

## **Sistemas de captura de movimiento para el caminar humano. Análisis y comparativa**

**M.J. Gómez García<sup>(1)</sup>, C. Castejón Sisamón<sup>(1)</sup>, J.C. García Prada<sup>(1)</sup>, G. Carbone<sup>(2)</sup>, M. Ceccarelli<sup>(2)</sup>**

*(1) Dpto. de Ingeniería Mecánica. Universidad Carlos III de Madrid  
mjggarci@ing.uc3m.es*

*(2) Laboratorio de Robótica y Mecatrónica. Universidad de Cassino  
ceccarelli@unicas.it*

---

*La naturaleza del movimiento humano ha sido ampliamente estudiada a lo largo de la historia. Sin embargo, en los últimos años, el interés creciente en áreas como la biomecánica, rehabilitación, animación gráfica, fisionomía deportiva, ergonomía y robótica, han proporcionado grandes avances [1]. Gracias a ello, el desarrollo y la utilización de sistemas de captura de movimiento humano también han ido en aumento. En este trabajo se presenta un estudio biomecánico de la tarea de caminar, en función del calzado y de la velocidad del sujeto. Para ello, se han realizado la toma de datos mediante dos sistemas de captura de movimiento novedosos. El primero de ellos, el sistema CATRASYS (“Cassino tracking system”) [2], inicialmente utilizado como sistema de captura de movimiento aplicado a la robótica, que se viene desarrollando desde 1994 en la Universidad de Cassino, y el segundo, es la tecnología de Kinect que, mediante un sensor de profundidad y un software específico, es capaz de detectar y seguir formas humanas [3]. Como resultados del trabajo se presentan los estudios realizados y los problemas y experiencias de ambos sistemas de medida, estableciendo una comparativa entre ambos.*

---

### **1. INTRODUCCIÓN**

La biomecánica es aún una ciencia en desarrollo debido a la dificultad para conseguir establecer una normalización. Una misma persona puede realizar el mismo movimiento de formas muy distintas, ya que influyen múltiples factores como la carga exterior añadida, la velocidad y, en el caso del caminar, también el calzado [4]. Además, cada movimiento humano, realizado por las extremidades superiores o inferiores, depende en gran medida de las dimensiones de las mismas y de la distribución de la masa, con lo que el mismo movimiento puede diferir mucho de una persona a otra. El hecho de que no exista el “hombre medio” complica este tipo de estudios. Las dimensiones del cuerpo humano varían según edad, sexo, raza, e incluso grupo laboral. Según el Dr. T. E. Hertzberg, investigador en antropología física, únicamente el 7% de la población tiene dos dimensiones medias, el 3% tiene tres y menos del 2% tiene cuatro [5].

En ocasiones, para realizar estudios biomecánicos se recurre a modelos de sistemas biológicos, existiendo hoy en día numerosos programas comerciales, como por ejemplo SIMM de Musculographics®. También se ha recurrido a la robótica como modelo de la realidad biomecánica humana, como en los trabajos presentados en [6-8], lo que ha beneficiado a ambas ciencias para su avance.

Otras veces, se ha recurrido a la observación directa de sistemas biológicos reales en movimiento. Para ello se utilizan distintas técnicas que se clasifican en cinemáticas, cinéticas y de consumo energético, dependiendo del tipo de datos que obtienen. Generalmente se suele recurrir a la combinación de varias técnicas para conseguir una mayor información.

En los últimos años, la técnica más ampliamente utilizada ha sido la del análisis de imágenes de video, por ser una de las más completas, ya que permite definir muchos parámetros cinemáticos, sobre todo cuando se mide la posición de marcadores pasivos. En este sentido, VICON® ha sido el sistema líder a nivel mundial en el campo de la medición y análisis del movimiento del cuerpo humano [1][4][9]. Según [10] el error cometido con la adquisición de datos mediante el sistema VICON® es inferior a 0,76mm.

Sin embargo, dentro de las técnicas ópticas están emergiendo nuevos métodos que no requieren del uso de marcadores para la captura del movimiento, como los desarrollados en Stanford, por la Universidad de Maryland, el MIT y el Instituto Max Planck. Estos métodos consisten en algoritmos que permiten que el sistema óptico identifique las formas humanas descomponiéndolas en componentes para su seguimiento. Técnicas como ésta, se han implantado en sistemas de movimiento como Kinect de Microsoft, para la consola Xbox 360, que es capaz de capturar el movimiento humano sin marcadores. Sin embargo, la desventaja de estas técnicas es que se encuentran aún en investigación, por lo que se desconocen algunos parámetros importantes determinantes en un sistema de medida, como por ejemplo, la precisión [11].

Como sistema alternativo, en la Universidad de Cassino, se ha desarrollado un sistema para la obtención de medidas biomecánicas, llamado "CATRASYS". A pesar de que esta técnica en un principio se concibió para determinar el área de trabajo de un robot experimentalmente [12], posteriormente se ha usado para caracterizar el movimiento humano, tanto de brazos [13] como del caminar [14]. Esta técnica ofrece la ventaja de proporcionar al mismo tiempo datos cinemáticos y cinéticos.

## 2. DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS DE MEDIDA

En este trabajo, se han efectuado mediciones con dos sistemas de captura de movimiento humano: el sistema CATRASYS, y el sensor Kinect de Microsoft con sus habilidades de reconocimiento humano.

Concretamente, para ambos sistemas se efectúan medidas biomecánicas durante la tarea del caminar, para cuatro personas distintas y distintas condiciones de marcha, en cuanto a velocidad y tipo de calzado.

### CATRASY

"Cassino Tracking System" se viene desarrollando desde el año 1994 en el LARM de la Universidad de Cassino. El sistema está basado en hilos extensibles que, mediante extensometría, trilateración y triangulación, es capaz de proporcionar la posición y la fuerza instantánea de un punto móvil al que están sujetos los extremos de los hilos. La cinemática de CATRASYS en su versión final es totalmente equiparable al de una plataforma paralela de Gough-Stewart del tipo 3-2-1 [2].

En la figura 1 se muestra la estructura cinemática del sistema de medida.

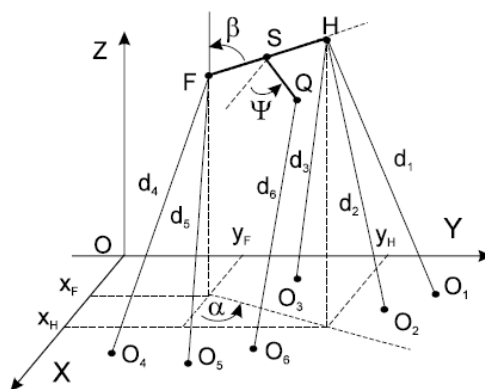


Figura 1. Esquema de configuración del sistema CATRASYS [2]

La cadena de medida, se compone de este sistema cinemático y los transductores. El programa de adquisición utilizado es el LabView®, en el que se ha programado un software que realiza las operaciones necesarias de trilateración de acuerdo con el esquema de la figura 1 [11].

El error de este sistema de medida ha sido evaluado previamente en [14]. En dicho trabajo se afirma que el error se sitúa en 1mm. cuando el rango de movimiento se encuentra entre 1 y 2 metros.

#### Sensor Kinect

Kinect, es un dispositivo desarrollado por Microsoft, que cuenta con una cámara RGB, un sensor infrarrojo de profundidad, y un micrófono. Además dispone de un procesador, que ejecuta un software propio que permite la captura de movimiento del cuerpo humano en 3D, como se observa en la figura 2(a).

Debido a las múltiples ventajas de este dispositivo y su asequible precio, se han hecho numerosos esfuerzos por proporcionar un controlador para PC que permita programar y utilizar las utilidades de Kinect en este entorno. Cabe destacar las librerías multilinguaje y multiplataforma de código abierto para Kinect creadas por OpenNi. En estas librerías se ofrece la capacidad llamada “skeleton tracking”, que hacen un boceto del esqueleto humano sobre la figura humana reconocida, como se muestra en la figura 2(b), y permite guardar sus posiciones.



Figura 2(a). Reconocimiento humano con Kinect

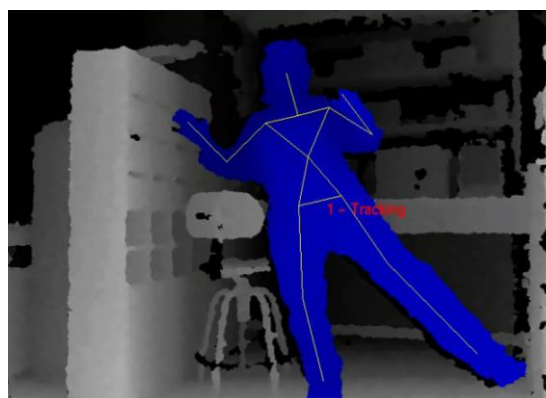


Figura 2(b). Capacidad de “skeleton tracking” de OpenNi con Kinect

Duta et al en 2011 realizan un estudio sobre el error cometido con Kinect al situar un objeto inmóvil en el espacio [3]. Al comparar los resultados con los obtenidos a través de un sistema VICON®, el error cuadrático medio es de 6,5 mm. en el eje x, 10,9 mm. en el eje y, y 5,7 mm. en el eje z. También se estima que al introducir movimiento, el error puede aumentar hasta 16,1mm, pero no se han encontrado trabajos donde se afirme de forma precisa el error cometido con este método.

Para la obtención de datos biomecánicos mediante Kinect, en este trabajo se ha elaborado un software en C++ en el sistema operativo Linux. Dicho software, creado en la plataforma QT, utiliza tanto las librerías OpenNi, como OpenCV. Utilizando la capacidad de “skeleton tracking” de OpenNi, el programa permite almacenar tanto las posiciones, como las rotaciones y el nivel de confianza de las articulaciones requeridas de un usuario que se coloque delante del sensor.

### 3. PARTE EXPERIMENTAL

En este trabajo se han realizado experimentos para cuatro personas distintas con variedad de complejidades, midiendo en la rodilla y el tobillo, ya que CATRASYS sólo permite la medida en dos puntos al mismo tiempo. La disposición de ambos sistemas de medida durante la captura de datos es la que se muestra en las figuras 3(a) y 3(b).



Figura 3(a). Sistema CATRASYS de la Universidad de Cassino

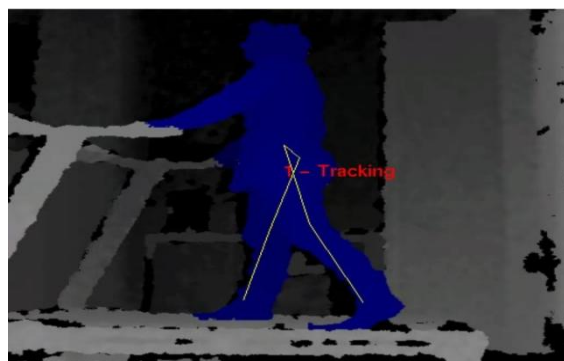


Figura 3(b). Obtención de datos biométricos con el sistema Kinect

Con cada uno de los dos métodos se han realizado cuatro tipos de ensayos, con múltiples repeticiones de cada uno en distintas fechas, para reducir el error experimental. Los ensayos realizados son los que se describen en la tabla 1.

Número de experimento	Descripción
1	Persona caminando a velocidad normal/calzado normal
2	Persona caminando a velocidad rápida/calzado normal
3	Persona caminando a velocidad normal/calzado deportivo
4	Persona caminando a velocidad rápida/calzado deportivo

Tabla 1. Descripción de los ensayos

Las dimensiones de las piernas de las cuatro personas sobre las que se realizaron las medidas para ambos sistemas aparecen en la tabla 2.

CATRASYS			KINECT		
Persona	Longitud cadera-tobillo (cm)	Longitud tobillo-rodilla (cm)	Persona	Longitud cadera-tobillo (cm)	Longitud tobillo-rodilla (cm)
Mujer 1	70	36	Mujer 1	71	36
Mujer 2	72	37	Mujer 2	72	37
Hombre 1	80	45	Hombre 1	85	44
Hombre 2	76	38	Hombre 2	84	42

Tabla 2. Descripción las personas evaluadas con CATRASYS y Kinect

Aunque la mujer 1 y 2 tienen prácticamente la misma altura, cabe destacar que la mujer 1 tiene una complexión delgada y la mujer 2 una complexión media. Lo contrario ocurre entre el hombre 1 y 2, siendo el hombre 1 de complexión media y el hombre 2 de complexión delgada.

Para todos los ensayos descritos se han realizado medidas unilaterales del lado izquierdo, por tratarse de personas sanas y sin ninguna patología. (a la parte de comparativa) En general, se ha trabajado con velocidades inferiores 0,75 pasos/s, (donde un paso es el ciclo

completo realizado con las dos piernas) para los ensayos 1 y 3. En el caso 2 y 4, se obtiene siempre una velocidad mayor de 0,75 pasos/s).

Los ensayos tenían una duración de 15 segundos, con una frecuencia de muestreo de 20Hz en el caso de CATRASYS, y 30 Hz en el caso de Kinect (frecuencia de operación de la cámara).

### 3.1 Resultados obtenidos con CATRASYS

En primer lugar, analizando los resultados obtenidos con CATRASYS, se puede afirmar que, para la misma persona, influye mucho más la velocidad que el calzado, que se observa que no afecta significativamente en las trayectorias ni en las fuerzas. Sin embargo, se ve claramente para todos los casos que, al aumentar la velocidad, las curvaturas se reducen, como se puede observar en la figura 4. En dicha figura se muestran todas las trayectorias del tobillo obtenidas para la mujer 2 en los cuatro ensayos.

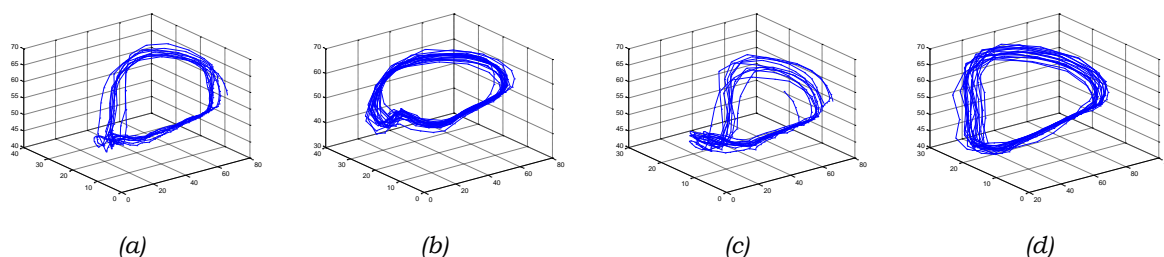


Figura 4. ZYX trayectorias para el tobillo de la mujer número 2. (a) Trayectorias del experimento 1. (b) Trayectorias del experimento 2. (c) Trayectorias del experimento 3. (d) Trayectorias del experimento 4.

Observando los resultados de cada ensayo para las cuatro personas evaluadas, también se concluye que, la mujer 1 y el hombre 2 tienen una mayor curvatura en las trayectorias de los tobillos que la mujer 2 y el hombre 1, cuya envergadura es mayor, como se puede observar en la figura 5.

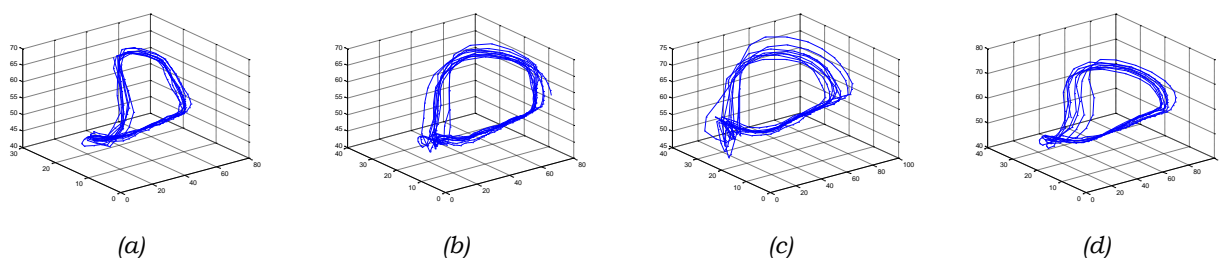


Figura 5. ZYX trayectorias del tobillo para el experimento número 1. (a) Trayectorias de la mujer 1. (b) Trayectorias de la mujer 2. (c) Trayectorias del hombre 1. (d) Trayectorias del hombre 2.

A pesar de la diferencia de pesos, no se observan grandes diferencias en las fuerzas entre hombres y mujeres, cuyo valor máximo en todos los casos oscila entre 0,7 y 0,8 kp.

### 3.2 Resultados obtenidos con Kinect

La primera conclusión que se puede sacar al observar los datos obtenidos con Kinect, es que la dispersión de los datos es muy elevada. En las figuras 6 y 7, se presentan los resultados obtenidos con Kinect, homólogas a las 4 y 5, respectivamente, donde se mostraban los obtenidos con CATRASYS.

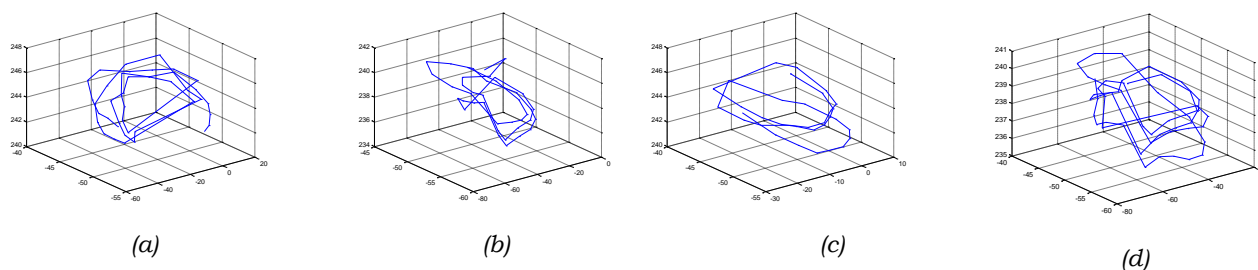


Figura 6. ZYX trayectorias para el tobillo de la mujer número 2. (a) Trayectorias del ensayo 1. (b) Trayectorias del ensayo 2. (c) Trayectorias del ensayo 3. (d) Trayectorias del ensayo 4.

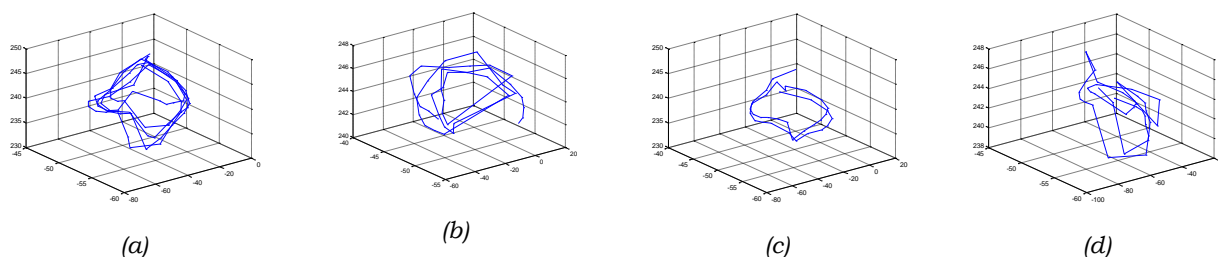


Figura 7. ZYS trayectorias del tobillo para el ensayo número 1. (a) Trayectorias de la mujer 1. (b) Trayectorias de la mujer 2. (c) Trayectorias del hombre 1. (d) Trayectorias del hombre 2.

Aunque no hay datos concretos sobre el error cometido con la capacidad de captura del movimiento humano de Kinect, ni de la capacidad de “skeleton tracking” de OpenNi, ya durante los ensayos se han observado ciertas desviaciones en ocasiones la posición prevista, como se observa en la figura 8.

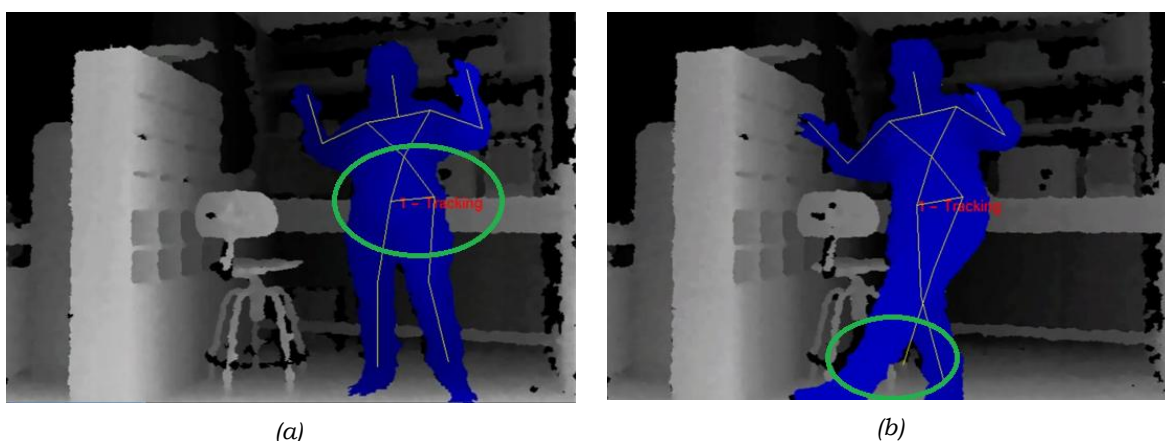


Figura 8 (a). Muestra el error cometido con “skeleton tracking” de OpenNi durante la captura del movimiento en cadera. (b) Muestra el error cometido con “skeleton tracking” durante la captura del movimiento en el tobillo.

#### 4. COMPARATIVA ENTRE LOS DOS SISTEMAS DE CAPTURA DE MOVIMIENTO

Para realizar una comparativa entre los dos sistemas de medida, se utilizarán los criterios expuestos en [16], según los cuales se puede clasificar los sistemas de captura de movimiento. Estos criterios son los que se exponen en la tabla 3, donde se muestra una comparativa entre los dos sistemas utilizados en este trabajo.

	<b>CATRASY</b> S	<b>KINECT</b>
<b>Precisión</b>	1mm	No hay datos
<b>Resolución</b>	10 <sup>-9</sup> m	10 <sup>-9</sup> m
<b>Precio</b>	Barato	Barato
<b>Accesibilidad</b>	Mala	Buena
<b>Rango de trabajo</b>	1.5m de movimiento	Entre 1 y 3 metros de profundidad. Cubre movimientos dentro de un rango horizontal de 54° y vertical de 39.1°.
<b>Portabilidad</b>	Mala	Buena
<b>Requerimientos de calibración</b>	Es necesario calibrar el sistema, de forma que detecte bien las posiciones de los puntos clave.	El sistema calibra a cada usuario cada vez que se introduce en su imagen, en un proceso que dura 2s.
<b>Restricciones de uso</b>	Solamente dos puntos clave. Mide posición y fuerza ejercida. Es intrusivo.	Se pueden medir todos los puntos clave que sean necesarios. Miden tanto posición, como orientación y nivel de confianza.
<b>Generación de resultados en tiempo real</b>	Sí	No
<b>Cableado</b>	Sí	Sí
<b>Problemas de oclusión</b>	No	Sí
<b>Comodidad del uso de sensores o dispositivos</b>	Mala	Buena
<b>Seguimiento de articulaciones o segmentos</b>	Buena, está atado.	No comprobada
<b>Información 2D o 3D</b>	3D	3D
<b>Multiplicidad de actores</b>	No es posible	Sí es posible.
<b>Frecuencia de muestreo</b>	Variable según necesidades.	Fija a 30 Hz (frecuencia de operación de la cámara)

Tabla 3. Comparativa entre los sistemas de captura de movimiento, CATRASYS y Kinect

## 5. CONCLUSIONES

En este trabajo se han evaluado dos sistemas de captura de movimiento, CATRASYS y Kinect. Se han realizado una serie de medidas durante la tarea del caminar para 4 personas en cada sistema, con su correspondiente análisis biomecánico. Además, se han comentado las ventajas e inconvenientes de cada uno a partir de su experiencia.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] C. A. Acosta Calderon, R. E. Mohan, L. Hu, C. Zhou, and H. Hu, "Generating human-like soccer primitives from human data," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 57, no. 8, pp. 860-869, Jul. 2009.
- [2] M. Ceccarelli, F. Thomas, and E. Ottaviano, "CATRASYS (Cassino Tracking System): Un sistema de medida de la posición y orientación de objetos móviles mediante hilos extensibles," *Anales de Ingeniería Mecánica*, vol. 15, no. 4, pp. 2995-3001, 2004.
- [3] T. Dutta, "Evaluation of the Kinect TM sensor for 3-D kinematic measurement in the workplace.," *Applied ergonomics*, pp. 1-5, Oct. 2011.
- [4] A. Villa, E. Gutiérrez, and J. C. Pérez, "Consideraciones para el análisis de la marcha humana. Técnicas de videogametría, electromiografía y dinamometría," *Revista Ingeniería Biomedica*, vol. 2, no. 3, pp. 16-26, 2008.
- [5] M. Zelnik and J. Panero, *Las dimensiones humanas en los espacios interiores*. Ed. Gustavo Gili, 2004.
- [6] J. Casamanchín and M. Muñoz, "Modelado y diseño de un brazo robot antropométrico," in *V Seminario Internacional de Ingeniería Biomédica*, Bogotá, 2009, vol. 15, no. 4.
- [7] P. van der Smagt et al., "Robotics of human movements" *Journal of physiology*, Paris, vol. 103, no. 3-5, pp. 119-32, 2009.
- [8] C. F. Rodríguez, J. C. Botero, and H. Quintero, "Aplicación de la teoría de robots manipuladores a la biomecánica del brazo humano," *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, vol. 4, pp. 51-57, 2007.
- [9] R. Martín, S. Postigo, F. Ezquerro, and A. D. L. Blanca, "Análisis cinemático y cinético de la articulación de la rodilla en maniobras de alta demanda: bajada escalones, quiebro y vuelta," *XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica*, Ciudad Real, 2010.
- [10] J. J. Aguilar and M. A. Martínez, "Análisis y caracterización experimental del sistema VICON de análisis de movimiento humano," in *XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Gráfica*, Sitges, 2006, pp. ISBN: 84-689-8638-0.
- [11] J. A. Gandullo Ávila, "Simocap, Sistema Simple de Captura de Movimiento," *Universidad de Sevilla*, 2010.
- [12] M. Ceccarelli, M. E. Toti, and E. Ottaviano, "CATRASYS (Cassino Tracking System): A New Measuring System for Workspace Evaluation of Robots," in *8th International workshop on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region RAAD'99*, 1999, pp. 19-24.
- [13] E. Ottaviano, C. Lanni, and M. Ceccarelli, "Experimental Determination of Workspace Characteristics of Human Arms," in *9th International Conference on Control and Automatization MED*, 2001, pp. 1-17.
- [14] E. Ottaviano, M. Ceccarelli, and F. Palmucci, "An application of CaTraSys, a cable-based parallel measuring system for an experimental characterization of human walking," *Robótica*, vol. 28, pp. 119-133, 2010.
- [15] E. Ottaviano, M. Ceccarelli, M. Toti, and C. Avila Carrasco, "CATRASYS (Cassino Tracking System): A Wire System for Experimental Evaluation of Robot Workspace," in *J. Robot. Mechatronics*, 2002, pp. 14(1), 78-87.
- [16] F. Thomas, E. Ottaviano, L. Ros, and M. Ceccarelli, "Performance Analysis of a 3-2-1 Pose Estimation Device," in *IEEE Transactions on Robotics*, 2005, vol. 21, no. 3, pp. 288-297.