

# Sistemas de análisis videofluoroscópicos de la rodilla durante el movimiento

Jorge Domínguez

*Docentes: Marcus Pandy, Darío Santos, María José González, Franco Simini*

**Abstract**— The study of the movement of the knee joint is of special importance in medicine. This work focused on several methods that use videofluoroscopy for the study of this movement. The systems studied were three. The first is CINARTRO, a Uruguayan device for the treatment of anterior cruciate ligament plasty. The second is MoBiX, a system that tracks patient and allows him to overground gait, instead of a treadmill. The third is a Zürich's system, a system that performs measures of force in addition to videofluoroscopy.

It was observed that CINARTRO allows greater repetitiveness of the exercise in patients, followed by the Zürich's system, and at the end MoBiX. In the other way MoBiX allows a more detailed study of the movement, using the fluoroscope in continuous mode and a high speed camera.

**Resumen**— El estudio del movimiento de la articulación de la rodilla es de especial importancia en la medicina. Este trabajo se enfocó en diversos métodos que utilizan la videofluoroscopia para el estudio de dicho movimiento. Los trabajos estudiados fueron tres. El primero de ellos es CINARTRO, un dispositivo uruguayo para el tratamiento de plastía de ligamento cruzado anterior. El segundo MoBiX, sistema que cuenta con seguimiento del paciente y permite al mismo caminar en el suelo en lugar de en una caminadora. El tercero un sistema desarrollado en Zúrich, que además de realizar la fluoroscopia realiza medidas de fuerza.

Se observó que CINARTRO permite mayor repetitividad del ejercicio en pacientes, seguido por el sistema de Zúrich y por último MoBiX. Por otro lado MoBiX permite un estudio más detallado del movimiento, al utilizar el fluoroscopia en modo continuo con una cámara de alta velocidad.

**Palabras clave**— Artroplastía total de rodilla (ATR), Centro de rotación (CR) de la rodilla, CINARTRO, Fantoma, Fluoroscopia, Ligamento cruzado anterior (LCA), Videofluoroscopia.

## I. INTRODUCCIÓN

LA rodilla es la articulación más grande del cuerpo, y es necesario tener rodillas en buen estado para realizar la mayoría de las actividades cotidianas. Es por esta razón que el estudio del movimiento de la rodilla es un tema de gran importancia en la medicina. Dichos estudios son necesarios ya sea para seguir la evolución de la rodilla luego de operaciones como plastía de ligamento cruzado anterior (LCA), o para

observar el funcionamiento de articulaciones artificiales como en el caso de la artroplastía total de rodilla (ATR).

La rodilla está formada por la unión de dos huesos muy importantes, el fémur y la tibia, además de la rótula. El fémur se apoya sobre la tibia en la llamada meseta tibial. La figura 1 muestra los huesos mencionados.

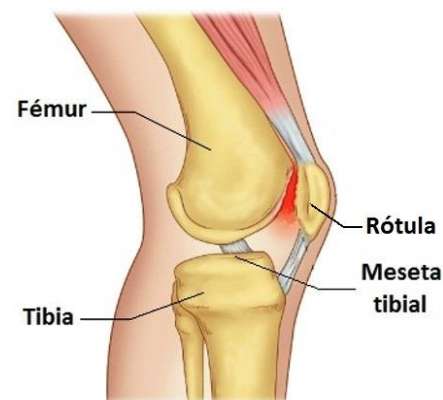


Fig. 1: Huesos de la rodilla humana.

Durante los últimos años, la videofluoroscopia se convirtió en una técnica nueva y bien aceptada para obtener información cinemática exacta de las articulaciones in vivo [1].

En la presente monografía se presentan tres sistemas basados en videofluoroscopia, todos diseñados para el estudio del movimiento de la rodilla.

## II. LA VIDEOFLUOROSCOPÍA

La videofluoroscopia es una técnica que utiliza rayos X para obtener imágenes en movimiento y en tiempo real, del interior de un objeto. El fluoroscopia, instrumento para realizar la videofluoroscopia, consiste básicamente en una fuente de rayos X y una pantalla fluorescente, entre las que se sitúa el objeto a ser observado. A su vez suelen contener intensificadores de imagen de rayos X para facilitar la visualización, y cámaras para almacenar las imágenes obtenidas.

A continuación se estudian tres sistemas basados en videofluoroscopia, CINARTRO, MoBiX y un sistema creado en Zúrich.

### III. CINARTRO

El dispositivo CINARTRO fue diseñado con el objetivo principal de realizar un seguimiento en el tratamiento de lesiones de LCA. Su nombre proviene de cinemática (CIN) y de articulación (del griego ARTRO) [2].

Cuando el LCA es reparado se continúa con un proceso de rehabilitación, cuyo objetivo es fortalecer los músculos lesionados, ya que de no ser así se corre riesgo de empeorar la lesión. Por lo general, la evaluación de la reconstrucción del LCA se realiza mediante rayos X, tomografía computarizada (TC) o resonancia magnética (RM). La desventaja de dichos métodos es que todos son estáticos, ya que toman una única imagen, por lo que no permiten estudiar los aspectos dinámicos de la articulación de la rodilla.

Uno de los métodos sugeridos para evaluar el movimiento es el estudio del centro de rotación (CR) de la rodilla y su migración en la meseta tibial durante la flexo-extensión [3]. Dicho método es aplicable para evaluar objetivamente la reconstrucción del LCA[4].

CINARTRO es un dispositivo capaz de, a través del procesamiento de las imágenes obtenidas, determinar la posición del CR de la rodilla de una persona, y realizar su seguimiento durante el movimiento de la misma.

La figura 2 presenta un diagrama de bloques del sistema CINARTRO.

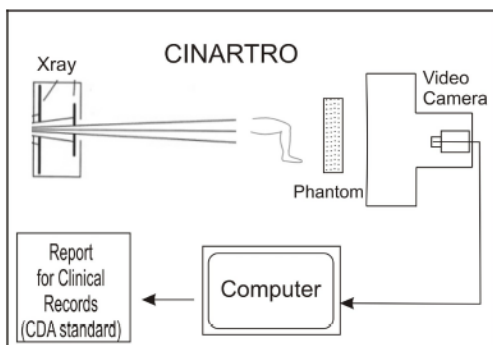


Fig. 2: Diagrama de bloques de CINARTRO. El sistema está formado por un arco en C con el dispositivo de rayos X y la pantalla con una cámara. Esta última envía las imágenes a una computadora, que luego del procesamiento genera un reporte clínico. (Tomado de Simini et al. [2]).

La pierna del paciente es colocada entre la fuente de rayos X y la pantalla de un arco en C, que a su vez contiene una cámara de video para digitalizar las imágenes. Dichas imágenes van a una computadora donde el software de CINARTRO, con la ayuda de un usuario, identifica en cada una de ellas la ubicación del fémur y la meseta tibial para posteriormente determinar el CR. Además de ello calcula el porcentaje de migración del CR respecto a la meseta tibial. Una vez finalizado el procesamiento, genera un reporte para la historia clínica del paciente.

Para calibrar el dispositivo, antes del estudio de cada paciente es necesario colocar un fantoma, que consiste en una matriz de esferas de plomo de 1 mm de diámetro separadas cada 1 centímetro. De este modo se corrige la distorsión de tipo no lineal que sufren las imágenes de rayos X obtenidas por un detector curvo [4].

La figura 3 muestra un ejemplo del fantoma en la imagen radiológica.

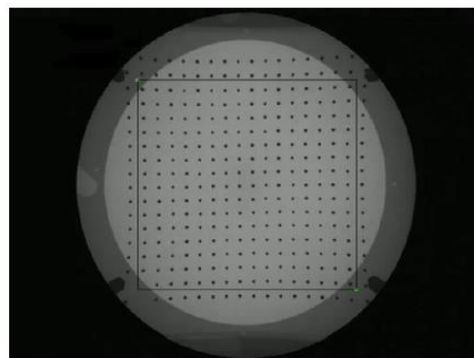


Fig. 3: Imagen radiográfica del fantoma para calibrar. Nótese la curvatura de las líneas de esferas en los bordes (en realidad en línea recta), provocada por la distorsión del sistema de rayos X. (Tomado de Olivera et al. [5]).

El método implementado consiste en obtener una serie de 30 imágenes durante la extensión y otras 30 durante la flexión, en un ejercicio de extensión-flexión en 2+2 segundos. Por tanto, el sistema de videofluoroscopia funciona en modo pulsado a 15 Hz. La dosis que recibe el paciente en cada ejercicio de 4 segundos es 250  $\mu$ Gy [2].

El software de CINARTRO recibe las imágenes e interactúa con el usuario para, mediante una guía interactiva, identificar tres puntos en el borde de la tibia y dos en la meseta tibial en cada imagen obtenida. A partir de dichos puntos obtiene dos segmentos, uno curvo para el fémur y uno recto para la meseta tibial, y calcula el CR siguiendo el método de Baltzopoulos [6].

En conclusión, CINARTRO consiste en un método para registrar los resultados de la reconstrucción del LCA, permitiendo realizar un seguimiento desde que la inflamación disminuye y durante la rehabilitación del paciente.

### IV. MOBiX

La mayoría de los sistemas de fluoroscopia son estáticos, lo que provoca dificultades en el estudio de la dinámica de las articulaciones. Un ejemplo de ello es el estudio de la articulación de la rodilla durante la caminata en la cual normalmente el paciente se encuentra en una caminadora.

MoBiX es un sistema de fluoroscopia capaz de realizar un seguimiento del movimiento del cuerpo humano, adquiriendo imágenes a alta velocidad de las articulaciones durante una caminata superficial. A su vez el sistema realiza un análisis fluoroscópico biplanar utilizando dos sistemas de videofluoroscopia en lugar de uno, que hace posible una precisión más alta en las medidas realizadas [7], además de permitir realizar un modelo tridimensional de la pierna, en lugar del modelo en dos dimensiones que se realiza con la videofluoroscopia convencional. El nombre del sistema proviene del inglés Mobile Biplane X-ray (MoBiX).

La figura 4 muestra un diagrama a escala del dispositivo.

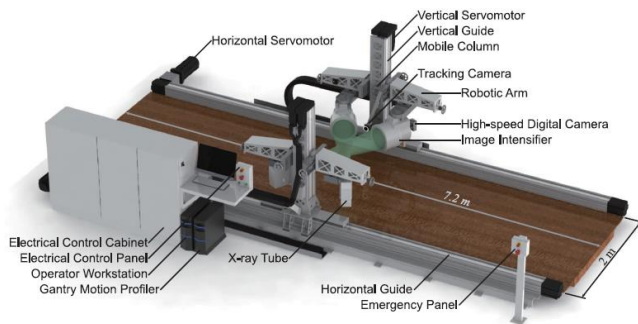


Fig. 4: Diagrama a escala de MoBiX. El sistema cuenta con dos unidades de fluoroscopia con sus respectivas cámaras, una cámara para el seguimiento del paciente, y un sistema robótico para mover lo anteriormente mencionado tanto vertical como horizontalmente. (Tomado de Gwan et al. [7]).

El hecho de mover los tubos de rayos X y los intensificadores de imagen no solo permite capturar varios ciclos de caminata en la superficie, sino que además reduce el desenfoque provocado por la velocidad relativa entre la articulación y el dispositivo de imágenes.

Para la fluoroscopia biplanar el sistema cuenta con dos tubos de rayos X, cada uno con su correspondiente intensificador de imagen y cámara de alta velocidad de hasta 1000 frames/s (fps). El sistema de fluoroscopia funciona en formato continuo, de manera que la cámara fotografíe correctamente. Aplicando la conversión  $1\text{ Sv} = 1\text{ Gy}$  [8], se estima que la dosis recibida por el paciente es de  $170\ \mu\text{Gy}$  en un minuto [7].

MoBiX cuenta con un mecanismo robótico que transporta los dos conjuntos de tubos de rayos X e intensificadores de imagen junto al sujeto, rastreando y fotografiando la articulación mientras el paciente se mueve. El movimiento del mecanismo, tanto vertical como horizontal, es mediante guías, haciendo uso de servomotores. A su vez, tanto los tubos de rayos X como los intensificadores de señal pueden ser rotados respecto al eje vertical. El seguimiento de la articulación de interés se hace a partir de una cámara colocada en medio de los intensificadores de señal. Esta cámara fotografía un marcador colocado en la articulación que se desea seguir y envía en tiempo real las imágenes a un computador.

Para minimizar el error en el seguimiento y al mismo tiempo mantener las vibraciones de la estructura robótica al mínimo, el sistema cuenta con un algoritmo de predicción del movimiento que, en conjunto con la información de las imágenes recibidas, genera el comando a enviarse al regulador de la velocidad y los servomotores.

Al igual que CINARTRO el sistema es calibrado haciendo uso de un fantoma en ambos dispositivos de rayos X.

En conclusión, MoBiX es un sistema capaz de realizar una fluoroscopia biplanar de una articulación durante la caminata, sin la necesidad de que el paciente esté en una caminadora. Esto es particularmente útil para el estudio de pacientes con ATR, al permitir estudiar de manera no invasiva el funcionamiento de la articulación.

## V. SISTEMA DE ZÜRICH

Una de las actividades que conlleva mayor dificultad a personas con trastornos en la rodilla es caminar por escaleras o por un plano inclinado. Para estudiar este problema, es necesario investigar el comportamiento de la rodilla durante dichas actividades. Por esta razón, en el instituto de biomecánica la escuela politécnica general de Zúrich, se diseñó un fluoroscopio móvil automatizado.

El objetivo de dicho sistema es obtener medidas cinemáticas y cinéticas de una persona caminando en un plano inclinado.

El sistema está compuesto por tres distintos sincronizados, (1) un fluoroscopio móvil, (2) un sistema VICON de rastreo de movimiento, y (3) placas de presión KISTLER.

El fluoroscopio móvil fue realizado desmontando el arco en C de la unidad de fluoroscopia y colocándolo en un sistema robótico que realiza el movimiento. La conexión entre el arco en C y el resto de la unidad de fluoroscopia se realiza por un cable de 8 m, que permite una distancia de caminata sobre la superficie de 12 m. El fluoroscopio es calibrado a través de una grilla para corregir la distorsión de las imágenes [9].

La unidad de fluoroscopia utilizada funciona en modo pulsado con un ratio de 25 Hz, y no se obtuvieron datos de la dosis de radiación recibida por el paciente en el ejercicio.

El sistema de rastreo de movimiento VICON consiste en un conjunto de cámaras infrarrojas que detectan la posición de marcadores colocados en el paciente, y a través de un software de procesamiento calcula la posición espacial de cada marcador. Se configuró VICON para muestrear a una frecuencia de 500 Hz, con lo cual la precisión en el seguimiento de la rodilla es de  $\pm 1\ \text{mm}$  [1].

El sistema KISTLER cuenta con 5 placas que miden la fuerza a partir de sensores piezoeléctricos, muestreando a una frecuencia de 1 kHz. Dichas placas se colocan separadas mecánicamente del suelo, de manera que no sean influenciadas por las vibraciones que provoca el brazo móvil. En la figura 5 se muestra un esquemático de dicha implementación.

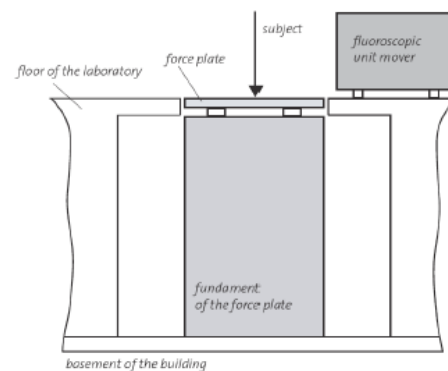


Fig. 5: Esquema de la colocación de las placas de fuerza. Se observa como las mismas están completamente aisladas de la superficie a su alrededor para no verse afectadas por vibraciones de la unidad de fluoroscopia. (Tomado de Gerber et al. [1]).

En conjunto, se obtiene un sistema capaz de realizar el seguimiento de la rodilla del paciente, mientras obtiene imágenes de fluoroscopia y la fuerza que éste realiza al caminar

por el plano inclinado. Si bien ya se habían realizado medidas de la cinemática y cinética utilizando fluoroscopia y placas de fuerza, nunca se había realizado ambas en forma simultánea.

La simultaneidad de las mediciones permitirá establecer una correspondencia entre la cinemática y la cinética de la rodilla, permitiendo realizar estudios más profundos sobre el funcionamiento de la misma.

## VI. COMPARACIONES

La primera diferencia que surge entre los sistemas es las medidas que realizan. Por un lado CINARTRO no permite seguir el movimiento de una persona caminando. Por otro lado MoBiX permite que el paciente camine en el suelo en lugar de en una caminadora al colocar el sistema de fluoroscopia en un sistema móvil, y el sistema de Zúrich agrega además medidas de fuerza mediante placas de presión, que muestrean la fuerza aplicada en el suelo por el paciente.

El sistema CINARTRO es el que obtiene imágenes a una frecuencia menor, siendo ésta 15 Hz, seguido por el sistema de Zúrich a 25 Hz. MoBiX es el que permite una frecuencia mayor (hasta 1000 fps) dado que sus fluoroscopios trabajan en modo continuo y su única limitación es la frecuencia de captura de la cámara. Esto indica que MoBiX es capaz de obtener resultados más precisos de la rodilla instante a instante. Se destaca además la fluoroscopia biplanar de MoBiX, que aumenta su precisión y realiza un modelo 3D de la rodilla.

Los tres sistemas necesitan ser calibrados antes de su uso para eliminar la distorsión en las imágenes producida por el sistema de fluoroscopia.

En cuanto a la dosis recibida por el paciente se observa que la suministrada por MoBiX es significativamente menor a la de CINARTRO, mientras que no se obtuvieron datos para el sistema de Zurich.

Se observa que CINARTRO es el único sistema que calcula parámetros del movimiento, al ser el único que realiza un procesamiento a las imágenes adquiridas. Además de ello, genera un reporte clínico para el paciente, lo cual es muy importante para realizar un correcto seguimiento del mismo.

La siguiente tabla resume las comparaciones mencionadas.

	CINARTRO	MoBiX	Sistema de Zurich
Requieren calibración	Si	Si	Si
Tipo de Fluoroscopia	2D	3D	2D
Procesa imágenes	Si	No	No
Permite caminar en el suelo	No	Si	Si
Obtiene medidas de fuerza	No	No	Si
Dosis de radiación	250 $\mu$ Gy cada 4 s.	170 $\mu$ Gy cada 60 s.	----
Fps del fluoroscopio	15	Hasta 1000	25

Tabla 1: Comparaciones realizadas a los tres sistemas estudiados

El sistema CINARTRO necesita de un procesamiento de las imágenes recibidas, al enfocarse en el seguimiento a pacientes con plastía de LCA. Dado que ese procesamiento involucra un usuario, es necesario que el número de imágenes obtenidas sea reducido. Por otro lado MoBiX se enfoca en el estudio de articulaciones artificiales por lo que sus resultados deben ser muy exactos, de ahí la alta frecuencia de muestreo del mismo. El sistema de Zurich se enfoca en el muestreo y estudio simultáneo de medidas tanto cinéticas como cinemáticas, por lo que su velocidad de muestreo intermedia es suficiente.

En conclusión, si bien todos se basan en la videofluoroscopia, cada sistema se enfoca en determinados resultados. Esto provoca ciertas diferencias en la forma en que aplican la videofluoroscopia, pero cada uno lo hace del modo en que mejores aplicaciones tiene en su área de estudio.

## REFERENCIAS

- [1] H. Gerber and E. Stüssi, "Method to simultaneously measure 3D kinematic and kinetic data during normal level walking using KISTLER force plates, VICON System and videofluoroscopy," no. June, 2017.
- [2] F. Simini and D. Santos, "Anterior Cruciate Ligament reconstruction follow-up instrumentation based on Centre of Rotation videofluoroscopy determination: Development of an original equipment, CINARTRO, and first clinical use," *Conf. Rec. - IEEE Instrum. Meas. Technol. Conf.*, pp. 923–926, 2014.
- [3] D. E. Tsaopoulos, V. Baltzopoulos, and C. N. Maganaris, "Human patellar tendon moment arm length: Measurement considerations and clinical implications for joint loading assessment," vol. 21, pp. 657–667, 2006.
- [4] D. Santos, "Estudio de los centros de rotación instantáneos de la rodilla en pacientes con plastía del ligamento cruzado anterior," *Fac. Med. - UdelaR*, 2014.
- [5] W. Olivera, M. Rodriguez, D. Santos, and F. Simini, "CINARTRO: Clinical Tool to Assess Knee Kinematics by Videofluoroscopy," pp. 26–29, 2016.
- [6] V. Baltzopoulos, "A videofluoroscopy method for optical distortion correction and measurement of knee-joint kinematics," *Clin. Biomech. (Bristol, Avon)*, vol. 10, no. 2, pp. 85–92, 1995.
- [7] S. Guan, H. A. Gray, F. Keynejad, and M. G. Pandy, "Mobile biplane X-Ray imaging system for measuring 3D dynamic joint motion during overground gait," *IEEE Trans. Med. Imaging*, vol. 35, no. 1, pp. 326–336, 2016.
- [8] B. H. Tonnessen and L. Pounds, "Radiation physics," *J. Vasc. Surg.*, vol. 53, no. 1, pp. 6–8, 2011.
- [9] P. Schütz, M. Angst, B. Postolka, M. Hitz, P. Schwilch, H. Gerber, W. R. Taylor, and R. List, "Knee implant kinematics of downhill walking by means of videofluoroscopy." 2016.



**Jorge Domínguez** nació en Trinidad, Flores, en 1993. Actualmente cursa el último año de la carrera de Ingeniería Eléctrica perfil Electrónica en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República (UdelaR) de Montevideo, Uruguay.