

Posicionamiento de ayuda visual utilizando compresión de nube de puntos y cámaras RGB-D para manipuladores robóticos

Visual-aid positioning using point cloud compression and RGB-D cameras for robotic manipulators

Estefan Iván Cisternas Velásquez¹

 <https://orcid.org/0009-0000-8179-5172>

Julio Andrés del Río Caldumbide¹

 <https://orcid.org/0009-0007-7437-3896>

Álvaro Javier Prado Romo²

 <https://orcid.org/0000-0001-7192-1681>

Oswaldo Aníbal Menéndez Granizo^{2*}

 <https://orcid.org/0000-0001-7101-0319>

Recibido 06 de abril de 2023, aceptado 12 de junio de 2023

Received: April 06, 2023 Accepted: June 12, 2023

RESUMEN

Durante la última década, se ha logrado la optimización de un conjunto masivo de tareas industriales aprovechando la precisión de los manipuladores robóticos. Si bien la nueva era de los manipuladores robóticos presenta herramientas de alta tecnología para solucionar problemas de posicionamiento y seguimiento, la actualización de las unidades más antiguas es un desafío importante debido a la incompatibilidad de hardware, mecanismos obsoletos y restricciones de operación. Este trabajo introduce un nuevo sistema de ayuda visual para determinar la postura y orientación, es decir, pose de un manipulador robótico utilizando un arreglo de dos cámaras estéreo. El sistema de posicionamiento visual calcula la posición del efector final a partir de la nube de puntos completa adquirida por el arreglo de cámaras y el modelo inverso del robot. Las nubes de puntos son fusionadas utilizando el algoritmo de *Iterative Closest Point*. Un detector de color amarillo detecta los puntos relacionados con el efector final. Finalmente, la posición del efector final se calcula con un estimador Media. Los resultados experimentales muestran que el dispositivo propuesto puede estimar la posición relativa del efector final respecto de la base del brazo robótico con errores aproximados de posicionamiento longitudinal, lateral y vertical de 19,6%, 15,7% y 9,2%, respectivamente.

Palabras clave: Visión por computador, visión estereoscópica, nube de puntos iterativa, compresión de nubes de puntos, aprendizaje de máquina, manipuladores robóticos.

ABSTRACT

Over the last decade, optimization of a massive set of industrial tasks has been achieved by taking advantage of repeatability and precision of robotic arms. While the new era of robotic arms introduces high-tech tools to fix positioning and tracking issues, upgrading older units is a significant challenge due to hardware incompatibilities, outdated mechanisms, and operation restrictions. This work introduces a new visual system to determine the position of a robotic arm using a two-stereo-cameras array.

¹ Universidad Andrés Bello, Facultad de Ingeniería, Santiago de Chile, Chile.

Email: e.cisternasvelsquez@uandresbello.edu; j.delrocaldumbide@uandresbello.edu

² Universidad Católica del Norte, Departamento de Ingeniería de Sistemas y Computación, Antofagasta, Chile.

Email: alvaro.prado@ucn.cl; oswaldo.menendez@ucn.cl

* Autor de correspondencia: oswaldo.menendez@ucn.cl

The visual-positioning system estimates the position of the end-effector using an inverse model of the robot and the full point cloud acquired with the stereo cameras. An Iterative Point Cloud algorithm merges the partial point clouds of each depth sensor, and with a yellow color detector, the algorithm extracts the Region of Interest (ROI). Experimental results show that the proposed device can estimate the relative position of the end-effector with respect to the robotic arm base with errors in the longitudinal, lateral, and vertical positions of around 19.6%, 15.7% and 9.2%, respectively.

Keywords: Computer vision, stereo vision, point cloud compression, machine learning, robotic manipulators.

INTRODUCCIÓN

Las industrias inteligentes permiten la conexión de diferentes organismos administrativos e industriales utilizando una amplia variedad de mecanismos sofisticados, principalmente sistemas robóticos de vanguardia [1]. Hoy en día, las tecnologías habilitadoras han alcanzado un nivel de madurez lo suficientemente alto para la realización práctica de las soluciones y servicios a nivel industrial, comenzando desde pequeñas pruebas hasta la masificación industrial de tareas autónomas basadas en plataformas robóticas [2]. Para garantizar una adecuada operación, y la alta precisión de los procesos industriales, los sistemas robóticos requieren el desarrollo de sistemas de control eficientes y robustos. Por lo general, los manipuladores robóticos de última generación ya se equipan con sistemas de posicionamiento muy precisos que garantizan el funcionamiento correcto del robot [3]. Sin embargo, una gran cantidad de robots antiguos no pueden ser actualizados y automatizados utilizando estas tecnologías, ya que dichas plataformas no tienen sistemas compatibles, poseen mecanismos obsoletos o discontinuados, o los costos son muy elevados para las industrias [4].

El reemplazo de unidades robóticas antiguas por modernas no es una opción viable debido a que no han cumplido un ciclo de trabajo o sus costos todavía no han sido amortizados [5]. Por lo tanto, existe la necesidad de actualizar un gran número de unidades para garantizar las demandas operativas. Además, la popularidad de los manipuladores robóticos en el desarrollo de tareas industriales asociado a sus alta repetibilidad y precisión ha incrementado su uso a nivel de aplicaciones industriales de vanguardia [1], [3], [6]. Entre las aplicaciones actuales más sobresalientes de los manipuladores robóticos están la fabricación de vehículos, manufacturación aditiva, agricultura de precisión [7], [8] e industria eléctrica

[1], [2], [9]. Actualmente, el posicionamiento de los manipuladores robóticos se realiza mediante sensores inerciales, tales como IMU y encoder, que se encargan determinar la orientación del robot, cámaras visuales con imágenes RGB, sensores LIDAR [10]-[12], entre otros. Por otro lado, el uso de cámaras que permiten determinar la pose de diferentes objetos en entornos variados ha permitido la penetración de estas tecnologías a nivel industrial [13]-[17].

Estudios preliminares han demostrado la utilidad de la visión estereoscópica para estimar de manera adecuada la profundidad de objetos [18]. Aquí cabe aclarar que este tipo de reconstrucción presenta un problema, y es que se ignora la fidelidad del objeto observado [19]. Una de las técnicas más utilizadas cuando se trata con la fusión de nubes de puntos es el algoritmo de *Iterative Closest Point* (ICP por sus siglas en inglés), un algoritmo muy estudiado y consolidado, pero en constante desarrollo para la aplicación de posicionamiento de brazos robóticos [19], [20]. Estudios relacionados al posicionamiento visual basado en imágenes pueden mostrar resultados espaciales y temporales con buena resolución, como los modelos de estudios propuestos para obtener la pose humana [21] o en donde mediante imágenes V-SLAM se corrige la posición por GPS para hacerla más precisa [22].

Las técnicas de posicionamiento para brazos robóticos usando visión estéreo ha sido altamente utilizado en la literatura [23]-[27]. Entre las principales aplicaciones se encuentran el desarrollo de robots para asistencia de personas [23], [24], reconstrucción tridimensional de ambientes [25] y aplicaciones en medicina [26]. Cio, Raison, Leblond Ménard, and Achiche Law-Kam [23], reemplazaron el uso de palancas manuales (joysticks) para el control manipuladores de asistencia con un sistema de visión estéreo de bajo costo [23]. Con el mismo objetivo, Hsieh and

Lin [24], introduce un controlador robusto basado en técnicas de aprendizaje por refuerzo, específicamente Q-learning [24]. Por otro lado, manipuladores robóticos equipados con cámaras estéreo han sido utilizadas para realizar la reconstrucción automática de ambientes mientras utiliza la misma información para realizar la navegación [25]. Recientemente, Penza, Cheng, Koskinopoulou, Acemoglu, Caldwell, and Mattos [26], presento un sistema de visión estéreo que permite compensar el movimiento y la deformación de los tejidos en aplicaciones médicas [26]. Además, se han presentado varias soluciones de control para compensar diferentes problemáticas, tales como redundancia cinemática, restricciones de luz o limitaciones geométricas [27], [28].

Este trabajo presenta un sistema de posicionamiento para manipuladores robóticos utilizando visión estéreo. El sistema consiste en dos cámaras estéreo que estiman la posición del efector final utilizando un algoritmo de dos etapas basado en técnicas de aprendizaje de máquina. Primero, se obtiene la nube de puntos asociados con el robot utilizando ambas cámaras estéreo. Ambas nubes de puntos son fusionadas utilizando el algoritmo de ICP, técnicas de procesamiento de imágenes y algoritmos de aprendizaje de máquinas. Además, utilizando un filtro de color se extraen todos los puntos tridimensionales asociados con la Región de Interés (siglas en inglés, ROI). Finalmente se estima la posición del efector

final (ROI) en coordenadas cartesianas utilizando el promedio de los puntos filtrados.

El resto de este trabajo está estructurado de la siguiente manera. La Sección Materiales y Métodos presenta los materiales principales usados en este trabajo. Además, introduce el algoritmo principal de dos etapas para determinar la posición del efector final. La Sección Resultados muestra los resultados experimentales sobre varias pruebas del sistema propuesto, realizados en un ambiente controlado y bajo condiciones de iluminación adecuadas. Finalmente, las conclusiones del trabajo de investigación propuesto son extraídas en la última sección.

MATERIALES Y MÉTODOS

Esta sección presenta los materiales y métodos requeridos para replicar las pruebas experimentales. Adicionalmente, evaluamos el principio de funcionamiento y las características técnicas del sistema de posicionamiento visual.

Sistema de medición

Como la Figura 1 ilustra, el sistema de posicionamiento propuesto consta de dos cámaras estéreo utilizadas para la reconstrucción 3D de un manipulador robótico de 6 grados de libertad. El sistema de visión usa un algoritmo de dos etapas que permite extraer

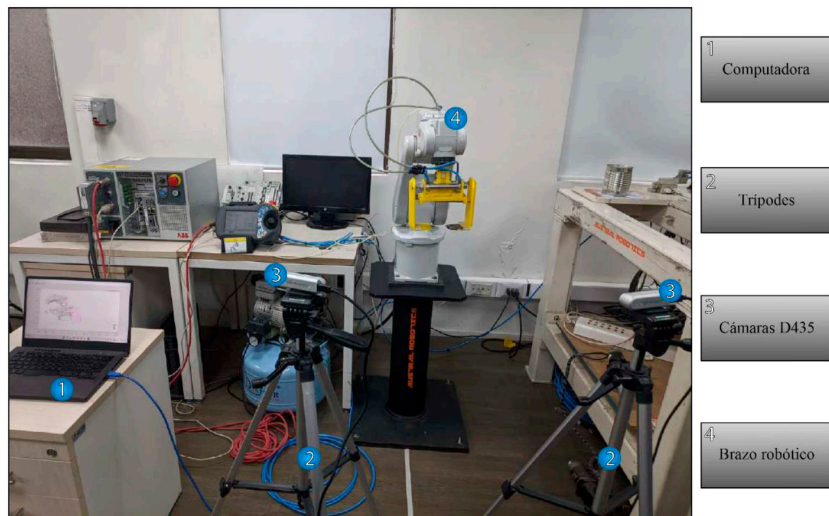


Figura 1. Representación física del sistema de posicionamiento utilizando cámaras RGB.

la información tridimensional (nube de puntos) asociadas al robot. Brevemente,

1. El sistema de visión consiste en dos cámaras estéreo Intel RealSense D435, las cuales adquieren dos imágenes RGB con una resolución de 1920×1080 píxeles. Las dimensiones del dispositivo son $90 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$. Mediante visión estéreo se crea una nube de puntos asociada a cada escena analizada utilizando MATLAB 2021b. Las nubes de puntos adquiridos son fusionadas con el algoritmo de ICP.
2. Con el fin de desarrollar un sistema de fácil transporte, montable y sencillo, ambas cámaras son montadas en trípodes Soligor WT-330A. La capacidad de carga de cada trípode es 730 g y la altura máxima es de 133 cm.
3. Debido a que la distancia mínima de las cámaras es 0,3 cm, ambas cámaras son localizadas a una distancia de 101,5 cm desde el eje Y, 7,5 cm desde el eje X y a una altura (eje Z) de 104,5 cm. Se considera que el eje inercial

está centrado en la base del robot (Figura 2). Adicionalmente, estas distancias garantizan que en cada imagen se puede observar el efector final (pinza en amarillo).

4. Debido a que se busca autonomía energética del robot, el sistema de visión es probado con un manipulador robótico industrial ABB – IRB120 con 6 grados de libertad. La capacidad de carga del robot es 3 kg, el alcance 58 cm y la repetibilidad es menor a 0,01 mm. La orientación y postura del robot se determina con seis ángulos directores $[\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6]$, los mismos que representan las orientaciones de cada una de las juntas (vea la Figura 2). En este trabajo, se considera como eje Y positivo al eje inercial anclado a la base del robot, el eje X como la lateralidad del robot y Z el eje de acción vertical.
5. Vale destacar que las cámaras son posicionadas en el ambiente de trabajo con la ayuda del software *Intel RealSense Viewer* provisto por el proveedor.

La Tabla 1 resume las principales características técnicas del hardware utilizado.

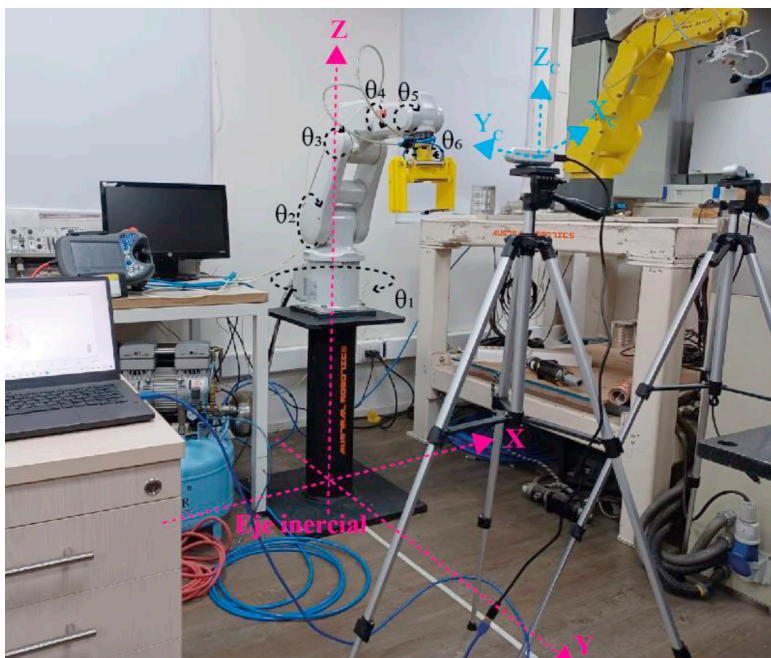


Figura 2. Distribución de los elementos del manipulador robótico. Además, aquí se muestra el marco de eje coordenado para la referencia inercial, distancias de referencia entre el robot y las cámaras RGB, y ángulos asociados a la pose del robot.

Tabla 1. Principales características de los materiales utilizados en este trabajo.

Materiales	Características
Manipulador Robótico	Modelo: ABB AB IRB 120 Capacidad de carga: 3 kg Repetitividad: 0,01 mm Grados de libertad: 6 Alcance máximo: 58 cm Peso: 25 kg
Cámaras Estéreo	Modelo: Module D435 + RGB Camera Dimensiones: 90 mm × 25 mm × 25 mm Conectores: USB-C 3,2 Gen 1 Distancia de medida: 0,3 a 3 m Resolución cámara RGB: 1920 × 1080 Tasa de adquisición: 30 fps FOV cámara RGB: 60° × 42° Distancia mínima: 28 cm FOV cámara profundidad: 87° × 58° Precisión de profundidad: 2% a 2,1 m
Trípodes	Ángulo de inclinación del trípode: -80° a 90° Altura de la placa del trípode: 1 m
Computador Estación Terrestre	Modelo: AMD Ryzen 7 4800HS Memoria RAM: 16 GB Sistema operativo: Windows 11/64bits Software del proveedor: Intel RealSense Viewer Software principal: MATLAB 2021b

Sistema de posicionamiento visual

El funcionamiento del sistema puede resumirse de la siguiente manera:

1. Las cámaras estereo extraen dos imágenes RGB del brazo robótico, ambas imágenes necesitan ser preprocesadas utilizando un algoritmo de corrección de perspectiva. Este algoritmo corrige distorsiones en la imagen.
2. Con las imágenes rectificadas se generan una nube de puntos 3D utilizando técnicas de procesamiento de imágenes y visión estereoscópica. Note que según el fabricante (Tabla 1), la precisión de las cámaras estereo es del 2% a una distancia de 2,1 m. Siguiendo las directrices de la Sección Sistema de medición, ya que la distancia máxima es de 101,5 cm, la precisión será menor.
3. Las nubes de puntos de ambas cámaras son fusionadas utilizando un algoritmo ICP. Debido a limitantes del algoritmo ICP, ambas cámaras no pueden estar separadas una distancia mayor a 30 cm en el eje X (distancia entre cámaras). Además, puesto que la densidad de la nube de puntos varía con la distancia entre las cámaras y el robot, la distancia en el eje Y entre el

sistema y el brazo robótico no puede exceder los 105 cm.

Una vez que se obtiene la nube de puntos fusionada, se extrae la Región de Interés (ROI) utilizando un filtro de color amarillo. Con el fin de este análisis, se garantiza que solo el efector final sea de color amarillo para asegurar su detección

La pose inicial del brazo robótico se configura como $[\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6]^T = [-30^\circ, 30,57^\circ, -29,97^\circ, 1,60^\circ, 76,03^\circ, -1,80^\circ]^T$. Con la finalidad de evaluar el comportamiento del sistema visual de posicionamiento incrementamos en pasos de 6° el ángulo θ_1 hasta alcanzar 30°. Para encontrar la posición real del brazo robótico como coordenadas cartesianas se utiliza matrices de rotación y translación basada en los parámetros propuestos por el fabricante.

Con la ROI, se determina la posición del efector final como el promedio de los puntos segmentados por el filtro de color. Finalmente, se determina la posición relativa del efector final respecto a la base del brazo robótico utilizando matrices de

translación asociadas a las distancias relativas entre las cámaras y el robot (Figura 3a). Note que, $\vec{r}_{cb}$ es la posición relativa de la cámara respecto a la base del manipulador robótico, la cual es un vector con distancia que se conoce a priori. Por otro lado, $\vec{r}_{ec}$ es la posición relativa del efector final respecto al eje anclado en la cámara estéreo 1 (vea $[X_C, Y_C, Z_C]$ en la Figura 2) y $\vec{r}_{eb} = \vec{r}_{ec} + \vec{r}_{cb}$ es la posición relativa del efector final respecto a la base del manipulador robótico.

La Figura 3 ilustra el diagrama general del sistema de posicionamiento visual.

RESULTADOS EXPERIMENTALES

La parte experimental consiste en evaluar el comportamiento del sistema propuesto para determinar la posición de un brazo robótico ABB – IRB 120 (vea las características del robot en la Tabla 1). Cabe destacar que, todas las pruebas

experimentales fueron desarrolladas en laboratorio bajo condiciones estables y manteniendo los niveles de iluminación estables. Ambas cámaras del sistema de posicionamiento fueron montadas en trípodes comerciales y posicionadas en frente del robot. La distancia entre el robot y las cámaras se determinó siguiendo la metodología y limitaciones descritas en la Sección Materiales y Métodos. Esta sección presenta el proceso de recolección de datos y las pruebas desarrolladas para evaluar el desempeño del dispositivo propuesto. Todas las pruebas desarrolladas en esta sección se han desarrollados bajo condiciones que garanticen la reproducibilidad.

Adquisición de Nubes de Puntos e Imágenes

Se adquieren cinco conjuntos de datos para cada pose evaluada. Cada conjunto de datos consta de dos imágenes RGB por cámara estéreo (cámaras izquierda y derecha), y sus nubes de puntos con la información tridimensional. Para fines de este

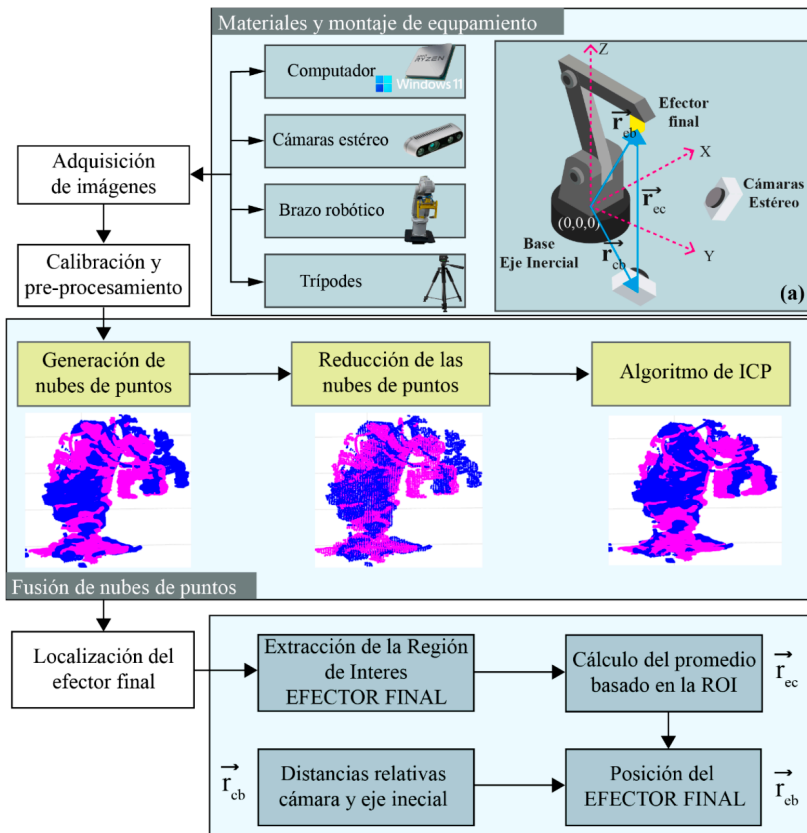
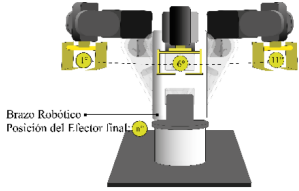
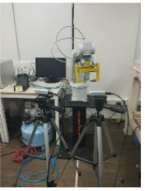


Figura 3. Arquitectura principal del sistema de posicionamiento visual usando cámaras estéreo.

análisis, las medidas se tomaron en un ambiente estáticos, es decir, sin objetos móviles. Además, la posición tanto de ambas cámaras como del brazo robótico se mantienen fijas durante la recolección de los datos. A pesar de que el ambiente es estático no es necesario aislar al robot o eliminar el fondo de cada imagen. Para garantizar la adquisición de solo aquellos puntos asociados al robot, cada nube de puntos es preprocesada de tal manera que se elimine todos los puntos localizados a una distancia superior de 150 cm desde el eje Y, ± 50 cm desde el eje X y a una altura (eje Z) de ± 60 cm. Estos umbrales se han determinado a partir de las dimensiones del robot y de la posición relativa entre las cámaras y el brazo robótico.

Por otra parte, para garantizar la adquisición de toda la información asociada al manipulador robótico, el desplazamiento del robot se realiza manteniendo constante los ángulos θ_2 a θ_6 y solo se varía θ_1 . Como se indicó en la Sección Materiales y Métodos, el ángulo θ_1 se varió manualmente en pasos de 6° entre -30° y 30° . Los límites de θ_1 se determinaron de manera empírica previamente analizando el espacio de trabajo del robot. En la Tabla 2 se muestra las 11 poses del robot (seis ángulos asociados a la orientación del manipulador robótico) que fueron experimentalmente evaluadas. Es sistema adquiere toda la información necesaria de manera automática, una vez el robot ha alcanzado la nueva posición y postura deseada.

Tabla 2. Diferentes poses del robot evaluadas experimentalmente usando el sistema de posicionamiento visual basado en cámaras estéreo.

Posición	Pose	Posición	Pose	Posición	Pose
			$\theta_1 = -12^\circ$ $\theta_2 = 30,57^\circ$ $\theta_3 = -26,97^\circ$ $\theta_4 = 1,60^\circ$ $\theta_5 = 78,73^\circ$ $\theta_6 = -1,80^\circ$		$\theta_1 = 12^\circ$ $\theta_2 = 30,57^\circ$ $\theta_3 = -26,97^\circ$ $\theta_4 = 1,60^\circ$ $\theta_5 = 78,73^\circ$ $\theta_6 = -1,80^\circ$
	$\theta_1 = -30^\circ$ $\theta_2 = 30,57^\circ$ $\theta_3 = -26,97^\circ$ $\theta_4 = 1,60^\circ$ $\theta_5 = 78,73^\circ$ $\theta_6 = -1,80^\circ$		$\theta_1 = -6^\circ$ $\theta_2 = 30,57^\circ$ $\theta_3 = -26,97^\circ$ $\theta_4 = 1,60^\circ$ $\theta_5 = 78,73^\circ$ $\theta_6 = -1,80^\circ$		$\theta_1 = 18^\circ$ $\theta_2 = 30,57^\circ$ $\theta_3 = -26,97^\circ$ $\theta_4 = 1,60^\circ$ $\theta_5 = 78,73^\circ$ $\theta_6 = -1,80^\circ$
	$\theta_1 = -24^\circ$ $\theta_2 = 30,57^\circ$ $\theta_3 = -26,97^\circ$ $\theta_4 = 1,60^\circ$ $\theta_5 = 78,73^\circ$ $\theta_6 = -1,80^\circ$		$\theta_1 = 0^\circ$ $\theta_2 = 30,57^\circ$ $\theta_3 = -26,97^\circ$ $\theta_4 = 1,60^\circ$ $\theta_5 = 78,73^\circ$ $\theta_6 = -1,80^\circ$		$\theta_1 = 24^\circ$ $\theta_2 = 30,57^\circ$ $\theta_3 = -26,97^\circ$ $\theta_4 = 1,60^\circ$ $\theta_5 = 78,73^\circ$ $\theta_6 = -1,80^\circ$
	$\theta_1 = -18^\circ$ $\theta_2 = 30,57^\circ$ $\theta_3 = -26,97^\circ$ $\theta_4 = 1,60^\circ$ $\theta_5 = 78,73^\circ$ $\theta_6 = -1,80^\circ$		$\theta_1 = 6^\circ$ $\theta_2 = 30,57^\circ$ $\theta_3 = -26,97^\circ$ $\theta_4 = 1,60^\circ$ $\theta_5 = 78,73^\circ$ $\theta_6 = -1,80^\circ$		$\theta_1 = 30^\circ$ $\theta_2 = 30,57^\circ$ $\theta_3 = -26,97^\circ$ $\theta_4 = 1,60^\circ$ $\theta_5 = 78,73^\circ$ $\theta_6 = -1,80^\circ$

En la Figura 4 se muestra las nubes de puntos asociadas a ambas cámaras estéreo. La nube de puntos adquirida por la cámara 1 (cámara localizada a la izquierda del robot) se presenta en puntos de color azul. Por otro lado, los puntos de color magenta están asociados a la cámara 2 (cámara localizada a la derecha del robot). Note que, en ambas nubes de puntos es fácil visualizar el brazo robótico y más importante el efector final. Sin embargo, cuando el efector final fue posicionado frente a las cámaras estéreo, la información se asocia principalmente al efector final, como se muestra en las Figuras 4f, 4g y 4h. Además, es muy notable que las nubes de puntos cuando el robot está rotados respecto a las cámaras proveen más información de la estructura en general, pero reduce la probabilidad de detectar el efector final, como se muestra en las Figuras 4b y 4l. Finalmente, cabe destacar que, debido a que la posición de ambas cámaras respecto al robot es diferente, no existe una coincidencia directa entre ambas nubes de puntos, por lo que esta información debe ser fusionada previamente utilizando algún algoritmo de fusión de nubes de puntos para garantizar su uso.

Fusión de nubes de puntos

A pesar de que, el efector final de manipulador móvil puede ser detectado en ambas nubes de puntos,

como se muestra en la Figura 4, la información de una sola cámara muchas veces no es suficiente para garantizar una localización efectiva, como se ve en la Figura 4j. Además, ya que el algoritmo de cálculo desarrollado determina la posición del efector final utilizando el valor medio de todos los puntos que se relacionan a este, la postura y posición del robot reduce la eficiencia de nuestro sistema principalmente debido a las partes ocluidas a las cámaras. En este contexto, la utilización de múltiples cámaras aumenta el desempeño del sistema de posicionamiento propuesto. Como se ve en la Figura 4, las nubes de puntos dependen de la posición relativa entre las cámaras y el robot. El algoritmo ICP descrito en la Sección Materiales y Métodos busca fusionar ambas nubes de puntos mediante la minimización del error de distancia entre las dos nubes de puntos.

Por otra parte, el tiempo computacional del algoritmo ICP aumenta a medida que las nubes de puntos son más densas. Por lo tanto, es necesario realizar una reducción de las ambas nubes de puntos. La Figura 5 presenta las nubes de puntos reducidas para las diferentes poses del brazo robótico analizadas en este trabajo. El algoritmo de reducción propuesto en esta etapa calcula el promedio de un punto y

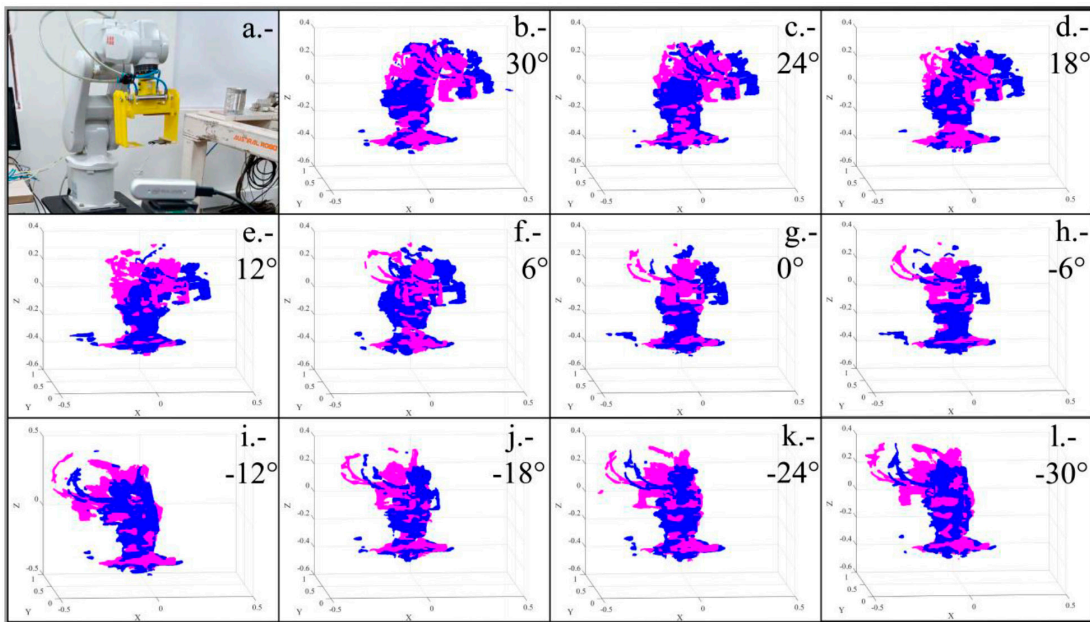


Figura 4. Adquisición de nubes de puntos e imágenes para diferentes ángulos θ_1 . 30°; 24°; 18°; 12°; 6°; 0°; -6°; -12°; -18°; -24°; 30°. En se presenta la imagen del manipulador utilizado.

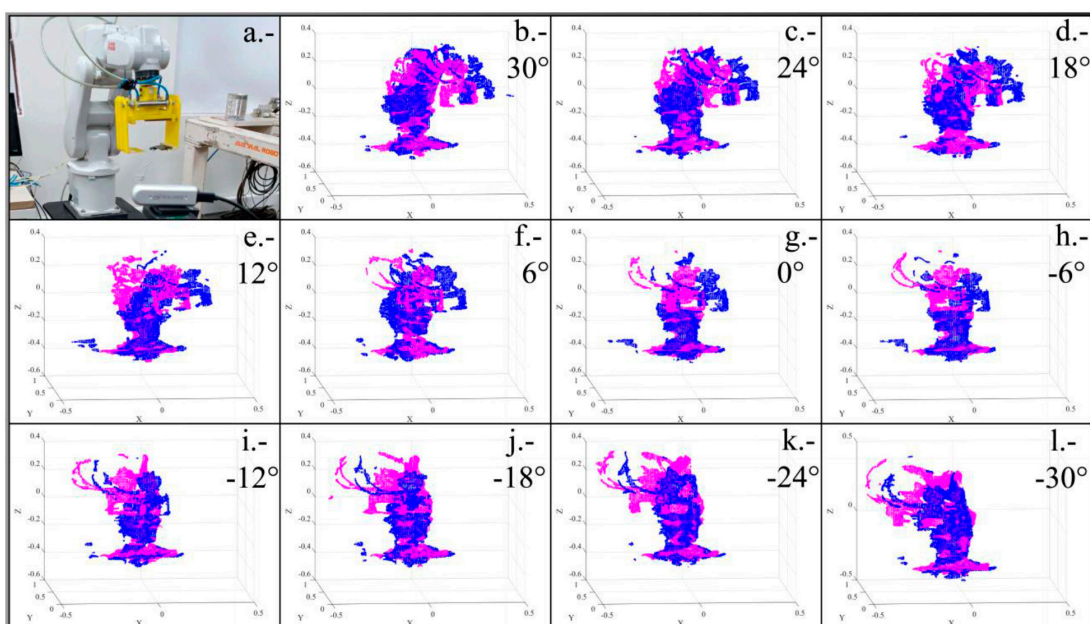


Figura 5. Nubes de puntos reducidas para diferentes ángulos θ_1 . 30°; 24°; 18°; 12°; 6°; 0°; -6°; -12°; -18°; -24°; 30°. En se presenta la imagen del manipulador utilizado.

todos aquellos puntos dentro de una esfera de radio fijo. El radio de la esfera se determina de manera empírica analizando la fusión del algoritmo ICP. Así, se determinó que el número de puntos óptimo para este proceso fue de 6800 pares de puntos. En otras palabras, se reduce la resolución de ambas nubes de puntos de aproximadamente 180.000 a 6800 puntos tridimensionales. Utilizando este algoritmo fue posible reducir el tiempo computacional de 10 minutos a 0,21 segundo. Además, el algoritmo reduce tiempo computacional a 0,1 segundo utilizando código C y archivos MEX, lo que es bastante importante para futuras aplicaciones en tiempo real. Una vez reducido el volumen de ambas nubes de puntos se ejecuta el algoritmo de ICP. La Figura 6 muestra los resultados de la fusión con ICP.

Vale la pena señalar aquí que, el algoritmo tiene un gran desempeño en la reconstrucción tridimensional del brazo robótico. Sin embargo, a medida que se tiene menos coincidencia entre las nubes de puntos, es decir, las cámaras adquieren diferentes partes de robot en su mayoría, el algoritmo reduce su eficiencia significativamente en el proceso de reconstrucción 3D. Resultados empíricos han demostrado que ambas cámaras no pueden estar separadas más de 30 cm entre sí, y ambas cámaras deben estar de frente al

brazo robótico. Adicionalmente, se ha determinado que el desempeño en la reconstrucción 3D depende de la distancia entre el brazo robótico y las cámaras. Hallazgos experimentales muestran que la distancia máxima para una reconstrucción adecuada no debe exceder los 105 cm.

Posicionamiento del manipulador robótico

Utilizando la nube de puntos fusionada y las imágenes RGB de cada cámara se utiliza un filtro de color amarillo para segmentar los puntos asociados con el efector final (ROI). El filtro de color usado mantiene el tono de la imagen deseado (color amarillo) y elimina el resto de los colores. Siguiendo la metodología descrita en la Sección Sistema de posicionamiento visual, se determina la posición del efector final respecto a la base del brazo robótico.

Finalmente, se determina la posición de efector final respecto a la base utilizando los ángulos de la pose y las distancias de cada segmento provistas por el fabricante. La Tabla 3 muestra los resultados obtenidos para cada una de las mediciones desarrolladas. Vale destacar que las medidas son respecto a las cámaras estéreo. La Tabla 4, muestra la posición promedio para cada ángulo analizado

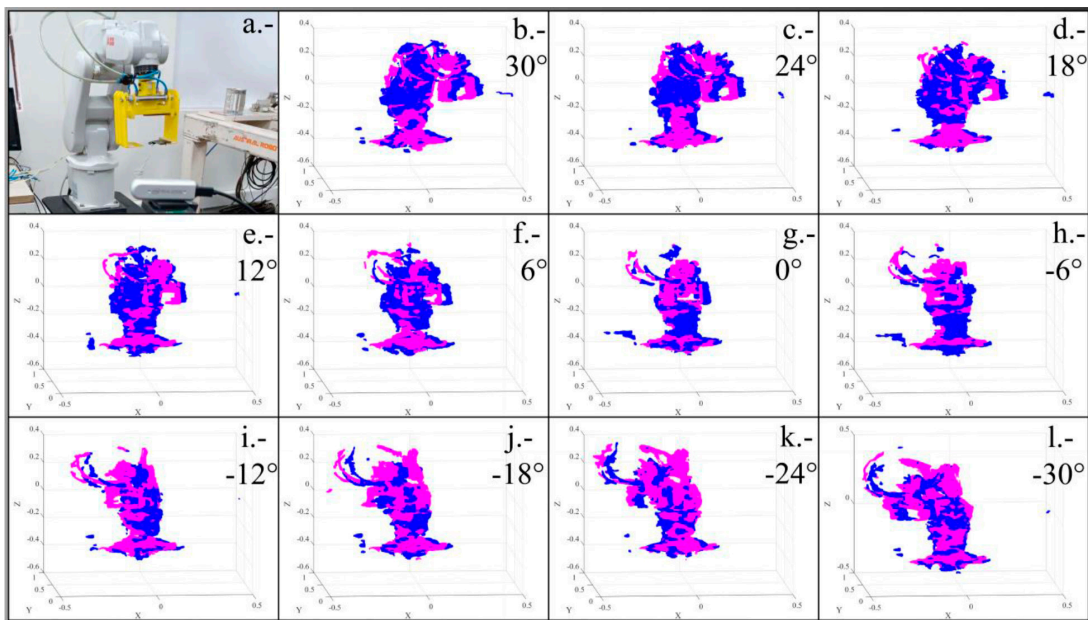


Figura 6. Nubes de puntos fusionadas utilizando algoritmo ICP para diferentes ángulos θ_1 . 30°; 24°; 18°; 12°; 6°; 0°; -6°; -12°; -18°; -24°; 30°. En se presenta la imagen del manipulador utilizado.

Tabla 3. Posición X, Y, y Z del efector final respecto a la base del brazo robótico medido con el sistema de posicionamiento visual basado en cámaras estéreo.

Ángulo [°]	Medición 1 [x y z] [cm]	Medición 2 [x y z] [cm]	Medición 3 [x y z] [cm]	Medición 4 [x y z] [cm]	Medición 5 [x y z] [cm]
-30	[-25.4, -55.9, 7.4]	[-25.7, -56.1, 7.5]	[-24.8, -53.8, 6.3]	[-25.9, -55.9, 7.2]	[-25.5, -56.0, 7.9]
-24	[-21.4, -53.2, 6.1]	[-22.2, -54.2, 7.2]	[-21.9, -54.1, 6.7]	[-22.0, -54.1, 6.6]	[-21.3, -53.1, 5.8]
-18	[-15.1, -51.0, 6.6]	[-16.1, -51.1, 6.4]	[-14.8, -50.4, 6.4]	[-16.7, -52.1, 6.8]	[-14.7, -49.6, 6.1]
-12	[-11.0, -49.0, 5.0]	[-10.1, -49.5, 6.5]	[-11.6, -50.2, 6.7]	[-12.4, -50.0, 6.3]	[-11.6, -49.8, 7.2]
-6	[-6.7, -49.0, 5.4]	[-5.8, -48.0, 5.2]	[-5.4, -48.2, 5.8]	[-5.3, -49.1, 6.4]	[-4.1, -47.6, 5.1]
0	[1.5, -47.5, 5.0]	[1.5, -47.3, 5.7]	[1.4, -47.5, 5.8]	[2.6, -47.1, 5.6]	[2.1, -47.5, 5.2]
6	[3.0, -47.3, 4.8]	[3.7, -49.7, 5.0]	[3.7, -48.8, 4.4]	[1.8, -46.8, 6.9]	[3.6, -47.9, 4.5]
12	[6.9, -50.4, 7.0]	[7.9, -50.3, 5.8]	[7.4, -50.4, 5.9]	[7.0, -49.7, 5.2]	[7.9, -49.5, 5.2]
18	[12.9, -50.3, 5.2]	[11.3, -51.2, 6.6]	[13.7, -51.4, 6.2]	[12.8, -50.4, 5.8]	[13.1, -50.4, 6.1]
24	[15.9, -52.5, 6.9]	[17.1, -51.7, 6.9]	[16.7, -52.3, 6.3]	[16.3, -52.8, 7.0]	[17.1, -51.4, 6.6]
30	[21.6, -52.4 5.9]	[22.1, -53.1 6.6]	[20.8, -52.4, 6.6]	[22.0, -53.5, 7.3]	[21.6, -52.4 5.9]

y el error asociado a cada una de las mediciones. La posición real del brazo robótico se determina utilizando el software provisto por el fabricante. Ya que el software del fabricante entrega seis ángulos directores, convertimos estos ángulos a coordenadas cartesianas utilizando la matriz de rotación respectiva.

Por otra parte, se calcula el error absoluto del sistema. Note que el sistema de posicionamiento tiene una tendencia en los datos similar a los valores reales. Los resultados experimentales muestran que el sistema de posicionamiento propuesto tiene un desempeño adecuado para determinar la posición del robot de manera indirecta. Sin embargo, para

Tabla 4. Error de la posición del efector final respecto a la base del brazo robótico.

Ángulo [°]	-30	-24	-18	-12	-6	0	6	12	18	24	30
Promedio	-25,5	-21,8	-15,5	-11,3	-5,5	1,8	3,2	7,4	12,8	16,6	21,6
Eje cámara	-55,5	-53,7	-50,8	-49,7	-48,4	-47,4	-48,1	-50,1	-50,7	-52,1	-52,8
[cm]	7,3	6,5	6,5	6,34	5,6	5,5	5,1	5,8	6,0	6,7	6,5
Promedio	-18,0	-14,3	-8,0	-3,8	2,0	9,3	10,6	14,9	20,3	24,1	29,1
Eje inercial	46,1	47,9	50,9	52,0	53,3	54,3	53,6	51,6	51,0	49,6	48,9
[cm]	56,9	56,2	56,2	56,0	55,3	55,2	54,8	55,5	55,7	56,4	56,2
Posición	-22,4	-18,2	-13,8	-9,2	-4,5	1	4,9	9,6	14,2	18,6	22,8
Real [x y z]	39,3	41,4	43,1	44,3	45,1	45,2	45,0	44,2	42,9	41,3	39,1
[cm]	50,2	50,2	50,2	50,2	50,2	50,2	50,2	50,2	50,2	50,2	50,2
Error abs	4,4	3,9	5,8	5,4	8,2	9,1	5,7	5,3	6,1	5,5	6,3
[x y z]	6,8	6,0	7,8	7,7	5,1		8,6	7,4	8,1	8,3	6,0
[cm]	6,7		6,0	5,8			4,6	5,3	5,5		

valores muy cercanos a 0° el error relativo para la posición X crece muy rápido (Tabla 4). Esto se debe principalmente a que los valores son muy cercanos a cero. Por otro lado, el error tanto para la posición en X, Y y Z se mantienen acotados y son menores al 8,3, 9,8 cm y 6,2 cm para el peor de los casos evaluados.

CONCLUSIONES

Este trabajo presenta un sistema no invasivo de posicionamiento visual para manipuladores robóticos utilizando cámaras estéreo. El sistema es provisto con un algoritmo de dos etapas que a través de un algoritmo ICP y un filtro de color determina la posición del efector final respecto a la base de un manipulador robótico. Con el fin de mejorar las mediciones y reducir los errores asociados al sistema de posicionamiento, es necesario establecer una metodología usando dispositivos de medida más precisos para determinar la posición relativa entre la base del brazo robótico y las cámaras. Los hallazgos experimentales demuestran un buen desempeño del sistema propuesto para el posicionamiento de brazos robóticos, alcanzado un error menor a 8,3 cm, 9,8 cm y 6,2 cm por cada eje. Lo indicado aquí sugiere el uso del sistema visual de posicionamiento en aplicaciones reales no invasivas, cuando la automatización y uso de otros sensores no se puede utilizar dadas las condiciones de la maquinaria o el acceso a ella. Aunque el sistema ha sido diseñado específicamente para el posicionamiento de brazo robóticos, su sistema operativo es bastante flexible para agregar otras

funcionalidades a futuro y puede ser usado en cualquier otra aplicación de posicionamiento visual. La utilización de otros algoritmos de fusión de nubes de puntos, la determinación del número óptimo de cámaras necesarias y la variación de condiciones ambientales son parte de la investigación en curso y trabajo futuro de los autores.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue parcialmente soportada y financiada por la Facultad de Ingeniería en Automatización y Robótica de la Universidad Andrés Bello, por el Departamento de Ingeniería de Sistemas y Computación de la Universidad Católica del Norte bajo el proyecto 202203010029-VRIDT-UCN. Los autores agradecen el soporte de ANID bajo los proyectos Fondecyt Iniciación 2023 con Nro. 11230962, Anillo de Investigación en Ciencia, y Tecnología ACT210052, y Fondef IDEA I+D 2021 Cod. ID21 | 10181.

REFERENCIAS

- [1] O. Menendez, F.A. Auat Cheein, M. Perez, and S. Kouro, "Robotics in Power Systems: Enabling a More Reliable and Safe Grid," *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 11, no. 2, pp. 22-34, 2017, doi: 10.1109/MIE.2017.2686458.
- [2] F.A. Auat Cheein and R. Carelli, "Agricultural Robotics: Unmanned Robotic Service Units in Agricultural Tasks," *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 7, no. 3, pp. 48-58, 2013, doi: 10.1109/MIE.2013.2252957.

- [3] P. Ramon Soria, B.C. Arrue, and A. Ollero. "A 3D-Printable Docking System for Aerial Robots: Controlling Aerial Robotic Manipulators in Outdoor Industrial Applications," *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 26, no. 1, pp. 44-53, March 2019, doi 10.1109/MRA.2018.2884744.
- [4] D. Chiaravalli, G. Palli, R. Monica, J. Aleotti, and D.L. Rizzini, "Integration of a Multi-Camera Vision System and Admittance Control for Robotic Industrial Depalletizing," in *2020 25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, 2020, pp. 667-674, doi: 10.1109/ETFA46521.2020.9212020.
- [5] J. Villacrés, R. Guamán, O. Menéndez, and F. Auat Cheein, "3D Printing Deformation Estimation Using Artificial Vision Strategies for Smart-Construction," *IECON 2021 - 47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 1-6, doi: 10.1109/IECON48115.2021.9589770.
- [6] M. Leonori, J.M. Gandarias, and A. Ajoudani, "MOCA-S: A Sensitive Mobile Collaborative Robotic Assistant Exploiting Low-Cost Capacitive Tactile Cover and Whole-Body Control," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 7, no. 3, pp. 7920-7927, 2022, doi: 10.1109/LRA.2022.3186053.
- [7] A.J. Prado, M. Torres-Torriti, and F. Auat Cheein, "Distributed Tube-Based Nonlinear MPC for Motion Control of Skid-Steer Robots with Terra-Mechanical Constraints," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 6, no. 4, pp. 8045-8052, 2021, doi: 10.1109/LRA.2021.3102328.
- [8] F. Auat Cheein, M. Torres-Torriti, N.B. Hopfenblatt, A.J. Prado, and D. Calabi "Agricultural service unit motion planning under harvesting scheduling and terrain constraints," *Journal of Field Robotics*, vol. 34, pp. 1531-1542, 2017, doi: 10.1002/rob.21738.
- [9] R. Guamán, A. Martínez, R. García, C. Muñoz, L.F. González, and F. Auat-Cheein "Recent Developments and Challenges of 3D-Printed Construction: A Review of Research Fronts," *Buildings*, vol. 12, pp. 229, 2022, doi: 10.3390/buildings12020229.
- [10] S. Ishikawa, Y. Ishibashi, P. Huang, and Y. Tateiwa, "Robot Position Control Using Force Information for Cooperative Work in Remote Robot Systems with Force Feedback," *International Journal of Communications, Network and System Sciences*, vol. 14, pp. 1-13, 2021, doi: 10.4236/ijcns.2021.141001.
- [11] D. Guo, Z. Li, A. H. Khan, Q. Feng, and J. Cai, "Repetitive Motion Planning of Robotic Manipulators with Guaranteed Precision," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 17, no. 1, pp. 356-366, 2021, doi: 10.1109/TII.2020.2970172.
- [12] N. Gafur, G. Kanagalingam, A. Wagner, and M. Ruskowski, "Dynamic Collision and Deadlock Avoidance for Multiple Robotic Manipulators," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 55766-55781, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3176626.
- [13] S. Mu, H. Qin, J. Wei, Q. Wen, S. Liu, S. Wang, S. Xu. "Robotic 3D Vision-Guided System for Half-Sheep Cutting Robot," *Mathematical Problems in Engineering*, pp. 1520686, 2020, doi: 10.1155/2020/1520686.
- [14] C. Kulpate, R. Paranjape, and M. Mehrandezh, "Precise 3D Positioning of a Robotic Arm Using a Single Camera and a Flat Mirror," *International Journal of Optomechatronics*, vol. 2, pp. 205-232, 2008, doi: 10.1080/15599610802301243.
- [15] Y. Matsuda, T. Sugi, S. Goto, and N. Egashira. "Teleoperation of robot arm with position measurement via angle-pixel characteristic and visual supporting function," *Artificial Life Robotics*, vol. 21, pp. 478-485, 2016, doi: 10.1007/s10015-016-0289-2.
- [16] J. Qu, F. Zhang, Y. Fu and S. Guo. "Multi-cameras visual servoing for dual-arm coordinated manipulation," *Robotica*, vol. 35, pp. 2218-2237, 2017. doi:10.1017/S0263574716000849.
- [17] J.M. Rendón-Mancha, A. Cárdenas, M.A. García, E. González-Galván, and B. Lara, "Robot Positioning Using Camera-Space Manipulation with a Linear Camera Model," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 26, no. 4, pp. 726-733, 2010, doi: 10.1109/TRO.2010.2050518.
- [18] A. Rezoug and M. S. Djouadi. "Visual based lane following for non-holonomic mobile robot". *IEEE EUROCON 2009*, 2009, pp. 902-907, doi: 10.1109/EURCON.2009.5167741.

- [19] D. Tian, H. Ochimizu, C. Feng, R. Cohen, and A. Vetro, "Geometric distortion metrics for point cloud compression," in *2017 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, 2017, pp. 3460-3464, doi: 10.1109/ICIP.2017.8296925.
- [20] J. Zhang, Y. Yao, and B. Deng, "Fast and Robust Iterative Closest Point," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 44, no. 7, pp. 3450-3466, 2022, doi: 10.1109/TPAMI.2021.3054619.
- [21] S. Phon-Amnuaisuk, K. Murata, L. Kovavisaruch, T. Lim, P. Pavarangkoon, and T. Mizuhara, "Visual-based Positioning and Pose Estimation," arXiv, 2022, doi: 10.48550/arxiv.2204.09232.
- [22] S. Ahmed Berrabah, H. Sahli, and Y. Baudoin, "Visual-based simultaneous localization and mapping and global positioning system correction for geo-localization of a mobile robot," *Measurement Science and Technology*, vol. 22, pp. 1-9, Doi: 10.1088/0957-0233/22/12/124003.
- [23] Y.S.L.K. Cio, M. Raison, C. Leblond Ménard, and S. Achiche, "Proof of Concept of an Assistive Robotic Arm Control Using Artificial Stereovision and Eye-Tracking," in *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, vol. 27, no. 12, pp. 2344-2352, Dec. 2019, doi: 10.1109/TNSRE.2019.2950619.
- [24] Y.-Z. Hsieh and S.S. Lin, "Robotic Arm Assistance System Based on Simple Stereo Matching and Q-Learning Optimization," *IEEE Sensors Journal*, vol. 20, no. 18, pp. 10945-10954, 2020, doi: 10.1109/JSEN.2020.2993314.
- [25] D. Banerjee, K. Yu, and G. Aggarwal, "Robotic Arm Based 3D Reconstruction Test Automation," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 7206-7213, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2794301.
- [26] V. Penza, Z. Cheng, M. Koskinopoulou, A. Acemoglu, D.G. Caldwell, and L.S. Mattos, "Vision-Guided Autonomous Robotic Electrical Bio-Impedance Scanning System for Abnormal Tissue Detection," *IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics*, vol. 3, no. 4, pp. 866-877, Nov. 2021, doi: 10.1109/TMRB.2021.3098938.
- [27] I. Ali, O.J. Suominen, E.R. Morales, and A. Gotchev, "Multi-View Camera Pose Estimation for Robotic Arm Manipulation," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 174305-174316, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3026108.
- [28] D. Tsai, D. G. Dansereau, T. Peynot, and P. Corke, "Image-Based Visual Servoing with Light Field Cameras," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 2, no. 2, pp. 912-919, April 2017, doi: 10.1109/LRA.2017.2654544.