

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS
Departamento de Arquitecturas de Computadores y Automática



**DISEÑO Y CONTROL REACTIVO DE ROBOTS
CAMINANTES SOBRE TERRENO NATURAL**

**MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR
PRESENTADA POR**

Samir Nabulsi Abussaid

Bajo la dirección del doctor
Manuel Ángel Armada Rodríguez

Madrid, 2009

• **ISBN: 978-84-692-0104-6**

©Samir Nabulsi Abussaid, 2008

Universidad Complutense de Madrid
Facultad de Ciencias Físicas

Departamento de Arquitectura de
Computadores y Automática



Diseño y Control Reactivo de Robots
Caminantes sobre Terreno Natural

Tesis Doctoral

Samir Nabulsi Abussaid

2007

Universidad Complutense de Madrid
Facultad de Ciencias Físicas

**Departamento de Arquitectura de
Computadores y Automática**



**Diseño y Control Reactivo de Robots
Caminantes sobre Terreno Natural**

Memoria presentada para optar al grado de Doctor

Autor:

Samir Nabulsi Abussaid

Ingeniero en Automática y Electrónica Industrial

Director:

Manuel Ángel Armada Rodríguez

Doctor en Ciencias Físicas

2007

A Virginia

Agradecimientos

Deseo expresar mi agradecimiento al Dr. D. Manuel A. Armada Rodríguez por su constante dedicación, paciencia y excelente dirección de esta Tesis, por haberme brindado la posibilidad de formar parte del grupo de trabajo del Departamento de Control Automático y de participar en el proyecto ROBOCLIMBER y en su continuación SAFERDRILL.

También deseo agradecer al Profesor Dr. D. Jesús Manuel de la Cruz por sus consejos y oportuna tutela ofrecidos en la Facultad de Ciencias Físicas de la Universidad Complutense de Madrid, agradecimiento que en su persona deseo hacer extensivo a todo el personal del Departamento de Arquitectura de Computadores y Automática por toda la ayuda ofrecida.

Mi más sincero agradecimiento al Dr. D. Salvador Ros Torrecillas, Director del Instituto de Automática Industrial del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (IAI - CSIC), por brindarme todos los medios humanos y materiales de este prestigioso centro de investigación, para la realización de esta Tesis Doctoral.

A todos mis compañeros del Departamento de Control Automático por su incondicional ayuda y su apoyo moral e intelectual. Al Dr. D. Pablo González de Santos, a la Dra. Dña. Elena García y al Dr. D. Joaquín Estremera por sus consejos en su amplio conocimiento de la robótica. Al Dr. D. José de No por sus aportaciones para mejorar la calidad de esta memoria. Al Dr. D. Theodore Akinfiyev por compartir sus amplios conocimientos en los sistemas mecánicos. En especial, a D. Manuel Prieto por su constante disponibilidad en compartir sus conocimientos. A D. Roberto Ponticelli por su colaboración en la implementación de sistemas electrónicos en Roboclimber y a D. Javier Sarria por su constante apoyo en cualquier circunstancia. Y a todos mis demás compañeros por su gran amistad y su cordialidad al compartir nuestras experiencias en el departamento.

Quisiera también agradecer, de la Universidad Tecnológica de Panamá, al Dr. D. Héctor Montes por su constante disponibilidad en compartir sus conocimientos, iniciar el estudio de fuerzas en Roboclimber y su ayuda en la acentuación de la disposición de esta memoria. También al Dr. D. Rony Caballero por sus aportaciones en el campo de la adquisición digital de datos.

A los integrantes del Taller Mecánico del Instituto de Automática Industrial, y en especial a D. Francisco Rueda y a D. Juan Carlos Regueiro por su gran colaboración y esfuerzo en la fabricación de Roboclimber.

A D. Félix Martín, Director de MACLYSA por su colaboración y participación en los proyectos ROBOCLIMBER y SAFERDRILL.

De manera muy especial a Virginia, mi esposa, por todo su apoyo emocional, su paciencia y por su imprescindible ayuda en el logro de mis objetivos, y a mi familia por su esfuerzo y gran apoyo al darme la oportunidad de realizar esta experiencia.

A ROBOCLIMBER “*Development of a tele-operated climbing robot for slope consolidation and landslide monitoring*”, un proyecto financiado por la Comisión Europea bajo el Contrato N°: G1ST-CT-2002-50160. En este consorcio participan: ICOP S.p.a, Space Applications Services (SAS), Otto Natter Prazisionenmechanik GmbH, Comacchio SRL, Te.Ve. Sas di Zannini Roberto & Co. (TEVE), MACLYSA, D’Appolonia S.p.a, University of Genova - PMAR Laboratory, y el IAI-CSIC.

A SAFERDRILL “*A remotely controlled autonomous walking and climbing robot for faster and safer landslide monitoring, slope stability analysis and consolidation*”, un proyecto financiado por la Comisión Europea bajo el Contrato N°: COOP-CT-2005-016842. En este consorcio participan: ICOP S.p.a., Space Applications Services (SAS), IMC Zlin a.s., Comacchio SRL, Zannini Roberto, MACLYSA, D’Appolonia S.p.a., Universidad de Genova - PMAR Laboratory, y el IAI-CSIC.

Y por último a la red financiada por la Comisión Europea CLAWAR *Thematic Network*, que ha sido de gran ayuda para todas las actividades en el área de los robots caminantes y escaladores.

Resumen

En las últimas décadas se ha constatado el creciente interés que presentan los robots caminantes, tanto desde el punto de vista de la investigación básica como de sus potenciales aplicaciones. Una de las principales características de los robots equipados con patas es su capacidad para poder desplazarse sobre una amplia variedad de terrenos no estructurados. Esta particularidad los hace muy atractivos e interesantes para su aplicación práctica como robots de servicios en los que se requiere la locomoción sobre terreno natural, el cual se caracteriza por presentar superficies irregulares, diversos tipos de obstáculos y distintas pendientes.

Sin embargo, el caminar sobre terreno natural implica que tanto la geometría como las propiedades físicas de los elementos que rodean al robot son desconocidas y muy variables, por lo que es necesario dotar al robot de un sistema de control que adapte su comportamiento con respecto al entorno. Si bien el modelo del robot puede ser conocido con precisión razonable, resulta difícil obtener una descripción detallada del entorno, especialmente en lo que respecta a sus propiedades físicas. Por ello, se hace imprescindible el empleo de distintos sistemas que proporcionen información acerca de la interacción dinámica entre el robot y los elementos que le rodean. Dicha información deberá ser introducida de forma adecuada en el sistema de control.

En esta tesis se aborda el problema de la locomoción sobre terreno natural de robots caminantes, y se proponen diversas soluciones para el control de la interacción robot-entorno basadas en arquitecturas de control reactivo. Para la realización de la tesis se ha elegido como plataforma experimental el robot Roboclimber, que es un robot cuadrúpedo, caminante y escalador, de grandes dimensiones, capaz de llevar consigo una carga muy elevada de equipo especializado para la consolidación de laderas de

montañas rocosas. Partiendo del diseño, realización y modelado del robot y de su sistema de actuación servo-hidráulico, y definida su arquitectura de control, se investigan diversas alternativas para la obtención de las fuerzas de reacción robot-entorno, bien de forma indirecta empleando sensores de ultrasonidos, bien de forma directa mediante el empleo de sensores de presión localizados en los actuadores hidráulicos. Dado el elevado número de señales presentes y de la presencia de ruido en las medidas, se toman en consideración diversas técnicas de filtrado. Por otro lado, la generación de modos de locomoción estables sobre terreno natural es un problema complejo que requiere regular la interacción dinámica robot-entorno. Por esta razón se investigan diversas estrategias de control reactivo para locomoción sobre terreno natural, que van desde el control acomodaticio hasta el control de impedancia.

Tanto para la implementación de las estrategias de control reactivo en tiempo real como para su evaluación experimental se ha empleado como plataforma a Roboclimber, con el que se han realizado pruebas exhaustivas y multitud de experimentos. Esta fase de experimentación ha servido también para evaluar la funcionalidad del robot en distintos tipos de situaciones con las que se va a tener que enfrentar habitualmente un robot de servicios que tiene que trabajar en ambientes y condiciones naturales, lo que significa, en la práctica, condiciones muy exigentes y de un grado de dificultad elevado. Aunque se haya empleado Roboclimber como plataforma de experimentación, muchos de los resultados obtenidos son de aplicabilidad, en general, al problema del control de robots caminantes sobre terreno natural.

Índice general

Índice de figuras	xv
Índice de tablas	xxiii
1. Introducción	1
1.1. Introducción a los robots con patas	1
1.2. Locomoción sobre terreno natural	3
1.3. Características de los robots caminantes	6
1.3.1. Robots caminantes	8
1.3.2. Locomoción híbrida	13
1.4. Características de los robots escaladores	14
1.4.1. Robots escaladores con sistema de soporte propio . . .	17
1.4.2. Robots escaladores asistidos por métodos de sujeción externos	22
1.5. Principales arquitecturas de control de fuerza	26
1.5.1. Control de rigidez	26
1.5.2. Control de amortiguamiento	27
1.5.3. Control de impedancia	27
1.5.4. Control paralelo fuerza/posición	29
1.6. Objetivos, metodología y estructura de la memoria	31
2. Diseño mecánico, sistema servo-hidráulico y arquitectura de control de Roboclimber	35
2.1. Diseño del sistema mecánico	39
2.1.1. Estructura mecánica	39
2.1.2. Configuración mecánica de las patas	40
2.1.3. Análisis cinemático	47

2.1.4.	Sistema de sujeción	50
2.2.	Sistema servo-hidráulico	52
2.2.1.	Grupo hidráulico o fuente de alimentación hidráulica	55
2.2.2.	Válvulas	57
2.2.3.	Cilindros hidráulicos	58
2.2.4.	Válvula de doble retención pilotada	60
2.2.5.	Diseño del sistema hidráulico de Roboclimber	61
2.2.6.	Modelo del sistema servo-hidráulico	65
2.2.7.	Modelo linealizado	70
2.3.	Arquitectura de control de Roboclimber	73
2.3.1.	Diseño de la estructura básica de control	73
2.3.2.	Jerarquías de la arquitectura de control	76
2.3.2.1.	Control básico	78
2.3.2.2.	Control cinemático	79
2.3.2.3.	Generador de movimientos	80
2.3.2.4.	Tareas compuestas	81
3.	Percepción de las fuerzas de reacción en robots caminantes	85
3.1.	Sistema de detección del suelo, diseño de los pies y corrección del error de posición en la detección	89
3.2.	Medición de fuerzas en función de la deformación mecánica de elementos estructurales	95
3.3.	Medición de fuerzas según la presión hidráulica	103
3.3.1.	Medición de fuerza empleando la presión hidráulica	103
3.3.2.	Análisis de la fricción en los actuadores hidráulicos.	108
3.3.2.1.	Modelo de la fricción en una cámara	110
3.3.2.2.	Fuerza de la presión diferencial	114
3.3.2.3.	Modelo de fricción de la articulación horizontal.	118
3.3.3.	Filtro de Kalman discreto modificado	123
3.4.	Medida indirecta del entorno usando sensores ultrasónicos	129
4.	Generación de modos de locomoción	133
4.1.	Modos de caminar	134
4.1.1.	El problema de la estabilidad	135
4.1.2.	Criterio de estabilidad estática	136
4.1.3.	Criterio de estabilidad dinámica	138

4.1.4.	Modos de caminar periódicos y aperiódicos	141
4.1.5.	Modo de caminar discontinuo	142
4.1.6.	Modo de caminar continuo	146
4.1.7.	Modos de cambio de dirección o de trayectoria	149
4.2.	Modo de escalar	154
4.2.1.	Análisis del modo de escalar	156
4.2.2.	Modo de escalar de una fase	157
5.	Diseño y evaluación experimental de estrategias de control reactivo para locomoción sobre terreno natural	163
5.1.	Adaptación activa mediante la medida indirecta del entorno	167
5.1.1.	Control acomodaticio de la velocidad vertical del cuerpo del robot	169
5.1.2.	Control reactivo simultáneo de la velocidad vertical /horizontal del cuerpo del robot	173
5.1.3.	Control reactivo de la velocidad horizontal del robot en un modo de caminar continuo	177
5.2.	Adaptación activa mediante el control de la interacción dinámica del robot con el entorno	182
5.2.1.	Controlador de impedancia	183
5.2.2.	Controlador paralelo fuerza/posición	184
5.2.3.	Consideraciones acerca del ZMP	185
5.2.4.	Control de la postura.	187
5.3.	Adaptación activa de los modos de caminar	200
5.3.1.	Análisis de las fuerzas de reacción en el modo de caminar discontinuo de dos fases	201
5.3.2.	Control de impedancia en cada pata en un modo de caminar discontinuo	201
5.3.3.	Control de impedancia en la pata contrapuesta a la de transferencia en un modo de caminar discontinuo	207
5.3.4.	Análisis de las fuerzas de reacción en el modo de caminar continuo	210
5.3.5.	Control de impedancia en cada pata en un modo de caminar continuo	213
5.3.6.	Control de impedancia en la pata contrapuesta a la de transferencia en un modo de caminar continuo	216
5.4.	Adaptación activa en la dirección del movimiento del robot	220

5.4.1. Control de impedancia en una articulación de rotación	221
5.4.2. Control de fuerza/posición en una articulación de rotación.	225
5.4.3. Control de fuerza/posición en el cuerpo del robot . . .	227
6. Principales aportaciones, conclusiones y líneas de investigación futuras	231
6.1. Principales aportaciones	231
6.2. Conclusiones	234
6.3. Líneas de investigación futuras	235
A. Características técnicas de Roboclimber	239
B. Componentes del control básico	241
B.1. Unidad de control central y sistema operativo	241
B.2. Tarjetas de control locales	243
B.3. Sensores de posición	244
B.4. Amplificación de potencia	246
C. Sistema de comunicación remota	247
C.1. Arquitectura cliente-servidor	247
C.2. Protocolo de comandos	248
C.2.1. Comunicación de Cliente a Servidor	249
C.2.2. Comunicación de Servidor a Cliente	251
C.2.3. Unidad de Control Remota (UCR)	253
D. Proceso de perforación	257
Referencias	263

Índice de figuras

1.1. The Adaptive Suspension Vehicle (The Ohio State University, 1985).	9
1.2. Ambler (Carnegie Mellon University, 1993).	10
1.3. Robot Caminante Silo4 (IAI-CSIC, 2000).	11
1.4. MECANT, robot hidráulico de seis patas (Universidad Técnica de Helsinki 1994).	12
1.5. BigDog (Boston Dynamics, 2005).	13
1.6. Tracminer. a) Prototipo y b) Concepto (IAI- CSIC, 1997).	14
1.7. El robot de servicios WorkPartner (Universidad Técnica de Helsinki, 2005).	15
1.8. Robot híbrido Wheeleg en la ladera del volcán Etna (2003).	15
1.9. Esquema de fuerzas de locomoción. (a) Robots caminantes y (b) Robots escaladores.	16
1.10. Robug II (University of Portsmouth, 1991).	18
1.11. Ninja I (Instituto Tecnológico de Tokio, 1994).	19
1.12. (a) REST (IAI-CSIC, 1998) y (b) REST2 (IAI-CSIC, 2000).	20
1.13. Lemur IIb (Stanford University, 2005).	22
1.14. Titan VII (Tokyo Institute of Technology, 1997).	23
1.15. Dante II (Carnegie Mellon University, 1994).	24
1.16. SRR (Jet Propulsion Laboratory, 2001).	25
1.17. Esquema básico de control de impedancia.	28
1.18. Esquema básico de control híbrido fuerza/posición.	29
1.19. Organización de la memoria.	34
2.1. Labores actuales de consolidación en laderas de montañas. (a) Estudio geológico y (b) Vehículos con brazos articulados.	36
2.2. Roboclimber.	38

2.3. Estructura de Roboclimber. (a) Vista superior, (b) Vista lateral, y (c) Imagen completa.	40
2.4. Disposición de las patas. a) Frontal y b) Sagital.	41
2.5. Geometría de las patas. a) Mamífero, b) Insecto y c) Reptil.	42
2.6. Estabilizadores de un sistema de perforación comercial (Comacchio s.r.l., 2005).	44
2.7. Estructura completa de Roboclimber y detalle de una pata.	45
2.8. Volumen de trabajo. a) Vista superior y b) Vista lateral.	46
2.9. Esquema cinemático de una pata.	47
2.10. Tirfor, sistema de sujeción de Roboclimber.	51
2.11. Combinación válvula-cilindro con fuente de alimentación hidráulica.	53
2.12. Subsistemas de los servo-sistemas hidráulicos con sus interconexiones.	54
2.13. Componentes del sistema hidráulico.	56
2.14. Válvula proporcional (ARON S.P.A.).	58
2.15. Cilindro hidráulico de doble efecto.	59
2.16. Válvula de retención doble pilotada. (a) Imagen real y (b) Esquema.	60
2.17. Esquema hidráulico de una pata.	62
2.18. Diagrama de control básico para el control de actuadores.	74
2.19. Esquema completo de control básico de movimientos.	75
2.20. Arquitectura de control global de Roboclimber.	77
2.21. Estructura de la Unidad de Control Remota.	82
2.22. Control del robot a través de Internet (Izquierda operador remoto en los laboratorios del IAI-CSIC (Arganda del Rey) y derecha imagen del robot situado realmente en las instalaciones de Commachio (Italia)	83
3.1. Intento de vuelco del robot durante un modo de caminar continuo.	88
3.2. Sistema de detección del suelo.	90
3.3. Tipos de pies. a) Soporte simple, b) Cónico y c) Con apoyo en triángulo.	91
3.4. Modo de caminar discontinuo con corrección de errores para la detección del suelo.	92

3.5. Modo de caminar discontinuo con corrección de errores para la detección del suelo.	94
3.6. Esquema de las fuerzas que actúan sobre la estructura vertical de una pata.	96
3.7. Análisis por elementos finitos en la estructura vertical de una pata.	97
3.8. Esquema de un puente de Wheatstone formado por galgas.	98
3.9. Instalación de las galgas en la barra del pie y en la estructura superior de la articulación vertical de Roboclimber.	99
3.10. Resultados de la calibración de los diferentes sensores de fuerza.	101
3.11. Centro de gravedad medido en Roboclimber.	102
3.12. Regresión lineal para la calibración de los sensores de la cámara A de los cilindros hidráulicos.	105
3.13. Medición de las fuerzas de soporte en las articulaciones verticales.	107
3.14. Medición de la fuerza dinámica en la cámara A de un cilindro hidráulico.	109
3.15. Modelo de fricción con respecto a la velocidad (curva de Stribeck).	112
3.16. Verificación del modelo de fricción.	113
3.17. Instalación de los sensores de presión para una articulación vertical.	115
3.18. Fuerza de presión diferencial del cilindro.	116
3.19. Modelo de fricción para la fuerza de presión diferencial.	117
3.20. Verificación del modelo de fricción para la fuerza de presión diferencial.	118
3.21. Montaje de la articulación horizontal.	119
3.22. Diferencias entre las velocidades de rotación y del cilindro con respecto a la posición de la articulación.	120
3.23. Fuerza de fricción medida y aproximación de la función de Stribek.	121
3.24. Comparación de los distintos modelos de fuerza.	122
3.25. Ejemplo de señales de fuerza y sus efectos: Señal de fuerza diferencial F_p y otros efectos adicionales del sistema hidráulico.	124
3.26. Algoritmo de evaluación mediante un filtro de Kalman modificado.	127

3.27. Comportamiento del filtro de Kalman sobre una señal de fuerza con distintos valores de Q y R	128
3.28. Comparación del filtro de Kalman. (a) Sin control de la innovación y (b) Con control de la innovación.	129
3.29. Roboclimber sobre superficies y suelos irregulares.	130
3.30. Sensor ultrasónico. (a) Instalación y (b) Rango de la señal ultrasónica.	131
4.1. Criterios de estabilidad estática de un robot caminante.	137
4.2. Criterios dinámicos. (a) Fuerzas actuando en un robot y (b) El robot alrededor de un eje de vuelco.	140
4.3. Modo de caminar discontinuo de dos fases.	144
4.4. Posición de las articulaciones de Roboclimber en un modo de caminar discontinuo de dos fases.	146
4.5. Comparación entre el MEL del modo de caminar continuo y el discontinuo.	149
4.6. Posición de las articulaciones de Roboclimber en un modo de caminar continuo.	150
4.7. Modo de locomoción de rotación.	151
4.8. Posición de las articulaciones de Roboclimber en un movimiento de rotación.	152
4.9. Modo de locomoción lateral.	153
4.10. Posición de las articulaciones de Roboclimber en un movimiento lateral.	154
4.11. Ejemplo de adaptabilidad en superficies inclinadas. (a) Estable y (b) Inestable.	155
4.12. Momentos generados en superficies inclinadas.	156
4.13. Modo de locomoción de escalar de una fase.	157
4.14. Simulación de los movimientos de Roboclimber en un modo de escalar.	159
4.15. Secuencia del modo de escalar de una fase de Roboclimber.	160
5.1. Roboclimber durante un modo de caminar en exteriores. a) Terreno irregular y blando, b) Superación del obstáculo y c) Terreno plano y suelo rígido	168
5.2. Esquema de control de la velocidad vertical del cuerpo del robot con detección de la superficie.	170

5.3. Secuencia del control de movimiento vertical del cuerpo del robot al desplazarse horizontalmente sobre una superficie escalonada.	171
5.4. Posición y comportamiento del cuerpo con respecto al suelo.	172
5.5. Esquema de control de velocidad vertical/horizontal del cuerpo del robot sobre objetos en el suelo y con obstáculos frontales.	174
5.6. Secuencia del movimiento del cuerpo del robot sobre una superficie con irregularidades y con un obstáculo frontal. . .	175
5.7. Desplazamiento y comportamiento del cuerpo del robot con control de velocidad vertical/horizontal.	176
5.8. Esquema del control indirecto de fuerza para acomodar la velocidad del modo de caminar continuo del robot en presencia de obstáculos frontales.	178
5.9. Secuencia de un modo de caminar continuo con control de obstáculos frontales.	179
5.10. Desplazamiento y velocidad del robot en un modo de caminar continuo con control de obstáculos frontales.	180
5.11. Concepto del conjunto de sensores ultrasónicos para Roboclimber.	181
5.12. Diagrama de control de impedancia con realimentación de fuerza.	184
5.13. Diagrama de control paralelo fuerza/posición.	185
5.14. Fuerza de las articulaciones verticales con control de impedancia.	188
5.15. Fuerza total medida y filtrada.	189
5.16. Posiciones de las articulaciones verticales con control de impedancia y filtro de primer orden.	191
5.17. Comportamiento del control de impedancia de la velocidad de las articulaciones con respecto a la posición q_i y a la fuerza F_{mi} con filtro de primer orden.	192
5.18. Cambio de estabilidad entre conjuntos de patas contrapuestas.	193
5.19. Comportamiento de la articulación vertical de la Pata 1 con una carga adicional sobre el robot.	194
5.20. Efecto del control de impedancia en la velocidad de las articulaciones con respecto a la posición q_i y a la fuerza F_{mi} con filtro de Kalman.	196

5.21. Fuerza en las articulaciones con control de impedancia, KBF y umbral e_{max}	198
5.22. Posición de las articulaciones con control KBF y umbral e_{max}	199
5.23. Comportamiento de la fuerza en un modo de caminar discontinuo de dos fases.	202
5.24. Posición del ZMP en el robot en un modo de caminar discontinuo de dos fases.	203
5.25. Comportamiento de la posición en un modo de caminar discontinuo de dos fases con control de impedancia en las cuatro patas.	205
5.26. Posición del ZMP en el robot en un modo de caminar discontinuo de dos fases con control de impedancia en las cuatro patas.	206
5.27. Comportamiento de la posición en un modo de caminar discontinuo de dos fases con control de impedancia en la pata contrapuesta.	208
5.28. Posición del ZMP en el robot en un modo de caminar discontinuo de dos fases con control de impedancia en la pata contrapuesta a la pata en transferencia.	209
5.29. Posición del ZMP en el robot en un modo de caminar continuo.	211
5.30. Comportamiento de la fuerza en un modo de caminar continuo.	212
5.31. Comportamiento de la posición en un modo de caminar continuo con control de impedancia para cada pata.	214
5.32. Posición del ZMP en el robot en un modo de caminar continuo con control de impedancia para cada pata.	215
5.33. Comportamiento de la posición en un modo de caminar continuo con control de impedancia en la pata contrapuesta.	217
5.34. Posición del ZMP en el robot en un modo de caminar continuo con control de impedancia en la pata contrapuesta.	218
5.35. Fase de transferencia de la pata 3 con control de impedancia en la pata contrapuesta.	220
5.36. Control de impedancia en una articulación de rotación.	223
5.37. Control de impedancia en una articulación de rotación con $F_{di} > 0$	224
5.38. Control de fuerza/posición en una articulación de rotación.	226
5.39. Experimento de control fuerza/posición sobre el cuerpo del robot.	228

5.40. Control de fuerza/posición en el cuerpo del robot.	229
B.1. Esquema de la tarjeta de control CM4.	244
B.2. Instalación de encoders en Roboclimber. (a) Articulación de rotación (BEI Ideacod DH05) y (b) Articulación prismática BEI Ideacod CD050.	245
C.1. UCR. (a) Abierto, (b) Cerrado, (c) HMI y (d) Mandos . . .	254
D.1. Sistema completo de perforación de Roboclimber.	258
D.2. Tareas básicas de perforación.	259
D.3. Roboclimber en proceso de perforación.	260

Índice de tablas

2.1. Características de soluciones diferentes al problema de consolidación de laderas de montañas.	37
2.2. Propiedades de las patas según su geometría.	43
2.3. Parámetros de los eslabones y articulaciones de una pata. . .	48
2.4. Elementos del esquema hidráulico.	63
2.5. Funciones del nivel de control básico.	78
2.6. Funciones del nivel de control cinemático.	79
2.7. Funciones del nivel de generación de movimientos.	80
3.1. Tabla de corrección del error de posición en la detección del suelo.	91
3.2. Tabla de especificaciones según el fabricante del sensor de presión GEMS 2200.	104
3.3. Tabla de valores obtenidos por la regresión lineal durante la calibración.	106
3.4. Tabla de parámetros del modelo de fricción de la cámara A.	112
3.5. Tabla de parámetros del modelo de fricción de la fuerza de presión diferencial en la articulación vertical.	117
3.6. Tabla de parámetros del modelo de fricción de la fuerza de presión diferencial con respecto a la velocidad de rotación.	123
3.7. Tabla de parámetros del modelo de fricción de la fuerza de presión diferencial con respecto a la velocidad del cilindro.	123
3.8. Parámetros del filtro de Kalman.	129
5.1. Parámetros del controlador de velocidad horizontal para el cuerpo del robot.	170
5.2. Parámetros del controlador de velocidad vertical/horizontal para el cuerpo del robot.	173

5.3. Parámetros del controlador de velocidad vertical/horizontal para el cuerpo del robot.	177
5.4. Parámetros del controlador de impedancia y del filtro de primer orden.	189
5.5. Parámetros del controlador de impedancia y del filtro de Kalman.	195
5.6. Parámetros del controlador de impedancia y del filtro de Kalman.	195
5.7. Parámetros del controlador de impedancia y del KBF y umbral e_{max_i}	197
5.8. Parámetros del controlador de impedancia en un modo de caminar discontinuo de dos fases con control de impedancia para cada pata.	204
5.9. Parámetros del controlador de impedancia en un modo de caminar discontinuo de dos fases con control en la pata contrapuesta.	207
5.10. Parámetros del controlador de impedancia en un modo de caminar continuo con control de impedancia para cada pata.	216
5.11. Parámetros del controlador de impedancia en un modo de caminar continuo con control en la pata contrapuesta.	219
5.12. Parámetros del controlador de impedancia en una articulación de rotación.	222
5.13. Parámetros del controlador de impedancia en una articulación de rotación con $F_{di} > 0$	225
5.14. Parámetros del controlador en paralelo fuerza/posición para el control del cuerpo.	228
A.1. Características técnicas de la estructura mecánica básica de Roboclimber.	239
A.2. Características técnicas del sistema de potencia para el modo autónomo.	239
A.3. Características técnicas del sistema de control de locomoción y de perforación.	240
C.1. Comandos de control del Cliente al Servidor.	250
C.2. Comandos de control del Servidor al Cliente.	252

Capítulo 1

Introducción

1.1. Introducción a los robots con patas

El creciente interés en el ámbito internacional por investigar acerca de los robots que emplean patas para su desplazamiento viene motivado tanto por su complejidad inherente, lo que supone un importante reto científico, como por sus potenciales aplicaciones (Armada 2000)(Armada y González de Santos 1997)(Collie 1992)(González de Santos et al. 1994)(González de Santos et al. 1997).

Específicamente los robots con patas nacen a raíz de la necesidad de disponer de vehículos capaces de acceder y de desplazarse de forma segura sobre terrenos naturales o no estructurados, a los que los vehículos con los sistemas tradicionales de desplazamiento, como las ruedas o las orugas, son incapaces de acceder, o, si lo hacen, se desplazan sobre ellos con muy baja eficiencia. La principal ventaja que ofrecen los robots caminantes con respecto a vehículos tradicionales es la gran movilidad que aquellos aportan mediante el movimiento de sus patas resultando en apoyos discretos sobre el terreno (Estremera 2003)(Jiménez 1994)(García 2002)(Vargas 1994)(González de Santos et al. 2006).

Como consecuencia, otra ventaja que ofrecen estas máquinas es su omnidireccionalidad, que es su capacidad para avanzar en cualquier dirección independientemente de la orientación del cuerpo. Los vehículos con orugas o con un sistema diferencial son capaces de realizar giros de radios nulos pero, al igual que los vehículos con ruedas directrices, necesitan orientar su eje longitudinal en la dirección (González de Santos

y Jiménez 1995) y en la orientación del avance antes de comenzar el desplazamiento del cuerpo en esa dirección, y la orientación del cuerpo está también determinada por la dirección del desplazamiento. La movilidad de las máquinas caminantes no sólo se refleja en sus desplazamientos por el terreno, sino que además aporta seis grados de libertad al cuerpo del vehículo, disponibles para la orientación y posicionamiento de herramientas, sensores, manipuladores, etc.

Así pues, entre las ventajas potenciales que ofrecen los robots caminantes para desplazarse sobre terreno irregular se encuentran: gran movilidad, buen aislamiento de las irregularidades del terreno, sobrepasar obstáculos y evitar brechas en el terreno, bajo impacto ambiental y buena eficiencia energética. El consumo energético es un aspecto capital para aplicaciones que demanden gran autonomía. Diversos estudios e investigaciones han demostrado que la locomoción con patas requiere un menor consumo energético que cualquier otra clase de locomoción (Bekker 1960). Asimismo se han estudiado diversos sistemas, como la pata pantográfica de Hirose (1984) o la disposición de las seis patas del Ambler que permiten un desacoplo gravitacional cuando el cuerpo está nivelado (Bares y Whittaker 1989)(González de Santos et al. 1991)(Nagy 1991)(González de Santos et al. 1992).

En este sentido los robots caminantes y escaladores presentan unas características idóneas para la realización de los denominados robots de servicios, bien para uso doméstico, personal o profesional, y para la intervención en medios hostiles o peligrosos (Armada et al. 2003)(García et al. 2007). Entre los sectores en los que se han emprendido realizaciones de robots caminantes y escaladores para abordar aplicaciones específicas se encuentran: la construcción naval (González de Santos et al. 2000), la construcción de infraestructuras (Molfinio et al. 2005), y la detección de minas antipersona (González de Santos et al. 2005).

Otra de las aplicaciones de gran interés científico es el empleo de robots móviles para la exploración planetaria, incluyendo robots caminantes como el Ambler (Bares y Whittaker 1989). En este caso se requiere una gran movilidad para poder desplazarse por una gran variedad de terrenos, con un muy bajo consumo energético. A esto hay que añadir la necesidad de autonomía en el control para la realización de misiones de exploración y de toma de muestras. Diversos conceptos de movilidad tales como ruedas, orugas o patas, y configuraciones del chasis para vehículos de exploración planetaria han sido investigados en detalle y comparados entre sí, resultando

la locomoción con patas ventajosa en numerosas situaciones (Martin et al. 1994)(Genta y Amatia 2004).

Sin embargo, a pesar de las ventajas que ofrecen los robots móviles con patas, existen ciertas limitaciones que dificultan, actualmente, su empleo en diversas aplicaciones. Podemos citar: baja velocidad, configuración mecánica complicada, coste elevado, control más complejo que los vehículos con ruedas u orugas, capacidad de carga relativamente baja, necesidad de emplear simultáneamente y en tiempo real numerosos sensores, entre otras. Estas limitaciones implican que se debe realizar aún un importante esfuerzo de investigación, en el cual la experimentación juega un papel fundamental.

Entre las líneas de investigación que requieren mayor atención para lograr un avance cualitativo en la locomoción sobre terreno natural destacan el diseño del robot y su configuración, la percepción del entorno y el control de la interacción robot-entorno. En los siguientes apartados de este primer Capítulo de la memoria se plantean los requerimientos fundamentales de la locomoción sobre terreno natural, se hace una revisión de las principales características de los robots caminantes y escaladores, se introduce el problema de la percepción del entorno, y se presentan las principales arquitecturas de control de fuerza como base al control reactivo. Por último, para finalizar el Capítulo, se especifican los principales objetivos de la tesis, la metodología a seguir para alcanzar dichos objetivos, y la estructura de la memoria.

1.2. Locomoción sobre terreno natural

Como es bien conocido, cuando un vehículo con ruedas se desplaza por un terreno natural, una de los índices que sirven para medir su eficiencia es el coeficiente de tracción, que se define mediante la relación fuerza de arrastre/peso. La tracción proporcionada por ruedas y la compactación del suelo están íntimamente relacionadas. El problema de la eficiencia en la tracción de vehículos con ruedas en suelos de baja densidad ha sido ampliamente estudiada, así como la compactación producida por el tráfico de estos vehículos (Bekker 1960). La máxima fuerza de tracción creada por un vehículo con ruedas depende del tipo de suelo, del nivel de deslizamiento de la rueda y de otros factores de menos relevancia. Asimismo, el mecanismo de tracción empleando orugas y la compactación correspondiente del suelo,

que presenta características bien diferenciadas respecto a los vehículos con ruedas, también ha sido estudiado en detalle (Wong y Huang 2006).

Por otro lado, los sistemas con patas representan una alternativa a la tracción (Morrison 1968)(Manko 1990). Los mecanismos basados en patas han sido objeto de numerosos estudios, y los primeros diseños trataban de imitar los movimientos de algunos animales (Todd 1985). Posteriores desarrollos han dado lugar a configuraciones más realistas y sencillas (Jiménez et al. 1993). Una característica singular de los sistemas con patas es que proporcionan un mayor coeficiente de tracción, generalmente a costa de una mayor complejidad mecánica.

La locomoción de un robot con patas se basa en alternar las fases de apoyo y transferencia de las patas siguiendo un algoritmo determinado que se denomina modo de locomoción. Esto implica que las patas contactan (fase de apoyo) y se separan del suelo (fase de transferencia) a lo largo del ciclo de locomoción. Si el suelo es horizontal y rígido, es posible mediante control de posición obtener un movimiento aceptable. Si el suelo presenta irregularidades o pendientes no conocidas de antemano, el conseguir una locomoción aceptable se convierte en un problema cuya resolución implica, en el caso más sencillo de pequeñas irregularidades, el empleo de sensores de contacto en los pies y una modificación de las trayectorias de las patas. En el caso más general esto obliga, sobre todo en aplicaciones de alto valor añadido, a que la tarea deba ser planificada con precisión, lo que requiere a su vez un modelo preciso del robot (cinemática y dinámica) y del entorno (geometría y características mecánicas). Desafortunadamente, en la práctica, esto no es posible, lo que limita y dificulta el empleo de robots con patas en terreno irregular. Es pues necesario buscar otras soluciones a este problema.

Esta situación es similar al problema del montaje preciso de conjuntos de piezas empleando robots manipuladores, en el que cuando un robot portando una pieza en su mano debe, por ejemplo, insertarla en otra con una tolerancia muy pequeña, surgen fuerzas de interacción que dificultan la tarea y que obligan a adoptar estrategias de control específicas. Del mismo modo, cuando un robot caminante se desplaza sobre terreno irregular, surgen fuerzas de interacción en el contacto de los pies con el suelo. Para una locomoción estable la interacción robot-entorno debe de ser controlada de forma apropiada (Montes 2005). De este modo, para obtener las ventajas inherentes que pueden proporcionar los robots con patas de adaptarse a los

diferentes tipos de suelos por los que deben desplazarse, se han estudiado diversas alternativas para analizar y regular la interacción física entre el robot y el entorno.

Obviamente, el problema se complica cuando el entorno en el que se trabaja es natural; esto significa que la geometría y propiedades de los elementos que rodean al robot son imprevisibles, en cuyo caso es necesario investigar acerca de posibles estrategias de control que adapten el comportamiento del robot con respecto al entorno. Si bien el modelo del robot puede ser conocido con una precisión razonable, resulta difícil obtener una descripción detallada del entorno, particularmente si éste es natural. Se distinguen, de forma general, tres niveles de aproximación para abordar este problema.

Una primera aproximación consiste en utilizar diferentes técnicas para obtener la información acerca del entorno, y basándose en ellas analizar la situación y determinar la estrategia apropiada de interacción. Inicialmente empleadas para robots móviles, algunas de estas técnicas se basan en la percepción de los objetos u obstáculos que rodean el robot usando sensores de medida de distancia como cámaras, sensores láser o ultrasonidos, para después aplicar técnicas de evasión o de redirección del robot.

En segundo lugar, como ya se ha indicado, es necesario en muchos casos realizar una medición de las fuerzas de interacción entre el robot y su contacto con el entorno, puesto que al implementar un control de movimientos para un robot dentro de un ambiente no muy bien modelado o desconocido, pueden ocurrir errores en la trayectoria deseada debido a la presencia de fuerzas no contempladas en el contacto de las patas con el entorno. Estos errores se traducen normalmente en vibraciones indeseadas y en la inestabilidad del robot. Un primer método para controlar el contacto pata-suelo consiste en que el sistema de control emplee el error de posición como una medida indirecta de fuerza para reducir el efecto de la desviación causada por las fuerzas de contacto, y, debido a esto, la fuerza de contacto es controlada de forma acomodaticia para evitar saturar el actuador de la articulación, y, por lo tanto, para evitar una rotura de las partes involucradas en el contacto si hubiera suficiente potencia involucrada.

Este esquema de control indirecto de fuerza de los movimientos basado en control de posición puede ser mejorado de forma notable realizando un control directo de la interacción del robot con el entorno, para lo que se debe disponer de las mediciones explícitas de las fuerzas de contacto e

incorporarlas en un lazo de control. Para lograr este objetivo, una alternativa clásica es instalar un sensor de fuerza en el extremo del robot, cuyas mediciones deben ser proporcionadas a la unidad de control del mismo, para que éste realice un control de fuerza de forma que el robot interactúe con el entorno de la manera deseada.

Cada una de estas aproximaciones presenta sus ventajas e inconvenientes, tanto desde el punto de vista de sus prestaciones como desde el de su implementación. En esta memoria se investiga con detalle este problema y se proponen diversas soluciones al mismo.

1.3. Características de los robots caminantes

La capacidad que tienen los robots caminantes de adaptarse a los terrenos naturales o irregulares manteniendo un control preciso sobre la velocidad, la posición, y la orientación del cuerpo, es la característica que los hace imprescindibles para trabajar en ese tipo de entornos, además de un vehículo ideal para el transporte de herramientas, sensores y material científico. Esto es posible gracias a la capacidad de adaptación de las patas para realizar apoyos discretos sobre el terreno, conservando la capacidad de subir o bajar el cuerpo de manera controlada. De esta forma pueden sobrepasar o adaptarse a obstáculos sin necesidad de inclinar su cuerpo o, en situaciones extremas, poder inclinar el cuerpo de forma controlada para superar obstáculos mayores. Por el contrario, los vehículos con ruedas u orugas modifican la posición u orientación de su cuerpo siguiendo las irregularidades del terreno y necesitan para adaptarse a éste una suspensión que hace incontrolable su posición. Los vehículos con ruedas pueden sobrepasar sólo obstáculos con alturas inferiores al radio de la rueda, mientras que en el caso de vehículos con orugas, se considera que la altura máxima de los obstáculos que pueden sobrepasar es la mitad de la longitud de la oruga.

El principal problema de los robots caminantes es la estabilidad. Un robot caminante es estáticamente estable cuando las patas que lo apoyan sobre el suelo soportan la totalidad de su masa. Se puede analizar matemáticamente la estabilidad al crear un polígono imaginario generado al unir, por medio de líneas, los puntos de apoyo de las patas. Si la proyección vertical del centro de gravedad del robot sobre el suelo está dentro de ese

polígono de apoyo es que el robot está en equilibrio estático (González de Santos y Jiménez 1995).

La adaptación de los robots caminantes se logra mediante el control del contacto entre la pata y la superficie. Es posible hacer la detección del suelo mediante sensores de contacto, pero con ello no se logra conocer la distribución de las fuerzas de apoyo, aunque es suficiente para la locomoción en terrenos poco irregulares. También se puede controlar el robot midiendo las fuerzas en 1, 2 o en 3 ejes, en cuyo caso se pueden conocer las cargas ejercidas por cada una de las patas con el fin de evitar deslizamientos y distribuir adecuadamente el peso del vehículo. Las máquinas caminantes ofrecen un mayor rendimiento energético en locomoción sobre terrenos irregulares ya que el cuerpo, y por tanto la mayor parte de la masa del vehículo, se puede mantener a una altura constante, de manera que ésta no sube y baja modificando la energía potencial según los detalles del terreno. Por el contrario, los movimientos ascendentes y descendentes de las patas durante las transferencias y la realización de trabajos de signo negativo durante el avance del cuerpo en sistemas no desacoplados gravitacionalmente (Hirose 1984) empeora este buen rendimiento. La deformación continua que producen en el terreno los vehículos con ruedas es otra razón que hace que su eficiencia energética sea menor que la de los vehículos caminantes, que únicamente producen depresiones aisladas.

Estas características hacen que las velocidades alcanzadas por los robots caminantes en terrenos muy accidentados, aunque son muy bajas, superen a las velocidades alcanzadas por otros vehículos. Sin embargo, más importante que la velocidad desarrollada es su capacidad para desplazarse sin bloquearse por terrenos hasta ahora reservados a la locomoción humana o animal sin requerir de terrenos especialmente adaptados ni de disponer de costosas infraestructuras (carreteras, vías, etc.).

Las principales desventajas de estas máquinas residen en la complejidad de la mecánica y de la importante carga de cálculo necesaria para coordinar los movimientos, lo que ha hecho que no se hayan producido avances significativos hasta las últimas décadas.

En los últimos años las máquinas caminantes se han usado como medio para comprender los mecanismos que rigen la locomoción humana y animal, tanto desde el punto de vista de la biomecánica como del estudio del sistema neuronal de control. También se han empleado como base para

la investigación en aquellas ramas de la inteligencia artificial que buscan la imitación del comportamiento de animales simples, y que pretenden emular la inteligencia a través del movimiento y la interacción con el entorno. Fuera de los laboratorios, las ventajas que ofrecen las máquinas caminantes, tal y como han sido señaladas en el apartado anterior, las hacen idóneas para distintos tipos de aplicaciones.

Dependiendo de la finalidad de las diversas investigaciones en esta materia, se conocen diferentes mecanismos y estrategias para adaptar el uso de los robots con patas a, virtualmente, cualquier tipo de entorno. Para mostrar una perspectiva más amplia del estado del arte de los robots caminantes con distintos tipos de adaptación al terreno o a otras características del entorno, se presentan a continuación algunos de los robots que, destacando por su funcionalidad, se han tomado como base y referencia para la realización de esta tesis.

1.3.1. Robots caminantes

- ASV

El *Adaptive Suspension Vehicle* (ASV) (Song y Waldron 1989) es un robot hexápodo diseñado para la locomoción en terrenos no estructurados. Su fabricación fue completada en mayo de 1985 en *Ohio State University*, y fue realizado para investigar el potencial y la viabilidad de los robots con patas para el transporte por terrenos accidentados (ver Figura 1.1).

En las especificaciones del proyecto se incluyó el requerimiento de que se pudiera superar obstáculos de 1.7 m de longitud y vallas de 1.3 m de altura; que debería alcanzar una velocidad de 2.25 m/s y que fuera capaz de soportar una carga de 227 Kg .

Dentro de las numerosas contribuciones de este proyecto a la investigación en el campo de los robots con patas, una de las más importantes fue el de utilizar un robot de grandes dimensiones para evaluar el control y la adaptación de los modos de caminar en terrenos irregulares. Entre el control de todos los modos de caminar que se probaron en el ASV y el control del movimiento del cuerpo destaca un algoritmo que mantenía el cuerpo del robot a una distancia del



Figura 1.1: *The Adaptive Suspension Vehicle (The Ohio State University, 1985).*

suelo constante, dependiendo de la posición de las patas y/o de la información proporcionada por los sensores de supervisión del suelo.

- **Ambler**

El robot Ambler (Bares y Whittaker 1993), fue desarrollado en *Carnegie Mellon University* y financiado por la NASA para el desarrollo de vehículos de exploración espacial y concretamente para la exploración en Marte, en donde es posible encontrar terrenos de roca agrietada, fosas llenas de polvo o campos de rocas extensos. Dentro de las especificaciones del proyecto se incluía poder superar obstáculos superiores a 1 m y lograr caminar por superficies con inclinaciones de hasta 30° ; además debía ser capaz de almacenar una carga variada (herramientas, rocas, etc.) que ocupara un metro cúbico de espacio, soportar cargas de más de 200 Kg y de moverse a una velocidad de 1 m/min (ver Figura 1.2).

Estructuralmente, el Ambler está formado por seis patas con una configuración mecánica en la que la primera articulación es de rotación, seguida por dos articulaciones prismáticas. Este tipo de configuración puede denominarse ortogonal puesto que la articulación



Figura 1.2: *Ambler* (Carnegie Mellon University, 1993).

de apoyo es ortogonal al plano de la articulación de propulsión.

Dentro de las principales conclusiones del desarrollo del Ambler está la extensa aportación en modos de caminar circulares para la exploración autónoma de terrenos extremos, debido a su gran longitud de paso y a la configuración ortogonal de las patas, en la que se desacopla el control de la propulsión horizontal del apoyo vertical de las patas. Asimismo destaca el control de orientación del robot (González de Santos et al. 1991)(González de Santos et al. 1992).

■ SILO4

El robot caminante SILO4 (acrónimo de Sistema Locomotor de cuatro patas) (ver Figura 1.3) se desarrolló en el Departamento de Control Automático del Instituto de Automática Industrial (IAI-CSIC) con el fin de ofrecer una plataforma común de experimentación que permitiera el estudio comparativo de algoritmos y técnicas de control de robots caminantes (González de Santos et al. 2006). Se concibió para que dispusiera de buena omnidireccionalidad sacrificando, fundamentalmente, su velocidad. Está formado por un cuerpo de forma cuasi-cúbica y cuatro patas distribuidas en configuración circular. Esta distribución facilita la



Figura 1.3: Robot Caminante Silo4 (IAI-CSIC, 2000).

omnidireccionalidad por la distribución de los volúmenes de trabajo de las patas de configuración insecto, cada una con tres articulaciones rotatorias.

El peso total del SILO4 es de 30 Kg, puede soportar una carga adicional de 15 Kg, y es capaz de desplazarse a una velocidad de 1 m/min. Una de las principales aportaciones de las investigaciones realizadas con el robot es el desarrollo de estrategias de control para la estabilidad (González de Santos et al. 2005) basadas en la lectura de cada uno de los sensores triaxiales de fuerza que, instalados en cada una de las patas, miden la fuerza que ejerce el pie sobre el suelo en la dirección longitudinal del eslabón al que está unido, las dos fuerzas perpendiculares a ésta y los momentos ejercidos en cada una de las articulaciones de la pata (Estremera 2003)(García 2002)(Gálvez 2002).

■ MECANT

Otro ejemplo relevante de un robot de seis patas es MECANT (MEChanical ANT) (ver Figura 1.4). Las patas de MECANT consistían en un pantógrafo en 2D con un tercer eje de rotación

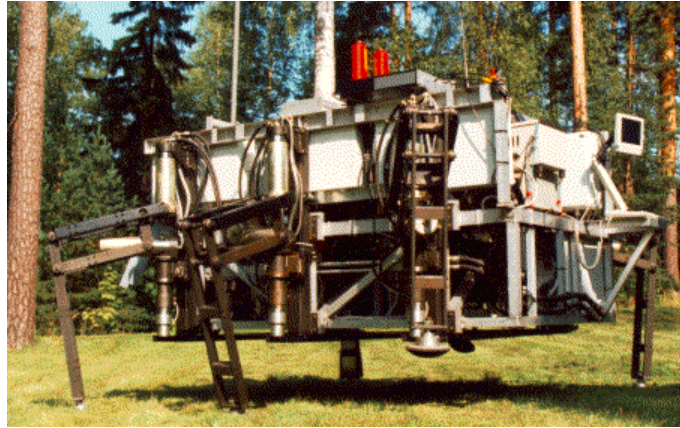


Figura 1.4: MECANT, robot hidráulico de seis patas (Universidad Técnica de Helsinki 1994).

alrededor de la vertical. Todos los grados de libertad eran actuados hidráulicamente y el robot fue realizado en la Universidad Técnica de Helsinki (Halme et al. 1994).

■ BigDog

El BigDog (ver Figura 1.5) es un robot cuadrúpedo que camina y corre sobre terrenos irregulares y en superficies con inclinaciones inferiores a 35° . Ha sido desarrollado por la empresa *Boston Dynamics* y financiado por la Agencia de Investigación de Proyectos Avanzados para la Defensa (DARPA).

Sus patas tienen tres grados de libertad de rotación pero con una configuración de mamífero e implementan sistemas de amortiguamiento para absorber los golpes y reciclar la energía generada en un paso, para aprovecharla en el siguiente (Boston Dynamics 2005). Su sistema de control modifica dinámicamente el comportamiento de la estabilidad para lograr que el robot se balancee, gire y se regule energéticamente dependiendo de las variaciones externas. Los actuadores son activados por la energía hidráulica generada por un motor de gasolina a bordo. La velocidad máxima alcanzada por este robot al correr es de 1.56 m/s y es capaz de soportar una carga adicional de hasta 54 Kg .

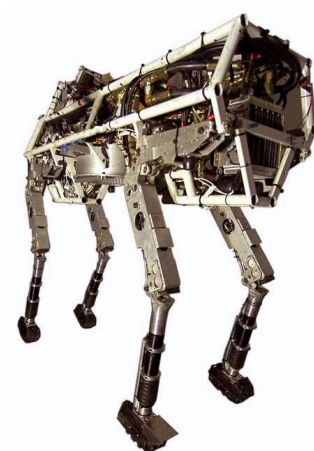


Figura 1.5: *BigDog* (Boston Dynamics, 2005).

1.3.2. Locomoción híbrida

Los principios fundamentales de locomoción, ruedas y patas, pueden combinarse en sistemas robóticos híbridos. El empleo de sistemas híbridos combinando ruedas y patas es una alternativa interesante, y supone una solución de compromiso en la cual la complejidad intrínseca de los sistemas con patas y las prestaciones de tracción de los sistemas con ruedas pueden ser mejoradas. Los sistemas de esta clase abandonan la idea de imitar la locomoción animal y operan siguiendo el principio de las patas giratorias. Un ejemplo importante de sistema híbrido lo tenemos en Tracminer (Maza et al. 1997)(Armada et al. 1997), cuya principal innovación es tratar de mejorar los sistemas de tracción con ruedas mediante la incorporación de un accesorio con patas situadas de forma apropiada. Como puede observarse en la Figura 1.6, el concepto de Tracminer emplea cuatro patas dispuestas de forma simétrica alrededor del centro de la rueda. Activando y desactivando las patas secuencialmente es posible ayudar a la rueda cuando las condiciones del suelo ofrecen poco agarre.

Otro ejemplo significativo es WorkPartner (ver Figura 1.7), un robot de servicios para tareas en exteriores que posee un sistema de locomoción híbrida que consiste en cuatro patas con ruedas y un cuerpo articulado (Halme et al. 2004). El sistema de locomoción de WorkPartner

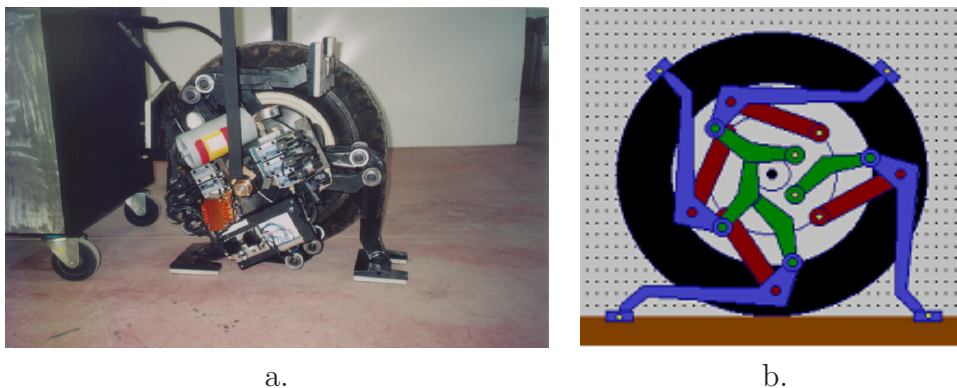


Figura 1.6: *Tracminer*. a) *Prototipo* y b) *Concepto* (IAI- CSIC, 1997).

permite el movimiento con patas solamente, con patas y ruedas actuadas simultáneamente, o con solo ruedas (Leppanen et al. 1998). Con la ayuda de un sistema de locomoción multimodo este robot puede desplazarse sobre diferentes tipos de terreno y negociar obstáculos de forma satisfactoria (Leppanen 2007). El tamaño de WorkPartner es adecuado para la cooperación con humanos. Su peso es de unos 270 *Kg.* y su sistema de actuación es eléctrico, basado en actuadores lineales de 250 *W.* Su sistema energético es híbrido y se basa en una combinación de un pequeño motor de explosión con un generador y baterías, siendo su tiempo de operación de 4 a 5 horas con un consumo de unos dos litros de gasolina.

Otro ejemplo de robots híbridos es Wheeleg, un robot realizado para analizar las posibilidades de esta configuración para desplazarse sobre terreno rocoso como por ejemplo en la exploración de volcanes (ver Figura 1.8) (Guccione y Muscato 2004).

1.4. Características de los robots escaladores

En los últimos años, diversos grupos de investigación han estado trabajando en el área de los robots escaladores (Armada et al. 1998)(Armada et al. 2003). Con respecto a los robots caminantes o a los vehículos con ruedas, en el diseño de los robots escaladores se deben tener en cuenta aspectos específicos en la generación de movimientos.



Figura 1.7: El robot de servicios WorkPartner (Universidad Técnica de Helsinki, 2005).



Figura 1.8: Robot híbrido Wheeleg en la ladera del volcán Etna (2003).

La interacción entre un robot móvil y la superficie que lo soporta está caracterizada por un conjunto de fuerzas que actúan sobre su cuerpo, lo que determina el comportamiento de la máquina. Así, desde el punto de vista de la locomoción, un robot móvil debe ejercer una fuerza en la dirección del movimiento; estas fuerzas son conocidas como fuerzas de propulsión (Hirose, Yoneda, y Tsukagoshi 1997)(Grieco et al. 1998). La fuerza de soporte actúa en contra de todas las fuerzas que tiendan a oprimir el robot contra la superficie de apoyo. Finalmente se tienen las fuerzas de agarre que generan la fricción necesaria para lograr la propulsión evitando que el robot sea

separado de la superficie por fuerzas externas. La aparición de estas fuerzas depende de las condiciones de operación del robot (véase Figura 1.9). En el caso de un robot caminante sobre terreno irregular o sobre superficies ligeramente inclinadas es común que las fuerzas de soporte se opongan a la gravedad y permitan de esta forma mantener la elevación del vehículo.

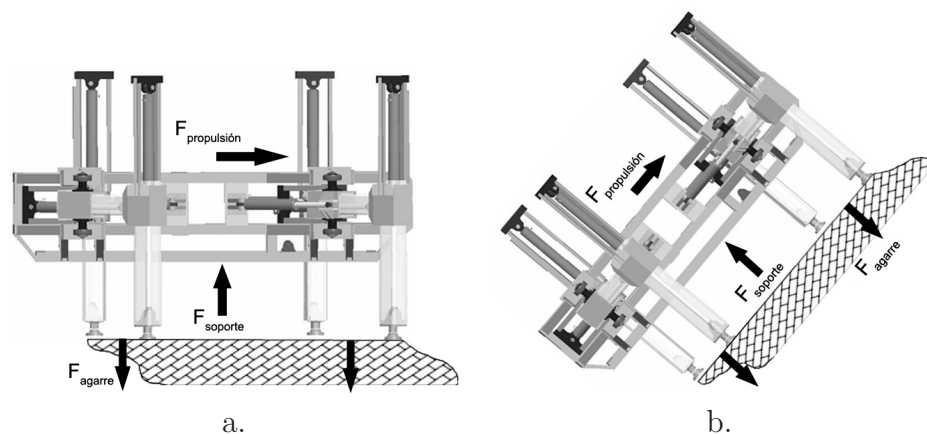


Figura 1.9: Esquema de fuerzas de locomoción. (a) Robots caminantes y (b) Robots escaladores.

No obstante, la gravedad influye de manera diferente sobre los robots escaladores, debiendo emplearse fuerzas de agarre que eviten el desprendimiento de la máquina. Para ello es necesario dotar a los robots escaladores de dispositivos especiales de sujeción que provean una fijación fiable y a la vez permitan obtener la movilidad requerida por el robot.

Las observaciones anteriores son extensibles al caso de que los robots móviles sean concebidos para operar en superficies verticales. Aún así, existen otras consideraciones asociadas con el escalado que deben ser analizadas. Mientras un robot escalador con patas emplea, por lo general, un único sistema de agarre que le proporciona tanto la sujeción como la propulsión del vehículo, su análogo con ruedas requiere, habitualmente, de un mecanismo distinto (a la rueda) que le mantenga unido a la superficie de escalado. Para llevar a cabo el avance del vehículo es necesario que las ruedas ejerzan presión sobre la superficie. Las fuerzas de reacción producto de este contacto se oponen a las fuerzas de agarre con lo cual disminuye la sustentación del vehículo.

Otro aspecto fundamental relacionado con la sustentación de un robot escalador es la fiabilidad de los puntos de sujeción. Una ventaja importante de los robots con patas es la distribución de dichos puntos en función de su número de patas. Esta distribución le proporciona al vehículo una mayor flexibilidad en el momento de elegir los puntos de apoyo. Si uno de los puntos de apoyo planificado no presenta la fiabilidad deseada, siempre es posible buscar algún otro, mientras el cuerpo es sustentado por las patas restantes; durante este proceso se puede cambiar la distribución de fuerzas en el vehículo a fin de repartir las cargas según el grado de confianza en los distintos apoyos. Los robots con ruedas no poseen tal flexibilidad por lo que generalmente es necesario cambiar la dirección de movimiento en busca de una superficie de apoyo adecuada.

Por eso es necesario dotar a los robots de dispositivos especiales de sujeción, ya sea en las patas o en el cuerpo, que le permitan primero, mantenerse en contacto con la superficie al escalar, y, segundo, moverse de manera confiable a lo largo de la misma. El mecanismo de agarre (o pie para los robots con patas) es quizá la parte más importante de un robot escalador. De sus características dependerá el comportamiento de la máquina, actuando directamente sobre la velocidad de escalado, limitando la capacidad de carga útil del robot, y restringiendo el área de aplicación.

En la literatura de robots escaladores se presentan distintos mecanismos de sujeción basados, principalmente, en ventosas de vacío, pies magnéticos u otros sistemas similares. Pero también se ha investigado sistemas de sujeción adicionales para los casos en los que el entorno no es estructurado. Algunos de estos trabajos serán descritos a continuación para mostrar una perspectiva general acerca del estado del arte en robots escaladores.

1.4.1. Robots escaladores con sistema de soporte propio

- **Robug II**

El Robug II es un robot diseñado para trabajar en edificios de difícil acceso, en donde se debe entrar primero caminando para poder después acceder a paredes verticales para realizar tareas de inspección. Es posible encontrar una situación como esta en los trabajos de mantenimiento de plantas químicas o en reactores nucleares.

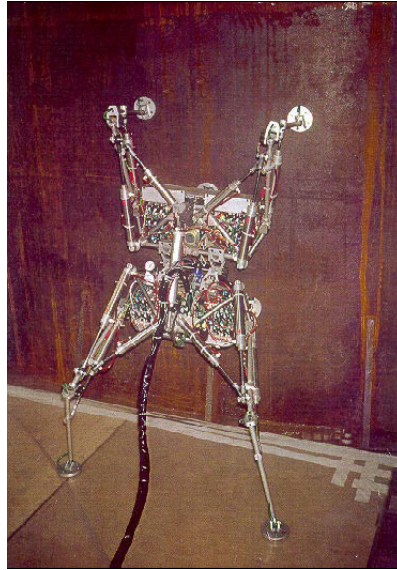


Figura 1.10: *Robug II* (University of Portsmouth, 1991).

Para resolver esto el Robug II (ver Figura 1.10), está fabricado a partir de dos módulos, cada uno de ellos tiene dos patas y cada pata tiene una ventosa de vacío para sujetarse a la pared. Los dos módulos están conectados por un pivote y un cilindro neumático para poder doblar el cuerpo. Esta propiedad mecánica incrementa la efectividad de maniobra especialmente para la transición necesaria al pasar de suelo a pared (Luk et al. 1991).

Cada una de las patas tiene tres grados de libertad de rotación con configuración de insecto y actuados por medio de cilindros neumáticos. Esta configuración es adecuada para sobrepasar obstáculos y para realizar los distintos movimientos para escalar y caminar.

Una de las principales aportaciones del desarrollo del Robug II es la configuración mecánica que incluye un grado de libertad adicional en el cuerpo, lo que aumenta su adaptabilidad a los cambios de inclinación.

- Ninja I

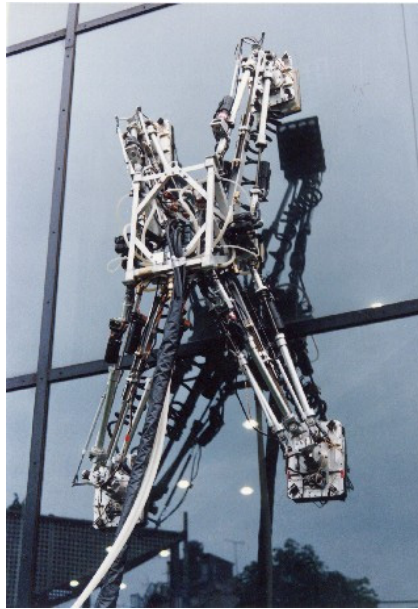


Figura 1.11: *Ninja I* (Instituto Tecnológico de Tokio, 1994).

El Ninja I (H-RL 2006) es un robot cuadrúpedo diseñado para la inspección y tareas de control en las fachadas de edificios singulares. En las patas lleva un sistema de ventosas que al generarse un efecto de vacío en ellas hacen que el robot se adhiera a los cristales de los edificios (ver Figura 1.11).

Los movimientos de las patas de este robot se realizan mediante la actuación de tres mecanismos prismáticos en paralelo. En lo posible, las patas deben estar orientadas en la dirección de la gravedad, mientras el control de movimientos necesita que se impliquen la mayor cantidad de articulaciones posibles (Akihiko y Hirose 1994) para poder mover el cuerpo. En los pies se ha instalado un sistema de ventosas que regula la presión según el estado del modo de escalar.

Una de las principales aportaciones del desarrollo del Ninja I es la generación de modos de escalar en paredes verticales, en este caso acristaladas, sin la ayuda de elementos de soporte externos.

■ REST y REST2

El REST (Grieco et al. 1998) (ver Figura 1.12a), realizado en el Departamento de Control Automático del IAI-CSIC, es un robot escalador hexápodo diseñado para realizar tareas de inspección y automatizar el proceso de soldadura de los cascos de grandes buques. La fuerza de agarre del REST es generada por medio de imanes permanentes equipados con una bobina para su desactivación, instalados en la base de sus pies para trasladarse por las paredes de acero de los cascos. Sus patas tienen una configuración tipo SCARA con las que es capaz de proporcionar mayor flexibilidad en sus movimientos de acuerdo con sus tareas.

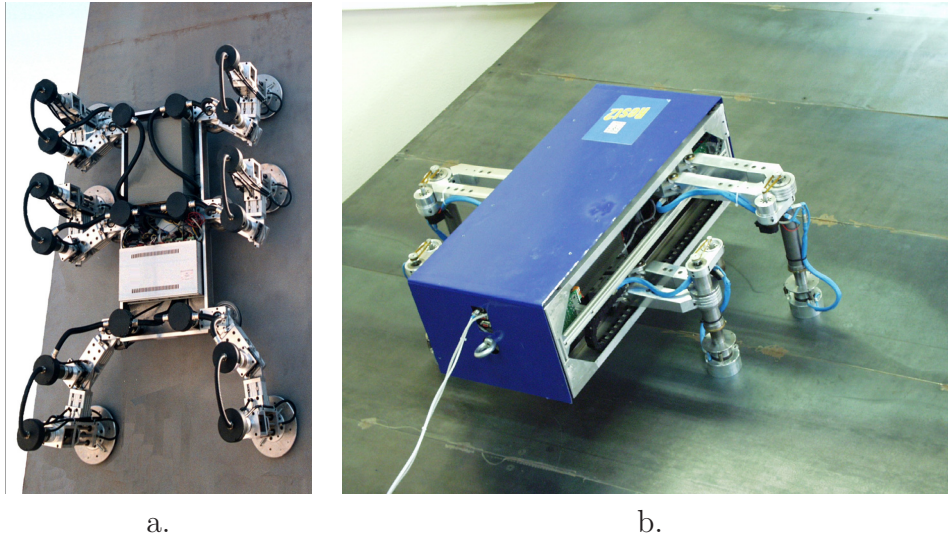


Figura 1.12: (a) REST (IAI-CSIC, 1998) y (b) REST2 (IAI-CSIC, 2000).

La principal aportación de esta investigación es que para el REST se ha realizado un modelo en el que se calcula en tiempo real la posición del apoyo de las patas durante el escalado, dependiendo de la capacidad del par que pueden generar sus articulaciones, por lo que es posible calcular desplazamientos energéticamente y con estabilidad óptima.

Su cuerpo está formado por una estructura de aluminio y sus

dimensiones son de 1100 mm de largo, 660 mm de ancho, una altura de 90 mm y un peso de 230 Kg , y además es capaz de soportar una carga adicional de 100 Kg

El REST2 (ver Figura 1.12b), diseñado como evolución del robot REST, es un robot escalador cuadrúpedo y que posee una estructura que es una mezcla entre robots deslizantes y robots con patas, puesto que cada una de las patas tiene 3 grados de libertad, las tres prismáticas, pero con la particularidad de tener en la primera articulación espacios de trabajo solapados (Prieto et al. 2000).

Esto significa que, en la configuración lateral de las patas y para el modo de escalar, es posible que la pata anterior de uno de los laterales realice el apoyo de la pata posterior mientras se mueve el cuerpo. La configuración de este robot es el resultado de un estudio basado en la disminución del consumo energético y en el aumento de velocidad y agilidad en los modos de escalar pudiendo que soportar una carga adicional de 15 Kg .

Dentro de las principales aportaciones del estudio del REST 2 se encuentra la forma en que realiza una secuencia de movimientos ondulatoria, con una configuración mecánica diseñada para optimizar el consumo energético mientras se aumenta la capacidad de trabajo.

■ Lemur IIb

El robot Lemur IIb (ver Figura 1.13) forma parte de una nueva tendencia en robots para realizar métodos de escalado libre y ha sido desarrollado por el grupo de investigación del *Jet Propulsion Laboratory* (NASA 2006) para la exploración planetaria. Este robot escala en paredes rocosas artificiales utilizando como soporte la fricción producida por las puntas de las patas. El objetivo es moverse por el terreno de manera natural similar a la de los humanos, el cual mueve primero un brazo de un apoyo a otro utilizando solo la fricción para mantener el equilibrio (Hauser et al. 2005).

Cada una de las cuatro patas del Lemur tiene tres articulaciones de rotación, en donde las primeras dos rotan paralelas a la superficie y la tercera es la articulación perpendicular que genera el contacto y el punto de apoyo con la superficie. Para determinar el siguiente punto de apoyo cuenta con un sistema de visión que al parametrizar el entorno



Figura 1.13: *Lemur IIb* (Stanford University, 2005).

más próximo, puede seleccionar el mejor punto de apoyo dependiendo de la cinemática y de la estabilidad del robot.

1.4.2. Robots escaladores asistidos por métodos de sujeción externos

- **Titan VII**

El Titan VII (ver Figura 1.14) ha sido desarrollado para realizar investigaciones en el campo de la construcción civil. Cuando se realizan infraestructuras de transporte como carreteras, vías de tren, túneles, etc., es necesario hacer un gran trabajo de cortar o reducir montañas y pendientes. Este trabajo es hecho actualmente por trabajadores-escaladores. El objetivo final de la investigación realizada con el Titan VII es la de construir un robot que sea capaz de llevar a bordo a los operarios con sus herramientas, de forma segura, para realizar estos trabajos en montañas con pendientes mayores de 45° (Hirose et al. 1997).

El Titan VII es un robot cuadrúpedo, cada pata tiene tres



Figura 1.14: *Titan VII* (Tokyo Institute of Technology, 1997).

articulaciones, dos de rotación y una de traslación, con una configuración de tipo insecto, cuyos movimientos son generados por actuadores eléctricos pero con articulaciones prismáticas. El vehículo puede subir por pendientes de hasta 30° utilizando un modo de caminar discontinuo específico para optimizar el margen de estabilidad energético. A partir de los 30° , es necesaria la ayuda de cables de acero que desde la parte superior de la pared, sujetan el robot. Estos cables están sujetos por un sistema motorizado con el que se controla la tensión deseada del cable, establecida por el sistema de control a bordo.

La mayor aportación de esta investigación es el uso de robots en el área de construcción de infraestructuras civiles debido a que previamente no se había desarrollado un prototipo con suficiente relevancia en el sector.

■ Dante II

El objetivo principal del proyecto Dante fue el de desarrollar un sistema robótico capaz de explorar los más abruptos terrenos en la exploración espacial, como lo son la Luna o Marte. Con este propósito

se ha construido el Dante II (ver Figura 1.15), un robot de ocho patas, cada una de tres grados de libertad, con un mecanismo de tipo pantógrafo y de configuración insecto. El robot pesa unos 770 *Kg* y es capaz de soportar una carga adicional de 130 *Kg* siendo capaz de llevarla a una velocidad de 10 *mm/s* en modo de escalado (Bares y Wettergreen 1999).



Figura 1.15: *Dante II* (Carnegie Mellon University, 1994).

Además el robot tiene un cuerpo dividido en dos conjuntos. Uno de ellos, el inferior, tiene las cuatro patas de los extremos y el superior tiene las cuatro patas interiores. Los dos conjuntos están unidos por medio de un marco que al deslizarse se producen movimientos laterales o de rotación entre los conjuntos aumentando el nivel de maniobrabilidad y de estabilidad.

Para moverse por medio de superficies muy irregulares y con inclinaciones superiores a 30° el robot debe estar sujeto por un cable, y por medio de un mecanismo de tensión interno tiene la posibilidad de controlar la tensión necesaria en el cable para realizar el descenso o el ascenso.

- **SRR**

Administrado para la NASA por el Instituto de Tecnología de California, el *Jet Propulsion Laboratory* (JPL) (NASA 2006), ampliamente conocido por sus recientes logros en la exploración de Marte, sigue avanzando en el desarrollo de robots con el objetivo de la exploración espacial y terrestre.



Figura 1.16: SRR (*Jet Propulsion Laboratory, 2001*).

Específicamente el *Sample Return Rover* o SRR (ver Figura 1.16) ha sido realizado para moverse por superficies naturales y paredes casi verticales, como las que se pueden encontrar en volcanes o en cráteres, con el objeto de recolectar muestras de rocas, mediante un brazo articulado que se acopla en la parte posterior del robot, o realizar distintos tipos de experimentos geológicos.

Está dotado de cuatro ruedas sujetas a soportes articulados o patas de 2 grados de libertad, siendo este un híbrido entre vehículos de locomoción con ruedas y robots con patas. En este caso, el SRR cuelga por medio de cuerdas de dos robots localizados en la parte superior de la montaña generando la fuerza de propulsión necesaria para que éste logre subir mientras supera obstáculos con sus soportes de ruedas articuladas.

1.5. Principales arquitecturas de control de fuerza

El control de fuerza en robots ha sido abordado por un número importante de investigadores en las últimas tres décadas. Las primeras realizaciones en este campo han sido destacadas en un primer estado del arte en control de fuerza por Whitney (Whitney 1987), y otros investigadores han evidenciado el progreso posterior en el control de fuerza en robótica (Carelli y Mut 1993) (Grieco 1997) (De Schutter et al. 1998). Asimismo, han sido publicadas monografías muy detalladas en el área del control de fuerza (Gorinevsky et al. 1997) (Siciliano y Villani 1999).

Actualmente, la mayoría de los investigadores consideran que las estrategias de control de fuerza pueden ser agrupadas en dos grandes categorías: a) aquellas que efectúan un control de fuerza indirecto; y, b) las que implementan un control de fuerza directo (Siciliano y Villani 1999). La principal diferencia entre las dos categorías es que en la primera se realiza el control de fuerza por medio del control de posición (sin el cierre explícito de un lazo de realimentación de fuerza), mientras que la segunda categoría se caracteriza por controlar directamente la fuerza de contacto al valor deseado gracias al cierre de un lazo explícito de realimentación de fuerza. Entre las investigaciones fundamentales en este campo cabe destacar el control de rigidez (Whitney 1977), el control de amortiguamiento (Salisbury 1980) (Klein y Brigs 1980) y el control de impedancia (Hogan 1985) (Surdilovik 1998) (Ferreti et al. 2000) (Nagchaudhuri y Garg 2001) (Albu-Schäfer y Hirzonger 2002), donde el error de posición se relaciona con la fuerza de contacto a través de la rigidez mecánica o de una impedancia de parámetros ajustables (que también puede ser rigidez en su caso particular).

1.5.1. Control de rigidez

Inicialmente desarrollado por Whitney (1977) Este es básicamente un control de posición x con una fuerza F proporcional al error de posición. Se establece una relación lineal entre el error de posición δx y F con lo que el efecto logrado es equivalente al de un resorte que ejerce una fuerza de restauración proporcional a su deformación.

$$F_e = K_s(x_d - x_r) \quad (1.1)$$

Eso significa que al aplicar una fuerza a una articulación, ésta reaccionará cambiando proporcionalmente su posición de acuerdo con la constante de rigidez K_s .

1.5.2. Control de amortiguamiento

Inicialmente desarrollado por Salisbury (1980), este es básicamente un control de posición con fuerza proporcional al error de velocidad, en el cual se establece una relación lineal entre el error de velocidad y la fuerza, con lo que el efecto logrado es el de un amortiguador viscoso que produce una fuerza de reacción proporcional a la velocidad con que se pretende desplazar.

La expresión que relaciona la fuerza de reacción de una articulación F_e con la variación de la velocidad obedece a la ecuación:

$$F_e = K_f(\dot{x}_d - \dot{x}) \quad (1.2)$$

en donde K_f es el coeficiente de fricción viscosa.

1.5.3. Control de impedancia

La impedancia se puede atribuir a un sistema mecánico caracterizado por una matriz de masa, una matriz de amortiguamiento y una matriz de rigidez, lo cual permite adaptar el comportamiento dinámico deseado que tiene el robot en su interacción con el medio. En este esquema de control, la presencia de la masa (en la impedancia deseada) hace que el sistema sea fuertemente acoplado y no lineal, lo que crea dificultades tanto en el modelado como en el control. No obstante, se ha demostrado que si se desean mantener características de linealidad y de desacoplo durante la interacción del robot con el entorno, es necesario añadir la medida de la fuerza y/o el par de contacto. Esto se puede lograr por medio de un sensor apropiado de fuerza/par colocado en la sección del robot que realiza la interacción (Siciliano y Villani 1999).

El control de impedancia (ver Figura 1.17) no intenta seguir trayectorias de posición y fuerza sino regular la relación entre la velocidad y la fuerza,

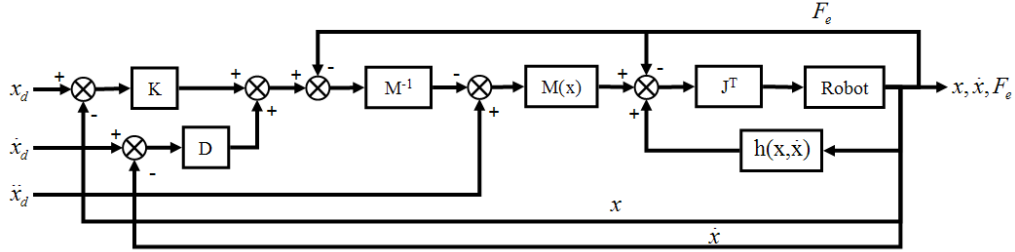


Figura 1.17: Esquema básico de control de impedancia.

en otras palabras la impedancia mecánica del manipulador (Spong y Vidyasagar 1989). En su forma más simple, este puede ser considerado como una generalización de los esquemas de control de rigidez y amortiguamiento. En esta forma, este es esencialmente un controlador de posición PD, donde las ganancias de realimentación de posición y velocidad se ajustan para variar la impedancia. Desafortunadamente, dada unas ganancias de realimentación fijas, la impedancia del manipulador cambia con la configuración debido a la no-linealidad del modelo del manipulador. El control de impedancia puede ser implementado en conjunto con una estrategia de control por dinámica inversa en el espacio cartesiano con el fin de lograr una impedancia constante independiente de la configuración del manipulador.

La forma general de la impedancia deseada puede ser expresada como:

$$F_e = M\ddot{x} + D\dot{x} + Kx \quad (1.3)$$

donde M es una matriz definida positiva de inercia, D y K son las matrices semidefinidas positivas de amortiguamiento y rigidez, x es la posición del manipulador y F_e es la fuerza ejercida en el ambiente. La ley de control para el control de un robot manipulador está dada por:

$$u = J^t[\bar{M}(x) * f + \bar{h}(x, \dot{x}) - F_e] \quad (1.4)$$

En donde:

$$f = -M^{-1}[K(x - x_d) + D(\dot{x} - \dot{x}_d) - F_e] \quad (1.5)$$

y $\bar{M}(x)$ es la matriz de inercia de manipulador y $\bar{h}(x, \dot{x})$ es el vector de las fuerzas de coriolis y centrípetas definidas en el espacio cartesiano.

1.5.4. Control paralelo fuerza/posición

Si se dispone de un modelo detallado del entorno, una estrategia muy utilizada, perteneciente a la segunda categoría, es el control híbrido fuerza/posición (Raibert y J.J. 1981) (Fisher y Mujtaba 1992), el cual tiene como objetivo controlar la posición en las direcciones no restringidas de movimiento, y de controlar la fuerza a lo largo de las direcciones en donde existe restricción de movimiento.

Desafortunadamente, en la mayoría de las situaciones prácticas no se dispone de un modelo detallado del entorno. En tales casos, una estrategia efectiva es el control interno/externo de posición/fuerza, donde un lazo externo de control de fuerza se cierra alrededor de un lazo interno de control de posición, el cual siempre está disponible en los robots manipuladores comerciales (Rocco et al. 1997). Otra estrategia de control de fuerza que permite la posibilidad de controlar movimientos en las direcciones restringidas, es el control paralelo de fuerza/posición (Chiaverini y Sciavicco 1993) (Siciliano y Villani 2000).

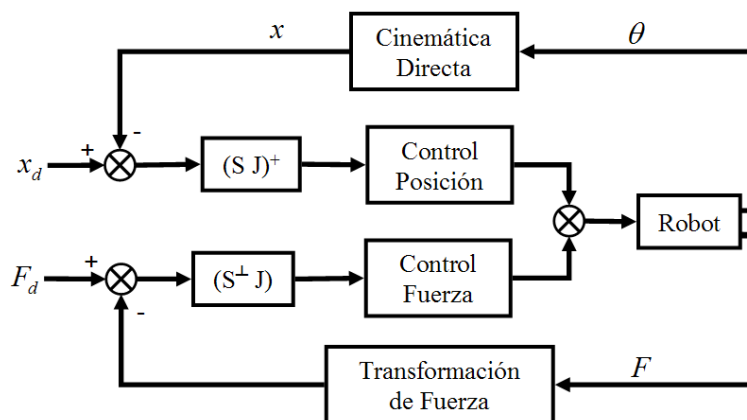


Figura 1.18: Esquema básico de control híbrido fuerza/posición.

En este esquema (ver Figura 1.18) las restricciones de posición y fuerza asociadas a una determinada tarea son especificadas en un sistema de coordenadas de referencia dividiendo así el espacio de la tarea en dos subespacios, el subespacio de control de posición y el de fuerza. Una matriz de selección S es empleada para gobernar cuales grados de libertad son

controlados en posición y cuales en fuerza. La información de posición y fuerza son analizados en forma independiente y las acciones de control resultante son combinadas solo en la etapa final cuando son convertidas a pares de la articulación.

Las posiciones de las articulaciones son convertidas al espacio cartesiano generándose el error de posición. Por medio de la matriz S se seleccionan los errores cartesianos de interés:

$$X_{es} = S * X_e \quad (1.6)$$

La variación introducida por Fisher (1992) al esquema propuesto por Raibert y Craig (1981) involucra la utilización de la pseudoinversa del producto $S * J$ (la matriz Jacobiana) como transformación de los errores cartesianos a errores en el espacio de las articulaciones utilizando así la solución de norma mínima para el error:

$$\theta_{es} = (S * J)^+ * X_{es} \quad (1.7)$$

Los errores de fuerza son seleccionados a través del uso de la matriz $I - S$, donde I es la matriz identidad, y son convertidos a errores de par en las articulaciones por medio del Jacobiano traspuesto J^T :

$$f_{es} = S^\perp * f_e \quad y \quad \tau_{es} = J^T * f_{es} \quad (1.8)$$

Este esquema, propuesto por Fisher es siempre cinemáticamente estable resolviendo los problemas de inestabilidad, asociados al control híbrido, reportados por An y Hollerbach (1987). Muchos de los algoritmos sobre control de posición y fuerza reportados en la literatura se han basado en la formulación propuesta por Raibert y Craig. Entre los trabajos más importantes podemos mencionar el trabajo de Zhang y Paul (1985) quienes modificaron el esquema de control híbrido, formulado inicialmente en el espacio cartesiano, planteando el problema en el espacio de las articulaciones. Mills (1991) plantea el problema de control híbrido desde la perspectiva de movimiento restringido. Anderson y Spong (1987) presentan un esquema de control llamado control híbrido de impedancia el cual combina las técnicas de control de impedancia y control híbrido posición/fuerza en una sola estrategia. Yoshikawa et al. (1988) proponen un esquema de control híbrido dinámico el cual tiene como fundamento las ecuaciones dinámicas del manipulador y las ecuaciones de restricción presentes sobre el elemento terminal.

1.6. Objetivos, metodología y estructura de la memoria

El objetivo principal de esta investigación es la de contribuir a resolver algunos de los problemas que presenta actualmente la locomoción de robots caminantes sobre terreno natural. Entre los problemas que se abordan destaca la generación de modos de caminar que mantengan la estabilidad del robot sobre terreno natural y permitan superar obstáculos, la realización de tareas específicas empleando herramientas a bordo, y la autonomía energética. En esta dirección se investigan y evalúan experimentalmente diversas estrategias de control reactivo para controlar la interacción robot-entorno. Para ello, partiendo del diseño y realización de un robot cuadrúpedo de grandes dimensiones, Roboclimber, que se emplea como plataforma experimental a lo largo de toda la memoria, se obtienen en primer lugar modelos de su estructura mecánica y de su sistema de accionamiento servo-hidráulico, y se diseña la arquitectura de control. Puesto que el objetivo es lograr modos de caminar estables sobre terreno irregular empleando control reactivo, una parte importante de la memoria se centra en la percepción de las fuerzas de reacción, lo que conlleva el empleo de diversos sensores (propioceptivos y estereoceptivos) y el adecuado procesamiento de sus señales. Una vez se dispone de un sistema experimental completo, se investigan las diversas estrategias de control reactivo y se evalúan mediante la ejecución de pruebas de laboratorio y de campo.

Dado este objetivo general, se han determinado una serie de objetivos específicos, más detallados, para llevar a cabo la investigación propuesta de una forma más sistemática y de acuerdo con la siguiente metodología:

- Diseño y realización de una plataforma experimental de robot de servicios autónoma que pueda desplazarse sobre terreno natural, así como de sus sistemas de accionamiento, de control y de comunicaciones.
- Diseño, implementación en tiempo real y evaluación experimental de modos de caminar sobre terreno natural.
- Diseño, implementación en tiempo real y evaluación experimental de modos de escalar sobre terreno natural.

- Diseño, implementación en tiempo real y evaluación experimental de métodos de detección y evasión de obstáculos asegurando la estabilidad.
- Diseño, implementación en tiempo real y evaluación experimental de sistemas de control con el que se pueda reaccionar de forma acomodaticia a los cambios imprevistos de las condiciones del entorno.
- Diseño, implementación en tiempo real y evaluación experimental de sistemas de control con el que se pueda reaccionar de forma acomodaticia a los cambios imprevistos de las condiciones de estabilidad del robot.

Por otro lado, al utilizar como soporte experimental un robot de servicios real objeto de dos proyectos de investigación financiados por la CE (Roboclimber, G1ST-CT-2002-50160 y Saferdrill, COOP-CT-2005-016842) se espera que este trabajo sea útil como referencia para la realización de nuevos proyectos, y que al analizar las ventajas y los inconvenientes que se enfrentaron durante el desarrollo del proyecto y al exponer posibles soluciones, se puedan sugerir sistemas alternativos para evitar estos problemas mejorando así la eficiencia de las investigaciones futuras.

En lo que respecta a la organización de esta memoria (ver Figura 1.19), que implementa la metodología propuesta, además de este primer capítulo de introducción, en el que se ha planteado la problemática y el interés de la locomoción sobre terreno natural, se han introducido los aspectos más relevantes de la percepción del entorno, se han revisado diversas estrategias de control reactivo, se han presentado algunos de los robots caminantes y escaladores de mayor relevancia para esta investigación, y se han especificado los objetivos de la tesis, la memoria contiene otros cinco capítulos que implementan la metodología propuesta, y varios apéndices, cuyo contenido se resume brevemente en los siguientes párrafos.

En el segundo capítulo, se presenta una descripción general de la plataforma experimental seleccionada para esta investigación, Roboclimber: diseño mecánico, sistema servo-hidráulico y arquitectura de control, en la que se incluyen sus principales características técnicas, ilustrando las soluciones elegidas para el diseño de su estructura mecánica, el diseño

y modelado del sistema de actuación del robot, y los distintos niveles y organización propuestos para su arquitectura de control.

En el tercer capítulo, se plantea el problema de la detección del suelo y de la percepción de las fuerzas de reacción del entorno en robots caminantes. Se proponen diversas soluciones a este problema encaminadas a obtener la información, tanto interna como externa, que pueda permitir modificar el comportamiento del robot de modo que éste se adapte a las condiciones impuestas por el terreno natural.

En el cuarto capítulo, se aborda el problema de la generación de los modos de locomoción del robot tanto en superficies planas como en superficies inclinadas, diseñando, implementando y evaluando experimentalmente los modos de caminar y de escalar más apropiados para un robot de grandes dimensiones.

En el quinto capítulo, se recolectan los principales resultados obtenidos en la evaluación experimental de las diversas estrategias de control reactivo para locomoción sobre terreno natural que han sido implementadas.

En el sexto capítulo se presentan las conclusiones y las principales aportaciones de esta tesis, así como las líneas de investigación futuras que podrían derivarse de este trabajo.

Finalmente, se incluyen cuatro apéndices que complementan las explicaciones y los datos presentados en la tesis, sobre todo desde el punto de vista de la implementación (especificaciones de Roboclimber, control básico, sistema de comunicación, y proceso de perforación), y el listado de referencias a las publicaciones, trabajos de investigación y tesis citados en la memoria.

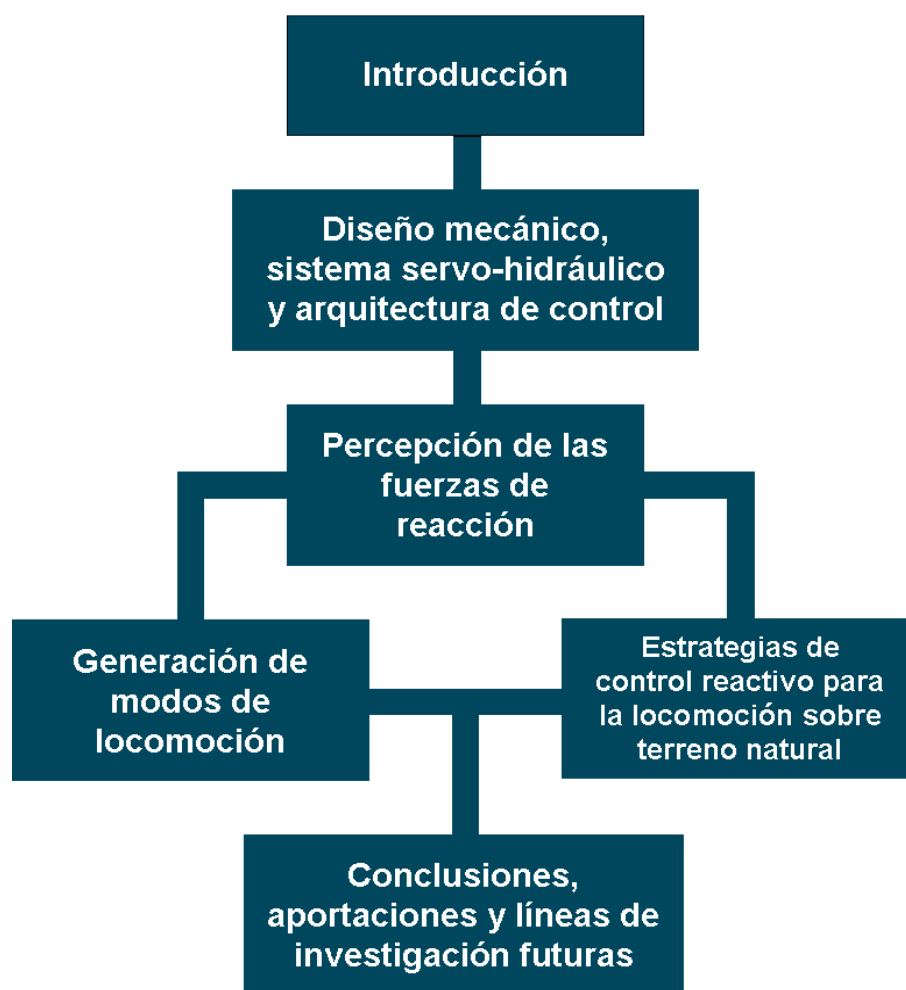


Figura 1.19: Organización de la memoria.

Capítulo 2

Diseño mecánico, sistema servo-hidráulico y arquitectura de control de Roboclimber

En el área de la construcción civil existen muchas tareas con un alto grado de peligrosidad que necesitan ser automatizadas para disminuir el riesgo de accidentes a que están sujetos los operadores humanos. En el caso de construcción de infraestructuras hay trabajos que tienen que ser realizados en las laderas de las montañas (Armada y González de Santos 2001)(Armada et al. 2002)(Armada et al. 2004). A este respecto, trabajos como los de perforación para insertar refuerzos, cubrir las pendientes con mallas de acero, formar mallas de hormigón y acero, o rociar con diferentes mezclas de cemento, suelen ser habituales para consolidar las laderas (Nabulsi et al. 2007).

Por ejemplo, en Europa existen muchas áreas de montaña en donde es necesaria la construcción de infraestructuras de transporte tales como ferrocarriles o autopistas; la mayoría de las veces hay que hacer cortes extensos en las montañas para allanar la superficie, lo que suele dejar laderas con poca firmeza y con peligro de deslizamientos de tierra o derrumbes. Actualmente hay pocas máquinas que se dediquen a realizar las tareas de consolidación de laderas de montaña, las cuales suelen necesitar un terreno accesible para llegar al área de trabajo y poder realizar las operaciones pertinentes.

En ocasiones, para fortalecer la estructura de las laderas se realizan

perforaciones horizontales con profundidades de hasta 20 m en varios puntos de la pendiente, y a continuación se inyecta hormigón para fortalecer y consolidar la estructura de la ladera.

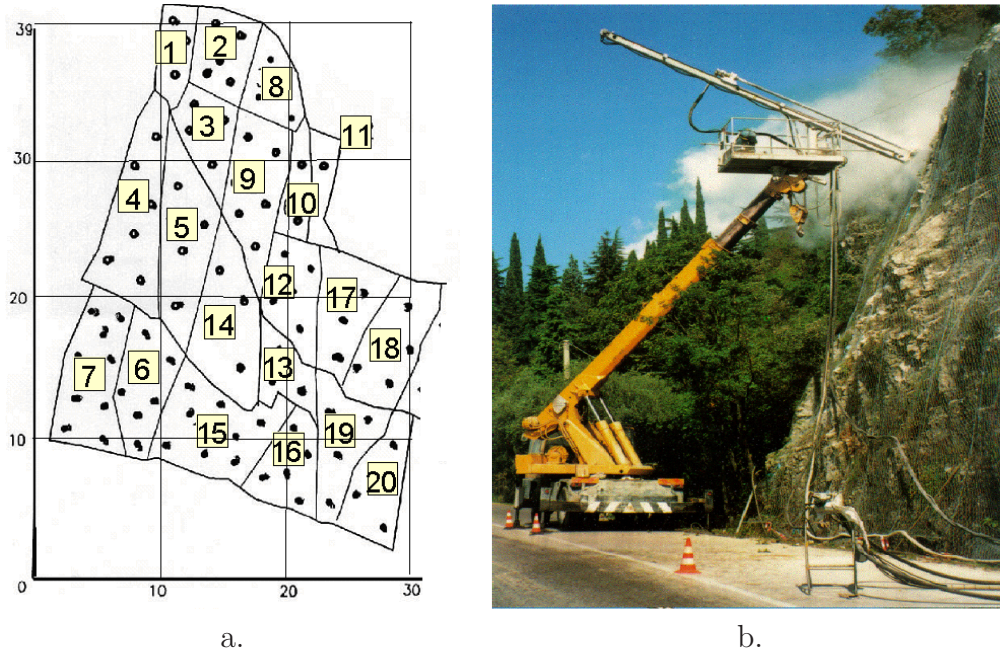


Figura 2.1: Labores actuales de consolidación en laderas de montañas. (a) Estudio geológico y (b) Vehículos con brazos articulados.

Este tipo de consolidación es realizada, a veces, acercando camiones con brazos articulados (ver Figura 2.1b) y llevando consigo el sistema de perforación, en sitios que deben ser accesibles para un vehículo pesado. Otra solución típica para este tipo de trabajos es el uso de andamios erigidos para que los trabajadores logren acceder y subir los equipos y las herramientas necesarias. Por supuesto estas soluciones tienen un alto coste en todos los aspectos, necesitan mucho tiempo para su realización, lo que supone cargas laborales muy altas y especializadas en tareas sumamente peligrosas. Otras soluciones alternativas han sido desarrolladas, como lo es el uso de estructuras metálicas colgadas de las montañas mediante cables de acero que llevan a bordo todo el equipamiento y los trabajadores especializados.

Roboclimber (ver Figura 2.2) es un robot cuadrúpedo, caminante y

Tabla 2.1: Características de soluciones diferentes al problema de consolidación de laderas de montañas.

Andamios	<ul style="list-style-type: none"> • Alto impacto ambiental • Alto coste de material • Alto coste laboral
Grúas y vehículos suspendidos	<ul style="list-style-type: none"> • Se necesita acceso libre • Rango operativo limitado
Solución robotizada	<ul style="list-style-type: none"> • Seguridad laboral • Eco-protección • Tiempo mínimo de preparación • Control de postura del taladro • Recopilación de datos geológicos

escalador (Armada y Molfino 2002) (Antonione et al. 2003) (Antonione et al. 2004), cuya realización ha sido financiada por un proyecto del Programa Growth de la Comisión Europea (2002-2004), cuya finalidad es realizar operaciones remotas y automatizadas de monitorización y de perforación en montañas rocosas de difícil acceso, con el objeto de consolidar las laderas y evitar derrumbes disminuyendo el riesgo que esto supone para distintas infraestructuras como carreteras, ferrocarriles o viviendas ubicadas cerca de las montañas.

Conceptualmente Roboclimber se basa en una estructura mecánica diseñada para llevar el equipo necesario a bordo para realizar las labores de consolidación (sistema de perforación). La estructura es soportada por cuatro patas, cada una de tres grados de libertad y de configuración cilíndrica, cuyos movimientos se generan a partir de actuadores hidráulicos y cuyo equipamiento tanto de control como de potencia son llevados a bordo, ascendiendo por las paredes de las montañas con un peso superior a 3500 Kg. con la ayuda de cables de acero sujetos adecuadamente en la cima de la montaña. La propulsión de los cables de acero se realiza empleando un sistema de tracción hidráulico, Tirfor, que debe ser controlado simultáneamente en función de los movimientos del robot.

El proyecto tiene como objetivo principal mejorar las condiciones del trabajo de consolidación con respecto a los diferentes tipos de soluciones

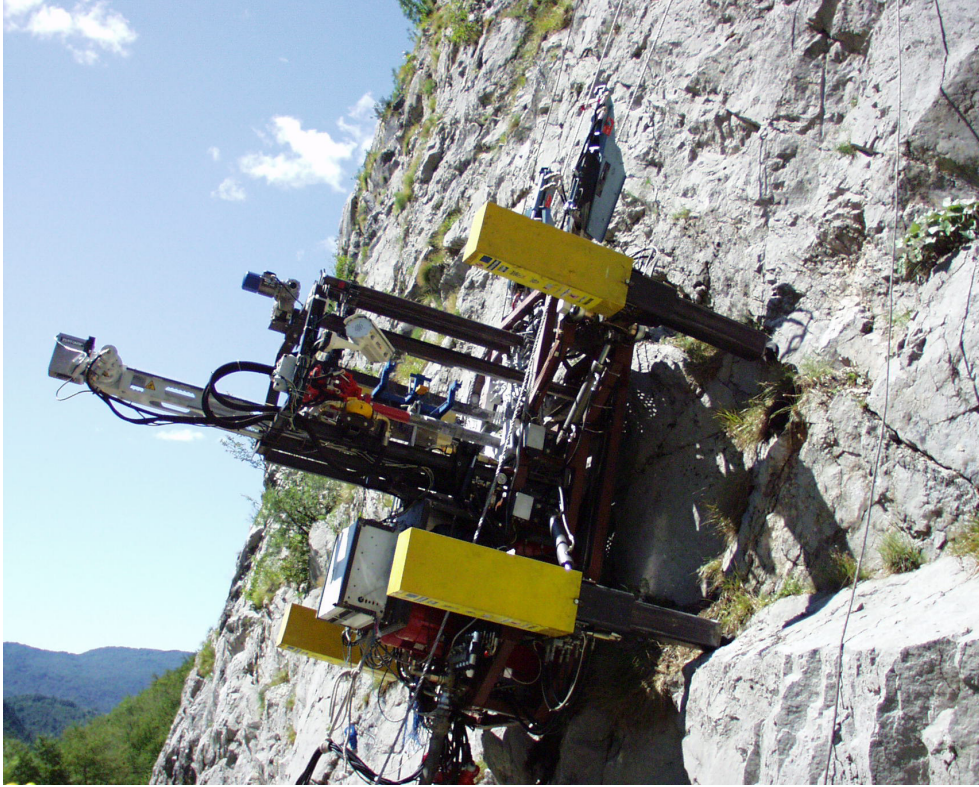


Figura 2.2: *Roboclimber*.

actuales (véase Tabla 2.1) como la reducción del tiempo de trabajo, reducción de gastos de materiales y de operación, y, lo más importante, la disminución del riesgo laboral. Dado el interés del proyecto y a que éste aborda el problema del diseño, realización y control de un robot con patas para automatizar tareas pesadas, y que además se requiere que el robot se mueva en terreno natural, se ha considerado oportuno emplear Roboclimber como plataforma experimental para la realización de esta tesis.

2.1. Diseño del sistema mecánico

Para comprender el concepto de la estructura mecánica del robot se deben recordar los requerimientos del proyecto para el que se ha construido. Primero, el robot tiene dos funciones principales; la primera es la recopilación de datos geológicos y la segunda es la de realizar trabajos de perforación para alcanzar profundidades de hasta 20 m en montañas rocosas.

Para cumplir con dichos requerimientos el robot tiene que desplazarse sobre distintos terrenos e inclinaciones, la fuerza de soporte del robot en la ladera debe ser generada mediante el uso de cables de acero sujetos en la cima de la montaña, y por consiguiente la fuerza de agarre del robot a la superficie debe ser la componente de fuerza generada por su propio peso. El robot debe ser capaz de caminar y escalar sobre pendientes con inclinaciones entre 60° y 90° , superando obstáculos superiores a 500 mm de altura. Por último, el sistema debe llevar a bordo el equipo necesario para alimentar los actuadores y para la generación de movimientos de los diversos subsistemas mecánicos.

Para desarrollar un sistema de control que genere estabilidad y robustez, capaz de poner en marcha un robot de grandes dimensiones con un grado de seguridad razonablemente alto, y con una relación potencia-coste baja, una solución muy apropiada es la de usar cilindros hidráulicos como actuadores en vez de motores eléctricos. Por eso el diseño mecánico también depende del uso y de las características de este tipo de actuadores.

2.1.1. Estructura mecánica

El diseño de la estructura mecánica de Roboclimber se basa en tubos de acero con perfil cuadrado de 70 mm y 7 mm de espesor. Aunque existen materiales más ligeros, como el aluminio, se ha decidido utilizar el acero como el material principal para la fabricación de la estructura de Roboclimber por sus propiedades mecánicas, que suelen ser más fiables considerando las elevadas cargas y torsiones que la estructura tendrá que soportar.

La estructura de Roboclimber está dividida en dos partes principales (véase la Figura 2.3). En la parte central del cuerpo se encuentran dos cavidades (c); la posterior está diseñada para alojar los sistemas hidráulicos con su depósito de aceite y el sistema de control del robot. La cavidad

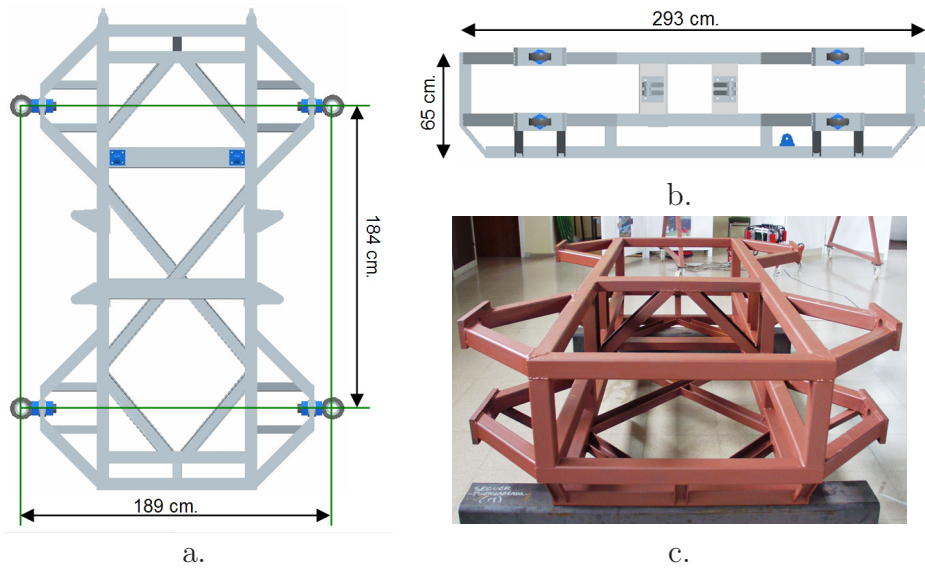


Figura 2.3: Estructura de Roboclimber. (a) Vista superior, (b) Vista lateral, y (c) Imagen completa.

delantera esta diseñada para instalar el sistema de perforación.

La locomoción de esta estructura se realiza mediante unas patas articuladas, que están fijadas por cuatro estructuras trapezoidales adosadas en los laterales de la estructura para este fin. En sus extremos se instalan cuatro rótulas las cuales tendrán la tarea de sujetar las patas y hacer de pivote para realizar giros. Como se puede ver en la Figura 2.3 (a), las dimensiones entre ejes se asemejan a un cuadrado, lo cual simplificará el estudio de las condiciones de estabilidad en el momento de realizar la generación de modos de locomoción. Una característica fundamental es que el peso total de la estructura base es de 500 Kg pero puede llegar a soportar sobre sí misma una carga superior a 3.5 toneladas.

2.1.2. Configuración mecánica de las patas

Las patas de las máquinas caminantes son el elemento básico para su locomoción. Por esa razón la elección acerca del tipo de configuración de patas que se va a utilizar es fundamental para lograr un buen

comportamiento en la locomoción tanto en modos de escalar como en modos de caminar. La selección del tipo de configuración mecánica y disposición depende de diferentes factores.

Lo primero que se debe analizar es la disposición de las patas. Se entiende por disposición, la localización del punto de anclaje de las patas en la estructura mecánica y su orientación según la dirección del movimiento; de esto depende la forma en que se debe comportar el robot en distintas situaciones. Existen dos posibilidades básicas para robots de cuatro patas o más, la disposición frontal y la sagital (Todd 1985) (ver Figura 2.4).

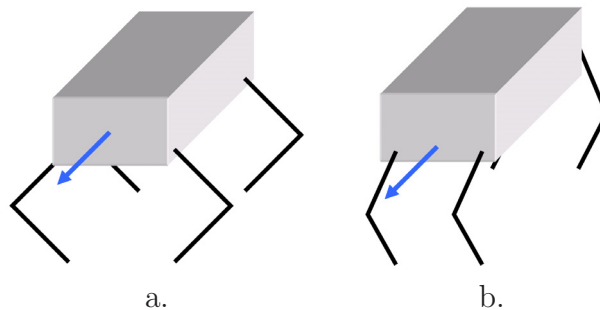


Figura 2.4: Disposición de las patas. a) Frontal y b) Sagital.

La disposición frontal se usa comúnmente en robots caminantes porque facilita las condiciones de estabilidad (Kar 2003)(Arikawa y Hirose 1996) puesto que no se requieren pares elevados para mover el cuerpo horizontalmente. Pero también se puede aumentar el paso aumentando la extensión de las articulaciones de las patas.

Por otro lado, la disposición sagital suele usarse en robots escaladores con sistemas de sujeción propios, puesto que se disminuye el par necesario para levantar verticalmente el cuerpo. También es útil para los casos en los que el grado de inclinación de la superficie no es muy elevado dado que es posible ampliar el apoyo para contrarrestar la inestabilidad generada por la fuerza de gravedad. A diferencia de la disposición frontal, la sagital no es favorable para las condiciones de estabilidad en los modos de caminar; pero si fuera este el caso, sería necesario emplear algoritmos más complejos para asegurar la estabilidad.

Dentro de los aspectos de diseño existe otra categoría en la que se analiza la geometría de las patas. Basándose en los estudios realizados en la

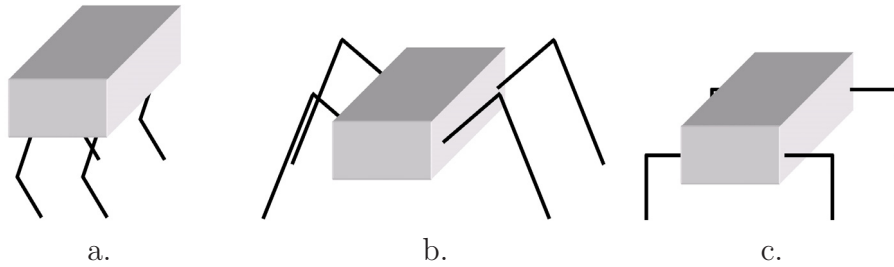


Figura 2.5: Geometría de las patas. a) Mamífero, b) Insecto y c) Reptil.

locomoción animal (McGhee y Frank 1968) (R.M. 1994), es posible dividir esta categoría fundamentalmente en tres grupos: el mamífero, el insecto y el reptil (ver Figura 2.5).

Por último, para una selección adecuada, se debe tener en cuenta la aplicación para la que se va a utilizar la pata. En el caso de Roboclimber se debe seleccionar una disposición en la que se tenga una base muy estable para caminar y para escalar soportando una carga muy elevada. Dentro de los requerimientos del proyecto se estableció que el robot debería ser colgado por medio de cables, puesto que sería muy difícil desarrollar un sistema de agarre que proporcione la adherencia necesaria para que el robot pudiera sostenerse sobre la superficie al escalar. Como parte de los requerimientos, también se optó por utilizar actuadores hidráulicos para las articulaciones debido a que los sistemas de perforación ya utilizan este tipo de actuadores y así aprovechar sus ventajas de alta relación peso/potencia.

Según estos requerimientos se deduce que las patas no tienen que hacer una fuerza necesariamente alta de agarre (puesto que es generada por el peso de la máquina y por los cables de los que está sujeto) y por la misma razón no tienen que generar pares muy altos para los modos de escalar, puesto que no tienen que elevar verticalmente el cuerpo; pero sí tienen que generar un soporte muy estable para las tareas de perforación, moverse con una gran carga a bordo con una velocidad baja y establecer una distancia entre la superficie y el cuerpo del robot para superar los obstáculos al mover el cuerpo.

Por estas razones se seleccionó un tipo de disposición frontal con una configuración reptil que, si bien, no es el que mejor se adapta a terrenos irregulares, tiene las propiedades más apropiadas de estabilidad (descritas

Tabla 2.2: *Propiedades de las patas según su geometría.*

Geometría	Ventajas	Desventajas
Mamífero	<ul style="list-style-type: none"> • Al ejercer una fuerza vertical sobre el cuerpo se minimiza el esfuerzo necesario para sostenerlo. • Buena capacidad de adaptación en terrenos irregulares. • Es posible generar modos de caminar más rápidos y dinámicamente estables. 	<ul style="list-style-type: none"> • Dado que las patas están por debajo del cuerpo el centro de gravedad del robot está alto. • Se reducen las opciones para posicionar las patas durante la locomoción. • Requiere de un control de estabilidad de mayor robustez.
Insecto	<ul style="list-style-type: none"> • Posee una gran capacidad de maniobra soportando el cuerpo en distintas posiciones. • Tiene una gran capacidad de adaptación en terrenos irregulares. • Da una buena estabilidad en el robot al mantener su centro de gravedad bajo. 	<ul style="list-style-type: none"> • El consumo energético es alto cuando tiene que subir el cuerpo. • No suelen poder alcanzar una velocidad alta. • Es necesario utilizar todas sus articulaciones para propulsar y sostener el cuerpo.
Reptil	<ul style="list-style-type: none"> • Provee un amplio soporte y un centro de gravedad bajo, generando una gran estabilidad en el robot. • Según su altura, puede sobrepasar obstáculos de gran tamaño. • El control de la articulación que soporta el cuerpo puede ser desacoplado de la que lo propulsa. 	<ul style="list-style-type: none"> • Todo el esfuerzo para soportar el cuerpo reside en la cadera, aún estando en posición estática. • No tiene facilidad de adaptación a terrenos muy irregulares. • Cuando el cuerpo esta soportado por dos patas opuestas diagonalmente, se generan fuerzas elevadas de torsión en la estructura.



Figura 2.6: Estabilizadores de un sistema de perforación comercial (Comacchio s.r.l., 2005).

en la Tabla 2.2) para cumplir con los requerimientos operativos del robot.

A partir de la selección del tipo de pata se puede empezar a analizar su diseño. El diseño fue inspirado en las extensiones que equilibran los sistemas de perforación actuales, los cuales tienen un centro de gravedad alto y se generan pares que pueden llegar a volcar el vehículo lateralmente al trabajar con cargas elevadas (véase Figura 2.6).

Estos estabilizadores suelen tener dos Grados De Libertad (*GDL*) prismáticos, uno horizontal para extender el soporte y el otro vertical para

adaptarlo al terreno irregular. Generalmente, para darle mayor rigidez al sistema, el mecanismo horizontal suele ser un tubo cuadrado de acero deslizándose dentro de otro, actuados por un cilindro hidráulico interior.

En las patas que utiliza Roboclimber se ha añadido una articulación de rotación adicional para tener la capacidad de giro horizontal y lograr realizar diferentes maniobras en la locomoción (ver Figura 2.7).

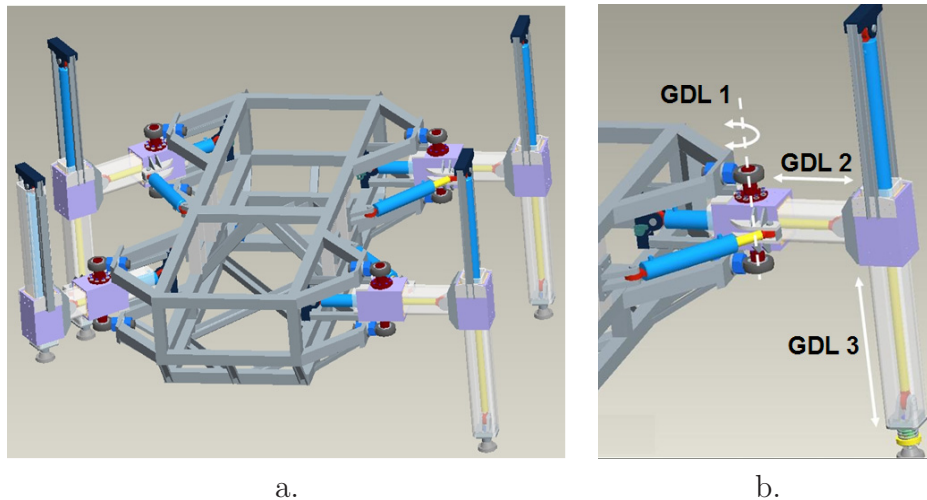


Figura 2.7: Estructura completa de Roboclimber y detalle de una pata.

Roboclimber tiene cuatro patas, y cada una de ellas tiene 3 *GDL*, dando como resultado un total de 12 *GDL* en el robot. Dentro de las principales características del diseño de las patas cabe resaltar su robustez y fiabilidad. Cada pata se conecta a la estructura, como se muestra en la imagen (véase la Figura 2.7b), por medio de unos ejes superiores e inferiores en las rótulas instaladas en los extremos de la estructura creando el *GDL* de rotación; este movimiento de rotación lo genera un actuador hidráulico ubicado en la parte lateral de la pata y conectado a su vez a la parte lateral correspondiente de la estructura (Figura 2.7a).

Los siguientes dos *GDL* prismáticos, uno horizontal y otro vertical, se construyen introduciendo un tubo cuadrado de acero dentro de otro. Entre los tubos se instala un cilindro hidráulico que sujeto del tubo exterior mueve el interior y de esta manera cuando el cilindro actúa, saliendo o entrando, también lo hace el tubo interior.

Esta configuración cinemática de las articulaciones, una de rotación y dos prismáticas, es normalmente llamada cilíndrica (Sciavicco y Siciliano 2001) debido al volumen de trabajo y alcance que describe su movimiento (véase la Figura 2.8), u ortogonal porque la fuerza que se tiene que realizar para desplazar el cuerpo es ortogonal a la fuerza que lo soporta. La zona verde de la figura muestra el área cinemática útil de trabajo para el desarrollo de movimientos en el robot.

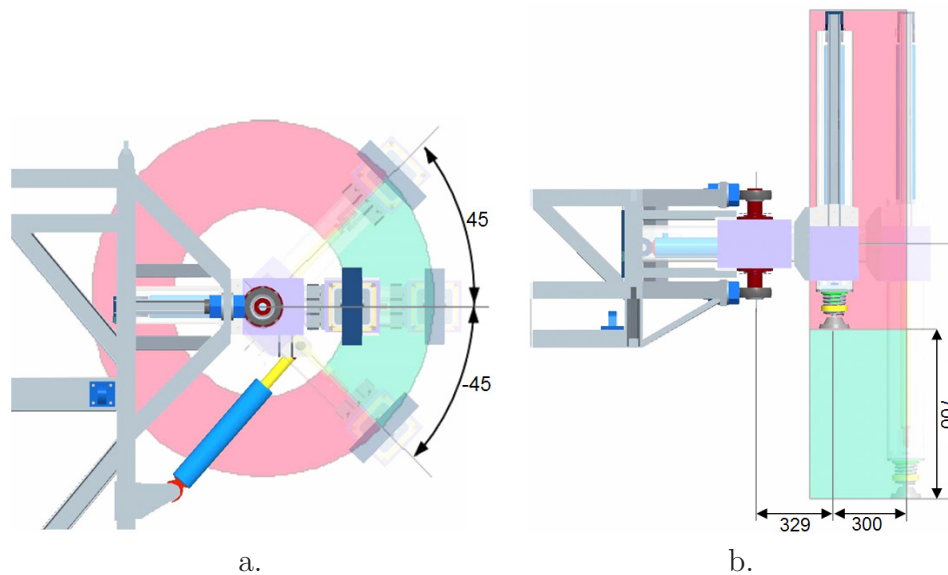


Figura 2.8: Volumen de trabajo. a) Vista superior y b) Vista lateral.

A las patas ortogonales se le pueden atribuir otras ventajas puesto que están especialmente indicadas para la movilidad, eficiencia, exactitud y los requerimientos de la locomoción sobre terrenos extremos (Bares y Whittaker 1993). Además su equilibrada base favorece la estabilidad de robots de grandes dimensiones como lo es Roboclimber.

Una de las principales características de la configuración mecánica actuada mediante cilindros hidráulicos es que se generan topes mecánicos muy rígidos en donde no es posible alcanzar posiciones de interferencia entre los distintos componentes del robot. Esta característica es muy importante puesto que dadas las fuerzas que cada uno de estos cilindros

puede desarrollar, si hubiese alguna interferencia, es muy probable que se produjeran daños en la estructura.

2.1.3. Análisis cinemático

Para poder realizar un control de posición de las patas en coordenadas espaciales es preciso resolver el problema cinemático inverso es decir, determinar qué posiciones han de adoptar las articulaciones para posicionar el extremo de la pata en un punto concreto, con respecto al sistema de coordenadas externas del sistema. Para ello se modela la pata como una cadena articulada en donde las articulaciones se mueven con los actuadores y de acuerdo con el criterio de Denavit y Hartenberg (Denavit y Hartenberg 1955), se realiza una asignación de sistemas de referencia a cada uno de los eslabones de la cadena cinemática (ver Figura 2.9).

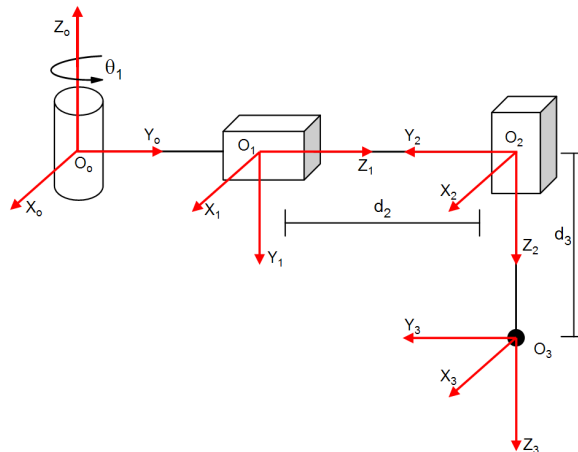


Figura 2.9: Esquema cinemático de una pata.

En base a esto se determinan los parámetros de los eslabones recogidos la Tabla 2.3. Los parámetros cinemáticos representan lo siguiente:

- a_i : Longitud del cuerpo.
- α_i : Giro del cuerpo.

- d_i : Distancia entre cuerpos adyacentes. Es la variable de la articulación si ésta es prismática.
- θ_i : Ángulo entre cuerpos adyacentes. Es la variable de la articulación si ésta es de rotación.

Tabla 2.3: *Parámetros de los eslabones y articulaciones de una pata.*

Eslabón	a_i	α_i	d_i	θ_i
1	0	$3\pi/4$	0	θ_1
2	0	$3\pi/4$	d_2	0
3	0	0	d_3	0

Dados los parámetros de los eslabones y de las articulaciones de la Tabla 2.3 las matrices de transformación homogéneas de cada uno de los sistemas de referencia asociados a cada articulación son:

$$A_1^0 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & -\text{sen } \theta_1 & 0 \\ \text{sen } \theta_1 & 0 & \cos \theta_1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$A_2^1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$$A_3^2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Multiplicando las matrices 2.1, 2.2 y 2.3 se obtiene la matriz de transformación que relaciona la posición y la orientación del sistema de

referencia solidario al eslabón 3 (punta del pie) de la pata del robot, con la posición y la orientación del sistema de referencia O_0 , en la articulación de rotación (base de la pierna) que está fija en el cuerpo del robot. El resultado es el siguiente:

$$T = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & \text{sen } \theta_1 & 0 & -d_2 \text{sen } \theta_1 \\ \text{sen } \theta_1 & -\cos \theta_1 & 0 & d_2 \cos \theta_1 \\ 0 & 0 & 1 & -d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

A partir de la matriz 2.4 se obtiene la expresión que define la posición del extremo del pie. Esta posición está dada en función de los valores de las articulaciones de la pata (problema cinemático directo) cuyo resultado es el siguiente:

$$\begin{aligned} P_x &= -d_2 \text{sen } \theta_1 \\ P_y &= d_2 \cos \theta_1 \\ P_z &= -d_3 \end{aligned} \quad (2.5)$$

Puesto que para mover las articulaciones se debe determinar un punto de llegada, se necesita conocer en qué posición debe estar cada articulación con respecto a las coordenadas internas de cada eje para lograr su objetivo. Esta posición está dada en un sistema de referencia de coordenadas externas, por lo que se desarrollan las ecuaciones cinemáticas inversas para determinar la posición de cada articulación con la que se alcanza un determinado punto. En el caso de las patas de Roboclimber el ángulo de la articulación de rotación se obtiene en función de los puntos P_x y P_y de las ecuaciones 2.5. Para deducir la longitud de las articulaciones prismáticas se despeja el sistema de ecuaciones (problema cinemático inverso) dando como resultado:

$$\begin{aligned} \theta &= -\arctg\left(\frac{P_y}{P_x}\right) \\ d_2 &= \sqrt{P_x^2 + P_y^2} \\ d_3 &= -P_z \end{aligned} \quad (2.6)$$

en donde d_3 es la posición de la vertical en coordenadas externas y determina la altura del robot.

En el caso de querer describir una línea recta se interpolan las trayectorias en una secuencia de rectas menores en función de la longitud del recorrido. Esto se debe a que la solución de la cinemática inversa sólo describe las coordenadas destino, pero si los puntos están alejados el recorrido intermedio difícilmente será rectilíneo. La generación de trayectorias a nivel cinemático del software permite especificar la necesidad o no de las interpolaciones en cada movimiento.

Las relaciones entre las velocidades en las articulaciones y la velocidad del extremo de la pata se expresan mediante la matriz Jacobiano, dada por:

$$J = \begin{bmatrix} -d_2 \cos \theta_1 & -\text{sen } \theta_1 & 0 \\ -d_2 \text{sen } \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

La obtención de las velocidades articulares partiendo de las velocidades del extremo de la pata están dadas por la matriz Jacobiano inversa:

$$J^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{-\cos \theta_1}{d_2} & \frac{-\text{sen } \theta_1}{d_2} & 0 \\ -\text{sen } \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

2.1.4. Sistema de sujeción

Como se mencionó al inicio de este capítulo, Roboclimber está soportado por dos cables de acero fijados en la parte superior de la ladera y la fuerza de propulsión para escalar se genera enganando al robot dos dispositivos llamados Tirfor que, actuados hidráulicamente, ejercen una fuerza tal que son capaces de mover el robot al sujetarse de los cables. Estos cables están ubicados de tal forma que sea posible para el robot abarcar el área en el que se desea realizar los trabajos de perforación (véase la Figura 2.10).

Mientras uno de los extremos del cable está sujeto firmemente en la cima de la montaña el otro extremo del cable se pasa a través del Tirfor. Cuando éste es accionado por un actuador hidráulico (ver la sección 2.2.3), el Tirfor se desliza por el cable, arrastrando todo lo que lleva sujeto a él, en este caso Roboclimber.

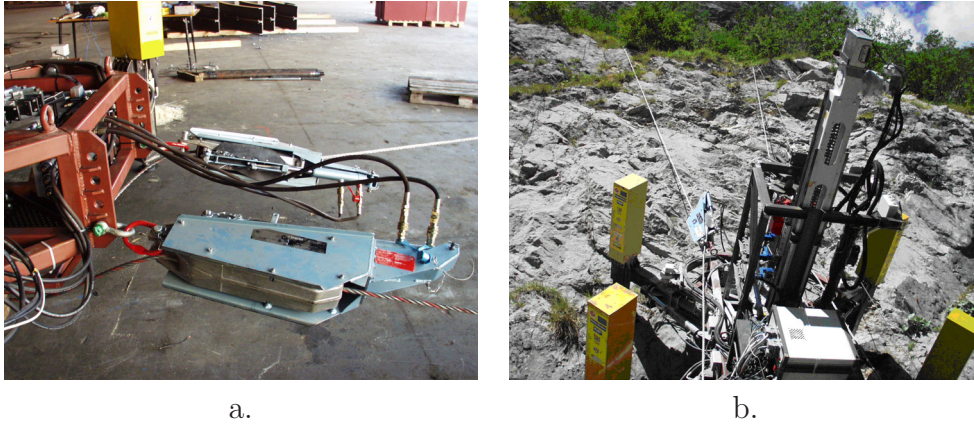


Figura 2.10: Tirfor, sistema de sujeción de Roboclimber.

El Tirfor ha sido elegido como medio de propulsión para escalar frente a otros sistemas tradicionales motorizados por varios motivos: no es necesario almacenar el cable (puesto que éste se mantiene siempre colgado de la montaña, se evitan los problemas que se pueden generar al enrollar y desenrollar el cable), se disminuye el peso que deben soportar la máquina y el Tirfor, y, al ser propulsados hidráulicamente, es posible utilizar el sistema de potencia hidráulica y de control ya incorporado en el robot. Esto implica que, al final, durante la escalada, hay que controlar un total de catorce *GDL*.

Esta solución tiene una desventaja importante, porque la velocidad de desplazamiento por el cable proporcionada por el Tirfor no es continua, lo que genera altas vibraciones al escalar y complicaciones al coordinar el movimiento del robot con el de los Tirfor. A pesar de esto el Tirfor es un dispositivo de fácil instalación, accionamiento sencillo y de gran robustez mecánica, razones por la que se ha seleccionado como método de propulsión en este proyecto, habiendo sido necesario realizar un esfuerzo adicional para solventar algunos de los inconvenientes mencionados.

2.2. Sistema servo-hidráulico

Un sistema hidráulico (Jelali y Kroll 2003) es un conjunto de componentes interconectados para proveer alguna forma de transferencia hidráulica. La estructura básica de estos sistemas está integrada por los siguientes elementos:

- fuente de potencia hidráulica,
- elementos de control (válvulas, sensores, etc.),
- actuadores (cilindros y/o motores),
- otros elementos (tuberías, instrumentos de medición, conectores, etc.).

Existe una gran variedad de combinaciones entre actuadores y válvulas para un amplio margen de aplicaciones. Aunque todas se basan en el mismo concepto, se estudiará aquella creada a partir de una válvula proporcional y un cilindro diferencial como actuador (ver Figura 2.11) que es probablemente la combinación más usada en robótica y en otras aplicaciones complejas debido a su fiabilidad y a su diseño compacto.

La consigna de control u entregada a la válvula suele ser una señal de tensión o de corriente y se puede considerar como una señal ideal. Esta consigna se usa para controlar el flujo de aceite por los orificios de la válvula. El aceite es suministrado por la fuente de alimentación que normalmente suele hacerlo a una presión constante p_s , mientras que el fluido es devuelto al tanque T por el circuito de retorno a una presión baja p_t .

El actuador, que en este caso es un cilindro, se compone de dos cámaras de aceite separadas por el pistón. El flujo de aceite resultante entre Q_A y Q_B sobre estas cámaras genera un movimiento en el pistón, generando así las presiones necesarias, p_A y p_B , para mover la carga acoplada al actuador. De esta forma, el movimiento del pistón (expresado en términos de la velocidad del pistón) depende de la carga del actuador. Esta carga puede ser vista como la inercia más otras fuerzas externas F_{ext} , como la gravedad o la fricción, si el movimiento se realiza libremente.

Si la apertura de la válvula y la generación de presión hidráulica es constante se produce un flujo de aceite que se traduce en el movimiento lineal del actuador a velocidad constante. Esto explica el comportamiento

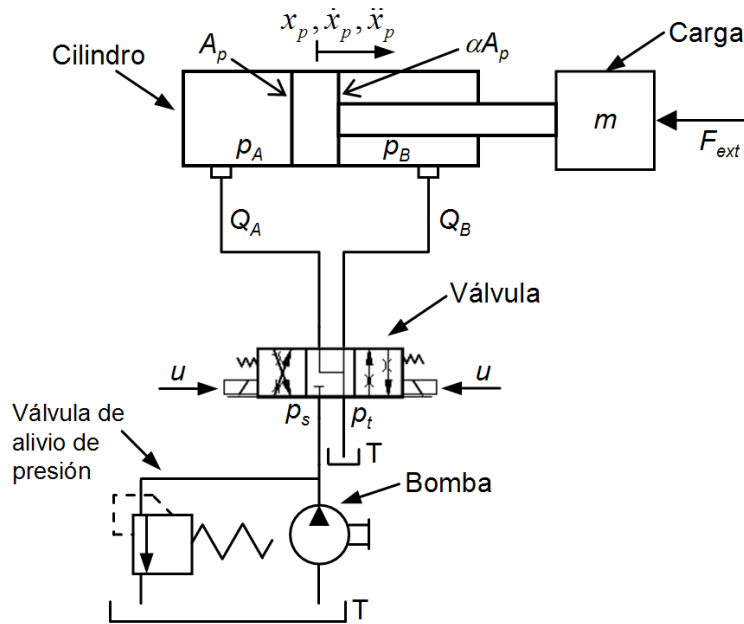


Figura 2.11: *Combinación válvula-cilindro con fuente de alimentación hidráulica.*

integral básico del actuador hidráulico entre la entrada u y la salida x_p (la posición del pistón). Debido a que el aceite es compresible, las columnas de aceite dentro de las cámaras del cilindro actúan como muelles y si hay una carga actuando sobre el pistón, la carga estará bajo los efectos de estos muelles creando un comportamiento de segundo orden en el actuador hidráulico.

A continuación se ilustra el concepto de los distintos subsistemas para el funcionamiento de un servo-sistema hidráulico:

- Fuente de alimentación + depósito (grupo hidráulico):** Una fuente de alimentación acciona un motor que actúa sobre una bomba hidráulica extrayendo el aceite almacenado en el depósito (T), generando un flujo a presión (p_s) que llegará a los actuadores por medio de las tuberías, controlado por las válvulas, convirtiendo así la energía mecánica en energía hidráulica. En la mayoría de las aplicaciones hidráulicas la fuente de alimentación está diseñada de tal forma que el sistema mantenga una presión constante para un cierto

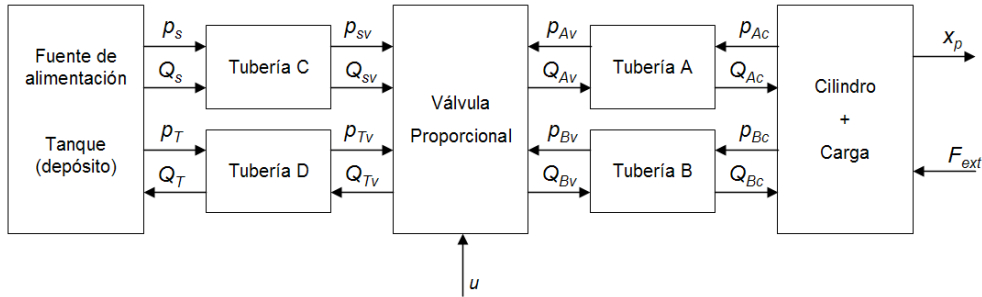


Figura 2.12: Subsistemas de los servo-sistemas hidráulicos con sus interconexiones.

rango de operaciones. Se debe tener en cuenta que si se superan los límites de operación de la fuente de alimentación, especialmente en los sistemas con un nivel alto de exigencia, las pérdidas de carga pueden ser importantes. También existen casos en los que se utilizan sistemas que regulan un flujo constante, generando fluctuaciones en la presión; las fluctuaciones de la presión de alimentación p_s y la de retorno p_T dependerán del caudal requerido.

- **Tuberías Fuente - Válvulas:** Existe un conjunto de tuberías por la que envía el flujo de aceite entre la bomba y las válvulas, y también entre las válvulas y el depósito. La relevancia de las tuberías en el comportamiento del sistema aumenta si la extensión es larga, afectando dinámicamente la acción sobre las válvulas y los actuadores, lo que se traduce en posibles oscilaciones en la presión.
- **Válvulas:** Las válvulas pueden ser usadas para controlar la dirección del flujo hidráulico, la cantidad de fluido y la presión que accionarán el actuador. Están diseñadas para proporcionar una respuesta rápida y tener un comportamiento idealmente lineal. Cualquier comportamiento no ideal dentro de la válvula se reflejará en todo el sistema hidráulico.
- **Tuberías Válvulas - Cilindro:** También existen una serie de tuberías que conectan las válvulas con el actuador, y son especialmente importantes cuando el cilindro tiene una carrera muy larga. Debido a la inercia y a la compresibilidad del aceite no se puede asumir que

las tuberías se comportan como dispositivos estáticos. Por esto, es necesario diferenciar la presión y el flujo entre el actuador y la válvula, de la presión entre la válvula y la fuente de alimentación. En la figura 2.12 se ilustran los distintos flujos presentes en los diferentes puntos del sistema.

- **Cilindro Actuador:** Y, por último, el actuador, que en este caso es un cilindro hidráulico, se compone de una masa activada por el fluido hidráulico Q_A y Q_B y sometido a una fuerza externa F_{ext} que se pueden entender como entrada al sistema, siendo las correspondientes presiones del actuador p_A y p_B , y la posición x_p o la velocidad \dot{x}_p consideradas como salidas. El actuador como subsistema es a su vez el eje central del sistema hidráulico. La base del actuador debe ser siempre realizada con la mayor rigidez posible, con una impedancia lo suficientemente alta como para evitar las pérdidas de energía. Si la base en donde se apoya el cilindro es deformable no se puede asumir que el actuador es un cuerpo rígido con impedancia infinita.

Así, el sistema servo-hidráulico se puede representar como compuesto por los cinco subsistemas como se muestra en la Figura 2.12. Sin embargo existen casos en que la acción dinámica de las tuberías sobre el circuito no son tan relevantes, con lo que se puede reducir la representación del sistema usando solo la válvula y el actuador. Posteriormente se hará una descripción más detallada de los componentes más importantes e influyentes en el diseño del sistema hidráulico de Roboclimber.

2.2.1. Grupo hidráulico o fuente de alimentación hidráulica

Los grupos hidráulicos (ver Figura 2.13) suelen venir preparados con un motor eléctrico o de combustible (como los de explosión interna o los motores diesel), de tal forma que sea posible accionar una bomba hidráulica. Las bombas son los dispositivos que impulsan el fluido hidráulico a presión, convirtiendo la energía mecánica en energía hidráulica. Para aplicaciones móviles se suele trabajar con presiones de 50 a 250 *bar*, pero en las aplicaciones en que se necesite el levantamiento de grandes pesos estas bombas pueden llegar a alcanzar los 5000 *bar*. Generalmente, las bombas,

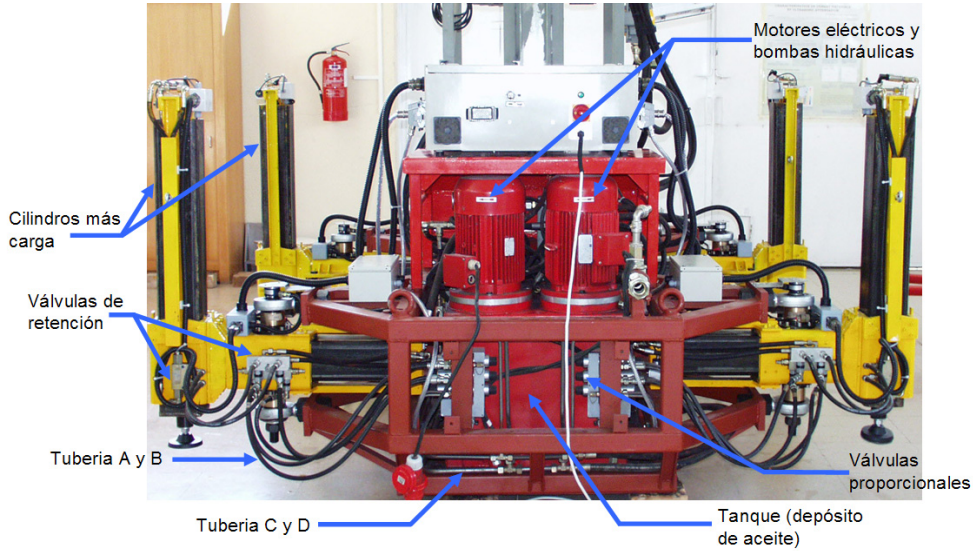


Figura 2.13: Componentes del sistema hidráulico.

son impulsadas por rotación y suelen obtener el aceite desde depósitos en donde está almacenado.

Normalmente las bombas son de desplazamiento positivo, esto quiere decir que la salida de presión del aceite es positiva. También existen otros tipos de bombas, como las de presión o caudal regulable, las cuales suelen entregar al sistema sólo la cantidad de presión o de flujo necesario sin tener que sobrecargarse; de esta forma se puede evitar, por ejemplo, el calentamiento del aceite optimizando así su eficiencia. Por último, también existe la posibilidad de controlar el caudal o la presión de la bomba controlando proporcionalmente la velocidad del motor que lo impulsa.

En nuestro caso, se asume que el flujo de aceite es generado a una presión constante. Sin embargo, el sistema puede ser muy sensible a la variación en la presión hidráulica p_s , generando pérdidas de presión, principalmente en los casos de sistemas en lazo cerrado en los que se requiere una gran demanda por parte de la bomba al estar cambiando la presión constantemente en los actuadores.

2.2.2. Válvulas

Las válvulas son el eslabón, mecánico o eléctrico, más importante en los sistemas hidráulicos. Para su control eléctrico utilizan un solenoide que al activarse activa también sistemas mecánicos internos que controlan la dirección, flujo y/o la presión del fluido (ver Figura 2.14).

Existen varios tipos de válvulas hidráulicas como son las válvulas direccionales, proporcionales o de presión. Para el diseño del sistema de posicionamiento de Roboclimber se usaron válvulas proporcionales.

La variante más simple dentro de las válvulas con solenoide son las válvulas direccionales. Son simplemente válvulas que hacen la función de un interruptor hidráulico, es decir que al ser activadas abren o cierran completamente, dentro de sus cavidades, el paso de aceite hacia los actuadores. Este tipo de válvulas tienen la limitación de que no se pueden controlar eléctricamente para modificar características en el fluido hidráulico como la presión o el flujo. Por ese motivo para el funcionamiento de servo-mecanismos se desarrollaron las válvulas proporcionales tanto para presión como para flujo. Estas válvulas son un mecanismo sofisticado y se les llama proporcionales porque actúan en proporción a la señal de entrada, características adecuadas para ser utilizadas en el control de circuitos en lazo cerrado, aprovechando además la gran precisión que generalmente proporcionan.

En el caso de las válvulas proporcionales de flujo, o de velocidad de fluido hidráulico (usadas en Roboclimber), se activan al excitar un solenoide que a su vez mueve una corredera interna de tal forma que se genera la circulación del fluido en una sola dirección y con el flujo (o caudal) controlado. En los distintos mecanismos de Roboclimber el control de la dirección y del flujo se hace en dos direcciones, por este motivo se utilizan válvulas proporcionales y actuadores de doble efecto.

En la Figura 2.14 se puede observar internamente la disposición de las partes de una válvula proporcional de doble efecto. Si ninguno de los solenoides está energizado la corredera permanece en el centro evitando cualquier flujo hidráulico en cualquiera de los sentidos. Si se acciona alguno de los solenoides, por ejemplo el solenoide B, se desplaza la corredera hacia la izquierda proporcionalmente a la señal de entrada creando una conexión de P a A y de B a T a través de secciones tipo diafragma con características de flujo progresivas. Si se desconecta la alimentación del solenoide la corredera

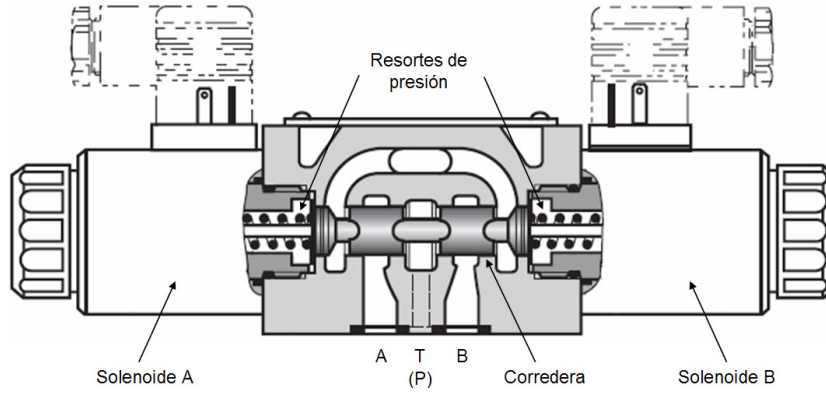


Figura 2.14: Válvula proporcional (ARON S.P.A.).

vuelve a situarse en el centro.

Debido a sus no linealidades las válvulas son dispositivos complejos. Realizar un modelo teórico y un análisis muy preciso de su comportamiento dinámico sería muy complicado y en la mayoría de los casos innecesario. Por esta razón se utilizan los parámetros especificados en la mayoría de los catálogos de los fabricantes en los que se indica la respuesta en frecuencia y/o la respuesta escalón para cada válvula.

2.2.3. Cilindros hidráulicos

Los actuadores hidráulicos son los dispositivos que emplean la energía hidráulica proveniente de la bomba y la convierten por medio de los elementos de control, como las válvulas, en energía mecánica y en consecuencia en trabajo útil. Los componentes más utilizados en hidráulica, y que generan movimientos lineales, son conocidos como cilindros hidráulicos, y los que generan movimientos rotacionales son los motores hidráulicos.

Existen varios tipos de cilindros hidráulicos, pero básicamente se dividen en dos grupos, los de simple efecto, que son los que permiten aplicar la fuerza hidráulica sólo en una dirección, y los de doble efecto que permiten el control del movimiento en dos sentidos.

Cuando el fluido entra por uno de los orificios *A* o *B* (ver Figura 2.15), hace que el aceite almacenado en la cámara opuesta al vástago salga

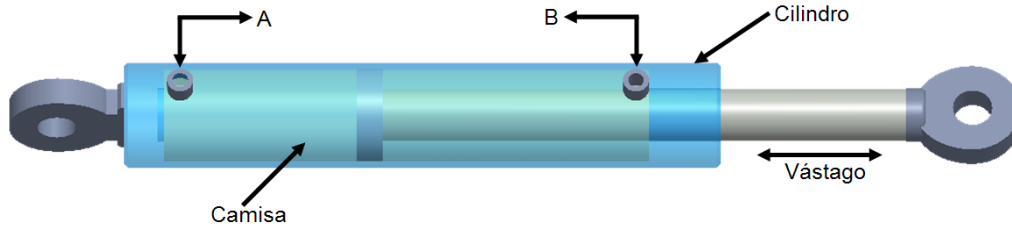


Figura 2.15: Cilindro hidráulico de doble efecto.

retornando por medio de las válvulas, hacia el depósito. Pero, como puede deducirse de la imagen indicada, al ingresar el fluido por la cámara *B*, la cantidad de aceite que se necesita para generar el movimiento del vástago es menor que si se hiciera por medio de la cámara *A*. Esta característica hace que a este tipo de cilindros se les llamen cilindros diferenciales, puesto que, con el mismo flujo aplicado en *B* o en *A*, la velocidad de entrada del vástago no es la misma que la de la salida.

Existen parámetros que hacen de los cilindros hidráulicos elementos no lineales para el modelado. Aunque la mayoría de los parámetros son conocidos, se pueden validar verificando el comportamiento experimental del cilindro pues pueden cambiar dependiendo de algunas circunstancias como por ejemplo la disposición durante su uso.

Los efectos no lineales que afectan en mayor medida al modelo de un cilindro hidráulico son:

- La geometría asimétrica debido a la diferencia de área entre las cámaras del cilindro.
- La dependencia de la presión del conjunto formado por el *módulo de Bulk* (la resistencia a la compresión del aceite) efectivo y la elasticidad del fluido, además de la elasticidad de los componentes mecánicos.
- La dependencia de la rigidez del actuador de la posición del cilindro, puesto que la frecuencia natural y por consiguiente el rango de amortiguación de la dinámica transitoria cambia con respecto a la posición del cilindro.

- Las fuerzas de fricción opuestas a la velocidad del vástago producen distintos tipos de efectos como los de la fricción viscosa o como la fricción de *Coulomb*.

Pero, quizá, el efecto más importante en el comportamiento dinámico del cilindro hidráulico es la influencia de la compresibilidad del aceite. El líquido hidráulico actúa como un muelle y, por consiguiente, introduce un sistema masa-muelle cuya frecuencia natural limita el ancho de banda de cualquier sistema hidráulico. La amortiguación debida a las fugas de líquido y a la fricción viscosa son relativamente bajas (para más información véase la sección 3.3).

2.2.4. Válvula de doble retención pilotada

Por motivos de seguridad, los movimientos de los sistemas de traslación del robot deben ser bloqueados cuando sea necesario que el robot este quieto o cuando el robot esté realizando las tareas de perforación. Por esta razón ha sido necesario incluir en el diseño del sistema hidráulico (véase la Figura 2.16) un dispositivo que sea capaz de bloquear el flujo de aceite en el circuito de cada uno de los cilindros hidráulicos de las patas; de no ser así las fuerzas externas que actúan sobre los cilindros moverían el vástago cuando la bomba esté detenida. Este dispositivo es la válvula de retención doble pilotada.

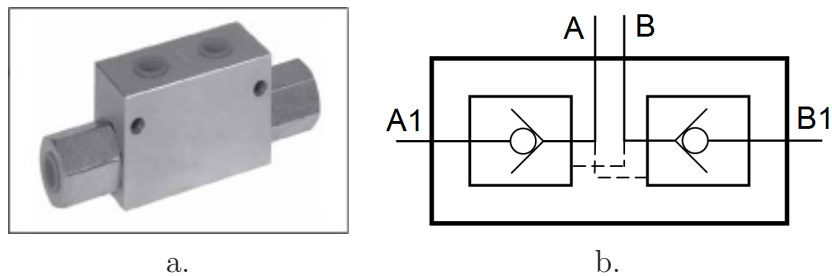


Figura 2.16: Válvula de retención doble pilotada. (a) Imagen real y (b) Esquema.

Este tipo de válvulas se utilizan en las articulaciones para bloquear el actuador y hacer que mantenga su posición cuando no exista presión hidráulica, reduciendo significativamente el consumo energético al no tener que realizar un control sobre las articulaciones que estén alrededor de una

posición deseada. El flujo de aceite que, por ejemplo, entra por A (ver Figura 2.16b) y sale por A1 permite que un pequeño piloto se abra permitiendo el paso al fluido en dirección B1 a B que es el que retorna del interior del actuador al depósito de aceite. Lo mismo ocurre si se genera un flujo con dirección B a B1, se abrirá el piloto para que haya un flujo en dirección de A1 a A. De esta forma se garantiza que las articulaciones de las patas se mantengan en la posición deseada mientras permanece almacenado el aceite dentro de las tuberías que conectan la válvula de retención y el cilindro, aunque no haya presión hidráulica entre la válvula proporcional y la de retención.

2.2.5. Diseño del sistema hidráulico de Roboclimber

Es posible clasificar los sistemas servo-hidráulicos en tres tipos básicos:

- **Controlados por válvulas.** Éste consiste en controlar el flujo o caudal por medio de las válvulas para alimentar un actuador y en donde la fuente de alimentación hidráulica puede ser de presión o caudal constante.
- **Controlados por bomba/motor.** En este sistema se realiza un control en el caudal producido por la bomba hidráulica, ya sea controlando la alimentación del motor o la alimentación de la bomba. El inconveniente de este tipo de control es que el caudal de salida de la bomba alimentaría por igual a todos los actuadores. En este caso la bomba también puede ser generadora de presión o de caudal constante.
- **Medida de carga.** El concepto de este sistema pretende que el flujo se ajuste automáticamente a la carga generada por los actuadores con una presión determinada dentro de unos parámetros específicos. Esto significa que la presión y el caudal son controlados. En muchos casos estos sistemas son el resultado de la combinación de sistemas de control por válvulas y del control de bomba/motor.

Para el diseño del sistema hidráulico que se utiliza en el sistema de posicionamiento de Roboclimber se han tenido en cuenta los requerimientos globales del sistema. Las principales ventajas de los servo-actuadores

hidráulicos son la gran presión que pueden soportar, la transmisión de movimientos con cargas muy elevadas y por último que pueden ser controladas mediante distintos tipos de realimentación como el flujo, la presión, posición, fuerzas o cualquier combinación de éstas. Finalmente, y porque en nuestra aplicación no es necesario alcanzar velocidades altas, los actuadores hidráulicos generan movimientos suaves, propiedad que ayuda en la generación de movimientos en donde la sincronización de varios actuadores es crítica y además ayudan también a mejorar el comportamiento dinámico del sistema disminuyendo el efecto indeseado de las inercias.

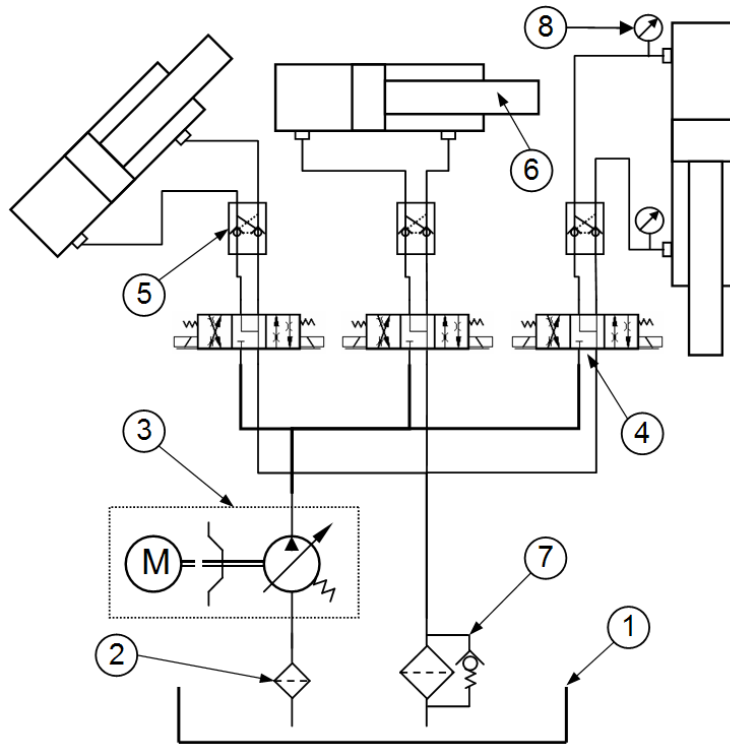


Figura 2.17: Esquema hidráulico de una pata.

Para lograr el movimiento del robot por medio de las patas primero se debe lograr que cada una de las articulaciones se mueva independientemente con una velocidad determinada, que pueda llegar a una posición específica y que sea controlado en los dos sentidos. Como ya se ha indicado, el sistema

Tabla 2.4: Elementos del esquema hidráulico.

1	Depósito de aceite
2	Filtro de retorno
3	Grupo hidráulico (motor eléctrico y bomba hidráulica)
4	Válvula proporcional
5	Válvula de doble retención pilotada
6	Cilindro hidráulico de doble efecto
7	Filtro de retorno
8	Indicador de presión (sensor de presión)

mecánico fue diseñado para utilizar cilindros hidráulicos. Por consiguiente es necesario un cilindro de doble efecto para cada articulación.

Controlar la velocidad del actuador implica que es necesario controlar su caudal; para lograr esto tenemos dos opciones, la primera es la de controlar el motor de la bomba. Esta posibilidad no se ajusta a las exigencias del sistema, puesto que para lograr un movimiento coordinado del cuerpo se dan casos en que las velocidades de las articulaciones no son las mismas. Por esta razón se decidió que cada articulación debería ser un sistema independiente controlado por medio de válvulas proporcionales.

Desde el punto de vista energético, es preferible realizar un control directo sobre la bomba hidráulica para el control del caudal. Pero los sistemas controlados por medio de válvulas proporcionales generalmente presentan mejores características dinámicas sobre los actuadores y además se puede realizar un control independiente en cada actuador. Por este motivo el control de los movimientos hidráulicos del robot se realizará por medio de un sistemas controlado por medio de válvulas proporcionales.

Para la selección de una bomba hidráulica hay dos parámetros imprescindibles que se deben tener en cuenta según las necesidades y características del sistema: la presión y el caudal. Con respecto al primer parámetro, la presión debe ser la adecuada como para poder generar una fuerza de empuje tal que se logre levantar una carga superior a los 3700 Kg equivalentes al peso del robot. Lo que significa que la articulación vertical de cada pata tendrá que soportar en algún instante una carga estática de, por lo menos, la mitad de la carga total del robot.

Empleando la ecuación de la presión:

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{Fuerza}{Area} = \frac{mg}{\pi r^2} \\
 P &= \frac{(1850 \text{ Kg})(9.8 \text{ m/s}^2)}{\pi(3.5 \cdot 10^{-2} \text{ m})^2} \\
 P &= \frac{18130 \text{ N}}{3.848 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2} = 4.711538 \cdot 10^6 \text{ Pa} \\
 P &= 47.12 \text{ bar}
 \end{aligned}
 \tag{2.9}$$

en donde r es el radio dado por la sección transversal de la camisa del cilindro hidráulico, que según se ha seleccionado por sus características mecánicas, tiene un diámetro de 70 mm , por lo tanto la presión mínima que el motor hidráulico debe proporcionar es 47.12 bar .

Para analizar el caudal Q mínimo que la bomba debe entregar al sistema es necesario tener en cuenta que al realizar el movimiento del cuerpo del robot se utilizan al menos ocho articulaciones u ocho cilindros hidráulicos a la vez. Usando la ecuación del caudal:

$$\begin{aligned}
 Q &= \frac{V}{\tau} = \frac{dA}{\tau} \\
 Q &= \frac{1.15 \text{ l}}{0.133 \text{ min}} = 8.65 \text{ l/min}
 \end{aligned}
 \tag{2.10}$$

En la ecuación 2.10, V es el volumen de la cámara interna del cilindro dado en litros, A es el área de la sección transversal de la cámara A del cilindro definida en la ecuación 2.9 y d es la longitud máxima de recorrido del cilindro de la articulación de rotación horizontal que es de 300 mm ; por último, τ es el tiempo en minutos en el que se hace el movimiento completo, que es de alrededor de 0.133 min u 8 seg , para cada una de las articulaciones. Por lo tanto, al multiplicar por el número de articulaciones, el Q máximo requerido por el sistema es de 34.638 l/min .

La selección de la válvula proporcional se debe hacer con respecto al caudal deseado para que sólo un cilindro hidráulico, de 300 mm de carrera, logre recorrer esa distancia en 3 seg . Calculando de la misma forma el caudal, pero con un tiempo de 3 seg da como resultado que el caudal necesario es de 13.85 l/min ; de esta forma se seleccionó una válvula capaz de entregar hasta 15 l/min , según las características del fabricante.

2.2.6. Modelo del sistema servo-hidráulico

El problema del modelado de los actuadores hidráulicos está bien establecido en los textos especializados en esta materia (Merritt 1976)(Viersma 1990)(Quang 2000)(Jelali y Kroll 2003). El modelo descrito a continuación está enfocado de tal forma que se pueda entender la naturaleza no lineal de los actuadores hidráulicos y profundizar en los fenómenos físicos que influyen en el comportamiento del sistema. De este modo se tendrá una idea más completa del funcionamiento de estos actuadores, lo que servirá de base para su control.

El modelo matemático de un sistema servo-hidráulico debe involucrar las leyes físicas básicas como las del equilibrio de la masa total en el volumen del fluido, las ecuaciones del movimiento para los elementos móviles, las ecuaciones del flujo turbulento a través de pequeños orificios, etc. En el modelo que se presenta a continuación se tienen en cuenta los siguientes efectos dinámicos:

- Cargas externas e internas incluyendo la fricción,
- la compresibilidad del aceite,
- y las fugas internas.

Seguiremos ahora el recorrido del fluido por los diferentes subsistemas del circuito hidráulico con combinación válvula-cilindro (ver Figura 2.11). Nótese que la alimentación hidráulica está modelada como una bomba de presión constante para el sistema y es independiente del flujo.

La servo-válvula

El flujo que pasa por la válvula es una función no lineal de la caída de presión debido al cambio de tamaño de los orificios internos de la válvula. Suponiendo que el flujo del aceite a través de los orificios de la válvula es turbulento, y que la presión dentro del depósito de aceite es la atmosférica (*i.e.* $p_t = 0$), el modelo de una válvula de cuatro vías es:

$$\begin{aligned}
 Q_A &= \Phi_{A1} - \Phi_{A2} = a_{A1}C_d\sqrt{2\frac{p_s - p_A}{\rho}} - a_{A2}C_d\sqrt{2\frac{p_A}{\rho}} \\
 Q_B &= \Phi_{B1} - \Phi_{B2} = a_{B1}C_d\sqrt{2\frac{p_s - p_B}{\rho}} - a_{B2}C_d\sqrt{2\frac{p_B}{\rho}}
 \end{aligned}
 \tag{2.11}$$

donde a_{Ai} y a_{Bi} son las áreas de los orificios dentro de la válvula, C_d es el coeficiente de descarga del fluido para un orificio de bordes afilados, p_s es la presión del grupo hidráulico y p_A y p_B son las presiones en las cámaras del cilindro. Las variables Φ_{Ai} y Φ_{Bi} representan los volúmenes de flujo turbulento a través de los orificios de la válvula, y Q_A y Q_B es el volumen del flujo entrando y saliendo de las cámaras del cilindro.

Las fugas de aceite

Siempre existe una holgura entre la camisa del cilindro y el pistón para permitir el movimiento del vástago. Aunque estas holguras son muy pequeñas en comparación a la sección transversal del área por donde fluye el aceite, estas holguras actúan como vías de escape internas cuando se ejerce una fuerza y como resultado se obtiene una diferencia de presión en las dos cámaras. Debido al desgaste de los materiales, también es posible que se produzcan fugas externas por las holguras generadas entre el vástago y la camisa del cilindro en el punto por donde sale el vástago. Suponiendo que el flujo de la fuga es laminar, el flujo de pérdidas en el vástago se puede modelar como:

$$Q_l = C_{ip}(p_A - p_B) \tag{2.12}$$

en donde Q_l es el caudal de pérdida de flujo y C_{ip} es el coeficiente de fugas. Aunque el coeficiente de fugas puede variar dependiendo de la viscosidad y de la temperatura del fluido, C_{ip} se puede considerar constante.

Por consiguiente si se añaden las fugas al modelo del flujo en las válvulas (2.11) se obtiene:

$$\begin{aligned}
 Q_A &= a_{A1}C_d\sqrt{2\frac{p_s - p_A}{\rho}} - a_{A2}C_d\sqrt{2\frac{p_A}{\rho}} - C_{ip}(p_A - p_B) \\
 Q_B &= a_{B1}C_d\sqrt{2\frac{p_s - p_B}{\rho}} - a_{B2}C_d\sqrt{2\frac{p_B}{\rho}} - C_{ip}(p_A - p_B)
 \end{aligned}
 \tag{2.13}$$

La compresibilidad del aceite

La rigidez finita del aceite es la causa de que los servo-sistemas hidráulicos tengan un comportamiento dinámico de segundo orden. Su influencia en los sistemas hidráulicos es similar a la de la compresibilidad de un resorte en los sistemas mecánicos. Una medida de la compresibilidad del aceite viene dada por el empleo del coeficiente β , que relaciona la variación de presión y de volumen en un recinto cerrado. La variación de la presión ΔP se define por:

$$\Delta P = -\beta \frac{\Delta V}{V} \quad (2.14)$$

El valor de β suele estar entre 600 y 1200 *MPa* y decrece si entra agua o aire en el sistema.

Las ecuaciones de continuidad

Usando el principio de continuidad y teniendo en cuenta la compresibilidad del fluido, es posible expresar el flujo en los lados de las cámaras del cilindro (Merritt 1976) de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} Q_A &= A_A \dot{x} + \frac{A_A L_A + V_{LA}}{\beta} \dot{p}_A \\ Q_B &= A_B \dot{x} + \frac{A_B L_B + V_{LB}}{\beta} \dot{p}_B \end{aligned} \quad (2.15)$$

donde A_A y A_B son el área de cada uno de los lados del pistón, L_A y L_B son las longitudes de las cámaras del pistón y V_{LA} y V_{LB} es el volumen ineficiente de aceite en cada cámara del actuador. Las tuberías de conexión entre la válvula y el actuador y el volumen necesario para llenar el sistema hasta alcanzar la extensión máxima en el actuador son volúmenes ineficientes.

La dinámica de la carga

El desplazamiento de la corredera de la válvula desde la posición nula (en donde las 4 vías están cerradas), genera una presión diferencial a través del cilindro hidráulico y como resultado se obtiene el movimiento del vástago.

La fuerza proporcionada por el actuador puede ser evaluada a partir de la segunda ley de Newton:

$$F = p_A A_A - p_B A_B = m\ddot{x} + D\dot{x} + F_l \quad (2.16)$$

donde F es la fuerza generada por el actuador; F_l es la fuerza de carga total en la que se incluyen la fuerza de fricción y las fuerzas externas, x es el desplazamiento del vástago, y m es la masa del vástago. Los efectos de fricción de caracterizan en este caso porque generalmente se oponen al movimiento. El modelo de la fricción se compone de un término viscoso lineal $D\dot{x}$ y de la fricción seca F_d :

$$F_f = F_d + D\dot{x} \quad (2.17)$$

donde F_d comúnmente es modelada como la fricción de Coulomb o como fricción estática. La fricción de Coulomb es generalmente modelada como una fuerza constante que existe cuando $\dot{y} \neq 0$. La estática actúa cuando el vástago no se mueve y es igual a la fuerza externa si no existe ningún movimiento, hasta un valor límite.

Si definimos el vector de estado como:

$$[x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T = [x \ \dot{x} \ p_A \ p_B]^T \quad (2.18)$$

y combinando las ecuaciones anteriores, se puede deducir un conjunto de ecuaciones en el espacio de estado que representen la dinámica del cilindro hidráulico:

$$\begin{aligned}
\dot{x}_1 &= x_2 \\
\dot{x}_2 &= \frac{1}{m} [x_3 A_A - x_4 A_B - D\dot{x} - F_f] \\
\dot{x}_3 &= \frac{\beta}{x_1 A_A + V_{LA}} \left[-x_2 A_A + C_{ip}(x_3 - x_4) \right. \\
&\quad \left. + a_{A1} C_d \sqrt{2 \frac{p_s - x_3}{\rho}} - a_{A2} C_d \sqrt{2 \frac{x_1}{\rho}} \right] \\
\dot{x}_4 &= \frac{\beta}{A_B(L - x_1) + V_{LB}} \left[x_2 A_B + C_{ip}(x_3 - x_4) \right. \\
&\quad \left. + a_{B1} C_d \sqrt{2 \frac{x_4}{\rho}} - a_{B2} C_d \sqrt{2 \frac{p_s - x_4}{\rho}} \right] \quad (2.19)
\end{aligned}$$

En este caso L es la longitud del recorrido del cilindro; V_{LA} y V_{LB} representan el volumen del fluido que se encuentra en las tuberías que conectan la válvula con el actuador.

Aproximaciones

A continuación se resumen las aproximaciones usadas para hallar el modelo dinámico del sistema hidráulico:

- La fuente hidráulica suministra presión constante sin importar la demanda de flujo.
- La presión del tanque es constante y está sometido a la presión atmosférica.
- Se utiliza una válvula simétrica de cuatro vías.
- El flujo en la válvula es turbulento.
- El flujo de las fugas es laminar.
- Se puede modelar el volumen ineficiente como una carrera adicional e ineficiente del pistón

- El actuador está sujeto a efectos de fricción de Coulomb y fricción viscosa.
- El ancho de banda de la válvula es mucho mayor que el del actuador, de tal forma que la dinámica de la corredera se pueda ignorar.
- El posible comportamiento dinámico de la presión en la transmisión de las líneas de conexión entre la válvula y el actuador pueden ser ignoradas.

Estas suposiciones se emplean con frecuencia y el modelo dinámico del actuador así obtenido es suficiente para describir con precisión el comportamiento de diversos sistemas hidráulicos.

2.2.7. Modelo linealizado

A continuación se presenta el modelo del cilindro hidráulico linealizado bajo las siguientes suposiciones:

- Los flujos en las cámaras del actuador son iguales (*i.e.* $Q_{sv} = \Phi_{A1} - \Phi_{A2} = \Phi_{B1} - \Phi_{B2}$) y varían linealmente con el desplazamiento de la válvula x_v .
- Se desprecian los volúmenes ineficientes V_{LA} y V_{LB} .

La válvula usada en el sistema servo-hidráulico es de centro cerrado. Pero debido a que la mayoría del tiempo la válvula trabaja en la región nula en donde el punto de equilibrio correspondes a $x_v = 0$ y a una posición inicial del pistón específica L_{01} se puede escribir:

$$\begin{aligned}
 x_v > 0 &\rightarrow a_{A1} = a_{B1} = a > 0, a_{A2} = a_{A4} = 0 \\
 x_v < 0 &\rightarrow a_{A2} = a_{B4} = -a > 0, a_{A1} = a_{A3} = 0 \\
 x_v = 0 &\rightarrow a_{A1} = a_{B1} = 0, a_{A2} = a_{A4} = 0
 \end{aligned} \tag{2.20}$$

en donde a es el área del orificio que deja la corredera al desplazarse dentro de la válvula. Por lo tanto al combinar las ecuaciones de continuidad (2.15)

y las de equilibrio de las fuerzas actuantes (2.16) se obtiene que:

$$\begin{aligned} \dot{p}_A &= \frac{\beta}{A_A L_{01}} (Q_{sv} - Q_l - A_A \dot{x}) \\ \dot{p}_B &= \frac{\beta}{A_B (L - L_{01})} (-Q_{sv} + Q_l + A_B \dot{x}) \\ \ddot{x} &= -\frac{D}{m} \dot{x} + \frac{A_A}{m} p_A - \frac{A_B}{m} p_B - F_{ext} \end{aligned} \quad (2.21)$$

En el espacio de estado el modelo linealizado se escribe ahora de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \dot{x} \\ \dot{p}_A \\ \dot{p}_B \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -\frac{D}{m} & 0 & \frac{A_A}{m} & -\frac{A_B}{m} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\beta}{L_{01}} & 0 & -\frac{\beta}{A_A L_{01}} C_{ip} & \frac{\beta}{A_A L_{01}} C_{ip} \\ \frac{\beta}{L-L_{01}} & 0 & \frac{\beta}{A_B (L-L_{01})} C_{ip} & -\frac{\beta}{A_B (L-L_{01})} C_{ip} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ x \\ p_A \\ p_B \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 0 & 0 \\ \frac{\beta}{A_A L_{01}} & 0 \\ -\frac{\beta}{A_B (L-L_{01})} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_{sv} \\ F_{ext} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.22)$$

en donde el vector de salida está dado por:

$$\begin{bmatrix} x \\ p_A \\ p_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ x \\ p_A \\ p_B \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

Se ha supuesto que Q_{sv} es una función lineal del desplazamiento de la corredera x_v . Al introducir los siguientes términos de presión:

$$\begin{aligned} p_s &= p_A + p_B \\ p_L &= p_A - p_B \end{aligned} \quad (2.24)$$

obtendremos una expresión lineal para Q_{sv} que puede escribirse como:

$$\begin{aligned} Q_{sv}(x_v, p_L) &= aC_d \sqrt{2 \frac{p_s - p_A}{\rho}} = aC_d \sqrt{\frac{p_s}{\rho}} \sqrt{2 \left(1 - \frac{p_A}{p_s}\right)} \\ &= aC_d \sqrt{\frac{p_s}{\rho}} \sqrt{\left(1 - \frac{p_L}{p_s}\right)} \simeq aC_d \sqrt{\frac{p_s}{\rho}} \left(1 - \frac{p_L}{p_s}\right) \end{aligned} \quad (2.25)$$

Suponiendo que el orificio de la válvula es una función lineal con respecto a la señal de entrada de control:

$$a = K \cdot u \quad (2.26)$$

donde K es el coeficiente de la corredera de la válvula (mm/mV). La expresión lineal para Q_{sv} se puede escribir como:

$$Q_{sv}(x_v, p_L) = C_A \left(1 - \frac{p_L}{2p_s}\right) u \quad (2.27)$$

con un C_A constante dada por:

$$C_A = K \cdot C_d \cdot \sqrt{\frac{p_s}{\rho}} \quad (2.28)$$

La ecuación del modelo lineal en el espacio de estado (2.22) indica claramente que el modelo depende de la linealización alrededor de la posición L_{01} . Esto podría suponer, en principio, una importante limitación al uso de este modelo, ya que la carrera del actuador es considerable. Sin embargo, en nuestro caso, al emplear, como ya se ha anticipado, realimentación de presión y de posición/velocidad, el modelo presentado es útil y explica bien el significado físico de las variables que intervienen. Debe observarse la naturaleza “paralela” de las dos ecuaciones de la presión en ambas cámaras, lo que sirve de base para el empleo de su diferencia para el control efectivo de la fuerza externa. El sistema tiene un polo en el origen, lo que indica la naturaleza integradora del cilindro. Tiene además un polo rápido con parte real negativa, y un par de polos complejos conjugados que dominan la respuesta del sistema. La parte imaginaria de este par complejo es de magnitud significativa, indicando una tendencia a la oscilación, por lo que el sistema de control debe evitar crear entradas que los exciten de forma inapropiada.

2.3. Arquitectura de control de Roboclimber

El control del robot está constituido por dos subsistemas independientes. El primero es el control de posicionamiento, cuyo objetivo final es generar estrategias para mover el robot a posiciones determinadas tanto en superficies planas como en superficies inclinadas y en donde dichas superficies pueden ser irregulares (Nabulsi et al. 2005)(Nabulsi et al. 2005)(Nabulsi 2007).

El segundo subsistema independiente del robot, es el generador de secuencias de movimientos, necesario para un sistema semi-autónomo de perforación. El conjunto de tareas que se generan deben ser supervisadas y coordinadas por medio de un ordenador de forma remota.

En la aplicación real los dos subsistemas, en principio, no serán activados para trabajar simultáneamente. Después del posicionamiento del robot las patas deben permanecer en posición estática mientras se hacen los trabajos de perforación. Es muy complicado hacer un control simultáneo debido a varios factores: primero por seguridad, puesto que no es apropiado mover la posición del robot mientras hay una broca enterrada; segundo, las secuencias de perforación requieren de muchos de los recursos disponibles, tanto hidráulicos como del sistema de control, haciendo un poco más complejo realizar un control simultáneo en tiempo real.

En los apartados anteriores se ha ilustrado la configuración mecánica del sistema hidráulico y como conclusión se ha determinado que se utilizarán las válvulas proporcionales como elemento de control del sistema de posicionamiento de Roboclimber y cilindros de doble efecto como actuadores hidráulicos. A continuación se hará una descripción completa del control básico y de los elementos de medida, así como de la arquitectura de control a nivel de software para proporcionar una idea más completa de la complejidad del sistema global.

2.3.1. Diseño de la estructura básica de control

Los servo-sistemas hidráulicos están diseñados generalmente para controlar una o más variables de salida del actuador, como la dirección, velocidad, aceleración, posición y/o la fuerza. El sistema de control en lazo cerrado más básico que se puede utilizar para el control de cada articulación se muestra en la Figura 2.18.

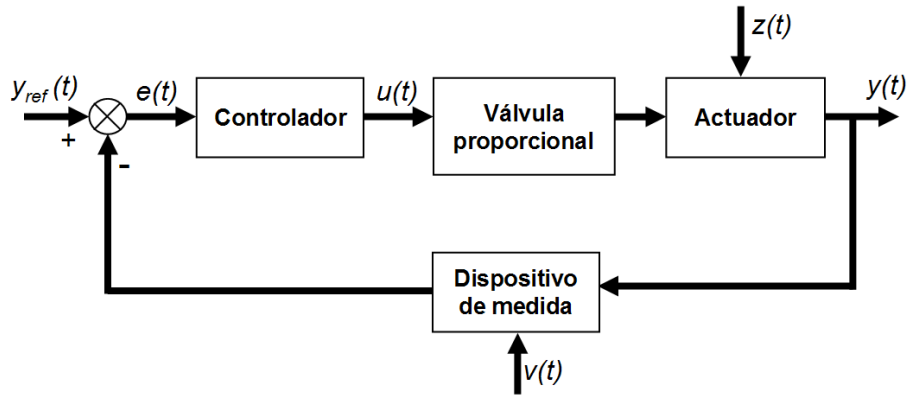


Figura 2.18: Diagrama de control básico para el control de actuadores.

La salida $y(t)$ en los sistemas de control debe ser forzada a seguir la señal de entrada $y_{ref}(t)$, sin importar las alteraciones externas en la entrada $z(t)$ (como por ejemplo fuerzas externas) ni los errores de medida del sensor ocasionados por las de interferencia del entorno, ilustrado en el diagrama de bloques como $v(t)$. Cualquier alteración en la señal al final va a ser causa de una corrección en la posición de la corredera de la válvula proporcional. Es esencial que el control sea preciso incluso cuando la dinámica del sistema esté sometida a un cambio constante.

Existen distintas técnicas de control lineal que suelen aplicarse a la hidráulica. Se utilizan sistemas de realimentación clásicos, como las técnicas del dominio en frecuencia o un controlador Proporcional Integral y Derivativo (PID), que quizá sea la solución más aplicada en estos casos. La aplicación de técnicas de control modernas como lo es el control H_∞ (Lambrechts 1994) o las basadas en la realimentación de la aceleración (Tafazoli et al. 1998), suelen proporcionar un mejor rendimiento que las técnicas de control clásicas, pero debido a la dificultad de su implementación, los resultados prácticos suelen ser cuestionables.

Pero a pesar de los diferentes tipos de control existentes y por motivos prácticos, la experiencia y las preferencias del diseñador juegan un papel muy importante en la selección del controlador adecuado.

En Roboclimber todos los movimientos hidráulicos en el sistema que necesitan ser controlados tienen que desarrollar una velocidad específica

y/o llegar con precisión a alguna posición deseada. Por esta razón, en la estructura básica de control, los servo-mecanismos hidráulicos son controlados midiendo su posición mediante *encoders* (codificadores ópticos incrementales), para cerrar el lazo (ver Figura 2.19 y para mayor detalle ver Anexo B).

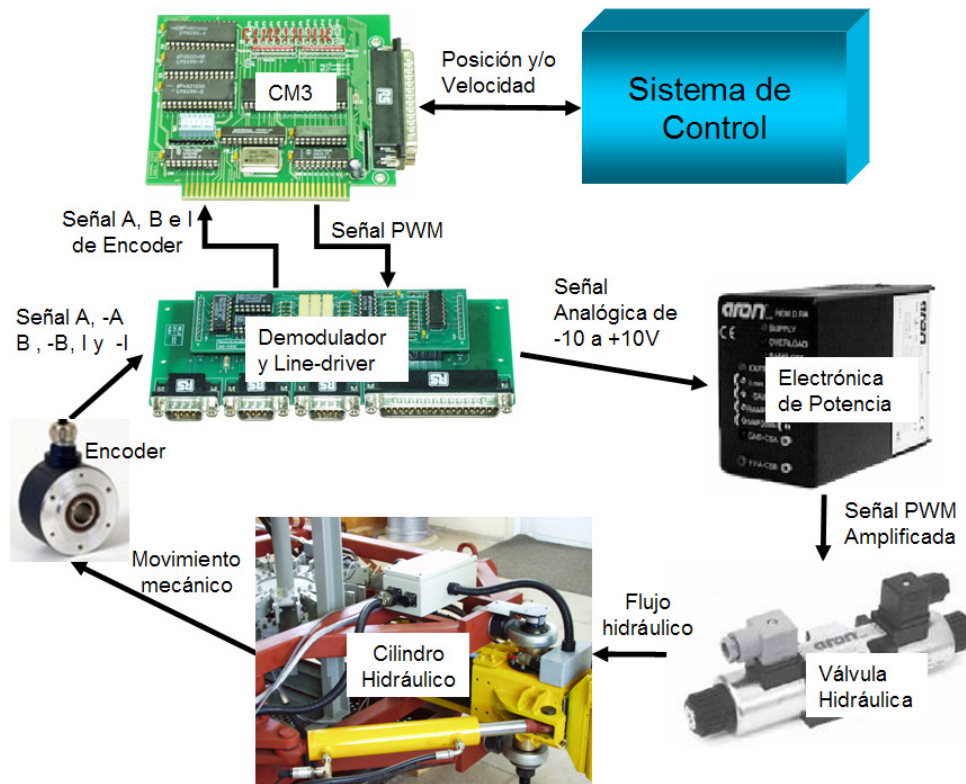


Figura 2.19: Esquema completo de control básico de movimientos.

En el Departamento de Control Automático del Instituto de Automática Industrial (IAI-CSIC) se ha desarrollado desde hace varios años una arquitectura de control eficiente y con un campo de aplicación muy amplio para el control de distintos tipos de motores eléctricos en el que una sola unidad de control compuesta de una CPU, tarjetas de control, tarjetas de adquisición de datos, fuentes de alimentación eléctrica y amplificadores de potencia se encargan del sistema completo. La arquitectura de control debe

ocuparse de toda la información generada por el sistema y procesarla en tiempo real. Por esta razón se ha optado por usar el sistema operativo QNX[®] 6.3 (QNX Software Systems Ltd. 2006), un sistema operativo basado en Unix y de procesamiento en tiempo real. Se utiliza para leer y procesar la información de todos los sensores manteniendo la capacidad y la precisión para controlar los actuadores simultáneamente, con un software de control desarrollado en lenguaje C/C++.

El sistema de control realiza la coordinación de las acciones sobre los actuadores de forma que se produzca la locomoción en la dirección y orientación deseadas. Para lograrlo se utiliza una unidad de control global y varios controladores locales (hardware de control). Se emplean microcontroladores distribuidos especializados y dedicados al control de movimiento local de cada articulación. Al descentralizar el control local, el procesador central queda libre para atender tareas de más alto nivel. La otra parte fundamental del controlador está formada por algoritmos y estrategias de control en forma de programas de ordenador (software de control). El software tiene una estructura jerárquica y se organiza desde las tareas de bajo nivel muy especializadas, hasta las tareas de mayor complejidad que involucran toma de decisiones.

La plataforma consta de una unidad de control central con microprocesador de 32 bits (i586) para la supervisión y planificación de todas las tareas a realizar. La unidad de control central es en la práctica un ordenador industrial de reducidas dimensiones, pero con todos los periféricos estándar de un PC. Los diferentes sensores a bordo están atendidos por una tarjeta de entrada-salida de señales analógicas y digitales. Las mediciones de magnitudes sensoriales, así como las acciones sobre los actuadores de cada pata están supervisadas en todo momento por el procesador central. Los microcontroladores locales están agrupados en tarjetas de tres o cuatro ejes cada una, por lo que cada tarjeta puede realizar al menos el control de una pata del robot.

2.3.2. Jerarquías de la arquitectura de control

El sistema de control de Roboclimber se ha diseñado para, en primer lugar, conseguir la coordinación de los movimientos de las patas de manera que se produzca la locomoción en la dirección y la orientación deseada y, en segundo lugar, realizar las tareas de perforación de forma segura. Esto

debe poder hacerse de forma remota y con tal modularidad que también sea posible conseguirlo con cualquier tipo de comunicación remota, ya sea desde un ordenador externo por medio de una Interfaz Hombre Máquina (*Human Machine Interface* HMI) o logrando un control completamente automatizado con el ordenador de a bordo.

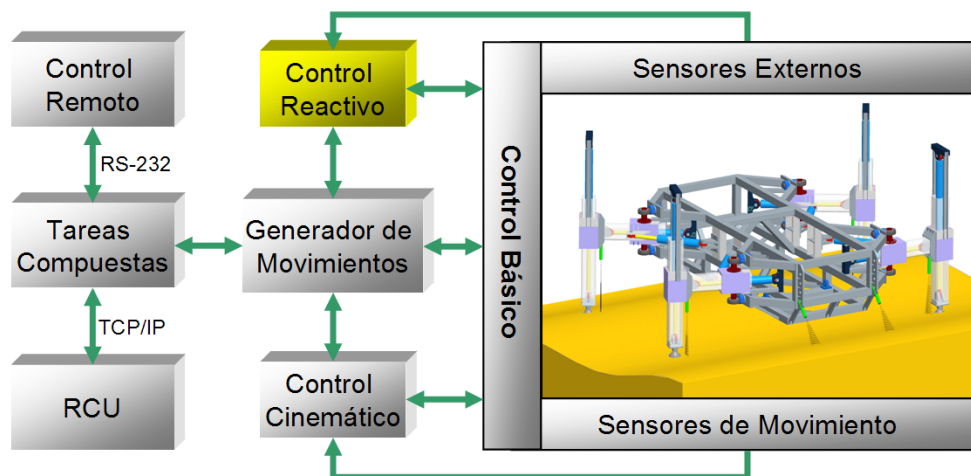


Figura 2.20: Arquitectura de control global de Roboclimber.

Como se ilustra en el esquema (ver Figura 2.20), el sistema de control está diseñado en base a módulos y jerarquías de software para poder acceder a los niveles más básicos desde los niveles más altos. El objetivo es poder lograr la integración de distintos dispositivos externos en la máquina sin que interfieran en sus funciones básicas de operación. Por ejemplo, si se quisiera operar el robot en base a coordenadas de un sistema de posicionamiento global (GPS), éste debe poderse integrar en el funcionamiento del robot, por medio de la información de un ordenador remoto, sin tener que hacer cambios en los modos de locomoción. Para lograrlo se precisa realizar algoritmos altamente modulares para que la comunicación entre los niveles de control sea posible.

En este apartado se profundizará en el diseño e implementación de la arquitectura de control y en la estructura a nivel de software que, desde las jerarquías más básicas, están preparadas para interactuar con el hardware de control y de esta forma lograr ejecutar en el robot sistemas de control

externos para modificar su comportamiento, si es necesario.

En el esquema se hace un énfasis especial al “*Control Reactivo*” por ser uno de los apartados (ver el Capítulo 5) más importantes de esta memoria. En dicho Capítulo se explica como se puede intervenir en el funcionamiento normal del robot por medio de sensores externos, para modificar su comportamiento.

2.3.2.1. Control básico

Los comandos básicos están diseñados para establecer una comunicación directa entre el ordenador y las tarjetas de control CM3 y CM4, con especial énfasis en el control de los microcontroladores LM629, mediante unas librerías de control diseñadas específicamente para ello previamente en el Departamento de Control Automático del IAI-CSIC. Las librerías están diseñadas para ser utilizadas por niveles de control superiores.

Tabla 2.5: *Funciones del nivel de control básico.*

Nivel	Funciones
Control básico	<ul style="list-style-type: none">● Lectura de posiciones● Lectura de entradas digitales● Lectura de señales analógicas● Salida de señales digitales● Salida de señales analógicas● Movimientos de articulaciones en posición● Movimientos de articulaciones en velocidad

Las funciones establecidas en el control básico (ver Tabla 2.5) son las que generan la activación de los actuadores de las patas del robot por medio de un control de posición o de velocidad según sea necesario. También es posible activar señales analógicas o digitales para generar los movimientos en distintos actuadores establecidos para los procesos de perforación (ver Apéndice D) o para el control de elementos externos.

También se encuentran las funciones para leer las posiciones de las diferentes articulaciones del robot. Estas señales son imprescindibles para el control del resto de los niveles de software puesto que con ellas se cierran la

mayoría de los lazos de realimentación. Por esta razón es posible acceder a este nivel de software desde módulos superiores como los de control externo, el control cinemático y la generación de movimientos que se explican a continuación.

2.3.2.2. Control cinemático

En un nivel superior se encuentra el control cinemático. Está integrado por las funciones diseñadas para realizar conjuntos de movimientos complejos de las articulaciones, como lo son las trayectorias en línea recta o los movimientos coordinados. Para lograr mantener un control sobre los límites cinemáticos se han diseñado funciones de advertencia cuando comandos de niveles superiores intentan acceder a posiciones erróneas, manteniendo la seguridad del sistema. Estas funciones están diseñadas principalmente para el control de los modos de locomoción.

Tabla 2.6: *Funciones del nivel de control cinemático.*

Nivel	Funciones
Control cinemático	<ul style="list-style-type: none"> ● Detección de límites cinemáticos ● Detección de errores de posición ● Generación de trayectorias de las patas en línea recta ● Detección del suelo ● Movimiento del cuerpo del robot en posición en X, Y, y Z ● Movimiento del cuerpo del robot en velocidad en X, Y, y Z ● Transferencia de las patas en modos de locomoción ● Orientación del cuerpo

Es posible acceder a las funciones del control cinemático (ver Tabla 2.6) desde niveles superiores para, por ejemplo, conocer las posiciones de las patas o del cuerpo del robot y secuenciar los movimientos de las mismas patas en coordenadas cartesianas o referidas al sistema de coordenadas internas del robot. En este nivel es en donde se implementan las matrices de transformación homogéneas que modelan la cinemática directa e inversa

Tabla 2.7: *Funciones del nivel de generación de movimientos.*

Nivel	Funciones
Generación de movimientos	<ul style="list-style-type: none"> • Inicialización de posiciones • Inicialización de movimientos • Modos de caminar discontinuos • Modos de caminar continuos • Modos de escalar • Modos de cambios de trayectoria • Sistemas de parada • Tareas de perforación • Información del estado del robot

de las patas y las relaciones (ver la sección 2.1.3) que permiten el cambio de sistema de referencia.

Las funciones de este nivel están diseñadas para que el desarrollo de modos de locomoción o de movimientos complejos sea mucho más simple puesto que todos utilizan las mismas funciones. Por ejemplo, si se quiere realizar un modo de caminar continuo (ver la sección 4.1.6) o discontinuo (ver la sección 4.1.5) en este nivel es posible encontrar las funciones adecuadas para lograrlo, como la generación de trayectorias de las patas o mover el cuerpo en diferentes posiciones, estableciendo normas de funcionamiento durante su ejecución.

2.3.2.3. Generador de movimientos

El generador de movimientos contiene comandos de alto nivel orientados al uso de componentes externos de comunicación para el control del robot. Este nivel es el de mayor importancia puesto que actúa como modelo del sistema con el que se pueda contar para controlar el robot externamente o por medio del control reactivo. En él se definen, con comandos simples, la secuencia de movimientos complejos mediante el uso de jerarquías inferiores para la generación de los modos de locomoción (ver Tabla 2.7).

Para la locomoción de Roboclimber es necesario generar estrategias de control en las que se asegure una locomoción segura y que además puedan

ser llamadas desde dispositivos remotos, mientras sea posible, como por ejemplo solicitar el envío del estado de la máquina para informar al operador acerca del estado del robot. Es posible ejecutar los sistemas de locomoción (expuestos con mayor detalle en el Capítulo 4) por medio de las funciones del sistema creadas en el nivel de software cinemático, mientras se establece una supervisión del estado del robot analizando la información proporcionada por los sensores externos. Por esta razón este nivel tiene una comunicación directa con el nivel básico del software y puede leer la situación actual del robot en cualquier instante.

En las funciones del modo de locomoción como es la del modo de caminar discontinuo de operación normal está implícito el hecho de realizar el control de estabilidad del robot, por ejemplo, por medio de los sensores de detección del suelo, ya que después de hacer la transferencia de una pata, y por razones de seguridad, el sistema debe cerciorarse de que las cuatro patas estén en contacto con el suelo.

Una de las condiciones más importantes de las funciones de este módulo es que sobre éstas se debe poder generar una conexión entre los comandos generados por operadores remotos a través de las “funciones externas” o establecer distintos tipos de comportamientos deseados por medio del “control reactivo”, estableciendo las prioridades para su funcionamiento y determinando la detección de errores durante el proceso de ejecución de movimientos.

2.3.2.4. Tareas compuestas

El diseño de las tareas compuestas, que es una jerarquía superior en la estructura de control, se ha diseñado para crear un vínculo entre las necesidades de operación del sistema remoto y los comandos desarrollados en los módulos del control del robot. No importa el tipo de comunicación que se requiera entre el operario y el robot, las tareas compuestas son independientes de cualesquiera de las formas de acceso al sistema de control central, puesto que pueden ser programadas específicamente para las necesidades de cada una de ellas.

Dentro de los objetivos de Roboclimber está el de poder manipular el robot de manera remota, razón por la cual se ha diseñado un sistema basado en comandos o *Unidad de Control Remota* (UCR) (ver Figura 2.21) (Pezzuto et al. 2006) que mediante el Protocolo de Comunicación para Transferencia

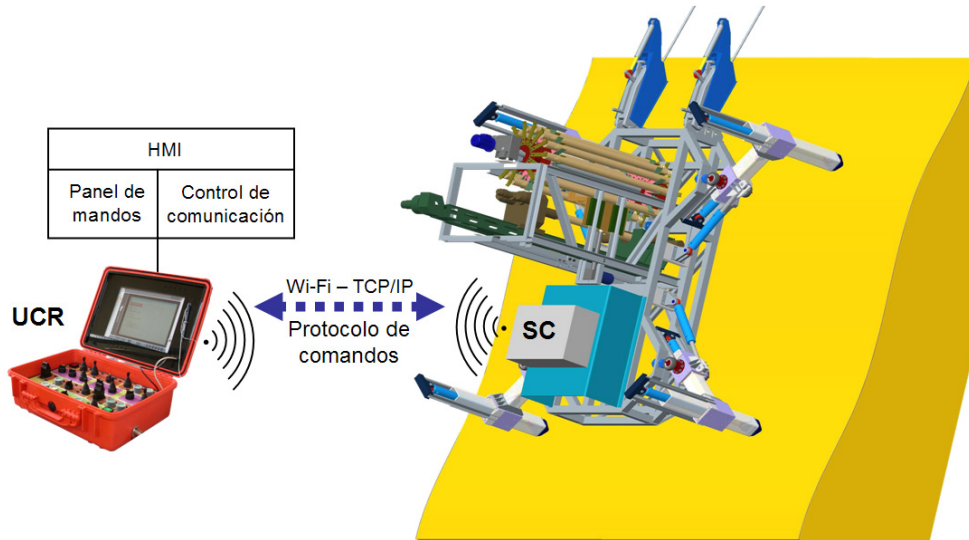


Figura 2.21: Estructura de la Unidad de Control Remota.

de datos (TCP/IP), sea capaz de enviar órdenes específicas al robot y recibir la información sobre su estado, generando a su vez una realimentación para que el operador pueda tomar decisiones acerca del comportamiento del robot (Armada, González de Santos, Jiménez, y Prieto 2000).

Dado que el operador debe comandar el robot de manera remota la comunicación entre la UCR y el robot se hace a través del estándar de comunicación inalámbrica Wi-Fi en base al diseño de un protocolo de comandos desarrollado específicamente para el proyecto Roboclimber entre el Departamento de Control Automático del IAI-CSIC y la empresa *Space Application Services* (SAS) (participantes en el consorcio de los proyectos Roboclimber y Saferdrill), para que se pueda realizar un control del robot con un nivel de seguridad amplio y con la posibilidad de usar más de un ordenador si es necesario. Así mismo, si es posible conectar el ordenador a bordo a Internet, también es posible controlarlo desde cualquier ordenador en cualquier lugar del mundo con alguna aplicación con la que se puedan enviar los comandos necesarios. El diseño y la arquitectura de este sistema se describe con mayor detalle en el Anexo C.

Una de las mayores ventajas de esta arquitectura es que dada la

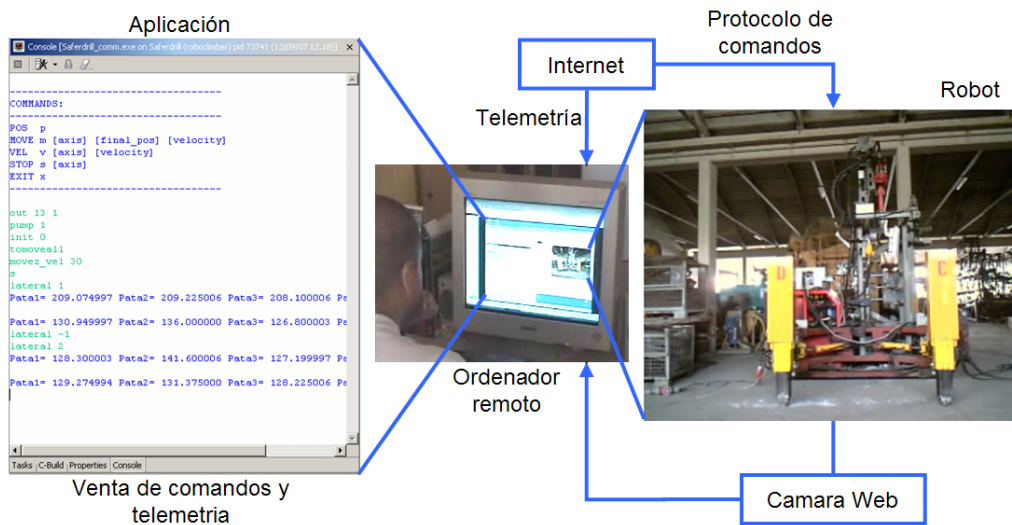


Figura 2.22: Control del robot a través de Internet (Izquierda operador remoto en los laboratorios del IAI-CSIC (Arganda del Rey) y derecha imagen del robot situado realmente en las instalaciones de Commachio (Italia)).

estandarización del protocolo de comunicación TCP/IP es posible acceder al robot de diversas formas. Por ejemplo, en la imagen (ver Figura 2.22) se ilustra como por medio de un puente el robot se conecta a Internet en una localización distinta al del operador y, por medio un ordenador, se puede usar una aplicación para enviar comandos y así controlar de forma remota el robot.

Capítulo 3

Percepción de las fuerzas de reacción en robots caminantes

Un componente básico de la locomoción en un robot caminante es el movimiento de las patas (recuérdese aquí que la locomoción a que nos referimos es una clase de locomoción que en la literatura se define como locomoción estática). El movimiento de una pata consta de tres etapas, primero la separación del suelo (fase de levantamiento), seguido por el movimiento que la desplaza a la nueva posición de apoyo deseada (fase de transferencia), y por último se realiza el contacto con el suelo (fase de apoyo). Si el suelo ofrece características ideales de laboratorio: superficie rígida y completamente horizontal, se puede conseguir una locomoción aceptable para un robot caminante generándola en base a la cinemática y sin tener en cuenta la interacción con el suelo. Sin embargo, incluso en estas condiciones ideales, las holguras y flexibilidades siempre presentes en todo sistema mecánico articulado (el robot nunca es infinitamente rígido), dan lugar a errores entre el posicionamiento teórico y el real, lo que se traduce en modificaciones de la orientación de la máquina. El fenómeno más frecuentemente observado en la práctica es que el robot va perdiendo altura en la dirección del movimiento al cabo de unos pocos pasos. En nuestro caso, al estar el robot concebido para la locomoción en terrenos naturales en los cuales la superficie del suelo es irregular y presenta propiedades físicas cambiantes, el control del vehículo sin tener en cuenta la interacción con el suelo es inviable. Un primer paso, muy sencillo, para tener en cuenta la interacción del robot con el suelo, es la detección todo-nada del mismo.

Podemos ilustrar brevemente la importancia de la detección todo-nada del suelo. La generación ideal de un modo de locomoción se traduce en posiciones de consigna a los accionamientos que mueven los grados de libertad. El sistema de control ejecuta dichas consignas hasta alcanzarlas con precisión. Esto implica que la pata en su camino de descenso buscando el apoyo del pie, realizará el recorrido propuesto sin error de posición. Si existe una irregularidad en el suelo, por ejemplo un hueco, en el momento de bajar la pata para hacer el contacto con el suelo, ésta se quedará a ras del hueco y por lo tanto no contactará con el suelo quedando la pata en el aire. Si en este momento comienza la transferencia de otra pata o hay un movimiento del cuerpo que modifique la posición del centro de gravedad del robot, éste puede desequilibrarse perdiendo su orientación. Esto implica que al ejecutar nuevos movimientos precalculados para las otras patas, en presencia de irregularidades del terreno, éstos pueden dar como resultado otras variaciones adicionales en la orientación del cuerpo, lo que puede resultar finalmente en una pérdida de estabilidad. Es por ello necesario disponer de algún sistema de detección que indique el contacto del pie con el suelo. En este caso, si el contacto se produce antes de finalizar el recorrido programado, al detectar el contacto el sistema de control deberá parar esa pata. Si, por el contrario, no se llega a contactar el suelo en el recorrido teórico, el sistema de control deberá seguir moviendo la pata hasta que se contacte con el suelo o se alcancen los límites máximos previstos para su recorrido.

Así pues, la no detección del contacto pie-suelo puede acarrear muchos problemas de estabilidad o de imprecisión en la orientación espacial del robot caminante, por lo que, cuando menos, debe incluirse un sistema fiable que permita al sistema de control saber cuando las patas contactan con el suelo. Esta información es básica para la generación de los modos de locomoción.

Sin embargo, como ya se ha anticipado al principio de esta discusión, aún empleando una detección del contacto pie-suelo, y dependiendo de las características del robot y de las condiciones del terreno, es posible que este método no resulte completamente eficaz. Así, es frecuente que, a pesar de emplear la información del contacto pie-suelo, se observe un progresivo error en la orientación del robot, llegando tarde o temprano a la inestabilidad. Esto se debe a que en la práctica el modelo cinemático o no es suficiente (por ejemplo se desprecia la flexibilidad de la estructura del cuerpo) o las dimensiones reales difieren de las teóricas (González de

Santos y Jiménez 1995)(Jiménez y González de Santos 1997). En estas circunstancias se suele recurrir, en la práctica, a restaurar la posición inicial del robot después de un determinado número de pasos, número que se decide experimentalmente. Obviamente esto no constituye la mejor solución posible al problema planteado, aunque lo atenúa.

Las causas que originan la indeterminación del contacto pie-suelo están en los cambios en las condiciones físicas tanto de la estructura mecánica del robot como de los distintos suelos en los que se debe desplazar, y/o en la presencia de perturbaciones externas. Un robot de las características y dimensiones de Roboclimber puede ser útil en muchas aplicaciones. Por ejemplo, puede emplearse como un vehículo para transportar personas, materiales o herramientas a sitios de difícil acceso atravesando terrenos con un alto grado de irregularidad. Otro ejemplo se da cuando se desinstala el sistema de perforación situado a bordo. Este sistema supone casi un tercio del peso del robot lo que, por supuesto, afecta directamente el centro de gravedad del robot y debe ser tenido en cuenta en el cálculo de los modos de caminar. Estas situaciones implican cambios sustanciales en la masa del robot y en su distribución en el chasis, y, por consiguiente, en una variación de la posición del centro de gravedad. Otro aspecto a considerar es la elevada masa de cada pata y la torsión de la estructura del chasis. En estas condiciones, la estabilidad del robot puede verse comprometida rápidamente si el método empleado para la detección del suelo es solamente un sensor todo-nada.

Así pues, ya que nuestro objetivo es caminar sobre terreno natural, es necesario analizar y mejorar los métodos existentes de detección del suelo. Por esta razón, en investigaciones anteriores se ha planteado el problema de la medida de las fuerzas en robots caminantes (ver sección 1.5). La medida de las fuerzas de reacción puede servir para controlar la interacción pie-suelo o para modificar la impedancia global del sistema robot-suelo. También es posible calcular, en tiempo real, la situación actual de la carga en el robot.

Para complementar esta introducción vamos a ilustrar con un ejemplo la problemática a que hemos hecho referencia. Un efecto muy claro del cambio del peso y por consiguiente, del centro de masa en el robot, se encuentra en el modo de caminar continuo. En las primeras etapas de la fase de experimentación se realizó la comprobación de todos los modos de caminar (ver sección 4.1), incluyendo el del modo de caminar continuo, sin tener instalado el sistema de perforación a bordo. Cuando se instaló el

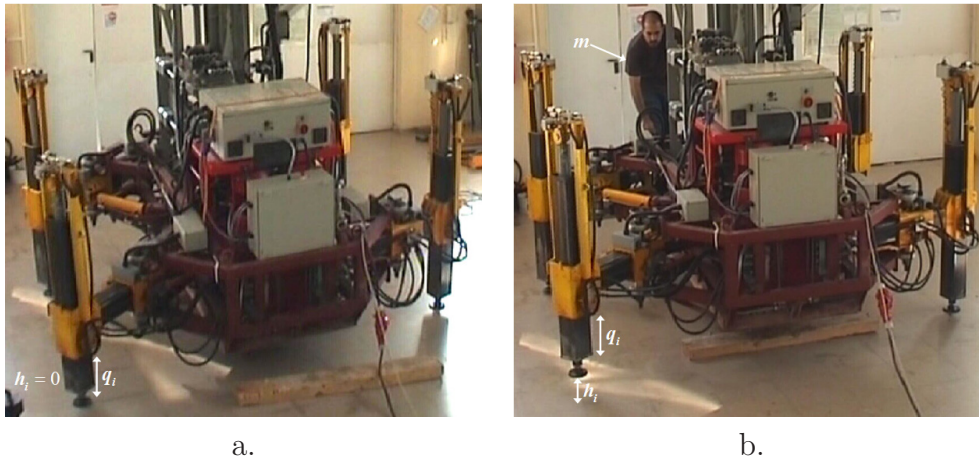


Figura 3.1: Intento de vuelco del robot durante un modo de caminar continuo.

sistema de perforación y se realizaron las pruebas de nuevo, en una de las transferencias del modo de caminar continuo el robot se desestabilizaba generando un par de vuelco entre las patas 1 y 4 cayendo sobre la pata 3 (ver Figura 3.1a), por lo que la pata no se separaba de la superficie al realizar la transferencia.

Este problema puede haberse presentado por varios motivos. El primero es que la proyección del CDG no se encuentre en ese instante dentro del polígono de apoyo. Al realizar el diseño mecánico de la estructura del robot se intentó ubicar el CDG en el centro geométrico del robot, pero en la fase de construcción se han hecho varios cambios con respecto al diseño original. Teniendo en cuenta que el MEL del robot en un modo de caminar continuo es de sólo 41 mm , es posible que el centro de gravedad esté fuera del polígono de apoyo. Pero si se tienen todas las patas en la misma posición, el cuerpo del robot está estáticamente estable y se realiza la transferencia de la misma pata, el robot se equilibra. Lo que significa que los efectos dinámicos durante un modo de caminar continuo están afectando al sistema.

Una posible solución es añadir una masa m en el lado opuesto de la dirección del vuelco para equilibrar el robot (ver Figura 3.1b). Pero, por supuesto, el robot debería estar capacitado para lograr solucionar estos inconvenientes de forma autónoma. Para tratar de solventar estos problemas, se han realizado pruebas con distintos sensores con los que se

puede medir la fuerzas que están actuando sobre las articulaciones verticales del robot. De esta forma debería ser posible, por ejemplo, medir el centro de masa del robot en tiempo real para poder plantear soluciones o alternativas en el control de los modos de caminar (Gálvez et al. 2000).

En el apartado 5.1 de esta memoria se ilustra cómo pueden afectar los obstáculos en los distintos modos de caminar del robot dependiendo de los diferentes tipos de suelos (Maza et al. 1997) y de terrenos, analizando una posible solución para la adaptación por medio de sensores de medida indirecta. Pero también existe la posibilidad de detectar obstáculos de forma directa si, por ejemplo, al estar la articulación de rotación en movimiento, la pata toca un obstáculo rígido, si no se detecta el obstáculo la fuerza de reacción puede llegar a desestabilizar el robot o a deformar la estructura mecánica de éste. Dada la estructura cinemática de la pata (ver sección 2.1.3), este problema se puede solucionar midiendo las fuerzas de reacción de la articulación de rotación.

Este capítulo de la memoria se centra pues en el problema de la percepción de las fuerzas de reacción en robots caminantes, y constituye la base y el paso lógico previo para el diseño de las estrategias de control reactivo que se presentan en el capítulo 5.

La medida de las fuerzas de reacción puede hacerse de forma indirecta, en base al empleo del error de posición, por ejemplo, o de forma directa. Cada una de estas alternativas presenta ventajas e inconvenientes, y grados de dificultad variables en cuanto a la sencillez o complejidad en el procesado de las señales. Estos temas serán objeto de un análisis detallado.

3.1. Sistema de detección del suelo, diseño de los pies y corrección del error de posición en la detección

Se ha diseñado un sistema de detección pasivo del suelo que se compone de cuatro elementos (véase Figura 3.2):

- **Base interior:** Es en donde se conecta el pie a la pata.
- **Muelle:** Es el mecanismo de recuperación de la detección y se aloja entre la base interior y la exterior.

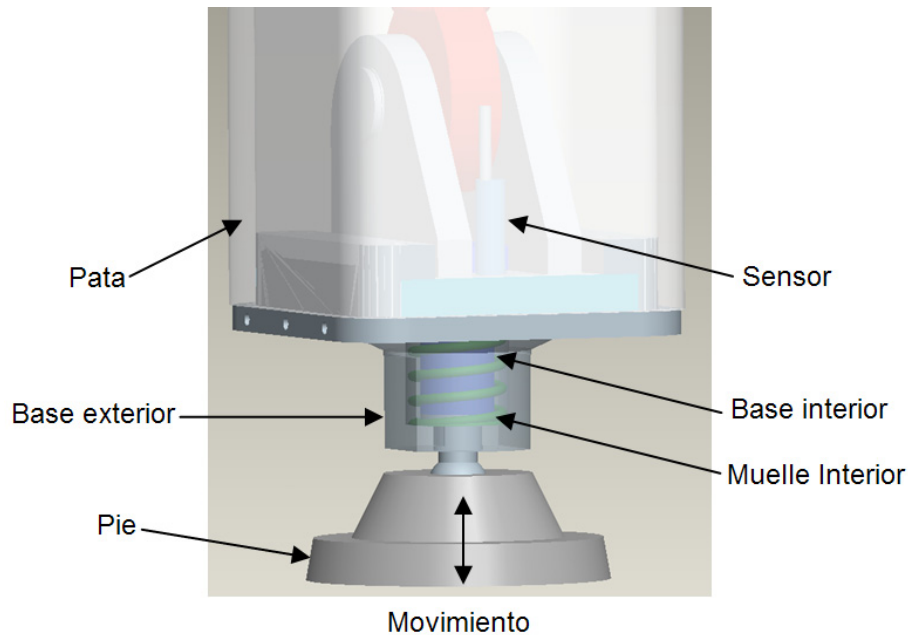


Figura 3.2: Sistema de detección del suelo.

- **Base exterior:** Es la parte que activa el sensor y recubre el muelle.
- **Sensor inductivo (OMRON® E2EL):** Se activa cuando el pie toca el suelo venciendo la fuerza del muelle y desplazando la base exterior.

Cuando la pata baja y el pie hace contacto con el suelo, se produce un leve movimiento de alrededor de unos 4 mm , de tal manera que la base exterior, sin llegar a tocar el sensor inductivo, tenga la capacidad de activarlo, enviando una señal al sistema de control. Por supuesto, cuando la pata sube y el pie deja de tocar el suelo el sensor se desactiva, al separarse la base exterior del sensor por la acción del muelle. La característica principal de este mecanismo es que, por medio de su sistema de recuperación es capaz de trabajar tanto en superficies horizontales como en superficies inclinadas.

Otra ventaja del diseño del mecanismo de detección del suelo es la posibilidad de incorporar con facilidad distintos tipos de pies puesto que se acoplan al sistema por medio de un solo tornillo. Se han diseñado distintos tipos de pies para las diferentes pruebas realizadas con Roboclimber.

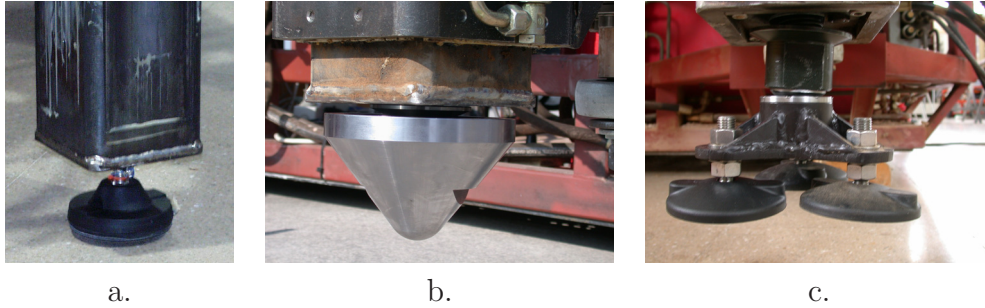


Figura 3.3: Tipos de pies. a) Soporte simple, b) Cónico y c) Con apoyo en triángulo.

Durante la fase inicial de la investigación en la que se han realizado experimentos en un entorno controlado y de condiciones óptimas de laboratorio, ha sido posible usar una base simple con una rótula (ver Figura 3.3a). Esta misma solución ha sido probada en terrenos irregulares y superficies menos rígidas con resultados desfavorables puesto que el peso del robot lograba enterrar los pies en la tierra durante su locomoción.

Tabla 3.1: Tabla de corrección del error de posición en la detección del suelo.

Pata	$E_{medido} (mm)$	$E_{promedio} (mm)$
Pata 1	52.77	52.93
	52.96	
	53.05	
Pata 2	38.87	38.89
	39.05	
	38.76	
Pata 3	48.58	48.59
	48.53	
	48.65	
Pata 4	49.87	49.98
	49.98	
	50.09	

Por esta razón se han diseñado otros dos tipos de pies adicionales. El primero, el cónico (ver Figura 3.3b), ha sido diseñado tanto para los modos de escalar en montañas rocosas como en los modos de caminar en terrenos muy irregulares y de distintas propiedades mecánicas. Su diseño está pensado para trabajar en condiciones extremadamente rigurosas puesto que protege el mecanismo de detección del suelo de los elementos externos. Es fijo y no posee un GDL más (como el de una rótula) disminuyendo así en número de piezas móviles y disminuyendo también la posibilidad de problemas mecánicos. Con su forma cónica es posible caminar por terrenos altamente irregulares con distintos tipos de suelo evitándose así posibles obstrucciones.

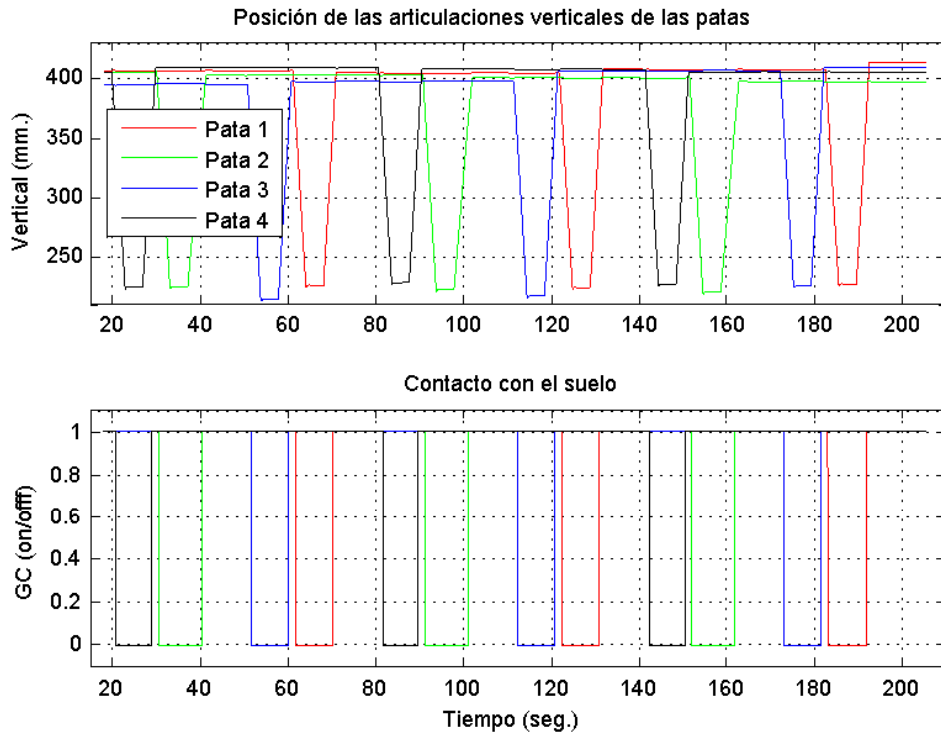


Figura 3.4: Modo de caminar discontinuo con corrección de errores para la detección del suelo.

Una desventaja de los tipos de pies cónicos es que debido al elevado peso del robot es posible destruir las superficies hechas de hormigón o de

baldosa. Por esta razón se ha diseñado un sistema alternativo para caminar en el que se utilizan tres bases similares al primer diseño (ver Figura 3.3c), pero con una disposición triangular, aumentando así el área de apoyo contra el suelo. Tiene un sistema de adaptación al terreno y a las inclinaciones del cuerpo puesto que incorpora un GDL adicional pasivo generado por una rótula, aumentando el nivel de agarre necesario para la propulsión del robot durante la locomoción.

Al emplear el sistema de detección en un modo de caminar (ver Capítulo 4) era posible observar que cuando una pata hacía contacto con el suelo (GC, *Ground Contact*), lo hacía antes de lo esperado. Esto se debe a la deformación que sufre la estructura del robot al levantar una pata. Cuando una pata deja de hacer contacto, dado que la pata está en el extremo de la estructura y esta puede llegar a pesar alrededor de 200 Kg , el soporte de acero que sostiene la pata y el cuerpo del robot flexionan disminuyendo la distancia que existe entre el cuerpo del robot y la superficie. Por eso, si no se realiza una corrección, con cada paso se irá reduciendo la distancia inicial entre el cuerpo y la superficie.

Puesto que esta deformación es diferente en cada fase del paso y en cada pata, la corrección se ha hecho a partir de medir de forma repetida el error en la detección del suelo en cada posición y dirección de desplazamiento del modo de caminar discontinuo de dos fases, en el que se levanta una pata cada vez.

Como se ilustra en la Tabla 3.1, algunos de los errores pueden ser de hasta 50 mm . Si la distancia máxima entre el cuerpo y la superficie es de 500 mm , esto significa que si no se hicieran las correcciones necesarias, en 10 pasos el cuerpo del robot haría contacto con el suelo.

Se han realizado múltiples experimentos para comprobar la utilidad de esta estrategia. El primer experimento se ha realizado en condiciones ideales, es decir, bajo condiciones de laboratorio. Como resultado, en la gráfica (ver Figura 3.4) se muestra como cada pata al detectar el suelo realiza una corrección permitiendo que la posición vertical se mantenga correctamente alrededor de la posición con la que cada pata inició el desplazamiento.

Tras analizar los resultados obtenidos en el laboratorio se han realizado experimentos en condiciones de trabajo reales (ver Figura 3.5). En este caso el robot pasa primero de una zona en la que el suelo es irregular y con una superficie blanda, después a tener que subir a un nivel superior en la que se encuentra con una vía con superficie rígida, y, por último, pasa a una



Figura 3.5: *Modo de caminar discontinuo con corrección de errores para la detección del suelo.*

superficie irregular blanda teniendo que bajar de nuevo a un nivel similar al anterior.

A pesar de que los resultados de estos experimentos permiten concluir que esta estrategia de corrección del error de posición en la detección con sensores todo-nada es adecuada para trabajar en terrenos irregulares con un margen de maniobra aceptable, persisten las limitaciones inherentes al método, por lo que en los siguientes apartados se proponen diversos métodos para la medida, directa o indirecta, de las fuerzas de reacción.

3.2. Medición de fuerzas en función de la deformación mecánica de elementos estructurales

La primera aproximación realizada para obtener la información de la fuerza de contacto entre las patas y el suelo, ha sido la medición de la deformación de algunos elementos estructurales de la articulación vertical de las patas del robot que son más sensibles a las variaciones de carga (Montes et al. 2004)(Montes et al. 2006)(Montes 2005). Esta medición se lleva a cabo por medio de transductores que, al deformarse, producen un cambio en la resistencia eléctrica y por consiguiente una diferencia de potencial que puede ser medida, amplificada y filtrada para su posterior conversión en una señal de fuerza. Estos transductores son elementos resistivos de alta precisión, denominados galgas extensiométricas, y cambian el valor de su resistencia cuando se deforman. Si se adhieren las galgas a un elemento mecánico elástico que esté soportando una carga y que se esté deformando, dependiendo de varios factores como el tipo de material y la sección transversal de este elemento, es posible deducir la fuerza que está actuando sobre él.

Existen múltiples técnicas para el montaje de las galgas sobre un elemento elástico dependiendo del tipo de medición o de aplicación (Dally et al. 1993), siendo las galgas el elemento más usado para la medición de fuerza. En primer lugar se realizó un análisis del efecto de las fuerzas de carga sobre una pata para determinar cuales eran la zonas más propicias para su medición. La articulación vertical de la pata se extiende cuando se aplica una presión hidráulica dentro de la camisa *A* del cilindro hidráulico,

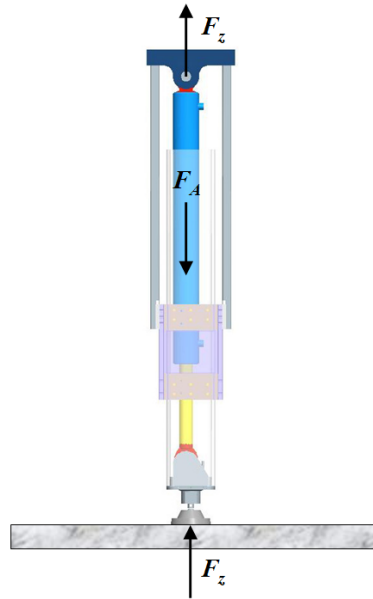


Figura 3.6: Esquema de las fuerzas que actúan sobre la estructura vertical de una pata.

generando una fuerza de empuje F_A . Cuando el pie ejerce una fuerza sobre el suelo, soportando la carga del robot y según el análisis de fuerzas (véase Figura 3.6), los pies, los elementos de soporte laterales y el soporte superior deben sufrir algún tipo de deformación.

Se realizó un análisis por elementos finitos previo para comprobar si era posible percibir alguna deformación en cualquiera de estos elementos estructurales de la pata, y si era así, proceder a realizar una medición real. Para el estudio se usó el módulo *Pro/Mechanica*[®] del software de diseño y simulación de sistemas mecánicos *Pro/Engineer*[®] (PTC 2006). Este análisis se realizó con distintas fuerzas sobre los diferentes elementos mecánicos de las patas, teniendo en cuenta el tipo de material. En la imagen (véase Figura 3.7b) se muestra la deformación ocasionada tanto en los soportes laterales como en el soporte superior, por una fuerza F_z de 7500 N que es la carga media que soporta una pata. También se ha hecho un estudio del pie simple, con la misma carga, para comprobar su posible comportamiento (ver Figura 3.7b).

Hay que hacer notar que en el análisis mediante simulación de la

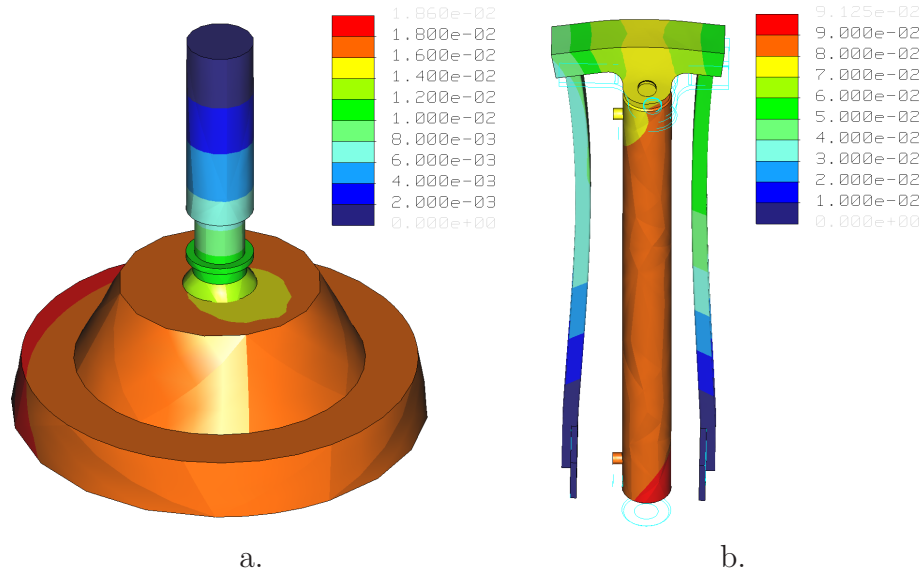


Figura 3.7: Análisis por elementos finitos en la estructura vertical de una pata.

estructura la deformación de los materiales está amplificada más de 500 veces para poder comprender visualmente el comportamiento de los elementos. El desplazamiento máximo calculado en la estructura de acero es de alrededor de una décima de milímetro y en la barra del pie de soporte es de casi dos décimas de milímetro. En cualquiera de los casos, la deformación es suficiente para poder aplicar las galgas extensiométricas como transductores para la medición de las fuerzas.

Del resultado del análisis por elementos finitos, se deduce que, con diferencia apreciable, la mejor resolución en la medición de la fuerza se obtendría de la medición de la deformación en la barra del pie, porque al estar en contacto directo con la superficie, se disminuye la influencia de otros componentes dinámicos (*e.g.* pérdidas de carga hidráulica, fricciones, deformaciones intermedias, etc.). Sin embargo, esta localización presenta el inconveniente de ser difícil de instalar en el pie, y para el uso real de la máquina es poco robusto al estar muy expuesto al medio. Además, la transmisión de la señal, que es muy débil, hasta el amplificador de instrumentación (imposible de situar en el pie) implica la contaminación de la misma por ruido. Por este motivo se realizó la comparación de la

medida de las deformaciones en la barra del pie y en el soporte superior, en el que, aunque la medición que proporciona es menos precisa, la robustez y la facilidad de la instalación aumentan.

Para cada una de las posiciones susceptibles de medición se ha implementado una forma de instalación distinta de las galgas, pero con el mismo principio que es la medida de la tensión conectando las galgas según un puente de Wheatstone.

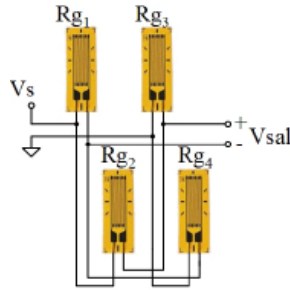


Figura 3.8: Esquema de un puente de Wheatstone formado por galgas.

En el caso de la barra del pie las galgas Rg_1 y Rg_3 se colocan transversalmente mientras que las galgas Rg_2 y Rg_4 (ver Ecuación 3.1) se colocan longitudinalmente:

$$Rg_1 = Rg_3 = Rg \left(1 + \frac{GvF}{AE} \right) \text{ y } Rg_2 = Rg_4 = Rg \left(1 - \frac{GF}{AE} \right) \quad (3.1)$$

Por consiguiente, la tensión de salida del puente de Wheatstone es:

$$V_{sal} = V_s \left(\frac{\frac{GF}{AE}(v+1)}{2 + \frac{GF}{AE}(v-1)} \right) \quad (3.2)$$

en donde G es el factor de la galga y V_s es la tensión de alimentación del puente.

Esta es una configuración clásica de celda de carga para medir las fuerzas en la dirección a la barra (ver Figura 3.9). La fuerza aplicada causa un

esfuerzo de compresión $-F/A$, donde A es el área de la sección transversal de la barra. Esta situación de carga produce una deformación longitudinal de compresión $e_l = -F/AE$, que viene acompañada por una deformación de tensión transversal $e_T = \nu F/AE$, donde E y ν son el Módulo de Young y el coeficiente de Poisson para el material con el que se ha fabricado la barra, respectivamente (Bentley 1995).

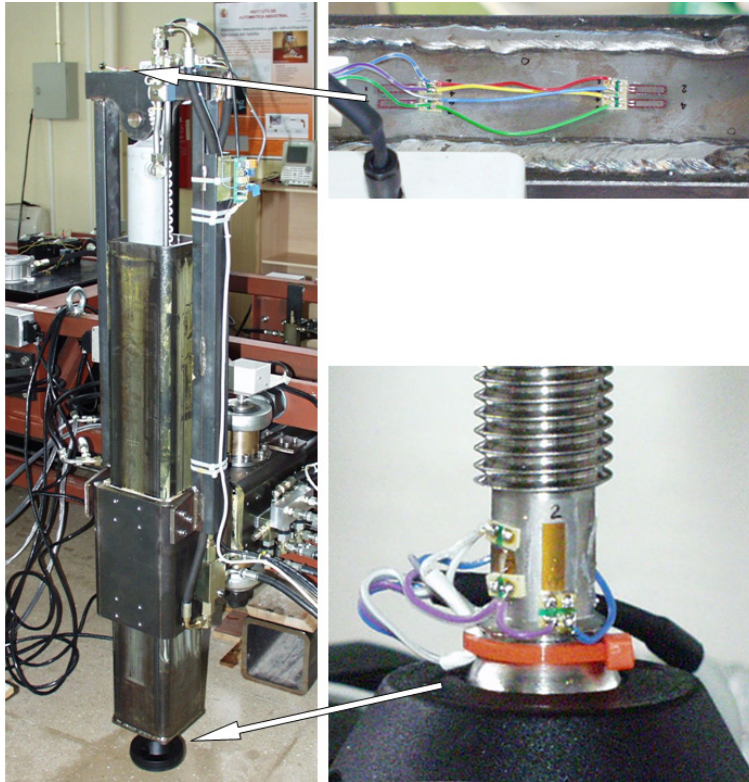


Figura 3.9: Instalación de las galgas en la barra del pie y en la estructura superior de la articulación vertical de Roboclimber.

Para la instalación del conjunto de galgas en la zona de mayor deformación de la parte superior de la pata (ver Figura 3.9), al tratarse de una disposición estructural similar a una viga con dos apoyos, sólo fue posible utilizar una configuración de medio puente de Wheatstone, lo que se traduce en un decremento en la sensibilidad de la medida. Para

compensarlo se ha añadido otro medio puente de referencia en una zona de menor deformación; este medio puente también sirve como sistema de compensación de temperatura en la medida.

Aunque es posible hallar la relación de la medida de las galgas y la fuerza con respecto a la configuración mecánica de forma teórica, es aconsejable realizar una calibración experimental en la que se asimilen los posibles errores de fabricación mecánica, instalación, amplificación, etc. (Montes et al. 2006)(Montes et al. 2004). Esta calibración experimental se realizó en cada uno de los sensores de las patas a partir de la relación entre la medida de la tensión de salida en el puente de galgas y una lectura de fuerza realizada a través de un instrumento patrón, por medio de la siguiente función:

$$F = \left(\frac{1}{v_s} \right) K v + b \quad (3.3)$$

en donde K es la matriz diagonal de relación de fuerzas/razón de tensión normalizada, v es el vector de las diferencias de tensiones registradas por el sensor, v_s es la alimentación del puente de galgas que en conjunto con v forman la razón de tensión normalizada, y b es el vector de ajuste de compensación de fuerzas.

En la Figura 3.10 se muestran algunos resultados de la calibración de los sensores de fuerza comparando la medida realizada en las dos instalaciones de los sensores en las patas. Cada sensor muestra un comportamiento lineal y, es posible apreciar que, como era de esperar, la sensibilidad del sensor de fuerza colocado sobre la barra del pie es mayor que la del sensor de fuerza colocado sobre la parte superior de la estructura de la pata.

Para verificar la aplicabilidad de las galgas extensiométricas como sensores de fuerza, se han realizado una serie de experimentos que van desde la detección de obstáculos, pasando por el control de impedancia, hasta llegar a realizar un control de la estabilidad calculando el ZMP con resultados muy favorables (Montes 2005).

Uno de los experimentos más básicos y que está en línea con el objetivo de resolver los problemas de estabilidad del robot, ha sido el de la medición del centro de gravedad del robot a partir de la medición de las fuerzas. De

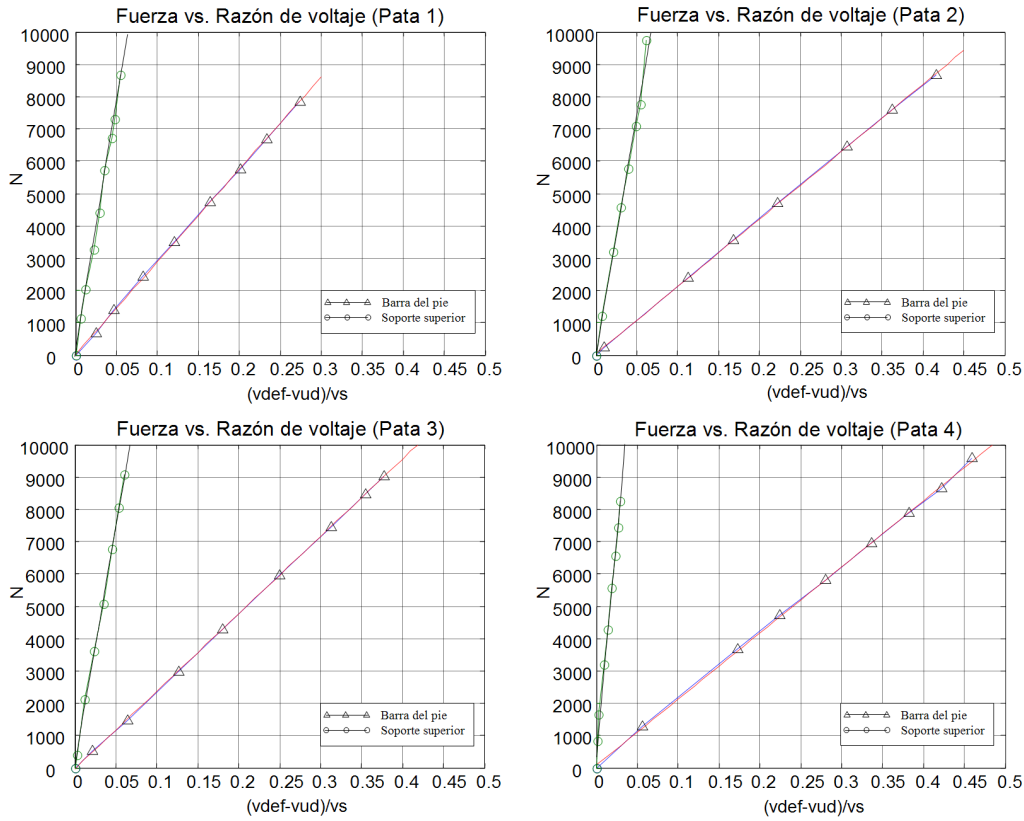


Figura 3.10: Resultados de la calibración de los diferentes sensores de fuerza.

acuerdo con la definición clásica en física:

$$x_o = \frac{\sum_{i=1}^n m_i x_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad y_o = \frac{\sum_{i=1}^n m_i y_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad (3.4)$$

donde m_i es la masa de cada segmento del robot; x_i e y_i , las distancias al centro de masa de cada segmento, y n el número de segmentos.

Para realizar el experimento se coloca al robot en una serie de posturas simétricas, en donde el centro geométrico del cuerpo del robot sea el centro

geométrico de la postura del mismo, y se mide la fuerza que en cada una de las patas. Calculando el promedio de fuerzas según la distancia entre cada una de las patas y el centro, es posible determinar la posición del centro de gravedad con respecto a los ejes x (plano transversal) e y (plano sagital).

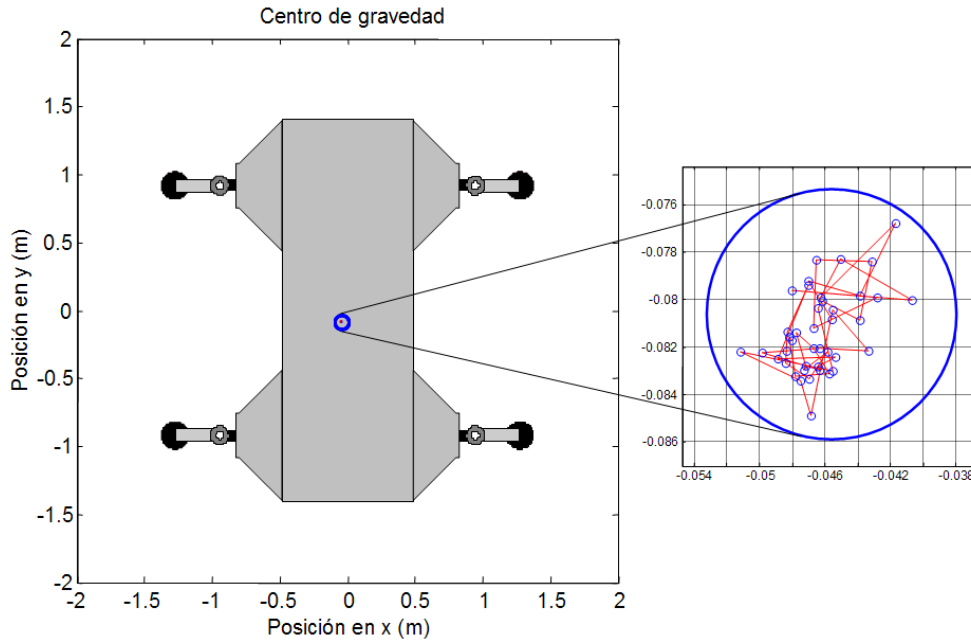


Figura 3.11: Centro de gravedad medido en Roboclimber.

Dado que en esta fase de la experimentación el peso total del robot era de 1973 Kg , como resultado de un cálculo por el método de aproximación de mínimos cuadrados, se determinó que el centro de gravedad en posición estática y simétrica está situado a -0.0464 m en el plano transversal y a -0.0813 m en el plano sagital, del centro geométrico del robot (ver Figura 3.11).

3.3. Medición de fuerzas según la presión hidráulica

A pesar de los buenos resultados obtenidos por la medida de la deformación de los distintos elementos en la estructura por medio de galgas extensiométricas y su empleo como sensores de fuerza (Montes et al. 2006), su instalación conlleva una importante desventaja: la falta de robustez en su implementación, sobre todo en un robot de servicios que debe caminar sobre terreno natural como Roboclimber.

Para solucionar estos inconvenientes, se ha abordado el estudio de otras alternativas en las que no se tenga que realizar cambios mecánicos drásticos (por ejemplo aligerar la estructura en el punto de medición), ni realizar inversiones altas para lograr una medición fiable de las fuerzas. Una de las posibles propuestas se ha derivado del análisis de las fuerzas que actúan sobre las patas (ver Figura 3.6). De este análisis se deduce que la extensión de la articulación prismática es generada por la presión que genera el fluido hidráulico en el interior del cilindro, y por lo tanto, dicha presión es la que genera la fuerza necesaria para soportar el robot.

Así pues, se ha determinado que una de las posibles soluciones al problema de la medición de las fuerzas en Roboclimber puede ser la de incorporar sensores que midan la presión hidráulica generada y por lo tanto deducir de este modo las fuerzas que actúan sobre la articulación. Los transductores más utilizados actualmente para convertir la presión hidráulica en una señal eléctrica son los transductores de presión. Las principales ventajas de estos sensores es que son relativamente económicos, fáciles de instalar, robustos y precisos.

3.3.1. Medición de fuerza empleando la presión hidráulica

Se ha seleccionado un transductor de presión hidráulica GEMS 2200 RGG100AA3UA (*Gems Sensors & Controls*) con un rango de medida entre $0 - 100 \text{ bar}$. Este sensor ha sido instalado, en primer lugar, en la entrada de la cámara A del cilindro hidráulico (ver Figura 2.15) de cada una de las articulaciones verticales de las patas del robot. Este sensor de presión se emplea para medir la presión que actúa sobre el área del pistón A_A y

así determinar la fuerza F_s que ejerce el vástago del cilindro hidráulico, deducida a partir de la ecuación de la presión (2.9),

$$F_s = P \cdot A_A \quad (3.5)$$

La tensión de salida del sensor de presión se aplica a un amplificador de instrumentación modular que combina alta precisión, bajo ruido, ganancia de alta precisión, coeficiente de baja ganancia de temperatura y alta linealidad. Al estar diseñado para el uso general de sensores, ha sido necesario realizar su calibración.

Primero se realizaron algunas pruebas de laboratorio para comprobar que la información de la tabla de especificaciones del fabricante (según la Tabla 3.2) concordaban realmente con la eficiencia del sensor y se determinó que era posible realizar una comparación directa de la tensión de salida del sensor con respecto a la tensión de salida del amplificador para calibrarlo.

Tabla 3.2: *Tabla de especificaciones según el fabricante del sensor de presión GEMS 2200.*

Precisión	0.25 %
Error Térmico	1.5 % de la escala completa
Tensión de salida	0 - 5 V
Temperatura de trabajo	-20 a 80°C
Tensión de alimentación	6.5 a 35 V

El proceso de calibración del amplificador consiste en la obtención de la tensión de salida del amplificador (o entrada para el conversor analógico digital) con respecto a la tensión de salida del sensor para cada pata. Para aplicar distintas fuerzas al vástago del cilindro hidráulico de una pata, se debe apoyar sobre la superficie dejando el resto de las patas en el aire. Al aumentar la extensión de la pata se va aumentando poco a poco la fuerza de contacto mientras se guardan los valores de la tensión medida en tiempo real. Por último, y para completar la función de la medida de la presión $P = k(aV_{in} + b)$ (en donde k es el factor de conversión de la presión y V_{in} es la tensión leída por el sistema de control), se realizó una regresión lineal (ver Figura 3.12) con la herramienta *Curve Fitting Tool* de *MATLAB*®

(The MathWorks 2006) utilizando los valores de salida del sensor V_{out} con respecto a los valores de entrada del amplificador V_{in} obtenidos (ver Tabla 3.3).

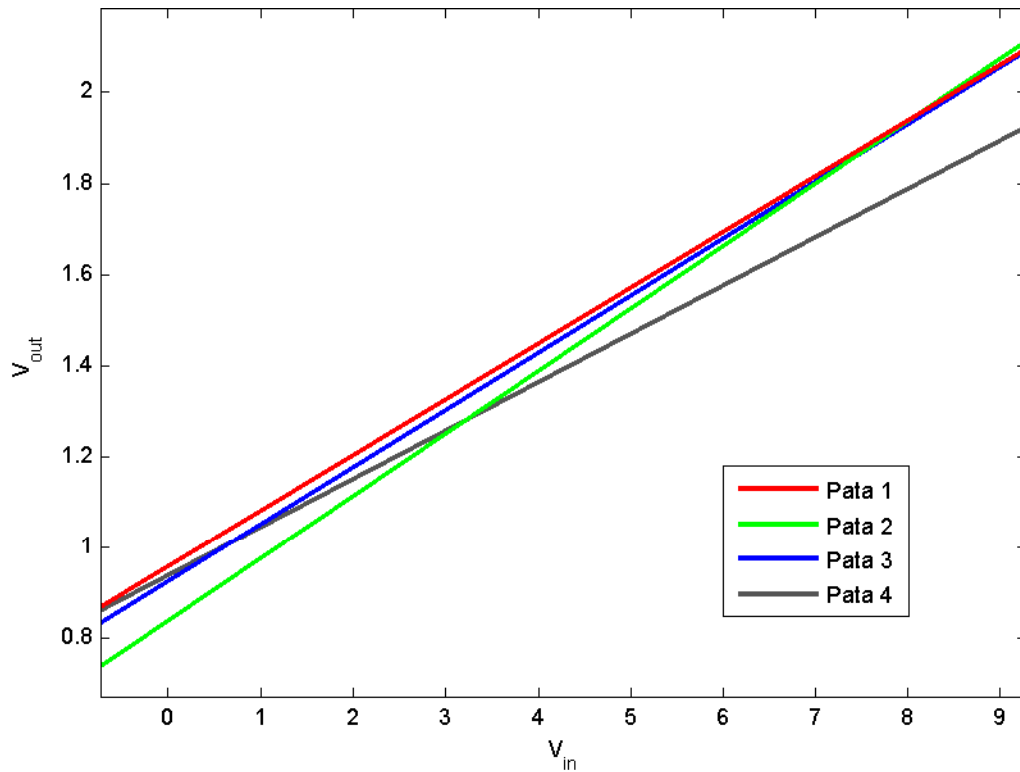


Figura 3.12: Regresión lineal para la calibración de los sensores de la cámara A de los cilindros hidráulicos.

Una vez hecha la calibración de los sensores de presión se han realizado diversos experimentos para evaluar su funcionalidad para determinar las fuerzas de soporte de las patas tanto en condiciones estáticas (robot parado en distintas configuraciones) como dinámicas (robot en movimiento). A continuación se ilustra un experimento para cada una de las condiciones de trabajo.

Tabla 3.3: Tabla de valores obtenidos por la regresión lineal durante la calibración.

Pata	a	b
1	0.1225	0.9589
2	0.1373	0.8395
3	0.1256	0.9261
4	0.1062	0.9392

▪ Robot en posición estática

Con el objeto de localizar el centro de gravedad del robot mediante la medida de fuerza en las patas por medio de los sensores de presión, se ha seguido la misma estrategia que se usó en el caso de las galgas extensiométricas donde el principio de medida era determinar la deformación de la barra del pie (ver sección 3.2). La estrategia consiste en colocar el robot en distintas posiciones geoméricamente simétricas, extender las articulaciones verticales hasta que las patas hagan contacto con el suelo, después hasta alcanzar una posición (altura) en la que el robot esté soportado por las patas y medir las fuerzas. Para determinar el centro de masa se emplea la formulación matemática ya conocida.

En la gráfica (ver Figura 3.13) se muestra un ejemplo de la medición de las fuerzas en el robot en donde, después de subir el robot hasta la altura deseada, y manteniendo fijas las posiciones de las patas (ver gráfico superior de la Figura 3.13), se observa como la señal de la fuerza medida tiende asintóticamente a un valor estacionario con gran lentitud (unos cien segundos). Dadas las diferencias lógicas en la construcción de las patas, y a que ni el robot ni la carga están distribuidos con una simetría perfecta, la medida de la fuerza es distinta para cada una de las patas. No obstante el comportamiento es similar en todas.

Una primera conclusión, a la vista de los resultados, es que con la medida de la presión en la cámara A para determinar la fuerza real se debe esperar un largo período transitorio. Una posible explicación es que en este caso tanto los elementos de la estructura mecánica como

los del circuito hidráulico (*e.g.* flexibilidad y longitud de las tuberías), se comportan como un sistema muelle-amortiguador. Este fenómeno se conoce como *efecto parasítico* (Armstrong-Helouvry 1991). En otras palabras, lo que ocurre es que la presión en la cámara *A* disminuye al redistribuirse de alguna forma por los diferentes conductos del sistema hidráulico.

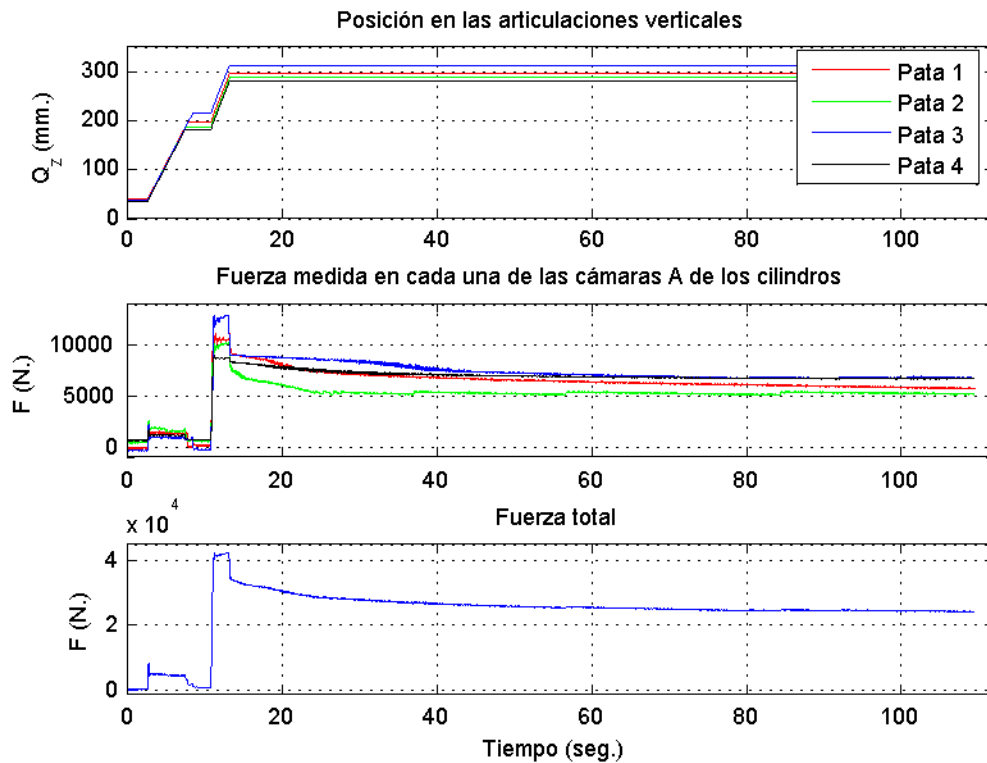


Figura 3.13: Medición de las fuerzas de soporte en las articulaciones verticales.

Se han realizado experimentos semejantes midiendo la presión en la cámara *B*, y se han obtenido resultados idénticos. Así pues, las medidas son válidas, pero el empleo del sensor en una sola cámara no es aconsejable para el control de fuerza en tiempo real, ya que la respuesta es muy lenta. Esto ha aconsejado, como se mostrará más adelante, el empleo de sensores de presión en ambas cámaras *A* y *B*

para emplearlos en un sistema de medida diferencial.

▪ Robot en movimiento

Para evaluar el comportamiento dinámico de los sensores de presión, se han realizado una serie de experimentos. La prueba más simple es medir la fuerza que actúa en el interior de la cámara A de una articulación vertical (en este caso en la de la pata 1) sin carga adicional, es decir cuando la pata está en el aire, y generar un movimiento por medio de una función sinusoidal de la velocidad:

$$\dot{q}_i = A\omega \sin(\omega t) \quad (3.6)$$

en donde A es la amplitud y ω es la frecuencia.

Como resultado de los experimentos, en la gráfica de la fuerza resultante (ver Figura 3.14), se puede observar que el comportamiento de la fuerza sigue lo esperado: cuando la pata se encoge (velocidad negativa) el rango de variación de la fuerza es más amplio ya que tiene que vencerse la gravedad, en cambio, cuando la pata se estira (velocidad positiva) la fuerza es menor al ser el movimiento a favor de la gravedad. También es aparente la presencia de fenómenos de fricción.

3.3.2. Análisis de la fricción en los actuadores hidráulicos.

Para poder comprender mejor la variedad de fenómenos físicos que influyen sobre el comportamiento del sistema servo-hidráulico tanto estática como dinámicamente, se deben realizar una serie de pruebas y simulaciones con el objetivo de enfocar el problema para cada caso en particular y lograr un modelo adecuado. El modelado de los fenómenos que afectan al sistema están basados en leyes físicas, como el balance de las masas en el volumen de aceite, las ecuaciones dinámicas de los elementos móviles, las ecuaciones para las turbulencias en el flujo, entre otros. En el modelo teórico del sistema hidráulico se intenta buscar cuáles son los fenómenos que más puede influir dinámicamente en su comportamiento.

Entre los factores que pueden contribuir se encuentran los siguientes:

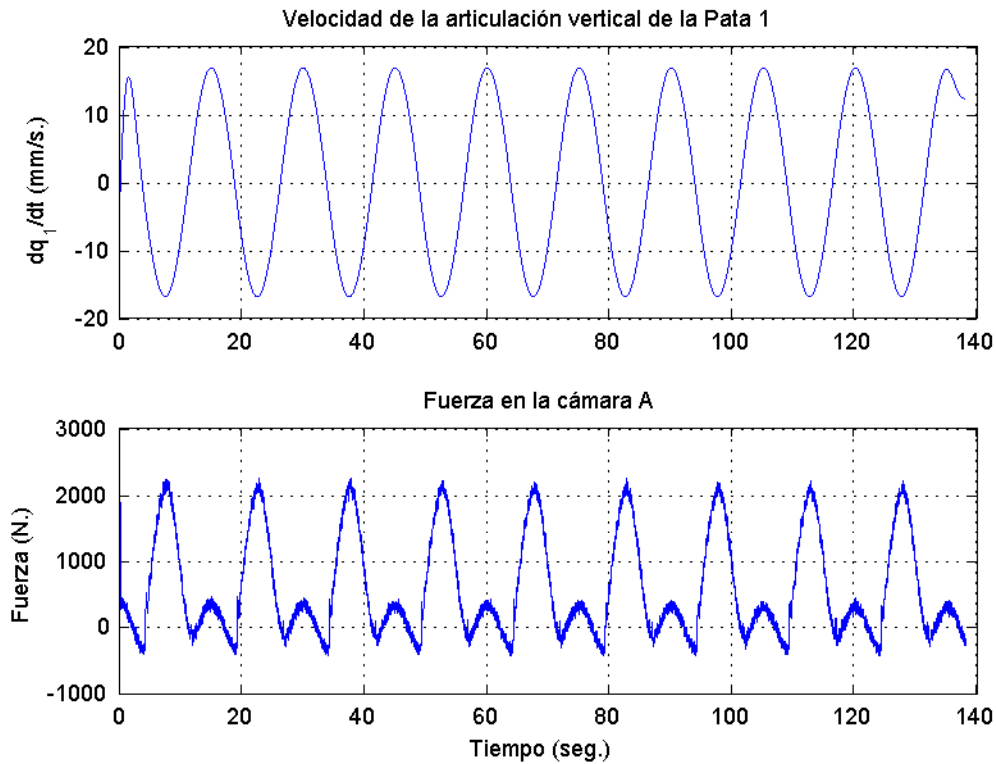


Figura 3.14: Medición de la fuerza dinámica en la cámara A de un cilindro hidráulico.

- las fuerzas de fricción dentro del cilindro hidráulico,
- la compresión del aceite,
- los efectos dinámicos de los distintos componentes del circuito hidráulico,
- la deformación de los elementos elásticos de la estructura mecánica del robot,
- el cambio en la temperatura del aceite, etc.

Como ya se ha indicado en la sección 2.2.6, el modelo de un servo-sistema hidráulico es no lineal y complejo, y de difícil empleo en la práctica. Por

esta razón se opta por emplear modelos linealizados en torno a un punto de funcionamiento. No obstante, si se pretende emplear la medida de presión para controlar la fuerza de interacción pie-suelo, deberemos investigar el problema de la fricción, y, si es posible, determinar un modelo lo más completo que pueda ser empleado en la práctica para mejorar la fiabilidad de las medidas de fuerza. En otras palabras, se va a realizar un esfuerzo importante encaminado a la obtención de una medida precisa de las fuerzas de interacción.

En los siguientes apartados se presenta con detalle el análisis y el modelado matemático de la fricción en un actuador hidráulico.

Como ya se ha ilustrado anteriormente (ver sección 2.2.3) se ha seleccionado un cilindro hidráulico diferencial para la actuación de las articulaciones de robot. Se le llama diferencial porque, aunque tenga el mismo diámetro interior en las camisas A y B , el volumen de la segunda es menor por la presencia del vástago. La diferencia en el volumen que pueden contener las cámaras da lugar a presiones distintas. Esta situación implica distinta fricción.

3.3.2.1. Modelo de la fricción en una cámara

Uno de los métodos estándar para contrarrestar la influencia de la fricción generada por el uso de fluido hidráulico (Armstrong-Helouvry 1991) sobre la medida de la fuerza durante el desplazamiento del vástago es modelando la fuerza de la fricción con respecto a la velocidad de desplazamiento del pistón \dot{x}_p según el modelo de Stribeck (1902):

$$\begin{aligned} F_f(\dot{x}_p) &= F_v(\dot{x}_p) + F_c(\dot{x}_p) + F_s(\dot{x}_p) \\ &= \sigma \dot{x}_p + \text{signo}(\dot{x}) \left[F_{c0} + F_{s0} \exp\left(-\frac{|\dot{x}_p|}{c_s}\right) \right] \end{aligned} \quad (3.7)$$

En esta función la fuerza de fricción se compone de tres partes: la fricción viscosa F_v con un coeficiente de fricción σ , la fricción de Coulomb F_c y la fricción estática F_s . F_{s0} y c_s (velocidad de Stribeck) son los parámetros de la fricción estática. Sin embargo, este modelo no tiene en cuenta la asimetría de la fricción en los cilindros diferenciales. Por este motivo se propuso un modelo modificado (Nissing 2002):

$$F_f(\dot{x}_p) = \begin{cases} \sigma^+ \dot{x}_p + \text{signo}(\dot{x}) \left[F_{c0}^+ + F_{s0}^+ \exp\left(-\frac{|\dot{x}_p|}{c_s^+}\right) \right] & \forall \dot{x}_p \geq 0 \\ \sigma^- \dot{x}_p + \text{signo}(\dot{x}) \left[F_{c0}^- + F_{s0}^- \exp\left(-\frac{|\dot{x}_p|}{c_s^-}\right) \right] & \forall \dot{x}_p < 0 \end{cases} \quad (3.8)$$

Se pueden identificar los parámetros de la fricción experimentalmente hallando la relación entre la velocidad y la fuerza medida. Generalmente se debería realizar esta identificación cuando el cilindro está sin carga y en posición horizontal y así hallar los parámetros de la fricción real en el cilindro. Pero en nuestro caso se ha realizado el modelado de la fricción con los cilindros en posición vertical y sin haber sido desinstalado de su estructura, con el objetivo de realizar una parametrización teniendo en cuenta los efectos de la estructura mecánica en el sistema, como el peso, el rozamiento del cuerpo de acero interno con el externo y la posición vertical de trabajo.

Por eso, para la identificación del modelo de la fricción de una de las articulaciones verticales del robot, se ha movido un cilindro en distintas velocidades positivas y negativas (es decir extendiendo y encogiendo el cilindro respectivamente), sin llegar a tocar el suelo, mientras se medía la fuerza en la cámara A .

El resultado es una función similar a una típica curva de Stribeck (ver Figura 3.15) pero con algunas peculiaridades. En la gráfica se ilustra como para cada una de las velocidades de medición, la fuerza en la cámara F_A no se enfoca sobre un solo punto sino en una línea amplia. Esto se debe a que la fuerza no sólo cambia con respecto a la velocidad sino también, con respecto a la posición del pistón. También se puede observar que las pendientes, en la zona lineal del modelo, son distintas dependiendo del signo de la velocidad; esto es debido a la posición vertical de la articulación, en donde es necesario levantar el peso de la estructura cuando ésta se contrae y liberarlo cuando se estira.

Empleando los parámetros de los componentes de la fricción (ver Tabla 3.4), calculados a partir de un método de aproximación, se halló el modelo de la fricción de Stribeck para actuadores diferenciales.

Para verificar el modelo de la fricción en el funcionamiento real del robot se ha hecho una simulación a partir de los datos obtenidos por el

Tabla 3.4: Tabla de parámetros del modelo de fricción de la cámara A.

Parámetros	$\dot{x} \geq 0$	$\dot{x} < 0$
σ	54.66	150
F_{c0}	-800	800
F_{s0}	500	-800
c_s	3	3

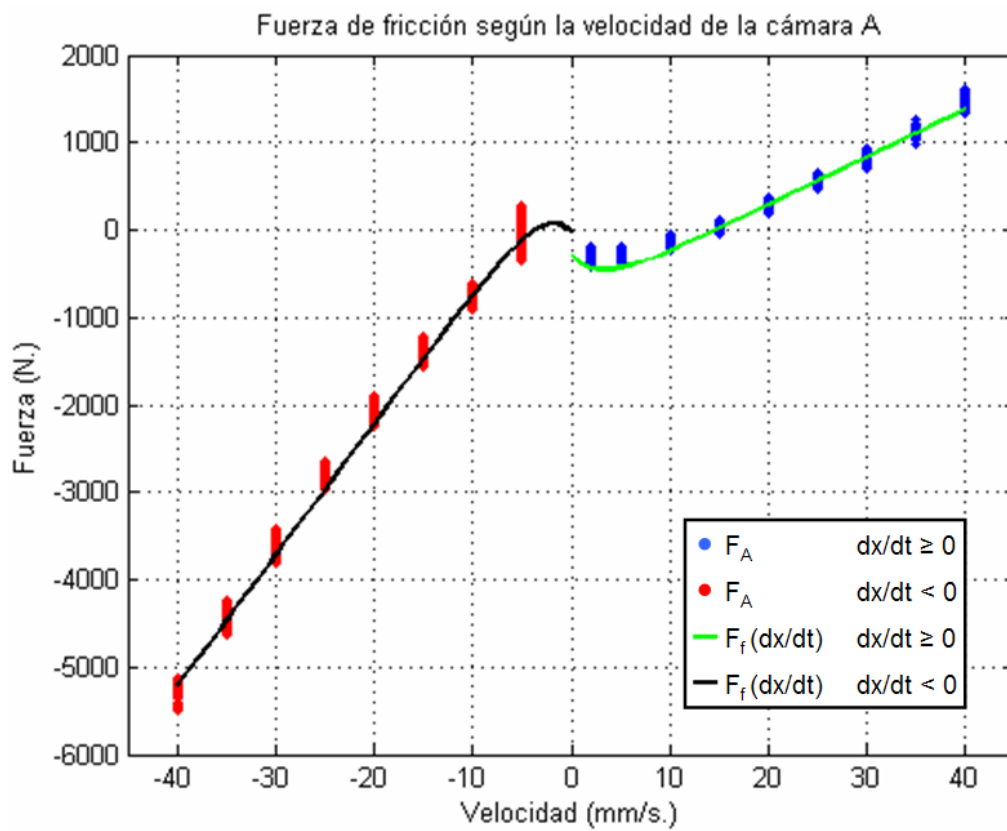


Figura 3.15: Modelo de fricción con respecto a la velocidad (curva de Stribeck).

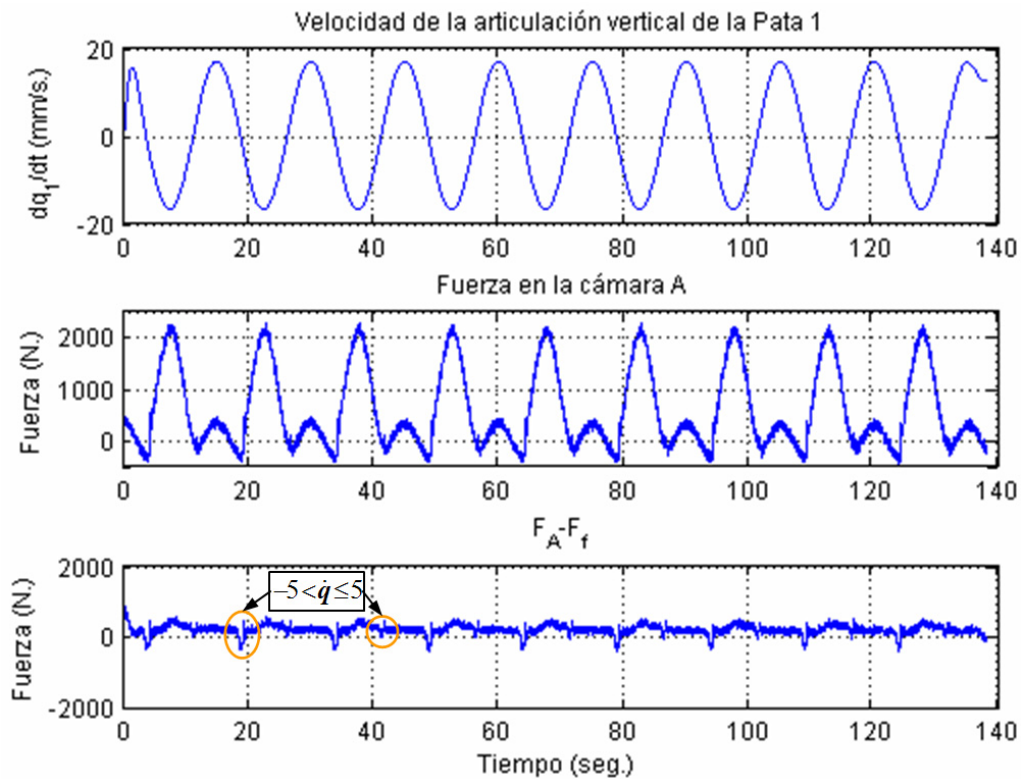


Figura 3.16: Verificación del modelo de fricción.

experimento en el que se observa el comportamiento dinámico de la fuerza.

En la gráfica (ver Figura 3.16) se ilustra como el modelo de la fricción tiende a linealizar el comportamiento de la fuerza en la cámara A al ser contrarrestado por la F_f , con el inconveniente de que a bajas velocidades, es decir, cuando la velocidad del cilindro es menor de 5 mm/s , se obtiene un comportamiento inusual, que no ha sido posible atenuar con los coeficientes de la velocidad de Stribeck.

Este efecto se produce por los siguientes motivos:

- En la válvula proporcional, el cambio de velocidad significa un cambio de sentido en la dirección del flujo hidráulico, lo que genera comportamientos no lineales en el circuito hidráulico.

- El rango de actuación del amplificador electrónico de potencia que controla la válvula proporcional, tiene una zona muerta cuando es inferior al 5% del caudal total, es decir cuando se están controlando velocidades entre $\pm 5 \text{ mm/s}$.
- El regulador PID trata de controlar velocidades entre $\pm 5 \text{ mm/s}$, dada la zona muerta del amplificador de potencia, cuando una articulación se desplaza a una velocidad continua dentro de este rango, si se generan perturbaciones, el controlador trata de compensar esta deficiencia cambiando el sentido del movimiento.

Por estos motivos es muy difícil modelar el comportamiento de la fuerza en este rango de velocidad. Pero no es necesario estudiar con mayor detalle este fenómeno, porque generalmente los movimientos de las articulaciones durante los modos de locomoción se suelen hacer con un régimen de velocidad muy superior.

3.3.2.2. Fuerza de la presión diferencial

Otro de los métodos más usados para contrarrestar el efecto de la presión diferencial entre las cámaras consiste en añadir un sensor de presión en la cámara B del cilindro hidráulico (ver Figura 3.17) y determinar la fuerza de presión diferencial F_p generada por el movimiento del pistón aplicando la ecuación:

$$F_p = (p_A - \alpha p_B) A_p \quad (3.9)$$

en donde A_p es el área de la camisa del pistón y α es el factor diferencial del área de las cámaras producido por el vástago.

Para ver el efecto de la medida de la fuerza con respecto a la diferencia de presión F_p se ha generado una señal de velocidad en la articulación vertical de la pata 1 igual al de los ejemplos anteriores.

En este caso (ver Figura 3.18) los efectos producidos por la aceleración se linealizan, no así los de la fricción. En la gráfica de la fuerza de la presión diferencial F_p se ilustra como afectan las fricciones linealmente cuando las velocidades son inferiores o superiores a cero. Este comportamiento tiene algunas ventajas con respecto a la medición con sólo un sensor:

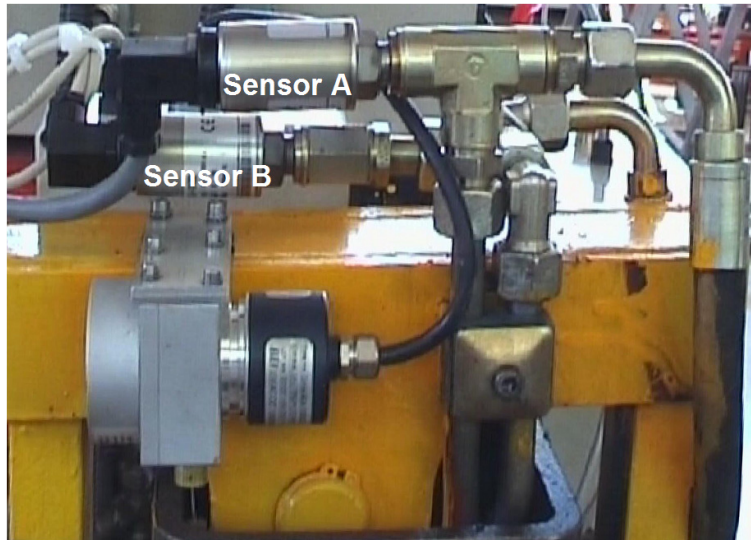


Figura 3.17: *Instalación de los sensores de presión para una articulación vertical.*

- Se minimizan los efectos de la temperatura en la medida de la fricción. El cambio en la temperatura modifica drásticamente el grado de viscosidad en el fluido hidráulico, pero al diferenciar la medida en las cámaras se reduce también el efecto de la temperatura.
- Se elimina el efecto causado por las bajas velocidades, inferiores a 5 mm/s , que sí aparece con la medición de la presión en una sola cámara.
- Es un sistema robusto que no requiere de una parametrización de la fricción en el cilindro, lo cual simplifica mucho el cálculo computacional en el momentos de controlar todos los cilindros.

Sin embargo, para entender el comportamiento del efecto total de la fricción en el cilindro se ha realizado un modelo de la fuerza de fricción con respecto a la velocidad en el cilindro sin carga, similar al realizado con un solo sensor, según la ecuación de Stribeck modificada (3.8).

En este caso se ilustra (ver Figura 3.19) como los efectos de la aceleración disminuyen haciendo que las pendientes de la velocidad negativa y positiva

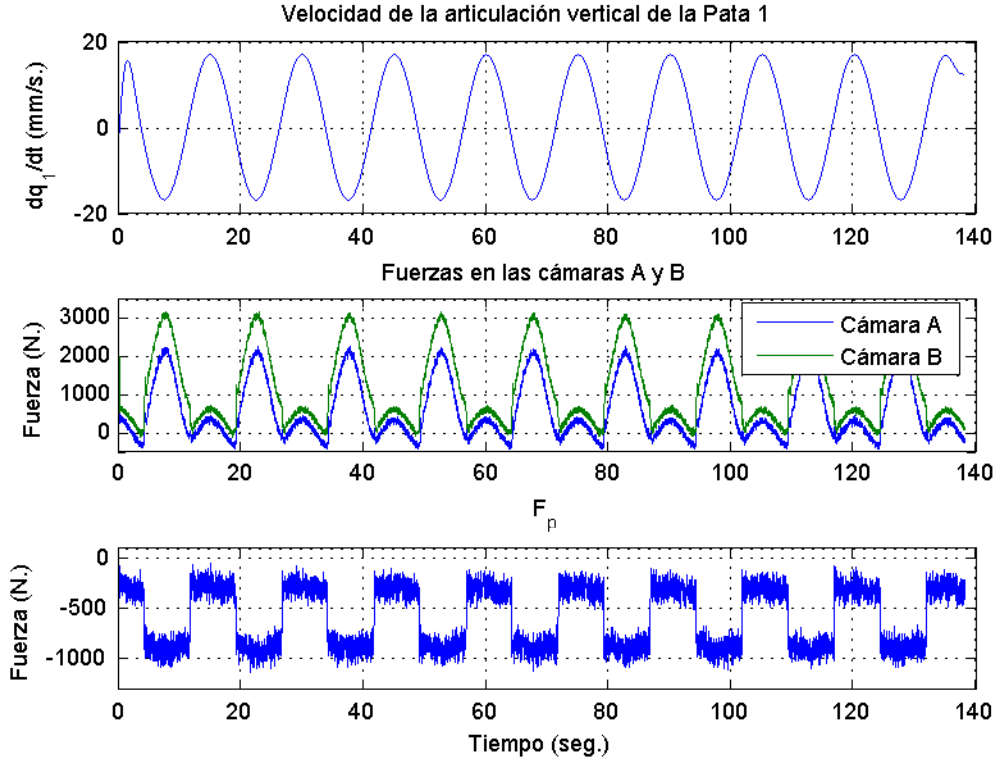


Figura 3.18: Fuerza de presión diferencial del cilindro.

sean similares, disminuyéndose también el efecto de la diferencia de la fricción entre las cámaras y, por último, reduciéndose la fricción total significativamente.

Para verificar los resultados del modelo de la fricción se ha usado el ejemplo ya empleado para la medición de la fuerza diferencial pero restando de ésta la fuerza de fricción hallada usando los valores de los parámetros de la fricción (ver Tabla 3.5) calculados a partir del nuevo modelo. Así, es posible medir la fuerza de carga en el cilindro compensando sus efectos dinámicos no deseados, haciendo también posible la medición de la fuerza externa según la ecuación:

$$F_{ext}(p_A, p_B, \dot{x}_p) = F_p(p_A, p_B) - F_f(\dot{x}_p) \quad (3.10)$$

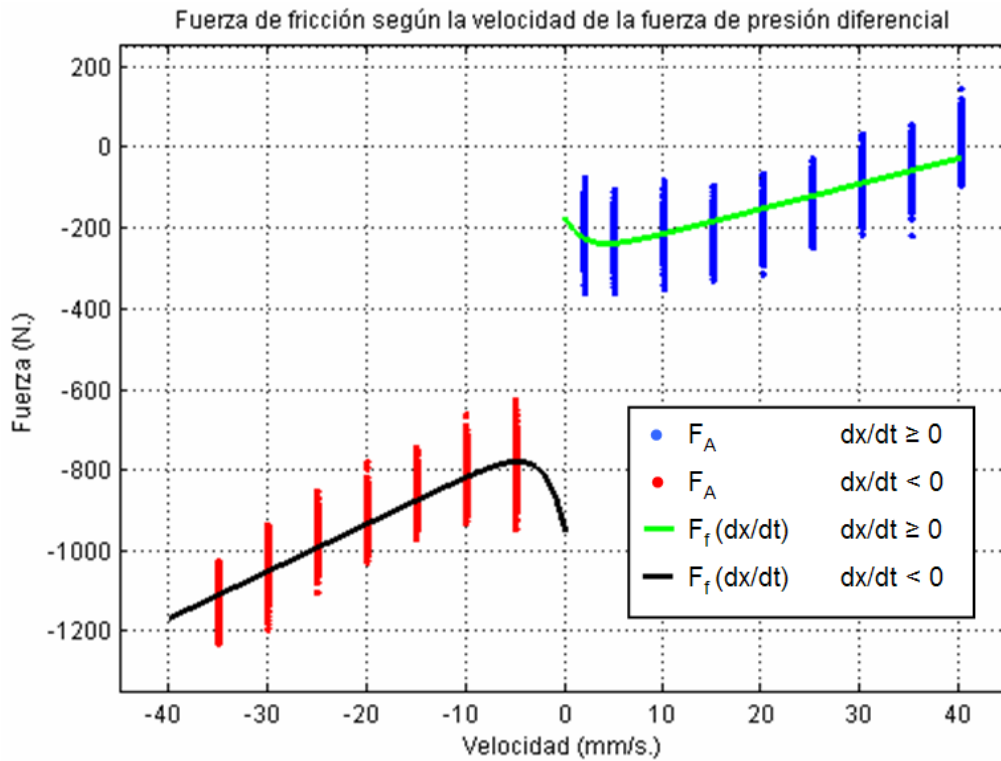


Figura 3.19: Modelo de fricción para la fuerza de presión diferencial.

Tabla 3.5: Tabla de parámetros del modelo de fricción de la fuerza de presión diferencial en la articulación vertical.

Parámetros	$\dot{x}_p \geq 0$	$\dot{x}_p < 0$
σ	6.25	11.67
F_{c0}	-280	-700
F_{s0}	100	-250
c_s	2	2

Como resultado, en la gráfica se ilustra (ver Figura 3.20) que la respuesta de la fuerza externa, deducida a partir de las fuerzas de la presión diferencial

y de la parametrización de la fricción, es muy satisfactoria dado que, aunque todavía se notan los efectos de las bajas velocidades, la fuerza externa F_{ext} tiene valores en torno a cero con una función muy lineal. Esto significa que es posible deducir las fuerzas de fricción que afectan, no sólo a las cámaras del cilindro hidráulico, sino también los de la estructura mecánica, completando así el modelo de fricción dinámica de la articulación vertical.

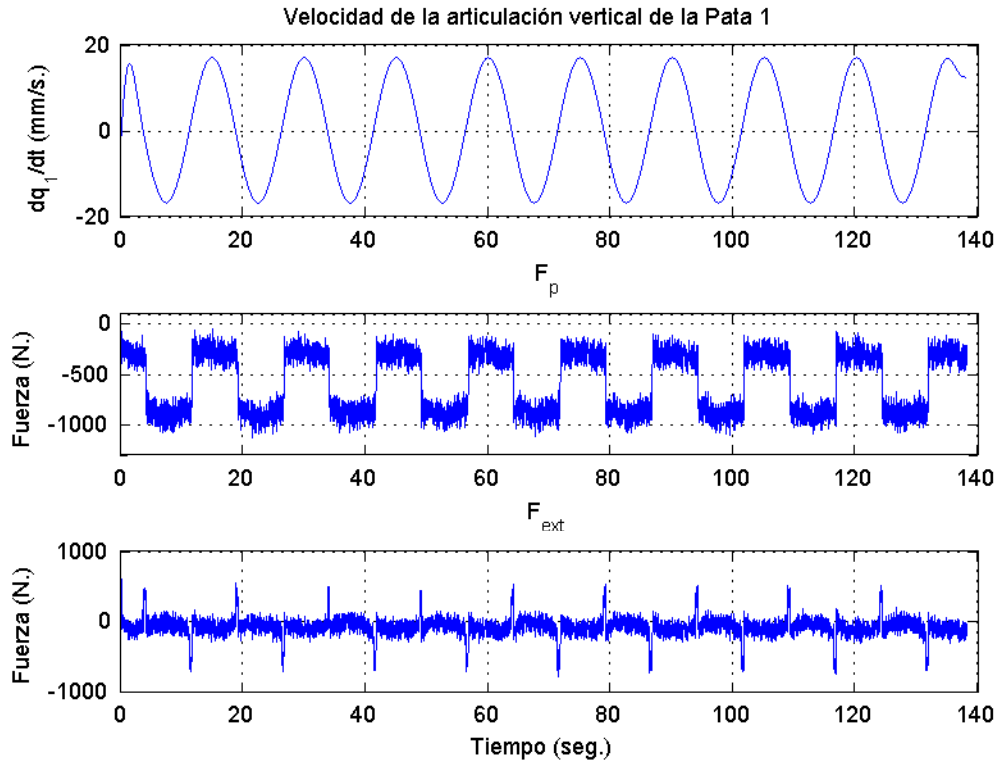


Figura 3.20: Verificación del modelo de fricción para la fuerza de presión diferencial.

3.3.2.3. Modelo de fricción de la articulación horizontal.

También es posible modelar los efectos dinámicos que afectan las articulaciones de rotación del robot basándose en los mismos conceptos del modelo de fricción usados para la articulación vertical, aunque con algunas

implicaciones adicionales. Una de las principales diferencias apreciables es que la gravedad no afecta directamente sobre la dirección de traslación de la articulación; además no interfiere una fricción producida por el roce mecánico en la configuración de la articulación prismática.

En este caso los aspectos más importantes a tener en cuenta son la fricción generada en los pivotes de rotación y en el cilindro hidráulico. Pero también es necesario analizar los aspectos de la configuración mecánica que pudieran generar efectos no lineales en el comportamiento de las fuerzas de fricción medidas en el cilindro (ver Figura 3.21).

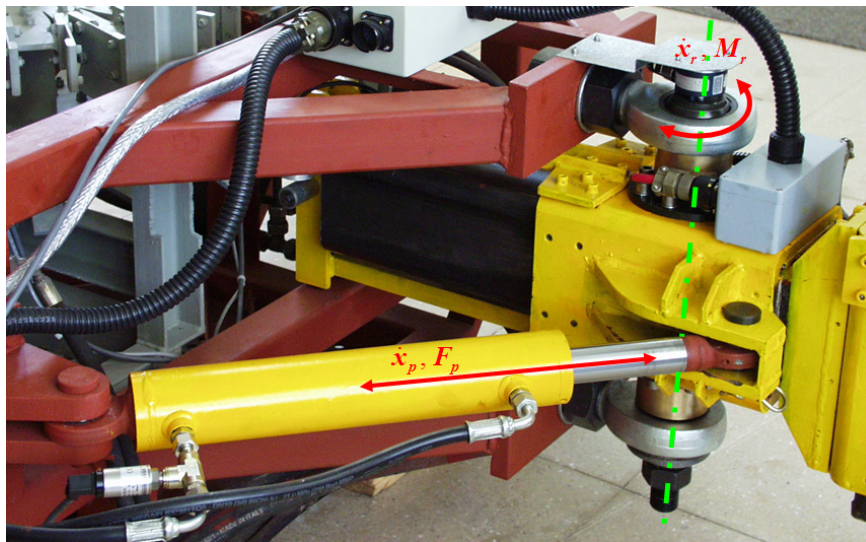


Figura 3.21: Montaje de la articulación horizontal.

Si se analiza cinemáticamente la forma en la que está configurada la articulación de rotación, es evidente que la posición o el ángulo de la rotación no es lineal con respecto a la longitud del cilindro hidráulico que lo actúa, y por consiguiente respecto a la velocidad (ver Figura 3.22). En el control de posición o de velocidad este problema es regulado efectivamente por el control PID de cada articulación, pero para el caso del análisis de la fricción generada por la presión hidráulica, dado que depende directamente de la velocidad, se ha realizado un análisis de la fricción con respecto a la velocidad de la articulación \dot{x}_r y otro con respecto a la velocidad del cilindro hidráulico \dot{x}_p .

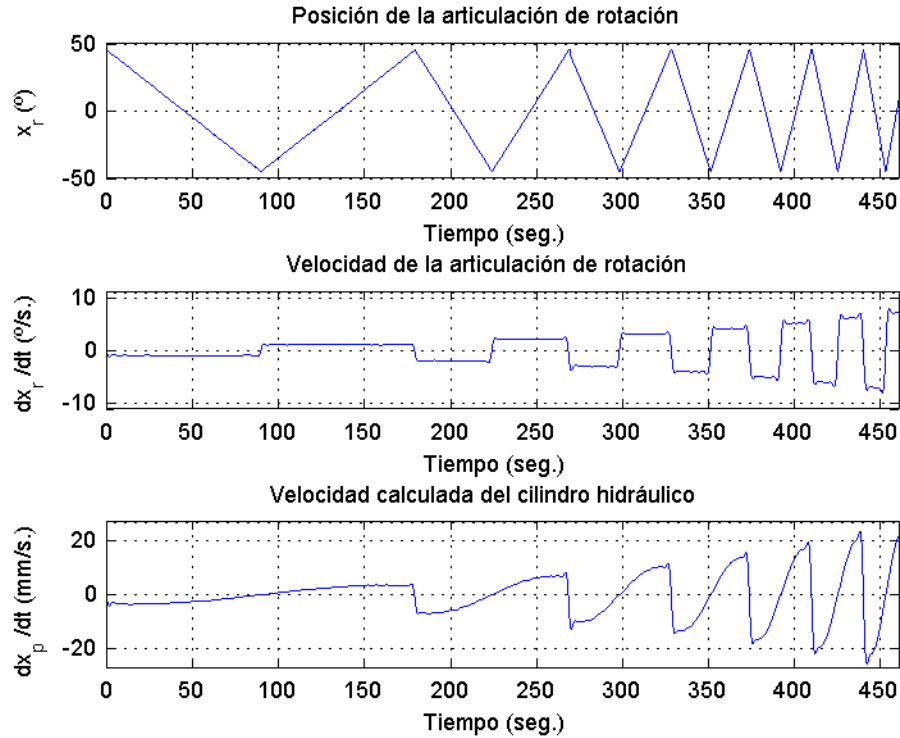


Figura 3.22: Diferencias entre las velocidades de rotación y del cilindro con respecto a la posición de la articulación.

Para calcular la fricción con respecto a la velocidad de rotación de la articulación, se ha realizado un análisis de fricción midiendo la fuerza diferencial F_p entre las cámaras del cilindro hidráulico y rotando la articulación a diferentes velocidades sin que actúen sobre ella fuerzas externas (ver Figura 3.24). Al igual que con el modelo de las articulaciones verticales, se ha aproximado el modelo a una función de Stribek modificada (3.8) con lo que ha sido posible hallar diferentes parámetros de la fricción (ver Tabla 3.6).

En el caso de la parametrización de la fricción con respecto a la velocidad de la extensión del cilindro hidráulico, se han usado los datos obtenidos de la velocidad con respecto a la rotación y se ha calculado cinemáticamente la velocidad de la extensión del cilindro \dot{x}_p con respecto a la posición de

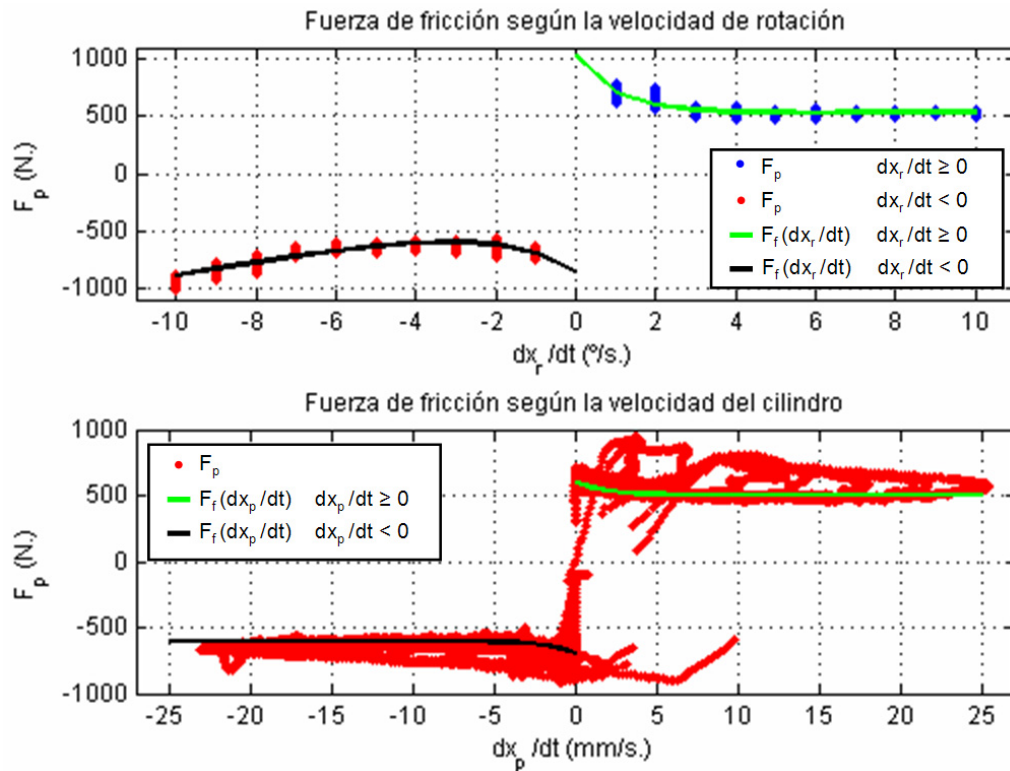


Figura 3.23: Fuerza de fricción medida y aproximación de la función de Stribek.

la articulación para que posteriormente se compare la fuerza diferencial medida en el cilindro F_p con respecto a su velocidad (ver Figura 3.24). Como resultado, en la Tabla 3.7 se ilustran los parámetros de la fricción.

Es interesante ver como, en este caso, los parámetros que verdaderamente influyen en el comportamiento de la fricción en la rotación de la articulación son una fricción de Coulomb F_{c0} , con una sutil diferencia entre velocidades producida por el cambio de sentido de la articulación. En la gráfica (ver Figura 3.24) se puede comparar el comportamiento de la fricción con respecto a las distintas velocidades producidas por los distintos

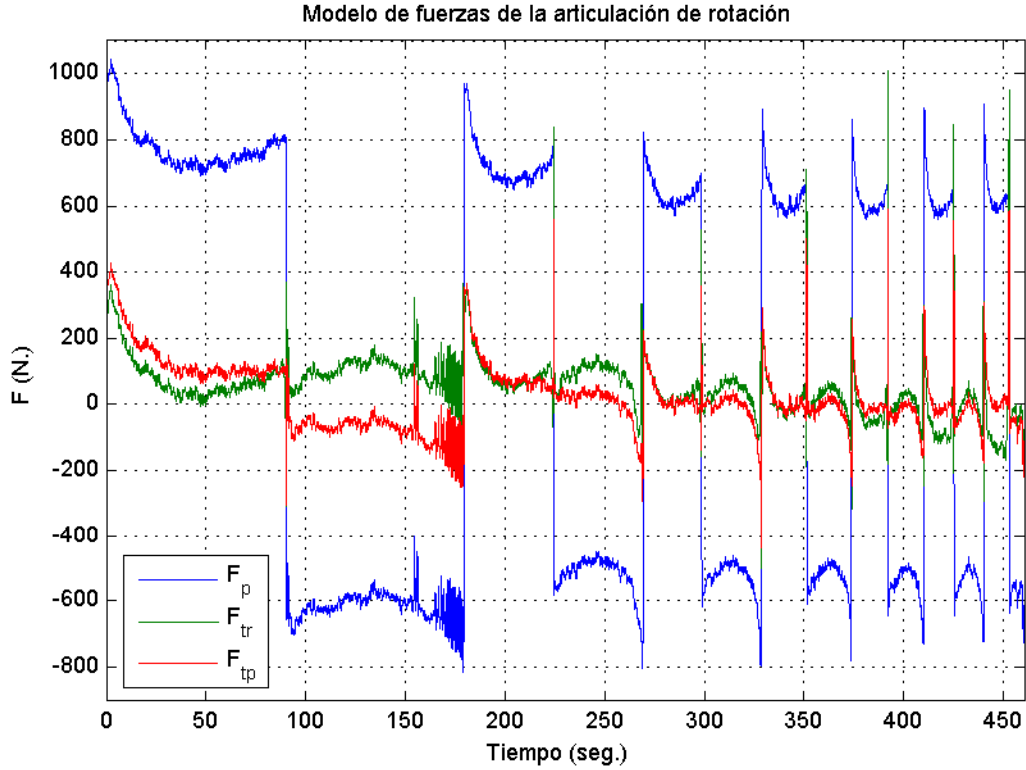


Figura 3.24: Comparación de los distintos modelos de fuerza.

modelos de la articulación ilustrados a continuación:

$$F_p(p_A, p_B) = (p_A - \alpha p_A) A_p$$

$$F_{tr}(p_A, p_B, \dot{x}_r) = F_p(p_A, p_B) - F_f(\dot{x}_r) \quad (3.11)$$

$$F_{tp}(p_A, p_B, \dot{x}_p) = F_p(p_A, p_B) - F_f(\dot{x}_p)$$

en donde F_{tr} es el modelo de la fuerza con respecto a la velocidad de rotación, y F_{tp} es el modelo de la fuerza con respecto a la velocidad de la extensión de la articulación.

Aunque los dos modelos basados en la fricción se comportan con respecto a la fuerza diferencial F_p de forma similar, a velocidades medias el modelo de la fuerza con respecto a la velocidad de la extensión del cilindro tiende a

Tabla 3.6: *Tabla de parámetros del modelo de fricción de la fuerza de presión diferencial con respecto a la velocidad de rotación.*

Parámetros	$\dot{x}_r \geq 0$	$\dot{x}_r < 0$
σ	1	58.33
F_{c0}	525	-300
F_{s0}	-500	-550
c_s	1	2

Tabla 3.7: *Tabla de parámetros del modelo de fricción de la fuerza de presión diferencial con respecto a la velocidad del cilindro.*

Parámetros	$\dot{x}_p \geq 0$	$\dot{x}_p < 0$
σ	0	0
F_{c0}	500	-600
F_{s0}	100	-100
c_s	2	2

linealizar en mayor medida su comportamiento. También es posible observar que a bajas velocidades, al igual que en el caso del modelo vertical, el sistema tiende a comportarse de manera errática.

3.3.3. Filtro de Kalman discreto modificado

En las secciones anteriores se ha ilustrado la forma de medir una fuerza a partir de la señal eléctrica producida por los sensores de presión con el objetivo de realizar un sistema de control para regular las fuerzas generadas en las articulaciones verticales del robot. Pero, como es posible observar en las distintas gráficas de fuerza, la definición de la señal es muy pobre; es decir, el ruido que afecta a la señal está entre 200 y 300 N . (ver Figura 3.25), razón por la cual no es posible detectar con precisión perturbaciones o cargas externas inferiores a 30 Kg .

Adicionalmente a los efectos ilustrados en el apartado anterior, dentro

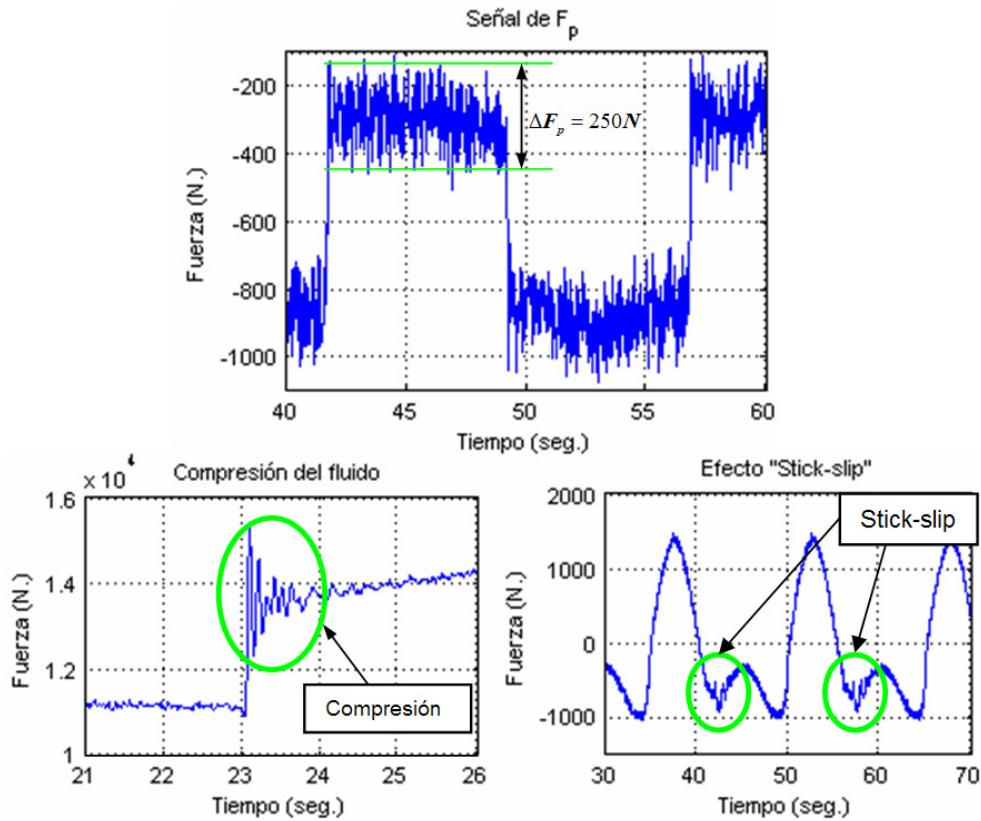


Figura 3.25: Ejemplo de señales de fuerza y sus efectos: Señal de fuerza diferencial F_p y otros efectos adicionales del sistema hidráulico.

de las distintas mediciones es posible hallar otros efectos en el sistema hidráulico que, por el momento, no son objeto de nuestro estudio, pero que pueden afectar la medida de la señal de fuerza (ver Figura 3.25). Uno de estos efectos es el comportamiento denominado *stick-slip* (Armstrong-Helouvry 1991)(Jelali y Kroll 2003) que es un bloqueo de muy corta duración que se origina a causa del rozamiento generado entre el pistón y la camisa del cilindro hidráulico a bajas velocidades. Otro es la compresión del fluido hidráulico cuando se aplica al sistema una señal escalón o en un cambio brusco de velocidad.

Por este motivo es necesario estudiar la posibilidad de incorporar en el

sistema de control filtros digitales que mejoren la señal, disminuyendo el ruido y ajustando su precisión, todo ello con vistas a la implementación del control reactivo. Aunque durante la fase de experimentación se han usado distintos tipos de filtros (*e.g.* filtro de primer orden), a continuación se describe el análisis del filtro de Kalman modificado empleado para el procesamiento digital de las señales de presión y estudiado con mayor detalle debido a las ventajas que ofrece.

En el filtro de Kalman discreto (1960) ilustrado a continuación, se obtiene una solución recursiva al problema del filtrado de sistemas lineales discretos. El filtro de Kalman estima un proceso usando una forma de control en lazo cerrado: se estima primero el estado del proceso en un instante de tiempo en forma de medidas (con ruido), en el que en un instante dado se estima el estado del proceso para obtener medidas (con ruido). Como tales, las ecuaciones del filtro de Kalman se dividen en dos grupos: actualización en el tiempo y actualización de la medida. En las primeras ecuaciones se estima el estado actual y el error de la covarianza para obtener *a priori* estimaciones en el siguiente instante de tiempo. El segundo conjunto de ecuaciones, el de la actualización de la medida, se encarga de realimentar el sistema incorporando una nueva medida dentro de la estimación *a priori* para obtener un resultado mejorado *a posteriori* (Brown y Hwang 1992).

Se utilizan dos ecuaciones para la actualización del estado en el tiempo, la del modelo de un proceso discreto:

$$\hat{x}_{k+1/k} = \Phi \hat{x}_{k-1} + \Gamma u_{k-1} \quad (3.12)$$

en donde Φ es la matriz de transición de estados, que relaciona el estado en el instante anterior con el actual, y Γ relaciona la entrada de control opcional u con el estado x_k .

Y la ecuación de estimación *a priori* del error de la covarianza:

$$P_{k+1/k} = \Phi P_{k-1} \Phi^T + Q \quad (3.13)$$

en donde Q es la covarianza del ruido del proceso.

Por otro lado, en el proceso de actualización del vector de estado, se evalúa primero la ganancia de Kalman:

$$K_k = P_{k+1/k} H^T (H P_{k+1/k} H^T + R)^{-1} \quad (3.14)$$

en donde H es la matriz de conexión entre la medida y el vector de estado x_k y R es la covarianza de la medida del error, que se utilizan para después poder evaluar el estado del proceso:

$$\hat{x}_k = \hat{x}_{k+1/k} + K_k(z_k - H\hat{x}_{k+1/k}) \quad (3.15)$$

según la medida del proceso en el tiempo z_k .

Por último se actualiza el valor del error de la covarianza:

$$P_k = (I - K_k H)P_{k+1/k} \quad (3.16)$$

Para cambiar el comportamiento en el proceso de medición (ver Figura 3.26) con un filtro de Kalman se deben cambiar los factores que influyen en el sistema. Por ejemplo, si el valor del error de la covarianza R tiende a cero significa que se aumenta la ganancia de Kalman K_k , haciendo que se confíe más en la medida z_k , y que se confíe menos en la medida de la predicción $H\hat{x}_{k-1}$. Por otro lado, si el valor de la predicción del error de la covarianza P_{k-1} se acerca a cero disminuyendo Q , se confía menos en la medida de z_k , mientras que se confía más en la medida de la predicción $H\hat{x}_{k-1}$.

En la práctica, en la implementación del filtro los factores R y Q , aunque es posible medirlos de forma matemática, se determinan antes del proceso de filtrado de forma empírica dependiendo del resultado al que se quiere llegar en un proceso determinado. En la gráfica (ver Figura 3.27) se ilustra como se atenúa la señal de fuerza cuando se aumenta el factor R y se disminuye el factor Q .

El filtro de Kalman se ha modificado para que se pueda seleccionar un parámetro que limite el umbral de la innovación de la entrada z_k con respecto a la medida de la predicción $H\hat{x}_{k-1}$. En pruebas realizadas anteriormente en Roboclimber, se han detectado cambios repentinos, representados como picos, en la medida de la fuerza por los efectos dinámicos derivados del acoplamiento de los movimientos de todas las patas y de los diferentes efectos dinámicos del sistema hidráulico. Por este motivo, y para mejorar la calidad y la robustez de la medida, se ha estudiado la posibilidad de implementar un control suplementario en la estimación de la diferencia de la medida de fuerza que no afecte a la capacidad recursiva del filtro de Kalman. Si este umbral del error en la estimación e_k supera un valor predeterminado e_{max} se actualiza la variable auxiliar de corrección de la

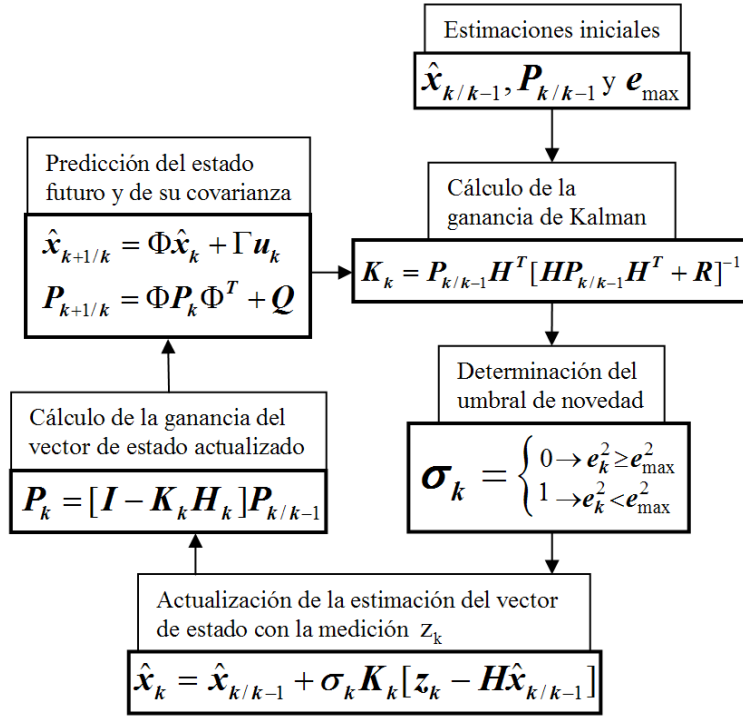


Figura 3.26: Algoritmo de evaluación mediante un filtro de Kalman modificado.

predicción σ_k (Chowdhury 2000) de la siguiente forma:

$$\sigma_k = \begin{cases} 0 & \text{si } e_k^2 \geq e_{max}^2 \\ 1 & \text{si } e_k^2 < e_{max}^2 \end{cases} \quad (3.17)$$

en donde el error de la estimación $e_k = z_k - H \hat{x}_{k-1}$. De esta forma se puede actualizar el valor estimado \hat{x}_k evitando los picos que, en ciertos casos, puedan distorsionar la calidad de la predicción de la estimación.

Como resultado (ver Figura 3.28), en la gráfica se ilustra la diferencia que existe cuando se utiliza el filtro de Kalman sin o con el control de la innovación según los parámetros de la Tabla 3.8. En el segundo caso es posible observar como la señal filtrada mantiene la misma tendencia que la señal original, pero evitando los efectos dinámicos generados, en este caso, por el cambio en la dirección de la velocidad en el actuador a bajas

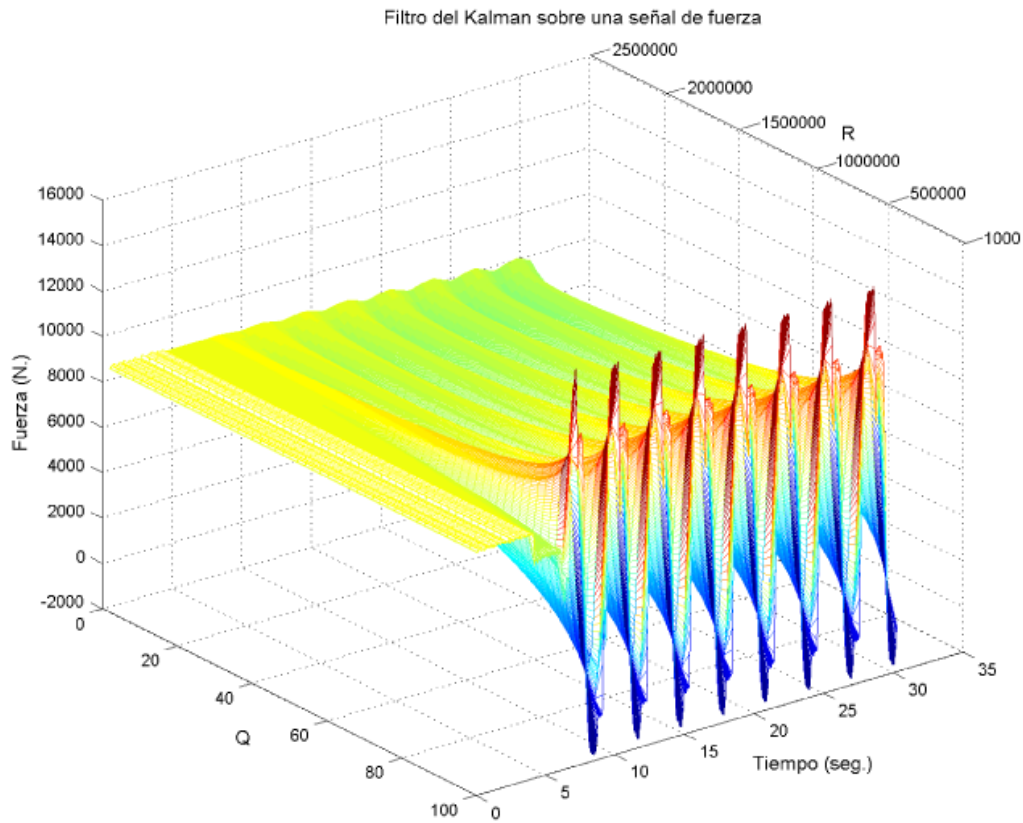


Figura 3.27: Comportamiento del filtro de Kalman sobre una señal de fuerza con distintos valores de Q y R .

velocidades (ver sección 3.3.2).

Una de las principales ventajas del filtro de Kalman es que, como está diseñado para su uso en sistemas de control en tiempo discreto, es ideal para integrarlo en los algoritmos de control con una carga computacional aceptable. Por este motivo, aunque esto no se analizará con detalle en esta memoria, es posible realizar un cambio de variables Q y R de forma adaptativa para robustecer aún más el proceso de filtrado.

Tabla 3.8: Parámetros del filtro de Kalman.

Parámetros	a	b
R	1000	1000
Q	1	1
e_{max}	-	50

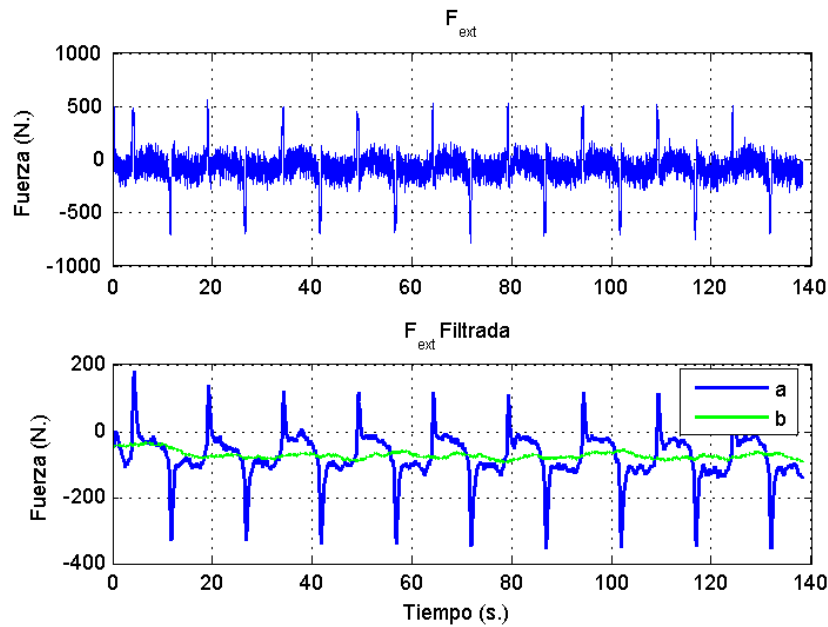


Figura 3.28: Comparación del filtro de Kalman. (a) Sin control de la innovación y (b) Con control de la innovación.

3.4. Medida indirecta del entorno usando sensores ultrasónicos

Existen algunos detalles que se deben tener en cuenta para mejorar el sistema de detección del suelo, porque es necesario robustecer la forma de caminar por distintos tipos de terrenos y distintos tipos de superficies. En la imagen (ver Figura 3.29) se muestra a Roboclimber superando un escalón

pasando de una superficie rígida a una superficie de menor consistencia utilizando el sistema de detección del suelo. En el proceso se producen diferencias entre el cuerpo y el suelo (h_1 y h_2) al cambiar la extensión de las articulaciones verticales (q_1 , q_2 , q_3 y q_4) del robot.



Figura 3.29: Roboclimber sobre superficies y suelos irregulares.

Cuando el robot camina por superficies de poca consistencia, debido a su gran peso, es factible que las patas se entierren; con el sistema de detección del suelo solamente es posible medir la deformación de la estructura de acero del robot, pero debido a que la pata que está en transferencia es la que menos peso tiene que ejercer, en una superficie poco consistente, el resto de patas son las que se entierren. Igual que cuando se realiza la transferencia del cuerpo en donde se cambia la distribución de los pesos del robot que producen que las patas se entierren en menor o mayor medida. En algunos casos se ha optado por utilizar inclinómetros para nivelar el cuerpo del robot durante el proceso de locomoción y en otros se ha intentado equilibrar cinemáticamente las articulaciones del mismo.

Pero estas soluciones no son factibles en estas condiciones,

porque Roboclimber debe caminar por inclinaciones también irregulares manteniendo una posición del cuerpo paralela a la de la superficie cuando la inclinación es elevada; esto con el propósito de llegar hasta el punto en el que pueda ser suspendido de las montañas.

Por esta razón, se propone incorporar un sistema con el que sea posible medir externamente la distancia entre el cuerpo del robot y el suelo. Una posible solución es la de usar sensores de distancia ultrasónicos (Nabulsi et al. 2005) y adaptarse a las condiciones del entorno dependiendo de la información generada por la distancia medida por los sensores dependiendo de su posición en el robot, ya sea apuntando hacia el suelo o en la parte frontal del robot para determinar obstáculos (ver sección 5.1).

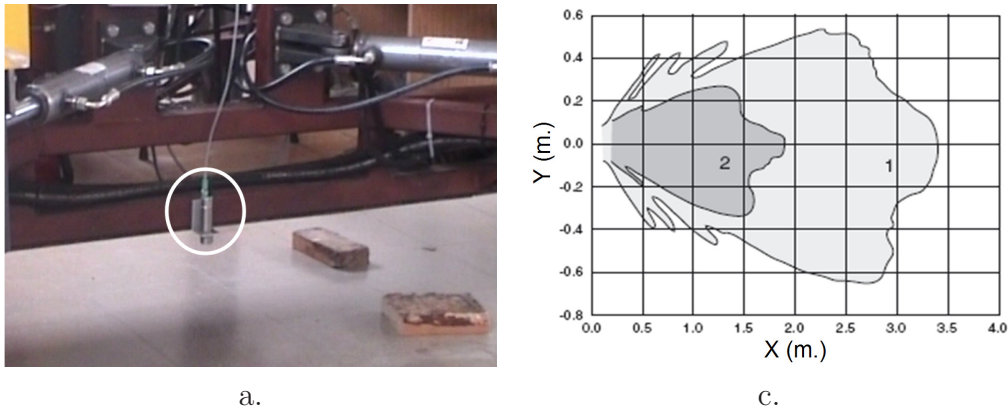


Figura 3.30: Sensor ultrasónico. (a) Instalación y (b) Rango de la señal ultrasónica.

Existen distintas disposiciones con las que es posible usar las señales ultrasónicas para medir distancias. En este caso se ha seleccionado el sensor *Pepperl + Fuchs*[®] de tipo UC2000-30GM (ver Figura 3.30) con el que es posible medir distancias x_i con un rango entre 220 a 2000 mm generando una salida analógica de 0 – 10 v proporcional a esta medida:

$$x_i = \frac{V \cdot R}{10} + 220 \tag{3.18}$$

en donde V es el valor de la señal de entrada y R es la diferencia entre el rango de medidas del sensor.

Para medir la distancia, el sensor emite una señal ultrasónica y espera a que, al rebotar en un objeto, retorne al sensor y de esta forma, al saber el tiempo que ha tardado en retornar, calcular la distancia que ha recorrido la onda. Como se ilustra en la imagen (ver Figura 3.30), debido a que la señal del sensor no se hace por medio de una línea sino de un cono, es posible detectar cualquier objeto que este dentro del rango de la onda. Por este motivo, estos sensores presentan algunos inconvenientes, ya que no es posible determinar con precisión el contorno de un objeto, ni tampoco es posible medir distancias muy cortas puesto que si el objeto está muy cerca al sensor hay una zona muerta. No obstante, dadas las características del robot, se ha utilizado un sensor comercial de estas prestaciones debido a su robustez y fiabilidad para su uso en exteriores, su facilidad en la instalación en el robot, y su buena disposición para la adquisición de datos.

Capítulo 4

Generación de modos de locomoción

En este capítulo se aborda el problema de la generación de los modos de locomoción para Roboclimber, el robot cuadrúpedo de grandes dimensiones elegido como plataforma experimental para esta tesis. Se revisan brevemente los distintos modos de locomoción susceptibles de ser empleados de acuerdo con varios criterios de estabilidad, y se implementan los modos básicos que permiten caminar al robot por terrenos con poca irregularidad. Estos modos de caminar constituyen la base necesaria para el diseño de algoritmos de control reactivo que se abordan más adelante en esta memoria.

Por otro lado se introducen los modos de locomoción para que el robot se pueda desplazar escalando por terrenos inclinados, y se propone un nuevo algoritmo de escalado, muy eficaz y no conocido en la literatura hasta la fecha (Nabulsi y Armada 2004).

La disponibilidad de diversos modos de caminar o de escalar, así como la facilidad para cambiar de uno a otro, facilita notablemente que el robot pueda ser controlado fácilmente de forma remota o que pueda llegar a desenvolverse de forma autónoma. En la aplicación particular del proyecto Roboclimber, el posicionamiento del robot no se realiza automáticamente; un operador debe determinar el objetivo y mediante los comandos necesarios, indicar en qué dirección moverse y donde detenerse, supervisando la ejecución mediante la información enviada desde el sistema de control, para luego realizar las tareas de perforación (Nabulsi et al. 2003)(Nabulsi et al. 2004).

En la unidad de control se han implementado distintos movimientos predefinidos para el robot; estos movimientos son lo suficientemente complejos como para poder ubicar el cuerpo del robot en seis grados de libertad por el espacio, o lo suficientemente simples como para poder actuar un solo eje independientemente.

4.1. Modos de caminar

Un modo de caminar es una secuencia por la cual se planifican los movimientos de las patas y del cuerpo del robot, de manera que se produzca una locomoción. Algunos autores (Song y Waldron 1989) lo definen como la localización en el tiempo y en el espacio de los apoyos y las transferencias de cada pata, de manera coordinada con el movimiento del cuerpo, con el fin de desplazar el robot de un punto a otro. Los modos de caminar se pueden clasificar según distintos criterios, como la periodicidad de la secuencia, el tipo de movimiento del cuerpo, o el método empleado para encontrar apoyos. Es posible resumir los diferentes modos de caminar de la siguiente forma:

1. Estabilidad

- Estática
- Dinámica

2. Movimiento del cuerpo

- Discontinuo
- Continuo

3. Periodicidad

- Aperiódica
- Periódica

El modo de caminar determina la velocidad, la estabilidad, y en general, la capacidad de un vehículo para desplazarse por un terreno determinado, por lo que un estudio de distintos modos es fundamental para el diseño de un robot caminante. Gracias a este estudio teórico se podrá hacer una

elección adecuada del modo de caminar óptimo para el robot, dados uno requisitos de estabilidad, movilidad, adaptabilidad al terreno, etc.

A continuación se detallará el problema y la clasificación de los modos de caminar susceptibles de implementar en Roboclimber.

4.1.1. El problema de la estabilidad

La investigación acerca de la estabilidad de los robots caminantes empezó a mediados de los años 60 cuando McGhee y Frank (McGhee y Frank 1968) definieron la estabilidad estática para un robot ideal. Según su definición, un robot es estáticamente estable si la proyección de su centro de gravedad (CDG) está dentro de un patrón de soporte. También definieron un robot ideal como aquel en el que se pueda considerar a las patas como cuerpos sin masa y en el que se pueda obviar su dinámica.

Al adoptar una secuencia en la que el modo de caminar sea estáticamente estable se simplifica notablemente el control del robot. Pero si en los movimientos de las patas intervienen cuerpos muy pesados, pueden aparecer efectos inerciales importantes, por lo que pueden empezar a no ser despreciables otros componentes dinámicos (como la fricción, la elasticidad, etc.) que afecten a la estabilidad. En este caso, para mantener las hipótesis de robot ideal, será necesario restringir la velocidad en los movimientos del robot.

Para aumentar la velocidad de un robot se debe considerar la dinámica en el algoritmo que controla su estabilidad durante la locomoción. Pero debido a la complejidad que supone considerar la totalidad de los efectos dinámicos del robot, algunos investigadores han intentado buscar soluciones diseñando mecanismos sencillos y con poca variabilidad para tener en cuenta la dinámica del sistema; algunas de estas soluciones, como el criterio del punto de momento cero (Vukobratovic y Juricic 1969) (ZMP, *Zero Moment Point*), fueron diseñadas para el control de la estabilidad de robots bípedos y han sido adaptados a robots con cuatro patas (Raibert et al. 1986)(Wong y Orin 1993)(Buehler et al. 1998).

Un problema del empleo del ZMP es que sólo es aplicable cuando las patas se encuentran apoyadas en superficies planas (Goswami 1999) (Kimura et al. 1990)(Yoneda et al. 1996); y debido a la simplificación mecánica en que se basa el ZMP su ejecución deja de ser útil en robots con aplicaciones reales, en donde es necesario manipular y transportar cargas

variables por terrenos irregulares.

Hasta el presente son pocos los trabajos emprendidos para hallar soluciones al problema del efecto dinámico en los robots caminantes (Kang et al. 1997) (Lin y Song 1993)(Papadopoulos y Rey 1996)(Montes 2005)(González de Santos et al. 2006). Esto se debe a que la realización de la mayor parte de robots de este tipo ha sido enfocada a determinadas aplicaciones industriales en los que prima la estabilidad estática, sin necesidad de galopar o de trotar (Estremera y Waldron 2006).

4.1.2. Criterio de estabilidad estática

El primer criterio de estabilidad estática definido para una máquina ideal caminando a una velocidad constante, en una dirección constante y sobre una superficie regular y plana, fue propuesto por McGhee y Frank (1968). El método de la proyección del Centro De Gravedad (CDG) (ver Figura 4.1) indica que un vehículo es estáticamente estable si la proyección de su CDG sobre un plano horizontal está dentro de su polígono de apoyo (definido como el polígono convexo formado al conectar los puntos de apoyo de los pies). Posteriormente este criterio se fue ampliando para su aplicación en superficies inclinadas redefiniendo el polígono de apoyo como la proyección horizontal del patrón de soporte (McGhee y Iswandhi 1979)(García 2002).

Los modos de caminar generalmente han sido diseñados teniendo en cuenta los criterios de estabilidad estática. Un modo de caminar es estáticamente estable si al mantener fijas las posiciones de todos los pies y, simultáneamente, reducir a cero todas las velocidades de traslación y rotación del sólido rígido resultante, todas las patas que estaban en contacto con el plano de apoyo permanecen en contacto con dicho apoyo (McGhee y Frank 1968).

La medida de la estabilidad estática puede basarse en criterios geométricos o bien en criterios energéticos. Entre las medidas de estabilidad basadas en criterios geométricos destaca el margen de estabilidad estática o Margen De Estabilidad (MDE) absoluto (ver Figura 4.1) que se define como la menor de las distancias de la proyección horizontal del centro de gravedad a los lados del polígono de apoyo (McGhee y Frank 1968). Como variante del MDE, y con el objetivo de simplificar las expresiones analíticas, se estableció el Margen de Estabilidad Longitudinal (MEL) (ver Figura 4.1), que se define como la menor de las distancias de la proyección del centro

de gravedad a las fronteras del polígono de apoyo según la dirección de movimiento del cuerpo (Zhang y Song 1989).

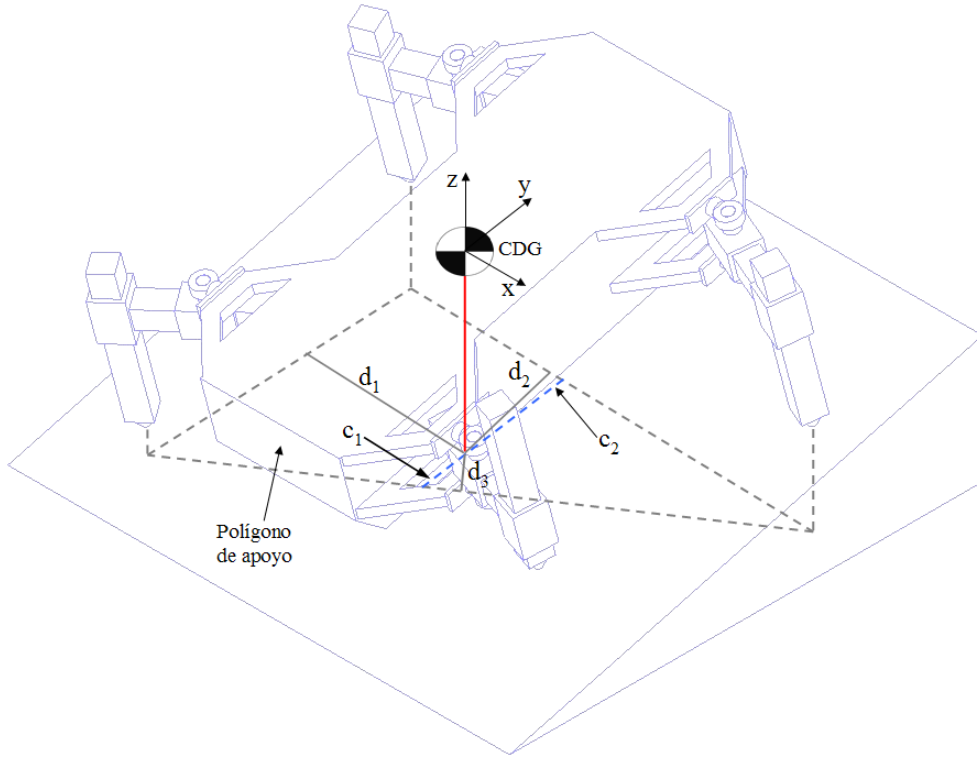


Figura 4.1: Criterios de estabilidad estática de un robot caminante.

En la imagen (ver Figura 4.1) se ilustra un ejemplo de los criterios de los márgenes de estabilidad MDE y MEL, teniendo en cuenta que el robot avanza en la dirección y :

$$MDE = \min(d_1, d_2, d_3) = d_3 \quad y \quad MEL = \min(c_1, c_2) = c_1 \quad (4.1)$$

También se han elaborado distintas teorías acerca de las medidas de estabilidad basadas en criterios energéticos que cuantifican la energía necesaria para provocar el vuelco de la máquina y se muestran más eficaces en terrenos irregulares. Entre estas medidas destaca el Margen de Estabilidad Energético Normalizado, que se define como la mínima energía

potencial necesaria para hacer volcar la máquina alrededor de un eje definido por los puntos de apoyo de dos patas consecutivas, normalizada al peso del vehículo (Hirose et al. 1998) y a la variación de la altura del CDG.

4.1.3. Criterio de estabilidad dinámica

Los modos de caminar dinámicamente estables son aquellos en los que, por el contrario, la estabilidad se mantiene gracias al movimiento activo y sostenido de los miembros de la máquina caminante (Estremera 2003). Para controlar este tipo de modo de caminar es necesario adoptar modelos dinámicos que son más complejos (García y González de Santos 2005)(Gálvez 2002), pero que permiten una locomoción más rápida (García 2002).

El primer criterio de estabilidad dinámica para el avance en una máquina caminante fue propuesto por Orin (1976). Basándose en el método de la proyección del CDG, Orin introdujo el criterio del Centro De Presión (CDP) diciendo que el robot es dinámicamente estable si la proyección del CDG, a lo largo de la dirección de la fuerza resultante que actúa sobre el CDG, está dentro del polígono de apoyo. Por lo tanto el Margen de Estabilidad Dinámica está definido como la distancia más corta del CDP a los bordes del polígono de apoyo. El método del CDP coincide con el método de la proyección de CDG en condiciones estáticas y en cualquier tipo de terreno.

También se ha establecido el ZMP para ser implementado en el control, principalmente, de los robots bípedos (Armada et al. 2002), en donde se ha sugerido como base que el modelo de un péndulo invertido puede ser válido como aproximación al sistema (Hemami et al. 1973). Posteriormente se redefinió el CDP como el Centro de Masa Efectiva (CME) (Kang et al. 1997) que es el punto en el plano de soporte en donde los momentos resultantes de las fuerzas de reacción del terreno se desvanecen. Esta definición coincide con el criterio del ZMP, pero como se ha dicho antes, sólo es aplicable a superficies planas. De este modo la idea del ZMP es ubicar el centro de masa dentro del área en un plano teniendo en cuenta los efectos dinámicos producidos por la posición del centro de gravedad (Hemami et al. 1973). Así el ZMP sobre el eje x del plano es (Caballero et al. 2006):

$$ZMP_x = \frac{x_c m(\ddot{z}_c + g) - (z_c - ZMP_z)m\ddot{x}_c}{m(\ddot{z}_c + g)} \quad (4.2)$$

y para el eje y :

$$ZMP_y = \frac{y_c m (\ddot{z}_c + g) - (z_c - ZMP_z) m \ddot{y}_c}{m (\ddot{z}_c + g)} \quad (4.3)$$

En donde m es la masa total del robot, x_c , y_c y z_c son las coordenadas del centro de masa y g es la aceleración de la gravedad.

Existen otros criterios de estabilidad basados en los momentos, como se indica a continuación. Dado el estado del robot (ver Figura 4.2a), las fuerzas y los momentos actuando en el CDG pueden llegar a desestabilizarlo. Podemos escribir las siguientes relaciones de equilibrio:

$$F_I = F_S + F_G + F_M \quad (4.4)$$

$$M_I = M_S + M_G + M_M \quad (4.5)$$

Para que exista un equilibrio dinámico la fuerza inercial F_I (4.4) debe ser equivalente a la suma de las fuerzas de soporte F_S , la gravitacional F_G y la de los efectos externos F_M . Lo mismo pasa con el momento inercial M_I (4.5).

Al volcar, en el robot se pierden las fuerzas de soporte en algunas patas mientras que en las restantes se crea un eje de vuelco (ver Figura 4.2b). La interacción resultante entre la fuerza F_R y el momento M_R de rotación entre el robot y el terreno resultan en una reacción contraria a las fuerzas de reacción entre el suelo y cada pata F_{ri} y el momento que se genera alrededor del CDG. Para que el robot pueda mantener la estabilidad es necesario generar un momento M_i alrededor del eje de vuelco i que compense las fuerzas y los momentos de desestabilización. Se dice que el sistema está dinámicamente desestabilizado cuando esta compensación no es suficiente para mantener el robot en equilibrio (González de Santos et al. 2006).

A partir de este concepto se han estudiado diferentes propiedades referentes al concepto de la estabilidad dinámica. Por ejemplo Lin y Song (1993) redefinieron el Margen de Estabilidad Dinámico (S_{MDE}) como el menor de los momentos M_i por cada eje de vuelco en el polígono de apoyo, normalizado al peso del sistema, esto es:

$$S_{DSM} = \min \left(\frac{M_i}{mg} \right) = \min \left(\frac{e_i \cdot (F_R \times P_i + M_R)}{mg} \right) \quad (4.6)$$

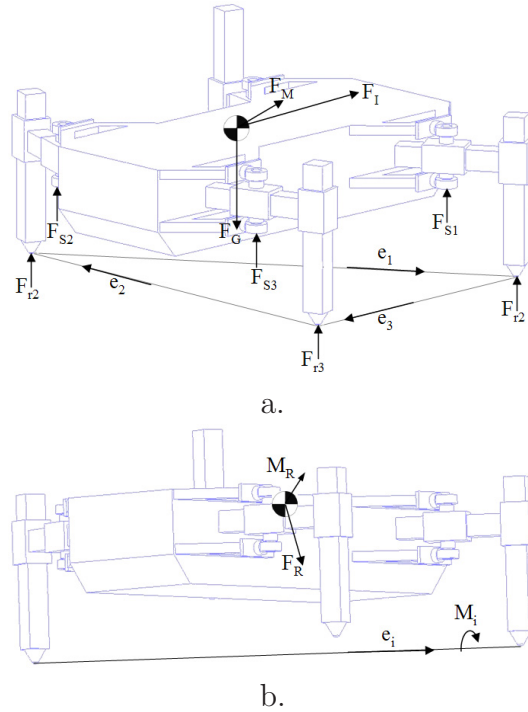


Figura 4.2: Criterios dinámicos. (a) Fuerzas actuando en un robot y (b) El robot alrededor de un eje de vuelco.

en donde P_i es la posición del vector desde el CDG hasta el i -ésimo pie de soporte, y e_i es un vector unitario que gira alrededor del polígono de apoyo en sentido antihorario. Si todos los momentos son positivos, es decir si tienen la misma dirección y sentido que e_i , entonces el sistema es estable.

También se ha estudiado el problema de la estabilidad desde un punto de vista energético. Basándose en el concepto del Margen de Estabilidad Energético desarrollados por Hirose *et. al* (1998), algunos autores propusieron extender este concepto y añadir la presencia de efectos dinámicos en el sistema, como lo son las fuerzas inerciales (Ghasempoor y Sepehri 1998)(García y González de Santos 2005).

4.1.4. Modos de caminar periódicos y aperiódicos

Los modos de caminar periódicos se caracterizan porque las posiciones de los pies y la secuencia de movimiento de las patas se repiten periódicamente en el tiempo. Esta característica hace que estos modos de caminar sean muy simples de formular e implementar y que, por tanto, se empleen frecuentemente.

Dentro de los modos periódicos hay que destacar los modos ondulatorios (*wave gait*). En ellos el instante de levantamiento y apoyo de cada pata se encuentra retrasado un cierto intervalo de tiempo con respecto a la pata situada detrás de ella. El movimiento de las patas según este patrón produce la sensación de una onda que se desplaza a lo largo del cuerpo en el sentido de la marcha. El modo ondulatorio continuo es el más común en la naturaleza; lo utilizan la mayoría de los insectos y cuadrúpedos cuando la velocidad de avance es baja.

Según esta definición los modos ondulatorios, y en general los modos periódicos presentan una muy reducida capacidad de adaptación a los terrenos irregulares, los cambios de trayectoria, y a requerimientos variables de velocidad y estabilidad. En general los modos periódicos presentan los siguientes inconvenientes:

1. El orden en que se producen las transferencias de las patas es fijo y por tanto la secuencia puede verse interrumpida si no se encuentran puntos de apoyo válidos.
2. La estabilidad puede verse comprometida en la locomoción por terrenos irregulares. La estabilidad depende en cada momento de las irregularidades del terreno.
3. La estabilidad depende de la trayectoria a seguir por el robot. Ciertos ángulos de deriva o radios de curvatura de la trayectoria pueden dar lugar a pérdidas de estabilidad.
4. Necesitan partir de una configuración de patas inicial determinada por la trayectoria a seguir por el cuerpo, lo que dificulta los cambios en la trayectoria.

Para tratar de subsanar estos inconvenientes, se han estudiado modos de caminar periódicos adaptativos en los que se permiten ciertos ajustes

en la velocidad del vehículo o en las posiciones de los pies, a partir de un patrón periódico. Por ejemplo, los estudios encaminados a conseguir modos de caminar ondulatorios adaptativos, capaces de modificar ciertos parámetros como la velocidad, el factor de apoyo, las fases relativas o los recorridos de las patas han conseguido una cierta eficacia, pero únicamente en terrenos ligeramente irregulares (Jiménez y González de Santos 1997).

En los modos de caminar aperiódicos la secuencia de movimientos de las patas no está predeterminada ni se repite cíclicamente, sino que se decide en tiempo real en función de distintos criterios. El modo aperiódico más primitivo es el modo de apoyo preciso en el que un operador humano se encarga de seleccionar todos los puntos de apoyo y de controlar los movimientos del cuerpo.

Por tanto este modo de caminar sólo resulta práctico en aquellos casos en los que es imposible usar algún otro tipo de locomoción. En los modos de caminar de seguimiento discontinuo (*follow the leader*) el operador decide sobre el terreno únicamente los puntos de apoyo más apropiados para las patas delanteras, mientras que el algoritmo de locomoción se encarga de planificar los movimientos de la máquina (patas y cuerpo) de manera que todos los demás pies pisen en esos mismos puntos.

Dentro de los modos de caminar aperiódicos destacan, por lo amplio de su definición, los modos de caminar libres en los que un algoritmo de control decide, en todo momento, el orden y el instante en que se producen las transferencias de las patas, los puntos en los se apoyan los pies y la velocidad con que se mueve el cuerpo del vehículo. En estos algoritmos la pata que se transfiere se decide generalmente en función del margen cinemático (McGhee y Iswandhi 1979) que se define como la distancia que el punto de apoyo de la pata puede recorrer en sentido opuesto a la dirección de movimiento antes de llegar a la frontera de su volumen de trabajo.

4.1.5. Modo de caminar discontinuo

En los modos discontinuos, en cada instante, se mueve únicamente una pata o bien se desplaza el cuerpo del robot. El cuerpo del robot avanza solo en ciertas partes de la secuencia. Las principales ventajas de este modo son:

- Mayor estabilidad en terrenos irregulares: normalmente el cuerpo solo se mueve cuando todas las patas están asentadas en el suelo,

disminuyendo la posibilidad de vuelcos debidos a las inercias. Además, no es necesaria la coordinación precisa de movimientos, ni hacer estimaciones del instante de contacto con el suelo, ya que siempre que una pata cambia de estado el cuerpo se encuentra parado.

- Menor consumo energético: En cada momento sólo unos pocos actuadores realizan un trabajo positivo, por lo que el consumo es menor. Sin embargo el cuerpo y la carga debe ser continuamente acelerados y desacelerados.
- Mayor velocidad en terrenos especialmente irregulares: A pesar de que los modos continuos son más rápidos en terrenos planos, los modos discontinuos son capaces de alcanzar mayores velocidades en terrenos irregulares, si se pone como condición mantener márgenes de estabilidad aceptables (González de Santos y Jiménez 1995).
- Facilidad de implementación: Debido a que el movimiento de cada una de las patas se realiza mientras el cuerpo está quieto, sólo es necesario calcular la trayectoria de cada pata independientemente y luego sólo la del cuerpo, facilitando la ejecución de tareas a nivel de programación.

En el caso de Roboclimber la tarea a realizar, mientras el robot está caminando en el suelo, es el de posicionamiento y transporte de todos sus instrumentos y de todo el equipo necesario para realizar trabajos semi-autónomos de perforación. El problema se complica si se debe mover por terreno irregular.

En estas condiciones la estrategia de movimiento más conveniente es la del “Modo discontinuo de dos fases” (Hirose 1984)(González de Santos y Jiménez 1995) para los modos de caminar de los robots cuadrúpedos. La característica principal de esta secuencia de movimientos es que está diseñada para optimizar el MDE y la distancia recorrida en cada fase.

En la secuencia del modo discontinuo de dos fases (ver Figura 4.3), las patas se deben ubicar de tal forma que el MDE no se salga del polígono de apoyo del robot al levantar una de ellas. Esto se logra apoyando la pata en su límite cinemático anterior, después de haber realizado su transferencia. En la primera parte de la secuencia (ver Figura 4.3a) la pata 4 debe ser levantada y se debe mover hasta un punto en el que sea posible subir otra pata, sin perder estabilidad (Figura 4.3b); esto se debe hacer cuando el cuerpo del

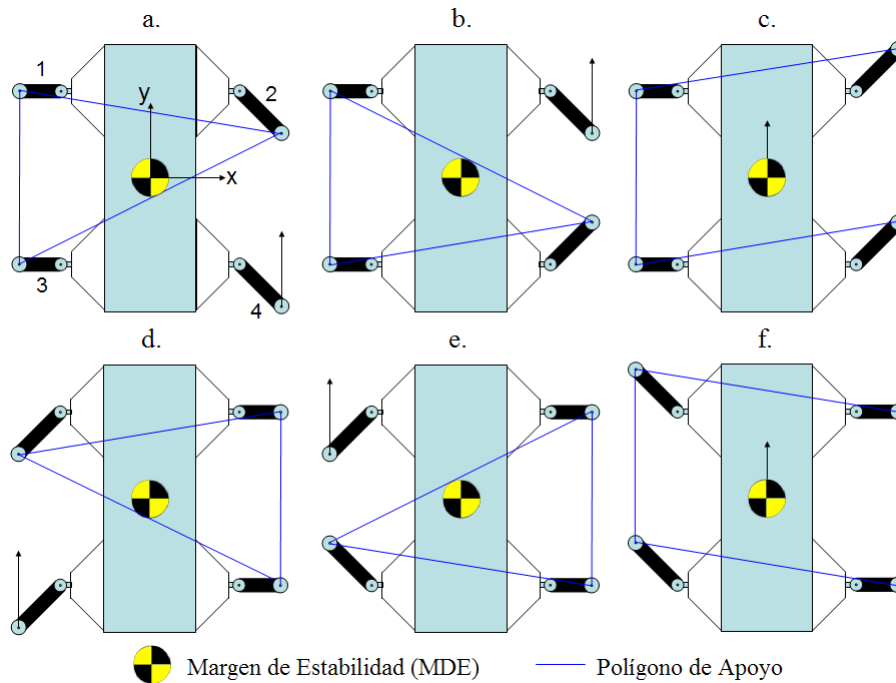


Figura 4.3: Modo de caminar discontinuo de dos fases.

robot está en posición estática. Después se mueve la pata 2 (Figura 4.3c) en el mismo sentido para luego poder hacer el movimiento del cuerpo que debe avanzar la mitad de la distancia recorrida por las patas (Figura 4.3d); de esta forma termina la primera fase. La segunda fase de la secuencia consiste en hacer los mismos movimientos (Figura 4.3e), pero con las patas del lado opuesto, es decir la pata 1 y la pata 3, y mover de nuevo el cuerpo del robot, terminando así con la segunda fase de la secuencia.

Analíticamente se puede determinar el grado de estabilidad de la posición de las patas mediante el MEL que, como se ha descrito anteriormente, está definido como la distancia más corta entre la proyección del centro de gravedad y el límite del polígono de apoyo en la dirección del eje longitudinal de la máquina (González de Santos y Jiménez 1995). El MEL se mide con respecto a la línea diagonal definida por dos pies no adyacentes y contralaterales ilustrada en la figura 4.3. En todos los casos de esta figura, la diagonal va desde una pata en el medio de su volumen

de trabajo (ver Capítulo 2) a una pata ubicada en su límite cinemático y cercano al centro de gravedad. Como se puede ver en la secuencia, el MDE es el mismo en todos los casos en los que el robot se encuentra en tres patas y por lo tanto se puede evaluar el MEL como valor absoluto de la abscisa de la diagonal en el origen:

$$MEL_d = \left| x_2 \left(\frac{y_3 - y_2}{x_3 - x_2} \right) + y_2 \right| \quad (4.7)$$

en donde $P_2(x_2, y_2)$ y $P_3(x_3, y_3)$ son los extremos de la diagonal.

Sustituyendo los valores de estos puntos por la primera postura (ver Figura 4.3a), $(-P_x/2, -P_y/2)$ y $(P_x/2, P_y/2 - R_y/2)$, de la Ecuación 4.7 se deduce que:

$$MEL_d = \frac{R_y}{4} \quad (4.8)$$

en donde P_x es la longitud del paso en la dirección del eje x , P_y es la longitud del paso en la dirección del eje y , y R_x y R_y son las dimensiones del área de trabajo de una pata que define la longitud del paso.

La desventaja más clara de los modos de caminar discontinuos con respecto a los modos de caminar continuos, es que además de ser más lentos, el cuerpo no está constantemente en movimiento; si el peso del robot es muy elevado, las inercias generadas al comenzar y al detener el movimiento del cuerpo pueden ser muy altas, y por consiguiente los esfuerzos que los actuadores y la estructura puede tener que soportar son muy elevados y frecuentes. Pero este problema es fácilmente admisible si se combinan unas bajas velocidades del cuerpo con unas rampas de aceleración y desaceleración moderadas.

En la gráfica (ver Figura 4.4) se muestra la posición de las articulaciones del Roboclimber durante un ciclo completo de un modo de caminar discontinuo de dos fases. De acuerdo con la geometría de la pata (ver Figura 2.8) es posible calcular el MEL_d de la ecuación 4.8 dependiendo de la posición de las articulaciones de las patas. Según la gráfica (ver Figura 4.4) el MEL máximo durante el modo de caminar discontinuo de dos fases es de 220 mm , lo cual lo hace un modo de caminar muy confiable con respecto al criterio de estabilidad.

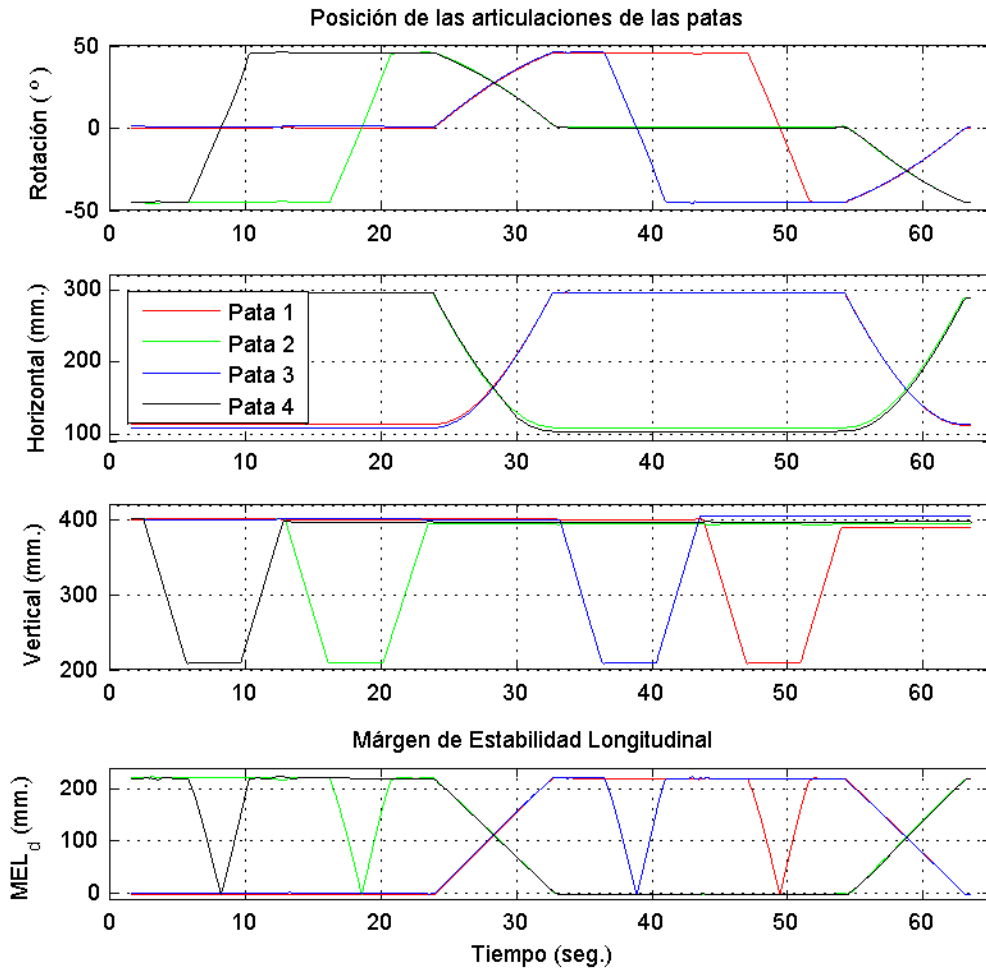


Figura 4.4: Posición de las articulaciones de Roboclimber en un modo de caminar discontinuo de dos fases.

4.1.6. Modo de caminar continuo

El modo continuo se caracteriza porque el cuerpo está constantemente moviéndose con respecto al suelo. La velocidad puede ser también variable (modos adaptativos) con el fin de dar tiempo a la máquina a adaptarse a terrenos irregulares o a la detección de obstáculos.

Los movimientos de las patas deben estar perfectamente coordinados

para asegurar el relevo en las funciones de apoyo y transferencia, asegurando siempre una base estable para el vehículo. Para ello es necesario tener una capacidad de cálculo importante en tiempo real, que sólo ha sido posible con el avance de los equipos informáticos.

Al hacer uso de un modo de caminar continuo sobre terrenos irregulares, existe la posibilidad de que el apoyo producido por la pata en transferencia no esté a la altura a la que está preestablecida por el sistema. Para evitar la inestabilidad que esta situación pueda provocar es necesario adaptar la velocidad del movimiento del cuerpo y de la trayectoria de las patas para equilibrar los cambios.

Dentro de los modos de caminar continuos hay que destacar los modos ondulatorios (*wave gaits*). En ellos la secuencia de levantamiento y apoyo de las patas comienza por la pata posterior, sigue con el movimiento de la pata que se encuentra por delante de ella y así sucesivamente. El tiempo de transferencia de una pata debe ser calculado de tal forma que sea posible que, mientras el cuerpo esté en movimiento, la siguiente pata no alcance su límite cinemático. El levantamiento de las patas, en este orden, produce la sensación de una onda que se desplaza a lo largo del cuerpo en el sentido de la marcha. El modo ondulatorio es el más común en la naturaleza, siendo usado por la mayoría de los insectos y por cuadrúpedos cuando la velocidad de avance es pequeña.

Los dos conceptos más importantes en el estudio de los modos ondulatorios son el factor de apoyo β y las fases relativas Φ_i .

El factor apoyo representa la fracción de tiempo en que una pata se encuentra en estado de apoyo frente a la duración del ciclo. Al aumentar el valor de β también se aumentará el número de patas en apoyo, mejorando la estabilidad del vehículo y disminuyendo la velocidad. Una disminución de este factor produce un aumento del número de patas en transferencia, y por tanto una disminución de la estabilidad, mientras que la velocidad aumenta.

La fase relativa de la pata, Φ_i , representa la fracción del tiempo de ciclo que una pata retrasa su localización respecto a la pata en transferencia. Esto significa que, después de que una pata haya hecho una transferencia, la siguiente pata debe esperar un tiempo para hacer la suya; si este tiempo disminuye, la estabilidad aumenta puesto que el robot se acerca a la máxima capacidad cinemática pero, por el contrario, disminuye el tiempo de reacción en el caso en que el apoyo se realice sobre una superficie irregular.

Se pueden describir estos modos mediante las ecuaciones que representan las fases relativas de cada pata en función del factor apoyo. En el caso concreto de cuadrúpedos, estas ecuaciones son:

$$\phi_1 = 0, \quad \phi_2 = \frac{1}{2}, \quad \phi_3 = \beta, \quad \phi_4 = F(\beta - \frac{1}{2})$$

en donde:

$$\begin{aligned} F(y) &= \text{parte fraccionaria de } y && \text{si } y > 0 \\ F(y) &= \text{parte fraccionaria de } |y| && \text{si } y < 0 \end{aligned}$$

Por lo tanto las patas de un mismo lado están desfasadas una fracción de β del ciclo completo de locomoción, mientras que las contralaterales están desfasadas medio ciclo.

El MEL para un robot cuadrúpedo en un modo de caminar ondulatorio se define como:

$$MEL_c = \lambda(\beta - \frac{3}{4}); \quad 1 > \beta \geq \frac{3}{4}; \quad y \quad R_y \leq P_y \quad (4.9)$$

en donde λ es la distancia que se mueve el centro de gravedad en un ciclo completo de locomoción.

Esta distancia está dada por:

$$\lambda = \frac{R_y}{\beta} \quad (4.10)$$

en donde β , como ya se ha definido anteriormente, es la fracción de tiempo en un ciclo completo de locomoción en la que cada pata esta apoyada en el suelo.

Sustituyendo la Ecuación 4.10 por la Ecuación 4.9 se puede deducir que el MEL para un modo de caminar ondulatorio asume valores entre cero y $R_y/4$, mientras que en el modo discontinuo el MEL puede ser constantemente $R_y/4$ (ver Figura 4.5)(González de Santos y Jiménez 1995).

En la gráfica (ver Figura 4.6) se muestran las posiciones de las articulaciones de las patas de Roboclimber durante un ciclo completo de un modo de caminar continuo a una velocidad de 20 mm/seg .

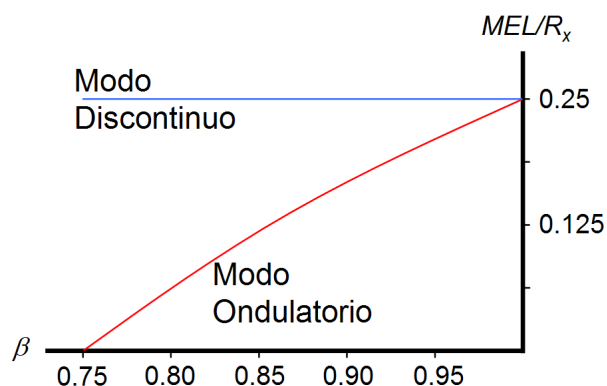


Figura 4.5: Comparación entre el MEL del modo de caminar continuo y el discontinuo.

Según se puede deducir de las posiciones de las articulaciones, el tiempo total de un ciclo completo en el modo de caminar continuo es de 46.6 seg y el tiempo medio de transferencia de una pata es de 9.8 seg . Por lo tanto el factor de apoyo de una pata es $\beta = 0.7864$. De esta forma se puede calcular el valor que determina del MEL_c (4.9) ilustrado (véase Figura 4.6) según las posiciones de las articulaciones de las patas del robot.

En este caso el valor máximo del MEL_c que puede llegar a alcanzar es de 41 mm valor muy por debajo del margen de estabilidad en el modo de caminar discontinuo.

La principal ventaja de los modos de caminar continuos es la mayor velocidad que pueden proporcionar con respecto a los modos discontinuos, aunque el modo continuo suele ser muy eficiente de forma especial en terrenos regulares. Sin embargo, cuando el objetivo es desplazarse por terreno irregular puede ser más conveniente en la práctica emplear el modo de caminar discontinuo de dos fases.

4.1.7. Modos de cambio de dirección o de trayectoria

Existen otros modos de locomoción para el desplazamiento de las máquinas caminantes que se utilizan principalmente para cambiar el sentido o la orientación del movimiento. Entre ellos se encuentran los modos circulares, laterales o los de cambio de deriva. En esta memoria se describirán los primeros dos por ser los más susceptibles de implementarse

en Roboclimber.

En los modos de caminar estudiados anteriormente, la consideración principal fue la de mantener la misma posición de las patas después de un ciclo completo. En los modos de cambio de trayectoria, para mantener la estabilidad, es necesario hacer un mayor número de movimientos por ciclo, como se describe en los siguientes apartados.

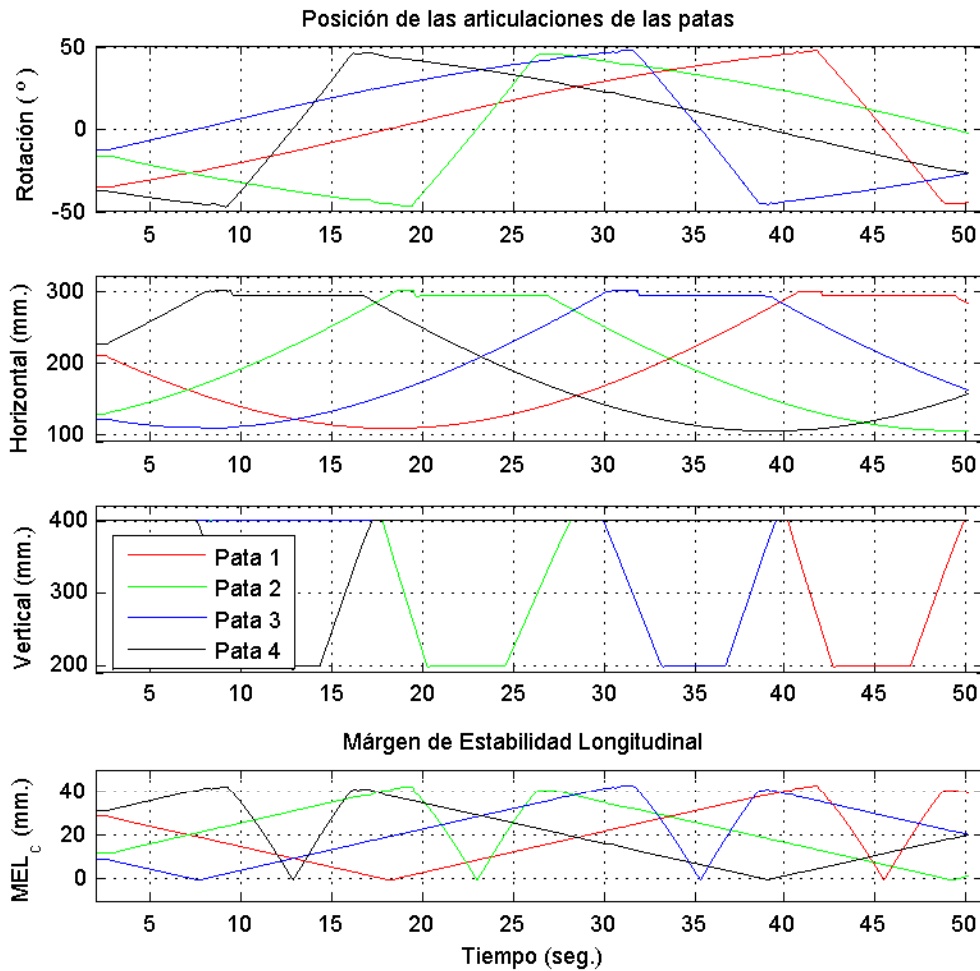


Figura 4.6: Posición de las articulaciones de Roboclimber en un modo de caminar continuo.

- **Modo de rotación:** En el modo de rotación o giro de radio nulo, el cuerpo cambia de orientación con respecto al eje z manteniendo fija su posición con respecto al plano (x, y) . En el caso de los robots cuadrúpedos es necesario cambiar la secuencia de los movimientos de las patas para efectuar estos giros (ver Figura 4.7).

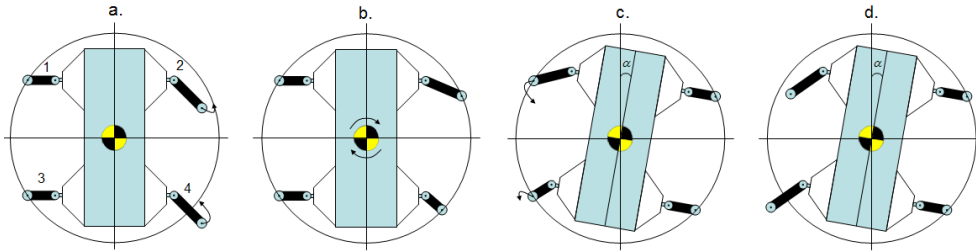


Figura 4.7: *Modo de locomoción de rotación.*

En la Figura 4.7a se muestra la posición inicial de las patas que es en donde deben estar al final de las fases del movimiento, es decir en su límite cinemático. Después de ubicar las patas 4 y 2, el cuerpo rota; pero esta rotación no ubicará de forma correcta las patas al final de la fase. Para volver a ubicar las patas en la posición correcta, se deben volver a hacer los movimientos de las patas 3 y 1. Pero si se realiza otra rotación no es necesario realizar la reubicación de las patas sino que se puede seguir la secuencia desde la tercera posición, como se muestra en la Figura 4.7c, y mover las patas en el sentido correcto para la siguiente rotación.

La ubicación de las patas al final de la primera fase (ver Figura 4.7b) se calcula aplicando una rotación homogénea alrededor del eje z de $\alpha/2$, a la posición de la pata al final de la primera fase del modo de dos fases. El ángulo α por el que rota el cuerpo en la locomoción debe ser un submúltiplo del ángulo rotado en toda la trayectoria β , como por ejemplo $\alpha = \beta/n$, donde n es el número de ciclos de locomoción necesarios para completar una trayectoria completa.

En el caso del modo de rotación de Roboclimber (ver Figura 4.8) se ha diseñado una secuencia en la que es posible rotar el cuerpo del robot con un ángulo $\alpha = 10^\circ$ por cada uno de los ciclos de rotación $n = 2$.

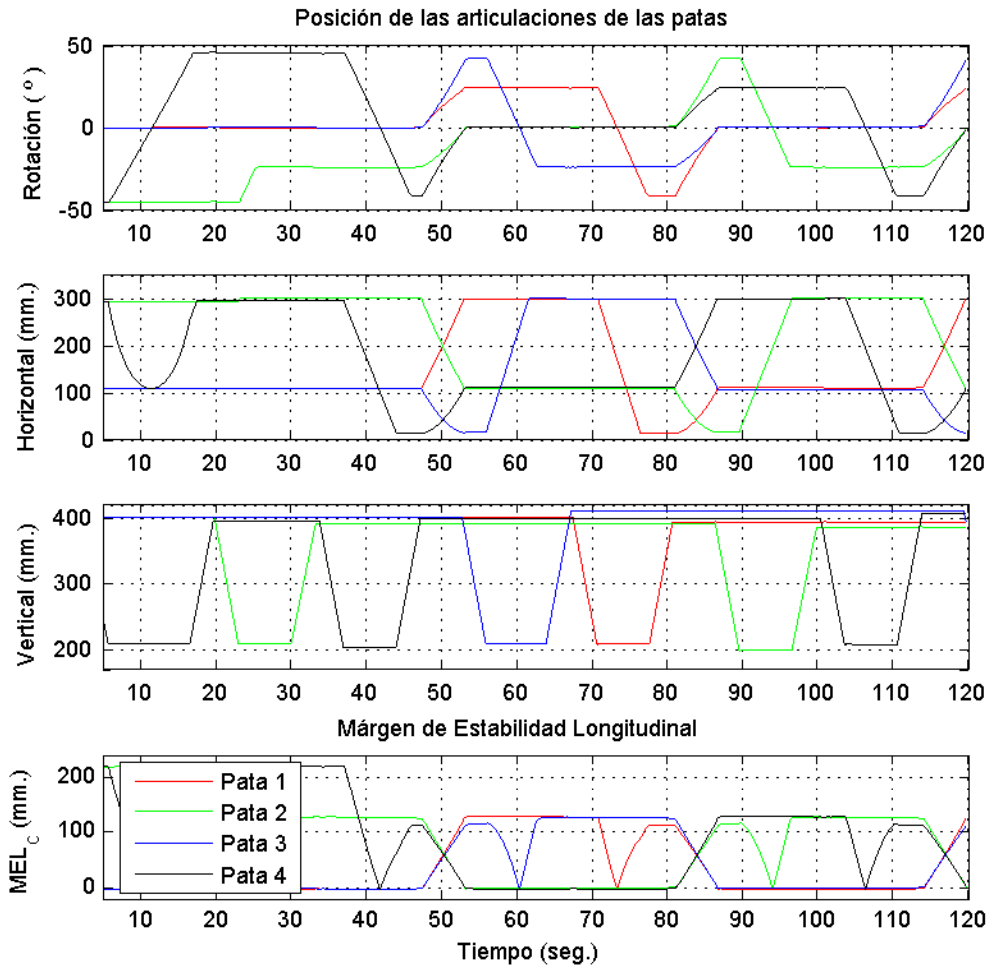


Figura 4.8: Posición de las articulaciones de Roboclimber en un movimiento de rotación.

Los modos de giros de radio nulo tiene el mismo objetivo que los modos de deriva (capacidad de seguir trayectorias angulares) y los giros de radio no nulo (orientación del cuerpo de manera que se optimice la velocidad de avance en línea recta), pero el tiempo invertido en el movimiento sólo se utiliza para el cambio de dirección sin hacer ninguna traslación. A cambio, su estabilidad está más controlada.

- Modo lateral:** En el modo de locomoción lateral, al igual que en el modo de rotación, debido a que en la posición inicial del robot algunas de las patas están en su límite cinemático, hay que añadir algunos movimientos al principio del ciclo y así poder mover el cuerpo del robot, para después reubicar las patas a su posición inicial al final del ciclo.

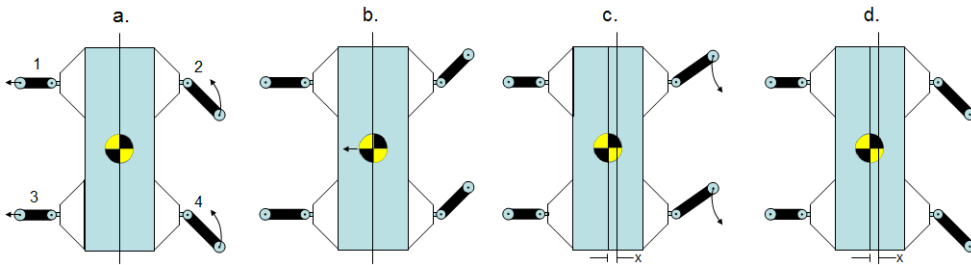


Figura 4.9: *Modo de locomoción lateral.*

En la preparación del movimiento lateral es necesario hacer cambios en las posiciones de las patas 3, 4, 2 y 1 consecutivamente con respecto a la posición inicial (véase Figura 4.9a y b) para poder desplazar la posición del cuerpo lateralmente en el sentido del movimiento indicado por la flecha (véase Figura 4.9c). Después del movimiento del cuerpo y de haberse desplazado una distancia $x = 110 \text{ mm}$ (ver Figura 4.9c) es necesario hacer dos movimientos adicionales en las patas 2 y 4 respectivamente para lograr ubicar el conjunto en su posición inicial.

En la gráfica (ver Figura 4.10) se ilustra un modo de locomoción lateral con un ciclo completo de dos fases en donde la distancia máxima de desplazamiento x es de 300 mm .

Puesto que el tiempo requerido por esta secuencia es muy alto, sin que realmente se logre un desplazamiento notable, este tipo de movimientos son empleados sólo para aumentar la versatilidad en el robot, sobre todo en los casos en los que el espacio de maniobra es limitado.

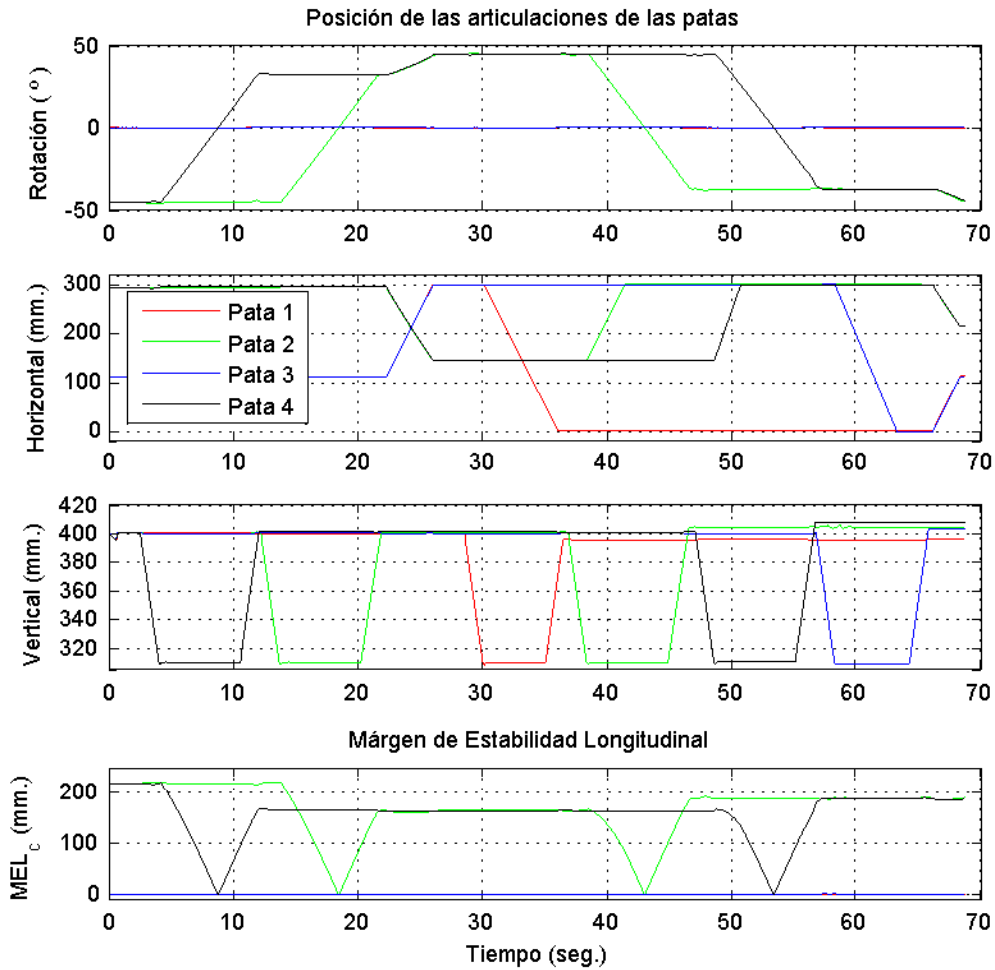


Figura 4.10: Posición de las articulaciones de Roboclimber en un movimiento lateral.

4.2. Modo de escalar

Existe una diferencia fundamental en el estudio de la estabilidad de los robots escaladores con respecto a los robots caminantes y es que no existe una proyección directa del centro de gravedad del cuerpo respecto al polígono de apoyo de las patas en la superficie de escalado (Grieco 1997)(Song y Waldron 1989). Si se considera un robot subiendo por una

superficie inclinada la proyección del centro de gravedad del cuerpo sobre el polígono de apoyo se ve desplazada en la dirección de descenso reduciéndose el margen de estabilidad.

Por esta razón existe una pendiente máxima de ascenso que puede ser salvada sin que la máquina se desestabilice. A partir de dicha pendiente es necesario el uso de mecanismos de sujeción que mantengan el robot adherido a la superficie de escalado.

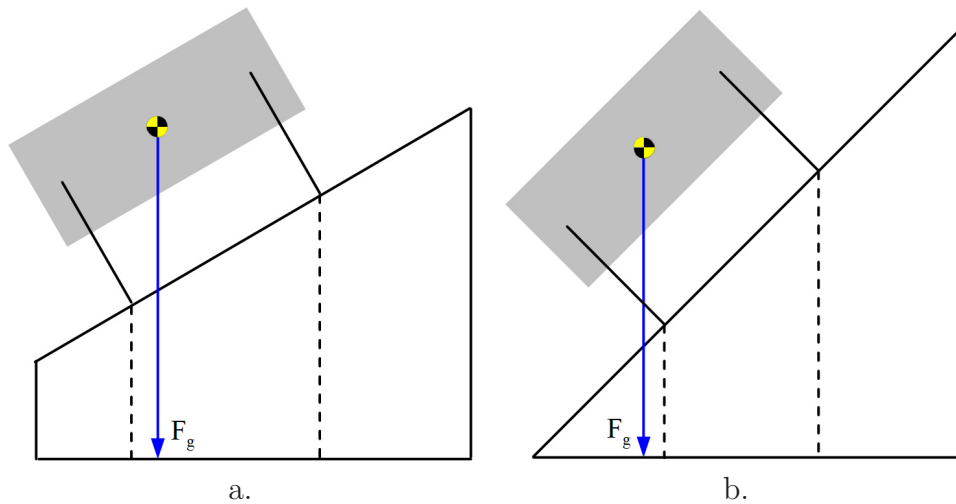


Figura 4.11: Ejemplo de adaptabilidad en superficies inclinadas. (a) Estable y (b) Inestable.

En el caso de un robot caminante, la fuerza que mantiene el vehículo unido a la superficie durante la locomoción es su propio peso. La proyección del centro de gravedad sobre el polígono de apoyo representa el punto sobre el cual el momento asociado a las fuerzas es nulo (ver Figura 4.11). Pero si hay fuerzas adicionales a la fuerza de la gravedad actuando sobre el vehículo o no es posible configurar cinemáticamente el robot para su estabilidad, el centro de gravedad puede salirse del polígono de apoyo, como lo es el caso de un robot con patas en una superficie inclinada.

4.2.1. Análisis del modo de escalar

Para evitar los momentos generados por el peso del sistema en superficies inclinadas, algunos robots utilizan métodos de sujeción a la superficie y una generación de movimientos para propulsar el robot verticalmente, como por ejemplo patas magnéticas y los modos de escalar del robot REST (Grieco 1997) o por medio de ventosas de vacío y los modos de escalar de cuadrúpedos diseñados para el robot NINJA I (Akihiko y Hirose 1994) o el Robug II (Luk et al. 1991), pero sus aplicaciones son muy concretas debido a que las condiciones superficiales en las que deben trabajar son muy específicas.

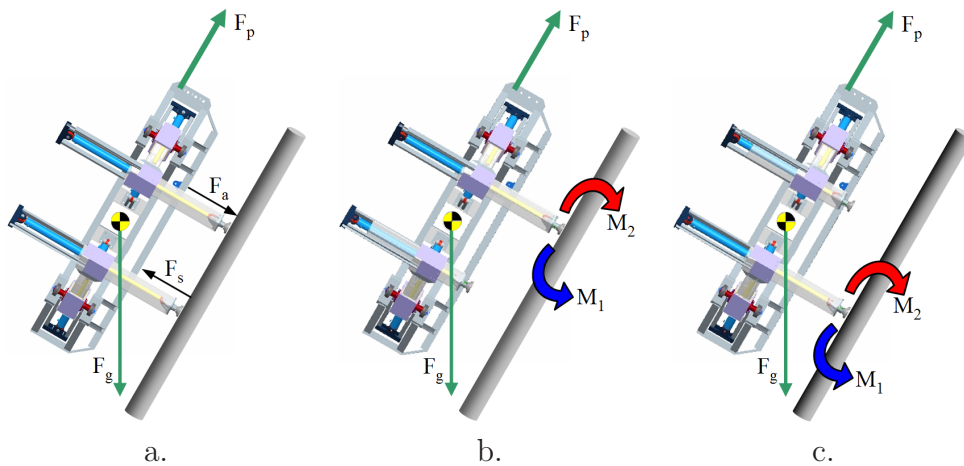


Figura 4.12: Momentos generados en superficies inclinadas.

Existen otros robots que deben escalar en superficies irregulares y utilizan soportes complementarios como lo son los cables, como el TITAN VII (Hirose et al. 1997) al que se le aplicó un modo de subir por las pendientes llamado “Modo de Avance Intermitente” pero diseñado para superficies con inclinaciones de alrededor de 30° ; y otros como el Dante II (Bares y Wettergreen 1999) que utiliza un novedoso sistema en el que el robot cambia la configuración de sus ocho patas para trasladarse por superficies muy inclinadas.

Los conceptos clásicos de estabilidad para escalar diseñados para los robots que se sujetan con dispositivos de adherencia especiales no son

directamente aplicables a Roboclimber. Por otro lado, los conceptos para escalar con mecanismos de sujeción que emplean cables sí son de interés para nuestro trabajo, aunque las dimensiones, la configuración y el peso de Roboclimber obligan a modificar o a mejorar los conceptos actuales. Por este motivo, se propone en esta tesis un nuevo método de escalado, que presenta la ventaja de poder ser aplicable en general para cualquier tipo de robot aunque no esté especialmente diseñado para escalar. El diseño del nuevo modo de locomoción para escalar y su evaluación experimental se presenta en el siguiente apartado.

4.2.2. Modo de escalar de una fase

En la figura (véase Figura 4.12) se presenta una configuración cuasi-estática con las patas lo más cerca posible entre ellas, donde la proyección del centro de gravedad de la máquina se encuentra detrás de las patas traseras. En este caso el robot volcaría hacia atrás si no se estuviera contrarrestando el par de vuelco con el generado por la fuerza F_p por medio de los cables. La fuerza de agarre es la componente ortogonal a la superficie resultante del peso de la máquina con respecto a la inclinación de la superficie que, aunque se trate de inclinaciones muy altas (hasta cerca del 100%), esta fuerza debe de ser capaz (lo es en teoría) de evitar la separación entre la máquina y la superficie de la ladera (por ejemplo en las tareas de perforación) (Nabulsi y Armada 2004)(Montes et al. 2004a).

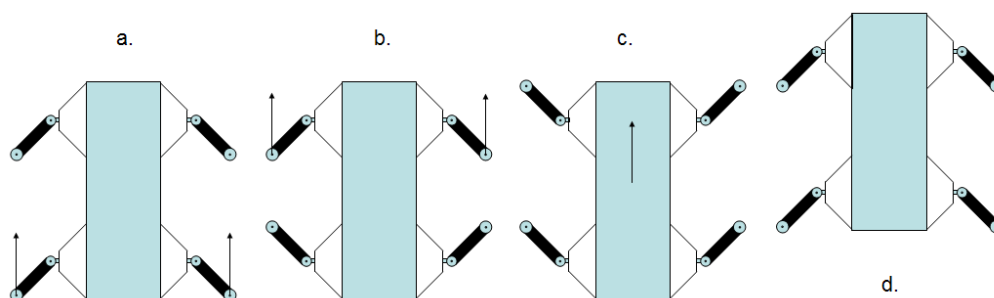


Figura 4.13: Modo de locomoción de escalar de una fase.

El objetivo de los movimientos del modo de escalar que se propone es el de lograr desplazar las patas evitando inestabilidades tanto verticales como

horizontales, para que después sea posible trasladar el cuerpo. Para lograrlo, la propuesta es que, a diferencia de lo que ocurre en los modos de caminar, la proyección del centro de gravedad debe estar siempre por detrás de las patas de apoyo; de esta forma se logra que el momento generado por el peso del cuerpo siempre tenga la dirección M_1 . Así, cuando las dos patas anteriores se levanten, como se muestra en la Figura 4.12 b y c, el apoyo de las patas posteriores es suficiente como para hacer una fuerza de soporte F_s y mantener una distancia con la superficie, mientras los cables soportan el peso de la máquina manteniendo así su posición y un equilibrio entre las fuerzas de propulsión F_p y de los momentos M_1 y M_2 .

$$M_1 + M_2 = 0 \quad (4.11)$$

Si por el contrario, el momento resultante por la proyección del centro de gravedad es en sentido M_2 , es decir, si la proyección del centro de gravedad estuviera por delante del apoyo de las patas, la máquina tendería a girar hacia adelante en el instante en que las patas delanteras fueran levantadas. También ocurriría lo mismo si, por ejemplo, se levantaran sólo las patas de uno de los lados del robot, creando un desequilibrio lateral. Por consiguiente el modo de escalar se ha deducido a partir de esta problemática (ver Figura 4.13).

A diferencia de los modos de caminar, la posición inicial del robot cuadrúpedo para el modo de escalar propuesto, requiere que todas las patas estén en la misma posición relativa según se muestra en la Figura 4.13a. La transferencia de las patas posteriores se debe hacer de forma simultánea (b). A continuación se realiza el movimiento de las patas anteriores (también simultáneo) (c), y en tercer lugar se hace la transferencia del cuerpo activando simultáneamente los Tirfor como medio de propulsión (ver sección 2.1.4), desplazando el cuerpo la misma distancia recorrida por las patas (d) y a la misma velocidad que los cables de arrastre, llegando las patas a su límite cinemático, y estando entonces dispuestas para un nuevo ciclo de locomoción.

Puesto que para la etapa de experimentación de un equipo como este, es muy complejo crear una infraestructura para lograr realizar experimentos de los modos de escalar en condiciones de laboratorio y realizar comparaciones adecuadas, se han simulado inicialmente las posiciones de Roboclimber para evaluar su comportamiento (ver Figura 4.14). Entre las ventajas más importantes de este modo de escalar está que, además de asegurar la

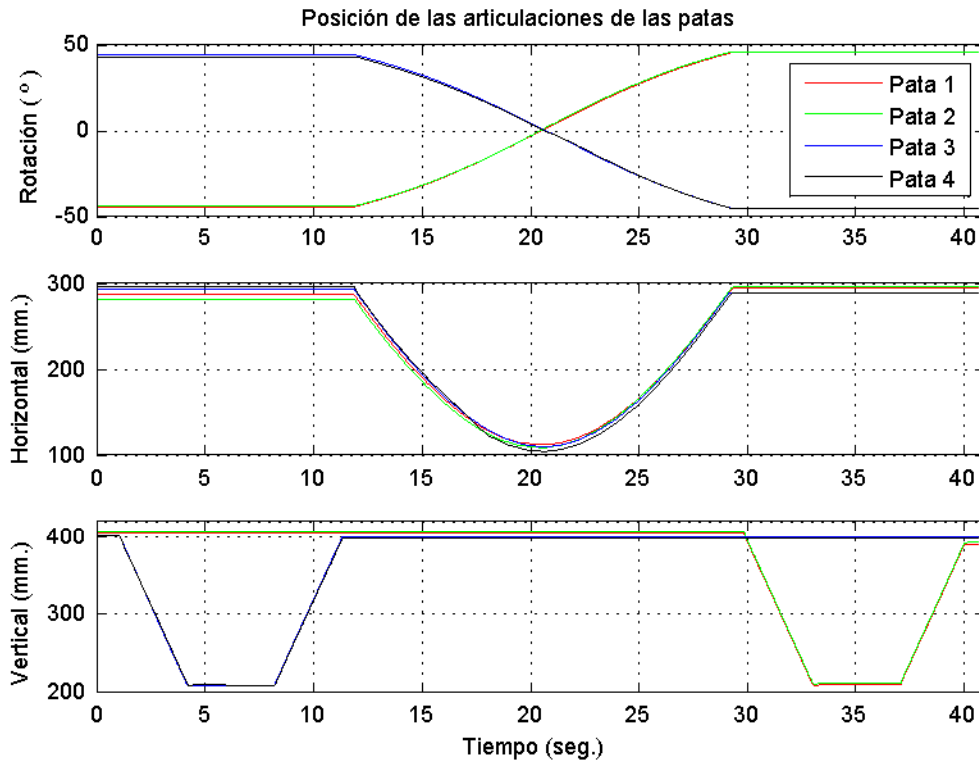


Figura 4.14: Simulación de los movimientos de Roboclimber en un modo de escalar.

estabilidad del sistema, es muy rápido puesto que con sólo una fase se logra un recorrido cinemático completo haciendo de éste un modo de locomoción muy eficiente con respecto a otros modos de caminar. En este caso es posible realizar un paso completo en 40 *seg* y avanzar 890 *mm*. Además su implementación es mucho más sencilla que la de otros modos de escalar, puesto que la cantidad de cálculos necesarios para completar el proceso se ven disminuidos.

Este modo de escalar está optimizado para que la proyección del centro de gravedad esté lo más alejado posible del margen de estabilidad longitudinal (MEL). Pero es necesario que la distancia entre el cuerpo y la superficie sea suficiente como para que en el instante en que las patas posteriores se separen de ésta, debido al momento M_1 (ver Figura 4.12),

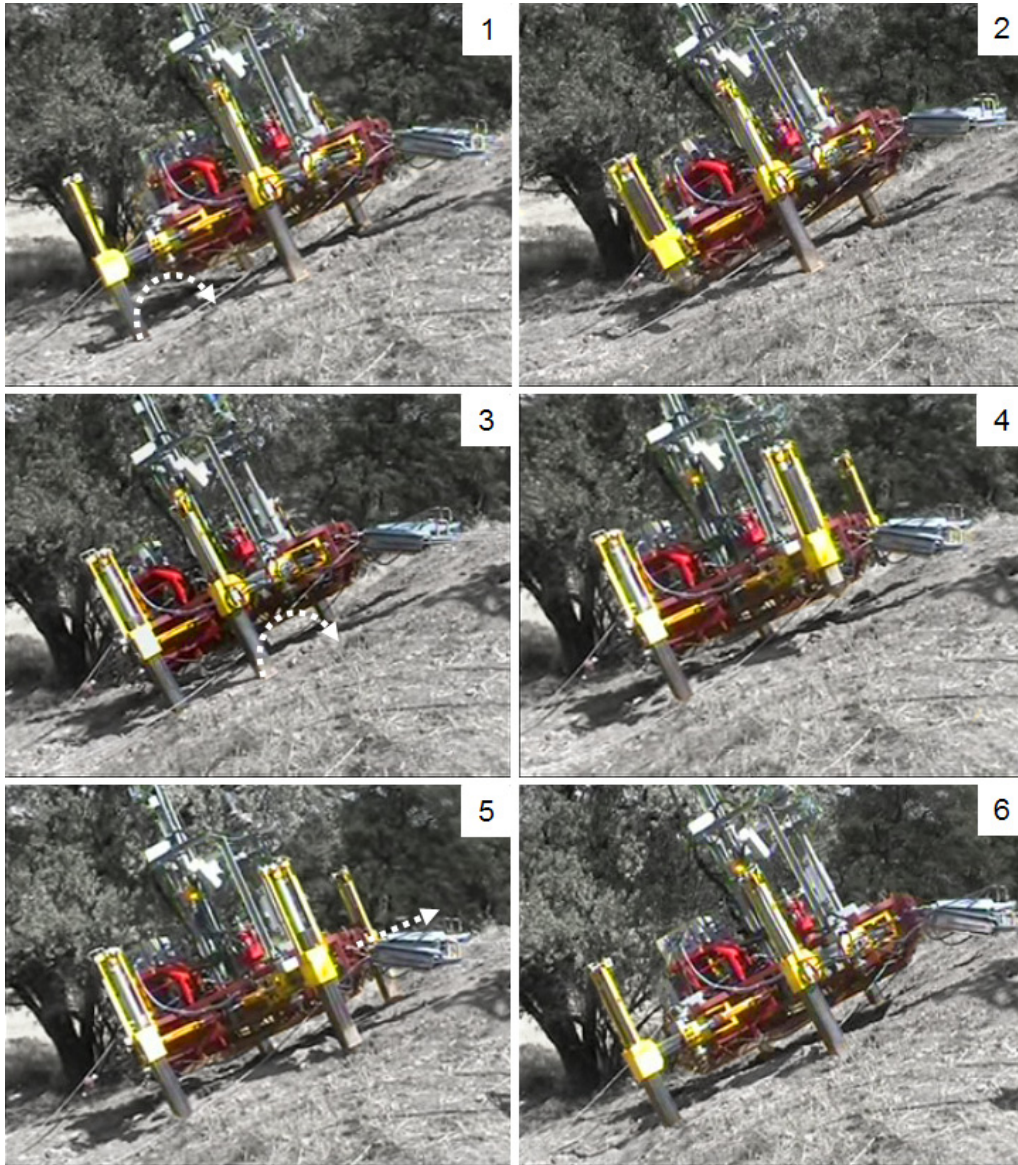


Figura 4.15: *Secuencia del modo de escalar de una fase de Roboclimber.*

la deformación de la estructura y de los cables no sean suficientes como para que la estructura haga contacto con la superficie. Es factible que esta

situación ocurra, sobre todo cuando se está trabajando sobre superficies muy irregulares; aunque si este es el caso, no sería un gran inconveniente, ya que si el cuerpo toca la superficie durante la transferencia de las patas, el único requerimiento sería que el cuerpo debería estar en apoyo estático.

Una vez que el algoritmo propuesto de escalado de una fase fue simulado se implementó en el sistema de control del robot y se evaluó experimentalmente con excelentes resultados. En la Figura 4.15 se presenta una secuencia de fotos que ilustra una de las pruebas de campo realizadas.

Capítulo 5

Diseño y evaluación experimental de estrategias de control reactivo para locomoción sobre terreno natural

Como ya se ha indicado en el Capítulo 1 de esta memoria, una de las principales características de los robots equipados con patas para su desplazamiento es su capacidad para poder moverse sobre una amplia variedad de terrenos no estructurados. Esta característica los hace muy atractivos e interesantes para su aplicación práctica como robots de servicios en los que se requiere la locomoción sobre terreno natural, el cual se caracteriza por presentar superficies irregulares, diversos tipos de obstáculos y distintas pendientes.

Los modos de locomoción introducidos en el Capítulo 4 de esta memoria constituyen la base indispensable para hacer caminar de forma estable un robot cuadrúpedo en un terreno plano y libre de obstáculos. Sin embargo, nuestro objetivo es conseguir una locomoción estable sobre terreno natural, lo que implica que se pretende caminar sobre terrenos irregulares, con suelos de distintas propiedades mecánicas (Maza et al. 1997) que son muy difíciles de prever con antelación, y en presencia de obstáculos que hay

que sobrepasar o evitar. A esto hay que añadir la necesidad de llevar a cabo tareas específicas (como llevar a bordo algún tipo de instrumentación o, por ejemplo, herramientas pesadas para la realización de tareas de consolidación). Estas condiciones, impuestas por la necesidad de caminar de forma estable sobre terreno natural, implican que los modos de locomoción que hemos presentado deberán modificarse para adaptarse a la nueva situación. Para hacer frente a este problema existen diversas alternativas, que requieren distintos grados de conocimiento del terreno por el que debe evolucionar el robot, por lo que es muy importante la búsqueda de soluciones que contemplen la mayor casuística de situaciones posible. Este es un problema muy complejo, y la adquisición de dicho conocimiento del terreno puede llevarse a cabo por medios muy diversos y con distintas metodologías. En esta memoria se ha optado por el empleo de estrategias de control reactivo, de modo que el sistema de control del robot no necesite tener conocimiento a priori de las condiciones del terreno, sino que sea capaz de modificar su comportamiento en tiempo real manteniendo las especificaciones globales de estabilidad y funcionamiento dentro de unos límites prácticos y razonables. Para la implementación y la evaluación experimental de las diversas estrategias de control reactivo que se presentan en este Capítulo, se emplean los resultados obtenidos en el Capítulo 3 de la memoria relativos a la percepción de las fuerzas de reacción. Por este motivo, se ha añadido el módulo de **control reactivo** a la arquitectura de control del robot (ver sección 2.3). El control reactivo del robot posee una colección de conductas que dependen del sistema de percepción sensorial y, por lo tanto, la conducta del robot emerge de la interacción entre el ambiente y dichas conductas (Brooks 1986). El módulo **generador de movimientos** del robot se usa como mecanismo de coordinación que determina la importancia relativa de las conductas a seguir en cada instante.

Tanto para la implementación de las estrategias de control reactivo que se proponen como para su evaluación experimental se ha empleado como plataforma a Roboclimber, con el que se han realizado pruebas exhaustivas y multitud de experimentos. Esta fase de experimentación, de la cual se presentan los resultados más relevantes, ha servido también para evaluar la funcionalidad del robot en distintos tipos de situaciones con las que se va a tener que enfrentar, habitualmente, un robot de servicios que tiene que trabajar en ambientes y condiciones naturales, lo que significa, en la práctica, condiciones muy exigentes y de un grado de dificultad elevado.

Por consiguiente, aunque se haya empleado Roboclimber como plataforma de experimentación, muchos de los resultados obtenidos son de aplicabilidad, en general, al problema del control de robots caminantes sobre terreno natural.

El primer intento para poder controlar el robot de forma reactiva por terrenos irregulares ha sido la implementación de un mecanismo todo o nada de detección del suelo, cuyos resultados, que ya han sido presentados en el Capítulo 3 de esta memoria (ver sección 3.1), resumimos por conveniencia a continuación. Es posible usar este mecanismo de detección todo-nada en condiciones de escalado y en modos de caminar, siendo el objetivo que, durante la fase de transferencia de una pata, al tener que apoyar la pata nuevamente sobre la superficie no importe a qué altura lo haga: la pata se debe detener en el instante del contacto, y el resto del robot debe seguir su proceso de locomoción. Con este método sencillo se consigue que por superficies irregulares se mantenga el cuerpo del robot, de forma aproximada, paralelo a la superficie del terreno, por lo que, en teoría, se mantendrá estable. Si las irregularidades del terreno no son muy significativas respecto a las dimensiones del robot, este método es muy sencillo, requiere poca carga de cálculo, y proporciona buenos resultados en la práctica. En el caso de que las irregularidades sean de una magnitud significativa (consideradas localmente o a lo largo del camino del robot) será preciso emplear la información de otros sensores para modificar el algoritmo de locomoción.

Así pues, el contenido del presente Capítulo se centra en analizar como se pueden mejorar o adaptar los modos de locomoción para caminar sobre terreno natural empleando diversos conceptos de control reactivo, cuyo objetivo, en términos generales, es alterar la inercia aparente del robot. Con esta finalidad se han investigado las siguientes líneas:

- Adaptación activa mediante la medida indirecta del entorno (control indirecto de fuerza mediante la medida de distancias sin contacto).
- Adaptación activa mediante la realimentación directa de las fuerzas de interacción (control directo de fuerza).

La primera línea de actuación está encaminada a evaluar un sistema de control cuya misión es que el cuerpo del robot siga de forma estable y suave las variaciones (en altura) del terreno. El algoritmo propuesto resulta

en un control de acomodación (Whitney 1977), una de las técnicas más sencillas de control de impedancia, que regula la altura del robot respecto al suelo, y que da resultados aceptables a velocidades bajas o medias. El controlador indirecto de fuerza propuesto en esta memoria, a diferencia de otras realizaciones (Morel et al. 1998), emplea sensores de ultrasonidos que proporcionan una medida indirecta de fuerza que es función de la distancia, bien desde el cuerpo hacia el suelo, o bien desde el cuerpo hacia obstáculos situados en la dirección del movimiento. Esto permite que se ataquen no solo los problemas de “interacción” robot-suelo y de acomodación a la superficie del mismo, sino que además es posible controlar la acomodación del robot con los obstáculos que aparezcan en su trayectoria. El control de acomodación que se obtiene con esta metodología, siendo superior al simple control todo-nada del contacto, es una primera aproximación al control de impedancia, y no permite estrictamente un control de la interacción dinámica del robot caminante con el entorno, ya que no se tienen en cuenta ni la impedancia mecánica real del robot ni la del entorno.

Por esta razón, la segunda línea de actuación propuesta se basa en el empleo de algoritmos de control directo de fuerza que emplean la realimentación de las fuerzas de contacto, y cuya finalidad es regular la interacción dinámica del robot con el entorno. En otras palabras, el objetivo es alterar la inercia aparente del robot de modo que se obtenga un comportamiento reactivo deseado entre el robot y el entorno. En este caso los cambios en la dinámica del robot debidos a variaciones en la carga, movimiento de las patas, inclinación del cuerpo, etc., se tienen en cuenta y se pueden modificar los algoritmos de locomoción para asegurar la estabilidad dinámica. Además, al medir las fuerzas de contacto se puede determinar el punto de momento cero, lo que permite diseñar nuevos algoritmos de locomoción. El sistema de medida de fuerzas que se utiliza se basa en la medida de la presión hidráulica en una o en las dos cámaras de los cilindros hidráulicos, tanto en las articulaciones verticales como en las horizontales del robot (ver sección 3.3).

5.1. Adaptación activa mediante la medida indirecta del entorno

Cuando un robot caminante se desplaza sobre un terreno natural los pies interaccionan de forma continuada con el suelo. Dependiendo de las propiedades del terreno y de la distribución de masas en el robot, las fuerzas de interacción cambian su magnitud y dirección en una forma impredecible, lo que implica dificultades importantes para la consecución de los objetivos especificados. Es por ello necesario incluir de alguna forma la información de la interacción real robot-entorno, para que el sistema de control tome las decisiones oportunas y pueda asegurar el cumplimiento de los objetivos.

Una primera aproximación a este problema es medir el entorno de forma indirecta empleando sensores de distancia. Si bien esta aproximación, en principio, no da una medida real de la interacción dinámica robot-entorno, ya que no hay medida directa del contacto físico, vamos a mostrar como es posible obtener una medida indirecta cuantitativa de dicha interacción mediante la interpretación de los datos de distancia como fuerzas virtuales. Así pues, en este apartado se proponen nuevas estrategias de adaptación activa mediante la medida indirecta del entorno empleando sensores de distancia ultrasónicos. Una serie de implementaciones servirán para ilustrar los resultados obtenidos.

Una de las pruebas realizadas, durante la evaluación experimental de los modos de locomoción, ha sido la de sortear diferentes cambios de superficies y suelos y la superación de obstáculos. Adicionalmente a lo mencionado anteriormente en esta memoria (ver sección 3.4) a continuación se ilustra una de las situaciones con las que es posible encontrarse en un medio con características cambiantes como lo es el entorno natural.

Como se ilustra en la secuencia de imágenes (ver Figura 5.1) es posible, cambiar durante un modo de caminar, de un nivel a otro usando solo el sistema de detección del suelo (ver sección 3.1). Pero a partir de las pruebas realizadas con los sensores de contacto se han detectado algunos problemas que se pueden solucionar, al menos parcialmente, mediante el uso de sensores de medida externos como, en este caso, los sensores ultrasónicos.

Según el control incorporado en el robot, si una pata detecta el suelo, el movimiento de la pata se detiene realizando las correcciones necesarias (ver sección 3.1). En este caso (ver Figura 5.1b) al detectar el cambio,



Figura 5.1: *Roboclimber* durante un modo de caminar en exteriores. a) Terreno irregular y blando, b) Superación del obstáculo y c) Terreno plano y suelo rígido

el obstáculo casi superaba el límite de la capacidad cinemática del robot, motivo por el cual el cuerpo roza la superficie rígida. Una vez que las patas estuvieron sobre la superficie rígida, el operador ha tenido que subir el cuerpo del robot bajo control manual para poder trasladarse después por la superficie de forma segura (ver Figura 5.1c).

El robot debería tener la suficiente autonomía para poder tomar las decisiones necesarias para solventar este tipo de situaciones de forma autónoma y así mejorar sus capacidades. Por este motivo, se propone incorporar al sistema de control sensores de medida externa para ayudar al robot a adaptarse a los cambios bruscos de superficies y de tipos de suelos.

Diversos experimentos se han llevado a cabo para verificar que con el uso de este tipo de sensores es posible realizar un sistema de control viable para la locomoción de robots con patas, no sólo en superficies irregulares sino también en distintos tipos de suelos.

La idea consiste en utilizar la información generada por los sensores ultrasónicos en un lazo adicional de realimentación del sistema de control en el que se modifica la velocidad del cuerpo del robot dependiendo de una fuerza generada en función de una distancia deseada. En el momento en el que se detecte un obstáculo la velocidad vertical del cuerpo del robot variará hasta alcanzar la altura adecuada mediante una ley de control de fuerza con constante de rigidez K_s y amortiguamiento D para conseguir un comportamiento acomodaticio:

$$F = -K_s \cdot q \quad y \quad F = D\dot{q} \quad (5.1)$$

5.1.1. Control acomodaticio de la velocidad vertical del cuerpo del robot

A partir de las ecuaciones de fuerza (5.1) es posible relacionar la velocidad de desplazamiento vertical del cuerpo del robot \dot{Q}_e con respecto a la distancia entre el cuerpo y la superficie medida por un sensor ultrasónico mediante la siguiente ley de control:

$$\dot{Q}_{ze} = \dot{Q}_{zd} - \frac{1}{D_z}(F_{zd} - F_z) \quad (5.2)$$

en donde:

$$F_{zd} = -K_{szd} \cdot h_{zd} \quad y \quad F_z = -K_{sz} \cdot h_z \quad (5.3)$$

\dot{Q}_{zd} es la velocidad deseada del cuerpo, y h_{zd} y h_z son las distancias deseada y medida por el sensor respectivamente.

En el caso en el que el cuerpo del robot se desplace a una velocidad horizontal constante \dot{Q}_y , la consigna de velocidad vertical \dot{Q}_{ze} debe ser introducida en el lazo de control para adaptar el cuerpo del robot a una altura deseada h_{zd} en función de la variación de la distancia a la superficie

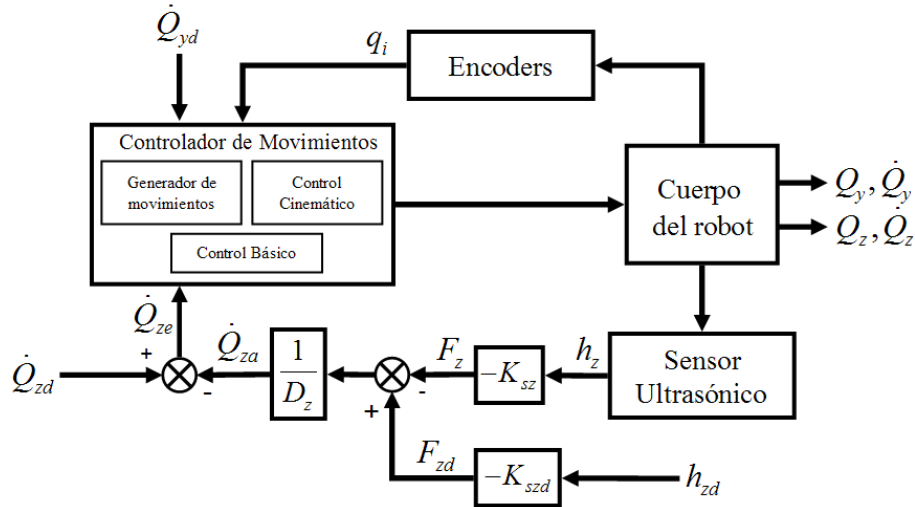


Figura 5.2: Esquema de control de la velocidad vertical del cuerpo del robot con detección de la superficie.

Tabla 5.1: Parámetros del controlador de velocidad horizontal para el cuerpo del robot.

Parámetros	Valores
\dot{Q}_{zd}	0 mm/s
\dot{Q}_{yd}	20 mm/s
h_{zd}	300 mm
K_{sz}	1 N/m
K_{szd}	1 N/m
D_z	2 Ns/m

medida por el sensor ultrasónico h_z (ver Figura 5.2) (ver sección 3.4) empleando, en este ejemplo, los valores de las constantes del controlador mostrados en la Tabla 5.1.

Para comprobar el funcionamiento y la eficiencia del controlador propuesto sobre el robot en estas condiciones, se ha diseñado un experimento en el que se introduce una consigna de velocidad horizontal constante en el cuerpo \dot{Q}_{yd} al controlador de movimientos del robot, tal que éste, al detectar

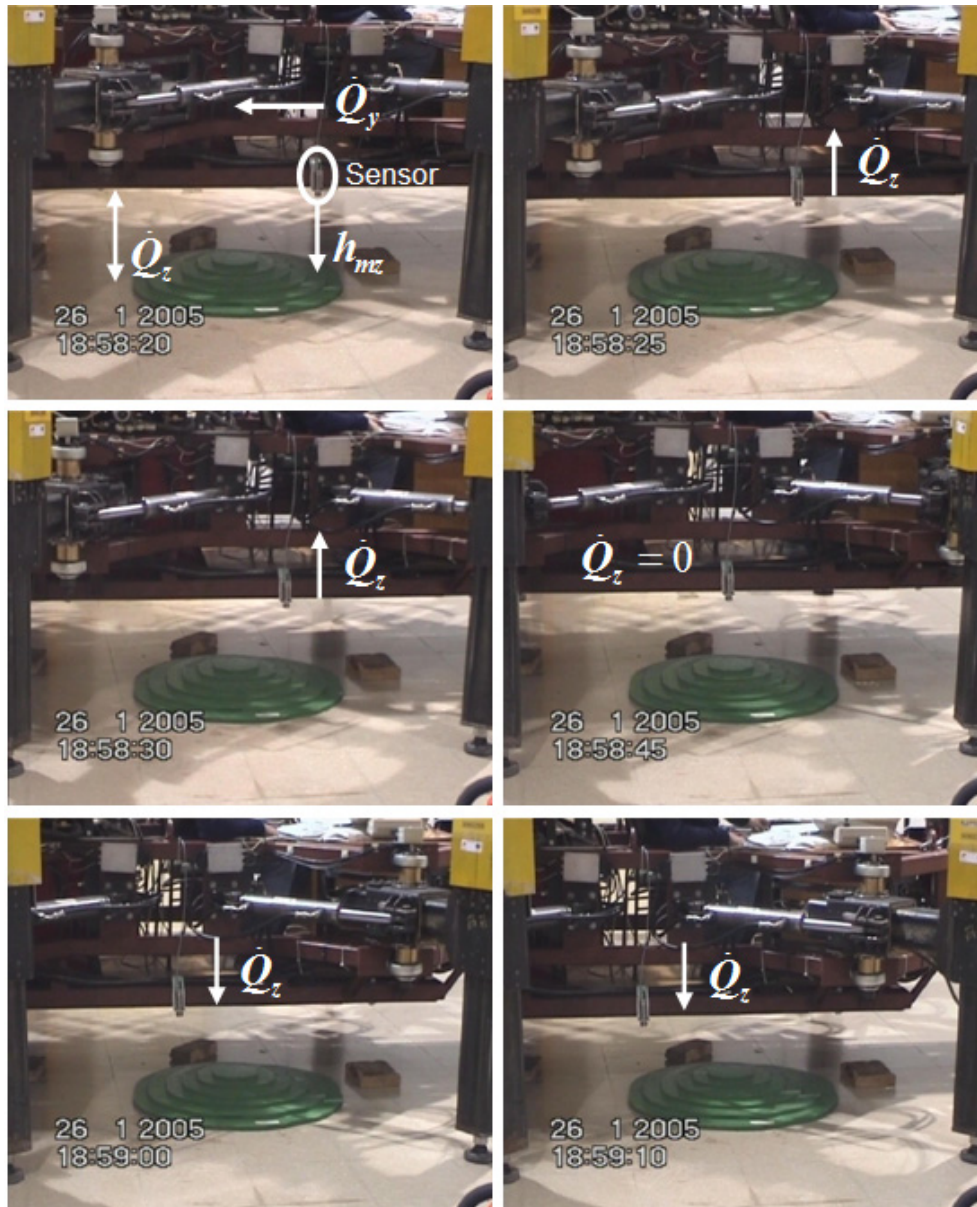


Figura 5.3: Secuencia del control de movimiento vertical del cuerpo del robot al desplazarse horizontalmente sobre una superficie escalonada.

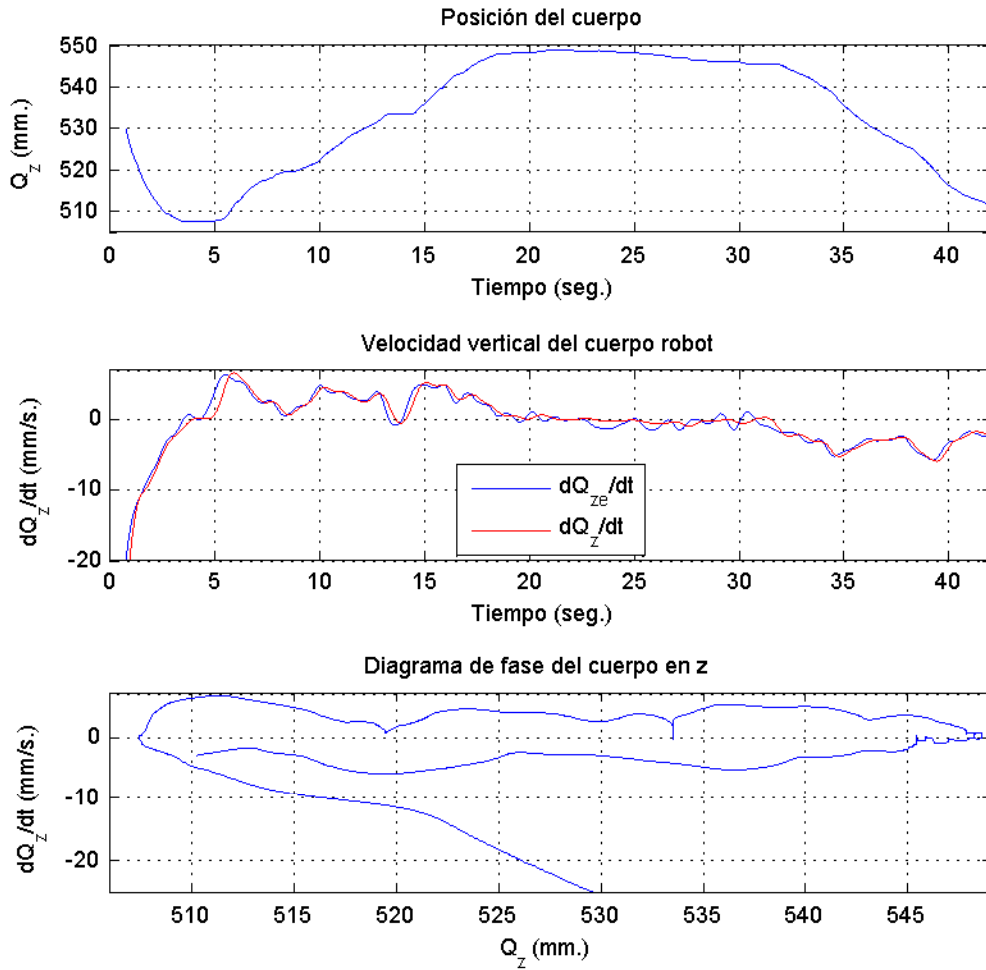


Figura 5.4: Posición y comportamiento del cuerpo con respecto al suelo.

por medio de los sensores ultrasónicos cambios en una superficie (en este caso un elemento escalonado), se adapte según las constantes del control de fuerza (ver Figura 5.3), sin modificar el apoyo de las patas.

Con este controlador, como se ilustra en la gráfica (ver Figura 5.4), el cuerpo logra adaptarse con suficiente aproximación al contorno de la superficie por la que pasa. En la gráfica se muestra la posición del cuerpo relativa al suelo, en lugar de la posición del cuerpo con respecto a la

superficie escalonada con el fin de enseñar la forma de interpretar el contorno por medio del sensor. Del diagrama de fases es posible deducir que el sistema tiende eficientemente a mantener un error cercano a cero al modificar la velocidad del cuerpo \dot{Q}_z para mantener una distancia vertical constante entre el cuerpo y la superficie escalonada.

5.1.2. Control reactivo simultáneo de la velocidad vertical /horizontal del cuerpo del robot

Con el objeto de poder detectar también obstáculos en la dirección de desplazamiento en un modo de caminar, se ha añadido al sistema de detección de la superficie un segundo sensor ultrasónico en la parte frontal del robot. De la misma forma a como se introduce una consigna de velocidad al controlador de velocidad vertical, se añade una consigna más para controlar la velocidad horizontal, como se muestra en el esquema de control (ver Figura 5.5).

Tabla 5.2: *Parámetros del controlador de velocidad vertical/horizontal para el cuerpo del robot.*

Parámetros	Valores
\dot{Q}_{zd}	0 mm/s
\dot{Q}_{yd}	0 mm/s
h_{zd}	300 mm
h_{yd}	1000 mm
K_{sz}	1 N/m
K_{szd}	1 N/m
K_{sy}	1 N/m
K_{syd}	1 N/m
D_z	1.2 N s/m
D_y	20 N s/m

En este caso, además de controlar la velocidad del cuerpo del robot mediante el esquema de control propuesto anteriormente (ver Figura 5.2),

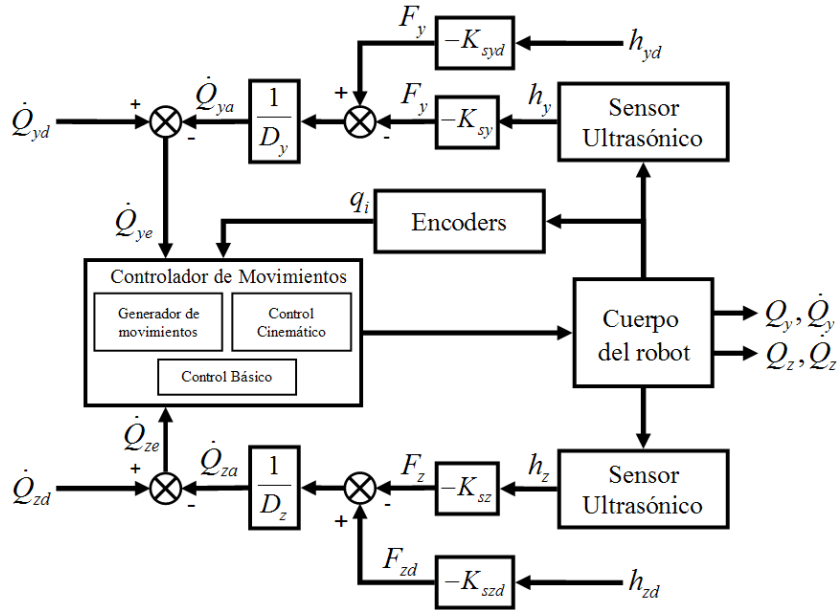


Figura 5.5: Esquema de control de velocidad vertical/horizontal del cuerpo del robot sobre objetos en el suelo y con obstáculos frontales.

se controlará también la velocidad vertical del cuerpo. Como realimentación adicional (ver Figura 5.5) se ha implementado un sensor ultrasónico en la parte anterior del cuerpo del robot, ubicado de tal forma que sea posible detectar obstáculos frontales. Para comprobar su funcionamiento, se ha diseñado un experimento similar al del caso anterior en el que se apoya el robot sobre sus cuatro patas y se permite solo el movimiento del cuerpo del robot sin cambiar el apoyo de sus patas; pero en este caso, en lugar de mantener un consigna de velocidad horizontal constante sobre el cuerpo del robot, ésta se modificará dependiendo de la distancia medida por el sensor ubicado en la parte frontal del robot y las constantes del controlador (ver Tabla 5.2).

En la secuencia (véase Figura 5.6) se ilustra como se adapta el cuerpo del robot a los diferentes obstáculos que se encuentran por debajo y por delante de éste. Si el obstáculo frontal no se moviera el robot se movería de acuerdo con el algoritmo de control de fuerza en función de la señal del sensor h_{ym} hasta tener el obstáculo a una distancia h_{yd} . Aunque los obstáculos de

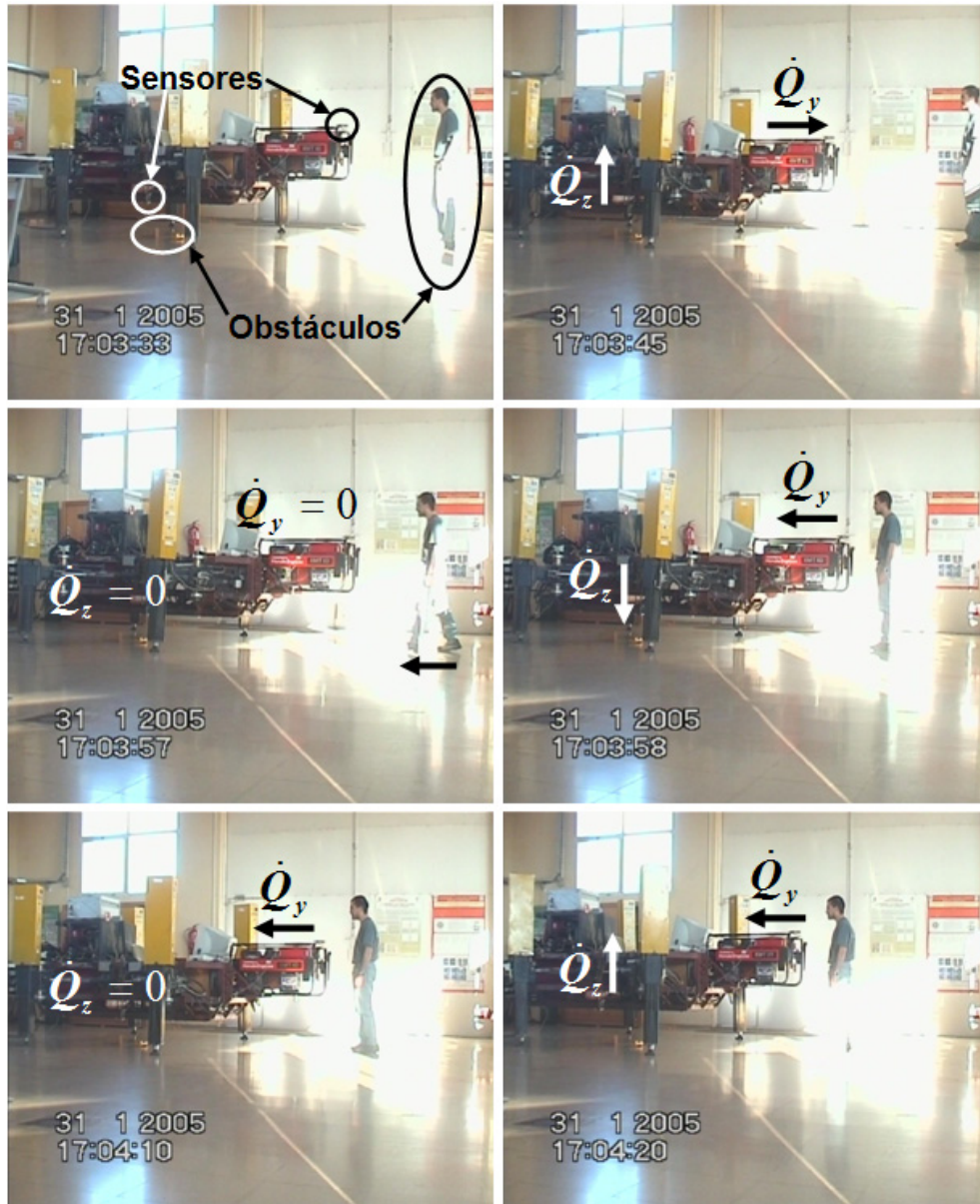


Figura 5.6: Secuencia del movimiento del cuerpo del robot sobre una superficie con irregularidades y con un obstáculo frontal.

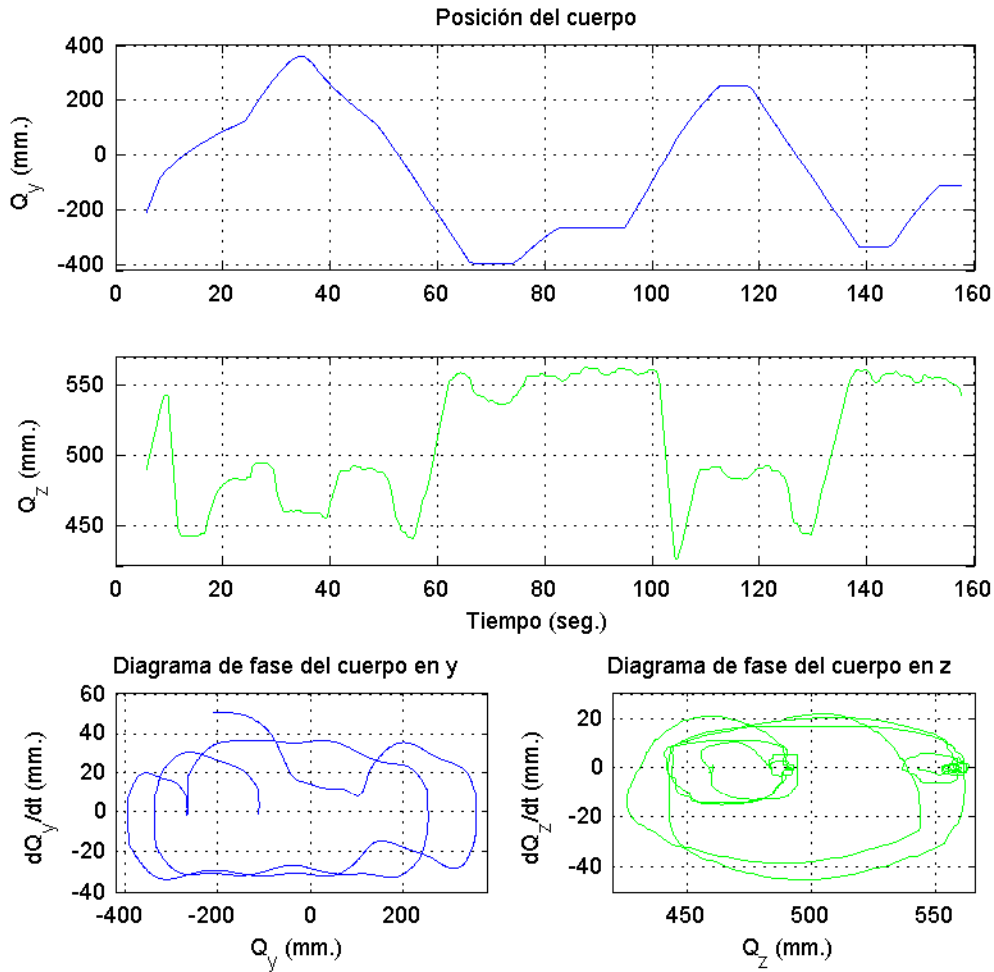


Figura 5.7: Desplazamiento y comportamiento del cuerpo del robot con control de velocidad vertical/horizontal.

ensayo puestos en el suelo son unos bloques de madera separados por una distancia aleatoria, debido a las características del ángulo de incidencia del sensor ultrasónico, el cuerpo del robot no sigue el contorno de ellos con total precisión, aunque para nuestro caso este efecto es apropiado puesto que la eficiencia del sistema aumenta al realizar la adaptación al cambio con mayor velocidad.

Se debe indicar, que, en cualquier caso, el comportamiento de la máquina con este sistema sigue siendo muy eficiente con respecto a la detección de los obstáculos. La velocidad del cuerpo tiende a cero constantemente según la proximidad de los obstáculos y la elección de las constantes de amortiguamiento y rigidez del sistema de control. En la gráfica (ver Figura 5.7) se ilustra tanto la posición como el cambio de velocidad del cuerpo según la detección de los obstáculos y aunque se nota más la aproximación a cero en el caso de la velocidad \dot{Q}_z , la de la velocidad \dot{Q}_y cambia constantemente (se acomoda) debido al cambio de posición del obstáculo frontal.

5.1.3. Control reactivo de la velocidad horizontal del robot en un modo de caminar continuo

Una vez establecido que es posible realizar un control de fuerza indirecto por medio de sensores externos, con suficiente efectividad en el cuerpo del robot, es necesario pasar a un nivel superior de operatividad como lo es el control de velocidad en un modo de caminar continuo. En este caso se utiliza un sensor ultrasónico en la parte frontal del robot para la detección de posibles obstáculos y reaccionar con un control de fuerza; pero en un modo de caminar no es suficiente controlar sólo la velocidad de desplazamiento, es necesario también mantener el control del factor de apoyo β (ver sección 4.1.6). Así, el modo de caminar que en principio se podría denominar periódico, sufriría cambios constantes en su velocidad transformándose en un modo de caminar aperiódico regido por las circunstancias externas.

Tabla 5.3: *Parámetros del controlador de velocidad vertical/horizontal para el cuerpo del robot.*

Parámetros	Valores
\dot{Q}_{zd}	0 mm/s
\dot{Q}_{yd}	0 mm/s
h_{yd}	1000 mm
K_{sy}	1 N/m
K_{syd}	1 N/m
D_y	50 Ns/m

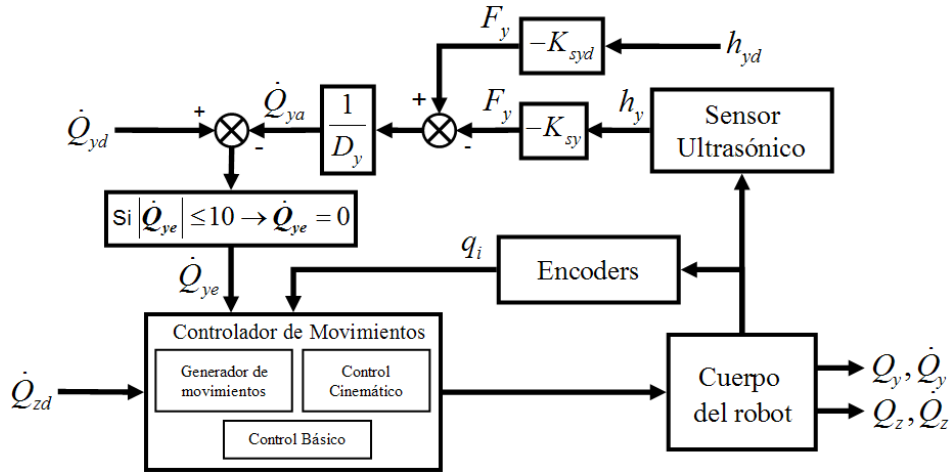


Figura 5.8: Esquema del control indirecto de fuerza para acomodar la velocidad del modo de caminar continuo del robot en presencia de obstáculos frontales.

En el esquema de control (ver Figura 5.8) se puede observar que el sistema usado para el control del modo de caminar continuo del robot es similar al del control del cuerpo, con la diferencia de que cuando la velocidad de consigna es inferior a 10 mm/s , se convierte en 0. Esto se realiza para evitar perturbaciones en el sistema puesto que el movimiento del cuerpo no responde a las consignas generadas por el sistema de Generación de Movimientos a velocidades muy bajas. También se ilustra que en este caso no se realiza una detección de las irregularidades del terreno manteniendo una velocidad en la altura del robot \dot{Q}_z constante.

Como se puede observar en la secuencia de movimientos del experimento (ver Figura 5.9), en la imagen superior izquierda el robot está a una distancia muy amplia con respecto al obstáculo por lo que va a la máxima velocidad de desplazamiento. Una vez detectado un obstáculo la velocidad del robot empieza a disminuir según las constantes de rigidez K_{sy} y de amortiguamiento D_y , cambiando la dirección de la velocidad en el momento en que el objeto está muy cerca.

En la gráfica (ver Figura 5.10) se muestra el desplazamiento del cuerpo en dirección y y la diferencia entre la consigna de velocidad \dot{Q}_{ye} y la velocidad del cuerpo medida \dot{Q}_y , y como se comporta el movimiento del cuerpo con respecto a los cambios de velocidad según las constantes del



Figura 5.9: Secuencia de un modo de caminar continuo con control de obstáculos frontales.

controlador (ver Tabla 5.3).

En la práctica, la dificultad para generar un control de la velocidad de los movimientos del robot en los dos ejes y y z , aumenta considerablemente si se tiene en cuenta que es necesario cambiar la velocidad del modo de caminar continuo, la transferencia de las patas y la detección del suelo con respecto a las consignas generadas por cada una de señales de distancia y las de detección del suelo. En este caso sería necesario desarrollar un sistema de fusión multisensorial en el que se tenga en cuenta toda la información y poder determinar la velocidad global de la máquina cambiando apropiadamente el tiempo de transferencia de las patas en cada instante según esta velocidad.

De esta forma se puede dotar a la máquina de distintas formas de adaptación según el tipo de terreno. Cuando el suelo es suave pero con

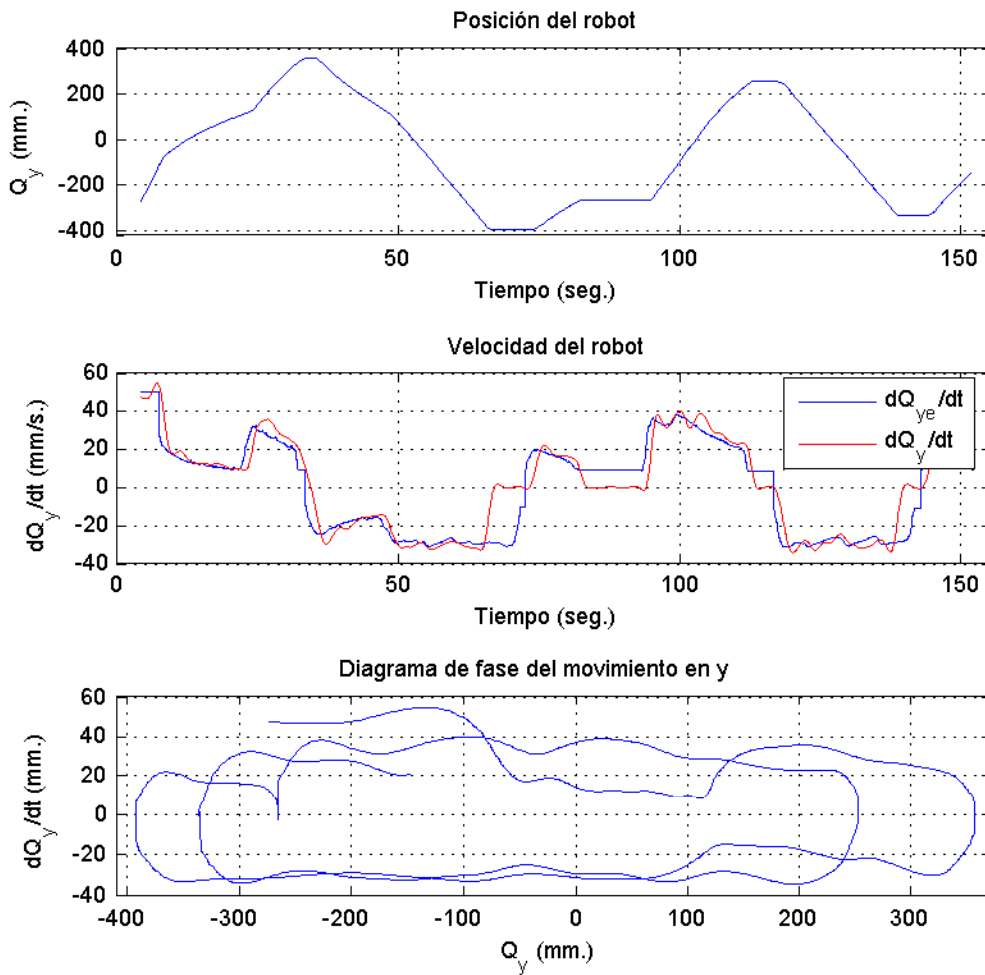


Figura 5.10: Desplazamiento y velocidad del robot en un modo de caminar continuo con control de obstáculos frontales.

pequeñas irregularidades, puede ser posible utilizar un control lento y con poco amortiguamiento; pero si por el contrario, el robot camina sobre terrenos abruptos y con obstáculos de gran tamaño, puede ser necesario el uso de un controlador con mayor rapidez en la reacción, para superar los obstáculos mientras cambia la velocidad del cuerpo, amortiguando la carga.

Basándose en estos resultados, se puede decir que es viable implementar

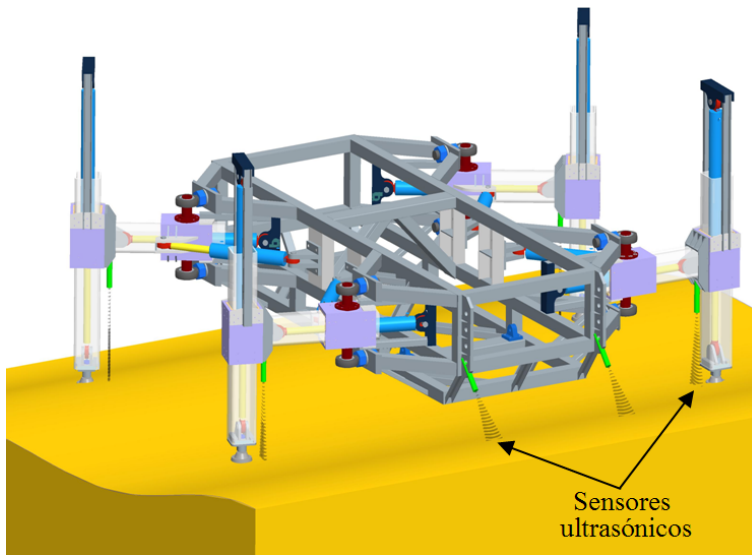


Figura 5.11: *Concepto del conjunto de sensores ultrasónicos para Roboclimber.*

un conjunto de sensores con los que se pueda medir el contorno de la superficie y nivelar activamente el cuerpo del robot con respecto a éste sin importar el tipo de suelo, la inclinación y el tipo de superficie (ver Figura 5.11). El sistema también podría usarse para la detección de obstáculos en la dirección del desplazamiento y poder determinar si éste es cinemáticamente superable o, por el contrario, es necesario aplicar técnicas de evasión (Balaguer et al. 1999)(Estremera y González de Santos 2003). Otra de las posibles ventajas de la detección externa del entorno con esta metodología, es que se puede obtener la información suficiente para poder cambiar en tiempo real tanto la altura del robot como la trayectoria de transferencia de las patas para optimizar la velocidad del paso durante los modos de caminar.

5.2. Adaptación activa mediante el control de la interacción dinámica del robot con el entorno

Nuestro objetivo se centra ahora en el empleo del control directo de fuerza mediante la realimentación de las fuerzas de contacto, cuya finalidad es regular la interacción dinámica del robot con el entorno. En otras palabras, el objetivo es alterar la inercia aparente del robot de modo que se obtenga un comportamiento reactivo deseado entre el robot y el entorno. En este caso, los cambios en la dinámica del robot debidos a variaciones en la carga, movimiento de las patas, inclinación del cuerpo, etc., se tienen en cuenta y se pueden modificar los algoritmos de locomoción para asegurar la estabilidad dinámica. Además, al medir las fuerzas de contacto se puede determinar el punto de momento cero, lo que permite diseñar nuevos algoritmos de locomoción o modificar los ya conocidos. El sistema de medida de fuerzas que se utiliza se basa en la medida de la presión hidráulica en una o en las dos cámaras de los cilindros hidráulicos (en los experimentos que se presentan a continuación en este capítulo, se utilizará la fuerza de presión diferencial entre ambas cámaras. Como ya se ha descrito anteriormente (ver sección 3.3) este método es útil para contrarrestar algunos efectos dinámicos indeseables), tanto en las articulaciones verticales como en las horizontales del robot.

Controlar de forma activa un robot con las características de Roboclimber, usando, aparte del control de posición, la medida de la presión hidráulica en los actuadores como realimentación, ofrece muchos desafíos. Roboclimber está compuesto por una serie de subsistemas embarcados en la plataforma (*e.g.* el sistema de control, el mecánico, el hidráulico, el equipo de perforación, etc.) y la distribución de cada uno de ellos afecta de forma importante al comportamiento del robot y dificulta la obtención de un modelo completo y preciso del mismo y, en consecuencia, dificulta el diseño de controladores.

También, dado que a un robot de servicios de esta clase se le exige trabajar en distintos tipos de ambientes y situaciones (ver Capítulo 3), las estrategias de control que se utilicen deben proporcionar un margen de trabajo amplio, por lo que la selección de las estrategias de control más adecuadas exige en gran medida un análisis empírico en cada tipo

de situación. Por este motivo se han realizado una serie de experimentos que, dependiendo de los requerimientos, han conducido a diferentes tipos de controladores con prestaciones distintas.

A continuación se proponen distintas estrategias en las que se pueda utilizar la fuerza de presión hidráulica como información de realimentación para cerrar el lazo de control. Debido a que el sistema de control del robot no está preparado para realizar un control de presión directo, sino un control de velocidad (ver sección 2.2) se va a usar la medida de la fuerza en lazos de realimentación externa, creando lazos de control reactivo con el generador de movimientos del robot (ver sección 2.3). Las estrategias de control más susceptibles de ser usadas son el control de impedancia y el control fuerza-posición.

En última instancia, los experimentos realizados en relación a la fuerza de las articulaciones verticales van encaminados a encontrar un sistema de control viable para estabilizar el sistema en los modos de caminar. También se emplearán las mismas estrategias de control de fuerza para aplicarlas en el actuador de las articulaciones de rotación con el propósito de encontrar opciones para el control activo en la dirección del movimiento en presencia de obstáculos.

5.2.1. Controlador de impedancia

El control de impedancia es una estrategia que puede ofrecer resultados muy interesantes en el proceso de la acomodación de las fuerzas y de los pares de interacción del robot con el entorno.

En la Figura 5.12 se presenta el diagrama de bloques del control de impedancia propuesto para que sea implementado en cada una de las patas de la plataforma experimental Roboclimber o en cualquier otro robot caminante. En esta estrategia se cierra un lazo exterior de fuerza en la que ésta es convertida a través de un bloque de impedancia deseada en una consigna de posición medida q_{mi} . Es necesario especificar los parámetros de la impedancia, tales como la matriz de inercia I , la de amortiguamiento D y la de rigidez K , con los que se define el comportamiento dinámico deseado que tiene que verificar el robot en su interacción con el entorno.

A este sistema de control se le presenta como consigna una posición deseada, se le resta la fuerza de interacción con el entorno convertida en posición medida equivalente y se genera la señal de error entre ambas.

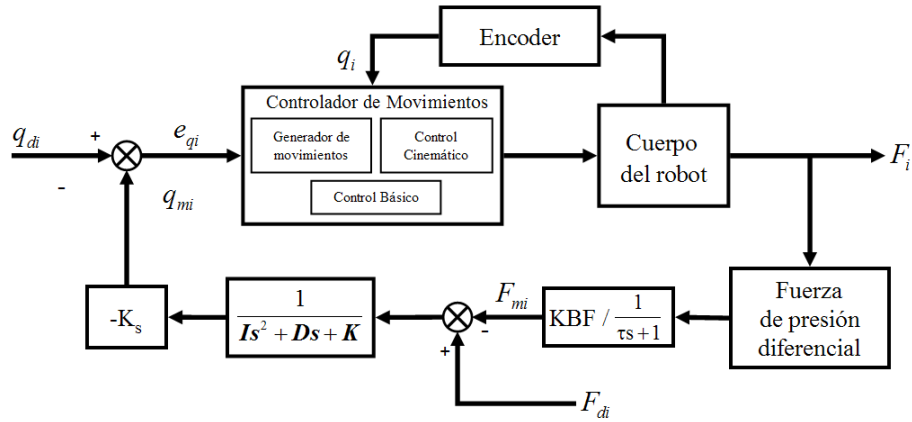


Figura 5.12: Diagrama de control de impedancia con realimentación de fuerza.

Específicamente, dentro de las condiciones iniciales para el diseño del controlador, en cada caso, es necesario determinar la frecuencia natural $w_n = 2\pi f$, la inercia $I = K/w_n^2$, y el amortiguamiento $D = 2\zeta\sqrt{KI}$, donde K es la constante de elasticidad, conformándose así los parámetros de la impedancia mecánica Z del controlador. Pero también es necesario definir o calcular las variables del filtro, tanto si se está usando un filtro de primer orden o un filtro de Kalman (ver sección 3.3.3), con las que se puede manipular la forma de interpretar la medida de la fuerza.

Por último, en el controlador de movimientos también es posible limitar la velocidad máxima de desplazamiento $|v_{max_i}|$ de las articulaciones como medida adicional para proteger el sistema.

5.2.2. Controlador paralelo fuerza/posición

Adicionalmente al concepto de control de impedancia existe también el concepto del control paralelo fuerza/posición, en el que se utilizan dos lazos externos. El primero es un lazo de posición, y el segundo se utiliza para generar ajustes a la consigna de movimiento y depende de la fuerza de interacción con el entorno (ver Figura 5.13).

Con este controlador se busca interactuar simultáneamente entre la posición y la fuerza, de este modo en las direcciones en donde se restringe el movimiento de la articulación, se pueden llegar a generar fuerzas lo

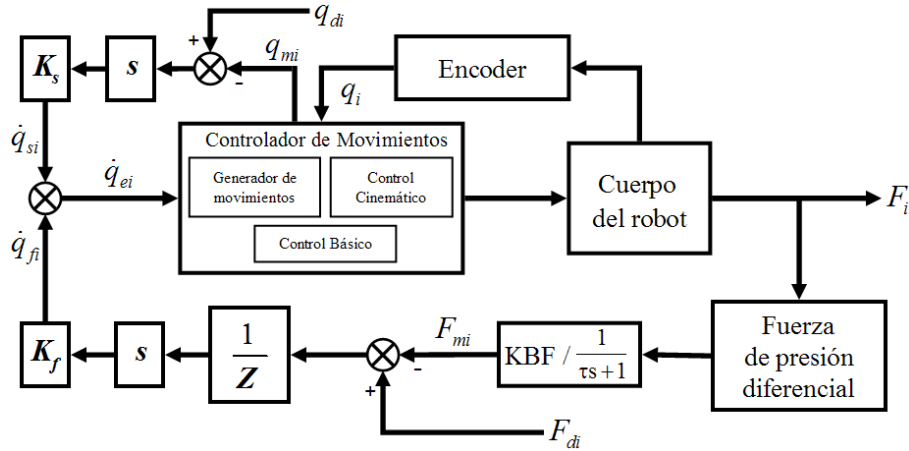


Figura 5.13: Diagrama de control paralelo fuerza/posición.

suficientemente altas para que el lazo de fuerza tenga un dominio sobre el lazo de posición. Por el contrario, si no aparecen fuerzas de interacción, o estas son muy pequeñas domina el lazo de posición. Esto puede llegar a ser muy útil, sobre todo cuando se busca reaccionar ante obstáculos de los que no se tenga información *a priori*.

La velocidad de consigna \dot{q}_{ei} que se introduce en el lazo interno del controlador de movimientos, se define por la siguiente ley de control,

$$\dot{q}_{ei} = K_f \left[\frac{s}{Z} (F_{di} - F_{mi}) \right] + K_s (q_{di} - q_{mi}) s \quad (5.4)$$

En esta ecuación el error de fuerza es filtrado por la impedancia Z para después ser derivado y adaptado por medio de K_f , y el error de posición es derivado y adaptado a la velocidad asumible por el generador de movimientos del robot a través de K_s .

5.2.3. Consideraciones acerca del ZMP

El criterio de estabilidad para robots caminantes históricamente más importante y conocido en la literatura se caracteriza por la estimación del punto de momento cero, y fue introducido por Vukobratovic y Juricic

(1969). Pero Goswami (1999) discute el empleo del ZMP y propone su equivalencia al empleo del concepto del centro de presión (CDP), que se define como el punto sobre el suelo en donde actúa la resultante de las fuerzas de reacción (Orin 1976). No obstante, la mayoría de los investigadores utilizan el concepto del ZMP para el equilibrado dinámico de la postura en robots (Hemami y C.L. 1977)(Hirai et al. 1998)(Takanishi et al. 1985)(Vukobratovic y Stoik 1975).

Por otro lado, Hemami y Golliday (1977) definen el ZMP como el punto donde la fuerza de reacción vertical intercepta el suelo. Así mismo, Hirai y Golliday (1998) definen el ZMP como el punto sobre el suelo en la cual los momentos netos de las fuerzas inerciales y las fuerzas gravitatorias no tienen componentes a lo largo de los ejes horizontales. También Arakawa y Fukuda (1997) expresan que p es el punto en el que los momentos alrededor de los ejes x e y generados por la fuerza de reacción y el par de reacción definido como el ZMP. Cuando el ZMP existe dentro de los límites de la superficie de soporte, entonces, el contacto entre el suelo y la pata de apoyo es estable, siendo:

$$p_{ZMP} = (x_{ZMP}, y_{ZMP}, 0) \in S \quad (5.5)$$

donde p_{ZMP} denota la posición del ZMP. S denota el dominio del polígono de soporte. Esta condición indica que no existe un giro alrededor del borde del pie.

A pesar de que Goswami (1999) propone que el concepto del ZMP es idéntico al del CDP, Vukobratovic y Borovac (2004) destacan en sus investigaciones más recientes una diferencia importante entre el ZMP y el CDP. Ellos afirman que la presión que existe entre el pie y el suelo puede ser siempre reemplazada por una fuerza que actúa en el CDP. Si esta fuerza equilibra todas las fuerzas que actúan sobre el mecanismo durante el movimiento, entonces su punto de acción es el ZMP. Consecuentemente, cuando ocurre un modo de caminar dinámicamente equilibrado, el CDP y el ZMP coinciden. Ahora bien, cuando el modo de caminar no es dinámicamente equilibrado, el ZMP no existe y el robot caerá alrededor del borde del pie.

En este caso, el punto de la fuerza de reacción del suelo con el borde del pie es el CDP (cuando el robot cae), mientras que el punto donde $M_x = 0$ y $M_y = 0$ se encuentra fuera del polígono de soporte. Este punto es denominado, según dichos autores, ZMP ficticio, cuyo acrónimo es FZMP

(del inglés *Fictitious ZMP*). Por lo tanto, y como consecuencia del análisis anterior, resulta incorrecto relacionar la noción de ZMP solamente al CDP. Además, el ZMP puede existir en algún otro punto del sistema, como por ejemplo, en la articulación del hombro, si se consideran los brazos como péndulos libremente equilibrados (sin actuador colocado en la articulación) (Vukobratovic y Boravac 2004)(Montes 2005).

Por este motivo el ZMP siempre coincide con el CDP cuando el robot realiza un modo de caminar dinámicamente equilibrado, pero el CDP no siempre es equivalente al ZMP (modo de caminar dinámicamente no equilibrado). Sin embargo, el FZMP nunca coincide con el CDP, porque el CDP no puede existir fuera del polígono de soporte. En lo que sigue emplearemos siempre el acrónimo ZMP por ser la notación internacionalmente aceptada.

Así mismo, si se tiene en cuenta que el robot es estáticamente estable es posible asumir que la evaluación del ZMP, sin tener en cuenta sus aspectos dinámicos, es equivalente al centro de masa (Montes et al. 2004b)(Armada et al. 2003)(Caballero 2002) evaluado mediante la medida de la fuerza en cada uno de los apoyos del robot. Por este motivo y para simplificar su evaluación durante los modos de caminar, el ZMP se ha evaluado por medio de las siguientes ecuaciones, que coinciden con la medida del CDP:

$$ZMP_x = \frac{\sum_{n=1}^4 y_n F_n}{\sum_{n=1}^4 F_n} \quad y \quad ZMP_y = \frac{\sum_{n=1}^4 x_n F_n}{\sum_{n=1}^4 F_n} \quad (5.6)$$

en donde F_i es la fuerza generada en cada una de las patas y x_i e y_i son las distancias entre el centro geométrico del robot y el punto de apoyo de cada pata en los ejes x e y respectivamente.

5.2.4. Control de la postura.

Como primer experimento de adaptación activa mediante la realimentación directa de las fuerzas de interacción se ha realizado un control de la postura, que consiste en generar el comportamiento deseado cuando el robot está en una posición específica apoyado sobre sus cuatro patas. Para

probarlo se levanta el robot sobre sus cuatro patas a una altura determinada y se activa el control de impedancia en cada una de ellas con algún criterio determinado por pruebas experimentales.

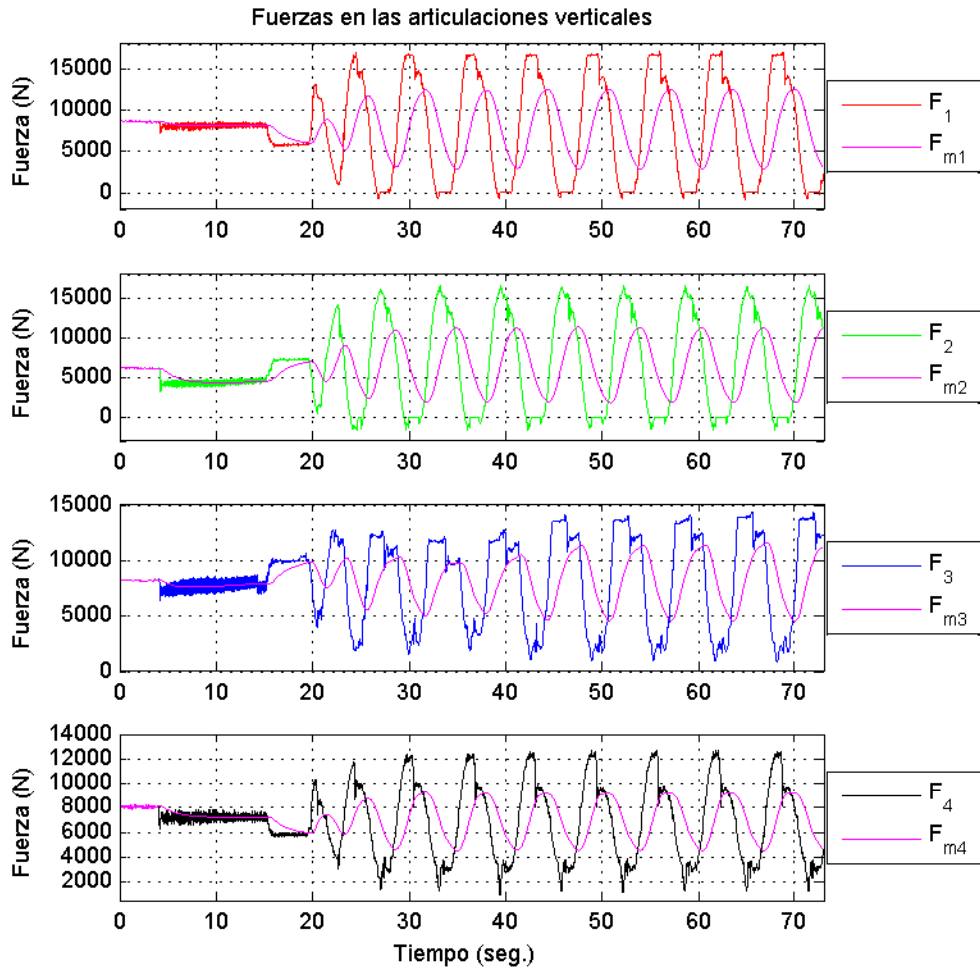


Figura 5.14: Fuerza de las articulaciones verticales con control de impedancia.

En las gráficas de fuerza y de posición (ver Figura 5.14 y 5.16) se ilustra el comportamiento de las articulaciones para mantenerse sobre su propio peso con un control de impedancia generado según las constantes de la

Tabla 5.4 para cada pata, en la que se muestra también la constante τ_i para el filtro de primer orden usado en este experimento.

Tabla 5.4: *Parámetros del controlador de impedancia y del filtro de primer orden.*

Parámetros	Pata 1	Pata 2	Pata 3	Pata 4
K_i	40000 N/m	40000 N/m	40000 N/m	40000 N/m
f_i	0.04 Hz	0.04 Hz	0.04 Hz	0.04 Hz
ζ_i	1.2	1.2	1.2	1.2
F_{di}	0 N	0 N	0 N	0 N
q_{di}	0.593 m	0.591 m	0.592 m	0.590 m
$ v_{max_i} $	0.01 m/s	0.01 m/s	0.01 m/s	0.01 m/s
τ_i	3	3	3	3

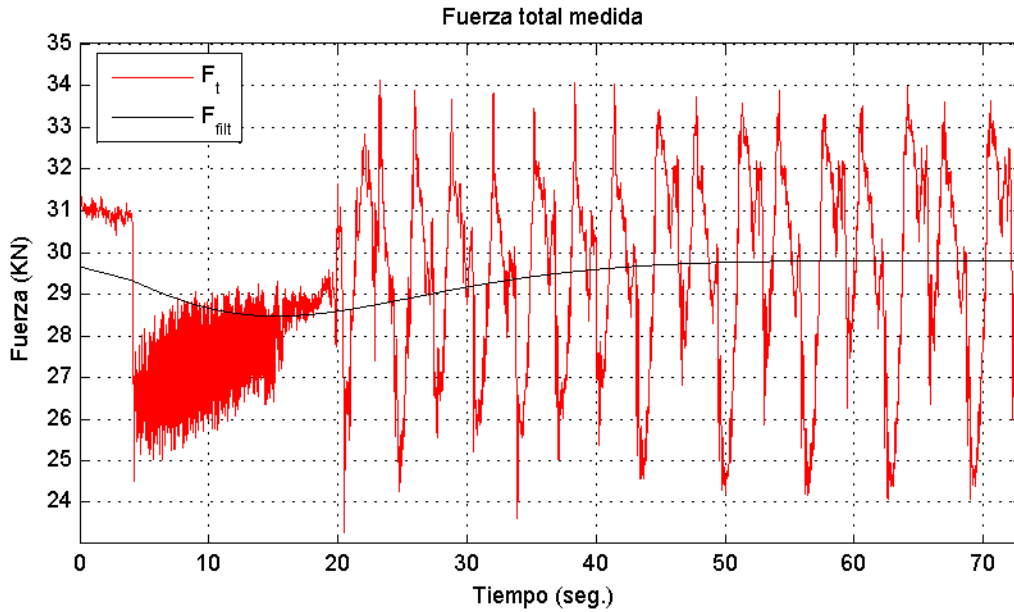


Figura 5.15: *Fuerza total medida y filtrada.*

A raíz de este experimento es interesante analizar distintas situaciones ocurridas durante su ejecución. En primer lugar, la fuerza de cada pata parece estar en un estado oscilatorio sostenido (o en resonancia). Este comportamiento es debido a que el filtro de primer orden empleado deja pasar las bajas frecuencias y la fuerza filtrada, al pasar por el bloque de impedancia y convertirse en una consigna de posición equivalente, presenta las mismas características, aunque atenuadas por dicho bloque, con lo que se tiene un comportamiento oscilatorio en la posición de los ejes (ver Figura 5.16).

Así pues, con esta sintonía, el robot se comporta como una masa sostenida por cuatro muelles de rigidez media y con una amortiguación pequeña. La respuesta es lenta y presenta un estado “estacionario” oscilatorio en posición con una frecuencia baja ($\approx 0.17 Hz$).

Como es posible ver en la gráfica (véase Figura 5.16), debido a que la fuerza deseada para cada pata es nula ($F_{di} = 0$), la posición de cada articulación está dada a partir de la diferencia entre la posición deseada q_{di} y la medida q_i , que es equivalente a la relación entre la fuerza y la constante de elasticidad de un sistema que se comporta como si el cuerpo del robot estuviera soportado por cuatro muelles. Cabe resaltar que el controlador de movimientos tiene un límite de velocidad máximo debido a los actuadores y por este motivo, en este experimento, no se tiene la capacidad de anular completamente el error de posición.

Así mismo, la oscilación también está marcada por un fenómeno que produce un intercambio constante de soporte entre las patas. Con esto se quiere decir que el robot tiende a mantenerse en equilibrio en uno de los conjuntos de dos patas contrapuestas en cada instante, pero como no logra llegar a un equilibrio lo trata de contrarrestar favoreciendo el equilibrio hacia las otras dos y así sucesivamente. En la gráfica (ver Figura 5.18) se ilustra el desfase de fuerzas que comparten por un lado las patas 1 y 4 y por otro las patas 2 y 3, llegando a estar cada conjunto sin carga.

Con respecto a la posición cada una de las articulaciones oscila permanentemente con una amplitud máxima de $0.05 m$ a una altura constante cuando no hay perturbaciones o cargas externas que afecten el sistema. Lo mismo ocurre con la fuerza que en cada una de las articulaciones oscila permanentemente con una amplitud máxima de $10000 N$.

Una vez implementada esta estrategia para el control de la postura del robot mediante control de impedancia, se han realizado múltiples

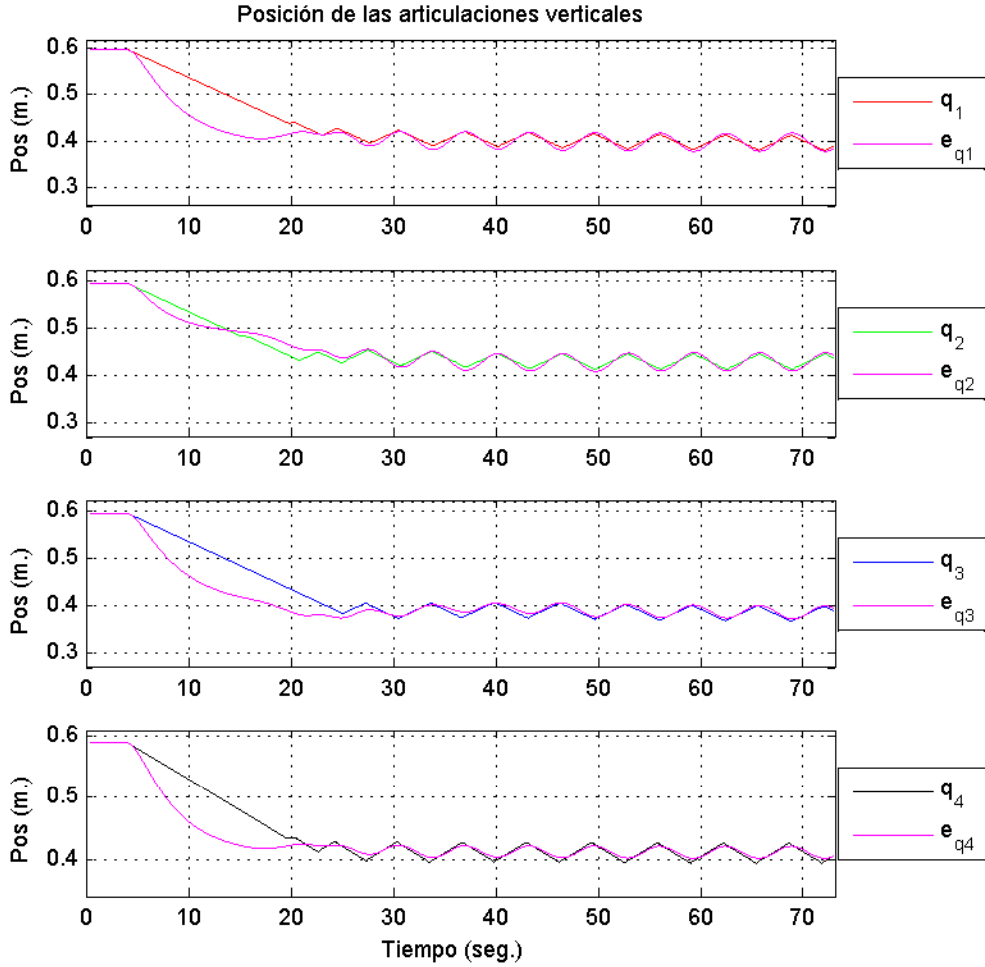


Figura 5.16: Posiciones de las articulaciones verticales con control de impedancia y filtro de primer orden.

experimentos con los que se ha querido comprobar la eficiencia del sistema en distintas situaciones y con distintas características. Algunos de estos se ilustran con mayor detalle a continuación.

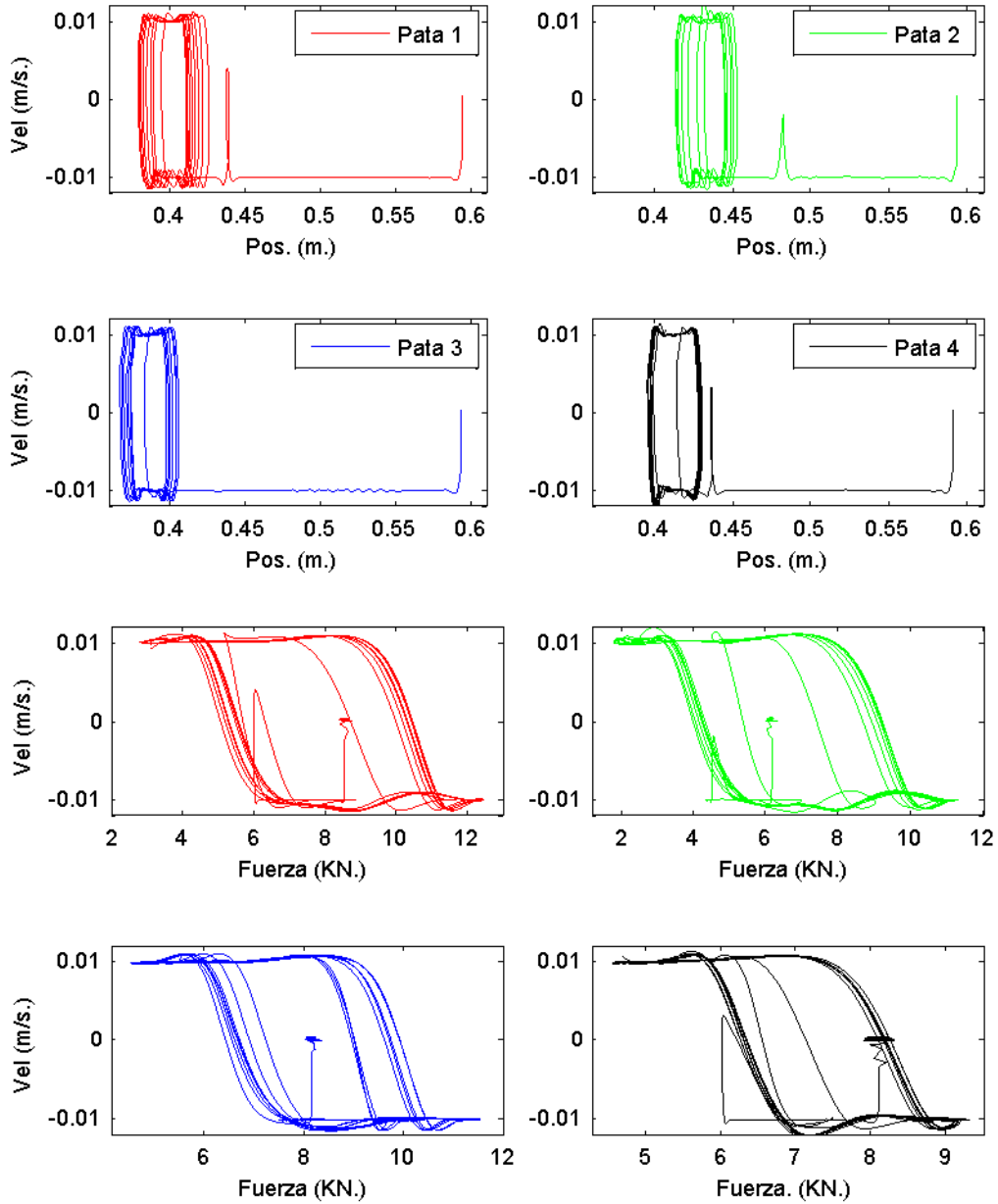


Figura 5.17: Comportamiento del control de impedancia de la velocidad de las articulaciones con respecto a la posición q_i y a la fuerza F_{mi} con filtro de primer orden.

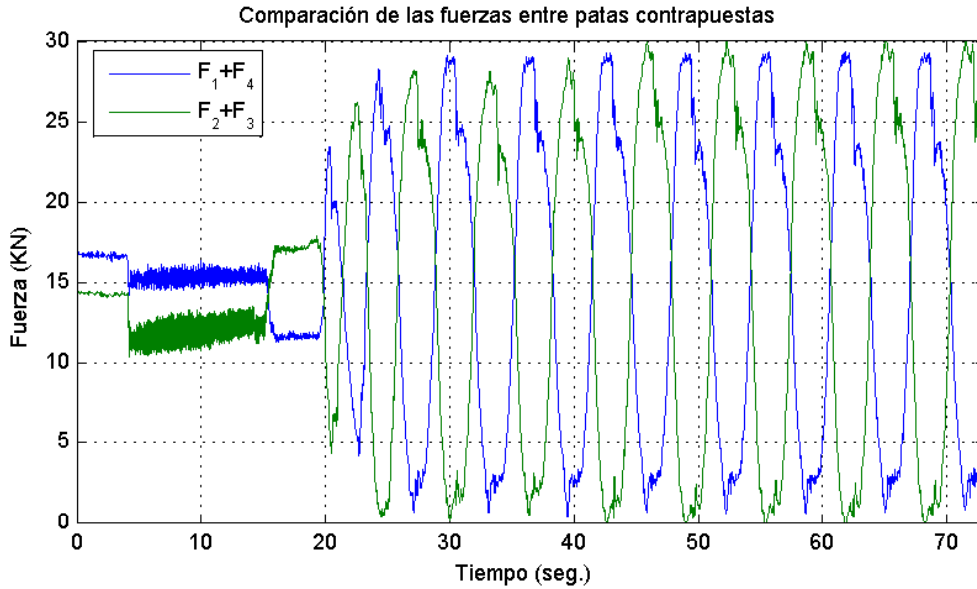


Figura 5.18: Cambio de estabilidad entre conjuntos de patas contrapuestas.

■ **Control de impedancia con filtro de primer orden y con carga adicional**

En este caso el objetivo era comprobar cual era el comportamiento del sistema cuando sobre en el robot se aplican distintos cambios de carga. Utilizando un controlador similar al anterior pero con un filtro más riguroso, es posible estabilizar la respuesta de las articulaciones aunque se necesite más tiempo de adaptación. Una vez estabilizado el sistema se ha aumentado la carga del robot en 1600 N en la parte frontal del robot para después ser retirada. Como un muelle, al aumentar la carga también debería disminuir la extensión de la articulación. Nótese no obstante que persisten oscilaciones en la respuesta, aunque de amplitud mucho menor que en el caso anterior (ver Figura 5.16 y Figura 5.19).

En la gráfica de la fuerza de la pata 1 (véase Figura 5.19), que es en donde más se puede observar el efecto, se ilustra la zona por la que se detecta la carga adicional y por consiguiente, en la gráfica de la posición, es posible observar el proceso de adaptación a la fuerza. De

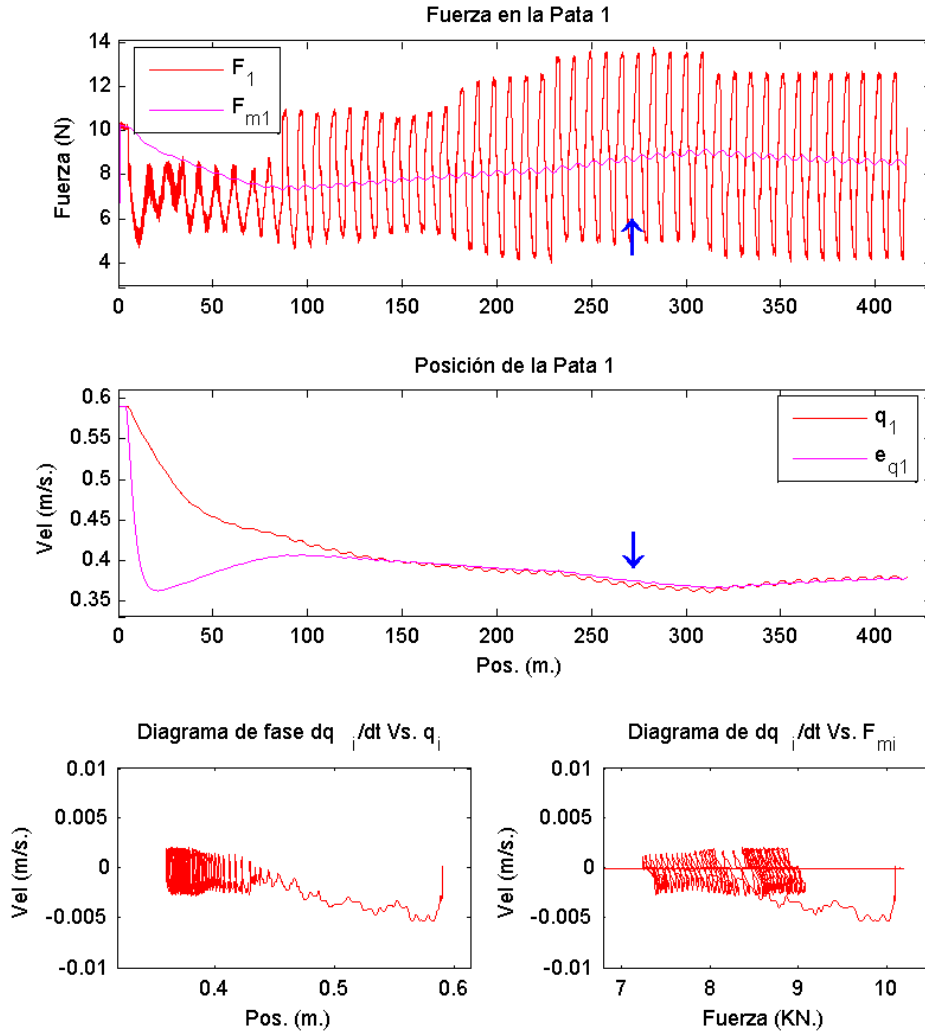


Figura 5.19: Comportamiento de la articulación vertical de la Pata 1 con una carga adicional sobre el robot.

esta forma se observa que usando este controlador es posible adaptar la postura del robot según las necesidades de peso, logrando adaptarse a distintas cargas, aunque la sintonía del controlador y del filtro sean complejas.

Tabla 5.5: Parámetros del controlador de impedancia y del filtro de Kalman.

Parámetros	Pata 1	Pata 2	Pata 3	Pata 4
K_i	40000 N/m	40000 N/m	40000 N/m	40000 N/m
f_i	0.04 Hz	0.04 Hz	0.04 Hz	0.04 Hz
ζ_i	1.2	1.2	1.2	1.2
F_{di}	0 N	0 N	0 N	0 N
q_{di}	0.589 m	0.595 m	0.587 m	0.592 m
$ v_{max_i} $	0.005 m/s	0.005 m/s	0.005 m/s	0.005 m/s
τ_i	80	80	80	80

■ **Control de impedancia con filtro de Kalman**

Dadas las limitaciones del filtro de primer orden nuestro objetivo es el de utilizar un filtro con mejores características como lo es el del filtro de Kalman. Se ha utilizado un factor de elasticidad K_i mayor que el de primer ejemplo (ver Tabla 5.4) y se ha disminuido la velocidad límite máxima v_{max_i} (ver Tabla 5.6).

Tabla 5.6: Parámetros del controlador de impedancia y del filtro de Kalman.

Parámetros	Pata 1	Pata 2	Pata 3	Pata 4
K_i	80000 N/m	80000 N/m	80000 N/m	80000 N/m
f_i	0.05 Hz	0.05 Hz	0.05 Hz	0.05 Hz
ζ_i	1.2	1.2	1.2	1.2
F_{di}	0 N	0 N	0 N	0 N
q_{di}	0.593 m	0.591 m	0.592 m	0.591 m
$ v_{max_i} $	0.005 m/s	0.005 m/s	0.005 m/s	0.005 m/s
R	5000	5000	5000	5000
Q	10	10	10	10

Como se ilustra en la gráfica (ver Figura 5.20) se ha logrado reducir la amplitud de la oscilación de la posición a 0.02 m y una amplitud en la oscilación máxima de la fuerza de 15000 N que es significativamente

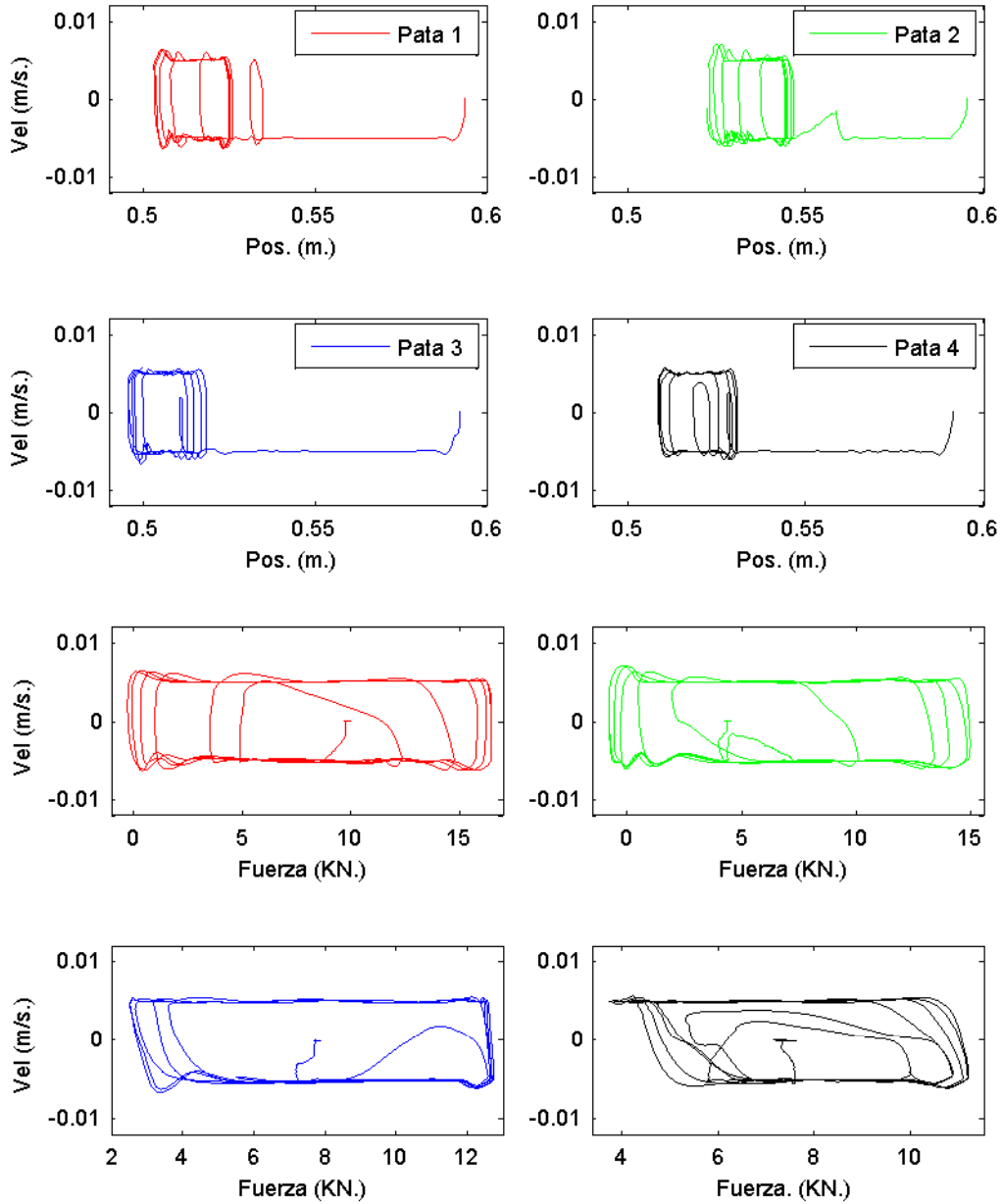


Figura 5.20: Efecto del control de impedancia en la velocidad de las articulaciones con respecto a la posición q_i y a la fuerza F_{mi} con filtro de Kalman.

superior al ejemplo anterior (ver Figura 5.17) pero de forma estable. Se observa asimismo que la distribución de la fuerza en las patas es diferente, aunque el promedio de fuerzas sea el mismo. Por último, también es posible observar que, debido al aumento en el factor de rigidez, el desplazamiento total de las articulaciones es menor con un promedio de $0.1 m$.

■ **Control de impedancia con filtro de Kalman y con umbral de novedad e_{max_i}**

Como se he ilustrado anteriormente (ver sección 3.3.3), es posible usar el filtro de Kalman (KBF) con un umbral máximo de novedad para la corrección de la predicción e_{max_i} . Una posible aplicación de esta característica es la de determinar cuando puede ser necesario dejar de tener en cuenta algunas características dinámicas del robot que influyen en su estabilidad.

Tabla 5.7: Parámetros del controlador de impedancia y del KBF y umbral e_{max_i} .

Parámetros	Pata 1	Pata 2	Pata 3	Pata 4
K_i	50000 N/m	50000 N/m	50000 N/m	50000 N/m
f_i	0.05 Hz	0.05 Hz	0.05 Hz	0.05 Hz
ζ_i	1.2	1.2	1.2	1.2
F_{di}	0 N	0 N	0 N	0 N
q_{di}	0.593 m	0.595 m	0.592 m	0.591 m
$ v_{max_i} $	0.015 m/s	0.015 m/s	0.015 m/s	0.015 m/s
R	50000	50000	50000	50000
Q	5	5	5	5
e_{max_i}	2000	2000	2000	2000

También, como ya se ha analizado en los ejemplos anteriores, uno de los principales efectos dinámicos que influyen en la oscilación constante del sistema es el intercambio de estabilidad entre patas contrapuestas. Con el siguiente ejemplo se pretende ilustrar como se puede modificar el comportamiento del sistema después de lograr el

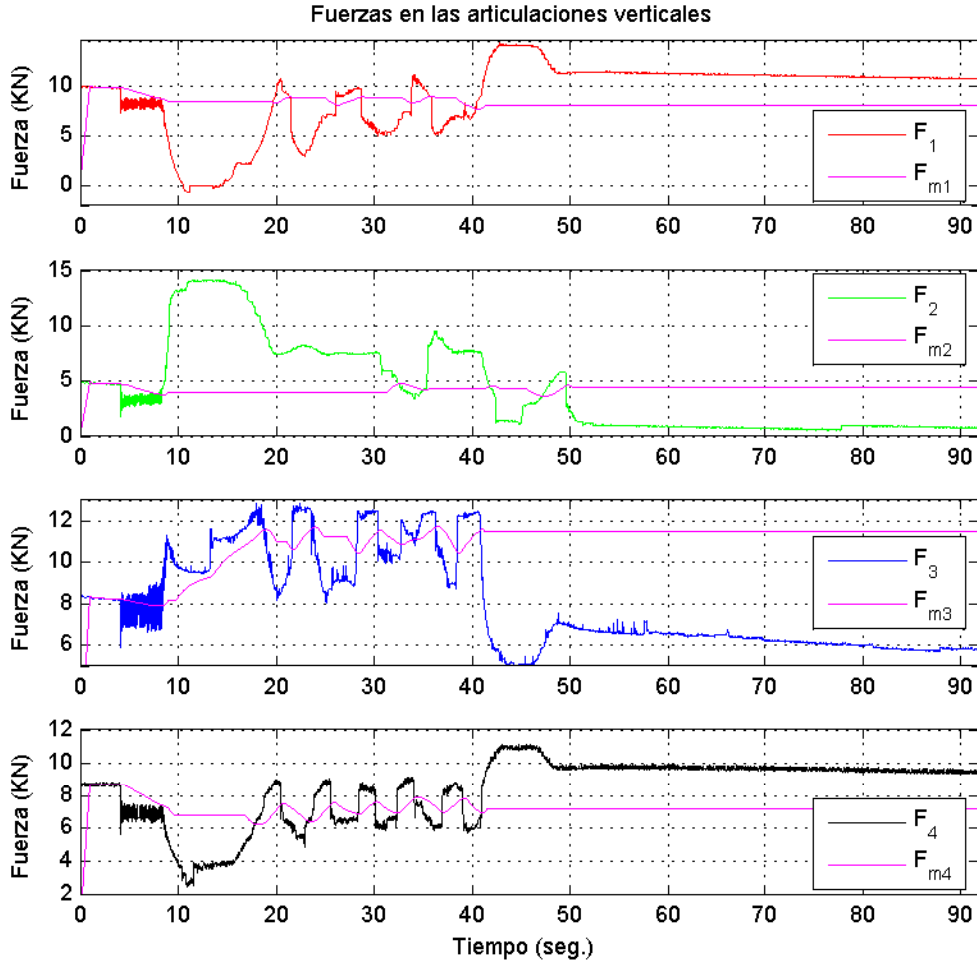


Figura 5.21: Fuerza en las articulaciones con control de impedancia, KBF y umbral e_{max} .

objetivo de llegar a la posición deseada según la fuerza aplicada en las articulaciones verticales y lograr dejar equilibrado el sistema en un estado deseado. Para el controlador se seleccionaron valores similares a los de los ejemplos anteriores (ver Tabla 5.7), pero cabe resaltar el umbral máximo de la velocidad $v_{max_i} = 0.015 m/seg.$, es de un nivel superior al de los ejemplos anteriores, esto significa que es posible

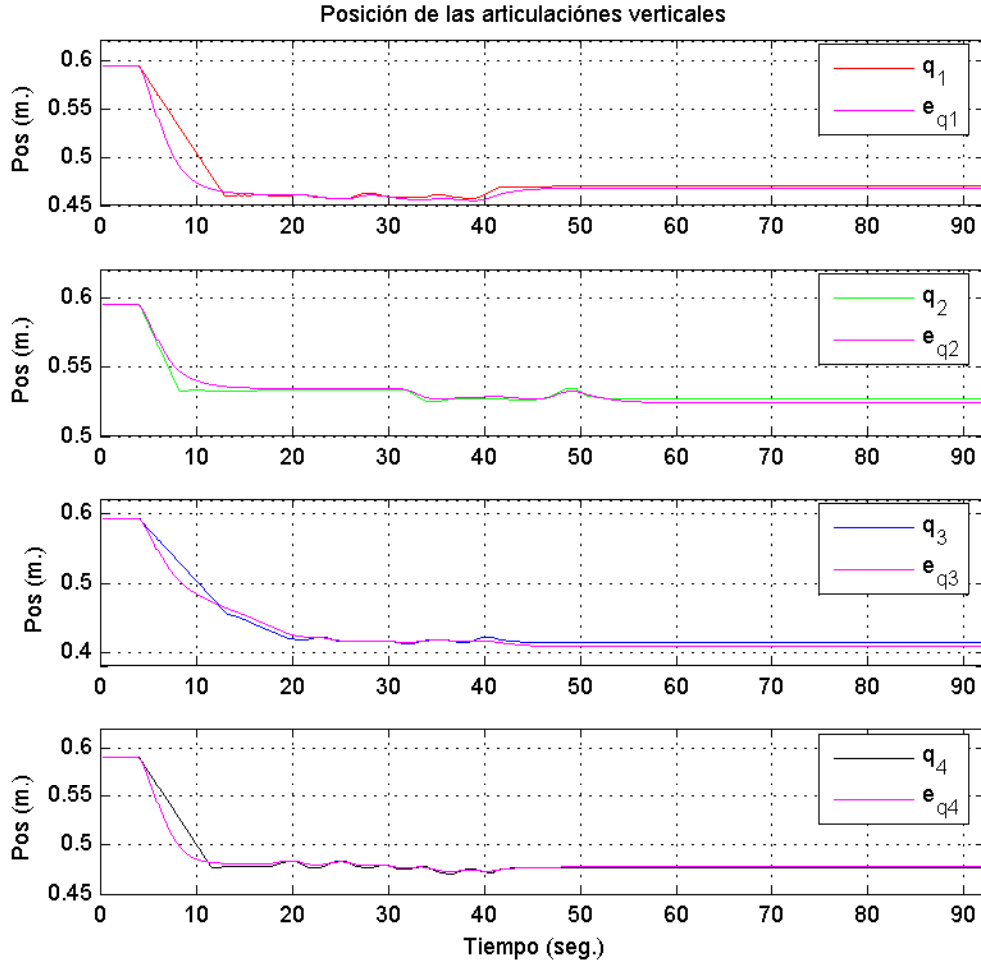


Figura 5.22: Posición de las articulaciones con control KBF y umbral e_{max} .

aumentar la velocidad de reacción del robot ante los cambios en las fuerzas.

Por otro lado en los parámetros del filtro se ha seleccionado un valor de umbral $e_{max_i} = 2000 N$, esto significa que si en la predicción del filtro del Kalman la novedad supera un valor por encima de este margen entonces el valor no se tendrá en cuenta para la actualización

de la predicción posterior.

Como resultado, es posible observar como se logra llegar a una posición determinada (ver Figura 5.22) por la acción de la impedancia en el sistema de control debido a la actuación de la fuerza (ver Figura 5.21) en el momento en el que se inició el proceso. Una vez superado el estado transitorio, en lugar de tener que mantenerse en una oscilación permanente en el estado estacionario (como se ilustra en los ejemplos anteriores), al detectar un cambio drástico de la fuerza en las articulaciones, debido a que con el umbral de novedad se filtró eficientemente el efecto del cambio de estabilidad entre patas contrapuestas, el robot logra una posición estática.

Uno de los problemas de usar este sistema es que puede darse la posibilidad en la que el robot no vuelva a llegar a una situación en la que la fuerza esté por debajo del umbral de la novedad. Para resolver este problema una solución viable es la de utilizar este sistema solo en determinadas situaciones con la posibilidad de activarlo y desactivarlo si es necesario.

5.3. Adaptación activa de los modos de caminar

A lo largo de esta memoria se ha destacado la importancia de la estabilidad en los modos de caminar de los robots con patas, así como se ha comentado el interés de mantener la misma en robots de servicios autónomos en terreno natural.

Como ya se ha anticipado, los modos de caminar presentados anteriormente deben ser modificados para tener en cuenta los factores que pueden influir en la inestabilidad del robot. El primer paso en esta dirección es realizar un análisis de las fuerzas de reacción durante la locomoción. Realizado este análisis estaremos en condiciones de proponer diversas estrategias de control de fuerza para mejorar su desempeño.

5.3.1. Análisis de las fuerzas de reacción en el modo de caminar discontinuo de dos fases

Aunque teóricamente es posible hacerse una idea de como podrían evolucionar las fuerzas durante un modo de caminar discontinuo de dos fases, se ha considerado oportuno evaluar su comportamiento real realizando dos pasos en el modo de caminar discontinuo hacia atrás (ver Capítulo 4) midiendo las fuerzas generadas en cada una de las articulaciones verticales.

Para ello, se han realizado experimentos en los que se miden las fuerzas durante un modo de caminar discontinuo de dos fases con la intención de evaluar el ZMP (ver Ecuación 5.6) en tiempo real, estando el robot dinámicamente equilibrado. La locomoción se ha realizado sobre una superficie rígida y se asume que esta superficie es plana y horizontal. También se asume que el plano vertical (eje z) es ortogonal al plano lateral del cuerpo del robot. Los resultados (posición de ejes verticales, fuerzas de reacción y evolución del ZMP) se muestran en la Figura 5.23. Para ilustrar mejor los resultados, en la Figura 5.24 se muestra la posición del ZMP sobre un esquema en planta del robot.

Al analizar los resultados, se puede observar que, en algunos instantes, sobre todo en las transferencias de las patas 3 y 4, la posición del ZMP está, aparentemente, fuera del polígono de apoyo. Esto se debe a que el ZMP se mide continuamente desde el instante en el que el control de movimientos del robot determina el momento de realizar una transferencia, pero, por algunos instantes, al inicio y al final de la transferencia, la pata está realmente aun en contacto con el suelo, lo que modifica el cálculo del ZMP. En estos instantes se debe denominar FZMP (definido anteriormente en la sección 5.2.3), y estos valores, señalados con color diferente (ver Figura 5.24) no deben ser tenidos en cuenta para efectos de la estabilidad del robot.

5.3.2. Control de impedancia en cada pata en un modo de caminar discontinuo

De la gráfica (ver Figura 5.24) se puede deducir que el ZMP está siempre ubicado en la mitad posterior del robot, con un desplazamiento respecto al centro geométrico del robot máximo de 0.342 m en el ZMP_x y de -0.511 m con respecto al ZMP_y cuando se realiza la transferencia de la pata 3, y solo en contadas ocasiones logra pasar a la parte anterior del centro del robot.

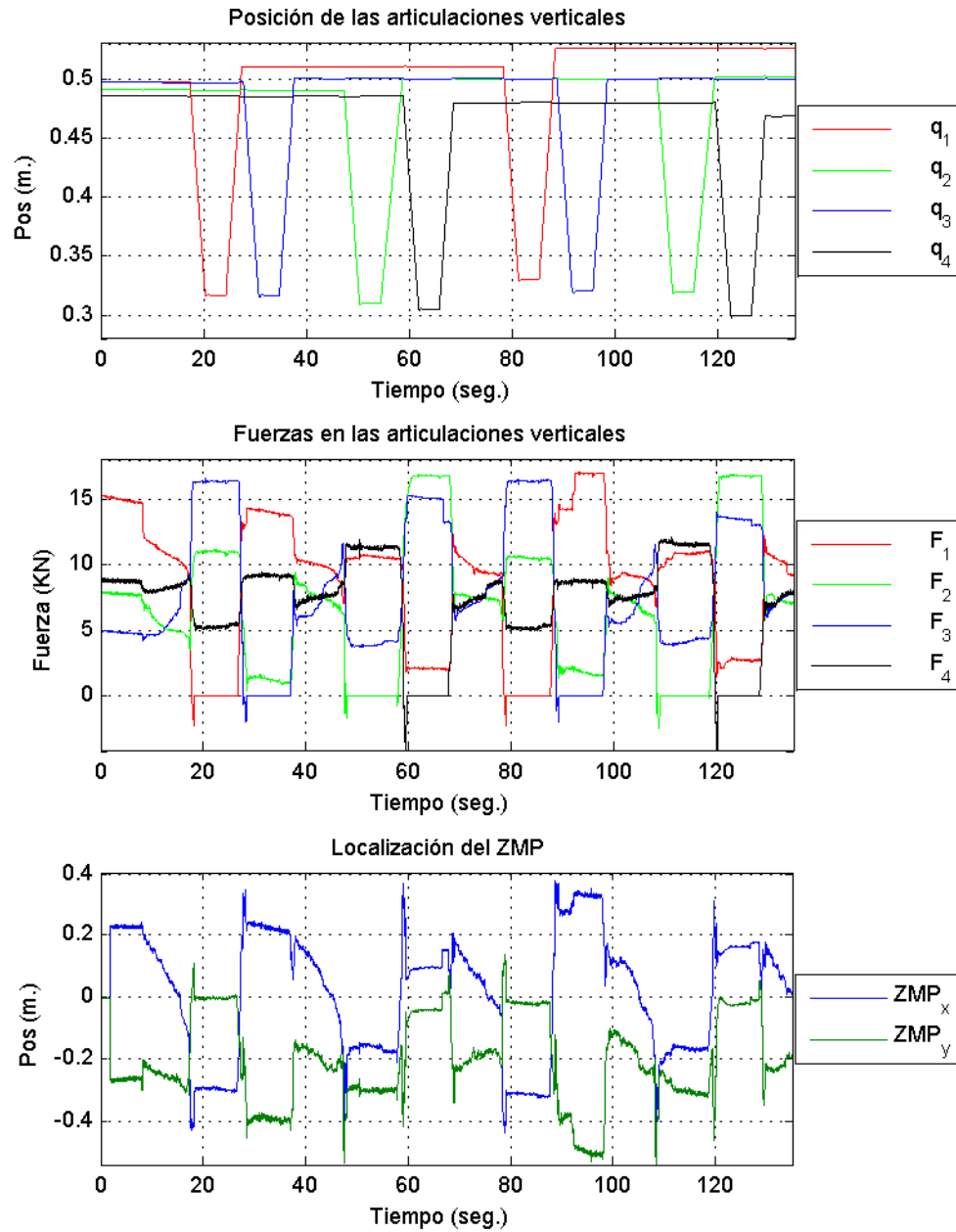


Figura 5.23: Comportamiento de la fuerza en un modo de caminar discontinuo de dos fases.

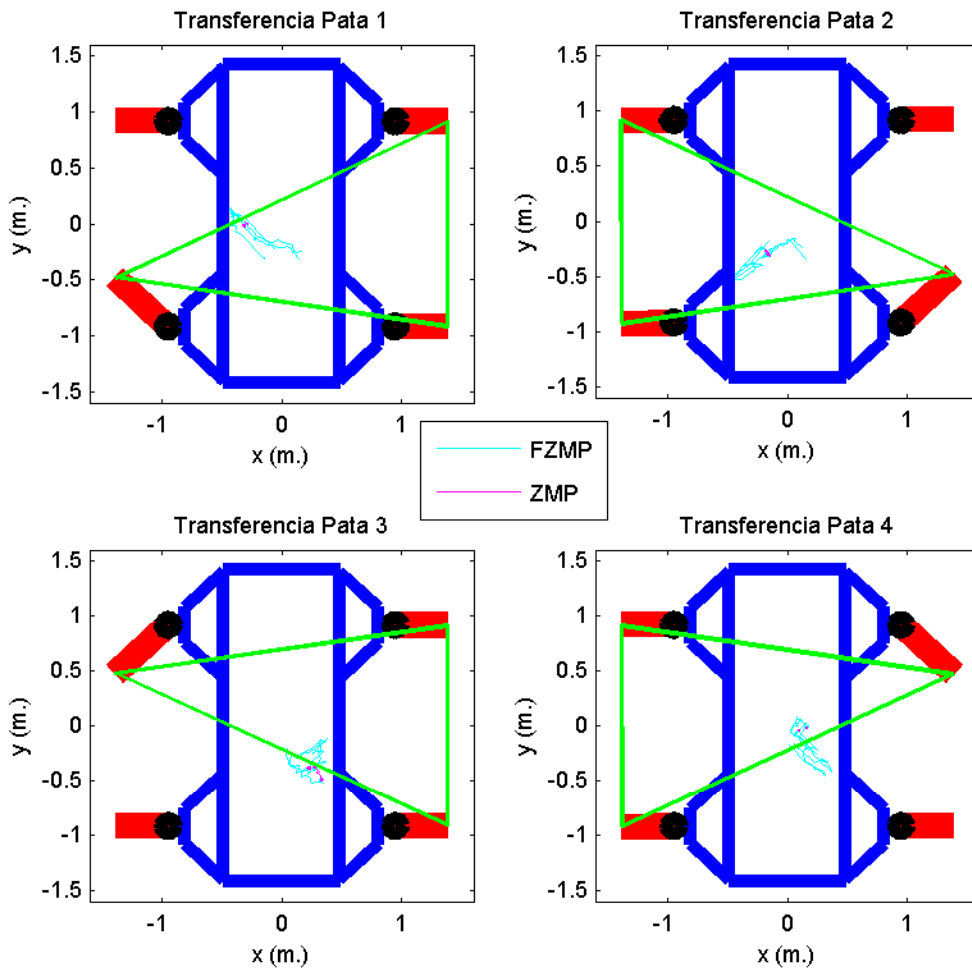


Figura 5.24: Posición del ZMP en el robot en un modo de caminar discontinuo de dos fases.

Esto significa que la estabilidad del robot empleado en estos experimentos (en otros robots el ZMP estará en otra posición, pero el problema es general a los robots caminantes que no tengan una simetría perfecta) disminuye cuando las patas posteriores se levantan. Es decir que, si en algún momento se genera alguna perturbación adicional, aumentando el peso del robot en la parte posterior (*e.g.* aumentando la carga), es posible que el robot se

desestabilice.

Como un primer intento de lograr contrarrestar esta situación se propone realizar un control de impedancia en cada una de las patas durante el modo de caminar discontinuo. El objetivo es que el robot adquiera un comportamiento reactivo en función de las fuerzas externas reales en cada instante logrando adaptar la posición del ZMP ante cualquier perturbación. En otras palabras, se pretende que cada una de las patas se comporte como una suspensión activa que equilibre el robot.

Tabla 5.8: *Parámetros del controlador de impedancia en un modo de caminar discontinuo de dos fases con control de impedancia para cada pata.*

Parámetros	Pata 1	Pata 2	Pata 3	Pata 4
K_i	175000 N/m	175000 N/m	175000 N/m	175000 N/m
f_i	0.05 Hz	0.05 Hz	0.05 Hz	0.05 Hz
ζ_i	1.2	1.2	1.2	1.2
F_{di}	0 N	0 N	0 N	0 N
q_{di}	0.453 m	0.503 m	0.458 m	0.485 m
$ v_{max_i} $	0.015 m/s	0.015 m/s	0.015 m/s	0.015 m/s
R	5000	5000	5000	5000
Q	10	10	10	10
e_{max_i}	6000	6000	6000	6000

Para ello se ha seleccionado un controlador (ver Tabla 5.8) con constantes de rigidez superiores a las del control de postura, pues los cambios realizados en las fuerzas de las patas son muy superiores con respecto al control cuando las cuatro patas están en contacto con el suelo, puesto que en un modo de caminar cuando se levanta una de las patas, el peso se debe distribuir por las tres patas que permanecen en contacto con el suelo. Además se incluye un filtro de Kalman con umbral $e_{max} = 6000 N$.

Como resultado (ver Figura 5.25) se observa que el robot se adapta correctamente a las condiciones de las fuerzas de reacción en todo momento, y, en este caso, al cambio del ZMP durante la transferencia de las patas. Al adaptarse al cambio del ZMP, resulta que el robot intenta de forma "natural" mantener en todo momento el ZMP en mismo sector geométrico del robot (ver Figura 5.26).

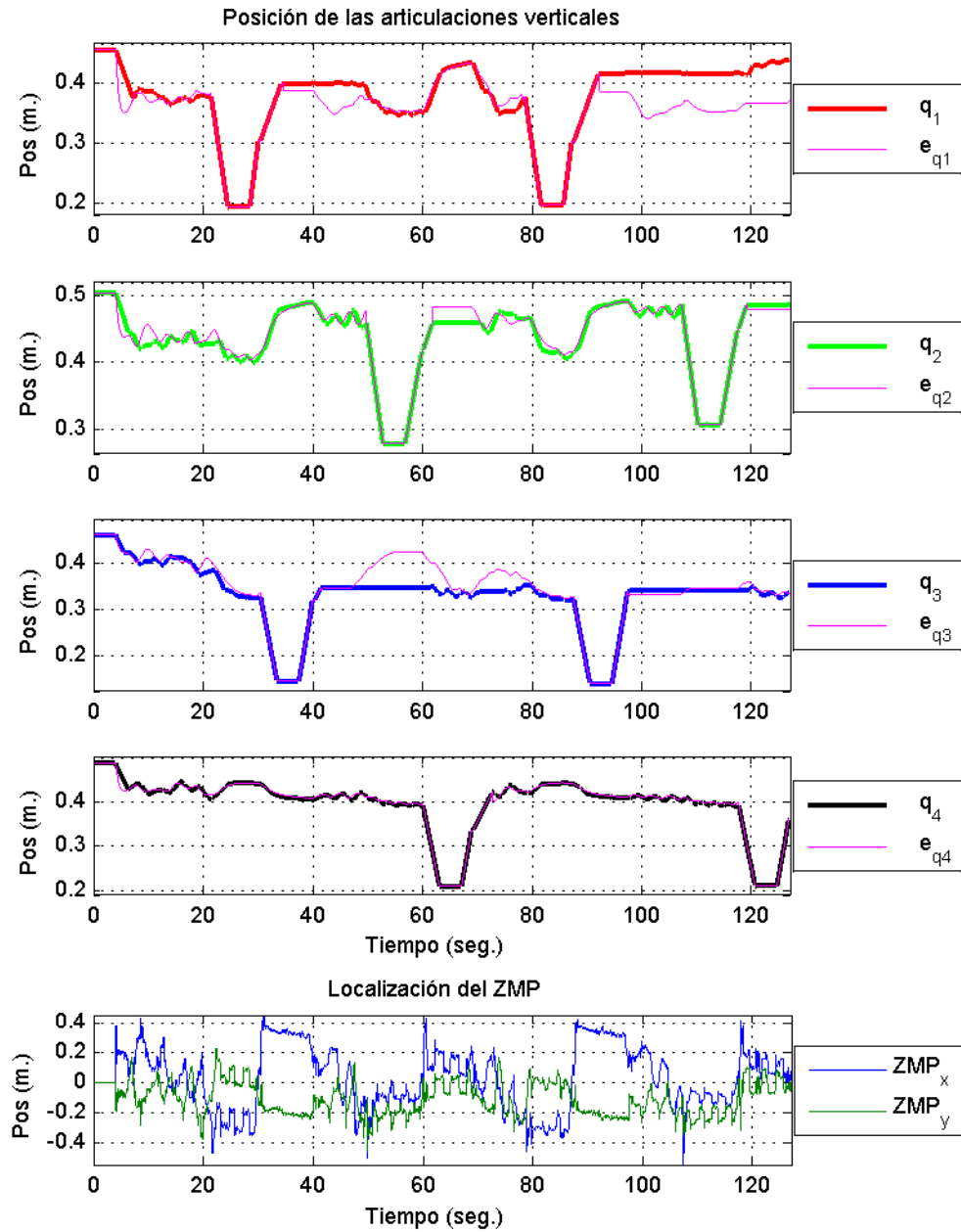


Figura 5.25: Comportamiento de la posición en un modo de caminar discontinuo de dos fases con control de impedancia en las cuatro patas.

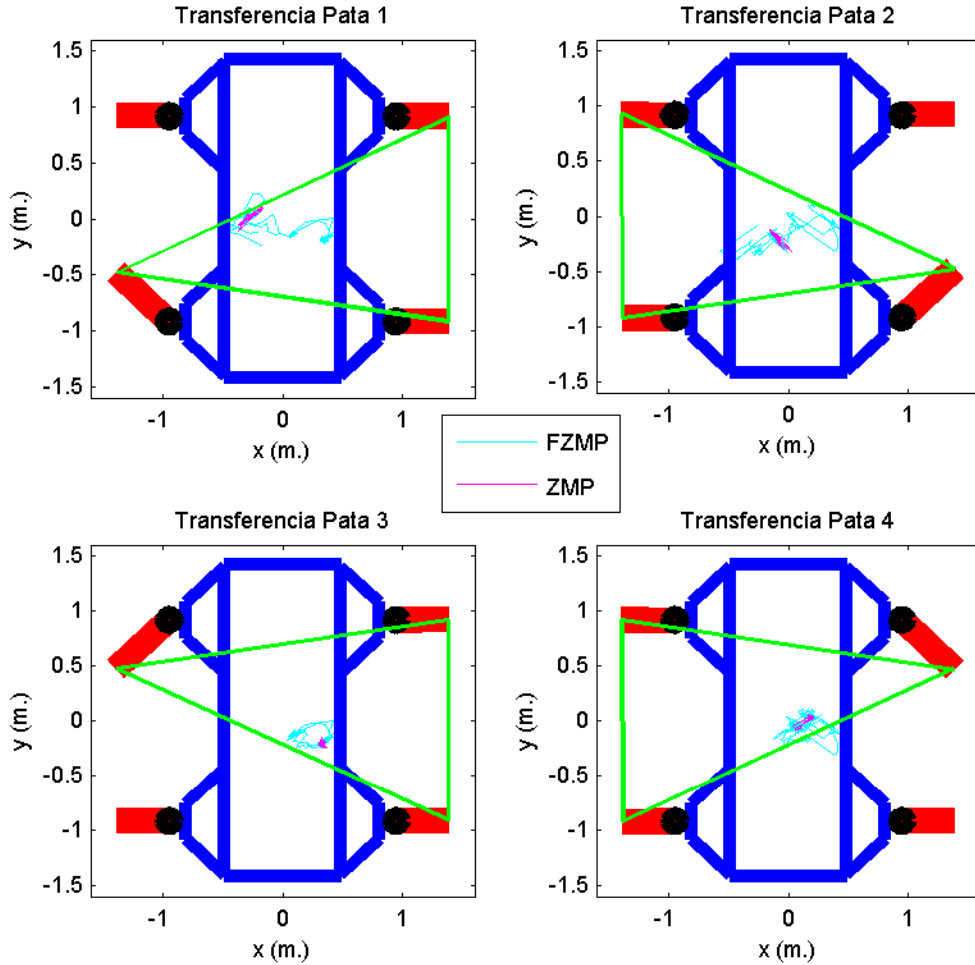


Figura 5.26: Posición del ZMP en el robot en un modo de caminar discontinuo de dos fases con control de impedancia en las cuatro patas.

No obstante, esta mejora evidente en la estabilidad resulta en un efecto indeseado. Cuando una pata está en transferencia, lo ideal es que el ZMP se aleje de ella en el sentido de la pata contrapuesta para alejar el CDG del MEL (ver Capítulo 4); pero como se muestra en la gráfica del ZMP (ver Figura 5.25), cuando por ejemplo, la pata 3 está en transferencia aumenta correctamente el ZMP_x hacia la parte derecha, pero el ZMP_y disminuye

llegando a ser inferior a $-0.2 m$, lo que puede desestabilizar el robot puesto que está en el límite del MEL (ver sección 4.1.6). En consecuencia el ZMP tiende a desplazarse hacia los costados del robot.

5.3.3. Control de impedancia en la pata contrapuesta a la de transferencia en un modo de caminar discontinuo

Para intentar resolver el inconveniente que acabamos de señalar se podría pensar en una estrategia de control con la que se pueda modificar la inclinación del robot controlando el balanceo y el cabeceo del mismo para modificar la posición del ZMP. Cuando una pata está en transferencia, al evaluar las fuerzas de las patas de soporte (ver Figura 5.23), es posible determinar que la fuerza soportada por la pata contrapuesta es significativamente inferior al resto, haciendo que el robot esté bajo la influencia del fenómeno del soporte entre patas contrapuestas (ver Figura 5.18).

Tabla 5.9: Parámetros del controlador de impedancia en un modo de caminar discontinuo de dos fases con control en la pata contrapuesta.

Parámetros	Pata 1	Pata 2	Pata 3	Pata 4
K_i	100000 N/m	100000 N/m	100000 N/m	100000 N/m
f_i	0.05 Hz	0.05 Hz	0.05 Hz	0.05 Hz
ζ_i	1.2	1.2	1.2	1.2
F_{di}	3000 N	2000 N	4500 N	4500 N
q_{di}	0.404 m	0.408 m	0.400 m	0.393 m
R	5000	5000	5000	5000
Q	10	10	10	10

Para intentar modificar este comportamiento se ha implementado una estrategia de control en la que únicamente se activa el control de impedancia en la pata contrapuesta a la pata en transferencia. Las variables del controlador experimentado se recogen en la Tabla 5.9.

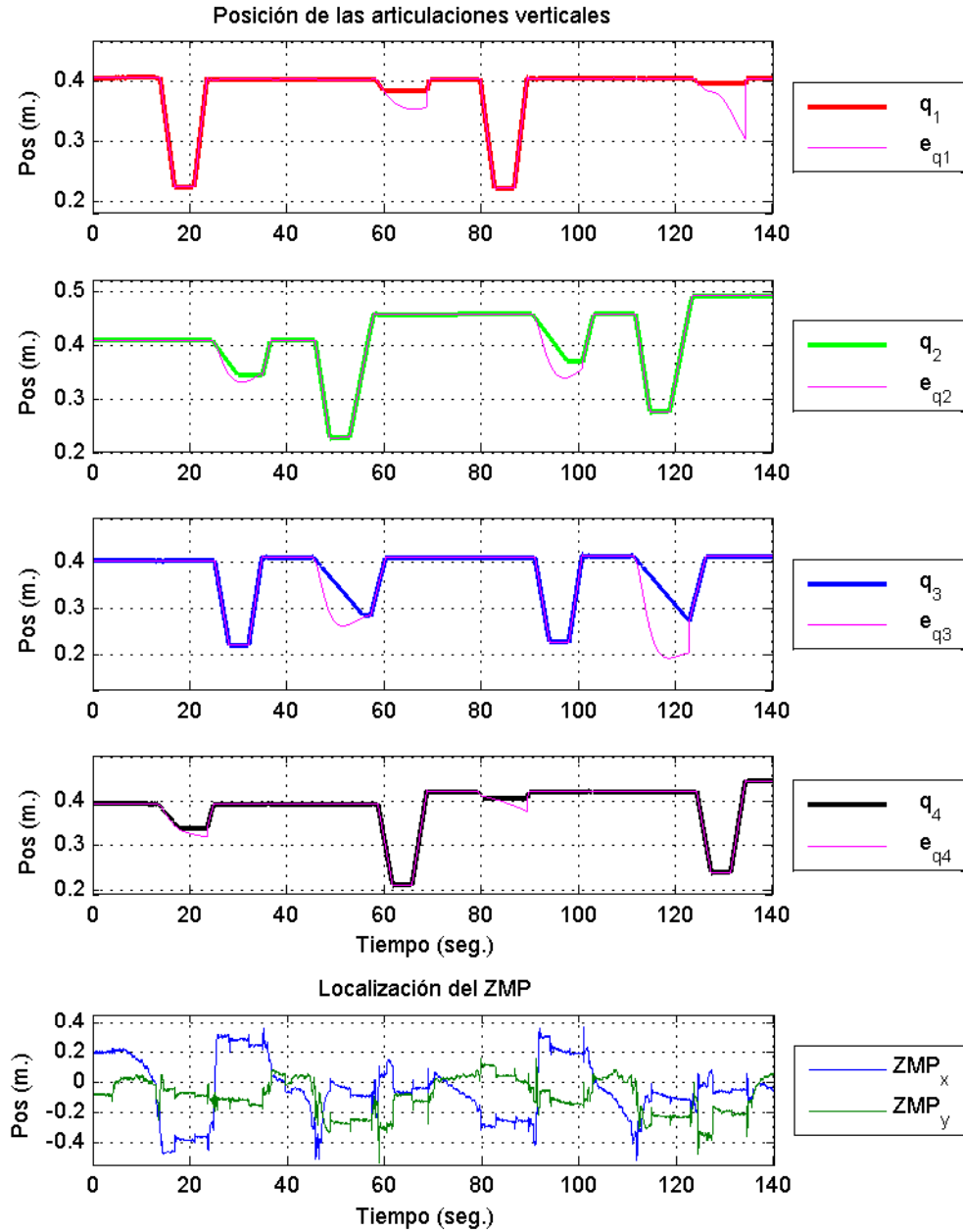


Figura 5.27: Comportamiento de la posición en un modo de caminar discontinuo de dos fases con control de impedancia en la pata contrapuesta.

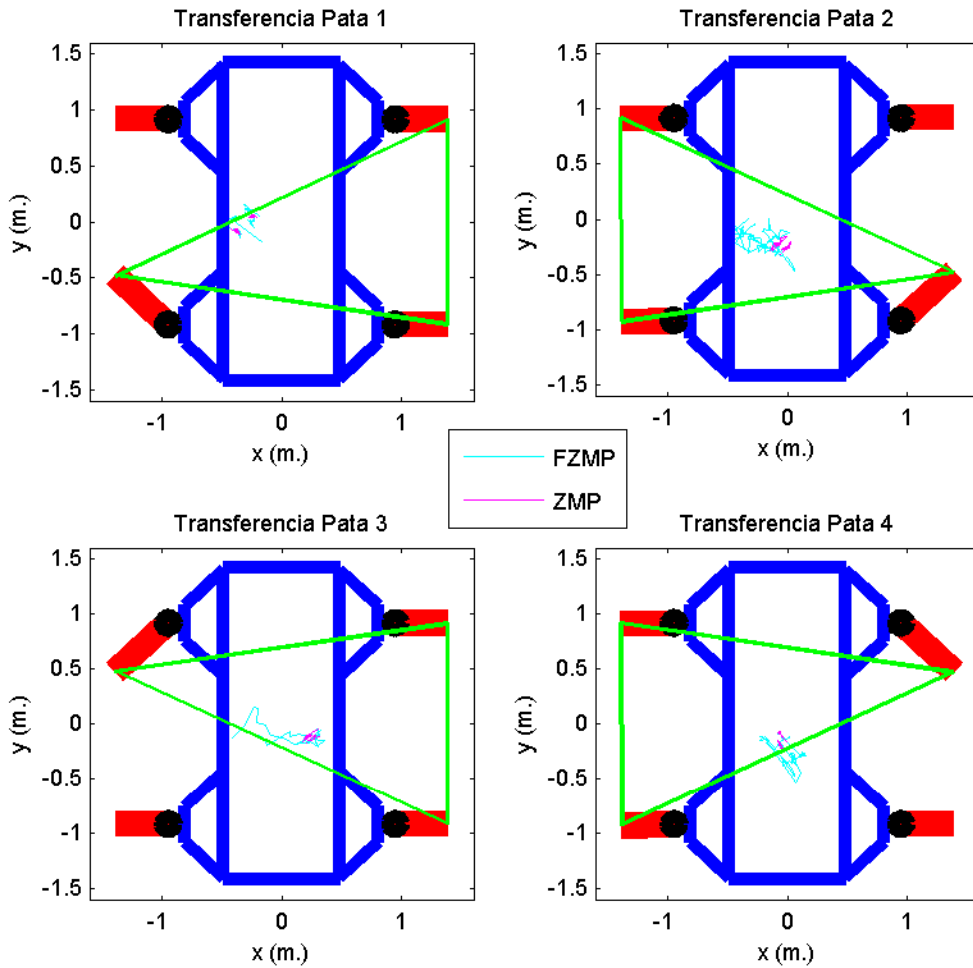


Figura 5.28: Posición del ZMP en el robot en un modo de caminar discontinuo de dos fases con control de impedancia en la pata contrapuesta a la pata en transferencia.

A diferencia de todos los controladores usados anteriormente, dado que el objetivo en este caso es que la pata contrapuesta a la pata en transferencia logre soportar una carga determinada, se ha incluido una fuerza deseada $F_{di} > 0$ evaluada a partir del análisis de cada una de las patas en un modo de caminar discontinuo de dos fases sin control de fuerza (ver Figura 5.23) y el MEL en cada situación. En este caso el controlador tratará de calcular

una posición en la que se cumpla la condición de fuerza deseada para la pata contrapuesta a la que está en transferencia. De esta forma se busca que el robot se incline en dirección contraria a la pata en transferencia, modificando también el ZMP hacia una posición más estable.

Cabe resaltar que, como medida preventiva de inestabilidad, se ha determinado en la estrategia que, cuando la pata que se está controlando alcanza la fuerza deseada, su movimiento se detiene hasta que la pata contraria termine su transferencia para que después vuelva a la posición en la que inició la trayectoria. En este sentido, se ha logrado que, por ejemplo, cuando la pata 3 está en transferencia, al activar el control de impedancia en la pata 2 se inicia un movimiento para buscar la fuerza deseada. En este momento la pata 2 se contrae (ver Figura 5.27) haciendo que el robot se incline en ese sentido. Como resultado, al evaluar el ZMP se determina que, al igual que en el caso anterior, el ZMP_x aumenta correctamente, pero por el contrario el $ZMP_y = -0.13\text{ m}$ disminuye también pero en menor medida, mejorando así las condiciones de estabilidad puesto que este valor es inferior al MEL cuando la pata 3 está en transferencia (ver Figura 5.28).

En algunos casos parece que la inclinación generada por el movimiento de la pata contrapuesta no es suficiente como para generar una estabilidad amplia, con esto se quiere indicar que en algunos casos la pata contraria no alcanza la fuerza deseada que aseguraría la estabilidad en el modo de caminar. Por este motivo lo ideal sería combinar el control de impedancia sobre las cuatro patas en general, con el control de las contrapuestas al de la pata en transferencia. Con esto se lograría por un lado mantener el ZMP del robot en la posición correcta durante el movimiento del cuerpo y en el momento en el que una pata realice una transferencia se pueda ayudar a mejorar el equilibrio del robot controlando la pata contraria con fuerza deseada.

5.3.4. Análisis de las fuerzas de reacción en el modo de caminar continuo

De forma similar al problema de la estabilidad en el modo de caminar discontinuo, también se ha analizado el comportamiento de las fuerzas durante un modo de caminar continuo. Como se ha ilustrado anteriormente (ver Capítulo 3), tener el CDG en la parte posterior del robot puede llegar a acarrear serios problemas de inestabilidad.

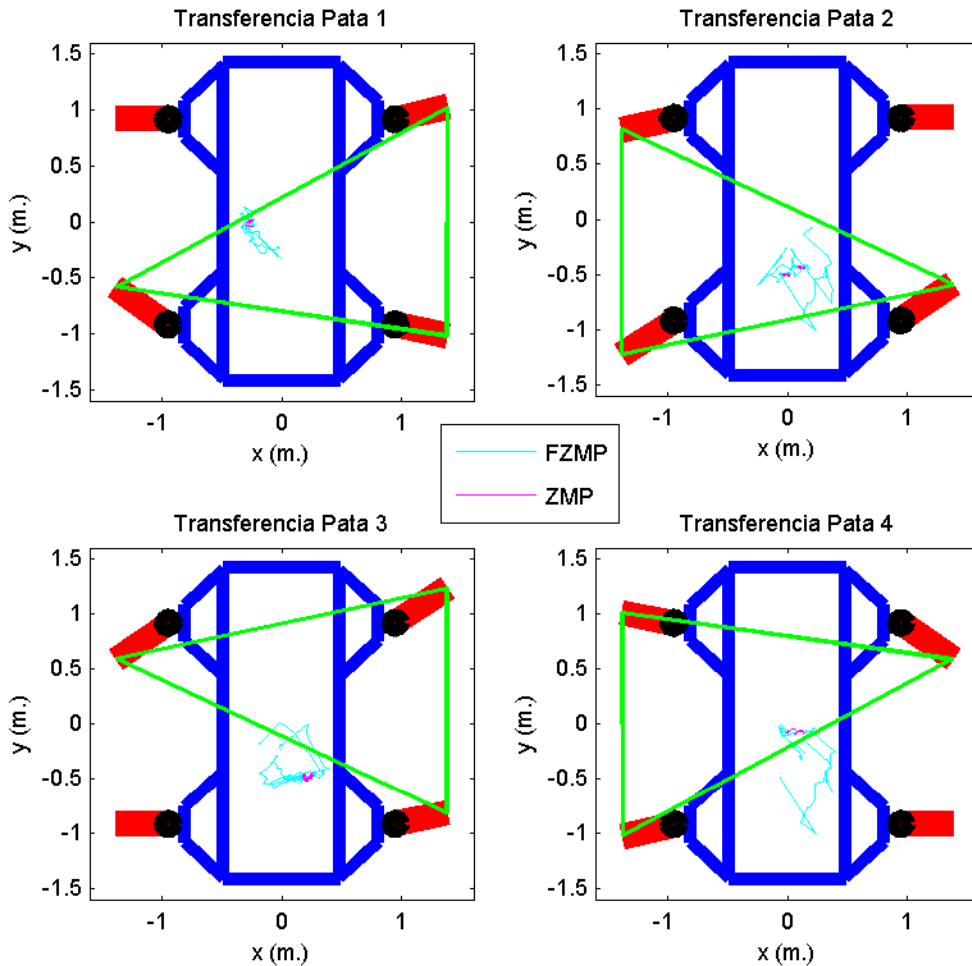


Figura 5.29: Posición del ZMP en el robot en un modo de caminar continuo.

Los experimentos mostrados a continuación se han realizado en condiciones idénticas a las realizadas para el modo de locomoción discontinuo, es decir, sobre una superficie rígida, con la misma carga y se supone que esta superficie es plana y horizontal. También se supone que el plano vertical (eje z) es ortogonal al plano lateral del cuerpo del robot.

Dado que en un modo de caminar continuo el MEL generalmente es inferior al de un modo discontinuo, se debe determinar la forma de

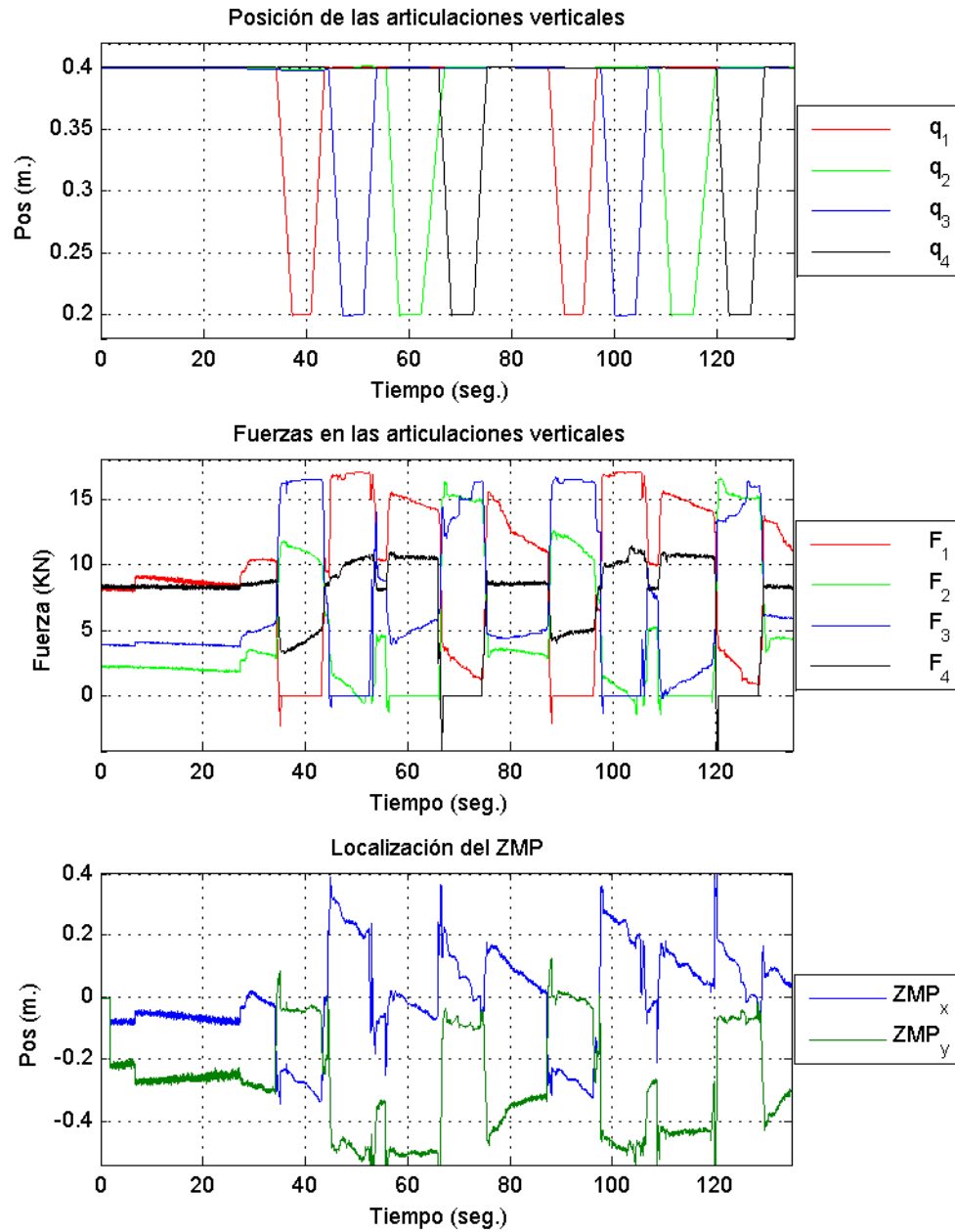


Figura 5.30: Comportamiento de la fuerza en un modo de caminar continuo.

evaluar y controlar el desplazamiento del ZMP en el robot cuando exista posibilidad de desequilibrio. En este caso también se determina el ZMP sin consideraciones dinámicas, pues aunque la masa del robot sea alta, la velocidad de locomoción es muy baja ya que el robot se desplaza a 0.02 m/s . Por otro lado, la generación de movimientos en el modo de caminar continuo se ha calculado para que las posiciones logren el máximo polígono de apoyo para la pata en transferencia a la velocidad establecida.

Al analizar el comportamiento del ZMP (ver Figura 5.29) durante un modo de caminar continuo hacia atrás, cuando las patas posteriores (3 y 4) están en transferencia el ZMP se sale del polígono de apoyo. Como resultado se obtiene que el robot vuelca hacia la pata 3 (por ejemplo) cuando ésta realiza su transferencia. Por este motivo se ha estudiado una forma de desplazar el ZMP durante el modo de caminar cuyos resultados serán examinados a continuación.

5.3.5. Control de impedancia en cada pata en un modo de caminar continuo

Como un primer intento para tratar de contrarrestar el vuelco del robot durante la transferencia de alguna pata con riesgo de desequilibrio, dados los resultados obtenidos con el control de impedancia en cada pata en el modo de caminar discontinuo de dos fases, se implementará un control de impedancia en cada una de las patas con la intención de que el robot se adapte de forma natural a los cambios de fuerza durante la locomoción.

En este caso, dado el comportamiento natural de las patas actuando como un muelle con amortiguamiento según las características del controlador (ver Tabla 5.10) de impedancia, en la locomoción, y debido a que las patas traseras deben soportar mayor carga, las patas traseras tienden a descender haciendo que el ZMP_x y el ZMP_y estén permanentemente por debajo de cero (ver Figura 5.31). Esto significa que el ZMP tiende a permanecer en la parte posterior izquierda del robot. En algunos casos, como en las transferencias de las patas 1 y 2 el ZMP alcanza valores correctos. Pero al no adaptarse en el momento de las transferencias de las patas 3 y 4, el robot se desequilibra con facilidad.

El caso más crítico se presenta en la transferencia de la pata 3. Como se ilustra en la gráfica (ver Figura 5.32) el ZMP está constantemente fuera del polígono de apoyo con el robot en un estado de desequilibrio

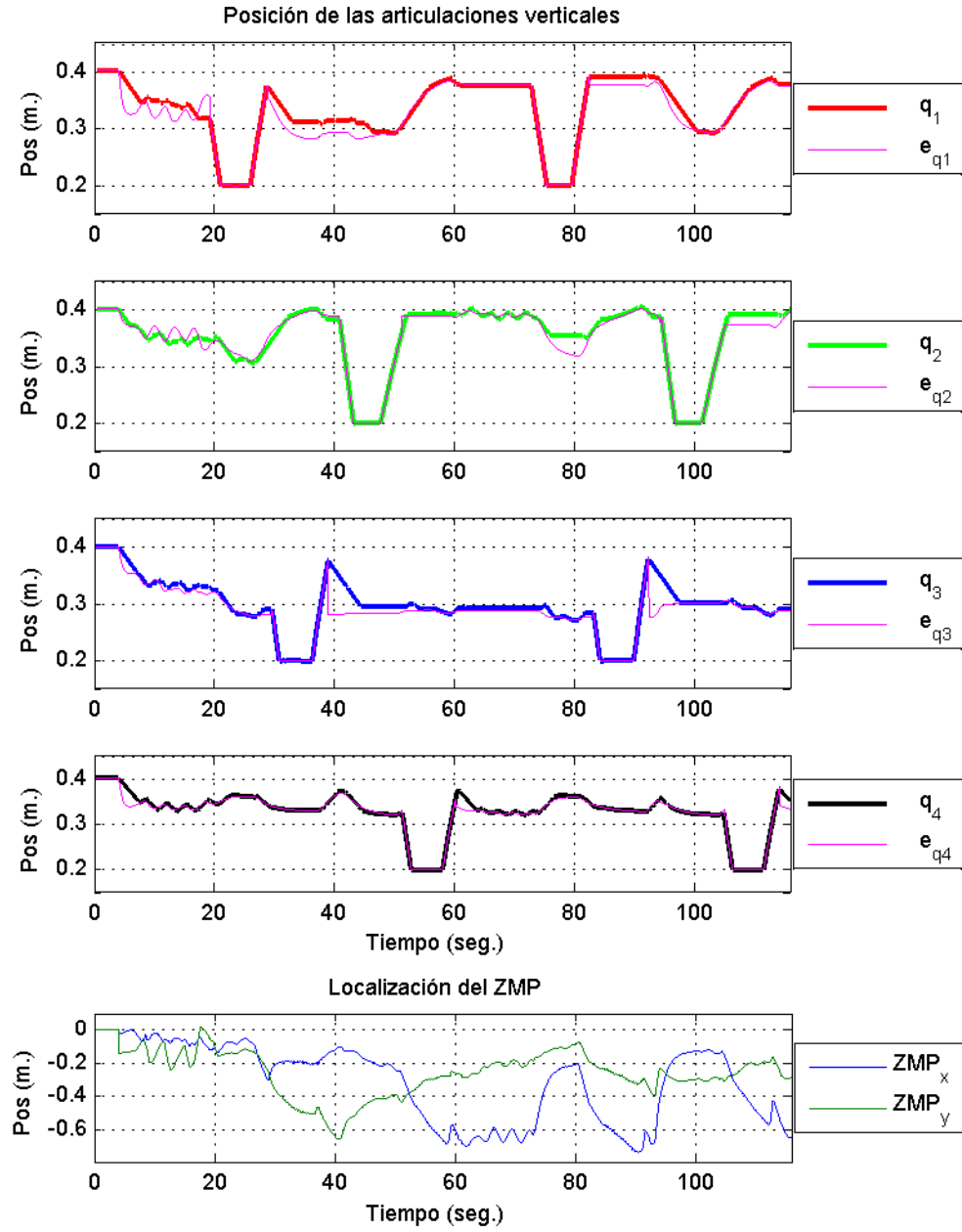


Figura 5.31: Comportamiento de la posición en un modo de caminar continuo con control de impedancia para cada pata.

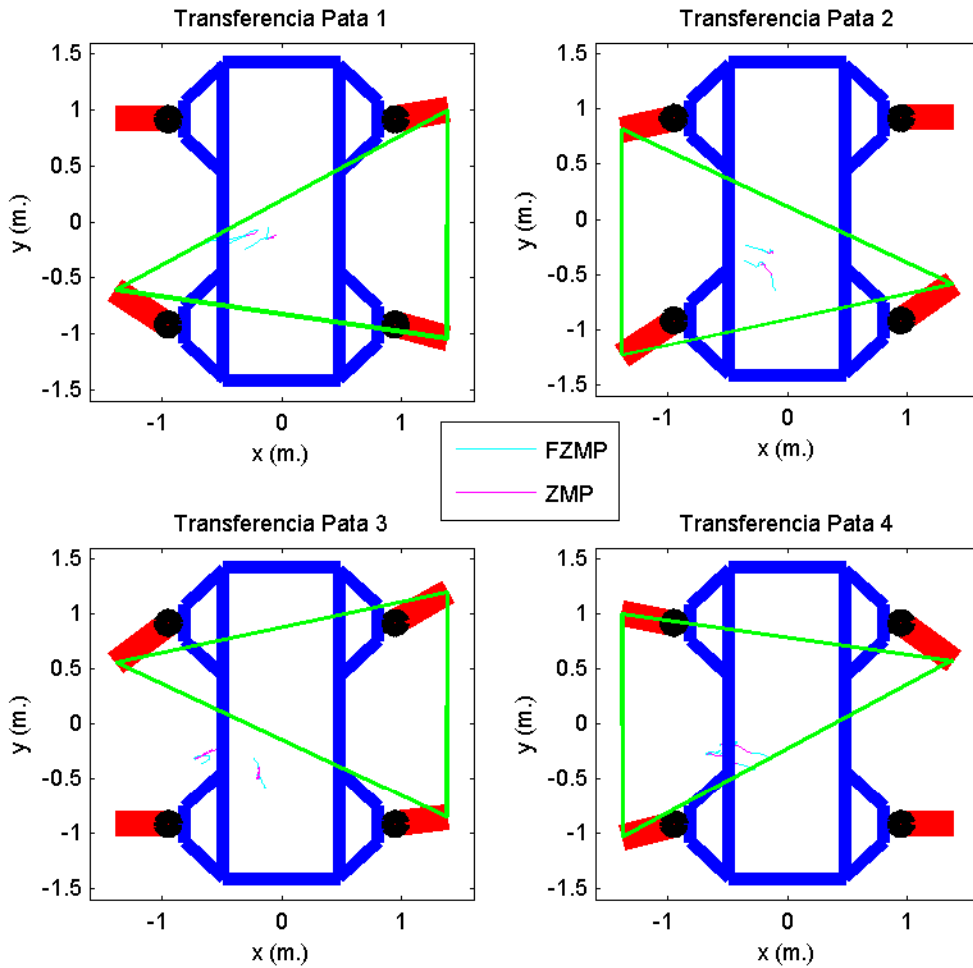


Figura 5.32: Posición del ZMP en el robot en un modo de caminar continuo con control de impedancia para cada pata.

permanente. Aunque en el caso del modo de caminar discontinuo esta estrategia lograba que el robot mantuviera el ZMP dentro del polígono de apoyo del robot, en este caso, debido al movimiento continuo del robot, éste no se logra estabilizar. Por esta razón, es necesario implementar otra estrategia adicional, para solucionar el problema de la estabilidad en el modo de caminar continuo.

Tabla 5.10: *Parámetros del controlador de impedancia en un modo de caminar continuo con control de impedancia para cada pata.*

Parámetros	Pata 1	Pata 2	Pata 3	Pata 4
K_i	100000 N/m	100000 N/m	100000 N/m	100000 N/m
f_i	0.05 Hz	0.05 Hz	0.05 Hz	0.05 Hz
ζ_i	1.3	1.3	1.3	1.3
F_{di}	0 N	0 N	0 N	0 N
q_{di}	0.400 m	0.400 m	0.400 m	0.400 m
R	5000	5000	5000	5000
Q	10	10	10	10
e_{max_i}	6000	6000	6000	6000

5.3.6. Control de impedancia en la pata contrapuesta a la de transferencia en un modo de caminar continuo

Al igual que en el caso del control de impedancia sobre la pata contrapuesta en el modo de caminar discontinuo de dos fases, el objetivo de activar el control solamente en la pata con posición contrapuesta a la pata en transferencia es lograr que el ZMP se ubique en una posición que favorezca el equilibrio en cualquier instante del modo de caminar continuo.

Antes de proseguir, primero se han analizado las condiciones adecuadas de equilibrio para evaluar las fuerzas de cada pata con respecto a las posiciones de las articulaciones, y al ZMP de un modo de locomoción continuo y sin control (ver Figura 5.30). Con ello se ha llegado a la conclusión de que las fuerzas deseadas F_{di} que debe tener cada pata contrapuesta a la pata de transferencia son similares a las utilizadas para el control en el modo de caminar discontinuo (ver Tabla 5.11).

Como se ilustra en la trayectoria de las posiciones (ver Figura 5.33), en este caso también ha sido necesario detener el movimiento de la pata contrapuesta al alcanzar la fuerza deseada. En algunos casos, como en el momento de la transferencia de la pata 3, el movimiento de la pata 1 (la contrapuesta) no se detiene hasta que la fase de transferencia se termina. Esto se debe a que para ella no ha sido posible alcanzar la fuerza deseada.

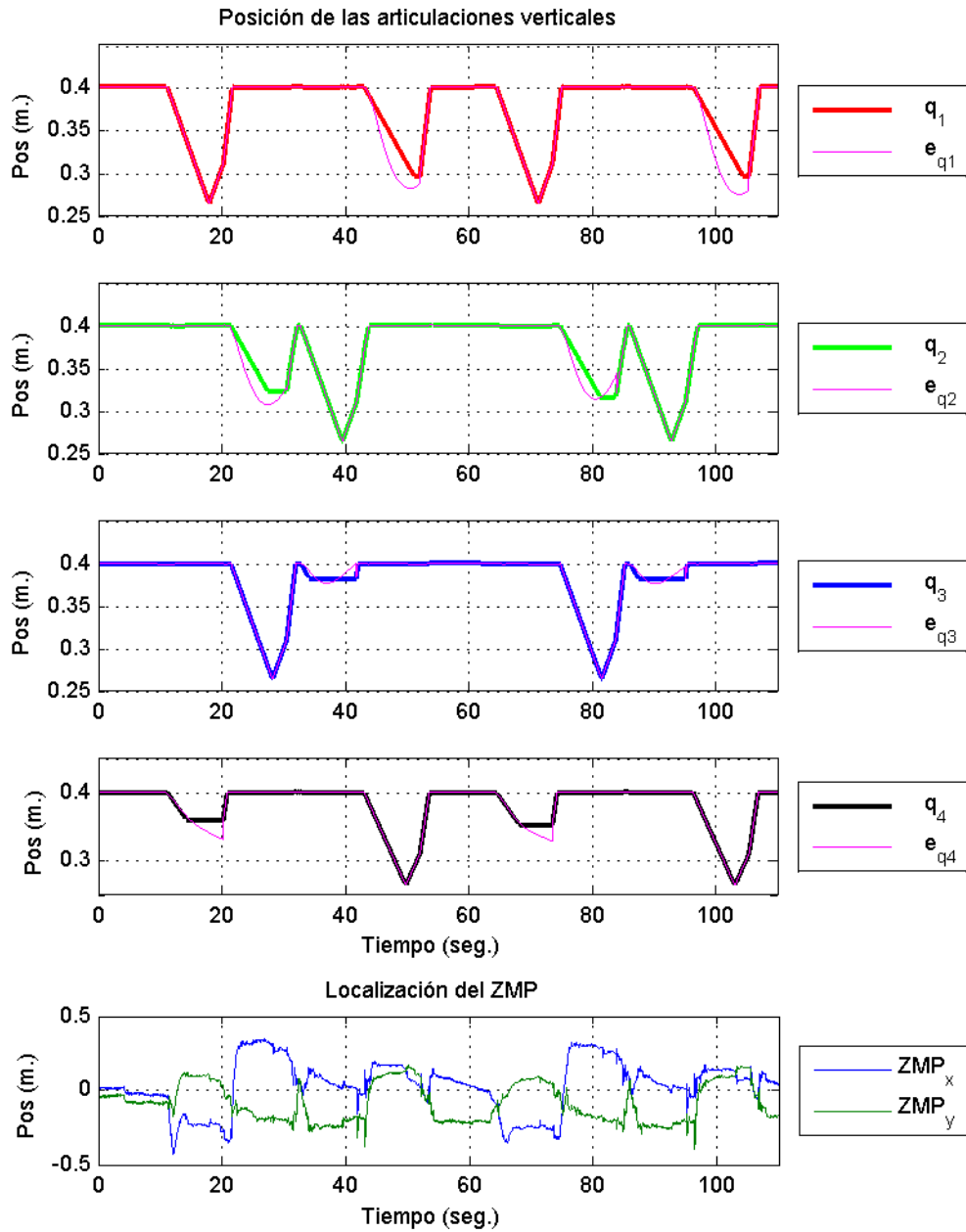


Figura 5.33: Comportamiento de la posición en un modo de caminar continuo con control de impedancia en la pata contrapuesta.

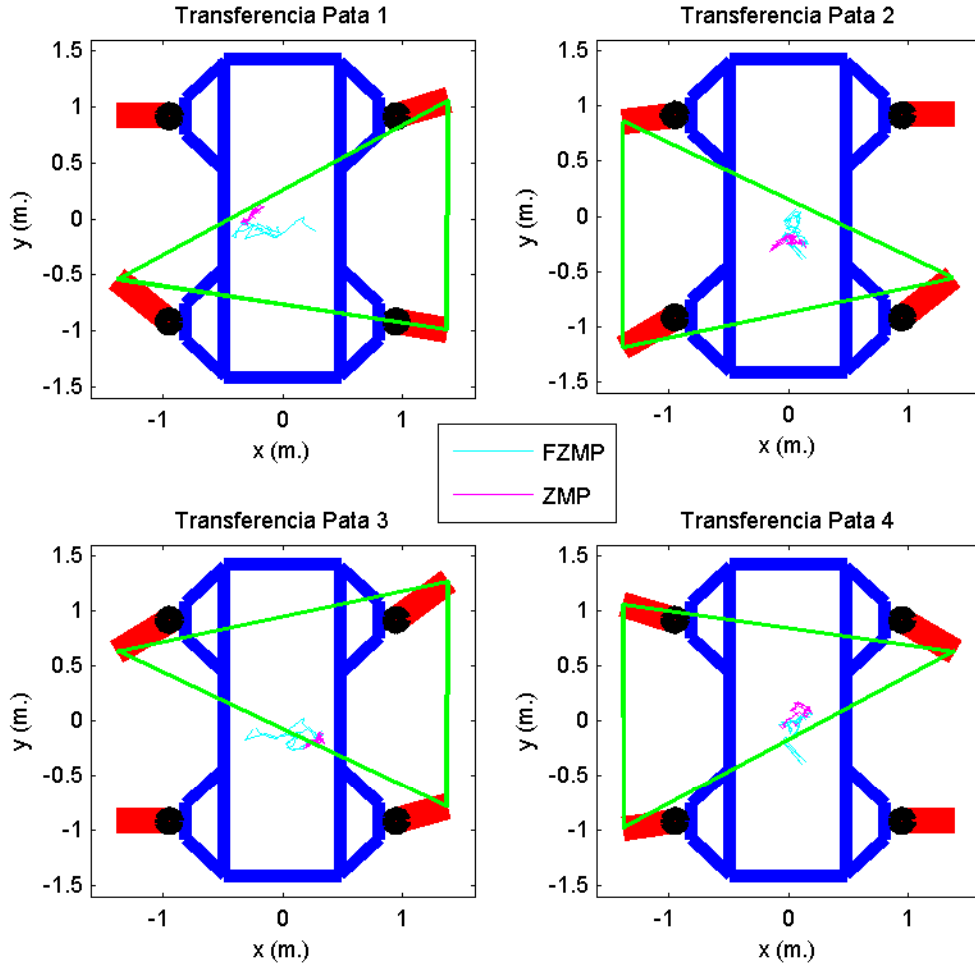


Figura 5.34: Posición del ZMP en el robot en un modo de caminar continuo con control de impedancia en la pata contrapuesta.

Aún así, según la trayectoria del ZMP_x y el ZMP_y (ver Figura 5.33) la posición de equilibrio se mantiene en torno al centro geométrico del polígono de apoyo durante todo el proceso. De la misma forma, si se compara por ejemplo el desplazamiento del ZMP en el momento de la transferencia de la pata 3 con respecto a la locomoción continua sin control (ver Figura 5.30) o con control de impedancia en las cuatro patas (ver Figura 5.31), es posible

Tabla 5.11: *Parámetros del controlador de impedancia en un modo de caminar continuo con control en la pata contrapuesta.*

Parámetros	Pata 1	Pata 2	Pata 3	Pata 4
K_i	100000 N/m	100000 N/m	100000 N/m	100000 N/m
f_i	0.05 Hz	0.05 Hz	0.05 Hz	0.05 Hz
ζ_i	1.3	1.3	1.3	1.3
F_{di}	3000 N	2500 N	2500 N	4500 N
q_{di}	0.400 m	0.400 m	0.400 m	0.400 m
R	5000	5000	5000	5000
Q	10	10	10	10
e_{max_i}	6000	6000	6000	6000

apreciar que en este caso el valor máximo del $ZMP_y = 0.02 m$, valor muy por debajo a los anteriores y similar al del caso de un modo de caminar discontinuo de dos fases (ver Figura 5.23).

Como resultado (ver Figura 5.34) se ha logrado que el robot esté correctamente en equilibrio durante todo el ciclo de locomoción en un modo de caminar continuo. Con esta estrategia de control también se ha logrado que la posición del ZMP tienda a acercarse al centro del polígono de apoyo aumentando la estabilidad, incluso teniendo un margen de estabilidad menor que en un modo discontinuo, lo que lo hace un modo de caminar que puede asimilar cambios de carga externos inesperados de forma eficiente.

Una de las características más interesantes de esta estrategia es que si en algún momento se generan pares de vuelco (como se ilustran en la sección 4.1.3) entre las patas diagonales de apoyo en dirección a la pata en transferencia, debido a que en ese instante se está produciendo una inclinación en el sentido contrario (en el de la pata contrapuesta), se podrían anular los pares de vuelco en el caso de un desequilibrio debido a una carga adicional inesperada.

En las imágenes (ver Figura 5.35) se ilustra el proceso de transferencia de la pata 3 en el modo de caminar continuo hacia atrás mientras se activa el control de impedancia en la pata 2.

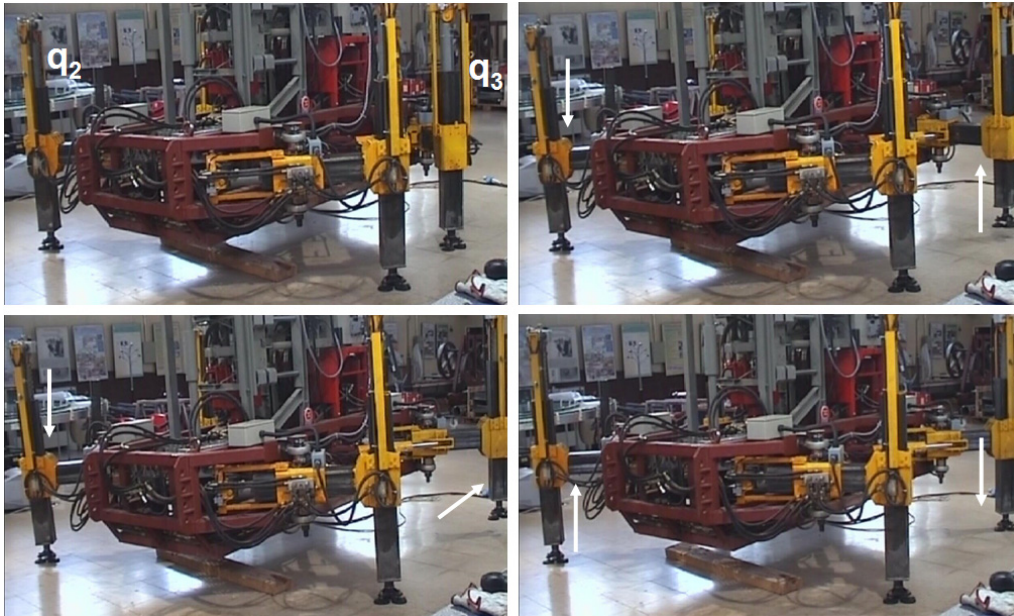


Figura 5.35: Fase de transferencia de la pata 3 con control de impedancia en la pata contrapuesta.

5.4. Adaptación activa en la dirección del movimiento del robot

En los apartados anteriores del presente capítulo de la memoria se han tratado las dificultades que presenta la adaptación activa de un robot caminante que atraviesa en su marcha un terreno natural, y se han propuesto y evaluado diversas estrategias de control, basadas en diferentes principios, que proporcionan soluciones alternativas al problema planteado. Sin embargo, salvo en la sección 5.1, en el que se contempla el empleo de sensores de medida de distancia sin contacto para implementar estrategias de control reactivo, las demás estrategias presentadas se han enfocado primordialmente al problema de la interacción robot-suelo. Siendo éste un problema fundamental, al que, como ya se ha indicado, se ha tratado de contribuir con una serie de aportaciones, vamos a, en base al conocimiento adquirido, tratar de extender los resultados al problema de la adaptación

activa en la dirección del movimiento del robot. Este problema se puede plantear como sigue. En terrenos muy irregulares, no solo hay que esperar irregularidad en el suelo, sino también la presencia de obstáculos (objetos, personas, etc.) en la dirección del movimiento del robot. El problema de la evitación de obstáculos, asociado o no a la navegación, es bien conocido en la robótica móvil clásica, y ha sido abordado por multitud de investigadores (fundamentalmente en interiores). Sin embargo, si un robot caminante desplazándose sobre terreno natural se encuentra un obstáculo o éste surge repentinamente y no es capaz de sobrepasarlo cinemáticamente y no dispone de ningún sistema con el que se pueda detectar el mismo *a priori* (como sensores ultrasónicos externos o un sistema de visión artificial combinado con detección por laser), o dichos sistemas están fuera de rango o simplemente fallan, posiblemente la pata o el cuerpo del robot chocaría con el obstáculo generando inestabilidad, e, incluso, dependiendo de la intensidad del choque, deformaciones o daños en el obstáculo (que puede ser una persona) o en el robot.

Una posible solución a este problema, cuando los demás sistemas de monitorización del entorno fallan, es la de incorporar lazos internos de control reactivo. Por esta razón, en los siguientes apartados, se propone medir las fuerzas generadas en las articulaciones que propulsan el cuerpo del robot en la dirección del movimiento (fundamentalmente las de rotación en nuestro caso) e implementar estrategias de control directo de fuerza que permitan reaccionar rápidamente en función de dichas fuerzas externas. Esto contribuirá en gran medida a la seguridad en la actuación del robot, especialmente si este se desenvuelve en un entorno en el que hay personas.

5.4.1. Control de impedancia en una articulación de rotación

La primera prueba realizada para la comprobación del sistema de reacción frente a fuerzas externas en una articulación de rotación se realizó con un controlador de impedancia (ver sección 5.2.1). Para emular la reacción ante un objeto externo, en lugar de mover el robot hasta hallar un obstáculo, se aplicaron manualmente cargas externas en la articulación estando ésta sin apoyo en el suelo. Así, se habilitó un controlador de impedancia configurado con $F_{di} = 0$, un controlador similar al utilizado en el control de la postura, pero con diferentes parámetros (ver Tabla 5.12),

elegidos de acuerdo con la sensibilidad deseada (acomodación dinámica) frente a la carga externa que tiene que soportar.

Tabla 5.12: *Parámetros del controlador de impedancia en una articulación de rotación.*

Parámetros	Pata 1
K_i	80000 N/m
f_i	0.9 Hz
ζ_i	0.9
F_{di}	0 N
q_{di}	0°
R	5000
Q	3

Una vez el sistema ha alcanzado su posición natural, de acuerdo con la configuración del controlador elegido, se han aplicado perturbaciones (cargas externas) adicionales para evaluar el comportamiento de la articulación. Como era de esperar, dado que la articulación soporta una fuerza estática inicial, ésta reacciona ante ellas deformándose hasta alcanzar una posición determinada por los parámetros de la impedancia deseada y la fuerza inicial. En la gráfica (ver Figura 5.36) se señalan con flechas los instantes en los que la articulación reacciona cambiando de posición dependiendo de la carga externa adicional, aplicada dos veces, para después volver a su estado de régimen sin perturbación.

Una segunda opción interesante puede ser la de usar una fuerza deseada $F_{di} > 0$ (ver Tabla 5.13). En este caso (ver Figura 5.37) la posición tiende a mantenerse como originalmente está establecido por el controlador de movimientos, a pesar de las posibles cargas externas.

De nuevo se observa como la articulación reacciona correctamente a la posición y a la fuerza deseada en el instante en el que recibe una perturbación externa. En este caso, además, con una fuerza mucho menor que la requerida en el caso anterior, la articulación cede rápidamente ante la perturbación. De esta forma se puede apreciar como es posible detectar una carga adicional en el momento en el que la pata esté en alguna posición específica.

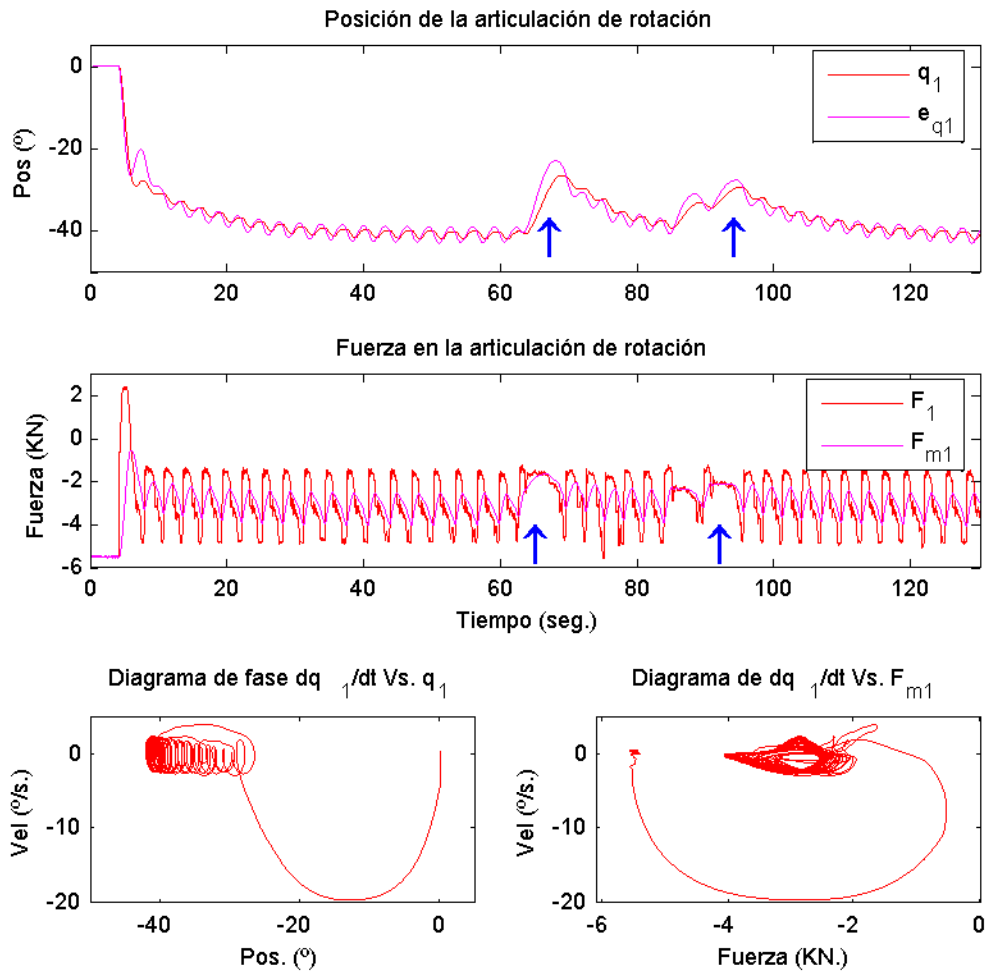


Figura 5.36: Control de impedancia en una articulación de rotación.

Nótese que, en ambos casos, la posición, el error en posición, la velocidad y la fuerza oscilan ligeramente dentro de una banda, excepto en los instantes en que se aplican las perturbaciones. Esto se debe, en parte, a la naturaleza no colocada del controlador de fuerza (el actuador del eje 1 no está situado en el mismo eje de rotación, sino que, como ya se ha indicado, el movimiento del eje 1 de cada pata se obtiene empleando un cilindro hidráulico fijo en un extremo al cuerpo del robot y en el otro extremo a la base del eje 2

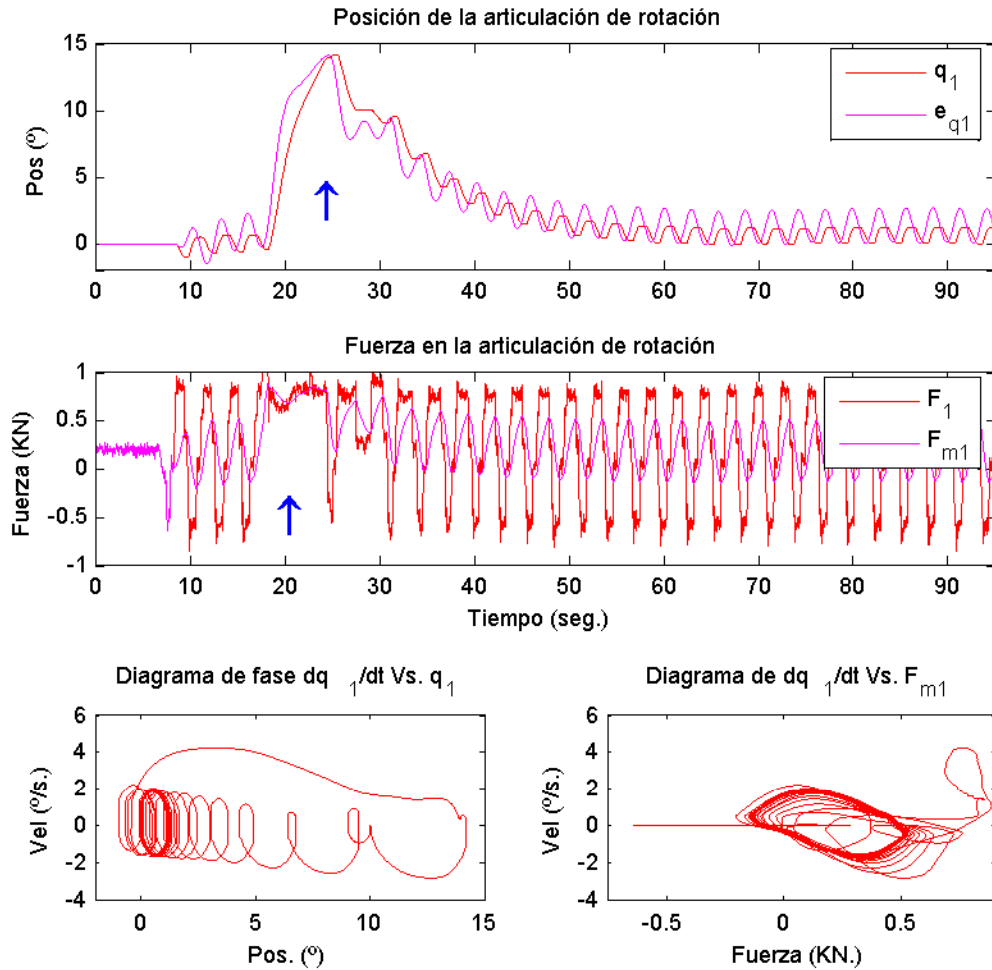


Figura 5.37: Control de impedancia en una articulación de rotación con $F_{di} > 0$.

(ver Figura 2.3). Nótese asimismo, cómo el lazo de control de posición interno reduce el error de posición “real” (es decir el valor medido en el eje) que se “incrementa artificialmente” por la realimentación de fuerza en el lazo externo con la finalidad de modificar la impedancia aparente del sistema completo. Los experimentos mostrados se ha seleccionado por ser muy ilustrativos de las dificultades, posibilidades e inconvenientes del método propuesto. Se han realizado numerosos experimentos adicionales,

Tabla 5.13: *Parámetros del controlador de impedancia en una articulación de rotación con $F_{di} > 0$.*

Parámetros	Pata 1
K_i	50000 N/m
f_i	0.1 Hz
ζ_i	0.9
F_{di}	118.42 N
q_{di}	0°
R	5000
Q	2

además de los presentados, con diferentes sintonías de los lazos interno y de impedancia.

Una vez evaluado el control de impedancia en una pata aislada, y dado que para la transferencia de las patas o para el movimiento del cuerpo las articulaciones se desplazan a una velocidad determinada por el control de movimientos del robot, es necesario encontrar una estrategia de control que se adapte a estas condiciones. Esto se muestra en el siguiente apartado.

5.4.2. Control de fuerza/posición en una articulación de rotación.

La estrategia de adaptación por medio de un controlador en paralelo fuerza/posición (ver sección 5.2.2) se ha incorporado de la misma forma que el de impedancia en una de las articulaciones de rotación del robot. Con este controlador se busca realizar cambios en la velocidad de consigna en los movimientos del robot cuando se detectan fuerzas externas. De esta forma se pretende determinar la velocidad que se debe generar realmente cuando el robot, durante una transferencia, encuentra fuerzas de interacción inesperadas y se desea obtener un comportamiento reactivo.

En este caso, para la sintonía del controlador se deben seleccionar tres grupos de variables. Para el primer grupo se seleccionan las constantes que evalúan la consigna de velocidad \dot{q}_{ei} . A continuación se seleccionan las constantes que buscan un comportamiento elástico de la fuerza por medio

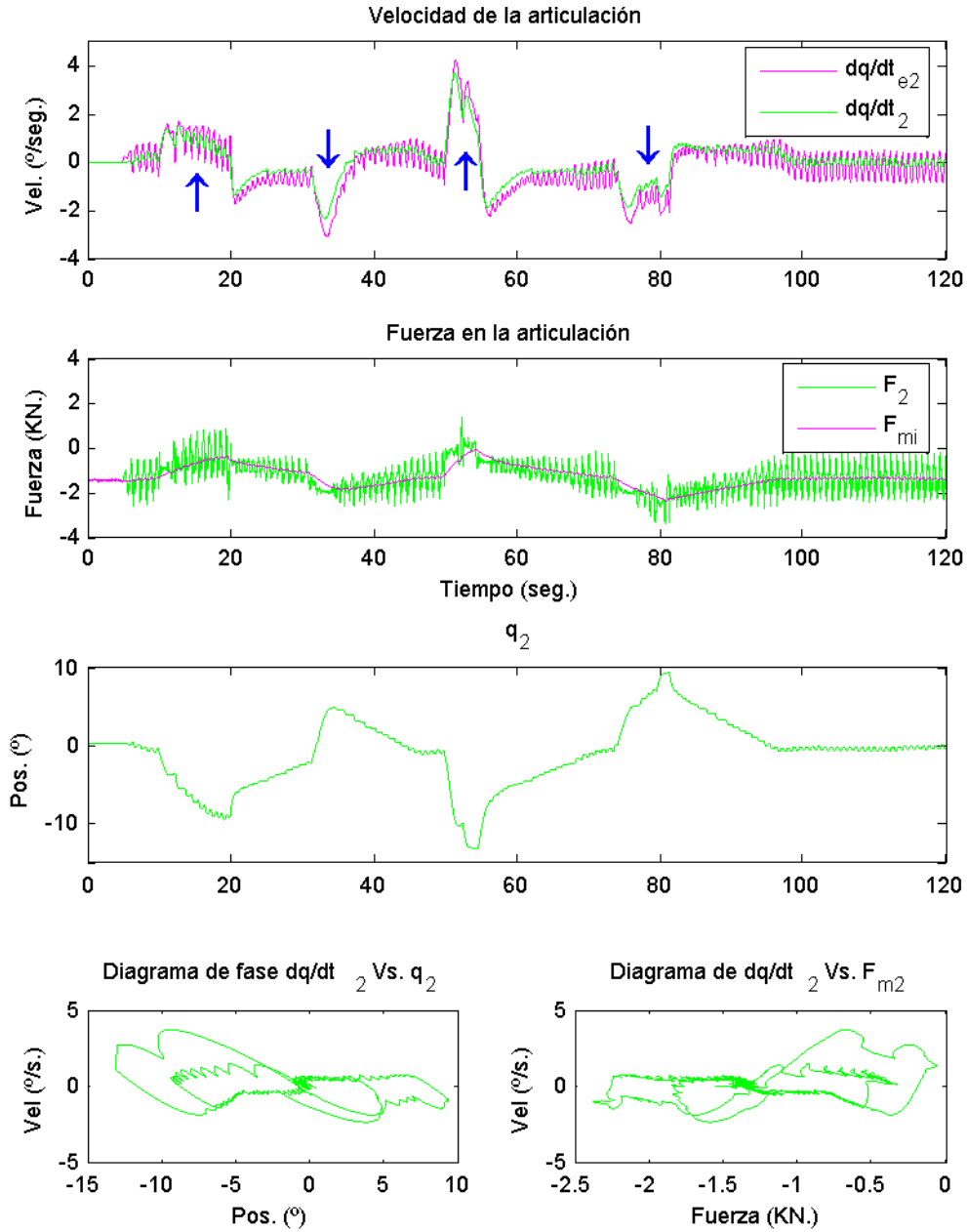


Figura 5.38: Control de fuerza/posición en una articulación de rotación.

de la impedancia Z y, por último, las constantes del filtro de Kalman.

El error de fuerza es convertido a consignas de velocidad a través de la impedancia deseada y un parámetro de sintonía K_f , mientras que el error de posición del lazo externo se ajusta experimentalmente con la finalidad de que interactúe adecuadamente con las fuerzas medidas. Como resultado se obtiene que la articulación actúa como un sistema masa-resorte-amortiguador creando una consigna de velocidad con la que genera correctamente un movimiento alrededor de la posición q_{di} y de la fuerza deseada F_{di} .

En la gráfica de la velocidad del robot (ver Figura 5.38) de uno de los experimentos realizados, la articulación ha reaccionado a múltiples exposiciones de cargas externas teniendo que realizar cambios en su velocidad para tratar de mantener la posición $q_2 = 0$, de acuerdo con los parámetros establecidos por el controlador (ver Tabla 5.14).

5.4.3. Control de fuerza/posición en el cuerpo del robot

Por último, se ha diseñado una estrategia para obtener un regulador de fuerza/posición en paralelo con la que se pueda controlar el contacto de un obstáculo con el cuerpo del robot. Generalmente, durante los modos de locomoción el cuerpo se desplaza longitudinalmente, regulado por el controlador de movimientos del robot con una consigna de velocidad, mientras se generan las trayectorias de las patas para que, coordinadamente, se genere una trayectoria en línea recta del cuerpo. Dado que el controlador de fuerza/posición tiene las características necesarias para ser usado de forma que se pueda controlar la fuerza durante el movimiento del cuerpo, se ha diseñado un experimento para lograr determinar si es posible la reacción controlada ante obstáculos por medio de la medida de fuerza de las articulaciones de rotación.

El experimento consiste en apoyar el robot sobre sus patas en una posición en la que sea posible trasladar el cuerpo longitudinalmente a lo largo del eje y (el eje de avance). Al igual que en el apartado anterior, el lazo de control de fuerza emplea la fuerza de presión diferencial de la articulación de rotación de la pata 2 de Roboclimber.

El lazo de control con respecto a la posición se evalúa a partir de la posición del robot, y se han tenido que determinar experimentalmente las

constantes que modifican las señales de fuerza y de posición para que se genere una velocidad de consigna de acuerdo con las capacidades del robot (ver Tabla 5.14). Así, en lugar de usar la consigna de velocidad para mover solamente la articulación de rotación, esta consigna alimenta el controlador de movimientos del robot para mover en velocidad el cuerpo del robot.

Tabla 5.14: *Parámetros del controlador en paralelo fuerza/posición para el control del cuerpo.*

Parámetros	Cuerpo
K_s	0.01
K_f	0.0015
F_d	-0.397 KN
q_d	0 m
K_i	10000 N/m
f_i	1 Hz
ζ_i	1
R	15000
Q	2

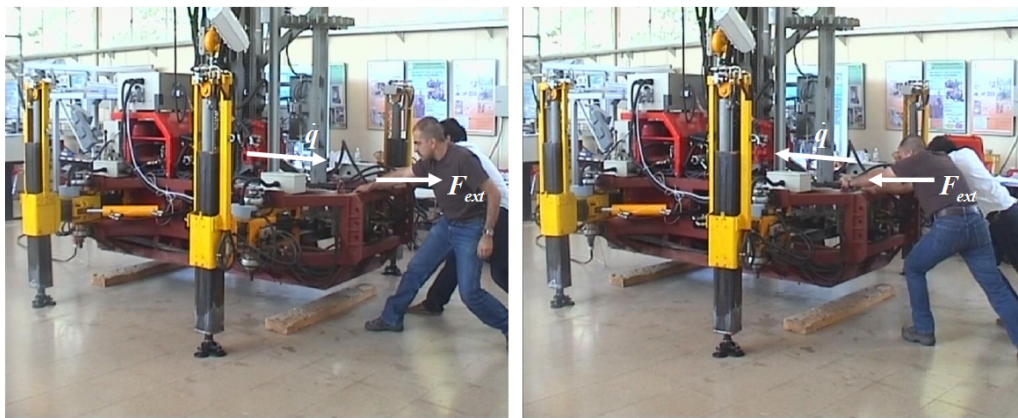


Figura 5.39: *Experimento de control fuerza/posición sobre el cuerpo del robot.*

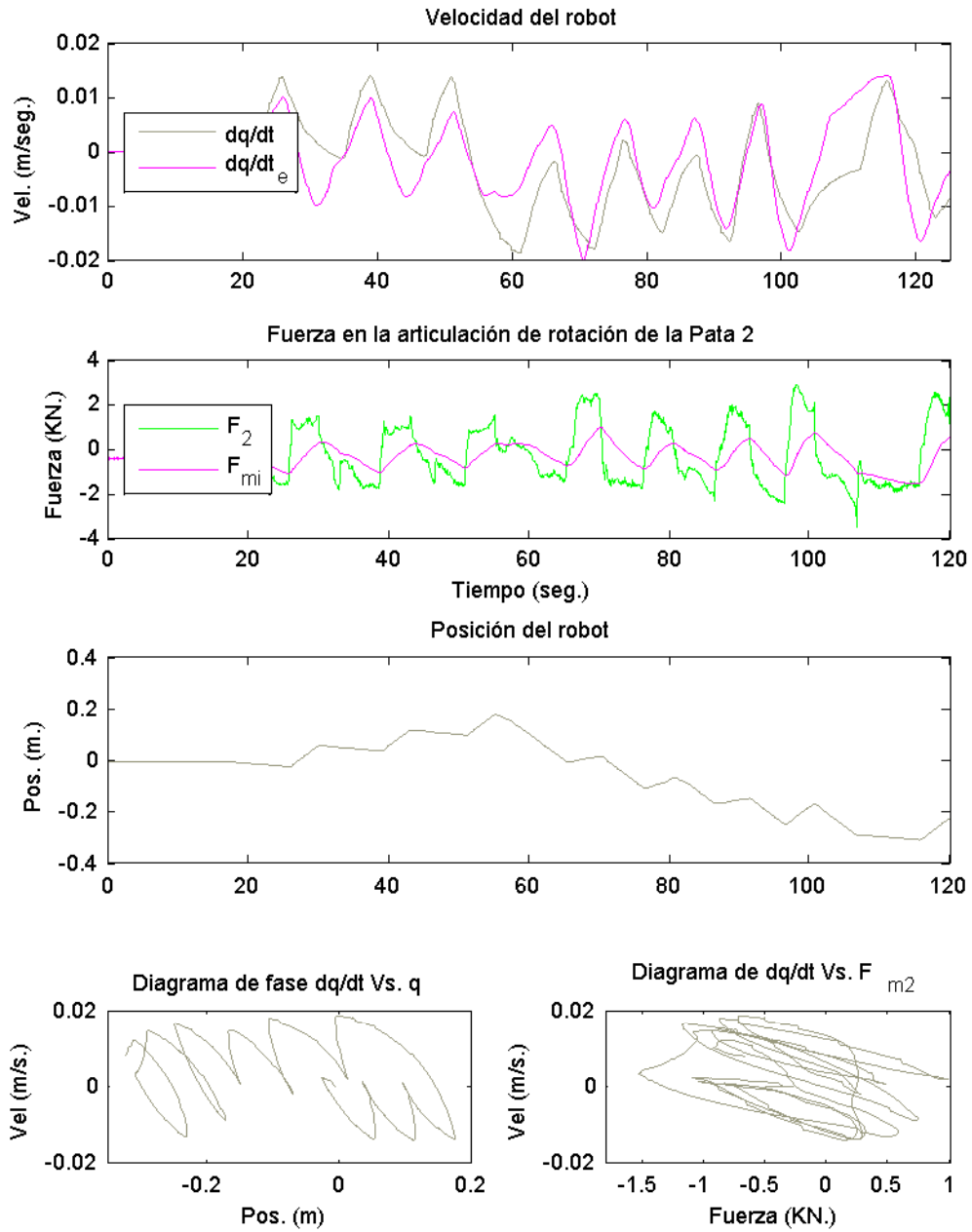


Figura 5.40: Control de fuerza/posición en el cuerpo del robot.

Para emular la reacción ante un obstáculo, al igual que en el caso anterior, se generan cargas externas longitudinales sobre el cuerpo del robot (ver Figura 5.39). Así, si se logra afectar la fuerza en la articulación de rotación de la pata 2, el cuerpo debería responder cambiando su posición.

Este experimento, cuyos resultados se muestran en la Figura 5.40, es sólo una muestra de lo que debería ser el sistema de detección completo. Para determinar de forma completa las cargas externas con mayor veracidad sería necesario deducir cinemáticamente las fuerzas que se aplican sobre los ejes de todas las articulaciones de rotación en la dirección del eje y , y así regular el controlador con respecto a la fuerza total y a la posición del cuerpo.

Es posible implementar estas estrategias de control en los modos de locomoción, tanto en el movimiento del cuerpo como en la transferencia de las patas, moviendo las articulaciones hacia una posición deseada comparada con una fuerza deseada evaluada anteriormente. Esto significa que es necesario analizar cual puede ser la fuerza máxima que cada articulación debe soportar durante los modos de locomoción para después poder determinar las fuerzas deseadas en cada fase. Esta materia no se tratará en esta memoria, y se deja para investigaciones futuras.

Capítulo 6

Principales aportaciones, conclusiones y líneas de investigación futuras

En este último apartado de la memoria se presentan, en primer lugar, las principales aportaciones de la Tesis, agrupadas en torno a los objetivos planteados en el Capítulo 1. A continuación se recogen las conclusiones más relevantes de la misma y, por último, se plantean las líneas de investigación futuras que darían continuidad a este trabajo.

6.1. Principales aportaciones

Las principales aportaciones de esta Tesis se presentan a continuación desglosadas en los siguientes cuatro apartados:

Diseño mecánico, sistema servo-hidráulico y arquitectura de control

- Se ha determinado una configuración mecánica innovadora y robusta para robots de servicios autónomos que se desplacen por terreno natural y que combinen capacidades de locomoción y de escalado. Se han diseñado pies para distintos tipos de terreno incluyendo sensores para la detección del suelo. Se ha realizado una plataforma, denominada Roboclimber, empleada a lo largo de la investigación para la evaluación experimental de estrategias de control reactivo.

- Se ha diseñado, analizado y modelado un sistema de accionamiento servohidráulico para robots de servicios en el que el mecanismo principal de propulsión de las articulaciones es el cilindro hidráulico. Se han diseñado unas articulaciones con topes mecánicos propios que evitan posibles daños en la estructura mecánica ante un eventual fallo en el sistema de control.
- Se ha diseñado e implementado una arquitectura de control modular organizada siguiendo una estructura de control jerárquico. Se destaca el diseño del Generador de Movimientos como planta o modelo del sistema de control con el que se pueda operar el robot por medio de interfases externas o controlar su reacción acomodaticia ante situaciones no previstas.
- Se ha diseñado y realizado un módulo de Control Básico que interacciona directamente con el hardware de control de bajo nivel y que incluye 20 reguladores PID digitales dedicados a controlar cada articulación hidráulica en velocidad y/o en posición. De esta forma se disminuye la carga computacional que se reserva para los cálculos de movimientos más complejos.
- Para que el robot pueda ser operado de forma remota se ha creado un protocolo de comandos que mediante una interfaz, o empleando el módulo de Tareas Compuestas, se pueda comunicar con el Generador de Movimientos para poder realizar tareas de alto nivel, mientras que se genera información sobre el estado del robot en tiempo real.

Percepción de las fuerzas de reacción

- Dado que el objetivo es caminar sobre terreno natural, se ha analizado en profundidad el problema de la percepción de las fuerzas de reacción con la finalidad de controlar la interacción robot-entorno o de modificar la impedancia aparente del robot, para lo que se han propuesto métodos de medida directa e indirecta.
- Se ha propuesto un nuevo algoritmo para la corrección del error de posición en la detección del suelo con sensores de contacto.

- Para la medida directa de las fuerzas de reacción se han analizado dos alternativas: galgas extensiométricas para medir la deformación de elementos estructurales, y medida de la presión hidráulica en los actuadores. Dado que la medida con galgas presenta problemas en su implementación, se ha optado por la segunda aproximación como solución más robusta, fiable y fácil de implementar.
- Para compensar los efectos de fricción no lineales presentes en los sistema servo-hidráulicos se ha analizado dicho problema y se ha obtenido un modelo para la medida de las fuerzas externas que incluye un modelo completo de fricción de Stribeck, cuyos parámetros han sido identificados experimentalmente con excelentes resultados.
- Se ha estudiado el uso de filtros digitales para mejorar la calidad de las señales de fuerza y en particular se ha empleado un filtro de Kalman discreto modificado para el procesamiento de datos con la incorporación de un umbral máximo de novedad para la corrección de la predicción.
- Se ha propuesto el empleo de sensores de ultrasonidos como sensores de medida indirecta de fuerza.

Modos de locomoción

- Se han analizado e implementado diversos modos de locomoción, evaluando su eficiencia en función de la estabilidad.
- Se han analizado e implementado diversos modos de escalado, proponiéndose por primera vez en esta Tesis un modo de escalar discontinuo de una fase. Con este modo de escalado se garantiza la estabilidad y se incrementa la velocidad de escalado sobre pendientes de más de 35° de inclinación.

Diseño y evaluación experimental de estrategias de control reactivo para locomoción sobre terreno natural

- Se ha evaluado la posibilidad de implementar distintos métodos de control reactivo con los que se puedan generar modos de locomoción

sobre cualquier superficie rígida, suave, irregular, con o sin obstáculos, de forma eficiente y estable, midiendo las condiciones externas con diferentes tipos de sensores. De esta forma se han podido establecer mecanismos de control en el que se utiliza el Generador de Movimientos como planta en el sistema de control.

- Se ha propuesto una estrategia global de adaptación activa mediante la medida indirecta del entorno empleando sensores de ultrasonidos habiéndose logrado buenos resultados en tres líneas fundamentales: control acomodaticio de la velocidad vertical del cuerpo del robot, control reactivo simultáneo de la velocidad vertical/horizontal del cuerpo del robot, y control reactivo de la velocidad horizontal del robot en un modo de caminar continuo.
- Se ha propuesto una estrategia de adaptación activa mediante el control de la interacción dinámica del robot con el entorno empleando medida directa de fuerza. Esta estrategia ha sido evaluada experimentalmente mediante: a) controlador de impedancia; b) controlador paralelo fuerza/posición; y c) control de la postura.
- Se ha propuesto una estrategia de adaptación activa de los modos de caminar, para la que se ha realizado un análisis de las fuerzas de reacción en el modo de caminar discontinuo de dos fases y un análisis de las fuerzas de reacción en el modo de caminar continuo. Se han obtenido excelentes resultados con dos estrategias propuestas en esta Tesis: a) control de impedancia en cada pata; b) control de impedancia en la pata contrapuesta a la de transferencia.
- Se ha propuesto una estrategia de adaptación activa en la dirección del movimiento del robot, evaluándose experimentalmente tres alternativas: a) control de impedancia en una articulación de rotación; b) control de fuerza/posición en una articulación de rotación; y c) control de fuerza/posición en el cuerpo del robot.

6.2. Conclusiones

En los últimos años uno de los objetivos de la robótica se ha centrado en hallar soluciones a tareas con grados de complejidad significativos y de alto

riesgo. Tal es el caso de los trabajos que se realizan para la consolidación de laderas de montañas.

A lo largo de esta investigación ha sido posible implementar de forma práctica diversos conceptos que actualmente se utilizan en el diseño y control de robots con patas, llevando a buen término un prototipo denominado Roboclimber, un robot cuadrúpedo de 3500 *Kg* que es capaz de caminar y de escalar sobre terreno natural, y que se ha empleado como plataforma experimental.

Como consecuencia del análisis de los modos de locomoción examinados y de sus limitaciones sobre terreno natural, se ha propuesto que, para una plena operatividad, el robot se pueda adaptar al cambio de condiciones naturales y al cambio de configuraciones de trabajo. Para ello se ha abordado el problema de la interacción robot-entorno y se han propuesto, implementado y evaluado experimentalmente diversas estrategias de control reactivo, que, en última instancia aspiran a modificar la impedancia aparente del robot, lográndose un avance significativo en este tema.

6.3. Líneas de investigación futuras

En base a los resultados obtenidos en la presente investigación, se proponen algunos trabajos futuros que pueden dar continuidad a esta Tesis.

- Se propone implementar un arreglo más amplio de sensores ultrasónicos para generar un mapa del terreno y evaluar la posibilidad del robot para sobrepasar las irregularidades u obstáculos detectados empleando técnicas de control reactivo.
- Se propone analizar los efectos de las fuerzas en los modos de escalar en pendientes superiores a 30° para estudiar la posibilidad de generar métodos de control de fuerza para este proceso.
- Se propone evaluar experimentalmente la combinación de un modo de caminar continuo con control de impedancia en las cuatro patas incluyendo el control de fuerza en la pata contrapuesta para mantener el equilibrio en todas las fases del proceso de locomoción.
- Dadas las características de los trabajos de perforación se debe estudiar la posibilidad de realizar un control de impedancia activa,

sobre las patas de soporte durante la perforación en pendientes. Así se deberían minimizar los efectos que la vibración produce en los sistemas del robot.

- Se propone evaluar la posibilidad de medir la fuerza en todas las articulaciones de rotación para mejorar la sensibilidad de las fuerzas externas ejercidas sobre el cuerpo del robot e implementarlo en los modos de caminar.
- Se propone analizar y evaluar experimentalmente la forma de implementar un modo de caminar dinámicamente estable usando el concepto del apoyo entre conjuntos de patas contrapuestas.
- Se propone realizar la fusión sensorial de la información proporcionada por los sensores de ultrasonidos y por los sensores de presión para conseguir un control combinado de fuerza.

Apéndices

Apéndice A

Características técnicas de Roboclimber

A continuación se resumen las características técnicas del sistema mecánico y del sistema de control de Roboclimber.

Tabla A.1: *Características técnicas de la estructura mecánica básica de Roboclimber.*

Dimensiones	Estructura	Patas	Total
Alto (m.)	0.650	1.150 - 1.850	1.850 (max.)
Ancho (m.)	1.66	0.970 - 1.270	2.760 - 3.360
Largo (m.)	2.925	0.40	2.925
Masa (Kg.)	700	200 (c/u)	1500
Material	Acero		

Tabla A.2: *Características técnicas del sistema de potencia para el modo autónomo.*

Modelo	Honda EMT 10
Potencia (KW)	9.6
Voltaje (Vca)	400
Autonomía (h)	8

Tabla A.3: Características técnicas del sistema de control de locomoción y de perforación.

	Locomoción	Perforación
Unidad de control		
Tarjetas de control CM3	4	-
Tarjetas de control CM4	-	2
Control PID con salida PWM	12	8
Entradas digitales	48	16
Salidas digitales	16	16
Entradas analógicas	16	16
Salidas analógicas	-	8
Lectura de encoder	12	8
CPU	Advantech® PCA-6772	
Sensores		
Encoders	12	1
Inductivos	4	3
Ultrasónicos	4	-
UMI	1	-
Inclinómetros	2	-
Microswitches	-	6
Actuación		
Electrónica de potencia	12	5
Válvulas proporcionales	12	5
Electroválvulas	-	5
Cilindros hidráulicos	12	6
Motores hidráulicos	-	2
Motores eléctricos	-	1
Potencia eléctrica		
Unidad de control (220 Vca)(Watts)	500	
Grupo hidráulico (400 Vca)(Watts)	9000	7500
Capacidad		
Vel. máx. de locomoción (m/seg.)	0.030 (modo continuo)	
Obstáculos (ancho x largo x alto)(m.)	0.30x0.80x0.50	
Profundidad de perforación (m.)	20	
Masa Total (Kg.)	3500	

Apéndice B

Componentes del control básico

B.1. Unidad de control central y sistema operativo

La unidad de control central consta de un PC industrial en una tarjeta (Single Board Computer) basado en un procesador VIA[®] a 670MHz. Se encarga de planificar y controlar los movimientos del robot, así como de coordinar la actuación del resto de los sistemas electrónicos. La arquitectura de control debe ocuparse de toda la información generada por el sistema y procesarla en tiempo real. Por esta razón se ha optado por usar el sistema operativo QNX[®] 6.3 (QNX Software Systems Ltd. 2006), un sistema operativo basado en Unix y de procesamiento en tiempo real. Se utiliza para leer y procesar la información de todos los sensores manteniendo la capacidad y la precisión para controlar los actuadores simultáneamente, con un software de control desarrollado en lenguaje C/C++. El control de los movimientos que producen la locomoción incluye como mínimo la planificación del modo de caminar, la coordinación de los movimientos compuestos, la generación de trayectorias simples y la realización de cálculos cinemáticos. Para lograr el control de posición y velocidad de los actuadores, la unidad central interacciona con las tarjetas de control local a las que envía los comandos necesarios. Por otra parte, el ordenador se ocupa de la obtención y filtrado de los datos leídos desde los sensores.

El ordenador dispone de 128MB de memoria RAM, tarjeta de red ethernet y un disco duro con el sistema operativo, el programa así como las herramientas de desarrollo necesarias para recompilar el programa de control directamente en el robot. El ordenador se ocupa también de proporcionar una interfaz de usuario para manejo del robot tanto localmente como a través de una red TCP/IP. Esto permite teleoperar el robot desde un lugar remoto.

El control de una máquina compleja, como un robot caminante, tiene ciertas características que hacen recomendable el uso de sistemas operativos en tiempo real. Tiempo real es la capacidad de un sistema para ejecutarse de manera síncrona a una serie de eventos externos al mismo. En un robot caminante estos eventos externos pueden ser los errores de seguimiento de trayectorias, los cambios producidos en las magnitudes sensoriales o las órdenes emitidas por el usuario. Además es necesario un sistema operativo capaz de manejar muchos eventos, actuar de acuerdo con restricciones de tiempo fijas y atender rápidamente a las interrupciones, siendo recomendable que este sistema operativo esté optimizado para aprovechar al máximo las posibilidades de las máquinas pequeñas, tales como lo ordenadores industriales.

Por otra parte, la generación de trayectorias para el control del movimiento de las patas exige el uso de una base de tiempo muy corta para producir movimientos suaves y precisos. Este control de las articulaciones a bajo nivel debe compaginarse con otras tareas como la generación de modos de caminar, la adquisición de datos del entorno, la comunicación con el usuario, etc., por lo que es necesario la capacidad multitarea. Unido a estas características, hay que tener en cuenta que ciertas aplicaciones comunes en los robots móviles tales como las de teleoperación y la telepresencia exigen una buena comunicación por red o línea serie. Esto hará posible la creación de sistemas distribuidos, lo que puede ayudar también a descargar de trabajo el ordenador de a bordo.

Una de las características más destacables de este sistema operativo es que cualquier proceso en una máquina puede hacer uso directamente de cualquier recurso compartido de manera que, desde el punto de vista de la aplicación, no hay diferencia alguna entre los recursos locales o remotos, y no es necesario especificar opciones especiales para acceder a los recursos remotos. Esto simplifica la creación de sistemas distribuidos en varios ordenadores conectados por línea serie o por red, tales como el formado

por un ordenador a bordo y una estación remota capaz de manejar de manera transparente todos los recursos del ordenador del robot. El sistema distribuido así creado se puede ampliar en cualquier momento sin alterar el funcionamiento del sistema operativo, introduciendo nuevas arquitecturas de red tales como redes de área local o Internet.

B.2. Tarjetas de control locales

En el robot hay seis tarjetas de control local desarrolladas por el Departamento de Control Automático del IAI-CSIC, que utilizan microcontroladores LM629 dedicados al control de articulaciones en lazo cerrado con realimentación de posición. Cuatro de ellas (CM3) tienen tres microcontroladores cada una y el resto (las CM4), tienen cuatro microcontroladores cada una. En el robot hay por lo tanto 20 microcontroladores LM629 trabajando en paralelo para el sistema de posicionamiento, más 8 microcontroladores adicionales para las tareas de control de los actuadores dedicados a las tareas de perforación.

Estos microcontroladores cuentan con un generador de perfiles de posición y velocidad, un regulador PID digital programable y un decodificador de señales en cuadratura de codificadores ópticos incrementales para la realimentación de la posición. La señal de control a la salida del microcontrolador es un tren de pulsos modulados en anchura (PWM, del inglés “Pulse Width Modulation”). Para iniciar el movimiento, el procesador central carga los valores de aceleración, velocidad y posición deseados en el generador de trayectorias del LM629. En cada período de muestreo estos valores son usados para calcular la nueva posición deseada, a la que se le resta la posición real del eje, obtenida por el codificador óptico incremental y el decodificador de posición. Así se origina la señal de error, que es la entrada al filtro compensador.

En las tarjetas CM3 y CM4 también se han incorporado buses tanto de entradas como de salidas digitales que son especialmente útiles para las tareas de control de perforación en las que se utilizan válvulas hidráulicas direccionales. En la tarjeta de CM4 (ver Figura B.1), y como una ampliación de su antecesora, se incluye además un módulo de adquisición de datos analógicos con una resolución de 12 bits para la lectura de señales, evitando así el uso de tarjetas de adquisición de datos adicionales. Esta señal

incrementales para la realimentación del controlador. Por este motivo ha sido preferible utilizar encoders externos para la medición directa de la posición de la articulación.

En Roboclimber, se usan dos tipos de encoders para la medición de la posición de las articulaciones de las patas.

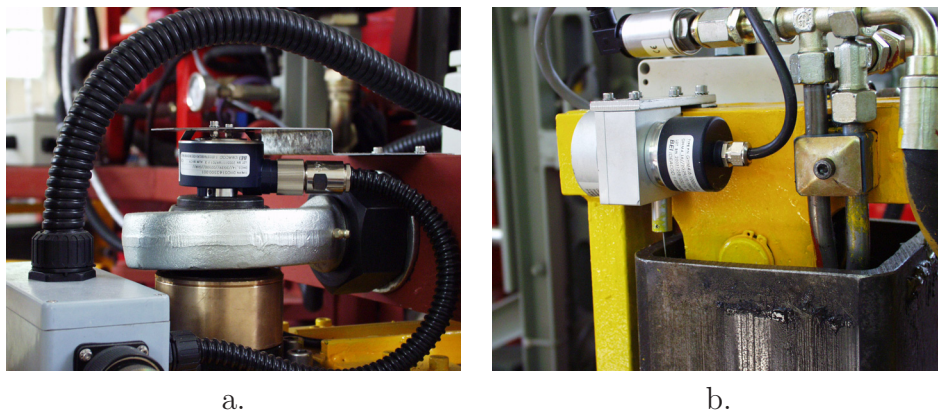


Figura B.2: Instalación de encoders en Roboclimber. (a) Articulación de rotación (BEI Ideacod DH05) y (b) Articulación prismática BEI Ideacod CD050.

En las articulaciones de rotación (ver Figura B.2a) se instalaron encoders con una resolución de 2500 *ppr* (pulsos por revolución) adaptándolos directamente al eje de cada una de dichas articulaciones para medir el ángulo de la pata, evitando medir la extensión del cilindro actuador, disminuyendo con ello la carga de operaciones en el ordenador del robot y facilitando así la solución de las ecuaciones cinemáticas.

Para las articulaciones prismáticas también se instalaron encoders pero lineales (ver Figura B.2b). Estos sensores tienen la característica de medir posiciones de actuadores lineales que, a diferencia de los de rotación y mediante un cable de acero, al cambiar la extensión del actuador se mueve el mecanismo interno del encoder generando señales del mismo tipo. El cable está sujeto a los tubos de acero internos de las articulaciones prismáticas de las patas midiendo directamente su posición con una resolución de 0.1 *mm*. Para evitar el ruido generado por el ambiente y por los distintos componentes del robot, y para asegurar una lectura correcta de los microcontroladores, se utilizan encoders con señales diferenciales;

estas señales se convierten posteriormente en dos señales unipolares que proporcionan la información para el cálculo de la posición y de la dirección generados en el microcontrolador.

B.4. Amplificación de potencia

Para cerrar completamente el lazo en el sistema de control hay un servoamplificador de potencia para cada actuador, tanto del sistema de posicionamiento como para los elementos de perforación.

Su función es la de adaptar la señal de control para la activación de las válvulas proporcionales del robot, para lo cual reciben las señales analógicas demoduladas (por medio de una tarjeta demoduladora desarrollada previamente en el IAI-CSIC) de ± 10 voltios a partir de la señal PWM suministrada por las tarjetas de control.

La electrónica de potencia transforma de nuevo la señal analógica en una señal PWM amplificada y sintonizada para las válvulas proporcionales. Además, los servoamplificadores incluyen un lazo de control con realimentación de corriente para suavizar (evitar picos) en la señal deseada para alimentar el solenoide de acuerdo con la consigna de entrada.

Apéndice C

Sistema de comunicación remota

C.1. Arquitectura cliente-servidor

Para la conexión entre los ordenadores del HMI (*Human Machine Interface*) y del sistema de control a bordo es necesaria la capacidad de comunicación mediante una red. Esta también es necesaria, en general, si se utiliza una arquitectura multiprocesador que divide el trabajo entre varios ordenadores, como por ejemplo, el envío de imágenes por medio de un ordenador, el control por medio de otro u otros ordenadores, etc. Así el operador se comunicará con el sistema de control del ordenador a bordo mediante paquetes TCP/IP desde los ordenadores conectados por una red Ethernet. La principal ventaja con la que cuenta este sistema de comunicación es que debido a su protocolo puede lograrse una conectividad efectiva entre diferentes sistemas operativos. Como ya se ha explicado en apartados anteriores el sistema operativo del robot es QNX[®] 6.3 y el sistema de desarrollo del HMI ha sido el sistema operativo WindowsXP[®].

Para determinar una jerarquía entre los distintos dispositivos también se deben definir los roles de cliente o servidor del sistema dependiendo de su función. Debido a que el sistema a bordo está diseñado para recibir las conexiones TCP/IP de uno o de varios dispositivos, es preferible que sea definido como el servidor mientras que los ordenadores que se conecten a él tendrán el estatus de cliente.

Así el ordenador a bordo siempre estará dispuesto a recibir conexiones externas siempre y cuando cumplan con el protocolo de comunicación determinado para su control. Este procedimiento tiene varias ventajas como, por ejemplo, en el caso en que se produzca una desconexión entre el sistema de control del robot y el ordenador del usuario, no es el robot el que debe volverse a conectar desde una posición remota sino que es posible volverse a conectar desde el ordenador cliente, y si este tiene algún tipo de problema, será posible conectarse desde un ordenador distinto con capacidad de conexión Wi-Fi.

Dentro del conjunto de tareas compuestas se ha aplicado un sistema de seguridad en el que, si se detecta una desconexión entre el usuario y el controlador a bordo, el robot se detendrá automáticamente. Para lograrlo, el sistema remoto debe estar enviando un comando de "señal activa" permanentemente durante la transmisión. Si en un determinado instante el sistema de control del robot no recibe ninguna señal, el robot tomará las medidas necesarias para su seguridad. Como esta señal, existen unos comandos diseñados para el control a distancia del robot; a continuación se describirá el protocolo de comandos que se utilizan para la comunicación del robot.

C.2. Protocolo de comandos

Una vez seleccionada la configuración TCP/IP para la comunicación, se ha desarrollado un protocolo que se compone de distintos comandos de control interpretados por cada uno de los componentes, es decir por el sistema de control a bordo y el UCR; están diseñados para simplificar las operaciones del control a distancia, transmitir la información generada por el robot en tiempo real al UCR, y lograr ejecutar comandos de alto y de bajo nivel en la jerarquía de control, manteniendo un nivel seguridad alto en cada una de las operaciones.

De acuerdo con los requisitos del sistema, es necesario que el operario tenga la información de los valores de operación del robot tanto en el proceso de posicionamiento como en el proceso de perforación, para poder tomar decisiones con respecto a las tareas a realizar. Durante el proceso de posicionamiento, para el operario es necesario tener la información de la posición global de la máquina con respecto al punto de partida, la lectura de

los diferentes sensores como los de detección del suelo o los inclinómetros, o información adicional como el estatus de la máquina. Para el proceso de perforación existen variables que el operario debe analizar para asegurar que el proceso se está llevando a cabo correctamente, tales como la presión, la velocidad y la longitud de la perforación o la presión y la velocidad de rotación del martillo.

Por lo tanto el sistema de comunicación entre el UCR y el sistema de control del robot a través de su módulo de tareas compuestas está desarrollado para que se mantenga una comunicación en tiempo real, para que desde el robot se envíe la información de su estatus y además esté dispuesto a recibir los comandos enviados por el operario según sea el proceso. La comunicación se realiza por las dos vías de Cliente a Servidor y viceversa con distintas características en cada situación como se explicará a continuación.

C.2.1. Comunicación de Cliente a Servidor

La función del ordenador remoto es la de enviar los comandos requeridos por el operador; por esta razón la comunicación entre un ordenador externo y el sistema de control del robot se limita al envío directo de comandos determinados en un formato definido, como por ejemplo:

REQ 216 11 1 1

Cuando el Cliente envía un comando con el inicio de palabra *REQ* significa que se requiere realizar alguna acción o pedir información del estado del robot; a este le debe seguir un número consecutivo, es decir un indicativo para saber cual fue el último comando enviado por el Cliente; después del consecutivo el comando debe incluir un número de proceso; en este caso el 11 significa mover el cuerpo, seguido de la dirección que en este caso es 1 y que significa adelante, y por último el tipo de paso que es 1, que quiere decir un paso normal. El Servidor debe interpretar estos comandos y enviar una señal de aceptación.

Como este, existen un conjunto de comandos que se han definido apropiadamente para poder controlar el robot con la mayor simplicidad y fiabilidad posible desde un sistema de control remoto como el UCR (ver Tabla C.1).

Tabla C.1: Comandos de control del Cliente al Servidor.

Módulo	Funciones
Control de posicionamiento	<ul style="list-style-type: none"> • Inicialización de movimientos para el posicionamiento • Inicialización de movimientos para la perforación • Movimiento del robot en X o Y • Movimiento del robot en Z • Movimiento de articulaciones • Movimiento de los Tirfor • Lectura de la posición del robot • Lectura de las posiciones de las articulaciones • Lectura de los sensores • Lectura del contacto con el suelo
Control de perforación	<ul style="list-style-type: none"> • Presión de la penetración • Activación del aire a presión • Iniciar proceso de perforación • Detener proceso de perforación • Adición de extensión • Extracción de extensión • Rotación de la cabeza de perforación • Presión de la cabeza de perforación • Control de componentes independientes • Lectura de sensores
Estatus general	<ul style="list-style-type: none"> • Parada de emergencia • Parada de movimientos • Inicio del robot • Modo de posicionamiento o perforación • Inicialización del robot

El sistema de control del robot está preparado para que cuando se ponga en marcha el movimiento completo del robot, el sistema decide si realiza modos de locomoción para escalar o para caminar según la inclinación del robot medida por los inclinómetros instalados a bordo. Si la inclinación es inferior a 45° el robot caminará, de lo contrario realizará los modos de

locomoción determinados para poder escalar (ver Capítulo 4).

Para asegurar que la comunicación entre el el Cliente y el Servidor está activa, si es necesario enviar alguna petición de tipo *REQ*, el UCR enviará una señal de *SIG* con un periodo de $2 Hz$. Si en el robot no se recibe ninguna comunicación en un tiempo superior al establecido, y por motivos de seguridad, se suspenderán todas las acciones hasta nueva orden.

C.2.2. Comunicación de Servidor a Cliente

El problema de la comunicación entre el robot y el UCR se complica aún más si se tiene en cuenta que para que el sistema de control remoto tenga la información actualizada para poder representarla en el HMI, el robot debe estar enviando constantemente una señal con la información específica de cada situación, ya sea durante el desarrollo de los trabajos de perforación o si está en el proceso posicionamiento.

Por esta razón se ha diseñado un protocolo de comandos para que el envío de información pueda hacer frente a las necesidades del sistema. Durante las operaciones existen tres tipos de estados en los que se pueden dividir la situación del sistema. El primer estado es el de encendido sin realizar operaciones (standby), la segunda es el del proceso de perforación y el tercero es el del proceso de posicionamiento.

El robot debe estar enviando una señal permanentemente con una frecuencia de $1 Hz$, con la información específica de cada estado. Si se recibe algún comando por parte del cliente, en la información enviada por el Servidor debe estar incluida la aceptación de ese comando, con su correspondiente consecutivo y con la información solicitada por el Cliente. Para comenzar, el robot debe enviar como mínimo unos datos básicos sobre su funcionamiento en cualquier estado con la señal *STA* (de estatus) como se muestra en el siguiente ejemplo:

STA 00 00 00

En este mensaje, el primer valor después de la señal *STA*, muestra el estatus de la máquina indicando que no hay problemas en la ejecución del proceso actual; por ejemplo, en el caso en que se hallan generado errores durante la ejecución del proceso de caminar el valor sería 06. El segundo parámetro, el 00, indica en el estatus en el que se encuentra el sistema de

Tabla C.2: Comandos de control del Servidor al Cliente.

Comando	Parámetros
STA (Estatus)	<ul style="list-style-type: none"> • Estatus • Modo de ejecución • Ejecución
TEL (Telemetría de perforación)	<ul style="list-style-type: none"> • Profundidad de penetración • Velocidad de rotación • Velocidad de penetración • Penetración de la extensión • Presión de penetración • Presión de rotación
TEL (Telemetría del Robot)	<ul style="list-style-type: none"> • Posición en X • Posición en Y
ERR (Errores)	<ul style="list-style-type: none"> • Obstrucciones en los elementos de perforación • Límites cinemáticos superados • No hay detección del suelo
EPO (Posiciones de elementos de perforación)	<ul style="list-style-type: none"> • Posición de la garra • Posición del brazo • Posición de la mordaza superior • Posición de la mordaza inferior • Posición del almacenaje • Posición de la cabeza del taladro
SPE (Información especial)	<ul style="list-style-type: none"> • Contacto con el suelo • Posición de las articulaciones • Lectura de los inclinómetros • Medida de los sensores adicionales

control, que en este caso sería en el de posicionamiento, y el tercero, el 00, que indica que la máquina está detenida y no está ejecutando ningún comando, pero en caso contrario enviaría un valor de 01.

Al mensaje se integrarán diferentes conjuntos de datos dependiendo del

modo y de la aplicación que se esté ejecutando (ver Tabla C.2). En el caso de que se estén realizando tareas de posicionamiento, en el mensaje se enviarán la coordenadas globales en X y en Y en las que se encuentra el robot con respecto al punto de partida después de un comando llamado *TEL* (telemetría). En el caso de que se estén realizando trabajos de perforación la telemetría cambiaría y se enviaría la información de los sensores que miden las presiones de rotación y de penetración seguida de los datos profundidad de la perforación, etc.

A este mensaje también se le puede anexar la información adicional necesaria cuando existe un problema de ejecución en el robot, la posición de cualquier articulación o de las posiciones de los elementos del sistema de perforación, o la medida de cualquiera de los sensores a bordo después de un comando de *ERR*. Dependiendo del grado del problema el robot deberá detener la ejecución de los procesos que se están llevando a cabo.

Por último, y en el caso en el que se haya recibido una petición desde el ordenador remoto, en el siguiente mensaje debe estar incluido el valor del consecutivo, después de una señal de *ACK* (recibido).

C.2.3. Unidad de Control Remota (UCR)

Para el usuario final solo deberían estar disponibles los comandos de más alto nivel, pero los diferentes niveles de control tienen que estar accesibles para que el operador del sistema remoto pueda realizar distintos tipos de acciones a bajo nivel en las distintas etapas de desarrollo del robot, especialmente en las tareas de locomoción en donde es posible encontrarse con obstáculos y situaciones que no se hayan previsto en la etapa del diseño. Por esta razón un sistema con múltiples tipos de usuarios ha tenido que ser diseñado y desarrollado para que el operador pueda controlar el robot desde el nivel de jerarquía más alto, hasta los niveles de programación propios del sistema del robot.

Para el proyecto Roboclimber se ha diseñado la UCR (ver Figura C.1) (Pezzuto et al. 2006) que está fabricado a partir de un maletín que contiene un conjunto de mandos (d) con un ordenador en el que se procesa y se muestra toda la información generada durante la operación del sistema. Este sistema ha sido construido teniendo en cuenta las condiciones ambientales externas en las que se va a trabajar.

La forma más fácil para que el operario asimile la información generada



Figura C.1: UCR. (a) Abierto, (b) Cerrado, (c) HMI y (d) Mandos

por el robot es empleando una interfaz gráfica o HMI (ver Figura C.1c) que se muestra en la pantalla del ordenador en la unidad. El HMI está organizado principalmente en dos módulos: el control del sistema de posicionamiento y el control del sistema de perforación. De esta manera solo se envían los comandos apropiados al robot y la información apropiada se muestra en cada una de las funciones, y en particular en áreas en donde se desarrolla un conjunto de eventos. En este caso se han desarrollado dos entornos, para simplificar la información presentada al operador.

El primer entorno es el que agrupa los componentes del sistema de locomoción. Por medio de la interfaz gráfica es posible determinar el estatus del robot de servicios, ofreciendo al usuario una simulación de lo que está ocurriendo realmente. Se definen las posiciones de las patas, los

modos de caminar y un contexto sensorial que, como principal componente, muestra el estado del contacto de las patas con el suelo. Los comandos de alto nivel, como caminar o escalar, son seleccionados por medio del panel de mandos. Para actualizar las posiciones ha sido necesario implementar funciones que se activen en los momentos necesarios para la actualización de, por ejemplo, las posiciones de las articulaciones para exponerlas en la simulación.

El segundo entorno se diseñó para hacer posible el control del sistema de perforación. En este entorno, primero se dan los comandos de más alto nivel como los de añadir o extraer extensiones y, a continuación, para las tareas de perforación se proporciona un sistema de control en el que el usuario puede controlar tanto la presión como la rotación del motor hidráulico para la perforación. Todo esto con ventanas y el entorno visual necesario para la generación de avisos de emergencia o del estatus del proceso.

Tanto para los niveles de usuario más avanzados, como para los desarrolladores del proyecto, se ha habilitado una línea de comandos específicos con los que se pueden enviar funciones de muy bajo nivel al robot como forma alternativa de generar tareas y adquirir información del sistema de control.

Apéndice D

Proceso de perforación

El sistema de perforación debe tener un funcionamiento semi-autónomo, pues es necesario que cuando el operario de la orden de perforar, el sistema de control realice los pasos necesarios para poner en marcha la perforación, mientras el operario recibe la información oportuna, como por ejemplo la profundidad de perforación, y así decidir cuando detener o continuar el proceso.

El sistema se compone de elementos que generan una gran potencia y tienen un gran peso. También hay elementos que se utilizan para realizar tareas muy delicadas y críticas, pues se puede poner en peligro la seguridad del robot si fallan algunas de las secuencias del proceso de adición y sustracción de extensiones, o si falla alguno de los sistemas de seguridad del proceso de perforación en sí.

Solo es posible realizar el proceso de perforación mediante la supervisión de un experto en el área. Se debe tener en cuenta que la única forma de sujeción del robot a la superficie de la montaña es su peso, y que el robot debe permanecer estático en todo el proceso, pues si hay alguna parte del taladro introducida en la montaña y el robot se mueve mínimamente, el taladro se puede bloquear dentro de la superficie de la montaña. Es posible que el robot se mueva por las fuerzas de propulsión que se generen por el martilleo que se produce para pulverizar la roca. Para evitar que esta fuerza de propulsión sea mayor al peso de la máquina es necesario regular la presión del aire comprimido que se utiliza para la actuación del martillo.

A nivel de software, es preciso mantener un control robusto y de elevada fiabilidad. En la parte más delicada del proceso, la adición y extracción de

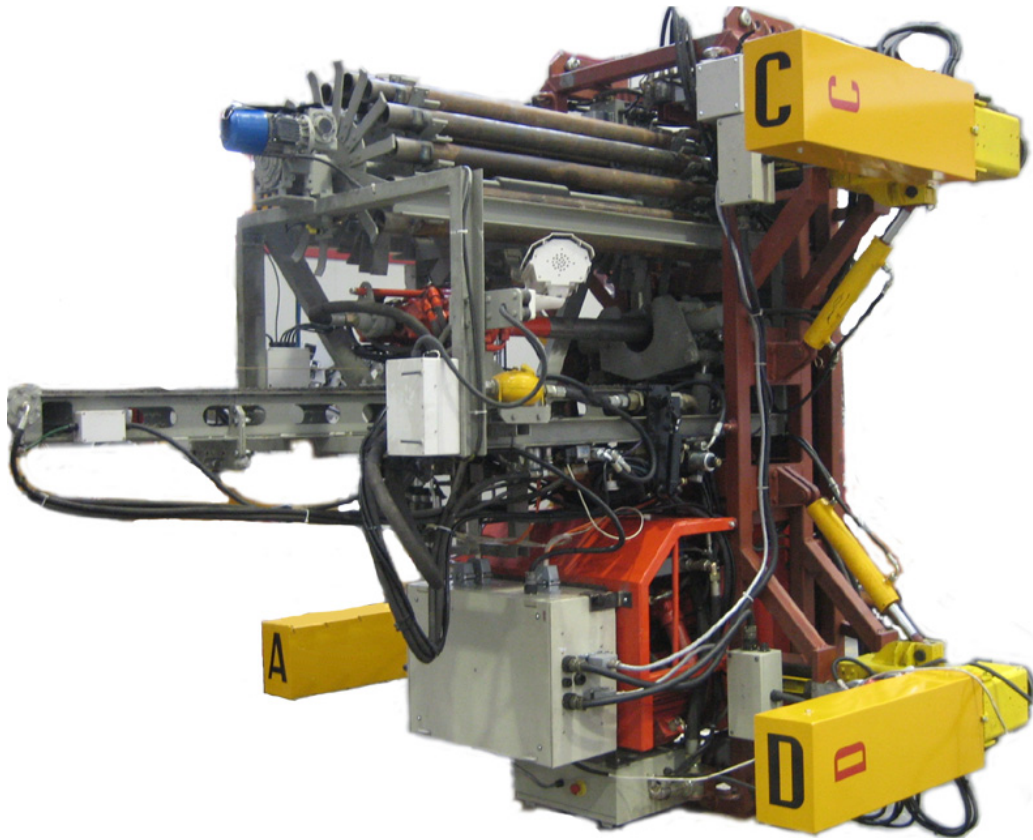


Figura D.1: Sistema completo de perforación de Roboclimber.

extensiones, los procesos lineales programados son de muy alta precisión, solo posibles en parte por el empleo de los diversos sensores que intervienen. Se requieren sensores en puntos estratégicos como el principio y el fin de carrera tanto del cilindro que acciona la mano, como en el del dedo robótico que desplaza las extensiones desde el carrusel hasta el motor hidráulico, y como el del motor hidráulico. Si se emplea un conjunto de sensores de proximidad de tipo *and* y *or* se puede evitar eléctricamente que, por ejemplo, se mueva el motor hidráulico mientras que la mano y el dedo robótico estén extendidos, y evitar que se produzca el daño de algunos elementos de la máquina.

El sistema está integrado básicamente por cuatro componentes: a) el

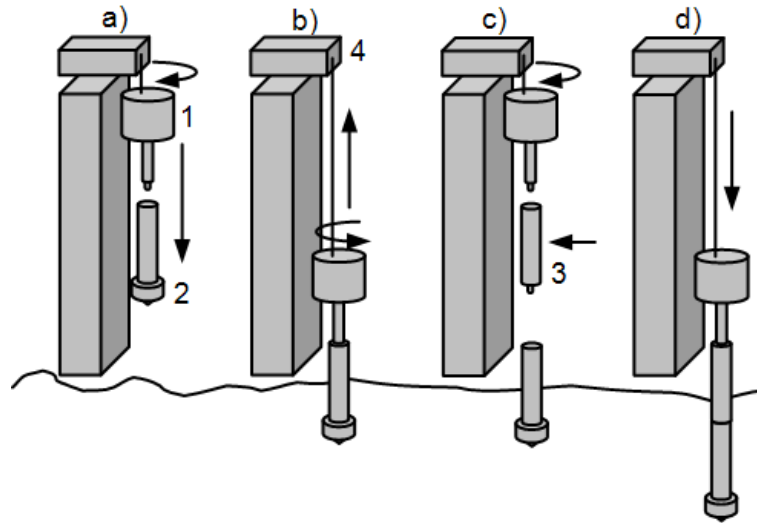


Figura D.2: Tareas básicas de perforación.

motor hidráulico que tiene dos grados de libertad, uno de rotación y otro de traslación; b) un carrusel con un grado de libertad, que rota por medio de un motor eléctrico, y que almacena las quince extensiones de 1.5 m cada una, que se utilizan para extender la capacidad del martillo en el proceso de perforación y llegar a alcanzar hasta 20 m de profundidad; c) una mano robótica de dos grados de libertad para sujetar y trasladar las extensiones desde el carrusel hasta el motor; y, por último, d) dos mordazas para sujetar las extensiones durante los proceso de adición y extracción; de estas mordazas, la superior, tiene también dos grados de libertad pues además de sujetar la extensión también la puede rotar.

Fundamentalmente, el funcionamiento del sistema semi-autónomo consiste en que el motor hidráulico (1) rota y avanza (véase Figura D.2a) introduciendo un martillo de perforación (2) en la superficie de la montaña rocosa (a). Este instrumento, alimentado por aire a presión, se utiliza para destruir la roca sacando y metiendo su punta velozmente. Para lograr mayor profundidad, puesto que este instrumento solo tiene un metro de largo, hay que instalar una extensión (3) entre el motor y el martillo sujetando primero el martillo con la mordaza inferior y desatornillando el motor (b), controlado mediante un lazo cerrado de posición con un encoder (4) para dar paso a la

extensión. El brazo robótico se debe posicionar de tal forma que el carrusel rote y ubique una de las extensiones de tal forma que el dedo la pueda sujetar y transportar (c).



Figura D.3: Roboclimber en proceso de perforación.

Después de ubicar la extensión y unir la extensión entre el motor y el martillo se puede empezar a hacer la perforación (d). La perforación tiene que ser supervisada por el operario, y por lo tanto se deben tener en cuenta algunos aspectos importantes. El martillo funciona al introducir en él aire a presión suministrado por un compresor neumático, presión que es controlada por un regulador neumático controlado por el sistema de control. Al introducir el aire comprimido, la cabeza del martillo entra y sale de tal forma que la roca con la que hace contacto se pulveriza. Primero la

profundidad de perforación debe ser conocida por el operario y se mide por medio del encoder; el grado de velocidad de rotación y de traslación debe ser elegida por el operario en los dos sentidos cada uno. Y, muy importante, mediante un sensor de presión instalado en el circuito hidráulico se puede saber el par aplicado por la rotación del motor.

La información de este sensor debe ser actualizada por el sistema de control para que el operario pueda responder en casos de emergencia, por ejemplo, cuando esta presión sube puede significar que la perforación se está bloqueando, ya sea por la acumulación de escombros o altas presiones de aire dentro del agujero, aumentando la presión de los sistemas hidráulicos, lo cual puede causar graves problemas en el robot. Como esta, otras circunstancias pueden ocurrir durante el proceso, por eso se necesita que el operador controle manualmente las velocidades de perforación ya que un sistema experto, por ejemplo, necesitaría un desarrollo más complejo. Por seguridad, si al perforar el sistema detecta niveles inusualmente altos de presión durante la perforación, el proceso se detendrá automáticamente.

Referencias

- Akihiko, N. y S. Hirose (1994). Walking and running of the quadruped wall-climbing robot. In *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 1005–1012. San Diego.
- Albu-Schäfer, D. y G. Hirzonger (2002). Cartesian impedance control techniques for torque controlled light-weight robots. In *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 657–663. Washington D.C.
- An, C. y J. Hollerbach (1987). Dynamic stability issues in force control of manipulators. In *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*. Raleigh.
- Anderson, R. y M. Spong (1987). Hybrid impedance control of robotic manipulators. In *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*. Raleigh.
- Antonione, P., M. Armada, S. Carosio, P. Comacchio, F. Cepolina, P. G. de Santos, T. Klopff, F. Martin, R. Michelini, R. Molfino, S. Nabulsi, R. Rozzoli, E. Rizzi, L. Zannini, y M. Zoppi (2003). Roboclimber. In *ASER03, 1st International Workshop on Advances in Service Robotics*. Bardolino, Italy.
- Antonione, P., M. Armada, S. Carosio, P. Comacchio, F. Cepolina, P. G. de Santos, T. Klopff, F. Martin, R. Michelini, R. Molfino, S. Nabulsi, R. Rozzoli, E. Rizzi, L. Zannini, y M. Zoppi (2004). Roboclimber: A four-legged climbing robot for rocky slope consolidation and monitoring. In *WAC ISORA04, 10th International Symposium on Robotics and Applications*. Sevilla, Spain.
- Arakawa, T. y T. Fukuda (1997). Natural motion generation of a biped locomotion robot using the hierarchical trajectory generation method.

- consisting of ga, ep layers. In *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, Albuquerque, NM.
- Arikawa, K. y S. Hirose (1996). Development of quadruped walking robot titan viii. In *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Volume 1, pp. 208–214.
- Armada, M. (2000). Climbing and walking: from research to applications. In *Proc. Int. Conf. Climbing and Walking Robots*, Madrid, Spain, pp. 39–48.
- Armada, M., R. Caballero, T. Akinfiev, H. Montes, C. Manzano, L. Pedraza, S. Ros, y P. González de Santos (2002). Design of silo2 humanoid robot. In *IARP Workshop on Humanoid and Friendly Robotics*, Tsukuba, Japan, pp. 37–42.
- Armada, M., R. Caballero, T. Akinfiev, H. Montes, y L. Pedraza (2003). Extending humanoid robot functioning by proficient application of non-linear actuator. In *11th ICAR: International Conference on Advanced Robotics*, Coimbra, Portugal, pp. 1757–1762.
- Armada, M. y P. González de Santos (1997). Climbing, walking and intervention robots. *Industrial Robot: An international Journal*. Vol. 24, No. 2, 158-163.
- Armada, M. y P. González de Santos (2001). Perspectives of climbing and walking robots for the construction industry. In *Proc. Int. Conf. Climbing and Walking Robots*, Karlsruhe, Germany, pp. 929–936.
- Armada, M., P. González de Santos, y M. Jiménez (1998). An introduction to clawar machines developed by the industrial automation institute. *Clawar News*. 158-163.
- Armada, M., P. González de Santos, M. Jiménez, y M. Prieto (2000). From remotely controlled manipulators to tele-operation of advance climbing and walking robots. In *Proc. Int. Conf. Climbing and Walking Robots*, Madrid, Spain, pp. 39–48.
- Armada, M., P. González de Santos, M. Jiménez, y M. Prieto (2003). Applications of clawar machines. *The International Journal of Robotics Research*. Vol. 22, No. 3-4, 251-264.
- Armada, M., P. González de Santos, y M. Prieto (2002). Climbing and walking robots for the petrochemical industry and for underwater

- applications. In *Proc. Int. Conf. Climbing and Walking Robots*, Paris, France, pp. 939–946.
- Armada, M., P. González de Santos, M. Prieto, E. García, T. Akinfiev, R. Fernández, H. Montes, S. Nabulsi, L. Pedraza, R. Ponticelli, J. Sarria, y J. Estremera (2004, May). State of the art in climbing and walking robots. In *Compit04: 3rd International Conference on Computer and IT Applications in te Maritime Industries*, pp. 315–321. Sigüenza, Spain.
- Armada, M., M. Maza, P. González de Santos, J. Fontaine, y V. Papantoniou (1997). Tracminer: Traction enhancement mining equipment accessory. *Industrial Robot: An international Journal*. Vol. 24, No. 5, 370-375.
- Armada, M. y R. Molfino (2002). Improving working conditions and safety for landslide consolidation and monitoring. In *Workshop on the role of CLAWAR in education, training, working conditions and safety*, Madrid, Spain. CD-ROM.
- Armstrong-Helouvry, B. (1991). *Control of Machines with Friction*. Boston: Kluwer Academic Publishers.
- Balaguer, C., V. Padron, A. Giménez, J. Pastor, y M. Abderrahim (1999). Path planning strategy of autonomous climbing robot for inspection applications in construction. In *16th IAAA/IFAC/IEEE International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, Madrid, Spain.
- Bares, J. y D. Wettergreen (1999). Danteei: Technical description, results, and lessons learned. *The International Journal of Robotics Research*. Vol. 18, No. 7, 621-649.
- Bares, J. y W. Whittaker (1989). Configuration of an autonomous robot for mars exploration. In *World Conference on Robotics Research: the next five years and beyond*.
- Bares, J. y W. Whittaker (1993). Configuration of autonomous walkers for extreme terrain. *The International Journal of Robotics Research*. Vol. 12, No. 6, 535-599.
- Bekker, M. (1960). *Off the Road Locomotion*. Michigan: University of Michigan Press.

- Bentley, J. (1995). *Principles of Measurement Systems*. London: Pearson Education Limited.
- Boston Dynamics (2005). *BigDog*. Boston Dynamics. <http://www.bostondynamics.com/>.
- Brooks, R. (1986). A robust layered control system for a mobile robot. *IEEE Journal of Robotics and Automation*. Vol. RA-2, No.1, 14-23.
- Brown, R. y P. Hwang (1992). *Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering*. New York: John Wiley and Sons, Inc.
- Buehler, M., R. Battaglia, A. Cocosco, G. Hawker, J. Sarkis, y K. Yamazaki (1998, May). Scout: A simple quadruped that walks, climbs and runs. In *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 1701–1712. Leuven, Belgium.
- Caballero, R. (2002). *Control de bípedos con accionamientos no lineales*. Ph. D. thesis, Universidad Politécnica de Madrid.
- Caballero, R., M. Armada, y P. Alarcón (2006). Methodology for zero-moment point experimental modelling in the frequency domain. *Journal of Vibration and Control*. Vol. 12, 1385-1406.
- Carelli, R. y V. Mut (1993). Adaptive motion force control of robots with uncertain constraints. *Robotics and Computer Integrating Manufacturing*. Vol. 10, No. 6, 393-399.
- Chiaverini, S. y L. Sciavicco (1993). The parallel approach to force/position control of robotics manipulators. *Journal of IEEE Transactions on Robotics and Automation*. Vol. 9, No. 4, 361-373.
- Chowdhury, N. (2000). Ordinary and Neural Chi-Squared Tests for Fault Detection in Multioutput Stochastic Systems. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. Vol. 8, No. 2, 372-379.
- Collie, A. (1992). Unusual robots. *Industrial Robots*. Vol. 19, No. 4, 13-16.
- Dally, J., W. Riley, y K. McConnell (1993). *Instrumentation for Engineering Measurements*. Singapore: Wiley.
- De Schutter, J., H. Bruyninck, W. Zhu, y M. Spong (1998). *Force Control: A Bird's eye View*, pp. 1–17. London: Springer-Verlag.

- Denavit, J. y R. Hartenberg (1955). A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices. *Journal of Applied Mechanics*, 215–221.
- Estremera, J. (2003). *Modos de caminar Libres y Sensores Virtuales*. Ph. D. thesis, Universidad Complutense de Madrid.
- Estremera, J. y P. González de Santos (2003). Free gaits for quadrupeds robots over irregular terrain. *The International Journal of Robotics Research*. Vol. 22, No. 2, 115-130.
- Estremera, J. y K. J. Waldron (2006). Leg thrust control for stabilization of dynamic gaits in a quadruped robot. *Courses and Lectures - International Centre of Mechanical Science*. No.487, 213–220.
- Ferreti, G., J. Magnani, P. Rocco, F. Ceconelo, y G. Rosetti (2000). Impedance control for industrial robots. In *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 4028–4033. San Francisco, California.
- Fisher, W. y M. Mujtaba (1992). Hybrid Position/Force Control: A Correct Formulation. *The International Journal of Robotics Research*. Vol. 11, No. 4, 299-311.
- García, E. (2002). *Optimización de la Estabilidad y la Velocidad de Robost Caminantes*. Ph. D. thesis, Universidad Politécnica de Madrid.
- García, E. y P. González de Santos (2005). An improved energy stability margin for walking machines subject to dynamic effects. *Robotica*. Vol. 23, No. 1, 13-20.
- García, E., M. Jiménez, P. G. de Santos, y M. Armada (2007). The evolution of robotics research. from industrial to service robots. *IEEE Robotics and Automation Magazine*. Vol. 14, No. 1, 90–103.
- Genta, G. y N. Amatia (2004). Mobility on planetary surfaces: may walking machines be a viable alternative? *Planetary and Space Science*. Vol. 52, 31–40.
- Ghasempoor, A. y N. Sepehri (1998). A measure of stability for mobile manipulators with application to heavy-duty hydraulic machines. *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 120, 360–370.

- Gálvez, J. (2002). *Percepción, control y distribución de las fuerzas en robots móviles con patas*. Ph. D. thesis, Universidad Politécnica de Madrid.
- Gálvez, J., J. Estremera, y P. González de Santos (2000). Silo4-a versatile quadruped robot for research in force distribution. In *Proc. Int. Conf. Climbing and Walking Robots*, Madrid, Spain, pp. 371–383.
- González de Santos, P., J. Estremera, E. García, y M. Armada (2005). Including joint torques and power consumption in the stability margin of walking robots. *Autonomous Robots*, Vol. 18, 43–57.
- González de Santos, P., E. García, y J. Estremera (2006). *Quadrupedal Locomotion: An Introduction to the Control of Four-Legged Robots*. London: Springer.
- González de Santos, P. y M. Jiménez (1995). Generation of discontinuous gaits for quadruped walking machines. *Journal of Robotic Systems*. Vol. 12, No. 9, 599-611.
- González de Santos, P., M. Armada, y M. Jiménez (1997). An industrial walking machine for naval construction. In *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, Albuquerque, NM.
- González de Santos, P., M. Armada, y M. Jiménez (2000). Ship building with rower. *IEEE Robotics and Automation Magazine*. Vol. 7, No. 4, 35–43.
- González de Santos, P., M. Armada, A. Martín, y W. De Peuter (1994). A survey of locomotion concepts for planetary exploration rovers. In *3rd ESA Workshop on Advance Space Technologies for Robot Applications*, Noordwjck, Netherlands.
- González de Santos, P., E. García, J. Estremera, y M. Armada (2005). Dylema: Using walking robots for landmine detection and location. *International Journal of Systems Science*. Vol. 36, No. 9, 545–558.
- González de Santos, P., P. Nagy, y W. Whittaker (1991, July). *Leveling of the AMBLER Walking Machine: A Comparison of Methods*. USA: CMU Robotics Institute Technical Report.
- González de Santos, P., P. Nagy, y W. Whittaker (1992). Attitude control methods for walking machines. In *ASME Mechanisms Conference*, pp. 89–94.

- Gorinevsky, D., A. Formalsky, y A. Schneider (1997). *Force Control of Robotics Systems*. Boca Raton, Florida: CRC Press LLC.
- Goswami, A. (1999). Postural stability of biped robots and the foot-rotation indicator (fri) point. *The International Journal of Robotics Research*. Vol. 18, No. 6, 523–533.
- Grieco, J., M. Pioto, M. Armada, y P. González de Santos (1998). A six-legged climbing robot for high payloads. In *IEEE International Conference on Control Applications*. Trieste, Italy.
- Grieco, J. C. (1997). *Robots escaladores. Consideraciones acerca del diseño, estabilidad y estrategias de control*. Ph. D. thesis, Universidad de Valladolid.
- Guccione, S. y G. Muscato (2004). The wheelleg robot. *IEEE Robotics and Automation Magazine*. Vol. 10, No. 4, 33–43.
- H-RL (2006). *Hirose Robotics Laboratory*. H-RL. <http://www-robot.mes.titech.ac.jp>.
- Halme, A., K. Hartikainen, y K. Karkkainen (1994). Terrain asaptive motion and free gait of a six legged walking machine. *Control Engineering Practice*. Vol. 2, No. 2, 237–279.
- Halme, A., I. Leppanen, J. Suomela, S. Ylonen, y I. Kettunen (2004). Workpartner: Interactive human-like service robot for outdoor applications. *The International Journal of Robotics Research*. Vol. 22, No. 7-8, 627-640.
- Hauser, K., T. Bretl, y J. Latombe (2005, April). Learning asisted multi-step planning. In *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 4586–4591. Barcelona, Spain.
- Hemami, H. y G. C.L. (1977). The inverted pendulum and biped stability. *Journal of Mathematical Biosciences*. Vol. 34, No. 1-2, 95-110.
- Hemami, H., F. Weimer, y S. Koozekanani (1973). Some aspects of the inverted pendulum problem for modeling of locomotions system. *IEEE Transactions on Automatic Control*. Vol. 18, No. 16, 658-661.
- Hirai, K., M. Hirose, Y. Haikawa, y T. Takenaka (1998, May). The development of Honda humanoid robot. In *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 1321–1326. Leuven, Belgium.

- Hirose, S. (1984). A study of design and control of a quadruped walking vehicle. *The International Journal of Robotics Research*. Vol. 3, No.2, 113-132.
- Hirose, S., H. Tsukagoshi, y K. Yoneda (1998, November). Normalized energy stability margin: Generalized stability criterion for walking vehicles. In *Proc. Int. Conf. Climbing and Walking Robots*, pp. 71–76. Brussels, Belgium.
- Hirose, S., K. Yoneda, y H. Tsukagoshi (1997, April). (TITAN VII): Qudruped walking and manipulating robot on a steep slope. In *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*. Albuquerque, New Mexico.
- Hogan, N. (1985). Impedance Control: An Aproach to Manipulation. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*. Vol. 107, 91-97.
- Jelali, M. y A. Kroll (2003). *Hydraulic Servo-Systems: Modelling, Identification and Control*. London: Springer-Verlag.
- Jiménez, M. (1994). *Generación e implementación de modos de caminar ondulatorios para robots cuadrúpedos*. Ph. D. thesis, Universidad de Cantabria.
- Jiménez, M., P. G. de Santos, y M. Armada. (1993). A four legged walking test bed. In *IFAC International Workshop on Intelligent Autonomous Vehicles*, pp. 8–13.
- Jiménez, M. y P. González de Santos (1997). Terrain adaptive gait for walking machines. *The International Journal of Robotic Research*. Vol. 16, No. 3, 320–339.
- Kalman, R. (1960). A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. *Trnasaction of the ASME - Journal of Basic Engineering*. 35-45.
- Kang, D., Y. Lee, S. Lee, Y. Hong, y Z. Bien (1997, April). A study on an adaptive gait for a quadruped walking robot under external forces. In *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 2777–2782. Albuquerque, New Mexico.
- Kar, D. (2003). Design of statically stable walking robot: A review. *Journal of Robotic Systems*. Vol. 20, No. 11, 671-686.

- Kimura, H., I. Shimoyama, y H. Miura (1990). Dynamics in the dynamic walk of a quadruped robot. *Advanced Robotics*. Vol. 4, No. 3, 283–301.
- Klein, C. y R. Brigs (1980). Use of active compliance in the control of legged vehicles. *Journal of IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*. Vol. 10, No. 7, 393–400.
- Lambrechts, P. (1994). *The Application of robust Control Theory Concepts to Mechanical Seervo Systems*. Ph. D. thesis, Delft University.
- Leppanen, I. (2007). *Automatic locomotion mode control of wheel-legged robots*. Ph. D. thesis, Technical University of Helsinki.
- Leppanen, I., S. Salmi, y A. Halme (1998). Workpartner, hut automation's new hybrid walking machine. In *Proc. Int. Conf. Climbing and Walking Robots*.
- Lin, B. y S. Song (1993). Dynamic modeling, stability and energy efficiency of a quadrupedal walking machine. In *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 367–373. Atlanta, Georgia.
- Luk, B., A. Collie, y J. Billingsley (1991, April). Robug ii: An intelligent wall climbing robot. In *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*. Sacramento, California.
- Manko, D. (1990). *A general model of legged locomotion on natural terrain*. Ph. D. thesis, Carnegie Mellon University.
- Martin, A., W. de Peuter, P. G. de Santos, y M. A. Armada (1994). A survey of locomotion concepts for planetary exploration rovers. In *3rd ESA Workshop on Advance Space Technologies for Robot Applications ESTEC*.
- Maza, M., J. Fontaine, M. Armada, P. González de Santos, V. Papantoniou, y M. Mas (1997). Wheel+legs: A new solution for traction enhancement without addaptive soil compaction. *IEEE Robotics and Automation Magazine*. Vol. 4, No. 4, 26–33.
- McGhee, R. y A. Frank (1968). On the stability properties of quadruped creeping gaits. *Mathematical Bioscience*, Vol. 3, 331–351.
- McGhee, R. y G. Iswandhi (1979). Adaptive locomotion for a multilegged robot over rough terrain. *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*. Vol. SMC-9, No. 4, 176–182.

- Merritt, E. (1976). *Hydraulic Control Systems*. New York: John Wiley.
- Mills, J. y A. Goldenberg (1991). Hybrid control: A constrained motion perspective. *Journal of Robotic Systems*. Vol. 8, No. 2.
- Molfino, R., M. Armada, F. Cepolina, y M. Zoppi (2005). Roboclimber the 3 ton spider. *Industrial Robot*. Vol. 32, No. 2, 163–170.
- Montes, H. (2005). *Análisis, Diseño y Evaluación de Estrategias de Control de Fuerza en Robots Caminates*. Ph. D. thesis, Universidad Complutense de Madrid.
- Montes, H., S. Nabulsi, y M. Armada (2004a). Design and implementation of force sensor for roboclimber. In *Proc. Int. Conf. Climbing and Walking Robots*, pp. 219–228. Madrid, Spain.
- Montes, H., S. Nabulsi, y M. Armada (2004b). Detecting zero-moment point in legged robot. In *Proc. Int. Conf. Climbing and Walking Robots*, pp. 229–236. Madrid, Spain.
- Montes, H., S. Nabulsi, y M. Armada (2006). Reliable, built-in, high-accuracy force sensing for legged robots. *The International Journal of Robotics Research*. Vol. 25, No. 9, 931-950.
- Montes, H., S. Nabulsi, M. Armada, y V. Sanchez (2004). Analysis and evaluation of force sensing strategies in walking robots. *Journal of Slovakia Science Academy*.
- Morel, G., E. Malis, y S. Boude (1998). Impedance based combination of visual and force control. In *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 1743–1748.
- Morrison, R. (1968). Iron mule train. In *Off-road mobility research symposium. International Society for Terrain Vehicles Systems*.
- Nabulsi, S. (2007). Diseño, realización y evaluación experimental del sistema de control de roboclimber. Master's thesis, Universidad Politécnica de Madrid.
- Nabulsi, S. y M. Armada (2004). Climbing strategies for remote manoeuverability of roboclimber. In *ISR04: 35th International Symposium on Robotics*. Paris, France.
- Nabulsi, S., M. Armada, y P. G. de Santos (2003). Control architecture for a four-legged hydraulically actuated robot. In *ISMR: International*

- Symposium on Measurements and Control in Robotics*, pp. 291–295. Madrid, Spain.
- Nabulsi, S., M. Armada, y H. Montes (2005). Multiple terrain adaptation approach using ultrasonic sensors for legged robots. In *Proc. Int. Conf. Climbing and Walking Robots*, pp. 391–398. London, United Kingdom.
- Nabulsi, S., H. Montes, y M. Armada (2004). Roboclimber: Control system architecture. In *Proc. Int. Conf. Climbing and Walking Robots*, pp. 943–952. Madrid, Spain.
- Nabulsi, S., M. Prieto, J. Sarria, y M. Armada (2005). Arquitectura y software de control de un robot de servicios teleoperado. In *COINMEC05: Congreso Internacional de mecatrónica*. San Luis de Potosí, México.
- Nabulsi, S., J. Sarria, R. Ponticelli, y M. Armada (2007, July). Robot de grandes dimensiones para la consolidación de laderas de montañas. In *RoboCity 2030: Workshop de Robots de Exteriores*, pp. 83–102. Avila, Spain.
- Nagchaudhuri, A. y D. Garg (2001). Adaptive control and impedance control for dual robotic arms manipulating a common heavy load. In *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, pp. 683–688. Como, Italy.
- Nagy, P. (1991). *An investigation of walker/terrain interaction*. Ph. D. thesis, Carnegie Mellon University.
- NASA (2006). *Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology*. NASA. <http://www-robotics.jpl.nasa.gov>.
- Nissing, D. (2002). *Identifikation, Regelung und Beobachterausslegung für elastische Grosshandhabungssysteme*. Duisburg: Diss, University of Duisburg, VDI verlag.
- Orin, D. (1976). *Interactive control of a six-legged vehicle with optimization of both stability and energy*. Ph. D. thesis, The Ohio State University.
- Papadopoulos, E. y D. Rey (1996, April). A new measure of tipover stability margin for mobile manipulators. In *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 3111–3116. Minneapolis, Minnesota.

- Pezzuto, G., J. Gancet, y S. Nabulsi (2006). Saferdrill control system architecture. In *8th International IFAC Symposium on Robot Control*. Bologna, Italy.
- Prieto, M., M. Armada, y S. Ros (2000, October). Continuous climbing control for legged robot rest 2. In *Proc. Int. Conf. Climbing and Walking Robots*, pp. 491–498. Madrid, Spain.
- PTC (2006). *ProEngineer Wildfire 3.0*. PTC. <http://www.ptc.com>.
- QNX Software Systems Ltd. (2006). *QNX 6.3*. QNX Software Systems Ltd. <http://www.qnx.com>.
- Quang, N. (2000). *Robust low level control of robotic excavation*. Ph. D. thesis, The University of Sydney.
- Raibert, M., M. Chepponis, y H. Brown Jr. (1986). Running on four legs as though they were one. *IEEE Journal of Robotics and Automation*. Vol. 2, No. 2, 70–82.
- Raibert, M. y C. J.J. (1981). Hybrid position/force control of manipulators. *ASME Journal of Dynamics Systems, Measurements, and Control*. Vol. 103, 126-133.
- R.M., A. (1994). *How Animals Move*. Tree Ferns Paul Franklin/Oxford Scientific films, Maris Multimedia.
- Rocco, P., G. Ferreti, y G. Magnani (1997). Implicit Force Control for Industrial Robos in contact with Stiff Surfaces. *Journal of Automatica*. Vol. 33, No. 11, 2041-2047.
- Salisbury, J. (1980). Active stiffness control of a manipulator in cartesian coordinates. In *19th Conference on Decision and Control*, pp. 95–100. Albuquerque, NM.
- Sciavicco, L. y B. Siciliano (2001). *Modelling and Control of Robot Manipulators*. London: Springer-Verlag.
- Siciliano, B. y L. Villani (1999). *Robot Force Control*. Norwell, Massachusetts: Kluwer Academy Publishers.
- Siciliano, B. y L. Villani (2000). Parallel force and position control of flexible manipulator. In *IEEE Control and Theory and Application*, Volume 147, pp. 605–612.

- Song, S. y K. Waldron (1989). *Machines that walk: The adaptive suspension vehicle*. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press.
- Spong, M. y M. Vidyasagar (1989). *Robot Dynamics and Control*. New York: John Wiley.
- Stribeck, R. (1902). Die wesentlichen Eigenschaften der Gleit- und Rollerlager. *Z Ver Dtsch Ing*. Vol. XXXXVI, 1341-348.
- Surdilovik, D. (1998). Synthesis of impedance control laws at higher control levels. In *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 213–218. Leuven, Belgium.
- Tafazoli, S., C. de Silva, y P. Lawrence (1998). Tracking control of an electrohydraulic manipulator in the presence of friction. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. Vol. 6, No. 3, 401-411.
- Takanishi, A., M. Tochizawa, H. Taraki, y I. Kato (1985). The realization of dynamic biped walking by the biped robot wl-10rd. In *International Conference on Advanced Robot*, pp. 459–466. Tokio.
- The MathWorks (2006). *Matlab*. The MathWorks. <http://www.mathworks.com>.
- Todd, D. (1985). *Walking Machines: An Introduction to Legged Robots*. London: Kogan Page.
- Vargas, J. (1994). *Diseño y realización de algoritmos de locomoción libre para robots caminantes de cuatro patas*. Ph. D. thesis, Universidad Complutense de Madrid.
- Viersma, T. (1990). *Analysis, Synthesis and Design of Hydraulic Servosystems and Pipelines*. Ph. D. thesis, University of Delft.
- Vukobratovic, M. y B. Boravac (2004). Zero-moment point - thirty five years of its life. *International Journal of Humanoid Robots*. Vol. 1, 157–173.
- Vukobratovic, M. y D. Juricic (1969). Contribution to the synthesis of biped gait. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. Vol. 16, No. 1, 1–6.
- Vukobratovic, M. y D. Stoik (1975). Dynamic control of unstable locomotion robots. *Journal of Mathematical Biosciences*. Vol. 24, 25–36.

- Whitney, D. (1977). Force Feedback Control of manipulator fine motions. *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurements, and Control*. Vol. 99, No. 2, 91-97.
- Whitney, D. (1987). Historical Perspective and State of the Art in Robot force Control. *The International Journal of Robotics Research*. Vol. 6, No.1, 3-13.
- Wong, H. y D. Orin (1993). Dynamic control of a quadruped standing jump. In *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 346–351. Atlanta, Georgia.
- Wong, J. y W. Huang (2006). Wheels vs. tracks - a fundamental evaluation from the traction perspective. *Journal of Terramechanics*. Vol. 43, 27–42.
- Yoneda, K., H. Iiyama, y S. Hirose (1996). Intermittent trot gait of a quadruped walking machine dynamic stability control of an omnidirectional walk. In *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 3002–3007. Atlanta, Georgia.
- Yoshikawa, T., T. Sugie, y M. Tanaka (1988). Dynamic hybrid position/force control of robot manipulator-controller design and experiment. *IEEE Journal of Robotics and Automation*. Vol. 4, No. 61.
- Zhang, C. y S. Song (1989). Gaits and geometry of a walking chair for the disabled. *Journal of Terramechanics*. Vol. 26, No. 3/4, 211–233.
- Zhang, H. y R. Paul (1985). Hybrid control of robot manipulators. In *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*. St. Louis.