

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

**“ Sistema de Control Electrónico Aplicado en la
Navegación de un Robot Hexapodo Autónomo ”**

POR

Ing. Nadxielli Elizabeth Pineda Martínez

TESIS

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL
GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA**

DIRECTOR DE TESIS

M. en C. Edmundo Javier Ollervides Vázquez

CODIRECTOR DE TESIS

Dr. Víctor Adrián Santibañez Dávila

ISSN: 0188-9060



RIITEC: (16)-TMCIE-2013

Torreón, Coahuila, México
Julio, 2014

"2013. Año de la Lealtad Institucional y Centenario del Ejército Mexicano"

Dependencia: **DEPI**
Oficio: **DEPIJ/374/2013**
Asunto: **Autorización de impresión de tesis.**

Torreón, Coah., **07 Diciembre 2013**

C. NADIELLI ELIZABETH PINEDA MARTINEZ
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA.
PRESENTE

Después de haber sometido a revisión su trabajo de tesis titulado:

"Sistema de control electrónico aplicado en la navegación de un robot hexápodo autónomo"

Habiendo cumplido con todas las indicaciones que el jurado revisor de tesis hizo, se le comunica que se le conceda la autorización con número de registro **RIITEC: (16)-MCIE-2013**, para que proceda a la impresión del mismo.

ATENTAMENTE

DR. JOSE LUIS MEZA MEDINA
Jefe de la División de Estudios de Posgrado e Investigación

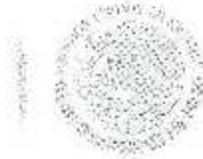


SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
INSTITUTO TECNOLÓGICO de la Laguna
División de Estudios de Posgrado e Investigación



SEP

SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



Subsecretaría de Educación Superior
Dirección General de Educación Superior Tecnológica
Instituto Tecnológico de Lagunas

"2013, Año de la Lealtad Institucional y Centenario del Ejército Mexicano"

Torreón, Coah., 06/Diciembre/2013

DR. JOSE LUIS MEZA MEDINA
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
PRESENTE

Por medio de la presente, hacemos de su conocimiento que después de haber sometido a revisión el trabajo de tesis titulado:

**"Sistema de control electrónico aplicado en la navegación
de un robot hexápodo autónomo"**

Desarrollado por el C. **NADIELLI ELIZABETH PINEDA MARTINEZ**, con número de control **M06131323** y habiendo cumplido con todas las correcciones que se le indicaron, estamos de acuerdo que se le conceda la autorización de la fecha de examen de grado para que proceda a la impresión de la misma.

ATENTAMENTE


M.C. EDMUNDO J. OLLERVIDES VAZQUEZ
Asesor/Director


DR. VICTOR A. SANTIBANEZ DAVILA
Coasesor


DR. ALEJANDRO E. DZUL LOPEZ
Comité Tutorial


DR. RICARDO E. CAMPA COCOM
Comité Tutorial



Dedicatoria

*Dedicado a mi familia
y a todas aquellas personas que han influido en mi vida.*

Agradecimientos

Ahora que termino la maestría quiero dar las gracias a todos los que me apoyaron para la realización de este trabajo:

Primeramente a Dios, que me permite culminar un periodo más de mi vida.

A mi familia, por apoyarme en cada instante de esta travesía, por no permitir que tirara la toalla en los momentos difíciles y por su presencia a pesar de la distancia.

A mis profesores, por el conocimiento compartido a lo largo de estos tres años, por enseñarme a ser una mejor profesionista.

A mi novio, por su apoyo incondicional, por la paciencia y por hacer grandes los pequeños momentos compartidos.

A mis amigos y compañeros de clase, con quienes logré convivir y aprender a ser una persona más social.

Al CONACyT, por el apoyo económico otorgado a través de la beca para estudios de maestría, y a los proyectos DGEST y CONACYT 134534.

Agradezco a mis sinodales, Dr. Víctor Adrián Santibáñez Dávila, Dr. Alejandro Enrique Dzul López y el Dr. Ricardo Emmanuel Campa Cocom por la comprensión, paciencia y atención prestada para la culminación de mi tesis, así como a mi asesor de tesis, M. en C. Edmundo Javier Ollervides Vázquez por todo el apoyo y confianza que me ha brindado, y a todas las personas que me ayudaron de cualquier manera, ya que sin esa ayuda hubiese sido muy complicado concluir mis estudios de maestría.

A todos mis más sinceras y efusivas gracias.

Resumen

En este trabajo se describe la implementación de un sistema de control electrónico multivariable para realizar la locomoción de un robot hexápodo caminante. La aplicación se enfoca en el desplazamiento inteligente del robot, con la planificación en tiempo real de los movimientos de las piernas del mismo, utilizando un modelo cinemático inverso para el cálculo de la trayectoria deseada. El robot interactúa con su ambiente mediante sensores electrónicos de fuerza montados en los extremos de las piernas, un sistema de sensores inerciales para realimentar la orientación y dirección de avance del tórax del robot; y un sensor de visión para el reconocimiento de objetos. Los actuadores del robot son servomotores de CD con impulsor electrónico integrado, el cual cuenta con la alternativa para medir la corriente eléctrica, la posición y la velocidad angular de la flecha del servomotor conectada en cada una de las articulaciones del robot.

Abstract

This research presents the implementation of a multivariable electronic control system for the locomotion of a hexapod walking robot. The application of this implementation is focused on the intelligent motion of the robot, by planning the real-time trajectory of the robot legs, using an inverse kinematics model for the computation of the desired path. The robot interacts with its environment through electronic force sensors mounted on the ends of the legs, a set of inertial sensors for feeding back the orientation and forward direction of the chest of the hexapod robot, and a vision sensor for objects recognition. The robot actuators are DC servo-motors with embedded electronic drivers, which have the option of measuring the electric current, the angular position and velocity of the servomotor shaft, which is to connected each of the robot joints.

Contenido

Dedicatoria	III
Agradecimientos	V
Resumen	VII
Abstract	IX
Lista de figuras	XV
Lista de tablas	XXI
1. Introducción	1
1.1. Objetivos de la tesis	5
1.1.1. Objetivo general	5
1.1.2. Objetivos específicos	6
1.2. Organización del documento	6
2. Configuración mecánica del robot hexápodo	9
2.1. Configuración de las piernas del robot	10
2.1.1. Grados de libertad de una pierna del robot hexápodo	13
2.1.2. Diseño definitivo	14
2.2. Modelado cinemático	19
2.2.1. Modelado cinemático de posición	20
2.2.2. Modelado cinemático directo de posición para una pierna del robot hexápodo	24

2.2.3.	Modelado cinemático inverso de posición para una pierna del robot hexápodo	29
2.2.4.	Modelado cinemático de velocidad	32
2.2.5.	Jacobiano de una pierna del hexápodo	33
2.3.	Modelo dinámico de una pierna del robot	37
2.3.1.	Modelo dinámico para una pierna del robot	40
3.	Sistema electrónico del robot hexápodo	53
3.1.	Tarjetas electrónicas embebidas	53
3.2.	Servomotores de CD	54
3.2.1.	Bus de comunicación	56
3.2.2.	Rutina para los servomotores en el ARM-CÓRTEX-M3	57
3.2.3.	Implementación física de los servomotores	58
3.3.	Sensores de fuerza de las piernas del robot	60
3.3.1.	Circuito acondicionador de señal	61
3.3.2.	Rutina para el sensor Flexiforce en Arduino Mega 2560	62
3.3.3.	Distribución física de los sensores Flexiforce	63
3.4.	Central Inercial AeroQuad v2.1	65
3.4.1.	Acelerómetro	65
3.4.2.	Giroscopio	67
3.4.3.	Bus de comunicación	69
3.4.4.	Rutina para la central inercial en el Arduino Mega	70
3.5.	Sistema electrónico para la detección y seguimiento de objetos	72
3.5.1.	Sensor de visión PS EYE	72
3.5.2.	Arquitectura para el sensor de visión PS Eye	73
3.5.3.	Rutina para la PS Eye en el Arduino Mega 2560	75
3.5.4.	Instalación del sensor PS-Eye en el hexápodo	77
3.5.5.	Sistema electrónico completo	79

4. Descripción del sistema de navegación del robot hexápodo	81
4.1. Estructura del sistema de control	82
4.2. Sistema de control de los servoactuadores	84
4.3. Planificación del caminado del robot	85
4.4. Espacio de trabajo	88
5. Simulación y Experimentación	93
5.1. Simulación	93
5.2. Experimentación	98
5.3. Resultados	99
5.3.1. Resultados considerando sólo 2 g.d.l. de una pierna	99
5.3.2. Resultados considerando los 3 g.d.l. de una pierna	109
5.3.3. Resultados experimentales con los sensores del robot	119
6. Conclusiones	123
Bibliografía	125
A. ATmega2560	131
B. ARM-CORTEX-M3	139

CONTENIDO

Lista de figuras

1.1. Robot "Aibo ERS-7M3" de la empresa Sony Co.	3
1.2. Ejemplo de robots hexápodos (a) Robot Rhex (b) Robot Meluantis	5
2.1. Ejemplo de robots de más de seis piernas (a) Robot "Araña" (b) Robot "Miriápodo" (c) Robot "Carminador de terrenos difíciles"	11
2.2. Configuración bilateral de un robot hexápodo	12
2.3. Configuración radial de un robot hexápodo	12
2.4. Grados de libertad para una pierna (a) 2 g.d.l. (b) 3 g.d.l.	13
2.5. Posibles estructuras para las piernas de un robot (a) actuación in-situ, y (b) paralelogramo deformable	14
2.6. Vista 3D del robot hexápodo Phoenix	15
2.7. Ensamblaje y dimensiones de una de las piernas del robot hexápodo	17
2.8. Cuerpo del robot hexápodo	18
2.9. Entradas y salidas de un robot	19
2.10. Arquitectura básica de un robot manipulador serial	21
2.11. Parámetros D-H	23
2.12. Diagrama de alambre de una pierna del hexápodo	25
2.13. Marcos de referencia para dos articulaciones de una pierna del hexápodo	25
2.14. Marcos de referencia para tres articulaciones de una pierna del hexápodo	27
2.15. Esquema geométrico para una pierna de dos articulaciones	30
2.16. Esquema geométrico para una pierna de tres articulaciones	31
2.17. Pierna considerando sólo 2 g.d.l.	41

LISTA DE FIGURAS

2.18. Pierna considerando los 3 g.d.l.	46
3.1. Servomotor CDS5516	55
3.2. Conexión del servo CDS5516	56
3.3. Distribución de los dieciocho servomotores del robot hexápodo	58
3.4. Distribución de los tres servomotores de una pierna del robot	59
3.5. Conector en serie para las seis piernas del robot	60
3.6. Sensor Flexiforce A201-25	61
3.7. Adaptador para la conexión del sensor flexiforce A201-25	62
3.8. Conexión del sensor flexiforce A201-25	62
3.9. Distribución de los sensores Flexiforce en el robot hexápodo	63
3.10. Distribución de los adaptadores de los sensores Flexiforce	64
3.11. Placa adaptadora para conectar Arduino Mega 2560	64
3.12. Ubicación del sensor Flexiforce en la pierna del robot	65
3.13. Acelerómetro ADXL345	66
3.14. PMODACL	67
3.15. Giroscopio L3G4200D	68
3.16. PMODGYRO	68
3.17. PMODGYRO, PMODACL y sus conexiones	70
3.18. Sensor de visión: PS Eye	73
3.19. Servomotor HITEC HS-422	74
3.20. Arquitectura del sistema para el sensor de visión PS Eye	75
3.21. Ubicación del sensor de visión PS Eye en el robot hexápodo	77
3.22. Conexiones del sensor de visión PS Eye	78
3.23. Conexiones Generales en la placa adaptadora Arduino	78
3.24. Sistema electrónico completo del robot hexápodo	79
4.1. Arquitectura del sistema de control realimentado de una pierna del robot	81
4.2. Trayectoria deseada para una pierna del robot	83
4.3. Tripiés para el caminado frontal del robot.	87

4.4. Tripiés para el caminado lateral del robot	87
4.5. Esquema para el cálculo del área de trabajo	89
4.6. Espacio de trabajo de una pierna de 3 g.d.l. del robot	89
4.7. Espacio de trabajo en el plano $y - z$ de una pierna	91
5.1. Diagrama a bloques del control de posición para una pierna del robot	93
5.2. Simulación de la respuesta de la posición en ángulos para los eslabones 1 y 2 con un controlador PID	94
5.3. Simulación de la posición deseada para los eslabones 1 y 2	95
5.4. Simulación de la posición deseada para los eslabones 1 y 2 vista desde el plano xy	95
5.5. Valores del error de posición para los eslabones 1 y 2 con un controlador PID	96
5.6. Valores del torque para los eslabones 1 y 2 con un controlador PID	96
5.7. Movimiento lateral del hexápodo	98
5.8. Trayectoria en $x - y$ para la primera pierna del robot hexápodo	100
5.9. Ángulos de las articulaciones para la primera pierna del robot hexápodo	101
5.10. Trayectoria en $x - y$ para la segunda pierna del robot hexápodo	102
5.11. Ángulos de las articulaciones para la segunda pierna del robot hexápodo	102
5.12. Trayectoria en $x - y$ para la tercera pierna del robot hexápodo	103
5.13. Ángulos de las articulaciones para la tercera pierna del robot hexápodo	104
5.14. Trayectoria en $x - y$ para la cuarta pierna del robot hexápodo	105
5.15. Ángulos de las articulaciones para la cuarta pierna del robot hexápodo	105
5.16. Trayectoria en $x - y$ para la quinta pierna del robot hexápodo	106
5.17. Ángulos de las articulaciones para la quinta pierna del robot hexápodo	107
5.18. Trayectoria en $x - y$ para la sexta pierna del robot hexápodo	108
5.19. Ángulos de las articulaciones para la sexta pierna del robot hexápodo	108
5.20. Trayectoria en $y - z$ para la primera pierna del robot hexápodo	110
5.21. Ángulos de las articulaciones para la primera pierna del robot hexápodo	110
5.22. Trayectoria en $y - z$ para la segunda pierna del robot hexápodo	111

LISTA DE FIGURAS

5.23. Ángulos de las articulaciones para la segunda pierna del robot hexápodo	112
5.24. Trayectoria en $y - z$ para la tercera pierna del robot hexápodo	113
5.25. Ángulos de las articulaciones para la tercera pierna del robot hexápodo	113
5.26. Trayectoria en $y - z$ para la cuarta pierna del robot hexápodo	114
5.27. Ángulos de las articulaciones para la cuarta pierna del robot hexápodo	115
5.28. Trayectoria en $y - z$ para la quinta pierna del robot hexápodo	116
5.29. Ángulos de las articulaciones para la quinta pierna del robot hexápodo	116
5.30. Trayectoria en $y - z$ para la sexta pierna del robot hexápodo	117
5.31. Ángulos de las articulaciones para la sexta pierna del robot hexápodo	118
5.32. Trayectoria en $y - z$ de las seis piernas del hexápodo	119
5.33. Mapa de huellas del robot hexápodo	120
5.34. Lecturas de la central inercial AeroQuad v2.1	121
A.1. Tarjeta Arduino modelo Mega 2560	132
A.2. Nombre de cada parte del Arduino Mega	133
A.3. Interfaz de desarrollo de Arduino	133
A.4. Barra de herramientas del compilador Arduino	134
A.5. Puerto COM asignado a Arduino Mega 2560	135
A.6. Ventana de trabajo de Arduino, selección del ejemplo	136
A.7. Ventana de trabajo de Arduino, selección de la placa Arduino Mega 2560	137
A.8. Ventana de trabajo de Arduino, selección del puerto COM	137
A.9. Barra de herramientas: selección de Upload	137
B.1. Dispositivo CM-530	139
B.2. Nombre de cada parte del dispositivo CM-530	141
B.3. Interfaz del paquete RoboPlus	141
B.4. Puerto COM asignado al CM-530	142
B.5. Aplicación RoboPlus Task	143
B.6. Interfaz de RoboPlus Terminal	144
B.7. Selección de la carpeta de trabajo	145

B.8. Interfaz para cargar un proyecto ya existente 145

LISTA DE FIGURAS

Lista de tablas

2.1. Parámetros Denavit-Hartenberg de la figura 2.13	26
2.2. Parámetros Denavit-Hartenberg de la figura 2.14	28
2.3. Parámetros dinámicos para el modelo de 2 g.d.l	42
2.4. Parámetros dinámicos para el modelo de 3 g.d.l	47
3.1. Interfaz de comunicación I^2C	69
4.1. Secuencia de tripiés	88
4.2. Valores utilizados en el diseño de la trayectoria deseada	90

Capítulo 1

Introducción

En la actualidad los robots son utilizados en diferentes aplicaciones, cada una tiene funciones y características diferentes, ya que realizan tareas de forma más exacta o más barata que los humanos. También se les utiliza en trabajos demasiado sucios, peligrosos o tediosos.

Aislado de cualquier tipo de contexto, el término robot puede tener significados distintos dependiendo de quién lo utilice. Varios factores contribuyen a esta divergencia en la acepción: desde la historia misma del término hasta los niveles de inteligencia que pueda tener una máquina industrial. En efecto, mientras que para un lector de literatura de ciencia ficción un robot es un artefacto antropomorfo, del tipo de C3PO de la "Guerra de las Galaxias", para un ingeniero será una simple máquina de transferencia de objetos, y para un científico será un manipulador asistido por sofisticados resortes de computación y de percepción que lo doten de un nivel elevado de inteligencia.

Así, una definición más general del término robot debería comprender todas las ideas que existan sobre esas máquinas.

Definición del Instituto de Robótica de América (RIA, por sus siglas en inglés: Robotics Institute of America): "Es un manipulador reprogramable, multifuncional, ideado para el

1. Introducción

transporte de materiales, partes, herramientas o sistemas especializados, con movimientos variados y programados para la realización de tareas diversas”

Definición de la Asociación Francesa de Normalización (AFNOR). “Es un manipulador controlado en posición, reprogramable, polivalente, de varios grados de libertad, capaz de manipular materiales, piezas, herramientas y dispositivos especializados, durante la ejecución de movimientos variables y programados para la realización de una variedad de tareas” [Pámanes, 2011].

Dentro de los tipos de robots los más comunes son los *industriales*, los robots de este tipo se utilizan para la realización de procesos de manipulación o fabricación automáticos. Los robots *móviles* terrestres cuentan con orugas, ruedas o patas que les permiten desplazarse en su entorno. Estos robots cuentan con sistemas de sensores, que son los que captan la información del entorno. Son herramientas muy útiles para investigar zonas muy distantes o difíciles de acceder, es por eso que se utilizan para realizar exploraciones. En *medicina* se emplean prótesis robotizadas para disminuidos físicos; estas cuentan con sistemas de mando y se adaptan fácilmente al cuerpo; lo que hacen estas prótesis es suplantar a aquellos órganos o extremidades, realizando sus funciones y movimientos; además existen robots destinados a la realización de intervenciones quirúrgicas. En *teleoperación*, los robots son controlados de manera remota por un operador humano, a estos artificios se los utiliza en situaciones extremas como la desactivación de una bomba o bien, para manipular residuos tóxicos. En las aplicaciones *espaciales* se encuentran robots que son utilizados para realizar exploraciones espaciales [Tipcsde.org, 2013].

En cuanto a los robots móviles, los más comunes son los que emplean ruedas como medio de locomoción; éstos son apropiados para desplazarse en superficies lisas, pero en aplicaciones donde la superficie de desplazamiento es totalmente irregular y desconocida, el uso de los robots móviles con ruedas presenta un sinnúmero de problemas; principalmente de estabilidad del vehículo y acceso a ciertas partes [Celaya y Porta, 1998]. Es en éste tipo de aplicaciones donde el uso de robots caminantes presenta un mejor desempeño

[Estrucmera y González, 2002].

En los últimos años se han estudiado diversos diseños de robots caminantes, con el propósito de lograr nuevas aplicaciones de los robots caminantes tanto comerciales, industriales y de entretenimiento. Como ejemplo, uno de estos robots es el cuadrúpedo desarrollado en la Universidad Politécnica Salesiana o el robot desarrollado por la empresa japonesa Sony Co.[Gorrostieta y Vargas, 2008]. El último, es un robot perro, conocido como "Aibo ERS-7M3", (véase Figura 1.1 está hecho de metal, puede desplazarse, sentarse, dormir y realizar hasta 18 funciones distintas según la información que le comunican sus sensores; tiene instalados una cámara y un sensor infrarrojo que le permite detectar objetos.

El diseño de sistemas de locomoción de robots caminantes se ha derivado del estudio de sistemas biológicos, especialmente de animales terrestres comunes, en los cuales se puede observar un sistema de locomoción basado en un conjunto de eslabones y articulaciones denominadas patas. La naturaleza ha encontrado, a través de millones de años de evolución, un sistema óptimo para el desplazamiento sobre terrenos irregulares, basado en el apoyo discreto de las patas sobre el terreno, a lo que normalmente se denomina pasos. Las máquinas caminantes aprovechan este tipo de locomoción ya sea mediante uno o más puntos de apoyo (monópodos, bípedos, cuadrúpedos, hexápodos, etc.), convirtiéndolas en las máquinas ideales para espacios peligrosos y de difícil acceso. Por otra parte, estas máquinas exigen sistemas mecánicos y de control más complejos que los usados por sistemas con ruedas, así como mayores niveles de sensorización, que hasta el momento limitan que

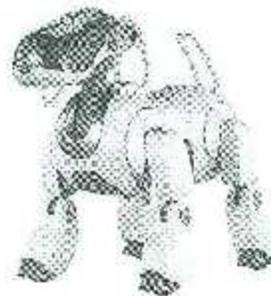


Figura 1.1: Robot "Aibo ERS-7M3" de la empresa Sony Co.

1. Introducción

sean industrialmente rentables, ya que los costos de fabricación y mantenimiento son mucho más elevados que otros tipos de robots. Las principales características que presentan las máquinas caminantes son: gran omnidireccionalidad, capacidad de adaptación al terreno, control de las fuerzas en los puntos de apoyo y apoyos discretos en el terreno. Por todas las características mencionadas las máquinas caminantes se convierten en mecanismos tríficos para desplazarse no sólo por superficies horizontales, sino también por superficies con cierto grado de inclinación o completamente verticales. En este último caso, estos mecanismos toman el nombre de robots escaladores. [Calle et al., 2007]

Dentro de los robots con piernas derivados de proyectos de investigación se puede decir que el robot más sobresaliente es el "Big Dog", el cual consta de cuatro piernas y tiene aplicaciones militares. También se pueden mencionar los robots "RHex" [Moore et al., 2002] y "MELMANTIS" [Melmantis et al., 1987] los cuales son robots con seis piernas. El primero, también llamado "Robot Parkour" (véase Figura 1.2(a)), presenta un solo motor por extremidad y tiene la capacidad de saltar ya bien sea desde suelo firme o brincar de un extremo a otro. El robot "MELMANTIS" (véase Figura 1.2(b)) usa largas barras en sus extremidades, las cuales pueden conmutar entre pata y brazo manipulador. También existen robots con un gran número de actuadores en cada una de sus piernas, como el que se menciona en la referencia [Jiarhna, 2006], el cual tiene 42 grados de libertad.

En este trabajo se implementa un robot caminante de seis piernas denominado en la literatura moderna como "Robot Hexápodo Caminante". La principal razón para la elección de este tipo de robot, consiste en el hecho de que el modelo cinemático de éste presenta el problema de estabilidad estática durante el desplazamiento producido por la locomoción de sus extremidades, por lo que el control de la navegación de este tipo de robots es un gran reto.

El sistema de locomoción empleado en el robot, objeto de este trabajo, consiste en el movimiento simultáneo coordinado de sus seis extremidades, cada una con tres grados de libertad (g.d.l.), siendo en total 18 g.d.l.

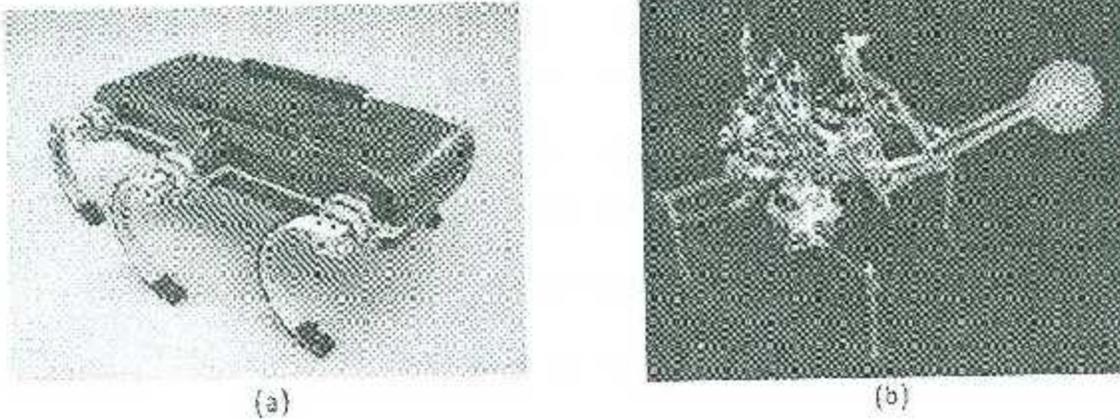


Figura 1.2: Ejemplo de robots hexápodos (a) Robot Rhex (b) Robot Melmantis

Algunas referencias de trabajos previos con robots de características parecidas se mencionan en las referencias ([Okamoto et al., 2009], [Rocamau et al., 2010]). Debido a que durante la locomoción del robot se realiza la interacción en un ambiente no estructurado, es necesario utilizar un sistema electrónico sensorial para la detección de obstáculos. Sin embargo, debe de considerarse que el problema principal es coordinar el movimiento angular de las 18 articulaciones del robot durante la locomoción, en particular la secuencia de los pasos. Este problema puede ser resuelto mediante la implementación de un sistema electrónico dedicado de arquitectura distribuida. Información sobre la implementación de algunos robots hexápodos caminantes puede ser verificada en las referencias [Belter et al., 2008] y [Showalter, 2009].

1.1. Objetivos de la tesis

1.1.1. Objetivo general

- Implementar un sistema de control electrónico multivariable para la locomoción de un robot autónomo de seis piernas nombrado en la literatura como Robot Hexápodo Caminante.

1. Introducción

1.1.2. Objetivos específicos

- Implementar y ensamblar las partes mecánicas del robot móvil hexápodo.
- Programar el algoritmo de control distribuido para el sistema de locomoción, utilizando servomotores electrónicos y una tarjeta electrónica embebida.
- Tomar lecturas de la locomoción del hexápodo empleando sensores de fuerza.
- Utilizar una central inercial para la lectura de la orientación del robot.
- Programar el algoritmo para la detección de objetos utilizando un sensor de visión.

1.2. Organización del documento

El documento se divide en seis capítulos, en los que se describen los componentes utilizados en el estudio, la construcción y la implementación del robot.

En el Capítulo 1 se da un breve repaso para conocer el concepto y aplicaciones de los robots; también se mencionan trabajos previos acerca de robots hexápodos con características similares al que se desea construir y se declaran los objetivos generales y específicos de este trabajo.

En el Capítulo 2 se hace una descripción de la estructura general del robot y los materiales del que está fabricado. Posteriormente se desarrollan los modelos cinemáticos y dinámicos que corresponden a las formas de operación de 2 g.d.l y 3 g.d.l. de cada una de las piernas del robot.

En el Capítulo 3 se presentan y se describen los componentes que integran el sistema de control electrónico del robot, el cual consta de los servomotores que permiten la locomoción del hexápodo y de los sensores de fuerza, orientación y visión, que permiten la interacción del robot con el medio ambiente; también se describe la forma de realizar la programación del robot, así como las tarjetas electrónicas embebidas utilizadas para su implementación.

En el Capítulo 4 se muestra la trayectoria deseada para el movimiento de cada una de las piernas del robot y se describe el caminado tipo tripie utilizado para llevar a cabo el desplazamiento del robot.

En el Capítulo 5 se muestran las simulaciones obtenidas empleando el paquete Simulink y la herramienta Hemero, así como, los resultados obtenidos experimentalmente.

Por último, en el Capítulo 6 se mencionan las conclusiones del trabajo y se comentan posibles trabajos a futuro.

1. Introducción

Capítulo 2

Configuración mecánica del robot hexápodo

La locomoción del robot hexápodo es el objetivo general de la presente tesis. La locomoción es la capacidad de trasladarse de un lugar a otro; para que esta función se realice se tiene que hacer uso de diversos elementos; por ejemplo, para que un insecto pueda trasladarse requiere de extremidades o alas según sea el caso, así mismo pasa con los automóviles, los cuales, por medio de ruedas o llantas, pueden moverse; y que decir de un humano, él requiere de piernas pero es capaz de manipular diversos objetos para su traslación. Un humano controla sus piernas a través de la mente, lo mismo sucede con un insecto, pero el automóvil es controlado por el ser humano; el robot necesita de extremidades o piernas para trasladarse y a su vez éstas requieren servomotores para que puedan moverse, y los servomotores necesitan estar controlados por un microcontrolador para desarrollar una función y el microcontrolador necesita contener un programa hecho por el hombre; todo este proceso conlleva muchos elementos, los cuales unidos permiten que el robot pueda moverse, es por ello que en este capítulo se detallan los componentes mecánicos que forman parte de la estructura del robot. Éstos son tres fundamentalmente: los actuadores, las piernas y el cuerpo.

2. Configuración mecánica del robot hexápodo

Los *actuadores*, que mueven las articulaciones, son servomecanismos de rotación que permiten el posicionamiento de cada articulación de forma absoluta mediante un lazo interno de control.

Las *piernas*, cuyo diseño permite soportar tres de los actuadores en el menor espacio posible y permite que la fuerza ejercida por éstos se propague de la forma más eficiente hacia el extremo.

El *cuerpo*, debe tener una forma que minimice las colisiones entre piernas sin evitar por completo el empalme de las zonas alcanzables por cada una.

Una vez presentada la estructura del robot, se detallan, de forma breve, las herramientas de cálculo que se utilizan para determinar los modelos cinemático y dinámico de las piernas del robot, que permitirán realizar simulaciones de la locomoción del mismo.

2.1. Configuración de las piernas del robot

Existen varias configuraciones posibles para un robot con piernas: aquellas que contemplan menos de cuatro piernas presentan problemas más propios de ingeniería de control que de cómputo. Los robots cuadrúpedos y hexápodos permiten un mayor desarrollo de los aspectos de planificación del movimiento, ya que si bien en estos casos los problemas derivados de la estabilidad están relativamente simplificados o son susceptibles de simplificación, en ellos se añade cierta complejidad de software. No existe ninguna ventaja en usar una configuración pentagonal, al contrario, se presentan inconvenientes debido a la simetría compleja. Robots de más de seis piernas sólo son útiles en campos más específicos, además de presentar un mayor costo. Dentro de estos últimos se encuentran el robot "Araña" (véase Figura 2.1(a)) formado por ocho piernas de 3 g.d.l. cada una [Axelrod et al., 2003], el robot "Miriápodo" (véase Figura 2.1(b)) compuesto de 13 extremidades [Salach, 2011] y el robot "Caminador para terrenos difíciles" (véase Figura 2.1(c)) el cual consta de 12 piernas capaces de soportar hasta 90 kilogramos de peso [Robotee, 2013].

2. Configuración mecánica del robot hexápodo

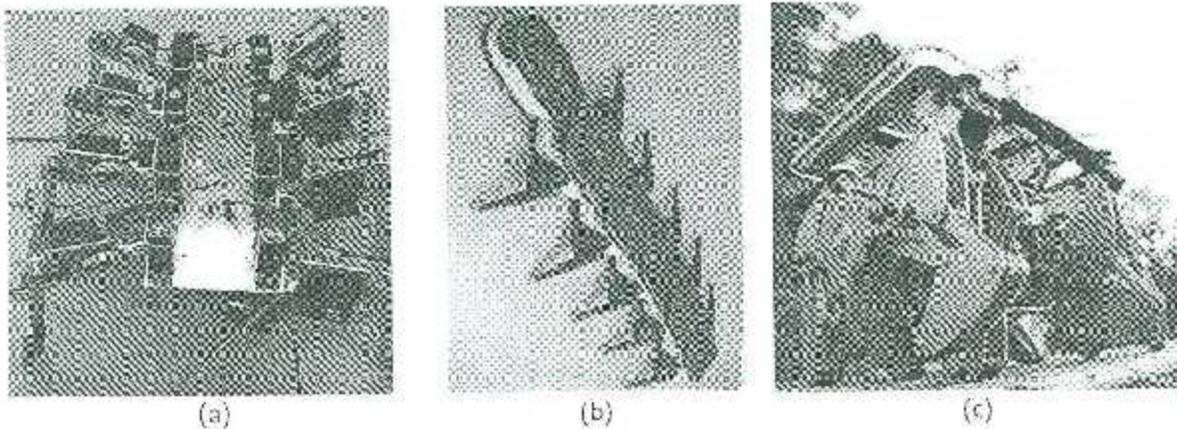


Figura 2.1: Ejemplo de robots de más de seis piernas (a) Robot "Araña" (b) Robot "Miriápodo" (c) Robot "Caminador de terrenos difíciles"

Un concepto importante a la hora de elegir el número de piernas del robot es el de *estabilidad estática*. Este término se refiere a la capacidad del robot para permanecer estable (sin caerse) cuando no está en movimiento. Es más fácil mantener la estabilidad estática en un robot hexápodo que en uno cuadrúpedo por un motivo muy sencillo: hay más piernas libres para repositionar el cuerpo del robot mientras éste se apoya en tres de ellas. En un robot cuadrúpedo, sin embargo, es obligatorio a utilizar un algoritmo de avance en el que las piernas vayan alternándose, puesto que sólo una está disponible una vez apoyado el robot en las otras tres. Por ello se decidió trabajar con la configuración hexápoda.

Dentro de esta configuración, surgen de forma natural dos distribuciones de las piernas alrededor del cuerpo del robot:

- La primera de ellas, denominada "*bilateral*" aunque también es conocida como *lineal*, se puede observar en la Figura 2.2. Esta distribución presenta una simetría a lo largo del eje longitudinal del robot. Tiene la ventaja de una mayor simplicidad a la hora de programar los movimientos, debido a que el robot está preparado físicamente para facilitar el avance en direcciones paralelas al eje de simetría. El inconveniente

2. Configuración mecánica del robot hexápodo

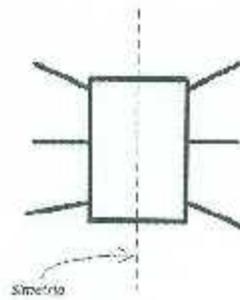


Figura 2.2: Configuración bilateral de un robot hexápodo

fundamental es que el sistema ofrece una mayor limitación en el movimiento en otras direcciones. Esto se puede solucionar implantando un nuevo movimiento, de giro, para cambiar de orientación explícitamente, pero ello complica más el software.

- La distribución *radial*, que se muestra en la Figura 2.3, no sufre el problema comentado, puesto que cualquier dirección es exactamente igual a cualquier otra. En dos dimensiones, esta distribución es totalmente simétrica, y eso lleva a un software más genérico y más simple. No necesita movimientos específicos de giro puesto que es capaz de desplazarse en cualquier dirección sin tener previamente que cambiar de orientación (el robot es omnidireccional), aunque este tipo de movimiento puede implementarse para casos específicos si es necesario.

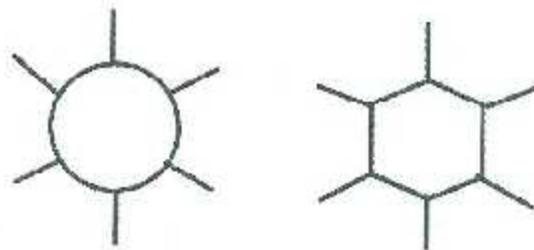


Figura 2.3: Configuración radial de un robot hexápodo

2.1.1. Grados de libertad de una pierna del robot hexápodo

Condicionadas por la elección de configuración hexápoda y distribución radial, las piernas deben contar con la mayor movilidad y accesibilidad dentro de sus espacios de trabajo. Debido a que se utilizan servos para las articulaciones, se presentan únicamente articulaciones de rotación.

En la figura 2.4(a) aparece el esquema de una pierna con 2 g.d.l. Esta estructura permite posicionar el extremo de la pierna en cualquier punto de la superficie de una esfera cuyo centro está en el interior de la primera articulación, pero provoca deslizamientos indeseables. Para localizar completamente el extremo de una pierna hacen falta seis grados de libertad: tres para especificar la posición y tres para especificar la orientación. Sin embargo, puesto que el extremo de la pierna se considera puntual, no hace falta especificar su orientación. Por consiguiente, son necesarios solamente 3 g.d.l. El esquema de una pierna con esta característica aparece en la Figura 2.4(b).

Los 3 g.d.l. de una pierna del robot aparecen en dos tipos de estructuras: actuación in-situ y paralelogramo deformable.

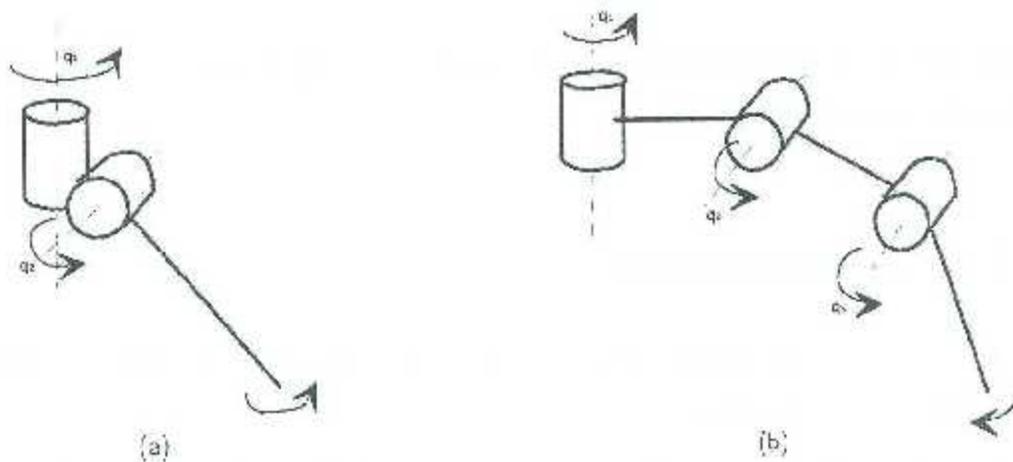


Figura 2.4: Grados de libertad para una pierna (a) 2 g.d.l. (b) 3 g.d.l.

2. Configuración mecánica del robot hexápodo

En la estructura de *actuación in-situ* (véase Figura 2.5(a)), los motores se sitúan directamente en las articulaciones. Esto permite una mayor simplicidad en la función que relaciona posición del servo con posición de la articulación. Presenta sin embargo el inconveniente de un mayor esfuerzo de la estructura, aunque éste es perfectamente soportable seleccionando los materiales adecuados para el robot.

La pierna tipo *paralelogramo deformable* (véase Figura 2.5(b)) consiste en un paralelogramo cuyos ángulos pueden variar mediante servos situados lejos de la articulación. Aunque con este diseño se logran evitar esfuerzos importantes debido a que el centro de gravedad de la pierna se sitúa más cercano al robot, también se acentúan las posibles holguras que con toda seguridad aparecerán en la estructura.

Además genera una mayor complejidad en la función anteriormente mencionada.



Figura 2.5: Posibles estructuras para las piernas de un robot (a) actuación in-situ, y (b) paralelogramo deformable

2.1.2. Diseño definitivo

El robot a utilizar a lo largo del desarrollo del presente trabajo de tesis es un dispositivo con seis piernas, cada una de las cuales consta de tres articulaciones de rotación (3 g.d.l.) capaces de posicionar el extremo de la pierna en cualquier punto dentro de su espacio de trabajo. Se emplea la estructura de un robot basado en el hexápodo "Phoenix" mostrado en la Figura 2.6, el cual es un modelo de la empresa Lynxmotion. Está equipado con servomotores, los cuales son responsables del movimiento de las articulaciones y están

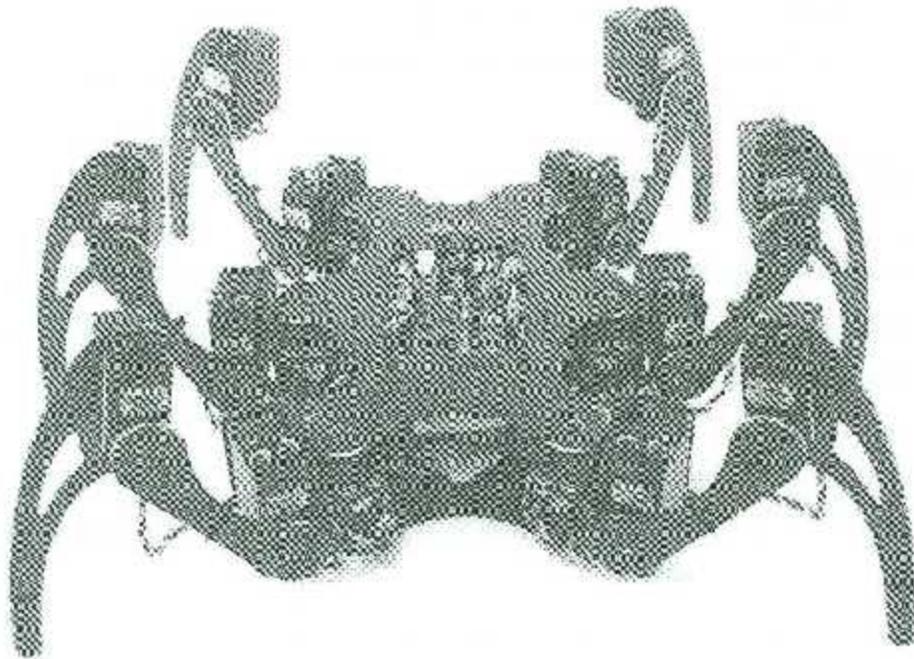


Figura 2.6: Vista 3D del robot hexápodo Phoenix

están situados en las mismas. La forma del robot fue especialmente elegida para mantener el centro de masa del robot en su centro geométrico, para que de esta forma se mantenga el equilibrio del tórax durante la locomoción del robot. La energía cinética acumulada como consecuencia de la forma física del robot le permite llevar a bordo la suficiente cantidad de peso para incluir los servomotores de las piernas, así como el sistema electrónico sensorial de a bordo y el sistema electrónico con microcontrolador que implementa el algoritmo de locomoción del robot.

Cada una de las piernas de robot está equipada con un sensor de fuerza montado en la parte posterior del extremo final, lo que permite que el robot detecte los puntos de apoyo del extremo final de cada pierna sobre una superficie. Las seis piernas del robot son mecánicamente idénticas. Para la implementación del robot móvil fue necesario llevar a cabo un proceso de diseño de prueba y error para determinar las dimensiones apropiadas de la longitud de los eslabones de cada extremidad. El principal parámetro de diseño

2. Configuración mecánica del robot hexápodo

tomado en cuenta es el par eléctrico máximo y las dimensiones de los servoactuadores del robot. Muchas de las partes de la estructura están implementadas con fierro vaciado.

Los actuadores

Los actuadores escogidos para mover las articulaciones del robot son servomotores Up-tech CDS5516 los cuales son compatibles funcionalmente con los servomotores Dynamixel AX 12 de Bioloid. Estos son muy apropiados por lo siguiente:

- Cuentan con un módulo interno de control realimentado PID de posición. Así, si se los desvía de la posición deseada, tienden siempre a volver a la misma, minimizando el error.
- La relación fuerza ejercida/consumo es relativamente alta.
- Los hay de diversos tamaños y pesos.
- Las órdenes que reciben siguen un protocolo de comunicación síncrono en serie I^2C , logrando controlar varios servomotores con tan sólo un ducto de conexión en paralelo.
- Son de relativamente bajo costo.
- Permiten la lectura de la posición a través del puerto de datos en serie.

Para más detalles sobre los servomotores utilizados véase en el capítulo 3, la sección 3.2.

Las piernas

El dibujo simplificado de una pierna aparece en la Figura 2.7. Las tres piezas que la componen se han diseñado ajustando sus dimensiones para conseguir el mejor compromiso entre dos objetivos contrapuestos:

- Espacio de trabajo lo más amplio posible.
- Holgas mínimas y estructura compacta.

2. Configuración mecánica del robot hexápodo

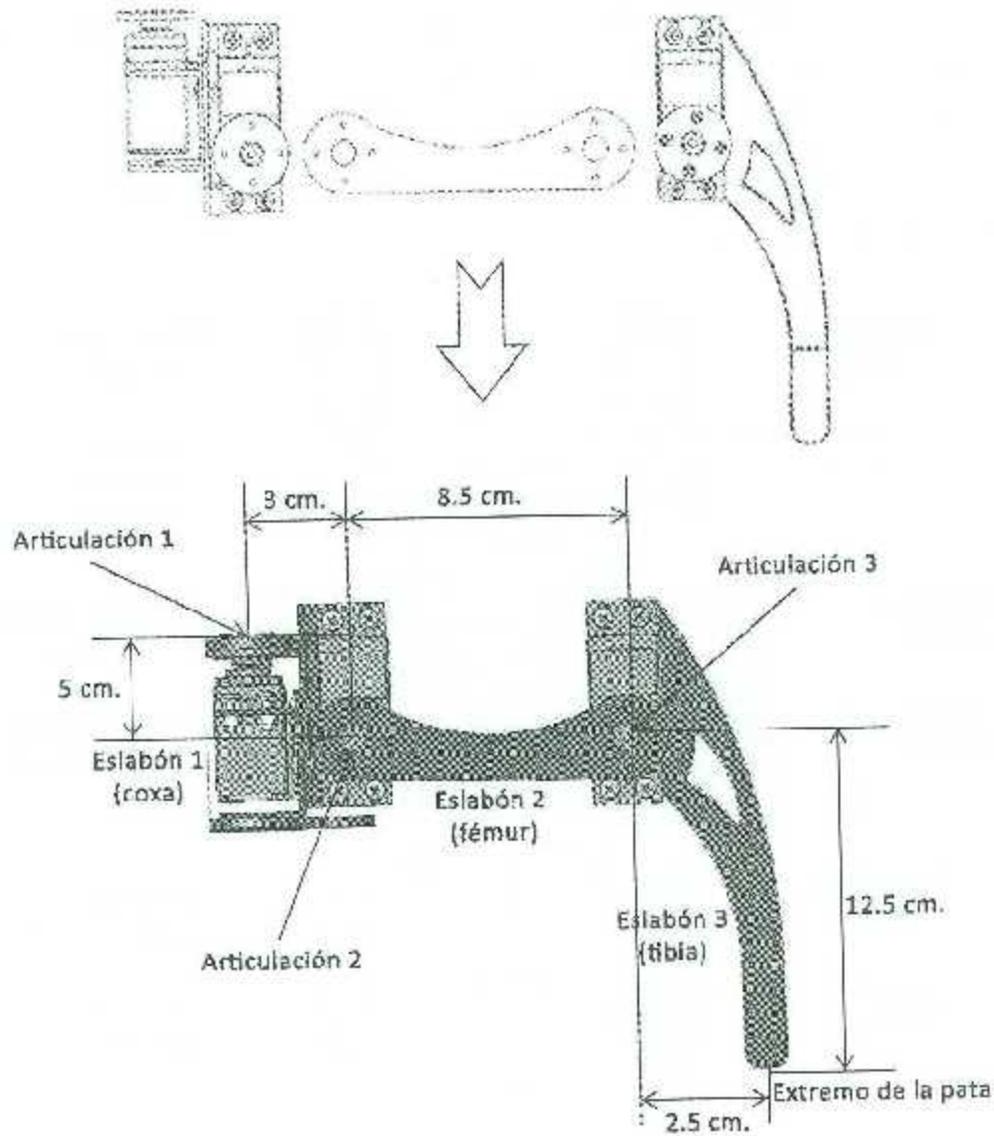


Figura 2.7: Ensamblaje y dimensiones de una de las piernas del robot hexápodo

El cuerpo

El diseño del cuerpo se ha hecho teniendo en cuenta el diseño previamente realizado de las piernas. Basándose en la distribución de las piernas, se debe considerar que sus dimensiones no deben ser demasiado grandes, para evitar futuras diferencias entre la realidad y

2. Configuración mecánica del robot hexápodo

el modelo cinemático del robot debidas a holguras e imprecisiones, pero tampoco deben ser tan pequeñas como para permitir un gran empalme en los espacios de trabajo de cada pierna, aunque una cierta conpartición de espacio sí es deseable ya que en el robot debe haber lugar para alojar las tarjetas controladoras [Sánchez y López, 2005]. Un esquema del cuerpo puede verse en la Figura 2.8

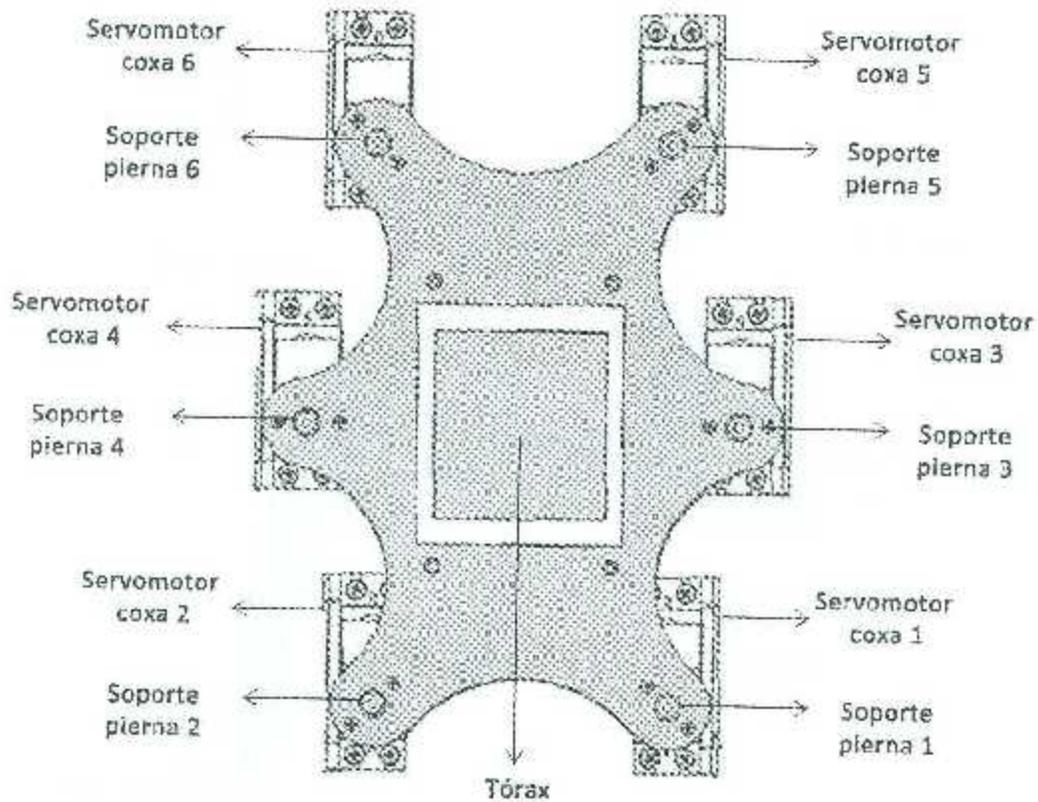


Figura 2.8: Cuerpo del robot hexápodo

2.2. Modelado cinemático



Figura 2.9: Entradas y salidas de un robot

Un robot puede ser descrito a través de un modelo matemático no lineal. Las entradas u al robot pueden ser las velocidades o los pares aplicados a cada una de las articulaciones. Las salidas y son, generalmente, las posiciones articulares o la postura del extremo final del robot.

En ésta sección se estudia la matemática necesaria para generar el movimiento del robot hexápodo con ayuda del modelo cinemático inverso de cada una de las piernas del hexápodo por separado (en total seis piernas). Cabe mencionar que en esencia el modelo cinemático inverso para cada una de las piernas será el mismo debido a que poseen la misma estructura mecánica, es decir, 3 articulaciones, 4 eslabones (contando el eslabón de la base) y mismas distancias geométricas. Cada una de las piernas del hexápodo sólo se diferencia en el marco de referencia del origen (del eslabón de la base) debido a que se encuentran distribuidas alrededor del cuerpo del hexápodo.

Una vez obtenido el modelo cinemático inverso de una de las piernas, será suficiente para ordenarle a cada pierna del hexápodo que se mueva a una posición deseada en el espacio planar (x, y) sin importar la orientación de cada una de las piernas, sino sólo tomando en cuenta la posición dentro del modelo cinemático inverso.

Para obtener el modelo cinemático inverso de una pierna del hexápodo, primero se obtendrá el modelo cinemático directo de la misma pierna, para después despejar de la ecuaciones de posición del modelo cinemático directo los ángulos de cada articulación en función de la posición del extremo de la pierna.

Un método general para obtener el modelo cinemático directo de un robot fue propuesto

2. Configuración mecánica del robot hexápodo

por J. Denavit y R. S. Hartenberg en 1955. Este método es el más utilizado en la actualidad, y existen dos versiones: el método D-H original [Barricatos et al, 1999] y el método D-H modificado [Craig, 2006].

El método parte de asignar a cada eslabón del robot un marco coordenado que se mueve junto con él. Luego, se determina la postura relativa entre cada par de marcos coordenados consecutivos. La postura del elemento final se obtiene entonces combinando todas las posturas relativas desde la base hasta el extremo [Pámanes, 2011].

2.2.1. Modelado cinemático de posición

Cinemática directa

La cinemática directa es una función vectorial f_D que relaciona las n coordenadas articulares agrupadas en el vector $q = [q_1 q_2 \dots q_n]^T \in \mathbb{R}^n$ con las coordenadas cartesianas $[x, y, z]^T \in \mathbb{R}^3$ que dan la posición y los ángulos de Euler $[\theta, \phi, \psi] \in \mathbb{R}^3$ que dan la orientación del extremo final del robot, tomando en cuenta las propiedades geométricas del sistema mecánico; es decir:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ \theta \\ \phi \\ \psi \end{bmatrix} = f_D(q) \quad (2.1)$$

En esta definición, f_D es una función continua que mapea de \mathbb{R}^n a \mathbb{R}^6 .

El objetivo del modelo cinemático directo es establecer una función que describa la postura (posición y orientación) del elemento terminal de un robot a partir del conocimiento de las variables articulares.

Existen varios métodos de obtener el modelo cinemático directo de un robot como

2. Configuración mecánica del robot hexápodo

el que se muestra en la Figura 2.10. Pero el método que aquí se estudia es usando los parámetros y el algoritmo de Denavit-Hartenberg.

En el método propuesto por Denavit-Hartenberg se colocan marcos coordinados en cada uno de los eslabones del robot, y luego se obtienen las matrices de transformación homogénea entre cada par de marcos consecutivos, las cuales permiten obtener los componentes de un vector de posición de un sistema de coordenadas a otro, sin importar si coinciden o no los orígenes de ambos marcos.

Una parte importante del método consiste en colocar los marcos de tal forma que la obtención de las matrices de transformación homogéneas resulte sencilla. Denavit y Hartenberg encontraron una forma de ubicar los marcos de modo que se requieren únicamente cuatro parámetros para definir completamente una matriz de transformación homogénea. Esos parámetros se conocen desde entonces como parámetros Denavit-Hartenberg (o simplemente parámetros D-H), denotados por θ_i , d_i , l_i y α_i y se calculan de la siguiente forma para los marcos entre los eslabones $i - 1$ e i [Reyes, 2011]:

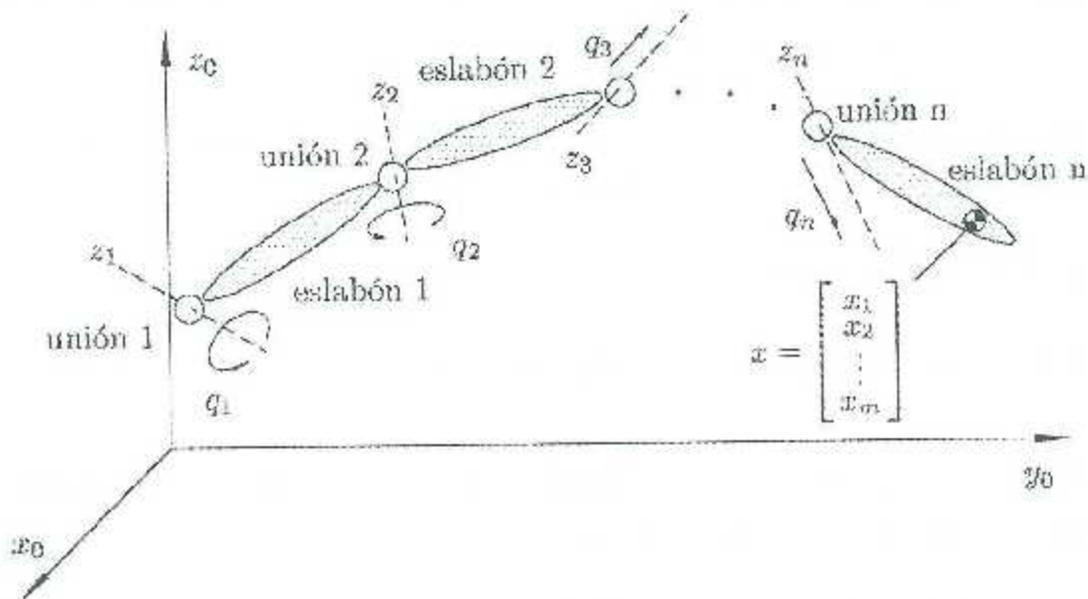


Figura 2.10: Arquitectura básica de un robot manipulador serial

2. Configuración mecánica del robot hexápodo

- l_i Es la distancia del eje z_{i-1} hacia el eje z_i medida sobre el eje x_i .
- α_i es el ángulo de torsión, el cual representa el ángulo entre los ejes z_{i-1} y z_i medido en el sentido contrario de las manecillas del reloj alrededor del eje x_i .
- d_i es la distancia del eje x_{i-1} al eje x_i a lo largo del eje z_{i-1} .
- θ_i es el ángulo entre los ejes x_{i-1} y x_i alrededor del eje z_{i-1} . El signo positivo de θ_i es el sentido contrario a las manecillas del reloj.

En general se tiene el siguiente procedimiento para asignar los marcos de referencia asociados a los eslabones del robot [Reyes, 2011].

- El eje z_i se asigna rigidamente a la articulación $i + 1$. Es decir, z_0 es el eje de la articulación 1, z_1 es el eje de la articulación 2, y así sucesivamente.
- Localizar el origen O_i del sistema de referencia $\Sigma_i(x_i, y_i, z_i)$ en la intersección del eje z_i con la normal común a los ejes z_{i-1} y z_i .
- Seleccionar el eje x_i sobre la normal que une los ejes z_{i-1} y z_i en dirección de la articulación $i + 1$ hacia la articulación i .
- Definir el ángulo de torsión α_i .
- Seleccionar el eje y_i por la regla de la mano derecha.

En la Figura 2.11 se muestra un ejemplo de dos marcos consecutivos en los que se indican los parámetros D-H correspondientes.

Una vez que se obtienen los parámetros D-H siguiendo las reglas anteriores, la matriz de transformación homogénea correspondiente se obtendrá siguiendo la fórmula general descrita por:

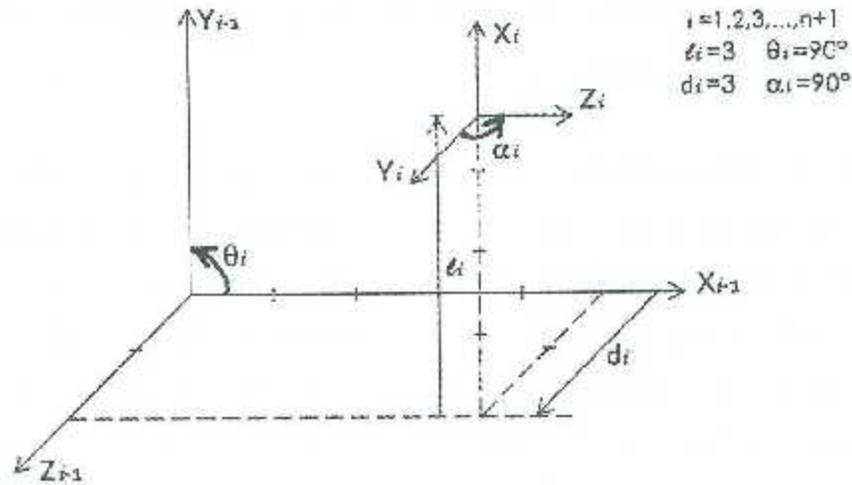


Figura 2.11: Parámetros D-H

$$H_{i-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i) \cos(\alpha_i) & \sin(\theta_i) \sin(\alpha_i) & l_i \cos(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & \cos(\theta_i) \cos(\alpha_i) & -\cos(\theta_i) \sin(\alpha_i) & l_i \sin(\theta_i) \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Cinemática inversa

La cinemática inversa es un problema no lineal que permite encontrar las coordenadas articulares en función de las coordenadas postura del extremo del robot. Este problema representa la solución inversa de la ecuación (2.1). dada la postura en variables operacionales $\{x, y, z, \theta, \phi, \psi\}$ del extremo final del robot, se obtiene el vector de variables articulares:

$$\mathbf{q} = f_R^{-1}(x, y, z, \theta, \phi, \psi) \quad (2.3)$$

Existen varios métodos para resolver el modelo cinemático inverso de un robot manipulador. Pero en este proyecto se usa un método geométrico para obtener las ecuaciones matemáticas que describan las variables articulares en función de la posición (sin tomar en cuenta la orientación) del extremo de cada pata, (ver sección 2.2.3).

2. Configuración mecánica del robot hexápodo

2.2.2. Modelado cinemático directo de posición para una pierna del robot hexápodo

Es importante seleccionar una configuración mecánica para la pierna del robot que maximice el movimiento y que imponga una menor cantidad de restricciones en la locomoción del robot. Para la implementación de cada una de las piernas del robot hexápodo, se utiliza una cadena cinemática de tres articulaciones de revolución (ó RRR), las cuales permiten un movimiento relativo de rotación entre los eslabones que se conectan. Cabe mencionar que en esencia el modelo cinemático para cada una de las piernas del hexápodo será el mismo debido a que poseen la misma estructura mecánica, es decir, 3 articulaciones, 4 eslabones (contando el eslabón de la base) y mismas distancias geométricas. Cada una de las piernas del hexápodo sólo se diferencia en el marco de referencia del origen (del eslabón de la base) debido a que se encuentran distribuidas alrededor del cuerpo del hexápodo.

Para la obtención del modelo cinemático directo de cada pierna se seguirá el algoritmo propuesto por Denavit-Hartenberg, el cual es usado para robots manipuladores seriales de n grados de libertad, y se describió en la subsección 2.2.1.

Antes de aplicar el método de Denavit-Hartenberg, para obtener el modelo cinemático directo, se presenta el diagrama de alambre de una pierna del hexápodo (véase Figura 2.12), a utilizar para dicho modelado.

Solución para dos g.d.l

En este caso, con la finalidad de minimizar el cálculo computacional y que el robot trabaje en un plano, se opta por modelar únicamente dos articulaciones.

En base al diagrama de alambre de la Figura 2.12 se presenta a continuación el diagrama de alambre en la Figura 2.13, en el cual se asignan los marcos de referencia de acuerdo a la convención de Denavit-Hartenberg, únicamente a las dos articulaciones a

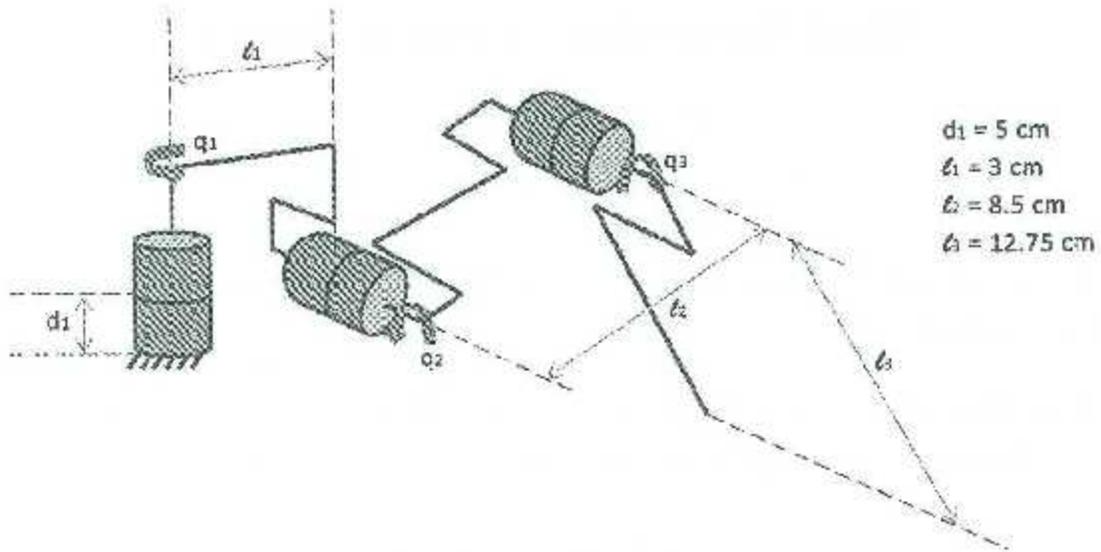


Figura 2.12: Diagrama de alambre de una pierna del hexápodo

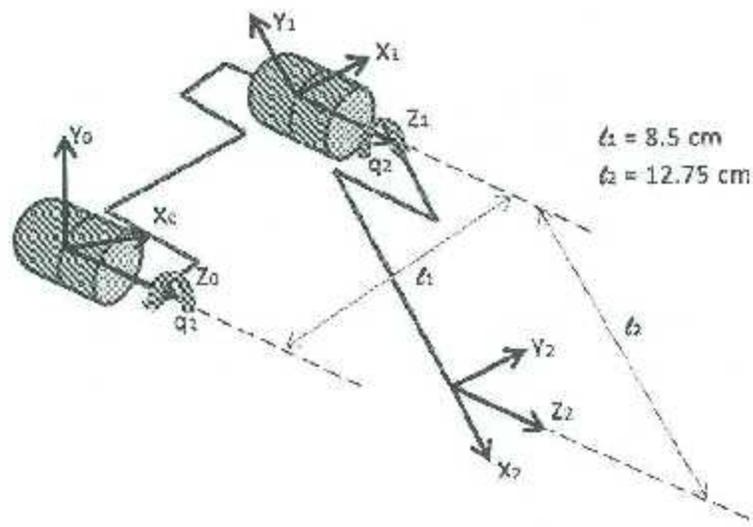


Figura 2.13: Marcos de referencia para dos articulaciones de una pierna del hexápodo

modelar (2 y 3) para que el robot trabaje en un plano. Una vez obtenidos los marcos de referencia, se obtienen los cuatro parámetros D-II, (véase Tabla 2.1). Para la obtención de los parámetros D-II es necesario saber que $i = 1, 2$, para el caso de 2 g.d.l de la Figura 2.13.

2. Configuración mecánica del robot hexápodo

Tabla 2.1: Parámetros Denavit-Hartenberg de la figura 2.13

i	l_i	α_i	d_i	θ_i
1	l_1	0	0	q_1
2	l_2	0	0	$-q_2$

Una vez que se tienen los parámetros D-H, las Matrices de Transformación Homogéneas se obtienen usando 2.2.

Conociendo que $i = 1$ y 2 (2 g.c.l.), y utilizando la Tabla 2.1, las matrices de transformación homogénea entre cada par de marcos consecutivos de la Figura 2.13 son:

$$H_1^0 = \begin{bmatrix} \cos(q_1) & -\text{sen}(q_1) & 0 & l_1 \cos(q_1) \\ \text{sen}(q_1) & \cos(q_1) & 0 & l_1 \text{sen}(q_1) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$$H_2^1 = \begin{bmatrix} \cos(q_2) & \text{sen}(q_2) & 0 & l_2 \cos(q_2) \\ -\text{sen}(q_2) & \cos(q_2) & 0 & -l_2 \text{sen}(q_2) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Para obtener la matriz de transformación homogénea H_2^0 , que relaciona el marco del extremo de la pierna con el marco de la base, se realiza una multiplicación matricial de (2.4) y (2.5), como se muestra en la Ecuación (2.6).

$$H_2^0 = H_1^0 H_2^1 = \begin{bmatrix} \cos(q_1 - q_2) & -\text{sen}(q_1 - q_2) & 0 & l_1 \cos(q_1) + l_2 \cos(q_1 - q_2) \\ \text{sen}(q_1 - q_2) & \cos(q_1 - q_2) & 0 & l_1 \text{sen}(q_1) + l_2 \text{sen}(q_1 - q_2) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Por lo tanto la cinemática directa para 2 g.c.l. de una pierna del robot es:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = f_R(q) = \begin{bmatrix} l_1 \cos(q_1) + l_2 \cos(q_1 - q_2) \\ l_1 \text{sen}(q_1) + l_2 \text{sen}(q_1 - q_2) \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Solución para tres g.d.l.

En este caso, con la finalidad que el robot trabaje en el espacio (x, y, z) , se incluyen las tres articulaciones de cada pierna del robot. Cabe mencionar que este modo de operación requiere mayor requerimiento computacional pero permite el movimiento menos restringido de cada una de las piernas del robot.

Para la obtención del modelo cinemático directo se seguirá el algoritmo propuesto por Denavit-Hartenberg, descrito en la subsección 2.2.1.

En base al diagrama de alambre de la Figura 2.12 se obtiene a continuación el diagrama de la Figura 2.14, en el cual se asignan los marcos de referencia de acuerdo a la convención de Denavit-Hartenberg a las tres articulaciones a modelar.

Una vez obtenidos los marcos de referencia, se obtienen los parámetros D-H, (véase Tabla 2.2). Para la obtención de los parámetros D-H es necesario saber que $i = 1, 2, 3$, para el caso de 3 g.d.l. de la Figura 2.14.

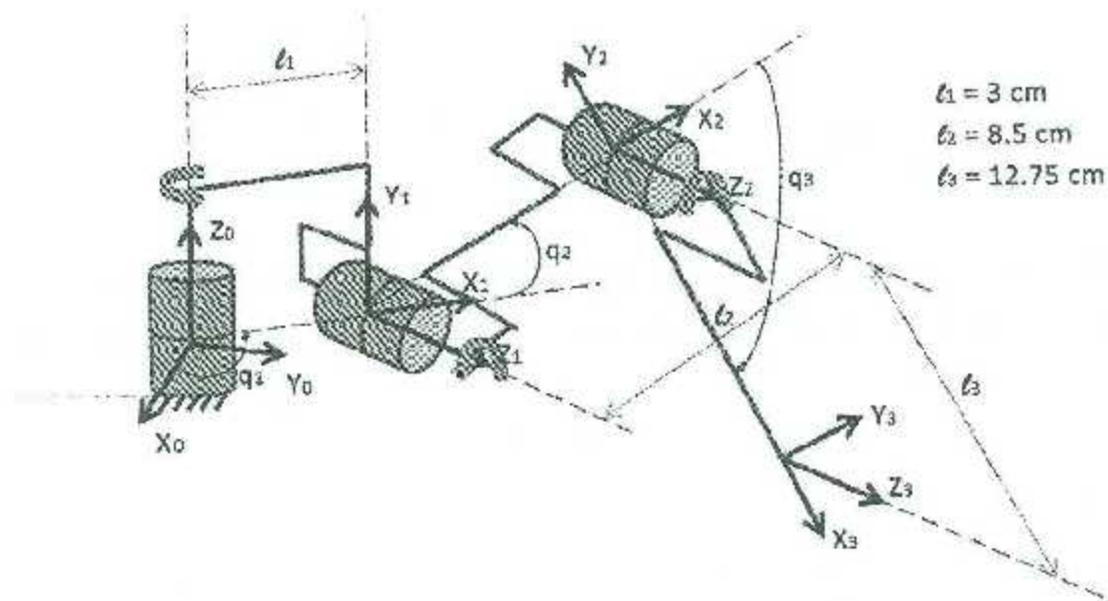


Figura 2.14: Marcos de referencia para tres articulaciones de una pierna del hexápodo

2. Configuración mecánica del robot hexápodo

Tabla 2.2: Parámetros Denavit-Hartenberg de la figura 2.14

i	l_i	α_i	d_i	θ_i
1	l_1	90	0	q_1
2	l_2	0	0	q_2
3	l_3	0	0	$-q_3$

Una vez que se tienen los parámetros D-H, las matrices de transformación homogéneas se obtienen usando (2.2) y la Tabla 2.1, las matrices de transformación homogénea entre cada par de marcos consecutivos de la Figura 2.14 son:

$$H_1^0 = \begin{bmatrix} \cos(q_1) & 0 & \sin(q_1) & l_1 \cos(q_1) \\ \sin(q_1) & 0 & -\cos(q_1) & l_1 \sin(q_1) \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

$$H_2^1 = \begin{bmatrix} \cos(q_2) & -\sin(q_2) & 0 & l_2 \cos(q_2) \\ \sin(q_2) & \cos(q_2) & 0 & l_2 \sin(q_2) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

$$H_3^2 = \begin{bmatrix} \cos(q_3) & \sin(q_3) & 0 & l_3 \cos(q_3) \\ -\sin(q_3) & \cos(q_3) & 0 & -l_3 \sin(q_3) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Para obtener la matriz de transformación homogénea H_3^0 , que relaciona el marco del extremo de la perna con el marco de la base, se realiza una multiplicación matricial de (2.8)-(2.10), es decir,

$$H_3^0 = H_1^0 H_2^1 H_3^2$$

lo que da como resultado:

$$\begin{bmatrix} \cos(q_2 - q_3) \cos(q_1) & -\sin(q_2 - q_3) \cos(q_1) & \sin(q_1) & \cos(q_1)[l_1 + l_2 \cos(q_2) + l_3 \cos(q_2 - q_3)] \\ \cos(q_2 - q_3) \sin(q_1) & -\sin(q_2 - q_3) \sin(q_1) & -\cos(q_1) & \sin(q_1)[l_1 - l_2 \cos(q_2) + l_3 \cos(q_2 - q_3)] \\ \sin(q_2 - q_3) & \cos(q_2 - q_3) & 0 & l_2 \sin(q_2) + l_3 \sin(q_2 - q_3) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Por lo tanto la cinemática directa para 3 g.c.l. de una pierna del robot es:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = f_R(q) = \begin{bmatrix} \cos(q_1)[l_1 - l_2 \cos(q_2) + l_3 \cos(q_2 - q_3)] \\ \sin(q_1)[l_1 + l_2 \cos(q_2) + l_3 \cos(q_2 - q_3)] \\ l_2 \sin(q_2) + l_3 \sin(q_2 - q_3) \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

2.2.3. Modelado cinemático inverso de posición para una pierna del robot hexápodo

Obtener la solución del modelo cinemático inverso de posición es importante para especificar las trayectorias de movimiento de las variables articulares de cada una de las piernas del robot. Una vez obtenido dicho modelo, será suficiente para ordenarle a cada pierna del hexápodo que se mueva a una posición deseada en el espacio tridimensional (x, y, z) , o en el plano (x, y) , sin importar la orientación de cada una de las piernas, sino solo tomando en cuenta la posición dentro del modelo cinemático inverso.

Solución para dos g.d.l.

En esta ocasión las trayectorias se obtienen a partir de la transformación de movimiento de la trayectoria asignada en coordenadas de trabajo (x, y) , correspondientemente con el movimiento deseado del marco de referencia del extremo final de la pierna. Entonces el objetivo es obtener las dos variables de articulación q_1 y q_2 que corresponden a la posición deseada del marco del extremo final.

Se deben considerar las siguientes limitantes: todas las articulaciones permiten la rotación sólo sobre un eje, los eslabones de la articulaciones 2 y 3 siempre tienen una rotación en ejes paralelos; además se deben considerar las limitaciones físicas que se pueden determinar para el ángulo de cada articulación.

Para la solución del modelo cinemático inverso de una pierna del hexápodo con dos articulaciones, se emplea un diagrama geométrico (véase figura 2.15) obtenido del diagrama de alambre de la Figura 2.13.

2. Configuración mecánica del robot hexápodo

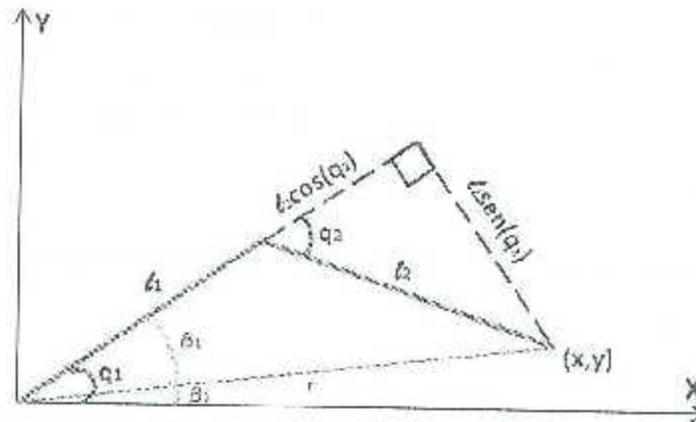


Figura 2.15: Esquema geométrico para una pierna de dos articulaciones

Según el diagrama mostrado en la Figura 2.15, se puede deducir por trigonometría que $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ y que:

$$\begin{aligned} \sqrt{x^2 + y^2} &= \sqrt{(l_1 + l_2 \cos(q_2))^2 + (l_2 \operatorname{sen}(q_2))^2} \\ x^2 + y^2 &= l_1^2 + l_2^2 + 2l_1l_2 \cos(q_2). \end{aligned} \quad (2.13)$$

entonces despejando q_2 de la ecuación (2.13)

$$q_2 = \arccos \left[\frac{x^2 + y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1l_2} \right]. \quad (2.14)$$

De manera similar se observa que q_1 está dado por $q_1 = \beta_1 + \beta_2$, donde

$$\begin{aligned} \beta_1 &= \operatorname{atan2} \left(\frac{l_2 \operatorname{sen}(q_2)}{l_1 - l_2 \cos(q_2)} \right) \\ \beta_2 &= \operatorname{atan2} \left(\frac{y}{x} \right), \end{aligned} \quad (2.15)$$

por lo tanto

$$q_1 = \operatorname{atan2} \left(\frac{l_2 \operatorname{sen}(q_2)}{l_1 - l_2 \cos(q_2)} \right) + \operatorname{atan2} \left(\frac{y}{x} \right) \quad (2.16)$$

Solución para tres g.d.l.

En este caso las trayectorias se obtienen a partir de la transformación de movimiento de la trayectoria asignada en coordenadas de trabajo (x, y, z) , correspondientemente con

2. Configuración mecánica del robot hexápodo

el movimiento deseado del marco de referencia del extremo final de la pierna. Entonces el objetivo es obtener las tres variables articulares q_1 , q_2 y q_3 que corresponden a la posición deseada (x, y, z) del marco del extremo final.

Se deben considerar las siguientes limitantes: todas las articulaciones permiten la rotación sólo sobre un eje, los eslabones de las articulaciones 2 y 3 siempre tienen una rotación en ejes paralelos, y además se deben considerar las limitaciones físicas que se pueden determinar para el ángulo de cada articulación.

Para la solución del modelo cinemático inverso de una pierna del hexápodo de tres articulaciones, se emplea un diagrama geométrico (véase Figura 2.16), obtenido del diagrama de alambre de la Figura 2.14.

El ángulo de la primera articulación se obtiene mediante la función arco-tangente al observar la Figura 2.16,

$$q_1 = \arctan\left(\frac{y}{x}\right) \quad (2.17)$$

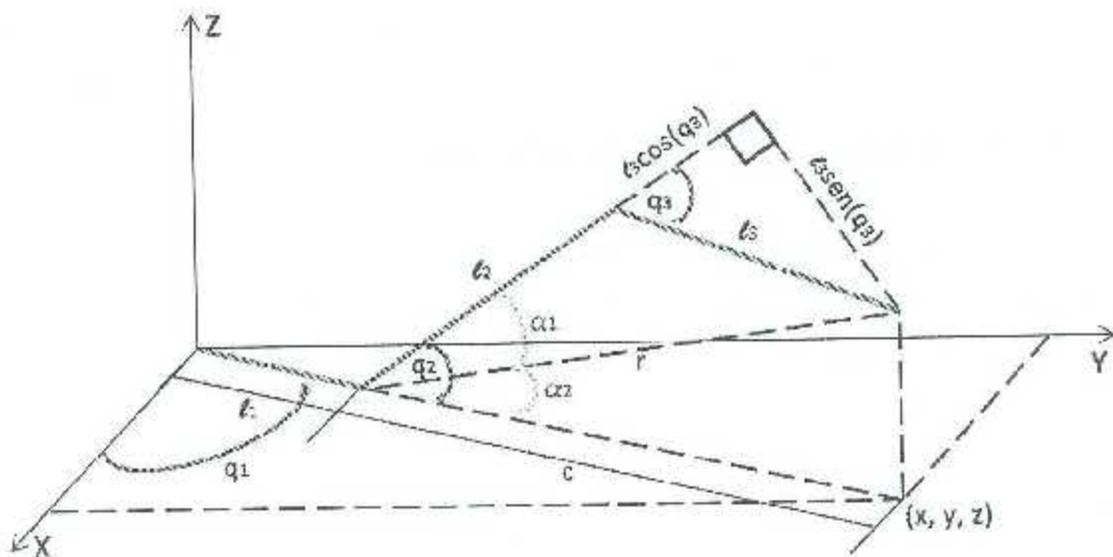


Figura 2.16: Esquema geométrico para una pierna de tres articulaciones

2. Configuración mecánica del robot hexápodo

Según el diagrama mostrado en la Figura 2.16, se puede deducir por trigonometría que $c = \sqrt{x^2 + y^2}$, y

$$r = \sqrt{c^2 + z^2} \quad (2.18)$$

$$r = \sqrt{(l_3 \sin(q_3))^2 + (l_2 + l_3 \cos(q_3))^2} \quad (2.19)$$

Igualando las ecuaciones (2.18) y (2.19) se tiene:

$$\sqrt{c^2 + z^2} = \sqrt{(l_3 \sin(q_3))^2 + (l_2 + l_3 \cos(q_3))^2} \quad (2.20)$$

$$c^2 + z^2 = l_2^2 + l_3^2 + 2l_2l_3 \cos(q_3),$$

entonces despejando q_3 de la ecuación (2.20) se llega a

$$q_3 = \arccos \left[\frac{x^2 + y^2 + z^2 - l_2^2 - l_3^2}{2l_2l_3} \right]. \quad (2.21)$$

De manera similar se observa que q_2 está dado por $q_2 = \alpha_1 + \alpha_2$, donde

$$\alpha_1 = \text{atan2} \left(\frac{l_3 \sin(q_3)}{l_2 + l_3 \cos(q_3)} \right) \quad (2.22)$$

$$\alpha_2 = \text{atan2} \left(\frac{z}{c} \right),$$

por lo tanto

$$q_2 = \text{atan2} \left(\frac{l_3 \sin(q_3)}{l_2 + l_3 \cos(q_3)} \right) + \text{atan2} \left(\frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}} \right) \quad (2.23)$$

2.2.4. Modelado cinemático de velocidad

La cinemática diferencial directa relaciona las velocidades articulares con las velocidades en el espacio de trabajo, por medio de la matriz jacobiana del robot, ésta se obtiene por el método de propagación de velocidades cuya ecuación está dada por:

$$v = J(q)\dot{q} \quad (2.24)$$

donde v , para el robot a utilizar, puede calcularse por

$$v = \sum_{i=1}^n R_{0,i}^0 (\omega_i^{i-1} \times p_n^{i-1}), \quad (2.25)$$

2. Configuración mecánica del robot hexápodo

donde ω_i^{i-1} es la velocidad de \mathcal{F}_i para articulaciones rotacionales, \mathbf{p}_n^i representa las coordenadas x_i , y_i y z_i del órgano terminal visto desde el marco i , es decir, $\mathbf{p}_n^i = [x_i^i \ y_i^i \ z_i^i]^T$ y v son las velocidades cartesianas del órgano terminal visto desde el marco 0, o sea $v = [\dot{x} \ \dot{y} \ \dot{z}]$

Mientras que la cinemática diferencial inversa relaciona las velocidades en el espacio de trabajo con las velocidades articulares, por medio de la matriz inversa del jacobiano del robot, ésta se puede expresar de la siguiente forma [Pámanes, 2011]:

$$\dot{q} = J^{-1}(\dot{q})v. \quad (2.26)$$

2.2.5. Jacobiano de una pierna del hexápodo

Cálculo para dos g.d.l

La ecuación (2.25) desarrollada para las dos articulaciones de una pierna del robot hexápodo queda:

$$v = (\omega_1^0 \times \mathbf{p}_2^0) + R_2^0(\omega_2^1 \times \mathbf{p}_2^1) \quad (2.27)$$

donde

$$\begin{aligned} \omega_1^0 &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{q}_1 \end{bmatrix} \\ \omega_2^1 &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} \\ \mathbf{p}_2^0 &= \begin{bmatrix} x_2^0 \\ y_2^0 \\ z_2^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 \cos(q_1) + l_2 \cos(q_1 - q_2) \\ l_1 \sin(q_1) + l_2 \sin(q_1 - q_2) \\ 0 \end{bmatrix} \\ \mathbf{p}_2^1 &= \begin{bmatrix} x_2^1 \\ y_2^1 \\ z_2^1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_2 \cos(q_2) \\ -l_2 \sin(q_2) \\ 0 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

2. Configuración mecánica del robot hexápodo

y la matriz de rotación está dada por:

$$R_1^0 = \begin{bmatrix} \cos(q_1) & -\sin(q_1) & 0 \\ \sin(q_1) & \cos(q_1) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

siendo $v = \begin{bmatrix} \dot{x} & \dot{y} \end{bmatrix}$ el vector de velocidades cartesianas del extremo de la pierna y $\dot{q} = \begin{bmatrix} \dot{q}_1 & \dot{q}_2 \end{bmatrix}$ las velocidades de los servomotores. Al desarrollar la ecuación (2.27) se puede obtener un jacobiano reducido, que es

$$J(\dot{q}) = \begin{bmatrix} j_{11} & j_{12} \\ j_{21} & j_{22} \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

$$j_{11} = [l_1 \sin(q_1) + l_2 \sin(q_1 - q_2)]$$

$$j_{12} = l_2 \cos(q_1 + q_2)$$

$$j_{21} = l_1 \cos(q_1) + l_2 \cos(q_1 - q_2)$$

$$j_{22} = l_2 \cos(q_1 - q_2),$$

por lo tanto la cinemática diferencial directa se define como

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = J(\dot{q}) = \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix}, \quad (2.29)$$

Mientras que la cinemática diferencial inversa se puede expresar de la siguiente forma:

$$J^{-1}(\dot{q}) = \frac{1}{\det(J)} \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

$$\det(J) = l_2 [\cos(q_1 - q_2) \sin(q_1) + \cos(q_1 + q_2) \cos(q_1)] + l_2 [\cos(q_1 - q_2) \sin(q_1 - q_2) + \cos(q_1 + q_2) \cos(q_1 - q_2)]$$

$$h_{11} = \cos(q_1 - q_2)$$

$$h_{12} = \cos(q_1 - q_2)$$

$$h_{21} = \frac{l_1 \cos(q_1) + l_2 \cos(q_1 - q_2)}{l_2}$$

$$h_{22} = \frac{l_1 \sin(q_1) + l_2 \sin(q_1 - q_2)}{l_2}$$

Cálculo para tres g.d.l.

La ecuación (2.25) desarrollada para las tres articulaciones de una pierna del robot hexápodo queda:

$$v = (\omega_1^0 \times P_3^0) + H_1^0(\omega_2^1 \times P_3^1) + H_2^0(\omega_3^2 \times P_3^2), \quad (2.31)$$

donde

$$\begin{aligned} \omega_1^0 &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{q}_1 \end{bmatrix} \\ \omega_2^1 &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} \\ \omega_3^2 &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix} \\ p_3^0 &= \begin{bmatrix} x_3^0 \\ y_3^0 \\ z_3^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(q_1)[l_1 - l_2 \cos(q_2) + l_3 \cos(q_2 - q_3)] \\ \sin(q_1)[l_1 + l_2 \cos(q_2) + l_3 \cos(q_2 - q_3)] \\ l_2 \sin(q_2) + l_3 \sin(q_2 - q_3) \end{bmatrix} \\ p_3^1 &= \begin{bmatrix} x_3^1 \\ y_3^1 \\ z_3^1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_2 \cos(q_2) + l_3 \cos(q_2 - q_3) \\ l_2 \sin(q_2) - l_3 \sin(q_2 - q_3) \\ 0 \end{bmatrix} \\ p_3^2 &= \begin{bmatrix} x_3^2 \\ y_3^2 \\ z_3^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_3 \cos(q_3) \\ -l_3 \sin(q_3) \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

y las matrices de rotación están dadas por:

$$H_1^0 = \begin{bmatrix} \cos(q_1) & 0 & \sin(q_1) \\ \sin(q_1) & 0 & -\cos(q_1) \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

2. Configuración mecánica del robot hexápodo

$$R_2^0 = \begin{bmatrix} \cos(q_1) \cos(q_2) & -\cos(q_1) \sin(q_2) & \sin(q_1) \\ \cos(q_2) \sin(q_1) & -\sin(q_1) \sin(q_2) & -\cos(q_1) \\ \sin(q_1) & \cos(q_2) & 0 \end{bmatrix}$$

siendo $v = [\dot{x} \ \dot{y} \ \dot{z}]$ el vector de velocidades cartesianas del extremo de la pierna y $\dot{q} = [\dot{q}_1 \ \dot{q}_2 \ \dot{q}_3]$ las velocidades de los servomotores. Al desarrollar la ecuación (2.31) se puede obtener un jacobiano reducido, que es

$$J(q) = \begin{bmatrix} j_{11} & j_{12} & j_{13} \\ j_{21} & j_{22} & j_{23} \\ j_{31} & j_{32} & j_{33} \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

$$j_{11} = -\sin(q_1)[l_1 + l_2 \cos(q_2) + l_3 \cos(q_2 - q_3)]$$

$$j_{12} = \cos(q_1)[l_2 \sin(q_1) + l_3 \sin(q_2 - q_3)]$$

$$j_{13} = l_3 \cos(q_1) \sin(q_3 - q_2)$$

$$j_{21} = -\cos(q_1)[l_1 + l_2 \cos(q_2) - l_3 \cos(q_2 - q_3)]$$

$$j_{22} = \sin(q_1)[l_2 \sin(q_1) + l_3 \sin(q_2 - q_3)]$$

$$j_{23} = l_3 \sin(q_1) \sin(q_2 - q_3)$$

$$j_{31} = 0$$

$$j_{32} = l_2 \cos(q_1) - l_3 \cos(q_2 - q_3)$$

$$j_{33} = l_3 \cos(q_2 - q_3)$$

por lo tanto la cinemática diferencial directa se define como

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = J(q) \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix}, \quad (2.33)$$

siendo \dot{x} , \dot{y} y \dot{z} las velocidades cartesianas del extremo de la pierna en el plano.

Mientras que la cinemática diferencial inversa se puede expresar de la siguiente forma:

$$J^{-1}(q) = \frac{1}{\det(J)} \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

$$\begin{aligned} \det(J) = & l_2(-\operatorname{sen}(q_1)^3 \cos(q_2 - q_3) + \operatorname{sen}(q_1)^2 \operatorname{sen}(q_2 - q_3) \cos(q_2)) \\ & + l_2(\cos(q_1)^2 \cos(q_2 - q_3) \operatorname{sen}(q_1) - \cos(q_1)^2 \operatorname{sen}(q_3 - q_2) \cos(q_2)) \\ & + l_3(\cos(q_1)^2 \cos(q_2 - q_3) \operatorname{sen}(q_2 - q_3) - \cos(q_1)^2 \operatorname{sen}(q_3 - q_2) \cos(q_2 - q_1)) \end{aligned}$$

$$h_{11} = -\operatorname{sen}(q_1)l_2(-\operatorname{sen}(q_1) \cos(q_2 - q_3) + \operatorname{sen}(q_2 - q_3) \cos(q_2))$$

$$\begin{aligned} h_{12} = & \cos(q_1)(-\cos(q_2 - q_3)l_2 \operatorname{sen}(q_1) - l_3 \cos(q_2 - q_3) \operatorname{sen}(q_2 - q_3)) \\ & + \cos(q_1)(\operatorname{sen}(q_3 - q_2)l_2 \cos(q_2) - l_3 \operatorname{sen}(q_3 - q_2) \cos(q_2 - q_1)) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h_{13} = & \cos(q_1) \operatorname{sen}(q_1)(\operatorname{sen}(q_1) \operatorname{sen}(q_2 - q_3)l_2 + l_3 \operatorname{sen}(q_2 - q_3)) \\ & - \cos(q_1) \operatorname{sen}(q_1)(-\operatorname{sen}(q_3 - q_2) \operatorname{sen}(q_1)l_2 - l_3 \operatorname{sen}(q_3 - q_2) \operatorname{sen}(q_2 - q_3)) \end{aligned}$$

$$h_{21} = \cos(q_1) \cos(q_2 - q_3)$$

$$h_{22} = -\operatorname{sen}(q_1) \cos(q_2 - q_3)$$

$$h_{23} = \operatorname{sen}(q_1)^2 \operatorname{sen}(q_2 - q_3) - \cos(q_1)^2 \operatorname{sen}(q_3 - q_2)$$

$$h_{31} = -l_3(l_2 \cos(q_2) + l_3 \cos(q_2 - q_3)) \cos(q_1)$$

$$h_{32} = l_3(l_2 \cos(q_2) - l_3 \cos(q_2 - q_3)) \operatorname{sen}(q_1)$$

$$h_{33} = -l_3(\operatorname{sen}(q_1)^3 l_2 + \operatorname{sen}(q_1)^2 l_3 \operatorname{sen}(q_2 - q_3) - \cos(q_1)^2 + l_2 \operatorname{sen}(q_1) - \cos(q_1)^3 l_3 \operatorname{sen}(q_2 - q_3)).$$

2.3. Modelo dinámico de una pierna del robot

Un robot es un sistema mecánico muy complejo cuya descripción analítica requiere de ecuaciones diferenciales. La naturaleza no lineal, multivariable y acoplada de su comportamiento dinámico ofrece un amplio espectro en la formulación de problemas de control teóricos y prácticos. El modelo dinámico del robot permite explicar todos los fenómenos físicos que se encuentran en su estructura mecánica, tales como efectos inerciales, fuerzas centrípetas y de Coriolis, pares gravitacionales y fricción, los cuales son fenómenos físicos intrínsecos o propios de la naturaleza dinámica del robot. El análisis y estudio de los fenómenos del robot se lleva a cabo por medio de ecuaciones diferenciales no lineales para formar el modelo dinámico. A diferencia de otros métodos de modelado de la física como

2. Configuración mecánica del robot hexápodo

el de Newton o el de Hamilton, las ecuaciones de movimiento de Euler-Lagrange representan la mejor alternativa de modelado para robots manipuladores debido a las propiedades matemáticas que se deducen de manera natural usando esa metodología.

Considérese un robot de n grados de libertad, como el mostrado en la figura 2.10. La energía total E de un robot de n g.d.l. es la suma de sus energías cinética K y potencial U :

$$E(q(t), \dot{q}(t)) = K(q(t), \dot{q}(t)) + U(q(t))$$

donde $q(t) = [q_1(t), \dots, q_n(t)]^T$.

El lagrangiano $L(q, \dot{q})$ de un robot manipulador de n g.d.l. es la diferencia entre su energía cinética K y su energía potencial U :

$$L(q(t), \dot{q}(t)) = K(q(t), \dot{q}(t)) - U(q(t)) \quad (2.35)$$

La energía cinética $K(q, \dot{q})$, se obtiene sumando la energía cinética de cada eslabón por separado, es decir:

$$K(q, \dot{q}) = \sum_{i=1}^n K_i(q, \dot{q}),$$

y para cada eslabón i , la energía cinética tiene una componente debida a la traslación y otra debida a la rotación del mismo. En general:

$$K_i(q, \dot{q}) = \frac{1}{2} m_i^0 v_i^{0^T} v_i^0 + \frac{1}{2} \omega_i^{0^T} I_i^0 \omega_i^0,$$

donde para cada eslabón i se tiene que m_i es la masa del eslabón, $v_i \in \mathbb{R}^3$ es el vector de velocidad lineal del eslabón, ω_i es el vector de velocidad angular del eslabón e $I_i \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ es la matriz de momentos de inercia del i -ésimo eslabón, la cual, en general tiene la forma siguiente:

$$I_i = \begin{pmatrix} I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{xy} & I_{yy} & I_{yz} \\ I_{xz} & I_{yz} & I_{zz} \end{pmatrix}$$

2. Configuración mecánica del robot hexápodo

De manera similar, la energía potencial total del robot se obtiene sumando la energía potencial de todos los eslabones por separado, es decir:

$$U(q) = \sum_{i=1}^n U_i(q),$$

donde para obtener la energía potencial del eslabón i se usa la expresión:

$$U_i(q) = m_i \mathbf{g}_n^T \mathbf{p}_{c_i}(q_i),$$

donde \mathbf{g}_n^T es el vector constante que indica la aceleración de gravedad y $\mathbf{p}_{c_i}(q)$ es el vector de posición del centro de masa.

Las ecuaciones de movimiento de Lagrange para un manipulador de n g.d.l., están dadas por:

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial \dot{q}} \right] - \frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial q} = \tau,$$

o en forma equivalente:

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial \dot{q}_i} \right] - \frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial q_i} = \tau_i, \quad i = 1, \dots, n \quad (2.36)$$

donde τ_i son las fuerzas y pares ejercidos externamente (por actuadores) en cada articulación así como fuerzas no conservativas. Como las fuerzas no conservativas se incluyen las de fricción, las de resistencia al movimiento de un objeto dentro de un fluido, y en general las que dependen del tiempo o de la velocidad.

Nótese que se tendrán tantas ecuaciones escalares dinámicas como g.d.l. tenga el robot manipulador.

El uso de las ecuaciones de Lagrange para el modelo dinámico de manipuladores se reduce a cuatro pasos:

- Cálculo de la energía cinética total: $K(q(t), \dot{q}(t))$.

2. Configuración mecánica del robot hexápodo

- Cálculo de la energía potencial total: $U(q(t))$.
- Cálculo del lagrangiano (2.35): $L(q(t), \dot{q}(t))$.
- Desarrollo de las ecuaciones de Lagrange (2.36).

El modelo dinámico en su forma compacta, y con la notación más utilizada en el área de la robótica, se encuentra descrito de la siguiente forma:

$$\tau = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q), \quad (2.37)$$

donde $q \in \mathbb{R}^n$ es el vector de coordenadas generalizadas o posiciones articulares, $\dot{q} \in \mathbb{R}^n$ es el vector de velocidades articulares, $\ddot{q} \in \mathbb{R}^n$ es el vector de aceleraciones articulares, $M(q) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ es la matriz de inercia, la cual es simétrica y definida positiva, $C(q, \dot{q}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ es la matriz de fuerzas centrífugas y de Coriolis y $g(q) \in \mathbb{R}^n$ es el vector de fuerzas o pares gravitacionales obtenido como el gradiente de la energía potencial, es decir: $g(q) = \frac{\partial U(q)}{\partial q}$ debido a la acción de la gravedad. [Kelly y Santibañez, 2003]

2.3.1. Modelo dinámico para una pierna del robot

La utilidad del modelo dinámico de robots es fundamental para los propósitos de simulación, diseño y construcción del sistema mecánico, así como análisis y diseño de algoritmos de control. Obtener la solución del modelo dinámico de cada una de las piernas del hexápodo es importante para estudiar el comportamiento del robot completo.

Solución del modelo utilizando dos articulaciones en la pierna del robot

En la Figura 2.17, se consideran únicamente dos articulaciones de una pierna del hexápodo. El mecanismo consta de 2 eslabones rígidos, siendo l_1 la longitud del primer eslabón y l_2 la longitud del segundo eslabón. Las articulaciones 1 y 2 son rotacionales. Los desplazamientos del robot se llevan a cabo en el plano vertical $x - y$. Las masas de los eslabones se denotan por m_1 y m_2 respectivamente. La distancia de los ejes de giro a

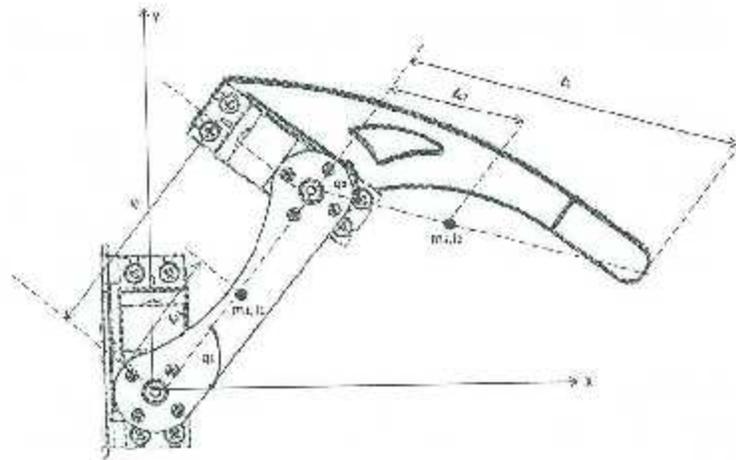


Figura 2.17: Pierna considerando sólo 2 g.d.l.

los centros de masas, es denotada por l_{c1} y l_{c2} respectivamente. Finalmente, I_1 e I_2 denotan los momentos de inercia de los eslabones con respecto al eje que pasa a través de sus centros de masas y que es paralelo al eje de rotación. Los valores de los parámetros mencionados anteriormente, considerados para el hexápodo del I.T.I., se muestran en la Tabla 2.3. Estos valores son obtenidos con la ayuda del programa SolidWorks, una vez dibujados cada uno de los eslabones, en 3D y con sus dimensiones, material y peso reales, de las piernas. Las posiciones articulares son asociadas a los ángulos q_1 y q_2 . El vector de posiciones articulares $q(t)$ se define como:

$$q(t) = \begin{bmatrix} q_1(t) & q_2(t) \end{bmatrix}$$

La energía cinética $K(q, \dot{q})$ para este caso puede descomponerse en la suma de dos partes:

$$K(q(t), \dot{q}(t)) = K_1(q, \dot{q}) + K_2(q, \dot{q}), \quad (2.38)$$

donde $K_1(q, \dot{q})$ y $K_2(q, \dot{q})$ son las energías cinéticas de los eslabones 1 y 2 respectivamente. A su vez, la energía cinética de cada eslabón se obtiene usando

$$K_1(q, \dot{q}) = \frac{1}{2} m_1 v_1^T v_1 + \frac{1}{2} \omega_1^T I_1 \omega_1 \quad (2.39)$$

2. Configuración mecánica del robot hexápodo

Tabla 2.3: Parámetros dinámicos para el modelo de 2 g.d.l

Descripción	Notación	Valor	Unidades
longitud eslabón 1	l_1	0.085	m
longitud eslabón 2	l_2	0.1275	m
distancia al centro de masa (eslabón 1)	l_{c1}	0.038065	m
distancia al centro de masa (eslabón 2)	l_{c2}	0.013990	m
masa eslabón 1	m_1	0.0120	kg
masa eslabón 2	m_2	0.080	kg
inercia eslabón 1 resp. centro de masa	$I_{z:1}$	0.0001085910	kg m ²
inercia eslabón 2 resp. centro de masa	$I_{z:2}$	0.0010687647	kg m ²
aceleración de la gravedad	g	9.81	m/s ²

$$K_2(q, \dot{q}) = \frac{1}{2} m_2 v_2^T v_2 - \frac{1}{2} \omega_2^T I_2 \omega_2 \quad (2.40)$$

Los vectores de velocidad lineal de los centros de masa, v_1 y v_2 , se obtienen simplemente derivando, respecto al tiempo, los vectores de posición de esos centros de masa, denotados por p_{c1} y p_{c2} respectivamente. Es fácil verificar que para una pierna se tiene:

$$p_{c1} = \begin{bmatrix} l_{c1} \cos(q_1) \\ l_{c1} \sin(q_1) \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$p_{c2} = \begin{bmatrix} l_1 \cos(q_1) + l_{c2} \cos(q_1 - q_2) \\ l_1 \sin(q_1) + l_{c2} \sin(q_1 - q_2) \\ 0 \end{bmatrix}.$$

y

$$v_1 = \frac{dp_{c1}}{dt} = \begin{bmatrix} -l_{c1} \sin(q_1) \dot{q}_1 \\ l_{c1} \cos(q_1) \dot{q}_1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$v_2 = \frac{dp_{c2}}{dt} = \begin{bmatrix} -l_1 \sin(q_1) \dot{q}_1 - l_{c2} \sin(q_1 - q_2) [\dot{q}_1 - \dot{q}_2] \\ l_1 \cos(q_1) \dot{q}_1 + l_{c2} \cos(q_1 - q_2) [\dot{q}_1 - \dot{q}_2] \\ 0 \end{bmatrix}$$

Por otro lado, la velocidad angular de cada eslabón, en este caso en el que el movimiento

2. Configuración mecánica del robot hexápodo

se realiza únicamente en el plano $x - y$, quedaría

$$\omega_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{q}_1 \end{bmatrix} \quad \omega_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{q}_1 - \dot{\phi} \end{bmatrix}$$

de modo que, de (2.39) y (2.40)

$$\begin{aligned} K_1(q, \dot{q}) &= \frac{1}{2} m_1 l_{c1}^2 \dot{q}_1^2 + \frac{1}{2} I_{zz1} \dot{q}_1^2 \\ K_2(q, \dot{q}) &= \frac{1}{2} m_2 [l_1^2 \dot{q}_1^2 + l_2^2 (\dot{q}_1 - \dot{q}_2)^2 + 2l_1 l_2 \cos(q_2) \dot{q}_1 (\dot{q}_1 - \dot{q}_2)] + \frac{1}{2} I_{zz2} [\dot{q}_1 - \dot{q}_2]^2 \end{aligned} \quad (2.41)$$

Para calcular la energía potencial se observa que

$$\mathbf{g}_{c1} = \mathbf{g}_{c2} = \begin{bmatrix} 0 \\ -g \\ 0 \end{bmatrix}$$

donde $g = 9.81 \text{ Km/s}^2$ es la constante de aceleración en la tierra y

$$\begin{aligned} \mathbf{p}_{c1} &= \begin{bmatrix} l_{c1} \cos(q_1) \\ l_{c1} \sin(q_1) \\ 0 \end{bmatrix} \\ \mathbf{p}_{c2} &= \begin{bmatrix} l_1 \cos(q_1) - l_2 \cos(q_1 - q_2) \\ l_1 \sin(q_1) + l_2 \sin(q_1 - q_2) \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

De modo que

$$\begin{aligned} U_1(q) &= -m_1 g (l_{c1} \sin(q_1)) \\ U_2(q) &= -m_2 g [l_1 \sin(q_1) + l_2 \sin(q_1 - q_2)] \end{aligned} \quad (2.42)$$

A partir de las ecuaciones (2.41) y (2.42), el lagrangiano toma la forma:

$$\begin{aligned} L(q, \dot{q}) &= K_1(q, \dot{q}) + K_2(q, \dot{q}) - U_1(q) - U_2(q) \\ &= \frac{1}{2} [m_1 l_{c1}^2 + m_2 l_1^2] \dot{q}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 l_2^2 [\dot{q}_1^2 - 2\dot{q}_1 \dot{q}_2 + \dot{q}_2^2] + m_2 l_1 l_2 \cos(q_2) [\dot{q}_1^2 - \dot{q}_1 \dot{q}_2] \\ &\quad + [m_1 l_{c1} + m_2 l_1] g \sin(q_1) - m_2 g l_2 \sin(q_1 - q_2) + \frac{1}{2} I_{zz1} \dot{q}_1^2 + \frac{1}{2} I_{zz2} [\dot{q}_1 - \dot{q}_2]^2 \end{aligned} \quad (2.43)$$

2. Configuración mecánica del robot hexápodo

De la ecuación (2.43) pueden determinarse las ecuaciones de movimiento de Lagrange:

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_1} &= [m_1 l_{c1}^2 + m_2 l_1^2 \dot{q}_1 + m_2 l_{c2}^2 \dot{q}_1 - m_2 l_{c2}^2 \dot{q}_2 + 2m_2 l_1 l_{c2} \cos(q_2) \dot{q}_1 \\ &\quad - m_2 l_1 l_{c2} \cos(q_2) \dot{q}_2 + I_{xx1} \dot{q}_1 + I_{xx2} [\dot{q}_1 - \dot{q}_2]] \\ \frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_1} \right] &= [m_1 l_{c1}^2 + m_2 l_1^2 \ddot{q}_1 - m_2 l_{c2}^2 \ddot{q}_2 - m_2 l_{c2}^2 \ddot{q}_2 - 2m_2 l_1 l_{c2} \cos(q_2) \ddot{q}_2 \\ &\quad - 2m_2 l_1 l_{c2} \sin(q_2) \dot{q}_1 \dot{q}_2 - m_2 l_1 l_{c2} \cos(q_2) \ddot{q}_2 + m_2 l_1 l_{c2} \sin(q_2) \dot{q}_1^2 - I_{xx1} \ddot{q}_1 - I_{xx2} [\ddot{q}_1 - \ddot{q}_2]] \\ \frac{\partial L}{\partial q_1} &= [m_1 l_{c1} + m_2 l_1] g \cos(q_1) - m_2 g l_{c2} \cos(q_1 - q_2) \\ \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_2} &= [-m_2 l_{c2}^2 \dot{q}_1 + m_2 l_{c2}^2 \dot{q}_2 - m_2 l_1 l_{c2} \cos(q_2) \dot{q}_1 + I_{xx2} [\dot{q}_1 - \dot{q}_2]] \\ \frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_2} \right] &= [-m_2 l_{c2}^2 \ddot{q}_1 - m_2 l_{c2}^2 \ddot{q}_2 - m_2 l_1 l_{c2} \cos(q_2) \ddot{q}_1 + m_2 l_1 l_{c2} \sin(q_2) \dot{q}_1 \dot{q}_2 + I_{xx2} [\ddot{q}_1 - \ddot{q}_2]] \\ \frac{\partial L}{\partial q_2} &= [-m_2 l_1 l_{c2} \sin(q_2) \dot{q}_1^2 - q_1 \dot{q}_2] + m_2 g l_{c2} \sin(q_1 - q_2) \end{aligned}$$

Las ecuaciones dinámicas que modelan la pierna del robot son obtenidas aplicando la ecuación (2.36), de la cual

$$\begin{aligned} \tau_1 &= [m_1 l_{c1}^2 + m_2 l_1^2 + m_2 l_{c2}^2 + 2m_2 l_1 l_{c2} \cos(q_2)] \ddot{q}_1 \\ &\quad - [m_2 l_{c2}^2 + m_2 l_1 l_{c2} \cos(q_2) + I_{xx2}] \ddot{q}_2 \\ &\quad - 2m_2 l_1 l_{c2} \sin(q_2) \dot{q}_1 \dot{q}_2 - m_2 l_1 l_{c2} \sin(q_2) \dot{q}_2^2 \\ &\quad - [m_1 l_{c1} + m_2 l_1] g \cos(q_1) - m_2 g l_{c2} \cos(q_1 - q_2) \end{aligned} \quad (2.44)$$

y

$$\begin{aligned} \tau_2 &= [-m_2 l_{c2}^2 - m_2 l_1 l_{c2} \cos(q_2) + I_{xx2}] \ddot{q}_1 \\ &\quad + [m_2 l_{c2}^2 - I_{xx2}] \ddot{q}_2 + m_2 l_1 l_{c2} \sin(q_2) \dot{q}_1^2 \\ &\quad - m_2 g l_{c2} \sin(q_1 - q_2) \end{aligned} \quad (2.45)$$

Finalmente se tiene para la forma (2.37) que: La matriz de inercia $M(q)$ de esta pierna es:

$$M(q) = \begin{bmatrix} m_{11}(q) & m_{12}(q) \\ m_{21}(q) & m_{22}(q) \end{bmatrix}, \quad (2.46)$$

donde por inspección se tiene:

$$\begin{aligned} m_{11}(q) &= m_1 l_{c1}^2 + m_2 l_1^2 + m_3 l_{c2}^2 + 2m_2 l_1 l_{c2} \cos(q_2) + I_{xx1} + I_{xx2} \\ m_{12}(q) &= -m_2 l_1 l_{c2} \sin(q_2) - I_{xx2} \\ m_{21}(q) &= -m_2 l_1 l_{c2} \sin(q_2) - I_{xx2} \\ m_{22}(q) &= m_2 l_{c2}^2 + I_{xx2} \end{aligned}$$

La matriz de inercia $C(q, \dot{q})$ es:

$$C(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} c_{11}(q, \dot{q}) & c_{12}(q, \dot{q}) \\ c_{21}(q, \dot{q}) & c_{22}(q, \dot{q}) \end{bmatrix}, \quad (2.47)$$

donde por inspección se tiene:

$$\begin{aligned} c_{11}(q, \dot{q}) &= -2m_2 l_1 l_{c2} \sin(q_2) \dot{q}_2 \\ c_{12}(q, \dot{q}) &= m_2 l_1 l_{c2} \sin(q_2) \dot{q}_2 \\ c_{21}(q, \dot{q}) &= m_2 l_1 l_{c2} \sin(q_2) \dot{q}_1 \\ c_{22}(q, \dot{q}) &= 0, \end{aligned}$$

y el vector $g(q)$ por:

$$\begin{aligned} g(q) &= \begin{bmatrix} g_1(q) \\ g_2(q) \end{bmatrix} \quad (2.48) \\ g_1(q) &= -(m_1 l_{c1} + m_2 l_1) g \cos(q_1) - m_2 g l_{c2} \cos(q_1 - q_2) \\ g_2(q) &= -m_2 g l_{c2} \sin(q_1 - q_2) \end{aligned}$$

Solución del modelo utilizando tres articulaciones de la pierna del robot

Considerando las tres articulaciones de una pierna del hexápodo, como se muestra en la Figura 2.18, el mecanismo consta de 3 eslabones rígidos, siendo l_1 la longitud del primer eslabón, l_2 la longitud del segundo eslabón y l_3 la longitud del tercer eslabón. Las uniones

2. Configuración mecánica del robot hexápodo

1, 2 y 3 son rotacionales. El desplazamiento del eslabón 1 se lleva a cabo en el plano horizontal $x - y$, mientras que los desplazamientos de 2 y 3 se llevan a cabo en el plano vertical $y - z$. Las masas de los eslabones se denotan por m_1 , m_2 y m_3 respectivamente. La distancia de los ejes de giro a los centros de masas, es denotada por l_{c1} , l_{c2} y l_{c3} respectivamente. Finalmente, I_1 , I_2 e I_3 denotan los momentos de inercia de los eslabones con respecto al eje que pasa a través de sus centros de masas. Los valores de los parámetros mencionados anteriormente se muestran en la Tabla 2.4. Estos valores son obtenidos con la ayuda del programa SolidWorks, una vez dibujados cada uno de los eslabones, en 3D y con sus dimensiones, material y peso reales, de las piernas. Las posiciones articulares son asociadas a los ángulos q_1 , q_2 y q_3 . El vector de posiciones articulares $q(t)$ se define como:

$$q(t) = [q_1(t) \quad q_2(t) \quad q_3(t)]$$

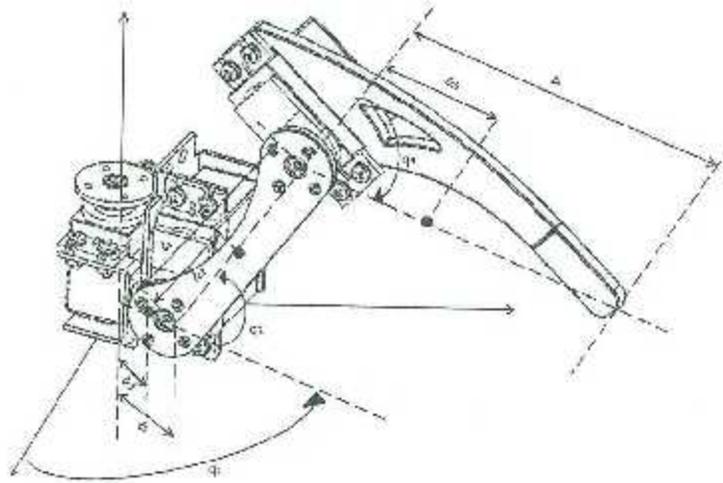


Figura 2.18: Pierna considerando los 3 g.d.l

La energía cinética $K(q, \dot{q})$ para este caso puede descomponerse en la suma de tres partes:

$$K(q(t), \dot{q}(t)) = K_1(q, \dot{q}) + K_2(q, \dot{q}) + K_3(q, \dot{q}), \quad (2.49)$$

2. Configuración mecánica del robot hexápodo

Tabla 2.4: Parámetros dinámicos para el modelo de 3 g.d.l

Descripción	Notación	Valor	Unidades
longitud eslabón 1	l_1	0.03	m
longitud eslabón 2	l_2	0.085	m
longitud eslabón 3	l_3	0.1275	m
distancia al centro de masa (eslabón 1)	l_{c1}	0.00429	m
distancia al centro de masa (eslabón 2)	l_{c2}	0.338065	m
distancia al centro de masa (eslabón 3)	l_{c3}	0.013990	m
masa eslabón 1	m_1	0.16273	kg
masa eslabón 2	m_2	0.0120	kg
masa eslabón 3	m_3	0.080	kg
inercia eslabón 1 resp. centro de masa	I_1	$\begin{bmatrix} 0.0006785968 & 0.0000213190 & 0.0001454860 \\ 0.0000213190 & 0.0000747007 & 0.0000298000 \\ 0.0001454860 & 0.0000298000 & 0.00017671679 \end{bmatrix}$	kg m ²
inercia eslabón 2 resp. centro de masa	I_2	$\begin{bmatrix} 0.0000042924 & 0.0000049112 & 0.0000 \\ 0.0000049112 & 0.0001043488 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000105310 \end{bmatrix}$	kg m ²
inercia eslabón 3 resp. centro de masa	I_3	$\begin{bmatrix} 0.0005774284 & 0.0003150935 & 0.0000175482 \\ 0.0003150935 & 0.0002727621 & 0.0000008798 \\ 0.0000175482 & 0.0000008798 & 0.00010687647 \end{bmatrix}$	kg m ²
aceleración de la gravedad	g	9.81	m/s ²

donde $K_1(q, \dot{q})$ y $K_2(q, \dot{q})$ y $K_3(q, \dot{q})$ son las energías cinéticas de los eslabones 1, 2 y 3 respectivamente. A su vez, la energía cinética de cada eslabón se obtiene usando

$$K_1(q, \dot{q}) = \frac{1}{2} m_1 v_1^T v_1 + \frac{1}{2} \omega_1^T I_1 \omega_1 \quad (2.50)$$

$$K_2(q, \dot{q}) = \frac{1}{2} m_2 v_2^T v_2 + \frac{1}{2} \omega_2^T I_2 \omega_2 \quad (2.51)$$

$$K_3(q, \dot{q}) = \frac{1}{2} m_3 v_3^T v_3 + \frac{1}{2} \omega_3^T I_3 \omega_3 \quad (2.52)$$

Los vectores de velocidad lineal de los centro de masa, v_1 , v_2 y v_3 , se obtienen simplemente derivando, respecto al tiempo, los vectores de posición de esos centros de masa, denotados por p_{c1} , p_{c2} y p_{c3} respectivamente. Es fácil verificar que para una pierna se

2. Configuración mecánica del robot hexápodo

tiene:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{p}_{c1} &= \begin{bmatrix} l_{c1} \cos(q_1) \\ l_{c2} \sin(q_1) \\ 0 \end{bmatrix} \\
 \mathbf{p}_{c2} &= \begin{bmatrix} [l_1 + l_{c2} \cos(q_2)] \cos(q_1) \\ [l_1 - l_{c2} \cos(q_2)] \sin(q_1) \\ l_{c2} \sin(q_2) \end{bmatrix} \\
 \mathbf{p}_{c3} &= \begin{bmatrix} [l_1 + l_2 \cos(q_2) + l_{c3} \cos(q_2 - q_3)] \cos(q_1) \\ [l_1 + l_2 \cos(q_2) + l_{c3} \cos(q_2 - q_3)] \sin(q_1) \\ l_2 \sin(q_2) + l_{c3} \sin(q_2 - q_3) \end{bmatrix}.
 \end{aligned}$$

y

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_1 &= \frac{\partial \mathbf{p}_{c1}}{\partial q_1} \dot{q}_1 = \begin{bmatrix} -l_{c1} \sin(q_1) \dot{q}_1 \\ l_{c1} \cos(q_1) \dot{q}_1 \\ 0 \end{bmatrix} \\
 \dot{x}_2 &= \frac{\partial \mathbf{p}_{c2}}{\partial q_1} \dot{q}_1 + \frac{\partial \mathbf{p}_{c2}}{\partial q_2} \dot{q}_2 = \begin{bmatrix} -[l_1 + l_{c2} \cos(q_2)] \sin(q_1) \dot{q}_1 + \cos(q_1) \sin(q_2) \dot{q}_2 \\ [l_1 - l_{c2} \cos(q_2)] \cos(q_1) \dot{q}_1 + \sin(q_1) \sin(q_2) \dot{q}_2 \\ l_{c2} \cos(q_2) \dot{q}_2 \end{bmatrix} \\
 \dot{x}_3 &= \frac{\partial \mathbf{p}_{c3}}{\partial q_1} \dot{q}_1 + \frac{\partial \mathbf{p}_{c3}}{\partial q_2} \dot{q}_2 + \frac{\partial \mathbf{p}_{c3}}{\partial q_3} \dot{q}_3 = \begin{bmatrix} [l_1 + l_2 \cos(q_2) + l_{c3} \cos(q_2 - q_3)] \sin(q_1) \dot{q}_1 + [l_2 \sin(q_2) + l_{c3} \sin(q_2 - q_3)] \cos(q_2) \dot{q}_2 - l_{c3} \cos(q_2 - q_3) \cos(q_3) \dot{q}_3 \\ [l_1 + l_2 \cos(q_2) + l_{c3} \cos(q_2 - q_3)] \cos(q_1) \dot{q}_1 + [l_2 \sin(q_2) + l_{c3} \sin(q_2 - q_3)] \sin(q_2) \dot{q}_2 + l_{c3} \cos(q_2 - q_3) \sin(q_3) \dot{q}_3 \\ l_2 \cos(q_2) \dot{q}_2 + l_{c3} \cos(q_2 - q_3) \dot{q}_3 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Por otro lado, la velocidad angular de cada eslabón, en este caso en el que el movimiento se realiza únicamente en el plano $x - y$, quedaría

$$\omega_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{q}_1 \end{bmatrix} \quad \omega_2 = \begin{bmatrix} \sin(q_1) \dot{q}_2 \\ -\cos(q_1) \dot{q}_2 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \omega_3 = \begin{bmatrix} \sin(q_1) [\dot{q}_2 - \dot{q}_3] \\ -\cos(q_1) [\dot{q}_2 - \dot{q}_3] \\ 0 \end{bmatrix}$$

de modo que de (2.50)-(2.52)

$$\begin{aligned}
 K_1(q, \dot{q}) &= \frac{1}{2} m_1 l_{c1}^2 \dot{q}_1^2 + \frac{1}{2} I_{c1} \dot{q}_1^2 \\
 K_2(q, \dot{q}) &= \frac{1}{2} m_2 [l_1^2 + 2l_1 l_{c2} \cos(q_2) + l_{c2}^2 \cos^2(q_2)] \dot{q}_1^2 \\
 &\quad + \frac{1}{2} m_2 l_{c2}^2 \dot{q}_2^2 + I_{c2} \dot{q}_2^2 - 2I_{c2} l_1 \sin(q_1) \cos(q_2) + I_{c2} l_1^2 \cos^2(q_2) \dot{q}_2^2 \\
 K_3(q, \dot{q}) &= \frac{1}{2} m_3 [l_1^2 + l_2^2 \cos^2(q_2) + l_{c3}^2 \cos^2(q_2 - q_3) + 2l_1 l_2 \cos(q_2 - q_3) + 2l_1 l_{c3} \cos(q_2) + 2l_2 \cos(q_2) l_{c3} \cos(q_2 - q_3)] \dot{q}_1^2 \\
 &\quad + \frac{1}{2} [2m_3 l_2 \cos(q_2) l_{c3} \cos(q_2 - q_3) + m_3 l_{c3}^2 + m_3 l_2^2 + 2m_3 l_2 \sin(q_2) l_{c3} \sin(q_2 - q_3)] \dot{q}_2^2 \\
 &\quad + \frac{1}{2} [I_{c3} m_3 - I_{c3} l_2 \cos(q_1)]^2 + I_{c3} l_2^2 \cos^2(q_1) - 2I_{c3} l_2 \sin(q_1) \cos(q_1) \dot{q}_3^2 \\
 &\quad + \frac{1}{2} m_3 l_{c3}^2 \dot{q}_3^2 + I_{c3} m_3 - I_{c3} l_2 \cos(q_1) \dot{q}_3^2 + I_{c3} l_2^2 \cos^2(q_1) - 2I_{c3} l_2 \sin(q_1) \cos(q_1) \dot{q}_3^2 \\
 &\quad + m_3 [-l_2 \cos(q_2) l_{c3} \cos(q_2 - q_3) + (l_{c3}^2 - l_2 \sin(q_2) l_{c3} \sin(q_2 - q_3)) \dot{q}_2 \dot{q}_3 \\
 &\quad - I_{c3} l_2 \cos(q_1) \dot{q}_2 \dot{q}_3 - I_{c3} l_2 - 2I_{c3} l_2 \sin(q_1) \cos(q_1) - I_{c3} l_2 \cos(q_1)] \dot{q}_2 \dot{q}_3
 \end{aligned}$$

(2.53)

2. Configuración mecánica del robot hexápodo

Para calcular la energía potencial se observa que

$$\mathbf{g}_{c1} = \mathbf{g}_{c2} = \mathbf{g}_{c3} = \begin{bmatrix} 0 \\ -g \\ 0 \end{bmatrix}$$

donde $g = 9.81 \text{ Km/s}^2$ es la constante de aceleración en la tierra y

$$\begin{aligned} \mathbf{p}_{c1} &= \begin{bmatrix} l_{c1} \cos(q_1) \\ l_{c1} \sin(q_1) \\ 0 \end{bmatrix} \\ \mathbf{p}_{c2} &= \begin{bmatrix} [l_1 + l_{c2} \cos(q_2)] \cos(q_1) \\ [l_1 + l_{c2} \cos(q_2)] \sin(q_1) \\ l_{c2} \sin(q_2) \end{bmatrix} \\ \mathbf{p}_{c3} &= \begin{bmatrix} [l_1 + l_2 \cos(q_2) + l_{c3} \cos(q_2 - q_3)] \cos(q_1) \\ [l_1 + l_2 \cos(q_2) + l_{c3} \cos(q_2 - q_3)] \sin(q_1) \\ l_2 \sin(q_2) - l_{c3} \sin(q_2 - q_3) \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

De modo que

$$\begin{aligned} U_1(q) &= 0 \\ U_2(q) &= m_2 g l_{c2} \sin(q_2) \\ U_3(q) &= m_2 g l_2 \sin(q_2) + l_{c3} \sin(q_2 - q_3). \end{aligned} \tag{2.54}$$

A partir de las ecuaciones (2.53) y (2.54), el lagrangiano toma la forma:

$$\begin{aligned} L(q, \dot{q}) &= K_1(q, \dot{q}) + K_2(q, \dot{q}) + K_3(q, \dot{q}) - U_1(q) - U_2(q) - U_3(q) \\ &= \frac{1}{2} m_1 \dot{q}_1^2 + \frac{1}{2} I_{c1} \dot{q}_1^2 \\ &\quad - \frac{1}{2} m_2 \dot{q}_1^2 + 2I_{c2} \cos(q_2) - I_{c2}^2 \cos^2(q_2) \dot{q}_1^2 \\ &\quad + \frac{1}{2} [m_2 \dot{q}_2^2 + I_{m2} - I_{m2} \cos(q_1)]^2 - 2I_{x21} \sin(q_1) \cos(q_1) + I_{y21} \cos^2(q_1) \dot{q}_2^2 \\ &\quad + \frac{1}{2} m_3 \dot{q}_1^2 + I_{c3}^2 \cos^2(q_2) + I_{c3}^2 \cos^2(q_2 - q_3) + 2I_{c3} \cos(q_2 - q_3) - 2I_{c2} \cos(q_2) + 2I_{c2} \cos(q_2) I_{c3} \cos(q_2 - q_3) \dot{q}_1^2 \\ &\quad + \frac{1}{2} [2m_2 l_2 \cos(q_2) I_{c3} \cos(q_2 - q_3) + m_3 I_{c3}^2 - m_3 \dot{q}_2^2 - 2m_2 l_2 \sin(q_2) I_{c3} \sin(q_2 - q_3)] \dot{q}_1^2 \\ &\quad - \frac{1}{2} [I_{m3} - I_{m3} \cos^2(q_1) - I_{m3} \cos^2(q_1)]^2 - 2I_{y31} \sin(q_1) \cos(q_1) \dot{q}_2^2 \\ &\quad + \frac{1}{2} [m_3 \dot{q}_3^2 + I_{m3} - I_{m3} \cos^2(q_1)]^2 + I_{y31} \cos^2(q_1) - 2I_{x31} \sin(q_1) \cos(q_1) \dot{q}_3^2 \\ &\quad + m_3 [-l_2 \cos(q_2) I_{c3} \cos(q_2 - q_3) - I_{c3}^2 - l_2 \sin(q_2) I_{c3} \sin(q_2 - q_3)] \dot{q}_1 \dot{q}_3 \\ &\quad + [I_{m3} \cos^2(q_1) - I_{m3} + 2I_{x31} \sin(q_1) \cos(q_1) - I_{y31} \cos^2(q_1)] \dot{q}_2 \dot{q}_3 \\ &\quad - m_2 g l_{c2} \sin(q_2) - m_2 g l_2 \sin(q_2) - l_{c3} \sin(q_2 - q_3) \end{aligned} \tag{2.55}$$

2. Configuración mecánica del robot hexápodo

De la ecuación (2.55) pueden determinarse las ecuaciones de movimiento de Lagrange, las cuales no se presentan debido a que fueron calculadas usando el software MatLab y su escritura abarcaría un amplio espacio. Por lo que sólo se presenta el resultado final para la forma (2.37) donde:

La matriz de inercia $M(q)$ está dada por:

$$M(q) = \begin{bmatrix} m_{11}(q) & m_{12}(q) & m_{13}(q) \\ m_{21}(q) & m_{22}(q) & m_{23}(q) \\ m_{31}(q) & m_{32}(q) & m_{33}(q) \end{bmatrix}, \quad (2.56)$$

con:

$$\begin{aligned} m_{11} = & 2m_3l_2 \cos(q_2)l_{c3} \cos(q_2 - q_3) + m_1l_{c1}^2 + m_2l_1^2 + m_3l_1^2 + m_2l_{c2}^2 \cos(q_2)^2 \\ & + m_3l_2^2 \cos(q_2)^2 + m_3l_{c3}^2 \cos(q_2 - q_3)^2 + I_{xx1} - 2m_2l_1l_2 \cos(q_2) + 2m_3l_1l_3 \cos(q_2) \\ & - 2m_3l_1l_{c3} \cos(q_2 - q_3) \end{aligned}$$

$$m_{12} = 0$$

$$m_{13} = 0$$

$$m_{21} = 0$$

$$\begin{aligned} m_{22} = & I_{yy2} \cos(q_1)^2 + I_{yy3} \cos(q_1)^2 + 2m_3l_2 \cos(q_2)l_{c3} \cos(q_2 - q_3) + m_2l_{c2}^2 + m_3l_2^2 + m_3l_{c3}^2 \\ & - 2I_{xy2} \sin(q_1) \cos(q_1) - 2I_{xy3} \sin(q_1) \cos(q_1) + I_{xx3} - I_{xx2} \cos(q_1)^2 - I_{xx3} \cos(q_1)^2 \\ & + 2m_3l_2 \sin(q_2)l_{c3} \sin(q_2 - q_3) + I_{xx2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m_{23} = & -m_3l_2 \sin(q_2)l_{c3} \sin(q_2 - q_3) - m_3l_2^2 \cos(q_2)l_{c3} \cos(q_2 - q_3) - I_{xx3} \\ & + I_{xx3} \cos(q_1)^2 - 2I_{xy3} \sin(q_1) \cos(q_1) - I_{yy3} \cos(q_1)^2 \end{aligned}$$

$$m_{31} = 0$$

$$\begin{aligned} m_{32} = & -m_3l_2 \sin(q_2)l_{c3} \sin(q_2 - q_3) - m_3l_2^2 \cos(q_2)l_{c3} \cos(q_2 - q_3) \\ & I_{xx3} + I_{xx3} \cos(q_1)^2 + 2I_{xy3} \sin(q_1) \cos(q_1) - I_{yy3} \cos(q_1)^2 \end{aligned}$$

$$m_{33} = m_3l_{c3}^2 + I_{xx3} - I_{xx3} \cos(q_1)^2 - 2I_{xy3} \sin(q_1) \cos(q_1) + I_{yy3} \cos(q_1)^2$$

La matriz de inercia $C(q, \dot{q})$ es:

$$C(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} c_{11}(q, \dot{q}) & c_{12}(q, \dot{q}) & c_{13}(q, \dot{q}) \\ c_{21}(q, \dot{q}) & c_{22}(q, \dot{q}) & c_{23}(q, \dot{q}) \\ c_{31}(q, \dot{q}) & c_{32}(q, \dot{q}) & c_{33}(q, \dot{q}) \end{bmatrix}, \quad (2.57)$$

donde

$$\begin{aligned}
 c_{11} &= \frac{1}{2}[-2m_3l_2l_{c3} \sin(2q_2 - q_3) - m_2l_{c2}^2 \sin(2q_2) - m_3l_2^2 \sin(2q_2)]\dot{q}_2 \\
 &+ \frac{1}{2}[m_3l_{c3}^2 \sin(2q_2 - 2q_3) - 2m_2l_1l_{c2} \sin(q_2) - 2m_3l_1l_2 \sin(q_3) - 2m_3l_1l_{c3} \sin(q_2 - q_3)]\dot{q}_3 \\
 &+ \frac{1}{2}m_3[l_{c3}l_2 \sin(2q_2 - q_3) - l_{c3}l_2 \sin(q_3) - l_{c3}^2 \sin(2q_2 - 2q_3) + 2l_1l_{c3} \sin(q_2 - q_3)]\dot{q}_3 \\
 c_{12} &= \frac{1}{2}[-2m_3l_2l_{c3} \sin(2q_2 - q_3) - m_2l_{c2}^2 \sin(2q_2) - m_3l_2^2 \sin(2q_2) - m_3l_{c3}^2 \sin(2q_2 - 2q_3)]\dot{q}_1 \\
 &+ \frac{1}{2}[-2m_2l_1l_{c2} \sin(q_2) - 2m_3l_1l_2 \sin(q_2) - 2m_3l_1l_{c3} \sin(q_2 - q_3)]\dot{q}_1 \\
 &- \frac{1}{2}[I_{yy2} - I_{yy3} - I_{xx2} - I_{xx3}] \sin(2q_1)\dot{q}_2 + [I_{xy2} + I_{xy3}] \cos(2q_1)\dot{q}_2 \\
 &+ \frac{1}{2}[I_{xx3} \sin(2q_1) - 2I_{xy3} \cos(2q_1) - I_{yy3} \sin(2q_1)]\dot{q}_3 \\
 c_{13} &= \frac{1}{2}m_3[l_2l_{c3} \sin(2q_2 - q_3) - l_{c3}l_2 \sin(q_3) + l_{c3}^2 \sin(2q_2 - 2q_3) + 2l_1l_{c3} \sin(q_2 - q_3)]\dot{q}_1 \\
 &+ \frac{1}{2}[I_{xx3} \sin(2q_1) - 2I_{xy3} \cos(2q_1) - I_{yy3} \sin(2q_1)]\dot{q}_2 \\
 &- \frac{1}{2}[-I_{xx3} \sin(2q_1) - 2I_{xy3} \cos(2q_1) + I_{yy3} \sin(2q_1)]\dot{q}_3 \\
 c_{21} &= \frac{1}{2}[2m_3l_2l_{c3} \sin(2q_2 - q_3) + m_2l_{c2}^2 \sin(2q_2) + m_3l_2^2 \sin(2q_2)]\dot{q}_1 \\
 &+ \frac{1}{2}[m_3l_{c3}^2 \sin(2q_2 - 2q_3) + 2m_2l_1l_{c2} \sin(q_2) + 2m_3l_1l_2 \sin(q_2) + 2m_3l_1l_{c3} \sin(q_2 - q_3)]\dot{q}_1 \\
 &+ \frac{1}{2}[-I_{yy2} - I_{yy3} + I_{xx2} + I_{xx3}] \sin(2q_1)\dot{q}_2 + [I_{xy2} - I_{xy3}] \cos(2q_1)\dot{q}_2 \\
 &+ \frac{1}{2}[-I_{xx3} \sin(2q_1) + 2I_{xy3} \cos(2q_1) - I_{yy3} \sin(2q_1)]\dot{q}_3 \\
 c_{22} &= \frac{1}{2}[-I_{yy2} - I_{yy3} + I_{xx2} + I_{xx3}] \sin(2q_1)\dot{q}_1 + [I_{xy2} - I_{xy3}] \cos(2q_1)\dot{q}_1 - m_3l_{c3}l_2 \sin(q_3)\dot{q}_3 \\
 c_{23} &= \frac{1}{2}[I_{xx3} \sin(2q_1) + 2I_{xy3} \cos(2q_1) - I_{yy3} \sin(2q_1)]\dot{q}_1 - m_3l_2l_{c3} \sin(q_3)\dot{q}_2 + m_3l_{c3}l_2 \sin(q_3)\dot{q}_3 \\
 c_{31} &= \frac{1}{2}m_3[-l_2l_{c3} \sin(2q_2 - q_3) + l_{c3}l_2 \sin(q_3) - l_{c3}^2 \sin(2q_2 - 2q_3) - 2l_1l_{c3} \sin(q_2 - q_3)]\dot{q}_1 \\
 &- \frac{1}{2}[-I_{xx3} \sin(2q_1) + 2I_{xy3} \cos(2q_1) - I_{yy3} \sin(2q_1)]\dot{q}_2 \\
 &+ \frac{1}{2}[I_{xx3} \sin(2q_1) - 2I_{xy3} \cos(2q_1) - I_{yy3} \sin(2q_1)]\dot{q}_3 \\
 c_{32} &= \frac{1}{2}[-I_{xx3} \sin(2q_1) - 2I_{xy3} \cos(2q_1) - I_{yy3} \sin(2q_1)]\dot{q}_1 - m_3l_2l_{c3} \sin(q_3)\dot{q}_2 \\
 c_{33} &= \frac{1}{2}[I_{xx3} \sin(2q_1) - 2I_{xy3} \cos(2q_1) - I_{yy3} \sin(2q_1)]\dot{q}_1
 \end{aligned}$$

2. Configuración mecánica del robot hexápodo

y el vector $g(q)$ es dado por:

$$g(q) = \begin{bmatrix} g_1(q) \\ g_2(q) \\ g_3(q) \end{bmatrix} \quad (2.58)$$

con

$$g_1 = 0$$

$$g_2 = m_2 g l_{c2} \cos(q_2) + m_3 g (l_2 \cos(q_2) - l_{c3} \cos(q_2 - q_3))$$

$$g_3 = -m_3 g l_{c3} \cos(q_2 - q_3)$$

Capítulo 3

Sistema electrónico del robot hexápodo

En este capítulo se describe el sistema electrónico utilizado para el control del robot hexápodo construido. Se inicia con una breve descripción de las tarjetas electrónicas, primero la que permite procesar las señales de los sensores: *de fuerza*, montados en los extremos de las piernas; *inerciales*, para realimentar la orientación y dirección del tórax del robot; así como la señal del sensor de visión, para el reconocimiento de objetos. Dichos sensores electrónicos también son presentados en este capítulo. Además se describe la tarjeta que permite controlar los servomotores del robot.

3.1. Tarjetas electrónicas embebidas

Un sistema embebido o empotrado ("embedded" en inglés) es un sistema de computación diseñado para realizar una o algunas pocas funciones dedicadas, frecuentemente en tiempo real. Al contrario de lo que ocurre con las computadoras de propósito general, (como por ejemplo una computadora personal) que están diseñadas para cubrir un amplio rango de necesidades, los sistemas embebidos se diseñan para cubrir necesidades específicas. En un sistema embebido la mayoría de los componentes se encuentran incluidos en la placa base (la tarjeta de vídeo, audio, módem, etc.) y muchas veces los dispositivos

3. Sistema electrónico del robot hexápodo

resultantes no tienen el aspecto de lo que se suele asociar a una computadora. Algunos ejemplos de sistemas embebidos podrían ser un taxímetro, un sistema de control de acceso, la electrónica que controla una máquina expendedora o el sistema de control de una fotocopiadora, entre otros.

Por lo general los sistemas embebidos se pueden programar directamente en el lenguaje ensamblador del microcontrolador o microprocesador incorporado sobre el mismo, o también, utilizando los compiladores específicos. Pueden utilizarse lenguajes como C ó C++; en algunos casos, cuando el tiempo de respuesta de la aplicación no es un factor crítico, también pueden usarse lenguajes interpretados como JAVA.

Cabe aclarar que un microcontrolador es un circuito integrado programable, capaz de ejecutar las órdenes grabadas en su memoria. Está compuesto de varios bloques funcionales, los cuales cumplen una tarea específica. Un microcontrolador incluye en su interior las tres principales unidades funcionales de una computadora: unidad central de procesamiento, memoria y periféricos de entrada/salida.

Durante el desarrollo de este proyecto se utilizan principalmente dos microcontroladores: el ATmega2560 y el ARM-CORTEX-M3, para más información sobre éstos consultar los Apéndices A y B, respectivamente.

3.2. Servomotores de CD

Un servomotor es un dispositivo electromecánico que, mediante un motor eléctrico con rotor y un circuito electrónico, consigue girar su eje de salida un cierto ángulo en base a una señal que se puede generar mediante un circuito de control externo. Los servos a utilizar en el proyecto son modelo CDS5516 de la empresa Uptech, véase Figura 3.1.

La serie CDS está formada por servos que integran un motor, un sensor, servo algoritmo y un puerto de conexión para bus serie. El CDS5516 es un actuador ideal para robots



Figura 3.1: Servomotor CDS5516

pequeños y otros equipos de posición. Posee las siguientes características:

- Par máximo de torque de 16 kgf-cm. (1.568 Nm.)
- Dimensiones de 40 x 20.5 x 42 mm.
- Pesa 6 grs.
- Máxima velocidad de rotación de 60°/0.18s.
- Fuente de alimentación de 6.5 a 8.4 V.
- Resolución de posición de 0.32°.
- Eje de salida por dos lados.
- Caja de engranajes de aleación, con doble cojinete de bolas.
- Anillo de goma en el eje de salida.
- 1023 pasos de control de velocidad a rotación continua.
- 1 Mbps de velocidad de transmisión.
- 250 Hz de frecuencia de actualización.
- Interfaz y protocolo compatible con Robotis Dynamixel AX12
- Posee un sensor y un convertidor A/D que ofrecen alta precisión de la posición.
- Resolución de la posición en el modo de posición de 0° hasta 300°.
- Tiempo de respuesta de hasta 2 ms.

La serie CDS se puede conectar en un bus en serie, que puede conectar hasta 200 servos a la vez. Cada unidad puede recalibrar su posición, velocidad de rotación, par, corriente y temperatura del motor ([Uptech, 2010],[DFRobot, 2013]).

3. Sistema electrónico del robot hexápodo

3.2.1. Bus de comunicación

El diagrama de conexión típica del bus de comunicación del servo CDS5516 se muestra en la Figura 3.2, donde de izquierda a derecha, los pines del servo representan la tierra (GND), el voltaje de alimentación (7.5 V) y la señal de control.

El bus serie tiene un dispositivo maestro y varios dispositivos esclavos, el controlador actúa como dispositivo principal, los servos actúan como dispositivos esclavos. La secuencia de comunicación es: primero el maestro envía un paquete de instrucciones, posteriormente el esclavo recibe el paquete de instrucciones, lo ejecuta y luego envía un paquete de respuesta al maestro.

Hay dos tipos de paquetes: el *paquete de instrucción*, enviado desde el controlador principal a los servos y el *paquete de estado*, enviado desde los servos al controlador principal. Puede haber múltiples servos en el mismo bus, pero a cada servo se le debe asignar un ID único. El paquete de instrucciones contiene la información de identificación; sólo los servos a los que se envía el paquete correspondiente responden al paquete de instrucciones; los otros servos lo ignoran. Hay 254 valores de ID disponibles, que van desde 0x00 a 0xFD.

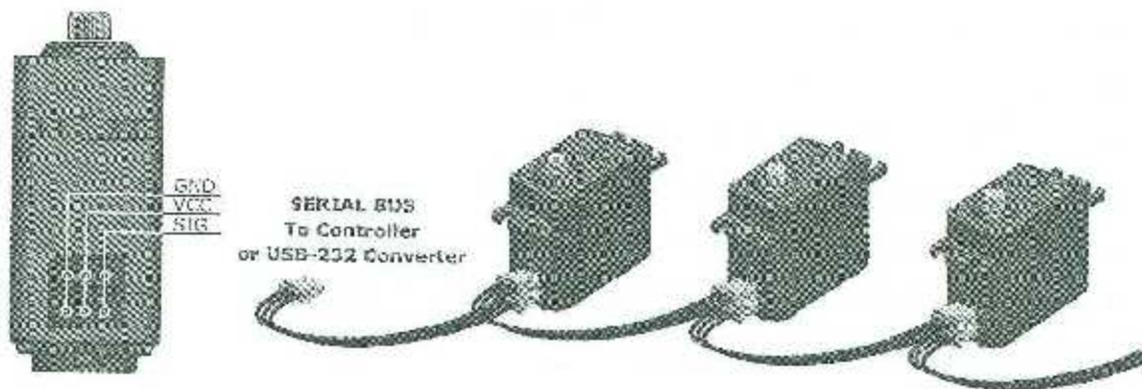


Figura 3.2: Conexión del servo CDS5516

3.2.2. Rutina para los servomotores en el ARM-CORTEX-M3

Para comenzar a escribir el programa, se tiene que modificar el archivo *main.c*, accediéndose a este archivo a través de la ventana *Project Explorer* en la ruta "10 DXL SYNC WRITE/app/src/main.c". Se reemplazan las instrucciones del método principal *void main()*. Todos los programas se deben inicializar con las siguientes líneas de programación, que activan las interrupciones necesarios y un temporizador.

```
RCC_Configuration();
NVIC_Configuration();
GPIO_Configuration();
SysTick_Configuration();
Timer_Configuration();
```

La inicialización del puerto de comunicación para los servomotores se realiza con la siguiente línea.

```
dxl_initialize( 0, 1 );
```

La instrucción para asignar la velocidad de los servomotores es:

```
dxl_write_word( BROADCAST_ID, P_GOAL_SPEED_L, VEL_L );
```

donde el parámetro *BROADCAST_ID* indica que es para todos los servomotores, *P_GOAL_SPEED_L* el número de registro que ya está predefinido y *VEL_L* la velocidad que se va a asignar en un intervalo de 0 a 1023.

Para indicar una misma posición a todos los servomotores se utiliza la instrucción

```
dxl_write_word( BROADCAST_ID, P_GOAL_POSITION_L, POS_L );
```

el parámetro *BROADCAST_ID* indica que es para todos los servomotores, *P_GOAL_POSITION_L* el número de registro que ya está predefinido y *POS_L* la posición deseada del servomotor en un intervalo de 0 a 1023.

3. Sistema electrónico del robot hexápodo

En el caso en que todos los servomotores tengan diferentes movimientos, pero necesiten estar sincronizados, se emplean las siguientes líneas. Primero se especifica que se va a sincronizar la posición de diferentes servomotores, mediante las siguientes instrucciones:

```
dxl_set_txpacket_id(BROADCAST_ID);  
dxl_set_txpacket_instruction(INST_SYNC_WRITE);  
dxl_set_txpacket_parameter(0, P_GOAL_POSITION_L);  
dxl_set_txpacket_parameter(1, 2);
```

la posición deseada de cada servomotor se especifica con la instrucción

```
dxl_set_txpacket_parameter(((i-1)*3+2, id);  
dxl_set_txpacket_parameter(((i-1)*3+3, dxl_get_lowbyte(pos_i));  
dxl_set_txpacket_parameter(((i-1)*3+4, dxl_get_highbyte(pos_i));
```

siendo $i=1,2,\dots,18$ la variable que indica el número de servomotor a mover, id es el identificador del servomotor, y pos_i la posición deseada del servomotor i .

Por último, para mandar las consignas de posición a cada uno de los servomotores se ejecutan las instrucciones

```
dxl_set_txpacket_length((2-1)*NUM_ACTUATOR+4);  
dxl_txrx_packet();
```

siendo $NUM_ACTUATOR$ el número de servomotores a utilizar.

3.2.3. Implementación física de los servomotores

El robot hexápodo utilizado está formado con 18 servomotores CDS5516 distribuidos a lo largo de 6 extremidades (véase Figura 3.3).

Cada extremidad consta de 3 servomotores (véase Figura 3.4) conectados en serie, por lo que en el hexápodo se realizan 18 conexiones en serie.

3. Sistema electrónico del robot hexápodo

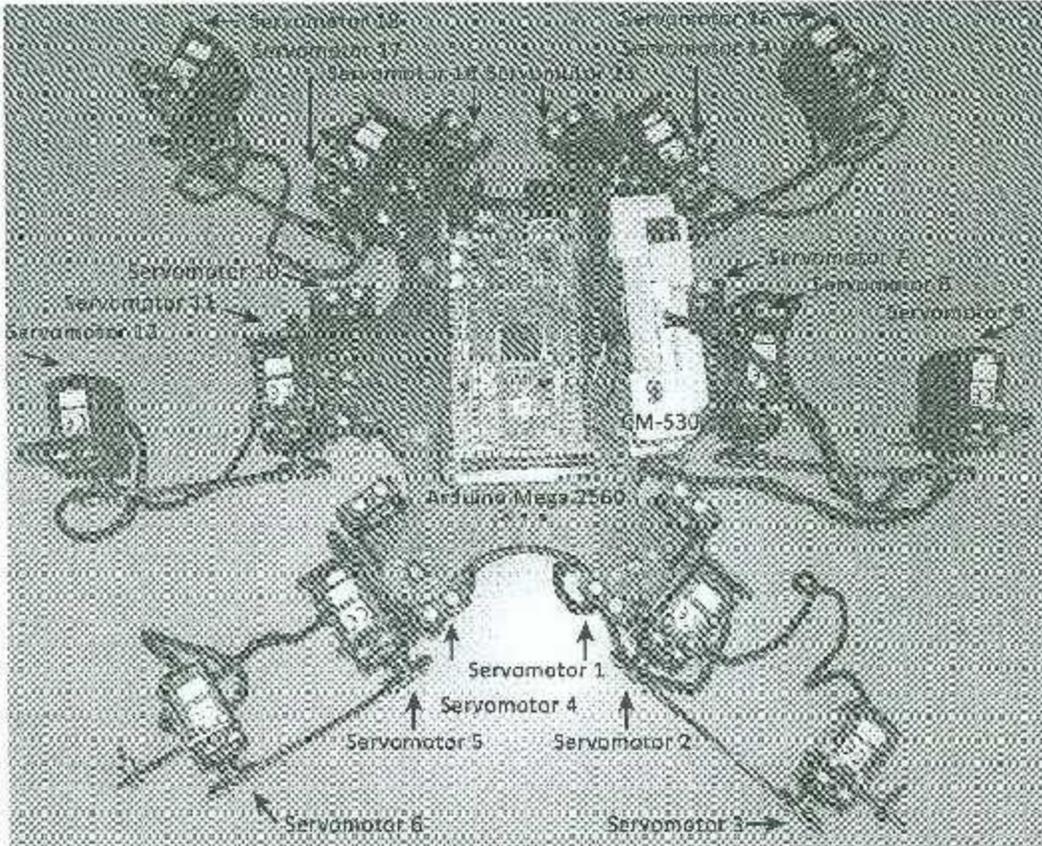


Figura 3.3: Distribución de los dieciocho servomotores del robot hexápodo

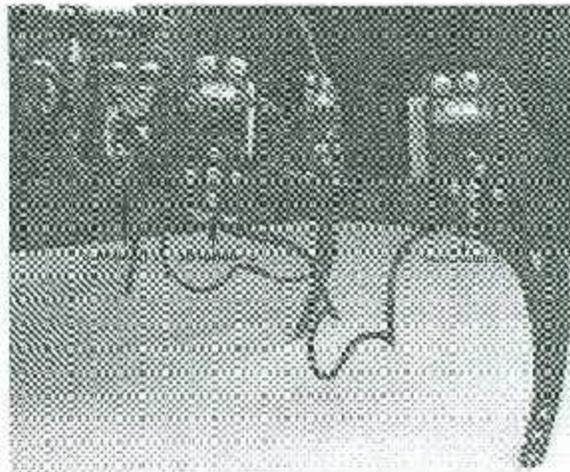


Figura 3.4: Distribución de los tres servomotores de una pierna del robot

3. Sistema electrónico del robot hexápodo

En la Figura 3.5 puede observarse el conector interno en serie de las piernas del robot, a través del cual se reparte la información enviada por el microcontrolador.

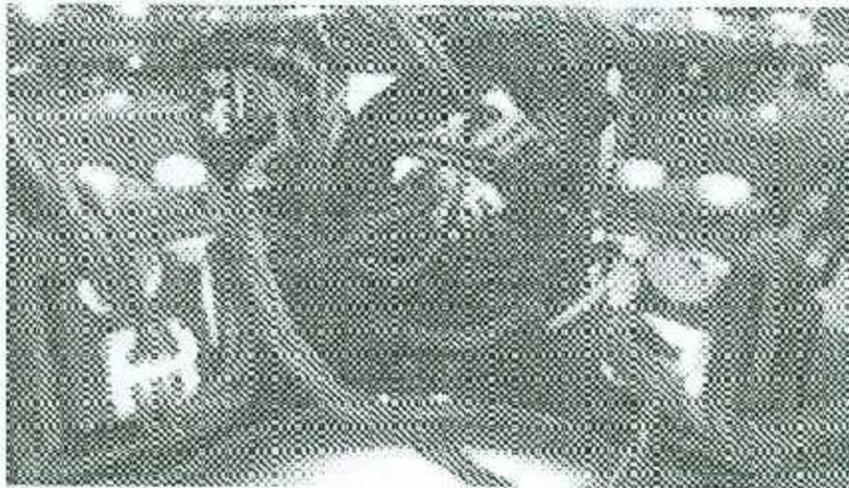


Figura 3.5: Conector en serie para las seis piernas del robot

3.3. Sensores de fuerza de las piernas del robot

Los sensores de fuerza utilizados en el hexápodo son sensores externos, especiales para el sensado de fuerza por el contacto con un objeto. Los sensores FlexiForce a utilizar en este proyecto presentan una tecnología basada en la variación de resistencia eléctrica del área sensora. La aplicación de una fuerza al área activa de detección del sensor se traduce en un cambio en la resistencia eléctrica del elemento sensor en función inversamente proporcional a la fuerza aplicada.

El modelo de sensor utilizado es el A201-25 (véase Figura 3.6), el cual presenta las siguientes características:



Figura 3.6: Sensor Flexiforce A201-25

- Rango de sensibilidad de 0 a 11 kgf (0 a 25 lbf).
- Longitud de los conductores (integrados como circuito impreso flexible) de 16 cm.
- Ancho en la zona de los conductores de 10 mm y en la zona sensible de 15 mm.
- Espesor de 0.127 mm.
- La zona de detección activa es un círculo colocado en un extremo del sensor que tiene 9.53 mm de diámetro.

El sensor está sostenido entre dos capas de película de poliéster. En la parte interna de cada una de estas capas hay una película de material conductor (plata) y dentro éstas una capa de "tinta" sensible a la presión. Todo el conjunto está unido por medio de un adhesivo.

El sensor actúa como resistencia variable en un circuito eléctrico. Cuando el sensor no tiene fuerza aplicada, su resistencia es muy alta (superior a 5 M Ω), y cuando se aplica una fuerza al sensor, la resistencia disminuye [Tekscan, 2009].

3.3.1. Circuito acondicionador de señal

Para facilitar el uso del FlexiForce, se usa un adaptador FlexiForce 1120 (véase figura 3.7).

El sensor FlexiForce se conecta con el cable de interfaz al adaptador, sin importar la

3. Sistema electrónico del robot hexápodo

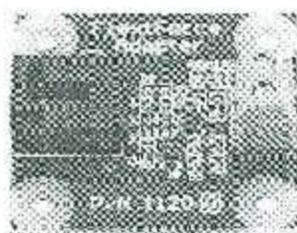


Figura 3.7: Adaptador para la conexión del sensor flexiforce A201-25

polaridad del sensor. La tarjeta del adaptador FlexiForce, a su vez, se conecta al Arduino Mega 2560. Como se muestra en la Figura 3.8, donde los pines de izquierda a derecha indican: la conexión a tierra, la conexión de alimentación de 5 V y la conexión de entrada analógica [Phidgets, 2012].

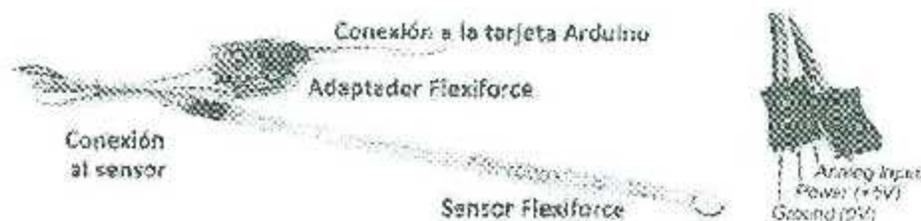


Figura 3.8: Conexión del sensor flexiforce A201-25

3.3.2. Rutina para el sensor Flexiforce en Arduino Mega 2560

Para iniciar con la medición mediante el sensor FlexiForce y el Arduino Mega 2560, primeramente hay hacer la conexión del adaptador a una de las entradas analógicas del Arduino, una vez hecho eso se procede con el código a utilizar.

El programa se inicia configurando el puerto serie, para trabajar a una velocidad de 9600 baudios, y se manda un mensaje al *Serial Monitor* que indica que se ha iniciado el programa. Posteriormente se inicia un ciclo donde se van obteniendo las lecturas del sensor y a su vez se realiza un cambio para que la unidad de lectura sea volts y se muestre el peso leído en kilogramos:

```
void setup()
{
  Serial.begin(9600); //Inicia el puerto serie a 9600 baud
  Serial.println("Iniciando");
}
void loop()
{
  int sensorValue = analogRead(A0); //
  float voltage = sensorValue * (5.0 / 1023.0); //Convierte a volts
  float peso1 = voltage*5; //Convierte de volts a lbs.
  float peso = peso1*.4535; //Convierte de lbs a Kgs.
}
```

3.3.3. Distribución física de los sensores Flexiforce

En el desarrollo del proyecto se utilizan seis sensores Flexiforce, con sus respectivos adaptadores, ubicados en cada pierna del robot, como se muestra, en la vista frontal y superior del hexápodo, de las Figuras 3.9 y 3.10, respectivamente.

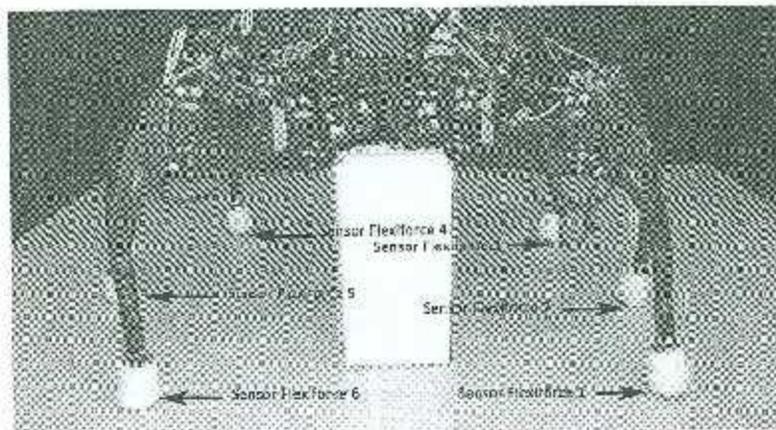


Figura 3.9. Distribución de los sensores Flexiforce en el robot hexápodo

3. Sistema electrónico del robot hexápodo

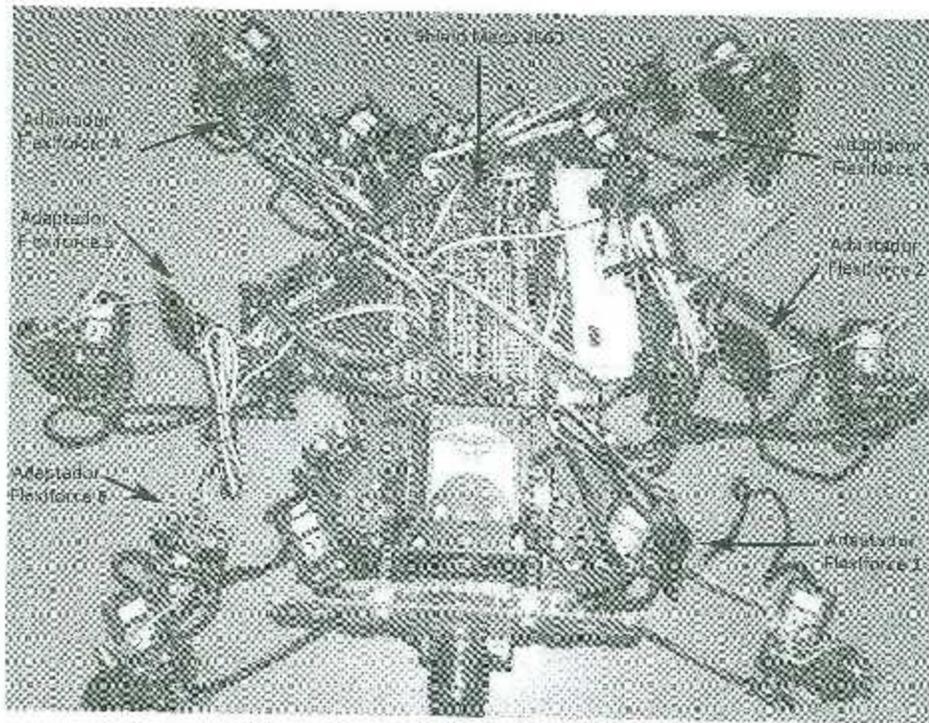


Figura 3.10: Distribución de los adaptadores de los sensores Flexiforce

Los Flexiforce están conectados a un shield especial para el Arduino Mega 2560 para poder realizar sus lecturas (véase Figura 3.11). Para instalar los sensores de fuerza se usaron unas puntas de goma como puede observarse en la Figura 3.12.

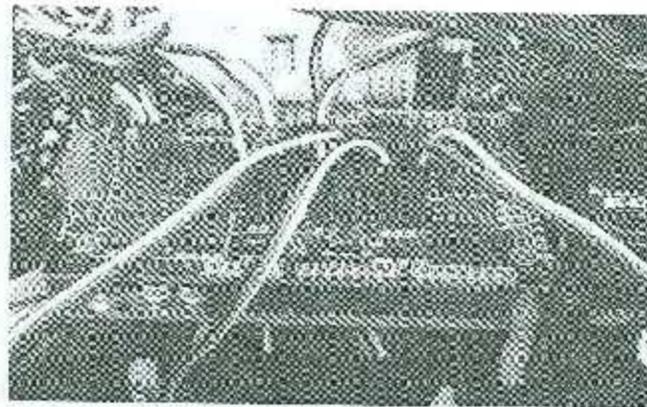


Figura 3.11: Placa adaptadora para conectar Arduino Mega 2560

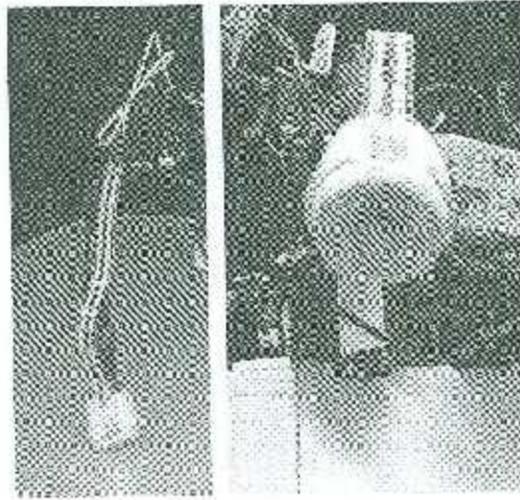


Figura 3.12: Ubicación del sensor Flexiforce en la pierna del robot

3.4. Central Inercial AeroQuad v2.1

Esta central utilizada, en un inicio, para medir la orientación del robot hexápodo, no incluye filtro. El sistema electrónico inercial AeroQuad v2.1 consta de un acelerómetro ADXL345 y un giroscopio L3G4200D, que se describen a continuación.

3.4.1. Acelerómetro

Se denomina acelerómetro a cualquier instrumento destinado a medir aceleraciones. Esto no es necesariamente lo mismo que la aceleración de coordenadas (cambio de la velocidad del dispositivo en el espacio), sino que es el tipo de aceleración asociada con la fuerza que experimenta una masa que se encuentra en el marco de referencia del dispositivo. Un ejemplo en el que este tipo de aceleraciones son diferentes es cuando un acelerómetro medirá un valor al tocarse la masa en el suelo, ya que las masas tienen un peso, a pesar de que no hay cambio de velocidad. Sin embargo, el acelerómetro en caída gravitacional libre hacia el centro de la Tierra medirá otro valor, ya que, a pesar de que su velocidad es

3. Sistema electrónico del robot hexápodo

cada vez mayor, esté en un marco de referencia en el que no tiene peso.

El ADXL345 es un acelerómetro de 3 ejes, pequeño, delgado, de baja potencia y con alta resolución (13 bits) que permite realizar mediciones de hasta ± 16 g. (véase Figura 3.13). Los datos digitales están formateados en dos complementos de 16 bits a través de una interfaz SPI (3- o 4-wire) o *I²C*.

El ADXL345 es ideal para medir aceleración estática en aplicaciones de sensado de inclinación, así como aceleraciones dinámicas resultantes de movimiento e impactos. Su alta resolución (4 mg/LSB) permite mediciones de inclinación con cambios menores a 1°.

Así mismo posee varias funciones especiales como sensado de actividad e inactividad para detectar la presencia o ausencia de movimiento. También se puede detectar si la aceleración excede un umbral determinado por el usuario en alguno de los ejes. Otra función importante es la detección de taps sencillos y dobles, por lo que se puede usar como mouse. La función de *free-fall* puede detectar si el dispositivo se está cayendo. Estas funciones pueden ser mapeadas a uno de los dos pines de interrupción que posee. Además cuenta con un buffer FIFO de 32 niveles para guardar datos y minimizar la interacción del procesador host. Los modos de bajo consumo permiten ceusar el acelerómetro empleando muy poca energía [AnalogDevices, 2009].



Figura 3.13: Acelerómetro ADXL345.

PMODACL

El PmodACL (véase Figura 3.14) es un acelerómetro digital de 3 ejes impulsado por el ADXL345 de Analog Devices. Utiliza un estándar de 12 pines Pmod y se puede comunicar a través de SPI o I^2C .

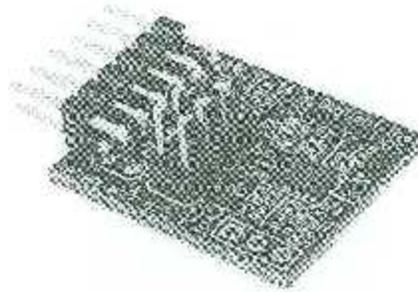


Figura 3.14: PModACL

Entre las características del PModACL, se incluyen [Digilent Inc., 2011a]:

- Resolución seleccionable por el usuario.
- Detección de single-tap/double-tap.
- Monitoreo de actividad / inactividad.
- Detección de caída libre.
- Interfaces SPI y I^2C .

3.4.2. Giroscopio

Un giroscopio es un dispositivo que permite el cálculo de la orientación y la rotación, basada en el principio del momento angular.

El giroscopio L3G4200D (véase Figura 3.15) tiene muchas opciones configurables, incluyendo tres sensibilidades de velocidad angular, una selección de las velocidades de datos de salida, un buffer FIFO integrada para el almacenamiento temporal de datos de salida

3. Sistema electrónico del robot hexápodo

y una señal programable de interrupción externa. Las tres lecturas de velocidad angular están disponibles a través de una interfaz digital, que puede ser configurada para operar en cualquier modo I^2C o SPI.

El sensor tiene una escala de $\pm 250/\pm 500/\pm 2000^\circ/s$ y es capaz de medir los índices con un ancho de banda seleccionable por el usuario. Puede operar en un rango de temperatura de $-40^\circ C$ a $+85^\circ$ [STMicroelectronics, 2010].

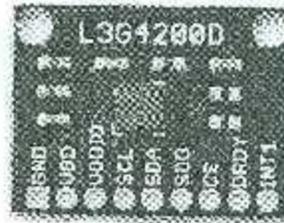


Figura 3.15: Giroscopio L3G4200D

PMODGYRO

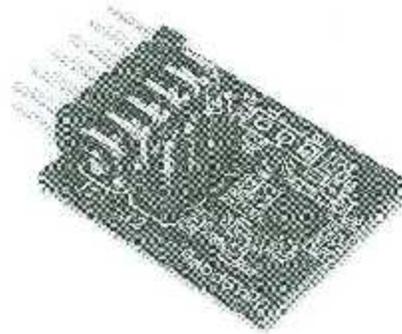


Figura 3.16: PMODGYRO

El PMODGYRO (véase Figura 3.16) es un giroscopio de tres ejes con salida digital y sensor de temperatura. El cual contiene el giroscopio L3G4200D. Utiliza un estándar de 12 pines para la comunicación SPI y 8 pines para la comunicación I^2C .

Entre las características del PMODGYRO se incluyen [Digilent Inc., 2011]:

- Interfaz de comunicación I^2C y SPI.
- Resolución seleccionable entre 250/500/2000dps.
- Dos pines de interrupción personalizables.
- Alimentación de bajo consumo.

3.4.3. Bus de comunicación

Todas las comunicaciones con el dispositivo deben especificar una dirección de registro y una bandera que indica si la comunicación es una lectura o escritura. Esto es seguido por la transferencia de datos real.

La configuración del dispositivo se realiza por escrito a través de los registros de control dentro del mismo. Se accede a los datos del acelerómetro o giroscopio mediante la lectura a través del dispositivo de registro.

Para más información, una lista completa de registros y su funcionalidad, así como las especificaciones de comunicación, se deben consultar las hojas de datos de los dispositivos [AnalogDevices, 2009] y [STMicroelectronics, 2010].

El estándar de interfaz I^2C utiliza dos líneas de señales. Estas son la línea de datos (SDA) y la línea de reloj (SCLK). En la tabla 3.1 se puede observar la interfaz de conexión así como la descripción de las señales de la comunicación I^2C .

Tabla 3.1: Interfaz de comunicación I^2C

Pin	Señal	Descripción
1, 2	SCLK	Reloj en Serie
3, 4	SDA/SDI/SDIO	Datos I^2C
5, 6	GND	Tierra de la fuente de Alimentación
7, 8	VCC	Voltaje 3.3 V de la fuente de Alimentación

En la Figura 3.17 se muestra la ubicación de las conexiones del giroscopio y el acelerómetro.

3. Sistema electrónico del robot hexápodo

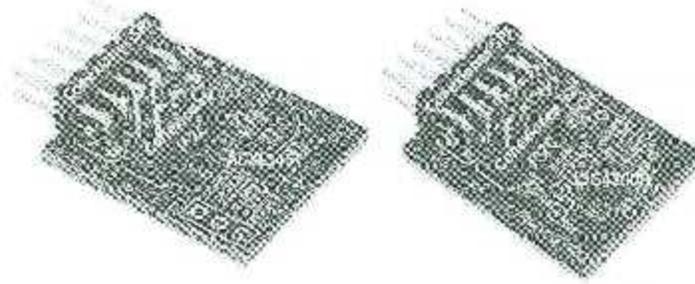


Figura 3.17: PMODGYRO, PMODACL y sus conexiones

3.4.4. Rutina para la central inercial en el Arduino Mega

Para iniciar con la medición de la inclinación mediante el dispositivo PMODACL y el Arduino Mega 2560, primeramente hay que descargar una biblioteca de funciones que permite la comunicación del acelerómetro vía I^2C . Esta biblioteca la podemos encontrar en la página: <https://www.loveelectronics.co.uk/products/136/3-axis-accelerometer---adx1345-breakout-board>.

Para hacer la conexión del dispositivo PMODACL con la tarjeta Arduino Mega 2560 hay que seguir los siguientes pasos:

- Conectar la tierra del PMODACL a la tierra de la tarjeta.
- Conectar VCC a 3.3v ya que funciona con una tensión de alimentación entre 2.0v y 3.6v.
- Conectar el SDA (línea de datos) del PMODACL al SDA (línea de datos) de la tarjeta Arduino Mega 2560.
- Conectar el SCL (línea de reloj) del PMODACL al SCL (línea de datos) de la tarjeta Arduino Mega 2560.

Una vez descargada la biblioteca indicada, y conectados los sensores, se procede con el código a utilizar. El programa se inicia incluyendo los archivos de cabecera

```
# include <Wire.h>
```

```
# include <ADXL345.h>
ADXL345 accel
```

Posteriormente se configura el puerto serie, para trabajar a una velocidad de 9600 baudios. Se inicializa la librería Wire, la cual inicia la comunicación *I²C* con el dispositivo. Después, se crea una instancia del acelerómetro. Enseguida, mediante un arreglo, se checa, si el acelerómetro está conectado. También se establece el rango del acelerómetro para un máximo de 2G (fuerza g), y por último se habilita al acelerómetro para empezar a tomar medidas.

```
void setup ()
{
  Serial.begin(9600);
  wire.begin();
  accel=ADXL345();
  if (accel.EnsureConnected())
  {
    Serial.println("El acelerometro esta conectado");
  }
  else
  {
    Serial.println("El acelerometro no esta conectado");
  }
  accel.SetRange(2, true);
  accel.EnableMeasurements();
}
void loop ()
{
  if (accel.isConnected)}
  {
    accelerometerScales scaled=accel.ReadScaledAxis();
```

3. Sistema electrónico del robot hexápodo

```
float xAxisGs-scaled ,XAxis;  
Output(scaled);  
}  
}
```

Un procedimiento similar al descrito anteriormente se sigue para programar y conectar el giroscopio PMODGYRO.

3.5. Sistema electrónico para la detección y seguimiento de objetos

El sistema electrónico para la detección y seguimiento de objetos está conformado por un sensor de visión PS EYE, el cual se describe a continuación.

3.5.1. Sensor de visión PS EYE

La PlayStation Eye (marca registrada) es un dispositivo de cámara digital (véase Figura 3.18), similar a una cámara web, para la consola PlayStation 3. La tecnología utiliza la visión por computadora y reconocimiento de gestos para procesar las imágenes tomadas por la cámara. Esto permite a los jugadores interactuar con los juegos con detección de movimiento y color [PlayStation, 2015].

Presenta las siguientes características:

- Captura vídeo estándar con velocidades de fotogramas de 60 hertz a una resolución de 640x480 píxeles y 120 hertz a 320x240 píxeles.
- Velocidad de fotogramas de hasta 320x240 a 187 ó 640x480 a 75 fps.
- Es compatible con aplicaciones específicas como FreeTrack y LinuxTrack.

- Tiene “dos veces la sensibilidad” del sensor EyeToy, lo que permite la operación más eficaz bajo una luz.



Figura 3.18: Sensor de visión PS Eye

- Cuenta con una lente de foco fijo de zoom ajustable. Se puede establecer en un campo de 56° o 75° .
- Conexión por USB.
- Dimensiones de 80 mm x 55 mm x 65 mm.

3.5.2. Arquitectura para el sensor de visión PS Eye

Para la puesta en operación del sensor de visión se crea un sistema que consta de dos servomotores Hitec HS122 de giro continuo, los cuales reciben señales de velocidad y presentan las siguientes características [Hitec, 2013]:

- Sistema de control por anchura de pulso de 1.5 ms al centro.
- Tensión de funcionamiento de 4.8 a 6 V.
- Velocidad a 6 V de 0.16 seg/60 grados sin carga.
- Fuerza a 6 V de 4.1 kg cm
- Corriente de reposo de 8 mA.
- Corriente de funcionamiento de 150 mA sin carga.
- Corriente máxima de 1100 mA.
- Rango de trabajo de 1100 a 1900 μ sec.

3. Sistema electrónico del robot hexápodo

- Dimensiones $40.6 \times 19.8 \times 36.6$ mm.
- Peso de 45.5 g.
- Rociamiento principal metálico y engratajes de plástico

Con el objetivo de lograr el seguimiento de un objeto se emplea la cámara PS-Eye para conocer la posición de éste. El procesamiento de imágenes se realiza con las funciones de la biblioteca AForge.NET. Estas funciones están desarrolladas en lenguaje de programación C# y para mandar las señales del sensor se utiliza el microcontrolador ATmega 2560, el cual se comunica vía USB a una computadora, y a su vez el Arduino tiene conectado en las terminales para señal PWM los servomotores HITEC modelo HS-422 (véase Figura 3.19).

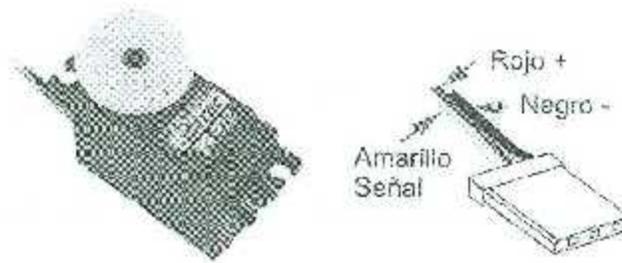


Figura 3.19: Servomotor HITEC HS-422

La cámara se monta sobre el servomotor con una corona en forma de hélice que viene como accesorio. El Arduino manda señales de sentido del giro al servomotor, de tal manera que éste va a girar a una misma velocidad, solamente que va a cambiar el sentido de giro. El diagrama de conexión se muestra en Figura 3.20. Para conocer el sentido del giro, la computadora lee las imágenes que son tomadas por la cámara y con las cuales se va a realizar el procesamiento de imágenes (segmentación e interpretación).

El procesamiento de imágenes por computadora se realiza en dos fases que son segmentación e interpretación. La primera fase (segmentación) se realiza para eliminar la información que está presente en la imagen y no es requerida, la segunda fase (interpretación) se aplica una vez que se tiene la información filtrada por la segmentación y se



Figura 3.20: Arquitectura del sistema para el sensor de visión PS Eye

procede a hacer cálculos como el área y la ubicación del centro geométrico o centro de del objeto a seguir [Sáenz, 2013].

3.5.3. Rutina para la PS Eye en el Arduino Mega 2560

Para utilizar los servomotores es necesario descargar la biblioteca que contiene los métodos para mandar una señal PWM por el puerto que se le indique, con la frecuencia necesaria para mover un servomotor HITEC.

Una vez descargadas la biblioteca, y conectados los servomotores, se procede con el código a utilizar. El programa inicia incluyendo el archivo de cabecera de la biblioteca correspondiente, se crea un objeto de la clase Servo que sirve para establecer el puerto e indicar las señales que se deben enviar, y se declara una variable para almacenar el carácter para indicar el sentido de giro:

```
#include <Servo.h>
Servo myservo;
```

3. Sistema electrónico del robot hexápodo

```
int dato;
```

Posteriormente se configura el puerto serie, para trabajar a una velocidad de 9600 baudios. Se inicializa `myservo.attach(9)` para indicar la salida del PWM. Enseguida se crea un arreglo para verificar si existe información en el buffer de entrada. Una vez que se tiene el dato almacenado, entra en la sentencia de selección múltiple para detectar el sentido de giro ('l'= izquierda ó 'r'= derecha) del servomotor o detenerlo ('s'=detener).

```
void setup()
{
  myservo.attach(9);
  Serial.begin(9600);
}
void loop()
{
  if(Serial.available()>0)
  {
    dato = Serial.read();
    switch ((char) dato)
    {
      case 'l':
        myservo.write(80);
        break;
      case 'r':
        myservo.write(100);
        break;
      case 's':
        myservo.write(0);
        break;
    }
  }
}
```

}
}

3.5.4. Instalación del sensor PS-Eye en el hexápodo

El sensor de visión utilizado se coloca en la parte frontal del hexápodo, como puede verse en la Figura 3.21.

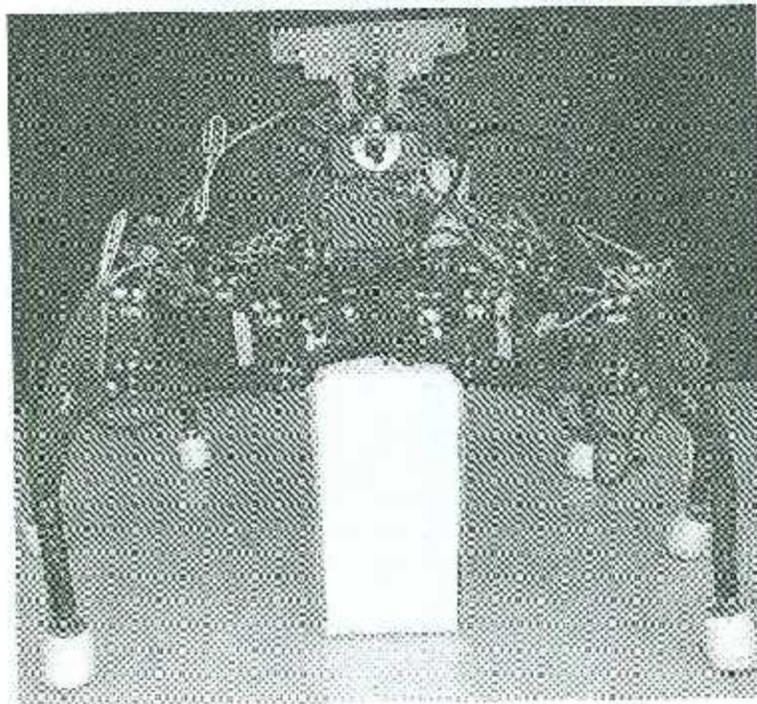


Figura 3.21: Ubicación del sensor de visión PS Eye en el robot hexápodo

3. Sistema electrónico del robot hexápodo

Se encuentra montado sobre una estructura con dos servomotores Hitec, los cuales se conectan al shield del Arduino Mega 2560 para la recepción de la señal de entrada como se muestra en la Figura 3.22.

En la Figura 3.23, se observan las conexiones generales a la placa adaptadora del Arduino de todos los sensores utilizados en el robot hexápodo.

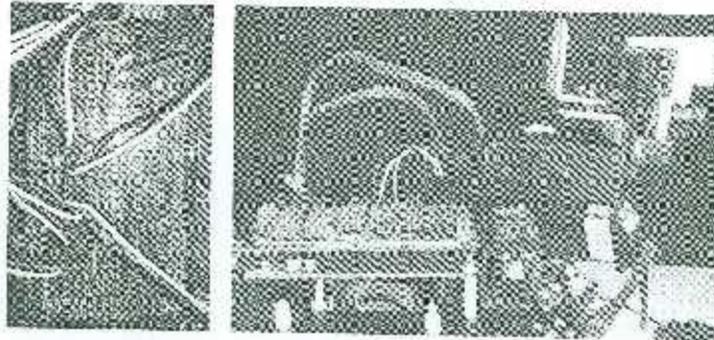


Figura 3.22: Conexiones del sensor de visión PS Eye

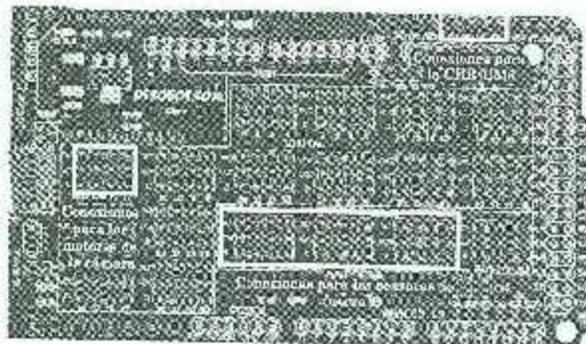


Figura 3.23: Conexiones Generales en la placa adaptadora Arduino

3.5.5. Sistema electrónico completo

En las secciones anteriores se describen cada uno de los diferentes elementos que componen la electrónica del robot hexápodo.

En la Figura 3.24 se muestra un diagrama del sistema electrónico completo donde se aprecian las relaciones que existen entre los diferentes elementos.

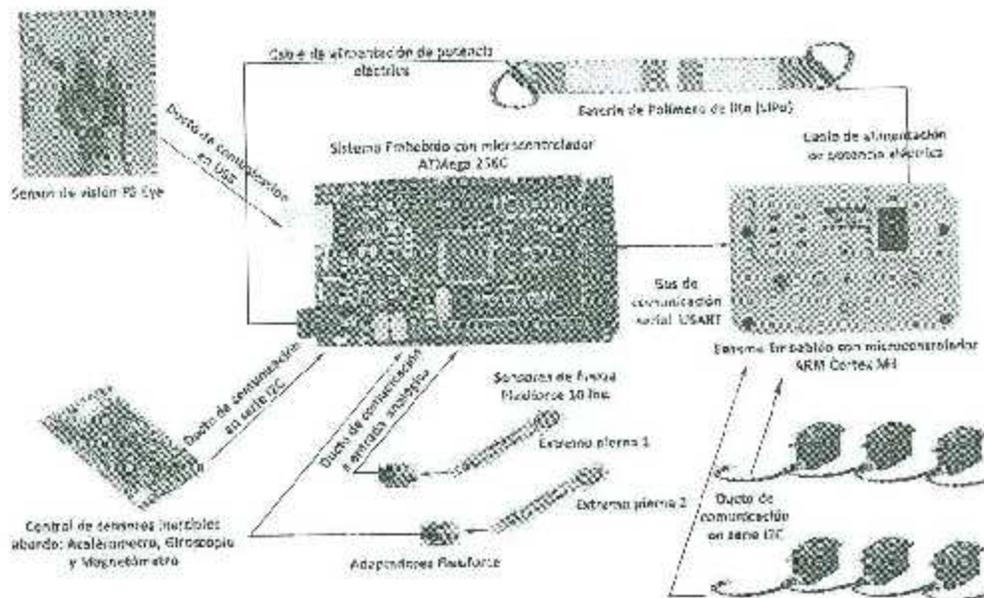


Figura 3.24: Sistema electrónico completo del robot hexápodo

3. Sistema electrónico del robot hexápodo

Capítulo 4

Descripción del sistema de navegación del robot hexápodo

Un robot móvil se caracteriza por realizar una serie de desplazamientos (navegación) y por llevar a cabo una interacción con distintos elementos de su entorno de trabajo (operación), que implican el cumplimiento de una serie de objetivos impuestos según cierta especificación.

Se le llama sistema de navegación a la metodología que permite guiar el curso de un robot móvil a través de un entorno. Las tareas involucradas en la navegación de un robot móvil son: la percepción del entorno a través de sus sensores, de modo que le permita crear una abstracción del mundo y la planificación de una trayectoria libre de obstáculos. Así, se define el concepto de operación como la programación de las herramientas de a bordo que le permiten realizar la tarea especificada [Muñoz, 2005].

En este capítulo se analiza el sistema de navegación del robot hexápodo, considerando principalmente los siguientes aspectos:

1. La estructura jerárquica del sistema de control.

4. Descripción del sistema de navegación del robot hexápodo

2. El sistema de control de los servoactuadores.
3. La planificación de las trayectorias deseadas.
4. El espacio de trabajo de cada pierna del robot.

Estos aspectos se tratan en las siguientes secciones: 4.1 Estructura del sistema de control, 4.2 Sistema de control de los servoactuadores, 4.3 Planificación del caminado del robot, 4.4 Espacio de trabajo.

4.1. Estructura del sistema de control

El robot hexápodo del Instituto Tecnológico de la Laguna cuenta con un sistema de control distribuido que consta de tres partes:

- Microcontrolador sensorial embarcado a bordo del robot.
- Microcontrolador maestro embarcado a bordo del robot.
- Microcontrolador integrado en el módulo de cada servo.

El microcontrolador sensorial es el ATmega2560 de la tarjeta Arduino Mega2560 y es el encargado de procesar las señales entregadas por los diversos sensores del sistema electrónico y enviar las señales al microcontrolador maestro.

El llamado microcontrolador maestro es el encargado de diseñar las trayectorias necesarias para el caminado del hexápodo. Básicamente es el módulo CM-530 que contiene el ARM-CORTEX-M3.

Además, cada uno de los 18 servomotores (3 por cada pierna) cuenta con un microcontrolador dedicado exclusivamente a implementar un controlador de posición, empleando dos lazos internos (un PID de posición y un PI de corriente).

4. Descripción del sistema de navegación del robot hexápodo

El microcontrolador maestro cuenta con puertos de comunicación, dedicados cada uno específicamente a realizar el enlace de comunicación serial con las piernas de forma simultánea. La medición en tiempo real de las variables de estado físicas (posición y velocidad de movimiento, así como la corriente eléctrica del servo) se realiza por medio del microcontrolador integrado en cada servomotor; la comunicación de datos se realiza mediante otro puerto del microcontrolador maestro de a bordo, conectado mediante un circuito de interfaz hacia un puerto *I²C* del microcontrolador integrado en el servo. En este proceso, cada microcontrolador de servo recibe las consignas de posición deseada y velocidad de avance, y envía de regreso las variables medidas de posición, velocidad y de la corriente eléctrica, al microcontrolador maestro.

Se puede considerar que existen cuatro sistemas de control a diferentes niveles, como se explica a continuación:

1. El primer nivel de control es el sistema que implementa el control de posición (PID-PI) en cada uno de los servos.
2. El segundo nivel realiza la realimentación de la fuerza aplicada en el extremo final de cada pierna del robot, para determinar la compensación de movimiento de las piernas, si se encuentra algún obstáculo en la superficie de desplazamiento. Este lazo puede ser considerado como el controlador de movimiento de una pierna completa del robot, por lo que en total se tienen seis controladores de movimiento, uno por cada pierna del robot.
3. Un tercer controlador realimenta la orientación y la dirección de navegación del robot. Los sensores utilizados para tal medición son: un acelerómetro en conjunto con un giroscopio y un magnetómetro, los que contienen cualquiera de las centrales inerciales que puede llevar el robot.
4. Un cuarto sistema de control es el que permite detectar obstáculos por medio de un sensor ultrasónico o bien seguir un objeto por medio de un sensor de visión (como el PS-Eye).

4.2. Sistema de control de los servoactuadores

Los servomotores utilizados para en el hexápodo cuentan con un sistema de comunicación en serie para recibir las consignas de posición y velocidad en formato digital, también cuentan con la capacidad de enviar paquetes de datos que representan las variables de estado del servomotor, como lo son la posición y velocidad angular, así como la corriente y el par eléctricos de servomotor. Cada servomotor tiene integrado un microcontrolador que ejecuta un algoritmo de control realimentado de doble lazo (que contiene un PI de corriente y un PID de posición). Si $u_c(t)$ es la señal de control aplicada a un servomotor entonces:

$$u_c(t) = K_{pc}i_e(t) - K_{vc} \int i_e(t)$$

donde $i_e(t) = i_d(t) - i_c(t)$ es el error de corriente del servomotor de una pierna, ya que $i_d(t)$ es la corriente deseada e $i_c(t)$ es la corriente medida. La corriente deseada $i_d(t)$ es la salida de un controlador PID de posición, es decir

$$i_d(t) = K_p\theta_e(t) + K_i \int \theta_e(t) + K_v\dot{\theta}_e(t)$$

donde $\theta_e(t) = \theta_d(t) - \theta(t)$ es el error de posición, $\theta_d(t)$ es la posición deseada y $\theta(t)$ es la posición actual. Estos dos lazos de control se implementan en cada servomotor de modo que, para una pierna del hexápodo se tendrá un diagrama de control como el mostrado en la Figura 4.1.

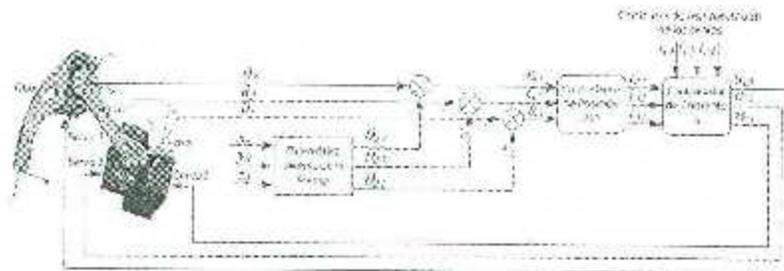


Figura 4.1: Arquitectura del sistema de control realimentado de una pierna del robot

4.3. Planificación del caminado del robot

Una de las tareas más importantes que tiene el control de navegación es el seguimiento de la trayectoria de cada paso a realizar por el hexápodo. Esta trayectoria está definida principalmente por el tipo de paso a realizar, las restricciones mecánicas, la cinemática y las características del terreno. En la Figura 4.2 se muestra la trayectoria de movimiento conocido como semicicloidal. Este movimiento se puede observar mejor en la proyección del plano de la trayectoria del paso $x - y$, para el caso de 2 g.d.l., y en el plano $y - z$, para 3 g.d.l. De forma que a partir de la altura y la longitud del paso, se construye automáticamente dicha trayectoria.

Debido a que los planos $x - y$ y $y - z$ son paralelos, y se realizan los mismos cálculos en ellos, a partir de este punto se mencionarán los procedimientos realizados, únicamente, con respecto al plano $y - z$.

Las ecuaciones para la planificación del movimiento semicicloidal son

$$y_d(t) = y_m + B \cos\left(\frac{t\pi}{t_f - t_i}\right), \quad t_i \leq t \leq t_f$$

$$z_d(t) = \begin{cases} z_i, & t_i \leq t \leq \frac{1}{2}t_f \\ z_i - A \operatorname{sen}\left(\frac{t\pi}{t_f - t_i}\right), & \frac{1}{2}t_f < t \leq t_f \end{cases}$$

donde y_m es el valor en el eje y donde el paso alcanza la altura máxima, z_i la distancia inicial en el eje z , B y A indican el valor medio de la longitud y la altura del paso respectivamente, mientras que las constantes t_i y t_f representan el tiempo transcurrido al avanzar la distancia. Para la Figura 4.2 dichas ecuaciones quedan como:

$$y_d(t) = 5 + 5 \cos\left(\frac{t\pi}{20}\right), \quad t_i \leq t \leq t_f$$

$$z_d(t) = \begin{cases} 0, & t_i \leq t \leq \frac{1}{2}t_f \\ 3 - 4 \operatorname{sen}\left(\frac{t\pi}{20}\right), & \frac{1}{2}t_f < t \leq t_f \end{cases}$$

4. Descripción del sistema de navegación del robot hexápodo

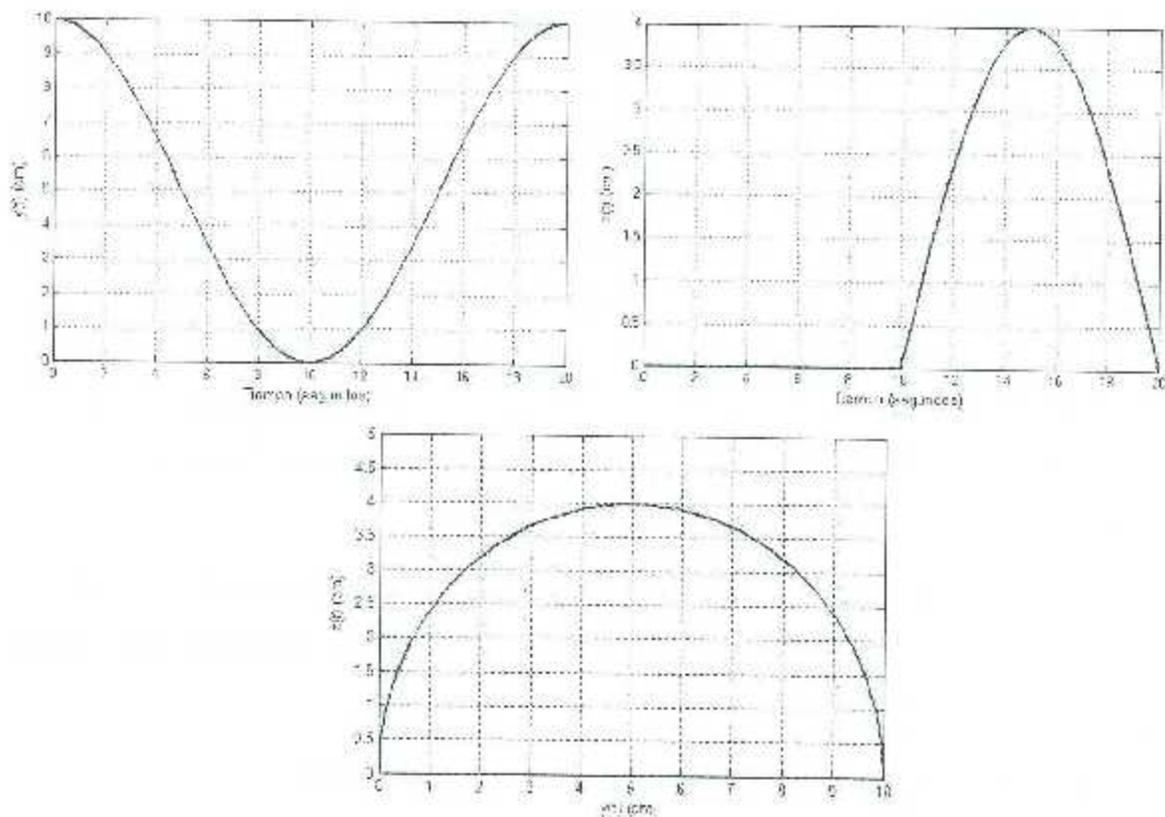


Figura 4.2: Trayectoria deseada para una pierna del robot

Este tipo de patrón de caminación se ha propuesto debido a sus características para modificar su período, longitud y altura.

El algoritmo de locomoción implementado para llevar a cabo la navegación del robot es programado en el lenguaje de programación C++ para el microcontrolador ARM CORTEX M3. Los movimientos de avance del robot hexápodo son calculados en el espacio de trabajo (x, y, z) , mediante trayectorias semicicloidales, mostradas anteriormente, de tal manera que la secuencia de pasos del robot se realiza por medio del control de movimiento de tripié con una consigna de seguimiento de trayecto semicicloidal. El robot puede avanzar de forma frontal y lateral, así como realizar movimientos de rotación sobre su centro geométrico. Para realizar movimientos simultáneos con tres piernas, se aplica el concepto conocido como caminado con tripié o triángulo de equilibrio, donde el robot hexápodo

4. Descripción del sistema de navegación del robot hexápodo

conserva su equilibrio, ya sea que esté sostenido estáticamente o realizando un movimiento de avance o de rotación. El concepto consiste en conservar el centro de gravedad del robot dentro del área formada por el tripié o triángulo de apoyo. En las Figuras 4.3 y 4.4 se muestra el tripié de movimiento frontal y lateral del robot, respectivamente.

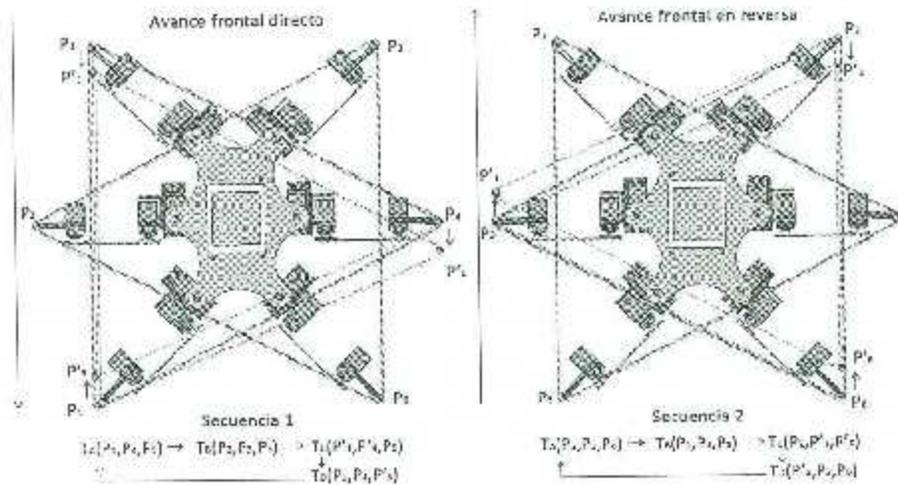


Figura 4.3: Tripiés para el caminado frontal del robot.

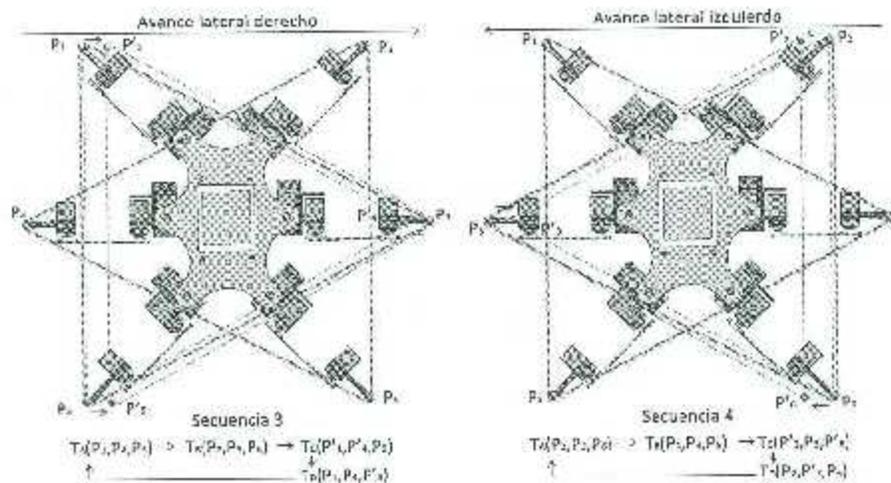


Figura 4.4: Tripiés para el caminado lateral del robot.

En la tabla 4.1 se muestra la secuencia de tripiés para el movimiento del robot. Para obtener más información acerca de métodos de locomoción se debe consultar las referencias [Celaya y Porta, 1998] y [Showalter, 2009].

4. Descripción del sistema de navegación del robot hexápodo

Tabla 4.1: Secuencia de tripiés

Tripié	Avance	Retroceso	Derecha	Izquierdo
A	P_1, P_4, P_5	P_2, P_3, P_6	P_1, P_4, P_5	P_2, P_3, P_6
B	P_2, P_3, P_6	P_1, P_4, P_5	P_2, P_3, P_6	P_1, P_4, P_5
C	P'_1, P'_4, P'_5	P'_2, P'_3, P'_6	P'_1, P'_4, P'_5	P'_2, P'_3, P'_6
D	P_1, P_4, P'_5	P'_2, P'_3, P_6	P_1, P_4, P'_5	P_2, P'_3, P_6

4.4. Espacio de trabajo

El espacio de trabajo de cada una de las piernas está definido por el volumen descrito por la cinemática del mecanismo que conforma la pierna, particularmente interesa el punto final de la extremidad que tiene contacto con la superficie. El conocimiento del espacio de trabajo permite saber cuál será la movilidad de cada una de las piernas.

Cabe aclarar que las áreas de trabajo de las piernas son idénticas, lo que permite una mayor certeza en el diseño de los algoritmos de locomoción.

Para conocer el área de trabajo conformada por los 3 eslabones de una pierna, ésta se delimita de manera que se cumpla con las siguientes condiciones, para la Figura 4.5:

$$l_2 + l_3 > k$$

$$l_3 - l_2 < k$$

$$l_2 - l_3 < k,$$

donde

$$k = \sqrt{x'^2 + y'^2 + z'^2}$$

$$x' = x - l_1 \cos(\theta)$$

$$y' = y - l_1 \sin(\theta)$$

$$z' = z$$

4. Descripción del sistema de navegación del robot hexápodo

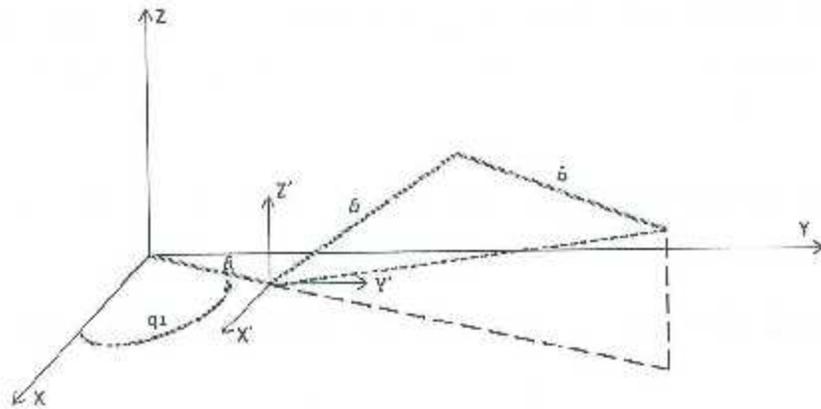


Figura 4.5: Esquema para el cálculo del área de trabajo

y los valores límites, para k están dados por:

$$25.7 > k$$

$$k > 8.93$$

generándose el área de trabajo como se muestra en la Figura 4.6.

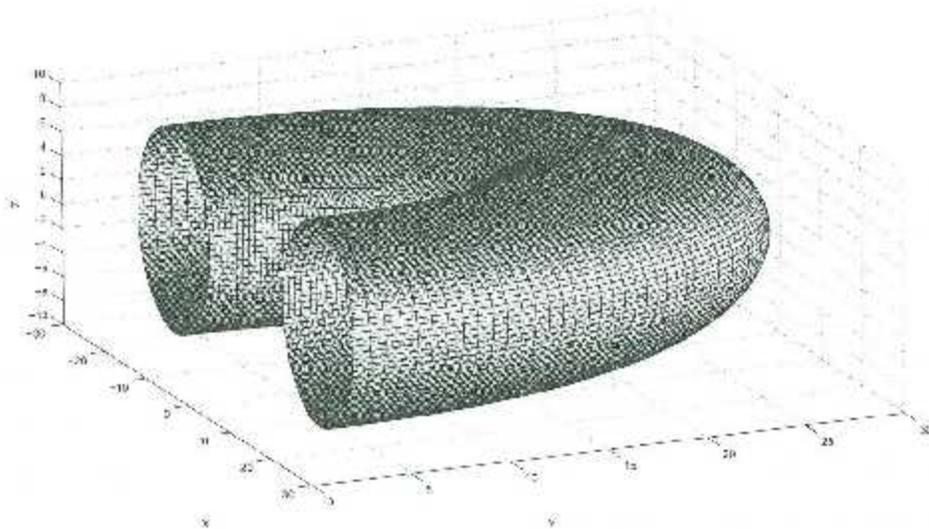


Figura 4.6: Espacio de trabajo de una pierna de 3 g.d.l. del robot.

4. Descripción del sistema de navegación del robot hexápodo

Considerando las limitantes físicas de la estructura en su conjunto y tomando en cuenta que el valor de q_1 es constante, el área de trabajo, en el plano $y-z$, se muestra en la Figura 4.7.

Debido a que la trayectoria deseada debe estar contenida en dicha área, se eligieron los parámetros mostrados en la Tabla 4.2, para su diseño.

Tabla 4.2: Valores utilizados en el diseño de la trayectoria deseada

Parámetro	Valor
A	4
B	5
y_m	15
z_s	-16
$t_f - t_s$	2

Quedando la ecuación de la trayectoria deseada como:

$$y_d(t) = 15 - 5 \cos\left(\frac{t\pi}{2}\right), 0 \leq t \leq 2 \quad (4.1)$$

$$z_d(t) = \begin{cases} -16, & 0 \leq t \leq 1 \\ -16 - 4 \operatorname{sen}\left(\frac{t\pi}{2}\right), & 1 < t \leq 2 \end{cases} \quad (4.2)$$

donde el valor de z_d para el tiempo de apoyo de la pierna es constante con un valor de -16 cm. La trayectoria deseada dibujada sobre el área de trabajo puede observarse en la Figura 4.7.

Es importante mencionar que la trayectoria deseada fue sufriendo cambios a lo largo del desarrollo de la tesis, debido a que el espacio de trabajo cambió a causa del tamaño del tercer eslabón, el cual sufrió modificaciones en el proceso de instalación de los sensores de fuerza, pasando de una longitud de 12.75 a 17.47 cm.

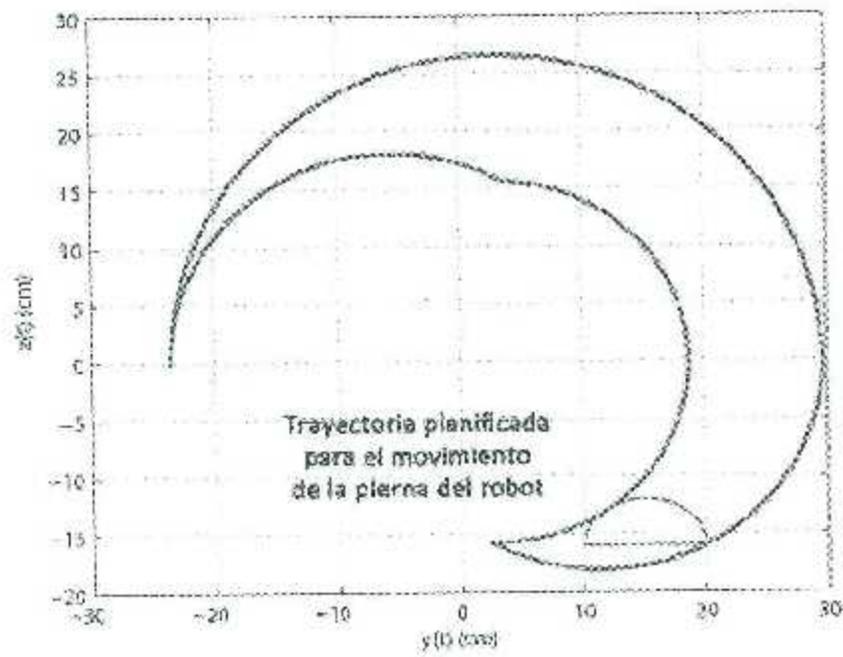


Figura 4.7: Espacio de trabajo en el plano $y-z$ de una pierna

4. Descripción del sistema de navegación del robot hexápodo

Capítulo 5

Simulación y Experimentación

5.1. Simulación

Con la finalidad de analizar en malla cerrada el comportamiento de los servomotores y su controlador PID al momento de generar la trayectoria deseada, se desarrolló una simulación en el software MatLab-Simulink, utilizando principalmente el bloque Embedded MatLab Function para ingresar las ecuaciones de la trayectoria deseada, la cinemática inversa y el modelo dinámico de una pierna del robot. En la Figura 5.1 se muestra el diagrama a bloques del controlador.

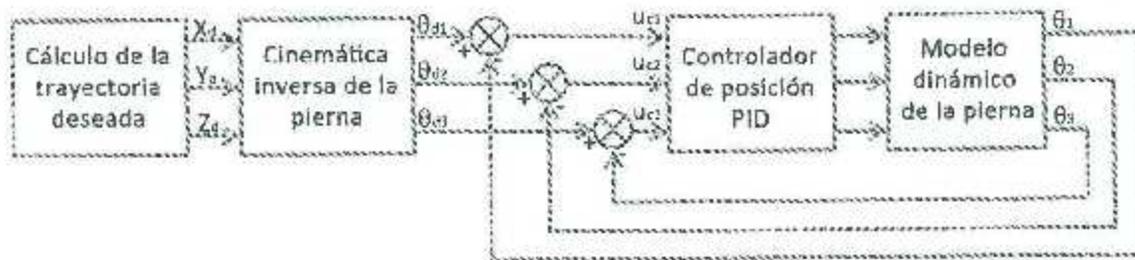


Figura 5.1: Diagrama a bloques del control de posición para una pierna del robot

La simulación se desarrolla considerando 2 g.d.l. y debido al desconocimiento de los valores reales para las ganancias de los controladores PID de cada servomotor, las ga-

5. Simulación y Experimentación

nancias de simulación se sintonizaron tomando en cuenta el valor de par máximo de los servomotores el cual es de 1.568 Nm, quedando dichas ganancias en: $K_{p1} = 5$, $K_{i1} = 1.2$, $K_{d1} = 0.2$ para el eslabón 1 y $K_{p2} = 3$, $K_{i2} = 1.9$, y $K_{d2} = 0.1$ para el eslabón 2.

En la Figura 5.2 se pueden observar las gráficas que describen las posiciones angulares que van tomando las articulaciones 1 y 2 para describir la trayectoria deseada descrita en las ecuaciones (4.1) y (4.2). En la gráfica superior, la línea punteada representa los valores deseados para el eslabón 1, mientras la línea sólida representa los valores que toma dicho eslabón una vez aplicado el controlador PID en simulación. En la gráfica inferior ocurre lo mismo pero para el eslabón 2.

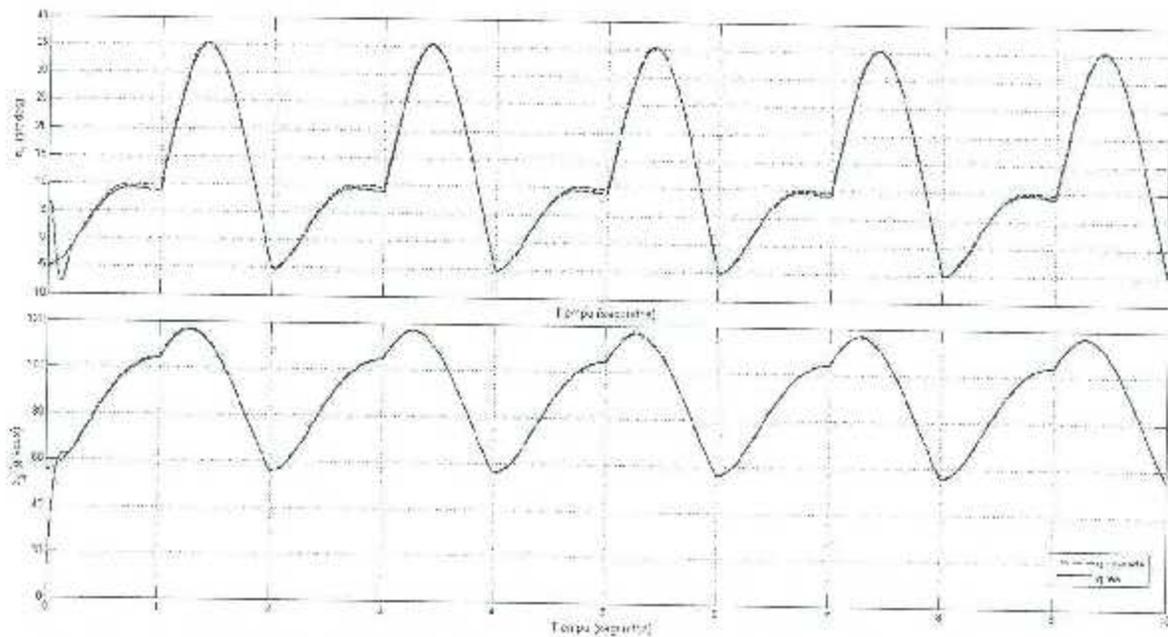


Figura 5.2: Simulación de la respuesta de la posición en ángulos para los eslabones 1 y 2 con un controlador PID

En la Figura 5.3 se observan los valores de posición deseados de los eslabones 1 y 2 individualmente, y en la Figura 5.4 se muestran dichos valores pero vistos desde el plano x - y donde se desarrolla la trayectoria deseada.

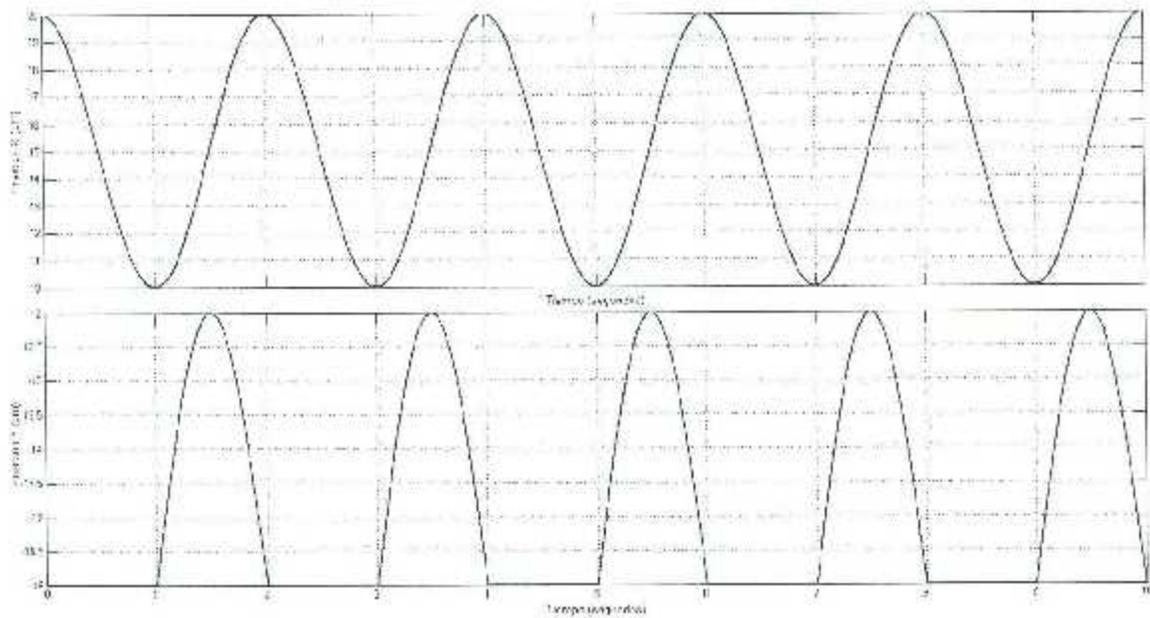


Figura 5.3: Simulación de la posición deseada para los eslabones 1 y 2

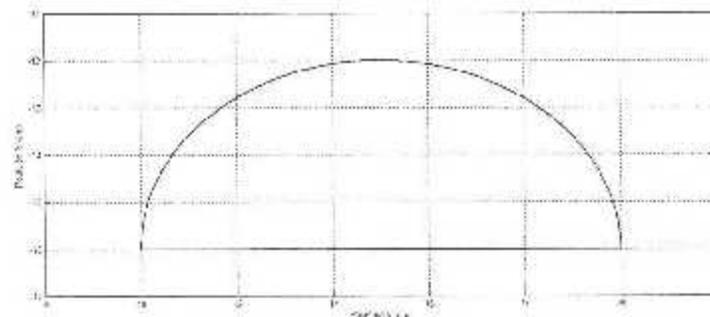


Figura 5.4: Simulación de la posición deseada para los eslabones 1 y 2 visto desde el plano xy

Como puede observarse en las gráficas, las articulaciones no logran alcanzar el valor deseado de posición, aún utilizando el controlador PID, el cual podría sintonizarse para una mejor respuesta, pero al hacerlo se sobrepasan los valores máximos de torque de los servomotores.

Sin embargo con los valores utilizados en simulación, el error en ambos eslabones como puede observarse en la Figura 5.5 es aceptable, ya que para el caso del eslabón 1 es de $\pm 1^\circ$ y para el eslabón 2 es de $\pm 0.5^\circ$.

5. Simulación y Experimentación

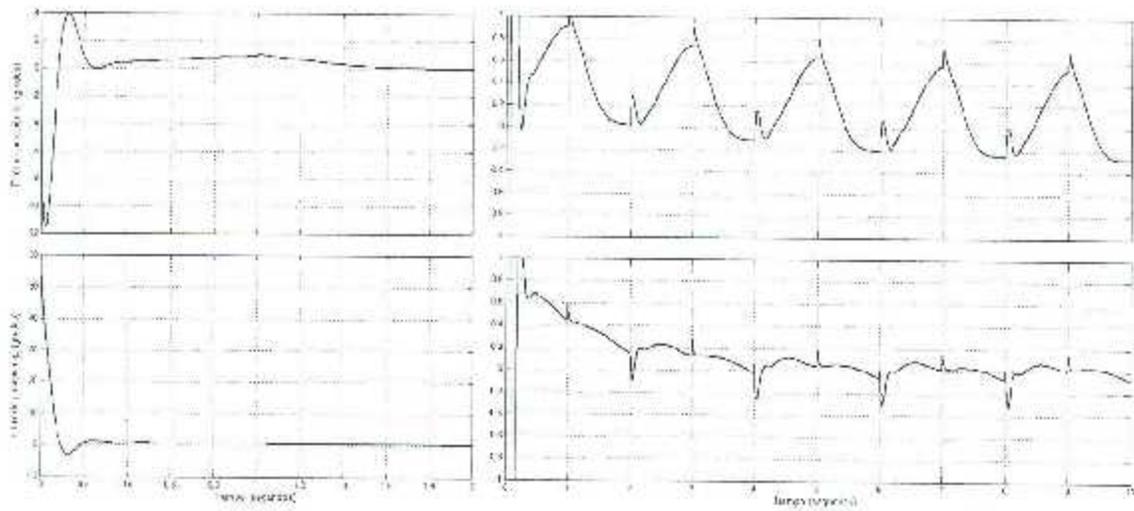


Figura 5.5: Valores del error de posición para los eslabones 1 y 2 con un controlador PID

Los valores de torque para los servomotores se muestran en las gráficas de la Figura 5.6 donde puede observarse que estos se mantienen dentro de los límites establecidos de $\pm 1.568 \text{ Nm}$

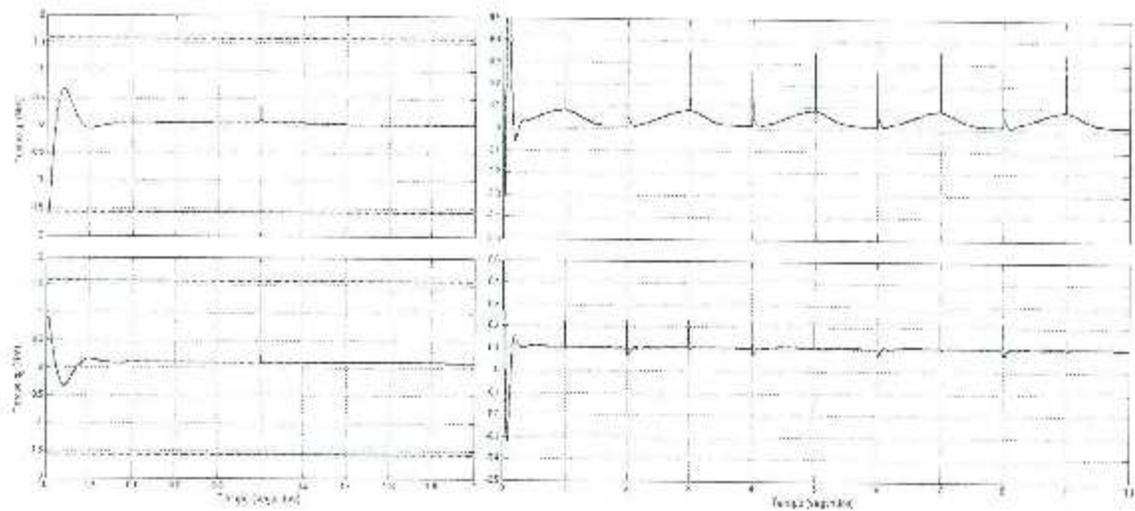


Figura 5.6: Valores del torque para los eslabones 1 y 2 con un controlador PID

Al analizar los resultados de simulación de la trayectoria deseada, por medio de la cinemática inversa y el uso del modelo dinámico de una pierna del robot, se puede concluir

que la trayectoria deseada es ejecutable, debido a que se encuentra dentro de los límites de torque máximo permitido y del área de trabajo de los servomotores.

Para simular la postura del robot, se desarrolló un programa con el paquete "MATLAB" y la herramienta "Hemero" cuyos comandos pueden consultarse en [Ollero, 2007]. "Hemero" contiene scripts para "MATLAB" que se pueden encontrar en línea y con permisos legales "Open Source". Entre las ventajas que presenta esta herramienta, está el poder ingresar directamente los parámetros de la convención Denavit-Hartenberg modificados y dar como resultado las matrices de transformación homogéneas. También puede calcular los ángulos de Euler a partir de las matrices de transformación y funcionar como simulador de postura para robots seriales.

Para realizar la simulación, primero se ejecuta un *script* para crear todas las matrices de transformación. Se ingresan los parámetros Denavit-Hartenberg de una sola extremidad y se utilizan los mismos para las otras 5 extremidades, únicamente cambiando la matriz que emplaza desde el marco de referencia del robot, que se encuentra en la base del cuerpo, hasta al marco que se sitúa donde se sujeta la extremidad al cuerpo. Una vez obtenidas las transformaciones para cada articulación es necesario multiplicarlas para obtener la transformación que va desde el marco de referencia del robot hasta el extremo de cada una de las articulaciones. Al final del *script* se crea una gráfica donde se muestra la posición del hexápodo en una posición inicial que se carga dentro del *script*.

Posteriormente se ejecutan diversos *scripts*, cada uno con diferente finalidad. Todos los *script* a partir de este punto contienen el modelo inverso de posición. Se probaron dos: uno para revisión de postura, al cual ingresando como parámetros la posición deseada del órgano terminal (OT) de cada una de las extremidades, se obtienen los ángulos que necesita cada uno de los actuadores para lograr dicha posición; y la segunda es la de movimiento lateral, donde ingresando la trayectoria deseada del marco del robot e ingresando la posición inicial de cada una de las extremidades, regresa un vector con el valor del ángulo que deben de tener los servomotores en cada instante de tiempo para lograr un avance lateral.

5. Simulación y Experimentación

Por último, teniendo los datos se crea un *script* que va recorriendo el vector e ingresando los valores de los ángulos en el modelo cinemático directo.

Lo anterior nos permite observar el movimiento del robot durante el caminado como se muestra en la Figura 5.7.

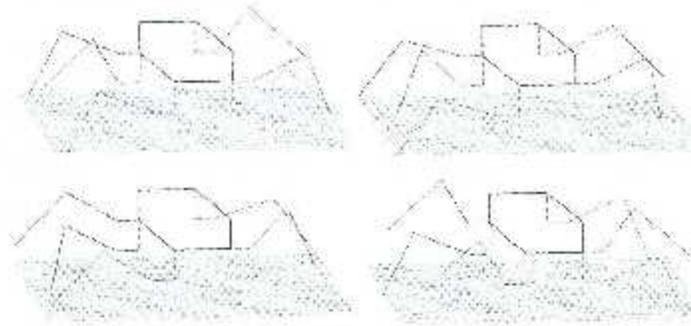


Figura 5.7: Movimiento lateral del hexápodo

La señal de entrada con la que se trabaja es una señal semicicloidal de amplitud de 4 cm. y longitud de 10 cm. Cabe aclarar que la trayectoria deseada no es la repetición continua de un semicírculo sino una combinación de éste con un movimiento lineal como se muestra en la Figura 4.2.

El tiempo de simulación es de 30 segundos. Como podrá observarse en las gráficas de las figuras que se presentan en la sección 5.3 los ángulos de las articulaciones tanto del primer tripie como del segundo, son casi iguales con la diferencia de que van desplazadas una de las otras porque el hexápodo siempre debe de tener por lo menos tres piernas de apoyo.

5.2. Experimentación

Los experimentos se realizaron dentro de las instalaciones del Laboratorio de Mecatrónica y Control en una superficie de desplazamiento firme y sin obstáculos. El modo de caminado del robot fue el avance lateral con una señal de entrada semicicloidal de

amplitud de 4 cm. y longitud de 10 cm. calculada por medio del microcontrolador ARM-CORTEX.M3. Del cual se obtuvieron los datos de ejecución después de haberse realizado las rutinas, esto debido a que la comunicación con los servomotores presenta problemas si se pretende hacer una lectura en tiempo real, la ejecución de la trayectoria deseada se interrumpe de forma discontinua.

5.3. Resultados

En esta sección se presentan conjuntamente los resultados de simulación (valores deseados) y experimentación (valores reales) con la finalidad de facilitar la comparación de dichos resultados.

La presentación de los resultados se realizará de la siguiente manera: Primero se presentan los valores de posición en el espacio de trabajo, obtenidos por las articulaciones y el plano para observar la trayectoria del paso. Posteriormente se muestran los valores en grados angulares obtenidos para poder realizar el posicionamiento de los servomotores, así como el valor del error para cada caso.

Esto para los dos casos que se han venido trabajando a lo largo del proyecto: considerando 2 y 3 g.d.l. para cada pierna del robot.

5.3.1. Resultados considerando sólo 2 g.d.l. de una pierna

La señal de entrada semicicloidal para este caso se ejecuta sobre el plano $x - y$, que es el plano sobre el que se calculó la cinemática inversa. Para este caso las piernas presentan una distribución longitudinal.

La articulación de la coxa (Figura 2.7) para el modelo de 2 g.d.l. se mantiene fija.

5. Simulación y Experimentación

Primera pierna del hexápodo

En la Figura 5.8 se observa que el extremo final de la pierna 1, no logra seguir fielmente la trayectoria deseada indicada, presentando un error de -4 a 1 cm. en el eje x y de -2 a 1 cm en el eje y , lo que provoca que la trayectoria en el plano $x - y$ no sea ejecutada en forma correcta.

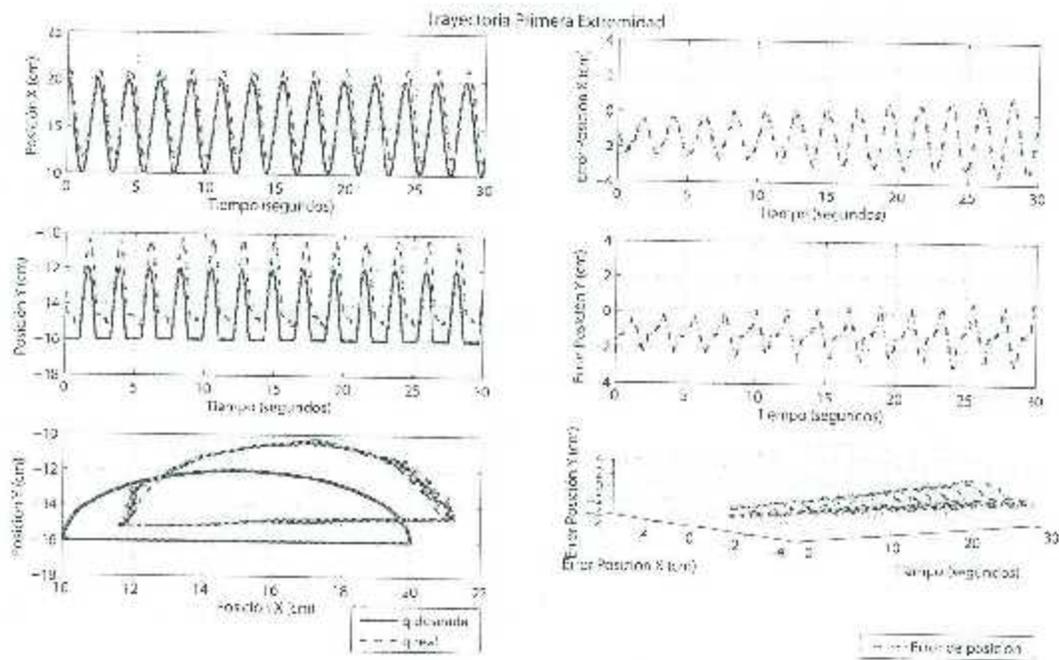


Figura 5.8: Trayectoria en $x - y$ para la primera pierna del robot hexápodo

En la Figura 5.9 se muestra que tanto el eslabón 1 como el eslabón 2 de la pierna 1, no logran posicionarse en el valor del ángulo deseado, presentando un error que va en incremento llegando a ser de -13 a 5 grados para el eslabón 1 y de -10 a 10 grados para el segundo eslabón. Cabe destacar que el valor deseado de la articulación de la coxa, la cual no se está moviendo, tampoco se mantiene en cero, sino presenta un error de 1 grado.

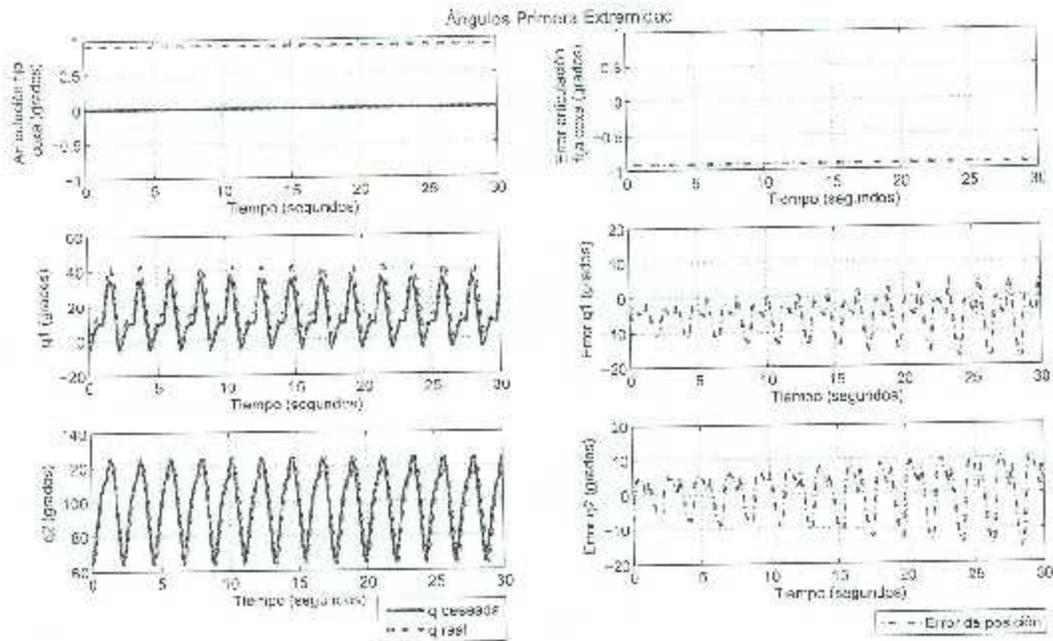


Figura 5.9: Ángulos de las articulaciones para la primera pierna del robot hexápodo

Segunda pierna del hexápodo

En la Figura 5.10 se aprecia que el extremo final de la pierna 2, no logra seguir la trayectoria deseada indicada, como ocurre en la pierna anterior, presentando un error que va de -2 a 0 cm. en el eje x y de -3 a 0 cm en el eje y .

En la Figura 5.11 se visualiza cómo los eslabones 1 y 2 de la pierna 2, no logran ubicarse en el valor del ángulo deseado para cada uno de ellos, presentando un error que va en incremento llegando a ser de -20 a 10 grados para el eslabón 1 y de -15 a 15 grados para el segundo eslabón, cabe destacar que el valor deseado de la coxa, el cual en este caso no se está moviendo, tampoco se mantiene en cero, sino presenta un error de ± 0.3 grados. Como puede observarse esta pierna presenta un error mayor a la anterior para los eslabones 1 y 2.

5. Simulación y Experimentación

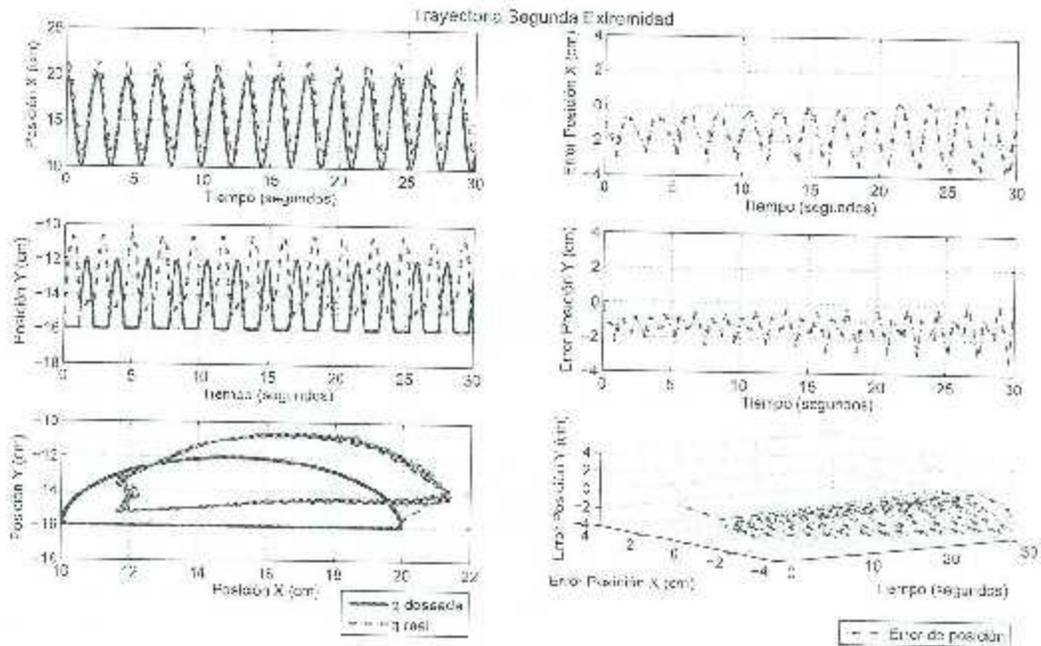


Figura 5.10: Trayectoria en $x - y$ para la segunda pierna del robot hexápodo

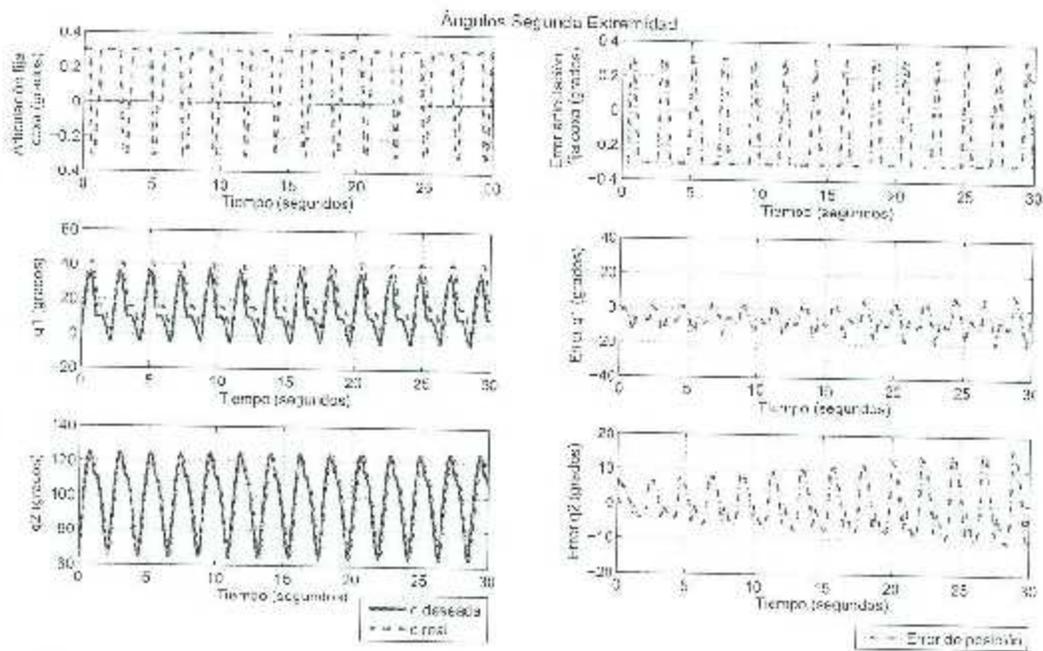


Figura 5.11: Ángulos de las articulaciones para la segunda pierna del robot hexápodo

Tercera pierna del hexápodo

En la Figura 5.12 se muestra como el extremo final de la pierna 3, no logra la trayectoria deseada, presentando un error de -3 a 1 cm. en el eje x y de -3 a 1 cm en el eje y , lo que en consecuencia provoca que la trayectoria en el plano $x - y$ no sea ejecutada en forma correcta.

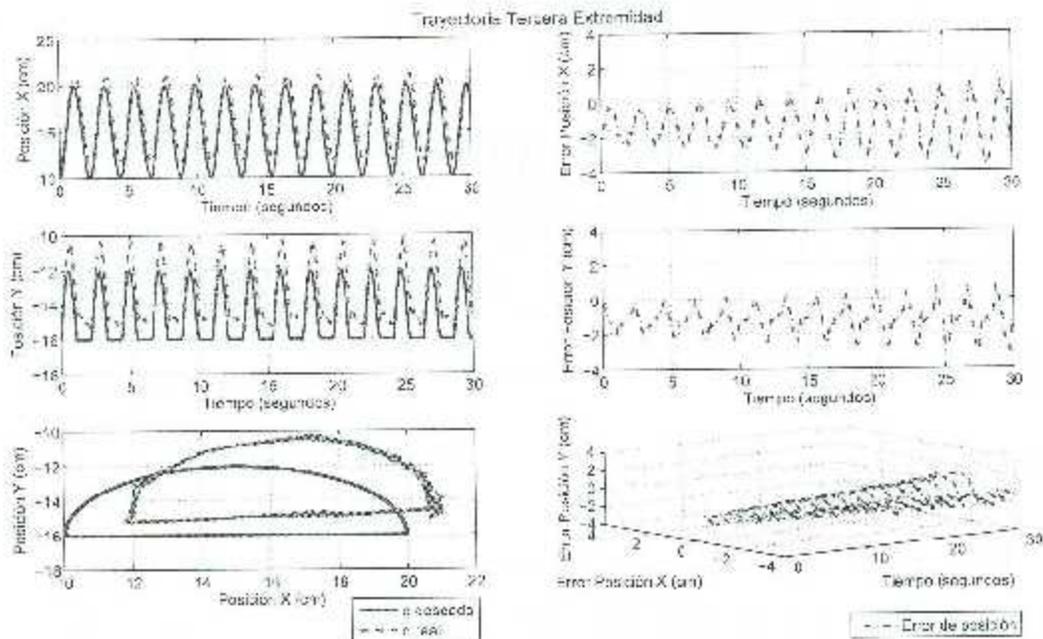


Figura 5.12: Trayectoria en $x - y$ para la tercera pierna del robot hexápodo

En la Figura 5.13 se muestra que tanto el eslabón 1 como el eslabón 2 de la pierna 3, no logran posicionarse en el valor del ángulo deseado, presentando un error que va en incremento llegando a ser de -18 a 5 grados para el eslabón 1 y de -18 a 10 grados para el segundo eslabón, cabe destacar que el valor deseado para la articulación de la coxa, el cual en este caso no se está moviendo, tampoco se mantiene en cero, sino presenta un error de -1 grado.

5. Simulación y Experimentación

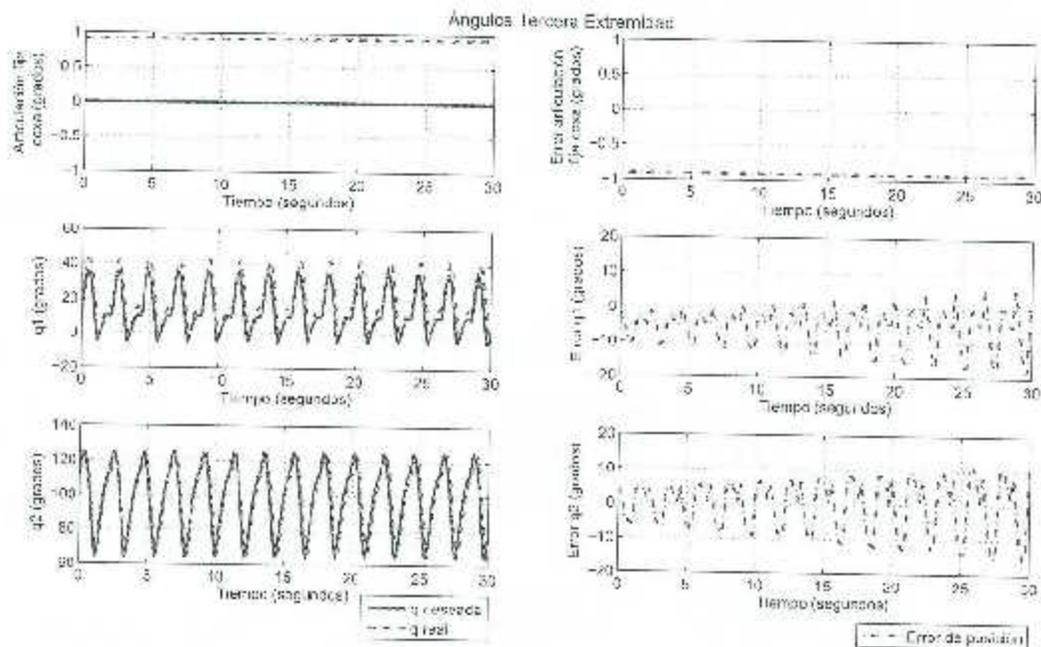


Figura 5.13: Ángulos de las articulaciones para la tercera pierna del robot hexápodo

Cuarta pierna del hexápodo

En la Figura 5.14 se aprecia que el extremo final de la pierna 4, no logra seguir la trayectoria deseada, como ocurre en las piernas anteriores, presentando un error que va de -3 a 3 cm, en el eje x y de -2 a 2 cm en el eje y . Siendo la que mayor error presenta para el caso de la trayectoria deseada.

En la Figura 5.15 se visualiza cómo los eslabones 1 y 2 de la pierna 4, no logran ubicarse en el valor del ángulo, presentando un error que va incrementando llegando a ir de -18 a 10 grados para el eslabón 1 y de -18 a 12 grados para el segundo eslabón, cabe destacar que el valor deseado de la articulación de la coxa es 0, el cual presenta un error de -0.3 a -0.6 grados.

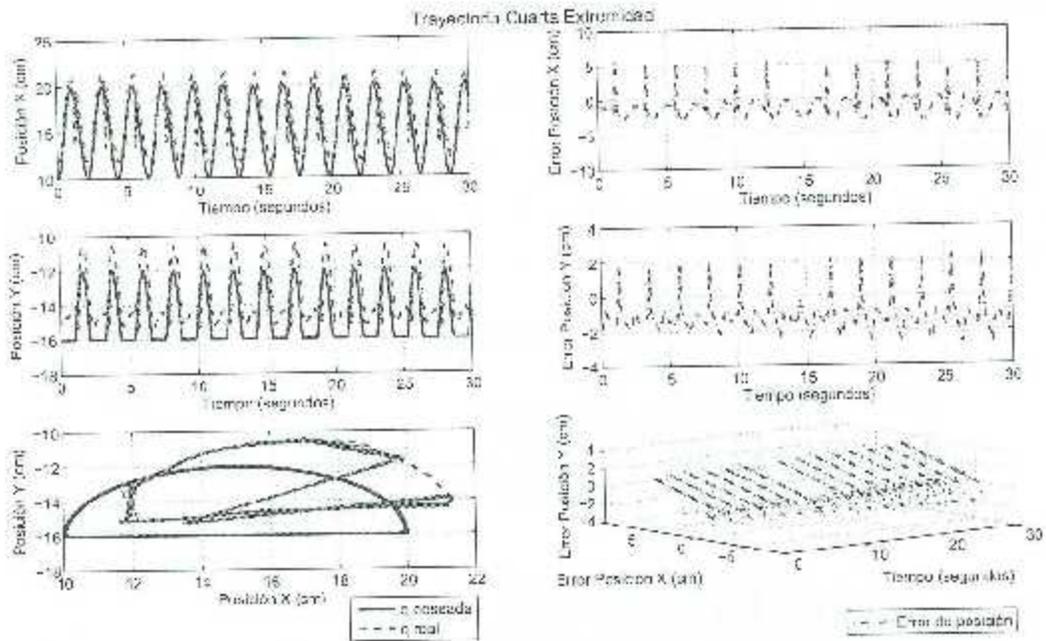


Figura 5.14: Trayectoria en $x - y$ para la cuarta pierna del robot hexápodo

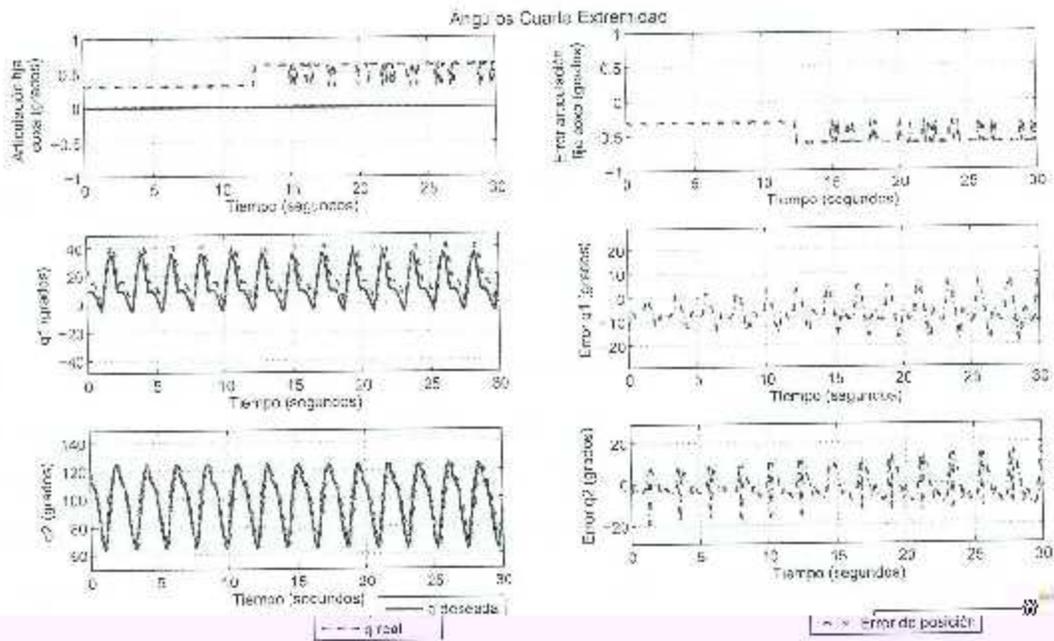


Figura 5.15: Ángulos de las articulaciones para la cuarta pierna del robot hexápodo

5. Simulación y Experimentación

Quinta pierna del hexápodo

En la Figura 5.16 se observa que el extremo final de la pierna 5, no logra seguir la trayectoria deseada, presentando un error de -3 a 1 cm en el eje x y de -3 a 1 cm en el eje y , lo que en consecuencia provoca que la trayectoria en el plano $x - y$ no sea ejecutada en forma correcta.

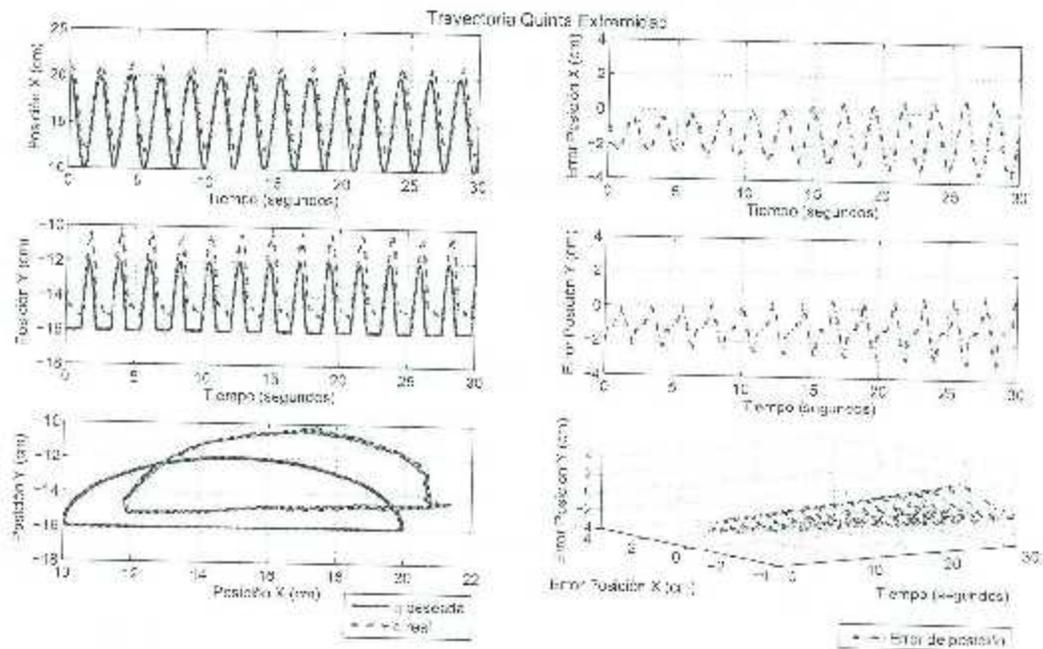
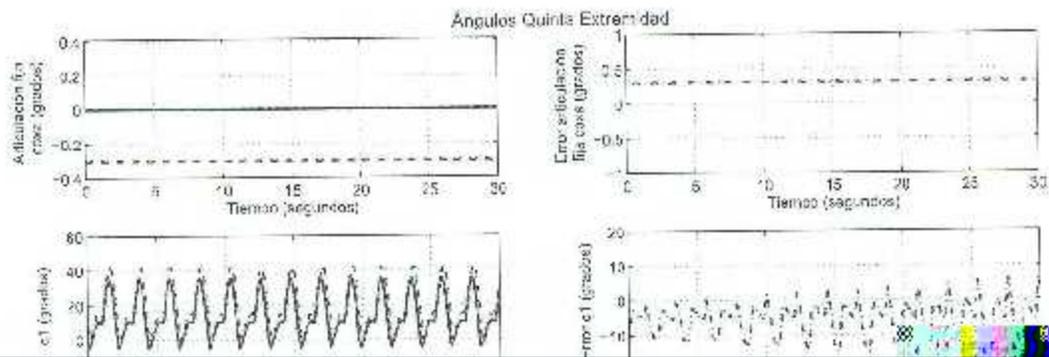


Figura 5.16: Trayectoria en $x - y$ para la quinta pierna del robot hexápodo

En la Figura 5.17 se muestra que tanto el eslabón 1 como el eslabón 2 de la pierna 5, no logran posicionarse en el valor del ángulo deseado, presentando un error que va en incremento llegando a ser de -18 a 8 grados para el eslabón 1 y de -15 a 11 grados para el segundo eslabón, cabe destacar que el valor deseado de la articulación de la coxa, el cual en este caso no se está moviendo, tampoco se mantiene en cero, sino presenta un error de -0.3 grados.

5. Simulación y Experimentación



5. Simulación y Experimentación

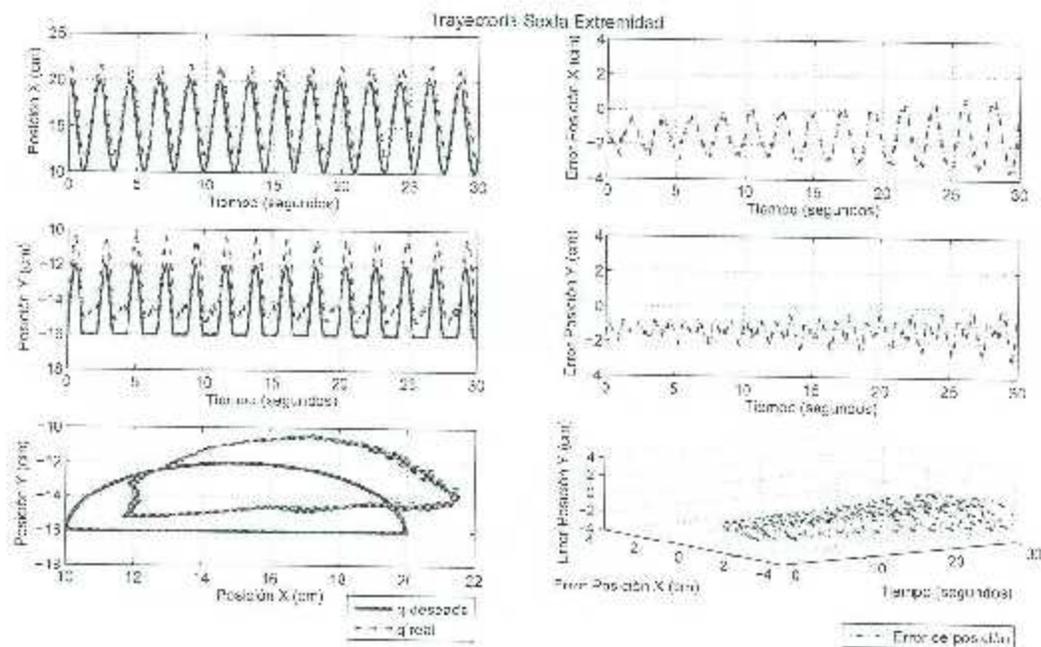


Figura 5.13: Trayectoria en $x-y$ para la sexta pierna del robot hexápodo

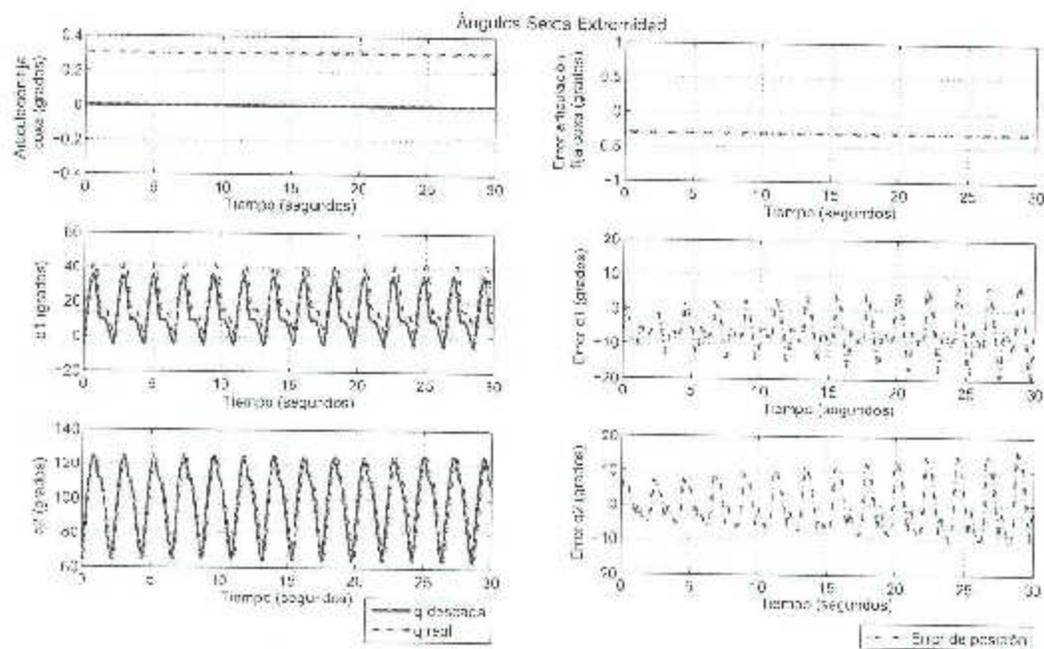


Figura 5.19: Ángulos de las articulaciones para la sexta pierna del robot hexápodo

Como pudo observarse, los servomotores correspondientes 1, 2 y 3 de cada pierna presentar un rango de error similar por lo que se puede deducir que no es por un problema de comunicación con el microcontrolador, sino del controlador interno de cada servomotor provocando un error considerable en la ejecución de la trayectoria deseada. Se llega a esta conclusión debido a que el controlador integrado en los servomotores es para regulación y no para seguimiento. Desafortunadamente no se pudo implementar un controlador externo debido a que la lectura en tiempo real de las posiciones no se puede realizar porque interrumpe con el envío de los datos de ejecución.

5.3.2. Resultados considerando los 3 g.d.l. de una pierna

La señal de entrada semicíclicodal para este caso se ejecuta sobre el plano $y - z$, con un desplazamiento constante en x , que es el espacio sobre el que se calculó la cinemática inversa.

Para este caso las piernas tienen una distribución radial, aunque las distribuciones de las piernas del hexápodo sean diferentes, siempre deberán estar en contacto con la superficie de desplazamiento tras de ellas.

Primera pierna del hexápodo

En la Figura 5.20 se observa que el extremo final de la pierna 1, no logra seguir la trayectoria deseada, presentando un error que va de -0.5 a 0.7 cm. en el eje x , de -3 a 3 cm en el eje y y de -1.5 a 2 cm. en el eje z .

En la Figura 5.21 se muestra que tanto el eslabón 2 como el eslabón 3 de la pierna 1, no logran posicionarse en el valor del ángulo deseado, presentando un error que va en incremento llegando a ser de -15 a 15 grados para el eslabón 2 y de -25 a 20 grados para el tercer eslabón; el eslabón 1 presenta un error que va de -6 a 6 grados.

5. Simulación y Experimentación

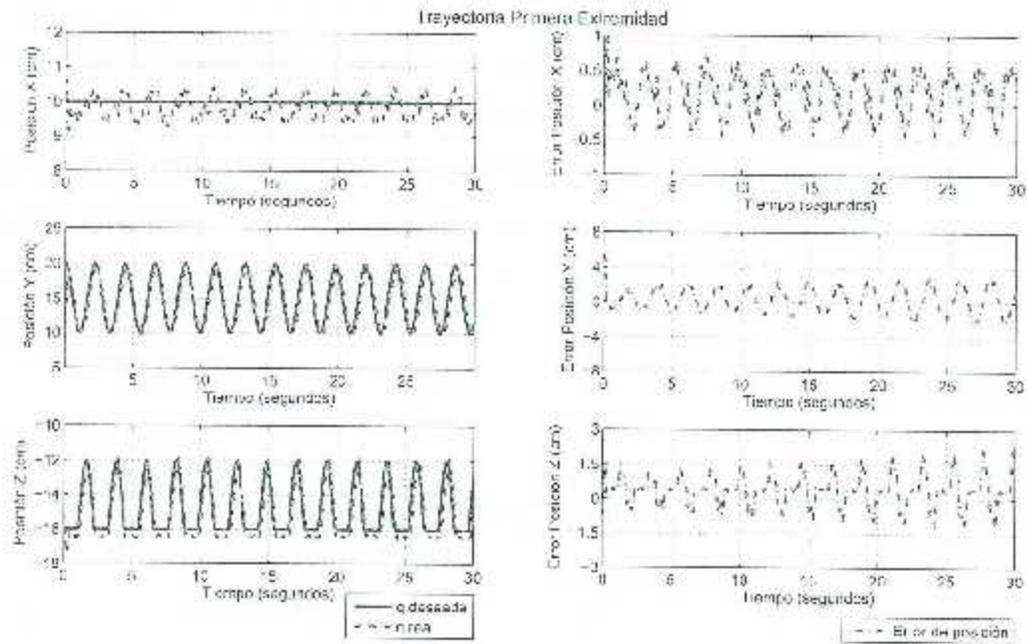


Figura 5.20: Trayectoria en $y-z$ para la primera pierna del robot hexápodo

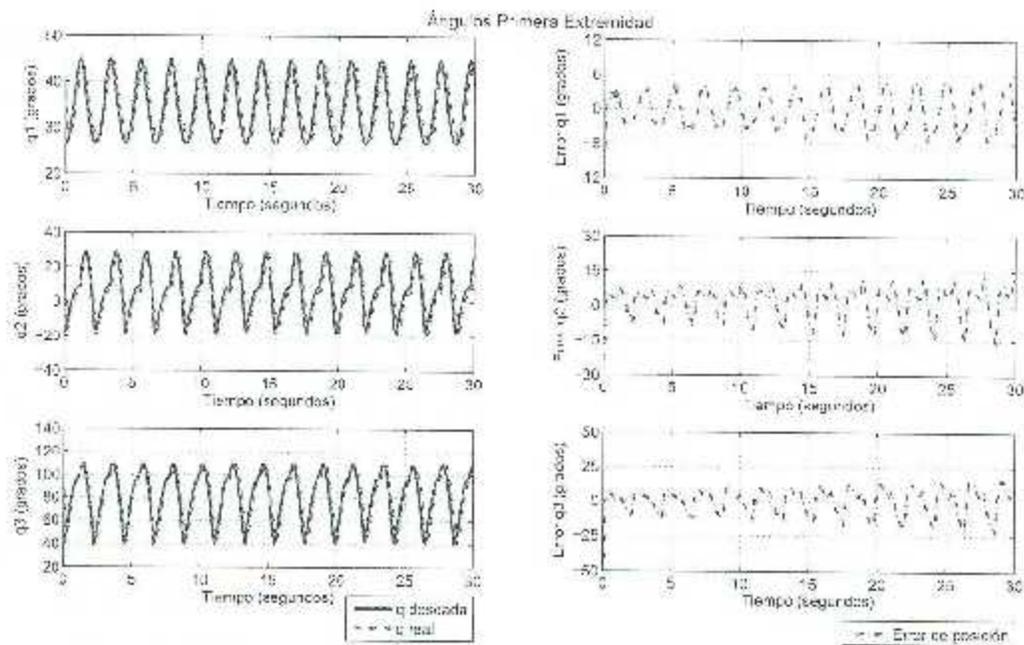


Figura 5.21: Ángulos de las articulaciones para la primera pierna del robot hexápodo

Segunda pierna del hexápodo

En la Figura 5.22 se aprecia que el extremo final de la pierna 2, no logra seguir la trayectoria deseada indicada, como ocurre en la pierna anterior, presentando un error que va de -0.75 a 0.75 cm. en el eje x , de -2 a 2 cm en el eje y y de -2 a 3 cm en el eje z .

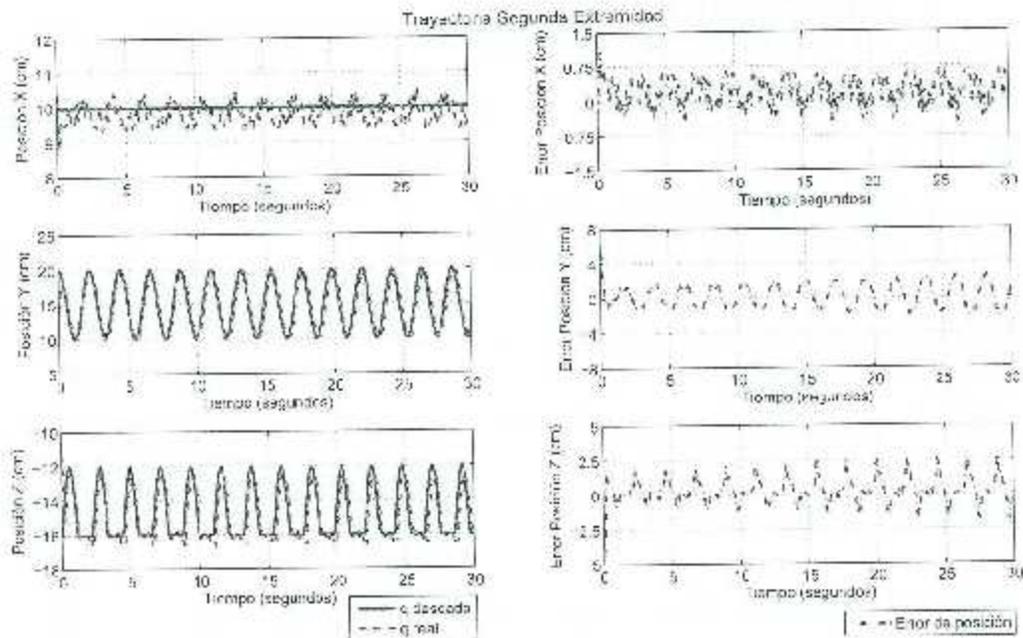


Figura 5.22: Trayectoria en $y - z$ para la segunda pierna del robot hexápodo

En la Figura 5.23 se visualiza cómo los eslabones 2 y 3 de la pierna 2, no logran ubicarse en el valor del ángulo deseado para cada uno de ellos, presentando un error que va en incremento llegando a ser de -10 a 20 grados para el eslabón 2 y de -20 a 20 grados para el tercer eslabón, cabe destacar que el valor deseado del eslabón 1, presenta un error menor de -6 a 6 grados.

5. Simulación y Experimentación

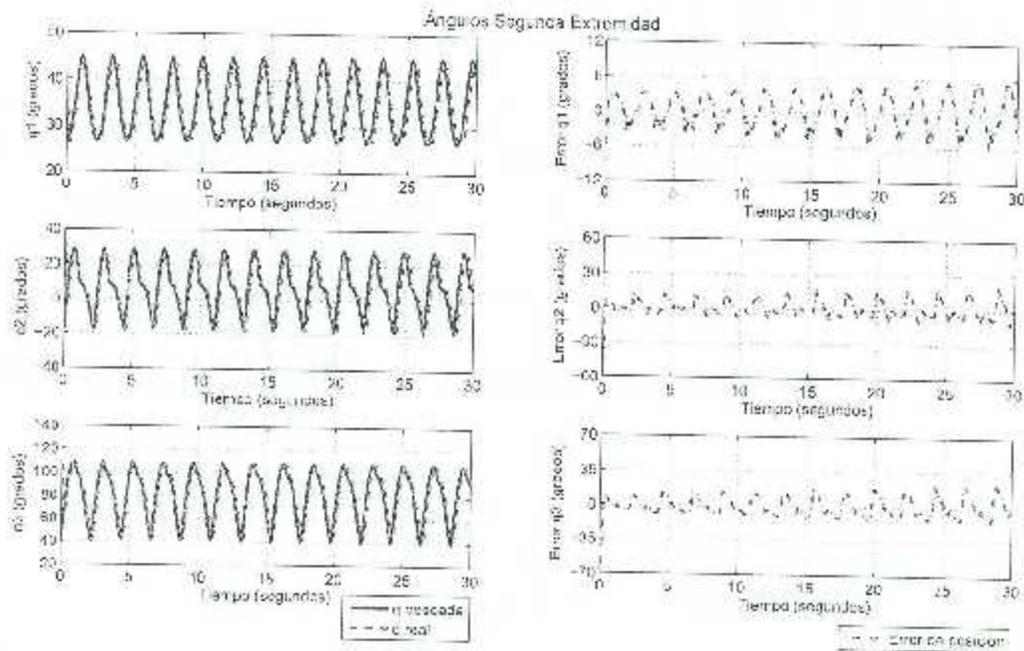


Figura 5.23: Ángulos de las articulaciones para la segunda pierna del robot hexápodo

Tercera pierna del hexápodo

Para el caminado lateral tanto la pierna 3 como la pierna 4 siguen moviéndose sólo en un plano. En la Figura 5.24 se muestra cómo el extremo final de la pierna 3, no logra la trayectoria deseada, presentando un error de -0.3 a 0.3 cm. en el eje x , de -3 a 3 cm en el eje y y de -1.5 a 2 cm en el eje z .

En la Figura 5.25 se muestra que tanto el eslabón 2 como el eslabón 3 de la pierna 3, no logran posicionarse en el valor del ángulo deseado, presentando un error que va en incremento logrando a ser de -20 a 20 grados para el eslabón 2, de -18 a 12 grados para el eslabón 3 y de -0.9 grados para el primer eslabón.

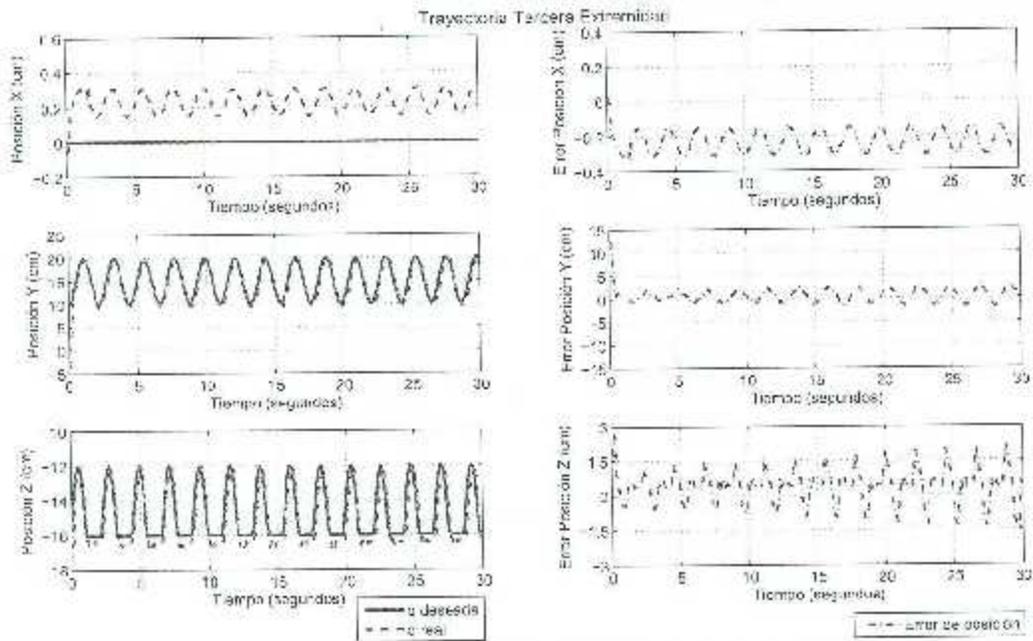


Figura 5.24: Trayectoria en $y - z$ para la tercera pierna del robot hexápodo

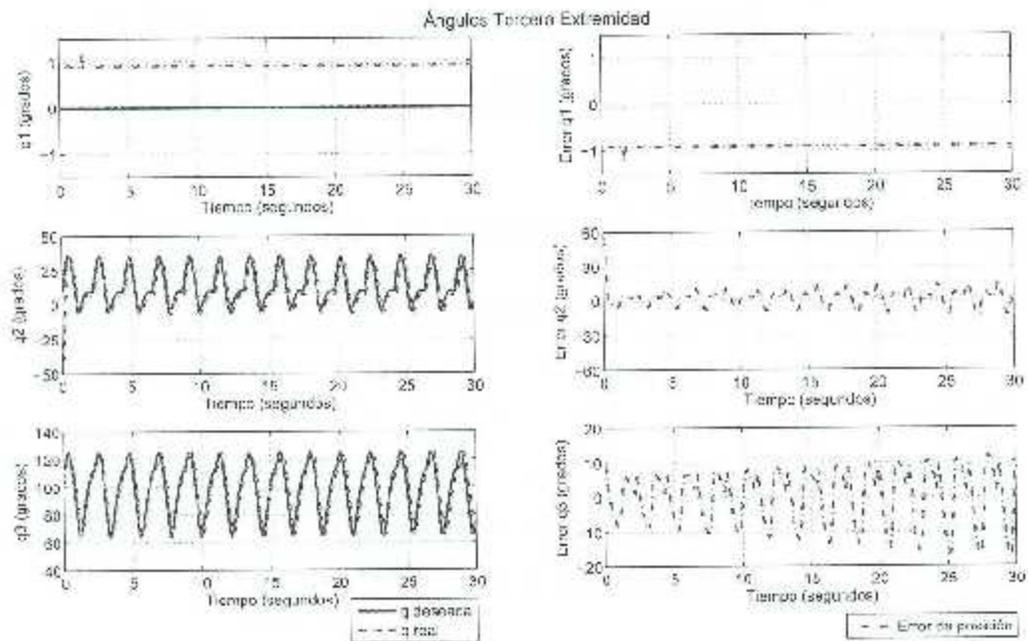


Figura 5.25: Ángulos de las articulaciones para la tercera pierna del robot hexápodo

5. Simulación y Experimentación

Cuarta pierna del hexápodo

Para el caminado lateral tanto la pierna 3 como la pierna 4 siguen moviéndose sólo en un plano. En la Figura 5.26 se aprecia que el extremo final de la pierna 4, presenta un error que va de -0.4 a 0.2 cm. en el eje x , de -2 a 3 cm en el eje y y de -2 a 2 en el eje z , lo que en consecuencia provoca que la trayectoria en el plano $y - z$ no sea ejecutada en forma correcta.

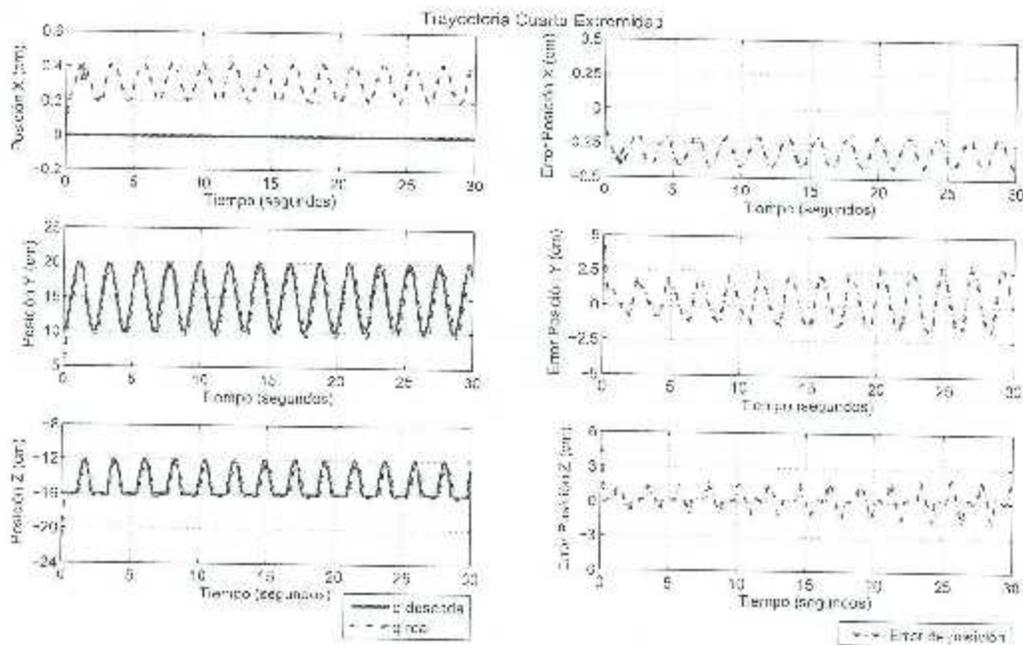


Figura 5.26: Trayectoria en $y - z$ para la cuarta pierna del robot hexápodo

En la Figura 5.27 se visualiza cómo los eslabones 2 y 3 de la pierna 4, no logran ubicarse en el valor del ángulo, presentando un error que va incrementando llegando a 17 de -15 a 17 grados para el eslabón 2 y de -12 a 20 grados para el tercer eslabón, cabe destacar que el valor deseado del eslabón 1 presenta un error de -1.2 grados.

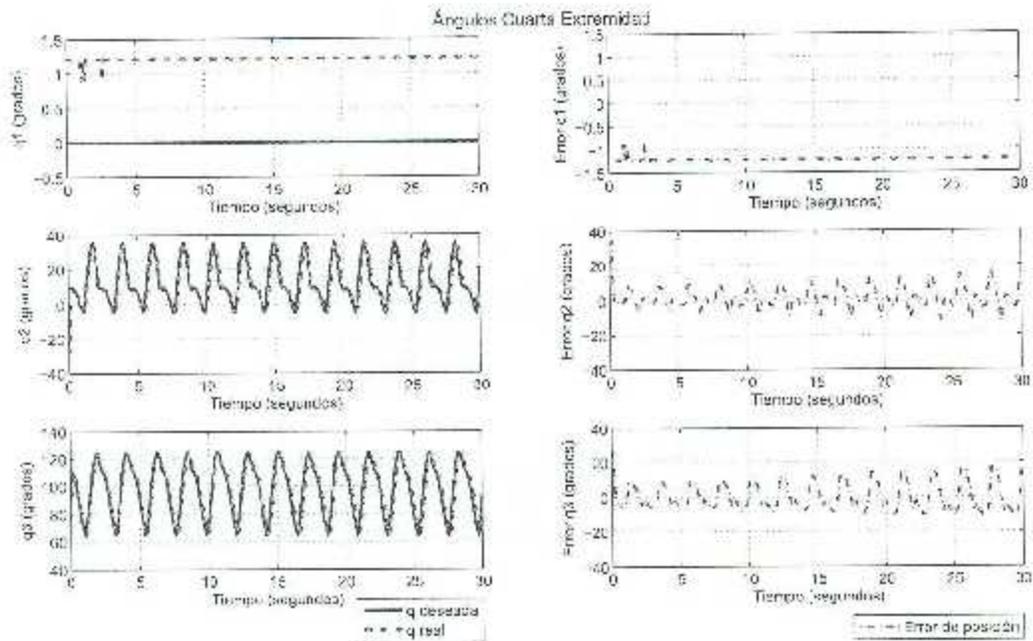


Figura 5.27: Ángulos de las articulaciones para la cuarta pierna del robot hexápodo

Quinta pierna del hexápodo

En la Figura 5.28 se observa que el extremo final de la pierna 5, presenta un error de -0.5 a 0.5 cm. en el eje x , de -3 a 3 cm en el eje y y de -1.5 a 2 cm en el eje z .

En la Figura 5.29 se muestra que tanto el eslabón 2 como el eslabón 3 de la pierna 5, presentan un error que va en incremento llegando a ser de -15 a 12 grados para el eslabón 2 y de -22 a 15 grados para el tercer eslabón, el valor deseado del eslabón 1 presenta un error de -6 a 6 grados.

5. Simulación y Experimentación

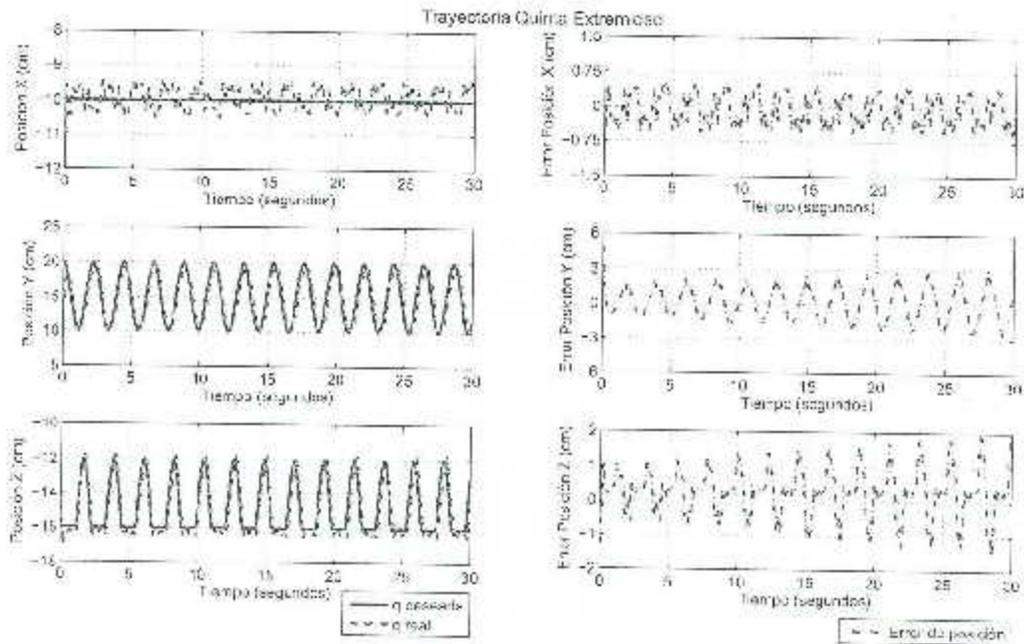


Figura 5.28: Trayectoria en $y-z$ para la quinta pierna del robot hexápodo

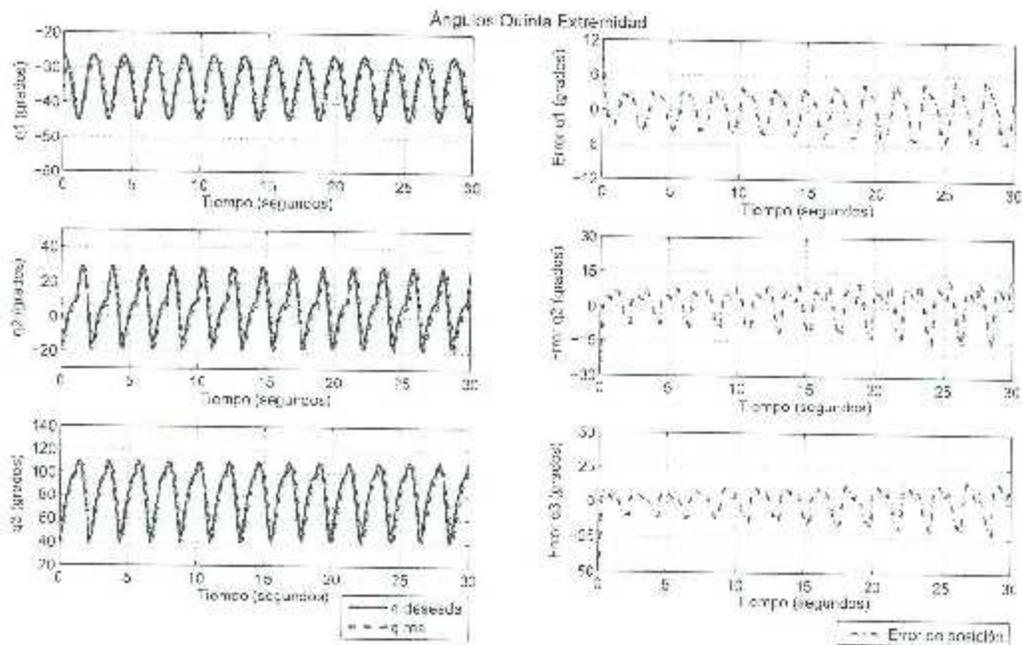


Figura 5.29: Ángulos de las articulaciones para la quinta pierna del robot hexápodo

Sexta pierna del hexápodo

En la Figura 5.30 se visualiza que el extremo final de la pierna 6, tampoco logra seguir la trayectoria deseada, presentando un error de -2 a 0.5 cm. en el eje x , de -2 a 3 cm en el eje y y de -2 a 2 en el eje z .

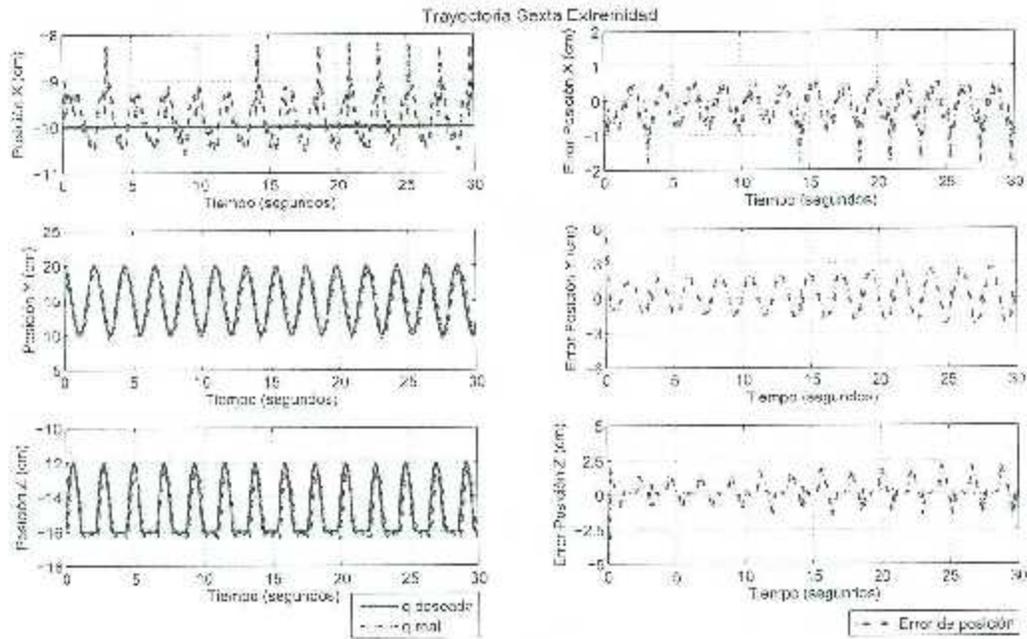


Figura 5.30: Trayectoria en $y - z$ para la sexta pierna del robot hexápodo

En la Figura 5.31 se visualiza cómo los eslabones 2 y 3 de la pierna 6, no logran ubicarse en el valor del ángulo deseado para cada uno de ellos; presentando un error que incrementa de -10 a 20 grados para el eslabón 2 y de -20 a 20 grados para el tercer eslabón, y de igual forma que en las piernas anteriores en eslabón 1 presenta un error, en esta ocasión de -5 a 6 grados.

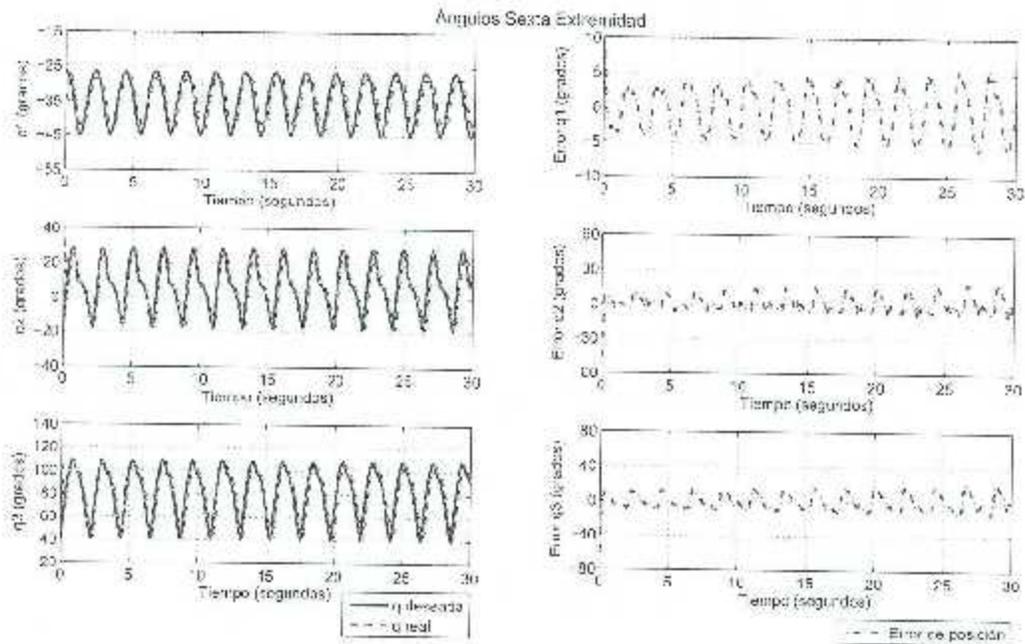


Figura 5.31: Ángulos de las articulaciones para la sexta pierna del robot hexápodo

Como puede observarse, los servomotores correspondientes 1, 2 y 3 de cada pierna presentan un rango mayor de error que el realizado en las lecturas con dos articulaciones, esto debido a los picos existentes en las lecturas de la posición de los servomotores y a que los valores deseados se encuentran en un área de trabajo mayor al primer experimento.

En la Figura 5.32 se muestran las trayectorias deseadas y reales de las 3 piernas, y como puede observarse no logran seguir la trayectoria deseada.

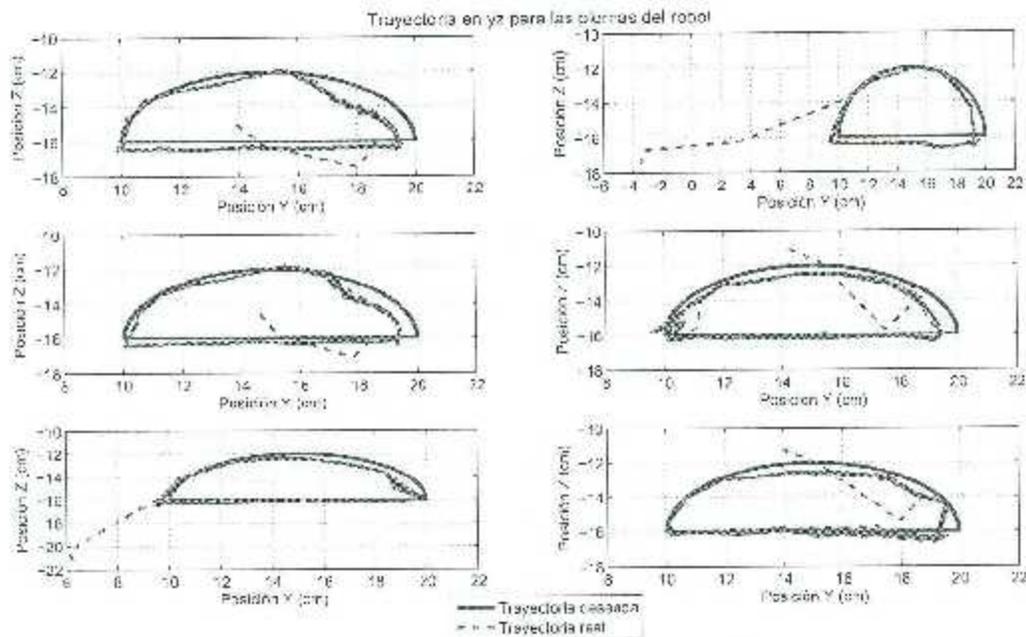


Figura 5.32: Trayectoria en $y-z$ de las seis piernas del hexápodo

5.3.3. Resultados experimentales con los sensores del robot

Sensores de fuerza Flexiforce

El experimento se realiza dentro del Laboratorio de Mecatrónica y Control, con los sensores Flexiforce montados en las piernas del robot. La lectura de los 6 sensores se realiza en paralelo con ayuda del Arduino Mega 2560, con un tiempo de muestreo de 30 milisegundos y los resultados se grafican utilizando un arreglo, el cual mantiene el valor leído en 0 cuando es 0 y lo convierte a un 1 cuando es mayor a 0. Como puede observarse en la Figura 5.33 cada paso se genera en un tiempo aproximado de 1.7 segundos.

Los triángulos formados por las piernas (1,4,5) y (2,3,6) no pueden apreciarse claramente en la gráfica debido a que la superficie de desplazamiento no era totalmente plana y el peso total del robot ocasionaba que los motores trabajaran a su máxima corriente y aún así no lograban la posición deseada y no se alcanzaba la altura deseada para la parábola.

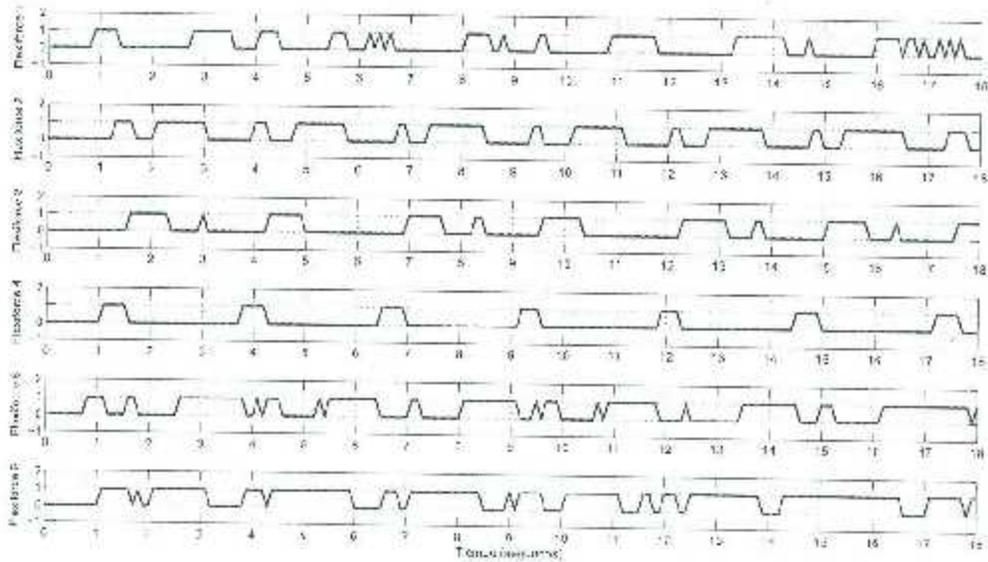


Figura 5.33: Mapa de huellas del robot hexápodo

Central Inercial AeroQuad v2.1

El experimento se realiza dentro del Laboratorio de Mecatrónica y Control, sin montar la central inercial en el robot. Los movimientos de la central se hicieron manualmente, girándola en un rango aproximando de ± 90 grados.

Los resultados se muestran en la Figura 5.34, donde pueden observarse las lecturas obtenidas entre el acelerómetro y el giroscopio para medir pitch y roll, las cuales muestran perturbaciones en las lecturas, aunque en el experimento se hayan realizados cambios lentos de inclinación del dispositivo, por ello y debido a que en este proyecto no se tenía considerado el desarrollo de un filtro para esta central, se descarta la posibilidad de su implementación final.

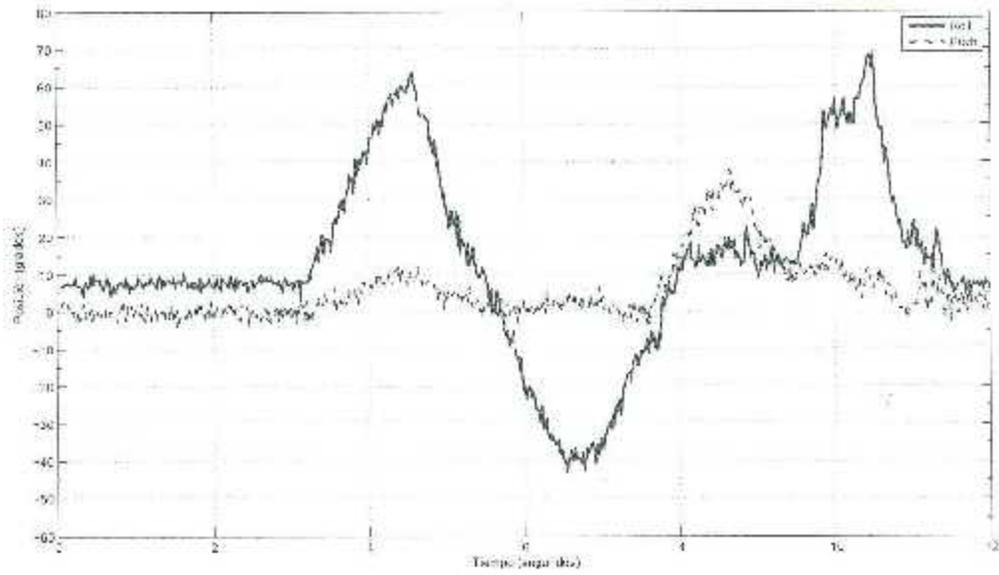


Figura 5.34: Lecturas de la central inercial AeroQuad v2.1

Capítulo 6

Conclusiones

En este trabajo se ha realizado la implementación del sistema de locomoción de un robot hexápodo caminante de arquitectura abierta, el cual puede ser reprogramado para realizar la evaluación de movimientos, mediante la ejecución en tiempo real de algoritmos de control con realimentación sensorial. Dicha locomoción se controló usando el modelo cinemático inverso individual de cada pierna (almacenado en el microcontrolador cerebro del hexápodo), calculándose en tiempo real los valores requeridos para todos los servomotores, lo que facilita el cambio de programación de las trayectorias, puesto que solo cambiando una fórmula se obtienen los valores requeridos.

El uso de sensores de fuerza en el extremo final de la piernas permite asegurar la estabilidad del robot durante el caminado, nos asegura que por lo menos tres piernas lo soportan, lo cual es el mínimo requerido para este propósito.

Los sistemas que emplean realimentación por cámaras presentan una gran ventaja debido a que es de muy fácil implementación y es posible encontrar una cámara en muchos lugares, y al comprarla vienen los drivers necesarios para que sea detectada por la computadora e en su defecto es posible descargarlos de red. Esto permite que las investigaciones que se realicen no requieran de grandes inversiones en cuanto a equipo y es fácil para que

6. Conclusiones

estudiantes puedan realizar proyectos académicos o personales.

La mayor parte del trabajo con el sensor de visión tiene que ver con programación ya que al poderse digitalizar las imágenes todo se reduce a procesos matemáticos y no se requiere de grandes estudios para poderlos aplicar gracias a las librerías como OpenCV o AForge.NET.

Durante la integración de los diversos subsistemas del robot se pudo comprobar la viabilidad de utilizar tarjetas con un microcontrolador embebido, que permiten una mayor miniaturización del sistema de control de a bordo de un robot móvil. Los resultados experimentales obtenidos en la plataforma de control electrónico de a bordo del robot pueden ser almacenados en un computador central y graficados posteriormente para su análisis.

Como trabajo futuro, se propone seguir con mejoras en la estructura del robot, ya que aunque éste fue un segundo prototipo, durante el transcurso del proyecto se observó que cambiar las dimensiones, forma, material y la distribución de las patas podrían generar una mejor respuesta y mejor manejo del robot. Esto debido a que al colocar los sensores de fuerza, aumentó la altura de las piernas, disminuyendo el área de trabajo de las mismas, el material con el que está fabricado el robot provoca que durante su locomoción algunas articulaciones se doblen o se pandeen.

Bibliografía

- [AnalogDevices, 2009] ANALOG DEVICES, *Digital Accelerometer ADXL345*, Documento técnico, Enlace electrónico: <https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Accelerometer/ADXL345.pdf>
- [Arduino, 2013] ARDUINO, *Arduino Mega*, Documento técnico en línea, Enlace electrónico: <http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMega>
- [Axelrod et al., 2003] AXELROD B., ROMEO N., TACKLYN J. y NORTHUP D., *Interdisciplinary Spider Robot Project*, Reporte de proyecto, Syracuse University, Syracuse, NY, 2003.
- [Belter et al., 2008] BELTER D., WALAS K. y KASINSKI A., *Distributed control system of DC servomotors for six legged walking robot.*, 13th International Power Electronics and Motion Control Conference, Poznań, Poland, September 2008.
- [Calle et al., 2007] CALLE E., ÁVILA L. y ZAMBRANO J., *Diseño e implementación de un robot móvil cuadrúpedo.*, Revista Tecnológica. ESPOL, Vol. 20 No. 1, pp 65 - 72, 2007.
- [Celaya y Porta, 1998] CELAYA E. y PORTA J.M., *A control structure for the locomotion of a legged robot.*, IEEE Robotics and Automation Magazine, Vol. 5, No. 2, pp 43 - 51, June 1998.

BIBLIOGRAFÍA

- [CHRobotics, 2013] CHROBOTICS, *UM6 Ultra-Miniature Orientation Sensor Datasheet*, Documento técnico, Enlace electrónico: http://www.chrobotics.com/docs/UM6_datasheet.pdf
- [DFRobot, 2013] DFRobot, *Uptech CDS55XX Serial Robot Servo (Robotis AX Compatible)*, Documento técnico en línea, Enlace electrónico: http://www.dfrobot.com/index.php?route=product/product&product_id=373#
- [Digilent Inc., 2011a] DIGILENT, *PmodACL - 3 - axis Accelerometer*, Documento técnico en línea, Enlace electrónico: <http://digilentinc.com/Products/Detail.cfm?Prod=PMOD-ACL>
- [Digilent Inc., 2011b] DIGILENT, *PmodGYRO 3-Axis Digital Gyroscope*, Documento técnico en línea, Enlace electrónico: <http://digilentinc.com/Products/Detail.cfm?Prod=PMOD-GYRO>
- [Estremera y González, 2002] ESTREMER A J. y GONZÁLEZ DE SANTOS P., *Free gait for quadruped robots over irregular terrain.*, International Robotics Research, Vol. 21, No. 2, Page(s) 115 - 130, 2002.
- [García et al., 1998] GARCÍA JAVIER, RODRÍGUEZ JOSÉ, SARRIEGUI JOSÉ y BRAZÁLEZ ALFONSO *Aprenda C++ como si estuviera en primero*, Notas de curso, Universidad de Navarra San Sebastian, España, Enlace electrónico: <http://collection.openlibra.com.s3.amazonaws.com/pdf/Aprenda-Cplusplus-Como-si-estuviera-en-primero.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIGYBY2YJT7GYM5UQ&Signature=LziBTPor11TeEiMuLyvSrOqWXF0%3D&Expires=1403897983>
- [Gorrostieta y Vargas, 2008] GORROSTIETA E. y VARGAS SOTO E., *Algoritmo Difuso de Locomoción Libre para un Robot Convitante de Seis Patas.*, Computación y Sistemas, Vol. 11, No. 3, Page(s) 260 - 287, 2008.

- [Hitec, 2013] HITEC MULTIPLEX, *HIS-422 Deluxe Standard Servo*, Documento técnico en línea, Enlace electrónico: http://hiteccrd.com/products/servos/sport-servos/ana_log-sport-servos/his-422-deluxe-standard_servo/product
- [Jianhua, 2006] JIANHUA G., *Design and kinematic simulation for six-DOF leg mechanism of hexapod robot.*, IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics., Kurring, China, December 2006.
- [Kelly y Santibañez, 2003] KELLY RAFAEL y SANTIBAÑEZ VÍCTOR, *Control de Movimiento de Robots Manipuladores*, Pearson Educación, 2003.
- [Melmantis et al., 1997] MELMANTIS M., KOYACHI N., ARAI T. y KAWAI K., *Mechanical design of hexapods with integrated limb mechanism: MELMANTIS-1 and MELMANTIS-2*, 8th International Conference on Advanced Robotics., Monterrey, CA, July 1997.
- [Moore et al., 2002] MOORE E.-Z., CAMPBELL D., GRIMMINGER F. y BUEHLER M., *Reliable Stair Climbing in the Simple Hexapod "RHex"*, IEEE International Conference on Robotics and Automation., Washington, DC, May 2002.
- [Muñoz, 2005] MUÑOZ MARTÍNEZ V.F., *Planificación de Trayectorias para Robots Móviles*, Universidad de Malaga, 2005, Documento en línea, Enlace electrónico: <http://webpersonal.unma.es/~VFMX/PDF/cap2.pdf>
- [Okamoto et al., 2009] OKAMOTO N., KURIHARA Y. y WATANABE K., *Motion control of multi-legged machines.*, International Conference on Control Automation and Systems, Fukuoka, Japan, August 2009.
- [Ollero, 2007] OLLERO A., *Robótica Manipuladores y Robots Móviles*, Alfaomega, 2007.
- [Pámanes, 2011] PÁMANES J.A. *Robótica: Introducción al Modelado de Manipuladores*, Notas del curso, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Instituto Tecnológico de la Laguna, Torreón, Coahuila, México.

BIBLIOGRAFÍA

- [Phidgets, 2012] PHIDGETS, *1126 User Guide*, Documento técnico en línea, Enlace electrónico: http://www.phidgets.com/docs/1120_User_Guide
- [PlayStation, 2013] PLAYSTATION, *PlayStation Eye Camera*, Documento técnico en línea, Enlace electrónico: <http://us.playstation.com/ps3/accessories/playstation-eye-camera-ps3.html>
- [Reyes, 2011] REYES F., *Robótica: Control de Robots Manipuladores*, Alfaomega, 2011.
- [Robotec, 2013] ROBOTEE, *Land Crawler - Theo Jansen Mechanism 11024*, Documento técnico en línea, Enlace electrónico: <http://www.robotee.com/index.php/land-crawler-extreme-locomotion-demo-video-11024/>
- [Roennau et al., 2010] ROENNAU A., KERSCHER T. y DILLMANN R., *Design and kinematics of a biologically-inspired leg for a six-legged walking machine.*, IEEE International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics, Tokyo, Japan, September 2010.
- [Salameh, 2011] SALAMEH P., *Limb designs for salamander and centipede robots*, Reporte de proyecto, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, Switzerland, 2011.
- [Sánchez y López, 2005] SÁNCHEZ ESPINOZA A. y LÓPEZ CARDELO C., *Diseño de un robot hexápodo: Hardware y software de control*, Reporte de proyecto, Universitat Politècnica de Catalunya Vilanova, España, 2005, Page(s) 45.
- [Sáenz, 2013] SÁENZ ESQUEDA J.A., *Diseño e implementación de un control servo-visual de seguimiento de objetos en el robot móvil Seekur*, Instituto Tecnológico de la Laguna, 2013.
- [Showalter, 2009] SHOWALTER M., *Work Space Analysis and Walking Algorithm Development for a Radially Symmetric Hexapod Robot*, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute, VDM Verlag, 2009.

-
- [STMicroelectronics, 2010] STMICROELECTRONICS, *L3G4200D*, Documento técnico en línea, Enlace electrónico: http://www.pololu.com/file/download/L3G4200D.pdf?file_id=0J491
- [Texascan, 2009] TEXSCAN, *Flexiforce Sensors User Manual*, Documento técnico en línea, Enlace electrónico: http://www.phidgets.com/documentation/Phidgets/3100_3_FlexiforceUserManual.pdf
- [Tiposde.org, 2013] TIPOSDE.ORG, *Tipos de robots*, Documento técnico en línea, Enlace electrónico: <http://www.tiposde.org/general/460-tipos-de-robots>
- [TrossenRobotics, 2006] TROSSEN ROBOTICS, *CM-530 Robotis Servo Controller*, Documento técnico en línea, Enlace electrónico: <http://www.trossenrobotics.com/p/cm-530-robotis-servo-controller.aspx>
- [Uptech, 2010] UPTECH ROBOTICS, *ProMOTION³ Robot Servo Datasheet*, Documento técnico en línea, Enlace electrónico: <http://www.dfrobot.com/image/data/ser0026/cds55xx-robot-servo-datasheet.pdf>

Apéndice A

ATmega2560

El microcontrolador ATmega2560, utilizado a lo largo del proyecto, forma parte del dispositivo Arduino Mega 2560. Arduino es una plataforma electrónica abierta para la creación de prototipos basada en software y hardware. Puede tomar información del entorno de toda una gama de sensores a través de sus pines de entrada y puede afectar aquello que le rodea controlando luces, motores y otros actuadores. El microcontrolador en la placa Arduino se programa mediante un lenguaje de programación basado en C, y soporta todas las funciones del estándar C y algunas de C++.

El Arduino Mega 2560 es una placa electrónica basada en el ATmega2560 (véase Figura A.1) y presenta las siguientes características [Arduino, 2013]:

- Microcontrolador ATmega 2560
- Alimentación de 5 V.
- Voltaje de entrada recomendado de 7-12 V.
- Voltaje de entrada límite de 6-20 V.
- 54 Pines Digitales de los cuales 15 proporcionan salida PWM.
- 16 Pines de entrada analógica.
- Corriente directa (DC) para I/O de 40mA.

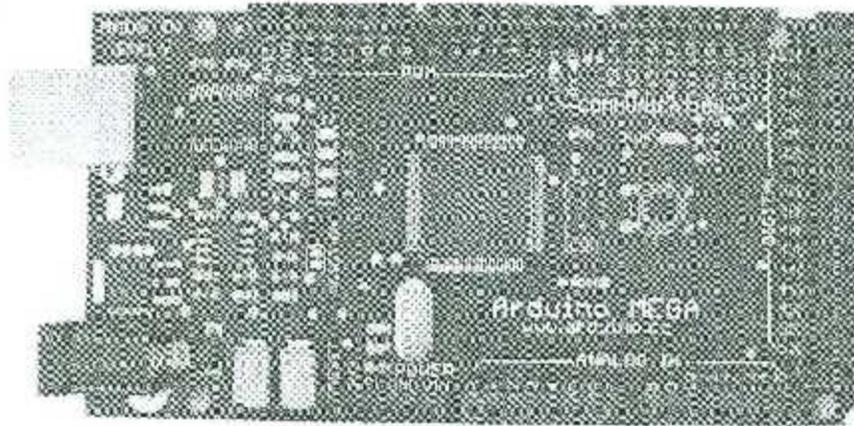


Figura A.1: Tarjeta Arduino modelo Mega 2560

- Corriente directa (DC) para 3.3 V de 50mA.
- Memoria Flash
- SRAM de 8 KB
- EEPROM 4 KB
- Velocidad de reloj (oscilador de cristal) de 16 MHz
- 4 UARTs (hardware para puerto serie)
- Conexión USB
- Conector de alimentación
- Una conexión ICSP y
- Un botón de reinicio.

La ubicación de los puertos, conexiones y botones se muestra en la Figura A.2.

El software para su programación es gratuito y puede ser descargado para Mac OS X, Windows y Linux desde la página oficial de Arduino en internet <http://arduino.cc/en/Main/Software>.

El entorno de desarrollo Arduino está constituido por un editor de texto para escribir el código, un área de mensajes, una consola de texto, una barra de herramientas con botones

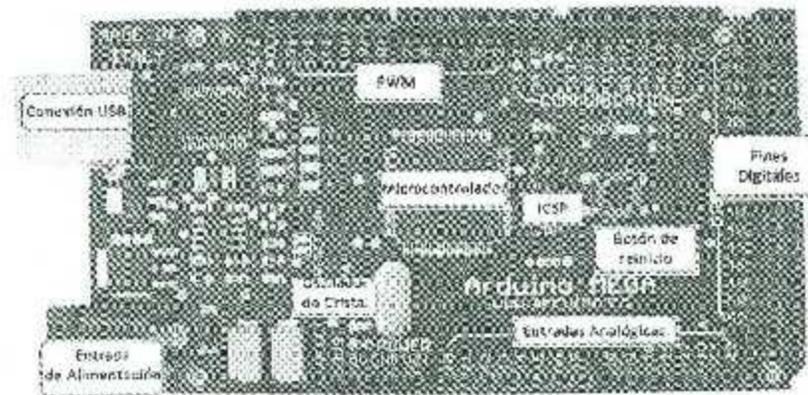


Figura A.2: Nombre de cada parte del Arduino Mega

para las funciones comunes, y una serie de menús. Todo esto permite la conexión con el hardware de Arduino para cargar los programas y comunicarse con ellos (véase Figura A.3).



Figura A.3: Interfaz de desarrollo de Arduino

Arduino utiliza para escribir el software que denomina "sketch" (programa). Estos programas son escritos en el editor de texto. Existe la posibilidad de cortar/pegar y buscar/reemplazar texto. En el área de mensajes se muestra información mientras se cargan los programas y también muestra errores. La consola muestra el texto de salida para el entorno de Arduino incluyendo los mensajes de error completos y otra información. La barra de herramientas permite verificar el proceso de carga, creación, apertura, guardado de programas, y el monitoreo del puerto serie (véase Figura A.4).

Las herramientas que aparecen en la barra son:

- **Verify/Compile.** Checa el código en busca de errores.
- **Stop.** Finaliza la monitorización serie.
- **New.** Crea un nuevo sketch.
- **Open.** Presenta un menú de todos los programas "sketchbook", (biblioteca de programas). Un click sobre uno de ellos lo abrirá en la ventana actual.
- **Save.** Guarda el programa.
- **Upload to I/O Board.** Compila el código y lo carga en la placa de Arduino.
- **Serial Monitor.** Inicia el monitoreo del puerto serie.



Figura A.4: Barra de herramientas del compilador Arduino

Puesta en marcha del controlador

Es necesario tener instalado el software en la versión que se requiera descargándolo desde la página <http://www.arduino.cc>. Cuando la descarga finaliza, se descomprime el

archivo. Se hace doble click en la carpeta Arduino-0022 para abrirla. **Nota** es recomendable instalar todo en la unidad raíz. En Windows Vista y Windows 7 los drivers deberían descargarse e instalarse automáticamente.

Al conectarse el cable USB del Arduino Mega se asigna un puerto COM al controlador y el número de puerto se visualiza en la pantalla de *Administrador de dispositivos* en la pestaña de *Puertos (COM y LPT)* como se muestra en la Figura A.5.

Para comenzar a utilizar la tarjeta Arduino Mega 2560, es necesario configurarla, para ello hay que seguir una serie de pasos con la finalidad de obtener una buena comunicación entre la tarjeta Arduino Mega 2560 y el compilador Arduino 0022. Los cuales son:

Ejecutar la aplicación Arduino. Hacer doble clic en la aplicación Arduino para abrir el programa.

Abrir el ejemplo "Blink" Abrir cualquier ejemplo, preinstalado en el programa, simplemente para probar la comunicación del compilador con la tarjeta Arduino Mega 2560. En este caso se abre el ejemplo para hacer parpadear un led (llamado "*LED blink*") el cual se encuentra en el menú: *File > Examples > Basic > Blink* (véase Figura A.6).

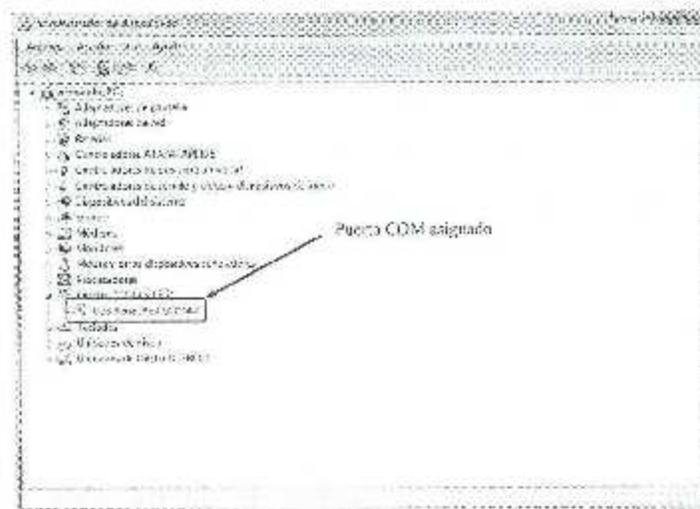


Figura A.5: Puerto COM asignado al Arcuino Mega 2560

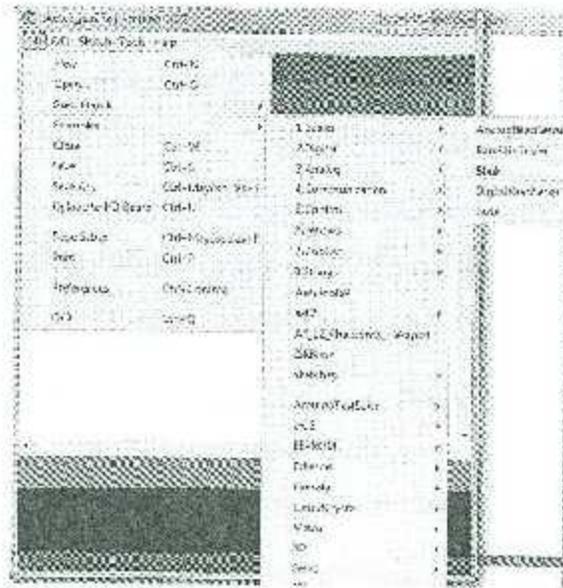


Figura A.6: Ventana de trabajo de Arduino, selección del ejemplo.

Seleccionar la placa. Seleccionar el tipo de placa del Arduino en el menú *Tools > Board*. En este caso, se selecciona Arduino Mega 2560, ya que durante este proyecto se trabaja con esta tarjeta (véase Figura A.7).

Seleccionar el puerto serie. Seleccionar el dispositivo serie de la placa Arduino en el menú *Tools > Serial Port*. Lo más probable es que sea COM3 o mayor. COM1 y COM2 se reservan, por regla general para puertos serie de hardware. Para asegurarse de cuál es, puede desconectar la placa y volver a mirar el menú; el puerto de la placa habrá desaparecido de la lista. Reconectar la placa y seleccionar el puerto apropiado (véase Figura A.8).

Subir el sketch a la placa. Pulsar sobre el botón "Upload" (véase Figura A.9) en el entorno Arduino. Esperar unos pocos segundos, se debe ver parpadear los led RX y TX de la placa. Si el volcado del código es exitoso, se verá aparecer el mensaje "Done uploading" en la barra de estado.



Figura A.7: Ventana de trabajo de Arduino, selección de la placa Arduino Mega 2560.

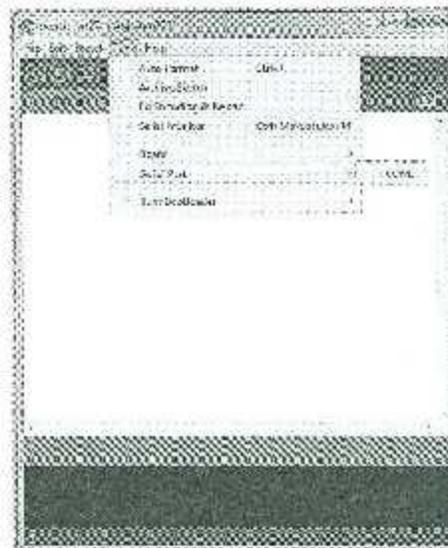


Figura A.8: Ventana de trabajo de Arduino, selección del puerto COM



Figura A.9: Barra de herramientas: selección de Upload

Unos pocos segundos después de finalizar de cargarse el programa, así deberá ver cómo el led de la placa conectado al pin 13 comienza a parpadear. Esto indica que se tiene una buena comunicación con la tarjeta Arduino y el compilador Arduino 0022.

Programación en Arduino

La estructura básica del lenguaje de programación de Arduino es bastante simple y se compone de al menos dos partes. Estas dos partes necesarias, o funciones, encierran bloques que contienen declaraciones e instrucciones.

```
void setup() { instrucciones; } void loop() { instrucciones; }
```

En donde *setup()* es la parte encargada de recoger la configuración y *loop()* es la que contiene el programa que se ejecutará cíclicamente. Ambas funciones son necesarias para que el programa trabaje.

La función *setup()*. Se establece cuando se inicia un programa (*-sketch*). Se emplea para iniciar variables, establecer el estado de los pines, cargar las librerías, etc. Esta función se ejecutará una única vez después de que se conecte la placa Arduino a la fuente de alimentación, o cuando se pulse el botón de reinicio de la placa.

La función *loop()*. Después de llamar a *setup()*, la función *loop()* hace precisamente lo que sugiere su nombre, se ejecuta de forma cíclica, lo que posibilita que el programa esté respondiendo continuamente ante los eventos que se produzcan en la tarjeta. Esta función es el núcleo de todos los programas de Arduino y la que realiza la mayor parte del trabajo.

Código de las funciones entre llaves. Las llaves sirven para definir el principio y el final de un bloque de instrucciones. Se utilizan para los bloques de programación *setup()*, *loop()*, *if*, etc. Una llave de apertura "{" siempre debe ir seguida de una llave de cierre "}". si no es así el programa dará errores.

Apéndice B

ARM-CORTEX-M3

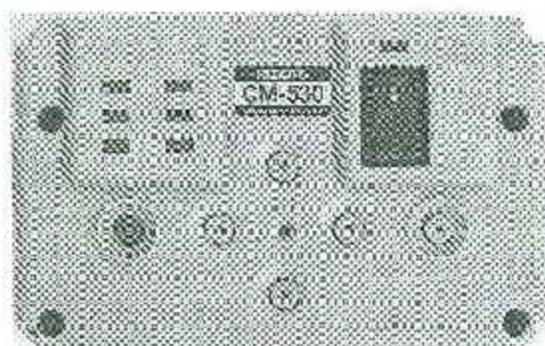


Figura B.1: Dispositivo CM-530

El ARM-CORTEX-M3 forma parte del dispositivo CM-530, véase Figura B.1, es un controlador de BIOLOID compatible con una gran variedad de sensores y actuadores. Es un sistema embebido que presenta las siguientes características [TrossenRobotics, 2006]:

- Procesador ARM Cortex STM32F103RF (32 bits).
- Alimentación de 6.5 V a 15 V.
- 6 puertos auxiliares de 5 pines compatibles con productos OLLO de Robotis para la expansión con sensores y dispositivos de terceros.
- Puerto para ZigBee o Bluetooth (opcional).

B. ARM-CORTEX-M3

- Soporta conexión directamente a baterías LiPo de los sistemas de Biobid Premium de Robotis: Mecanismo de desconexión automática de la batería y monitorización y control del nivel de carga.
- 5 puertos de bus TTL de Biobid (3 pines) para controlar en bus serie Daisy Chain un número grande de actuadores de la serie AX o de actuadores serie MX de 3 pines, TTL (encoder magnético).
- LEDs informativos del estado del microcontrolador.
- Detector de sonido (micrófono).
- Sensor de temperatura.
- Sensor de tensión.
- Generador de sonidos y tonos.
- 5 botones disponibles programables y un botón de reset.
- Compatibilidad con OLLO, Biobid STEM y Biobid Premium, los cuales son kits de robots educativos de la compañía Robotis.
- Compatible con RoboPlus y programable en lenguaje C.

La ubicación de los puertos, conexiones y botones se muestra en la Figura B.2.

El controlador tiene instalado de fábrica un firmware que permite leer los sensores o mandar señales a actuadores conectados a través del paquete RoboPlus. En la Figura B.3 se muestra la interfaz de RoboPlus la cual contiene tres pestañas. La primera pestaña dice *OLLO* y contiene las aplicaciones para comunicarse con los robots de ROBOTIS OLLO; la segunda pestaña dice *BIOLOID* y contiene las aplicaciones para la comunicación con sensores y actuadores de robots BIOLOID; y la tercera pestaña dice *Expert* y contiene las aplicaciones para actualizar o sustituir el firmware del dispositivo, entre ellas la console de RoboPlus.

B. ARM-CORTEX-M3

se puede descargar de la página <http://www.trossenrobotics.com/> encontrándose el link de descarga en la página de especificaciones del CM-530. El paquete contiene las funciones para que la computadora reconozca el controlador mediante el puerto USB, los controladores emulan un puerto serial porque la comunicación con el procesador ARM Cortex es mediante el protocolo UART.

La primera vez que se conecta el CM-530, éste debe de estar apagado y el RoboPlus instalado en la computadora. Al conectarse el cable USB se comienza a instalar el controlador, al terminar se asigna un puerto COM al controlador y el número de puerto se revisa en la pantalla de *Administrador de dispositivos* en la pestaña de *Puertos (COM y LPT)* como se muestra en la Figura B.4. Para utilizar el controlador, ya bien sea para el uso con RoboPlus o para actualizar el firmware, es necesario que tenga la alimentación conectada y esté encendido.

Con la aplicación *RoboPlus Task* (véase Figura B.5) se pueden cargar programas para la lectura de sensores o para activar algún actuador. En este ambiente se pueden programar rutinas que posteriormente se descargan al CM-530 y pueden ser ejecutadas de manera autónoma. Esta aplicación es limitada para el cómputo de valores, porque únicamente permite ingresar ecuaciones lineales.

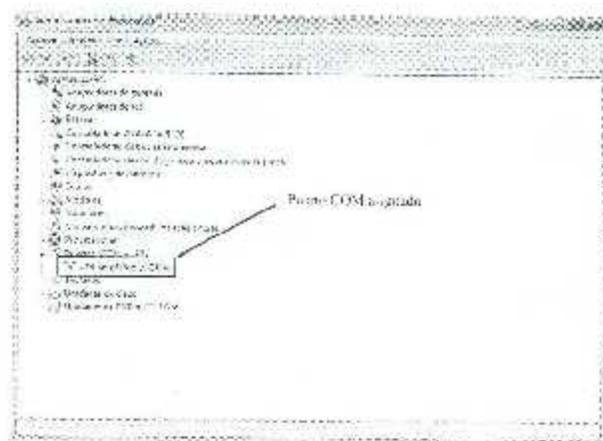


Figura B.4: Puerto COM asignado al CM-530

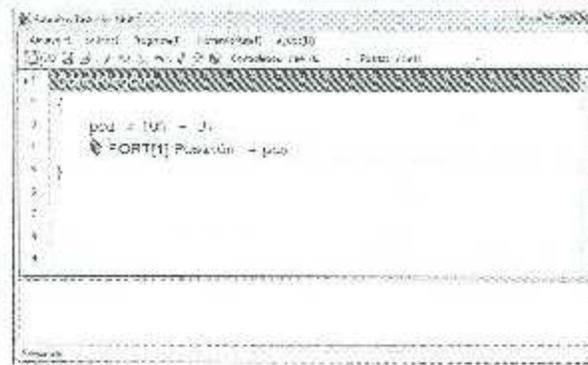


Figura B.5: Aplicación RoboPlus Task

Para programar en este ambiente primero se tiene que seleccionar el controlador a utilizar y el puerto COM asignado al momento de instalarlo. Ambas opciones se encuentran abajo del menú de *Ayuda*. Los controladores disponibles son CM-100, CM-5, CM-510, CM-530 y CM-700. Para escribir una línea de código se realizan los siguiente pasos:

1. Seleccionar el número de línea con el ratón.
2. Presionar *Enter* para desplegar una tabla con las instrucciones disponibles.
3. Hacer doble clic sobre la instrucción deseada e ingresar los parámetros que se piden.

En este ambiente no es posible escribir directamente las instrucciones porque no cuenta con un editor de texto ni un compilador. Algunas de las instrucciones disponibles son: *if*, *while*, *for* y *goto*. Solamente existe un tipo de variable que es numérica y no es necesario declararla previamente.

Programación de firmware

Para explotar las capacidades del controlador es necesario programar directamente el firmware. Esto permite reemplazar la programación actual del controlador, al realizar esto únicamente se podrá tener comunicación con el controlador mediante la aplicación *RoboPlus Terminal* (véase Figura B.6).

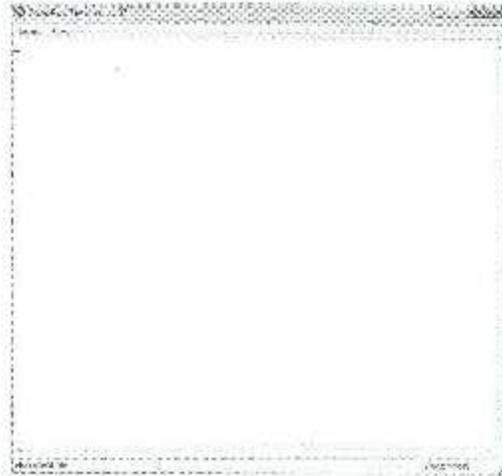


Figura B.6: Interfaz de RoboPlus Terminal

Escribir el programa firmware

Para programar el firmware se realiza con el lenguaje de programación C/C++. Se utilizan tres paquetes que son: *WinARM* que contienen los archivos de cabecera para programar un procesador ARM, *gcc-arm-none-eabi* que es el compilador y *Eclipse Kepler* que es la interfaz de programación, siendo todos de licencia gratuita. También es necesario descargar de la página http://support.robotis.com/en/software/embedded_c/cm530.htm el archivo comprimido "embedded_c(cm530_v1.02).zip" y descomprimirlo, al descomprimirlo se crean distintas carpetas que contienen los archivos de cabecera y códigos de ejemplo de firmware.

Cuando se ejecuta el paquete *Eclipse Kepler* se solicita una carpeta de trabajo (véase Figura B.7). Si se selecciona la predeterminada se bloquean algunas opciones que son necesarias para programar el firmware, por lo que es necesario seleccionar una carpeta distinta recomendando la carpeta creada al momento de descomprimir el archivo "embedded_c(cm530_v1.02).zip".

Después de haber seleccionado la carpeta de trabajo se toma uno de los códigos fuente de ejemplo. Se selecciona la opción ubicada en *File->New->Makefile Project with Existing*



Figura B.7: Selección de la carpeta de trabajo

Code desplegándose la pantalla mostrada en la figura B.8. Haciendo click sobre el botón *Browse...* se busca la carpeta donde se aloja el código fuente. Esta opción va a cargar todos archivos de cabecera (.h), archivos de código fuente (.cpp) y el archivo de compilación (Makefile). Todos los archivos van a aparecer en la ventana *Project Explorer*, desde esta ventana se podrá acceder a cada archivo para su edición, así como la opción de compilación. El archivo resultante de la compilación es un archivo .bin, siendo este archivo el que se carga al controlador CM-530. Para este trabajo se toma el ejemplo de sincronización de servomotores que se encuentra en la carpeta *10 DXL SYNC WRITE*.



Figura B.8: Interfaz para cargar un proyecto ya existente

Archivo de compilación

El compilador recomendado por el fabricante es *WinARM*, pero este compilador tiene limitaciones en cuanto a operaciones con punto flotante. Se realizó el cambio por el compilador *gcc-arm-none-eabi*, que fue mencionado al principio de esta subsección, permitiendo realizar operaciones de punto flotante. Para indicar el uso del nuevo compilador se tienen que realizar cambios en algunas instrucciones del archivo con el nombre **Makefile**. Los cambios son los siguientes:

- Reemplazar la línea

```
CCMPLE_OPTS = -mcpu=cortex-m3 -mthumb -Wall -g  
Os -fno-common
```

por

```
CCMPLE_OPTS = -mcpu=cortex-m3 -mthumb -mfpvfp  
-msoft-float -Wall -g -Os -fno-common -lm
```

- Reemplazar la línea

```
TCHAIN_PREFIX arm-eabi-
```

por

```
TCHAIN_PREFIX arm-none-eabi-
```

- Reemplazar la línea

```
LDFLAGS = -Wl,--gc-sections,-Map- $\{S\}$ .map,-cref,-u,  
Reset_Handler  $\{$(INCLUDE_DIRS)\} \{$(LIBRARY_DIRS)\}$   
-T stm32.ld
```

por

```
LD_FLAGS = -mcpu=cortex-m3 -mthumb -mfpu=vpfp -msoft-float  
-Wl,--gc-sections,-Map,$@.map,-cref,Reset_Handler  
$(INCLUDE_DIRS) $(LIBRARY_DIRS) T stm32.ld -lm
```

