

Recepción: 15 de enero de 2018**Aceptación:** 08 de febrero de 2018**Publicación:** 14 de marzo de 2018

ANÁLISIS DEL EJE INSTANTÁNEO DE ROTACIÓN DEL MOVIMIENTO DE FLEXO-EXTENSIÓN DEL CUELLO MEDIANTE VÍDEO ANÁLISIS: FIABILIDAD Y ANÁLISIS DE ERRORES

ANALYSIS OF THE INSTANTANEOUS AXIS OF THE NECK FLEXION-EXTENSION MOVEMENT BY MEANS OF VIDEO ANALYSIS: RELIABILITY AND ERROR ANALYSIS

William Venegas Toro¹
Álvaro Page del Pozo²
Iván Zambrano Orejuela³
Christopher Ruiz Cruz⁴

1. P.h.D en Tecnologías para la Salud y el Bienestar, Docente investigador en Mecánica Computacional, MCs. Diseño, Producción y Automatización Industrial. Departamento de Diseño. Escuela Politécnica Nacional. Quito. Ecuador. E-Mail: william.venegas@epn.edu.ec
2. P.h.D Docente e Investigador, Ing. Industrial. Departamento Biomecánica. Universitat Politècnica de València, Instituto de Biomecánica de Valencia. Valencia. España. E-Mail: alvaro.page@ibv.upv.es
3. MSc. en Informática, Ing. Mecánico, Docente e Investigador en Diseño Mecánico. Departamento de Diseño. Escuela Politécnica Nacional. Quito. Ecuador. E-Mail: ivan.zambrano@epn.edu.ec
4. Ing. Mecánico, investigador pasante. Departamento de Diseño. Escuela Politécnica Nacional. Quito. Ecuador. E-Mail: cristopher.ruiz@epn.edu.ec

Citación sugerida:

Venegas Toro, W., Page del Pozo, Á. Zambrano Orejuela, I. y Ruiz Cruz, C. (2018). Análisis del eje instantáneo de rotación del movimiento de flexo-extensión del cuello mediante vídeo análisis: fiabilidad y análisis de errores. *3C Tecnología: glosas de innovación aplicadas a la pyme*, 7(1), 79-92. DOI: <<http://dx.doi.org/10.17993/3ctecno.2018.v7n1e25.79-92/>>.

RESUMEN

El objetivo del trabajo es evaluar la fiabilidad para medir el eje de rotación instantáneo (EIR) del raquis cervical de sujetos sanos mediante una técnica de video análisis de bajo coste y diseñar una técnica que minimice los errores.

Los datos fueron obtenidos a partir de marcadores técnicos y anatómicos ubicados en 7 sujetos sanos, con tres sesiones experimentales por sujeto, medidas por dos operadores distintos. El movimiento se registró mediante la cámara de vídeo de un smartphone, a 30 fps. Los videos fueron analizados mediante el software libre Tracker, y los cálculos cinemáticos (posiciones, velocidades, aceleraciones y EIR) se realizaron con software propio desarrollado en MATLAB. Se realizó un análisis de fiabilidad calculando el coeficiente de correlación intraclase (ICC) y el error estándar medio (SEM) entre operador y entre sesión.

Los valores obtenidos para el SEM e ICC son aceptables o buenos, mostrando las posibilidades del uso de técnicas de bajo coste en aplicaciones biomecánicas, lo que abre posibilidades muy interesantes en campos como la valoración funcional.

ABSTRACT

The objective of this work is to evaluate the reliability of the measurement of the instantaneous axis of rotation (EIR) of the cervical spine by means of a video analysis technique of low cost, as well as to design a technique that minimizes the errors.

The information was obtained from technical and anatomical markers located in 7 healthy subjects, with three experimental sessions for subject, measured by two different operators. The movement registered by means of the video camera of a smartphone, to 30 fps. The videos were analyzed by means of the free software Tracker, and the kinematic calculations (positions, speeds, accelerations and EIR) were realized by proper software developed in MATLAB. A reliability analysis was realized calculating the intraclass correlation coefficient (ICC) and the standard error mean (SEM) between operator and between sessions.

The values obtained for the SEM and ICC are acceptable or good, showing the possibilities of the use of techniques of low cost in biomechanical applications, what opens very interesting possibilities in fields like the functional assessment.

PALABRAS CLAVE

Cinemática del cuello, Eje instantáneo de rotación, Videoanálisis, Fiabilidad.

KEY WORDS

Neck Kinematics, Instantaneous Helical axis, Videoanalysis, Reliability.

William Venegas, Álvaro Page, Iván Zambrano y Christopher Ruiz

1. INTRODUCCIÓN

El estudio de la cinemática del cuello es una parte fundamental de la valoración funcional del cuello, con interesantes aplicaciones en la medicina clínica y legal. La correcta medida del movimiento cervical permite diagnosticar, planificar el tratamiento, evaluar los resultados o mejoras en los pacientes y clasificar los desórdenes del cuello (Baydal-Bertomeu 2011).

La forma más simple y sencilla para describir el movimiento es mediante el rango articular del cuello (ROM), bajo posiciones estáticas en los extremos, instrumentadas por dispositivos simples (goniómetros, inclinómetros, imagenología, etc.). Esta técnica ha logrado demostrar que el ROM se relaciona el dolor y las pérdidas funcionales (Koning 2008; Fletcher 2008).

A pesar de ser muy usadas en el ámbito clínico, las técnicas basadas en el ROM son estáticas y no ofrecen información del movimiento, lo que limita las aplicaciones para valorar la coordinación o el control sensorimotor que van relacionado con la valoración de la condición física del sujeto.

Por ello se han desarrollado otras técnicas (ultrasonidos, sistemas electromagnéticos, videofotogrametría, sistemas inerciales) para mejorar el estudio de la cinemática del movimiento continuo del cuello, caracterizando y clasificando los factores que afectan al movimiento (Cagnie 2007; Duc 2014; Fletcher 2008; Dunleavy 2013; Gelalis 2008; Hall 2008; Assink 2005).

Las técnicas de análisis cinemático permiten medir variables continuas que describen el movimiento a través de variables como: velocidades y aceleraciones angulares, medidas de suavidad del movimiento, armonía de movimiento, variabilidad, jerk, etc. (Sjolander 2008; Roijezon 2010; Baydal-Bertomeu, 2011, Bahat 2015). A pesar de proporcionar una información mucho más detallada del movimiento cervical, la mayoría de los trabajos publicados se limitan al estudio de las variables angulares, presentando una descripción parcial del movimiento en la que no se consideran los desplazamientos.

Por ello, más recientemente, se han desarrollado nuevos enfoques basados en la descripción completa de la cinemática cervical a partir de la descripción de la posición y movimiento del Eje Instantáneo de Rotación (EIR) (Grip 2008, Page 2011; Cescon 2014; Barbero 2017). El EIR ofrece una información completa del movimiento articular y es muy sensible a pequeños cambios de los patrones del movimiento o a alteraciones en la coordinación motora (Woltring 1994; Page 2011).

Las técnicas anteriores permiten análisis complejos en tres dimensiones. No obstante, se aplican sistemáticamente al análisis de movimientos en los planos anatómicos (ángulos de flexo-extensión, flexión lateral y rotación axial). Por tanto se plantea la posibilidad de utilizar técnicas más sencillas y baratas, como el videoanálisis, para obtener resultados similares a un coste mucho más bajo.

Por todo ello se plantea una técnica de bajo costo y que permita determinar todas estas variables cinemáticas, contribuyendo así en el análisis del eje instantáneo de rotación del movimiento de flexo-extensión (FE) del cuello mediante video análisis.

Ahora bien la utilidad de las técnicas cinemáticas no depende solo la cantidad de información que puedan ofrecer, sino también de la calidad de dicha información. En particular las aplicaciones en el ámbito clínico exigen verificar la fiabilidad de las medidas. La fiabilidad es una propiedad

William Venegas, Álvaro Page, Iván Zambrano y Christopher Ruiz

clínica relacionada con la reproducibilidad y resulta crítica para poder comparar medidas realizadas sobre sujetos distintos o en repeticiones del mismo sujeto (Lemeunier 2017).

Estos aspectos han sido ampliamente estudiados en el caso de las medidas basadas en el ROM (revisados en Jordan 2000, de Koning 2008 y Leung 2016). Mucho más escasos son los trabajos orientados a determinar la fiabilidad de las variables cinemáticas en movimientos continuos (Michiels 2013; Bahat 2015). No hemos encontrado ningún estudio que analice la fiabilidad en la medida del EIR del cuello, si bien sí hay datos sobre otras articulaciones (Cáceres 2016).

La fiabilidad del EIR es un aspecto crítico en sus aplicaciones al ámbito clínico. En efecto, el movimiento del EIR es muy sensible a las alteraciones funcionales o a pequeños cambios en la coordinación motora (Woltring 1994; Page 2011). Pero por ese mismo motivo es también muy sensible a los errores experimentales o a la variabilidad intrasujeto inevitable en las pruebas realizadas con personas (Page 2006).

En esta línea se plantea el presente trabajo, cuyo objetivo es determinar la fiabilidad en la medida de la posición del EIR asociada a diferentes fuentes de variabilidad: entreciclos dentro de la misma sesión, entre operadores y entre sesiones tomadas en días diferentes. Para ello se ha realizado un estudio experimental y se ha caracterizado la fiabilidad mediante parámetros relativos (coeficiente de correlación intraclase, ICC) y absolutos (error estándar, SEM) y correlación ICC.

2. METODOLOGÍA

2.1. PARTICIPANTES

Un grupo de 7 sujetos sanos voluntarios participaron en las pruebas, con edades comprendida entre los 14 y 50 años, Todos los participantes firmaron un formulario de consentimiento como parte del protocolo desarrollado en el proyecto conjunto de investigación junior PIJ-15-08 de la EPN y la UPV.

2.2. PRUEBAS

Los sujetos participaron en tres sesiones, dos sesiones seguidas en un día, medidas con dos operadores diferentes (para determinar la fiabilidad inter-observador) y otra sesión al siguiente día (fiabilidad entre sesiones). En cada sesión se realizaron diez movimientos cíclicos continuos aproximados en el plano sagital (flexo-extensión). Cada sujeto realiza el gesto de manera natural en un minuto bajo el protocolo descrito a continuación.

2.3. DISEÑO EXPERIMENTAL

El protocolo experimental es llevado a cabo por las fases Informativa, preparación previa de medición, toma de datos y proceso de codificación de videos.

La fase informativa establece el porqué de la toma de datos a los sujetos programando las citas de sesiones para las muestras bajo un formulario de consentimiento informado.

La fase de preparación previa de medidas es posible cuando se haya realizado una adecuada instrumentación al sujeto. Primero se encera un punto de referencia al sistema de coordenadas cartesianas garantizando su horizontalidad. Se instrumenta a cada sujeto con una diadema con 4 marcadores técnicos y 3 marcadores anatómicos ubicados, uno cerca la sien, el otro debajo del lóbulo de la oreja y uno en el hombro como referencia.

La fase de toma de datos, en la cual se fija la postura del sujeto, se instruye al sujeto para que se acondiciona a los movimientos experimentales, se da una señal de sonido por el celular para las diferentes indicaciones de movimiento.

La fase de codificación de videos, se registran los movimientos del cuello capturando la posición de un conjunto de marcadores reflectantes anatómicos y técnicos situados sobre la cabeza del sujeto, utilizando para ello una cámara de vídeo de un smartphone y frecuencias de muestreo de 30 fps.

Cada sujeto fue medido en dos sesiones dentro del mismo día por los dos operadores y en otra sesión al día siguiente por uno de los dos operadores. Comparando las sesiones del mismo día se determina la fiabilidad entre operadores, mientras que comparando las medidas del mismo operador en días diferentes se obtiene la fiabilidad entre sesiones.

2.4. ANÁLISIS CINEMÁTICO

El software libre Traker proporciona las coordenadas de los marcadores a los videos obtenidos por el dispositivo smartphone como se muestra en la figura 1. A partir de las mismas se han calculado las variables cinemáticas del movimiento (desplazamientos, giros, velocidades lineales y angulares) utilizando software propio basado en los algoritmos descritos en (Page 2009). El movimiento continuo fue descompuesto en ciclos de flexión y extensión obteniéndose un EIR promedio entre ciclos siguiendo el procedimiento descrito en (Page 2010).

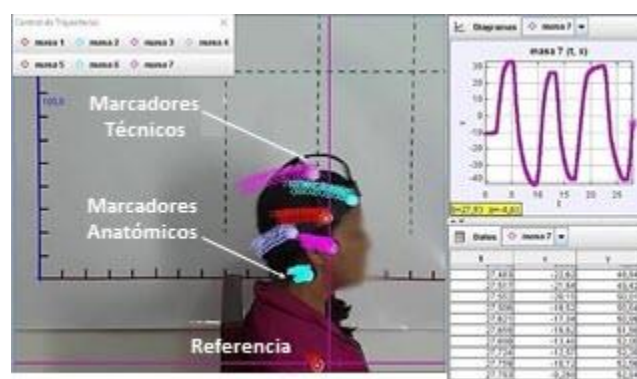


Figura 1. Video análisis realizado en el software Traker.

Fuente: elaboración propia.

2.5. TRATAMIENTO DE DATOS

Las coordenadas de las posiciones cartesianas a los marcadores técnicos y anatómicos son obtenidas en por el software Traker. Posteriormente se suavizan con un proceso basado en funciones b-spline y se calculan los desplazamientos finitos. Mediante derivación numérica se calculan las velocidades y aceleraciones. A partir de las variables cinemáticas se calcula el EIR como se describe en (Page 2006).

El EIR se desplaza con el movimiento del cuello describiendo una superficie axoide. En el caso de un movimiento plano el corte con dicho plano describe una curva. En el movimiento estudiado, flexo extensión, se ha calculado la curva intersección del EIR con el plano sagital (Page 2011).

De esta manera el movimiento de cuello lleva asociada una curva, estableciéndose la fiabilidad de su medida a partir de las similitudes entre axoides para repeticiones en el mismo movimiento, en la misma sesión o entre sesiones diferentes.

Para poder comparar curvas se normalizó la escala de tiempos mediante un reescalado lineal pasando a una escala de 0-100 % del ciclo de movimiento. Además se eliminaron partes de los extremos del movimiento donde la velocidad angular era inferior a un umbral y EIR no se puede calcular con precisión (Page 2006).

La fiabilidad entre ciclos para cada sujeto se analizó calculando el ICC (2,k) para las dos coordenadas del axoide (X y Y) y el tal como se explica en (Weir 2005). De esta manera se obtiene, para cada sujeto, un valor de reproducibilidad entre ciclos de la misma sesión. Además se ha calculado el error estándar (SEM) de las coordenadas del EIR mediante un ANOVA como se describe en el artículo anteriormente citado. También se ha analizado la fiabilidad de las curvas ángulo (tiempo).

En el caso de la fiabilidad entre operadores y entre sesiones, se ha calculado el ICC (2, single) y el SEM a partir del ANOVA asociado.

Estos valores se han calculado para las curvas de cada sujeto. Para describir la distribución de la muestra analizada se usarán los valores medios en el caso de la fiabilidad entre ciclos y una descripción más detallada (mediana y cuartiles inferior y superior) en el caso de la variabilidad entre operadores y entre sesiones.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la tabla 1 se describen los valores medios de algunas de las variables obtenidas para la extensión (elevación (+)) y flexión (descenso (-)) del cuello.

Los resultados respecto al rango y la posición angular no son simétricos, las desviaciones estándar confirman que los datos están dispersos respecto a la media. Las velocidades y aceleraciones angulares muestran una asimetría sin embargo los valores corresponden en la publicación (Baydal-Bertomeu 2011). La armonía confirma que es poco reproducible con un valor aproximado de 0.75.

Tabla 1. Resumen de variables cinemáticas que caracterizan el movimiento de flexo-extensión.

Variable	Dirección de movimiento	Movimiento
		FE Media (std)
Ángulo máximo (°)	(-)	51.0 (16.5)
	(+)	43.0 (9.7)
ROM (°)		95.0 (19.6)
Máxima velocidad Angular (°/s)	(-)	40.7 (17.6)
	(+)	46.8 (23.4)
Máxima aceleración Angular (°/s ²)		98.1 (60.2)
Armonía	(-)	0.748 (0.061)
	(+)	0.714 (0.064)

Tabla 2. Coordenadas corte del EIR con el plano del movimiento

Variable	Dirección de movimiento	Movimiento
		FE Media (std)
Posición media EIR_X (cm)	(-)	-0.01 (2.9)
	(+)	0.05 (3.2)
Posición media EIR_Y (cm)	(-)	15.6 (2.2)
	(+)	15.2 (2.3)
Rango EIR_X (cm)	(-)	4.1 (1.1)
	(+)	3.3 (1.1)
Rango EIR_Y (cm)	(-)	5.4 (2.7)
	(+)	6.7 (2.7)

En la tabla 2 aparece una descripción detallada del desplazamiento del EIR. La posición media del EIR está sobre el hombro donde está el origen del sistema de referencia anatómico y está claramente por arriba (unos 15 cm). Sin embargo, el rango de desplazamiento del EIR es bastante amplio sobre todo en el movimiento de flexo-extensión, su desviación estándar satisface que los resultados son buenos ya que no están muy dispersos de la media.

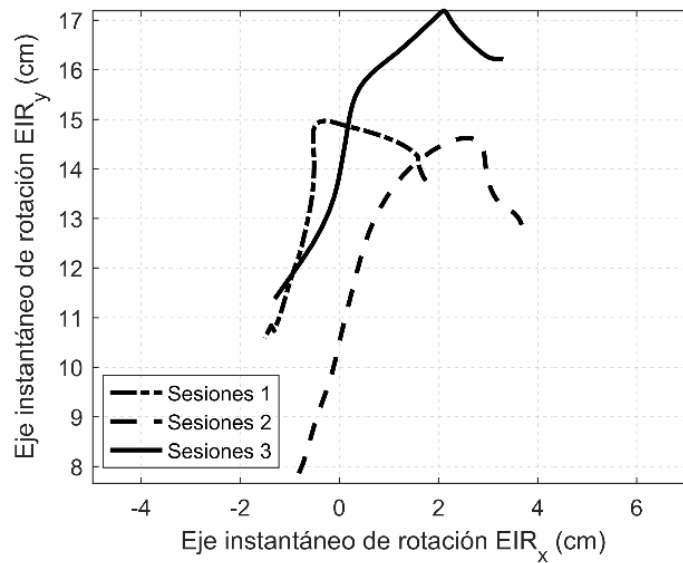


Figura 2. Comportamiento del EIR medio en el plano sagital para las tres sesiones de un solo sujeto en el movimiento de flexión.

Fuente: elaboración propia.

En la figura 2 se muestra un ejemplo de los axoides del EIR en las tres repeticiones de un sujeto. El origen de coordenadas corresponde al hombro, como puede observarse se trata de curvas suaves que representan un movimiento continuo del EIR asociado a un movimiento también continuo de la cabeza. Estos resultados son aproximados con los apuntados en Page (2011) y señalan un movimiento coordinado de las vértebras cervicales, a diferencia del movimiento aparentemente errático del EIR que se muestra en otros trabajos (Cescon, 2014; Barbero 2017). Dichos movimientos erráticos no tienen justificación desde el punto de vista cinemático o fisiológico y probablemente se deben a una técnica experimental poco precisa.

Como puede verse, las curvas suelen presentar un punto más elevado que corresponde a la posición neutra. A medida que se produce el movimiento de flexión, el EIR desciende rápidamente. En el de extensión también hay descenso, pero menos acusado. Se puede observar que todas las curvas tienen un valor pico que es el correspondiente a la máxima extensión del cuello.

Además se aprecia que las curvas de la primera y segunda sesión muestran cambios más sutiles en comparación con la tercera sesión que fue en un día distinto, con lo cual se puede notar lo susceptible que es el EIR; sin embargo estas variaciones son más evidentes en mayor medida en el tramo de ascensión de la curva hasta el valor pico, mientras que en el tramo de descenso de la curva se muestra un comportamiento más sutil y constante, como se esperaría de un movimiento continuo y coordinado de la cabeza (Page 2011).

Tabla 3. Fiabilidad del ángulo y eje de rotación instantáneo entre ciclos. El ICC es adimensional, el SEM se expresa en las unidades indicadas en cada variable en la primera columna.

Variable	Dirección de movimiento	Movimiento	
		FE	SEM
Ángulo (°)	(-)	0.995 4.0	
	(+)	0.997 3.3	
Posición media del EIR X (cm)	(-)	0.838 0.6	
	(+)	0.815 0.7	
Posición media del EIR Y (cm)	(-)	0.782 0.9	
	(+)	0.866 1.2	

Los valores medios de fiabilidad entre-ciclos dentro de la misma sesión aparecen en la tabla 3. Como puede observarse, la fiabilidad en la medida de los ángulos es muy alta, con un ICC próximo a la unidad y un error estándar de menos de 4°, muy pequeño si se compara con el rango del movimiento que es de casi 95° de media. En cuanto a la posición del EIR, el ICC conjunto también es bueno (0.78), con un error estándar en las coordenadas del orden de 1.2 cm.

Tabla 4. Fiabilidad interobservador (IO) e Intersesión (IS) de variables cinemáticas. El ICC es adimensional, el SEM se expresa en las unidades indicadas en cada variable en la primera columna.

Variable	Dirección de movimiento	Movimiento	
		FE	SEM
Ángulo medio (°)	(-)	0.589 6.8	0.806 4.8
	(+)	0.589 6.9	0.783 5.2
ROM (°)	(-)	0.772 10.6	0.931 5.8
	(+)	0.780 4.7	0.983 1.1
Velocidad angular media (°/s)	(-)	0.689 11.2	0.971 2.2
	(+)	0.834 0.4	0.686 0.4
Aceleración angular media (°/s ²)	(-)	0.510 0.8	0.745 0.3
	(+)		

Estos resultados muestran que el movimiento cíclico es muy reproducible y que se verifica la hipótesis de un grado de libertad funcional propuesta en (Page 2011).

En la tabla 4 se muestran los resultados de la fiabilidad entre observadores (sesiones en el mismo día con diferentes observadores (IO)) y entre sesiones (sesiones en días diferentes con el mismo observador (IS)), indicándose el ICC y los SEM para cada variable cinemática.

Como puede observarse los valores del ICC son buenos en el ángulo, pero irregulares en la velocidad angular, aceleración angular y armonía. Lo que implica que el análisis de variables numéricas extraídas de las características máximas a las variables funcionales es muy dispersas, lo que sugiere agrupar por factores como: edad, tipos de pacientes, etc., esto ayudara a clasificar y mejorar su correlación.

Tabla 5. Interobservador (IO) y entre sesiones (IS) fiabilidad del eje de rotación instantáneo. El ICC es adimensional, el SEM se expresa en las unidades indicadas en cada variable en la primera columna.

Variable	Dirección de movimiento	Movimiento	
		FE	
		ICC	
		SEM	
		IO	IS
Posición media del EIR X (cm)	(-)	0.806 1.3	0.625 1.7
	(+)	0.845 1.3	0.533 2.2
Posición media del EIR Y (cm)	(-)	0.384 1.5	0.314 2.0
	(+)	0.659 1.5	0.608 1.7

En la tabla 5 se describe la posición del EIR. El ICC es bueno para unas direcciones de movimiento pero en otras no, mientras que el error estándar mediano es orden de 1.5 cm, lo que pone de manifiesto que el comportamiento de cada sujeto es poco reproducible en medidas dentro del mismo día, incluso cuando se instrumenta dos veces al sujeto por operadores diferentes. Hay diferencias entre el movimiento de flexión y el de extensión, si bien parece que el de flexión es algo más reproducible.

En cambio los valores de los parámetros de fiabilidad entre sesiones (mismo operador). Los valores son salgo inferiores al caso anterior, como era de esperar dado que ahora las medidas se toman en días distintos. En este caso hay algunos sujetos que ya presentan una variabilidad mayor, si bien los valores medios son irregulares. El error mediano es del orden de 2.2 cm, lo que se considera que la técnica de video análisis es buena para la medida del EIR.

Hay que señalar que la comparación entre repeticiones se ha realizado sobre una escala temporal normalizada, que no tiene en cuenta el pequeño desfase que se puede producir en los ángulos. Debido a ello es posible que no se estén comparando puntos exactamente homólogos en las curvas de la figura 2. Esto afecta negativamente a la fiabilidad calculada, que posiblemente mejoraría si se realizase un reescalado en el domino geométrico, usando el ángulo como variable y no el porcentaje del ciclo de movimiento.

William Venegas, Álvaro Page, Iván Zambrano y Christopher Ruiz

En cualquier caso, los valores de fiabilidad obtenidos muestran que, con la técnica de medida adecuada (precisión y promediado en medidas cíclicas), es posible determinar la posición del EIR con buena reproducibilidad no sólo entre operadores, sino incluso en medidas tomadas en días diferentes.

4. CONCLUSIONES

El EIR es una característica del movimiento que proporciona valiosa información sobre la cinemática y sobre la coordinación motora en articulaciones complejas, como es el caso del cuello. Su trayectoria es muy sensible a pequeñas alteraciones del movimiento, por lo que la determinación de la fiabilidad de la técnica empleada es imprescindible para poder usar esta característica en aplicaciones clínicas.

En este trabajo se muestra que, bajo las condiciones adecuadas de precisión de la técnica de medida, es posible analizar la el movimiento del EIR del cuello de una forma suficientemente fiable. La fiabilidad es excelente entre ciclos de la misma sesión y buena entre operadores, pero entre sesiones es irregular.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por Escuela Politécnica Nacional de Quito, Ecuador bajo el proyecto conjunto de investigación junior PIJ-15-08 con la Universitat Politècnica de València.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Assink, N., Bergman, G. J., Knoester, B., Winters, J. C., Dijkstra, P. U., & Postema, K. (2005). Interobserver reliability of neck-mobility measurement by means of the flock-of-birds electromagnetic tracking system. *Journal of Manipulative & Physiological Therapeutics*, 28(6), 408-413.
- Bahat, H. S., Chen, X., Reznik, D., Kodesh, E., & Treleaven, J. (2015). Interactive cervical motion kinematics: sensitivity, specificity and clinically significant values for identifying kinematic impairments in patients with chronic neck pain. *Manual therapy*, 20(2), 295-302.
- Barbero, M., Falla, D., Clijisen, R., Ghirlanda, F., Schneebeli, A., Ernst, M. J., & Cescon, C. (2017). Can parameters of the helical axis be measured reliably during active cervical movements?. *Musculoskeletal Science and Practice*, 27, 150-154.
- Baydal-Bertomeu, J. M., Page, Á. F., Belda-Lois, J. M., Garrido-Jaén, D., & Prat, J. M. (2011). Neck motion patterns in whiplash-associated disorders: quantifying variability and spontaneity of movement. *Clinical biomechanics*, 26(1), 29-34.
- Caceres, M., Serra, P., Lopez, J., & Page, A. (2016). Reliability of the Shoulder Instantaneous Helical Axis measurement during the scaption movement. *Gait & Posture*, 49, 268.
- Cagnie, B., Cools, A., De Loose, V., Cambier, D., & Danneels, L. (2007). Reliability and normative database of the Zebris cervical range-of-motion system in healthy controls with preliminary validation in a group of patients with neck pain. *Journal of Manipulative & Physiological Therapeutics*, 30(6), 450-455.
- Cescon, C., Cattrysse, E., & Barbero, M. (2014). Methodological analysis of finite helical axis behavior in cervical kinematics. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 24(5), 628-635.
- de Koning, C. H., van den Heuvel, S. P., Staal, J. B., Smits-Engelsman, B. C., & Hendriks, E. J. (2008). Clinimetric evaluation of active range of motion measures in patients with non-specific neck pain: a systematic review. *European Spine Journal*, 17(7), 905-921.
- Duc, C., Salvia, P., Lubansu, A., Feipel, V., & Aminian, K. (2014). A wearable inertial system to assess the cervical spine mobility: comparison with an optoelectronic-based motion capture evaluation. *Medical Engineering and Physics*, 36(1), 49-56.
- Dunleavy, K., & Goldberg, A. (2013). Comparison of cervical range of motion in two seated postural conditions in adults 50 or older with cervical pain. *Journal of Manual & Manipulative Therapy*, 21(1), 33-39.
- Fletcher, J. P., & Bandy, W. D. (2008). Intrarater reliability of CROM measurement of cervical spine active range of motion in persons with and without neck pain. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 38(10), 640-645.

- Gelalis, I. D., DeFrate, L. E., Stafilas, K. S., Pakos, E. E., Kang, J. D., & Gilbertson, L. G. (2009). Three-dimensional analysis of cervical spine motion: reliability of a computer assisted magnetic tracking device compared to inclinometer. *European Spine Journal*, 18(2), 276-281.
- Grip, H., Sundelin, G., Gerdle, B., & Karlsson, J. S. (2008). Cervical helical axis characteristics and its center of rotation during active head and upper arm movements—comparisons of whiplash-associated disorders, non-specific neck pain and asymptomatic individuals. *Journal of biomechanics*, 41(13), 2799-2805.
- Hall, T. M., Robinson, K. W., Fujinawa, O., Akasaka, K., & Pyne, E. A. (2008). Intertester reliability and diagnostic validity of the cervical flexion-rotation test. *Journal of Manipulative & Physiological Therapeutics*, 31(4), 293-300.
- Jordan, K. (2000). Assessment of published reliability studies for cervical spine range-of-motion measurement tools. *Journal of Manipulative & Physiological Therapeutics*, 23(3), 180-195.
- Lemeunier, N., da Silva-Oolup, S., Chow, N., Southerst, D., Carroll, L., Wong, J. J., ... & Murnaghan, K. (2017). Reliability and validity of clinical tests to assess the anatomical integrity of the cervical spine in adults with neck pain and its associated disorders: Part 1—A systematic review from the Cervical Assessment and Diagnosis Research Evaluation (CADRE) Collaboration. *European Spine Journal*, 26(9), 2225-2241.
- Leung, M. Y., Lo, J., & Leung, Y. Y. (2016). Accuracy of different modalities to record natural head position in 3 dimensions: a systematic review. *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 74(11), 2261-2284.
- Michiels, S., Halleman, A., Van de Heyning, P., Truijen, S., Stassijns, G., Wuyts, F., & De Hertogh, W. (2014). Measurement of cervical sensorimotor control: The reliability of a continuous linear movement test. *Manual therapy*, 19(5), 399-404.
- Page, A., De Rosario, H., Mata, V., Hoyos, J. V., & Porcar, R. (2006). Effect of marker cluster design on the accuracy of human movement analysis using stereophotogrammetry. *Medical and Biological Engineering and Computing*, 44(12), 1113.
- Page, A., Galvez, J. A., de Rosario, H., Mata, V., & Prat, J. (2010). Optimal average path of the instantaneous helical axis in planar motions with one functional degree of freedom. *Journal of biomechanics*, 43(2), 375-378.
- Page, Á., De Rosario, H., Gálvez, J. A., & Mata, V. (2011). Representation of planar motion of complex joints by means of rolling pairs. Application to neck motion. *Journal of biomechanics*, 44(4), 747-750.
- Röijezon, U., Djupsjöbacka, M., Björklund, M., Häger-Ross, C., Grip, H., & Liebermann, D. G. (2010). Kinematics of fast cervical rotations in persons with chronic neck pain: a cross-sectional and reliability study. *BMC musculoskeletal disorders*, 11(1), 222.

- Snodgrass, S. J., Cleland, J. A., Haskins, R., & Rivett, D. A. (2014). The clinical utility of cervical range of motion in diagnosis, prognosis, and evaluating the effects of manipulation: a systematic review. *Physiotherapy*, 100(4), 290-304.
- Weir, J. P. (2005). Quantifying test-retest reliability using the intraclass correlation coefficient and the SEM. *Journal of strength and conditioning research*, 19(1), 231.
- Woltring, H. J., Long, K., Osterbauer, P. J., & Fuhr, A. W. (1994). Instantaneous helical axis estimation from 3-D video data in neck kinematics for whiplash diagnostics. *Journal of biomechanics*, 27(12), 1415-1432.