



Universidad
Carlos III de Madrid



DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE SISTEMAS Y AUTOMÁTICA

TESIS DE MÁSTER

LOCOMOCIÓN BASADA EN OSCILADORES PARA ROBOTS CON PATAS

Autor: Javier Isabel Hernández
Tutor: Juan Carlos González Víctores
Director: Juan González Gómez

MÁSTER OFICIAL EN
ROBÓTICA Y AUTOMATIZACIÓN

Leganés, Madrid
Julio 2016



Universidad
Carlos III de Madrid

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE SISTEMAS Y AUTOMÁTICA

TESIS DE MÁSTER

LOCOMOCIÓN BASADA EN OSCILADORES PARA ROBOTS CON PATAS

Autor: Javier Isabel Hernández

Tutor: Juan Carlos González Víctores

Director: Juan González Gómez

MÁSTER OFICIAL EN
ROBÓTICA Y AUTOMATIZACIÓN

LEGANÉS, MADRID

JULIO 2016

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID
MÁSTER OFICIAL EN ROBÓTICA Y AUTOMATIZACIÓN

El tribunal aprueba la Tesis de Máster titulada “**Locomoción basada en osciladores para robots con patas**” realizada por **Javier Isabel Hernández**.

Fecha: Julio 2016

Tribunal: _____
Dr. Ramón Ignacio Barber Castaño

Dr. Fernando Martín Monar

Dr. Álvaro Castro González

Índice general

Índice de tablas	IX
Índice de figuras	XI
Agradecimientos	XV
Resumen	XVII
Abstract	XIX
1. Introducción	1
1.1. Objetivos	3
1.2. Conceptos generales	5
1.3. Estructura del documento	6
2. Estado del arte	7
2.1. Tipos de robots móviles	7
2.1.1. Bípedos	7
2.1.2. Cuadrúpedos	8
2.1.3. Humanoides	10
2.1.4. Artrópodos	11

2.2.	Control asociado a la caminata	12
2.2.1.	Movimiento cuasiestático y dinámico	12
2.2.2.	ZMP	14
2.2.3.	Modelo de péndulo invertido	15
2.2.4.	Modelo cart-table	16
2.3.	Estrategias de desarrollo de caminatas	17
2.3.1.	Tablas de control	18
2.3.2.	Seguimiento de trayectorias fijas	20
2.3.3.	Caminatas adaptativas	22
2.3.4.	Soluciones mecánicas	24
2.3.5.	Bioinspiración	27
3.	Osciladores y movimiento	31
3.1.	Definición	31
3.2.	Parámetros	32
3.2.1.	Forma de onda (f)	33
3.2.2.	Offset (O)	33
3.2.3.	Amplitud (A)	34
3.2.4.	Periodo (T)	34
3.2.5.	Desfase (Ψ)	35
3.2.6.	Umbral de activación	35
3.3.	Modificaciones sobre el oscilador	36
4.	Modulaciones sobre los osciladores	39
4.1.	Modulaciones estáticas	40
4.1.1.	Aumentar o disminuir la velocidad de avance del robot . .	40
4.1.2.	Crear movimientos de giro	40
4.1.3.	Invertir el movimiento de una extremidad	42
4.2.	Modulaciones dinámicas	42
4.2.1.	Modulaciones relativas a la estabilidad	42

4.2.2. Modulaciones relativas a la trayectoria	44
4.3. Transiciones basadas en modulaciones	45
5. Composición de osciladores	49
5.1. Operaciones sobre osciladores	49
5.2. Osciladores cartesianos	51
5.3. Sistemas de capas de osciladores	53
6. Metodología de diseño	57
6.1. Análisis de la morfología del robot	57
6.2. Definición de la arquitectura de osciladores	58
6.3. Configuración de parámetros	59
6.4. Síntesis de la metodología	62
7. Experimentos y resultados	65
7.1. Implementación directa de osciladores	65
7.1.1. Montaje experimental	65
7.1.2. Métricas empleadas	70
7.1.3. Resultados	70
7.2. Adición de modulaciones	72
7.2.1. Montaje experimental	73
7.2.2. Métricas empleadas	77
7.2.3. Resultados	78
7.3. Transiciones	79
7.3.1. Montaje experimental	79
7.3.2. Métricas empleadas	84
7.3.3. Resultados	84
7.4. Capas de osciladores	85
7.4.1. Montaje experimental	86
7.4.2. Métricas empleadas	89
7.4.3. Resultados	90

8. Conclusiones y líneas futuras	91
8.1. Conclusiones	91
8.2. Líneas futuras	92
Bibliografía	95

Índice de tablas

7.1.	Definición de osciladores para una caminata rectilínea en el robot Zowi.	68
7.2.	Definición de osciladores con mayor periodo para una caminata rectilínea en el robot Zowi.	68
7.3.	Definición de osciladores con mayor amplitud para una caminata rectilínea en el robot Zowi.	69
7.4.	Resultados de la primera prueba con Zowi.	71
7.5.	Resultados de la segunda prueba con Zowi.	71
7.6.	Resultados de la tercera prueba con Zowi.	72
7.7.	Definición de osciladores base para una caminata rectilínea en el robot Maus.	76
7.8.	Definición de modulaciones para mejorar la estabilidad sobre una caminata rectilínea en el robot Maus.	76
7.9.	Resultados del segundo experimento: inclinación máxima del robot.	78
7.10.	Resultados del segundo experimento: altura máxima de los obstáculos.	78
7.11.	Resultados del segundo experimento: desnivel máximo de la superficie.	79

7.12. Definición de osciladores base para una caminata rectilínea en el robot Kame.	83
7.13. Definición de osciladores base para una rotación sobre el eje vertical hacia la derecha en el robot Kame.	83
7.14. Velocidades medidas en Kame.	84
7.15. Definición de osciladores para un movimiento rectilíneo en el robot Raider.	89
7.16. Resultados del experimento con Raider.	90

Índice de figuras

1.1. Robots de los equipos participantes en el Argos Challenge: Foxiris, LIO, AIR-K Argonauts, Vikings.	2
1.2. Robot LIO de la Escuela Politécnica Federal de Zúrich y Alstom Inspection Robotics.	2
2.1. Robot bípedo planar de la Universidad Carnegie Mellon.	8
2.2. Diferentes configuraciones de patas en robots bípedos. De izquierda a derecha: patas en serie con rodilla doble, mecanismo de pantógrafo, geometría basada en links, y rodilla invertida con articulaciones adaptativas.	9
2.3. Diferentes morfologías para robots cuadrúpedos: reptil, insecto y mamífero.	9
2.4. Diferentes kits comerciales de robots humanoides: Robonova, Kondo, Darwin y Robovie.	10
2.5. Robots humanoides de competición: Raider (en primer plano) y Grap (segundo plano).	11
2.6. Robots artrópodos con seis, doce y ocho patas: Phantom X, Morphex, Spider.	12
2.7. El robot cuadrúpedo AT-AS de Ana de Prado, en equilibrio sobre tres patas.	13

2.8. El robot bípedo Frosty de Frosty Design.	14
2.9. Regiones estables del ZMP en apoyo simple y múltiple.	15
2.10. Esquema del modelo cart-table.	17
2.11. El robot hexápodo Phoenix de Kåre Halvorsen.	19
2.12. Programación del robot Phoenix mediante tablas de control. . . .	19
2.13. Robot Cheetah Cub del Biorobotics Laboratory de la Escuela Politécnica Federal de Lausana.	23
2.14. Robot RoboSimian del Jet Propulsion Laboratory de la NASA. . .	23
2.15. RHex, de Boston Dynamics; y PROLERO, de la ESA.	24
2.16. Diferentes ejemplos de whegs en robots.	25
2.17. Cornell biped, de la Universidad de Cornell	26
2.18. Salamandra Robotica, del Biorotics Laboratory de la EPFL. . . .	28
2.19. Robot humanoide NAO, desplaza��ndose a lo largo de un desnivel de 11°.	29
 3.1. Esquema de un sistema de oscilador simple.	32
3.2. Ejemplo: movimiento de un servo al aplicarle un oscilador.	33
3.3. Diferentes formas de onda para un oscilador: seno, diente de sierra, semisenso y onda cuadrada.	34
3.4. Offsets diferentes para un oscilador sinusoidal.	35
3.5. Amplitudes diferentes para un oscilador sinusoidal.	35
3.6. Periodos diferentes para un oscilador sinusoidal.	36
3.7. Desfase entre dos osciladores sinusoidales superpuestos.	36
3.8. Umbral de activación aplicado sobre un oscilador.	37
 4.1. Esquema del sistema de un oscilador con modulación.	39
4.2. Trayectorias solapadas de los pies de un robot bípedo.	41
4.3. Trayectoria formada por las huellas de un robot bípedo girando. .	41
4.4. Esquema de un robot bípedo con doce osciladores y seis modulaciones.	43

4.5. Proyección del centro de gravedad de un robot sobre una superficie inclinada.	44
4.6. Oscilador normal (en verde) frente a oscilador realimentado (en azul).	44
5.1. Esquema de un sistema con varios osciladores aplicados sobre un solo actuador (superior), y esquema de un sistema de oscilador usado en varios actuadores (inferior).	50
5.2. Representación en 2D de la pata de un robot bípedo.	50
5.3. Composición de osciladores con dos osciladores directos (izquierda) y tres osciladores directos (derecha).	51
5.4. Esquema de un sistema de osciladores aplicados sobre la cinemática inversa.	52
5.5. Trayectoria generada con osciladores en el espacio cartesiano. . .	53
5.6. Capas en el desplazamiento de un robot NAO.	54
5.7. Ejes de balanceo en un cuadrúpedo PhantomX.	55
6.1. Planos de simetría en un robot cuadrúpedo.	58
6.2. Formación de una trayectoria circular a partir de dos osciladores desfasados 90°.	61
6.3. Oscilador fijado para balancear un robot (en verde) y corrección a partir de un sensor inercial (en azul).	62
6.4. Oscilador reconfigurado para balancear un robot (en verde) y corrección a partir de un sensor inercial (en azul).	62
7.1. Robot Zowi.	66
7.2. Configuración de osciladores del robot Zowi.	67
7.3. Escenario de experimentación.	69
7.4. Robot Maus.	73
7.5. Configuración de osciladores del robot Maus.	74
7.6. Robot Kame.	80

7.7.	Configuración de osciladores del robot Kame.	81
7.8.	Decremento del radio de giro durante la transición.	85
7.9.	Robot Raider.	86
7.10.	Arquitectura de osciladores en el robot Raider.	88

Agradecimientos

Antes de nada, me gustaría dar las gracias a BQ por haber financiado parte de la construcción de algunos de mis robots. En su momento apostaron por la robótica y el open-source, y gracias a ello los proyectos están vivos y evolucionan junto a la comunidad. En segundo lugar quiero dar las gracias a mi tutor y también presidente de la Asociación de Robótica UC3M (ASROB), el Dr. Juan G. Víctores, quien me ha ayudado inmensamente a afrontar este trabajo. Gracias a él ahora tengo un poco más de fe en la universidad. Por supuesto, quiero dar las gracias a mi director, el Dr. Juan González (Obijuan), quien en poco tiempo pasó de ser un miembro de la comunidad de internet, a ser mi jefe, y actualmente le considero un amigo. Sus estudios en la locomoción de los robots ápodos fueron la chispa para poner en marcha este trabajo, y sin duda nada de esto hubiese sido posible sin él. No quiero dejar de dar las gracias también a los miembros de la asociación de robótica, con quienes he compartido tanto buenos momentos como discusiones técnicas. Por último quiero dar las gracias a mis padres, a mi hermana y a Silvia, que siempre me dan apoyo y cariño cuando lo necesito.

Resumen

Esta tesis estudia la locomoción de los robots con patas. Específicamente, se centra en el método de osciladores, que es un método bioinspirado basado en el movimiento de las articulaciones del robot a partir de señales rítmicas. Este método ha sido anteriormente implementado con éxito para crear desplazamientos en robots ápodos y también como simplificación de los generadores centrales patrones (CPG) en robots con patas. A lo largo del desarrollo de este trabajo se realiza un estudio exhaustivo de las posibilidades que ofrecen los algoritmos de caminata basados íntegramente en osciladores. También se propone la adición de modulaciones en las señales para modificar funciones de caminata, crear funciones nuevas y también realizar la transiciones entre funciones de caminata. Otro tema tratado es la composición de osciladores para crear movimientos complejos definidos por varias señales sumadas. Reuniendo estos conceptos, se ha desarrollado una metodología de diseño genérica para la implementación de caminatas. Por último se han realizado experimentos con algunos robots construídos por el autor: Zowi, Kame, Maus y Raider.

Abstract

This thesis presents a study of the locomotion of legged robots. Specifically, it is focused on the oscillator method, which is a bio-inspired method based on the movement of robot joints created by rhythmic signals. This method has been successfully implemented previously on limbless robots and as a simplification of central pattern generators (CPG) on legged robots. During the development of this work, a deep study of the possibilities offered by walking algorithms fully based on oscillators has been made. Also, the addition of modulations upon signals with the aim of modifying gaits is proposed, creating new gaits and making transitions between different gaits. Another topic discussed is the creation of complex movements defined by different composed signals. Putting together these concepts, a generic design methodology for the implementation of walking gaits has been made. Finally, different experiments with some robots created by the author have been made: Zowi, Kame, Maus and Raider.

Capítulo **1**

Introducción

A la hora de diseñar un robot móvil para una aplicación concreta, una de las primeras decisiones que debe tomarse es: ¿es mejor utilizar una plataforma con ruedas o con patas? Por lo general, las razones que suelen tenerse en cuenta para tomar esta decisión son la complejidad del entorno o la naturaleza de la tarea a realizar. A priori, parece sensato pensar que un robot con ruedas podrá moverse bien por terrenos sencillos, mientras que un robot con patas puede tener unas capacidades mayores para desplazarse por terrenos complejos. Relacionado con esto, una apreciación puede ser que la locomoción de un robot con ruedas tiene un desarrollo más rápido y simple, mientras que un robot con patas es un sistema que requiere un desarrollo más lento y complejo.

Para situar esto en un problema real puede tomarse como ejemplo el Argos Challenge¹. En esta competición se busca el desarrollo de un robot autónomo para la inspección de plantas de gas y petróleo. Los robots deben realizar pruebas en entornos preparados para humanos. Entre los desafíos a los que se enfrentan se encuentran: navegar evitando obstáculos, subir y bajar escaleras, o desplazarse por superficies deslizantes. En la figura 1.1 se muestran algunos de los robots participantes.

¹<http://www.argos-challenge.com/en>



Figura 1.1: Robots de los equipos participantes en el Argos Challenge: Foxiris, LIO, AIR-K Argonauts, Vikings.

Como se puede observar, la mayoría de los equipos optan por utilizar robots con configuraciones de orugas. Sin embargo, uno de los equipos utiliza un robot cuadrúpedo, LIO. En la figura 1.2 se ve cómo este robot tiene muy buenas capacidades para realizar tareas como subir escaleras, pero en comparación a sus rivales es un robot lento al desplazarse en suelo llano. Esta lentitud se debe principalmente a la complejidad de su caminata. Cada movimiento de cada articulación está cuidadosamente calculado y sincronizado con la marcha.



Figura 1.2: Robot LIO de la Escuela Politécnica Federal de Zúrich y Alstom Inspection Robotics.

¿A qué se debe esta complejidad añadida? Para empezar, un robot con patas normalmente tiene un mayor número de grados de libertad, y su estado debe controlarse en todo momento. Esto se traduce en una necesidad de cómputo mucho mayor. Además, la diversidad de patrones de movimiento y combinaciones que puede realizar un robot con patas es inmensa. En ocasiones, la elección de un robot con patas se hace con el único objetivo de estudiar las formas de caminar del robot. De forma paralela, cuando se estudian algoritmos de navegación se utilizan robots más simples, para desacoplar su estudio de la complejidad del estudio de sus caminatas.

Diseñar patrones de desplazamiento o caminatas en robots con patas es un problema complejo. En este trabajo se presenta un método sencillo y de bajo coste computacional, que resulta efectivo en diversos robots: el método de osciladores.

1.1. Objetivos

El objetivo de esta tesis es el estudio de las caminatas que hacen posible a los robots con patas desplazarse. Particularmente el estudio se centrará en el método de osciladores, incluyendo varios complementos al método que amplían su potencia. A continuación se detallan los objetivos específicos que se perseguirán a lo largo del desarrollo de este trabajo:

- Estudiar los diferentes algoritmos usados para generar patrones de caminata en robots con patas. La locomoción de los robots con patas ha sido ampliamente estudiada en los últimos años, y el problema se ha abordado desde muchas perspectivas diferentes. Es difícil definir un método eficaz si éste no va acompañado de una aplicación concreta. Por ello, se estudiarán algunos de los métodos más comunes.
- Estudiar el funcionamiento de un oscilador. Se detallarán cuales son los parámetros necesarios para configurar un oscilador y se analizará cómo

afectan estos a la salida del oscilador.

- Analizar la viabilidad de la implementación del método de osciladores en diferentes configuraciones robóticas. Se conoce que el método de osciladores ha sido implementado exitosamente en robots con topologías muy concretas, como los robots ápodos. Será objetivo de este trabajo mostrar diferentes morfologías robóticas que son compatibles con los osciladores.
- Analizar las modulaciones que pueden aplicarse a los osciladores. Se persiguen dos objetivos secundarios: modificar los parámetros de un oscilador para generar patrones de caminata derivados a partir de uno básico, y reforzar el funcionamiento de la caminata estableciendo relaciones entre agentes externos y la adaptación del patrón base. Como parte de esto, se estudiará la transición entre diferentes patrones de marcha basada en modulaciones.
- Analizar la composición de osciladores. Se pretende analizar qué tipo de movimientos se pueden crear al combinar la salida de varios osciladores. También se analizarán diferentes métodos para realizar las combinaciones.
- Estudiar la aplicación de los osciladores de forma directa e inversa. Primero, se propone la aplicación directa en las articulaciones o actuadores de los robots. Posteriormente, se estudiará el diseño de osciladores cartesianos apoyados en el modelo cinemático inverso del robot.
- Desarrollar una metodología de diseño. Se propone construir una metodología que sirva de referencia para el diseño de caminatas basada en osciladores. En esta metodología, se pretende englobar todos los aspectos de aplicación, modulación y combinación de osciladores tratados en esta tesis, así como otros aspectos tratados individualmente en publicaciones y trabajos anteriores.

Como resumen, el objetivo de esta tesis se centra en el desarrollo de caminatas. No incluye por tanto la creación de comportamientos autónomos más allá de la propia caminata. Tampoco se incluye entre los objetivos el diseño y construcción de los robots, aunque se usarán varios prototipos creados por el autor como plataformas experimentales para el estudio de caminatas.

1.2. Conceptos generales

Para facilitar la lectura de la tesis, en esta sección se aclara el significado de algunos de los conceptos que se repetirán en los siguientes capítulos.

- Caminata: se define la caminata de un robot como el conjunto de todas las funciones de locomoción que hacen posible su movilidad completa.
- Función de caminata: se conoce como función de caminata a una funcionalidad de locomoción del robot que le permite realizar un objetivo concreto. Ejemplos de funciones de caminata pueden ser caminar hacia delante, girar a la derecha o saltar. También puede denominarse patrón de marcha.
- Fase de apoyo: la fase de apoyo es el instante de una función de caminata en la que una determinada extremidad del robot se encuentra en contacto con el suelo.
- Fase aérea: paralelamente a la fase de apoyo, la fase aérea es el instante de una función de caminata en la que una determinada extremidad del robot se encuentra en el aire.
- Guiñada, cabeceo y alabeo: para nombrar las rotaciones que pueden darse en tres dimensiones, se utiliza el criterio de guiñada, cabeceo y alabeo (en inglés suelen nombrarse como yaw, pitch y roll). La guiñada es la rotación sobre el eje vertical de un cuerpo, el cabeceo es la rotación sobre su eje transversal y el alabeo es la rotación sobre su eje longitudinal.

1.3. Estructura del documento

A continuación se describe cómo se ha organizado el contenido del documento a lo largo de sus capítulos.

En el capítulo 2, se realiza un estudio del estado del arte, poniendo especial énfasis en las estrategias existentes para desarrollar caminatas y en los algoritmos de control asociados a ellas.

En el capítulo 3, se introduce el concepto de oscilador. En este capítulo se analizarán los parámetros que definen un oscilador así como su influencia en la salida generada por el oscilador.

En el capítulo 4, se analizan las diferentes modulaciones que pueden aplicarse sobre los osciladores para variar su funcionamiento.

En el capítulo 5, se analiza la composición de osciladores simples para crear movimientos más complejos.

En el capítulo 6, se ha desarrollado una metodología de diseño de caminatas con osciladores, reuniendo los conceptos de los capítulos anteriores y de otros trabajos.

En el capítulo 7, se realizan experimentos sobre robots reales que abarcan los puntos más importantes de la tesis.

En el capítulo 8, se concluye la tesis comentando de forma crítica los resultados obtenidos.

Capítulo 2

Estado del arte

En este capítulo se estudiarán las características de los robots con patas y algunas estrategias comunes para conseguir que un robot camine.

2.1. Tipos de robots móviles

Los robots móviles son aquellos robots que tienen la capacidad de desplazarse. Esta tesis se centra particularmente en aquellos que basan su medio de locomoción en patas, entre los que existe una gran diversidad de configuraciones y morfologías. A continuación se estudian algunas de estas morfologías. Todos los robots que aparecen a continuación son robots de pequeño tamaño, con una altura normalmente inferior a 50 cm.

2.1.1. Bípedos

Los robots bípedos son robots que se mueven mediante el uso de dos patas. En muchos casos la morfología del robot se compone únicamente de dos patas, sin tronco, lo que conlleva que sean las propias patas las que se encarguen al mismo tiempo de avanzar y de controlar la estabilidad del robot. Entre los robots usados en investigación podemos encontrar bípedos planares [1][2], que

son robots a los que se les ha restringido el balanceo lateral para poder estudiar exclusivamente su avance y equilibrio frontal. En la figura 2.1 se muestra el bípedo planar de la Universidad Carnegie Mellon [3].

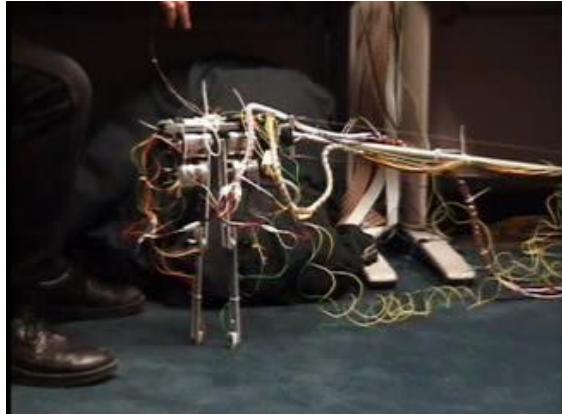


Figura 2.1: Robot bípedo planar de la Universidad Carnegie Mellon.

Los robots bípedos son especialmente adecuados para el diseño de patas experimentales. En la figura 2.2 se muestran algunos ejemplos de configuraciones de patas en serie, con rodilla invertida, con doble rodilla [4], con mecanismos de pantógrafo, con articulaciones adaptativas, etc. Los robots de izquierda a derecha son: ROFI¹, Ignis², un prototipo del autor y Sentinel³.

Los bípedos tienen una característica importante, y es que deben ser capaces de guardar el equilibrio cuando se encuentran con un solo pie apoyado en el suelo. Este aspecto se desarrolla en la sección 2.2.1.

2.1.2. Cuadrúpedos

Los robots cuadrúpedos se caracterizan por tener cuatro patas. En general, estos robots tienden a asemejarse a seres vivos en su morfología. En la figura 2.3 se muestran algunos ejemplos de robots cuadrúpedos. Los robots de izquier-

¹<http://www.projectbiped.com/prototypes/rofi>

²Ignis, de SNJ Robot Lab

³<http://yaleguan.com/project-sentinel.html>



Figura 2.2: Diferentes configuraciones de patas en robots bípedos. De izquierda a derecha: patas en serie con rodilla doble, mecanismo de pantógrafo, geometría basada en links, y rodilla invertida con articulaciones adaptativas.

da a derecha son: Pleurobot, AT-AS⁴ y un robot cuadrúpedo inspirado en un mamífero⁵.

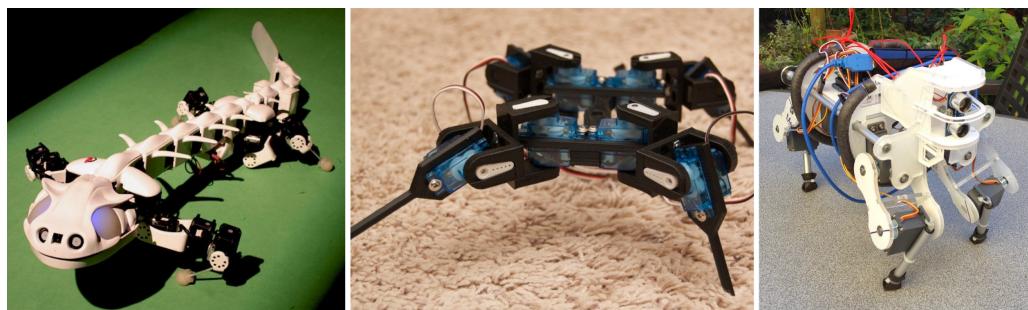


Figura 2.3: Diferentes morfologías para robots cuadrúpedos: reptil, insecto y mamífero.

Como se puede ver, las posibilidades de los cuadrúpedos son muy amplias, desde robots similares a vertebrados [5] a robots inspirados en reptiles [6]. En general, pueden dividirse en dos grupos: robots con patas horizontales y robots con patas verticales. Los robots con patas horizontales son más estables, pero no son tan ágiles como los robots con patas verticales.

⁴<http://www.thingiverse.com/thing:38159>

⁵<http://coretechrobotics.blogspot.com.es/2014/10/a-simple-quadruped-robot.html>

2.1.3. Humanoides

Los robots humanoides pretenden replicar las características mecánicas de los humanos. Aunque entran dentro de la categoría de bípedos, ya que usan dos patas para desplazarse, su morfología incluye dos brazos y una cabeza. Además, los brazos y patas de un humanoide deben ser similares a los humanos para poder replicar sus movimientos. Por esta razón, sus piernas no admiten tantas configuraciones como las de los robots bípedos. Entre los robots comerciales existen varios modelos aptos como plataforma sobre la que estudiar caminatas; en la figura 2.4 se muestran algunos. Los robots de izquierda a derecha son: Hitec Robonova⁶, Kondo KHR-3hv⁷, Robotis Darwin OP⁸ y VStone Robovie X⁹.



Figura 2.4: Diferentes kits comerciales de robots humanoides: Robonova, Kondo, Darwin y Robovie.

La proliferación de competiciones robóticas también ayuda al desarrollo de robots humanoides [7][4][8], en muchos caso especializados mecánicamente en tareas concretas. En la figura 2.5 se muestran dos robots humanoides orientados a la competición, Raider [9] y Grap. Un punto importante a tener en cuenta es que los brazos de los robots humanoides son una parte activa de su locomoción, y son especialmente importantes a la hora de equilibrar el robot [10].

⁶<http://hitecrcd.com/>

⁷<http://kondo-robot.com/>

⁸http://www.robotis.com/xe/darwin_en

⁹https://www.vstone.co.jp/english/products/robovie_x

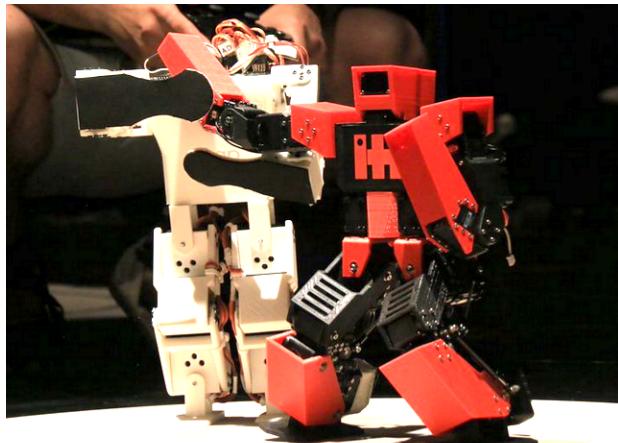


Figura 2.5: Robots humanoides de competición: Raider (en primer plano) y Grap (segundo plano).

2.1.4. Artrópodos

Los artrópodos son robots de seis o más patas inspirados en insectos. Estos robots son estáticamente estables, ya que siempre tendrán al menos tres apoyos en el suelo. Están caracterizados por tener un gran número de grados de libertad, lo que les permite adaptarse a terrenos complejos [11]. En la figura 2.6 se muestran algunos ejemplos de robots artrópodos. Los robots de izquierda a derecha son: Phantom X¹⁰, Morphex¹¹ y un robot araña imprimible¹².

La configuración más común de la pata de un robot hexápodo u octápodo se basa en tres actuadores colocados en serie en las posiciones de guíñada-alabeo-alabeo. Sin embargo también existen patas simples de únicamente dos articulaciones, así como patas complejas de cuatro o más articulaciones.

¹⁰<http://learn.trossenrobotics.com/10-interbotix/crawlers/phantomx-hexapod/100-phantomx-hexapod-getting-started.html>

¹¹<http://zentasrobots.com/robot-projects/morphex-mkii/>

¹²<http://www.thingiverse.com/thing:585>

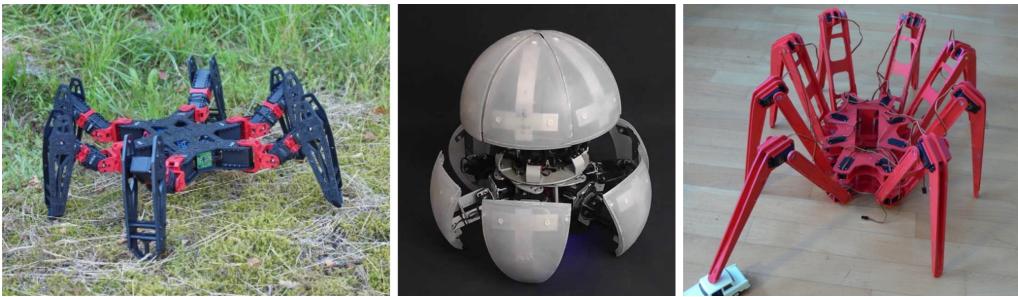


Figura 2.6: Robots artrópodos con seis, doce y ocho patas: *Phantom X*, *Morphex*, *Spider*.

2.2. Control asociado a la caminata

El control a la hora de generar caminatas para un robot es un tema sobre el que existe abundante literatura. Por lo general, las investigaciones se orientan de dos formas distintas. Por un lado, están quienes realizan un estudio exhaustivo de la cinemática y la dinámica del robot con el objetivo de predecir su comportamiento en cada instante. La efectividad de estos desarrollos está estrechamente relacionada con la precisión de las medidas y cálculos que se realizan en el robot. Algunos de los factores a tener en cuenta en el análisis del robot incluirían la situación del centro de masas de cada pieza, la rigidez de los materiales, el comportamiento de los actuadores en diferentes condiciones, etc. Por otro lado, el otro grupo se centra menos en el análisis del robot a favor de dar más importancia a la realimentación en su control.

2.2.1. Movimiento cuasiestático y dinámico

Una primera división entre las funciones de caminata, nos permite clasificarlas en dos grupos: cuasiestáticas y dinámicas. Las funciones de caminata cuasiestáticas son aquellas en los que el robot se mantiene en equilibrio estático en cada instante de tiempo. Si considerásemos cada pata como un único punto de apoyo, este método solo sería aplicable en robots de cuatro o más patas. La razón de esto es que se considera que un cuadrúpedo puede mantener el equi-

librio cuando avanza con una pata y se apoya en el suelo con las tres restantes. En la figura 2.7 se muestra el robot AT-AS [12] de Ana de Prado en equilibrio sobre tres patas. Sin embargo, en la práctica, a veces los apoyos de las patas de un robot son polígonos relativamente grandes, por lo que también puede aplicarse a robots bípedos que alcanzan el equilibrio estático apoyándose sobre un pie. El problema de esta forma de caminar es que, a fin de minimizar los efectos iniciales, se utilizan velocidades muy bajas para poder despreciar las aceleraciones. Un ejemplo de aplicación sería el clásico movimiento de un hexápedo que alterna su posición con tres patas en fase de apoyo y tres patas en fase aérea.

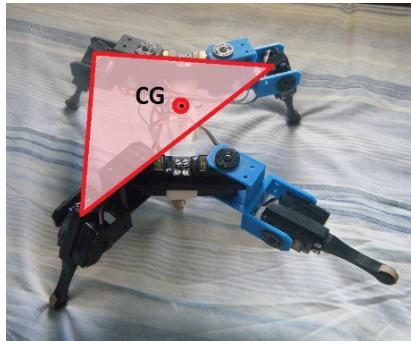


Figura 2.7: El robot cuadrúpedo AT-AS de Ana de Prado, en equilibrio sobre tres patas.

Por otra parte, en los patrones de marcha dinámicos entra en juego las fuerzas propias del desplazamiento. A diferencia de los anteriores, en los patrones dinámicos existen instantes de tiempo en los que el robot adquiere una posición inestable. Un ejemplo de esto es el robot Frosty de Frosty Design¹³, mostrado en la figura 2.8.

Esta forma de desplazarse es la que podemos observar en los animales y humanos. Por lo general, puede deducirse que estos desplazamientos son potencialmente más rápidos. También requieren de menos apoyo en el suelo, lo que se traduce en menos patas o pies más pequeños.

¹³<http://frostyorange.blog.shinobi.jp/>



Figura 2.8: El robot bípedo *Frosty* de *Frosty Design*.

2.2.2. ZMP

El concepto de ZMP (Zero Moment Point) fue propuesto por M. Vukobratovic en [13]. El ZMP es el punto espacial sobre el cual la suma de todas las fuerzas y efectos iniciales del robot se anula. Para que un robot se mantenga estable, el ZMP debe proyectarse sobre el polígono que forman sus apoyos en la superficie sobre la que camina. Cuando el robot se encuentra en una fase de apoyo en la que solo una pata está en contacto con el suelo (por ejemplo, en el caso de un robot bípedo), el ZMP debe situarse en un punto contenido dentro de la planta de la pata que está en contacto con el suelo. Si el robot se encuentra apoyado con más de una pata, la región en la que el ZMP asegura la estabilidad se encuentra en el polígono creado por las patas que están apoyadas en el suelo más la región creada en el espacio intermedio. Las regiones estables sobre las que se puede situar el ZMP se han representado en la figura 2.9.

Una forma básica de aplicar el ZMP en un robot consiste en la creación de caminatas cuasiestáticas. En una caminata cuasiestática el robot se mueve lentamente para poder despreciar el efecto de las velocidades. Anulando las velocidades y las aceleraciones, también se anulan los momentos lineales de las masas del robot. De esta forma, para calcular el ZMP solo se tienen en cuenta las fuerzas gravitatorias. La condición de equilibrio en este caso se simplifica

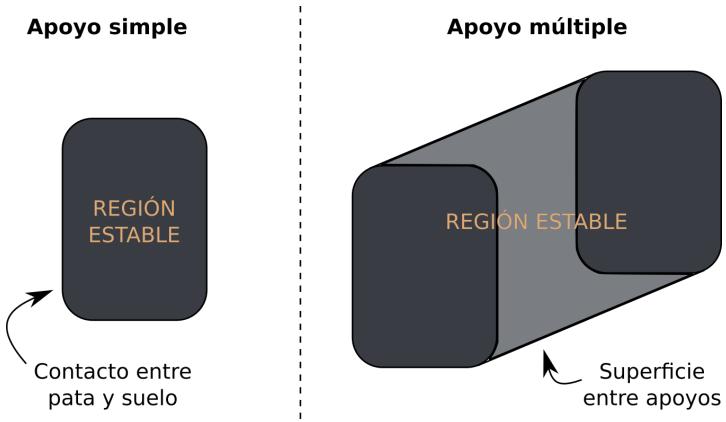


Figura 2.9: Regiones estables del ZMP en apoyo simple y múltiple.

en que la proyección vertical del centro de masas del robot se encuentre dentro del polígono de apoyo. El resultado de esto son caminatas en las que el robot es estáticamente estable en cualquier instante de la caminata. Además de producir una caminata lenta, esta aproximación requiere un uso de amplitudes mayores en el balanceo del centro de masas del robot. Otros inconvenientes radican en la necesidad de soportar todo el peso del robot de forma continuada sobre algunos de sus apoyos (sobre un pie en el caso de bípedos) durante las zancadas, que además de requerir una estructura mecánica más rígida también conlleva un consumo energético mayor.

En cambio, en caminatas dinámicas, la proyección del centro de masas no tiene por qué estar dentro del polígono de soporte para que el ZMP se cumpla. Las caminatas dinámicas permiten mayor velocidad, y suelen presentar mejoras en desplazamientos sobre superficies no necesariamente lisas.

2.2.3. Modelo de péndulo invertido

Una forma de modelar el comportamiento de un robot (generalmente para un bípedo) es equiparar su comportamiento al de un péndulo invertido [14]. Este método se ha estudiado tanto en dos como en tres dimensiones [15]. Las

ventajas del modelo de péndulo invertido (conocido como IPM por sus siglas en inglés), son su simplicidad y que provee una solución cerrada para el cálculo de trayectorias.

Existen diferentes aproximaciones para aplicar este modelo. La más básica consiste en situar la masa del péndulo en el centro de masas del robot, mientras que la base se corresponde con el centro de presión de los apoyos del robot. Por su parte, la masa de la pierna se supone nula. Sin embargo, existen otras aproximaciones para implementar el modelo que utilizan masas distribuidas [16]. En el caso de los robots bípedos podemos encontrar el TMIPM (Two Masses Inverted Pendulum Mode), que modela el robot con una masa en el torso y otra en la pata que se encuentra en fase aérea. En este caso el movimiento de la pata se define de forma prácticamente arbitraria y el movimiento del torso se calcula analíticamente. Dando un paso más el MMIPM (Multiple Masses Inverted Pendulum Mode), propone la modelización de la pata en fase aérea mediante varias masas. En este caso se fija una trayectoria para el extremo de la pata y la posición del resto de masas se calculan de forma iterativa.

2.2.4. Modelo cart-table

Como combinación del ZMP y el modelo de péndulo invertido, surge el modelo cart-table [17]. Este modelo busca la similitud del robot con el sistema formado por una mesa y un carro que se mueve sobre su tablero. Si este método se aplicase en dos ejes, requeriría otro conjunto adicional de mesa y carro. En la figura 2.10 se muestra un esquema de cómo se representa este modelo.

La masa del carro corresponde con la masa total del robot, que en este modelo se concentra en un punto, su centro de masas. El pie de la mesa representa el polígono que forman los apoyos del robot sobre el suelo. Como se puede observar, la base de la mesa es más pequeña que su tablero. Dado que en el modelo la mesa tiene una masa despreciable, si el carro se parase cerca de los extremos del tablero la mesa volcaría. Pero si el carro, que sí tiene masa, se sitúa en un

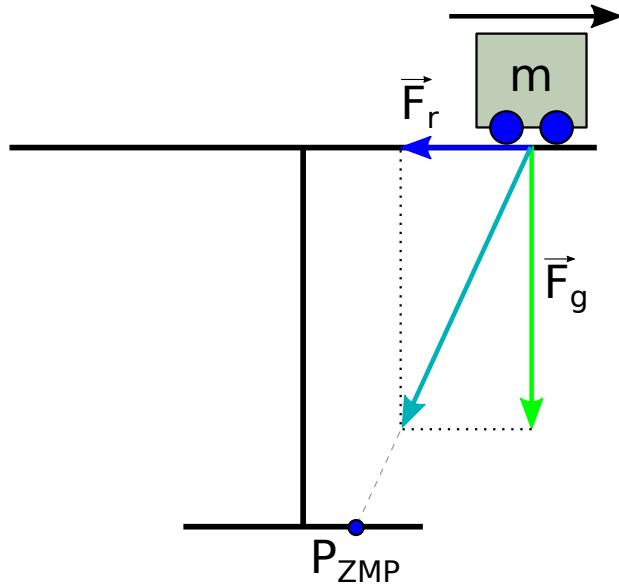


Figura 2.10: Esquema del modelo cart-table.

extremo y acelera con una magnitud adecuada, es capaz de mantener la mesa recta. En ese instante en el que el carro acelera, crea una fuerza de reacción en sentido contrario sobre la mesa, que contrarresta el efecto gravitatorio y hace que el ZMP se proyecte sobre la base. Si la aceleración del carro fuese demasiado baja, la mesa volcaría hacia la derecha; si fuese demasiado alta, volcaría hacia la izquierda.

2.3. Estrategias de desarrollo de caminatas

Para enfrentar el problema de la locomoción en robots con patas, existen diferentes estrategias. Cada una de ellas aborda el problema de una forma diferente y ha demostrado ser útil en grupos de robots específicos. En la mayoría de los casos, estas estrategias se solapan, y muchos de los robots que se presentan como ejemplos, utilizan al mismo tiempo varios de estos métodos. Por ello, se intenta mostrar su característica dominante en cada caso.

2.3.1. Tablas de control

El método de las tablas de control [18], consiste en el desarrollo de una matriz que almacena la posición de las articulaciones del robot en diferentes instantes. En una tabla de control, cada celda representa un valor q de posición para una articulación del robot. Para un robot de n grados de libertad, cada fila tendrá un total de n valores, que representan una instantánea de la posición total del robot. El conjunto de estas m filas, define una secuencia de movimiento. De esta forma una tabla de control queda completamente definida como se muestra en la ecuación 2.1.

$$TC = \begin{pmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} & \dots & q_{1n} \\ q_{21} & q_{22} & q_{23} & \dots & q_{2n} \\ q_{31} & q_{32} & q_{33} & \dots & q_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ q_{m_t 1} & q_{m_t 2} & q_{m_t 3} & \dots & q_{m_t n} \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

Donde para cada q_{ij} , i representa un instante temporal y j un grado de libertad del robot.

Una tabla de control, puede construirse manualmente simplemente escribiendo en cada casilla la posición que debe tomar cada articulación. En robots muy simples y/o con pocos grados de libertad es fácil definir estos valores realizando cálculos sencillos, o incluso buscándolos mediante la experimentación. Un ejemplo es el robot hexápodo Phoenix¹⁴ de Kåre Halvorsen, mostrado en la figura 2.11.

Phoenix se programa a través de una aplicación gráfica que almacena los valores de sus articulaciones en una hoja de cálculo, como se muestra en la figura 2.12. Los datos de cada vector se guardan en un microcontrolador y se comunican por serie entre el microcontrolador y el controlador de los servos del robot.

Otra forma de abordar el problema es la definición de los valores de la ta-

¹⁴<http://www.lynxmotion.com/images/html/proj098.htm>



Figura 2.11: El robot hexápedo Phoenix de Kåre Halvorsen.

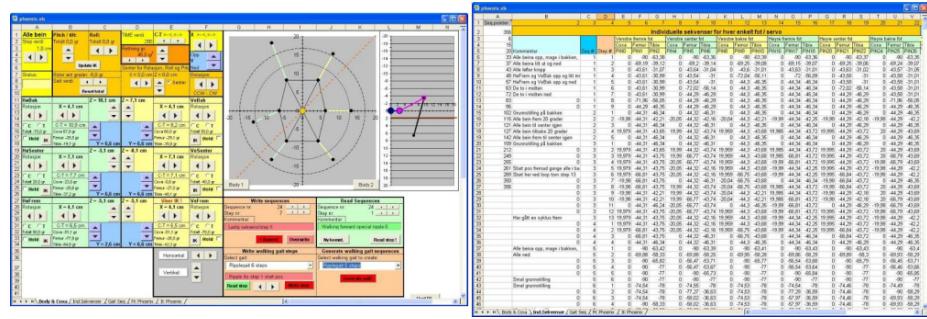


Figura 2.12: Programación del robot Phoenix mediante tablas de control.

bla por guiado. Este método, comentado ampliamente en el libro *Fundamentos de Robótica* [19] de Antonio Barrientos, puede encontrarse muy frecuentemente en la programación de robots industriales como brazos robóticos. Aunque en el caso de un brazo robótico, el fin de su movimiento no es el del desplazamiento, el funcionamiento es similar. La forma de proceder consiste en que un operador, manipula físicamente el robot, colocándolo en las posiciones que quiere que alcance y guardándolas en la tabla de control. Además de utilizar el propio robot (si tiene un sistema de realimentación que permita leer su posición), pueden utilizarse réplicas del robot, como maquetas; o elementos de teleoperación, como potenciómetros, joysticks, etc. Este método se usa más comúnmente en labores

de manipulación, pero también es útil en tareas de locomoción. Es útil principalmente en aquellas complejas y poco repetitivas, como por ejemplo subir un escalón.

La otra forma de construir una tabla de control es generando los valores de forma automática. Esto permite extraer los movimientos generados por un algoritmo y desarrollar una tabla que replique su comportamiento. De esta forma, se crean secuencias estáticas que definen las funciones de movilidad del robot.

La realización de tablas de control es una estrategia para desarrollar caminatas que requiere una potencia computacional mínima, ya que el controlador simplemente debe leer su contenido y ejecutarlo. Sin embargo, el problema de las tablas de control es que son estáticas, es decir, no pueden modificarse. Si se requiere cambiar un movimiento, es necesario volver a generar una tabla nueva que contenga esos cambios. Más específicamente, si por ejemplo se necesita que un robot adapte su movimiento basándose en información que recoja con sensores, desarrollar tablas de control no basta como estrategia.

2.3.2. Seguimiento de trayectorias fijas

En la mayoría de los casos, podemos considerar la pata de un robot como una cadena cinemática formada por eslabones rígidos y unida por sus articulaciones. La cinemática directa de la pata de un robot produce una posición y orientación de su extremo basándose en la definición de valores que describen la posición de cada una de sus articulaciones por separado. De este modo, como se describe en la ecuación 2.2, para un robot con n grados de libertad, un conjunto de n valores q , describen completamente su posición (x, y, z) y orientación (α, β, γ) .

$$\begin{aligned} x &= f_x(q_1 \dots q_n), y = f_y(q_1 \dots q_n), z = f_z(q_1 \dots q_n) \\ \alpha &= f_\alpha(q_1 \dots q_n), \beta = f_\beta(q_1 \dots q_n), \gamma = f_\gamma(q_1 \dots q_n) \end{aligned} \quad (2.2)$$

Sin embargo, en ocasiones fijar un valor para cada articulación de la cadena es un proceso complicado. Cada una de las articulaciones modifica la posición

y la orientación del extremo de la cadena de una forma diferente. Esto hace que controlar la posición del segmento de la pata más alejado del cuerpo, sea bastante complejo. Hacer uso de la cinemática inversa permite fijar específicamente la posición y orientación del extremo de una pata. La posición permite situar el último segmento de la cadena cinemática en cada uno de los puntos que definen la trayectoria. La orientación, por su parte, permite variar la inclinación del extremo de la pata. Modificar la orientación es especialmente útil a la hora de controlar cómo se realiza el apoyo de la pata en el suelo. Sobre todo, se vuelve necesaria en terrenos con inclinación y en superficies irregulares. Para calcular la cinemática inversa, se requiere encontrar una relación de la forma que se muestra en la ecuación 2.3.

$$\begin{aligned} q_k &= f_k(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma) \\ k &= 1 \dots n \text{ (GDL)} \end{aligned} \tag{2.3}$$

Con la cinemática inversa es sencillo realizar movimientos en términos de posición. Por ejemplo, si se fijan dos componentes cartesianas, y se varía la restante, se consigue realizar un movimiento rectilíneo (en este caso, sobre el eje de la componente variada). Eligiendo adecuadamente las restricciones, pueden realizarse movimientos que sigan diferentes trayectorias. En el caso de una caminata, podemos definir la posición del pie de un robot bípedo respecto a su tronco. En [20] se realiza un estudio analítico de la cinemática de un robot hexápodo, y se utiliza este método para imitar la secuencia de movimiento de un insecto palo.

Existen diferentes formas de calcular la cinemática inversa de un robot. Los métodos pueden dividirse en analíticos, geométricos y numéricos. Los métodos analíticos y geométricos habitualmente se desarrollan de forma manual. Pero dada la capacidad de cómputo que tienen los sistemas hoy en día, pueden utilizarse herramientas que calculan la cinemática inversa de forma automática. Entre estas opciones se pueden encontrar ejemplos como las librerías KDL (Ki-

nematics and Dynamics Library), escritas en código C++ como parte del proyecto Orocó [21], que calculan sus soluciones de forma iterativa con métodos numéricos; o las librerías NUKE (Nearly Universal Kinematics Engine) en C, que precomputan soluciones analíticas y están orientadas a su implementación en microcontroladores de potencia limitada.

2.3.3. Caminatas adaptativas

Una estrategia para controlar la movilidad de un robot es la creación de caminatas reactivas con el entorno. Como se comentó anteriormente, los robots con patas tienen un gran potencial para desplazarse por terrenos abruptos. Con este fin, la caminata puede adaptarse en tiempo de ejecución a las características del terreno sobre el que se va a desplazar. Aunque lo más común es que para desarrollar esta caminata exista una planificación previa de la trayectoria de la zancada, también podemos encontrar casos en los que el sistema es puramente reactivo. Para estudiar estos métodos se hará una primera división entre métodos pasivos y activos.

Los métodos adaptativos pasivos son aquellos mediante los cuales el robot varía su apoyo en la superficie del terreno sin ejercer un control directo sobre algunas de sus articulaciones. Ejemplo de esto es el robot Cheetah Cub [22] del Biorobotics Laboratory de la Escuela Politécnica Federal de Lausana, mostrado en la figura 2.13. Este robot es capaz de sobrepasar obstáculos como escalones sin tener ningún tipo de sensorización o realimentación de su estado que le permita detectarlos, su mecánica absorbe las perturbaciones.

A menudo, estos robots incluyen elementos mecánicos elásticos, como gomas y muelles [23][24]. Por otro lado, existen robots que de forma activa sensan el terreno y planifican su movimiento en base a sus irregularidades. En [25], el robot bípedo Meltran II camina usando un algoritmo básico que se modifica según las exigencias del entorno. Utiliza un sensor de ultrasonidos para detectar pequeños escalones y desniveles en el suelo.

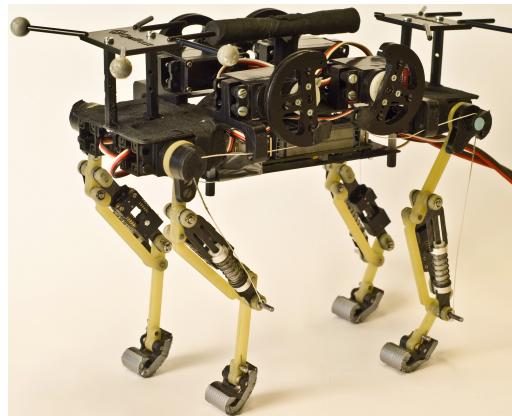


Figura 2.13: Robot Cheetah Cub del Biorobotics Laboratory de la Escuela Politécnica Federal de Lausana.

Un ejemplo más radical de un robot que se adapta al terreno de forma activa es el RoboSimian [26] del Jet Propulsion Laboratory de la NASA, mostrado en la figura 2.14. RoboSimian planifica cada paso para adecuarse a terrenos abruptos. Los datos necesarios para la planificación se toman de varias cámaras situadas en el cuerpo del robot y de sensores iniciales. No realiza una caminata continua, sino que incluye pausas constantemente para replanificar las zancadas.

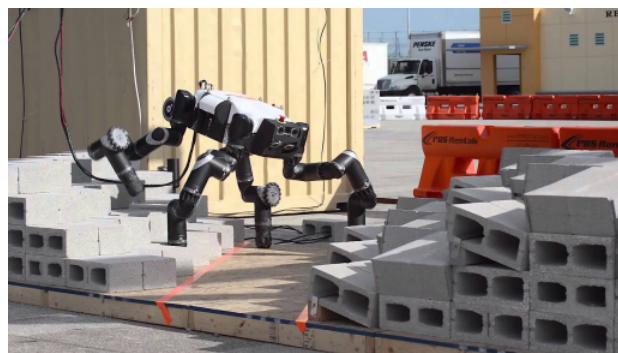


Figura 2.14: Robot RoboSimian del Jet Propulsion Laboratory de la NASA.

2.3.4. Soluciones mecánicas

En ocasiones, el diseño de una caminata queda definido completamente por la mecánica del robot. Existen soluciones mecánicas a la hora de construir un robot que simplifican enormemente el control de su movilidad, pero que mantienen los beneficios que aporta la locomoción con patas.

Un ejemplo de esto son los robots que montan un híbrido entre ruedas y patas, conocido como whegs [27][28][29]. Las ruedas son mecánicamente simples, y permiten a un vehículo moverse rápidamente. Las patas permiten a un robot caminar por terrenos complejos y trepar. Las whegs suponen un punto medio entre ambas opciones. En la figura 2.15 se puede observar un robot de la familia RHex [30] [31], este en particular de Boston Dynamics, que tiene una configuración de seis whegs; y el robot PROLERO [32] de la Agencia Espacial Europea, dotado de cuatro whegs.



Figura 2.15: RHex, de Boston Dynamics; y PROLERO, de la ESA.

Existen diferentes tipos de whegs, pero todos tienen características comunes. Primeramente, en estacionario, realizan un movimiento rotativo y continuo. Comúnmente, las patas se construyen con materiales elásticos para facilitar la adaptación del robot al terreno. En la figura 2.16 se muestran algunos tipos de whegs. Los robots mostrados, de izquierda a derecha y de arriba a abajo son: RHex, Minier Whegs, Whegs VP y Ratasjalg¹⁵.

Por lo general, cada wheg se mueve con un grado de libertad, pero existen

¹⁵http://www.roboticsportal.it/en/ratasjalg_robot



Figura 2.16: Diferentes ejemplos de whegs en robots.

configuraciones de mecanismos solidarios que realizan el movimiento de varias whegs a la vez con un solo actuador.

El control de estos robots es similar al de los robots con ruedas, con excepción de un parámetro clave: el desfase entre parejas de whegs. En el caso de seguir una trayectoria rectilínea, este desfase define los instantes de tiempo en los que una wheg está en el aire o en contacto con el suelo. De modo genérico, los desfases entre whegs para un movimiento rectilíneo responden a la fórmula 2.4

$$\Delta\Phi = \frac{180^\circ}{n} \quad (2.4)$$

Donde n es el número de aspas de la wheg.

Sin embargo, variando este desfase pueden conseguirse patrones de marcha especiales. En [33], utilizan un desfase de 0° (o lo que es lo mismo, ponen las whegs a girar en fase) para trepar y sortear obstáculos.

Otro ejemplo de robots que usan soluciones mecánicas para conseguir des-

plazarse son los denominados caminantes pasivos. Los caminantes pasivos son un tipo de robot de geometría muy simple. A partir de un cálculo intensivo de la posición de sus articulaciones y su reparto de masas, estos robots son capaces de caminar con un aporte energético mínimo. En muchos casos, la fuerza de la gravedad y la inercia son lo único que hace falta para conseguir que el robot se desplace. En la figura 2.17 se muestra un ejemplo de caminante pasivo, el bípedo de La Universidad de Cornell [34].

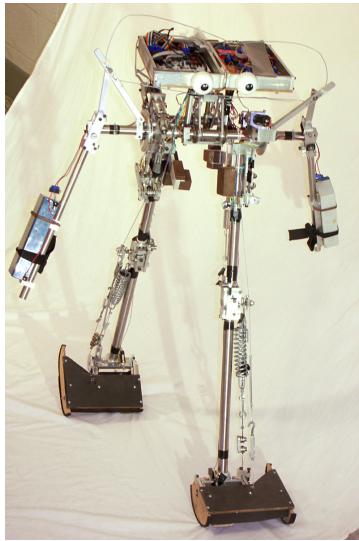


Figura 2.17: Cornell biped, de la Universidad de Cornell

Las bases del movimiento de los caminantes pasivos fueron sentadas por Tad McGeer [35], demostrando que era posible hacer caminar a un robot planar con dos patas a lo largo de una superficie inclinada sin proporcionarle energía ni control. El sistema actúa como dos péndulos acoplados: la pata apoyada en el suelo se considera un péndulo invertido, mientras que la pata que se encuentra en el aire realiza el movimiento de un péndulo libre ligado a la cintura.

Steven Collins también ha realizado un estudio intensivo sobre los caminantes pasivos, esta vez 2D y 3D. En [36], se contraponen dos extremos a la hora de realizar patrones de caminata: el control absoluto de todas las articulaciones del

robot, contra la existencia de articulaciones que se mueven libremente. Las ventajas principales que se exponen frente a un control exhaustivo de la cinemática inversa del robot, radican en la inefficiencia de estos últimos. Robots humanoides como el ASIMO de Honda [37], desarrollan un control completo de la cinemática del robot y de las posiciones de cada articulación en cada instante. Esto conlleva un gasto energético mucho mayor al que consumiría un humano para realizar los mismos desplazamientos. Además, en la mayoría de los casos la articulación de un robot está constituida mecánicamente por el propio actuador. Esto supone que incluso para realizar movimientos como balancear un brazo de forma pendular, un motor debe hacer fuerza para mover los engranajes de una reduc-tora, mientras que un humano se apoya en la propia fuerza de la gravedad para realizar este tipo de movimientos. Por estas razones, los caminantes pasivos se proponen como una estrategia diferente al del seguimiento de trayectorias por las extremidades del robot. Los caminantes pasivos se presentan como robots con movimientos fluídos y dinámicos en los que la subactuación y el equilibrio son factores clave.

2.3.5. Bioinspiración

Otra forma de conseguir un desplazamiento eficaz consiste en buscar una similitud con la biología y con cómo se desplazan los seres vivos en lo que a control se refiere. Mecánicamente, los robots muchas veces tienden a copiar configurações y geometrías de los animales, ya sean cuadrúpedos, hexápodos, humanoides, etc. Entonces, parece razonable intentar copiar también su control.

Se conoce que los seres vivos no realizan grandes cálculos ni emplean grandes esfuerzos al desplazarse. Más bien, son funciones automáticas que no requieren una atención continua. En este sentido, se compara con otras funciones vitales como respirar, parpadear o masticar. Estas funciones tienen en común un carácter rítmico, ocurren de forma cíclica.

En la biología, se conoce que estos ritmos se generan gracias a los genera-

dores centrales de patrones o CPGs (Central Pattern Generators) [38]. Los CPGs son circuitos neuronales que pueden encontrarse tanto en vertebrados como en invertebrados, que producen señales rítmicas a partir de estímulos no rítmicos. Además, se ha demostrado [39] que no se requiere realimentación sensorial para poner en marcha los CPGs.

Uno de los robots más notables en el uso de CPGs es la Salamandra Robótica [40] del Biorobotics Laboratory de la EPFL. El robot se muestra en la figura 2.18. Se trata de un robot anfibio con una configuración de ocho actuadores colocados en serie en su cuerpo que le permiten realizar ondulaciones. La Salamandra Robótica usa las oscilaciones de su cuerpo, producidas por los CPGs, para desplazarse por tierra y agua.



Figura 2.18: *Salamandra Robotica*, del Biorotics Laboratory de la EPFL.

En [41] se expone una implementación de CPGs enfocada a el robot humanoide NAO de la figura 2.19. Además de generar las funciones básicas de movilidad del robot, también es capaz de producir reacciones frente a perturbaciones, incluso cuando estas no son rítmicas. Gracias a esto, es capaz de superar pequeños desniveles o incluso recuperarse frente a variaciones externas de su equilibrio.

Sin embargo, los osciladores neuronales a veces resultan bastante complejos. Otra aproximación que surge como simplificación de los CPGs es el uso



Figura 2.19: Robot humanoide NAO, desplaza  ndose a lo largo de un desnivel de 11°.

de osciladores senoidales. Los osciladores senoidales se han usado con éxito en diferentes investigaciones de robots ápodos [42] y también en robots con patas [43][44]. En comparación con los osciladores neuronales, los osciladores senoidales utilizan un número menor de parámetros, su implementación es más sencilla y requieren un menor coste computacional. Estos parámetros además son más intuitivos físicamente, y por ello es más fácil seleccionar valores para su diseño.

Capítulo **3**

Osciladores y movimiento

En este capítulo se introduce el concepto de oscilador y generación de movimiento. También se detallan sus parámetros y cómo influyen estos en el funcionamiento del oscilador.

3.1. Definición

Un oscilador es un generador de señales oscilantes. Dada la simplicidad de los osciladores, pueden implementarse de diferentes formas. Por ejemplo, pueden implementarse en software, escribiendo un código que genere valores de forma cíclica. Este código además tiende a requerir una potencia de computación mínima. Pero también pueden implementarse en hardware, con circuitos digitales o analógicos. La implementación en hardware, que se comentó en la sección 2.3.5, está más cerca del funcionamiento real en los seres vivos. El objetivo principal de la señal generada por el oscilador es producir movimiento en las articulaciones del robot. Para ello, la señal define el funcionamiento de los actuadores, que son el equivalente a los músculos del robot. Para moverlos, se puede interpretar la salida del oscilador de dos formas: como un controlador en posición o directamente como un controlador del par que se aplica en cada

actuador.

El esquema que sigue un sistema de oscilador se muestra en la figura 3.1, donde un conjunto de parámetros configuran el oscilador, que genera una señal y esta produce un movimiento cíclico a través de un actuador.

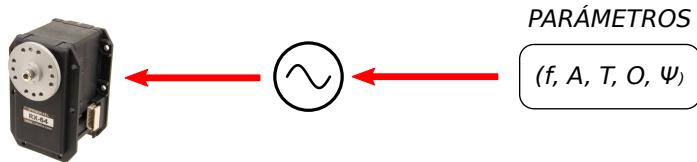


Figura 3.1: Esquema de un sistema de oscilador simple.

Como ejemplo más concreto, en la 3.2, se puede imaginar un oscilador con una forma de onda senoidal que marca un control en posición sobre un servomotor. En cada instante de tiempo, el actuador adopta la posición de la salida del oscilador, repitiéndolas en cada periodo. En la figura 3.2, se muestra cómo funcionaría este ejemplo.

A continuación, se describen los parámetros que se utilizan comúnmente para definir un oscilador.

3.2. Parámetros

Los parámetros de un oscilador se utilizan para fijar el comportamiento de un oscilador en el tiempo, y se interpretan como se muestra en la ecuación 3.1.

$$o(t) = A \cdot f\left(\frac{2\pi}{T}t + \Psi\right) + O \quad (3.1)$$

Donde o es la salida del oscilador, A la amplitud, f la función que define la onda, T el periodo, Ψ el desfase y O el offset. En los siguientes apartados se analiza cada uno de ellos.

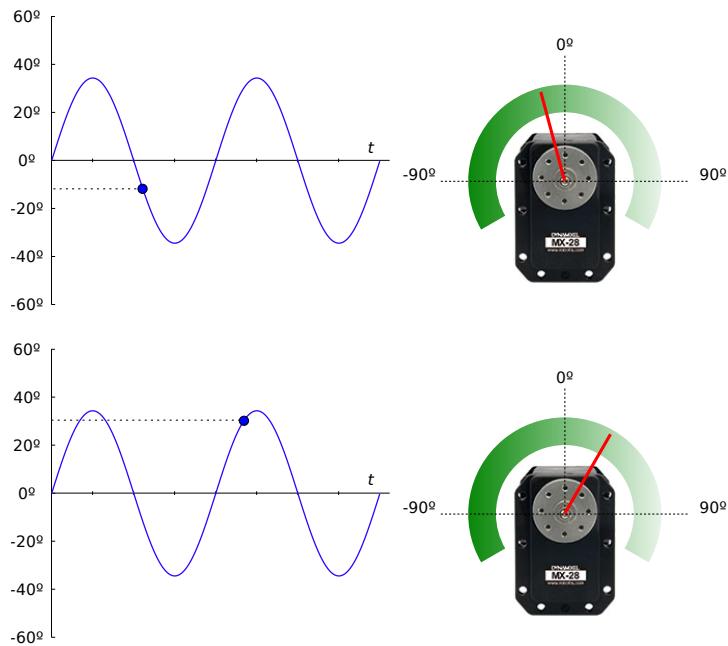


Figura 3.2: Ejemplo: movimiento de un servo al aplicarle un oscilador.

3.2.1. Forma de onda (f)

Aunque lo más frecuente es que los osciladores utilicen señales senoidales, existen otras formas de onda que resultan útiles para diseñar caminatas. En la figura 3.3 se muestran algunas de ellas.

Estas ondas además, pueden dividirse en dos tipos: simétricas y asimétricas. Las ondas asimétricas se usan comúnmente en movimientos que incluyen restricciones externas, como el contacto de una extremidad con una superficie.

3.2.2. Offset (O)

El offset define el punto medio de la onda. Esto significa que las oscilaciones se producen alrededor de este valor. En la figura 3.4 se han representado dos osciladores sinusoidales con diferente offset.

El offset, además, puede entenderse como el valor medio de un oscilador, y

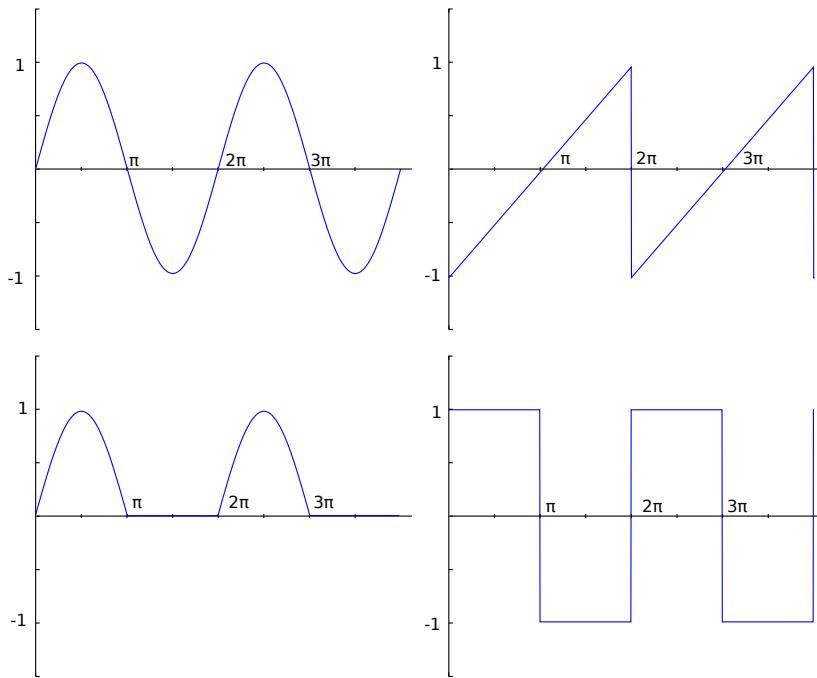


Figura 3.3: Diferentes formas de onda para un oscilador: seno, diente de sierra, semiseno y onda cuadrada.

puede utilizarse para definir valores fijos cuando la amplitud de la onda es nula.

3.2.3. Amplitud (A)

La amplitud es el parámetro que indica la distancia máxima que puede alcanzar un movimiento tomando como referencia el punto medio. Esto significa que la salida del oscilador estará acotada tal que $o(t) \in [O - A, O + A]$

Junto con el offset, determina los valores máximos y mínimos que puede producir el oscilador.

3.2.4. Período (T)

El periodo es el tiempo que emplea el oscilador en realizar un ciclo completo. Define la velocidad que producirá la salida del oscilador.

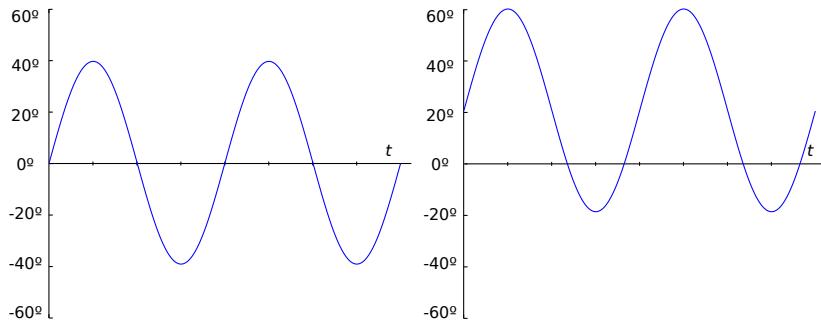


Figura 3.4: Offsets diferentes para un oscilador sinusoidal.

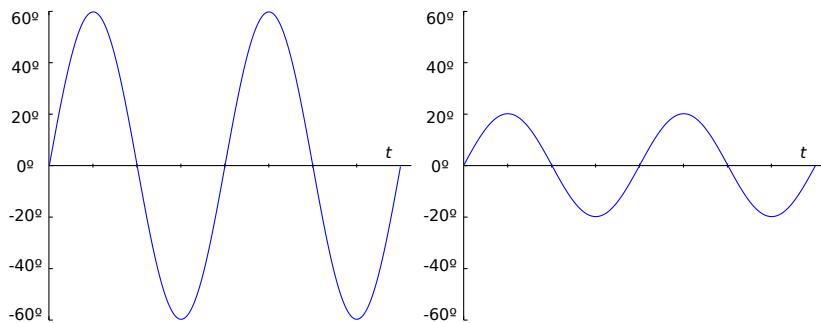


Figura 3.5: Amplitudes diferentes para un oscilador sinusoidal.

3.2.5. Desfase (Ψ)

El desfase es el desplazamiento en el tiempo que existe entre dos ondas en un instante determinado y se mide en grados. Determinar el desfase entre osciladores, como se verá más adelante, puede considerarse el factor más importante a la hora de diseñar caminatas.

3.2.6. Umbral de activación

El umbral de activación no es tanto un parámetro intrínseco al oscilador sino un acondicionamiento que se aplica a la salida. La función principal de este parámetro es recortar partes de la onda que no se desea que sean alcanzadas por la salida. En términos de posición, fijar un umbral de activación sirve para limitar las posiciones extremas del oscilador. En la figura 3.8 se ha representado

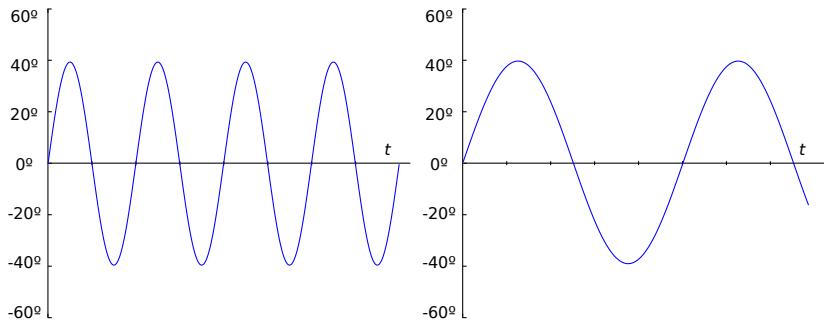


Figura 3.6: Periodos diferentes para un oscilador sinusoidal.

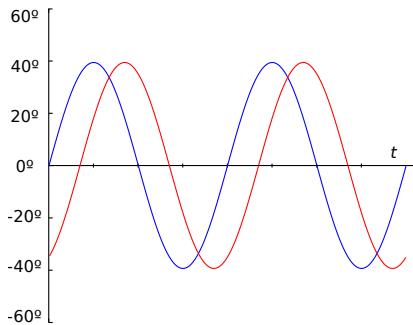


Figura 3.7: Desfase entre dos osciladores sinusoidales superpuestos.

cómo actúa sobre un oscilador.

Un caso típico sería limitar una onda para usar solo sus valores positivos. Si se tratase de un seno, el equivalente sería una onda de medio seno.

Una vez conocidos los parámetros que se requieren para configurar un oscilador, ya se tienen las herramientas necesarias para crear movimientos en las articulaciones de un robot. En robots con morfologías simples, esto puede ser suficiente para diseñar algunas funciones de caminata básicas.

3.3. Modificaciones sobre el oscilador

El sistema de oscilador que se representó en la figura 3.1 puede no resultar demasiado potente, ya que el oscilador se configura con unos parámetros fijos y

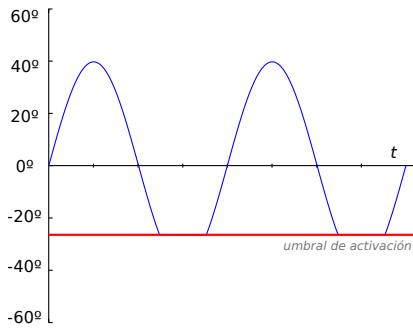


Figura 3.8: Umbral de activación aplicado sobre un oscilador.

su salida siempre será la misma en cada periodo. Es cierto que en muchos robots es más que suficiente para construir sus caminatas, pero a medida que la morfología de un robot se complica, este tiende a requerir el control de más variables. Durante el desarrollo de esta tesis se han descubierto dos formas de realizar modificaciones sobre un oscilador que permiten aumentar sus capacidades. Estos dos métodos de modificación son:

- **Modulación:** la modulación consiste en la variación de parámetros del oscilador durante su funcionamiento. Es decir, es la forma de modificar la salida de un oscilador sin modificar la configuración de sus parámetros. Las modulaciones son adiciones relativas que se implementan por encima de los parámetros.
- **Composición:** la composición trata de combinar la salida de varios osciladores simples para crear osciladores más complejos. Como se verá más adelante, esto permite realizar un control más avanzado sobre las articulaciones del robot.

En este capítulo se han detallado los conceptos básicos necesarios para la implementación de osciladores. En los próximos capítulos se profundizará sobre las formas de modificar un oscilador.

Capítulo **4**

Modulaciones sobre los osciladores

Se entiende como modulación, una variación sobre un parámetro de un oscilador que produce un cambio en su salida. En la figura 4.1 se muestra un esquema de un sistema de oscilador con una modulación. En la representación se puede observar que la modulación actúa sobre el oscilador, que tiene una configuración de parámetros fija. De esta forma, la salida de un oscilador está determinada por sus parámetros y por los valores relativos que introducen las modulaciones sobre estos parámetros.

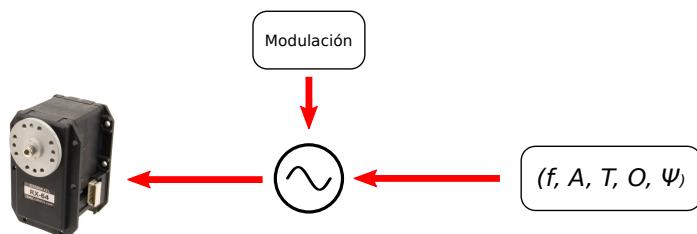


Figura 4.1: Esquema del sistema de un oscilador con modulación.

A continuación, se propondrá la adición de modulaciones con dos objetivos: adaptar el comportamiento de una función de caminata existente y crear nuevas

funciones de caminata. Para ello, se comenzará por separarlos en modulaciones estáticas y modulaciones dinámicas.

4.1. Modulaciones estáticas

Una modulaciones estática es un valor constante que, junto al valor actual de un parámetro, varía de forma permanente el funcionamiento del oscilador. Existen diferentes aspectos de la caminata que resulta interesante modular. Durante el desarrollo de este trabajo se han encontrado tres aspectos característicos que han resultado ser especialmente útiles para diseñar funciones de caminata.

4.1.1. Aumentar o disminuir la velocidad de avance del robot

En términos de distancia y tiempo absolutos, una forma de aumentar la velocidad del robot es modulando los valores de amplitud y periodo del oscilador. En las implementaciones de osciladores, siempre existirá al menos un oscilador cuya amplitud afectará directamente a la amplitud de una zancada. Por ello, mayores amplitudes significan mayor distancia de zancada. El periodo a, su vez, marcará el tiempo durante el que se produce la zancada. Un periodo menor produce zancadas más rápidas.

Sin embargo, es necesario apuntar que variaciones radicales de estos valores pueden afectar a la estabilidad del robot, y esto además se acentúa en topologías con un número reducido de patas.

4.1.2. Crear movimientos de giro

Tras conseguir una caminata rectilínea eficaz, un segundo objetivo suele ser encontrar funciones que permitan al robot girar. Como se puede intuir, para girar, un robot debe realizar un movimiento asimétrico. La forma de convertir un desplazamiento rectilíneo en uno curvo, es rompiendo la sincronización de los dos lados del robot. Para lograrlo, se modulan ligeramente los desfases de los

osciladores de una mitad del robot respecto a la otra. Esto produce la solapación de la elevación de las zancadas. En la figura 4.2 se ha representado la trayectoria en el espacio de zancadas solapadas.

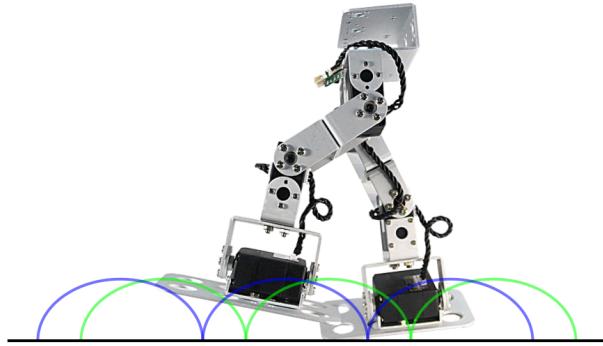


Figura 4.2: Trayectorias solapadas de los pies de un robot bípedo.

Aparentemente no se observa giro, pero al solapar las zancadas se producen fases de doble apoyo en las que los pies avanzan frontalmente a diferentes velocidades. Al ocurrir esto, un pie pivota sobre el otro y produce el giro. En la figura 4.3 se muestra una posible trayectoria de giro producida por un solapamiento de las zancadas.

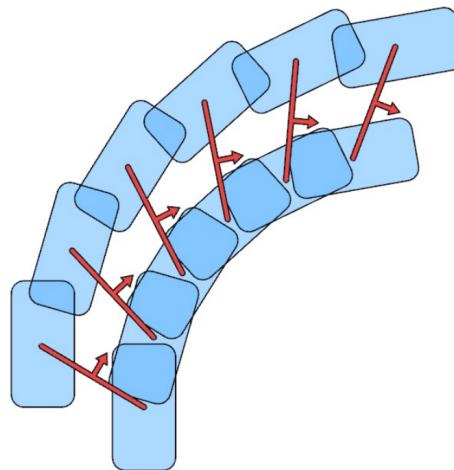


Figura 4.3: Trayectoria formada por las huellas de un robot bípedo girando.

Es importante recalcar que existen formas de crear giros además de usar modulaciones, y en ellas no es necesario usar fases de doble apoyo. Las fases de doble apoyo crean deslizamientos, pero en robots con grados de libertad limitados resulta ser una forma eficaz de crear giros.

4.1.3. Invertir el movimiento de una extremidad

Otra necesidad básica es cambiar el sentido de un movimiento. Con ello se pueden conseguir funciones como caminar hacia atrás. Invertir el ciclo de un oscilador es simple: se consigue añadiendo una modulación de 180° que se sume al desfase original. Hay que remarcar que el desfase en estacionario se representa de forma relativa a la fase del resto de osciladores. Por ello, invertir un oscilador funciona si la referencia en fase del resto de osciladores no cambia.

4.2. Modulaciones dinámicas

En ocasiones puede ser necesario que estas modulaciones no sean fijas, sino que cambien para adecuarse a otros factores. Pueden usarse sensores que aporten una realimentación del estado del robot o las condiciones del entorno. La información de estos sensores puede usarse para diseñar una modulación que modifique la salida de un oscilador y cambie el patrón de caminata. En la figura 4.4 se muestra un esquema de un robot bípedo BP1-KT¹ con doce osciladores.

En la imagen se ha representado la adición de modulaciones basadas en la realimentación sensorial de una brújula y un acelerómetro.

4.2.1. Modulaciones relativas a la estabilidad

Por regla general, una caminata fija diseñada para que un robot camine por una superficie horizontal no funcionará correctamente cuando el robot se desplace sobre una superficie inclinada. Incluso pequeños baches pueden provocar

¹<http://www.bizchip.com/Biped%20Robot.pdf>

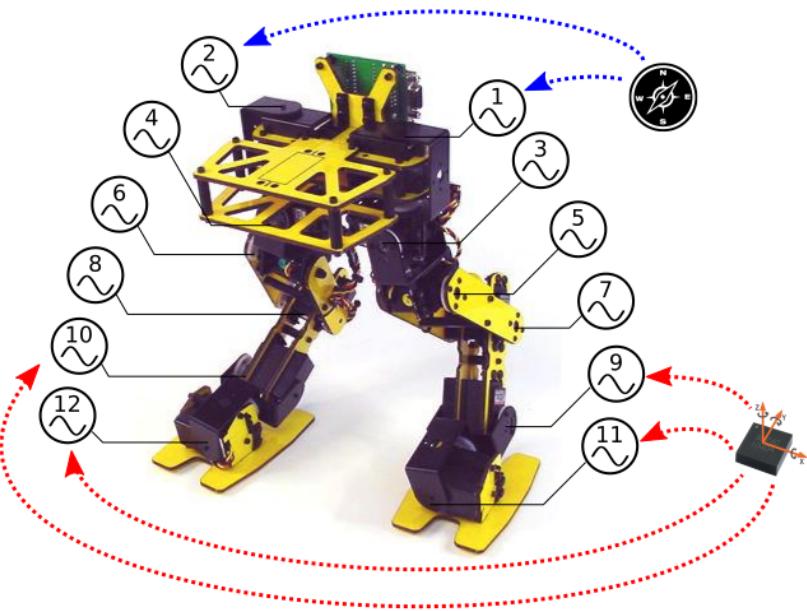


Figura 4.4: Esquema de un robot bípedo con doce osciladores y seis modulaciones.

que el robot se desestabilice. Esto se debe a que para cada caso, la posición de la proyección vertical del centro de gravedad del robot respecto al polígono de apoyo de sus pies con la superficie varía. Este efecto se ha representado en la figura 4.5.

Para solucionar esto, el centro de gravedad del robot debe recolocarse, ya sea cambiando la posición del cuerpo o desplazando el centro de gravedad de su cuerpo al cambiar de posición algunas de sus extremidades.

Cambiar la posición media de una articulación es sencillo, solo debe cambiarse el offset del oscilador que gestiona su movimiento. Poniendo un ejemplo, sacando información de un inclinómetro se puede modificar la extensión media de la piernas de un robot bípedo. Extendiendo la piernas de forma asimétrica se consigue balancear el robot, y con ello desplazar su centro de gravedad. Buscar una relación entre el valor del inclinómetro y ese desplazamiento, permite controlar (de una forma bastante básica) la estabilidad del robot. En la figura 4.6 se muestra en verde un oscilador básico y en azul un oscilador con realimenta-

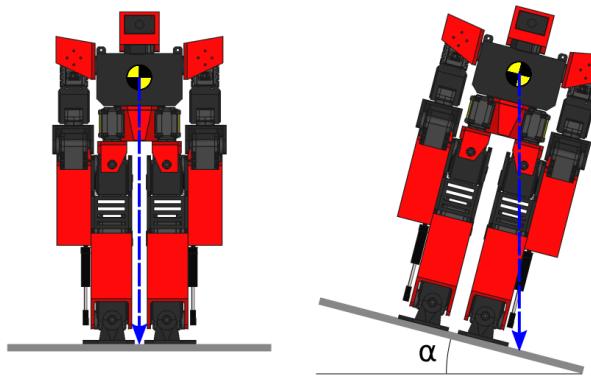


Figura 4.5: Proyección del centro de gravedad de un robot sobre una superficie inclinada.

ción. El oscilador realimentado varía su salida para acomodarse a condiciones de inclinación diferentes en la superficie.

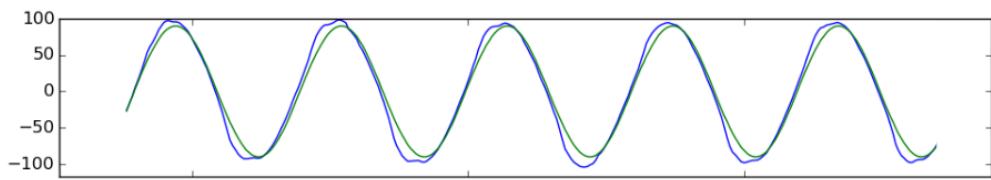


Figura 4.6: Oscilador normal (en verde) frente a oscilador realimentado (en azul).

4.2.2. Modulaciones relativas a la trayectoria

Un problema existente en los robots móviles y que se acentúa en los robots con patas es la dificultad de mantener una trayectoria recta. Las imperfecciones de la superficie y de los puntos de apoyo del robot, provocan que el robot se deslice y se tuerza. Existen diferentes sensores que permiten conocer la posición y orientación real del robot. En el apartado 4.1.2 se comentó cómo modificar la velocidad y el giro del robot, y esto es lo que necesita para hacer correcciones de su trayectoria. Estas correcciones se pueden gestionar con los datos extraídos de sensores inerciales.

En este punto, se conoce como variar movimientos de desplazamiento. Exis-

te un caso más radical en el que se requiere realizar modificaciones sobre un patrón de caminata hasta el punto de convertirlo en otro patrón con un objetivo diferente.

4.3. Transiciones basadas en modulaciones

Crear una transición entre osciladores es similar a realizar una mezcla entre dos movimientos. Para hacerlo más visual, puede suponerse un robot bípedo con dos funciones: caminar hacia delante y rotar sobre sí mismo. Solo con estas funciones se puede predecir que el robot tiene libertad absoluta para desplazarse en dos dimensiones. Sin embargo existe un problema: que el robot sea capaz de caminar en línea recta y girar sobre sí mismo de forma estable no significa necesariamente que pueda realizar una de estas funciones seguida directamente de la otra sin perder la estabilidad. Es más, un desplazamiento en línea recta puede funcionar muy bien cuando se realiza de forma estacionaria pero fallar cuando se inicia desde una posición de reposo.

Esto se debe a una razón básica. Mientras en un robot con ruedas el desplazamiento es continuo, en un robot con patas el desplazamiento es discreto, y está dividido en zancadas. Pausar una zancada en medio de su ciclo no resetea las inercias que sufre el robot, y esos efectos iniciales se conservan en su siguiente movimiento.

Recapitulando, se tiene una función de desplazamiento y en un momento específico se requiere cambiar de función. Dicho de otra forma, se requiere realizar una transición entre dos funciones. Hay transiciones cuya implementación es directa, como por ejemplo pasar de un movimiento rectilíneo con una velocidad determinada a otro movimiento rectilíneo con una velocidad mayor, que puede conseguirse acelerando los osciladores (más particularmente, acelerando su periodo y/o amplitud).

A continuación se propone una forma de realizar transiciones de forma genérica entre funciones de caminata. Para ello se realizará una interpolación lineal

entre los parámetros de las dos funciones de caminata. Cada función de caminata estará formada por un número determinado de osciladores, y estos a su vez tienen cuatro parámetros cada uno. De este modo, podemos representar la configuración de cada función de caminata en una matriz con cuatro filas y tantas columnas como número de osciladores existan.

$$F_1 = \begin{pmatrix} O_1 & O_2 & O_3 & O_4 & \dots & O_n \\ A_1 & A_2 & A_3 & A_4 & \dots & A_n \\ T_1 & T_2 & T_3 & T_4 & \dots & T_n \\ \psi_1 & \psi_2 & \psi_3 & \psi_4 & \dots & \psi_n \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

Asimismo, tendremos una función de caminata secundaria con sus propios parámetros contenidos en una matriz F_2 .

$$F_2 = \begin{pmatrix} O'_1 & O'_2 & O'_3 & O'_4 & \dots & O'_n \\ A'_1 & A'_2 & A'_3 & A'_4 & \dots & A'_n \\ T'_1 & T'_2 & T'_3 & T'_4 & \dots & T'_n \\ \psi'_1 & \psi'_2 & \psi'_3 & \psi'_4 & \dots & \psi'_n \end{pmatrix} \quad (4.2)$$

Una transición se realiza entre dos instantes de tiempo. Teniendo en cuenta que en un t_0 el robot efectúa la función de caminata configurada con los parámetros de F_1 y en un t_T la función de caminata cuyos parámetros se describen en F_2 , el tiempo intermedio $t \in [t_0, t_T]$ el robot adoptará el comportamiento de una función intermedia F_{12} .

$$F_{12} = F_1 + (F_2 - F_1) \frac{t - t_0}{t_T - t_0} \quad (4.3)$$

Para el caso en que una de las funciones de caminata sea la posición de reposo, las amplitudes de los osciladores será nulas y los offset marcarán su posición de reposo. El desfase y el periodo de los osciladores es un parámetro que no influiría nada en este caso. Para simplificar el problema, conviene tomar un periodo y desfase igual al de la función a la que se realiza la transición.

En este capítulo se ha introducido el concepto de modulación y se han explicado diferentes tipos. También se han detallado algunas variaciones en la caminata que pueden realizarse utilizando modulaciones y se ha propuesto un método para realizar transiciones entre diferentes funciones de caminata.

Capítulo **5**

Composición de osciladores

En los capítulos anteriores se han analizado diferentes formas de afrontar el diseño de caminatas aplicando osciladores de forma directa sobre las articulaciones del robot. En este capítulo se estudiará su aplicación a un nivel diferente.

5.1. Operaciones sobre osciladores

Una primera consideración es que no siempre un oscilador se encargará del movimiento de una articulación. En el momento de realizar un diseño de caminata existe la opción de realizar operaciones sobre los osciladores, y utilizar un mismo oscilador para gestionar el movimiento de varias articulaciones o utilizar varios osciladores para dirigir el movimiento de una articulación. En la figura 5.1 se muestran los esquemas de los dos sistemas.

Por ejemplo, en la figura 5.2 se muestra una representación en dos dimensiones de la pata de un robot bípedo con rodilla invertida. Los tramos azules se corresponden con los eslabones que forma la pierna y los puntos rojos se corresponden con las articulaciones del robot (en este caso, dos).

En la figura 5.3, se muestran en verde dos trayectorias generadas a partir de osciladores aplicados de forma directa. En el gráfico de la izquierda se ha

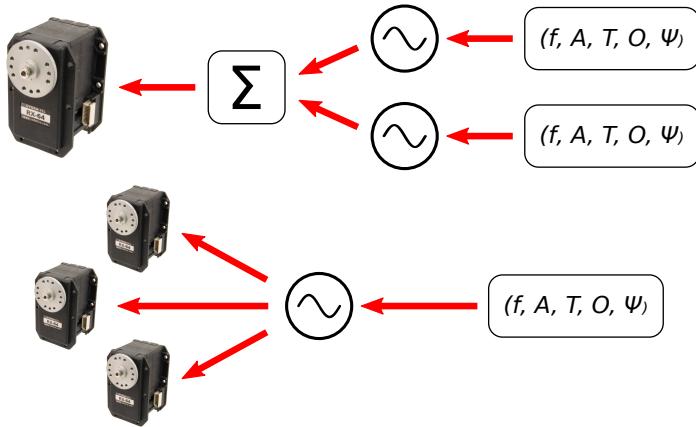


Figura 5.1: Esquema de un sistema con varios osciladores aplicados sobre un solo actuador (superior), y esquema de un sistema de oscilador usado en varios actuadores (inferior).

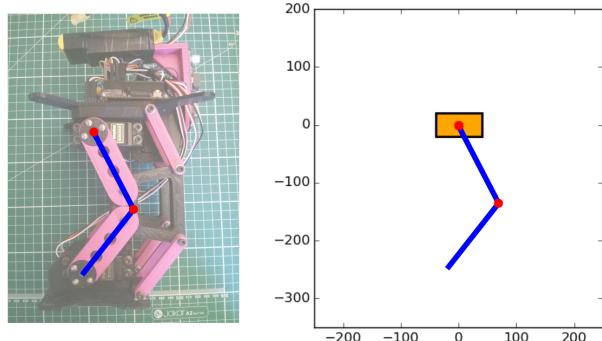


Figura 5.2: Representación en 2D de la pata de un robot bípedo.

representado una posible trayectoria definida por dos osciladores, uno en cada articulación. Por otra parte, el gráfico de la derecha se ha partido de la configuración de osciladores anterior y se ha sumado a ambas articulaciones un tercer oscilador con una amplitud reducida y la mitad de periodo que el resto de osciladores. Una composición de este tipo puede servir para acentuar los extremos de la trayectoria que describe la pata.

El problema de diseñar movimientos o trayectorias añadiendo osciladores es que progresivamente los diseños se vuelven difícilmente intuitivos. Además, cada oscilador adicional aumenta el número de parámetros totales que definen

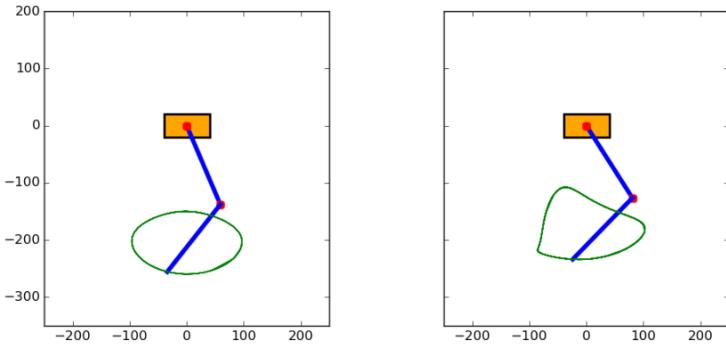


Figura 5.3: Composición de osciladores con dos osciladores directos (izquierda) y tres osciladores directos (derecha).

la caminata. Por esta razón, es mejor afrontar el problema utilizando métodos que abstraigan la composición de osciladores.

5.2. Osciladores cartesianos

Un modo de diseñar caminatas desde una perspectiva diferente es utilizar osciladores cartesianos. Este método, comentado en [45], consiste en calcular la cinemática inversa de la pata del robot y definir los movimientos en el espacio cartesiano. De esta forma, el diseño pasa de orientarse hacia el movimiento de las articulaciones del robot a orientarse hacia la trayectoria de su extremidad. En este punto, la salida de los osciladores no se interpreta como una posición en espacio articular, sino como una posición u orientación en el espacio cartesiano. En este caso cada oscilador que entra en el cálculo de la cinemática inversa aporta una porción del movimiento final de varios actuadores. En la figura 5.4 se muestra un esquema.

Utilizar osciladores en el espacio cartesiano es especialmente útil cuando se trabaja con robots con muchos grados de libertad, como es el caso de un robot humanoide. Por lo general, los robots humanoides tienen patas con un número

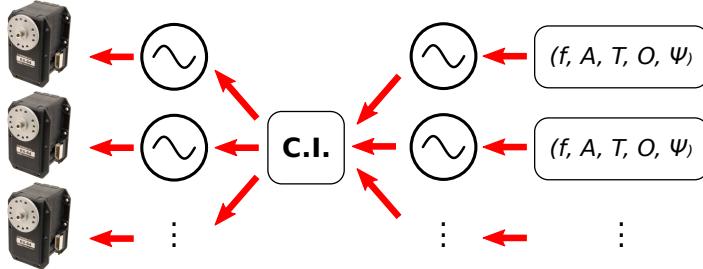


Figura 5.4: Esquema de un sistema de osciladores aplicados sobre la cinemática inversa.

de entre cinco y siete grados de libertad. Si se implementa un oscilador en cada articulación, el número de parámetros a controlar se dispara, haciendo muy tedioso el proceso de diseño de la caminata. Haciendo uso de la cinemática inversa, la caminata es más fácilmente controlable. Además, es fácil realizar ciertas restricciones que simplifican los cálculos.

Una posible restricción que es bastante recurrente es fijar la orientación de la extremidad. Por ejemplo, definir que la orientación de la planta de los apoyos del robot es paralela a la superficie sobre la que se desplaza elimina la necesidad de calcular el cabeceo y alabeo. Haciendo esto, solo es necesario trabajar con los tres ejes cartesianos y el eje de guiñada (que es especialmente útil a la hora de definir giros en el desplazamiento del robot).

Como continuación del ejemplo anterior, en la figura 5.5 se ha representando una clásica trayectoria de media circunferencia. Esta trayectoria se consigue fácilmente utilizando un oscilador senoidal en el eje horizontal y un oscilador de media onda senoidal en el eje vertical.

Esta configuración es bastante interesante, ya que permite que el cuerpo del robot mantenga su posición en el eje vertical durante la zancada. Por lo general, es una trayectoria básica que funciona bastante bien en diferentes topologías. Al mismo tiempo, la simplicidad de la trayectoria y su generación facilita la adición de modulaciones para ajustar la caminata.

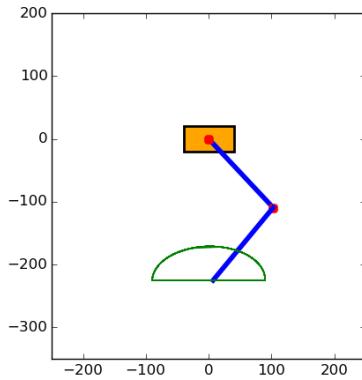


Figura 5.5: Trayectoria generada con osciladores en el espacio cartesiano.

5.3. Sistemas de capas de osciladores

Todos los métodos que se han descrito hasta ahora parten de las articulaciones del robot al movimiento final, de los cálculos directos hasta la composición del movimiento. Una vez se ha analizado cómo implementar osciladores de forma directa en articulaciones, cómo utilizar modulaciones para variar la caminata y cómo aplicar osciladores sobre la cinemática inversa de un robot, se poseen diferentes herramientas potentes para diseñar caminatas. En esta sección se propone el diseño de caminatas a alto nivel, comenzando por los aspectos más generales de la caminata y poco a poco descender combinando las diferentes técnicas mostradas hasta el momento.

La caminata de cualquier robot con patas siempre tiene tres partes fundamentales. Según la topología del robot pueden entenderse de diferente forma, pero de un modo u otro todo puede dividirse en tres puntos[43][44]:

- Balanceo del cuerpo del robot.
- Elevación de las extremidades.
- Zancada horizontal.

Estos tres movimientos se corresponden con fases cíclicas de la caminata. Lo que se propone en esta sección es la construcción de las tres fases por separado para luego sumarlas. Para hacer la explicación más visual, se usará como ejemplo el robot humanoide de la figura 5.6. Sobre la imagen se han dibujado los movimientos de balanceo, elevación y zancada.

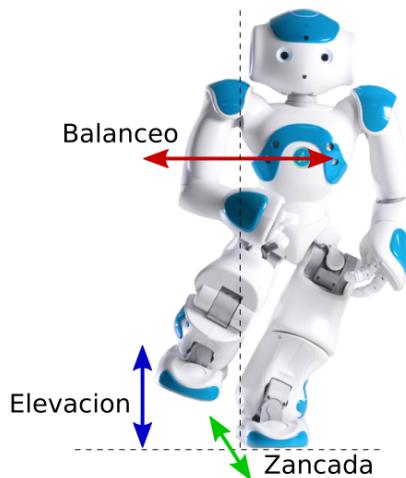


Figura 5.6: Capas en el desplazamiento de un robot NAO.

La clave en este procedimiento es ajustar cada uno de estos movimientos al comportamiento de un oscilador. En el caso del balanceo, puede conseguirse con un oscilador que produzca un movimiento lateral sincronizado de las dos piernas. La elevación y la zancada, al ser movimientos que se realizan en cada pierna de forma alternada, se consiguen utilizando parejas de osciladores con fase contraria. Más específicamente, en el caso de la elevación, cuando una pierna sube para avazar, la otra pierna baja para servir de apoyo al robot. La pierna que se encuentra en apoyo se mueve hacia atrás para desplazar el cuerpo del robot hacia delante mientras que la pierna que se encuentra en el aire avanza en la misma dirección del cuerpo para completar la zancada. De esta forma, el movimiento completo de las piernas del robot quedaría totalmente definido por seis osciladores, uno en cada movimiento individual de la pierna.

En el caso de robots con más patas, como cuadrúpedos o hexápodos, esta división también es aplicable, pero al tener un mayor número de patas existen diferentes combinaciones. Mientras que la elevación y la zancada serán similares para las patas, el balanceo dependerá de otros factores. Por ejemplo, en un robot cuadrúpedo las fases de apoyo pueden realizarse en grupos de dos o de tres patas. Cuando se trata de dos patas (normalmente en parejas antisimétricas) el balanceo es similar al del robot bípedo, pero también existe la posibilidad de mantener tres patas en apoyo y solo una en el aire. Además, para un cuadrúpedo con desplazamientos con triple apoyo, el orden en que cada pata entra en fase aérea es variable y el balanceo del cuerpo dependerá directamente de este orden, manteniendo el centro de gravedad del robot dentro del triángulo que forman sus patas en apoyo. Para balancear el peso del robot en dos dimensiones, la posición del cuerpo del robot deberá ser definida por al menos dos osciladores, tal y como se muestra en la figura 5.7. Si fuese el caso de un robot hexápodo, se podría realizar el mismo balanceo que en el robot humanoide (alternando apoyos de tres patas), pero existirían también varias configuraciones con balanceos más complejos.

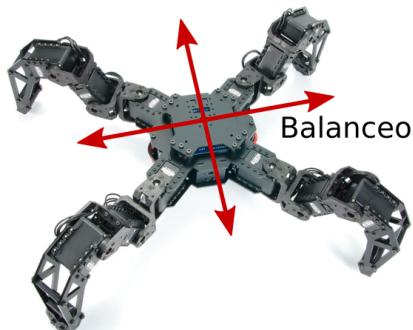


Figura 5.7: Ejes de balanceo en un cuadrúpedo PhantomX.

Capítulo 6

Metodología de diseño

Independientemente del robot, el proceso de diseñar funciones de caminata se puede dividir en diferentes fases. En este capítulo, se proponen una serie de pasos a seguir para conseguir que un robot camine utilizando osciladores.

6.1. Análisis de la morfología del robot

El primer punto es analizar las características del robot, poniendo especial atención en el aspecto mecánico. Afrontar el problema del diseño de una caminata puede ser fácil cuando los robots son muy simples. Se conoce que un robot pequeño con pocos grados de libertad tiende a tener un comportamiento predecible. La cantidad de parámetros de una caminata aumenta proporcionalmente con el número de grados de libertad del robot, y teniendo en cuenta las posibles combinaciones entre parámetros, el crecimiento del número de posibles caminatas se dispara.

Por ello, un primer punto sería analizar cuántos grados de libertad tiene el robot. Es especialmente útil dar a cada grado de libertad una identidad, ya sea etiquetándolos con un nombre o simplemente numerándolos. En caso de numerarlos, la forma propuesta es recorrer el robot de arriba a abajo y de izquierda

a derecha (del robot). Numerarlos es especialmente útil a la hora de programar los osciladores, ya que osciladores con un número cercano estarán cerca físicamente. En la figura 4.4 se mostraba la forma correcta de numerar los grados de libertad de un robot. Cuando existan articulaciones que rompan la simetría del robot, se propone numerarlos aparte.

El segundo paso consiste en encontrar simetrías en la morfología del robot. Cada plano de simetría que se fije en el robot dividirá el número de parámetros que será necesario diseñar. Dado que la locomoción con osciladores es un proceso cíclico, en una función como es caminar hacia delante, una mitad del robot realiza los mismos movimientos alternados que la otra mitad, solo que con un desfase de 180° . En la figura 6.1 se muestra un ejemplo de planos de simetría.

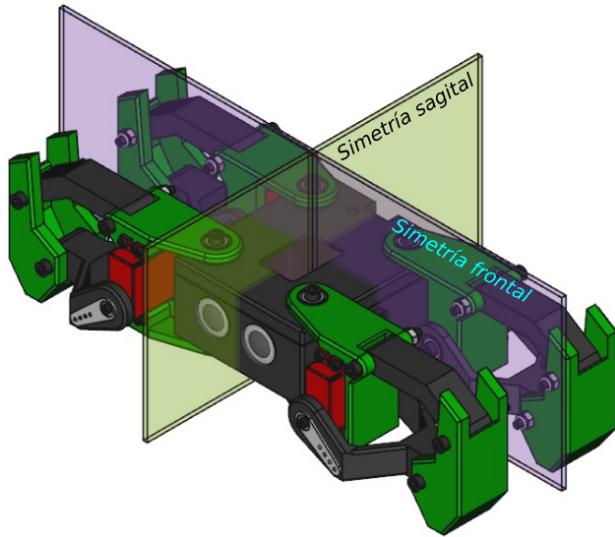


Figura 6.1: Planos de simetría en un robot cuadrúpedo.

6.2. Definición de la arquitectura de osciladores

Una vez analizada la morfología del robot se procede a decidir cómo se van a gestionar los movimientos de las articulaciones. En ese sentido, puede elegir-

se entre un control directo o hacer uso de la cinemática inversa. Con un control directo de las articulaciones, se puede deducir que se utilizará un oscilador para cada articulación, en cambio, si se controlan sobre la cinemática inversa del robot, el número de osciladores puede reducirse.

También es importante apuntar que no solo se depende del número, sino también de cómo están colocados los ejes de las articulaciones. No se puede fijar un umbral del número de articulaciones sobre las que es mejor aplicar un control directo o cinemática inversa, porque los factores que intervienen son específicos para cada robot y para cada tarea, y se basan en la dificultad. Sin embargo, un factor importante será minimizar el número total de osciladores.

A parte de eso, otro punto importante es la interpretación de la salida del oscilador. Normalmente la salida se interpretará como una posición u orientación. Pero también existe la posibilidad de interpretar la salida de los osciladores como el par que se aplica en los motores del robot.

Tras definir estos aspectos, se puede decir que se ha completado la arquitectura de osciladores del robot. Después de esto, solo será necesario configurar los parámetros de cada oscilador.

6.3. Configuración de parámetros

Para implementar los parámetros de los osciladores se puede comenzar por el offset. Los parámetros de offset del robot pueden aproximarse a una postura en la que el robot se encuentre en reposo, con una posición de las articulaciones alejada de los puntos máximos y mínimos. En la medida de lo posible, es interesante que estos valores del offset sean además posiciones en las que los actuadores del robot no realizan demasiado esfuerzo, ya que al fin y al cabo van a constituir el punto medio de las posiciones que van a tomar los actuadores durante los ciclos del oscilador.

Una vez definido el offset, es interesante definir el periodo. El periodo debe ser el mismo para todos los osciladores, aunque en algunas ocasiones muy

concretas algunos pueden usar divisores del periodo común. El periodo es una medida que puede variar mucho dependiendo del tipo de robot que se utilice. Por ejemplo, los robots inspirados en insectos suelen tener periodos muy bajos, mientras que los robots bípedos ejecutan periodos más largos. Durante el desarrollo de este trabajo, se ha observado empíricamente que una buena aproximación es utilizar la frecuencia natural de un péndulo [46] cuya longitud sea la altura del centro de masas del robot respecto al suelo. El periodo en ese caso se calcularía atendiendo a la ecuación 6.1.

$$T = 2 \cdot \pi \sqrt{\frac{h_{CoM}}{g}} \quad (6.1)$$

Donde h_{CoM} representa la altura del centro de masas del robot respecto al suelo. Es importante remarcar que esta altura varía con la posición del robot, que se ha definido anteriormente con el offset.

Las amplitudes de los osciladores son un parámetro muy relativo a la naturaleza de la caminata. Como se comentó en el apartado 4.1.1, amplitudes pequeñas producirán funciones de caminata lentas, mientras que las amplitudes grandes son propias de funciones más rápidas, como correr. Si el objetivo es realizar la implementación en un robot real, es recomendable comenzar con amplitudes pequeñas e ir aumentando su valor poco a poco hasta alcanzar el valor objetivo. De esta forma es más fácil experimentar cómo cambia el comportamiento del robot junto a la amplitud.

Por último, deben asegurarse unos valores de desfase que permitan una sincronización adecuada entre los movimientos de todas las articulaciones. Como punto de partida, se conoce que implementar un desfase de 90° entre dos articulaciones cuyos ejes se cruzan produce un movimiento circular, tal y como se ha representado en la figura 6.2. Esta trayectoria variará su forma en base a los valores de amplitud seleccionados.

Esta trayectoria podría marcar de forma directa el movimiento de la extremidad de un robot. Normalmente, además de una trayectoria así, el robot requerirá

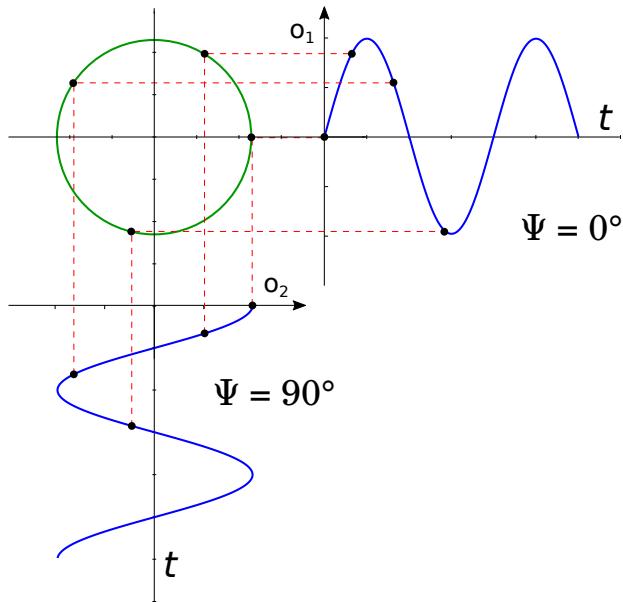


Figura 6.2: Formación de una trayectoria circular a partir de dos osciladores desfasados 90°.

un balanceo de su cuerpo para desplazar su centro de masas. La coordinación entre los pasos y el balanceo es quizás el punto más crítico en el diseño de la caminata. Es razonable pensar que el peso del robot debe desplazarse hacia la parte del robot que está en contacto con el suelo, pero para que la caminata sea exitosa se necesita mucha más precisión. Para encontrar el desfase óptimo en un balanceo existen dos formas: realizar un cálculo de la dinámica del robot en cada instante, o realizar una medición empírica a partir del comportamiento del robot. Para medir el desfase, se puede utilizar por ejemplo un sensor inercial que mida la inclinación del robot y en base a ello balancee el peso. En la figura 6.3 se ha graficado un oscilador que marca el balanceo de un robot bípedo (en verde), y por encima se muestra la acción de un sensor inercial (en azul) que modula el oscilador para que el robot conserve su estabilidad.

Lo interesante en la gráfica es que la señal corregida corresponde con un oscilador con una fase menor. En un caso así, se puede ajustar el oscilador original para aumentar su fase e intentar que su comportamiento se acomode al mismo

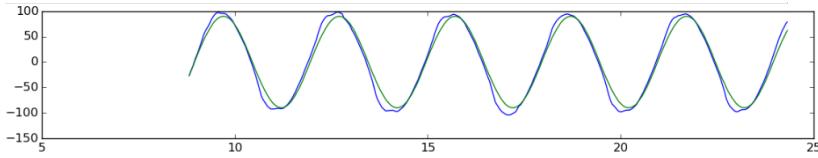


Figura 6.3: Oscilador fijado para balancear un robot (en verde) y corrección a partir de un sensor inercial (en azul).

que se formó al combinar el oscilador original junto a la realimentación del sensor. En la figura 6.4 se puede observar cómo cambian las señales al añadir 35° más al desfase del oscilador.

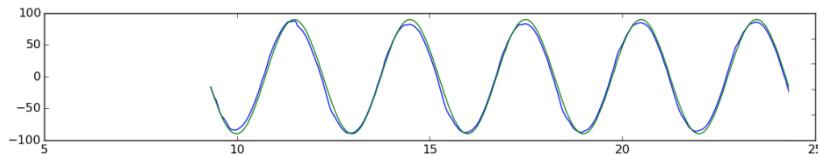


Figura 6.4: Oscilador reconfigurado para balancear un robot (en verde) y corrección a partir de un sensor inercial (en azul).

De esta forma, dado que la corrección necesaria por parte del sensor se minimiza, se puede extraer que el valor de la fase del oscilador ahora es más eficaz para mantener un balanceo en equilibrio. En el momento de fijar los desfases es interesante dividir el problema como se comentó en la sección 5.3.

6.4. Síntesis de la metodología

En esta sección se ha hecho una división en reglas secuenciales de los conceptos de este capítulo. El método que se presenta a continuación puede considerarse una receta para el diseño de caminatas. Es importante recalcar que dependiendo de la morfología del robot habrá puntos que se apliquen y puntos que se desprecien. También depende de las capacidades del robot y de si este posee sensores que le aporten información tanto del entorno como de su propio estado. Ante todo, no se pretende exponer una solución definitiva para el diseño

de caminatas basadas en osciladores, sino que se trata de una propuesta que durante el desarrollo de la tesis ha resultado ser efectiva. Los puntos propuestos son los siguientes:

1. Análisis y numeración de los grados de libertad del robot.
2. Definición de simetrías en la morfología del robot.
3. Elección entre control directo o inverso.
4. Definición del offset de cada oscilador.
5. Definición de un periodo común.
6. Definición de la amplitud de cada oscilador.
7. Definición del desfase entre osciladores.
8. Calibración de parámetros.
9. Adición de modulaciones.

En este capítulo se ha mostrado cómo definir la arquitectura de osciladores de un robot y cómo configurar los parámetros de cada oscilador. Una vez se obtiene una función de caminata estable ya pueden crearse más funciones, nuevas o a partir de modulaciones. También se deja preparado el sistema para aplicar optimizaciones de los parámetros de la caminata.

Capítulo 7

Experimentos y resultados

En este capítulo se presentan algunos experimentos de diseño de caminatas basadas en osciladores. Estos experimentos se han realizado sobre distintas plataformas robóticas, cada una con ciertas peculiaridades a nivel de hardware. El montaje experimental se ha realizado poniendo en práctica la metodología propuesta en el capítulo 6.

7.1. Implementación directa de osciladores

En el primer experimento se pretende mostrar la implementación directa de osciladores, estudiada en el capítulo 3, en un robot bípedo con una configuración muy básica. Se utilizará para ello el robot Zowi¹, mostrado en la figura 7.1.

7.1.1. Montaje experimental

El robot Zowi es un bípedo con únicamente cuatro grados de libertad. Cada pata está formada por una articulación de guiñada y una de cabeceo. Como punto de partida se aplicará la metodología presentada en la sección 6.4.

¹<https://github.com/javierih/zowi>



Figura 7.1: Robot Zowi.

1. Análisis y numeración de los grados de libertad del robot.

Zowi tiene un total de 4 grados de libertad, se han numerado sus articulaciones en la figura 7.2.

2. Definición de simetrías en la morfología del robot.

Se ha determinado que Zowi es simétrico en el plano sagital.

3. Elección entre control directo o inverso.

Dado que cada pata tiene únicamente dos grados de libertad en ejes de rotación cruzados, se ha optado por realizar un control directo.

4. Definición del offset de cada oscilador.

Se parte de una configuración global a 0° , coincidiendo con la posición de la figura 7.2.

5. Definición de un periodo común.

La altura del centro de masas de Zowi en la posición marcada por el offset es de aproximadamente 12 cm , utilizando la ecuación 6.1 se obtiene un resultado aproximado a 700 ms .

6. Definición de la amplitud de cada oscilador.

Dado que el robot es simétrico, los osciladores 1 y 2, y 3 y 4, tendrán la misma amplitud. En este experimento se ha partido de unos valores de 30° y 20° respectivamente.

7. Definición del desfase entre osciladores.

La simetría hace que los osciladores 1 y 2, y 3 y 4, tengan el mismo valor de desfase. Centrando la atención en una sola pata, para crear el movimiento de la zancada se ha fijado un desfase de 90° entre los dos osciladores.

8. Calibración de parámetros.

Una vez probados estos parámetros se ha observado que los efectos elásticos del robot provocan que a veces los tobillos no sean capaces de alcanzar la posición requerida. Este efecto se ha solventado reconfigurando el offset de los osciladores 3 y 4 con una variación de 4° . En este caso la simetría provoca que su signo sea contrario. Este efecto además eleva ligeramente el centro de masas del robot, por lo que el periodo calculado anteriormente también ha aumentado. El valor calculado se ha aproximado a $750\ ms$.

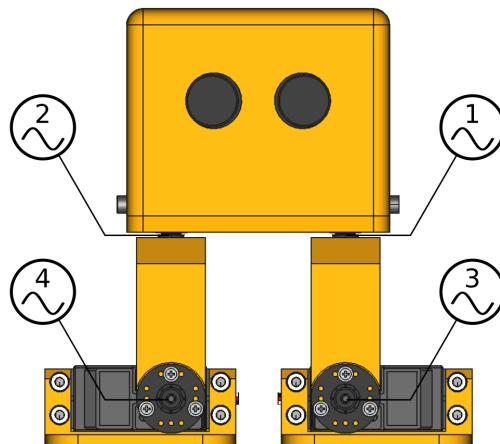


Figura 7.2: Configuración de osciladores del robot Zowi.

De este modo, el resultado es una función de caminata rectilínea con los parámetros definidos en la tabla 7.1. Esta función de caminata permite al robot avanzar hacia delante realizando zancadas consecutivas de forma sincronizada con el balanceo de su cuerpo. Al tratarse de una configuración de osciladores tan sencilla, puede observarse que los osciladores 1 y 2 influyen directamente en el avance, mientras que los osciladores 3 y 4 están más relacionados con el balanceo del peso.

Oscilador	Forma de onda	Offset	Amplitud	Periodo	Desfase
1	Seno	0°	30°	750 ms	0°
2	Seno	0°	30°	750 ms	0°
3	Seno	4°	20°	750 ms	-90°
4	Seno	-4°	20°	750 ms	-90°

Tabla 7.1: Definición de osciladores para una caminata rectilínea en el robot Zowi.

Para observar cómo cambia el comportamiento del robot, se han definido dos tablas alternativas. En 7.2 se ha aumentado el periodo de los osciladores y en 7.3 se ha aumentado la amplitud de los osciladores 1 y 2.

Oscilador	Forma de onda	Offset	Amplitud	Periodo	Desfase
1	Seno	0°	30°	1000 ms	0°
2	Seno	0°	30°	1000 ms	0°
3	Seno	4°	20°	1000 ms	-90°
4	Seno	-4°	20°	1000 ms	-90°

Tabla 7.2: Definición de osciladores con mayor periodo para una caminata rectilínea en el robot Zowi.

El experimento se ha desarrollado sobre una superficie de madera. Sobre ella se han marcado dos líneas paralelas distanciadas a un metro. En la figura 7.3 se

Oscilador	Forma de onda	Offset	Amplitud	Periodo	Desfase
1	Seno	0°	40°	750 ms	0°
2	Seno	0°	40°	750 ms	0°
3	Seno	4°	20°	750 ms	-90°
4	Seno	-4°	20°	750 ms	-90°

Tabla 7.3: Definición de osciladores con mayor amplitud para una caminata rectilínea en el robot Zowi.

muestra una foto del escenario preparado para realizar las pruebas.



Figura 7.3: Escenario de experimentación.

El robot partirá desde detrás de la línea de salida y se desplazará en línea recta hasta la línea de meta. En total debe recorrer un metro en línea recta. Para evitar efectos no estacionarios, el robot se sitúa 5 cm por detrás de la primera línea, de modo que cuando comience el experimento el robot ya habrá alcanzado un comportamiento estacionario. Junto al documento se ofrece un video² que

²https://www.youtube.com/watch?v=4N_jUH8hbx8

muestra cómo se desarrolla la prueba. El objetivo será ver cómo cambian las métricas con cada una de las tres configuraciones.

7.1.2. Métricas empleadas

Como métricas, se han utilizado estas medidas:

- Frecuencia de paso: f_{step} . Medida de cuántos pasos por segundo realiza el robot.
- Velocidad media y velocidad relativa: v y v_r . La velocidad relativa es una medida de velocidad en relación al tamaño del cuerpo. Se mide en cuerpos por segundo, dividiendo la velocidad entre la longitud del robot.
- Longitud de zancada total y longitud de zancada relativa: l_{step} y l_r . La longitud de cada zancada se ha medido dividiendo el número de pasos que realiza el robot por la distancia total recorrida. De esta forma, el resultado indica cuánto avanza el robot por cada paso que realiza. También se ha calculado esta longitud en relación al tamaño del cuerpo del robot.

7.1.3. Resultados

El robot ha recorrido la pista de un metro un total de seis veces en cada una de las tres pruebas. Para realizar los cálculos, se ha tenido en cuenta que la longitud del robot es de 72 mm. Los resultados obtenidos en este experimento se presentan a continuación. En la tabla 7.4 se han calculado las marcas de Zowi con la configuración de la tabla 7.1.

Revisando los valores pueden sacarse varias conclusiones. La frecuencia de paso es un valor que podía deducirse viendo los parámetros de los osciladores. Por cada periodo completo de 750 ms se produce una zancada de cada pata del robot, que forman analíticamente 2,66 p/s. El valor medido es ligeramente diferente al calculado. Esto se debe a los efectos del rozamiento y las ligeras variaciones de orientación que el robot sufre mientras camina.

Prueba	f_{step}	v	v_r	l_{step}	l_{stepe}
1	2,45 p/s	64,35 mm/s	0,89 BL/s	26,32 mm	0,37
2	2,48 p/s	62,03 mm/s	0,86 BL/s	25,00 mm	0,35
3	2,61 p/s	65,32 mm/s	0,91 BL/s	25,00 mm	0,35
4	2,55 p/s	67,02 mm/s	0,93 BL/s	26,32 mm	0,37
5	2,62 p/s	65,62 mm/s	0,91 BL/s	25,00 mm	0,35
6	2,60 p/s	66,58 mm/s	0,92 BL/s	26,32 mm	0,36
<i>Resultados</i>	2,55 p/s	65,15 mm/s	0,90 BL/s	25,64 mm	0,35

Tabla 7.4: Resultados de la primera prueba con Zowi.

En la tabla 7.5 se han calculado las marcas de Zowi con la configuración de la tabla 7.2.

Prueba	f_{step}	v	v_r	l_{step}	l_r
1	2,04 p/s	50,89 mm/s	0,71 BL/s	25,00 mm	0,35
2	1,97 p/s	49,21 mm/s	0,68 BL/s	25,00 mm	0,35
3	1,97 p/s	48,12 mm/s	0,67 BL/s	24,39 mm	0,34
4	2,04 p/s	51,23 mm/s	0,71 BL/s	25,00 mm	0,35
5	1,99 p/s	49,68 mm/s	0,69 BL/s	25,00 mm	0,35
6	1,98 p/s	48,43 mm/s	0,67 BL/s	24,39 mm	0,34
<i>Resultados</i>	2,00 p/s	49,59 mm/s	0,69 BL/s	24,80 mm	0,34

Tabla 7.5: Resultados de la segunda prueba con Zowi.

El primer cambio que se aprecia es que la velocidad del robot ha disminuido considerablemente respecto al experimento anterior. La diferencia que existe en la longitud de los pasos es prácticamente despreciable y es probable que se deba a pequeños deslizamientos de los pies del robot con el suelo. En este caso, al ir

más lento, el valor de la frecuencia de paso se ajusta mejor al valor ideal, es decir, los efectos del rozamiento y de la variación de su orientación han sido menores.

En la tabla 7.6 se han calculado las marcas de Zowi con la configuración de la tabla 7.3

Prueba	f_{step}	v	v_r	l_{step}	l_{stepe}
1	2,65 p/s	75,59 mm/s	1,05 BL/s	28,57 mm	0,40
2	2,66 p/s	73,86 mm/s	1,03 BL/s	27,68 mm	0,39
3	2,60 p/s	74,40 mm/s	1,03 BL/s	28,57 mm	0,40
4	2,64 p/s	73,20 mm/s	1,02 BL/s	27,78 mm	0,39
5	2,64 p/s	75,36 mm/s	1,05 BL/s	28,57 mm	0,40
6	2,70 p/s	77,28 mm/s	1,07 BL/s	28,57 mm	0,40
<i>Resultados</i>	2,65 p/s	74,95 mm/s	1,04 BL/s	28,31 mm	0,39

Tabla 7.6: Resultados de la tercera prueba con Zowi.

En los resultados de la tercera prueba se nota un aumento de velocidad significativo respecto a la primera prueba. Además, las marcas indican que los pasos han sido más largos, tal y como cabía esperar al aumentar la amplitud.

Al aumentar aún más la amplitud del robot o disminuir el periodo, se produce un comportamiento inestable del robot con mayores deslizamientos sobre la superficie e incluso pérdidas de equilibrio.

7.2. Adición de modulaciones

En este experimento se ha añadido una modulación dinámica, estudiada en el capítulo 4, en la caminata del robot Maus³, mostrado en la figura 7.4. El objetivo es aumentar la estabilidad del robot para hacerlo inmune a pequeñas imperfecciones y pendientes en el terreno.

³<https://github.com/javierih/maus>



Figura 7.4: Robot Maus.

7.2.1. Montaje experimental

Maus es un bípedo de 5 grados de libertad con una configuración de patas basadas en paralelogramos articulados. Tiene dos grados de libertad en cada pata, que le permiten mover los pies hacia delante, atrás, arriba y abajo. La característica importante de este robot es que posee un grado de libertad adicional, que controla una masa móvil de una magnitud bastante grande comparada con el peso total del robot, y hace la función de estabilizador. También posee un sensor inercial de nueve ejes (brújula, giróscopo y acelerómetro) situado en su cuerpo, que le permitirá conocer su inclinación en tiempo real. A continuación se muestra la aplicación de la metodología:

1. Análisis y numeración de los grados de libertad del robot.

El robot tiene un total de 5 grados de libertad. Al numerarlos, se ha apartado la articulación del estabilizador para no romper la simetría del robot. La numeración se presenta en la figura 7.5.

2. Definición de simetrías en la morfología del robot.

Maus es un robot simétrico en su plano sagital.

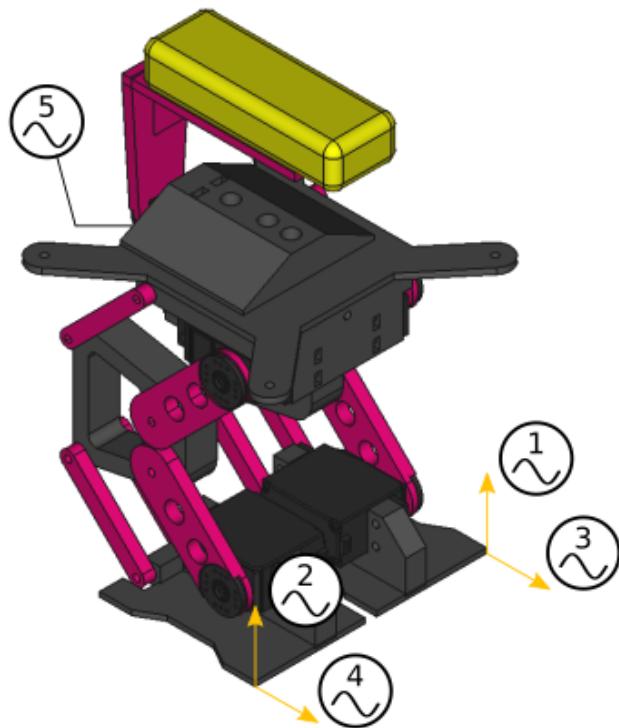


Figura 7.5: Configuración de osciladores del robot Maus.

3. Elección entre control directo o inverso.

Cada pata tiene dos grados de libertad sobre ejes de rotación paralelos. Se ha optado por utilizar la cinemática inversa pensando en que de este modo será más fácil añadir las modulaciones previstas. El estabilizador se controlará de forma directa.

4. Definición del offset de cada oscilador.

Los offsets corresponden a una posición similar a la mostrada en la figura 7.5, con las patas flexionadas para mejorar el rango de movimiento.

5. Definición de un periodo común.

La altura del centro de masas de Maus en la posición marcada por el offset es de aproximadamente 18 cm , a partir de la ecuación 6.1 se obtiene un resultado aproximado a 800 ms .

6. Definición de la amplitud de cada oscilador.

En este caso las amplitudes de los osciladores se describen en milímetros. Se ha definido para cada pata una amplitud de 20 mm en la elevación de los pies y de 30 mm en su avance.

7. Definición del desfase entre osciladores.

La diferencia de fase entre los dos osciladores de una pata, al igual que se hizo en el experimento anterior, se ha fijado a 90° . En este caso, la simetría provoca que los osciladores de la derecha del robots estén desfasados 180° respecto a los de la izquierda. En el caso del estabilizador, se ha partido con un desfase que le permite alcanzar su posición máxima sobre la pata que en ese momento se encuentra en su punto máximo de extensión.

8. Calibración de parámetros.

Se ha corregido empíricamente el estabilizador retrasando su fase 10° desde su valor inicial. La función de caminata diseñada hasta este momento se ha representado en la tabla 7.7.

9. Adición de modulaciones.

A los osciladores de las componentes verticales de las patas se les añade una modulación en el offset proporcional a la inclinación del robot en el eje de alabeo. Ahora las patas pueden estirarse y encogerse de forma proporcional al valor del sensor. Por otra parte, al oscilador del estabilizador se le asigna una modulación en el offset también proporcional a la inclinación del robot en el eje de alabeo. Estos cambios se han detallado en la tabla 7.8.

Los parámetros de la tabla 7.7 producen una caminata funcional. Sin embargo, en ocasiones el robot se tambalea y realiza movimientos erráticos.

Oscilador	Forma de onda	Offset	Amplitud	Periodo	Desfase
1	Medio seno	-75 mm	20 mm	800 ms	270°
2	Medio seno	-75 mm	20 mm	800 ms	90°
3	Seno	-30 mm	30 mm	800 ms	0°
4	Seno	-30 mm	30 mm	800 ms	180°
5	Seno	0°	90°	800 ms	280°

Tabla 7.7: Definición de osciladores base para una caminata rectilínea en el robot Maus.

Oscilador	Offset
1	-75 mm - 0,15 * e_{roll}
2	-75 mm + 0,15 * e_{roll}
3	-30 mm
4	-30 mm
5	0° - 5 * e_{roll}

Tabla 7.8: Definición de modulaciones para mejorar la estabilidad sobre una caminata rectilínea en el robot Maus.

El efecto de estas modulaciones es el de desplazar el centro de gravedad del robot hacia el lado contrario al que se incline, para así recuperar el equilibrio y evitar caídas. Durante el experimento el robot caminará por una superficie plana sobre la que se han colocado pequeños baches. La función de estos baches es perturbar el movimiento del robot, provocando inclinaciones. Junto al experimento, se ha aportado un vídeo⁴ demostrativo. Durante la primera prueba se medirá la inclinación del robot en cada instante mientras camina por una superficie plana y horizontal. En la segunda prueba se añadirán obstáculos de diferentes tamaños. Por último, en la tercera prueba se hará caminar al robot sobre un tablero inclinado con diferentes ángulos. El robot caminará primero sin realimentación sensorial y después con las modulaciones.

7.2.2. Métricas empleadas

En este experimento se realizará una comparativa entre los resultados de la caminata cuando se realiza en lazo abierto y cuando se incluyen las modulaciones. Las métricas que se utilizarán en este experimento son las siguientes:

- Inclinación máxima del robot: ϕ_{max} . Esta medida representa la inclinación máxima que adquiere el robot en su eje de alabeo mientras se desplaza por un suelo plano sin obstáculos.
- Altura de obstáculos: h . Se ha medido la altura de obstáculos, representados por pequeños objetos, que el robot es capaz de superar durante su desplazamiento. Durante la prueba, se considerará que pasa el obstáculo si es capaz de superarlo al menos una vez entre varios intentos.
- Desnivel de la superficie: α . Al hacer caminar al robot sobre una superficie inclinada, se controla el ángulo máximo de la superficie que puede admitir el robot sin caerse. La superficie se inclinará en un eje paralelo al eje de alabeo del robot.

⁴https://www.youtube.com/watch?v=Y95A_eKOkUo

Para enmarcar los resultados, también se medirá la velocidad media del robot (v), y su velocidad relativa en términos de cuerpos por segundo (v_r).

7.2.3. Resultados

Se ha medido una velocidad de $75,47 \text{ m/s}$. Al tener una longitud de 92 mm , implica una velocidad relativa de $0,79 \text{ BL/s}$. En la tabla 7.9 se muestran los resultados de la inclinación máxima.

	$\phi_{max} [^{\circ}]$
Bucle abierto	9,12
Con modulación	4,86

Tabla 7.9: Resultados del segundo experimento: inclinación máxima del robot.

Como se puede observar, la estabilidad con la modulación es mucho mayor. La inclinación máxima del robot se ha reducido prácticamente a la mitad. A continuación, en la tabla 7.10 se muestran los resultados del robot al intentar pasar por encima de obstáculos de diferentes tamaños.

$h [\text{mm}]$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Normal	✓	✓	✓	✓	✓	✓				
Con modulación	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	

Tabla 7.10: Resultados del segundo experimento: altura máxima de los obstáculos.

Con el efecto de la modulación, el robot ha sido de superar obstáculos de hasta 9 mm , mientras que en bucle abierto solo obstáculos de hasta 6 mm . Sin realimentación el robot se desequilibra al afrontar el obstáculo y comienza a balancearse de forma descontrolada hasta que cae al suelo. Por último en la tabla 7.11 se muestran los resultados de la tercera prueba.

$\alpha [{}^\circ]$	0	2	4	6	8	10	11	12	13	14
Normal	✓	✓	✓	✓						
Con modulación	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Tabla 7.11: Resultados del segundo experimento: desnivel máximo de la superficie.

En este caso, se ha observado que el robot caminando en bucle abierto pierde su estabilidad al superar una inclinación de la superficie de $7,5^\circ$. Con el efecto de las modulaciones el robot puede mantener el equilibrio con inclinaciones mucho mayores. El experimento se ha detenido al llegar a $14,5^\circ$ porque la excesiva inclinación provoca que el robot se deslice sobre el tablero, haciendo imposible realizar medidas precisas. Sin embargo, no se ha observado pérdida de equilibrio en ningún momento. Esto hace pensar que, en unas condiciones de mayor adherencia entre los apoyos del robot y la superficie, se podrían medir inclinaciones máximas superiores.

7.3. Transiciones

El objetivo de este experimento es implementar una transición entre dos funciones de marcha, tal y como se estudió en el capítulo 4. Se ha utilizado para ello el robot Kame⁵, mostrado en la figura 7.6, un cuadrúpedo de ocho grados de libertad.

7.3.1. Montaje experimental

El robot Kame es un robot cuadrúpedo con dos articulaciones en cada pata. Sus patas tienen una geometría de paralelogramo formada por diferentes barras móviles. Además de ser un robot mecánicamente simétrico en los planos frontal y sagital, sus patas están colocadas en una configuración de cuadrado,

⁵<https://github.com/javierih/kame>



Figura 7.6: Robot Kame.

existiendo la misma distancia entre patas delateras y traseras como entre patas de la izquierda y de la derecha. Al igual que en los experimentos anteriores, se seguirán los puntos de la metodología para diseñar su caminata.

1. Análisis y numeración de los grados de libertad del robot.

El robot tiene un total de 8 grados de libertad. La numeración se muestra en la figura 7.7.

2. Definición de simetrías en la morfología del robot.

Como se mostró anteriormente en el ejemplo de la figura 6.1 el robot presenta dos planos de simetría: sagital y frontal.

3. Elección entre control directo o inverso.

Analizando una única pata, esta tiene dos articulaciones: una de guijada y una de alabeo. Se considera razonable utilizar un control directo.

4. Definición del offset de cada oscilador.

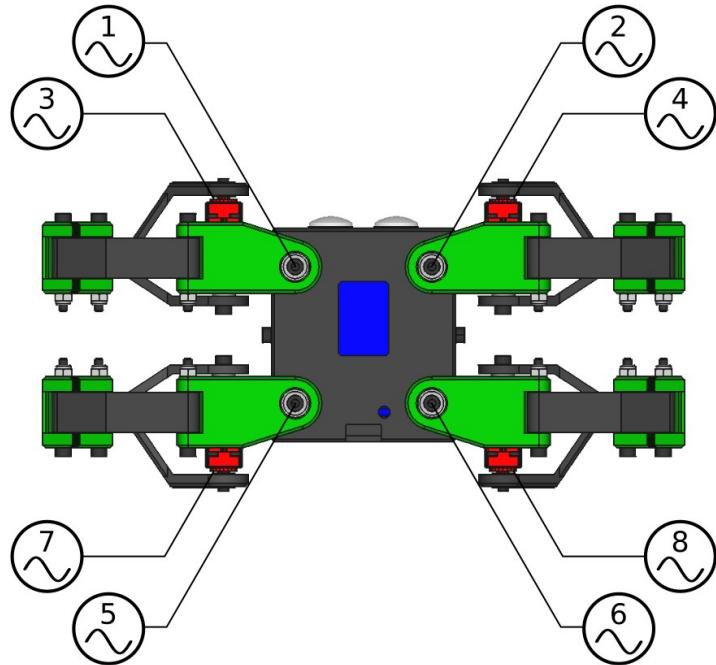


Figura 7.7: Configuración de osciladores del robot Kame.

Se ha definido el offset de cada oscilador de forma que eleven un poco el robot respecto al suelo. También se han separado las patas para darles un mayor rango de movimiento libre.

5. Definición de un periodo común.

Teniendo en cuenta que el centro de masas se encuentra a una altura de unos 7 cm , el periodo resultante al aplicar la ecuación 6.1 se puede aproximar a 550 ms .

6. Definición de la amplitud de cada oscilador.

Teniendo en cuenta la simetría del robot, se estudiará el movimiento de una sola pata. Al actuador del eje de guiñada se le ha fijado una amplitud de 15° mientras que al oscilador del eje de cabeceo se le ha dado un valor de 20° .

7. Definición del desfase entre osciladores.

Se ha fijado una diferencia de fase de 90° entre los dos osciladores de cada pata. Para sincronizar las cuatro patas, se han igualado los valores de los osciladores entre patas de izquierda y patas de la derecha, y se han desfasado 180° entre patas delanteras y patas traseras. Sin embargo, debido que los servomotores de cabeceo de las patas traseras están invertidos respecto a la posición de las delanteras, habrá que sumarles 180° más en su desfase.

8. Calibración de parámetros.

Dado que el objetivo es que el robot camine hacia delante, para aportarle mayor estabilidad se ha desplazado el cuerpo frontalmente variando ligeramente la posición de los offsets. La configuración resultante se ha descrito en la tabla 7.12

9. Adición de modulaciones.

La modulación que se ha implementado en este experimento corresponde con una transición. Se pretende que el robot pase de la función de caminata rectilínea a una función de caminata de rotación sobre sí mismo. La función de caminata secundaria se ha diseñado de forma similar y se presenta en la tabla 7.13. La modulación producirá un valor entre 0 y 1 que representa el progreso de la transición, siendo 0 un desplazamiento rectilíneo puro y 1 una rotación sobre el eje de guiñada del robot.

Durante este experimento se ha desarrollado una transición entre las dos funciones de caminata, realizando medidas durante la fase intermedia. Para ello se ha medido el radio de giro en diferentes instantes de la transición. Para una mayor comprensión del experimento, se ha aportado un vídeo⁶ en el que se puede observar el proceso de medición.

⁶<https://www.youtube.com/watch?v=hFu9mRGQ3f0>

Oscilador	Forma de onda	Offset	Amplitud	Periodo	Desfase
1	Seno	99°	15°	550 ms	0°
2	Seno	81°	15°	550 ms	0°
3	Seno	67°	20°	550 ms	90°
4	Seno	113°	20°	550 ms	90°
5	Seno	69°	15°	550 ms	180°
6	Seno	111°	15°	550 ms	180°
7	Seno	113°	20°	550 ms	90°
8	Seno	67°	20°	550 ms	90°

Tabla 7.12: Definición de osciladores base para una caminata rectilínea en el robot Kame.

Oscilador	Forma de onda	Offset	Amplitud	Periodo	Desfase
1	Seno	105°	15°	550 ms	0°
2	Seno	75°	15°	550 ms	180°
3	Seno	67°	20°	550 ms	90°
4	Seno	113°	20°	550 ms	90°
5	Seno	75°	15°	550 ms	180°
6	Seno	105°	15°	550 ms	0°
7	Seno	113°	20°	550 ms	90°
8	Seno	67°	20°	550 ms	90°

Tabla 7.13: Definición de osciladores base para una rotación sobre el eje vertical hacia la derecha en el robot Kame.

7.3.2. Métricas empleadas

Las métricas que van a utilizarse en este experimento son las siguientes:

- Frecuencia de paso: f_{step} . Medida de cuántos pasos por segundo realiza el robot.
- Velocidad media y velocidad relativa: v y v_r . Ambas se medirán en el movimiento rectilíneo.
- Velocidad angular media: ω . La velocidad angular se medirá en el movimiento de rotación.
- Radio de giro: r . Cuando el robot avanza recto se considerará un radio infinito, mientras que cuando rota sobre sí mismo el radio es nulo. Se estudiará cómo cambia este radio en diferentes instantes la transición.

7.3.3. Resultados

En la tabla 7.14 se encuentran las velocidades medidas en el robot Kame. Destaca la velocidad relativa, de $2,00 \text{ BL/s}$, la más alta de estos experimentos. Si bien es cierto, aún podrían ajustarse los osciladores para hacerla bastante más rápida, pero se ha elegido esta configuración por su estabilidad y repetitibilidad en las medidas de las pruebas.

f_{step}	ω	v	v_r
3,67 p/s	1,32 rad/s	136,05 mm/s	2,00 BL/s

Tabla 7.14: Velocidades medidas en Kame.

La variación del radio de giro del robot durante la transición se ha representado en el gráfico de la figura 7.8.

No se han tomado medidas del radio desde 0 a 0,2, ya que en esa parte de la transición, la función de caminata resultante es tan parecida al movimiento

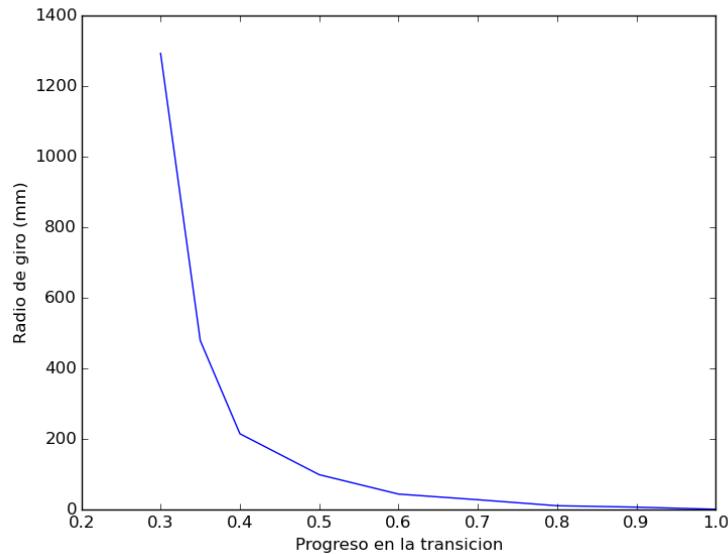


Figura 7.8: Decremento del radio de giro durante la transición.

rectilíneo que los radios de giro eran demasiado altos para medirlos con precisión. Viendo el gráfico se puede concluir que a medida que la transición avanza el radio de giro va disminuyendo. Cuando llega a 0,9 que corresponde a un 90 % de giro y un 10 % de avance, el movimiento resultante es prácticamente igual a la rotación sobre sí mismo. Lo más interesante es el tramo entre 0,3 y 0,6, en el que pueden encontrarse movimientos de giro fácilmente controlables. A partir de estos datos, se podría realizar la transición de forma progresiva en un tiempo definido.

7.4. Capas de osciladores

En este último experimento se probará la composición de osciladores a alto nivel, estudiada en el capítulo 5 sobre un robot con una morfología más compleja, un humanoide. Se utilizará para ello la última versión del robot Raider⁷,

⁷<https://github.com/javierih/raider>

con veinticuatro grados de libertad. El robot se muestra en la figura 7.9. Como aspecto singular de esta plataforma destaca la geometría de las piernas, basada en un mecanismo de pantógrafo y la incorporación de un amortiguador entre la rodilla y tobillo que acompaña el movimiento extensor. La sincronización de los actuadores en este caso es crítica, no solo por la efectividad de la caminata sino por la seguridad de sus componentes mecánicos.



Figura 7.9: Robot Raider.

7.4.1. Montaje experimental

Para diseñar la arquitectura de osciladores de Raider se ha seguido la metodología propuesta.

1. Análisis y numeración de los grados de libertad del robot.

El robot cuenta con 24 grados de libertad, de los cuales se utilizaran de for-

ma activa 13, ya que los brazos se mantendrán en una posición fija similar a la mostrada en la figura 7.9. El actuador de la cintura se ha apartado de la numeración y colocado al final para evitar romper la simetría.

2. Definición de simetrías en la morfología del robot.

Raider tiene una simetría en el plano sagital.

3. Elección entre control directo o inverso.

Dada la gran cantidad de actuadores del robot se utilizará la cinemática inversa en las piernas del robot, pero la cintura y las articulaciones de guiñada de las piernas se controlarán de forma directa. En la figura 7.10 se puede observar la arquitectura de osciladores completa.

4. Definición del offset de cada oscilador.

Se ha fijado como offset una posición de reposo similar a la que aparece en la figura 7.9. Esta posición permite mover las piernas del robot con libertad.

5. Definición de un periodo común.

A diferencia del resto de experimentos, en este caso no se ha utilizado la frecuencia de un péndulo natural en los cálculos de Raider. El valor que habría proporcionado la fórmula sería de aproximadamente 1100 ms pero dado que se trata de un robot orientado a la competición los requerimientos son diferentes: se necesita que el robot de pasos más pequeños y más rápidos. Por ello se ha reducido el periodo a la mitad, 550 ms.

6. Definición de la amplitud de cada oscilador.

Como se comentaba en el punto anterior, se han seleccionado amplitudes bastante pequeñas que proporcionan al robot una mayor robustez en su caminata. En la tabla 7.15 se muestran los resultados.

7. Definición del desfase entre osciladores.

De nuevo, el desfase entre el movimiento en Y y el movimiento en Z de cada pie se ha fijado a 90° , formando una trayectoria elíptica. El balanceo, se ha fijado para que funcione en fase con las piernas, de modo que cuando una pierna del robot se encuentre en su punto de extensión máxima, el peso del robot se desplazará lateralmente hacia esa pierna. Asimismo, los osciladores de guiñada de cada pierna se han fijado en fase con el avance. La cintura se encargará de mover el peso del robot para contrarrestar el efecto de los osciladores de guiñada.

8. Calibración de parámetros.

Ha sido necesario calibrar el movimiento de la cintura, y se ha obtenido empíricamente que 270° es una aproximación razonable.

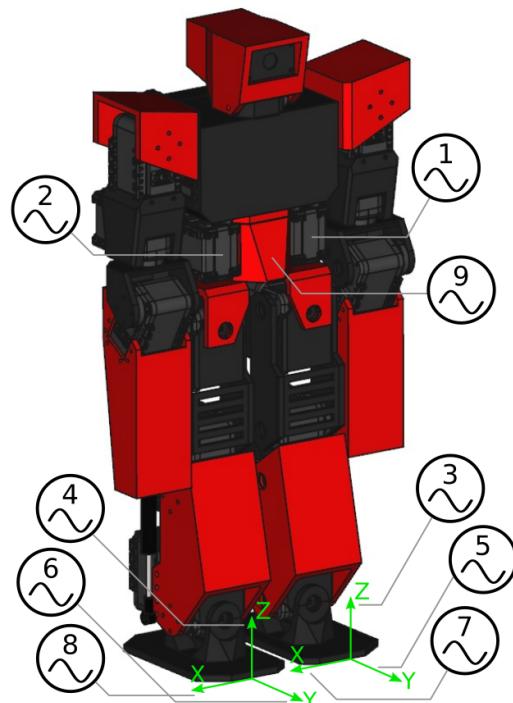


Figura 7.10: Arquitectura de osciladores en el robot Raider.

La configuración de cada oscilador se muestra en la tabla 7.15.

Oscilador	Forma de onda	Offset	Amplitud	Periodo	Desfase
1	Seno	90°	4°	550 ms	90°
2	Seno	90°	4°	550 ms	90°
3	Seno	-135 mm	8 mm	550 ms	0°
4	Seno	135 mm	8 mm	550 ms	180°
5	Seno	-26 mm	13 mm	550 ms	270°
6	Seno	-26 mm	13 mm	550 ms	90°
7	Seno	8 mm	10 mm	550 ms	30°
8	Seno	-8 mm	10 mm	550 ms	30°
9	Seno	90°	6°	550 ms	270°

Tabla 7.15: Definición de osciladores para un movimiento rectilíneo en el robot Raider.

El robot ha recorrido el mismo escenario del primer experimento, mostrado en la figura 7.3. Se ha realizado el recorrido entre la línea de salida y la línea de llegada un total de seis veces. Al igual que en el primer experimento, el robot ha comenzado la prueba a una distancia de 5 cm de la línea de salida, de forma que en el momento de cruzarla ya se ha alcanzado un comportamiento estacionario. Este experimento se acompaña con un vídeo⁸ para una mayor comprensión del proceso.

7.4.2. Métricas empleadas

Durante este experimento se han estudiado las siguientes métricas:

- Frecuencia de paso: f_{step} . Medida de cuántos pasos por segundo realiza el robot.
- Velocidad media y velocidad relativa: v y v_r . La velocidad relativa es una medida de velocidad en relación al tamaño del cuerpo. Se mide en cuerpos

⁸https://www.youtube.com/watch?v=Q9RKSIT2L_U

por segundo, dividiendo la velocidad entre la longitud del robot.

- Longitud de zancada total y longitud de zancada relativa: l_{step} y l_r . La longitud de cada zancada se ha medido dividiendo el número de pasos que realiza el robot por la distancia total recorrida. De esta forma, el resultado indica cuánto avanza el robot por cada paso que realiza. También se ha calculado esta longitud en relación al tamaño del cuerpo del robot.

7.4.3. Resultados

Se ha realizado la prueba un total de seis veces, obteniendo los resultados que se muestran en la tabla 7.16. Se ha tenido en cuenta que la longitud del cuerpo del robot es de 72 mm.

Prueba	f_{step}	v	v_r	l_{step}	l_{stepe}
1	3,46 p/s	88,65 mm/s	1,14 BL/s	25,64 mm	0,33
2	3,55 p/s	93,55 mm/s	1,20 BL/s	26,32 mm	0,34
3	3,61 p/s	94,88 mm/s	1,22 BL/s	26,32 mm	0,34
4	3,49 p/s	91,83 mm/s	1,18 BL/s	26,32 mm	0,34
5	3,52 p/s	90,33 mm/s	1,16 BL/s	25,64 mm	0,33
6	3,54 p/s	93,28 mm/s	1,20 BL/s	26,32 mm	0,34
<i>Resultados</i>	3,53 p/s	92,09 mm/s	1,18 BL/s	26,09 mm	0,33

Tabla 7.16: Resultados del experimento con Raider.

La velocidad media del robot es de 92,09 mm/s, que corresponde a una velocidad relativa de 1,18 BL/s. En esta prueba no se ha utilizado ninguna realimentación sensorial en el robot, eso ha provocado que al robot en ocasiones se deslizase sobre la superficie y cambiase ligeramente su orientación.

Capítulo 8

Conclusiones y líneas futuras

Para finalizar, se exponen las conclusiones del proyecto. También se comentan posibles desarrollos futuros que no han sido abarcados por esta tesis, pero sería interesante estudiar.

8.1. Conclusiones

Durante el desarrollo de esta tesis se ha realizado un estudio de las posibilidades que ofrece la locomoción basada en osciladores para robots con patas. Se ha definido un estado del arte que incluye además otras alternativas de generación de caminatas, cuyas características en muchos casos son comparables al método de osciladores.

También se han presentado los parámetros requeridos para configurar un oscilador, explicando cuál es la función de cada parámetro y cómo afectan al movimiento. Este tema ha sido tratado anteriormente de forma parcial en otras publicaciones, pero sin desarrollarse de forma explícita.

Durante el desarrollo del trabajo se han mostrado diversos ejemplos de morfologías de robots sobre las que se puede implementar el método de osciladores. Además, a lo largo del capítulo 7 se han mostrado cuatro plataformas robóticas

cuya locomoción se ha diseñado utilizando íntegramente osciladores. El comportamiento de estos robots ha resultado ser muy positivo, cumpliendo con creces sus necesidades de desplazamiento.

La adición de modulaciones constituye un recurso muy potente en el diseño de las funciones de caminata, ya que permite realizar variaciones de la configuración de osciladores en base a parámetros secundarios o agentes externos. Además, usar modulaciones para realizar transiciones entre movimientos llena un vacío existente en las caminatas basadas en osciladores.

Otro punto que ha significado una ampliación de las posibilidades del método ha sido la composición de osciladores. Al combinar osciladores simples se han obtenido osciladores más complejos, que son útiles en algunas funciones de caminata. A parte, la composición ha derivado en la división de funcionalidades de un movimiento. Esto podría resumirse como que movimientos simples basados en osciladores simples pueden combinarse para dar lugar a movimientos complejos basados en osciladores complejos. Otra forma de abordar la composición de osciladores se ha realizado analizando la cinemática inversa de las patas, siendo una técnica que facilita mucho el control del robot cuando este tiene muchos grados de libertad.

Finalmente, la metodología de diseño puede servir como punto de partida para construir la arquitectura de osciladores de un robot y configurar sus parámetros. Se espera además que esta pueda resultar útil en trabajos futuros con robots con patas, sobre todo en aquellos cuyo objetivo no sea específicamente el estudio de la locomoción. De esta forma, puede solucionarse el problema de la locomoción utilizando osciladores y dedicar más tiempo a otro tipo de funcionalidades y comportamientos de un robot.

8.2. Líneas futuras

Como puntos que pueden dar lugar a trabajos futuros, se han seleccionado algunas ideas que no han sido tratadas (o sí lo han sido, pero no con demasiada

profundidad) durante el desarrollo de este documento. Los puntos se exponen a continuación:

- Optimización de las funciones de caminata. Una vez desarrollada una arquitectura de osciladores, se ha visto que puede modificarse con modulaciones. Utilizar técnicas de optimización sobre las modulaciones, como podrían ser algoritmos evolutivos, podrían hacer más robusta la locomoción. También podría ser interesante optimizar los parámetros de desfase, ya que suelen ser los más complicados de configurar. Relacionado con esto, sería especialmente útil la implementación de robots con osciladores en simuladores para poder estudiar la optimización ágilmente.
- Profundizar el estudio de la transición entre movimientos. Durante la tesis de propuso realizar interpolaciones lineales entre los parámetros de dos funciones de caminata durante intervalos variables de tiempo. Se ha visto que las transiciones son un punto muy delicado en la locomoción con patas, pudiendo producir inestabilidad. Sería interesante encontrar algún modo de controlar el estado del robot durante la transición para darle mayor robustez a la propia caminata.
- Aplicación a robots no puramente terrestres. Se conoce con anterioridad que se han utilizado CPGs en robots acuáticos y aéreos. Sería interesante estudiar si el método de osciladores es también válido en esas situaciones.
- Relacionado con el punto anterior, se propone el estudio de los osciladores en plataformas robóticas cuyo medio de locomoción no esté basado puramente en patas, sino que incorporen elementos reptantes, aletas, ruedas y otros.

Bibliografía

- [1] Eric R Westervelt, Jessy W Grizzle, and Daniel E Koditschek. Hybrid zero dynamics of planar biped walkers. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 48(1):42–56, 2003.
- [2] PXLM La Hera, Anton S Shiriaev, Leonid B Freidovich, Uwe Mettin, and Sergei V Gusev. Stable walking gaits for a three-link planar biped robot with one actuator. *IEEE Transactions on Robotics*, 29(3):589–601, 2013.
- [3] Jun Morimoto, Gordon Cheng, Christopher G Atkeson, and Garth Zeglin. A simple reinforcement learning algorithm for biped walking. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA'04. 2004*, volume 3, pages 3030–3035. IEEE, 2004.
- [4] Youngbum Jun, Robert Ellenburg, and Paul Oh. From concept to realization: designing miniature humanoids for running. *Journal on Systemics, Cybernetics and Informatics*, 8(1):8–13, 2010.
- [5] Michael P Murphy, Aaron Saunders, Cassie Moreira, Alfred A Rizzi, and Marc Raibert. The littledog robot. *The International Journal of Robotics Research*, page 0278364910387457, 2010.
- [6] Auke Jan Ijspeert, Alessandro Crespi, Dimitri Ryczko, and Jean-Marie Ca-

- belguen. From swimming to walking with a salamander robot driven by a spinal cord model. *science*, 315(5817):1416–1420, 2007.
- [7] Alberto Jardón, Félix Rodríguez, Juan G Victores, Santiago Martínez, and Carlos Balaguer. A review of eight years of ceabot contest: a national wide mini humanoids competition. In *ROBOT2013: First Iberian Robotics Conference*, pages 41–52. Springer, 2014.
- [8] Sven Behnke. Robot competitions-ideal benchmarks for robotics research. In *Proc. of IROS-2006 Workshop on Benchmarks in Robotics Research*, 2006.
- [9] Javier Isabel. Desarrollo de una plataforma robótica mini-humanoide con visión artificial. *Universidad Carlos III de Madrid, TFG*, 2013.
- [10] Scott Kuindersma, Roderic Grupen, and Andrew Barto. Learning dynamic arm motions for postural recovery. In *IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*, 2011, pages 7–12. IEEE, 2011.
- [11] Navinda Kottege, Callum Parkinson, Peyman Moghadam, Alberto Elfes, and Surya PN Singh. Energetics-informed hexapod gait transitions across terrains. In *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 5140–5147. IEEE, 2015.
- [12] Ana de Prado. Proyecto at-as: Diseño de un robot cuadrúpedo imprimible, fabricación e implementación de la locomoción. *Trabajo Final de Grado*, 2012.
- [13] Miomir Vukobratovic and Davor Juricic. Contribution to the synthesis of biped gait. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, (1):1–6, 1969.
- [14] Shuuji Kajita, Fumio Kanehiro, Kenji Kaneko, Kazuhito Yokoi, and Hirohisa Hirukawa. The 3d linear inverted pendulum mode: A simple modeling for a biped walking pattern generation. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2001., volume 1, pages 239–246. IEEE, 2001.

- [15] Shuuji Kajita, Fumio Kanehiro, Kenji Kaneko, Kiyoshi Fujiwara, Kazuhito Yokoi, and Hirohisa Hirukawa. Biped walking pattern generation by a simple three-dimensional inverted pendulum model. *Advanced Robotics*, 17(2):131–147, 2003.
- [16] Amos Albert and Wilfried Gerth. Analytic path planning algorithms for bipedal robots without a trunk. *Journal of Intelligent and Robotic Systems (IROS) 2003*, 36(2):109–127, 2003.
- [17] Shuuji Kajita, Fumio Kanehiro, Kenji Kaneko, Kiyoshi Fujiwara, Kensuke Harada, Kazuhito Yokoi, and Hirohisa Hirukawa. Biped walking pattern generation by using preview control of zero-moment point. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2003. Proceedings. ICRA'03.*, volume 2, pages 1620–1626. IEEE, 2003.
- [18] Mark Yim. Locomotion with a unit-modular reconfigurable robot. *Stanford University*, 1994.
- [19] Antonio Barrientos, Luis Felipe Peñin, Carlos Balaguer, and Rafael Aracil. *Fundamentos de robótica*. McGraw-Hill, Interamericana de España, 2007.
- [20] Giorgio Figliolini and Pierluigi Rea. *Mechanics and simulation of six-legged walking robots*. INTECH Open Access Publisher, 2007.
- [21] Herman Bruyninckx. Open robot control software: the orocos project. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2001. Proceedings 2001 ICRA.*, volume 3, pages 2523–2528. IEEE, 2001.
- [22] Alexander Spröwitz, Alexandre Tuleu, Massimo Vespignani, Mostafa Ajallooeian, Emilie Badri, and Auke Jan Ijspeert. Towards dynamic trot gait locomotion: Design, control, and experiments with cheetah-cub, a compliant quadruped robot. *The International Journal of Robotics Research*, 32(8):932–950, 2013.

- [23] Alexander Spröwitz, Max Fremerey, Konstantinos Karakasiliotis, Simon Rutishauser, Ludovic Righetti, and Auke Jan Ijspeert. Compliant leg design for a quadruped robot. In *Abstracts of Dynamic Walking 2009*, number BIOROB-CONF-2008-014, 2009.
- [24] Nikos G Tsagarakis, Zhibin Li, Jody Saglia, and Darwin G Caldwell. The design of the lower body of the compliant humanoid robot “ccub”. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2011*, pages 2035–2040. IEEE, 2011.
- [25] Shuuji Kajita and Kazuo Tani. Adaptive gait control of a biped robot based on realtime sensing of the ground profile. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1996. Proceedings.*, volume 1, pages 570–577. IEEE, 1996.
- [26] Paul Hebert, Max Bajracharya, Jeremy Ma, Nicolas Hudson, Alper Aydemir, Jason Reid, Charles Bergh, James Borders, Matthew Frost, Michael Hagman, et al. Mobile manipulation and mobility todo as manipulation—design and algorithms of robosimian. *Journal of Field Robotics*, 32(2):255–274, 2015.
- [27] Roger D Quinn, John T Offi, Daniel A Kingsley, and Roy E Ritzmann. Improved mobility through abstracted biological principles. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2002.*, volume 3, pages 2652–2657. IEEE, 2002.
- [28] William A Breckwoldt, Kathryn A Daltorio, Lars Heepe, Andrew D Horchler, Stanislav N Gorb, and Roger D Quinn. Walking inverted on ceilings with wheel-legs and micro-structured adhesives. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2015*, pages 3308–3313. IEEE, 2015.
- [29] Yi Sun, Yang Yang, Shugen Ma, and Huayan Pu. Modeling paddle-aided

- stair-climbing for a mobile robot based on eccentric paddle mechanism. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2015., pages 4153–4158. IEEE, 2015.
- [30] Uluc Saranli, Martin Buehler, and Daniel E Koditschek. Rhex: A simple and highly mobile hexapod robot. *The International Journal of Robotics Research*, 20(7):616–631, 2001.
- [31] Garrett J Wenger, Aaron M Johnson, Camillo J Taylor, and Daniel E Koditschek. Semi-autonomous exploration of multi-floor buildings with a legged robot. In *SPIE Defense+ Security*, pages 94680B–94680B. International Society for Optics and Photonics, 2015.
- [32] A Martin-Alvarez, W De Peuter, J Hillebrand, P Putz, A Matthyssen, and JF De Weerd. Walking robots for planetary exploration missions. In *WAC*, volume 96, pages 27–30, 1996.
- [33] Robert T Schroer, Matthew J Boggess, Richard J Bachmann, Roger D Quinn, and Roy E Ritzmann. Comparing cockroach and whogs robot body motions. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA'04.*, volume 4, pages 3288–3293. IEEE, 2004.
- [34] Steve Collins, Andy Ruina, Russ Tedrake, and Martijn Wisse. Efficient bipedal robots based on passive-dynamic walkers. *Science*, 307(5712):1082–1085, 2005.
- [35] Tad McGeer. Passive dynamic walking. *The International Journal of Robotics Research*, 9(2):62–82, 1990.
- [36] Steven H Collins, Martijn Wisse, and Andy Ruina. A three-dimensional passive-dynamic walking robot with two legs and knees. *The International Journal of Robotics Research*, 20(7):607–615, 2001.

- [37] Joel Chestnutt, Manfred Lau, German Cheung, James Kuffner, Jessica Hodges, and Takeo Kanade. Footstep planning for the honda asimo humanoid. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2005. Proceedings. ICRA'05.*, pages 629–634. IEEE, 2005.
- [38] GM Hughes and CAG Wiersma. The co-ordination of swimmeret movements in the crayfish, *procambarus clarkii* (girard). *Journal of Experimental Biology*, 37(4):657–670, 1960.
- [39] P Wallén and TL Williams. Fictive locomotion in the lamprey spinal cord in vitro compared with swimming in the intact and spinal animal. *The Journal of Physiology*, 347:225, 1984.
- [40] Andrea Crespi, Konstantinos Karakasiliotis, Anais Guignard, and Auke J Ijspeert. Salamandra robotica ii: an amphibious robot to study salamander-like swimming and walking gaits. *IEEE Transactions on Robotics.*, 29(2):308–320, 2013.
- [41] John Nassour, Patrick Hénaff, Fethi Benouezdou, and Gordon Cheng. Multi-layered multi-pattern cpg for adaptive locomotion of humanoid robots. *Biological cybernetics*, 108(3):291–303, 2014.
- [42] Juan González Gómez. Robótica modular y locomoción: Aplicación a robots ápodos. *Universidad Autónoma de Madrid, Thesis*, 2008.
- [43] Ching-Chang Wong, Chi-Tai Cheng, Chih-Cheng Liu, and Yueh-Yang Hu. Cordic-based fpga hardware design method for biped walking gait. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 38(5):610–620, 2015.
- [44] Inyong Ha, Yusuke Tamura, and Hajime Asama. Gait pattern generation and stabilization for humanoid robot based on coupled oscillators. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2011, pages 3207–3212. IEEE, 2011.

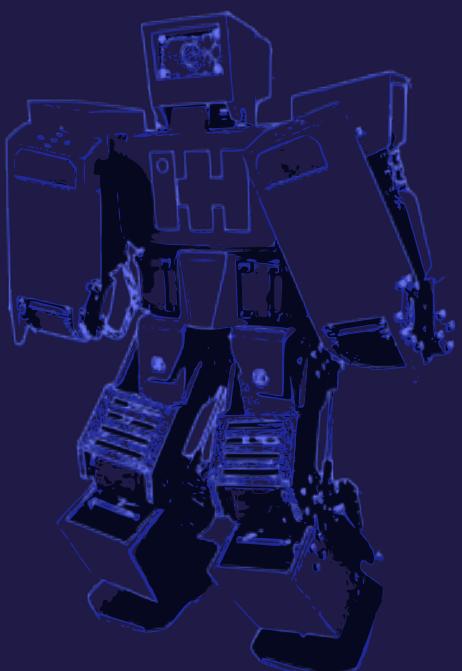
- [45] Gen Endo, Jun Nakanishi, Jun Morimoto, and Gordon Cheng. Experimental studies of a neural oscillator for biped locomotion with qrio. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2005. ICRA 2005.*, pages 596–602. IEEE, 2005.
- [46] PA Tipler. Física (volumen 1), cap. 14. *Reverté, Barcelona*, 1, 2003.



Máster Oficial en Robótica y Automatización

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática

Universidad Carlos III de Madrid



Esta tesis estudia la locomoción de los robots con patas. Específicamente, se centra en el método de osciladores, que es un método bioinspirado basado en el movimiento de las articulaciones del robot a partir de señales rítmicas. Este método ha sido anteriormente implementado con éxito para crear desplazamientos en robots ápodos y también como simplificación de los generadores centrales patrones (CPG) en robots con patas. A lo largo del desarrollo de este trabajo se realiza un estudio exhaustivo de las posibilidades que ofrecen los algoritmos de caminata basados íntegramente en osciladores. También se propone la adición de modulaciones en las señales para modificar funciones de caminata, crear funciones nuevas y también realizar la transiciones entre funciones de caminata. Otro tema tratado es la composición de osciladores para crear movimientos complejos definidos por varias señales sumadas. Reuniendo estos conceptos, se ha desarrollado una metodología de diseño genérica para la implementación de caminatas. Por último se han realizado experimentos con algunos robots construidos por el autor: Zowi, Kame, Maus y Raider.