



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA
CARRERA DE MECATRÓNICA

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE ESCANEEO
BASADO EN VISIÓN ARTIFICIAL PARA LA IMITACIÓN DEL
MOVIMIENTO DEL BRAZO HUMANO EN EL ROBOT KUKA KR5-2
ARC HW.

Trabajo de titulación previo a la obtención del
título de Ingeniera en Mecatrónica / Ingeniero
en Mecatrónica

AUTORES: EDUARDO JOSUÉ ASTUDILLO FLORES
VALERIA ANAHÍ DUEÑAS LÓPEZ

TUTOR: ING. PAÚL ANDRÉS CHASI PESANTEZ, MSc,

Cuenca – Ecuador

2024

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Eduardo Josué Astudillo Flores con documento de identificación N° 0150036945 y Valeria Anahí Dueñas López con documento de identificación N° 0804331064; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 8 de julio del 2024

Atentamente,



Eduardo Josué Astudillo Flores
0150036945



Valeria Anahí Dueñas López
0804331064

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Nosotros, Eduardo Josué Astudillo Flores con documento de identificación N° 0150036945 y Valeria Anahí Dueñas López con documento de identificación N° 0804331064, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Artículo Académico: "Diseño e Implementación de un Sistema de Escaneo Basado en Visión Artificial para la Imitación del Movimiento del Brazo Humano en el Robot Kuka Kr5-2 Arc Hw", el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniera en Mecatrónica / Ingeniero en Mecatrónica, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 8 de julio del 2024

Atentamente,



Eduardo Josué Astudillo Flores
0150036945



Valeria Anahí Dueñas López
0804331064

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Paúl Andrés Chasi Pesantez con documento de identificación N° 0103650295, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE ESCANEEO BASADO EN VISIÓN ARTIFICIAL PARA LA IMITACIÓN DEL MOVIMIENTO DEL BRAZO HUMANO EN EL ROBOT KUKA KR5-2 ARC HW, realizado por Eduardo Josué Astudillo Flores con documento de identificación N° 0150036945 y Valeria Anahí Dueñas López con documento de identificación N° 0804331064, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Artículo Académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 8 de julio del 2024

Atentamente,



Paúl Andrés Chasi Pesantez
0103650295

Dedicatoria

Eduardo Astudillo

“Si estás atento al presente, el pasado no te distraerá, entonces serás siempre nuevo”

Facundo Cabral-2016.

La culminación de este proyecto se lo dedico a mi tío Felipe, por sus consejos y enseñanzas, que desde el cielo ha sabido indicarme el camino correcto y ser inspiración para terminar este proyecto. A mis padres, pues la lucha que hicieron no ha sido en vano y a ellos les debo todo. A mis hermanos, por brindarme su cariño y ser ejemplo de dedicación y constancia.

Valeria Dueñas

“Soy quien soy, con todos mis fallos y errores. Quizás mañana sea un poco más sabio y también seré yo. Esos defectos y errores me definen, conforman las estrellas más brillantes en la constelación de mi vida”

Namjoon para Unicef - 2019.

Le dedico el resultado de este artículo a mis padres y abuelos, quienes me enseñaron que la perseverancia, dedicación y constancia permiten alcanzar grandes cosas. A mi hermana y a mi tía, por hacerme entender que es necesario tomar pausas para poder hacer un mejor trabajo. Finalmente, a mi bisabuela Bere, quien hubiera querido verme culminar esta etapa, por ser pilar fundamental de esta familia. Aunque ya no esté con nosotros, su legado siempre se mantendrá vivo.

Agradecimientos

Eduardo Astudillo

En primer lugar, doy gracias a mis padres por ser siempre la inspiración para seguir adelante, por demostrarme que el único límite es uno mismo, por haberme enseñado que junto con esfuerzo, trabajo, dedicación y constancia se alcanza cualquier meta, de manera especial doy gracias por todo el sacrificio que han realizado para que sea posible alcanzar este punto. A mis hermanos por ser un pilar fundamental en mi día a día y por ser mi guía a lo largo de este trayecto, además de ser un ejemplo de disciplina todos los días. A mis abuelos, por estar presentes y apoyarme en los momentos en los que más lo necesitaba, por su cariño, consejos y las sonrisas que siempre me acogían. A mis tíos, por apoyarme en cada momento de necesidad y darme la mano para seguir adelante, de manera especial a Felipe y Pablo a quienes les debo este momento. A mis amigos y todas aquellas personas que confiaron en mí y supieron extenderme la mano para seguir adelante, especialmente a Valeria, Pamela, Daniel y Mateo que estuvieron presentes en los momentos más oscuros hasta la fecha y supieron ser luz, mostrarme una sonrisa y ser un apoyo incondicional. Por último, agradezco al Ing. Paul Chasi el cual confió en nosotros, fue guía y nos permitió culminar este proyecto

Valeria Dueñas

Me gustaría agradecer a mis padres quienes se esforzaron por permitirme estudiar en esta Universidad y me inculcaron que la honestidad, rectitud, constancia y esfuerzo abre las puertas de cualquier lugar. A mis abuelos que me enseñaron a no tener miedo de arriesgar todo y empezar desde cero, que el trabajo duro pero honrado siempre traerá consigo una recompensa. A mis mejores amigos Nicolás, Steeven y Elizabeth, por levantarme cada vez que sentía que caería. A Eduardo, por creer en mí e iluminar mis días grises. Finalmente al Ing. Paul Chasi que confió en nosotros para llevar a cabo esta investigación y otras tareas a lo largo de nuestra carrera Universitaria.

Este documento fue realizado enteramente en L^AT_EX

Índice

Certificado de responsabilidad y autoría del trabajo de titulación	I
Certificado de cesión de derechos de autor del trabajo de titulación a la Universidad Politécnica Salesiana	II
Certificado de dirección del trabajo de titulación	III
Dedicatoria	IV
Agradecimientos	V
1. Introducción	2
2. Metodología	3
2.1. Cinemática inversa.	3
2.2. Determinación de ángulos mediante escaneo	5
3. Resultados y discusión	6
3.1. Análisis de estabilidad de las coordenadas de la muñeca	6
3.2. Pruebas de posicionamiento del robot a partir del escaneo de los ángulos . . .	6
3.2.1. Evaluación de desempeño del sistema de escaneo del eje de movimiento A1	6
3.2.2. Evaluación de desempeño del sistema de escaneo del eje de movimiento A2 y A3	7
4. Conclusiones y recomendaciones	7
Referencias	7



DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE ESCANEADO BASADO EN VISIÓN ARTIFICIAL PARA LA IMITACIÓN DEL MOVIMIENTO DEL BRAZO HUMANO EN EL ROBOT KUKA KR5-2 ARC HW

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A SCANNING SYSTEM BASED ON ARTIFICIAL VISION FOR THE IMITATION OF HUMAN ARM MOVEMENT IN THE KUKA KR5-2 ARC HW ROBOT

Eduardo Astudillo ¹, , Valeria Dueñas ², , Paul Chasi ³, 

Resumen

Este artículo describe el diseño e implementación de un sistema de escaneo basado en visión artificial para replicar el movimiento del brazo humano en el robot KUKA KR5-2 ARC HW. Utilizando una cámara web, el sistema captura y procesa imágenes para detectar puntos de referencia del brazo mediante Mediapipe y OpenCv. El estudio evalúa el desempeño del sistema en los ejes de movimiento del robot (A1, A2 y A3), analizando los errores absolutos y relativos. Los resultados muestran que el sistema imita efectivamente los movimientos del hombro en el eje A2 y del codo en el eje A3. Sin embargo, en el eje A1 (cadera), se observó un margen de error que sugiere la necesidad de una segunda cámara para estabilizar la coordenada "z". Este sistema podría mejorar significativamente la eficiencia de los robots industriales en aplicaciones de manufactura, ensamblaje y manipulación de materiales peligrosos.

Palabras clave: Visión artificial, robot colaborativo, escaneo de movimiento, Mediapipe, OpenCV, automatización industrial, manufactura avanzada, interacción humano-robot, brazo robótico, aplicación industrial.

Abstract

This article describes the design and implementation of a scanning system based on artificial vision to replicate human arm movements in the KUKA KR5-2 ARC HW robot. Using a webcam, the system captures and processes images to detect arm reference points using Mediapipe and OpenCv. The study evaluates the system's performance in the robot's axes of motion (A1, A2, and A3) by analyzing absolute and relative errors. The results show that the system effectively imitates shoulder movements in axis A2 and elbow movements in axis A3. However, for axis A1 (hip), a margin of error was observed, suggesting the need for a second camera to stabilize the "z" coordinate. This system has the potential to significantly improve the efficiency of industrial robots in manufacturing, assembly, and handling hazardous materials.

Keywords: Computer vision, collaborative robot, motion scanning, Mediapipe, OpenCV, industrial automation, advanced manufacturing, human-robot interaction, robotic arm, industrial application.

1. Introducción

La importancia del sector industrial para la economía mundial es indiscutible, siendo fundamental para el crecimiento y el empleo [1,2]. La transformación digital de los procesos industriales es impulsada por avances en software e información [3]. El Foro Económico Mundial (WEF) en 2016 destacó que los robots avanzados son cruciales para la cuarta revolución industrial, al ser "más prácticos que el trabajo del ser humano en la fabricación" [4].

En la Cuarta Revolución Industrial, los robots colaborativos son esenciales en producción y manufactura, combinando toma de decisiones humana con la repetibilidad y fuerza de los robots para aumentar la productividad y reducir costos [5,6]. Los sistemas de visión artificial, que utilizan cámaras, sensores y láseres, son vitales para la inspección de materiales, reconocimiento de objetos y patrones, y análisis de componentes electrónicos [7–9]. Estos sistemas requieren un control adecuado de iluminación y operan mejor en entornos cerrados con iluminación constante [10]. Integran sensor, controlador y transmisión de datos en un solo dispositivo, siendo cruciales en la visión artificial de robots manipuladores industriales.

Herramientas como KUKA.VisionTech automatizan procesos industriales combinando cámaras, sensores avanzados y algoritmos de procesamiento de imágenes, operando con la unidad de control del robot KR C4 y el KUKA System Software 8.3 x [11]. En universidades de países en vías de desarrollo indus-

trial, es más práctico adaptar estas tecnologías a los recursos existentes, optimizando el uso de equipos y fomentando la investigación y desarrollo [12].

Lopez-Juarez et al. (2018) identifican la necesidad de una cámara de escaneo 3D estática para ajustar la velocidad y activar paradas de emergencia en un autómatas KR60-3 [13]. Rivera-Calderón et al. (2022) subraya la importancia de cámaras monocromáticas en tiempo real para distinguir colores y dimensiones en probetas operadas por un autómatas UR5 [14]. Boby et al. (2016) proponen un método de calibración de robots mediante una única imagen no precalibrada, considerando la profundidad de enfoque [15].

La integración de sistemas de visión artificial en el ámbito industrial mejora la precisión y eficiencia de los procesos y abre nuevas posibilidades en robótica avanzada. Este contexto es esencial para nuestra investigación en el diseño e implementación de un sistema de escaneo basado en visión artificial para imitar el movimiento del brazo humano en el robot KUKA KR5-2 ARC HW, destacando la importancia de avanzar en la integración de estas tecnologías.

Para enviar datos al KR C2 se utiliza una conexión Ethernet y el software RoboDK, que ofrece una API con rutinas y comandos para programar robots usando lenguajes como Python, Matlab y C. La conexión online con el robot requiere seguir los pasos detallados en [16] y agregar comandos de [17] para la conexión y el movimiento del robot en el código. El proceso del sistema de escaneo se muestra en la **Figura 1**.

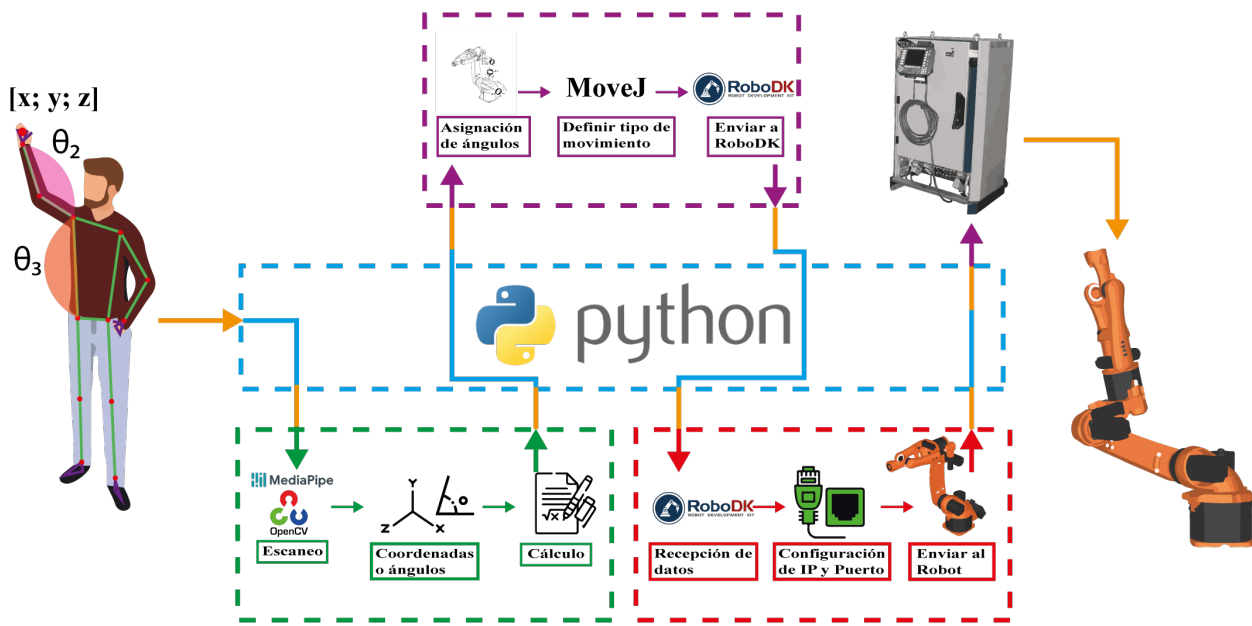


Figura 1. Diagrama del proceso seguido para el desarrollo del sistema de escaneo.

2. Metodología

2.1. Cinemática inversa.

El KUKA KR5-2 arc HW cuenta con 6 ejes de movimiento denominados como A1, A2, A3, A4, A5 y A6 tal como se muestra en la **Figura 2**.

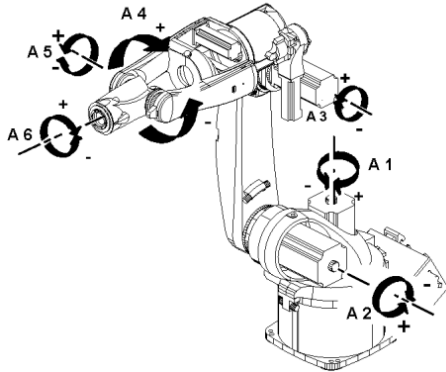
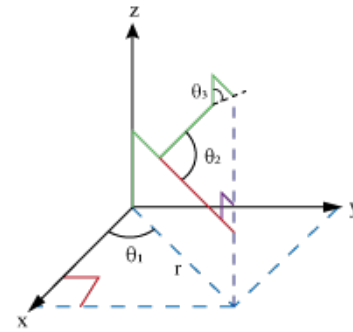
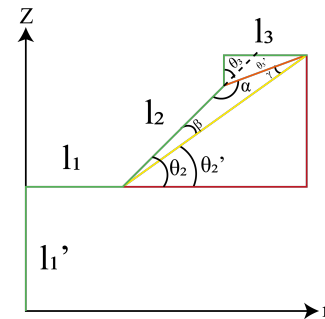


Figura 2. Ejes de movimiento del KUKA KR5-2 arc HW. [18]

Para simplificar el análisis se trabajó únicamente con los tres primeros ejes de movimiento **A1**, **A2** y **A3** del robot, ya que estos permiten establecer la posición del efector final. En el caso de las últimas tres juntas (**A4**, **A5** y **A6**), se asumió que permanecerían estáticas, ya que controlan la orientación del efector y no influyen en su posición tal como se explica en [19]. Se empleó el método geométrico para hallar las ecuaciones que permitan deducir los ángulos de las articulaciones en función de la ubicación del efector final. Para ello, se colocó al robot en una posición de análisis determinada, donde las variables l_1 , l_2 y l_3 corresponden a la longitud de los eslabones ubicados en los ejes de rotación **A1**, **A2** y **A3** mientras que l'_1 representa la altura del primer eslabón, h representa el vector formado desde la intersección del eslabón 1 y el eslabón 2 hacia el efector final y r se interpreta como la proyección del eslabón 2 y 3 en el eje X visto de manera lateral. Los ángulos θ_1 , θ_2 y θ_3 son los ejes de movimiento del 1 al 3 y θ'_2 es el ángulo formado desde r hacia h . Finalmente la variable β es el ángulo formado desde h hacia el eslabón 2, γ es ángulo medido desde el eslabón 3 hacia h y α es el ángulo evaluado desde el eslabón 2 hacia la hipotenusa del triángulo formado por el eslabón 3. Esto se observa en la **Figura 3(a)** y **(b)**.



(a) Vista isométrica



(b) Vista lateral

Figura 3. Posición del robot para el análisis inverso.

Se realiza el análisis en el plano formado por el eje z y la proyección del brazo en el plano horizontal, como se observa en la vista lateral de la **Figura 3(b)**. Extrayendo los triángulos formados por los segmentos del robot y rectas trazadas desde cada articulación hasta la posición del efector final se obtuvieron los siguientes elementos de análisis que se representan en la **Figura 4(a)** y **(b)**.

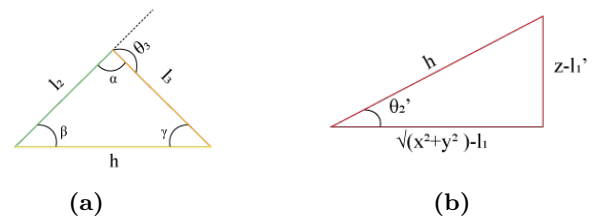


Figura 4. Relaciones trigonométricas.

Se emplean las relaciones trigonométricas existentes para calcular los θ_i iniciando desde θ_3 para hallar posteriormente θ_2 y θ_1 . Empleando el triángulo representado en la **Figura 4(b)** se puede deducir a través del teorema de Pitágoras el valor de la hipotenusa del triángulo formado, teniendo que:

$$h^2 = (\sqrt{x^2 + y^2} - l_1)^2 + (z - l'_1)^2$$

$$h = \sqrt{(\sqrt{x^2 + y^2} - l_1)^2 + (z - l'_1)^2} \quad (1)$$

De la misma manera, empleando el triángulo usado anteriormente se puede determinar el ángulo θ'_2 por medio del uso de identidades trigonométricas, teniendo que:

$$\begin{aligned} \tan(\theta'_2) &= \frac{z - l'_1}{\sqrt{x^2 + y^2} - l_1} \\ \theta'_2 &= \arctan\left(\frac{z - l'_1}{\sqrt{x^2 + y^2} - l_1}\right) \end{aligned} \quad (2)$$

Por consiguiente, se aplica la ley de cosenos en el triángulo formado en la **Figura 4(a)** con el fin de conocer la expresión que defina la magnitud del ángulo α . De esta manera se tiene:

$$h^2 = l_3^2 + l_2^2 - 2l_3l_2 \cos(\alpha)$$

Se reemplaza la expresión de h descrita en (1)

$$\begin{aligned} (\sqrt{(\sqrt{x^2 + y^2} - l_1)^2 + (z - l'_1)^2})^2 &= \\ l_3^2 + l_2^2 - 2l_3l_2 \cos(\alpha) \\ (\sqrt{x^2 + y^2} - l_1)^2 + (z - l'_1)^2 &= l_3^2 + l_2^2 - 2l_3l_2 \cos(\alpha) \\ -\cos \alpha &= \frac{(\sqrt{x^2 + y^2} - l_1)^2 + (z - l'_1)^2 - l_3^2 - l_2^2}{2l_3l_2} \end{aligned} \quad (3)$$

De la misma manera se define la magnitud del ángulo β por medio de la ley de cosenos utilizando de igual manera el triángulo representado en la **Figura 4(a)**.

$$l_3^2 = h^2 + l_2^2 - 2hl_2 \cos \beta$$

Por consiguiente, se reemplaza la expresión de h descrita en (1) y despejando $\cos(\beta)$, se obtiene:

$$\begin{aligned} -\cos \beta &= \frac{l_3^2 - l_2^2 - [(\sqrt{x^2 + y^2} - l_1)^2 + (z - l'_1)^2]}{2l_2[(\sqrt{x^2 + y^2} - l_1)^2 + (z - l'_1)^2]} \\ \beta &= \arccos\left(-\frac{l_3^2 - l_2^2 - [(\sqrt{x^2 + y^2} - l_1)^2 + (z - l'_1)^2]}{2l_2[(\sqrt{x^2 + y^2} - l_1)^2 + (z - l'_1)^2]}\right) \end{aligned} \quad (4)$$

Analizando la vista lateral del robot expuesta en la **Figura 3(a)** se puede deducir una relación entre θ_3 y el ángulo α , donde se tiene:

$$\theta_3 + \alpha = 180$$

$$\alpha = 180 - \alpha_3 \quad (5)$$

Reemplazando (5) en(3) se tiene:

$$\begin{aligned} -\cos(180^\circ - \theta_3) &= \frac{(\sqrt{x^2 + y^2} - l_1)^2 + (z - l'_1)^2 - l_3^2 - l_2^2}{2l_3l_2} \\ -[\cos(180) \cos(\theta_3) + \sin(180) \sin(\theta_3)] &= \end{aligned}$$

$$\frac{(\sqrt{x^2 + y^2} - l_1)^2 + (z - l'_1)^2 - l_3^2 - l_2^2}{2l_3l_2}$$

$$\cos(\theta_3) = \frac{(\sqrt{x^2 + y^2} - l_1)^2 + (z - l'_1)^2 - l_3^2 - l_2^2}{2l_3l_2} \quad (6)$$

Analizando la relación trigonométrica existente entre la tangente, coseno y seno de θ_3 , se tiene:

$$\begin{aligned} \tan \theta_3 &= \frac{\sin \theta_3}{\cos \theta_3} \\ \theta_3 &= \tan\left(\frac{\sin(\theta_3)}{\cos(\theta_3)}\right) + \varphi \end{aligned} \quad (7)$$

Donde:

$$\varphi = 11,71247^\circ$$

Se recuerda que la constante φ representa una corrección de ángulo debido a que se utiliza un vector que comienza al final del segundo eslabón del autómatas y termina en el extremo del tercer eslabón, el cual se puede visualizar de color naranja en la perspectiva lateral de la **Figura 3(a)**.

Recordando la identidad trigonométrica básica de la suma de senos y cosenos elevados al cuadrado, se tiene que:

$$\sin^2(\theta_3) + \cos^2(\theta_3) = 1$$

$$\sin(\theta_3) = \sqrt{1 - \cos^2(\theta_3)} \quad (8)$$

Dado que se conoce la expresión del $\sin(\theta_3)$ representada en la ecuación[8] y el $\cos(\theta_3)$ mostrada en (6) se pueden sustituir estos términos directamente en (7), obteniendo:

$$\theta_3 = \tan\left(\frac{\sqrt{1 - \left(\frac{(\sqrt{x^2 + y^2} - l_1)^2 + (z - l'_1)^2 - l_3^2 - l_2^2}{2l_3l_2}\right)^2}}{\frac{(\sqrt{x^2 + y^2} - l_1)^2 + (z - l'_1)^2 - l_3^2 - l_2^2}{2l_3l_2}}\right) + 11,71247^\circ \quad (9)$$

Por consiguiente, se analiza la vista lateral del robot expuesta en la **Figura 3(a)** se puede deducir una relación entre θ_2 y el ángulo β , donde se tiene:

$$\theta_2 = \theta'_2 + \beta \quad (10)$$

Debido a que se conoce la expresión de θ'_2 representada en la (2) y β mostrada en la (4) se pueden sustituir estos términos directamente en la ecuación (10), obteniendo:

$$\begin{aligned} \theta_2 &= \arctan\left(\frac{z - l'_1}{\sqrt{x^2 + y^2} - l_1}\right) \\ &+ \arccos\left(\frac{-l_3^2 + l_2^2 + [(\sqrt{x^2 + y^2} - l_1)^2 + (z - l'_1)^2]}{2l_2[(\sqrt{x^2 + y^2} - l_1)^2 + (z - l'_1)^2]}\right) \end{aligned} \quad (11)$$

Para hallar θ_1 será necesario analizar la proyección de robot en el plano XY que se puede visualizar en la **Figura 3(b)**, donde se puede concluir que debido al movimiento del robot su sombra formará un triángulo rectángulo el cual depende únicamente de las coordenadas “x” y “y” del efector final, de esta manera se utiliza trigonometría básica para definir θ_1 , teniendo:

$$\tan(\theta_1) = \frac{-y}{x}$$

$$\theta_1 = \arctan\left(\frac{-y}{x}\right)$$

Obtenidas las ecuaciones que permiten determinar los ángulos θ_1 , θ_2 y θ_3 , se determinaran las diferentes configuraciones del autómatas para alcanzar la posición dada. Ya que se trabajó solo con los tres primeros ejes de movimiento se obtendrán únicamente 4 posibles soluciones, mismas que se dividen en dos grandes grupos según la posición del hombro: “Left Shoulder” y “Right Shoulder”, estos a su vez se subdividen en dos posiciones del codo: “Elbow-down” y “Elbow-up” como se muestra en la **Figura 5**.

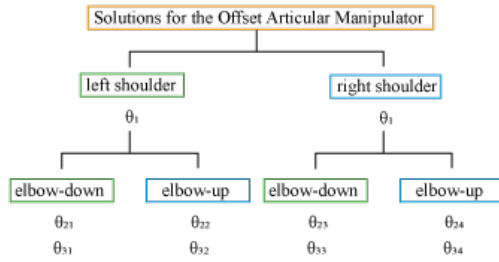


Figura 5. Cuatro tipos de configuraciones posibles para llegar al punto.

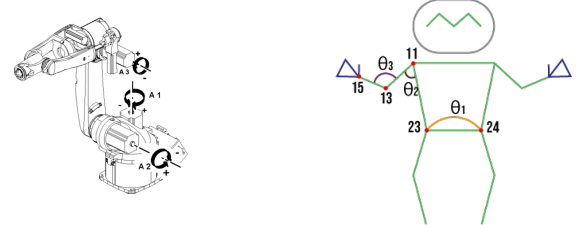
Siguiendo el diagrama mostrado en la **Figura 5** y colocando al robot en la posición de análisis $(1007, 107; -1007, 107; 994, 264)[mm]$, que representa la ubicación del efector final en x , y y z respectivamente, se obtuvo que mediante el cálculo de la cinemática inversa en la:

- **Configuración 1:** El robot se posicionará en $(1007.203; -1007.203; 994.021)[mm]$ utilizando las coordenadas articulares: $\theta_1 = 45^\circ$, $\theta_{21} = -6.05^\circ$, y $\theta_{31} = -21.57^\circ$.
- **Configuración 2:** El robot se posicionará en $(1007.107; -1007.107; 994.264)[mm]$ utilizando las coordenadas articulares: $\theta_1 = 45^\circ$, $\theta_{22} = -45^\circ$, y $\theta_{23} = 45^\circ$.
- **Configuración 3:** El robot se posicionará en $(-1007.324; 1007.324; 1080.982)[mm]$ utilizando las coordenadas articulares: $\theta_1 = -135^\circ$, $\theta_{32} = -18.45^\circ$, y $\theta_{33} = -6.08^\circ$.

- **Configuración 4:** El robot se posicionará en $(-1007.553; 1007.553; 0)[mm]$ utilizando las coordenadas articulares: $\theta_1 = -135^\circ$, $\theta_{24} = -45.5^\circ$, y $\theta_{34} = 47.07^\circ$.

2.2. Determinación de ángulos mediante escaneo

La cinemática inversa mostró que el efector final del robot puede alcanzar el punto final sin imitar el movimiento del brazo humano. Para solucionar esto, se usaron los puntos de referencia del hombro, codo, muñeca y cadera obtenidos de **Mediapipe** para calcular los ángulos θ_1 , θ_2 y θ_3 de los tres primeros ejes de movimiento del robot, como se muestra en la **Figura 6(a)**. La relación entre las juntas del robot y las escaneadas con **Mediapipe** es directa, como se ilustra en la **Figura 6(b)**.



(a) Ejes de movimiento [18].

(b) Puntos de referencia Mediapipe.

Figura 6. Ángulos articulares y puntos de referencia del cuerpo humano.

- **Cálculo de θ_1 .**

θ_1 es el ángulo de giro alrededor del eje "z" en la primera articulación (A1) del robot, relacionado con el giro de la cadera. Para calcular este ángulo, se mide la distancia entre los puntos "Right_hip" y "Left_hip" (puntos 23 y 24 en la **Figura 6(a)** y **(b)**). Esta distancia se determina usando las coordenadas “x” y “y” obtenidas del escaneo, como se muestra en la ecuación (12).

$$distancia = \sqrt{(Right_hip.x - Left_hip.x)^2 + (Right_hip.y - Left_hip.y)^2} \quad (12)$$

Cuando el usuario gira su cadera frente a la cámara, la distancia entre los puntos de interés (Right_hip y Left_hip) varía. Se establece una referencia de píxeles máxima mediante pruebas iniciales para determinar la relación entre esta distancia y el giro de la cadera, utilizando una regla de tres simple. Esta configuración inicial depende de la iluminación del área de trabajo. Debido a la repetitividad del proceso, se emplea una función para calcular el ángulo de giro.

Función ángulo_1(*distancia*):

```

if distancia > pixeles_maximos then
  | distancia = pixeles_maximos;
end
distancia = (  $\frac{\textit{distancia} \times 90}{\textit{pixeles\_maximos}}$  )
ángulo = -(distancia - 90)
return distancia

```

- **Cálculo de θ_2 y θ_3 .**

El proceso es idéntico y se repite para ambos ángulos, por lo que se propone la siguiente función:

Función calcular_ángulo(*a*, *b*, *c*):

```

a = convertir_a_array(a) ; // Inicio
b = convertir_a_array(b) ; // Medio
c = convertir_a_array(c) ; // Final
radianes = arctan2(cy-by, cx-bx) -
arctan2(ay-by, ax-bx) ; // Calcular
ángulo en radianes
ángulo = abs(radianes*180.0/pi) ;
// Convertir a grados
if ángulo > 180.0 then
  | ángulo = 360 - ángulo ; // Ajustar
  | ángulo si es mayor a 180 grados
end
return ángulo

```

Para calcular el ángulo entre dos vectores, se definen tres puntos: inicial (*a*), medio (*b*) y final (*c*). Esto permite obtener dos vectores relativos al punto medio: \vec{ba} y \vec{bc} . Luego, se calculan los ángulos de estos vectores respecto al eje x utilizando la función arco tangente de dos argumentos, que asegura la precisión en la determinación del cuadrante del ángulo.

$$\begin{aligned} \text{ángulo } \vec{ba}: & \arctan 2(a_y - b_y, a_x - b_x) \\ \text{ángulo } \vec{bc}: & \arctan 2(c_y - b_y, c_x - b_x) \end{aligned}$$

Para calcular el ángulo relativo entre los dos vectores, se determina la diferencia entre los ángulos de cada uno de la siguiente manera:

$$\theta_i = \arctan 2(c_y - b_y, c_x - b_x) - \arctan 2(a_y - b_y, a_x - b_x) \quad (13)$$

Finalmente, se ajustará el ángulo para que esté en un rango de 0 a 180 grados, ya que el movimiento del brazo y el ángulo entre el brazo y la cadera no superan este límite.

3. Resultados y discusión

3.1. Análisis de estabilidad de las coordenadas de la muñeca

La cinemática inversa demuestra que las ecuaciones para los ángulos de giro del robot dependen

de las coordenadas del efector final. Por ello, es esencial que las coordenadas "x", "y" y "z" de la muñeca sean estables para evitar movimientos inesperados y asegurar precisión. Sin embargo, el escaneo de profundidad con una sola cámara web, como se menciona en MediaPipe [20], aún presenta inestabilidad.

Se realizó un análisis de estabilidad de la posición de la muñeca durante 100 segundos. Las coordenadas "x" y "y" mostraron un comportamiento lineal con una desviación menor a 0.1 píxeles, indicando estabilidad. Sin embargo, la coordenada "z" presentó cambios bruscos en cortos periodos, lo implica posibles movimientos inesperados que podrían afectar la estabilidad del robot. De esta manera la coordenada "z" podría ser una limitante en el sistema.

3.2. Pruebas de posicionamiento del robot a partir del escaneo de los ángulos

Para verificar la precisión de los ángulos de movimiento del robot en relación con los ángulos reales medidos en la cadera, hombro y codo utilizando goniómetros, se realizaron pruebas de posicionamiento en cada articulación del robot. Las primeras tres pruebas evaluaron el movimiento independiente de cada articulación, mientras que la cuarta prueba combinó los tres ejes de movimiento para asegurar precisión en movimientos simultáneos. Se calcularon el error absoluto, el error relativo y la desviación estándar para evaluar el desempeño del sistema de escaneo.

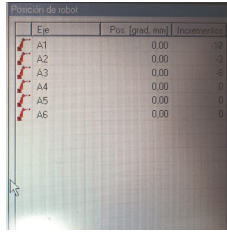
Las Figuras 7, 8 y 9 muestran ejemplos de cómo se realizó el escaneo y el posicionamiento del robot.

3.2.1. Evaluación de desempeño del sistema de escaneo del eje de movimiento A1

El método para determinar el ángulo de giro de la primera articulación del robot (A1) requiere medir la distancia entre dos puntos de referencia en la cadera. Se observó que la variación en esta distancia se vuelve significativa principalmente para ángulos superiores a 40°. El sistema de escaneo tiene dificultades para detectar variaciones con ángulos inferiores a 35°, lo que limita su precisión en esta articulación y resulta en un error absoluto notable de 31%.



(a) Proceso de medición del ángulo producido por el giro de la cadera.

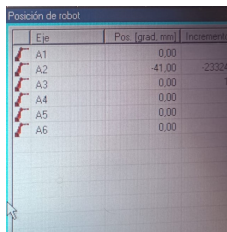


(b) Posicionamiento del robot.

Figura 7. Escaneo del ángulo estimado de la cadera comparado con el posicionamiento del robot.



(a) Proceso de medición del ángulo producido por el giro de la cadera.

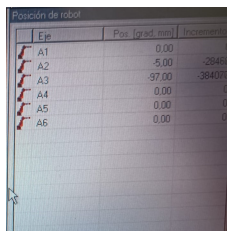


(b) Posicionamiento del robot.

Figura 8. Escaneo del ángulo estimado del hombro comparado con el posicionamiento del robot.



(a) Proceso de medición del ángulo producido por el giro de la cadera.



(b) Posicionamiento del robot.

Figura 9. Escaneo del ángulo estimado del codo comparado con el posicionamiento del robot.

3.2.2. Evaluación de desempeño del sistema de escaneo del eje de movimiento A2 y A3

Para las pruebas del sistema de escaneo del robot, el rango de movimiento de la articulación A2 se limita a 0° a -90° debido a restricciones del hombro, en lugar del rango completo de 65° a -180° [21]. El movimiento se basa en una referencia con el brazo estirado horizontalmente y, si el ángulo escaneado es menor de 0° , se envía 0° al controlador para evitar colisiones con el suelo. El error absoluto promedio en esta articulación es

de 0.82° y el error relativo es del 3%, indicando una buena precisión, aunque las pequeñas desviaciones son atribuibles a cambios mínimos en la posición, como los causados por la respiración.

Para el codo, el rango de movimiento se ajusta a 0° a -112° , en lugar del rango completo de 170° a -110° [21], debido a restricciones articulares, y la medición del ángulo de giro se basa en la posición del antebrazo. El error absoluto promedio en esta articulación es de 1.80° y el error relativo es del 5%, lo que también muestra una precisión adecuada. Las pequeñas desviaciones observadas son similares a las de la articulación A2 y pueden ser influidas por cambios en la posición, como la respiración.

4. Conclusiones y recomendaciones

En conclusión, la aplicación de la cinemática inversa requiere la estabilidad de las coordenadas de posición. No obstante, la coordenada "z" mostró variaciones abruptas, causando inestabilidad en el robot y dificultando su uso para el escaneo del brazo humano.

El método de determinación de ángulos mediante escaneo demostró ser eficaz en los ejes A2 y A3, con errores relativos promedios de 3% (0.82°) y 5% (1.80°), respectivamente, lo que lo hace adecuado para estas articulaciones. En contraste, el eje A1 presentó un error relativo promedio de 31% (4.21°) y permitió determinar ángulos solo entre 35° y 90° , lo que limita su implementación.

Para mejorar la precisión, se recomienda estabilizar la coordenada "z" mediante una cámara de profundidad o una segunda cámara web. El método de escaneo es viable para las juntas A2 y A3, mejorando la funcionalidad de robots sin aplicaciones de escaneo o tracking y facilitando la implementación de nuevos procesos de trabajo.

Referencias

- [1] H. Lasi, "Industrial intelligence-a business intelligence-based approach to enhance manufacturing engineering in industrial companies," *Procedia CIRP*, vol. 12, pp. 384-389, 2013.
- [2] R. Davies, "Industry 4.0: Digitalisation for productivity and growth," 2015.
- [3] J. L. del Val Román, "Industria 4.0: la transformación digital de la industria," in *Valencia: Conferencia de Directores y Decanos de Ingeniería Informática, Informes CODDII*, 2016.

- [4] WEF, “The future of jobs. employment, skills and workforce strategy for the fourth industrial revolution,” Davos, Switzerland, 2016, available online: http://www3.weforum.org/docs/WEF_Future_of_Jobs.pdf (accessed January 30, 2016).
- [5] F. Sherwani, M. M. Asad, and B. S. K. K. Ibrahim, “Collaborative robots and industrial revolution 4.0 (ir 4.0),” in *2020 International Conference on Emerging Trends in Smart Technologies (ICETST)*. IEEE, 2020, pp. 1–5.
- [6] M. Soori, R. Dastres, B. Arezoo, and F. K. G. Jough, “Intelligent robotic systems in industry 4.0: A review,” *Journal of Advanced Manufacturing Science and Technology*, pp. 2024007–0, 2024.
- [7] M. Javaid, A. Haleem, R. P. Singh, S. Rab, and R. Suman, “Exploring impact and features of machine vision for progressive industry 4.0 culture,” *Sensors International*, vol. 3, p. 100132, 2022.
- [8] R. L. Silva, M. Rudek, A. L. Szejka, and O. C. Junior, “Machine vision systems for industrial quality control inspections,” in *Product Lifecycle Management to Support Industry 4.0: 15th IFIP WG 5.1 International Conference, PLM 2018, Turin, Italy, July 2-4, 2018, Proceedings 15*. Springer, 2018, pp. 631–641.
- [9] O. O. Vergara-Villegas, V. G. Cruz-Sánchez, H. de Jesús Ochoa-Domínguez, M. de Jesús Nandayapa-Alfaro, and Á. Flores-Abad, “Automatic product quality inspection using computer vision systems,” *Lean manufacturing in the developing world: Methodology, case studies and trends from Latin America*, pp. 135–156, 2014.
- [10] E. García, “Visión artificial,” *FUOC Fundación para la Universitat Oberta de Catalunya*, 2012.
- [11] K. AG, “Kuka.visiontech,” 2024, Último acceso: 2 de julio de 2024. [Online]. Available: https://www.kuka.com/es-es/productos-servicios/sistemas-de-robot/software/software-de-aplicaci%C3%B3n/kuka_visiontech
- [12] H. PATARROYO, “Sistema de visión artificial para el robot rhino usando matlab®.” 2010.
- [13] I. Lopez-Juarez, R. Rios-Cabrera, E. Rojas-Sanchez, A. Maldonado-Ramirez, and G. Lefranc, “Grounding the lexicon for human-robot interaction during the manipulation of irregular objects,” in *2018 7th International Conference on Computers Communications and Control (ICCCC)*, 2018.
- [14] S. Rivera-Calderón, R. Pérez-San Lázaro, and C. Vazquez-Hurtado, “Online assessment of computer vision and robotics skills based on a digital twin,” in *2022 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)*. IEEE, 2022, pp. 1994–2001.
- [15] R. A. Bobby and S. K. Saha, “Single image based camera calibration and pose estimation of the end-effector of a robot,” in *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2016, pp. 2435–2440.
- [16] RoboDK, “Robodk api,” 2023.
- [17] —, “Robodk driver for kuka,” 2023.
- [18] KUKA, “Kr 5 arc hw, kr 5 arc hw-2,” 2011.
- [19] W. Ma, G. Gao, and J. Zhao, “Kinematics modelling and trajectory planning for an industrial robot,” in *2018 10th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC)*. IEEE, 2018, pp. 1–6.
- [20] MediaPipe, “Holistic,” 2023.
- [21] KUKA, “Kr 5 arc hw,” 2005.