

Jornadas de Automática

Optimización de la Configuración de Puertos y del Posicionamiento de los Manipuladores en Cirugía Laparoscópica Robotizada

Fontúbel, Carlos^{a,*}, Cisnal, Ana^a, Pérez-Turiel, Javier^a, Fraile-Marinero, Juan Carlos^a

^a Instituto de las Tecnologías Avanzadas de la Producción, Universidad de Valladolid, Paseo Prado de la Magdalena 3-5, 47011, Valladolid, España.

To cite this article: Fontúbel, Carlos, Cisnal, Ana, Pérez-Turiel, Javier, Fraile-Marinero, Juan Carlos. 2025 Optimization of Port Configuration and Manipulator Positioning in Robotic Laparoscopic Surgery. *Jornadas de Automática*, 46. <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2025.46.12259>

Resumen

Este trabajo presenta un algoritmo para optimizar tanto la configuración de los puertos quirúrgicos como la posición de las bases de brazos robóticos en cirugía laparoscópica robotizada. Se realiza una evaluación cinemática basada en el *Conditioning Index*, identificando combinaciones válidas de base y puertos que garanticen la movilidad en todo el órgano diana. Posteriormente, se aplica DBSCAN para identificar agrupaciones de puertos y se realiza una optimización multiobjetivo que considera separación entre bases, distribución y adyacencia de los puertos. El algoritmo se valida mediante simulaciones con dos robots UR3e y cuatro puertos, demostrando la efectividad del método para obtener soluciones óptimas y robustas. El algoritmo es especialmente útil en la planificación preoperatoria, ya que proporciona al cirujano configuraciones de bases y puertos que garantizan la factibilidad de la intervención desde el punto de vista de la maniobrabilidad y minimizan el riesgo de colisiones.

Palabras clave: Cirugía Robótica, Laparoscopia Robotizada, Optimización global, Conditioning Index, Planificación Quirúrgica.

Optimization of Port Configuration and Manipulator Positioning in Robotic Laparoscopic Surgery

Abstract

This work presents an algorithm to optimize the configuration of surgical ports and the positioning of robotic arm bases in robot-assisted laparoscopic surgery. A kinematic evaluation based on the Conditioning Index (CI) is performed, identifying valid base-port combinations that ensure complete maneuverability throughout the entire target organ. Subsequently, DBSCAN is applied to identify port clusters, and a multi-objective optimization is carried out, considering base separation, port distribution, and adjacency. The process is validated through simulations involving two UR3e robots and up to four ports, demonstrating the effectiveness of the method in obtaining optimal and robust solutions. The algorithm is particularly useful in preoperative planning, as it provides the surgeon with base/port configurations that guarantee the feasibility of the procedure in terms of maneuverability and minimize the risk of collisions.

Keywords: Robotic Surgery, Robot-Assisted Laparoscopy, Global Optimization, Conditioning Index, Surgical Planning.

1. Introducción

La cirugía mínimamente invasiva asistida por robot ha transformado el panorama quirúrgico, ofreciendo ventajas como una mayor rapidez en la ejecución (Mäenpää et al., in press) y una reducción de errores respecto a la laparoscopia tradicional (Zihni et al., 2018). Este procedimiento se realiza

mediante pequeñas incisiones por las que se introducen instrumentos robóticos y una cámara endoscópica, manejados de forma remota por el cirujano.

Una planificación preoperatoria adecuada, en particular la colocación de los puertos para los trócares (puntos de acceso al espacio quirúrgico situados en el abdomen del paciente) y la posición inicial del robot, es clave para evitar colisiones

entre brazos robóticos (Coste-Manière et al., 2001) y optimizar factores clave como la destreza, el alcance y la visibilidad. Una colocación incorrecta puede requerir recolocaciones intraoperatorias, lo que prolonga el tiempo quirúrgico y puede afectar negativamente la recuperación del paciente.

El posicionamiento de los puertos difiere enormemente en función del tipo de intervención, e incluso de la estrategia (Thiruchelvam, Lee & Chiow, 2021). Aunque existen métodos para determinar las posiciones óptimas de los puertos, estos no siempre consideran la cinemática de los manipuladores (Feuerstein et al., 2008). En otros casos, a pesar de utilizar criterios de maniobrabilidad, centran su experimentación en el da Vinci (Sun & Yeung, 2007; Maddah et al., 2023). Otros utilizan trayectorias preplanificadas y evalúan si es posible recorrerlas a través de los diferentes puertos considerados (Wörn & Weede, 2009), siendo estas trayectorias difíciles de obtener.

En la práctica se sigue dependiendo en gran medida de la experiencia del cirujano, lo que puede no garantizar una solución óptima en términos de maniobrabilidad para el robot. Sistemas comerciales como el da Vinci incluyen guías de posicionamiento, pero se han identificado limitaciones para adaptarse a la variabilidad anatómica (Wang Jinling et al., 2016). Esta dificultad se acentúa en sistemas robóticos nuevos, donde no existen referencias previas claras.

Este trabajo presenta un método de optimización de la colocación de las bases y los puertos basado en simulaciones cinemáticas que consideran un gran número de posibles combinaciones de bases y puertos. Cada configuración es evaluada mediante el *Conditioning Index* (CI), una métrica que cuantifica la calidad cinemática del robot, indicando su proximidad a una singularidad y su capacidad para moverse eficazmente en todas las direcciones del espacio cartesiano (Klein & Blaho, 1987). Se aplica un umbral mínimo para garantizar una movilidad aceptable en todo el volumen quirúrgico. A partir de las configuraciones viables de bases y puertos, se plantea una optimización multiobjetivo para obtener configuraciones óptimas de forma reproducible y adaptable a distintos robots, morfologías abdominales y posiciones del órgano diana.

2. Materiales y Métodos

La metodología se implementa mediante un algoritmo que combina criterios geométricos y métricas cinemáticas para determinar las configuraciones óptimas de posicionamiento. El diagrama en la Fig. 1 resume las fases del algoritmo.

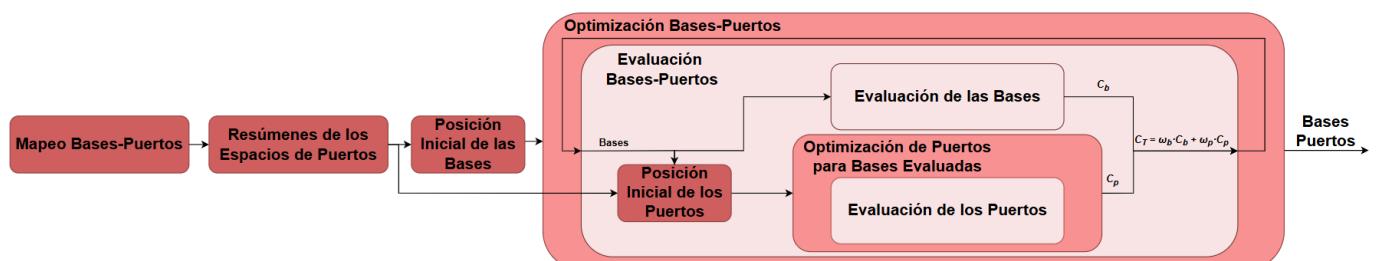


Figura 1. Diagrama conceptual del algoritmo de optimización del posicionamiento de brazos robóticos y puertos laparoscópicos.

2.1. Mapeo de las Combinaciones Bases-Puertos

Cada posible ubicación de la base en el entorno quirúrgico se evalúa en función de la capacidad del robot para acceder al órgano diana desde distintos puertos laparoscópicos. Para cada combinación base-puerto, se verifica que el *Tool Center Point* (TCP) pueda alcanzar todos los puntos del órgano sin alcanzar singularidades usando el *Conditioning Index* (CI) basado en la matriz Jacobiana. El CI, que varía entre 0 y 1, cuantifica la cercanía a singularidades: valores próximos a 0 indican configuraciones singulares y valores cercanos a 1, configuraciones isotrópicas. Matemáticamente, el CI es la inversa del número condicional k de la matriz Jacobiana (J):

$$CI(J) = \frac{1}{k(J)} \equiv \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}, \quad (1)$$

donde σ_{min} y σ_{max} son los valores singulares mínimo y máximo de la matriz Jacobiana, respectivamente.

El resultado de esta fase es un conjunto de combinaciones base-puerto que garantizan una maniobrabilidad mínima aceptable, es decir, aquellas en las que el CI supere un umbral definido para todos los puntos del órgano.

2.2. Generación de los Resúmenes de los Espacio de Puertos

Los puertos válidos identificados para cada base se agrupan espacialmente mediante el algoritmo DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise) (Schubert et al., 2017), adecuado por su capacidad para identificar clústeres de forma arbitraria sin requerir un número predefinido de grupos. Este enfoque permite, durante la optimización posterior, utilizar los centroides de los clústeres como aproximaciones de cada punto que contienen. Además, realizar estas agrupaciones favorece que el puerto seleccionado esté rodeado de alternativas viables, tolerando desviaciones en la colocación real.

Para evitar la fragmentación de clústeres, se aplica un umbral de conectividad que fusionará clústeres con suficientes puntos conectados. También se reasignarán los *outliers* a los clústeres con contacto directo. El proceso es iterativo y se repite hasta que no queden *outliers*, o no se realicen cambios. En cada iteración se realizan dos pasos: (1) fusión de clústeres densamente conectados, y (2) asignación del *outlier* con mayor número de conexiones a cualquier clúster. Al reagrupar clústeres, si un clúster tiene el mismo número de conexiones con varios clústeres vecinos, se combina con aquel con el que comparte la mayor densidad de enlaces, es decir, un mayor número total de enlaces entre puntos de ambos clústeres.

Los *outliers* con igual número de conexiones a varios clústeres se asignan a aquel cuyo centroide esté más próximo, garantizando así una asignación coherente en términos espaciales. De esta forma, se consolida un conjunto compacto y representativo de regiones viables, mejorando la coherencia estructural de cada agrupamiento.

2.3. Optimización de las Configuraciones Base-Puertos

Se emplea un algoritmo iterativo para explorar combinaciones de posiciones de base y sus puertos válidos. La función de coste total C_T se minimiza iterativamente para encontrar la configuración óptima, que considera C_p , que representa el coste asociado a la combinación óptima de puertos para la combinación de bases evaluada; y C_b , que evalúa la idoneidad espacial de las bases seleccionadas.

$$C_T = \omega_b \cdot C_b + \omega_p \cdot C_p, \quad (2)$$

donde ω_b y ω_p son coeficientes de ponderación acotados en $[0,1]$ que permiten ajustar la influencia relativa de cada componente en el coste total.

2.3.1. Evaluación de la Combinación de Bases

La función de coste para las bases C_b se diseña para favorecer bases que estén espacialmente bien separadas entre sí:

$$C_b(\{b_i\}) = \max \left(0, 1 - \frac{d_{b_{min}}}{\bar{d}_b} \right), \quad (1)$$

donde $\{b_i\}$ representa el conjunto de posiciones espaciales de las n_b bases evaluadas en cada iteración. El término d_{min} indica la distancia mínima entre cualquier par de bases, y \bar{d}_b es una distancia de referencia para su normalización, determinada experimentalmente como la distancia mínima a partir de la cual la separación entre las bases se considera óptima. Al estar acotada en $[0,1]$, la función C_b también lo está, alcanzando valores más bajos cuando las bases están distribuidas a una distancia igual o mayor que \bar{d}_b .

2.3.2. Optimización y Evaluación de Puertos

Dentro del proceso de minimización de C_T , es necesario determinar la configuración óptima de puertos correspondiente a la combinación $\{b_i\}$ de bases evaluadas. Será necesario realizar un proceso de optimización para extraer la combinación de puertos óptima, junto con su coste asociado (C_p). Este coste se utiliza como entrada para el cálculo de C_T . Se ha desarrollado un procedimiento sistemático que permite su determinación de forma estructurada y repetible en base a tres criterios:

- Distancia mínima entre pares de puertos: debe maximizarse para favorecer la separación entre los brazos robóticos y prevenir colisiones.
- Adyacencia local de los puertos: debe maximizarse para obtener soluciones con elevada conectividad local, lo que incrementa la tolerancia ante errores de posicionamiento.

- Distancia al centro del clúster: debe minimizarse para favorecer configuraciones centradas que robustezcan el resultado frente a desviaciones, especialmente en condiciones de igual adyacencia.

La función de coste asociada C_p es la siguiente:

$$C_p\{p_i\} = \omega_{dp} \cdot \max \left(0, 1 - \frac{d_{p_{min}}}{\bar{d}_p} \right) + \omega_{ap} \cdot \max \left(0, 1 - \frac{1}{n_p} \sum_{i=1}^{n_p} \frac{n_i}{\bar{n}} \right) + \omega_{cp} \cdot \max \left(0, \frac{1}{n_p} \sum_{i=1}^{n_p} \frac{d_i}{\bar{d}_c} \right), \quad (3)$$

donde se consideran los siguientes parámetros:

- $\{p_i\} \in R^3$: conjunto de posiciones de los puertos evaluados.
- n_p : número total de puertos,
- n_i : número de vecinos conectados al punto p_i dentro de su clúster (adyacencia),
- $c_i \in R^3$: centroide del clúster al que pertenece p_i ,
- $d_i = \|p_i - c_i\|$: distancia del punto p_i al centroide ci (centralidad),
- \bar{d}_c : máxima distancia deseable al centroide,
- \bar{n} : número promedio de conexiones en los clústeres,
- \bar{d}_p : distancia mínima deseable entre pares de puertos,
- $\omega_{dp}, \omega_{ap}, \omega_{cp}$: pesos de cada término de C_p ,
- $d_{p_{min}} = \min_{1 \leq i < j \leq n_p} \|p_i - p_j\|$: distancia mínima entre pares de puertos.

Para evaluar la función de coste C_p , se generan combinaciones óptimas de clústeres mediante una búsqueda por fuerza bruta. Se exploran todas las combinaciones posibles y se seleccionan aquellas en las que los centroides más cercanos presentan la mayor distancia. Los clústeres resultantes se consideran los candidatos adecuados para contener la configuración óptima de puertos, ya que maximizan la distancia mínima entre ellos. Este enfoque acota significativamente el proceso de optimización, partiendo de una solución inicial que permite una convergencia más rápida hacia la solución final. Definida la solución inicial, se optimizará la posición final de los puertos mediante el uso del algoritmo *Simulated Annealing* (SA) (Bertsimas & Tsitsiklis, 1993), utilizado para encontrar el mínimo global en funciones con múltiples mínimos locales.

El coste C_p final resultado de esta optimización se proporciona como retroalimentación al algoritmo iterativo de optimización de posicionamiento de las bases. De esta forma se guía la búsqueda hacia configuraciones de bases/puertos que cumplan todos los criterios definidos.

2.4. Setup y entorno experimental

Las simulaciones se llevaron a cabo en MATLAB R2024a, utilizando la *Robotics System Toolbox* para modelar el comportamiento cinemático del robot UR3e, (Universal Robots®). Se utilizó una herramienta acoplada 40 cm sobre el eje z del efecto final. Se realizó un único conjunto de simulaciones para extraer el espacio de puertos. Asumiendo herramientas idénticas, sus resultados se pueden replicar para cada robot semejante, obteniendo así tantos espacios de bases

y puertos como robots se quiera introducir en el *setup* quirúrgico.

Se ha utilizado la *Parallel Computing Toolbox*, que permite ejecutar múltiples simulaciones y cálculos de forma paralela, optimizando tiempos.

3. Resultados

El experimento tiene como objetivo validar la capacidad del algoritmo para encontrar combinaciones óptimas de posiciones de las bases y los puertos asignados a dos robots UR3e. Ambos robots se ubican en el mismo lado del paciente, lo que requiere una planificación cuidadosa de sus bases para evitar interferencias y garantizar el acceso adecuado.

Para aumentar la complejidad del problema, se introdujeron dos espacios adicionales de puertos válidos, simulando la presencia de puertos habilitados para el acceso del cirujano, o de otros dos brazos robóticos auxiliares en el otro lado del paciente. De este modo, el algoritmo de selección de puertos opera considerando un total de cuatro puertos disponibles ($n_p = 4$).

El algoritmo desarrollado debe ser capaz de determinar de forma simultánea las posiciones óptimas de las bases para ambos robots y la combinación ideal de puertos entre los cuatro disponibles, favoreciendo que se cumplan los criterios definidos. En las siguientes secciones se presentan los resultados obtenidos en cada una de las fases del algoritmo.

3.1. Evaluación de la Accesibilidad al Espacio de Trabajo desde Potenciales Posiciones de la Base del Robot

Para evaluar la viabilidad de distintas configuraciones de acceso robótico al órgano diana, se modeló un entorno que incluye representaciones geométricas del órgano, el abdomen y el espacio disponible para ubicar las bases del robot. Este entorno permite analizar la accesibilidad del UR3e dentro de su espacio de trabajo estimado.

El órgano diana fue modelado como un prisma rectangular ubicado dentro del volumen delimitado por $X \in [-0.07, 0.03]$ m, $Y \in [-0.06, 0.04]$ m y $Z \in [-0.14, -0.06]$ m, y discretizado en una malla tridimensional con una resolución de 0.03m. Por su parte, el plano abdominal se representó como un plano ubicado en $Z=0.06$, con un área de 0.35×0.35 m centrada en el origen, y fue discretizado mediante una malla bidimensional con una resolución de 0.025 m.

En cuanto al espacio disponible para ubicar las bases, se evaluaron 2016 posiciones posibles en la sección izquierda del abdomen ($X < -0.30$ m), como se muestra en la Figura 2. Cada una de estas ubicaciones debía permitir contener el volumen completo del órgano dentro de una esfera de 0.90 m de radio, lo cual corresponde al espacio de trabajo del robot: 0.50 m propios del UR3e más 0.40 m adicionales correspondientes a la herramienta. La componente Z de las ubicaciones de base se restringió al rango $[-0.10, 0.30]$ m, priorizando aquellas posiciones ligeramente por encima del plano de trócares (ubicado a 0.06 m) para facilitar el acceso. Finalmente, la resolución empleada para el muestreo del espacio de bases fue de 0.05 m.

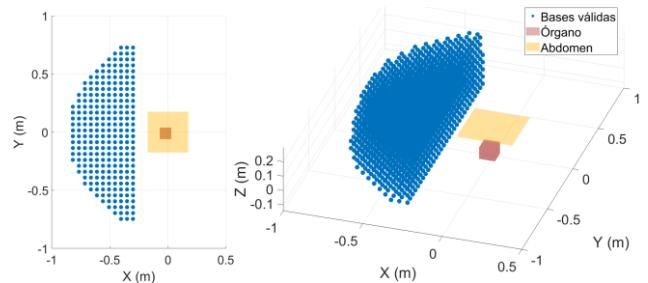


Figura 2. Ubicación de los elementos utilizados en las simulaciones: órgano diana, plano abdominal, y las posiciones evaluadas para las bases.

Se ha determinado experimentalmente que el UR3e presenta un valor de $CI \geq 0.065$ en configuraciones cómodas (debido a su tamaño compacto y alto acoplamiento entre articulaciones rotativas). Debido a la baja resolución en el muestreo del órgano, se aplicó un CI altamente restrictivo como criterio de aceptabilidad, estableciendo experimentalmente el umbral de $CI \geq 0.0285$. Este umbral se aplicó a cada posición del TCP del robot, evaluando para cada ubicación de la base qué puertos permiten recorrer el órgano completo con dicha condición mínima.

Se garantizó que la trayectoria seguida por el TCP sea continua en cuanto a las posiciones articulares. Además, se excluyeron configuraciones “codo abajo” y configuraciones recogidas (en las que la muñeca 2 está más próxima a la base que la muñeca 1). Las configuraciones “codo abajo” se evitan para minimizar el riesgo de colisiones con el paciente, mientras que las configuraciones recogidas, aunque pueden mejorar la maniobrabilidad local, incrementan considerablemente el riesgo de autocolisión. La exclusión de estas configuraciones permite finalizar las simulaciones de forma anticipada, ya que en la mayoría de los casos generan colisiones en algún punto durante el recorrido del órgano. Asimismo, se realizó una evaluación preliminar de la accesibilidad del órgano comprobando la cobertura de los puntos más extremos de su geometría: esquinas, centro de las caras, aristas y punto central.

Los resultados finales han determinado que 1551 de las 2016 ubicaciones evaluadas contienen al menos un puerto válido.

3.2. Clustering y resumen del espacio de puertos

Una vez determinados los espacios de puertos válidos para cada base, se aplicó el algoritmo para agruparlos según su ubicación espacial. El valor de la distancia para considerar puntos como vecinos se seleccionó ligeramente por encima del tamaño de celda de la malla (0.025 m), por lo que considera únicamente las conexiones con sus vecinos ortogonales. Se estableció un mínimo de 4 puntos para formar un núcleo. Todas ellas se consideran posiciones válidas para la base, ya que su espacio contiene al menos una zona con una agrupación densa y estable de puertos viables, lo que proporciona un margen de error suficiente para el posicionamiento final del puerto.

Los clústeres generados por el algoritmo fueron sometidos a las siguientes correcciones de forma iterativa hasta que no se detectaron más cambios. En cada iteración, los clústeres que tenían más del 30 % de sus puntos conectados a otro clúster

fueron reabsorbidos por este. Además, el *outlier* más fuertemente conectado a un clúster fue incorporado a él. A continuación, se evaluó la posibilidad de recombinar clústeres si la nueva asignación de *outliers* lo permitía.

Para el desarrollo del método se han utilizado espacios de trócares generados a partir de datos sintéticos, distribuidos sobre la misma rejilla empleada para los espacios de puertos reales (Fig. 3). Los centros de los clústeres generados se han ubicado en las coordenadas $(-0.10, 0.10)$, $(0.10, -0.10)$, $(-0.05, -0.05)$ y $(0.075, 0.00)$, con desviaciones estándar respectivas de $(0.02, 0.02)$, $(0.03, 0.025)$, $(0.02, 0.02)$ y $(0.01, 0.01)$. Tras la ejecución de 10.000 simulaciones aplicando el algoritmo de *clustering*, los resultados obtenidos indican que en el 12.49 % de los casos se detectaron 3 clústeres, en el 86.1 % se detectaron 4, y en el 1.39 % se identificaron 5. La proximidad espacial entre los clústeres centrados en $(0.075, 0.00)$ y $(0.10, -0.10)$ explica que en una proporción significativa de ejecuciones ambos hayan sido agrupados, siendo por tanto esperable y aceptable que el algoritmo devuelva tres clústeres como resultado válido en esos casos.

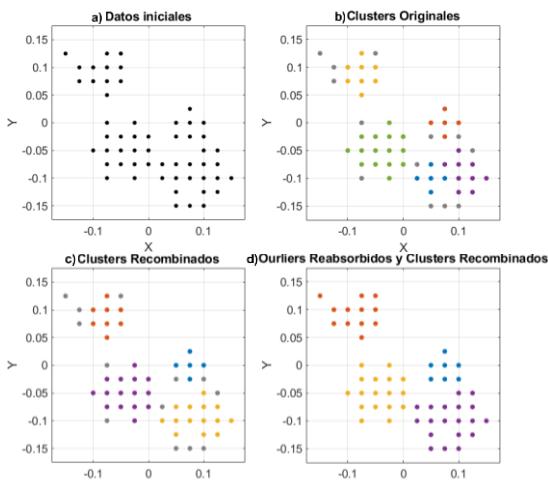


Figura 3. Resultados del *clustering*: (a) datos iniciales, (b) resultados de DBSCAN, (c) recombinación de clústeres, (d) reasignación de *outliers* y recombinación iterativa.

Los resultados del resumen del espacio de puertos identificaron 826 posibles de base que presentan al menos un clúster compuesto por cuatro puertos válidos o más (Fig. 4). Todas ellas se consideran posiciones válidas para la base, ya que su espacio contiene al menos una zona con una agrupación densa y estable de puertos viables, lo que proporciona un margen de error suficiente para el posicionamiento final del puerto.

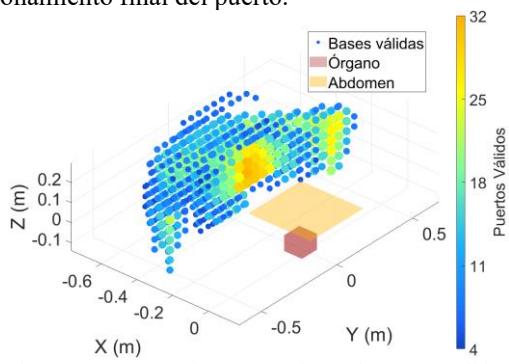


Figura 4: Bases con al menos un clúster de puertos válidos.

3.3. Optimización iterativa de configuraciones base-puertos

A partir de la distribución espacial de las bases candidatas (Fig. 4), se pueden distinguir tres zonas diferenciadas. Destaca una zona central, caracterizada por una accesibilidad óptima, con mayor cantidad de puertos válidos y dos zonas periféricas situadas en los extremos del eje Y, más cercanas a los límites del alcance del robot. El tamaño reducido del robot UR3e condiciona la accesibilidad, más estable cuando puertos, órgano y base se encuentran a una distancia pequeña.

Dado que el objetivo consiste en introducir dos robots en el entorno quirúrgico, se seleccionan como aproximaciones iniciales las dos bases viables que presentan mayor separación en el eje Y.

La función de coste para las bases C_b considera un único factor, la distancia entre bases. Para la normalización se toma una distancia entre bases de 0.70 m (distancia de referencia que se ha considerado segura), por lo que toda distancia mayor a este valor mayor tendrá C_b nulo. Se ha asignado un peso relativo $\omega_b = 0.25$ al coste C_b , mientras que el peso relativo del coste de los puertos C_p ha sido $\omega_p = 0.75$. Los pesos de la función de coste de los puertos y los puertos óptimos encontrados se muestran en el apartado 3.4.

Se analizaron diez ejecuciones del algoritmo, registrando los costes de bases (C_b) y puertos (C_p). Los valores de C_p oscilaron entre 0.18 y 0.25 (media: 0.21), indicando cierta variabilidad en las combinaciones, pero manteniendo siempre un rendimiento aceptable. En cuanto a C_b , se obtuvo coste cero en nueve ejecuciones y un valor de 0.13 en uno de los casos, lo que refleja una alta eficiencia en la selección de bases. La convergencia del algoritmo fue adecuada en todos los escenarios evaluados. La mejor solución ($C_T = 0.13$) se muestra en la Fig. 5, donde los dos robots se ubican en las bases óptimas $(-0.61, -0.24, 0.0500)$ m y $(-0.40, 0.42, 0.00)$ m, con sus respectivos puertos seleccionados y los puertos auxiliares.

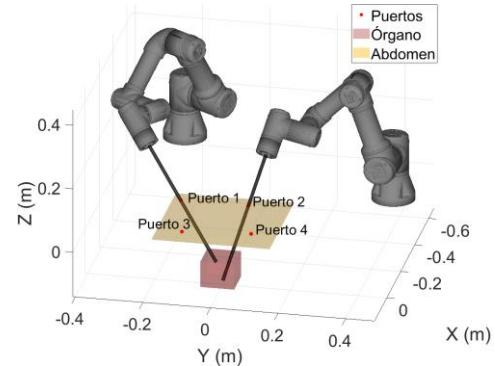


Figura 5: Posicionamiento de las bases y puertos óptimos.

3.4. Configuración Óptima de Puertos para la Combinación de Bases Evaluada

Para los puertos, el coste C_p incluye tres componentes ponderados: distancia al centroide del clúster ($\omega_{cp} = 0.15$), adyacencia ($\omega_{ap} = 0.35$) y repulsión entre puertos ($\omega_{dp} = 0.5$). Los valores de referencia en la ecuación C_p son: $\bar{d}_c = 5$ cm de distancia al centroide, $\bar{n} = 8$ conexiones adyacentes y una distancia $\bar{d}_p = 0.3$ m entre puertos. La combinación

óptima de puertos en para las bases evaluadas y los espacios de puertos validados se muestran en la Fig. 6.

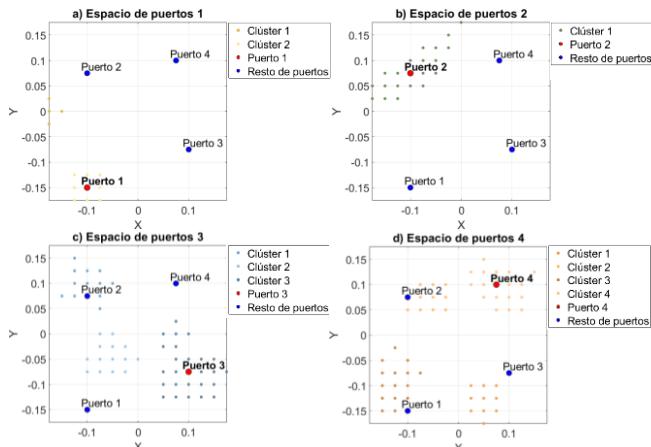


Figura 6. Puertos óptimos y clústeres en los espacios analizados. Puntos grandes: combinación óptima de puertos (rojo: espacio actual; azul: otros espacios). Puntos pequeños: puertos válidos agrupados por clúster.

4. Discusión

La aplicación de este algoritmo en tiempo real presenta limitaciones significativas debido a su elevada carga computacional. Para lograr una optimización que permita alcanzar un mínimo global (o al menos uno representativo), es necesario evaluar un gran número de posiciones posibles para la base y, para cada una, múltiples posiciones de puertos que aseguren acceso completo y ergonómico al órgano diana. Este proceso implica un volumen considerable de cálculos, lo que dificulta su implementación en escenarios quirúrgicos, donde el tiempo es un factor crítico.

No obstante, estas limitaciones se vuelven menos restrictivas en contextos de planificación preoperatoria, donde se dispone de mayor margen temporal. En este entorno, el algoritmo puede aportar un valor significativo al permitir simular y hallar las configuraciones óptimas antes de la intervención. La estructura modular del sistema favorece su reutilización en otros contextos, como la validación de diseños de instrumentos quirúrgicos o brazos robóticos, lo que incrementa su versatilidad y potencial de aplicación.

Al basarse exclusivamente en criterios geométricos y de maniobrabilidad, el método permite incorporar condiciones clínicas adicionales, como imponer o restringir ubicaciones específicas de los puertos según preferencia del cirujano o acotar el espacio de evaluación para las bases función del entorno quirúrgico. La incorporación de restricciones médicas adicionales permite asegurar que los robots podrán ejecutar las tareas quirúrgicas de forma segura y conforme a los requisitos clínicos específicos.

5. Conclusión

Aunque no parece posible adaptar el algoritmo para su ejecución en tiempo real durante la preparación del quirófano, su viabilidad en entornos de planificación preoperatoria está plenamente justificada. En estos casos, puede contribuir a evitar interrupciones en la intervención debido a colisiones entre los brazos robóticos o a alcanzar posiciones singulares. Asimismo, su arquitectura modular

permite adaptar el sistema a tareas complementarias como la validación de diseños de herramientas o plataformas robóticas, ampliando así su utilidad más allá del ámbito estrictamente quirúrgico. Esta flexibilidad refuerza su valor como herramienta de apoyo en diferentes etapas del desarrollo y planificación en cirugía asistida por ordenador.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado parcialmente gracias al apoyo del Ministerio de España de Ciencias, Innovación y Universidades a través del proyecto PID2022-138206OB C33.

Referencias

- Bertsimas, D. & Tsitsiklis, J. 1993. Simulated Annealing. *Statistical Science*, 8(1), 10–15.
DOI: 10.1214/SS/1177011077
- Coste-Manière, É., Adhami, L., Severac-Bastide, R., Lobontiu, A., Salisbury, J.K., Boissonnat, J.-D., Swarup, N., Guthart, G., et al. 2001. Optimized Port Placement for the Totally Endoscopic Coronary Artery Bypass Grafting using the da Vinci Robotic System. *Experimental Robotics VII. Lecture Notes in Control and Information Sciences*. V. 271. D. Rus & S. Singh, Editores. Springer, Berlin, Heidelberg. 199–208.
DOI: 10.1007/3-540-45118-8_21
- Feuerstein, M., Mussack, T., Heining, S.M. & Navab, N. 2008. Intraoperative Laparoscope Augmentation for Port Placement and Resection Planning in Minimally Invasive Liver Resection. *IEEE Transactions on Medical Imaging*. 27(3), 355–369.
DOI: 10.1109/TMI.2007.907327
- Klein, C.A. & Blaho, B.E. 1987. Dexterity Measures for the Design and Control of Kinematically Redundant Manipulators. *The International Journal of Robotics Research*. 6(2), 72–83.
DOI: 10.1177/027836498700600206
- Maddah, M.R., Classe, J.M., Jaffre, I., Watson, K.A., Lin, K.S., Chablat, D., Dumas, C. & Cao, C.G.L. 2023. A decision aid for the port placement problem in robot-assisted hysterectomy. *Laparoscopic, Endoscopic and Robotic Surgery*. 6(2), 43–56.
DOI: 10.1016/j.jlers.2023.05.002
- Mäenpää, M.M., Nieminen, K., Tomás, E.I., Laurila, M., Luukkaala, T.H. & Mäenpää, J.U. (in press). Robotic-assisted vs traditional laparoscopic surgery for endometrial cancer: a randomized controlled trial. *American Journal of Obstetrics and Gynecology*. 215(5), 588.e1–588.e7.
DOI: 10.1016/j.ajog.2016.06.005
- Schubert, E., Sander, J., Ester, M., Kriegel, H.P. & Xu, X. 2017. DBSCAN Revisited, Revisited: Why and How You Should (Still) Use DBSCAN. *ACM Transactions on Database Systems*. 42(3), 1–21.
DOI: 10.1145/3068335
- Sun, L.W. & Yeung, C.K. 2007. Port placement and pose selection of the Da Vinci surgical system for collision-free intervention based on performance optimization. *International Conference on Intelligent Robots and Systems*. IEEE. San Diego, CA, USA. 1951–1956.
DOI: 10.1109/IROS.2007.4399354
- Thiruchelvam, N., Lee, S.Y. & Chiow, A.K.H. 2021. Patient and port positioning in laparoscopic liver resections. *Hepatoma Research*. 7(22), 1–18.
DOI: 10.20517/2394-5079.2020.144
- Wang Jinling, Lin Katherine S, Watson Keith A, Galloway Michael L, Hellan Minia & Cao Caroline G.L. 2016. Need Help with Port-placement in Robot-Assisted Surgery: A Survey Study - SAGES Abstract Archives. Disponible en: <https://www.sages.org/meetings/annual-meeting/abstracts-archive/need-help-with-port-placement-in-robot-assisted-surgery-a-survey-study/> [accedido el 23 de mayo de 2025].
- Wörn, H. & Weede, O. 2009. Optimizing the Setup Configuration for Manual and Robotic Assisted Minimally Invasive Surgery. *IFMBE Proceedings*. 25(6), 55–58.
DOI: 10.1007/978-3-642-03906-5_16
- Zihni, A., Gerull, W.D., Cavallo, J.A., Ge, T., Ray, S., Chiu, J., Brunt, L.M. & Awad, M.M. 2018. Comparison of precision and speed in laparoscopic and robot-assisted surgical task performance. *Journal of Surgical Research*. 223, 29–33.
DOI: 10.1016/j.jss.2017.07.037