

## Arquitectura funcional para una sutura robótica automatizada en cirugía laparoscópica

Galán-Cuenca, A.<sup>a</sup>, Herrera-López, J.M.<sup>a</sup>, Fernández-Naranjo, M.<sup>b</sup>, García-Morales, I.<sup>a</sup>, Burrieza, A.<sup>b</sup>, Muñoz, V. F.<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad de Málaga, C/ Severo Ochoa, 4, Parque tecnológico de Andalucía (PTA), 29071

<sup>b</sup>Departamento de Filosofía, Universidad de Málaga, Campus de, Blvr. Louis Pasteur, 27, 29010

**To cite this article:** Galán-Cuenca, A., Herrera-López, J.M. Fernández-Naranjo, M., García-Morales, I., Burrieza, A., Muñoz, V.F. 2023. Functional architecture for automated robotic suturing in laparoscopic surgery. XLIV Jornadas de Automática, 35-40. <https://doi.org/10.17979/spudc.9788497498609.035>

### Resumen

La cirugía laparoscópica es una cirugía mínimamente invasiva que hace reducidas incisiones en el tejido del paciente durante el procedimiento. Una de las tareas más desafiantes dentro de este campo es la sutura realizada con robots. Este artículo presenta una estrategia de sutura robótica automatizada pensada para coordinar la colaboración entre el cirujano y los brazos robóticos. En el planteamiento se usa una plataforma robótica formada por tres brazos manipuladores y dos dispositivos hápticos. Para la automatización de la tarea el artículo explica el uso de un motor de inferencia basado en ontologías y el reconocimiento de flujos de trabajo para tener conciencia de en qué parte del proceso está el sistema e inferir que acciones se deben hacer; y el uso de técnicas de control para posicionar los instrumentos dentro del paciente sin ejercer daño en el abdomen.

*Palabras clave:* Ontología, Flujo de trabajo, Cirugía laparoscopia, Sutura robotizada, Control, Cualitativo, Cuantitativo

### Functional architecture for automated robotic suturing in laparoscopic surgery

#### Abstract

Laparoscopic surgery is a minimally invasive surgery that makes small incisions in the patient's tissue during the procedure. One of the most challenging tasks within this field is suturing performed with robots. This article presents an automated robotic suturing strategy designed to coordinate the collaboration between the surgeon and the robotic arms. The approach uses a robotic platform consisting of three manipulator arms and two haptic devices. For the automation of the task the article explains the use of an ontology-based inference engine and workflow recognition to be aware of where the system is in the process and to infer what actions should be done; and the use of control techniques to position the instruments inside the patient without exerting damage to the abdomen.

*Keywords:* Ontology, Workflow, Laparoscopic surgery, Robotic suturing, Control, Qualitative, Quantitative

### 1. Introducción

La sutura laparoscópica es una de las tareas más desafiantes en las cirugías mínimamente invasivas (MSI) (Leonard et al., 2014b), especialmente cuando se realiza con robots quirúrgicos. A pesar de los avances en la robótica quirúrgica, suturar o grapar las incisiones quirúrgicas sigue siendo una de las etapas más repetitivas y que consume más tiempo en esta tarea (Leonard et al., 2014a) conllevando fatiga muscular al cirujano o cirujana, por lo que constituye una tarea adecuada para ser

automatizada (Pedram et al., 2021).

Uno de los desafíos en la robótica quirúrgica es el desarrollo de sistemas autónomos de nivel 4, que son aquellos con la capacidad de hacer y ejecutar automáticamente decisiones clínicas bajo la constante supervisión del cirujano (Attanasio et al., 2021), que regulan la coordinación entre el cirujano y los brazos robóticos. Estos sistemas utilizan información preoperatoria para supervisar y replanificar las maniobras quirúrgicas, permitiendo al cirujano tomar el control en cualquier momento. Para ello, es esencial hacer una planificación previa de las

\*Autor para correspondencia: [alvarogalan98@uma.es](mailto:alvarogalan98@uma.es)  
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

tareas quirúrgicas, para desarrollar un plan o estrategia para un procedimiento. Este proceso es esencial para garantizar que el procedimiento se realice de manera segura, efectiva y eficiente. EL IECTR/TR 60601-4-1:2017 titulado "Medical electrical equipment" parametriza la autonomía de los robots en 4 funciones cognitivas, que son: generar opciones para lograr los objetivos deseados, seleccionar una de las opciones en función de un criterio, ejecutarla y supervisar el resultado de la ejecución. Esto requiere la combinación de enfoques relacionados con el análisis cognitivo del área quirúrgica, los sistemas de inferencia y la planificación de movimiento del robot.

El desarrollo de metodologías de planificación de tareas basadas en una arquitectura cognitiva, con capacidades de supervisión y coordinación de la colaboración humano-robot durante la tarea, se ha convertido en una línea de investigación importante en este campo. Se han propuesto técnicas de reconocimiento de la fase quirúrgica mediante redes neuronales convolucionales (CNN) (Twinanda et al., 2017), con redes neuronales profundas (Li et al., 2021) o integrando SLAM en CNNs para la detección de herramientas quirúrgicas y flujos de trabajo (Lan, 2022). Además, hay otros enfoques que utilizan un motor de inferencia basado en ontologías y un método de predicción para casos de uso neuroquirúrgico (Neumann et al., 2022) para identificar la maniobra que se está ejecutando según el estado del protocolo.

La planificación del movimiento en robots quirúrgicos implica determinar la trayectoria óptima para alcanzar un objetivo específico, dividiendo la tarea en subtareas y primitivas de movimiento siguiendo un esquema jerárquico o esquemas organizativo para planificar los movimientos colaborativos entre robots (Nagy and Haidegger, 2022). Otros enfoques emplean técnicas de aprendizaje para la coordinación de robots multi-brazo (Deniša et al., 2021) o el aprendizaje por refuerzo para planificar una maniobra quirúrgica (Scheikl et al., 2023). Sin embargo, ninguno considera la colaboración humano-robot (Huynhnguyen and Buy, 2021) ni la supervisión comparativa del resultado esperado (Yan et al., 2022).

Este artículo propone una estrategia para la sutura robótica automatizada mediante el uso de un motor de inferencia basado en ontología y estrategias de control. Incorpora una interfaz de usuario y dos dispositivos hápticos para permitir la colaboración humano-robot. Durante el proceso de sutura, el sistema razona el estado actual de la operación y las acciones que se deben ejecutar, haciendo uso de un control fuerza-posición para que los robots alcancen las posiciones deseadas sin ejercer fuerzas en el abdomen del paciente.

El artículo se organiza de la siguiente manera. La sección 2 plantea el problema a resolver, desde el escenario usado hasta la arquitectura funcional implementada. En la sección 3 se presenta el flujo de trabajo diseñado para procesos de sutura robótica automatizada, así como el razonador capaz de inferir el estado actual del proceso y las acciones ejecutables del sistema. La sección 4 presenta las estrategias de control planteadas para el movimiento del brazo robot y de la herramienta, y finalmente, se presentan las conclusiones y desarrollos futuros en la sección 5.

## 2. Planteamiento del problema

Con el objetivo de presentar un escenario real donde integrar la estrategia desarrollado en este artículo, en la Figura 1 se recoge el escenario a usar y los sistemas de referencia presentes. Como se ve en la Figura 1, está formado por dos hápticos y tres brazos robóticos manipuladores, uno para sostener la cámara y dos que portan el instrumental quirúrgico y que se han denominado por derecho e izquierdo con sus respectivas pinzas.

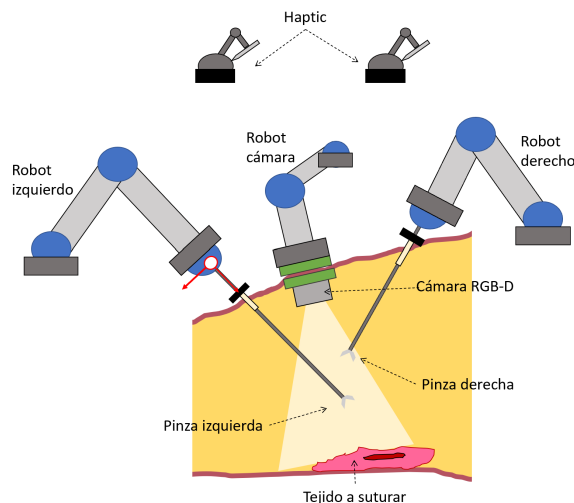


Figura 1: Escenario quirúrgico.

La arquitectura implementada, recogida en la Figura 2, permite al cirujano elegir entre dos opciones de control para los robots manipuladores en la cirugía. La primera opción es utilizar un razonador automático basado en ontologías, mientras que la segunda opción es la teleoperación mediante un dispositivo háptico. El *Interfaz*, mostrado en la parte superior de la Figura 2, permite al cirujano tomar el control de uno o ambos robots en cualquier momento, con el objetivo de alcanzar un nivel 4 de autonomía en el proceso, enviando comandos teleoperados para posicionar las herramientas quirúrgicas y controlar su ángulo y apertura de pinza. El *Interfaz* proporciona retroalimentación visual y de fuerzas, facilitando una comunicación bidireccional y mayor autonomía en la cirugía. Además, la *Interfaz* incorpora un reconocedor de gestos mediante técnicas de aprendizaje automático para identificar los movimientos del cirujano.

La Figura 2 es simétrica para los dos robots manipuladores, ya que el control y los sensores de ambos brazos son iguales. A la izquierda de la arquitectura presentada y debajo de la *Interfaz*, se ve el *Selector*, encargado de seleccionar la consigna teleoperada o autónoma, por orden del cirujano, y enviarla a un bloque de *Control* encargado de controlar la pose de cada brazo que mueve el instrumental y realizar un control cinemático de la herramienta. Esto lo hace mandando las referencias al bloque *Instrumental Izquierdo*, pero como se ha dicho es idéntico para el derecho.

Posteriormente, mediante un análisis intraoperatorio del bloque *Sensores* mide los movimientos realizados por el instrumental y la interacción humano-robot. Estos datos son mandados al *Razonador* junto la salida del reconocedor de gestos y los datos obtenidos mediante *Visión*, que son la ubicación de

la herida a suturar, entendiendo herida como la incisión presente en el tejido interno del paciente y que se quiere cerrar, y el número de puntos de sutura necesarios para cerrar la herida así como sus ubicaciones. Esta información de la herida se obtiene tras procesar la imagen intraoperatoria captada por una cámara RGB-D ubicada en el interior de la cavidad abdominal como se ve en la Figura 1, clasificar si es una herida plana, tubular, fina o gruesa, y posteriormente estimar la ubicación de los puntos de sutura de manera autónoma haciendo uso de criterios médicos. Todo esta información es la entrada del bloque razonador.

En el *Razonador*, mediante la generación de un *Vector de Predicados* pasa la información de cuantitativa a cualitativa. Dicho vector, es la entrada del *Motor de inferencia* encargado de identificar en que estado del proceso de sutura se encuentra el sistema e inferir que acción se debe realizar a continuación. Esto se logra gracias a un modelado previo del flujo de trabajo en los procesos de sutura quirúrgica robotizada. Las acciones obtenidas del *Motor de Inferencia*, son acciones cualitativas encargadas de controlar el movimiento individual de cada robot así como la colaboración entre ellos. Finalmente, el *Generador de Primitivas* convierte las acciones cualitativas a cuantitativas para que puedan ser entendidas en el mundo real, generando así las consignas autónomas del robot. Por último, tanto las decisiones del razonador como el conjunto de datos sensorizados y de visión son pasados al interfaz, para dar una realimentación al cirujano.

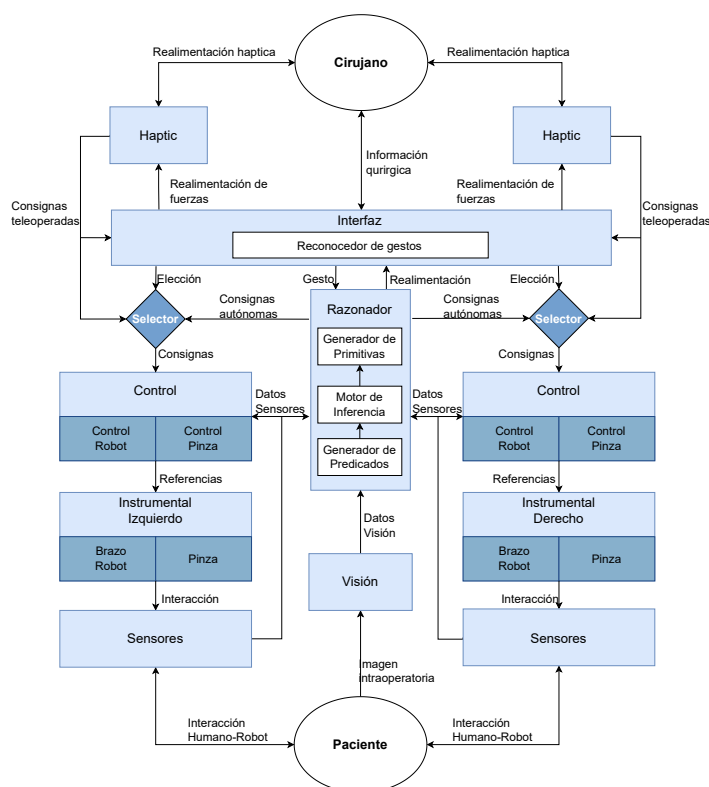


Figura 2: Arquitectura funcional implementada.

### 3. Razonador

El *Razonador* tiene dos funciones principales: detectar la fase actual y detectar la acción a realizar en el punto de sutura

actual. Esto se logra mediante el uso de ontologías implementadas con el editor *Protege* y el razonador *HermiT 1.4.3.456*, usando *python* como lenguaje para comunicar la ontología con los otros módulos. Para poder reconocer la fase de trabajo actual se hace uso de una planificación previa del flujo de trabajo, y durante el procedimiento, se usa un vector de predicados de relación, para representar de manera cualitativa el estado de la sutura. Además de estos predicados, también cuenta con predicados internos que son: *FaseActual*, *FaseSiguiete*, *PuntoDeSutura\_Actual* y *PuntoDeSutura\_Siguiete*. Con el conjunto de todos los predicados y el número de puntos de sutura ( $n$ ) (obtenido por visión), la ontología es capaz de inferir, mediante reglas, cual es la acción ejecutable, la fase actual de las nueve contempladas, la fase siguiente y el punto de sutura actual y el siguiente. En las siguientes subsecciones, se explica el flujo de trabajo implementado y la formalización de este mediante predicados, así como las estrategias para pasar la información de cuantitativo a cualitativo y viceversa.

#### 3.1. Flujo de trabajo

En la planificación de tareas se ha modelado el flujo de trabajo existente en operaciones de sutura laparoscópica robotizadas. Para ello, se ha seleccionado una sutura barbada continua, donde solo se requiere el uso de un nudo al comienzo de la sutura, sin nudo final. Uno de los puntos cruciales en la sutura es el nudo, por su complejidad en operaciones de laparoscopia y por ser considerado el punto más débil de cualquier línea de sutura (Márquez and Belda, 2015), es por eso, que un planteamiento que reduzca el número de nudos es ventajoso. La sutura barbada es un tipo de sutura donde el hilo cuenta con pequeñas barbas en sentido helicoidal que permite que el movimiento de la sutura sea unidireccional, y la sutura continua es un tipo de sutura donde una vez realizado el primer punto de sutura y su nudo, se continúa introduciendo el hilo de forma constante a lo largo de toda la incisión, como se ve en la Figura 3, donde en rojo se representa el hilo y en la zona superior derecha el nudo inicial.

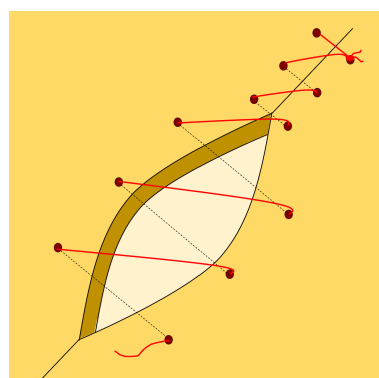


Figura 3: Representación de una sutura barbada continuada.

Se han identificado nueve fases recurrentes en cada punto de sutura de este tipo. En la Figura 4, se muestra el flujo de trabajo que comprende estas nueve fases para una sutura realizada con dos pinzas quirúrgicas y una aguja, específicamente para heridas finas. Las acciones entre fases se destacan en rojo. Cabe mencionar que, en esta planificación, se supone que el

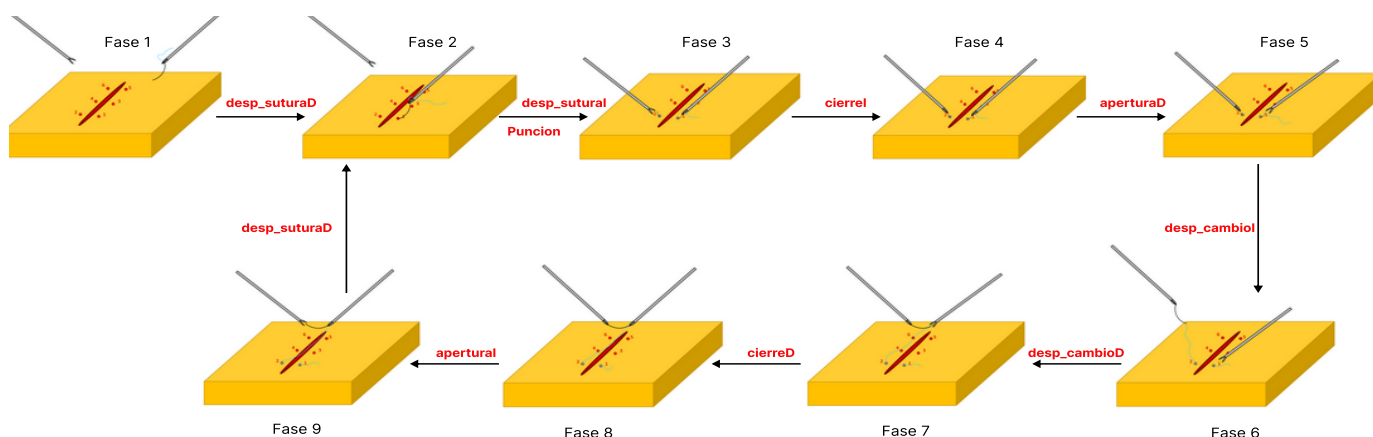


Figura 4: Flujo de trabajo de la sutura laparoscópica robotizada

nudo inicial ya ha sido realizado y no se ha tenido en cuenta su ejecución. Las fases contempladas son:

- Fase 1: Las dos pinzas se encuentran sobre el tejido, con la pinza del brazo derecho agarrando la aguja y el punto de sutura objetivo aún sin suturar.
- Fase 2: La pinza derecha se aproxima al punto de sutura actual.
- Fase 3: En esta fase se hace un movimiento coordinado entra la pinza derecha que hace pasar la aguja por el tejido para suturar, y la pinza izquierda que se mueve hasta la superficie del tejido por donde sale la aguja.
- Fase 4: En esta fase, después de la punción, comienza el proceso de pasar la aguja de la pinza derecha a izquierda. El primer paso reflejado en esta fase es que la pinza izquierda se cierre agarrando la aguja mientras la derecha aún la tiene sujeta.
- Fase 5: La pinza derecha se abre dejando la aguja agarrada únicamente por la pinza izquierda.
- Fase 6: La pinza izquierda, que sujeta la aguja, se mueve a un punto bias sobre el tejido para tensar el hilo.
- Fase 7: En esta fase la pinza derecha se mueve al punto bias sobre el tejido para comenzar el cambio de aguja de la pinza izquierda a la derecha.
- Fase 8: La pinza derecha se cierra para que ahora las dos pinzas agarren la aguja.
- Fase 9: La pinza izquierda suelta la aguja y ahora esta agarrada únicamente por la derecha, teniendo la misma configuración que en la primera fase pero ahora con el punto de sutura actual punzado.

Exceptuando para el primer punto de sutura realizado, cuyo orden es seleccionado por el bloque de *Visión* que es el encargado de detectar los puntos de sutura, el flujo de trabajo no vuelve a pasar por la fase 1, pasando de la fase 9 a la 2 directamente.

### 3.2. Formalización mediante predicados del flujo de trabajo

Mediante el uso de predicados de relación se modela el flujo de trabajo de la Figura 4. Para la identificación se han seleccionado ocho predicados, recogidos en la Tabla 1. Dicha Tabla muestra el nombre del predicados, la definición de cada uno, y las técnicas usadas para convertir la información de cuantitativa a cualitativa. La información cuantitativa es la facilitada por los sensores, el algoritmo de visión y la mandada por el cirujano. La Tabla 2 recoge el *valor* de los predicados para cada fase, identificando así el flujo de trabajo de manera cualitativa, y que es pasado al *Motor de Inferencia*.

Tabla 1: Predicados de relación.

Predicado	Definición	Técnica
enPosicionPinzaD(X,valor)	Verdadero cuando la pinza derecha está en la posición de sutura X	Reglas borrosas
enPosicionPinzaI(X,valor)	Verdadero cuando la pinza izquierda está en la posición de sutura X	Reglas borrosas
enPosicionCambioD(X,valor)	Verdadero cuando la pinza derecha está en la posición de cambio X	Reglas borrosas
enPosicionCambioI(X,valor)	Verdadero cuando la pinza izquierda está en la posición de cambio X	Reglas borrosas
pinzaCerrada(P,valor)	Verdadero cuando los motores cierran la pinza P	Lectura de los encoders
libre(Y,valor)	Verdadero hasta que se suture el punto Y	Análisis de la imagen
terminado(Y,valor)	Verdadero solo cuando se cumplen las nueve fases del proceso	Dependencia

### 3.3. Generación de primitivas de movimiento

El bloque *Generador de Primitivas* recibe como entradas del *Motor de Inferencia* literales compuestos por la acción ejecutable y el punto de sutura actual sobre el que se realiza dicha

Tabla 2: Valores de los predicados para cada fase del flujo de trabajo.

	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4	Fase 5	Fase 6	Fase 7	Fase 8	Fase 9
<b>enPosicionPinzaD</b>	False	True	True	True	True	True	False	False	False
<b>enPosicionPinzaI</b>	False	False	True	True	True	False	False	False	False
<b>enPosicionCambioD</b>	False	False	False	False	False	False	True	True	True
<b>enPosicionCambioI</b>	False	False	False	False	False	True	True	True	True
<b>pinzaCerrada(D)</b>	True	True	True	True	False	False	False	True	True
<b>pinzaCerrada(I)</b>	False	False	False	True	True	True	True	True	False
<b>libre</b>	True	True	False	False	False	False	False	False	False
<b>terminado</b>	False	False	False	False	False	False	False	False	True

acción. El punto de sutura es un índice entre 1 y  $n$  que se convierte en coordenadas utilizando una base de datos que almacena los valores de las tres coordenadas espaciales relacionadas con ese índice. Hay un total de nueve acciones individuales y cada acción se transforma en primitivas o consignas autónomas, encargadas de comandar al robot. Las consignas contempladas son:

- $R\_Drch(X_{des})$ : Mover el robot derecho a una posición deseada ( $X_{des}$ ).
- $R\_Izq(X_{des})$ : Mover el robot izquierdo a una posición deseada ( $X_{des}$ ).
- $P\_Drch(X_{des})$ : Mover la pinza derecha a una posición deseada ( $X_{des}$ ).
- $P\_Izq(X_{des})$ : Mover la pinza izquierda a una posición deseada ( $X_{des}$ ).

La Tabla 3 recoge las nueve acciones cualitativas de la Figura 4 (en rojo), las consignas cuantitativas, y un breve definición de cada una.

Tabla 3: Convección de acciones cualitativas a cuantitativas.

Acción	Consigna	Definición
desp_suturaD	$R\_Drch(X_{des})$ $P\_Drch(X_{des})$	Mover herramienta derecha a punto de sutura actual
desp_suturaI	$R\_Izq(X_{des})$ $P\_Izq(X_{des})$	Mover herramienta izquierda a punto de sutura actual
puncion	$P\_Drch(X_{des})$	Hacer punción con pinza derecha
cierreI	$P\_Izq(X_{des})$	Pinza izquierda agarra la aguja
aperturaD	$P\_Drch(X_{des})$	Pinza derecha suelta la aguja
desp_cambioI	$R\_Izq(X_{des})$	Mover robot izquierdo a punto bias
desp_cambioD	$R\_Drch(X_{des})$	Mover robot derecho a punto bias
cierreD	$P\_Drch(X_{des})$	Pinza derecha agarra la aguja
aperturaI	$P\_Izq(X_{des})$	Pinza izquierda suelta la aguja

#### 4. Control y movimiento del instrumental quirúrgico

Una vez seleccionada la consigna a seguir, el bloque *Control* se encarga de enviar al bloque *Instrumental* las referencias necesarias para alcanzar los objetivos. El *Instrumental* se compone tanto del brazo robótico que sujeta la herramienta como de la pinza.

El control del brazo robótico es un control fuerza-posición diseñado para posicionar la punta de la herramienta, respetando la incisión en el abdomen por el que la herramienta debe pivotar en este tipo de operaciones, punto de fulcro, y sin ejercer fuerzas en el abdomen del paciente durante el movimiento, presentado en (Galán-Cuenca et al., 2023). Para ello, un control PI se encarga del control de posición y un control proporcional del control de fuerzas. La Figura 5 recoge la arquitectura planteada, que tiene como consigna la posición deseada de la punta del robot y la fuerza deseada, que en este caso siempre es cero. En el primer bucle de realimentación, el *Control de Fuerzas*, usa la diferencia de fuerzas,  $\Delta F$ , para obtener la referencia  $\Delta X$  que corrige de manera lineal la posición del punto de fulcro estimado por el *Estimador distancia al fulcro*. La posición del fulcro,  $F_P$ , junto con la posición deseada,  $X_{des}$ , entran en el bloque *Pose deseada TTP* para obtener la pose, posición y orientación, de la punta de la herramienta. Esta consigna de pose, entra al segundo bucle de realimentación del *Control Posición*. El robot se mueve interactuando con el paciente obteniendo por medio del bloque *Sensores* la fuerza y el momento en el fulcro ( $F/T_{fulcrum}$ ). En el caso de la herramienta, al contar con 4 motores que rigen la posición angular de la pinza, se usa un control cinemático proporcional para asegurar los ángulos y apertura de la herramienta.

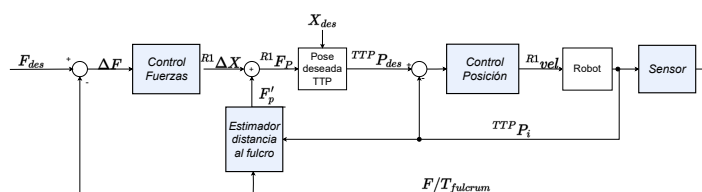


Figura 5: Representación de una sutura barbada continuada.

El bloque *Instrumental* es el que interactúa con el paciente con el bloque *Sensores* para poder tener realimentación de la interacción humano-robot. Los datos de los sensores medidos son: la fuerza y el momento medidos con un sensor localizado en el efector final de cada robot y las posiciones y ángulos re-



lativos de la dos instrumentos quirúrgicos. Información que es compartida tanto con el *Razonador* como con el *Interfaz*.

## 5. Conclusiones

En este artículo se ha presentado una arquitectura funcional para sutura robótica automatizada en cirugía laparoscópica que logra el nivel 4 de autonomía en una plataforma, pensada para ser usada en tiempo real, formada por tres robots manipuladores UR3 de UniversalRobots®, dos sensores de fuerza/torque de OnRobot® en los efectores finales de cada robot, una cámara Intel Real Sense Depth modelo D405, dos herramientas quirúrgicas, dos trócar para introducir cada herramienta en el abdomen, dos dispositivos OpenHaptic® y un pelvitrainer de MedicalSimulator. La arquitectura está compuesta por una *Interfaz* que conecta al cirujano con la plataforma robótica, que incluye dos robots manipuladores con instrumental quirúrgico, un brazo con cámara, sistemas hápticos para teleoperación y un *Razonador* que genera comandos autónomos. El *Razonador* utiliza información cualitativa derivada de una planificación previa del flujo de trabajo para determinar la fase de trabajo actual, la siguiente y las acciones a ejecutar. Estas acciones se convierten en comandos cuantitativos enviados a los robots y pinzas para lograr las posiciones y ángulos deseados. Finalmente, un controlador permite que la herramienta se mueva dentro del abdomen del paciente sin ejercer fuerza y alcance la posición deseada.

Como contribución a la literatura existente, esta arquitectura considera una colaboración humano-robot durante la planificación de movimientos, por medio de un *Selector* que permite discernir que agente comanda los robots, el humano de manera teleoperada o el *Razonador* de manera autónoma; además, mediante un motor de inferencia basado en ontologías, se identifica el escenario quirúrgico y la maniobra realizada y se compara con el estado y maniobra esperadas, permitiendo supervisar el proceso.

Futuros avances en este trabajo implicarían la implementación de una arquitectura funcional y robusta a fallos, que se lograría mediante la especialización de la ontología para todos los casos de errores quirúrgicos contemplados y las acciones correspondientes para evitarlos; la automatización del movimiento del robot manipulador que sujeta la cámara, que en este escenario es fijo y no se mueve; y abordar el problema latente en la sutura robotizada de hacer nudos.

## Agradecimientos

Este trabajo ha recibido financiación del proyecto "Planificador global de un sistema robótico para anastomosis", con identificador PID2019-111023RB-C31, y del proyecto "Sistema Quirúrgico Ciberfísico Para Abordaje Laparoscópico" con identificador PY20-00738. Proyectos a los que se encuentra adscrito el grupo de investigación de Robótica Médica del Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad de Málaga.

## Referencias

- Attanasio, A., Scaglioni, B., De Momi, E., Fiorini, P., Valdastrì, P., 2021. Autonomy in surgical robotics. *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems* 4 (1), 651–679.  
URL: <https://doi.org/10.1146/annurev-control-062420-090543>  
DOI: 10.1146/annurev-control-062420-090543
- Deniša, M., Schwaner, K. L., Iturrate, I., Savarimuthu, T. R., 2021. Semi-autonomous cooperative tasks in a multi-arm robotic surgical domain. In: 2021 20th International Conference on Advanced Robotics (ICAR). pp. 134–141.  
DOI: 10.1109/ICAR53236.2021.9659445
- Galán-Cuenca, A., De Luis-Moura, D., Herrera-López, J., Rollón, M., García-Morales, I., Muñoz, V., 2023. Automated suture for a robotic platform to assist laparoscopic surgery. *Jornadas Nacionales de Robótica y Bioingeniería* 00, 1–5.  
DOI: <https://doi.org/>
- Huynhnguyen, H., Buy, U. A., 2021. Toward gesture recognition in robot-assisted surgical procedures. In: 2020 2nd International Conference on Societal Automation (SA). pp. 1–4.  
DOI: 10.1109/SA51175.2021.9507175
- Lan, E., 2022. A novel deep learning architecture by integrating visual simultaneous localization and mapping (vslam) into cnn for real-time surgical video analysis. In: 2022 IEEE 19th International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI). pp. 1–5.  
DOI: 10.1109/ISBI52829.2022.9761454
- Leonard, S., Shademan, A., Kim, Y., Krieger, A., Kim, P. C. W., 2014a. Smart tissue anastomosis robot (star): Accuracy evaluation for supervisory suturing using near-infrared fluorescent markers. In: 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). pp. 1889–1894.  
DOI: 10.1109/ICRA.2014.6907108
- Leonard, S., Wu, K., Kim, Y., Krieger, A., Kim, P., 2014b. Smart tissue anastomosis robot (star): A vision-guided robotics system for laparoscopic suturing. *Biomedical Engineering, IEEE Transactions on* 61, 1305–1317.  
DOI: 10.1109/TBME.2014.2302385
- Li, Y., Li, Y., He, W., Shi, W., Wang, T., Li, Y., 2021. Se-ohfm: A surgical phase recognition network with se attention module. In: 2021 International Conference on Electronic Information Engineering and Computer Science (EIECS). pp. 608–611.  
DOI: 10.1109/EIECS53707.2021.9587961
- Márquez, M., Belda, R., 2015. Uso de las suturas barbadas en cirugía general y digestiva. *revisión de conjunto. Cirugía Española* 94.  
DOI: 10.1016/j.ciresp.2015.03.007
- Nagy, T. D., Haidegger, T., 2022. Autonomous peg transfer—a gateway to surgery 4.0. In: 2022 IEEE 10th Jubilee International Conference on Computational Cybernetics and Cyber-Medical Systems (ICCC). pp. 000069–000076.  
DOI: 10.1109/ICCC202255925.2022.9922841
- Neumann, J., Uciteli, A., Meschke, T., Bieck, R., Franke, S., Herre, H., Neumuth, T., 2022. Ontology-based surgical workflow recognition and prediction. *Journal of Biomedical Informatics* 136, 104240.  
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1532046422002453>  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jbi.2022.104240>
- Pedram, S. A., Shin, C., Ferguson, P. W., Ma, J., Dutton, E. P., Rosen, J., 2021. Autonomous suturing framework and quantification using a cable-driven surgical robot. *IEEE Transactions on Robotics* 37 (2), 404–417.  
DOI: 10.1109/TR0.2020.3031236
- Scheikl, P. M., Tagliabue, E., Gyenes, B., Wagner, M., Dall'Alba, D., Fiorini, P., Mathis-Ullrich, F., 2023. Sim-to-real transfer for visual reinforcement learning of deformable object manipulation for robot-assisted surgery. *IEEE Robotics and Automation Letters* 8 (2), 560–567.  
DOI: 10.1109/LRA.2022.3227873
- Twinanda, A. P., Shehata, S., Mutter, D., Marescaux, J., de Mathelin, M., Padoy, N., 2017. Endonet: A deep architecture for recognition tasks on laparoscopic videos. *IEEE Transactions on Medical Imaging* 36 (1), 86–97.  
DOI: 10.1109/TMI.2016.2593957
- Yan, Y., Wang, H., Yu, H., Wang, F., Fang, J., Niu, J., Guo, S., 2022. Machine learning-based surgical state perception and collaborative control for a vascular interventional robot. *IEEE Sensors Journal* 22 (7), 7106–7118.  
DOI: 10.1109/JSEN.2022.3154921