

## Sistema robótico de auto-acoplamiento para la interfaz multifuncional SIROM

Daniel Bilbao<sup>a,\*</sup>, Unai Ferrer<sup>b</sup>, Javier Viñals<sup>b</sup>, Gonzalo Guerra<sup>b</sup>, Eloy Irigoyen<sup>a</sup>, Itziar Cabanes<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad del País Vasco, Plaza Ingeniero Torres Quevedo, 1, 48013, Bilbao, España.

<sup>b</sup>SENER Aeroespacial, Av. de Zugazarte, 56, 48930, Getxo, España.

**To cite this article:** Bilbao, D., Ferrer, U., Viñals, J., Guerra, G., Irigoyen, E., Cabanes, I. 2023. Self-coupling robotic system for the SIROM multifunctional interface. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial 20, 269-280. <https://doi.org/10.4995/riai.2023.19271>

### Resumen

Con objeto de realizar tareas de servicio en órbita de manera autónoma y sin necesidad de personal humano, este trabajo presenta el desarrollo de un sistema robótico de auto-acoplamiento basado en cámaras y marcadores visuales que permiten facilitar el ensamblaje de la interfaz multifuncional SIROM (Standard Interface for Robotic Manipulation), diseñada por SENER Aeroespacial. Para ello se ha implementado un control servo visual, logrando realizar el acoplamiento de manera autónoma entre un dispositivo SIROM activo utilizado como herramienta de un manipulador robótico y su homólogo SIROM pasivo acoplado a un módulo espacial. Este desarrollo permitirá que en el futuro dicha interfaz robótica sea una solución de referencia vanguardista para la realización de estas tareas. La solución presentada ha sido validada mediante la realización de ensayos independientes para cada uno de los subsistemas que componen el prototipo desarrollado y, posteriormente, se ha verificado el funcionamiento del sistema al completo en diferentes escenarios de ensamblaje y ante situaciones de gran desalineamiento. El análisis de los resultados obtenidos en este trabajo permiten corroborar que el prototipo diseñado logra cumplir con el objetivo principal de manera satisfactoria.

*Palabras clave:* Control servo visual, estimación de posición, estimación de orientación, control adaptativo, control de fuerza, manipulación robótica, SIROM, ensamblaje robótico.

### Self-coupling robotic system for the SIROM multifunctional interface

#### Abstract

In order to perform in-orbit servicing tasks autonomously and without the need for human personnel, this work presents the development of a self-coupling robotic system based on cameras and visual markers that allow to facilitate the assembly of the SIROM (Standard Interface for Robotic Manipulation) multifunctional interface, designed by SENER Aeroespacial. For this purpose, a visual servoing control has been implemented, achieving autonomous coupling between an active SIROM device used as a robotic manipulator tool and its passive SIROM counterpart coupled to a spatial module. This development will allow this robotic interface to be a cutting-edge reference solution for performing these tasks in the future. The solution presented has been validated by carrying out independent tests for each of the subsystems that make up the prototype developed and, subsequently, the operation of the entire system has been verified in different assembly scenarios and in situations of significant misalignment. The analysis of the results obtained in this work corroborates that the designed prototype successfully achieves the main objective.

*Keywords:* Visual servoing control, position estimation, orientation estimation, adaptive control, force control, robotic manipulation, SIROM, robotic assembly.

\*Autor para correspondencia: bilbaod12@gmail.com

## 1. Introducción

El SIROM (Standard Interface for Robotic Manipulation) (Vinals et al., 2020), (SENER, 2022b) es una interfaz electromecánica multifuncional desarrollada por SENER Aeroespacial, la cual integra cuatro interfaces principales: mecánica, eléctrica, de transmisión de datos y térmica o de fluidos. Por ello, es un dispositivo útil para el desempeño de diversas aplicaciones orbitales y planetarias. En cuanto a la naturaleza de uso de este dispositivo, permite realizar la conexión entre un SIROM activo y un pasivo (Figura 1) de forma robusta a través de un sistema de garras accionadas por un motor.



Figura 1: SIROM activo (izquierda) y pasivo (derecha)

El desarrollo del SIROM comenzó como un *Operation Grant* del proyecto PERASPERA (Plan European Roadmap and Activities for Space Exploitation of Robotics and Autonomy), el cual es un programa de proyectos cuyo objetivo principal es madurar las capacidades tecnológicas europeas en robótica para aplicaciones espaciales y, se encuentra dentro del programa de investigación e innovación europeo Horizonte 2020 (Vinals et al., 2020).

De forma muy resumida, SIROM está diseñado como una interfaz andrógina que permite una fácil conexión/desconexión con otros SIROM (SENER, 2021). Sus ganchos de alto rango de captura se basan en el sistema de acoplamiento de la Estación Espacial Internacional. Una vez acoplado mecánicamente, SIROM despliega su placa de conectores para establecer una conexión física para datos, transmisión de energía eléctrica y transmisión de fluidos (opcional). Una de las líneas de datos es para protocolo CAN y está gestionada por la electrónica SIROM. Las otras líneas de datos son totalmente personalizables y los usos típicos son la transmisión de datos de alta velocidad a través de Space-Wire o Gigabit Ethernet. En cuanto a transmisión eléctrica, SIROM integra una línea de baja potencia regulable y una de alta potencia (20 A). Finalmente, la interfaz de reabastecimiento de combustible se basa en el conector de fluidos RIDER (G. Guerra and Gala, 2022) desarrollado también por SENER Aeroespacial (SENER, 2022b).

En cuanto a los sistemas espaciales actuales, estos difieren respecto a los utilizados al inicio de la era espacial (Asif, 1958), ya que funcionaban sin ser intervenidos durante su vida útil. Esto se debe a que, mediante interfaces espaciales como el SIROM, es posible realizar reparaciones, repostaje e incluso sustitución de componentes de los equipos de vuelo sin necesidad de retirar el sistema espacial de su órbita.

En este tipo de tareas, los sistemas automáticos han tenido un rol predominante en las tecnologías espaciales debido a su adecuación en el escenario orbital, donde los límites, riesgos y

costes de las acciones humanas se multiplican. Considerando así los sistemas robóticos como una excelente alternativa, ya que ejecutan tareas y operaciones complejas sin necesidad de un operador humano (Branz and Francesconi, 2017). Ejemplo de estas misiones son las tareas de mantenimiento o de sustitución de algún elemento de un satélite empleando un robot (De Stefano et al., 2021, 2019), a diferencia de las soluciones planteadas donde se introduce un humano en el lazo de control.

De esta manera, realizar el control de las misiones espaciales desde la tierra supone un aumento considerable del tiempo de ejecución del sistema (Dong and Zhu, 2015). Para hacer frente a estos retos, es necesario el control autónomo, el cual se convierte en un hito destacado en la investigación en el área de la robótica espacial (Larouche and Zhu, 2014).

Este nuevo enfoque conlleva la necesidad de desarrollar equipos que permitan realizar dichas operaciones, más conocidas como tareas de servicio en órbita (IoS, *In-Orbit Servicing*) (European Space Policy Institute, 2020). En este escenario, el SIROM resulta un elemento crucial para este tipo de cometidos, ya que funciona como interfaz entre los diferentes elementos de los equipos de vuelo.

Por ello, teniendo en cuenta que actualmente no existe un sistema de control que facilite el auto-acoplamiento entre diferentes SIROM, el objetivo del presente trabajo es dotar al dispositivo de las herramientas necesarias para realizar dicha tarea sin necesidad de personal humano. Por lo tanto, la solución propuesta lleva a cabo el diseño, desarrollo y análisis de laboratorio de los componentes tecnológicos involucrados en el sistema, verificando su correcto funcionamiento tras la integración de los mismos en una única solución y, obteniendo como resultado un prototipo del sistema robótico de auto-acoplamiento que se integrará junto con el SIROM en futuras versiones.

Cabe destacar que, aunque existen diversas alternativas para desarrollar el sistema de auto-acoplamiento, este trabajo se ha enfocado en el uso de técnicas de visión por computador debido a su alta resolución y precisión en la identificación de objetos en el espacio, combinado con su bajo costo y flexibilidad. Además, es importante mencionar que SENER Aeroespacial definió el uso de un sistema de visión como requisito del proyecto, lo que reafirma la relevancia y actualidad de esta tecnología en el contexto de la industria aeroespacial.

El resto del artículo se estructura de la siguiente manera. En la siguiente sección se detallan las consideraciones a tomar tanto por parte del control servo visual, como por parte del sistema de visión. En la sección III, se detalla el desarrollo de los subsistemas que componen la solución avanzada presentada en este trabajo, así como la integración del sistema al completo. Posteriormente se describe la validación realizada mediante ensayos experimentales y se analizan los resultados más relevantes. Por último, en la sección V se presentan las conclusiones obtenidas y los trabajos futuros.

## 2. Control servo visual

El control servo visual se fundamenta en comandar un manipulador robótico mediante un lazo de realimentación basado en la información proporcionada por una cámara.

Un criterio comúnmente utilizado para clasificar los tipos de control servo visual es la forma de definir la señal de error

utilizada (Hutchinson et al., 1996). De esta manera, se dice que en el control basado en imagen *IBVS* (Image Based Visual Servoing) (Figura 2) el robot se controla mediante el error entre las proyecciones de las características geométricas del objetivo deseadas y las actuales (Qiu et al., 2018). Por ejemplo, si el objetivo es un cubo con una esquina marcada, las proyecciones de las características geométricas pueden ser las coordenadas de esa esquina en el plano de la imagen capturada por la cámara. Estas proyecciones se realizan en planos bidimensionales por lo que no es posible estimar la profundidad a la que se encuentra el objetivo. Para ello, son necesarias medidas adicionales (Dong and Zhu, 2015). Sin embargo, esta técnica de control es muy robusta, ya que no se ve penalizada por una mala modelización del objetivo, no es sensible a errores de calibración de la cámara y no se ve afectada por el ruido aparente en las imágenes capturadas por la cámara (Corke, 2017).

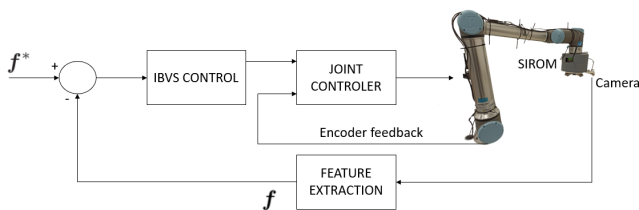


Figura 2: Control servo visual basado en imagen

Por otro lado, en el control servo visual basado en posición *PBVS* (Position Based Visual Servoing) (Figura 3), el robot se controla en función del error entre la posición a alcanzar y la actual. Para determinar dicho error y poder reducir el mismo, se extraen ciertas características de la imagen obtenida y se realiza una estimación de la posición y orientación que se desea alcanzar por parte del manipulador robótico para que dicho error sea prácticamente nulo. De esta manera se dice que la precisión de esta técnica de control se fundamenta en la estimación realizada por el sistema de visión, la cual se ve influenciada por la precisión del modelo del objetivo, la calibración de la cámara y por el ruido en las imágenes (Corke, 2017).

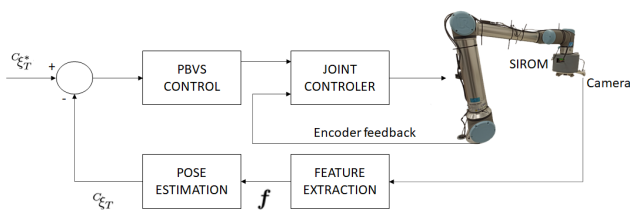


Figura 3: Control servo visual basado en posición

En cuanto al método de control híbrido, este evalúa parcialmente el error en el espacio tridimensional (*PBVS*) y parcialmente en el espacio bidimensional (*IBVS*). Aunque sea un método efectivo, la implementación de un control servo visual híbrido es más compleja y es necesario disponer de mayor capacidad computacional para ejecutar el control de manera satisfactoria (Dong and Zhu, 2015).

En resumen, el control autónomo de robots basado en visión define el uso de mecanismos de retroalimentación visual

para el control cinemático de los robots. Este control es semejante a los controles de velocidad clásicos, ya que las señales enviadas al robot son referencias de velocidad, las cuales se obtienen en función de la señal de error obtenida. Sin embargo, mediante las técnicas de *Visual servoing* se requiere de un sistema de visión que cierre el lazo de control para poder obtener dicho error.

Con todo y, tras haber evaluado las alternativas existentes en el campo del control servo visual, debido a que la estimación de la profundidad es un aspecto crítico en esta aplicación se ha empleado el control basado en posición *PBVS* sobre el que se ha desarrollado una novedosa mejora respecto a los controladores clásicos basados en visión. Para ello, se ha introducido un término adaptativo que permite adecuar la dinámica del sistema en función de los desalineamientos existentes entre pares de SIROM, de manera que en función del error, el manipulador adecua su velocidad para realizar el acoplamiento tan pronto como sea posible.

### 2.1. Marcadores fiduciales ArUco

El sistema de visión, a su vez, se fundamenta en la detección de ciertas características del objeto a localizar, pudiendo así estimar la ubicación exacta del mismo. Para ello, los marcadores fiduciales en su forma general son comúnmente utilizados para proporcionar un punto de referencia o una medida en la imagen capturada por la cámara, facilitando así la extracción de las características asociadas al objetivo.

Una de las principales aplicaciones de los marcadores fiduciales en robótica es la localización y el mapeo. Aunque otros métodos como la odometría visual inercial (*VIO*) y el mapeo y localización simultánea (*SLAM*) pueden proporcionar datos más precisos, requieren condiciones de iluminación ideales y características visuales distintivas, las cuales no se cumplen en entornos espaciales.

Existen muchos tipos de marcadores fiduciales. Por ejemplo en (Kalaitzakis et al., 2021), se realiza un estudio de los marcadores más empleados en la actualidad. Sin embargo, en este trabajo se emplean marcadores fiduciales ArUco (Garrido-Jurado et al., 2014; Romero-Ramirez et al., 2018), los cuales están delimitados por un borde exterior negro y una región interna que hace referencia a un patrón binario. Dicha elección se fundamenta en varias razones. En primer lugar los marcadores ArUco son robustos ante rotaciones, cambios de iluminación y distorsión, lo que los hace ideales para entornos con condiciones de iluminación variables como es el caso en entornos espaciales. En segundo lugar, son fácilmente detectables y rápidamente reconocibles, lo que los hace idóneos para aplicaciones con requisitos de tiempo real. Además, son fáciles de generar y utilizar, ya que se basan en un código de barras bidimensional y no requieren una gran cantidad de información para ser leídos. Por último, son pequeños, característica indispensable para poder realizar su integración en el SIROM.

Este tipo de marcadores puede pertenecer a diferentes diccionarios y en función del diccionario al que pertenezcan, se encontrarán más o menos bits en el patrón binario que los caracteriza. De esta manera, cuanto mayor número de bits tenga el marcador, menor es la posibilidad de confusión a la hora de realizar la detección de los mismos.

En la Figura 4 se muestra un ejemplo de marcador ArUco, donde es posible localizar cada una de las esquinas que componen el mismo. La primera esquina es la superior izquierda y el orden sucesivo es en sentido de las agujas del reloj,  $s$  es la longitud del lado del marcador y el sistema de referencia asociado al mismo se ubica en el centro del marcador. Mencionar que es necesario visualizar todas las esquinas del marcador para poder realizar una estimación de la *pose*.

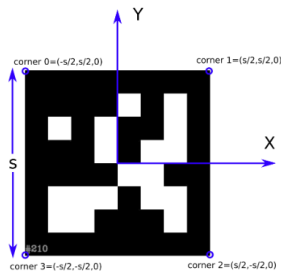


Figura 4: Ejemplo de un marcador ArUco estándar

Sin embargo, la estimación de la posición y orientación utilizando únicamente cuatro puntos coplanares está sujeta a problemas de ambigüedad. Como se muestra en la Figura 5, un marcador puede proyectarse en los mismos píxeles de la imagen con diversas ubicaciones de la cámara. En general, la ambigüedad se puede resolver si la cámara está más cerca del marcador o mediante el uso de múltiples marcas no coplanares (Muñoz-Salinas, 2018).

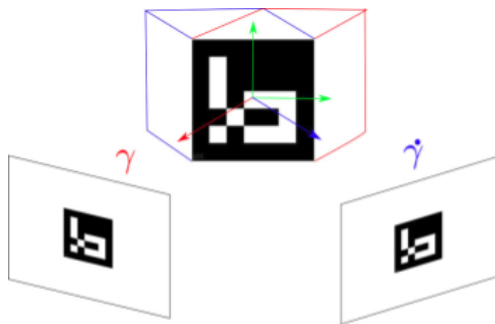


Figura 5: Problema de ambigüedad.

En resumen, el sistema de visión tiene como objetivo detectar los marcadores dispuestos en el SIROM pasivo como puntos de referencia tridimensionales, permitiendo así estimar la ubicación del dispositivo respecto del manipulador robótico que hace uso del SIROM activo como herramienta. Para ello, como bien se comenta posteriormente, se disponen varios marcadores de manera estratégica, formando un tablero de marcadores que permite mejorar los resultados respecto al uso de un único marcador.

### 3. Sistema robótico de auto-acoplamiento basado en visión

Como bien se ha mencionado en la *Introducción*, la solución propuesta en este trabajo se basa en el desarrollo de un sistema

de control servo visual que utiliza la información proporcionada por un sistema de visión, pudiendo comandar al manipulador robótico que hace uso del SIROM activo como herramienta hasta lograr realizar el ensamblaje con un SIROM pasivo.

Por lo tanto, la solución diseñada se fundamenta en la integración de los dos subsistemas que componen el sistema robótico de auto-acoplamiento: Sistema de visión y sistema robótico.

#### 3.1. Sistema de visión

El sistema de visión es el encargado de determinar la ubicación del SIROM pasivo respecto del manipulador robótico. Para ello, se hace uso de un conjunto de marcadores ArUco ubicados en el plano que define el triángulo de conexión del SIROM. El uso de un conjunto de marcadores se debe a que, en caso de utilizar un único marcador como punto de referencia tridimensional y que el sistema de visión lo pierda de vista durante la aproximación al objetivo, el robot deberá realizar una reubicación en lazo abierto para localizar de nuevo el SIROM pasivo, generando trayectorias no deseadas.

Por ello, se ha utilizado una herramienta que permite crear tableros de marcadores ArUco de cualquier disposición 2D y 3D. De esta manera, mediante la integración de más de un marcador y creación del tablero de marcadores, se evita la generación de trayectorias no deseadas por parte del manipulador robótico. Consiguiendo así determinar la ubicación del tablero respecto de la cámara incluso ante oclusiones siempre que se visualice al completo al menos uno de los marcadores integrados en el mismo.

Para realizar el diseño del tablero de marcadores, en primer lugar, es necesario analizar la geometría del SIROM con la intención de poder definir cada uno de los puntos característicos de los marcadores, tras ubicar los mismos en el dispositivo. Definiendo así la disposición del tablero respecto del sistema de referencia genérico. En este caso, dicho sistema de referencia está asociado al centro del dispositivo, es decir, al centro del triángulo de conexión.

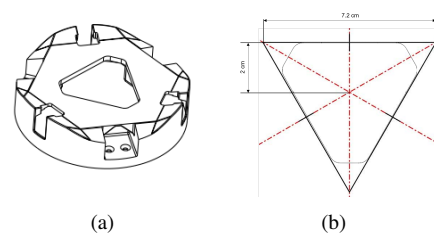


Figura 6: Modelo CAD del SIROM y su triángulo de conexión acotado.

Como se puede apreciar en la Figura 6, el triángulo de conexión es semejante a un triángulo equilátero sin vértices. Por lo que, tras realizar el análisis geométrico del plano que define dicho triángulo de conexión, se aprecia cómo cada lado del triángulo tiene una longitud de 7.2 cm. De esta manera, dibujando el baricentro del mismo y calculando la distancia al centro del triángulo respecto una de las bases, se obtiene que dicho valor es de 2 cm.

Debido al espacio disponible en el plano que define el triángulo de conexión del SIROM, se han utilizado unos marcadores de 1.8 cm de lado, con un borde blanco de 0.1 cm para facilitar el proceso de detección al algoritmo. Además, cabe

destacar que los marcadores elegidos tienen un patrón binario de 7x7 bits, lo que los hace idóneos para la tarea de localización del dispositivo ya que, estos son lo suficientemente complejos para garantizar una detección precisa y confiable, pero aún conservan la suficiente simetría para asegurar la estabilidad necesaria en su detección.

En cuanto a la creación del tablero, partiendo del análisis realizado anteriormente y considerando que la primera esquina del conjunto *marcador ID 0 / borde blanco* está alineada con el eje Y del sistema de referencia genérico, se ha creado un vector de puntos característicos que define la ubicación de cada una de las esquinas del marcador respecto del sistema de referencia genérico. Destacar que se ha decidido utilizar el marcador con ID 0 como referencia, pero se podría elegir cualquiera de los marcadores. En la Figura 7 se puede apreciar la disposición del sistema de referencia genérico y de los marcadores en el triángulo de conexión del SIROM pasivo.

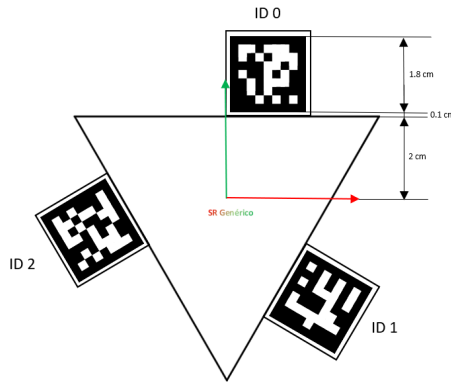


Figura 7: Disposición del sistema de referencia genérico y de los marcadores

Entonces, teniendo en cuenta que el primer punto característico es el asociado a la esquina superior izquierda, que el orden de las esquinas del marcador es en sentido de las agujas del reloj y, considerando el análisis geométrico realizado anteriormente, se ha obtenido el vector que define la posición de cada una de las esquinas del marcador con ID 0 respecto del sistema de referencia genérico.

En cuanto a la definición de los puntos característicos de los marcadores restantes, gracias a la simetría a 120° que posee el triángulo de conexión y al haber colocado cada uno de los marcadores simétricamente, mediante el uso de una matriz de rotación que realice la rotación en el eje Z a  $\pm 120^\circ$ , se consigue definir la ubicación de cada una de las esquinas de los marcadores que componen el tablero al completo. Obteniendo la siguiente representación vectorial del tablero respecto del sistema de referencia genérico:

$$\vec{EsquinasID0} = [[0.1, 3.9, 0], [1.9, 3.9, 0], [1.9, 2.1, 0], [0.1, 2.1, 0]]\text{cm} \quad (1)$$

$$\vec{EsquinasID1} = [[3.33, -2.04, 0], [2.43, -3.6, 0], [0.87, -2.7, 0], [1.77, -1.14, 0]]\text{cm} \quad (2)$$

$$\vec{EsquinasID2} = [[-3.43, -1.86, 0], [-4.33, -0.31, 0], [-2.77, 0.6, 0], [-1.88, -0.963, 0]]\text{cm} \quad (3)$$

Mencionar que la precisión con la que se crea el tablero de marcadores se fundamenta en ubicar correctamente los mismos, de modo que la disposición real del tablero sea la misma que la definida mediante la metodología detallada anteriormente. Por ello, debido a que la colocación de los marcadores se ha realizado en función del análisis geométrico realizado en la Figura 6, los puntos definidos pueden estar sujetos a cierto error. Sin embargo, como se detalla posteriormente, esta incertidumbre no afecta a los resultados obtenidos.

En la Figura 8 se puede apreciar la disposición del tablero adoptada en un APM (*Active Payload Module*) compuesto por un SIROM pasivo. Además, se puede observar como mediante la detección de dicho tablero se consigue realizar la estimación de la *pose* del dispositivo incluso cuando alguno de los marcadores queda parcialmente oculto.

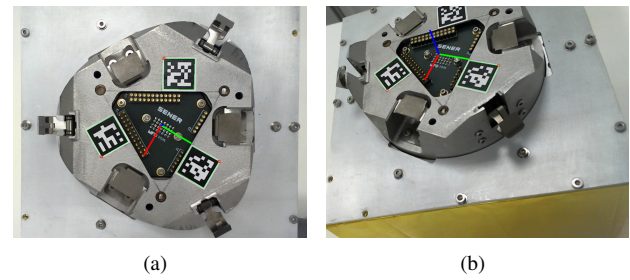


Figura 8: Tablero integrado en un APM compuesto de un SIROM

Por otro lado, para poder realizar una correcta estimación de la *pose* del dispositivo, es necesario conocer los parámetros característicos de la cámara utilizada (Diaz-Cano et al., 2022). Para la obtención de los mismos, se ha utilizado el método de calibración de Zhang (Zhang, 1999).

Este método se basa en capturar un número predefinido de imágenes del patrón de calibración y a través de funciones proporcionadas por la librería OpenCV (Bradski, 2000), se localizan los puntos de interés. De esta manera, se calcula la homografía entre el plano de la imagen y el tablero de ajedrez utilizado como patrón de calibración, obteniendo los parámetros intrínsecos característicos de la cámara utilizada.

$$A = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Además de los parámetros intrínsecos, también son necesarios los parámetros de distorsión de la cámara utilizada, ya que mediante estos es posible reducir dicho efecto en las imágenes y obtener una correcta estimación de la *pose* del dispositivo. Para ello, se utilizan los modelos de distorsión considerados por OpenCV (Bradski, 2000) donde,  $k_1, k_2, k_3$  hacen referencia a la distorsión radial provocada por defectos en la curvatura de la lente y  $p_1$  y  $p_2$  representan la distorsión tangencial provocada por falta de colinealidad de los centros ópticos.

$$x_{distorted} = x \cdot (1 + k_1 \cdot r^2 + k_2 \cdot r^4 + k_3 \cdot r^6) \quad (5)$$

$$y_{distorted} = y \cdot (1 + k_1 \cdot r^2 + k_2 \cdot r^4 + k_3 \cdot r^6) \quad (6)$$

$$x_{distorted} = x + [2 \cdot p_1 \cdot x \cdot y + p_2 \cdot (r^2 + 2 \cdot x^2)] \quad (7)$$

$$y_{distorted} = y + [2 \cdot p_2 \cdot x \cdot y + p_1 \cdot (r^2 + 2 \cdot y^2)] \quad (8)$$

En resumen, el sistema de visión se fundamenta en detectar y estimar la *pose* de un SIROM pasivo a través de una cámara

y un conjunto de marcadores dispuestos en el mismo. Para ello, se hace uso tanto del tablero diseñado e integrado en el propio dispositivo así como de los parámetros característicos de la cámara utilizada, obtenidos tras la calibración. De esta manera, consiguiendo que el sistema de visión sea el sistema que realimenta el lazo de control robótico y comanda al manipulador en función de las estimaciones realizadas.

### 3.2. Sistema robótico

El sistema robótico por su parte es el responsable de realizar las tareas de *búsqueda*, *aproximación al objetivo* y *acoplamiento final*. Al inicio de la aplicación la posición del SIROM objetivo (SIROM pasivo) es desconocida por lo que es necesario realizar la búsqueda del mismo. El algoritmo de búsqueda del SIROM objetivo, ejecuta una serie de movimientos predefinidos, permitiendo al sistema de visión percibir todo el espacio de trabajo del robot. El sistema de visión está en continua comunicación con el robot y cuando este detecta el objetivo, la ejecución del algoritmo se detiene y se da paso a la aproximación del mismo. Al detenerse la ejecución del algoritmo de búsqueda, se almacena la última configuración articular adoptada. En caso de que a lo largo de la aproximación el objetivo se pierda y no se vuelva a encontrar empleando la reubicación, el algoritmo de búsqueda volverá a ejecutarse partiendo de esta configuración articular. En la Figura 9 se puede apreciar el flujograma que define el funcionamiento del sistema robótico.

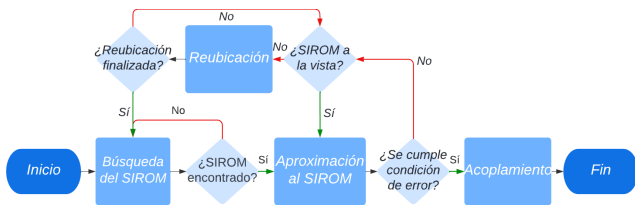


Figura 9: Diagrama de bloques de las tareas del sistema robótico

Una vez localizado el objetivo, el robot se controla de manera que se permita el auto-acoplamiento entre ambos SIROM. Para ello se plantean dos estrategias de control:

- Control de posición basado en visión: Estrategia de control que permite la aproximación del robot hasta situarse en una posición compatible con el rango de captura del SIROM.
- Control de fuerza: Estrategia de control que permite que durante el acoplamiento, el SIROM corrija el desalineamiento entre ambos dispositivos gracias a la fuerza ejercida por los ganchos y pétalos de guiado.

Como en el control de posición basado en visión empleado en la fase de aproximación se considera la velocidad de la cámara  $v_c$  como señal de entrada del robot y, se desea un decremento exponencial del error, la ley de control a emplear es la detallada en (9).

$$v_c(t) = -\lambda \cdot \widehat{L}_e^+ \cdot e(t) \quad (9)$$

Donde  $\widehat{L}_e^+$  es la matriz de interacción definida por (F. Chaumette and Hutchinson, 2006), tal y como se muestra en (10) y (11).

$$\widehat{L}_e^+ = \begin{bmatrix} -I_3 & \begin{bmatrix} {}^c t_o \\ \end{bmatrix}_x \\ 0_{3 \times 3} & L_{\theta u} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$L_{\theta u} = I_3 - \frac{\theta}{2} \cdot \begin{bmatrix} u \\ \end{bmatrix}_x + \left(1 - \frac{\text{sinc}\theta}{\text{sinc}^2 \frac{\theta}{2}}\right) \cdot \begin{bmatrix} u \\ \end{bmatrix}_x^2 \quad (11)$$

Por otro lado,  $e(t)$  representa el error de posición en cada instante de tiempo. Dicho error se define siguiendo la expresión (12).

$$e(t) = ({}^c t_o - {}^{c^*} t_o, \theta u) \quad (12)$$

Donde  ${}^c t_o$  representa el vector de traslación actual entre la cámara y el objetivo y  ${}^{c^*} t_o$  el vector deseado. Además,  $\theta u$  representa el error de orientación entre la cámara y el objetivo en notación axial-angular.

Sin embargo, los desalineamientos entre ambos dispositivos pueden variar notablemente en el momento de la detección inicial del SIROM objetivo. Los controladores clásicos basados en visión hacen uso de una ganancia ( $\lambda$ ) constante, lo que provoca que la dinámica sea muy lenta en las aproximaciones finales con valores de  $\lambda$  bajos o, que la dinámica sea demasiado agresiva al inicio de las aproximaciones con valores de  $\lambda$  muy altos. Con el objetivo de adecuar la dinámica a lo largo de toda la aproximación, se ha propuesto una ganancia adaptativa (Kermorgant and Chaumette, 2014) definida en (13) que permite adaptar el valor de la ganancia en función del error de posición entre los dos SIROM.

$$\lambda(\|e\|) = (\lambda_0 - \lambda_\infty) \cdot e^{-\frac{\lambda_0'}{\lambda_0 - \lambda_\infty} \|e\|} + \lambda_\infty \quad (13)$$

En la expresión (13), se observa que el valor de la  $\lambda$  adaptativa se ve influenciado por tres parámetros:  $\lambda_0$ ,  $\lambda_\infty$  y  $\lambda_0'$ . Por un lado,  $\lambda_0$  determina la dinámica del sistema cuando el módulo del error es cercano a 0. Por otro lado,  $\lambda_\infty$  determina la dinámica del sistema cuando el módulo del error tiene valores grandes. Por último,  $\lambda_0'$  determina la dinámica del sistema cuando el módulo del error es 0. Para ajustar los parámetros se han seguido las pautas definidas en (*Visual Servoing Platform*) (ViSP, 2022):

- $\lambda_0$ : Incrementar su valor hasta que el robot oscile sin converger con módulos del error pequeños. Seleccionar un valor ligeramente menor al valor que ha hecho que el sistema oscile.
- $\lambda_\infty$ : Incrementar su valor hasta que el sistema de visión no pueda realizar el seguimiento o hasta que el robot obtenga velocidades demasiado altas. Seleccionar un valor ligeramente menor al valor que ha hecho que ocurra cualquiera de las dos situaciones.
- $\lambda_0'$ : Ajustar en función de la pendiente que se le quiera dar a  $\lambda$  cuando el error sea 0.

En cuanto a la reubicación en caso de pérdida del objetivo durante la aproximación, esta se fundamenta en trasladar la cámara en los ejes X-Y-Z,  $\pm 100$  mm,  $\pm 100$  mm y  $+100$  mm respectivamente. Al finalizar cada una de estas traslaciones se vuelve a verificar si el objetivo se encuentra a la vista. En caso de que nuevamente se localice el objetivo, la aproximación se reanuda y, en caso contrario, se vuelve a la etapa de búsqueda.

Por último, una vez el sistema se encuentra próximo al objetivo, se debe producir el acoplamiento entre ambos SIROM.

Para que se produzca dicho acoplamiento es necesario ejecutar el control de fuerza (14) que permite corregir los posibles desalineamientos finales en función de la fuerza ejercida por las garras de la interfaz mecánica. Las estrategias de control de admitancia permiten que el robot se mueva en función de fuerzas externas. La implementación de dicho controlador se ha realizado siguiendo la metodología propuesta en (Scherzinger et al., 2019), donde se modeliza la fuerza externa a través del modelo dinámico del robot. En esta propuesta se asume que el robot se mueve lentamente debido al contacto y que la gravedad es compensada mediante los controladores de bajo nivel.

$$\ddot{q} = H^{-1}(q) \cdot J(q)^T \cdot f^{ext} \quad (14)$$

Donde  $H^{-1}(q)$  es la inversa de la matriz de inercias del sistema formado por el SIROM y el robot,  $J(q)^T$  es la traspuesta de la matriz jacobiana del robot y  $f^{ext}$  es la fuerza externa obtenida por el sensor situado en el extremo del robot.

En resumen, el sistema robótico se fundamenta en el correcto uso de la información transmitida por el sistema de visión. Por ello, mediante la implementación de las fases anteriormente detalladas, el manipulador robótico dispuesto de un SIROM activo como herramienta, es capaz de localizar, aproximarse y ensamblarse con un SIROM pasivo acoplado a un módulo espacial, ubicado en la periferia del espacio de trabajo del robot.

### 3.3. Integración de ambos subsistemas

En cuanto a la integración de los subsistemas que componen el novedoso sistema robótico de auto-acoplamiento propuesto en este trabajo, mencionar que, al tratarse de un trabajo enmarcado en el ámbito del *Visual Servoing* (F. Chaumette and Hutchinson, 2006), es necesario definir la configuración utilizada para ubicar la cámara junto con el manipulador robótico.

Las configuraciones más frecuentemente utilizadas son las denominadas *Eye-in-hand* y *Eye-to-hand*. En el caso de la configuración *Eye-in-hand*, la cámara se sitúa junto al efector final del manipulador. Por otro lado, la configuración *Eye-to-hand* permite tener una vista general del espacio de trabajo sobre el que actuará el brazo robótico, ya que la cámara se ubica en la periferia del mismo. Por ello, es muy común el uso de ambas configuraciones para el desempeño de tareas complejas.

Es decir, la configuración *Eye-in-hand* tiene una vista parcial, pero más precisa a diferencia de la configuración *Eye-to-hand*, la cual tiene una vista menos precisa pero global (Muis and Ohnishi, 2004).

En el presente trabajo se ha utilizado una configuración *Eye-in-hand* debido a que, en el futuro, se pretende integrar una cámara en el propio SIROM y, de esta manera, se consigue realizar un prototipado lo más similar a la aplicación real. Dando paso a que sea el propio dispositivo capaz de alimentar la cámara y gestionar la información obtenida mediante el sistema de visión implementado.

Además, en la Figura 10 se puede apreciar más detalladamente la configuración mencionada donde se ha ubicado la cámara junto con el manipulador robótico de forma estable y segura, consiguiendo una integración eficiente y precisa. De esta manera, la cámara se mueve solidaria al TCP (*Tool Center Point*) del robot, permitiendo definir el sistema de referencia asociado a la misma respecto del SIROM activo.

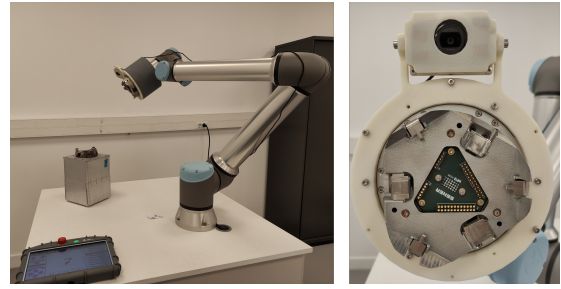


Figura 10: Configuración utilizada para la implementación del sistema

Como la correcta definición de dicho sistema de referencia resulta de vital importancia, se ha desarrollado un método analítico que permite determinar la ubicación de la cámara respecto del TCP del manipulador, en este caso un SIROM activo.

- En primer lugar, se sitúa un marcador ArUco de 15 cm de lado en la periferia de la mesa de trabajo del robot y, mediante un palpador cónico diseñado por SENER Aeroespacial, se obtiene la ubicación de dicho marcador respecto de la base del robot.

$${}^{BaseUR10e}T_{ArUco} \quad (15)$$

- Posteriormente, se mueve el robot a una posición en la que la cámara visualiza el marcador, obteniendo la matriz de transformación homogénea que relaciona la ubicación del TCP respecto de la base del robot. Aplicando la inversa a dicha matriz, se obtiene la ubicación de la base del robot respecto del SIROM activo.

$${}^{TCP}T_{BaseUR10e} = ({}^{BaseUR10e}T_{TCP})^{-1} \quad (16)$$

- En este punto, es decir, con el robot ubicado en la posición utilizada en el paso anterior, se ejecuta el sistema de visión y se obtiene la ubicación del marcador respecto de la cámara. Aplicando la inversa a dicha matriz, se determina la ubicación de la cámara respecto del marcador.

$${}^{ArUco}T_{Cámara} = ({}^{Cámara}T_{ArUco})^{-1} \quad (17)$$

- Por último, mediante la siguiente operación matricial se obtiene la matriz de transformación homogénea que relaciona la ubicación de la cámara respecto del TCP del manipulador.

$${}^{TCP}T_{Cámara} = {}^{TCP}T_{BaseUR10e} \cdot {}^{BaseUR10e}T_{ArUco} \cdot {}^{ArUco}T_{Cámara} \quad (18)$$

En cuanto a la implementación de los algoritmos, estos se han programado en Python y se han integrado mediante el uso del *framework* ROS. Cada uno de los subsistemas que componen el sistema de auto-acoplamiento hacen referencia a un nodo ROS independiente y la comunicación entre ambos subsistemas se realiza siguiendo una arquitectura publicista/subscriptor como se muestra en la Figura 11.

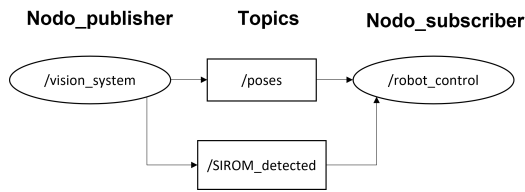


Figura 11: Ejemplo de nodos publicista y suscriptor

Concretamente, la primera integración del sistema de auto-acoplamiento se ha realizado mediante el uso de una máquina virtual con un sistema operativo Ubuntu 18.04.6 LTS y ROS Melodic 1.14.12. Mencionar que el uso de estas versiones se debe a que Universal Robots recomienda el uso de las mismas para garantizar el correcto funcionamiento del driver ROS (Robots and FZI, 2021).

#### 4. Validación del sistema robótico de auto-acoplamiento

La validación del sistema robótico de auto-acoplamiento es necesaria antes de realizar su futura integración en el propio SIROM. Esta se fundamenta en verificar que el sistema de visión funciona correctamente y que los resultados obtenidos durante las fases de búsqueda, aproximación y ensamblaje que ejecuta el sistema robótico son correctos.

Las pruebas de validación se han llevado a cabo en un entorno de laboratorio, sin considerar las condiciones espaciales, ya que este desarrollo se fundamenta en un prototipado del sistema de auto-acoplamiento. Sin embargo, a la hora de llevar el desarrollo a un entorno espacial, habrá que considerar las condiciones en dicho entorno de aplicación para ajustar el desarrollo a las especificaciones del mismo.

Para ello, se han llevado a cabo diferentes ensayos validando tanto el desempeño del sistema de visión como cada una de las fases de búsqueda, aproximación y ensamblaje que ejecuta el sistema robótico de auto-acoplamiento. Una vez realizadas las validaciones de manera independiente, se ha realizado la validación del sistema al completo.

##### 4.1. Validación del sistema de visión

El sistema de visión es el encargado de cerrar el lazo de control del sistema robótico de auto-acoplamiento. Para ello, debe ser capaz de localizar un SIROM dispuesto por un tablero de marcadores, así como de estimar su ubicación respecto de la cámara.

En primer lugar, con el objetivo de validar el desempeño del sistema de visión y tras integrar el tablero compuesto de marcadores ArUco en el dispositivo, se ha hecho una adaptación de la norma UNE-EN ISO 9283 (AENOR, 2003). Esta norma contiene los criterios de análisis de prestaciones y métodos de ensayo relacionados para robots manipuladores. La adaptación se fundamenta en que, en vez de realizar treinta ciclos de ensayo como bien se menciona en la norma, se han realizado cinco ciclos por cada punto, reduciendo notablemente los tiempos de ensayo. De esta manera se han analizado una serie de puntos predefinidos por SENER Aeroespacial, los cuales definen la ubicación del SIROM pasivo respecto del SIROM activo.

Para ello, se ha ubicado el SIROM pasivo en un punto de la periferia del espacio de trabajo del manipulador y el robot

con el SIROM activo en cada uno de los puntos predefinidos por SENER Aeroespacial. Estos puntos están asociados a los desalineamientos que se generan comúnmente en tareas de ensamblaje en órbita, los cuales se han obtenido a partir de los diferentes ensayos realizados con el SIROM para otros proyectos de desarrollo del dispositivo. Tras ejecutar las pruebas de validación pertinentes, se ha evaluado la estimación realizada por el sistema de visión mediante la comparación del resultado obtenido y el punto predefinido.

##### 4.2. Validación de la fase de búsqueda

En la validación del algoritmo de búsqueda del SIROM, se ha verificado que los movimientos predefinidos para realizar la búsqueda en el espacio de trabajo del robot permiten encontrar el SIROM pasivo y se ha analizado el tiempo que tarda en realizar dicho cometido.

Para ello, se ha ubicado un APM (*Active Payload Module*) compuesto por un SIROM pasivo en diferentes ubicaciones de la mesa de trabajo del robot y se ha ejecutado el algoritmo de búsqueda. La ejecución del algoritmo se detiene cuando se detecta el SIROM, en caso de encontrarlo, o cuando el barrido por todos los puntos predefinidos finaliza. En caso de que la búsqueda sea satisfactoria, se almacena el tiempo transcurrido.

En la Figura 12 se muestran las diferentes ubicaciones adoptadas por el SIROM pasivo integrado en el APM. Pudiendo concluir que la búsqueda se realiza satisfactoriamente en todo el espacio de trabajo del manipulador robótico.

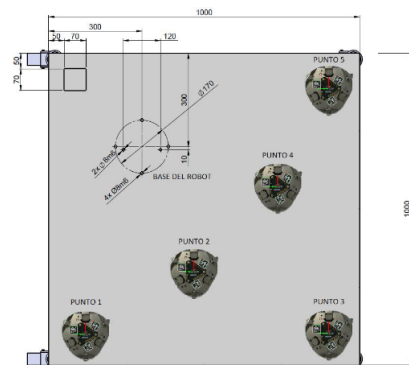


Figura 12: Ubicaciones del APM en la validación de la fase de búsqueda

Por otro lado, los ensayos se ejecutan en dos orientaciones: horizontal e inclinado a 45°, como se puede apreciar en la Figura 13. La elección de dichos valores de orientación se fundamenta en los límites del algoritmo de búsqueda, considerando como casos ideales los ensayos a 0° y como casos límites los ensayos a 45°.



Figura 13: Soportes para ubicar el APM en diferentes orientaciones



En cuanto a los resultados obtenidos, estos se presentan posteriormente en la sección secundaria denominada *Análisis de resultados*.

#### 4.3. Validación de la fase de aproximación

En tercer lugar, se han realizado pruebas para validar las estrategias planteadas para la aproximación del SIROM activo al SIROM pasivo.

En este ensayo se realiza una aproximación mediante desalineamientos ficticios. Para ello, se ha definido una *pose* inicial y otra final. Partiendo de la *pose* inicial y conociendo la ubicación del SIROM activo utilizado como TCP del manipulador por cada iteración del bucle de control, se ha calculado el desalineamiento relativo entre la posición actual de dicho SIROM y la *pose* objetivo. Este cálculo simula la información transmitida por el sistema de visión.

A lo largo de las aproximaciones se han ido obteniendo los desalineamientos entre los dos SIROM, pudiendo evaluar la dinámica del error hasta su convergencia dentro de los límites establecidos por SENER Aeroespacial.

De la misma manera que para los resultados obtenidos para la validación de la fase de búsqueda, los resultados de la fase de aproximación se presentan posteriormente en la sección secundaria denominada *Análisis de resultados*.

#### 4.4. Validación de la fase de ensamblaje

Por último, se han realizado los ensayos relativos a la validación del control de fuerza propuesto para realizar el ensamblaje entre los SIROM. Para ello, se han situado ambos SIROM al límite del rango de captura y se ha aplicado una fuerza externa de manera manual para efectuar el acoplamiento.

En cuanto al límite del rango de captura, este se puede definir de manera desacoplada para cada grado de libertad o de manera acoplada considerando cierto desalineamiento entre SIROM activo y pasivo en todos los grados de libertad. Sin embargo, como en la aplicación real los desalineamientos siempre estarán acoplados, se ha realizado el ensayo situando el SIROM con el desalineamiento máximo acoplado en cada grado de libertad.

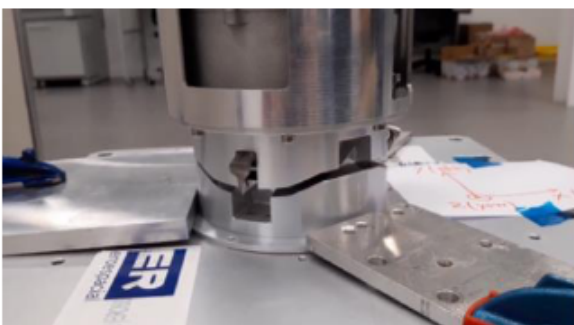


Figura 14: Disposición de los SIROM para la validación de la fase de ensamblaje

Como se puede apreciar en la Figura 14, el SIROM pasivo queda firmemente sujeto a la mesa. De esta manera el robot es quien se mueve en función de las fuerzas ejercidas por los ganchos de captura del SIROM activo, y no el SIROM pasivo.

Además, mencionar que a lo largo del ensayo se han almacenado los desalineamientos relativos entre ambos SIROM, así como las fuerzas y pares ejercidos en el extremo del robot.

#### 4.5. Validación del sistema integrado

Tras validar de manera independiente el sistema de visión y el sistema robótico e integrar ambos subsistemas, se han realizado una serie de ensayos para validar el correcto funcionamiento del sistema de control servo visual al completo.

De la misma manera que para la validación del sistema de visión, se ha adaptado la norma UNE-EN ISO 9283 (AENOR, 2003), realizando cinco ciclos por cada uno de los 49 puntos analizados. Reduciendo así los tiempos de ensayo notablemente y consiguiendo abarcar la mayor parte del espacio de trabajo, además de determinar la precisión y exactitud del sistema robótico de auto-acoplamiento.

Para ello, como bien se ha mencionado anteriormente, se ha ubicado un APM compuesto por un SIROM pasivo en una posición conocida, se ha definido el punto de ensamblaje y se ha ejecutado el sistema para cada uno de los 49 puntos predefinidos. Una vez realizada la detección del SIROM pasivo y la aproximación al mismo, se ha evaluado la diferencia entre el punto de ensamblaje predefinido y el punto actual del TCP, pudiendo determinar el error final del sistema de auto-acoplamiento antes de accionar las garras que facilitan el acoplamiento entre ambos SIROM.

Además, a lo largo de la aproximación se han ido obteniendo los desalineamientos entre SIROM activo y pasivo por cada iteración del bucle de control. De esta manera, se ha podido evaluar la dinámica del error hasta su convergencia dentro de los límites establecidos, donde el SIROM activo es capaz de accionar los ganchos de captura para realizar el ensamblaje junto con el SIROM pasivo, de la misma manera que en la validación de la fase de aproximación.

Estos límites del error se definieron mediante la realización de los ensayos asociados al proyecto EROSS (EROSS, 2022). En dichos ensayos se obtuvo el rango máximo de captura entre SIROM activo y pasivo para realizar el acoplamiento de manera satisfactoria, el cual queda definido por los siguientes límites para cada grado de libertad:  $\pm 5$  mm en X e Y, [0-10] mm en Z y  $\pm 1,5^\circ$  en los tres grados de libertad rotacionales.

Los resultados obtenidos, de la misma manera que para las validaciones anteriormente comentadas, se presentan posteriormente en la sección secundaria denominada *Análisis de resultados*. Además, en el siguiente enlace (SENER, 2022a) se facilita un vídeo ilustrativo de uno de los ensayos realizados para el sistema integrado.

#### 4.6. Análisis de resultados

En esta sección se muestran los resultados más relevantes asociados a las pruebas de validación realizadas anteriormente, los cuales permiten ofrecer una visión cuantitativa del resultado del novedoso sistema robótico de auto-acoplamiento implementado en este trabajo. En concreto, se analizan los resultados de la fase de búsqueda y los resultados obtenidos tras integrar ambos subsistemas, pudiendo corroborar que cada una de las fases que aborda el sistema robótico de auto-acoplamiento y el propio sistema de visión funcionan correctamente.

En la Tabla 1 se resumen los resultados obtenidos del ensayo asociado a la fase de búsqueda del SIROM.

Tabla 1: Resultados del ensayo de validación de la fase de búsqueda

Punto	Inclinación	$T_{E1}$ (s)	$T_{E2}$ (s)	$T_{E3}$ (s)	$T_{E4}$ (s)	$T_{E5}$ (s)	$T_{Medio}$ (s)
1	0°	8,11	8,06	8,06	8,09	<b>7,98</b>	8,06
	45°	8,11	8,12	8,06	<b>8,04</b>	8,12	8,09
2	0°	5,41	5,42	5,37	5,42	<b>5,34</b>	5,392
	45°	18,85	18,91	<b>18,47</b>	18,86	18,88	18,794
3	0°	<b>35,04</b>	35,05	35,11	35,1	35,09	35,078
	45°	35,09	35,08	35,07	35,11	<b>35,06</b>	35,082
4	0°	32,41	<b>30,34</b>	32,39	34,41	32,35	32,38
	45°	35,07	<b>35,05</b>	35,11	35,11	35,1	35,088
5	0°	60,79	<b>60,49</b>	60,97	62,04	61,68	61,194
	45°	62,09	<b>61,29</b>	62,12	62,13	62,08	61,942

Tal y como se puede apreciar, el algoritmo de búsqueda es capaz de encontrar el SIROM en todos los casos analizados. Por ende, se puede concluir que el sistema de visión realiza correctamente la detección del dispositivo. Por otro lado, se puede observar cómo la fase de búsqueda necesita más tiempo en los casos en los que el SIROM pasivo se encuentra inclinado. Además, en función de lo alejado que esté el APM compuesto por el SIROM pasivo respecto del punto inicial del algoritmo de búsqueda, el sistema necesitará más tiempo para realizar la detección.

Es resumen, el algoritmo diseñado para realizar la búsqueda del SIROM pasivo por la mesa de trabajo del manipulador robótico es capaz de detectar el dispositivo en todo el espacio de trabajo del robot. Sin embargo, al haber adaptado la serie de movimientos de búsqueda al entorno de aplicación, en caso de trasladar la solución a otro escenario, se deberá adecuar el algoritmo a dicho espacio de trabajo. Es decir, como en función de la tarea que deba desempeñar el sistema de auto-acoplamiento, el robot estará ubicado de una manera u otra, pueden variar las posiciones por las que se ha de realizar el barrido respecto a este ensayo. Teniendo que adecuar dichas posiciones en función del entorno de trabajo.

En cuanto a los resultados de las fases de aproximación y de ensamblaje del sistema al completo, en las Figuras 15 y 16 se muestra la evolución del error en la fase de aproximación para los seis grados de libertad de los que consta el sistema. En concreto, se muestra la evolución del error para un desalineamiento inicial en los tres ejes (X-Y-Z) de 20 mm, 170 mm y 350 mm en traslación y -45°, 18° y 25° en rotación (convención *Roll-Pitch-Yaw*), respectivamente. Mencionar que este desalineamiento inicial, a modo de ejemplo, se corresponde con uno de los puntos definidos por SENER Aeroespacial.

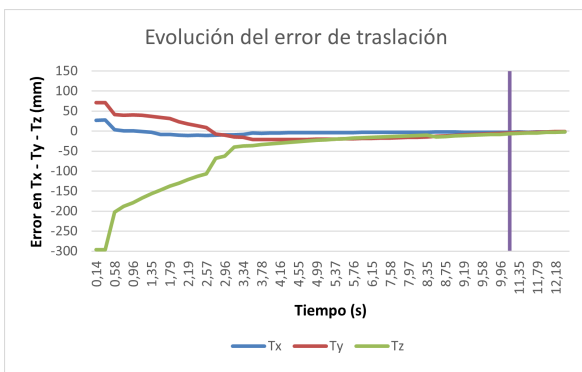


Figura 15: Evolución del error de traslación

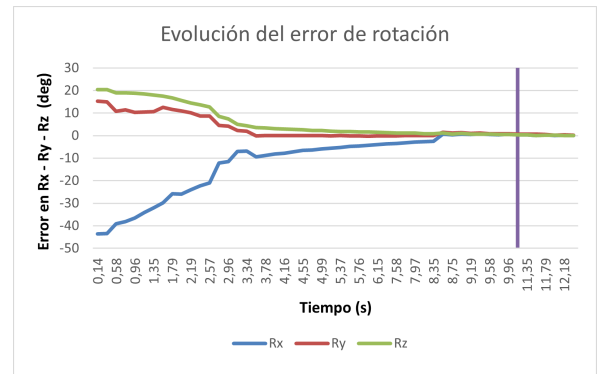


Figura 16: Evolución del error de rotación

Observando las Figuras 15 y 16 se puede corroborar que la ley de control planteada en (9), permite reducir el error de manera exponencial. Por otro lado, introducir la ganancia adaptativa definida en (13) permite que el valor de  $\lambda$  se adecue al error evitando grandes saltos en su reducción. Además, mencionar que la línea morada que se observa en dichos resultados representa el instante de tiempo en el que ambos SIROM están dentro del rango de captura. Sin embargo, la aproximación continua hasta que el desalineamiento entre ambos es mínimo. En concreto, hasta que el módulo del error es menor que 0.001.

En cuanto a los resultados de la fase de ensamblaje, en las Figuras 17, 18 y 19 se representa el error para cada grado de libertad en el propio punto de ensamblaje entre SIROM activo y pasivo tras terminar la fase de aproximación. Es decir, antes de accionar las garras y ejecutar el control de admitancia.

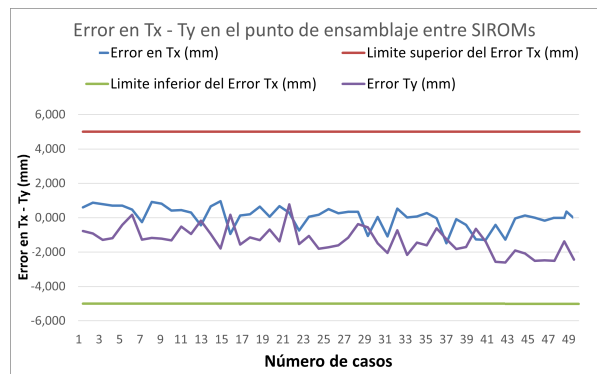


Figura 17: Error en el ensamblaje para Tx y Ty

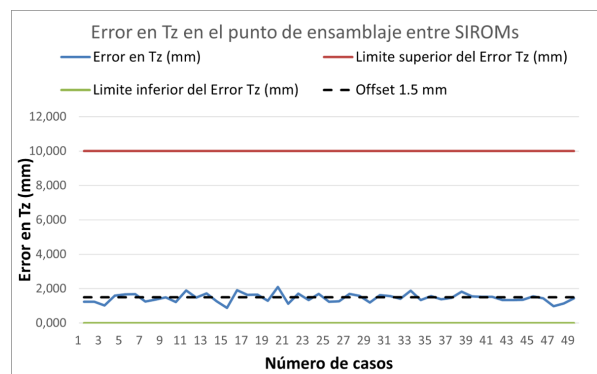


Figura 18: Error en el ensamblaje para Tz

Analizando el error de traslación obtenido en Tx, Ty y Tz, se puede apreciar que los resultados están dentro del límite máximo del error para todos los casos analizados. Además, es mencionable que el error en Z es ligeramente superior a 0 mm, ya que es preferible dejar un *offset* en dicho grado de libertad, con el objetivo de evitar colisiones entre ambos SIROM.

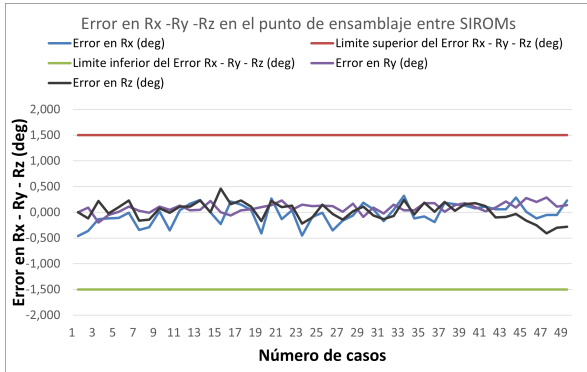


Figura 19: Error en el ensamblaje para Rx - Ry - Rz

Los resultados obtenidos para los grados de libertad rotacionales (Rx, Ry y Rz) indican que tampoco se supera el límite del error impuesto, quedando los SIROM con un desalineamiento mínimo antes de accionar las garras de captura.

En cuanto a los resultados asociados al control de fuerza, el cual se ejecuta al finalizar la aproximación y quedar los SIROM prácticamente alineados en el eje Z, estos se muestran en las Figuras 20 y 21.

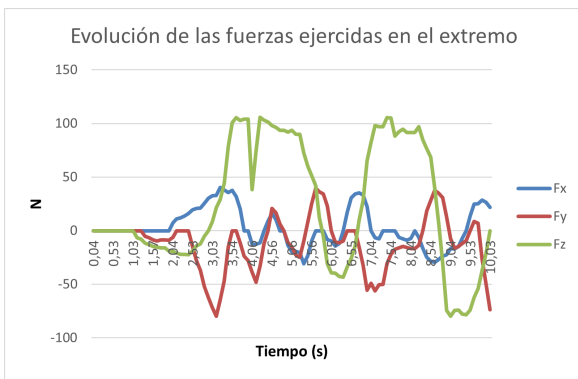


Figura 20: Fuerzas ejercidas en el extremo del robot durante el ensamblaje

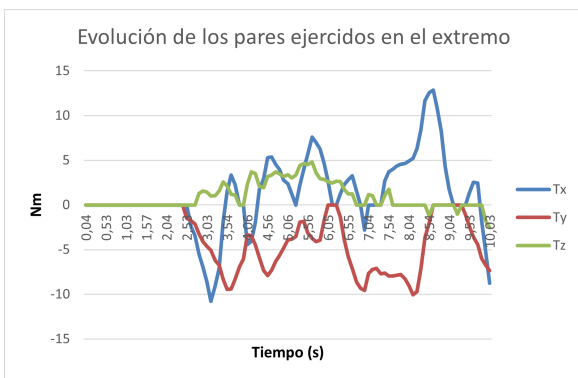


Figura 21: Pares ejercidos en el extremo del robot durante el ensamblaje

Tras la ejecución de la fase de ensamblaje, se puede observar como el control de admitancia implementado genera los pares y fuerzas necesarias para alinear los dos SIROM. Además, se puede confirmar que el control actúa principalmente sobre el desalineamiento en el eje Z, ya que antes de aplicar el control de fuerza, este era el eje con mayor desalineamiento y, como se muestra en la Figura 20, es en este grado de libertad donde se genera más fuerza.

En resumen, analizando los resultados obtenidos se puede corroborar que el sistema de auto-acoplamiento realiza una estimación de la *pose* del SIROM correcta y, de esta manera, el sistema robótico consigue realizar una aproximación y posterior acoplamiento de manera satisfactoria.

### 5. Conclusiones y trabajos futuros

En este trabajo, se ha desarrollado un sistema robótico de auto-acoplamiento que permite a la interfaz multifuncional SIROM realizar tareas de ensamblaje, con el objetivo de ser un dispositivo funcional en el ámbito de los servicios en órbita.

El uso de un tablero formado por marcadores ArUco ha permitido realizar la búsqueda del SIROM con mayores desalineamientos que mediante el uso de un único marcador. Además, a pesar de la incertidumbre en la precisión con la que se crea el tablero, los resultados obtenidos permiten corroborar que el prototipo del sistema robótico de auto-acoplamiento diseñado logra cumplir con el objetivo principal de manera satisfactoria.

El haber optado por una solución basada en información visual hace que el sistema adquiera autonomía, logrando que pueda adaptarse a posibles cambios en el entorno o que pueda emplearse en aplicaciones no repetitivas. Por otro lado, el algoritmo desarrollado para la búsqueda del SIROM es un algoritmo particularizado para esta aplicación concreta. De manera que, en caso de que el escenario sea diferente, como bien se ha mencionado anteriormente, será necesario actualizar dicho algoritmo. No obstante, los resultados obtenidos muestran que el algoritmo de búsqueda diseñado es adecuado para este escenario. En cuanto a la aproximación, se ha concluido que en aplicaciones en las que se sitúa la cámara en el extremo del robot tiene gran importancia no perder el objetivo. Siendo este uno de los motivos por el que se ha escogido la estrategia de control basada en posición PBVS, además de la importancia de la información de profundidad.

Por otro lado, emplear una  $\lambda$  adaptativa ha hecho posible que la solución propuesta sea válida tanto para grandes como para pequeños desalineamientos. Además, mediante el control de admitancia propuesto se han logrado corregir los desalineamientos máximos establecidos por SENER Aeroespacial, consiguiendo realizar el acoplamiento entre dos SIROM en función de las fuerzas externas de manera satisfactoria.

Por ello, tras la integración del sistema al completo, se corrobora que el funcionamiento del mismo es correcto y además que la solución desarrollada es robusta, ya que independientemente de la ubicación del SIROM pasivo en el espacio de trabajo, el sistema de auto-acoplamiento es capaz de realizar el ensamblaje de manera satisfactoria.

En cuanto a líneas futuras, tras verificar que el sistema de visión desarrollado permite comandar un manipulador robótico

para realizar el acoplamiento entre pares de SIROM, se pretende integrar el sistema de visión en el propio dispositivo, de manera que el SIROM tenga la funcionalidad de comandar al manipulador robótico que haga uso del mismo para conseguir realizar el acoplamiento con un SIROM pasivo. Sin embargo, al realizar dicha integración, el procesamiento de la información capturada por la cámara se hará en el propio SIROM, el cual dispone de una electrónica enfocada a los equipos de vuelo con menos recursos que la utilizada en el prototipado. Por ello, se deberá de adecuar la algoritmia a la misma.

Además, debido a que en el entorno espacial el módulo que haga uso del SIROM pasivo estará en movimiento respecto del manipulador robótico que porta el SIROM activo como herramienta, se deberá de corroborar mediante las pruebas de validación pertinentes que el sistema de auto-acoplamiento es capaz de realizar el ensamblaje incluso ante este tipo de perturbaciones.

## Agradecimientos

Este trabajo es parte de un desarrollo interno de SENER Aeroespacial el cual forma parte del proyecto SIROM. De esta manera, los autores agradecen el continuo apoyo y colaboración tanto a SENER Aeroespacial como al Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad del País Vasco (Ref. GIU19/045).

## Referencias

- AENOR, 2003. Robots manipuladores industriales: Criterios de análisis de prestaciones y métodos de ensayo relacionados (iso 9283:2003).
- Asif, S., 1958. Announcement of the first satellite. Pravda Newspaper Article, 311–312.  
URL: <https://digitalarchive.wilsoncenter.org/document/165454.pdf?v=1b97d7e06318bd134c57860e8ba96a5d>
- Bradski, G., 2000. The opencv library. Dr. Dobb's Journal of Software Tools.
- Branz, F., Francesconi, A., 2017. Experimental evaluation of a dielectric elastomer robotic arm for space applications. *Acta Astronautica* 133, 324–333.  
DOI: 10.1016/j.actaastro.2016.11.007
- Corke, P., 01 2017. Robotics, Vision and Control. Vol. 118.  
DOI: 10.1007/978-3-319-54413-7
- De Stefano, M., Mishra, H., Balachandran, R., Lampariello, R., Ott, C., Secchi, C., 2019. Multi-rate tracking control for a space robot on a controlled satellite: A passivity-based strategy. *IEEE Robotics and Automation Letters* 4 (2), 1319–1326.  
DOI: 10.1109/LRA.2019.2895420
- De Stefano, M., Mishra, H., Giordano, A. M., Lampariello, R., Ott, C., 2021. A relative dynamics formulation for hardware-in-the-loop simulation of on-orbit robotic missions. *IEEE Robotics and Automation Letters* 6 (2), 3569–3576.  
DOI: 10.1109/LRA.2021.3064510
- Diaz-Cano, I., Quintana, F. M., Galindo, P. L., Morgado-Estevez, A., 2022. Eye-to-hand calibration of an industrial robotic arm with structured light 3d cameras. *RIAI - Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial* 19, 154–163.  
DOI: 10.4995/RIAI.2021.16054
- Dong, G., Zhu, Z. H., 2015. Position-based visual servo control of autonomous robotic manipulators. *Acta Astronautica* 115, 291–302.  
DOI: 10.1016/j.actaastro.2015.05.036
- EROSS, P., 2022. Eross - european robotic orbital support services.  
URL: <https://eross-h2020.eu/eross/>
- European Space Policy Institute, E. R., 2020. 76-in-orbit services-full report.  
URL: <https://www.espi.or.at/reports/in-orbit-services/>
- F. Chaumette, S. H., Hutchinson, S., 2006. Visual servo control, part i: Basic approaches. *IEEE Robotics Automation Magazine* 13, 82–90.  
DOI: 10.1109/MRA.2006.250573
- G. Guerra, J. Viñals, I. S. M. D.-C., Gala, J., 2022. Development of robotic fluid transfer interface based on rider connector.
- Garrido-Jurado, S., Muñoz-Salinas, R., Madrid-Cuevas, F., Marín-Jiménez, M., 2014. Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion. *Pattern Recognition* 47 (6), 2280–2292.  
DOI: 10.1016/j.patcog.2014.01.005
- Hutchinson, S., Hager, G., Corke, P., 11 1996. A tutorial on visual servo control. *Robotics and Automation, IEEE Transactions on* 12, 651 – 670.  
DOI: 10.1109/70.538972
- Kalaitzakis, M., Cain, B., Carroll, S., Ambrosi, A., Whitehead, C., Vitzilaios, N., 04 2021. Fiducial markers for pose estimation: Overview, applications and experimental comparison of the artag, apriltag, aruco and stag markers. *Journal of Intelligent Robotic Systems* 101.  
DOI: 10.1007/s10846-020-01307-9
- Kermorgant, O., Chaumette, F., 2014. Dealing with constraints in sensor-based robot control. *IEEE Transactions on Robotics* 30 (1), 244–257.  
DOI: 10.1109/TR0.2013.2281560
- Larouche, B. P., Zhu, Z. H., 2014. Autonomous robotic capture of non-cooperative target using visual servoing and motion predictive control. *Autonomous Robots* 37, 157–167.  
DOI: 10.1007/s10514-014-9383-2
- Muis, A., Ohnishi, K., 2004. Eye-to-hand approach on eye-in-hand configuration within real-time visual servoing. In: *The 8th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control, 2004. AMC '04*. Vol. 10. pp. 647–652.  
DOI: 10.1109/AMC.2004.1297945
- Muñoz-Salinas, R., 2018. Aruco library documentation.  
URL: <https://docs.google.com/document/d/1QU9KoBtjSM2kF6IT0jQ76xqL7H0TEtXriJX5kwi9Kgc/>
- Qiu, Z., Hu, S., Liang, X., 03 2018. Model predictive control for constrained image-based visual servoing in uncalibrated environments: Mpc for constrained ibvs in uncalibrated environments. *Asian Journal of Control* 21.  
DOI: 10.1002/asjc.1756
- Robots, U., FZI, 2021. Universal robots ros driver. GitHub.  
URL: [https://github.com/UniversalRobots/Universal\\_Robots\\_ROS\\_Driver](https://github.com/UniversalRobots/Universal_Robots_ROS_Driver)
- Romero-Ramirez, F. J., Muñoz-Salinas, R., Medina-Carnicer, R., 2018. Speeded up detection of squared fiducial markers. *Image and Vision Computing* 76, 38–47.  
DOI: 10.1016/j.imavis.2018.05.004
- Scherzinger, S., Rönnau, A., Dillmann, R., 2019. Contact skill imitation learning for robot-independent assembly programming. 2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 4309–4316.  
DOI: 10.48550/arXiv.1908.06272
- SENER, G., 2021. Sirom standard interface for robotic manipulation. Youtube.  
URL: [https://www.youtube.com/watch?v=uwpm\\_S0nYE8](https://www.youtube.com/watch?v=uwpm_S0nYE8)
- SENER, G., 2022a. Ensayo de auto-acoplamiento de la interfaz robótica sirom. Youtube.  
URL: <https://www.youtube.com/watch?v=eNaQr6CyfT8>
- SENER, G., 2022b. Standard interface for robotic manipulation (sirom) - datasheet. SENER Aeroespacial.  
URL: <https://www.aeroespacial.sener/en/pdf-profile-project/standard-interface-for-robotic-manipulation-sirom>
- Vinals, J., Gala, J., Guerra, G., 2020. Standard interface for robotic manipulation (sirom): Src h2020 og5 final results-future upgrades and applications.
- ViSP, 2022. Tutorial: How to boost your visual servo control law. Visual Servoing Platform.  
URL: <https://visp-doc.inria.fr/doxygen/visp-3.5.0/tutorial-boost-vs.html>
- Zhang, Z., 1999. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations. In: *Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision*. Vol. 1. pp. 666–673.  
DOI: 10.1109/ICCV.1999.791289