

Capítulo 8

Conclusiones

”Es la pregunta la que nos da fuerza. Es la duda la que te ha traído aquí.”

– Trinity, en la película “Matrix”

Este último capítulo se ha dividido en tres apartados. Comenzamos presentando las principales aportaciones de esta tesis junto a una breve discusión de sus implicaciones. A continuación resumimos las conclusiones particulares de cada capítulo. Finalmente indicamos algunas de las posibles líneas de investigación futuras que dan continuidad a este trabajo.

8.1. Principales aportaciones

Tras plantear las preguntas iniciales, desarrollar los modelos matemáticos, obtener los resultados y comprobarlos tanto en simulación como en robots reales, concluimos lo siguiente:

1. *Comprobada la viabilidad de los generadores sinusoidales como controladores para la locomoción en una y dos dimensiones de los robots ápodos modulares de los grupos cabeceo-cabeceo y cabeceo-viraje, en régimen permanente y sobre superficies planas, homogéneas y sin obstáculos.*

Este controlador es válido para robots con un número de módulos mayor o igual a dos o tres, según que el tipo de conexión sea cabeceo-cabeceo o cabeceo-viraje respectivamente. Respondiendo a la pregunta formulada en los objetivos, “¿Se consigue que el robot se desplace?”, la respuesta es sí. Además, los movimientos logrados son muy suaves y naturales, dando la sensación de que el robot está vivo.

El controlador basado en generadores sinusoidales tiene tres ventajas principales. Una es la escalabilidad. Para realizar la locomoción de un robot ápedo de M módulos no hay más que añadir el mismo número de generadores. Otra es la economía de recursos. Se requieren muy pocos cálculos lo que permite implementarlos en los microcontroladores de gama baja. La tercera ventaja es su realización en diferentes tecnologías: mediante *software*, circuitos electrónicos digitales o incluso circuitos analógicos.

Mediante la utilización de FPGAs se pueden diseñar circuitos específicos que permiten que el robot se mueva “por *hardware*” de la misma manera que los rabos de las lagartijas se mueven cuando son seccionados.

2. *Se ha demostrado que los robots ápedos del grupo cabeceo-viraje, con un número de módulos mayor o igual a tres, pueden al menos desplazarse utilizando cinco modos de caminar diferentes: línea recta, trayectoria circular, desplazamiento lateral, rodar y rotar. Al aumentar el número de módulos aparecen nuevos movimientos como son el desplazamiento lateral en S, lateral inclinado y la rotación en S.*

El modelo de generadores sinusoidales planteado como hipótesis no sólo es viable sino que permite una variedad de movimientos mayor de lo esperada, dada la sencillez del controlador. El autor de esta tesis no deja de asombrarse al observar el robot moverse con esa variedad de movimientos sabiendo que los servos simplemente están oscilando.

Con los modos de caminar obtenidos todo robot ápedo del grupo cabeceo-viraje con más de dos módulos puede alcanzar cualquier punto (x,y) del plano, con cualquier orientación. Además, gracias al movimiento de rodar, puede recuperar su posición original en caso de volcar.

3. *La dimensión mínima del espacio de control para la locomoción de los robots ápedos del grupo cabeceo-viraje con más de dos módulos sobre una superficie es de cinco. Es decir, que sólo son necesarios cinco parámetros para que cualquier robot con conexión cabeceo-viraje de más de dos módulos se pueda desplazar empleando al menos los cinco modos de caminar encontrados. Los parámetros son las amplitudes de los generadores asociados a los módulos verticales y horizontales, sus diferencias de fase y la diferencia de fase entre los verticales y horizontales.*

Para el desplazamiento en línea recta la dimensión es de dos. Sólo se necesitan dos parámetros para mover cualquier robot del grupo cabeceo-cabeceo de más de un módulo. Son la amplitud y la diferencia de fase.

Para el movimiento de un robot ápedo concreto de M módulos, se pueden emplear más parámetros de control, como por ejemplo la utilización de amplitudes diferentes para los distintos módulos. En ese caso la solución ya no es general, sino particular a ese robot. En estos espacios de mayor dimensión pueden existir más soluciones a la locomoción. En esta tesis nos hemos centrado en buscar el espacio de dimensión mínima que permita la locomoción con independencia del número de módulos.

4. *Se han encontrado tres modos de caminar novedosos, que no habían sido previamente estudiados por otros investigadores ni realizados en ningún robot ápedo, a nuestro leal saber. Son el*

desplazamiento lateral inclinado y la rotación en S y en U. Los movimientos de rotación son especialmente importantes ya que permiten que los robots ápodos puedan cambiar su orientación para apuntar hacia cualquier posición. Sólo empleando la locomoción en línea recta y la rotación se consigue que el robot alcance cualquier punto del plano y que se oriente en la dirección deseada.

La rotación en U la puede realizar cualquier robot del grupo cabeceo-viraje con más de dos módulos. La rotación en S con una ondulación la pueden realizar todos aquellos robots con un número mayor o igual a 8 módulos.

5. *Se ha planteado el problema de las configuraciones mínimas para las topologías de una dimensión y se ha resuelto. Se han encontrado las dos configuraciones mínimas, de dos y tres módulos que son capaces de moverse en una y dos dimensiones respectivamente.* Se puede, por tanto, responder a la pregunta planteada en los objetivos: “¿Cuales son los robots con el menor número de módulos que tienen la capacidad de desplazarse?”. La respuesta son estas configuraciones mínimas. Para moverse en línea recta son necesarios dos módulos. Para hacerlo en un plano tres.

Este problema es novedoso y no había sido anteriormente planteado. Se propuso en el 2005 en [42]. El artículo fue seleccionado como uno de los siete mejores del congreso y recibió el “*Industrial Robot Highly Commended Award*”. Las dos configuraciones mínimas con topología de una dimensión encontradas son la constituida por dos módulos con conexión de cabeceo-cabeceo (configuración *PP*) y la compuesta por tres, el central de viraje y los de los extremos de cabeceo (configuración *PYP*).

Estas configuraciones son importantes por los siguientes motivos. 1) Constituyen las unidades atómicas de movimiento (*UAM*), que son capaces de desplazarse por un plano, alcanzando cualquier punto (x,y) de su superficie y con cualquier orientación. 2) Maximizan el número de subrobots en los que puede dividirse un robot modular auto-configurable. 3) Son las más eficientes en cuanto a la energía que necesitan para desplazarse. 4) Permiten estudiar la locomoción de otros robots mediante la identificación de su estructura en ellos, encontrar nuevos modos de caminar y deducir la viabilidad del movimiento de ciertas configuraciones que a priori no se sabía si pueden desplazarse.

6. *Se han obtenido las relaciones entre los parámetros de los generadores y los parámetros cinemáticos de los robots de los grupos de estudio.* Para algunos modos de caminar se han propuesto las ecuaciones teóricas y para otros se muestran las relaciones empíricamente.

Estas relaciones permiten conocer cómo afecta cada generador a la locomoción. De una manera general, las amplitudes se relacionan con el tamaño del paso del robot (lineal o angular) durante un periodo y las diferencias de fases con la coordinación y el tipo de modo de caminar. Su conocimiento es importante para que los controladores de los niveles superiores puedan reaccionar ante los estímulos externos modificando la cinemática del robot, como por ejemplo reducir las amplitudes para pasar por debajo de un obstáculo o atravesar un tubo. Al hacerlo,

gracias a estas relaciones, sabemos que el paso del robot disminuirá, pero si no se modifican las diferencias de fases, el modo de caminar será el mismo.

7. *Se ha resumido el conocimiento sobre la locomoción de los robots ápodos de los grupos de estudio en 27 principios fundamentales, 11 para la locomoción en una dimensión, otros 11 para el desplazamiento en un plano y 5 para las configuraciones mínimas.*

Con estos principios se pretende que otros investigadores o ingenieros de aplicaciones puedan mover cualquier robot modular con topología de una dimensión de los grupos mencionados, tanto en simulación como en la realidad, de una manera fácil y rápida. Además, estos principios se pueden aplicar al desplazamiento de los robots ápodos autopropulsados, que aunque utilizan ruedas u orugas como medio principal de locomoción, también podrán hacerlo mediante movimientos corporales.

8. *Se ha demostrado que las soluciones encontradas al problema de la coordinación para lograr la locomoción de los robots ápodos son válidas para su utilización en robots reales.* Han sido probadas en cuatro prototipos de robots ápodos contruidos a partir de la unión de los Módulos Y1, diseñados específicamente para esta tesis. La verificación para robots con diferente número de módulos se ha realizado utilizando el simulador desarrollado.

8.2. Otras aportaciones

8.2.1. Sobre metodologías

El estudio de la locomoción de los robots modulares en general es una tarea titánica debido a que existen infinitas posibles configuraciones. Además, el número de ellas crece exponencialmente con la cantidad de módulos empleados.

Para abordar el problema se ha propuesto una clasificación de los robots modulares de tipo cadena en tres grandes familias, según las dimensiones de su topología. El grupo de los robots con topología de una dimensión (robots ápodos) se propone subdividirlo, a su vez, en otros tres grupos, según el tipo de conexión entre los módulos. Aparecen así los grupos con conexión viraje-viraje, cabeceo-cabeceo y cabeceo-viraje. En esta tesis se ha abordado el estudio detallado de estos dos últimos grupos.

Para el estudio de cada uno de estos grupos se propone una metodología basada en encontrar las ondas corporales continuas que definen la forma de todos los miembros del grupo. Estas ondas se parametrizan y se describen mediante puntos en un espacio de formas.

Se propone un método para resolver los problemas de la cinemática directa en inversa estableciendo relaciones entre los espacios de control y de formas, para cada uno de los modos de caminar encontrados. La búsqueda de los modos de caminar se hace mediante algoritmos genéticos sobre el espacio de control.

Se ha formulado el problema de las configuraciones mínimas y se describe la metodología empleada para su solución, basada en iterar sobre el número de módulos y realizar búsquedas con algoritmos genéticos.

Se ha propuesto una técnica de análisis y síntesis de movimientos basado en identificar las configuraciones mínimas en el modelo alámbrico de otros robots. Esto permite encontrar nuevos modos de caminar así como deducir la viabilidad del movimiento de ciertas configuraciones que a priori no se sabría si pueden desplazarse.

8.2.2. Sobre la locomoción en una dimensión

El estudio de la locomoción en una dimensión se ha realizado para los robots del grupo cabeceo-cabeceo, aunque es generalizable al grupo cabeceo-viraje gracias a la idea propuesta de bloques. Las ecuaciones se han calculado usando bloques genéricos de parámetros d y d_0 . Cada grupo de estudio tiene diferentes valores de estos parámetros que al sustituirlos en las ecuaciones genéricas permite obtener las expresiones particulares para ellos.

Se ha mostrado que sólo son necesarios los dos parámetros α y k para describir la forma de los robots ápodos de este grupo de cualquier longitud y determinar sus propiedades de locomoción. Tanto la estabilidad como el paso sólo dependen de ellas. La dimensión del espacio de control es de 2. Mediante las relaciones establecidas se obtienen la amplitud de los generadores (A) y la diferencia de fase ($\Delta\phi$) en el espacio de control.

Se ha propuesto una ecuación para el cálculo del paso del robot y un criterio para determinar la estabilidad. Ambos se pueden expresar bien usando los parámetros del espacio de formas (α , k) o bien en el espacio de control ($A, \Delta\phi$).

El mecanismo que hace posible el movimiento en línea recta es la aparición de una onda corporal que recorre el cuerpo del robot. Esta onda es de tipo serpentinoide. Los parámetros α , k describen esta onda global. El espacio de formas es de gran utilidad para especificar las restricciones en las dimensiones del robot, como por ejemplo limitar su altura para que pueda avanzar por el interior de un tubo.

8.2.3. Sobre la locomoción en un plano

El estudio de la locomoción en un plano se ha realizado para los robots del grupo cabeceo-viraje. Sólo son necesarios cinco parámetros para caracterizar la locomoción de al menos los ocho modos de caminar encontrados. Expresados en el espacio de formas son: α_v , α_h , k_v , k_h , $\Delta\phi_{vh}$, y en el de control: A_v , A_h , $\Delta\phi_v$, $\Delta\phi_h$ y $\Delta\phi_{vh}$.

El mecanismo que permite la locomoción del robot es debido a la aparición de una onda corporal tridimensional que es la resultante de la superposición de las ondas bidimensionales que se aplican a las articulaciones verticales y horizontales. El estudio de las ondas corporales permite conocer las dimensiones del robot durante el movimiento, los puntos de apoyo con el suelo para conocer su estabilidad y deducir las ecuaciones de los parámetros cinemáticos.

Se ha propuesto una clasificación de los tipos de ondas tridimensionales en diferentes familias, según cómo se realiza la propagación y la forma que adoptan. Cada modo de caminar está asociado a una onda de una familia diferente.

Los modos de caminar encontrados se han estudiado detalladamente a partir de la forma de la onda tridimensional. Tienen entre 1 y 3 grados de libertad. Para todos ellos se han propuesto bien ecuaciones teóricas para calcular los parámetros cinemáticos o bien se han deducido empíricamente en los experimentos.

El movimiento en trayectoria circular se obtiene mediante la superposición de una onda serpentinoide en las articulaciones verticales y una curva circular en las horizontales. Tiene tres grados de libertad, el ángulo del arco de la trayectoria y los parámetros α y k de la serpentinoide vertical.

El movimiento de rodar se caracteriza por la superposición de dos ondas circulares iguales y un desfase entre ellas de 90 grados. Tiene un único grado de libertad, α , para especificar el ángulo del arco del cuerpo. Del análisis del modelo alámbrico se ha comprobado que la rotación se realiza para cualquier valor de α . Sin embargo, si la sección del robot es cuadrada, lo que ocurre en los robots reales, se ha calculado el valor umbral α_{min} que determina si el movimiento será de rodar o un desplazamiento lateral de tipo remero.

El desplazamiento lateral está caracterizado por la superposición de dos ondas serpentinoides con el mismo número de ondulaciones. La onda tridimensional es del tipo isomorfa. Tiene dos grados de libertad α y k que se corresponden con los de la onda horizontal. Este movimiento se puede realizar en su versión inclinada en la que aparece un nuevo parámetro β para especificar esta inclinación.

El movimiento de rotación permite al robot cambiar la orientación de su eje longitudinal. Existen dos variantes, la rotación en S y en U. En la primera se caracteriza por la superposición de dos ondas serpentinoides (resultado una onda tridimensional no isomorfa) y la segunda por una serpentinoide y otra circular. Ambas tienen dos grados de libertad.

8.2.4. Sobre configuraciones mínimas

Se han encontrado las dos configuraciones mínimas que se mueven en una y dos dimensiones. La configuración *PP* está constituida por dos módulos de cabeceo y la *PYP* por tres, dos de cabeceo y el central de viraje. La primera se mueve en línea recta, hacia adelante o atrás y la segunda puede

realizar cinco modos de caminar diferentes: línea recta, trayectoria circular, desplazamiento lateral, rodar y rotar.

Todos los modos de caminar de la configuración *PYP* quedan caracterizados por las ecuaciones de sus subespacios de control que establecen relaciones entre los cuatro parámetros A_v , A_h , $\Delta\phi_v$ y $\Delta\phi_{vh}$. Los parámetros libres son los grados de libertad del movimiento. Se ha estudiado la cinemática de todos los movimientos y se han propuesto las ecuaciones para calcular el paso en función de sus parámetros de control.

El movimiento en línea recta tiene dos grados de libertad, A y $\Delta\phi$. Se ha propuesto un criterio para establecer el punto de trabajo donde la coordinación es la mejor. Se ha demostrado que para el modelo alámbrico, la mejor coordinación se consigue en el rango de $\Delta\phi$ entre 108 y 110.

El movimiento de rodar se ha estudiado en detalle y se ha deducido el valor de la amplitud mínima que se tiene que aplicar para que se pueda realizar, en función de las dimensiones del módulos. Tiene un único grado de libertad, A , que determina la forma que adopta el robot durante el movimiento. Para realizarlo las dos articulaciones verticales están en fase y la horizontal desfasada 90 grados.

El desplazamiento lateral permite que el robot se mueva hacia los lados manteniendo la misma orientación de su cuerpo. La coordinación es exactamente la misma que para el caso de rodar. Según la amplitud escogida se realizará un movimiento u otro.

El movimiento de rotar permite al robot cambiar la orientación de su cuerpo. Tiene un grados de libertad, A , que determina el paso angular a rotar. Las dos articulaciones verticales están en oposición de fase, y la horizontal desfasada 90 grados.

8.2.5. Sobre la plataforma robótica creada

Como se indicó en la introducción de la tesis, se ha desarrollado una plataforma constituida por mecánica, *hardware* y *software* para comprobar la validez de las soluciones propuestas.

Los módulos *Y1* diseñados para la construcción de los prototipos de robots ápodos, a diferencia de los módulos desarrollados en otros centros de investigación, son muy baratos y fáciles de construir. Constan de seis piezas de plástico que se obtienen mediante corte manual (prototipos) o láser (para tiradas mayores). Están pensados para ser usados con los servos Futaba 3003 o compatibles, uno de los modelos más baratos y extendidos. Además, son módulos libres. Los planos para su fabricación están disponibles.

La electrónica empleada para el posicionamiento de los servos es también *hardware* libre. Todos los esquemas, placa de circuito impreso (*PCB*) y ficheros de fabricación (*GERBER*) están disponibles. Entre otras cosas, esto permite que otros investigadores o ingenieros puedan modificar esta electrónica para incorporarla dentro de los módulos, con la idea de hacer robots autónomos o bien añadir sensores.

El entorno *software* desarrollado permite la simulación de cualquier robot ápedo con topología de una dimensión. También es *software* libre por lo que otros investigadores pueden reproducir los experimentos descritos en esta tesis o crear los suyos propios.

8.3. Líneas futuras

Como es habitual en la ciencia, los trabajos de investigación plantean más preguntas que las que resuelven. Es el caso de esta tesis. El autor la ha terminado con un cierto sentimiento de que no está finalizada. Y en verdad es así. Es tanto lo que queda por investigar que las aportaciones de este trabajo resultan insignificantes. El profesor Juan Pablo Rozas de la Universidad de Castilla la Mancha me comentó una vez: “*Has de saber que las tesis nunca terminan, sino que se matan. Mata la tuya ya*”.

Algunas de las líneas de investigación que dan continuidad a esta tesis son:

- *Estudio dinámico/energético de las topologías de una dimensión.* En esta tesis se ha representado la locomoción de los robots ápedos mediante puntos de trabajo en el espacio de formas y de control que determinan las dimensiones del robot durante el movimiento así como su paso (lineal o angular). Sin embargo, no se ha realizado ningún estudio energético. Se propone encontrar la ecuación del consumo y eficiencia energética en función del punto de trabajo. De esta manera se podrán seleccionar los movimientos donde el consumo sea menor o la eficiencia mayor. Es un problema muy importante para la materialización de la locomoción de robots autónomos.
- *Materialización de los controladores en hardware, usando FPGA.* Los controladores basados en generadores sinusoidales tienen la ventaja de que pueden ser realizados en diferentes tecnologías, entre ellas los circuitos digitales. El empleo de FPGA permite la materialización de estos controladores “por hardware”. Este enfoque de locomoción “mediante hardware” es más parecido a los sistemas biológicos donde todas las neuronas y músculos funcionan en paralelo y se sincronizan mediante conexiones entre ellas.
- *Desarrollo de nuevos controladores con realimentación.* Se ha resuelto el problema de la coordinación, de manera que se conocen cómo tienen que ser las oscilaciones de los módulos para la realización de diferentes movimientos. El siguiente problema a resolver es cómo mantener esta coordinación constante aunque cambie el medio por el que se desplace el robot. Para mantener un ritmo constante, será necesario incluir realimentación. Se proponen dos alternativas para abordar el diseño del controlador.

Una es el estudio de los controladores bioinspirados, de tipo CPG, que tengan en cuenta esta realimentación a la hora de generar las oscilaciones de salida. Esto está siendo estudiado actualmente por el grupo de Neurociencia computacional de la UAM, a cargo del profesor Pablo



Figura 8.1: La nueva generación de módulos GZ-I

Varona. En un trabajo preliminar, Herrero et al.[49] han probado la viabilidad de diferentes arquitecturas de CPG para la locomoción en línea recta de los robots del grupo cabeceo-cabeceo. Recientemente están añadiendo realimentación de la posición de los servos. Para llevar a cabo los experimentos han construido un prototipo de 8 articulaciones a partir de los Módulos Y1 creados en esta tesis y están añadiendo la electrónica necesaria para la lectura de las posiciones de los servos.

Por otro lado, siguiendo las ideas desarrolladas por Matellán et al.[95], se propone el desarrollo de un controlador para la obtención de comportamientos reactivos. La idea no es el diseño de este controlador, sino su generación automática mediante lógica borrosa y algoritmos genéticos.

- *Diseño de nuevos módulos.* Los módulos Y1 creados para la construcción de los prototipos de robots ápodos de esta tesis son sólo la primera generación. Para la investigación sobre la locomoción de nuevas configuraciones se necesitan unos módulos más robustos, que incorporen



Figura 8.2: Robot trepador *Skycleaner* (izquierda). Prototipo de la oruga trepadora que usa ventosas pasivas para agarrarse (centro). Experimentos de trepar realizados con *Hypercube* (derecha)

servos de mayor par, así como la electrónica y la baterías para la creación de robots autónomos. Ese es el objetivo de la nueva generación: los módulos *GZ-I*¹ que se están desarrollando en colaboración con el grupo TAMS de la universidad de Hamburgo[185]. Los prototipos están hechos de aluminio (figura 8.1).

- *Estudio de la locomoción de las configuraciones con otras topologías.* En este trabajo se ha abordado el estudio de la locomoción de los robots modulares, comenzando por las topologías de una dimensión. Queda pendiente el estudio de las topologías de dos y tres dimensiones. Hay que establecer nuevas clasificaciones, investigar sus propiedades de locomoción y encontrar las configuraciones mínimas de los nuevos grupos. En artículos previos[42] se encontró una configuración mínima de tres módulos con topología de dos dimensiones capaz de desplazarse en tres direcciones posibles del plano así como rotar, cambiando su orientación. En [185] se han realizado experimentos con una topología en estrella de 6 módulos, compuesta por los módulos *GZ*.

La herramienta de simulación diseñada en este tesis es sólo para topologías de 1D, sin embargo, Rafael Treviño[152], en su proyecto final de carrera, ha creado el *software MRSuite* que permite también simular topologías en 2D.

- *Desarrollo de orugas trepadoras.* Una de las áreas de robótica con aplicaciones industriales es la de los robots trepadores, donde se investigan y desarrollan robots capaces de moverse por superficies verticales para realizar inspecciones, encontrar escapes o realizar tareas de limpieza. Un grupo todavía no explorado son los robots trepadores de tipo oruga. Tienen la ventaja de que su cuerpo se puede flexionar para introducirse por tubos o cambiar entre dos superficies con diferentes inclinaciones. El estudio de la locomoción de las topologías de 1D se puede aplicar a la creación de este tipo de robots. En colaboración con el grupo *TAMS* de la Universidad de Hamburgo estamos trabajando en un prototipo que utiliza ventosas pasivas para el agarre en las

¹Más información: [http://tams-www.informatik.uni-hamburg.de/people/hzhang/projects/index.php?content=Modular %20robot](http://tams-www.informatik.uni-hamburg.de/people/hzhang/projects/index.php?content=Modular%20robot)

superficies verticales[184]. En la figura 8.2 se muestra el robot limpiador *Skycleaner*, diseñado por Houxiang Zhang. En la parte central se puede ver un dibujo del prototipo de oruga trepadora y en la derecha una foto de los experimentos preliminares realizados con el robot Hypecube, creado en esta tesis.

- *Desarrollo y materialización de comportamientos.* Con las aportaciones de esta tesis se puede convertir un robots ápedo de M módulos en un sistema móvil capaz de desplazarse a cualquier punto (x,y) del suelo y con cualquier orientación. El siguiente paso es dotarlo de sensores e implementar comportamientos para que sea autónomo. Una línea de trabajo irá encaminada en la utilización de una arquitectura basada en Jerarquías dinámicas de esquemas[6], desarrollada por Jose María Cañas en su tesis doctoral[7] y materializada en una plataforma *software* para el desarrollo de aplicaciones con robots móviles², que además es libre. Para ello se propone añadir a este entorno los componentes necesarios para que soporte los robots modulares.

²Más información: http://jde.gsync.es/index.php/Main_Page