

Sistema de captura para la imitación del movimiento humano por un robot planar de base fija

Capture system for human motion imitation by a fixed base planar robot

Diego A. Bravo M. * Carlos F. Rengifo R. **

Fecha recepción: julio 15 de 2014 Fecha aceptación: septiembre 8 de 2014

RESUMEN

En este trabajo se muestra la implementación de un sistema de captura de movimiento de bajo costo, utilizando Kinect™, para la imitación de movimiento en el plano frontal mediante un robot planar de base fija. Se hizo un estudio de la cinemática inversa para mapear el movimiento humano mediante las coordenadas cartesianas (x, y, z) que entrega el sensor y transformarlas en coordenadas articulares (q_1, q_2, \dots, q_9) que son las posiciones angulares de referencia para el robot. Estas trayectorias de referencia se utilizaron para imitar el movimiento humano por medio de un robot planar de nueve grados de libertad.

Palabras clave: Captura de movimiento, Kinect, Robot, Modelos biomecánicos.

ABSTRACT

This paper shows the implementation of a motion capture system of low cost, using Kinect for imitation of movement in the frontal plane with a fixed base planar robot. The inverse kinematics for mapping human motion through Cartesian coordinates (x, y, z) provided by sensor and turn them into joint coordinates (q_1, q_2, \dots, q_9) , which are the angular positions of reference for the robot. These reference trajectories were used to imitate human movement by a planar robot with nine degrees of freedom.

Keywords : Motion Capture, Kinect, Robot, biomechanical models.

* Ingeniero Físico, MsC. Profesor Departamento de Física. Universidad del Cauca, Calle 5 No. 4-70, Popayán, Colombia. email: dibravo@unicauca.edu.co

** Ingeniero Electricista, PhD. Profesor Departamento de Electrónica, Instrumentación y Control. Universidad del Cauca, Calle 5 No. 4-70, Popayán, Colombia. email: caferen@unicauca.edu.co



1. INTRODUCCIÓN

Diversos autores han estudiado el problema de imitación de movimiento humano mediante robots humanoides adaptando los datos de captura de movimiento a la generación de trayectorias articulares en robots bípedos, [1]. En [2, 3] se muestra como el robot humanoide HRP-1S es capaz de imitar el movimiento de un artista que baila la danza tradicional japonesa *Jongara-bushi* mediante un sistema de captura de movimiento con marcadores, las trayectorias articulares fueron ajustadas para satisfacer las restricciones mecánicas del robot.

Aunque la imitación de movimiento es simplemente el mapeo de movimiento humano a robots humanoides, que tienen apariencia similar, éste no es un problema trivial, [4]. En [5], se destaca la imitación del robot humanoide TORO mediante captura de movimiento. Sin embargo en el desarrollo de estos trabajos, no se precisa cómo adaptar estos movimientos a la imitación por parte del robot. En este trabajo se implementó un sistema de captura de movimiento en 3D que permite mapear los movimientos naturales de las personas en el plano frontal, para la adaptación e imitación por medio de un robot planar de base fija a partir del sensor Kinect.

En el mercado existen sistemas especializados para la captura de movimiento, por ejemplo: PeakMotus (Vicon)TM, SkillSpectorTM y DartFishTM, entre otros. La característica común de los sistemas descritos anteriormente es su alto costo e implementación. Surge entonces el interrogante ¿Es posible construir un sistema de captura de movimiento con Kinect de bajo costo y fácil implementación? En nuestro caso particular, un sistema de captura de movimiento permitirá extraer las trayectorias articulares del movimiento humano con el fin de adaptarlas como referencias para la imitación del movimiento por un robot planar.

Este documento está compuesto de cuatro secciones. En la sección 2 se presentan las características de los sistemas de captura de movimiento, enfatizando en el Kinect. La parte 3 describe un método basado en cinemática inversa para el cálculo de las coordenadas articulares a partir de

las coordenadas cartesianas. En la sección 4 se detalla la construcción del robot planar, mientras que en la sección 5 se muestran y se discuten los resultados obtenidos. La parte final 6 está dedicada a las conclusiones y perspectivas.

2. SISTEMAS DE CAPTURA DE MOVIMIENTO

La captura de movimiento es el proceso de registro de la posición de un cuerpo, mediante el seguimiento de una serie de puntos de interés en el espacio y tiempo para obtener una representación tridimensional (3D) digital. Esta tecnología permite la traducción del movimiento en un formato digital [6]. El sujeto de estudio puede ser cualquier objeto en movimiento del mundo real; los puntos claves a capturar, son las áreas que mejor representan el movimiento del sujeto. Estos puntos pueden ser puntos de rotación o conexiones entre las partes rígidas del sujeto. Para un ser humano, por ejemplo, algunos de los puntos claves son las articulaciones que actúan como puntos de pivote y conexiones para los huesos. En cada uno de estos puntos de interés se colocan sensores o marcadores que sirven para recolectar datos de posición, velocidad y aceleración.

Los sistemas de captura de movimiento óptico son los más utilizados en laboratorios de biomecánica [7], y se pueden clasificar como sistemas ópticos sin marcadores y con marcadores, estos a su vez se dividen en: activos y pasivos. En los sistemas ópticos con marcadores pasivos (ViconTM), se colocan al sujeto marcadores reflectantes en todos los puntos de interés de captura de movimiento. A diferencia de los sistemas ópticos activos (OptotrakTM), donde se colocan marcadores activos (diodos emisores de luz [LED]). Una desventaja en los sistemas ópticos con marcadores es la oclusión, aquí los marcadores no aparecen en bastantes tomas de la cámara debido a la obstrucción de la línea de visión de los objetos de la escena o por otras partes del cuerpo del sujeto. Aunque, la mayoría de los paquetes de post-procesamiento comerciales tienen la capacidad de tratar con los marcadores ocluidos, pueden crear marcadores virtuales para ayudar a llenar los marcadores ocluidos, o pueden usar

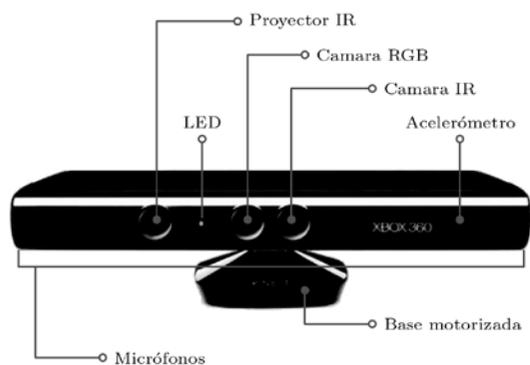


Figura 1: Disposición de los sensores en el kinect.

marcadores redundantes (más que el mínimo requerido en el protocolo estándar) para compensar los marcadores ocluidos.

El movimiento de los marcadores se suele utilizar para deducir el movimiento relativo subyacente entre dos segmentos adyacentes, con el objetivo de definir con precisión el movimiento de una articulación. El cuidado del movimiento de la piel en relación con el hueso subyacente es el principal factor que limita la aplicación de algunos sensores, [8], [9], [10].

Los sistemas de captura de movimiento sin marcadores, como la cámara Microsoft Kinect™, Figura 1 y Organic Motion™, ofrecen una alternativa distinta a la tecnología de captura de movimiento, [11]. El Kinect™, es una cámara capaz de estimar la Geometría 3D de la escena adquirida, a 30 cuadros por segundo; está construida con un sensor de profundidad de resolución espacial de 640 × 480 píxeles, una vídeo-cámara VGA de la misma resolución y un arreglo de micrófonos para reconocimiento de voz. El Kinect™ fue desarrollado como un dispositivo periférico para uso con la consola de juegos Xbox 360™. Aunque, se ha adaptado fácilmente para otros campos como: la robótica [12], seguimiento del esqueleto humano [13], reconstrucción 3D [14], terapia asistencial [15] y biomecánica [16].

2.1 El sensor de profundidad del Kinect™

Dos sensores conforman el componente de profundidad del kinect: un proyector infrarrojo y un sensor CMOS monocromático (camara IR),

ambos trabajan con un chip interno fabricado por PrimeSense para la captura de movimiento en 3D. La cámara IR también tiene una resolución de VGA (640 × 480 píxeles) con 11 bits de profundidad. La técnica es llamada *Escaneo 3D de luz estructurada*, se proyecta un patrón de franjas de luz infrarroja sobre el campo de vista, creando un mapa de profundidad a partir de los rayos que el sensor recibe de las reflexiones de luz de los objetos en la escena. El mapa de profundidad especifica la distancia de las superficies de los objetos desde el marco de referencia del kinect.

Otros sensores de profundidad similares a éste, determinan el mapa de profundidad de la escena basados sobre el tiempo que tarda la luz en regresar a la fuente. Sin embargo, el kinect codifica los datos en la luz infrarroja cuando esta es enviada y analiza las distorsiones en la señal después que retorna, con el fin de dar más detalles 3D de la imagen en la escena. La imagen de profundidad 3D es procesada en el software para ejecutar el seguimiento del esqueleto y reconocimiento de gestos, las especificaciones del kinect se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Especificaciones del kinect

Rango del sensor de profundidad	1.2 a 3.5 m
Res. Imagen de profundidad	640 × 480 11 bit @ 30 Hz
Res. Imagen de color	640 × 480 8 bit @ 30 Hz
Resolución Audio	16 bit, 60 Khz
Campo de Vista	Horizontal: 27° Vertical: 43°
Rango de giro del motor	Vertical: ±27°

El mapa de profundidad se obtiene a partir de las operaciones ejecutadas por el chip PS1080 de PrimeSense sobre la imagen capturada por la cámara IR, ésta imagen VGA tiene una precisión de 11 bits, o 2048 distintos valores, representados gráficamente por niveles de gris desde el blanco (2047) hasta el negro (0). La medida de la distancia se representa en una escala logarítmica, así la precisión del sensor de profundidad es más baja en objetos más distantes al kinect. Una

vez el mapa de profundidad ha sido generado, es posible extraer información compleja de la escena como es el seguimiento del esqueleto y reconocimiento de gestos.

En este artículo, en la sección 5 se discute la resolución del sensor Kinect para aplicaciones en robótica. Otros trabajos han estudiado la resolución del dispositivo en distintos campos, en la rehabilitación, [17] ilustra la precisión de Kinect para medir el movimiento en personas con la enfermedad de Parkinson. En biomecánica, [18] muestra la precisión obtenida en la medición de las variables espacio-temporales de la marcha. En reconstrucción 3D, [19] estudió la precisión del sensor de profundidad del Kinect. En [20] se publican los resultados del uso del sensor Kinect como sensor de visión para un vehículo terrestre autónomo, pero estos trabajos no hacen un estudio acerca de la resolución del Kinect para imitación de movimiento humano por robots, a diferencia de este trabajo.

3. ANÁLISIS CINEMÁTICO DEL MOVIMIENTO HUMANO

El interés en esta parte del trabajo recae sobre el análisis cinemático, el cual considera el movimiento como una función del tiempo y el espacio y se centra en el estudio del movimiento de los segmentos de las extremidades inferiores y superiores con independencia de las fuerzas que lo generan. Es posible evaluar el rango del movimiento articular, trayectoria del centro de gravedad, velocidad y aceleración lineales y angulares (posición, velocidad y aceleración). Las técnicas empleadas son de dos tipos: directas e indirectas. Las primeras se llaman así porque se aplican, de manera directa, sensores que captan el movimiento del sujeto. Tales son: goniómetros y acelerómetros. Las señales procedentes de estos sensores se encuentran ligadas directamente al movimiento ejecutado por el sujeto en estudio. Las variables que suelen medirse son básicamente dos: ángulos y aceleraciones. Las indirectas se basan en distintos sistemas de obtención de imágenes (fotografía estroboscópica o por destello luminoso, filmación en video y cinematografía). Las ventajas de estas técnicas

son la simplicidad relativa de los equipos y la libertad de movimientos del individuo a examinar.

La técnica aquí utilizada es de tipo indirecta ya que se hará uso de un sensor de profundidad para detectar la persona y capturar información 3D de las coordenadas cartesianas. El Kinect obtiene información de profundidad de la escena codificada en valores entre 0 y 2047 (11 bits). Con base en esta información, y utilizando técnicas de procesamiento de imágenes y nubes de puntos, se logra obtener información 3D de las coordenadas cartesianas de los puntos en el esqueleto de una persona. La Figura 2 muestra el esqueleto óptico de una persona a una frecuencia de 30 Hz.

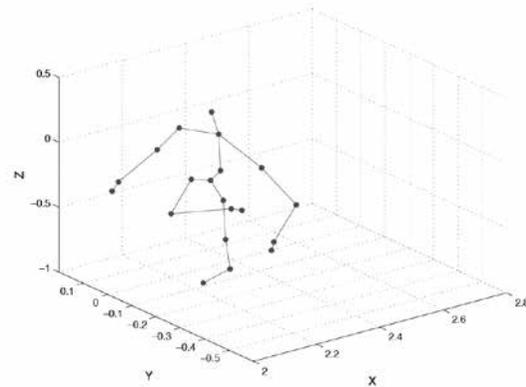


Figura 2: Esqueleto Óptico de una persona

De acuerdo al campo de visión del sensor, Tabla 1, para una persona de 1.75 m de altura es posible hacer un análisis del movimiento en un rango de 3.5 m si la persona marcha de frente al sensor, o de 4.5 m, lo hace de forma lateral.

3.1 Determinación de los Parámetros Cinemáticos del Movimiento

En esta parte se describe la relación de los parámetros cinemáticos a partir de las mediciones del sensor Kinect. El sensor calcula las coordenadas cartesianas (x, y, z) de los n puntos de seguimiento considerados a una frecuencia máxima de 30 Hz. El software muestrea esa señal, de tal forma que cada instante de tiempo t_k , se tiene información de los $r_i(t_k) = (x_i(t_k), y_i(t_k), z_i(t_k))$, tal que $i = 1, 2, 3, \dots, n$. Donde $r_i(t_k)$ es el vector posición

evaluado en el instante t_k , tomando como origen del sistema de referencia el sensor.

Se utiliza la interpolación cubica spline para obtener una curva continua y suave, $\mathbf{R}^i(t)$, para cada $r_i(t_k)$. Para obtener la velocidad, $v_i(t_k)$, se evalúa la función $\mathbf{V}(t)$ para todo $t = t_k$. $\mathbf{V}(t)$ se obtiene mediante la derivada de la función $\mathbf{R}_i(t)$ con respecto a t .

$$\mathbf{V}(t) = \frac{d\mathbf{R}_i(t)}{dt} \quad (1)$$

El mismo procedimiento se realiza para la aceleración lineal, $a_i(t_k)$. En este caso $\mathbf{A}(t)$ se obtiene a partir de la segunda derivada.

$$\mathbf{A}(t) = \frac{d^2\mathbf{R}_i(t)}{dt^2} \quad (2)$$

3.2 Cinemática inversa del movimiento en el plano frontal

El problema de la cinemática inversa consiste en transformar las coordenadas cartesianas (x, y, z) en coordenadas articulares (q_1, q_2, \dots, q_n) , [21]. Es decir, se debe hallar una función f tal que:

$$q = f(x)$$

Para estudiar la cinemática de los segmentos corporales, primero se define el tal segmento como la diferencia vectorial entre dos puntos, por ejemplo el segmento pierna, como la diferencia entre los puntos articulares rodilla y tobillo.

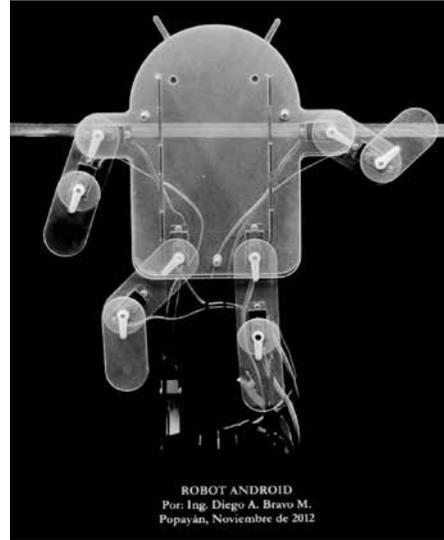
$$\mathbf{S}_{ab}(t) = \mathbf{R}_a(t) - \mathbf{R}_b(t) \quad (3)$$

Donde $a \neq b \in 1, 2, \dots, n$.

Sea $\mathbf{S}_{ab}(t)$ y $\mathbf{S}_{cd}(t)$ dos segmentos, por ejemplo los segmentos pierna y antepierna, respectivamente. Para obtener la evolución temporal del ángulo formado entre estos dos segmentos se utiliza:

$$\theta_{cd}^{ab} = \arccos \left(\frac{\mathbf{S}_{ab}(t) \cdot \mathbf{S}_{cd}(t)}{|\mathbf{S}_{ab}(t)| |\mathbf{S}_{cd}(t)|} \right) \quad (4)$$

Para obtener las funciones discretas de la posición angular, velocidad y aceleración lineal se evalúan los instantes de tiempo $t = t_k$ en las ecuaciones (3), (1) y (2).



(Figura 3. Robot Planar Android.

Este procedimiento se hace para calcular las posiciones angulares de las extremidades superiores e inferiores en el plano frontal, (8 posiciones angulares). Después de hacer el cálculo de las coordenadas articulares, estas se toman como referencia para la posición angular de los servomotores que constituyen el robot planar de base fija, detallado en la siguiente sección.

4. ROBOT PLANAR PARA IMITACIÓN DE MOVIMIENTO

Para el desarrollo de este proyecto se implementó la captura de movimiento con Kinect como sensor de visión, Processing como lenguaje de programación, utilizando librerías de OpenNI y NITE. Con esta información se construyó el Robot *Android 2D* que imita el movimiento humano en dos dimensiones, utilizando 9 servomotores como actuadores y la tarjeta Arduino UNO como tarjeta de control electrónica e interfaz física entre el computador y el robot, Figura 3.

La metodología empleada se muestra en la Figura 4. Primero el sistema de captura de movimiento entrega las coordenadas cartesianas (x, y, z) de 15 puntos articulares, luego el software calcula la cinemática inversa del movimiento humano en el plano frontal y entrega las coordenadas articulares (q_1, q_2, \dots, q_9) que sirven como señales de referencia a los servomotores que componen

- Sistema de captura para la imitación del movimiento humano por un robot planar de base fija •

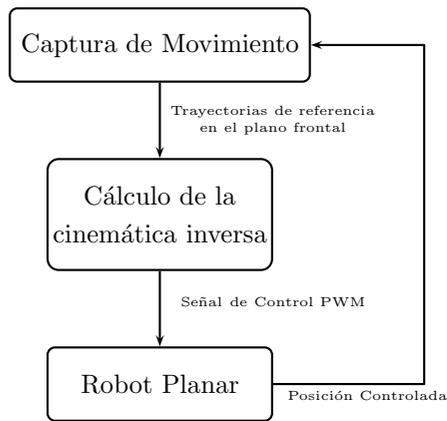


Figura 4. Metodología usada para la imitación de movimiento

al robot Android. Esta interacción cierra un bucle, en donde en cada instante de muestreo se actualizan las posiciones angulares para lograr la imitación del movimiento humano por parte del robot.

Para el desarrollo del software se escribieron dos programas: *Server Applet*, que se encarga de capturar las coordenadas cartesianas de los 15 puntos de seguimiento desde el sensor y transformarlas en las (9) posiciones articulares del robot, para ser enviadas en forma remota al programa *Client Applet*, Figura 5(a). Client Applet envía por el puerto serial, un vector con las posiciones articulares del robot a la tarjeta arduino, y esta a su vez envía las señales de control PWM a los 9 servomotores para imitar el movimiento humano, como se muestra en la Figura 5(b).

En la siguiente sección se muestran los resultados obtenidos al copiar las trayectorias angulares en el plano frontal del movimiento humano para la imitación por parte del robot

5. RESULTADOS

La Figura 6 muestra las trayectorias articulares del brazo derecho obtenidas mediante captura de movimiento a una frecuencia de 30 fps, y las trayectorias filtradas con una $f_c = f_s/2$, para evitar el solapamiento de la señal. La línea punteada denota la señal sin filtrar, mientras que la línea continua es la señal de la posición angular filtrada.



(a) Server applet



(b) Client applet

Figura 5. Interfaz gráfica de usuario en Processing .

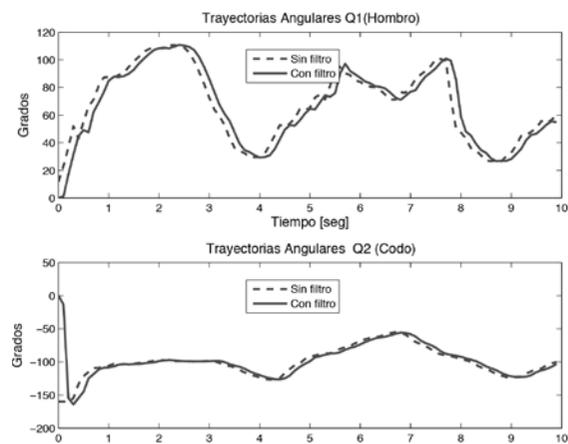


Figura 6. Trayectorias filtradas del hombro derecho q_1 y codo derecho q_2

Para el seguimiento de las trayectorias se utilizó la interpolación cúbica spline entre cada una de las posiciones articulares. El término spline hace referencia a una curva definida en porciones

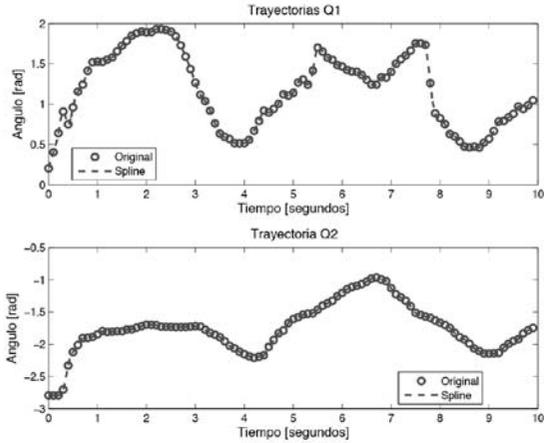


Figura 7. Trayectorias interpoladas del hombro derecho q_1 y codo derecho q_2

diferenciables, donde los splines cúbicos se utilizan para crear una función que interpole un conjunto de datos con la función de unir polinomios cúbicos para cada intervalo y construida para tener la primera y segunda derivada continuas, [22]. La Figura 7 muestra un conjunto de puntos interpolados por una línea punteada cuya ecuación obedece a un polinomio de tercer orden.

Resolución en X Y Z

La resolución espacial del sensor es una medida de la sensibilidad del mismo. Para el caso de la resolución espacial XY donde se considera que los pixeles son cuadrados, la resolución es una medida del ancho del mismo, el cual por razones ópticas [23], no será el mismo a diferentes profundidades (distancia entre el sensor y el objeto). En el caso de la resolución en Z, la pregunta que se hace es ¿En cuánto cambia el nivel de gris cuando el objeto se aleja por ejemplo 0,1m de su posición inicial?

En el caso más optimista [24], el error asociado a la medida de la posición cartesiana (coordenadas XYZ) será la mitad de la resolución de las mismas.

Resolución en X y Y

Para realizar la calibración estática se diseñó un experimento que consiste en colocar en la escena un objeto cuadrado de dimensión $w \times h$, se

procede a determinar cuántos pixeles caben en el ancho a distintas profundidades. Para ello se utiliza un perfil de línea a lo ancho de la imagen cerca al objeto de interés y se cuenta el número N_p de pixeles cuyo nivel de gris se encuentra alejado a menos de una desviación estándar de la media de los niveles de gris en todo el objeto. Para las distintas profundidades se determina el N_p que decrecerá a medida que esta aumente y la resolución se obtendrá dividiendo el ancho del objeto entre el número de pixeles.

$$Res_{xy} = Res_x = Res_y = \frac{w}{N_p} \quad (5)$$

Resolución en Z

Sea ΔL la variación en la profundidad y ΔN la variación en los niveles de gris. Para determinar la resolución espacial en Z se calcula a partir de:

$$Res_z = \frac{\Delta L}{\Delta N} \quad (6)$$

Para cada una de las profundidades se realiza este cálculo.

Los estudios para determinar la resolución espacial XYZ, evidencian que el error asociado a la medición de las coordenadas cartesianas aumenta a medida que el sujeto de análisis se aleje del sensor (escala logarítmica), obteniendo valores mínimos y máximos de: 1mm hasta 6.5 mm para X,Y; y 2 mm hasta 5 cm en Z, para valores de distancia al sensor de 0.8 m hasta 4 m

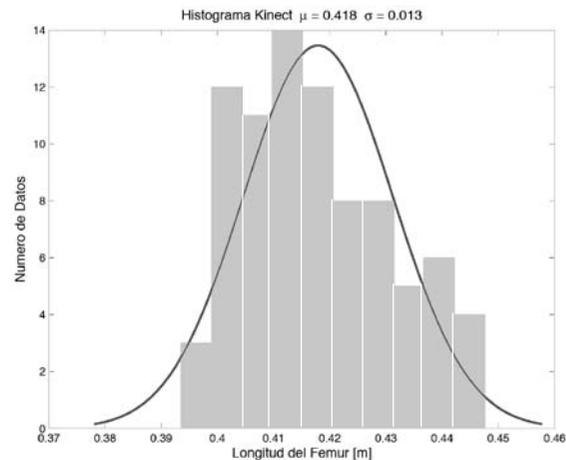


Figura 8. Histograma Kinect, $\mu = 0.418$, $\sigma = 0.013$

respectivamente. Las desviaciones en la medida de las coordenadas es considerable frente a la presencia de fuentes parásitas infrarrojas, por tal motivo, es necesario realizar un adecuado control del mismo.

La Figura 8 muestra una distribución de los datos obtenidos por Kinect para la longitud del femur, estos se aproximaron por una curva gaussiana de media igual a 0.418 m, con una desviación estándar de 0.013 m. Aunque no era propósito de este trabajo, el software permite calcular las medidas antropométricas de una persona, como son medidas cuantitativas de la longitud el femur, la tibia en las piernas, húmero y cúbito en los brazos.

6. CONCLUSIONES

La captura de movimiento se puede utilizar para permitir que los robots imiten el movimiento humano. Se espera replicar estos resultados en un ciclo de marcha de un robot bípedo conservando la estabilidad, entendiendo estabilidad como el hecho de que el robot no caiga al momento de realizar los movimientos necesarios para caminar.

El sistema de captura de movimiento con Kinect es de bajo costo y fácil instalación, y se presenta como una opción para realizar un estudio preliminar de los parámetros cinemáticos del movimiento humano, que aunque no es de alta precisión, permitirá realizar estudios previos antes de dirigirse a centros especializados del movimiento.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus más sinceros agradecimientos a la Universidad del Cauca en Colombia por todo el apoyo académico y financiero brindado en este proyecto.

REFERENCIAS

[1] S. Albretch, K. Ramírez, F. Ruiz, D. Weikersdorfer, M. Leibold, M. Ulbrich, and M. Beetz, "Imitating human reaching motions using physically inspired optimization principles,"

in *11th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, 2011.

- [2] A. Nakazawa, S. Nakaoka, K. Ikeuchi, and K. Yokoi, "Imitating human dance motions through motion structure analysis," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 3, 2002, pp. 2539 – 2544.
- [3] S. Nakaoka, A. Nakazawa, K. Yokoi, H. Hirikawa, and K. Ikeuchi, "Generating whole body motions for a biped humanoid robot from captured human dances," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 3, sept. 2003, pp. 3905 – 3910.
- [4] K. Munirathinam, S. Sakkay, and C. Chevallereau, "Dynamic motion imitation of two articulated systems using nonlinear time scaling of joint trajectories," in *International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Algarve, Portugal, May-June 2012.
- [5] K. Hu, C. Ott, and D. Lee, "Online human walking imitation in task and joint space based on quadratic programming," in *Robotics and Automation (ICRA), 2014 IEEE International Conference on*, June 2014, pp. 3458–3464.
- [6] A. Menache, *Understanding motion capture for computer animation*, 2nd ed. Elsevier, 2011.
- [7] V. Ivancevic and T. Ivancevic, *Human-Like Biomechanics: A Unified Mathematical Approach to Human Biomechanics and Humanoid Robotics*, ser. Intelligent Systems, Control and Automation: Science and Engineering, v. 28. Springer, 2008.
- [8] A. Cappozzo, A. Cappello, U. d. Croce, and F. Pensalfini, "Surface-marker cluster design criteria for 3-d bone movement reconstruction," in *Biomedical Engineering*, 1997.
- [9] J. P. Holden, J. A. Orsini, K. L. Siegel, T. M. Kepple, L. H. Gerber, and S. J. Stanhope, "Surface movement errors in shank kinematics and knee kinetics during gait," *Gait & Posture*, vol. 5, no. 3, pp. 217 – 227, 1997.
- [10] C. Reinschmidt, A. van den Bogert, B. Nigg, A. Lundberg, and N. Murphy, "Effect of skin movement on the analysis of skeletal knee joint motion during running," *Journal of Biomechanics*, vol. 30, pp. 729–732, 1997.
- [11] C. D. Mutto, P. Zanuttigh, and G. M. Cortelazzo, *Time-of-Flight Cameras and Microsoft*

- Kinect(TM)*. Springer Publishing Company, Incorporated, 2012.
- [12] G. Du, P. Zhang, J. Mai, and Z. Li, "Markerless kinect-based hand tracking for robot teleoperation." *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2012.
- [13] L. A. Schwarz, A. Mkhitarian, D. Mateus, and N. Navab, "Human skeleton tracking from depth data using geodesic distances and optical flow," *Image and Vision Computing*, vol. 30, no. 3, pp. 217 – 226, 2012.
- [14] S. Izadi, D. Kim, O. Hilliges, D. Molyneaux, R. Newcombe, P. Kohli, J. Shotton, S. Hodges, D. Freeman, A. Davison, and A. Fitzgibbon, "Kinect-fusion: Real-time 3d reconstruction and interaction using a moving depth camera," in *Proceedings of the 24th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, ser. UIST '11. New York, NY, USA: ACM, 2011, pp. 559–568.
- [15] R. A. Clark, Y.-H. Pua, K. Fortin, C. Ritchie, K. E. Webster, L. Denehy, and A. L. Bryant, "Validity of the microsoft kinect for assessment of postural control," *Gait & Posture*, vol. 36, no. 3, pp. 372 – 377, 2012.
- [16] A. Schmitz, M. Ye, R. Shapiro, R. Yang, and B. Noehren, "Accuracy and repeatability of joint angles measured using a single camera markerless motion capture system," *Journal of Biomechanics*, vol. 47, no. 2, pp. 587 – 591, 2014.
- [17] B. Galna, G. Barry, D. Jackson, D. Mhiripiri, P. Olivier, and L. Rochester, "Accuracy of the microsoft kinect sensor for measuring movement in people with parkinson's disease," *Gait & Posture*, vol. 39, no. 4, pp. 1062 – 1068, 2014.
- [18] R. A. Clark, K. J. Bower, B. F. Mentiplay, K. Paterson, and Y.-H. Pua, "Concurrent validity of the microsoft kinect for assessment of spatiotemporal gait variables," *Journal of Biomechanics*, vol. 46, no. 15, pp. 2722 – 2725, 2013.
- [19] K. Khoshelham, "Accuracy analysis of kinect depth data," in *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XXXVIII, August 2011.
- [20] R. El-laithy, J. Huang, and M. Yeh, "Study on the use of microsoft kinect for robotics applications," in *Position Location and Navigation Symposium (PLANS), 2012 IEEE/ION*, April 2012, pp. 1280–1288.
- [21] W. Khalil and E. Dombre, *Modeling, Identification and Control of Robots*, 2nd ed., ser. Kogan Page Science. Paris, France: Butterworth Heinemann, 2004.
- [22] C. D. Boor, *A Practical Guide to Splines*. Springer, 2001.
- [23] A. de la Escalera Hueso., *Visión por computador. Fundamentos y métodos*. Prentice Hall., 2001.
- [24] D. Baird, *Experimentación. Una Introducción a la Teoría de las Mediciones y al Diseño de Experimentos*. Prentice Hall, 1991.