



Simulaciones músculo-esqueléticas de la secuencia de pedaleo de ciclistas

Iker Agirre-Olabide¹, Aitor Plaza¹, Javier Ibarrola Chamizo^{1,2}, Julen Bacaicoa^{1,2}

¹ Departamento de Ingeniería, Universidad Pública de Navarra. iker.agirre@unavarra.es, aitor.plaza@unavarra.es, javier.ibarrola@unavarra.es, julen.bacaicoa@unavarra.es

² Institute of Smart Cities (ISC), Universidad Pública de Navarra.

Los estudios biomecánicos en el ciclismo se han vuelto una herramienta esencial para optimizar el pedaleo del ciclista para maximizar la transferencia de la energía generada por el sujeto en energía mecánica. Un pedaleo sub-óptimo además de reducir el rendimiento puede generar diferentes lesiones en el ciclista.

Este trabajo presenta simulaciones músculo-esqueléticas para analizar la influencia músculo-esquelética durante la fase de pedaleo de un ciclista. Estas simulaciones se realizan con el software OpenSim, utilizando la cinemática inversa. De este modo el monitorizado de las posiciones articulares del sujeto durante toda la fase de pedaleo es necesaria.

Las técnicas de visión artificial han experimentado un notable crecimiento en los últimos años, y basándose en métodos de inteligencia artificial, la detección de la pose humana ha sido altamente perfeccionada. Por ello, se utiliza un software libre de detección de la pose humana sin la necesidad de utilizar marcadores en las articulaciones del sujeto. Además, se utilizan 2 cámaras que se calibran y sincronizan para poder obtener las posiciones de los marcadores en 3 dimensiones. Finalmente, con el uso de todos los datos experimentales se han realizado las simulaciones músculo-esqueléticas para analizar la fase de pedaleo del ciclista.

1. Introducción

Durante la última década, la biomecánica está empezando a ser un tema de gran interés dentro del ciclismo, ya que una geometría inadecuada puede generar diferentes lesiones en los deportistas. Además, una óptima geometría aumenta la eficiencia de pedaleo y en consecuencia el rendimiento del deportista [1-4]. El método empleado es el “*bike fitting*” en el cual se optimiza la posición de la bicicleta respecto al ciclista utilizando mediciones experimentales para evaluar la postura del ciclista. Las técnicas más empleadas para evaluar la posición del ciclista se basan en el estudio de los ángulos articulares a partir de la grabación en vídeo de la secuencia de pedaleo del ciclista, ya que permite individualizar el ajuste [5]. Sin embargo, la correcta colocación de los marcadores en los centros articulares puede suponer una fuente de error, ya que se basa en el contacto manual de la articulación y la experiencia del profesional evaluador [6].

En los últimos años se han desarrollado nuevas técnicas de identificación de poses humanas sin la necesidad de utilizar marcadores y basados en redes neuronales entrenadas para la detección de la pose mediante imágenes o videos. Entre ellos los más extendidos son OpenPose [7-9], MediaPipe [10] and BlazePose [11]. El uso de estos programas sin el empleo de marcadores se está extendiendo a aplicaciones ciclista [12-13] los cuales se utilizan como reemplazo de los marcadores tradicionales del “*bike fitting*”. Para completar el estudio es necesario el tratamiento de los datos y OpenSim se presenta como una alternativa a los softwares comerciales, ya que es un software libre para modelar, simular, controlar y analizar el sistema neuromusculoesquelético [14]. Éste ha sido utilizado para modelar diferentes deportes como el golf [15], ciclismo [16] y atletismo [17].

En este trabajo, se realiza un estudio de la orientación de la bicicleta respecto de la colocación inicial de las cámaras y se determina la óptima orientación para la detección de la pose humana mediante OpenPose. Para ello se describe la metodología experimental empleada y se presentan 3 configuraciones de estudio, donde se varía la orientación de la bicicleta. Para ello se realizan las calibraciones de las cámaras y se estiman los marcadores de la pose humana mediante el software libre de OpenPose. Los datos obtenidos se combinan con la técnica de triangulación para poder estimar la posición del ciclista en el espacio tridimensional. Finalmente, las medidas se utilizan para realizar simulaciones de cinemática inversa mediante OpenSim. Estos resultados se utilizan para determinar la óptima orientación de las cámaras respecto al ciclista y se proponen las mejoras a implementar en la bicicleta para mejorar la comodidad del ciclista.

2. Grabación experimental

La grabación de la secuencia de pedaleo del ciclista se realiza en un espacio amplio y libre de ruido visual para una correcta visualización del movimiento del ciclista, que permita centrar la atención en el sujeto estudiado. En la Figura 1 se muestran los elementos utilizados para la ejecución de las grabaciones: (1) bicicleta de montaña, (2) rodillo magnético para mantener la bicicleta estática durante las grabaciones, (3-4) 2 webcams con una resolución HD, conexión USB y una frecuencia de grabación de 30 fps, (5) tablero con patrón de ajedrez asimétrico para la calibración y (6) ordenador portátil.



Figura 1: Espacio de trabajo para el estudio del pedaleo del ciclista.

En primer lugar, es necesario realizar la calibración de cada cámara como la calibración estéreo de ambas. Para ello, se realiza una secuencia de grabación sincronizada de las dos cámaras donde una persona desplaza el tablero de ajedrez asimétrico (7x9 cuadrados de 35x35 mm) por todo el rango de grabación de las webcams. De este modo se obtienen 100 imágenes por cámara que son utilizadas para realizar los dos tipos de calibraciones mencionadas anteriormente. Las imágenes obtenidas se utilizan para determinar las características intrínsecas de cada cámara mediante la aplicación de “*Camera Calibrator*” de MATLAB. En la Figura 2 se muestran los resultados de las calibraciones de cada cámara. Estas calibraciones se emplean para eliminar el efecto “ojo de pez” que aparece en las grabaciones con el fin de obtener una detección de puntos y una representación 3D más precisa.

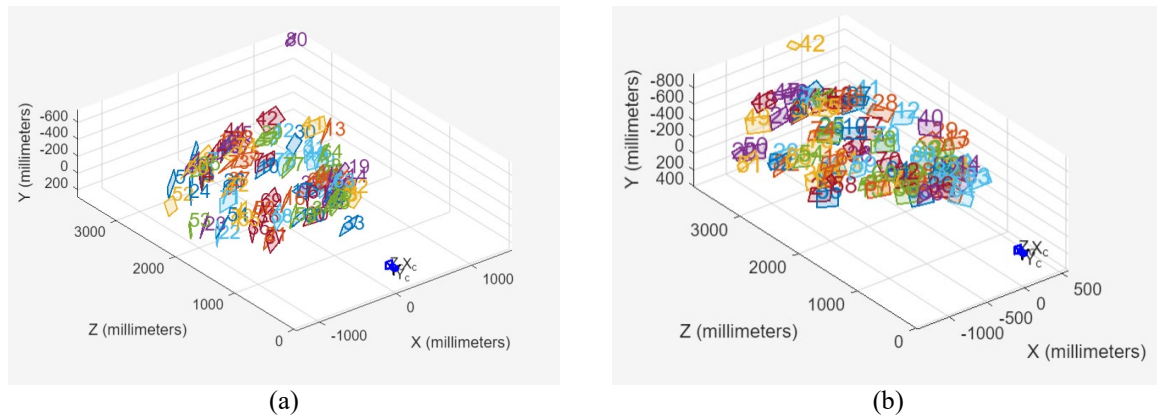


Figura 2: Resultados de la calibración intrínseca: (a) cámara 1 y (b) cámara 2.

En segundo lugar, se utilizan las mismas imágenes para obtener los parámetros extrínsecos de la configuración de las 2 cámaras. Para ello se utiliza la aplicación “Stereo Camera Calibrator” de MATLAB y en la Figura 3 se muestra la calibración realizada.

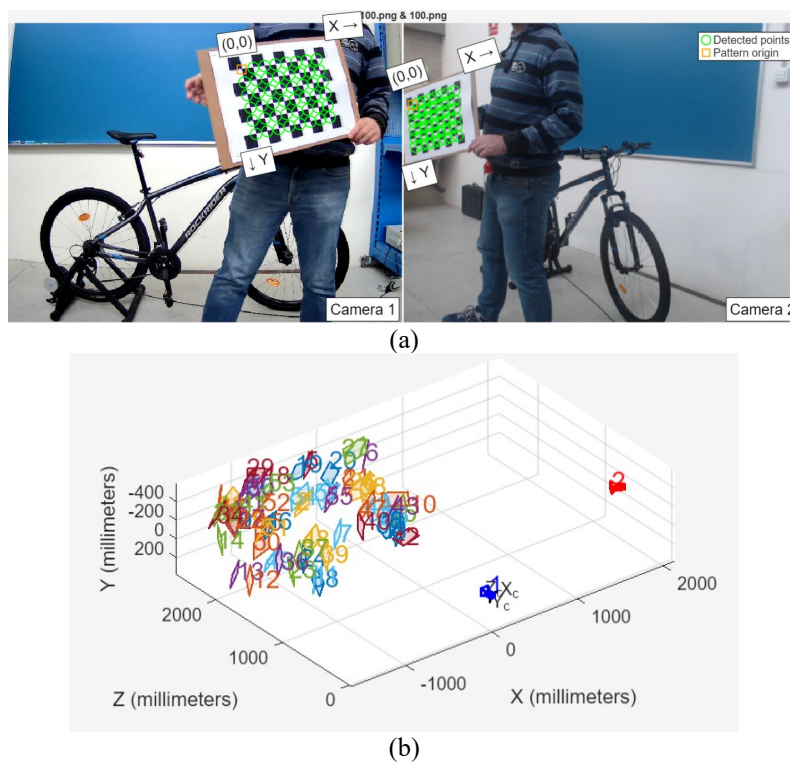


Figura 3: (a) Ejemplo de calibración y (b) resultados de la calibración extrínseca.

Finalmente se realizan 3 grabaciones diferentes para determinar la influencia de la colocación de las cámaras en la detección de los puntos de la pose humana. En lugar de mover las cámaras de lugar se ha rotado la bicicleta para obtener 3 diferentes configuraciones que se muestran en la Figura 4.

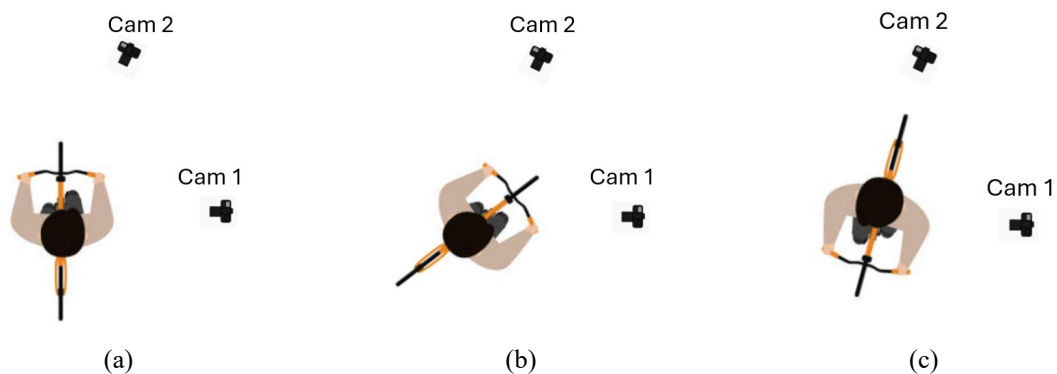


Figura 4: Tres configuraciones de bicicleta estudiadas: configuración (a) 1, (b) 2 y (c) 3.

3. Detección de la pose del ciclista

En la actualidad existen diversos códigos libres para la detección de la pose humana. Durante este trabajo, se utiliza una red neuronal abierta denominada OpenPose [8] para la identificación de poses humanas utilizando imágenes o vídeos. La siguiente figura muestra a modo de ejemplo las poses humanas identificadas en la imagen. Aunque OpenPose tenga la capacidad de detectar 135 puntos de la pose humana en este trabajo las coordenadas detectadas se muestran en la Figura 5.



Figura 5: Numeración de las coordenadas extraídas con OpenPose (a) [8] y ejemplo de postura humana (b).

El resultado del procesamiento de los vídeos es un fichero json, el cual se combina con los parámetros intrínsecos y extrínsecos de la calibración para obtener puntos espaciales del ciclista en 3 dimensiones y en coordenadas X, Y y Z. Para ello se utiliza el comando de triangulación que combina los datos obtenidos del procesamiento de OpenPose con los parámetros estéreos de la calibración de las cámaras. En la Figura 6 se muestra una representación tridimensional donde se han eliminado los puntos de detección de los puntos de la cara y los pies.

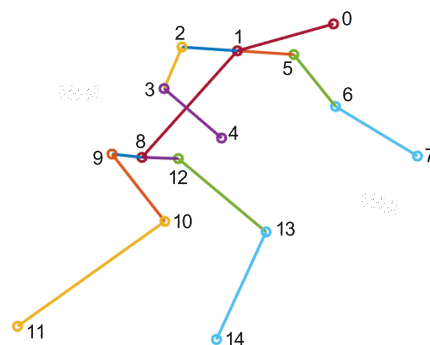


Figura 6: Esqueleto con puntos de referencia extraídos por OpenPose.

4. Simulaciones basadas en la cinemática inversa

Los puntos espaciales obtenidos del tratamiento de los datos se utilizan para realizar simulaciones de las tres configuraciones estudiadas en este trabajo. El software utilizado para la ejecución de la cinemática inversa es OpenSim, software extensible para modelar, simular, controlar y analizar el sistema neuromusculoesquelético. Es un sistema de software de libre acceso que permite el desarrollo modelos de estructuras musculoesqueléticas y crear simulaciones dinámicas del movimiento [14].

El modelo musculoesquelético utilizado en este trabajo es el desarrollado por Uhlrich et al. [18], en el cual se utilizan 54 marcadores para definir el movimiento del esqueleto. Además, el modelo cuenta con 62 elementos que representan los diferentes músculos que trabajan en la parte inferior del cuerpo humano.

El modelo mencionado se ha tenido que adecuar a las casuísticas de este trabajo. Para ello, se han eliminado varios marcadores y se han ajustados sus posiciones para poder obtener una correlación óptima entre los puntos detectados por OpenPose y los marcadores del modelo. Además, se han eliminado las coordenadas de la cara, ya que estas distorsionan el resultado de las cinemáticas inversas, simplificando el modelo a 20 marcadores. Los datos espaciales obtenidos de la triangulación se han convertido al formato necesario para su lectura mediante el software

de OpenSim. Para el escalado del modelo se han utilizado los primeros frames del vídeo. En la figura 7 se muestra la sincronización de las grabaciones de las 2 cámaras y la simulación de OpenSim.

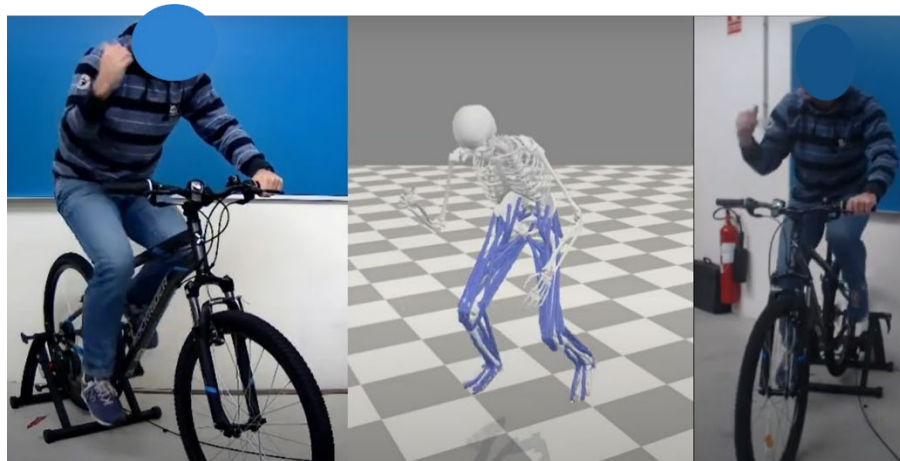


Figura 7: Sincronización de los vídeos de cada cámara y la simulación de OpenSim.

5. Resultados

En este apartado se analizan los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas en OpenSim. Para ello se estudian la evolución de diferentes ángulos de articulares de la parte inferior del ciclista. En primer lugar, se va a estudiar la influencia la posición de las cámaras en la óptima detección de la pose humana. Para ello se estudian la evolución de los de la rotación de la pelvis, el ángulo de las rodillas y la rotación y flexión de la cadera. En la Figura 8 se muestra la evolución de la rotación que sufre la pelvis durante la fase del pedaleo de los 3 casos estudiados en este trabajo. La primera y tercera configuración tienen una fluctuación durante el pedaleo mientras que en la segunda configuración esta variación es menor. Además, la configuración 3 entorno al segundo 14 sufre un desfase de 360 grados, sin influir en la oscilación. De este análisis se puede concluir que la detección de los puntos de la cadera de ambos lados es óptima para la segunda configuración mientras que para los otros casos la detección de uno de los puntos de la cadera no es adecuada, ya que durante el pedaleo la pelvis no puede sufrir grandes variaciones.

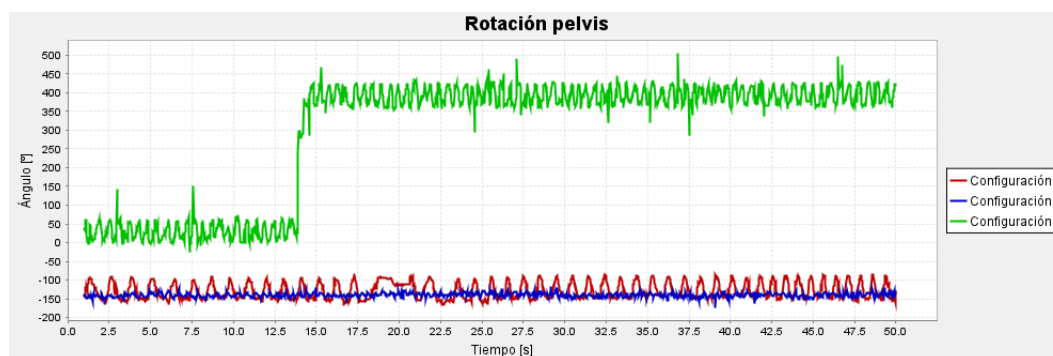


Figura 8: Evolución de la rotación de la pelvis para los 3 casos de estudio.

Aunque el análisis de la rotación de la pelvis puede ser suficiente para descartar 2 de los 3 casos de estudio, también se va a analizar qué es lo que pasa en la detección de los puntos de la cadera para determinar cuál es el que no se detecta de manera óptima. Para ello, se estudia la rotación que sufre la cadera y el ángulo de flexión de la cadera. En la Figura 9 (b) se observa como para el segundo caso de estudio la flexión de la cadera es similar tanto para la derecha como para la izquierda. Sin embargo, la configuración 1 (Figura 9 (a)) muestra una gran diferencia entre la flexión de la cadera izquierda con la de la derecha. De este modo se concluye que colocando las cámaras en el mismo lado del ciclista la detección no es óptima, ya que la grabación de la cámara 1 no detecta el lado izquierdo del ciclista. En la configuración 3 (Figura 9 (c)) en cambio la detección no tiene tantos errores, ya que las dos cámaras están colocadas en la parte posterior del ciclista. Sin embargo, hay un máximo para ambas flexiones de la cadera.

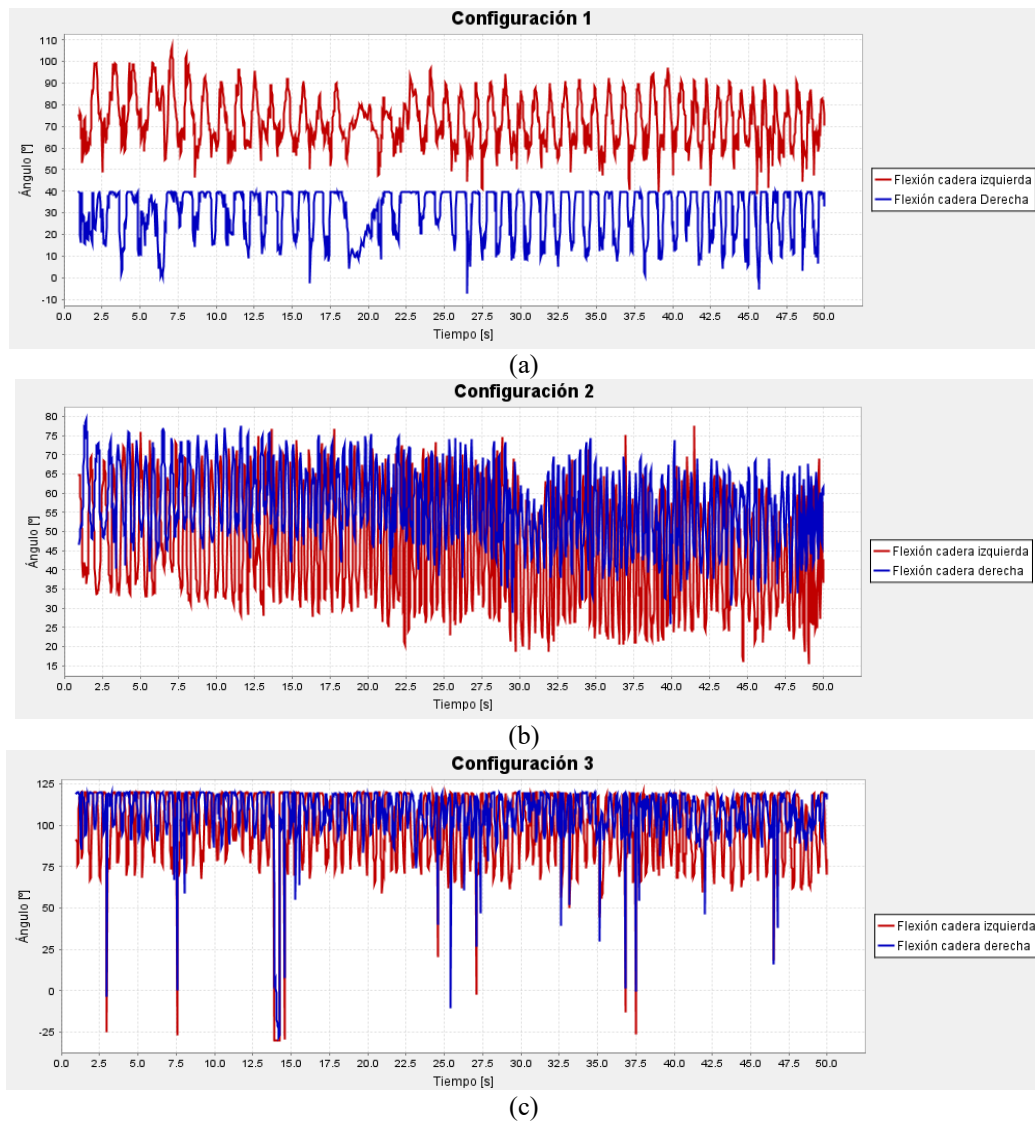


Figura 9: Evolución de la flexión de la cadera para los 3 casos de estudio.

El último parámetro biomecánico que se estudia para determinar la influencia que tiene las posiciones de las cámaras respecto al ciclista es la rotación de la cadera. En la Figura 10 (a) se aprecia que la rotación de la cadera no es coherente y confirma que colocando las dos cámaras en el mismo lado la detección de uno de los lados no es adecuada. En cuanto a las otras dos configuraciones analizando la rotación de la cadera no se puede obtener una clara conclusión, puesto que en ambos estudios hay una variación entre los ángulos de la cadera derecha e izquierda. Sin embargo, en la tercera configuración (Figura 10 (c)) existen unos picos durante la evolución de los ángulos mostrando que en determinadas fases del pedaleo la detección de los puntos de la cadera no es correcta. Por lo tanto, se concluye que las cámaras tienen que estar colocadas en ambos lados del ciclista y preferiblemente en la parte frontal, aunque desde la parte trasera también se puede obtener una detección adecuada.

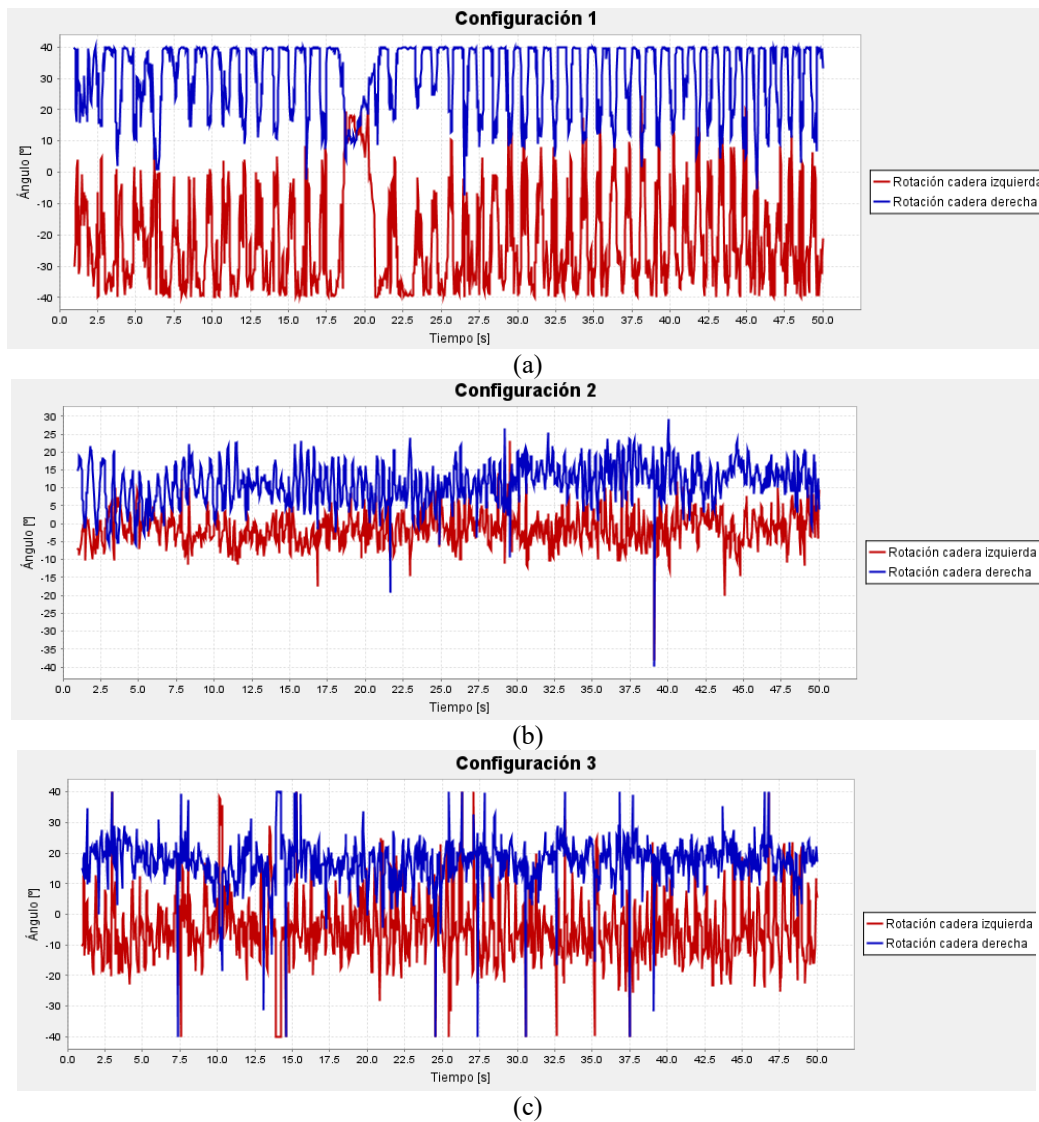


Figura 10: Evolución de la rotación de la cadera para los 3 casos de estudio.

El ángulo de la rodilla es uno de los parámetros más relevantes en la fase del pedaleo del ciclista, el cual está directamente relacionado con la altura del sillín de la bicicleta. Por ello el primer parámetro que se estudia es la evolución del ángulo de la rodilla en la secuencia de pedaleo (Figura 11). En la configuración 1 se aprecia el desfase que hay entre las dos extremidades inferiores, aunque hay fases donde la detección no ha sido óptima. Además, los valores numéricos de ambos lados son similares. En cuanto a las otras 2 configuraciones se observa que la detección de la rodilla derecha tiene unos valores mayores que el de la izquierda. Asimismo, analizando los valores numéricos de los estudios se observa que los valores no están dentro del ángulo óptimo de la rodilla de 140° y 150° [19-20]. De estos estudios se concluye que hay que aumentar la distancia del sillín para aumentar el ángulo máximo de la rodilla para evitar futuras dolencias durante el pedaleo y optimizar el rendimiento.

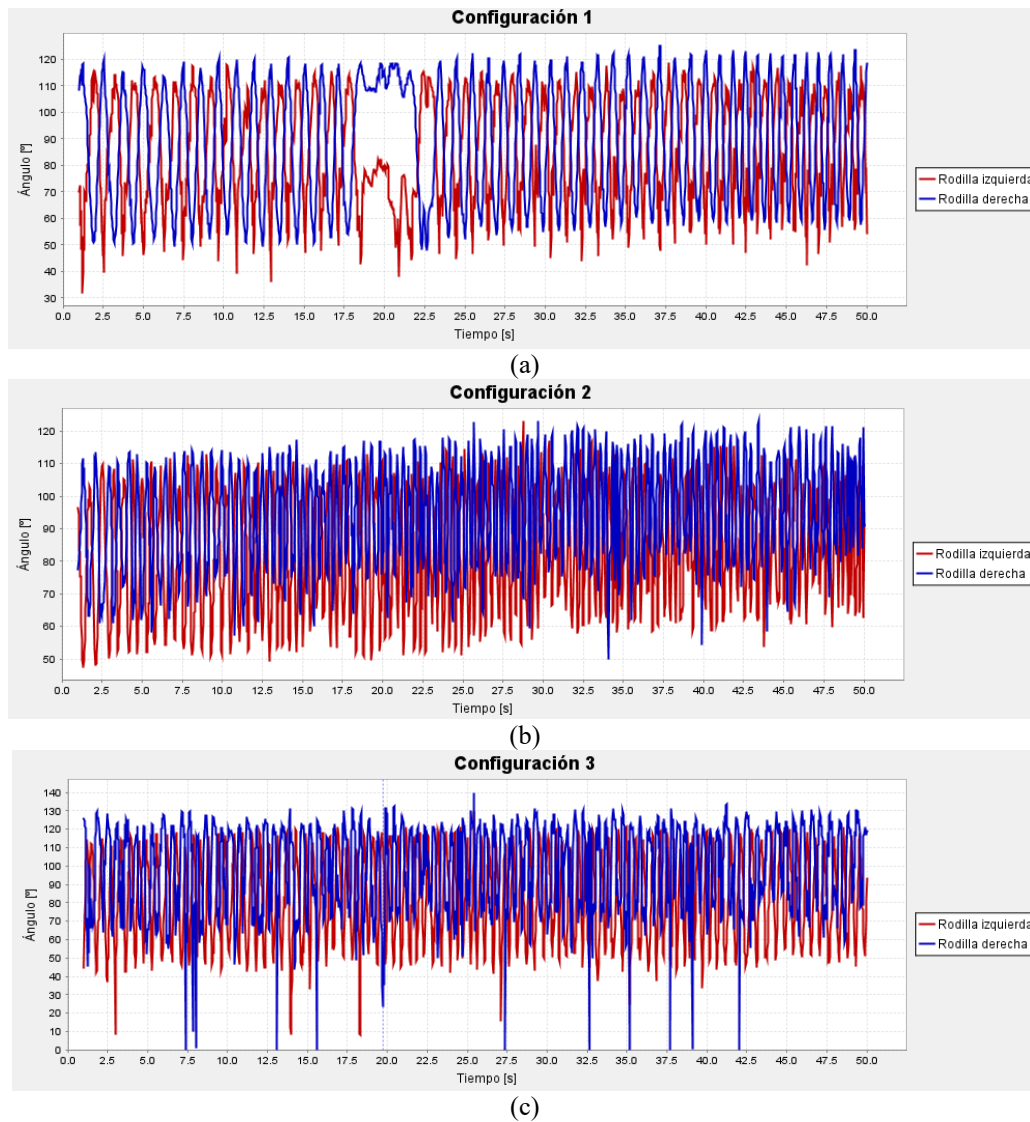


Figura 11: Evolución del ángulo de la rodilla para los 3 casos de estudio.

El último parámetro que se estudia en este trabajo es el movimiento lumbar (“*lumbar bending*” en OpenSim) y la extensión lumbar que sufre la espina dorsal durante la fase de pedaleo. Una alta variación del movimiento lumbar determina que el ciclista sufre movimientos durante el pedaleo y en consecuencia no mantiene la postura óptima para evitar dolencias futuras. Por otro lado, el ángulo de extensión lumbar se recomienda que sea entre 50 y 60 grados respecto a la horizontal [19-20]. En la Figura 12 (a) se muestra la variación del movimiento lumbar y para la configuración 1 y 3 la variación es muy alta lo cual significa que la detección no ha sido adecuada. En la Figura 12(b) también se observa la misma tendencia, el valor de la extensión lumbar no sufre variaciones. En cambio, la configuración 2, cuya detección ha sido óptima, la evolución de los dos parámetros es coherente con la literatura y se concluye que el sujeto tiene una extensión lumbar adecuada para no sufrir dolencias lumbares.

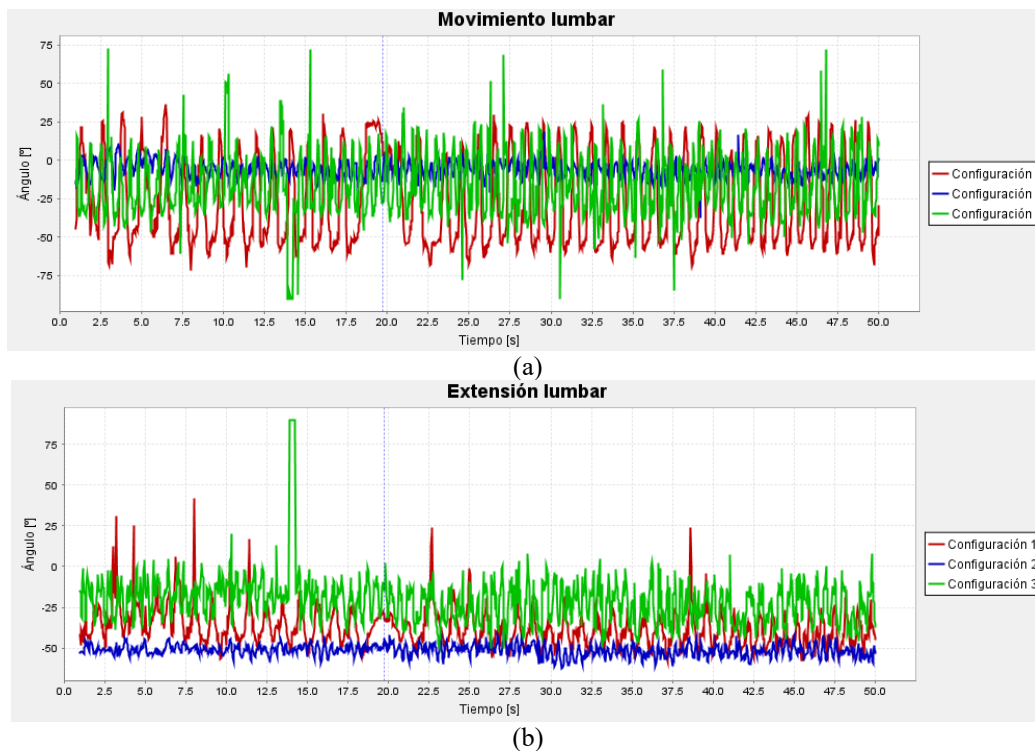


Figura 12: Evolución del (a) movimiento lumbar y (b) extensión lumbar para los 3 casos de estudio.

6. Conclusiones

En este trabajo se han analizado 3 orientaciones de bicicleta respecto a una colocación de cámaras inicial para determinar la influencia en la detección de la pose ciclista. Para ello, se han utilizado simulaciones de OpenSim para determinar cuál es la configuración óptima para obtener resultados satisfactorios. De este modo, se concluye que la orientación de las cámaras tiene una gran relevancia para la detección de las articulaciones más relevantes de la pose humana durante la práctica del ciclismo. Las cámaras tienen que estar orientadas en los dos laterales del ciclista, pero sin estar en la perpendicular ya que una pequeña orientación respecto de la perpendicular mejora los resultados de detección. Además, la colocación de las cámaras en la parte trasera del sujeto no influye en exceso en el resultado final de la detección.

Por otro lado, utilizando los resultados de las simulaciones de la cinemática inversa de OpenSim, se ha podido estudiar la fase del pedaleo del ciclista. Se concluye que hay que ajustar la altura del sillín de la bicicleta para reducir las dolencias que puede suponer debido a una altura inferior a la óptima. Para ello se ha estudiado la evolución del ángulo de las dos rodillas. Otro parámetro biomecánico estudiado es la evolución del movimiento lumbar. Este parámetro ayuda a identificar posturas no cómodas para el ciclista. Además, se ha complementado el estudio con el ángulo de extensión lumbar y se ha concluido que el ciclista tiene una postura óptima para no sufrir dolencias lumbares.

7. Referencias

- [1] Priego Quesada J.I., Pérez-Soriano P., Lucas-Cuevas A.G., Salvador Palmer R., Cibrián Ortiz de Anda R.M., "Effect of bike-fit in the perception of comfort, fatigue and pain", *Journal of Sports Sciences* **35**, 1459–1465 (2017)
- [2] Bini R.R., Hume P., "A Comparison of Static and Dynamic Measures of Lower Limb Joint Angles in Cycling: Application to Bicycle Fitting", *Human Movement* **17**, 36–42 (2016).
- [3] Ferrer-Roca V., Roig A., Galilea P., García-López J., "STATIC VERSUS DYNMIC EVALUATION IN BIKE FITTING: INFLUENCE OF SADDLE HEIGHT ON LOWER LIMB KINEMATICS", *Biomechanics in Sports 29 Portuguese Journal of Sport Sciences*, **11**, (2011)
- [4] Bini R., Daly L., Kingsley M., "Changes in body position on the bike during seated sprint cycling: Applications to bike fitting", *European Journal of Sport Science* **20**, 35–42 (2020)
- [5] Swart, J., & Holliday, W., "Cycling biomechanics optimization—The (R) evolution of bicycle fitting." *Current Sports Medicine Reports*, **18** (12), 490–496. (2019)

- [6] Malus, J., Skypala, J., Silvernail, J. F., Uchytel, J., Hamill, J., Barot, T., & Jandacka, D., “Marker placement reliability and objectivity for biomechanical cohort study: Healthy aging in industrial environment (HAIE—Program 4)”, *Sensors*, **21**(5), Article 1830, (2021)
- [7] Kim, W. *et al.*, “Ergonomic postural assessment using a new open-source human pose estimation technology (OpenPose)” *International Journal of Industrial Ergonomics* **84**, 103164 (2021)
- [8] Cao Z., Hidalgo G., Simon T., Wei S.-E., Sheikh Y., "OpenPose: Realtime Multi-Person 2D Pose Estimation Using Part Affinity Fields", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **43**, 172–186 (2021)
- [9] Bini, R. R., Serrancoli, G., Santiago, P. R. P., Pinto, A., & Moura, F., “Validity of Neural Networks to Determine Body Position on the Bicycle”, *Research Quarterly for Exercise and Sport*, **94**(4), 905–912, (2022)
- [10] Kim, J.-W.; Choi, J.-Y.; Ha, E.-J.; Choi, J.-H., “Human Pose Estimation Using MediaPipe Pose and Optimization Method Based on a Humanoid Model”, *Applied Science*, **13**, 2700, (2023)
- [11] S. Mroz *et al.*, "Comparing the Quality of Human Pose Estimation with BlazePose or OpenPose," *4th International Conference on Bio-Engineering for Smart Technologies (BioSMART)*, 1-4, Paris, (2021)
- [12] G. Serrancoli *et al.*, "Marker-Less Monitoring Protocol to Analyze Biomechanical Joint Metrics During Pedaling," *IEEE Access*, **8**, 122782-122790, (2020)
- [13] Pagnon, D.; Domalain, M.; Reveret, L. “Pose2Sim: An End-to-End Workflow for 3D Markerless Sports Kinematics—Part 1: Robustness”, *Sensors*, **21**, 6530, (2021)
- [14] Delp, S. L. *et al.*, OpenSim: “Open-source software to create and analyze dynamic simulations of movement”, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, **54**(11), 1940-1950. (2007)
- [15] Mahadas, S., Mahadas, K., Hung, G.K., “Biomechanics of the golf swing using OpenSim”, *Computers in Biology and Medicine*, **105**, 39-45, (2019)
- [16] Clancy, C.E., Gatti, A.A., Ong, C.F. *et al.*, “Muscle-driven simulations and experimental data of cycling”, *Scientific Reports*, **13**, 21534, (2023)
- [17] X. Jiang and I. Bíró, "Muscle force estimation in running gait analysis after a prolonged running session via OpenSim," *4th International Conference on Computer Engineering and Application (ICCEA)*, China, 498-502, (2023)
- [18] Uhlich S. D., Falisse A., Kidziński Ł., Muccini J., Ko M., *et al.*, “OpenCap: Human movement dynamics from smartphone videos”, *PLOS Computational Biology*, **19** (10), (2023)
- [19] Dias Scoz R. *et al.*, "Effectiveness of a 3D bikefitting method in riding pain, fatigue, and comfort: a randomized controlled clinical trial", *Sports Biomechanics*, 1–14, (2022).
- [20] Scoz R.D., *et al.*, "Long-Term Effects of a Kinematic Bikefitting Method on Pain, Comfort, and Fatigue: A Prospective Cohort Study", *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **19**, (2022).