

# Simulación Robótica del Ciclo de Marcha Humana

Miguel A. LLaja Silva<sup>1</sup>, Ignacio Dorna<sup>2</sup>, Jorge Bauer<sup>3</sup>

Universidad Tecnológica Nacional, Buenos Aires, Argentina

1: miguelandres17@hotmail.com, 2: dornaignacio@yahoo.com.ar, 3: doktorjbauer@yahoo.com.ar

**Resumen**-En el presente trabajo se muestra la implementación de un sistema de simulación robótica para el ciclo de marcha humana en el plano sagital, y una introducción al análisis del ciclo de marcha en 3 planos (sagital, frontal y transversal) de forma simultánea. Los métodos que se usaron para obtener datos sobre la marcha, tales como: captura de movimiento por procesamiento de imágenes e imágenes representativas al ciclo de marcha, la simulación usa los ángulos o posiciones obtenidos por estos métodos. Se muestra las características del modelo humanoide usado en el programa de simulación Marilou Anycode 2010 y la interfaz usada para la comunicación entre los datos de la marcha humana y el simulador.

## I. INTRODUCCIÓN

Actualmente la simulación por computadora está tomando cada vez más preponderancia dado que evita gastos en la fabricación de prototipos y se puede realizar ensayos simulados sin temor a perder material, que suele ser de precios elevados. La globalización de la información ha facilitado el acceso a simuladores robóticos que anteriormente eran usados por grupos reducidos.

En lo que se refiere a robótica, el uso de simuladores está abriendo puertas a nuevos desarrollos en el ámbito de la vida cotidiana, se habla de robots humanoides para la asistencia a discapacitados o como ayuda y compañía a personas de avanzada edad, también de prótesis robóticas o exoesqueletos robóticos.

Con este contexto por delante, se plantea el estudio de la marcha humana orientada a robots humanoides y exoesqueletos, teniendo en cuenta entonces los distintos tipos de actuadores y sensores que se usan en estos sistemas.

Un robot humanoide es un robot con formas antropomórficas, el cual puede tener torso, cabeza brazos y piernas, o solo alguna parte en especial, como por ejemplo de la cintura para arriba, uno de los más avanzados y representativos robots humanoides es el fabricado por Honda, ASIMO Fig. 1a.

Un exoesqueleto robótico es un sistema que funciona parecido al sistema esquelético humano, pero que se aplica de forma externa al cuerpo, este puede ser para brazo, piernas o un sistema que cubra todo el cuerpo, un ejemplo es ReWalk Exoskeleton Fig. 1b.

Pero ¿cómo se estudia el comportamiento que tiene un robot humanoide o un exoesqueleto para moverse como un ser humano normal? anteriormente, se trabajaba directamente con



Fig. 1. Sistemas Robóticos: Robots Humanoides(a) y Exoesqueletos (b).

prototipos, ahora se puede hacer uso de simuladores, estos simuladores no reemplazan a los prototipos, pero si reducen la cantidad de prototipos previos al desarrollo final.

En el presente trabajo se presenta la implementación de un sistema de simulación robótica usando un modelo humano, para ensayar el ciclo de marcha humana.

## II. CICLO DE MARCHA HUMANA

La marcha normal del ser humano es cíclica, y los movimientos que lo componen se producen en 3 planos llamados: plano sagital, frontal y transversal Fig. 2

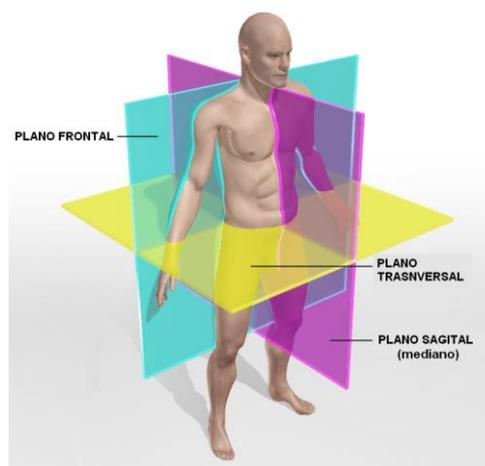


Fig. 2. Planos del ciclo de marcha humana

El ciclo de marcha está compuesto de 2 fases secuenciales, la fase de apoyo y la fase de balanceo, a su vez el ciclo está dividido en 8 eventos, 5 eventos de apoyo y 3 eventos de balanceo. Las fases se refieren al pie derecho, dado que el análisis del pie izquierdo es el mismo [1].

A. La fase de apoyo se divide en:

1. Contacto inicial

En este evento el centro de gravedad del cuerpo está en su punto más bajo y es cuando el pie derecho da su primer contacto con el piso Fig. 3a.

2. Respuesta a la carga

Este intervalo va desde que toca el pie derecho al piso hasta que toda la planta del pie está tocando el piso porcentualmente va desde el 0% al 10% del ciclo de marcha Fig. 3b.

3. Apoyo medio

Este intervalo va desde que el pie izquierdo deja el piso hasta que la proyección del centro de gravedad del cuerpo sobre el piso, está en la mitad del pie derecho, porcentualmente va desde el 10% al 30% del ciclo de marcha Fig. 3c.

4. Fin del apoyo

Este intervalo va desde que la proyección del centro de gravedad sobre el piso, pasó la mitad del pie derecho hasta que el pie izquierdo toca el piso, porcentualmente va desde el 30% al 50% del ciclo de marcha Fig. 3d.

5. Pre-balanceo

Este intervalo va desde que el pie izquierdo toca el piso hasta que el pie derecho deja el piso, porcentualmente va desde el 50% al 60% del ciclo de marcha Fig. 3e.

B. La fase de balanceo se divide en:

6. Balanceo inicial

Este intervalo inicia la aceleración del pie derecho y va desde que el pie derecho deja el piso hasta que la proyección del centro de gravedad sobre el piso está en la mitad del pie izquierdo, porcentualmente va desde el 60% al 70% del ciclo de marcha Fig. 3f.

7. Balanceo medio

Este intervalo va desde que la proyección del centro de gravedad sobre el piso pasó la mitad del pie izquierdo hasta que el pie derecho esta justo delante de la pierna izquierda, porcentualmente va desde el 70% al 85% del ciclo de marcha Fig. 3g.

8. Fin del balanceo

Este intervalo es de desaceleración del pie derecho y va desde que el pie pasa delante de la pierna izquierda hasta que toca el piso, porcentualmente va desde el 85% al 100% del ciclo de marcha Fig. 3h.

### III. ESTRUCTURA DEL SISTEMA

El sistema realizado para la simulación cuenta con 3 partes diferenciadas, el ingreso de información, la interfaz de control y el entorno de simulación, como se muestra en la Fig. 4. Dado que la simulación requiere de información de entrada para ser probado, se implementaron distintos tipos de sistemas para captura de movimiento humano.

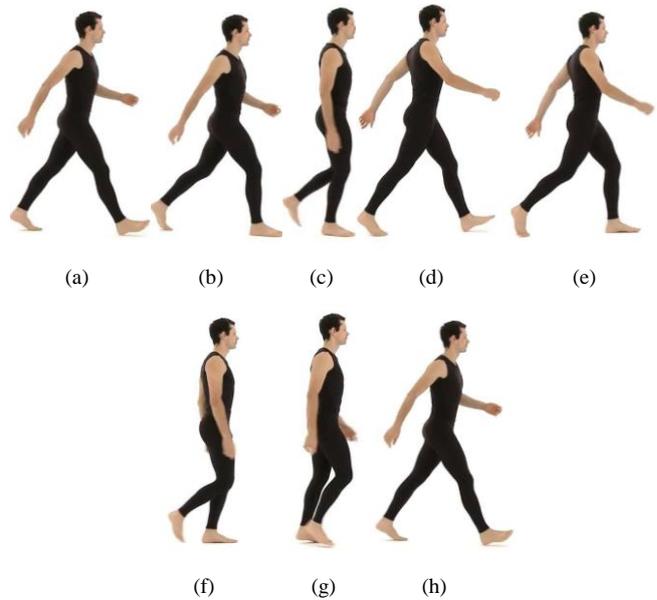


Fig. 3. Ciclo de marcha humana, fase de apoyo, contacto inicial(a), respuesta a la carga(b), apoyo medio(c), fin de apoyo(d), pre-balanceo(e) y fase de balanceo, balanceo inicial(f), balanceo medio(g), fin de balanceo(h)

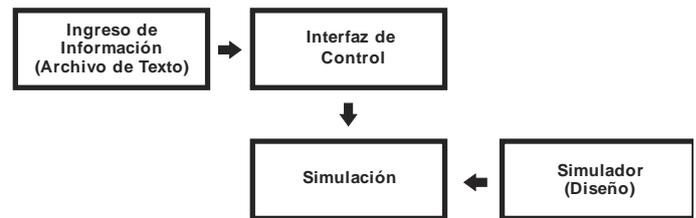


Fig. 4. Estructura del sistema de simulación

### IV. OBTENCIÓN DE MEDICIONES

A. Captura de movimiento por procesamiento de imágenes

Se implementó un programa en Microsoft Visual C++ 2010 Express Edition [2] usando la biblioteca para visión artificial OpenCV [3] y la librería para detección de regiones cvBlobsLib [4], con el propósito de realizar la detección de marcadores de determinado color, en este caso rojos, ubicados en las articulaciones, de forma que luego de obtener las posiciones de cada marcador, por métodos trigonométricos obtener los ángulos de las articulaciones.

En la Fig. 5. Se puede ver el alcance que tuvo el sistema, en la parte derecha se ve la imagen binaria obtenida luego de ser procesada con OpenCV y en la parte izquierda de la imagen se puede ver la detección de los marcadores obtenidos por cvBlobslib a partir de la imagen binaria, con cuadrados rojos está indicado la cantidad de marcadores que detecto y el texto de color azul en el marcador central indica el ángulo de esa articulación.

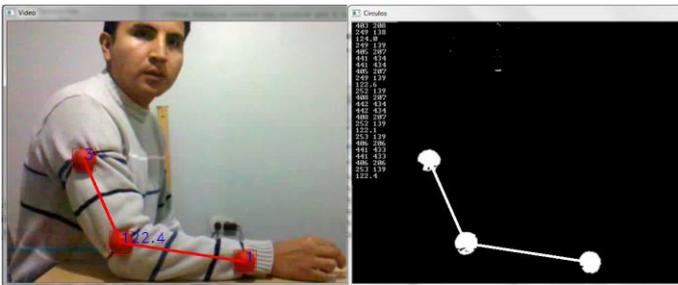


Fig. 5. Interfaz del programa para procesamiento de imágenes.

Al analizar imágenes en las que el objetivo con marcadores no realizaba movimiento respecto a la cámara se obtuvieron buenos resultados, pero al analizar el ciclo de marcha humana en la que el objetivo con marcadores estaba en movimiento, el sistema fallaba al perder momentáneamente la detección de algunos marcadores por la variación de la luz reflejada en cada marcador y el ángulo de grabación de la cámara, esto se pudo solucionar de 2 formas: la primera fue mejorando la iluminación sobre el objetivo, en este caso se utilizó luz natural y grabando en día soleado, y segundo, moviendo la cámara a la velocidad de movimiento del objetivo, de forma que se lo pueda tener enfocado en todo momento y con la misma luz.

Esto fue pensando para la detección en un solo plano, al ampliar la detección al espacio hace que el costo de implementación sea muy elevado, al necesitar de un ambiente de grabación con luz regulada en todos los ángulos y mayor cantidad de cámaras. Por lo que se pensó en implementar otro tipo de sistema para captura de movimiento.

#### B. Captura de movimiento con unidades de medida inercial

Se está implementando un sistema de captura de movimiento basado en múltiples unidades de medida inercial, estos son circuitos integrados que contienen giroscopios (velocidad angular) acelerómetros (aceleración lineal) y magnetómetros (usado para identificar el norte magnético) [5]. Con los cuales mediante algoritmos que usan los datos del giroscopio, acelerómetro y magnetómetros en conjunto, logran calcular los desplazamientos angulares del dispositivo, estos ubicados en lugares específicos del cuerpo, pueden brindar los ángulos de las articulaciones.

Dado que el sistema de captura con unidades de medida inercial aún está en implementación se decidió usar imágenes representativas al ciclo de marcha humana, de forma tal que se pueda continuar con el desarrollo de la simulación y dejarla lista para el ingreso de datos provenientes de distintos sistemas de captura de movimiento.

#### C. Obtención de mediciones mediante imágenes representativas al ciclo de marcha

Este método está basado en realizar mediciones ya sea de ángulos o posiciones directamente sobre las imágenes representativas al ciclo de marcha, se usó las imágenes de los 8



Fig. 6. Ángulos en imagen representativa al ciclo de marcha, son modificados para adaptarlos al modelo humanoide usado.



Fig. 7. Posiciones del pie en imágenes representativas al ciclo de marcha, las medidas no tienen unidades, se escalan usando medidas reales.

eventos característicos del ciclo de marcha en el programa AutoCad 2011. Se usaron imágenes sobre el plano sagital.

##### 1. Medición de ángulos

Se midieron los ángulos respecto al eslabón anterior, en el caso de la cadera respecto a la vertical, de forma tal que se obtenga la posición general del cuerpo para poder probar la simulación. En la Fig. 6 se puede observar cómo fueron obtenidos los ángulos.

##### 2. Medición de la posición del pie relativo a la cadera

El objetivo de esta medición es para darle mayor aplicación al sistema de simulación dado que de esta forma se puede obtener los ángulos de las articulaciones aplicando cinemática inversa de acuerdo a las posiciones ingresadas. En la Fig. 7 se muestra como se midieron las posiciones.

## V. SIMULACIÓN

El programa de simulación utilizado en este trabajo es Marilou Anycode 2010 [6], el cual permite modelar y simular entornos robóticos, con la posibilidad de usar gran cantidad de sensores y actuadores en un entorno virtual con motor físico el cual permite usar la aceleración de la gravedad, inercia, o simular choques. También tiene la posibilidad de acceso al entorno de simulación por lenguajes de programación como C/C++/Microsoft C# y con una modificación de Microsoft C# usar Microsoft Visual Basic Net., en la Fig. 8 se puede ver el entorno de diseño de Marilou Anycode 2010.

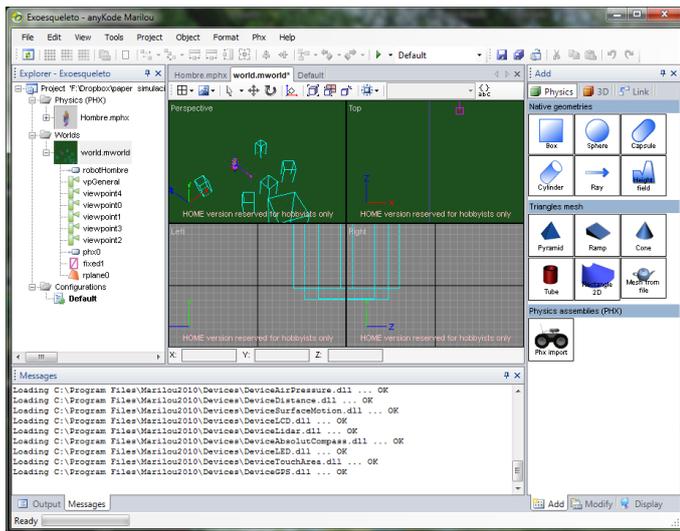


Fig. 8. Entorno de diseño Marilou Anycode 2010

### A. Modelo Utilizado

El modelo utilizado es un robot humanoide con proporciones de un humano normal [7] y peso de 66 Kg-f, tiene 20 grados de libertad, distribuidos como muestra la Fig. 10a y en cada articulación tiene un servomotor.

Dado que el humanoide no cuenta con inteligencia programada para el manejo de su estabilidad, se le agrego al entorno de simulación un soporte lateral que esta adherido al humanoide permitiéndole movimientos en el plano sagital e impidiendo que pueda caer. En la Fig. 10b se puede ver el modelo usado desde el entorno de simulación de Marilou Anycode 2010.

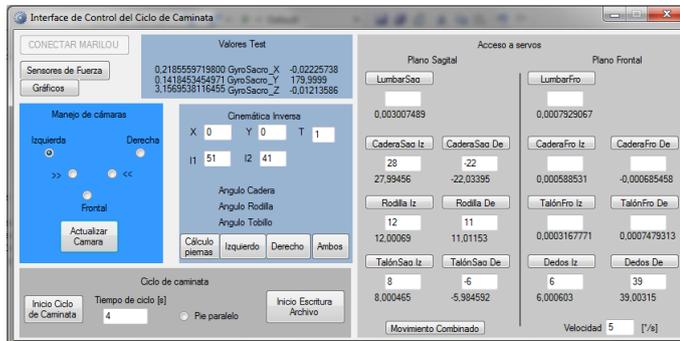
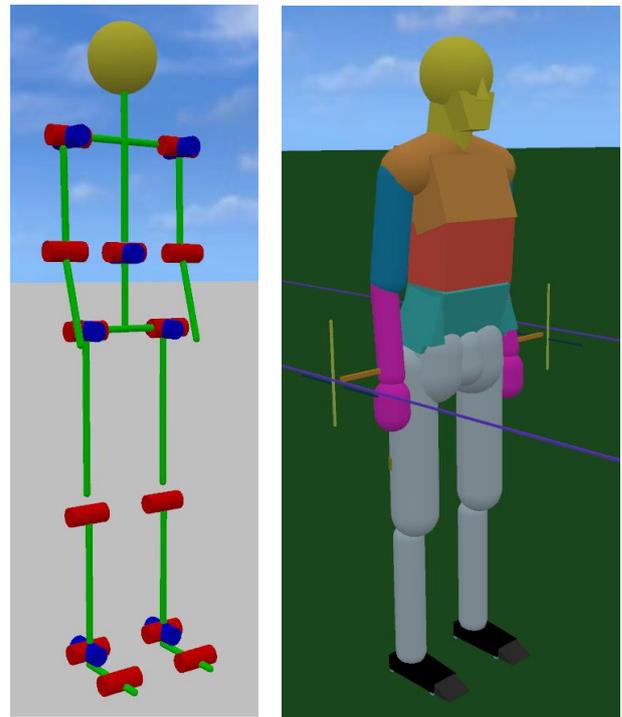


Fig. 9. Interfaz de Control



(a)

(b)

Fig. 10. Modelo representando la ubicación de los grados de libertad (a) y el modelo usado en la simulación (b).

### B. Interfaz utilizada para el control de la simulación

El programa para el control de la simulación fue hecho en Microsoft Visual Basic Net. 2010, este permite acceder al entorno de simulación, para manejar las cámaras, visualizar la posición angular de los servomotores, los sensores de fuerza y los giroscopios, permite también modificar las posiciones angulares de los servomotores y la interacción entre datos obtenidos por algún tipo de captura de movimiento en formato de archivo de texto y el entorno de simulación. En la Fig. 9 se puede ver el programa utilizado como interfaz.

### C. Simulación usando ángulos de imágenes representativas al ciclo de marcha

Luego de hacer las mediciones de los ángulos de las 8 imágenes que representan a los 8 eventos de la marcha, se genera un archivo de texto que es leído por el programa de control, que calcula las velocidades entre cada medición leída y luego envía los ángulos y las velocidades a cada servomotor del humanoide. Con este método se puede simular el ciclo de marcha en los 3 planos, pero requiere que los datos de entrada contengan información de los 3 planos, de esta forma no se usaría el soporte lateral, en la Fig. 11 se puede ver las imágenes de los 8 eventos obtenidas de la simulación para el plano sagital.

### D. Simulación usando posiciones del pie en imágenes representativas al ciclo de marcha

Al igual que el método anterior, luego de la medición de las posiciones de los 8 eventos de la marcha se genera un archivo

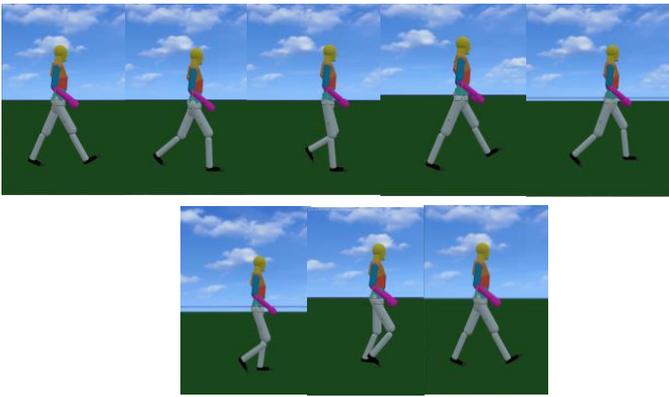


Fig. 11. Simulación de ciclo de marcha usando ángulos de imágenes representativas al ciclo de marcha, fase de apoyo y balanceo

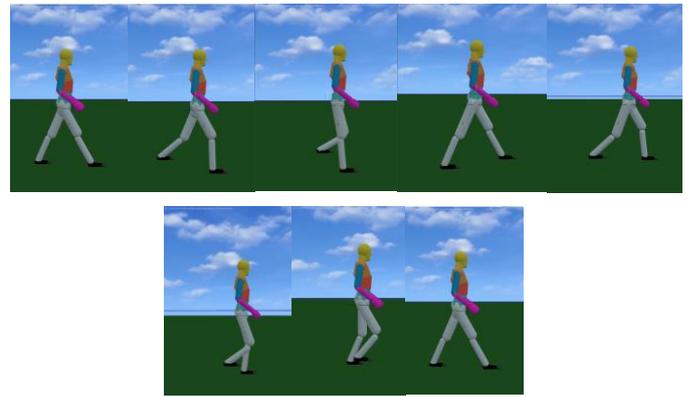


Fig. 12. Simulación de ciclo de marcha usando posiciones del pie en imágenes representativas al ciclo de marcha, fase de apoyo y balanceo

de texto, este es leído por el programa de control, que calcula los ángulos y las velocidades y las envía a cada servomotor del humanoide, en la Fig. 12 se puede ver las imágenes de los 8 eventos obtenidas de la simulación.

Este método calcula los ángulos por cinemática inversa método geométrico [8], para un sistema de dos eslabones y dos grados de libertad, los dos eslabones forman la pierna. Por este método se calculan los ángulos de la cadera y las rodillas, el ángulo del pie se calcula en función de los anteriores, de forma que sea paralelo al piso en cada momento. Este sistema tiene 2 soluciones para el ángulo de la rodilla, pero se toma solo la solución positiva ya que la rodilla no puede rotar hacia adelante. La articulación de los dedos del pie se mantiene fija en cada momento.

## VI. CICLO DE MARCHA HUMANA EN ROBOTS HUMANOIDES

Teniendo en cuenta que el ciclo de marcha que podría usar un robot humanoide puede estar influido por perturbaciones, éste no solo tiene que simular el ciclo de marcha programado, sino que tiene que tener un control ante perturbaciones externas.

Si bien aún no se programó la inteligencia para la estabilidad automática del humanoide, se agregó sensores de fuerza para el control de los ángulos límites a los que puede llegar el humanoide sin caer.

Según el trabajo de M. Vukobratovic' y B. Borovac [9] la posición del centro de presión calculado por las fuerzas sensadas debe estar dentro del polígono de apoyo, este puede ser el representado por la superficie de un pie, si hay un pie apoyado o de la superficie formada por los dos si ambos están apoyados en el piso.

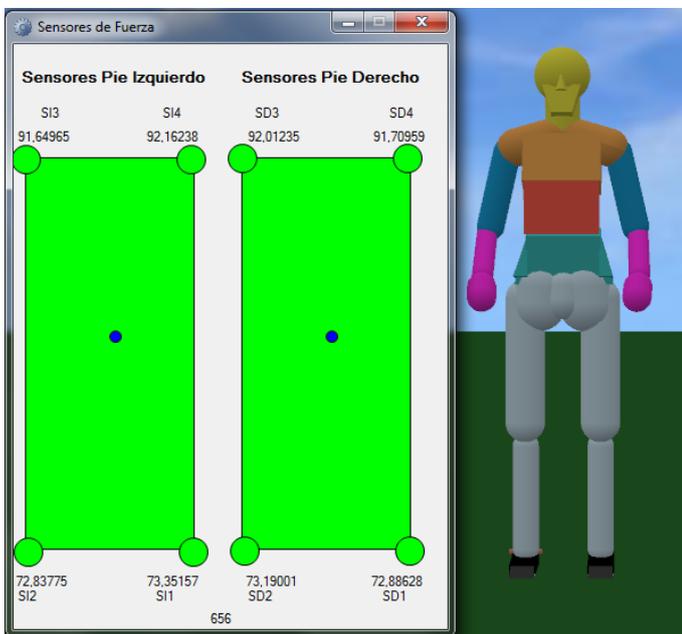


Fig. 13. Vista de sensores de fuerza en estado normal, valores en Newtons



Fig. 14. Vista de sensores de fuerza con una inclinación hacia adelante, valores en Newtons

## REFERENCIAS

En la Fig. 13 se muestra los valores de los sensores de fuerza cuando el humanoide está en posición normal.

En la Fig. 14 se muestra los valores de los sensores de fuerza cuando el humanoide está inclinado, se puede notar que el círculo azul que representa la ubicación de la resultante se desplazó hacia adelante.

## VII. CONCLUSIONES

Al analizar las limitaciones con las que se llegó en el desarrollo de un sistema de captura de movimiento por procesamiento de imágenes, se puede concluir que el sistema es factible, pero de costo elevado, y si el desarrollo propuesto necesita de este sistema y se cuenta con los recursos, se podría implementar.

El costo de sistemas de captura con unidades de medida inercial (IMU siglas en inglés) es relativamente bajo, pero la implementación es algo compleja. Si bien podemos decir que no habría problemas relevantes al usar un solo IMU, el hecho de utilizar aproximadamente 10 de ellos o más para armar un sistema de captura, hace que aparezcan ciertos problemas, como por ejemplo, el hardware necesario para la lectura de 10 IMUs simultáneamente, el manejo de referencias y la acumulación de errores.

El uso de imágenes representativas al ciclo de marcha no es el fin de este sistema de simulación, pero si ayudaron a definir las características principales que tiene un sistema de este tipo, dado que no requiere modificación relevante en el caso que se use otra información de entrada, ya sea de visión o con unidades inerciales.

El desarrollo de este sistema usando Marilou Anycode 2010 facilita en gran medida la simulación de proyectos robóticos por su entorno de diseño y simulación amigable, y la cantidad de actuadores, sensores y su acceso con programas de distintos lenguajes.

Si se piensa en el ciclo de marcha necesario para la implementación de exoesqueletos robóticos, que se utilizan para personas con discapacidad en los miembros inferiores como se muestra en la Fig. 1b, se puede ver que es prioritariamente en el plano sagital, por lo que el sistema de simulación con el modelo humanoide con soportes laterales serviría para este estudio.

Para el desarrollo de robots humanoides el uso de la cinemática inversa en las piernas y el agregado de sensores de fuerza en los pies, es un buen inicio para el control de la estabilidad ante un ciclo de marcha con perturbaciones externas.

La simulación del ciclo de marcha humana tiene gran dependencia al sistema de captura utilizado, pero también al modelo utilizado, en este caso, el modelo de humanoide utilizado es de 20 grados de libertad, podemos mencionar al robot humanoide de Sony, modelo SDR-4X con 38 GL y el robot humanoide desarrollado por la Universidad de Waseda en Japón, modelo WABIAN-2R con 41 GL.

- [1] C. L. Vagnah, B. L. Davis, y J. C. O'Connor, *Dynamics of Human Gait*, 2da ed., Cape Town, South Africa, Kiboho Publishers, 1992.
- [2] (2014) Visual Studio Express [en línea]. Disponible en: <http://www.visualstudio.com/es-es/products/visual-studio-express-vs>
- [3] (2014) OpenCV [en línea]. Disponible en <http://opencv.org/>
- [4] (2014) CvBlobsLib [en línea]. Disponible en <http://cvblobslib.sourceforge.net/>
- [5] J. L. Pons, *Wearable Robots, Biomechatronic Exoskeletons*, West Sussex, Inglaterra, John Wiley & Sons Ltd, 2008.
- [6] AnyKode Marilou – Modeling and simulation environment for Robotics [en línea]. Disponible en: <http://www.anykode.com/index.php>
- [7] R. M. Enoka, *Neuromechanics of Human Movement*, 3ra ed., Champaign, United States of America, Human Kinetics, 2002.
- [8] J. J. Craig, *Introduction to Robotics, Mechanics and Control*, 3ra ed., United States of America, Pearson Prentice Hall, 2005.
- [9] M. Vukobratovic' y B. Borovac, "Zero-Moment point Thirty Five Years of its Life", *International Journal of Humanoid Robotics*, Vol. 1, No. 1, 157-173, January, 2004.
- [10] R. Siegwart, I. R. Nourbakhsh, D. Scaramuzza, "Introduction to Autonomous Mobile Robots", 2da ed., London, England, The MIT Press, 2011.