

SÍNTESIS DE LA MARCHA ROBÓTICA MEDIANTE LA APROXIMACIÓN DEL CICLO LÍMITE: EL ROBOT BÍPEDO ESBiRRo

Juan Álvaro Gallego, Arturo Forner Cordero, Juan C. Moreno, Edyta A. Turowska, Jose L. Pons
Grupo de Bioingeniería - CSIC, gallego@iai.csic.es

Resumen

El hombre siempre se ha sentido atraído por la idea de diseñar máquinas semejantes a sí mismo. Estos robots humanoides podrían servir para sustituirnos en tareas molestas o peligrosas, para el cuidado de personas con discapacidad, o simplemente como medios de entretenimiento. Así, durante casi cuarenta años han ido apareciendo un gran número de robots humanoides. Estos prototipos estaban controlados como los manipuladores industriales, siguiendo unas trayectorias predefinidas garantizando la estabilidad local. Mientras los robots basados en esta aproximación lograban resultados espectaculares, aparecieron unas máquinas capaces de descender una pendiente sin actuación ni control, y con un movimiento casi humano, los robots dinámicos pasivos. Estas máquinas andantes inspiraron el diseño de robots, que confiando en su cinemática y dinámica intrínsecamente inestables, caminan forma veloz y eficiente. Son los llamados robots de Ciclo Límite. En el presente trabajo se revisan los pasos que se han dado para desarrollar este concepto, recorriendo las principales ideas y el estado del arte. Después se presenta al bípedo ESBiRRo, el robot de Ciclo Límite con mayor similitud con el hombre hasta la fecha. Con él, se intentará reproducir la capacidad del ser humano para andar en circunstancias adversas: caminar sobre terreno irregular, tropezar con obstáculos, sufrir empujones, etcétera. Por último, y tras describir tanto el diseño como el control de ESBiRRo, los autores presentan una reflexión sobre cuál puede ser el camino a tomar por la robótica humanoide para hacer su sueño realidad.

Palabras Clave: Robots humanoides, Zero Moment Point (ZMP), Robots Dinámicos, Ciclo Límite.

1 INTRODUCCIÓN

Los robots humanoides siempre han despertado una gran fascinación en la comunidad científica y la población en general. Además, durante las próximas décadas se espera la inclusión de estas máquinas en nuestro día a día, ya sea para asistir al ser humano en

ciertas tareas, como mano de obra, o simplemente como medio de entretenimiento.

Al principio de los setenta, la Universidad de Waseda presentó el primer robot antropomórfico capaz de caminar, el Wabot-1. A partir de entonces, diversos grupos de investigación han desarrollado un considerable número de robots humanoides, la mayoría de ellos en Japón, pero también en otros países, incluyendo España, [2]. Entre los más célebres cabe destacar a ASIMO [27], QRIO [8] o HRP-2 [11], fig. 1.

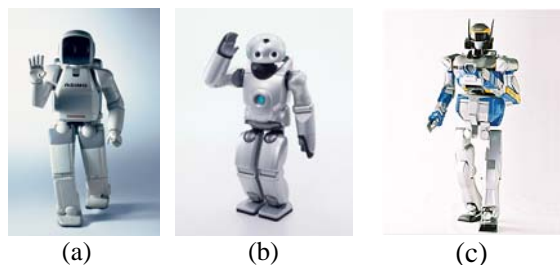


Figura 1: ASIMO (a), QRIO (b) y HRP-2 (c).

Todos estos robots se controlan de manera similar a los manipuladores industriales, basándose en control de trayectorias. La marcha se sintetiza como una trayectoria continua a lo largo del espacio, que el robot debe seguir manteniendo su estabilidad local. Durante años se ha satisfecho esta restricción usando el paradigma del “Punto de Momento Cero” (“Zero Moment Point”, ZMP) propuesto por Vukobratovic. El ZMP se define como el punto del suelo respecto al cual el momento creado por las fuerzas inerciales y gravitacionales no tiene componente en los ejes horizontales, [32]. Para garantizar la estabilidad, el ZMP debe mantenerse en el polígono de sustentación, la superficie que definen los pies en contacto con el suelo. Se han propuesto otros criterios de estabilidad como el “Indicador de la Rotación del Pie” (“Foot Rotation Indicator”, FRI), [10], aunque la mayoría de los robots humanoides utilizan el ZMP. Sea cual sea el criterio de estabilidad local utilizado, una vez garantizada ésta, el robot es capaz de caminar de forma segura.

Basándose en estas ideas los robots humanoides han logrado realizar una gran variedad de tareas, como subir o bajar escaleras, evitar obstáculos o manipular objetos. Sin embargo, todavía no se ha resuelto el problema de caminar en entornos no estructurados,

sobre superficies irregulares o bajo la influencia de perturbaciones externas, situaciones que el ser humano parece manejar con relativa facilidad, [7].

Centrándonos exclusivamente en la síntesis de la marcha, existe una aproximación alternativa (y opuesta) para resolver este problema. Al principio de los años noventa, McGeer demostró que un mecanismo con la cinemática y dinámica adecuadas podía bajar una pendiente suave sin ningún aporte externo de energía, [23]. McGeer bautizó a estos bípedos como “Robots Pasivos Dinámicos” (“Passive Dynamic Walkers”), sentando la base de la síntesis de la marcha considerada como un fenómeno intrínsecamente inestable.

Los prototipos desarrollados por McGeer tenían unas características que les hacían muy diferentes a los robots humanoides tradicionales. La particularidad más importante, es que tenían los pies curvos, lo que impedía que fueran controlables, ignorando la necesidad de estabilidad local. Por otra parte, a pesar de la ausencia de control, eran capaces de caminar de una forma visualmente mucho más parecida a la nuestra, con un consumo de energía considerablemente menor que los robots tradicionales.

En la figura 2 se muestra una reproducción de “Dynamite”, la máquina andante con rodillas de McGeer [24], y el bípedo tridimensional de Cornell, [3]. Éste último fue el primer “Passive Dynamic Walker” que no tenía dos pares de piernas: sus brazos le servían para lograr estabilidad lateral.

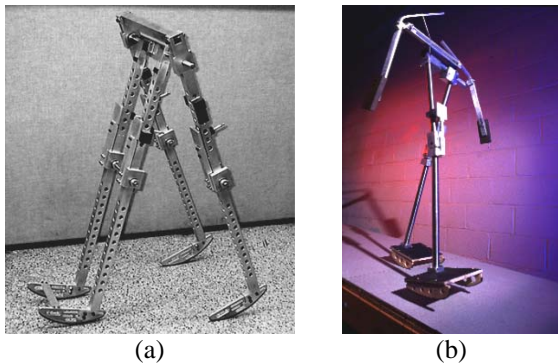


Figura 2: Dynamite, “Passive Dynamic Walker” con rodillas de McGeer (a) y “Passive Dynamic Walker” tridimensional de Cornell (b).

Durante los años posteriores, diversos grupos de investigación comenzaron a desarrollar sus propias versiones de las máquinas andantes de McGeer. Al mismo tiempo, se les fueron añadiendo actuadores para que fueran capaces de caminar sobre terreno plano. Además, la publicación de un artículo en la revista *Science* atrajo una mayor atención sobre esta línea de investigación, [5]. En él se exponía la utilidad de construir robots dinámicos cada vez más complejos para comprender cómo se genera la marcha en los seres humanos “de una forma constructi-

va”. Los tres robots presentados en este artículo tenían en común la actuación en tan solo una o dos de sus articulaciones y los pies curvos.

Recientemente se ha definido un marco formal que contiene a estos robots basados en “Passive Dynamic Walkers”, bautizándolos “Robots de Ciclo Límite” (“Limit Cycle Walkers”), debido a que se basan en la generación de marcha (nominalmente) cíclica, [12].

En el presente trabajo se describe el robot más novedoso que sigue la aproximación del Ciclo Límite, el bípedo ESBiRRo, figura 3. Dicho robot ha sido desarrollado por el Grupo de Bioingeniería, la TU Delft, Technaid y Össur hf dentro del marco del proyecto europeo ESBiRRo (IST-61-045301-STP), cuyo objetivo es lograr la generación de marcha eficiente y robusta, incorporando estrategias biomiméticas de reacción ante perturbaciones [8].



Figura 3: Primer prototipo del bípedo ESBiRRo.

Este artículo está organizado de la siguiente manera: primero se realiza una descripción más profunda del “Passive Dynamic Walking” incidiendo en sus conceptos básicos. Después se presenta el paradigma del “Limit Cycle Walking”, describiendo algunos de los robots más representativos y exponiendo las ideas básicas para su diseño. También se comparan los principios básicos de locomoción de los robots de Ciclo Límite con los del ser humano. En la sección posterior se describe al bípedo ESBiRRo desde un punto de vista multidisciplinar: tanto su concepción y diseño mecánico como su control. Por último, se realiza una discusión sobre la síntesis de marcha y se presentan unas conclusiones.

2 PASSIVE DYNAMIC WALKING

Como se dijo en la introducción, McGeer desarrolló una serie de máquinas andantes capaces de descender una pendiente suave sin ningún tipo de actuación ni control, basándose tan sólo en su diseño mecánico, [23, 24]. Su primer prototipo era tan simple como dos piernas rígidas dotadas de pies curvos y unidas mediante una articulación sin fricción que simulaba la cadera.

2.1 EL “SIMPLEST WALKER”

Inspirándose en este prototipo, García [9] propuso un modelo simplificado para entender la síntesis dinámica de la marcha cíclica. A este modelo se le conoce como “El modelo más Simple de la marcha” (“Simplest Walker”) y ha servido de base para numerosos estudios sobre la síntesis del movimiento, [19, 33, 36, 37]. La irreducible simplicidad del modelo de García ha hecho que se utilice para demostrar los conceptos básicos de la marcha dinámica. Se recomienda al lector el tutorial sobre simulación del “Simplest Walker” presentado en [35].

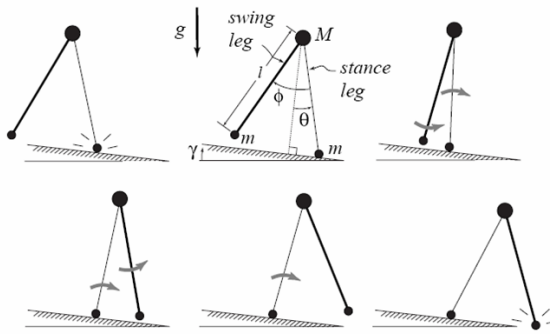


Figura 4: Un paso completo del “Simplest Walker” de García [9]. El segmento grueso representa la pierna que se encuentra en fase de oscilación. El segmento fino representa la pierna en apoyo.

La figura 4 muestra un paso completo del “Simplest Walker”. En ella se observa que una vez que la pierna fina comienza su fase de apoyo, ésta se comporta como un péndulo invertido, al igual en varios modelos de la marcha humana, por ejemplo en “la analogía del péndulo invertido”, [22]. Al final de la fase de oscilación la pierna en balanceo golpea el suelo, disipándose energía. Es la energía potencial que aporta el descenso de la rampa quien se encarga de compensar esta pérdida, lo que hace posible que el modelo (y los “Passive Dynamic Walkers”) anden.

2.2 ESTUDIO DEL MOVIMIENTO DE LAS MÁQUINAS DINÁMICAS

La marcha de cualquier máquina basada en “Passive Dynamic Walking” se evalúa entre dos pasos consecutivos. Comparando las condiciones iniciales en el paso $n+1$ con las del paso n , podemos intuir si el robot seguirá andando de forma estable o se caerá. Matemáticamente podemos expresarlo mediante la función de zancada (“stride function”), S [35], que no es más que un mapa de Poincaré de las condiciones iniciales del paso n en el paso $n+1$, (1). El requisito fundamental para que la marcha sea cíclicamente estable es que las condiciones iniciales en dos zancadas consecutivas sean lo suficientemente iguales.

$$\mathbf{v}_{n+1} = S(\mathbf{v}_n) \quad (1)$$

Si la marcha es perfectamente cíclica, las condiciones iniciales en $n+1$ serán exactamente iguales a las de n , con lo que \mathbf{v}_n es un punto fijo del mapa de Poincaré que denotaremos con \mathbf{v}^* , (2):

$$\mathbf{v}^* = S(\mathbf{v}^*) \quad (2)$$

En simulación, la búsqueda de un punto fijo se realiza de forma iterativa, normalmente mediante el método de Newton-Raphson, [9, 35]. En la práctica, para encontrar un punto fijo de nuestra máquina pasiva es necesario “lanzarla” con unas condiciones iniciales adecuadas para que alcance su Ciclo Límite, lo que requiere bastante paciencia y esfuerzo.

2.3 ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD

Una vez que el bípodo alcanza su Ciclo Límite lo seguirá eternamente sino actúan sobre él otras fuerzas externas. En presencia de pequeñas perturbaciones, existen un conjunto de estados que llevan al bípodo de vuelta a su marcha cíclica estable, es decir, a su Ciclo Límite. Este conjunto de estados se llama Cuenca de Atracción (“Basin of Attraction”), [28]. Si por el contrario, la perturbación fuerza al robot a dejar su Cuenca de Atracción, éste se caerá, más rápido cuanto más lejos esté de ella. Desgraciadamente, cuando se trabaja con prototipos reales es imposible caracterizar su Cuenca de Atracción ya que no se puede “lanzar” al robot desde todas las condiciones iniciales en todos los instantes de la marcha.

Una forma sencilla de determinar si un cierto estado inicial va a llevar al bípodo lo suficientemente cerca de su Ciclo Límite, es calcular los multiplicadores de Floquet, λ , los autovalores del Jacobiano \mathbf{J} empleado para linealizar el movimiento del robot en torno a su punto fijo, (3). Si alguno de ellos se encuentra fuera del círculo unidad, el bípodo se caerá, sino, seguirá caminando de forma más estable cuanto más cerca estén los autovalores de su origen. A este método se le conoce como estudio de la Estabilidad Cíclica, [12]:

$$\mathbf{v}^* + \Delta \mathbf{v}_{n+1} \approx S(\mathbf{v}^*) + \mathbf{J} \Delta \mathbf{v}_n, \quad \mathbf{J} = \frac{\partial S}{\partial \mathbf{v}} \quad (3)$$

La figura 5 resume de forma intuitiva los conceptos que se han presentado en esta sección: la curva cerrada representa el Ciclo Límite, y la superficie que la contiene a la Cuenca de Atracción. El plano es una sección de Poincaré del Ciclo Límite y su intersección con la superficie definida por la Cuenca de Atracción determina una curva que contiene todas las condiciones iniciales que generan una marcha cíclica estable.

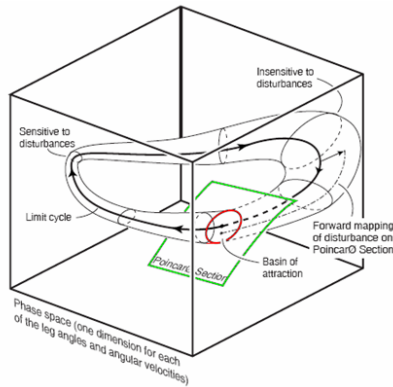


Figura 5: Abstracción en 3D de la marcha en Ciclo Límite (normalmente se requieren muchas más dimensiones para representar el movimiento). Se representan la Cuenca de Atracción y una sección de Poincaré. Adaptada de Wisse [34].

3 LIMIT CYCLE WALKING

A raíz de los prometedores resultados obtenidos por las máquinas pasivas de McGeer, comenzó a explorarse la posibilidad de sustituir la energía que aportaba la pendiente por algún tipo de actuador, [31]. Como se verá a continuación, los primeros prototipos incorporaban tan sólo actuación en una de sus articulaciones, típicamente en la cadera o el tobillo.

3.1 ESTADO DEL ARTE DE LOS ROBOTS DE CICLO LÍMITE

En la figura 6 se muestran los tres bípedos descritos en [5], ejemplos representativos del estado del arte de robots de Ciclo Límite.

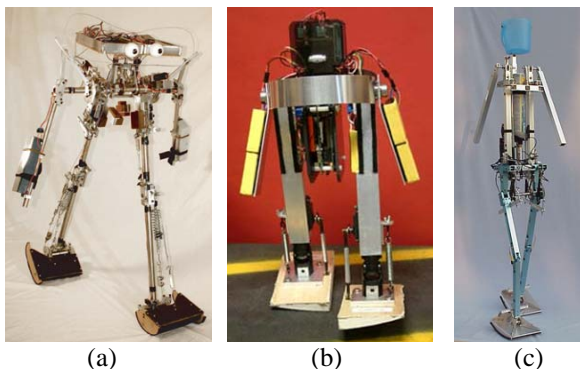


Figura 5: “Cornell Efficient Biped” (a), “Toddler” del MIT (b) y “Denise” de la TU Delft (c).

3.1.1 El bípedo eficiente de Cornell

El “Cornell Efficient Biped” fue diseñado para lograr la máxima eficiencia energética. De hecho, es la única máquina andante (no pasiva) que consume menos energía al andar que el hombre: su Coste de

Transporte (COT) definido como la energía consumida para mover una unidad de peso una unidad de distancia, es de 0.2, frente al 0.3 del ser humano o el 3.2 de ASIMO, [21]. El bípedo de Cornell compensa la energía que pierde al andar dando un impulso (“push off”) en el tobillo de la pierna en apoyo justo cuando la pierna en oscilación colisiona con el suelo, [4]. Este impulso es proporcionado por un único motor de CC situado en la zona proximal. En cuanto al control, una máquina de estados implementada con sesenta y ocho líneas de código en C++ son suficientes para que el robot ande establemente sobre terreno plano.

3.1.2 Toddler

El segundo bípedo de la figura 6 es Toddler, [30]. Este robot fue diseñado para poner a prueba la utilidad del aprendizaje motor en una máquina pasiva. El objetivo del proceso de aprendizaje de Toddler es encontrar una ley de control que establezca la marcha del robot en terreno plano, usando como función objetivo el patrón de marcha que aparece al descender de forma pasiva una pendiente. Mediante aprendizaje reforzado se logra que el robot sea capaz de adaptarse a distintos tipos de terreno, incluso aprendiendo a la vez que está andando. El sistema de sensores y actuadores de Toddler es el más complejo de entre los robots de Ciclo Límite debido a que necesita bastante información para aprender. Cuatro servomotores actúan en las diferentes articulaciones y otros tantos giroscopios miden una serie de ángulos y velocidades angulares. El control se realiza con un PC/104 a 700MHz.

3.1.3 Denise

Denise es un robot con características antropomórficas inspirado en cómo un patinete o una bicicleta mantienen su estabilidad, [36]. Así, mediante un diseño adecuado de la articulación del tobillo se acopla la inclinación lateral del robot con el giro respecto a su eje vertical, lográndose una estabilidad lateral suficiente como para que Denise ande. Para ello, la articulación del tobillo permite el giro en la dirección de la marcha (“roll”), [38]. La cadera está equipada con músculos McKibben, unos actuadores neumáticos que pretenden reproducir los músculos humanos. El parámetro crítico que determina la estabilidad de Denise es el ángulo que forman el pie y la pierna en el plano sagital, que está también relacionado con la velocidad mínima a la que tiene que caminar para no caerse. Denise se controla con una máquina de cuatro estados implementada en treinta líneas en un microcontrolador PIC. Un contacto bajo cada pie constituye la única entrada de control, al igual que en el bípedo de Cornell, [4].

En resumen, estos tres robots tienen una serie de características comunes. En primer lugar, fijándonos en su diseño mecánico, todos tienen pocos GdL, la mayor parte en el plano sagital. Respecto a las estrategias de control todas son muy sencillas, ya que incluso en Toddler el aprendizaje reforzado se usa para sintonizar un número reducido de parámetros. Además la cantidad de información sensorial necesaria para el control de la marcha es muy reducida: recordar que en el robot de Cornell y en Denise tan sólo se usa un contacto bajo cada pie.

3.2 DEFINICIÓN FORMAL DE “LIMIT CYCLE WALKING”

En la sección anterior se han presentado tres robots basados en “Passive Dynamic Walkers” que comparten una serie de ideas comunes para lograr producir marcha cíclica eficiente y estable. Como se mencionó en la introducción a estos robots se les ha llamado “Limit Cycle Walkers”, concepto que se define como *“una secuencia nominalmente periódica de pasos, que es estable como un todo pero no localmente estable en cada instante de tiempo”*, [12].

La frase “secuencia nominalmente periódica de pasos” expresa que idealmente cada paso es una repetición exacta del anterior, lo que se traduciría en una curva cerrada en el espacio de estado, similar a la representada en la figura 5. En la práctica, sin embargo, lo que se intenta es que el robot se mantenga lo más cerca posible de ella, sin salirse de su Cuenca de Atracción.

La otra idea fundamental de la definición, es que la marcha “no es localmente estable en cada instante de tiempo”, evitando la necesidad de forzar al robot a seguir de forma exacta unas trayectorias mediante complejos lazos de realimentación. Así se relaja la restricción de controlabilidad local, logrando una marcha “estable como un todo” que tiende a mantenerse en la vecindad del Ciclo Límite.

3.3 ¿CÓMO SE DISEÑA UN ROBOT DE CICLO LÍMITE?

Sorprendentemente, los diseñadores de Robots Pasivos y de Ciclo Límite no realizan complejas simulaciones por ordenador de sus máquinas andantes antes de construirlas, [4, 23, 38]. Al contrario, simulando modelos muy sencillos basados en el “Simplest Walker”, se logra entender cómo la modificación de ciertos parámetros como la distribución de masas, el radio de curvatura de los pies o la longitud del tronco influye en el movimiento. Además, se procura que estos modelos simplificados sean “lo más pasivos posibles” para evitar el problema de modelado de los actuadores, aunque no siempre sea posible, [37].

Una vez realizadas estas pequeñas simulaciones, comienza la construcción de un prototipo, teniendo en cuenta unos pocos principios básicos como “mante-

ner la masa lo más proximal posible” o que “un número excesivo de GdL implica añadir peso innecesario”. Después, comienzan los pequeños ajustes de parámetros del prototipo, [38]. Por último se valora la “calidad de la marcha”, típicamente midiendo la robustez ante perturbaciones. Tradicionalmente se ha utilizado el máximo desnivel que el robot puede atravesar sin caerse, aunque recientemente se han propuesto medidas más rigurosas, [13].



Figura 7: Modelos reducidos basados en el “Simplest Walker” usados para el diseño de MIKE, MAX y Denise. Adaptada de [38].

En la figura 7 se muestran los modelos simplificados utilizados para simular tres robots de Ciclo Límite, MIKE [33], MAX [37], y Denise [38]. Se puede ver que MIKE parte del “Simplest Walker”, mientras que para construir a MAX se estudió cómo afecta añadir un cuerpo a la estabilidad del “Simplest Walker”. En este caso el torso se mantiene en la bisectriz de las dos piernas mediante una restricción cinemática, y se añade un muelle para garantizar la estabilidad, que sirve además para controlar la cadencia del paso. Por último, el modelo de Denise es una versión en 3D del “Simplest Walker” en el que se valora cómo afecta el ángulo que forman el pie y la pierna en el plano sagital en la estabilidad total del bípodo.

3.4 ¿CAMINAN LOS ROBOTS DE CICLO LÍMITE COMO LOS SERES HUMANOS?

Desgraciadamente, a día de hoy todavía no existe una comprensión total de los mecanismos que rigen la marcha humana, ya que involucra distintos sistemas complejos interactuando entre sí, como el sistema músculo-esquelético o el sistema nervioso. Sin embargo, se sabe que la dinámica intrínseca de las piernas tiene una gran influencia en nuestro movimiento, [23]. De hecho, la velocidad preferente de la marcha viene dada en gran medida por la frecuencia de resonancia de las éstas, [19]. Además, la marcha es un fenómeno intrínsecamente inestable, donde la pierna en apoyo se comporta como un péndulo invertido, [22].

En cuanto al control de la marcha, existen abundantes evidencias neurofisiológicas que revelan que los movimientos rítmicos básicos se originan en grupos de neuronas situados en la médula espinal, los llamados Generadores Centrales de Patrones (GCPs). Estos circuitos neuronales son capaces de generar actividad

rítmica de manera autónoma, aunque pueden ser modulados mediante entradas corticales o sensoriales, [1]. Simulaciones por ordenador refuerzan la idea de que la marcha humana es naturalmente cíclica debido a la interacción entre el sistema músculo-esquelético, los GCPs y el entorno, [29].

Tampoco debemos olvidar el papel que juegan los reflejos para cerrar el lazo de control, sirviendo como realimentación continua, de baja ganancia y con considerable retardo. De hecho, en [20] Kuo expuso la importancia relativa de la realimentación y la prealimentación en el control de la marcha. Simulando el control de un péndulo, demostró que mediante realimentación pura el controlador es muy sensible a imperfecciones en el sistema sensorial, y que con prealimentación pura el controlador no es capaz de reaccionar ante perturbaciones. Sin embargo, un algoritmo de control híbrido puede manejar ambos problemas.

Un último elemento que juega un papel fundamental en la generación y control de movimiento en los seres humanos son los modelos internos, un conjunto de representaciones inversas y directas del sistema motor presentes en el cerebelo, [39]. Los modelos inversos proporcionan las señales de control para lograr una determinada trayectoria, mientras que los directos predicen las consecuencias de las acciones que se están llevando a cabo, compensando el gran retardo de en la realimentación.

Si nos fijamos en los robots de Ciclo Límite, vemos que se apropian de muchas de estas ideas. En primer lugar, y como herencia directa de las máquinas pasivas, su cinemática y dinámica condicionan en gran medida su marcha, que puede asemejarse a una caída continua interrumpida por la colisión del miembro en oscilación con el suelo, [34]. Además las máquinas de estados que se usan para controlar los robots de Ciclo Límite [4, 17, 38] pueden considerarse versiones discretas de los GCPs. Prototipos más recientes, incorporan también una cierta realimentación en su control, como se verá en la sección siguiente, [14, 15, 17]. Por otra parte, hasta la fecha no existen prototipos que implementen modelos internos.

4 EL BÍPEDO ESBiRRO

Los robots de Ciclo Límite han logrado grandes resultados en cuanto a eficiencia y apariencia humana al caminar, pero todavía deben demostrar su valía en otro problema fundamental de la marcha: andar sobre superficies irregulares y en entornos no estructurados. Este es el objetivo principal del proyecto ESBiRRO: implementar reacciones de recuperación biomiméticas en robots de Ciclo Límite, para evitar que el robot se caiga cuando es forzado a abandonar su Cuenca de Atracción, [8].

Para poner a prueba las estrategias de recuperación, se aborda el diseño del robot de Ciclo Límite con la apariencia más humana hasta la fecha.

4.1 DISEÑO CONCEPTUAL

El primer parámetro a definir a la hora de diseñar un robot de Ciclo Límite es su número de GdL. Observando al ser humano, se ve que las articulaciones que juegan un rol más importante son las de la cadera, la rodilla y el tobillo en el plano sagital. Además, se ha demostrado que el hombre necesita control activo de la estabilidad lateral, proporcionado en gran medida por la situación medio-lateral de los pies, [6]. Así el bípedo ESBiRRO incorpora un único GdL en la cadera que permite controlar el ángulo que forman las piernas en el plano frontal (abducción-adducción), y una articulación que permite la inversión-eversión del tobillo de forma pasiva.

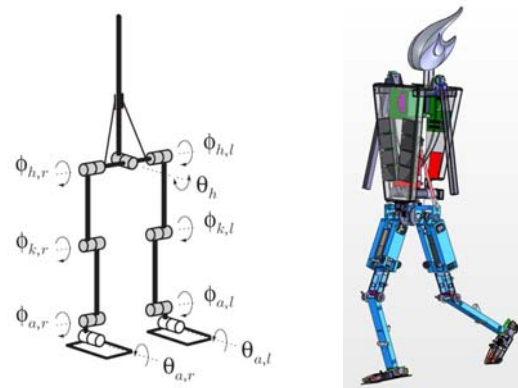


Figura 8: Grados de Libertad y apariencia del primer prototipo del bípedo ESBiRRO.

En la figura 8 se ilustran los GdL, y el diseño CAD del primer prototipo ESBiRRO. Las articulaciones $\phi_{i,j}$ corresponden a los GdL en el plano sagital, mientras que $\theta_{a,j}$ representan la inversión-eversión del tobillo. La articulación θ_h junto con la deslizadora representa el mecanismo de abducción-adducción de la cadera.

4.2 SENSORES, ACTUADORES Y SISTEMA DE CONTROL

Los aspectos más críticos en el diseño de cualquier tipo de sistema robótico son los actuadores y las fuentes de alimentación, ya que condicionan el tamaño, peso y autonomía del sistema, [25]. En el caso concreto de un robot basado en una máquina pasiva, existe una restricción fundamental a la hora de elegir el tipo de actuador: la reversibilidad. Si un actuador no es reversible, se altera la dinámica natural del bípedo, con lo que no se puede aprovechar las ventajas de la marcha en Ciclo Límite, [17].

Así se decide utilizar motores tradicionales de CC siguiendo la aproximación de la “Actuación Elástica en Serie” (AES), [26]. Añadiendo un elemento elás-

tico entre el conjunto motor-reductora y la articulación, se consiguen gran número de ventajas: mayor capacidad para absorber impactos, capacidad de realizar control de par midiendo la elongación del muelle y reducción de la inercia reflejada. En la figura 9 se presenta el diagrama de bloques de un AES y los resultados de una prueba ilustrando este concepto: mientras que el motor de CC no permite a la pierna oscilar libremente (línea continua), añadiendo un muelle, se respeta la dinámica natural del péndulo (línea discontinua).

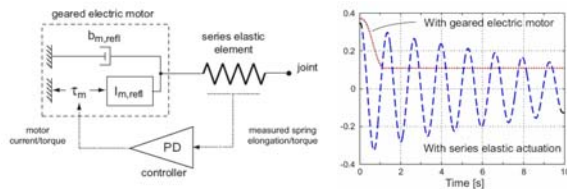


Figura 9: Diagrama de bloques de la Actuación Elástica en Serie. Resultado experimental probando que se respeta la dinámica original del sistema.

En cuanto al sistema sensorial, ESBiRRO se ha diseñado teniendo en mente que caminará mediante control de par o control de posición, dependiendo de la articulación y la fase de la marcha. Para implementar el control de posición tan sólo es necesario un encóder en cada articulación, mientras que para realizar control de par se necesita medir la elongación del muelle, por lo que se requiere otro encóder en el lado del motor. Se ha dicho que el control de la situación lateral de los pies es un aspecto fundamental para garantizar la estabilidad lateral de la marcha [6, 16]. También lo es medir la inclinación del cuerpo en el plano sagital, para que no adquiera una inclinación excesiva, provocando una caída. Esta información la da un órgano vestibular que consta de tres acelerómetros y tres giroscopios MEMS situados en el tronco. Para completar el sistema sensorial de ESBiRRO, el robot cuenta con dos interruptores en cada pie, uno en la parte frontal y otro en la posterior, permitiendo detectar la colisión del tacón y el momento en que la puntera se levanta del suelo. Los algoritmos de control corren en un PC/104 con Linux RT a 1000Hz. La alimentación la proporcionan dos baterías LiPo, una a la parte de potencia y otra a la de control. Con ellas, el robot es capaz de caminar más de media hora.

4.3 ALGORITMO DE CONTROL

El controlador de ESBiRRO consiste en una máquina de estados que se encarga de decidir en que fase del ciclo de la marcha se encuentra el robot, [17]. Esta máquina de estados simula el comportamiento de un GCP de forma discreta. En cada una de las fases se implementan distintas estrategias de control en cada articulación.

Se distinguen cuatro fases de la marcha: 1) doble apoyo con la pierna izquierda adelantada, 2) apoyo simple de la pierna izquierda, 3) doble apoyo con la pierna derecha adelantada y 4) apoyo simple de la pierna derecha.

A continuación, se explica brevemente el control de cada articulación. Mediante el control del tobillo se pretende lograr un impulso suficiente al final de la fase de apoyo, un impacto suave al final de la oscilación y una separación suficiente entre el pie y el suelo durante la oscilación, [14]. En cuanto a la rodilla, las dos piernas están completamente estiradas durante la fase de doble soporte, mientras que durante la oscilación, tan sólo lo está la pierna en apoyo, la otra se flexiona para evitar que el pie tropiece con el suelo. El control de la cadera tiene como objetivo mantener el cuerpo erguido, usando la señal de orientación proveniente del órgano vestibular y una trayectoria prealimentada, [15]. El GdL de abducción-adducción de la cadera se encarga de controlar la situación lateral de los pies en los últimos 300ms de la fase de oscilación, [16]. También asegura una separación suficiente entre ellos para que no choquen entre sí al principio de la fase de balanceo.

4.4 EXPERIMENTOS DE MARCHA

En la figura 10 se muestran las trayectorias y los pares aplicados en cada una de las articulaciones de ESBiRRO durante diez pasos. La figura 11 da información de la orientación del robot, [17].

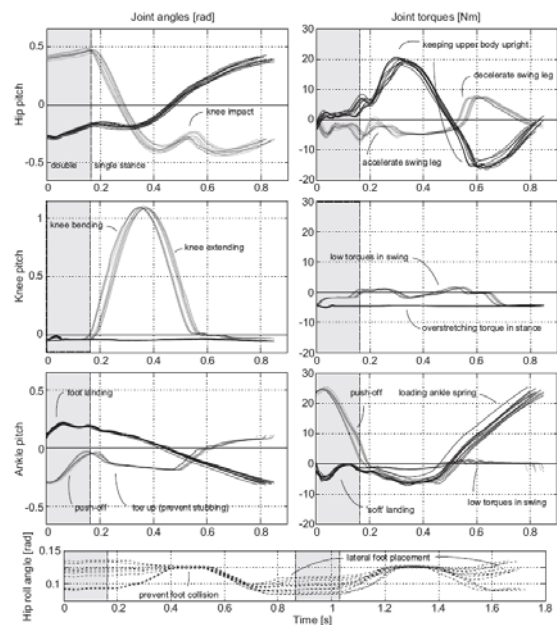


Figura 10: Ángulos pares medidos durante 10 pasos de ESBiRRO. Las líneas gruesas representa la pierna en apoyo, las finas la pierna en oscilación.

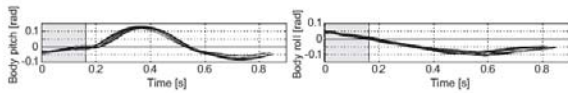


Figura 11: Inclinación y ángulo en la dirección de la marcha de los pasos representados en la figura 9.

5 DISCUSIÓN

Los robots basados en las máquinas pasivas andantes de McGeer han demostrado ser capaces de caminar de una forma eficiente y visualmente atractiva. Además, mediante las transiciones violentas que ocurren al impactar el pie en oscilación, se logra aumentar la velocidad de la marcha aprovechando la dinámica natural del sistema. Basándose en la intuición, se espera que la marcha en Ciclo Límite aumente la estabilidad ante perturbaciones, [12], pero esto está aún por demostrar. De hecho éste es el objetivo que se persigue con el bípodo ESBiRRo, utilizarlo como plataforma experimental para implementar estrategias de recuperación biomiméticas, [7, 8]. Para ello se le ha dotado de actuadores flexibles y de una mayor capacidad sensorial, que probablemente se amplíe en futuras versiones.

La aproximación del Ciclo Límite está sirviendo no sólo para ampliar la gran familia de los robots humanoides, sino sobretodo, para entender distintos aspectos de la marcha humana. La construcción de prototipos cada vez más complejos, ha ayudado a aumentar nuestra comprensión de un gran número de cuestiones sobre nuestra forma de caminar, como el control del tronco [15, 37], la estabilidad lateral [4, 16, 36] o el rol del tobillo al principio de la fase de oscilación [14]. No en vano el objetivo es construir robots para entender al hombre, [5].

A pesar de todo, los robots de Ciclo Límite no deben ser vistos como un “rival” de los humanoides basados en control de trayectorias. De hecho sería interesante sacar partido de las virtudes de cada aproximación, desarrollando una nueva generación de robots que incorpore las ventajas de ambas teorías [21]. No hay que olvidar que los robots de control de trayectorias [2, 11, 18, 27] han sido capaces de resolver problemas muy complejos como la manipulación de objetos, el ascenso y descenso de escaleras o evitar obstáculos.

Por tanto parece interesante desarrollar robots que caminen normalmente en Ciclo Límite por motivos de eficiencia energética y velocidad, y que se sirvan de un control más restrictivo para situaciones complejas, como pasar por zonas muy estrechas, o caminar por escaleras. Además, podrían incorporar los sistemas de manipulación de los humanoides basados en control de trayectorias.

6 CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado la aproximación del Ciclo Límite como una aproximación alternativa a la síntesis tradicional de la marcha basada control de trayectorias. Los autores creen que una combinación de ambas ayudará a incorporar robots humanoides en nuestras vidas en un futuro relativamente cercano.

Además se ha descrito al bípodo ESBiRRo, el robot de Ciclo Límite más reciente, comentando su diseño conceptual, su sistema de sensores y actuadores y su estrategia de control. Se muestran datos de experimentos de marcha estable, que demuestran la gran habilidad para caminar de este prototipo.

Agradecimientos

Los autores quieren dar las gracias a Martijn Wisse y Daan Hobbelen (Delft UT) por nuestras conversaciones sobre “Dynamic Walking”, y por sus valiosos consejos, que tanto han contribuido a los resultados que aquí se presentan.

El trabajo presentado en este artículo se ha realizado con el apoyo económico de la Comisión de la Unión Europea, dentro del 6º Programa Marco, convocatoria ICT “Cognitive Systems, Interaction, Robotics”, Acción Clave 2.6.1 “Advanced Robotics”, mediante el contrato IST-61-045301-STP, “ESBiRRo-Biomimetic actuation, sensing and control technology for limit cycle bipedal walkers

Referencias

- [1] Azevedo C., Espiau B., Amblard B., Assaiante C., (2007) “Bipedal locomotion: toward unified concepts in robotics and neuroscience”, *Biological Cybernetics*, pp. 209-228.
- [2] Cabas L., de Torre S., Arbulu M., Balaguer C., (2004) “Development of the Light-Weight Human Size Humanoid Robot RH-0”, *International Conference on Climbing and Walking Robots*, pp. 643-653.
- [3] Collins, S.H., Wisse, M., Ruina, A., (2001) “A 3-D Passive Dynamic Walking robot with two legs and knees”, *The International Journal of Robotics Research*, pp. 607-615.
- [4] Collins S.H., Ruina A., (2005) “A bipedal walking robot with efficient and human like gait”, *International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1983-1988.
- [5] Collins S., Ruina A., Tedrake R., Wisse M., (2005) “Efficient bipedal robots based on Passive Dynamic Walkers”, *Science*, pp. 1082-1085.

- [6] Donelan J.M., Shipman D.W., Kram R., Kuo A.D., (2004) "Mechanical and metabolic requirements for active lateral stabilization in human walking", *Journal of Biomechanics*, pp. 827-835.
- [7] Forner-Cordero A., Koopman H.F.J.M., van der Helm F.D.T., (2003) "Multiple-step strategies to recover from stumbling perturbations", *Gait & Posture*, pp. 47-59.
- [8] Forner Cordero A., Pons J.L., Wisse M., (2008) Basis for bioinspiration and biomimetism in wearable robots, en el libro *Wearable Robots: biomechatronic exoskeletons*, John Wiley & Sons, Inglaterra.
- [9] García M.S., Chatterjee A., Ruina A., Coleman M.J., (1998) "The Simplest Walking Model: Stability, complexity and scaling", *ASME Journal of Biomechanical Engineering*, pp. 281-288.
- [10] Goswami A., (1999) "Postural stability of biped robots and the Foot-Rotation Indicator", *The International Journal of Robotics Research*, pp. 523-533
- [11] Hirukawa H. et al, (2004) "Humanoid robotics platforms developed in HRP", *Robotics and Autonomous Systems*, pp. 165-175.
- [12] Hobbelen D.G.E., Wisse M., (2007) Limit Cycle Walking, en el libro *Humanoid Robots, Human-like Machines*, I-Tech Education and Publishing, Asutria.
- [13] Hobbelen D.G.E., Wisse M., (2007) "A disturbance rejection measure for Limit Cycle Walkers: The Gait Sensitivity Norm", *IEEE Transactions on Robotics*, pp. 1213-1224.
- [14] Hobbelen D.G.E., Wisse M., (2008) "Ankle actuation for Limit Cycle Walkers", *The International Journal of Robotics Research*, pp. 709-735.
- [15] Hobbelen D.G.E., Wisse M., (in review) "Upper body feedback and feedforward control in Limit Cycle Walkers", *IEEE Transactions on Robotics*.
- [16] Hobbelen D.G.E., Wisse M., (in review) "Active lateral foot placement for 3D stabilization of a Limit Cycle Walker", *International Journal of Humanoid Robotics*.
- [17] Hobbelen D.G.E., de Boer T., Wisse M., (in review) "System overview of bipedal robots Flame and Tulip: tailor-made for Limit Cycle Walking", *International Conference on Intelligent Robots and Systems*.
- [18] Ishida T., (2004) "Development of a small biped entertainment robot QRIO", *International Symposium on Micro-Nanomechatronics and Human Science*, pp. 23-28.
- [19] Kuo, A.D., (2001) "A simple model predicts the step length-speed relationship in human walking", *ASME Journal of Biomechanical Engineering*, pp. 264-269.
- [20] Kuo A.D., (2002) "The relative roles of feedforward and feedback in the control of rhythmic movements", *Motor Control*, pp. 129-145.
- [21] Kuo A.D., (2007) "Choosing your steps carefully", *IEEE Robotics & Automation Magazine*, pp. 18-29.
- [22] Kuo A.D., (2007) "The six determinants of gait and the inverted pendulum analogy: A dynamic walking perspective", *Human Movement Science*, pp. 617-656.
- [23] McGeer T., (1990) "Passive Dynamic Walking" *The International Journal of Robotics Research*, pp. 62-82.
- [24] McGeer T., (1990) "Passive Walking with knees" *International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1640-1645.
- [25] Pons J.L., (2005) *Emerging Actuator Technologies: A Micromechatronic Approach*, John Wiley & Sons, Inglaterra.
- [26] Pratt G.A., Williamson M.M., (1995) 'Series Elastic Actuation', *International Conference on Intelligent. Robots and Systems*, pp.399-406.
- [27] Sakagami Y., Watanabe R., Aoyama C., Matsunaga S., Higaki N., Fujita M., (2002) "The intelligent ASIMO: system overview and integration", *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2478-2483.
- [28] Schwab A.L., Wisse M., (2001) "Basin of Attraction of the Simplest Walking model", *ASME International Conference on Noise and Vibration*.
- [29] Taga G., Yamaguchi Y., Shimizu H., (1991) "Self-organized control of bipedal locomotion by neural oscillators in unpredictable environment", *Biological Cybernetics*, pp. 147-159.

- [30] Tedrake R., Zhang T.W., Seung H.S., (2004) "Stochastic policy gradient Reinforcement Learning on a simple 3D Biped", *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2849-2854.
- [31] van der Linde R.Q. (1999) "Passive bipedal walking with phasic muscle contraction", *Biological Cybernetics*, pp. 227-237.
- [32] Vukobratovic M., Borovac B., (2004) "Zero Moment Point - Thirty five years of life", *International Journal of Humanoid Robotics*, pp. 157-173.
- [33] Wisse M., van Frankenhuyzen J., (2003) "Design and Construction of MIKE; a 2D autonomous biped based on passive dynamic walking", *Conference of Adaptive Motion of Animals and Machines*.
- [34] Wisse M., (2004) "Essentials of Dynamic Walking", PhD Thesis, Delft, The Netherlands.
- [35] Wisse M., Schwab A.L., (2004) "First steps in Passive Dynamic Walking", *International Conference on Climbing and Walking Robots*, pp. 745-756.
- [36] Wisse M., Schwab A.L., (2005) "Skateboards, bicycles, and 3D biped walking machines; Velocity dependent stability by means of lean-to-yaw coupling", *The International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 417-429.
- [37] Wisse M., Hobbelen D.G.E., Schwab A.L., (2007) "Adding an upper body to Passive Dynamic Walking robots by means of a hip bisecting mechanism", *IEEE Transactions on Robotics*, pp. 112-123.
- [38] Wisse M., Feliksdal G., van Frankenhuyzen J., Moyer B., (2007) "Passive-based Walking robot", *IEEE Robotics & Automation Magazine*, pp. 52-62.
- [39] Wolpert D.M., Miall R.C., Kawato M., (1998) "Internal models in the cerebellum", *Trends in Cognitive Sciences*, pp. 338-347.