

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE CUENCA CARRERA DE MECATRÓNICA

REDISEÑO DEL SISTEMA MECATRÓNICO Y PROPUESTA DE CONTROL DEL ROBOT DELTA DEL LABORATORIO DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN MODULAR (MPS)

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

AUTORES: JEAN PIERRE ARTEAGA FIGUEROA EDUARDO JOSUE PINEDA GUNCAY TUTOR: ING. ÁNGEL EUGENIO CÁRDENAS CADME, M.Sc. CO-TUTOR: ING. MONICA ALEXANDRA ROMERO SACOTO, M.Sc.

Cuenca – Ecuador

2024

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Jean Pierre Arteaga Figueroa con documento de identificación N° 0107591299 y Eduardo Josue Pineda Guncay con documento de identificación N° 0107409815; 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, 25 de Julio del 2024

Atentamente,

00116

Jean Pierre Arteaga Figueroa 0107591299

Eduardo Josue Pineda Guncay 0107409815

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

Nosotros, Jean Pierre Arteaga Figueroa con documento de identificación N° 0107591299 y Eduardo Josue Pineda Guncay con documento de identificación N° 0107409815, 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: Rediseño del Sistema Mecatrónico y Propuesta de Control del Robot Delta del Laboratorio de Sistemas de Producción Modular (MPS)", el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: 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, 25 de Julio del 2024

Atentamente,

Jean Pierre Arteaga Figueroa 0107591299

Eduardo Josue Pineda Guncay 0107409815

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Ángel Eugenio Cárdenas Cadme con documento de identificación N° 0301631966, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: REDISEÑO DEL SISTEMA MECATRÓNICO Y PROPUESTA DE CONTROL DEL ROBOT DELTA DEL LABORATORIO DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN MODU-LAR (MPS), realizado por Jean Pierre Arteaga Figueroa con documento de identificación N° 0107591299 y Eduardo Josue Pineda Guncay con documento de identificación N° 0107409815, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Artículos Académicos que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 25 de Julio del 2024

Atentamente,

I E. Cidenos C.

Ángel Eugenio Cárdenas Cadme 0301631966

Dedicatoria

Jean Pierre Arteaga Figueroa

A cada uno de los miembros de mi querida familia: principalmente a mis padres, quienes han sido mi guía, mi sustento y apoyo, por haber estado siempre presentes. A mis abuelos, tíos y hermanos, quienes me han acompañado en cada paso de este camino, preocupándose por mí y sabiendo comprenderme.

A mis amigos, con quienes he compartido desvelos, estrés, preocupaciones, alegrías, viajes y muchas vivencias más dentro de todo este proceso académico y de formación continua: Eduardo, Santiago, Nicolás, David, Joan, Danny y Bryam.

Eduardo Josue Pineda Guncay

A mi querida familia: a mi papá, por su constante apoyo y sabiduría; a mi mamá, por su amor incondicional y su fortaleza; a mis hermanos, por su apoyo y ánimo. Gracias a todos por estar a mi lado en este proceso. Este logro es tanto suyo como mío.

A mis amigos Jean, Santiago, David, Nicolás y Joan, quienes han estado conmigo de principio a fin en este proceso: gracias por su inquebrantable apoyo y motivación, que me han inspirado a nunca rendirme.

Agradecimientos

Jean Pierre Arteaga Figueroa

Recordemos que el estudio, investigación y cualquier proceso de aprendizaje es trabajo en equipo, por lo que agradezco cordialmente a cada uno de los docentes apasianados por transmitir conocimiento valioso.

Un grato agradecimiento a mi familia y pareja por su comprensión, ya que han aguantado muchos días de vacaciones, fines de semana y amanecidas, donde no he podido estar presente o ellos han estado rodeados de papeles con anális de de robots.

Y por supuesto a las verdaderas amistades que han sacrificado su tiempo por ayudarme a formar tanto en un carácter académico y humano.

Eduardo Josue Pineda Guncay

Es necesario reconocer que la educación es la base de toda sociedad. Por ello, quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todos aquellos docentes que me han transmitido sus conocimientos a lo largo de mi proceso educativo. Su dedicación, paciencia y sabiduría han sido fundamentales para mi crecimiento académico y personal. Sin su guía y apoyo, este logro no habría sido posible. Gracias por inspirarme a ser curioso y perseverante.

Quiero expresar mi agradecimiento a toda mi familia por su paciencia y comprensión durante todo este proceso, especialmente en aquellos momentos en los que no pude estar presente. Su amor y aliento han sido fundamentales para alcanzar este logro. Gracias por ser mi mayor fuente de inspiración.

Finalmente, quiero dar las gracias a todos mis amigos, quienes siempre me han apoyado y han estado a mi lado en los momentos más complicados. Los llevaré siempre conmigo. Gracias por su amistad.

Índice

| Certificado de responsabilidad y autoría del trabajo de titulación | | | | |
|--|---|-----|--|--|
| Ce | ertificado de cesión de derechos de autor del trabajo de titulación a la Universidad Politécnica Salesiana | II | | |
| Ce | ertificado de dirección del trabajo de titulación | III | | |
| De | edicatoria | IV | | |
| Ag | gradecimientos | V | | |
| 1. | Introducción | 2 | | |
| 2. | Materiales y Métodos | 2 | | |
| | 2.1. Diseño mecánico | 2 | | |
| | 2.2. Cinemática directa | 3 | | |
| | 2.3. Configuraciones singulares | 3 | | |
| | 2.4. Cinematica inversa | 4 | | |
| | 2.5. Espacio de trabajo | 4 | | |
| | 2.5.1. Espacio de trabajo ideal | 5 | | |
| | 2.5.2. Espacio de trabajo real | 5 | | |
| | 2.6. Control de posición | 5 | | |
| | 2.7. Interfaz de usuario para el control del robot Delta | 6 | | |
| 3. | Resultados y discusión | 6 | | |
| 4. | Conclusiones | 8 | | |
| Re | eferencias | 8 | | |

Este documento fue realizado enteramente en $I\!\!\!A T_{\rm E} X$





pISSN: 1390-650X $\,/\,$ eISSN: 1390-860X

REDISEÑO DEL SISTEMA MECATRÓNICO Y PROPUESTA DE CONTROL DEL ROBOT DELTA DEL LABORATORIO DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN MODULAR (MPS)

REDESIGN OF THE MECHATRONIC SYSTEM AND PROPOSAL FOR CONTROL OF THE DELTA ROBOT OF THE MODULAR PRODUCTION SYSTEMS (MPS) LABORATORY

Jean Pierre Arteaga Figueroa¹,^(D), Eduardo Josue Pineda Guncay¹,^(D), Angel Eugenio Cárdenas Cadme¹,^(D), Monica Alexandra Romero Sacoto¹,^(D)

Resumen

Este estudio plantea el rediseño del robot Delta, teniendo como punto de partida el análisis de las limitaciones del diseño original, el redimensionamiento de los eslabones permite una expansión significativa del espacio de trabajo del robot. La implementación de un controlador PID en el robot Delta ha permitido lograr movimientos precisos independientemente del ángulo objetivo. La elección de este control garantiza que cada movimiento sea ejecutado con precisión. Las pruebas realizadas demuestran que los actuadores responden de manera rápida y sin sobrepaso, además de asegurar un error menor al 0.343%.

Se analizan las ecuaciones cinemáticas directa e inversa, junto con la matriz jacobiana, lo que permite identificar configuraciones singulares. Se comparan los espacios de trabajo ideal y real, identificando que ϕ_{3i} , L1 y L2 son los principales factores que aumentan el espacio de trabajo, siendo ϕ_{3i} una limitante mecánica de la junta esférica empleada.

El desarrollo de una interfaz gráfica de usuario (GUI) en Python® permite una interacción intuitiva en tiempo real con el robot, donde los usuarios pueden controlar el robot, especificar coordenadas y visualizar los ángulos necesarios para posicionar el efector final.

Abstract

This study proposes the redesign of the Delta robot, starting from the analysis of the limitations of the original design. The resizing of the links allows for a significant expansion of the robot's workspace. The implementation of a PID controller in the Delta robot has enabled precise movements regardless of the target angle. The choice of this control ensures that each movement is executed with precision. The tests carried out demonstrate that this system responds quickly and without overshoot, while ensuring stable performance of the robot under all operating conditions. The direct and inverse kinematic equations are analyzed, along with the Jacobian matrix, which allows for the identification of singular configurations. Ideal and real workspaces are compared, identifying that ϕ_{3i} , L_1 , and L_2 are the main factors that increase the workspace, with ϕ_{3i} being a mechanical limitation of the spherical joint used. The development of a graphical user interface (GUI) in Python® allows for intuitive real-time interaction with the robot, where users can control the robot, specify coordinates, and visualize the necessary angles to position the endeffector.

Palabras clave: Cinemática, configuración singular, control PID, Delta, espacio de trabajo, Python.

Keywords: Kinematics, singular configuration, PID control, Delta, workspace, Python.

¹ Ingeniería Mecatrónica, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador, jarteagaf1@est.ups.edu.ec

1. Introducción

Los robots son elementos clave en la industria moderna, su uso es esencial en la automatización industrial, ya que ayudan a mantener tanto la cantidad como la calidad de la producción, a la vez que aporta flexibilidad a las líneas de fabricación. Los procesos de manufactura actuales, la mejora de la calidad y la reducción de los costos de producción han incrementado la adopción de robots en diversas industrias [1,2].

Dentro de las categorías de robots, se presentan varios tipos, como el cartesiano, cilíndrico, polar, articulado, SCARA y paralelo. Dentro de esta última categoría, destaca el robot Delta en los entornos de producción automatizados. A diferencia de otros robots, el Delta se distingue por su flexibilidad, lo que lo hace adecuado para una amplia variedad de procesos. [3].

El robot Delta se caracteriza por tener su efector final unido a su base fija mediante varias cadenas cinemáticas independientes. Este diseño ofrece ventajas sobre los robots de cadena abierta; que incluyen mayor rigidez estructural, capacidad para operar a velocidades más altas y una precisión superior [4].

Las principales fortalezas del robot Delta radican en su alta capacidad de producción, son idóneos para tareas de "pick and place", ya que pueden operar a gran velocidad en diversas tareas. [5,6]. El rendimiento del robot Delta no solo se debe a su diseño mecánico, sino también al fundamento teórico que lo sustenta.

El modelo matemático para la cinemática directa e inversa, así como para las configuraciones singulares posee un carácter universal, esto significa que puede aplicarse a cualquier robot Delta con una configuración similar.

Se tomará como base al primer modelo realizado [7] para el desarrollo del rediseño, en el que se varían longitudes de eslabones y se emplean juntas esféricas con un mayor ángulo de trabajo.

Este artículo se estructura en tres secciones principales para abordar el rediseño del robot Delta. En Materiales y Métodos, se incluyen el diseño mecánico, cinemática directa e inversa, configuraciones singulares, espacio de trabajo, control de posición e interfaz de usuario. En Resultados y Discusión, se analizan los datos para optimizar los eslabones y el espacio de trabajo. Finalmente, en Conclusiones, se resumen los puntos clave y las contribuciones del estudio a la robótica.

2. Materiales y métodos

En esta sección se detallará el proceso completo de diseño mecánico, así como los cambios realizados a los componentes. Adicionalmente, se explicará paso a paso el proceso para la obtención de la cinemática directa e inversa, además de las singularidades, espacio de trabajo y el controlador de posición PID.

2.1. Diseño mecánico

El robot Delta se caracteriza por una restricción paralela entre la plataforma móvil y fija, donde su efector final es posicionado mediante servomotores. Esta condición es fundamental para su diseño mecánico, ya que influye en su funcionalidad, rendimiento y espacio de trabajo [8].

En la Figura 1, se presenta el modelo final del robot Delta que ha sido mejorado respecto a su diseño original. Inicialmente, el robot presentaba restricciones en su espacio de trabajo. Para abordar esta limitación, se ajustaron las dimensiones de los eslabones y se emplearon juntas esféricas con un mayor rango de movimiento.



Figura 1. Diseño final robot Delta

La Tabla 1, contiene las dimensiones de los componentes con las que el espacio de trabajo fue calculado y el robot Delta fue construido.

 Tabla 1. Dimensiones actuales robot Delta

| Parámetros | Medición |
|-----------------------------------|--------------------|
| Bíceps (L1) | 275 mm |
| Antebrazo $(L2)$ | $345 \mathrm{~mm}$ |
| Radio de plataforma fija (r_A) | $150 \mathrm{~mm}$ |
| Radio de plataforma móvil (r_B) | $46.1~\mathrm{mm}$ |

2.2. Cinemática directa

Se concidera que los actuadores están ubicados en A_i la Figura 2, muestra una de las tres cadenas cinemáticas del robot Delta, donde se observan los marcos de referencia móviles, así como los ángulos θ y ϕ .



Figura 2. Diagrama esquemático de una cadena cinemática (a) de una vista 3D (b) en el plano x-y [9]

Para proceder con los cálculos es necesario conocer el ángulo en el que se ubica cada uno de los servomotores medidos desde el marco de referencia global hasta cada uno de los actuadores, esto se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Ubicación de actuadores θ

| Parámetros | Ángulo |
|------------|---------------|
| θ_1 | 90° |
| $	heta_2$ | 330° |
| $	heta_3$ | 210° |

Tras conocer la posición y orientación del marco de referencia fijo, además de comprender que representan los ángulos ($\phi_i \ge \theta_i$), se calcula la cinemática directa al implementar el algoritmo de Denavit-Hartenberg.

La posición del efector final se obtiene de la cuarta columna de la matriz de transformación homogénea (T) obtenida con el algoritmo mencionado, la misma se muestra en la Ec 1.

Debido a que el diseño está basado en tres cadenas cinemáticas cerradas este proceso se deberá realizar para cada una de ellas.

$$\begin{bmatrix} Px \\ Py \\ Pz \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) \left[r_a - r_b + l_1 \cos(\phi_{1i}) + l_2 \cos(\phi_{1i} + \phi_{2i}) \cos(\phi_{3i}) \right] - l_2 \sin(\theta_i) \sin(\phi_{3i}) \\ \sin(\theta_i) \left(r_a - r_b + l_1 \cos(\phi_{1i}) + l_2 \cos(\phi_{1i} + \phi_{2i}) \cos(\phi_{3i}) \right) + l_2 \cos(\theta_i) \sin(\phi_{3i}) \\ l_1 \sin(\phi_{1i}) + l_2 \sin(\phi_{1i} + \phi_{2i}) \cos(\phi_{3i}) \end{bmatrix}$$
(1)

2.3. Configuraciones singulares

Las posiciones singulares de un robot ocurren cuando el determinante de su matriz jacobiana es igual a cero. En estas posiciones, cualquier mínima modificación en las coordenadas cartesianas demandaría un cambio infinitamente grande en las coordenadas articulares [10]. Esto significa que si se intentara mover el efector final a las inmediaciones de las configuraciones singulares, obligaría a las articulaciones a moverse a velocidades que los actuadores no pueden manejar.

Por este motivo el robot pierde o gana uno de sus grados de libertad al estar próximo a las configuraciones singulares, haciendo imposible que el efector final se mueva en una determinada dirección [10].

Para analizar y determinar las configuraciones singulares de un robot, es fundamental calcular la matriz jacobiana (J).

Matemáticamente, se expresa como: $\dot{P} = \mathbf{J} \cdot \boldsymbol{\phi}$ Donde: \dot{P} es el vector de velocidades del efector final.

 ϕ es el vector de velocidades articulares.

J es la matriz jacobiana.

La Ec 2, ilustra la relación entre las velocidades lineales del efector final \dot{P} y las velocidades articulares $\dot{\phi}_i$. Matemáticamente se expresa como:

$$\begin{bmatrix} \dot{P}x\\ \dot{P}y\\ \dot{P}z \end{bmatrix} = \mathbf{J} \begin{bmatrix} \dot{\phi}_{1i}\\ \dot{\phi}_{2i}\\ \dot{\phi}_{3i} \end{bmatrix}$$
(2)

La Ec 3 define la matriz jacobiana (J). Esta es una representación de las derivadas parciales de las componentes de la posición del efector final [x, y, z] con respecto a las ángulos articulares ϕ_{1i} , ϕ_{2i} , ϕ_{3i} .

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial Px}{\partial \phi_{1i}} & \frac{\partial Px}{\partial \phi_{2i}} & \frac{\partial Px}{\partial \phi_{3i}} \\ \frac{\partial Py}{\partial \phi_{1i}} & \frac{\partial Py}{\partial \phi_{2i}} & \frac{\partial Py}{\partial \phi_{3i}} \\ \frac{\partial Pz}{\partial \phi_{1i}} & \frac{\partial Pz}{\partial \phi_{2i}} & \frac{\partial Pz}{\partial \phi_{3i}} \end{bmatrix}$$
(3)

La Ec 4 muestra el determinante de la matriz jacobiana $\det(J)$, este es un factor importante para conocer si el robot se encuentra en una configuración singular. Esto ocurre cuando el determinante de la matriz jacobiana es igual a cero, por lo que el robot puede experimentar una ganancia o pérdida de un grado de libertad, traducido como pérdida de movilidad o control en ciertas direcciones.

$$\det (J) = l_1 \cdot l_2^2 \cdot (-\sin (\phi_{2i})) \cdot \cos^2(\phi_{3i}) = 0 \quad (4)$$

Para obtener los ángulos ϕ_{2i} y ϕ_{3i} que generen una configuración singular se debe conocer que valor de dichos ángulos provocan que la determinante del Jacobiano sea igual a cero. Resultando así 4 diferentes posibilidades:

$$\phi_{3i} = 90^{\circ}, 270^{\circ} \text{ y } \phi_{2i} = 0^{\circ}, 180^{\circ}$$

2.4. Cinemática inversa

El objetivo de la cinemática inversa es conocer los valores (ϕ_{11} , ϕ_{12} , ϕ_{13}) de los actuadores en función de la posición del efector final [x, y, z] [11]. Para el cálculo de la cinemática inversa se debe partir del análisis previo de la cinemática directa desarrollado en la Ec 1. La meta es reducir las ecuaciones eliminando ϕ_{2i} y ϕ_{3i} para obtener como variable ϕ_{1i} , ya que estos ángulos corresponden a las juntas esféricas pasivas o virtuales. Esto se obtiene operando como se muestra en la Ec 5, la misma hace referencia a funciones que describen tres esferas con centro en (Pi, Pj, Pk) y radio de l_2 , el cual es fundamental para obtener un espacio de trabajo deseado.

$$(Px - Pi)^{2} + (Py - Pj)^{2} + (Pz - Pk)^{2} = l_{2}^{2}$$
 (5)

Donde:

$$Pi = \cos(\theta_i) \left(r_a - r_b + l_1 \cos(\phi_{1i}) \right)$$
$$Pj = \sin(\theta_i) \left(r_a - r_b + l_1 \cos(\phi_{1i}) \right)$$
$$Pk = l_1 \sin(\phi_{1i})$$

Operando y factorizando se obtiene la Ec
 6 que describe una función dependiente de $\phi_{1i}.$

$$\cos(\phi_{1i})(s) + \sin(\phi_{1i})(p) + g = 0 \tag{6}$$

Donde:

$$s = 2rl_1 - 2l_1Px\cos(\theta_i) - 2l_1Py\sin(\theta_i)$$

$$p = -2l_1Pz$$

$$g = -2rPx\cos(\theta_i) - 2rPy\sin(\theta_i) + Px^2 + Py^2$$

$$+Pz^2 + r^2 + l_1^2 - l_2^2$$

Se utiliza la sustitución Universal o sustitución de Weierstrass en la Ec 6 para expresar las funciones trigonométricas en términos algebraicos.

$$t = \tan\left(\frac{\phi_{1i}}{2}\right)$$
$$\cos(\phi_{1i}) = \frac{1-t^2}{1+t^2}$$
$$\sin(\phi_{1i}) = \frac{2t}{1+t^2}$$

Basándose en la sustitución mencionada, se obtiene la Ec7.

$$t^{2}(g-s) + 2tp + (s+g) = 0$$
(7)

Esta genera dos posibles soluciones para t como se muestra en la Ec 8.

$$t = \frac{-p \pm \sqrt{p^2 - (g^2 - s^2)}}{g - s} \tag{8}$$

Bajo la misma premisa que se usó en la Ec 7, se obtiene la Ec 9, la cual describe la cinemática inversa y tiene dos soluciones posibles para llegar a una misma posición espacial [12].

$$\phi_{1i} = 2 \arctan\left(\frac{-p \pm \sqrt{p^2 - (g^2 - s^2)}}{g - s}\right) \qquad (9)$$

2.5. Espacio de trabajo

El espacio de trabajo de un robot Delta se define como la intersección de los volúmenes alcanzables por los tres brazos del robot, formando una región tridimensional en la que el efector final puede operar. Esta área se obtiene de la intersección de tres esferas, tal como se muestra en la Ec 5.

Es importante destacar que el área de trabajo en forma de esfera está directamente influenciada por los parámetros geométricos: l1 (longitud del bíceps), l2(longitud del antebrazo), ra (radio de la plataforma fija) y rb (radio de la plataforma móvil). Conforme se ajusten estos parámetros la extensión del espacio de trabajo varía, permitiendo gran adaptabilidad.

2.5.1. Espacio de trabajo ideal

El espacio de trabajo ideal se define como el conjunto de todos los puntos posibles que puede alcanzar el efector final para ángulos existentes de ϕ_{1i} sin restricciones mecánicas. Para determinar este espacio, se realiza un barrido de puntos en los ejes X, Y y Z utilizando la cinemática inversa. Se corrobora que la la Ec 6 se cumpla para las tres cadenas cinemáticas simultáneamente; si alguna de ellas no se satisface, ese punto no puede considerarse parte del espacio de trabajo.

La Figura 3 presenta el rango del espacio de trabajo ideal del robot en los tres ejes coordenados. Estos valores definen los límites dentro de los cuales el efector final del robot puede operar de manera óptima. El rango en los ejes X e Y se extiende de -370 mm a 370 mm. En el eje Z, se extiende desde 200 mm hasta 610 mm.



Figura 3. Espacio de trabajo ideal

2.5.2. Espacio de trabajo real

El espacio de trabajo real se ve reducido por condiciones mecánicas, como se ve en la Figura 4, la junta esférica empleada tiene una limitación de $[-20^{\circ} a 20^{\circ}]$ en ϕ_{3i} , cabe destacar que este ángulo fue medido físicamente a través de un goniómetro.



Figura 4. Limitante de ϕ_{3i}

La Figura 5 detalla el espacio de trabajo real y refleja las limitaciones mecánicas que afectan al robot durante su operación, en comparación con el espacio de trabajo ideal. En los ejes X e Y, el rango se reduce significativamente a [-100 mm, 100 mm]. Sin embargo, el rango en el eje Z se mantiene sin cambios [200 mm, 610 mm], permitiendo un desplazamiento vertical considerable.



Figura 5. Espacio de trabajo real

2.6. Control de posición

Con base en las dimensiones de los componentes mostradas en la Tabla 1, se diseña e implementa un sistema de control de posición PID. El sistema se encarga de asegurar que la posición deseada coincida con la posición angular de cada uno de los actuadores; en este caso, se usa el servomotor Dinamixel MX-106.

Para el correcto funcionamiento de los motores es necesario implementar un controlador. Para ello se propone un control PID, sus constantes son determinadas utilizando el segundo método de sintonización de Ziegler-Nichols, debido a su enfoque experimental. Este método consiste en ajustar inicialmente el controlador en modo proporcional y aumentar la ganancia hasta observar oscilaciones sostenidas en el sistema, para que este método pueda ser aplicado se deben presentar dichas oscilaciones para cualquier valor que pueda tomar. A partir de la ganancia crítica y el periodo de estas oscilaciones, se calcularon los parámetros del controlador PID, garantizando que el robot pueda alcanzar y mantener las posiciones requeridas durante su operación [13–15].

Siendo las constantes del controlador empleadas: P=34, I=2, D=10, se realizan pruebas en el robot Delta construido, validando su efectividad y precisión, durante estas pruebas se ha evaluado el desempeño del controlador en una variedad de ángulos, asegurando que el sistema es capaz de satisfacer la dinámica del robot, los resultados de dichas pruebas se pueden observar en la Tabla 3.

La Figura 6 muestra un diagrama de bloques que define al sistema de control PID para regular la posición de los motores Dynamixel conectados en paralelo.



Figura 6. Diagrama de bloques del controlador [16].

Una característica del control PID es su rápida respuesta para cualquier velocidad y ángulo de destino, esto significa que el rendimiento del controlador es constante.

Además del control de los actuadores, el mismo permite implementar dos tipos de trayectorias: lineal y circular. La trayectoria lineal requiere un punto inicial y final, entre estos dos puntos se generan 100 puntos intermedios, y el robot se desplaza a través de cada uno de estos. La trayectoria circular requiere tres puntos: inicial, intermedio y final, se implementa determinando el plano que contiene estos tres puntos y luego generando un arco en dicho plano. En la Figura 7 se presenta de color azul una trayectoria lineal y en color rojo una trayectoria circular.



Figura 7. Trayectorias lineal y circular

2.7. Interfaz de usuario para el control del robot Delta

Con el fin de generar una interacción humano-máquina se diseña una GUI programada en Python, la cual permite la interacción y control en tiempo real del robot.

La Figura 8, muestra la GUI del programa que permite conectar el robot mediante un puerto COM. La interfaz ofrece opciones de movimiento, como trayectorias lineales, circulares y movimientos punto a punto, se pueden especificar las coordenadas espaciales a las que se quiere llevar el efector final. En base a esta posición, la interfaz calcula y muestra automáticamente los ángulos $(-\phi_1, -\phi_2, -\phi_3)$ necesarios para posicionar el efector final del robot en la ubicación deseada.

Este cálculo se fundamenta en la cinemática inversa, esencial para determinar los ángulos que deberán adoptar cada uno de los servomotores para alcanzar la posición especificada. Esto permite resolver la relación entre las coordenadas ingresadas y el ángulo requerido por cada servomotor, asegurando que el efector final se desplace a cualquier punto en el espacio tridimensional.

| Control de Trayectorias de Robot Delta | - (| 2 | Х |
|--|-------------|---------|----|
| Puerto COM: Conectar Desconectar Desconectar Desconectar Desconectar Desconectar Agregar Movimiento | Eliminar Me | ovimien | to |
| pointx 0 | | | |
| pointy 4 | | | |
| pointz 60 | | | |
| phi12: [81.17699420315923 phi22: [93.06668579053154 phi32: [93.06668579053154 | | | |
| Punto 1: (0.0, -10.0, 40.0) Punto 2: (0.0, 4.0, 60.0) | | | |
| Ir a Home | | | |
| Inicializar Movimientos 1: Movimiento Lineal [(0, 0, 61), (0, 0, 0, 40, 0)] 2: Movimiento Lineal [(0, 0, 0, 40, 40, 0), (0, 40, 0)] 3: Movimiento Punto a Punto [(0, 10, 0, 40, 0), (0, 0, -10, 0)] | | | |
| Estado: Desconectado | | | |

Figura 8. Interfaz gráfica de usuario GUI

Además, la GUI incluye seguridades como la de enviar un mensaje de error cuando la posición objetivo sale del espacio de trabajo, proporcionando así una capa adicional de seguridad y prevención de errores.

El usuario puede seleccionar el tipo de movimiento, agregar puntos e inicializar los movimientos, los cuales se muestran agregados en una lista y se pueden eliminar. Adicionalmente incluye seguridades al tener un fallo en la conexión o al seleccionar una posición a la que el robot no pueda llegar.

3. Resultados y discusión

Mediante el proceso matemático se encuentran ecuaciones que modelan la cinemática inversa del robot Delta, las cuales permiten controlar el ángulo que deberá adoptar cada uno de sus actuadores para satisfacer una posición deseada. La Tabla 3 muestra el error angular que existe al realizar un movimiento con el robot, se puede observar que para diferentes ángulos deseados el error calculado mediante la diferencia porcentual nunca excede el 0.343% lo que valida el sistema de control previamente realizado.

Tabla 3. Diferencia porcentual angular (ϕ_{1i})

| ϕ_{1i} Deseado [°] | ϕ_{1i} Medido [°] | Diferencia Porcentual [%] |
|-------------------------|------------------------|------------------------------|
| 38,88 | 38,81 | 0,181 |
| 53,39 67.76 | $53,39 \\ 67.70$ | 0,009 0.092 |
| $95,\!68$ | 95,53 | 0,155 |
| 44,19 | 44,34 | 0,343 |

Las restricciones mecánicas y las longitudes de los eslabones juegan un papel fundamental dentro del cálculo del espacio de trabajo. Modificando parámetros dimensionales de los eslabones y ángulos límite de las juntas esféricas con el fin de poder determinar como afecta cada una de estas al espacio de trabajo.

Al calcular la matriz jacobiana del sistema se identifican singularidades del robot, es decir, aquellas configuraciones en las que el robot adquiere un grado de libertad adicional o lo pierde. El determinar que las singularidades del sistema únicamente dependen de los ángulos de las juntas esféricas facilita en gran medida el análisis del robot.

Una contribución destacada de este estudio se basa en la descripción detallada del espacio de trabajo del robot Delta, tanto en términos ideales como reales. Mientras que muchos estudios previos se enfocan principalmente en el espacio de trabajo ideal, este análisis abarca los dos aspectos, proporcionando una visión más completa y práctica del rendimiento operacional del robot. Se identifica que las longitudes de los eslabones L1 y L2, así como la medida de las plataforma fija y el rango de movimiento de las juntas esféricas, tienen un impacto directo en el tamaño y la forma del espacio de trabajo. En particular, L1 influye en la altura del espacio de trabajo, mientras que L2 afecta significativamente el ancho y altura, siempre y cuando las juntas esféricas posean un rango mínimo de movimiento de $[-30^{\circ}, 30^{\circ}]$ que puede alcanzar por ejemplo la junta "Ball Joint Linkage, 1/4"-28 Internal Thread, Right-Hand Shank, Right-Hand Ball Stud" de McMaster (modelo 60645K421), que emplea material de acero al carbono con revestimiento de zinc y requiere lubricación para su funcionamiento óptimo como se muestra en la Figura 9.



Figura 9. Junta esférica propuesta [17]

Adicionalmente, se observó que la proximidad entre motores es crucial para maximizar el espacio de trabajo del robot. Un mayor acercamiento entre los motores optimiza tanto la altura como el ancho del espacio de trabajo, mientras que una separación excesiva tiende a reducir estas dimensiones, limitando así la capacidad operativa del robot. La Figura 10 muestra el espacio de trabajo resultante del robot Delta, considerando únicamente los datos experimentales positivos que incrementan el espacio de trabajo. Variando L1 a 20 mm, L2 a 60 mm, además de considerar la junta esférica mencionada anteriormente. En la Figura (10c) se puede observar como los lados del espacio de trabajo forman un prisma hexagonal y el límite inferior es algo similar a una esfera [18].



(a) Espacio de trabajo ideal optimizado





(c) Espacio de trabajo real plano XY

Figura 10. Espacio de trabajo propuesto optimizado

Para determinar si los parámetros seleccionados generan algún cambio o mejora en el rendimiento del robot Delta, se calcula la diferencia porcentual en el espacio de trabajo limitado entre los dos conjuntos de parámetros. Esta métrica se obtiene mediante la fórmula de la diferencia porcentual, que compara el número de puntos válidos del segundo robot con el del primer robot. Este cálculo permite cuantificar el aumento relativo en el espacio de trabajo, proporcionando una medida clara y objetiva de la mejora en el rendimiento del robot. Al aplicar esta ecuación, se evalúa si las modificaciones en los parámetros del robot Delta resultan en un espacio de trabajo más amplio y eficiente. La diferencia porcentual de 543,66%solo refleja el cambio en términos cuantitativos, sino que

4. Conclusiones

también facilita una mejor comprensión de cómo los

ajustes en el diseño impactan en la funcionalidad global

El espacio de trabajo real del robot Delta fue calculado en base a sus restricciones mecánicas dadas principalmente por el ángulo ϕ_{3i} . Mediante el uso de juntas esféricas con mayor rango de movimiento y el redimensionamiento de eslabones se ha logrado una expansión del espacio de trabajo del robot Delta mejorándolo en un 543,66%.

El redimensionamiento de los eslabones han mejorado significativamente el espacio de trabajo del robot aumentando su capacidad y flexibilidad operativa. Inicialmente, la longitud de L1 era de 350mm; después de la optimización, se redujo a 200mm, en cambio la longitud de L2 se modifica de 345mm a 600mm.

Por ultimo, se debe ampliar el rango de movimiento de $\phi 3i$ pasando de $[-20^{\circ} \text{ a } 20^{\circ}]$ a $[-30^{\circ} \text{ a } 30^{\circ}]$.

Se emplea un controlador de posición PID, el cual asegura que los movimientos del robot sean precisos, teniendo una buena respuesta ante cualquier ángulo objetivo. Para el diseño del controlador, los parámetros de Proporcionalidad (P), Integral (I) y Derivada (D) fueron ajustados cuidadosamente para optimizar el rendimiento del robot. Esto permite que el sistema responda de manera rápida y eficaz ante cualquier cambio en la posición deseada, minimizando el error de posición y proporcionando una respuesta suave y controlada, con un error calculado a través de la diferencia porcentual menor a 0.343%. La ejecución de pruebas confirma que el robot Delta es capaz de realizar varias trayectorias con una gran precisión al desplazar el efector final en el espacio de trabajo. Las pruebas incluyeron la verificación de su capacidad para seguir trayectorias lineales y circulares, así como para alcanzar puntos específicos en el espacio.

La ejecución de pruebas confirman que el robot Delta es capaz de realizar varias trayectorias con una gran precisión al desplazar el efector final en el espacio de trabajo. Las pruebas incluyeron la verificación de su capacidad para seguir trayectorias lineales y circulares, así como para alcanzar puntos específicos en el espacio tridimensional, mostrando una mejora significativa en su funcionalidad.

Un componente crucial del proyecto fue el desarrollo de una interfaz gráfica de usuario (GUI) programada en Python, diseñada para facilitar la interacción y el control en tiempo real del robot. Esta interfaz permite al usuario conectar y desconectar el robot, seleccionar trayectorias y especificar posiciones deseadas, también calcula y muestra automáticamente los ángulos de las articulaciones necesarios para mover el efector final a la ubicación especificada, utilizando la cinemática inversa desarrollada. La interfaz ha sido probada con éxito en el robot Delta construido, demostrando ser una herramienta intuitiva y efectiva para el control preciso del robot.

Referencias

- H. Taghirad, Parallel robots: mechanics and control. Boca Raton, FL: CRC Press/Taylor & Francis Group, 2013.
- G. Gogu, Structural synthesis of parallel robots, ser. Solid mechanics and its applications. Dordrecht; London; New York: Springer, 2008, no. v. 149, 159, 173, 183.
- [3] S. Wang, H. Lin, R. Gai, and Y. Sun, "An application of vision technology on intelligent sorting system by delta robot," in 2017 IEEE 19th International Conference on e-Health Networking, Applications and Services (Healthcom). Dalian: IEEE, Oct. 2017, pp. 1–6. [Online]. Available: http://ieeexplore.ieee.org/document/8210773/
- [4] L.-W. Tsai, Robot analysis: the mechanics of serial and parallel manipulators. New York: Wiley, 1999.
- [5] T. H. T. Tran, D. S. Nguyen, N. T. Vo, and H. N. Le, "Design of Delta Robot Arm based on Topology optimization and Generative Design Method," in 2020 5th International Conference on Green Technology and Sustainable Development (GTSD). Ho Chi Minh City, Vietnam: IEEE, Nov. 2020, pp. 157–161. [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/9303083/
- [6] H. Zhang, K. Zhang, and J. Gao, "Dynamically Based Motor Parameters for Delta Robots Using the Specified Workspace," in 2019 IEEE 6th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA). Tokyo, Japan: IEEE, Apr. 2019, pp. 814–818. [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/8715064/

del robot.

- [7] F. Fajardo and J. Montalván, "DISEÑO DE UN ROBOT DELTA ADAPTADO AL SISTEMA DE PRODUCCIÓN MODULAR DE LA UNIVER-SIDAD POLITÉCNICA SALESIANA," Ph.D. dissertation, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador, 2021.
- [8] J. Lin, C.-H. Luo, and K.-H. Lin, "Design and Implementation of a New DELTA Parallel Robot in Robotics Competitions," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 12, no. 10, p. 153, Oct. 2015. [Online]. Available: http://journals.sagepub.com/doi/10.5772/61744
- [9] Y.-L. Kuo, "Mathematical modeling and analysis of the Delta robot with flexible links," *Computers & Mathematics with Applications*, vol. 71, no. 10, pp. 1973–1989, May 2016. [Online]. Available: https://linkinghub.elsevier. com/retrieve/pii/S089812211630147X
- [10] A. Barrientos, Fundamentos de robótica, 2nd ed. Aravaca, Madrid: McGraw-Hill Interamericana de España, 2017.
- [11] M. Laribi, L. Romdhane, and S. Zeghloul, "Analysis and dimensional synthesis of the DELTA robot for a prescribed workspace," *Mechanism* and Machine Theory, vol. 42, no. 7, pp. 859–870, Jul. 2007. [Online]. Available: https://linkinghub. elsevier.com/retrieve/pii/S0094114X0600142X
- [12] P. Hoai, V. Cong, and T. Hiep, "Design a low-cost delta robot arm for pick and place applications

based on computer vision," *FME Transactions*, vol. 51, no. 1, pp. 99–108, 2023. [Online]. Available: https://scindeks.ceon.rs/Article.aspx? artid=1451-20922301099H

- [13] K. Ogata, Ingeniería de control moderna, quinta ed. PEARSON EDUCACIÓN, S.A., 2010.
- [14] R. C. Dorf and R. H. Bishop, Modern control systems, thirteenth edition ed. Hoboken: Pearson, 2016.
- [15] W. Bolton, Mecatrónica: sistemas de control electrónico en la ingeniería mecánica y eléctrica. Un enfoque multidisciplinario, quinta edición ed. Méxivo D.F.: Alfaomega Grupo Editor, 2013.
- [16] Y.-L. Kuo and P.-Y. Huang, "Experimental and simulation studies of motion control of a Delta robot using a model-based approach," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 14, no. 6, p. 172988141773873, Nov. 2017.
 [Online]. Available: http://journals.sagepub.com/ doi/10.1177/1729881417738738
- [17] McMaster, "Ball Joint Linkage 1/4"-28 Internal Thread, Right-Hand Shank, Right-Hand Ball Stud," 2024. [Online]. Available: https://www.mcmaster.com/60645K421/
- [18] L. Rey and R. Clavel, "The Delta Parallel Robot," Parallel Kinematics Machines, pp. 402–417, 1999.