

# Evaluación de habilidades motoras en cirugía de mínima invasión basada en el análisis del vídeo laparoscópico

I. Oropesa García<sup>1,2</sup>, P. Sánchez-González<sup>1,2</sup>, P. Lamata de la Orden<sup>1</sup>, M.K. Chmarra<sup>3</sup>,  
J.A. Sánchez-Margallo<sup>4</sup>, F.W. Jansen<sup>3,5</sup>, J. Dankelman<sup>3</sup>  
F.M. Sánchez-Margallo<sup>4</sup>, E.J. Gómez Aguilera<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Grupo de Bioingeniería y Telemedicina, ETSI Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España; {ioropesa,psanchez,lamata,egomez}@gbt.tfo.upm.es

<sup>2</sup> Centro de Investigación Biomédica en Red en Bioingeniería, Biomateriales y Nanomedicina, Zaragoza, España

<sup>3</sup> Department of BioMechanical Engineering, Faculty of Mechanical, Maritime and Materials Engineering (3mE), Delft University of Technology, Delft, Países Bajos, {m.k.chmarra,j.dankelman}@tudelft.nl

<sup>4</sup> Centro de Cirugía de Mínima Invasión Jesús Usón, Cáceres, España, {jasanchez,msanchez}@ccmijesususon.com

<sup>5</sup> Department of Gynecology, Leiden University Medical Center, Leiden, Países Bajos, f.w.jansen@lumc.nl

## Resumen

*En el presente trabajo se muestran los resultados preliminares de validación de un sistema de evaluación de habilidades motoras en cirugía de mínima invasión (CMI) basado en el seguimiento por vídeo del instrumental quirúrgico. El sistema, en fase de prototipo aún, se valida con 42 participantes (16 noveles, 22 residentes y 4 expertos). En esta primera fase del trabajo se han analizado varias métricas obtenidas a partir del 2D de la imagen. El sistema presenta validez para las métricas de tiempo, camino recorrido, velocidad media y eficiencia de espacio. A falta de implementar una versión definitiva capaz de llevar a cabo procesamiento en tiempo real de múltiples herramientas, y de la validación de métricas obtenidas a partir del 3D, se demuestra la viabilidad de construir entornos de formación basados en tecnologías de vídeo, que sean transparentes al cirujano.*

## 1. Introducción

La formación de nuevos cirujanos de mínima invasión ha acaparado una gran atención en los últimos años, motivado en parte por la presión de las sociedades modernas, que demandan mayor seguridad en los quirófanos y profesionales ampliamente preparados [1]. El paradigma de formación está siendo transformado gradualmente, de un modelo basado en tutelas maestro-aprendiz hacia programas formativos objetivos y estructurados [2]. Estos modelos abogan por retrasar el momento en que los residentes se involucren activamente en una cirugía real hasta el momento en que haya adquirido las habilidades motoras necesarias. En consecuencia, las primeras etapas de formación se llevan a cabo en entornos de laboratorio, mediante el uso de simuladores físicos y virtuales [1].

Estos sistemas basan parte de sus procesos de entrenamiento y evaluación en el uso de métricas de eficiencia que registren información de los movimientos realizados por el cirujano durante una tarea específica [3]. El funcionamiento de dichos sistemas suele estar basado en el seguimiento activo del instrumental quirúrgico

mediante sensores ópticos, mecánicos o electromagnéticos [4], que modifican su ergonomía y los hacen poco prácticos para entornos de quirófano.

Una alternativa para el seguimiento del instrumental de forma pasiva y transparente al cirujano es el análisis del vídeo endoscópico [5]. Las características no invasivas de un sistema de seguimiento basado en visión por ordenador lo convierten en idóneo tanto fuera del quirófano (formación) [6] como dentro (formación, cirugía guiada por imagen) [5]. En formación, este concepto ya ha sido explotado en el simulador ProMIS (Haptica, Dublín, Irlanda), para el seguimiento del instrumental basado en visión estereoscópica. El reto de este trabajo de investigación, sin embargo, consiste en obtener la posición real del instrumental en el espacio en base a la imagen monoscópica del endoscopio [7][8][9].

Al igual que en cualquier otro entorno de formación, ligado al sistema será necesaria la definición de los parámetros de calidad a medir para evaluar las habilidades motoras del cirujano. En general, dichas métricas deben determinar la validación de construcción del sistema (es decir, su bondad, en base a ellas, a la hora de distinguir entre cirujanos de distinta experiencia) [3].

En el presente trabajo se muestran los resultados preliminares para la validación de un prototipo basado exclusivamente en el seguimiento del instrumental mediante análisis de vídeo. En una primera fase, las métricas han sido definidas únicamente a partir de la imagen 2D del endoscopio, y validadas para una tarea de evaluación en la que sólo se emplea una pinza laparoscópica.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1. Descripción del sistema

El sistema para el seguimiento espacial del instrumental consta de las siguientes etapas:

1. *Corrección de las deformaciones de la imagen:* De cara a una adecuada detección de los bordes del instrumental, se realiza una corrección de la distorsión radial de la imagen, mediante el algoritmo descrito por Bouguet en [10].
2. *Segmentación del instrumental de la imagen:* En trabajos anteriores, se presentaron diversas aproximaciones a la segmentación, orientada a escenarios anatómicos [11][12]. Basándonos en estos trabajos, la segmentación se realiza por color tanto en el espacio RGB (componente R) como HSV (componente H), seguida de una apertura de la imagen para la eliminación de píxeles sueltos.
3. *Detección de los bordes y punto a seguir del instrumental:* Para la detección de bordes se emplea un filtrado de Sobel, seguido de una transformación de Hough en la región del instrumental [11][12]. Para determinar el punto a seguir, se emplea un marcador blanco en la frontera entre vástago y punta de la herramienta, que se detecta en la imagen mediante un gradiente direccional en la dirección del eje de la herramienta [13].
4. *Post-procesado de datos:* Finalmente, para el tratamiento de ruido y eliminación de muestras erróneas, se ha diseñado un filtrado recursivo basado en la obtención de los centroides calculados mediante una implementación del algoritmo k-medians [14].

La implementación del sistema ha sido realizada mediante Matlab R2009b (Mathworks, Natick, MA, E.E.U.U.).

## 2.2. Metodología de validación

El experimento se llevó a cabo en los laboratorios de aprendizaje del Leiden University Medical Centre (LUMC, Leiden, Países Bajos), con un total de 42 participantes. Al no existir un estándar de clasificación predeterminado, se determinaron cuatro categorías en base a la experiencia: 16 noveles sin experiencia laparoscópica previa (N); 22 residentes, de los cuales 8 constaban de experiencia laparoscópica baja (RB, menos de 10 intervenciones realizadas) y 14 alta (RA, 11-100 intervenciones realizadas); y 4 expertos (E, más de 100 intervenciones realizadas). En una categorización superior, se considera a los N y RB como no expertos (NEx) y a los RA y E como expertos (Ex). Tres de los participantes eran zurdos.

La tarea a realizar consiste en recoger y colocar secuencialmente en sus correspondientes orificios una serie de objetos esféricos (garbanzos). El escenario consta de bloques a distintas alturas y orientaciones, así como zonas de oclusión visuales. Las habilidades evaluadas son la coordinación ojo-mano, la percepción espacial y el prensado (Fig. 1).

Cada participante recibió una breve descripción de la tarea antes de realizarla. Puesto que su objetivo es la validación como elemento de evaluación y no de entrenamiento, no se les permitió practicar con la tarea previamente. Para asegurar la igualdad de condiciones, la posición de la tarea, la cámara y los trócares de la cámara e instrumentos se mantuvieron fijos para todos los

participantes. Todas las secuencias de video fueron grabadas y analizadas a posteriori.



Figura 1. Montaje experimental. Izda: Escenario de trabajo. Dcha: Tarea de evaluación empleada.

En este estudio preliminar, todas las métricas fueron obtenidas a partir de las trayectorias 2D obtenidas, y por tanto las unidades de distancia se muestran en píxeles (pp). Las métricas implementadas y analizadas para este estudio fueron las siguientes:

- Tiempo: Tiempo empleado en completar la tarea (s).
- Camino recorrido: Camino total recorrido en la imagen por el instrumental laparoscópico, medido en la interfaz vástago-punta (pp).
- Velocidad media: Tasa de cambio de la posición del instrumental por segundo (pp/s).
- Eficiencia de espacio: Relación entre el camino recorrido total y el espacio ocupado. Calculado como:

$$\frac{\sqrt{\text{Área máxima abarcada}}}{\text{Camino recorrido}} \text{ (s.u.)}$$

- Tiempo de búsqueda: Tiempo total empleado en el área de recogida de los garbanzos (s).

El análisis estadístico se ha llevado a cabo mediante SPSS v. 17 (SPSS Inc., Chicago, IL, U.S.A.). Para establecer la validación de construcción de una métrica, es preciso que ésta muestre diferencias significativas en sus resultados para los distintos grupos de experiencia considerados (significancia). Para tal fin se emplea el test de Mann-Whitney, considerando significancia a  $P < 0.05$ .

## 3. Resultados

A modo de ejemplo, la Fig.2 muestra los resultados del análisis de una secuencia de vídeo de este trabajo, perteneciente a un RA:

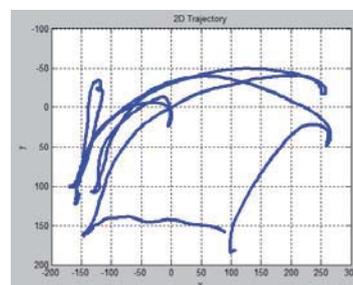


Figura 2. Seguimiento 2D del instrumental mediante análisis de vídeo (píxeles).

Todos los participantes fueron capaces de completar la tarea. Los resultados obtenidos para las distintas métricas se recogen en la Fig.3.

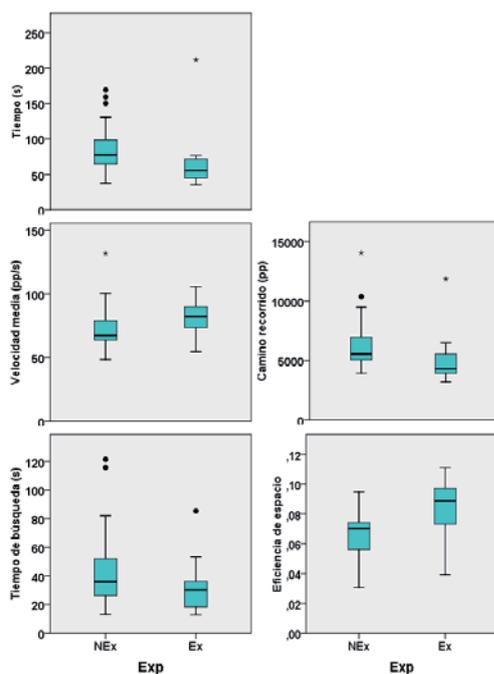


Figura 3. Resultados obtenidos para cada métrica.

En la Tabla 1 se resumen los datos de la validación, estableciéndose qué métricas presentan diferencias significativas y en qué casos. En ella se observa como salvo el tiempo de búsqueda, todas las métricas propuestas presentan validación de construcción entre expertos y no expertos. Si nos fijamos en el análisis entre los cuatro grupos, vemos que principalmente estas diferencias se dan entre los noveles y los grupos de alta experiencia (residentes de alta experiencia y expertos).

Métricas	Significancia (Ex - NEx)	Significancia (N-RB-RA-E)
Tiempo	x	N-RB, N-RA, N-E, RB-E
Camino recorrido	x	N-RA
Velocidad media	x	N-RA, N-E
Eficiencia de espacio	x	N-RA, N-E
Tiempo de búsqueda		

Tabla 1. Validación de construcción. La significancia entre Ex y NEx se señala mediante una x. La significancia entre N, RB, RA y E (4grupos) se expresa por parejas de grupos.

Tan sólo una de las métricas analizadas no alcanza el valor de significancia requerido ( $P < 0.05$ ), sí bien en el análisis de los resultados sí se observaron diferencias tanto entre Ex y NEx ( $P = 0,089$ ) como entre N y RA ( $P = 0,061$ ). Estas diferencias pueden también entreverse en la Fig.3.

#### 4. Discusión

En este trabajo se ha presentado un sistema para la evaluación de habilidades basado en seguimiento del instrumental quirúrgico a partir del vídeo laparoscópico; así como resultados preliminares de validación con una tarea específica de simulador físico.

El principal objetivo del trabajo ha sido demostrar la viabilidad de incorporar un sistema de estas

características a los procesos de formación de habilidades motoras de CMI. El prototipo actual del mismo presenta en estos momentos algunas limitaciones que son necesarias solventar antes de su definitiva implantación en rutina clínica.

La primera de ellas es su capacidad de trabajo en tiempo real. Actualmente, el procesamiento de vídeo se realiza a posteriori sobre secuencias pregrabadas, con un tiempo de procesamiento en torno a 1 *frame/s*. Sin embargo, para garantizar una realimentación inmediata acerca del desempeño del cirujano, el tiempo real es un requisito fundamental. Se contemplan para este caso la incorporación de mejoras tanto hardware (uso de GPUs) como software (migración a OpenCV).

La segunda gran limitación actual pasa por la detección de múltiples instrumentos. Gran parte de las tareas de formación existentes suelen emplearse para entrenar y evaluar la coordinación bi-manual, y por tanto requieren el seguimiento de dos herramientas. Actualmente, el prototipo se encuentra diseñado para trabajar con una, aunque ya se está trabajando en esta característica. En este sentido, se están investigando dos posibilidades: (1) explotar el uso de marcadores de distinto color para distinguir entre herramienta izquierda y derecha [15]; (2) detectar cada herramienta sin emplear marcadores, en función de su ángulo de entrada, según el trabajo de [13].

Al margen de estas limitaciones, el presente trabajo sirve para fijar las bases de un sistema de evaluación de este tipo y demostrar su validez preliminar. Pese a que en este punto de la validación sólo se ha considerado el uso de métricas obtenidas directamente de la imagen 2D, éstas reflejan diferencias significativas entre los distintos grupos analizados. Lo que es más importante, existe un paralelismo entre las diferencias detectadas mediante el uso del vídeo y las detectadas en el mismo estudio haciendo uso del sistema de sensores TrEndo [16].

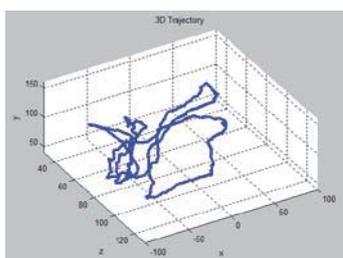
De las distintas métricas empleadas, el tiempo y el camino recorrido son las más comunes en este tipo de sistemas, y su validez se suele demostrar como independiente a la tarea y a las habilidades entrenadas [17]. La velocidad media, una métrica menos común, también demuestra su validez como discriminador de la pericia quirúrgica.

Dos métricas nuevas específicas para el seguimiento por vídeo son el tiempo de búsqueda y la eficiencia de espacio. La primera nace de la observación directa, al comprobarse que los expertos podían recoger y manipular con mayor facilidad los garbanzos del escenario. Pese a que la métrica no muestra finalmente resultados lo suficientemente significativos, sí se aproximan a los umbrales considerados a tal fin. Serán por tanto necesarios nuevos estudios para corroborar su utilidad.

La eficiencia de espacio nace como una métrica destinada a cuantificar el uso que hacen los cirujanos del área de visión proporcionado por el endoscopio. A falta de la información 3D que permita cuantificar el volumen empleado, esta métrica permite relacionar el área cubierta total (que no varía significativamente entre participantes)

con el camino recorrido. De nuevo, pese a los resultados positivos obtenidos, esta métrica requerirá de nuevos estudios que confirmen su validez.

El objetivo último de este trabajo pasa por la determinación de métricas válidas a partir de la posición 3D del instrumental. Los trabajos de investigación actuales se centran en caracterizar la localización tridimensional del instrumental, obtenida a partir del diámetro aparente del vástago, del campo de visión del endoscopio y de la posición de los trócares (Fig.4). El análisis de las trayectorias 3D obtenidas servirá para conocer el verdadero potencial de este nuevo sistema.



**Figura 4.** Seguimiento 3D del instrumental mediante análisis de vídeo (cm). Obtenidas a partir de la trayectoria 2D mostrada en la Fig.2

## 5. Conclusiones

Este trabajo ha demostrado la viabilidad de emplear el análisis del vídeo laparoscópico para la evaluación de habilidades motoras en CMI. Los resultados aquí presentados se basan exclusivamente en métricas de evaluación de habilidades quirúrgicas, obtenidas a partir de la imagen 2D del vídeo laparoscópico. El propósito final de este trabajo es, sin embargo, la determinación de métricas válidas basadas en la posición 3D del instrumental. Las ventajas de un sistema basado en vídeo son claras: una nula modificación de la ergonomía del instrumental quirúrgico gracias a la ausencia de sensores, y una portabilidad que favorece su implantación tanto en escenarios de laboratorio como en quirófanos reales.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el programa FPU del Ministerio de Ciencia e Innovación y el proyecto intramural THEMIS del CIBER-BBN. Los autores agradecen su colaboración a todos los participantes del LUMC.

## Referencias

- [1] Aggarwal R, Moorthy K, Darzi A. Laparoscopic skills training and assessment. *British Journal of Surgery*, vol 91, 2004; pp 1549-1558.
- [2] Harden RM, Stevenson M, Downie WW, Wilson GM. Assessment of clinical competence using objective structured examination. *British Medical Journal*, vol 1, 1975, pp 447-51.
- [3] Fried GM, Feldman LS. Objective Assessment of Technical Performance. *World Journal of Surgery*, vol 32, 2008; pp 156-160.
- [4] Chmarra MK, Grimbergen CA, Dankelman J. Systems for tracking minimally invasive surgical instruments. *Minimally Invasive Therapies and Allied Technologies*, vol 16, 2007; pp 328-340.
- [5] Sánchez-González P, Cano AM, Oropesa I, Sánchez-Margallo FM, del Pozo F, Lamata P, Gómez EJ. Laparoscopic Video Analysis for Training and Image Guided Surgery. *Minimally Invasive Therapies and Allied Technologies*, 2010 (In press).
- [6] Sánchez-Margallo JA, Sánchez-Margallo FM, Pagador JB, Gómez-Aguilera EJ, Sánchez-González P, Usón J, Moreno J. Video-based assistance system for training in minimally invasive surgery. *Minimally Invasive Therapies and Allied Technologies*, 2010 (In press).
- [7] Voros S, Long J, Cinquin P. Automatic Localization of Laparoscopic Instruments for the Visual Servoing of an Endoscopic Camera Holder. *Medical Image Computing and Computer Assisted Interventions*, vol 9, 2006, pp 535-42.
- [8] Doignon C, Nageotte F, Maurin B, Krupa A. Pose estimation and feature tracking for robot assisted surgery with medical imaging. In: Kragic D, Kyriak V eds. *Unifying perspectives in computational and robot vision*. Springer US: vol 8, 2008, pp 79-101.
- [9] Cano, A.M., Gayá, F., Lamata, P., Sánchez-González, P., Gómez, E.J. Laparoscopic tool tracking method for augmented reality surgical applications. *Lecture Notes in Computer Science*, vol 5104, 2008, pp 191-196.
- [10] Bouguet JY. Camera Calibration Toolbox for Matlab. [http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib\\_doc/index.html](http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/index.html) (Consultada: Julio 2011).
- [11] Cano AM, Vara I, Sánchez-González P, del Pozo F, Gómez EJ. Laparoscopic image analysis for automatic tracking of surgical tools. *Proceeding of the 22<sup>nd</sup> International Congress and Exhibition on Computer Assisted Radiology and Surgery (CARS 2008)*, Barcelona, 2008.vol 3, pp 279.
- [12] García ME, Oropesa I, Sánchez-González P, Cano AM, Sánchez-Margallo FM, Gómez EJ. Optimización de un método de detección y seguimiento de instrumental quirúrgico en vídeo laparoscópico. *Libro de Actas del XXVIII Congreso Anual de la Sociedad Española de Ingeniería Biomédica*, Madrid, 2010, pp 254.
- [13] Allen BF, Kasper F, Nataneli G, Dutton E, Faloutsos P. Visual tracking of laparoscopic instruments in standard training environments. *Studies in health technology and informatics*, vol 163, 2011, pp 11-17.
- [14] Jain AK, Dubes RC, Algorithms for Clustering Data. Prentice-Hall, 1981.
- [15] Bouarfa L, Akman O, Schneider A, Jonker PP, Dankelman J. In-vivo real time tracking of surgical instruments in endoscopic video. *Minimally Invasive Therapies and Allied Technologies*, 2011, pp 1-6 (Early Online).
- [16] Chmarra MK, Bakker NH, Grimbergen CA, Dankelman J. TrEndo, a device for tracking minimally invasive surgical instruments in training setups. *Sensor Actuators A-Physical*, vol 126, 2006, pp 328-334.
- [17] Oropesa I, Sánchez-González P, Lamata P, Chmarra MK, Pagador JB, Sánchez-Margallo JA, Sánchez-Margallo FM, Gómez EJ. Methods and tools for objective assessment of psychomotor skills in laparoscopic surgery. *Journal of Surgical Research*, 2011 (In press).