

GEOMETRIC DEFINITION OF THE SPATIAL MOVEMENT OF AN ARTICULATION THROUGH PHOTOGRAMMETRIC TECHNIQUES FOR 3D

Cavas-Martínez, F.; Fernández-Pacheco, D.G.; Cañavate, F.J.F.; Nieto, J.

Universidad Politécnica de Cartagena

The definition of the movement that a force produces in a part of the human body is known as one of the acceptations of the Biomechanics. At present, there exist technologies to reproduce and capture the movement of the articulations, but the main difficulty lies in providing its spatial position in the geometric domain. This paper proposes an algorithm that permits to define the geometric position of a human articulation during the spatial trajectory by using images captured with photogrammetric techniques for 3D and geometric transformations. The obtained results demonstrate a geometric similarity with the real trajectory of the articulation.

Keywords: *Biomechanics; Spatial position; Geometric transformation; Trajectory*

DEFINICIÓN GEOMÉTRICA DEL MOVIMIENTO ESPACIAL DE UNA ARTICULACIÓN MEDIANTE TÉCNICAS DE FOTOGRAMETRÍA 3D

La definición del movimiento que una fuerza provoca en una parte del cuerpo humano se conoce como una de las acepciones de la biomecánica. Actualmente existen tecnologías de reproducción y captura del movimiento de las articulaciones, pero la dificultad reside en proporcionar su ubicación espacial en el dominio geométrico. En la presente comunicación se propone un algoritmo que permite definir la posición geométrica durante la trayectoria espacial de una articulación humana partiendo de imágenes obtenidas mediante técnicas de Fotogrametría 3D y usando transformaciones geométricas. Los resultados obtenidos muestran una semejanza geométrica con la trayectoria real de la articulación.

Palabras clave: *Biomecánica; Ubicación espacial; Transformación geométrica; Trayectoria*

1. Introducción

Dentro de la Biomecánica, una de sus afecciones utiliza el concepto de medición del movimiento para describir el análisis de todos los datos adquiridos durante un movimiento bidimensional o tridimensional provocado por una fuerza en una parte del cuerpo humano. Estos datos adquiridos se procesan posteriormente en aras de calcular determinados parámetros como la velocidad, los desplazamientos lineales o angulares, etc., los cuales permiten un análisis sistemático del movimiento humano con o sin trastornos esqueléticos o neuromusculares (Weinhandl et al., 2010; Suárez, Pérez & Díaz, 2006). De esta manera, esta información puede resultar muy útil para realizar un diagnóstico clínico (Peterson & Bronzino, 2008), ya que proporciona la naturaleza y la severidad de la patología, planteándose el tratamiento de choque más eficaz y adecuado no solo en el plano funcional, sino también estético (Sanz, 2003).

Existen en la actualidad varios sistemas de captura del movimiento a través de imágenes adquiridas mediante fotografía digital o video, como por ejemplo los sistemas ópticos, magnéticos, mecánicos, inerciales, etc., (Kitawa & Windsor, 2008).

Con respecto a la fotografía digital, la resolución de ésta, y por lo tanto de la imagen, viene condicionada por la calidad del sensor, las características de la lente y la organización de los píxeles del fotoreceptor (Pérez, 2011). Por otro lado, el formato video permite captar imágenes en movimiento, lo que brinda la ilusión de ver una rápida sucesión de múltiples imágenes o frames.

Los inicios de la captura de movimiento datan de la década de los años 70, donde su objetivo fundamental fue la búsqueda de aplicaciones médicas y militares. Sin embargo, fue la industria CGI (Computer-Generated-Imagery) quien descubrió en los años 80 el verdadero potencial de esta tecnología (Kitawa & Windsor, 2008).

Los trabajos de investigación actuales en el campo de la captura de movimiento del cuerpo humano se encuentran focalizados hacia la implementación de sistemas generales que impliquen un seguimiento y control de todo el cuerpo humano, y que sea lo suficientemente representativo de acciones reales. Sin embargo, el problema de este tipo de modelo articulado es la magnitud del espacio físico necesario para cada etapa de movimiento y el elevado coste computacional que implica (Deutscher, Davison & Reid, 2001). Los algoritmos propuestos, ya sean estocásticos o deterministas, buscan un espacio físico con 360° de libertad, es decir, sin restricciones, pero fracasan debido a la alta exigencia computacional. Algunos autores plantean definir una jerarquía de movimientos (Gavrila & Davis, 1996), mientras que otros proponen acotar el intervalo espacial de movimiento de cada sujeto (Hogg, 1983).

La captura mediante imágenes del movimiento ya sea parcial o total, de una parte o de la totalidad del cuerpo humano, no resulta muy compleja. La dificultad real radica en definir su ubicación espacial en el dominio geométrico, dado que no se conocen las transformaciones geométricas necesarias para cubrir en el dominio espacial la trayectoria tridimensional de un punto.

A la hora de capturar el movimiento del cuerpo humano, la geometría de los segmentos constitutivos del cuerpo varía dependiendo de cada software a considerar. Algunos autores proponen un modelo constitutivo del cuerpo humano basado en 17 segmentos y 14 articulaciones basado en coordenadas 3D de dichas articulaciones y la longitud de sus segmentos (Chen & Lee, 1992). Otros proponen un modelo constitutivo formado por 17 segmentos en forma de sección elíptica donde cada segmento posee 29 grados de libertad (Deutscher, Blake & Reid, 2000). Existe otro modelo representado por 14 cilindros elípticos que posicionan el centro del sistema de coordenadas en el centro del torso humano (Marr & Nishihora, 1978).

La presente comunicación tiene por objeto diseñar un algoritmo que permita definir la posición geométrica de un punto, realizando el movimiento natural de una articulación humana durante su trayectoria espacial partiendo de unas imágenes obtenidas mediante Fotogrametría 3D y usando transformaciones geométricas.

Además de las trayectorias, se ha reproducido el movimiento articulado del hemisferio superior del cuerpo humano a través del software Matlab ®. Para ello han sido considerados varios marcadores pasivos situados sobre los dos brazos con el fin de reproducir el movimiento natural realizado por el esqueleto humano asistido por su musculatura adyacente.

2. Metodología

La metodología propuesta se centra en la descripción del experimento a realizar. Para ello se hace hincapié en las diferentes partes de las que está comprendido, como es la posición y la calibración de las cámaras, la captura del movimiento y la detección del centro del marcador activo. Por último, se presenta un algoritmo en forma de diagrama de flujo que permite al usuario reproducir el experimento.

2.1 Descripción del algoritmo

Se propone un flujo de trabajo para obtener la trayectoria que describe el movimiento de un marcador óptico activo, concretamente una luz led, a partir de los videos de dos cámaras situadas estratégicamente. Este flujo consta de:

- Situación de las cámaras en la posición estéreo.
- Calibración de las dos cámaras.
- Filmado del movimiento del marcador de forma sincronizada por las dos cámaras.
- Obtención del centro del marcador en cada frame de video de las dos cámaras.
- Aplicación del sistema de ecuaciones (1) con las coordenadas del centro del marcador en cada frame de video de las dos cámaras. Es en este sistema donde se pueden conocer sus parámetros intrínsecos (distancia focal f , punto principal u_0 y v_0 , longitud horizontal d_x y vertical d_y de los píxeles) y extrínsecos (rotación y traslación), así como las coordenadas en píxeles que tiene en cada imagen un punto del espacio, con las coordenadas del centro del marcador en cada frame de video de las dos cámaras.

$$x_w(m_{11}^i - u^i * m_{31}^i) + y_w(m_{12}^i - m_{32}^i * u^i) - z_w(m_{13}^i - m_{33}^i * u^i) = (m_{34}^i - u^i * m_{14}^i) \quad (1)$$

$$x_w(m_{21}^i - v^i * m_{31}^i) + y_w(m_{22}^i - m_{32}^i * v^i) - z_w(m_{23}^i - m_{33}^i * v^i) = (m_{34}^i - v^i * m_{14}^i)$$

$$x_w(m_{11}^d - u^d * m_{31}^d) + y_w(m_{12}^d - m_{32}^d * u^d) - z_w(m_{13}^d - m_{33}^d * u^d) = (m_{34}^d * u^d - m_{14}^d)$$

$$x_w(m_{21}^d - v^d * m_{31}^d) + y_w(m_{22}^d - m_{32}^d * u^d) - z_w(m_{23}^d - m_{33}^d * v^d) = (m_{34}^d * v^d - m_{14}^d)$$

donde los superíndices i y d indican si se utiliza la cámara de la izquierda o de la derecha.

Para realizar este procedimiento se han empleado los medios técnicos de la Tabla 1.

Tabla 1: Listado de Materiales

Material	Cantidad	Características Técnicas
Ordenador Portátil	2	ASUS Notebook K72jk Series
Cámara web	2	Logitech Webcam C300 - 1.3MP
Marcador Pasivo	1	Led Blanco 5 m.m.
Patrón de calibración bidimensional	1	-
Sábana Color Oscuro	2	-

2.2. Diseño del experimento

2.2.1 Posición de las cámaras

En primer lugar se colocaron las dos cámaras en dos soportes metálicos de forma que ambas permanecieran invariantes en su posición estéreo una vez ya calibradas. La distancia espacial entre ambas fue de 100 centímetros.

2.2.2 Calibración de las cámaras

Para realizar el proceso de calibrado de las cámaras se utilizó una herramienta desarrollada en Matlab® la cual, tras realizar una serie de operaciones, proporciona los parámetros de calibración. Estos se dividieron en:

- a. Intrínsecos (distancia focal f , punto principal u_0 y v_0 , longitud horizontal d_x y vertical d_y de los píxeles), los cuales contienen la geometría interna y las características ópticas de la cámara.
- b. Extrínsecos (rotación y traslación), que comprenden la posición 3D y la orientación o posición espacial de la cámara relativa al sistema de coordenadas global.

El cálculo de estos parámetros fue realizado sobre el marcador activo considerado. En el experimento se mantuvieron constantes las condiciones de ensayo referidas a la iluminación y al fondo, así como la ropa utilizada cuando se realizaban los movimientos del marcador.

Para efectuar la calibración de las dos cámaras se realizaron un conjunto de 16 fotografías simultáneas al patrón bidimensional colocado en distintas posiciones.

2.2.3 Captura del movimiento del marcador

En los diferentes experimentos se filmaron movimientos arbitrarios del marcador mediante las dos cámaras web conectadas a los dos portátiles. El inicio de los dos videos se efectuó de forma manual, por lo que hubo que garantizar la sincronización entre las dos cámaras para que ambas detectaran el movimiento del marcador en la misma cantidad de frames. Esto se logró manteniendo apagado el marcador al iniciar los videos y utilizando su encendido como evento simultáneo que ocurre en las dos cámaras. Aquí influye el hecho de que las cámaras sean iguales, esto es, los videos tomados por éstas tienen que tener la misma frecuencia de captura (frames por segundo), así como el tamaño en píxeles. Los videos tomados por las dos cámaras en los diferentes experimentos presentan las siguientes propiedades: ancho del frame (640 píxeles), alto del frame (480 píxeles), tasa de captura (15 fps).

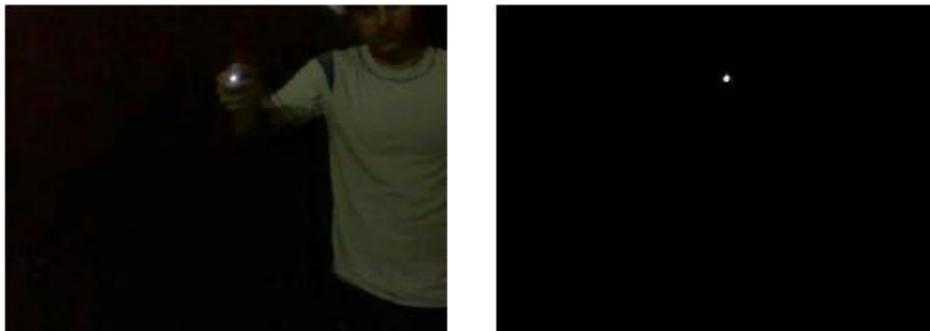
2.2.4 Detección del centro del marcador activo

Para obtener las coordenadas bidimensionales en píxeles del centro del marcador LED en cada frame de video, es necesario separarlo del resto de los objetos que aparezcan en la imagen, es decir, se necesita realizar un proceso de segmentación.

La segmentación de imágenes es la identificación y el aislamiento de una imagen en regiones que se espera correspondan a una estructura determinada. Una de las técnicas que existen es el denominado método basado en la umbralización, en el cual todos los píxeles que tienen el mismo valor de intensidad, por encima o por debajo de un nivel, son clasificados como parte de un segmento. La umbralización es por lo general rápida y puede ser efectuada en tiempo real. La mayor preocupación en el método basado en píxeles es establecer el umbral o nivel apropiado. Encontrar un nivel de umbral adecuado puede ser proporcionado por una gráfica que contenga la distribución de la intensidad de los píxeles en la imagen. Esta gráfica se denomina histograma y es de gran ayuda para seleccionar niveles de umbral (Semmlow & Johson, 2004).

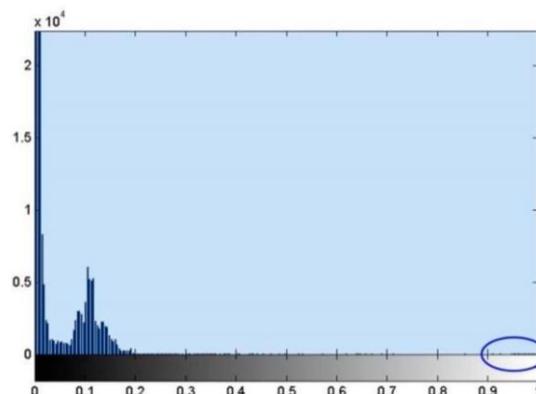
Para segmentar los frames de video e identificar el centro del marcador, el umbral que debemos definir es el que permita detectar sólo un marcador activo, al que después se le puede hallar su centro de masa. Para garantizar esto, el área donde se realiza la captura debe prepararse de forma tal que la iluminación sea tenue y exista un fondo oscuro. Este es un paso de vital importancia para que el algoritmo propuesto funcione correctamente. En la Figura 1(izquierda) se observa un frame de video de una de las dos cámaras que detectó al marcador en uno de los experimentos realizados. Este mismo frame se muestra después de segmentarlo en la Figura 1(derecha).

Figura 1. Frame de uno de los videos en los que aparece el marcador (izquierda) y frame del marcador después de realizar el proceso de segmentación (derecha)



Cumpliendo estas condiciones de ensayo, la figura 2 muestra el histograma que se obtiene de un frame que detectó al marcador.

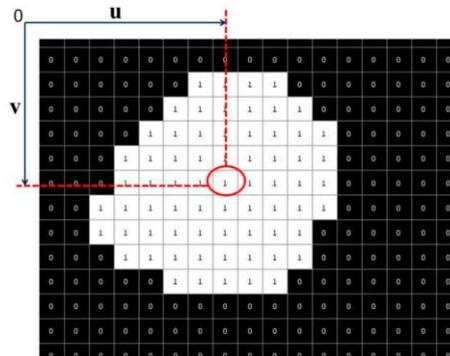
Figura 2. Histograma de un frame que detectó al marcador



A partir de la figura 2 puede verse que en los *frames* predominan los tonos oscuros (parte izquierda del histograma), mientras que sólo una pequeña cantidad de píxeles está por encima del umbral 0.9 (parte de la derecha), siendo precisamente éstos los que pertenecen al punto luminoso. En este histograma el intervalo en los niveles de gris es de 0 a 1, debido a que se obtuvo mediante un procesamiento en Matlab®, que tomó los *frames* de video como datos de tipo doble.

Una vez segmentados los *frames* que componen los videos de la captura e identificados los que detectan al marcador, hay que obtener las coordenadas en píxeles que tiene el centro del punto luminoso en cada uno de ellos. Esto puede realizarse hallando su centro de masa, algo que puede hacerse de manera sencilla en MatLab utilizando la función 'regionprops'. Al utilizar esta función se tomó la parte entera del valor devuelto por lo que se comete un error de un píxel en la coordenada encontrada. La Figura 3 es una vista ampliada de la imagen donde aparece segmentado el marcador activo y donde se muestra el píxel que se detecta como centro del marcador al efectuar este proceso.

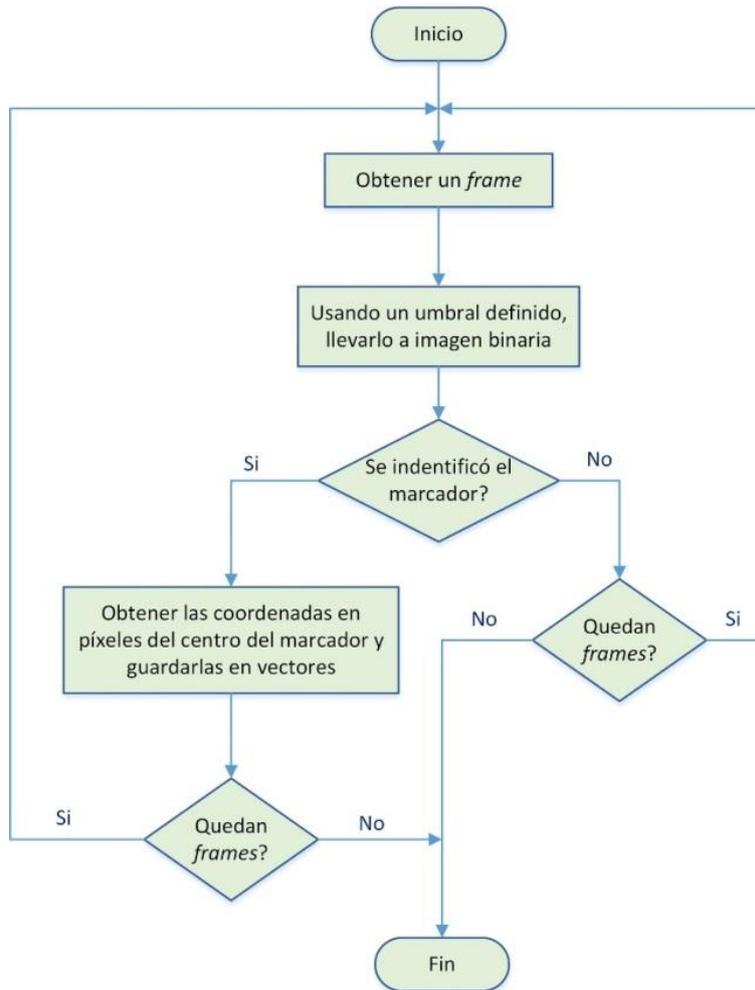
Figura 3. Pixel que se detecta en el centro del marcador activo



2.3. Propuesta del algoritmo

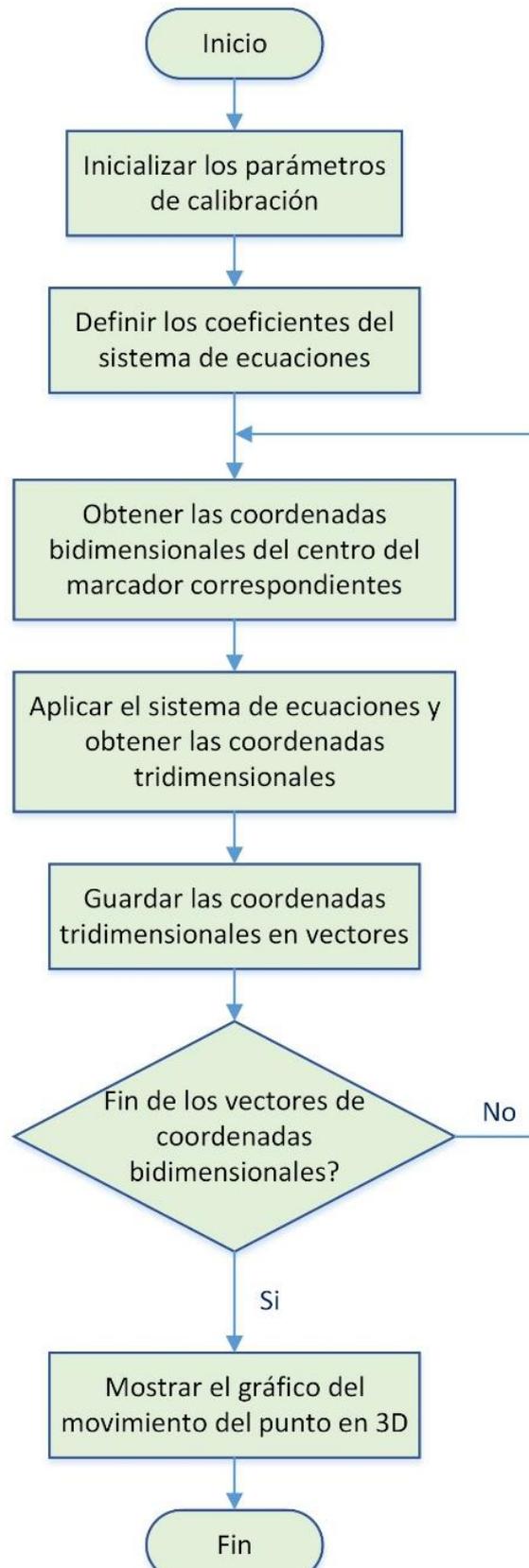
Para llevar a cabo los pasos explicados hasta el momento, se propone el siguiente diagrama de flujo que indica el proceso que debe aplicar a cada video que captura el movimiento del marcador. La programación del mismo se realizó utilizando el software Matlab®.

Figura 4. Línea de trabajo para obtener el marcador



Una vez obtenidas las coordenadas que tiene el centro del marcador en cada frame del video de las dos cámaras y definidos los parámetros de calibración, puede determinarse la trayectoria que describió el movimiento del marcador en el espacio utilizado. El siguiente diagrama de la Figura 5 indica la línea de trabajo a seguir.

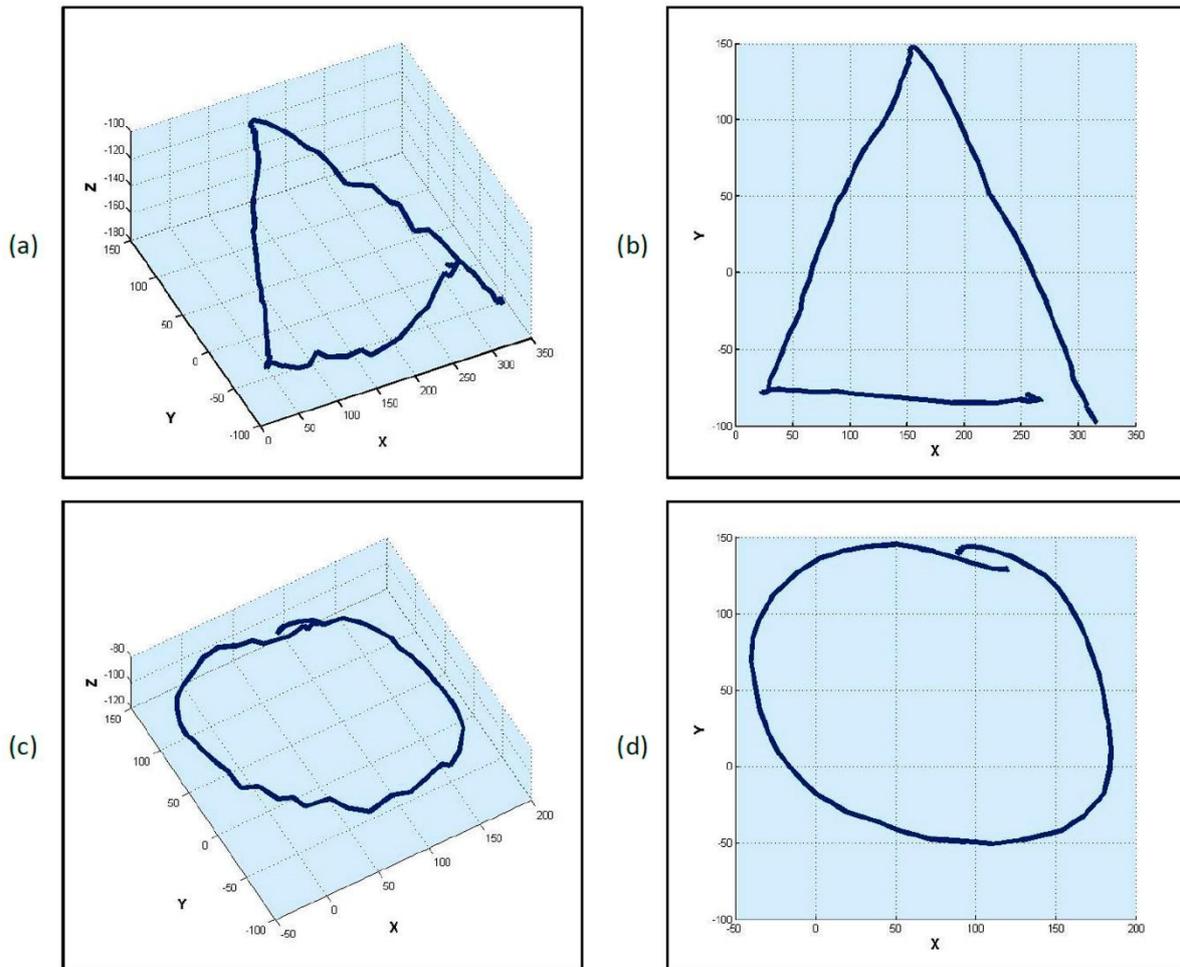
Figura 5. Línea de trabajo para determinar la trayectoria de movimiento del marcador



3. Resultados

La metodología propuesta permitió obtener las coordenadas tridimensionales de los movimientos de un marcador activo a partir de los videos de las cámaras. La mayoría de los movimientos realizados durante el experimento fueron hechos de manera que al ser reconstruidos pudieran compararse fácilmente con los videos de captura, por ello se realizaron movimientos de fácil reconocimiento geométrico como movimientos circulares o triangulares. En la Figura 6 se representa gráficamente cada trayectoria mediante una vista tridimensional y otra bidimensional, está última en formato cartesiano X, Y que es la que obtenemos en posición frontal.

Figura 6. Trayectorias obtenidas en el experimento



A través de estas figuras se puede advertir que algunas de las curvas tienen picos en la trayectoria que describen. Esto es debido a que las gráficas son una discretización del movimiento real del punto definido por el marcador activo. Es decir, como la tasa de captura de las cámaras es de 15 fps, en un segundo se obtienen 15 posiciones del movimiento del marcador que si es efectuado con cambios bruscos en su dirección, dará estos picos en la trayectoria representada. De esto se puede deducir que los sistemas que utilizan cámaras con grandes tasas de captura se acercan más al movimiento real que puedan tener los marcadores.

Para lograr el sincronismo entre los dos videos capturados por ambas cámaras, se utilizó el marcador activo ya comentado. La relación de los frames que se detectaron respecto al marcador activo (ver Tabla 2) indica que de los 8 videos tomados entre las dos cámaras, en

7 de ellos las dos cámaras detectan al marcador la misma cantidad de frames. En el único caso en que esto no sucede (vídeo 5), la diferencia es de un frame, lo que provoca un desfase en el tiempo de los videos de 1/15 segundos, ya que la tasa de captura de las cámaras es de 15 fps.

Tabla 2: Relación de los frames que detectaron al marcador pasivo

Vídeo	Frames de la Cámara 1	Frames de la Cámara 2
1	94	94
2	78	78
3	62	62
4	73	73
5	85	84
6	98	98
7	101	101
8	88	88

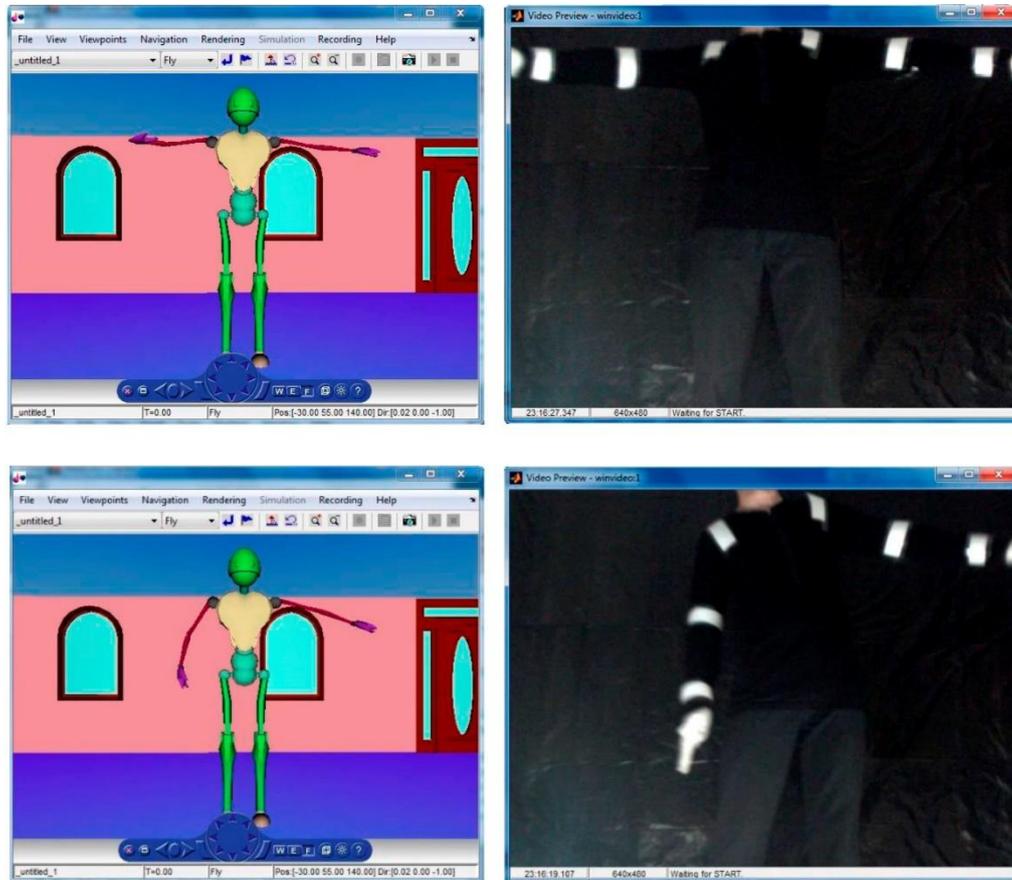
En el experimento realizado se mantuvieron constantes las condiciones de entorno referidas a la iluminación y al fondo, así como a la ropa utilizada cuando se realizaron los movimientos del marcador activo.

Figura 7. Segmentación de marcadores pasivos



Por otro lado, se realizó un segundo experimento donde se reprodujo el movimiento articulado en 2D del hemisferio superior del cuerpo humano a través del software Matlab ®. Para ello se consideraron varios marcadores pasivos situados sobre los dos brazos con el fin de reproducir el movimiento natural. Inicialmente fue necesario binarizar y segmentar las imágenes de los marcadores pasivos (Figura 7) para posteriormente reproducir el movimiento a través de un modelo virtual (Figura 8).

Figura 8. Reproducción movimiento articulado hemisferio superior mediante modelo virtual



4. Conclusiones

En esta comunicación se propone un algoritmo para la definición geométrica de la trayectoria espacial de un punto que reproduce el movimiento natural de una articulación humana mediante técnicas de Fotogrametría 3D, usando para ello transformaciones geométricas de rotación y traslación que presentan una semejanza geométrica entre las trayectorias reales que describe el movimiento del punto luminoso y las que se obtienen. El control de las condiciones de ensayo, como la iluminación y el fondo, permite aislar el punto luminoso del resto de los elementos que pueden aparecer en el área de captura, sin que se observen puntos fantasmas que afecten a la obtención del centro del marcador en el proceso de segmentación.

Por otro lado, actualmente se está trabajando también en la reproducción a través de un modelo virtual del movimiento articulado en 2D del hemisferio superior del cuerpo humano para obtener la trayectoria espacial de varios puntos luminosos (marcadores pasivos) utilizando el algoritmo propuesto en este trabajo.

5. Referencias

- B. C. Suárez, J.J.R.P., and R. M. Díaz. (2006). Informática y Deporte. Movimiento Deportivo. XX Jornadas Canarias de Traumatología y Cirugía Ortopédica (pp. 244-246). Las Palmas de Gran Canaria.

- Deutscher, J., Blake, A., & Reid, I. (2000). Articulated body motion capture by annealed particle filtering. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (pp. 126-133).
- Deutscher, J., Davison, A., & Reid, I. (2001). Automatic partitioning of high dimensional search spaces associated with articulated body motion capture. *Computer Vision and Pattern Recognition, 2001. CVPR 2001. Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on* (pp. II-669-II-676).
- Gavrila, D.M., & Davis, L.S. (1996). 3D model-based tracking of humans in action: a multi-view approach. *Proc. Conf. Computer Vision and Pattern Recognition* (pp. 73-80). University of Maryland at College Park.
- Hogg, D. (1983). Model-based vision: a program to see a walking person. *Image and Vision Computing*, 1 (1), 5-20.
- James, J. (2006). *Digital Intermediates for Film and Video*. Elsevier.
- Marr, D., & Nishihara, H.K. (1978). Representation and recognition of the spatial organization of three-dimensional shapes. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Containing papers of a Biological character*. Royal Society (Great Britain) (pp. 269-294).
- Pérez, I.M.C. (2011). *Obtención del Dominio Geométrico Exterior del Sistema Máxilo-Craneal*. La Habana: Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría.
- Peterson, D.R., & Bronzino, J.D. (2007). *Biomechanics: Principles and Applications*, Second Edition. Taylor & Francis.
- Sanz, C.M. (2003). *Marcha Patológica*. *Revista del pie y tobillo*, 1-7.
- Weinhandl, J.T., Armstrong, B.S.R., Kusik, T.P., Barrows, R.T., & O'Connor, K.M. (2010). Validation of a single camera three-dimensional motion tracking system. *Journal of Biomechanics*, 43 (7), 1437-1440.
- Zen, C., & Hsi-Jian, L. (1992). Knowledge-guided visual perception of 3-D human gait from a single image sequence. *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on*, 22 (2), 336-342.