

Automatización de un sistema de manipulación tipo pick and place con 3 grados de libertad¹

Automation of a pick and place manipulation system with 3 degrees of freedom

Felipe Mosquera Morales²
Francisco Javier Henao Castañeda³

Recibido: 28/06/2014 - Aceptado: 06/08/2014

Cómo citar este artículo: F. Mosquera y F. Henao “Automatización de un sistema de manipulación tipo pick and place con 3 grados de libertad”, *IngEam*, vol. 2, n.º 2, pp. 115-141, 2015

Resumen

El objetivo del presente artículo es exponer el proceso de construcción de un manipulador robótico programable. Para ello, primero se presenta el proceso de diseño, fabricación y ensamble. Segundo, se explica la configuración geométrica, los elementos activos de ejecución, los elementos de control y el modelo mecánico. Tercero, para mostrar más acerca del funcionamiento del manipulador se desarrollan los modelos matemáticos correspondientes a la cinemática y el volumen de trabajo. Cuarto, se mencionan las pruebas que se realizaron al manipulador. Por último, se dan tres conclusiones: a) la identificación de variables físicas que hicieron óptima la construcción del manipulador; b) cambio en los actuadores neumáticos por servomecanismos lineales c) la imprecisión que presenta el manipulador en el grado de libertad rotacional se soluciona si se cambia el servomotor por uno con mayor par, pues la inercia hace que sufra un retardo buscando la posición deseada y oscile, lo cual provoca imprecisión en el sistema.

115

Palabras clave: Mecanismos, Manipuladores, sistemas de control, automatización, cinemática

Abstract

The aim of this article is to present the process of building a programmable robotic manipulator. To do this, first the process of design, manufacture and assembly is presented. Second, the geometric configuration is explained, the active elements of execution, control elements and the mechanical model. Third, to show more about the operation of the corresponding manipulator, cinematics, mathematical models and the amount of work. Fourth, the tests performed to the manipulator are mentioned. Finally, there are three conclusions: a) the identification of optimal physical variables that made the construction of the manipulator; b) change in pneumatic actuators for linear servomechanisms c) the inaccuracies that the manipulator presents in the rotational degree of freedom is solved if the servomotor is changed to one with higher torque, because of inertia, it suffers a delay searching the desired position and oscillates,

¹ Artículo de investigación derivado de proyecto de grado para optar el título de Ingeniero Mecánico.

² Ingeniero Mecánico de la Universidad Tecnológica de Pereira. Maestrante de Filosofía - UTP. Correo electrónico: fmosquera@utp.edu.co

³ MSc. en Sistemas Automáticos de Producción-UTP, Ingeniero Mecánico - UTP. Correo electrónico: frajahec@utp.edu.co

causing imprecision in the system.

Keywords: Mechanisms, manipulators, control systems, automation, kinematic

1. Introducción

Dentro del campo de la robótica los dispositivos pick and place (sistemas de colocación y agarre) han sido foco de múltiples investigaciones, debido a su gran utilidad en funciones como manipulación de residuos nocivos para la salud, celdas de manufactura flexible y aplicaciones aeroespaciales, para así suplir la mano de obra humana en actividades que requieren precisión, lo cual provocarían posiciones incómodas o alta repetitividad. Así pues, se buscó construir un manipulador robótico programable. Para la realización se aprovecharon herramientas como la neumática, los servomecanismos, y las plataformas libres como Arduino, basada en *processing* (lenguaje de programación, entorno de desarrollo, y la comunidad en línea), para ejecutar el sistema de control.

Inicialmente se definieron parámetros claves para el desarrollo de un manipulador como su tipo, la configuración geométrica, sus elementos activos de ejecución (actuadores), elementos de control y un modelo mecánico que soportara los componentes anteriormente mencionados. Posterior al diseño mecánico del manipulador se procedió a su construcción, encontrando ventajas y limitaciones en los montajes, realizando cambios y ajustes para lograr un dispositivo de funcionamiento mecánico óptimo. Seguidamente para tener un concepto más amplio acerca del funcionamiento del manipulador se desarrollaron los modelos matemáticos relevantes, como el modelo cinemático directo, el inverso y su volumen de trabajo, para observar la capacidad y limitaciones del manipulador en un espacio físico de trabajo. Por último, se ejecutaron pruebas al servomecanismo, exhibiendo las cualidades de su tecnología, se comprobó físicamente su modelo cinemático directo para certificar el buen desarrollo de los modelos matemáticos y se programaron secuencias de trabajo para el manipulador, esto con el fin de aprovechar las ventajas de los lenguajes de programación de plataformas libres, simulando posibles funcionalidades en la industria.

116

2. Marco teórico

Automatización

El sustituir la intervención humana directa por fuentes alternativas de energía controladas para la realización del trabajo fue un paso fundamental en la evolución del hombre, permitiendo así realizar tareas de forma más eficaz. El uso de poleas para levantar grandes cargas, la utilización del vapor como fuerza motriz, los mecanismos de relojería, el aprovechamiento de los caudales de agua o las corrientes de viento son algunos ejemplos del inicio de la automatización en la historia humana.

La automatización ha sido crucial en el crecimiento y desarrollo de la industria, pues las necesidades de producir a gran escala y de forma eficiente, para sostenerse en el mercado globalizado, han llevado al hombre a hacer ahínco en cómo mejorar los sistemas de

producción, para así producir en serie de manera uniforme y aprovechando los recursos tecnológicos.

Dentro de los campos hoy día destacados en la automatización figura la robótica, pues esta es una forma de manufactura flexible, que puede reprogramarse por medios computacionales, realizar tareas repetitivas, de gran esfuerzo y precisión. También, se utiliza en tareas que representan un riesgo para la vida humana, como lo son: el manejo de residuos tóxicos o radioactivos, el trabajo en espacios no adecuados, en sitios de difícil acceso para el ser humano o en posiciones incómodas, siendo también manipulado de forma teleoperada.

Definición de automatización industrial

Uso de sistemas o elementos computarizados para controlar maquinarias o procesos industriales substituyendo a operadores humanos [1]. En la automatización industrial se utilizan sistemas electromecánicos, sensores, transmisores de campo, sistemas de control y software para realizar monitoreo, control y supervisión de plantas o procesos industriales.

Sistemas automáticos de control

El uso de la retroalimentación, con el objeto de controlar un sistema, ha tenido una historia fascinante. Las primeras aplicaciones del control con retroalimentación se basan en los mecanismos regulados con flotador, desarrollados en Grecia en el periodo 0 a 300 A.C. El regulador con flotador fue utilizado por Ktesibios en un reloj de agua. En el año 250 A.C. Philón desarrolló una lámpara de aceite que sostenía el nivel de aceite por medio de un regulador con flotador, un siglo después de Cristo, Herón de Alejandría, publicó un libro en el cual mostraba varias formas de mecanismos de nivel mediante reguladores con flotador y lo tituló pneumática [2].

Los sistemas de control permiten que haya un mejor desempeño en un determinado proceso, que haya una reducción de errores, teniendo en cuenta los múltiples factores que intervienen en este, pero, son a groso modo, mayormente empleados en los procesos industriales, donde se puede realizar control a sistemas eléctricos, mecánicos, neumáticos, hidráulicos etc. Existe una clasificación para los sistemas de control, de lazo abierto y de lazo cerrado. El sistema de control de lazo cerrado maneja una señal de entrada y una de salida, donde la señal de salida no interviene nunca en la señal de entrada, es decir, no hay comparación entre las dos señales, mientras tanto, los sistemas de control de lazo cerrado entregan una señal de salida que a su vez retorna a la señal de entrada para ajustar así los parámetros deseados.

Robótica

La fascinación por simular de forma mecánica o artificial seres animados más la progresiva necesidad de fuerza de trabajo, ha llevado la humanidad a buscar alternativas para sustituir el trabajo físico o la potencia muscular, por máquinas o instrumentos con capacidad de procesar información, suplementar e incluso reemplazar el trabajo humano. Desde los autómatas franceses y suizos del siglo XVIII, que ya incorporaban complejas estrategias de

control automáticas para su movimiento. En la actualidad ha habido una concurrencia por parte de la ingeniería y la ciencia, para desarrollar dispositivos capaces de suplir necesidades de trabajo mostrando notorios avances e interés en el campo de la robótica [3].

Descripción de un robot industrial

Un robot industrial es un manipulador de usos múltiples, conectado con elementos rígidos que pueden ser prismáticos o de revolución, fijados a una base, bastidor o soporte, y, que al final de su cadena cinemática cuenta con actuador de sujeción, soporte o ejecución (como en el caso de los robots soldadores), causando así un movimiento relativo entre pieza y pieza [4]. El robot cuenta con un volumen de trabajo, es decir, puede describir trayectorias o posicionarse en cualquier ubicación que se encuentre dentro de esta esfera de influencia. Por lo general los brazos robóticos pueden realizar movimientos con tres grados de libertad variando el número de articulaciones que, a su vez, dependen del mecanismo de sujeción normalmente llamado muñeca [3].

Aplicaciones de un robot industrial

Los robots son de mucha utilidad en la industria, sobre todo cuando se habla de labores repetitivas, de gran esfuerzo físico o peligro y que demandan alta precisión. Por eso son utilizados en tareas de fabricación y ensamblaje, como en montajes y transporte de piezas, pintura, soldadura, manejo de materiales peligrosos, exploraciones en sitios de riesgo y en el estudio de brazos protésicos [3]. Los robots son frecuentemente utilizados en la industria automotriz, aeroespacial, militar e incluso para realizar procedimientos médicos, además están clasificados en dos grandes categorías; móviles y fijos, aunque también, de acuerdo a su grado de autonomía, es decir, si son teleoperados, de funcionamiento repetitivo y autónomos o inteligentes. Para el caso particular de los manipuladores industriales se tienen en cuenta categorías dependiendo de los movimientos básicos que realicen y su geometría con cuatro configuraciones básicas; cartesiana, cilíndrica, polar y angular [4].

Neumática

La palabra neumática proviene de la raíz griega “pneuma” que significa aire. Es la tecnología que se dedica al estudio del movimiento del aire, aprovechando sus características de gas ideal y como material elástico, esto implica que, al aplicársele una gran cantidad de energía en su etapa de compresión, se retorne al descomprimirse. En sus comienzos el hombre utilizó el aire como fuerza motriz para la navegación, transporte de materia (correo), en molinos, y también para bombear agua. En 1868 George Westinghouse fabricó un freno de aire, revolucionando así el transporte ferroviario. Para la década de 1950 se comienza a desarrollar esta industria, paralelo al desarrollo de los sensores.

Los sistemas de aire comprimido constan básicamente de elementos activos llamados compresores y de varios elementos pasivos que son: tanques acumuladores que almacenan el fluido, filtros que eliminan las impurezas del aire (partículas, humedad etc.), lubricadores que inyectan pequeñas partículas de aceite en el sistema, evitando así el desgaste de piezas

mecánicas, reguladores de presión que mantienen constante la presión en el sistema, silenciadores que reducen el ruido al expulsar aire a la atmósfera, elementos de transporte del fluido lo suficientemente resistentes para soportar la presión y llevar aire a los puntos deseados del circuito neumático, elementos de control y regulación como: válvulas que direccionan, cortan o permiten el paso del fluido y elementos de trabajo como actuadores lineales o rotativos [5].

Electroneumática

Los sistemas neumáticos se complementan con los eléctricos y electrónicos, permitiendo así dar un alto grado de tecnificación y multiplicidad en sus usos. Comúnmente se utilizan válvulas solenoides, señales de realimentación de interruptores magnéticos, interruptores y sensores eléctricos para finales de carrera. Para usos más eficientes se utilizan los PLC (programable logic controller) y microprocesadores, permitiendo así programar la lógica del funcionamiento de un conjunto neumático [5].

Electrónica

Es el estudio de sistemas que para su funcionamiento utilizan la conducción y control de flujo de electrones u otras partículas con carga eléctrica, diseño y construcción de circuitos electrónicos. Es fundamental en la resolución de problemas en campos como la ingeniería electrónica, electromecánica, la informática e implica el diseño de software para su control. Los circuitos electrónicos son particularmente utilizados en el control, procesamiento, distribución de información, conversión y distribución de energía eléctrica, involucrando así la detección o creación de campos electromagnéticos y corrientes eléctricas.

119

Tarjeta electrónica Arduino

Arduino es una plataforma de electrónica abierta, para la creación de prototipos basada en software y hardware libre, flexible y fácil de usar. Se creó para artistas, diseñadores, aficionados y cualquier interesado en crear entornos u objetos interactivos. Arduino puede recopilar información de su entorno por medio de sus pines de entrada, dando la posibilidad de utilizar una amplia gama de sensores y, a su vez, controlando luces, motores y otros actuadores por medio de sus pines de salida. El microcontrolador de la placa Arduino se controla mediante el lenguaje de programación Arduino que está basado en *Wiring* y el entorno de desarrollo Arduino basado en *processing* (lenguaje de programación, entorno de desarrollo, y la comunidad en línea) [6]. Las placas Arduino pueden ser fabricadas a mano o comprarse montadas de fábrica, es una plataforma libre, de fácil adaptación, muy versátil y flexible al interactuar con diversos tipos de software.

Servomotores

Los servomotores son dispositivos electromecánicos constituidos fundamentalmente por tres elementos: amplificador electrónico, motor eléctrico y sensor de posición. El sensor de posición se encarga de medir el desplazamiento articular (lineal o rotacional) y el

amplificador electrónico o servo amplificador que se encarga de acondicionar al motor la impedancia y la señal de voltaje de baja potencia proveniente de una computadora o un sistema mínimo digital.

Los servomotores cuentan con tres modos de operación: posición, velocidad y par. El modo posición puede mover el motor a un punto o posición preestablecida llamado *set point*. Este modo no permite desplazar cargas o aplicar una fuerza determinada, dándose así el frecuente uso de reguladores como el proporcional derivativo (PD) o el integral proporcional derivativo (PID). En el modo velocidad se controla el movimiento del motor a una velocidad deseada, pero al igual que en el modo posición, no se puede ejercer fuerza, son llamados entonces, modos de arquitectura cerrada, debido a que no pueden programar otro tipo de controladores, lo cual restringe su uso en el campo de la robótica.

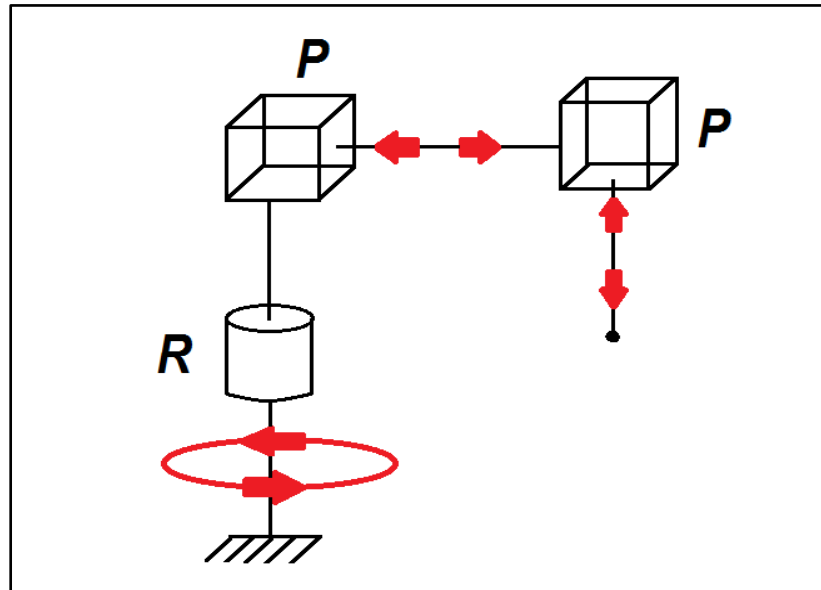
3. Diseño y construcción del manipulador

Tipo de manipulador

Se decidió construir un manipulador con coordenadas cilíndricas de tipo RPP con dos ejes lineales y uno rotacional. Para tal fin se utilizó un servomotor como elemento rotacional, dos actuadores neumáticos que realizan los movimientos lineales y, una ventosa neumática encargada de realizar la función de sujeción de pieza. La figura 1 muestra el esquema básico para el tipo de manipulador previamente descrito.

120

Figura 1. Esquema básico de un manipulador RPP



Selección de elementos neumáticos: de acuerdo con las consideraciones de tamaño y geometría, los elementos neumáticos seleccionados para el desarrollo del proyecto se presentan a continuación:

Actuadores neumáticos: se utilizaron dos actuadores neumáticos marca AirTac, referencia SE-32x100.

Electroválvulas: para realizar el control de los actuadores neumáticos se utilizaron dos electroválvulas marca Festo de referencia MFH-5-1/8 y para el control del eyector de vacío, se utilizó una electroválvula marca Festo de referencia MFH-3-M5.

Eyector de vacío: para la generación de vacío en el elemento de sujeción (ventosa), se utilizó eyector de vacío marca SMC de referencia ZH10L.

Selección de elementos electrónicos: los elementos electrónicos que hacen parte del sistema de control del manipulador son los siguientes:

- a. **Sensores:** para realizar el control de inicio y fin de carrera de los actuadores neumáticos se eligieron cuatro sensores magnéticos marca AirTac de referencia CS-1E de tipo normalmente abierto.
- b. **Tarjetas de control:** para realizar el control PWM del servomotor se utilizó una tarjeta US2Dynamixel utilizando su puerto RS485. Para controlar el resto del circuito neumático y sensores magnéticos, de final e inicio de carrera, se utilizó una tarjeta Arduino MEGA 2560.

121

El controlador USB2Dynamixel puede ser usado en computadores portátiles y PCs sin puertos seriales para convertir un puerto USB en puerto serial, dentro de sus características están:

- Permite seleccionar entre: RS-232, RS-485, TTL.
- Conector de 3P: Puerto de comunicación para niveles TTL
- Conector de 4P: Puerto de comunicación RS-485.
- Conector DB9 para RS 232.

Se escogió la última versión de la tarjeta Arduino Mega 2560 debido a su precio y funcionalidad; la placa está basada en el microcontrolador ATmega2560. Cuenta con 54 entradas/salidas digitales (de las cuales 14 pueden ser utilizados como salidas PWM), 16 entradas analógicas, 4 UARTs (hardware con puertos serie), un cristal de 16 MHz, una conexión USB, un conector de alimentación, un encabezado ICSP, y un botón de reinicio. Contiene todo lo necesario para apoyar el microcontrolador. Simplemente se conecta al computador con un cable USB o a un adaptador AC - DC con centro positivo o a una batería para empezar. El Mega 2560 es compatible con la mayoría de los shields diseñados para el Arduino Uno o Arduino Duemilanove. Además, de todas las características mencionadas, el Arduino Mega 2560 utiliza un ATmega8U2 en lugar del chip FTDI. Esto permite velocidades de transferencia más rápidas, no necesita drivers para Linux o Mac

(para Windows es necesario), y la capacidad de tener al Arduino como un teclado, ratón, joystick, etc.

Servomotor RX-24F. Como elemento de control rotacional se utilizó un servomotor marca Dynamixel referencia RX-24F.

Montaje del sistema de control

Para controlar el servomotor RX-24F se utilizó la USB2DINAMYXEL que convierte un puerto USB en un puerto serial RS485. Para realizar la escritura de señales digitales, controlar los solenoides de las electroválvulas y hacer lectura de las señales digitales de los sensores se utilizó una tarjeta Arduino Mega2560 que funciona en un rango de 0V a 5V. Debido a que las solenoides de las electroválvulas son activadas por señales de 24V, se tuvo que construir una tarjeta amplificadora, que permite conmutar las señales de 5V por señales de 24V y un sistema de Pull Down para que al realizar la lectura de los sensores se evitaran ruidos haciendo buena referencia a tierra en el sistema. Para todos estos propósitos se construyó una caja de control, hecha en acrílico y que constó de 24 conectores tipo RCA.

Circuito neumático del manipulador: de los tres grados de libertad del manipulador, dos son de carácter lineal, para este propósito se utilizaron actuadores neumáticos de doble efecto. Cabe resaltar que el efector final del manipulador es también de carácter neumático, para realizar sujeción por vacío. Cada elemento va acompañado por su respectivo elemento neumático de control (electroválvulas), por consiguiente fue necesario diseñar e instalar un circuito neumático.

Diseño en CAD de elementos mecánicos: para culminar el modelo físico del manipulador, se diseñó el modelo necesario que acoplara y soportara los actuadores neumáticos y el servomotor, de manera que, se cumplieran los requerimientos mecánicos y geométricos. El diseño fue realizado en el software CAD Autodesk Inventor Professional 2011. Con el diseño en CAD terminado, se ejecutó el mecanizado de las partes. Como criterio de diseño se tuvieron en cuenta las necesidades de acoplar los elementos neumáticos y electrónicos, de configurar la geometría física de un manipulador de tipo cilíndrico, y de diseñar una estructura apta para la ejecución de los actuadores.

Construcción del manipulador

Inicialmente se respetaron los planos realizados en el software de CAD, Autodesk Inventor 2011, sin embargo, a medida que se fue desarrollando la construcción y pruebas de montaje del manipulador se realizaron algunos cambios para mejorar su estructura y funcionamiento. Se manejaron únicamente dos tipos de roscas en el manipulador; M6x1 y M10x1, con longitudes entre 10 y 30 mm. Las piezas que no se alteraron de acuerdo con los planos iniciales:

- El alojamiento del actuador neumático horizontal.
- El eje del servomotor.

- La base para el soporte del servomotor.
- El acople para actuadores neumáticos de horizontal a vertical marca AirTac, referencia F-SI32-FA.
- El cople para actuadores neumáticos de horizontal a vertical marca AirTac, referencia F-SI32-FA

Al alojamiento del actuador horizontal se le agregó una laminilla con disposición vertical y dos rodamientos (uno fijo y uno graduable), que hacen contacto con el disco que sirve como guía del movimiento rotacional y a su vez como soporte, evitando así que el giro o momento, generado por el peso del sistema superior del manipulador recaigan en el eje del servomotor. Se mecanizó un eje escalonado conservando las medidas iniciales del diseño y se acopló con un rodamiento comercial, previamente seleccionado de referencia 6200-2RS y marca SKF. Este eje por un extremo se ensambla a la flecha de salida del servomotor Dynamixel RX-24F y por el otro es roscado con el alojamiento del actuador neumático de disposición horizontal.

La base para el soporte del servomotor cuenta con las medidas inicialmente planificadas, no obstante, la perforación en la cual el soporte del servomotor va ensamblado, se varió de disposición lateral a frontal, debido a que el soporte del servomotor sufrió una variación durante la construcción. El acople para para configurar dos actuadores neumáticos el uno horizontal y el otro vertical es marca AirTac, referencia F-SI32-FA es de tipo comercial, sin embargo, se necesitó realizarle una perforación en el centro, pues de fábrica viene solo con cuatro perforaciones de 7 mm, distribuidas en sus esquinas, este elemento es sujetado por una pinza permitiendo ensamblar un actuador de manera horizontal con uno en disposición vertical.

123

Variaciones en la construcción del manipulador: el diseño inicial fue variando durante la construcción y el montaje del manipulador. Algunos elementos fueron eliminados, variados o adicionados para obtener así mejores resultados en el desempeño, estos elementos son los siguientes:

- Soporte circular.
- Disco circular para guía del movimiento rotacional.
- Soporte servomotor.
- Guías lineales.
- Placa soporte de guías lineales.
- Abrazadera regulable para actuador vertical.
- Sistema anti giro vástago actuador vertical.

Debido a los requerimientos de robustez de los manipuladores robóticos y a la necesidad de guiar el movimiento de giro se construyó una base circular con un diámetro de 158 mm, a partir de un tubo de acero recortado, se soldó a una base rectangular, con perforaciones en las esquinas para ser fijado por medio de tornillos a la base de trabajo del manipulador, con cuatro pestañas soldadas distribuidas a 90° una de la otra, para así ser fijado por su parte

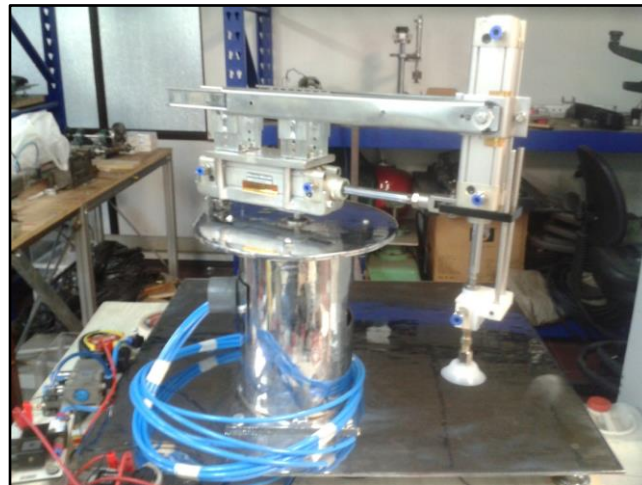
superior al disco circular que guía el movimiento rotacional. Posteriormente esta pieza fue tratada con un proceso de cromado para mejorar su estética y prolongar su conservación.

Se construyó un disco de 260 mm de diámetro, para guiar el movimiento rotacional del manipulador y soportar el peso de la parte superior de este. El disco tiene un mecanizado en el centro para el alojamiento del rodamiento 6200-2RS y cuatro perforaciones dispuestas a 90 °, para ser fijado por medio de tornillos al soporte global circular del manipulador.

Para alojar y soportar el servomotor se dobló, perforó y mecanizó con la forma de su parte inferior, una lámina de 37 mm de ancho y 110 mm de largo. La ranura fue realizada de forma tal que se pudiera reubicar el punto de fijación durante los cambios que iban sufriendo las piezas del manipulador, y también para hacer más flexible el montaje evitando que el elemento estuviese expuesto a carga por error en las medidas. Para guiar el movimiento horizontal, y evitar el giro del actuador vertical, se modificaron 2 correderas lineales comerciales y se acoplaron a una base rectangular que encaja en el alojamiento del actuador horizontal.

Para acoplar las guías horizontales al actuador vertical, y evitar así su giro, se construyó una abrazadera regulable por medio de tornillos y con una perforación roscada a cada lado que permite ensamblarla en las correderas. Finalmente, para evitar el giro del vástago del actuador vertical se construyó una pieza plástica que se sujeta al eyector de vacío de la ventosa y se ensambla en dos varillas circulares que pasan por los orificios del acople F-SI32-FA.

Figura 2. Ensamble total manipulador pick and place con 3 GDL



4. Cinemática y modelos matemáticos del manipulador

Volumen de trabajo

El volumen de trabajo de un actuador describe esencialmente el espacio dentro del cual se desplaza su muñeca. Un actuador cilíndrico posee un volumen de trabajo regular; es decir, su espacio de trabajo es geoméricamente semejante a un cilindro. Esta configuración consta de una articulación rotacional con una libertad de giro entre 0° y 270° (normalmente los manipuladores cilíndricos no giran los 360°), y dos articulaciones prismáticas dispuestas de manera perpendicular entre sí con una libertad de actuación lineal entre 0 y 100 mm. El elemento es de interés sobre todo en células flexibles, con el robot situado en el centro, sirviendo otras máquinas dispuestas de manera radial a su alrededor, máquinas de control numérico para el transporte de herramientas, utilizado para la selección de piezas, la industria farmacéutica, la ubicación de productos para empaque, en pintura o soldadura, cuando su trayectoria y espacio de trabajo lo permiten.

Se parte entonces del volumen de un cilindro para calcular el volumen de trabajo; como la trayectoria no describiría un cilindro completo al no girar 360°, sino, 270°, es decir, 3/4 partes de un cilindro. Se debe tener en cuenta el espacio de trabajo muerto que se ocasiona por la configuración del manipulador, entonces; el volumen total de trabajo es producto de la diferencia del volumen máximo, producto del final de la carrera del actuador horizontal y el volumen muerto, ocasionado por la distancia entre el eje del elemento rotacional y el inicio de la carrera del actuador horizontal, describiendo geoméricamente un cilindro hueco en el centro. Las siguientes ecuaciones hacen parte del análisis del volumen de trabajo real del manipulador, en concordancia con los análisis anteriores.

$$V_T = \frac{3}{4}\pi r_{Max}^2 h - \frac{3}{4}\pi r_{Min}^2 h \quad (1)$$

Dónde:

V_T = Volumen total de trabajo

r_{Max} = Radio máximo del manipulador, es decir, el final de la carrera del actuador horizontal

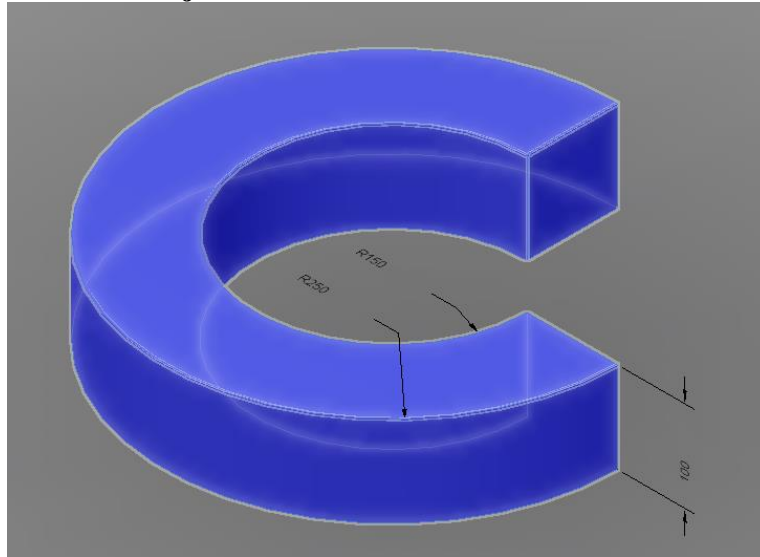
r_{Min} = Radio mínimo del manipulador, es decir, el inicio de la carrera del actuador horizontal

h = Es la altura del cilindro, en este caso, el fin de la carrera del actuador vertical

Agrupado términos comunes en (1):

$$V_T = \frac{3}{4}\pi h (r_{Max}^2 - r_{Min}^2) \quad (2)$$

Figura 3. Volumen de trabajo

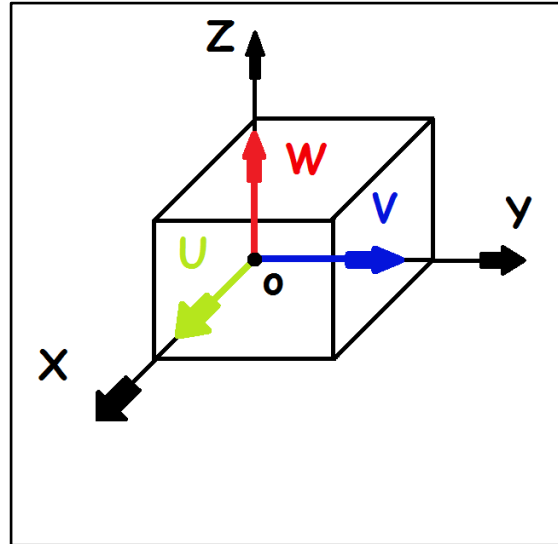


Cinemática directa

126

Se utiliza álgebra vectorial y matricial para el desarrollo de un método generalizado y sistemático para describir y representar la localización de los elementos de un brazo con respecto a un sistema de referencia fijo. Como los elementos de un brazo pueden girar o trasladarse con respecto a un sistema de coordenadas de referencia, se establecerá un sistema de coordenadas ligado al cuerpo a lo largo del eje de la articulación para cada elemento. El problema cinemático directo se reduce a encontrar una matriz de transformación que relaciona el sistema de coordenadas ligado al cuerpo al sistema de coordenadas de referencia. También, se utiliza una matriz de rotación 3x3 para describir las operaciones rotacionales del sistema ligado al cuerpo con respecto al sistema de referencia. Se usan entonces las coordenadas homogéneas para representar vectores de posición en un espacio tridimensional, y las matrices de rotación se ampliarán a matrices de transformación homogénea 4x4 para incluir las operaciones de traslación del sistema de coordenadas ligado al cuerpo. Esta representación matricial de un elemento mecánico rígido para describir la geometría espacial de un brazo fue utilizada por primera vez por Denavit y Hatenberg en 1955. Para exponer matemáticamente los criterios mencionados, se exhibe un ejemplo para un punto P :

Figura 4. Sistema de coordenadas de referencia ligado al cuerpo.



Una matriz de rotación 3x3 opera sobre un vector de posición en un espacio euclídeo tridimensional que relaciona las coordenadas a un sistema rotado OUVW (sistema ligado al cuerpo) en un sistema de coordenadas de referencia OXYZ.

127

Para una posición en partículas P_{uvw} se tiene.

$$P_{uvw} = (P_u, P_v, P_w)^T Y P_{xyz} = (P_x, P_y, P_z)^T \quad (3), \quad \text{Siendo } T \text{ convención para transpuesta.}$$

Se puede encontrar una matriz R de transformación 3x3 que transforme las coordenadas P_{uvw} respecto a OXYZ después que el sistema de coordenadas OUVW ha sido girado.

$$P_{xyz} = R P_{uvw} \quad (4)$$

$$P_{uvw} = P_u i_u + P_v j_v + P_w k_w \quad (5)$$

P_x, P_y, P_z : Son los componentes de P a lo largo de los ejes OX,OY,OZ.

$$P_x = i_x \cdot P = i_x i_u P_u + i_x j_v P_v + i_x k_w P_w$$

$$P_y = i_y \cdot P = i_y i_u P_u + i_y j_v P_v + i_y k_w P_w$$

$$P_z = i_z \cdot P = i_z i_u P_u + i_z j_v P_v + i_z k_w P_w$$

Expresándolo en forma matricial:

$$\begin{matrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{matrix} = \begin{bmatrix} i_x i_u & i_x j_v & i_x k_w \\ j_y i_u & j_y j_v & j_y k_w \\ k_z i_u & k_z j_v & k_z k_w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_u \\ P_v \\ P_w \end{bmatrix}$$

Siendo la matriz 3x3 la matriz R, y, análogamente se puede decir que:

$$P_{uvw} = QP_{xyz} \quad (6)$$

Lo cual por conmutación de productos lleva a:

$$Q = R^{-1} = R^T \quad (7)$$

$$QR = R^T R = R^{-1} R = I_3 \quad (8)$$

Siendo I_3 la matriz identidad.

La intención del ejemplo anterior era encontrar las matrices de rotación que representan rotaciones del sistema OUVW respecto a los ejes principales de referencia OXYZ. Si el sistema se gira a α° respecto al eje OX entonces el punto P_{uvw} con coordenadas $(Pu, Pv, Pw)^T$ con respecto a OUVW tendrá coordenadas diferentes a $(Px, Py, Pz)^T$ con respecto al sistema OXYZ. La matriz $R_{x,\alpha}$ se llama matriz de rotación con respecto al eje OX con un ángulo α , entonces:

$$P_{xyz} = R_{x,\alpha} P_{uvw} \quad (9)$$

Con $i_x \equiv i_u$, con respecto a OX:

$$R_{x,\alpha} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\text{Sen}\alpha \\ 0 & \text{Sen}\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix}$$

Respecto a OY:

$$R_{y,\phi} = \begin{bmatrix} \cos\phi & 0 & \text{Sen}\phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\text{Sen}\phi & 0 & \cos\phi \end{bmatrix}$$

Respecto a OZ:

$$R_{z,\theta} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\text{Sen}\theta & 0 \\ \text{Sen}\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Las matrices de rotación se pueden multiplicar entre sí para representar la secuencia de rotación respecto a OXYZ, lo que se denomina una matriz de rotación compuesta. Es importante tener en aclarar que las matrices no conmutan por eso se debe tener en cuenta el orden.

$$R = R_{y,\phi} R_{z,\theta} R_{x,\alpha} \quad (10)$$

En esta secuencia el primer eje que rota es α .

$$\begin{bmatrix} \cos\phi & 0 & \text{Sen}\phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\text{Sen}\phi & 0 & \cos\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\text{Sen}\theta & 0 \\ \text{Sen}\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\text{Sen}\alpha \\ 0 & \text{Sen}\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} \cos\phi\cos\theta & \sin\phi\sin\alpha - \cos\phi\sin\theta\cos\alpha & \cos\phi\sin\theta\sin\alpha + \sin\phi\cos\alpha \\ \sin\theta & \cos\theta\cos\alpha & -\cos\alpha \\ -\sin\phi\cos\theta & \sin\phi\sin\theta\cos\alpha + \cos\phi\sin\alpha & \cos\phi\cos\alpha - \sin\phi\sin\theta\sin\alpha \end{bmatrix}$$

Como una matriz de rotación 3x3 no da posibilidad para la traslación y el escalado, se introduce una cuarta coordenada o componente al vector de posición $P = (Px, Py, Pz)^T$ transformándolo en $\hat{P} = (wPx, wPy, wPz, w)^T$, entonces se dice que el vector \hat{P} se exprese en coordenadas homogéneas. La representación vectorial en coordenadas homogéneas permite en un espacio euclídeo tridimensional desarrollar transformaciones matriciales para la rotación, escalado, rotación y transformación de perspectiva, también, representar un vector de posición de N componentes por un vector de $(N+1)$ componentes se llama representación en coordenadas homogéneas. En robótica es común utilizar un factor de escala W que es igual a 1, las coordenadas físicas se relacionan con coordenadas homogéneas de la siguiente manera:

$$P_x = \frac{WP_x}{W} \quad P_y = \frac{WP_y}{W} \quad P_z = \frac{WP_z}{W} \quad (11)$$

La matriz de transformación homogénea es una matriz 4x4 que transforma un vector posición expresado en coordenadas homogéneas de un sistema de coordenadas a otro y se puede dividir en cuatro sub-matrices:

$$T = \begin{bmatrix} R_{3x3} & P_{3x1} \\ f_{1x3} & 1x1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{matriz de rotación} & \text{vector de posición} \\ \text{---} & \text{---} \\ f_{1x3} & 1x1 \end{bmatrix}$$

Las matrices de rotación homogéneas básicas, son:

$$T_{x,\alpha} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

$$T_{y,\phi} = \begin{vmatrix} \cos\phi & 0 & \sin\phi & 0 \\ 0 & 1 & -\sin\phi & 0 \\ -\sin\phi & 0 & \cos\phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

$$T_{z,\theta} = \begin{vmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

En una matriz de translación homogénea básica la diagonal produce escalado global y local, los valores de las coordenadas se alargan mediante los escalares a, b, c .

$$T_{trans} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & dx \\ 0 & 1 & 0 & dy \\ 0 & 0 & 1 & dz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

$$\begin{vmatrix} a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} a_x \\ b_y \\ c_z \\ S \end{vmatrix}$$

$$\begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S \end{vmatrix} \begin{vmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} X \\ Y \\ Z \\ S \end{vmatrix}$$

En las matrices de rotación básicas, T_{rot} , no se produce efecto de escalado local, el cuarto elemento diagonal produce escalado global, entonces, si $S>1$ las coordenadas se reducen y si $0<S<1$ las coordenadas se alargan. Si $S>0$ las coordenadas físicas del vector son:

$$P_x = \frac{x}{S}, P_y = \frac{y}{S}, P_z = \frac{z}{S}, w = \frac{S}{S} = 1 \quad (12)$$

130

Entonces; una matriz de transformación homogénea 4x4 transforma un vector expresado en coordenadas homogéneas con respecto al sistema de coordenadas OUVW en el sistema de coordenadas de referencia OXYZ, usando un $W=1$.

$$\hat{P}_{xyz} = T \hat{P}_{uvw} \quad (13) \quad \text{con } W=1$$

$$T = \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x & p_x \\ n_y & s_y & a_y & p_y \\ n_z & s_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n & s & a & p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Representación de Denavit-Hartenberg

Denavit y Hatenberg crearon un algoritmo que permite obtener el modelo cinemático directo. Este método permite establecer sistemas de coordenadas ligados a cada eslabón para obtener la cinemática del mecanismo. Después de definidas los sistemas de coordenadas se pasa de uno a otro por medio de transformaciones básicas (rotaciones y traslaciones), que, a su vez dependen de las características geométricas de cada eslabón, relacionando así un sistema de coordenadas con otro; las transformaciones que se utilizan son:

- Rotación alrededor del eje Z_{i-1} un ángulo θ_i .
- Traslación a lo largo de Z_{i-1} una distancia d_i ; vector $(0, 0, d_i)$.
- Traslación a lo largo de x_i una distancia a_i ; vector $(a_i, 0, 0)$.
- Rotación alrededor del eje x_i un ángulo α_i .

Donde:

θ_i Es el ángulo que forman los ejes x_{i-1} y x_i medido en un plano perpendicular al eje z_{i-1} , utilizando la regla de la mano derecha. Es un parámetro para articulaciones giratorias.

d_i Es la distancia a lo largo del eje z_{i-1} desde el origen del sistema de coordenadas (i-1)-ésimo hasta la intersección del eje z_{i-1} con el eje x_i . En articulaciones prismáticas es un parámetro variable.

a_i Es la distancia a lo largo del eje x_i que va desde la intersección del eje z_{i-1} con el eje x_i hasta el origen del sistema i-ésimo, en el caso de articulaciones giratorias. En el caso de articulaciones prismáticas, se calcula como la distancia más corta entre los ejes z_{i-1} y z_i .

α_i Es el ángulo de separación del eje z_{i-1} , medido en un plano perpendicular a x_i , utilizando la regla de la mano derecha.[4].

Tabla 1. Parámetros Denavit-Hartenberg

PARÁMETROS D-H				
Articulación	θ_i	α_i	a_i	d_i
1	θ_1	0	0	d_0
2	0	90°	0	d_1
3	0	90°	0	d_2

131

θ_1 : Para este caso este ángulo oscila entre 0° y 270° .

d_0 : 23, 5 mm.

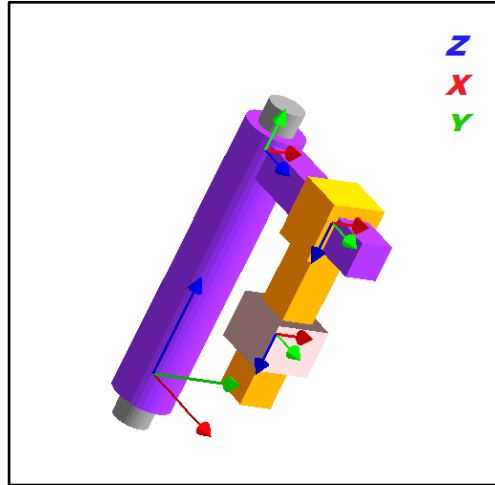
d_1 : L_1+150 ; $0 < L_1 < 100$ mm

d_2 : L_2+140 ; $0 < L_2 < 100$ mm

L1= Carrera actuador horizontal

L2= Carrera actuador vertical

Figura 5. Establecimiento de coordenadas articulares para un robot cilíndrico (RPP)



$${}^{(i-1)}A_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\cos\alpha_i \text{Sen}\theta_i & \text{Sen}\alpha_i \text{Sen}\theta_i & a_i \cos\theta_i \\ \text{Sen}\theta_i & \cos\alpha_i \cos\theta_i & -\text{Sen}\alpha_i \cos\theta_i & a_i \text{Sen}\theta_i \\ 0 & \text{Sen}\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_3^0 = A_1 A_2 A_3$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & -\text{sen}\theta_1 & 0 & 0 \\ \text{sen}\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^1A_2 = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & 0 & -\text{sen}\theta_1 & 0 \\ \text{sen}\theta_1 & 0 & \cos\theta_1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_0^3 = {}^1A_2 A_3 \quad (14)$$

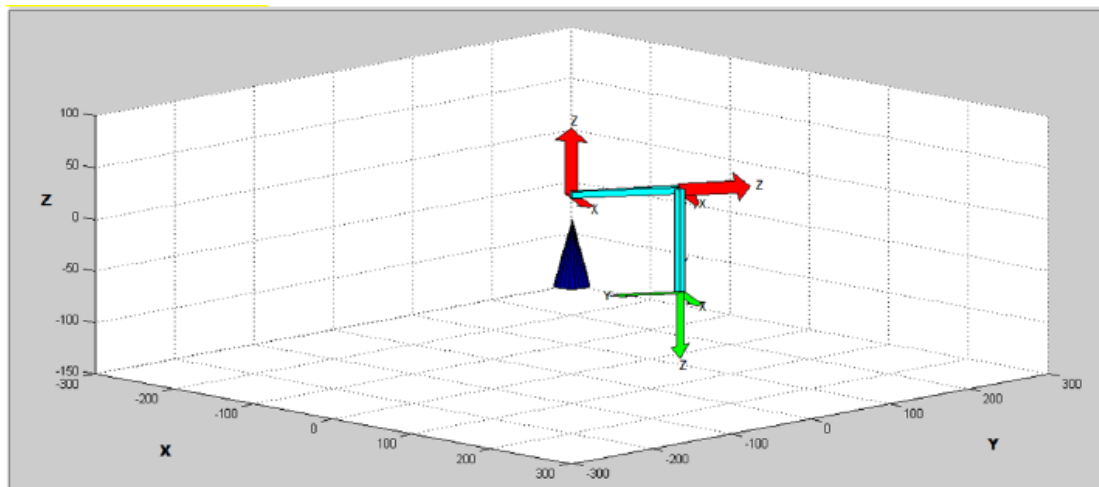
$$T_0^3 = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & \text{sen}\theta_1 & -\cos\theta_1 & -d_2\text{sen}\theta_1 \\ \text{sen}\theta_1 & -\cos\theta_1 & -\text{sen}\theta_1 & d_2\cos\theta_1 \\ 0 & 0 & -1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Como los ejes no son coincidentes entre sí, a la matriz se le agregan las distancias correspondientes, para hacer exactos los cálculos.

Comprobación gráfica de la cinemática directa

Como la principal función del modelo cinemático directo es relacionar la localización de los elementos articulares de una cadena cinemática con respecto a un eje de referencia fijo, normalmente ubicado en la base, se realizó la comprobación de forma gráfica, apoyados en la herramienta computacional Hemero, que es una toolbox disponible en red de manera gratuita para ejecutarse en el software Matlab.

Figura 6. Representación gráfica del manipulador RPP con 3 grados de libertad en Hemero toolbox.



133

Problema cinemático inverso

El objetivo del problema cinemático inverso consiste en encontrar los valores que deben adoptar las coordenadas articulares del robot $q = (q_1, q_2, \dots, q_n)^T$ para que su extremo se posicione y oriente según una determinada localización espacial.

Así cómo es posible abordar el problema cinemático directo de una manera sistemática a partir de la utilización de matrices de transformación homogéneas, e independientemente de la configuración del robot, no ocurre lo mismo con el problema cinemático inverso, siendo el procedimiento de obtención de las ecuaciones fuertemente dependiente de la

configuración del robot. Se han desarrollado algunos procedimientos genéricos susceptibles de ser programados, de modo que un computador pueda, a partir del conocimiento de la cinemática del robot (con sus parámetros de DH, por ejemplo) obtener la n-upla de valores articulares que posicionan y orientan su extremo. El inconveniente de estos procedimientos es que se trata de métodos numéricos iterativos, cuya velocidad de convergencia e incluso su convergencia en si no está siempre garantizada.

A la hora de resolver el problema cinemático inverso es mucho más adecuado encontrar una solución cerrada. Esto es, encontrar una relación matemática explícita de la forma:

$$q_k = F_k(x, y, z, a, \beta, g)$$

$K = 1 \dots n$ (grados de libertad)

Este tipo de solución presenta, entre otras, las siguientes ventajas:

1. En muchas aplicaciones, el problema cinemático inverso ha de resolverse en tiempo real (por ejemplo, en el seguimiento de una determinada trayectoria). Una solución de tipo iterativo no garantiza tener la solución en el momento adecuado.
2. Al contrario de lo que ocurría en el problema cinemático directo, con cierta frecuencia la solución del problema cinemático inverso no es única; existiendo diferentes n-uplas $(q_1, q_2, \dots, q_n)^T$ que posicionan y orientan el extremo del robot

134

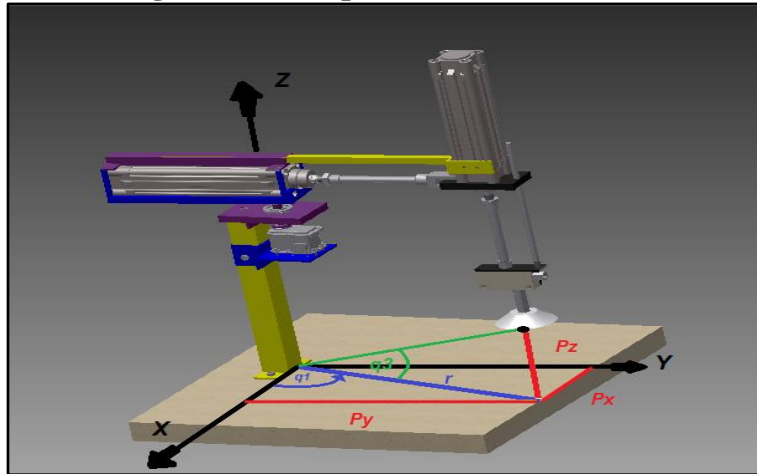
De mismo modo, en estos casos una solución cerrada permite incluir determinadas reglas o restricciones que aseguren que la solución obtenida sea la más adecuada posible. No obstante, a pesar de las dificultades señaladas, la mayor parte de los robots poseen cinemáticas relativamente simples que facilitan en cierta medida la resolución de su problema cinemático inverso. Por ejemplo, si se consideran solo tres primeros grados de libertad de muchos robots, estos tienen una estructura plana, esto es, los tres primeros elementos quedan contenidos en un plano. Esta circunstancia facilita la resolución del problema. Así mismo, en muchos robots se da la circunstancia de que los tres grados de libertad últimos, dedicados fundamentalmente a orientar el extremo del robot, correspondan a giros sobre los ejes que se cortan en un punto.

De nuevo esta situación facilita el cálculo de la n-upla $q = (q_1, q_2, \dots, q_n)^T$ correspondiente a la posición y orientación deseadas. Por lo tanto, para los casos citados y otros, es posible establecer ciertas pautas generales que permitan plantear y resolver el problema cinemático inverso de una manera sistemática.

Para obtener los valores de las primeras variables articulares, que son las que posicionan el robot, se utilizan métodos geométricos, que abordan relaciones geométricas y trigonométricas sobre los elementos del robot. Para la solución de este problema particular

se utilizó un método geométrico, haciendo una resolución de triángulos formados por los elementos y articulaciones del robot.

Figura 7. Relaciones trigonométricas para la cinemática inversa del manipulador.



$$0 < \theta = q_1 < 270^\circ$$

$$\tan q_1 = \frac{p_y}{p_x} \quad (15)$$

$$q_1 = \tan^{-1} \frac{p_y}{p_x} \quad (16)$$

$$r = q_2$$

$$r^2 = x^2 + y^2 \quad \text{ó} \quad r^2 = p_x^2 + p_y^2 \quad (17)$$

$$\tan q_3 = \frac{p_z}{r}$$

$$q_3 = \tan^{-1} \frac{p_z}{r}$$

$$q_3 = \tan^{-1} \frac{p_z}{q_2} \quad (18)$$

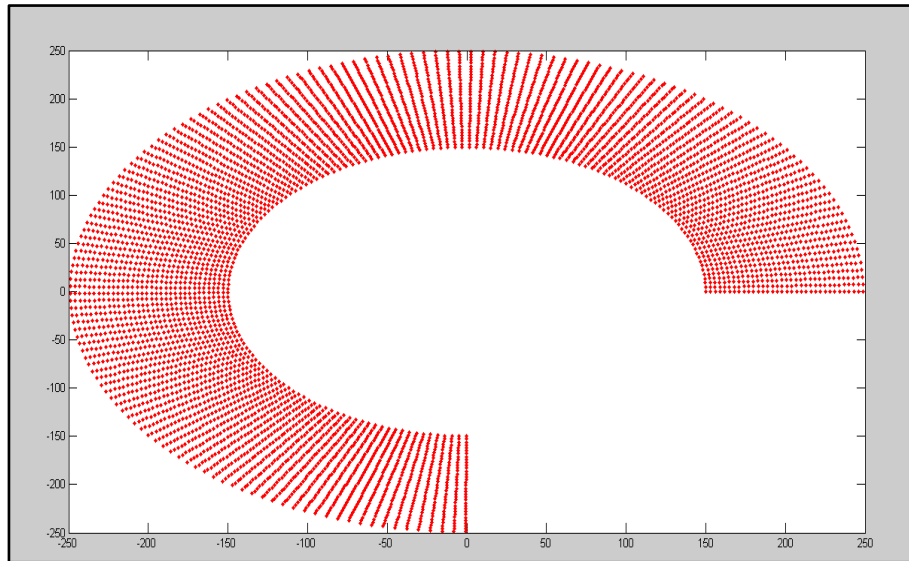
A partir de las anteriores relaciones trigonométricas para encontrar la cinemática inversa del manipulador, el vector q_k (vector de coordenadas articulares), es el siguiente:

$$q_k = \left(\tan^{-1} \frac{p_y}{p_x}, r, \tan^{-1} \frac{p_z}{r} \right)$$

Comprobación gráfica al problema cinemático inverso

Como la solución del problema cinemático inverso no es única, para realizar comprobación del modelo, también se utilizó el apoyo en las herramientas matemáticas que ofrece el software Matlab, logrando conocer los posibles puntos de ubicación del efector final en el plano XY, utilizando las funciones trigonométricas que relacionan este plano, teniendo claro que estas posiciones varían a lo largo del eje Z, entre 0 y 100 unidades de altura, en este caso milímetros, y, en coordenadas entre 70 y 170 en Z.

Figura 8. Posibles posiciones del efector final en el plano XY



136

5. Resultados y discusión

Secuencias de programación

El manipulador construido es reprogramable. Para ejemplificar cómo funciona, se realizaron tres secuencias de prueba con la finalidad de mostrar la versatilidad de usos que este tiene dentro de su espacio de trabajo. Como su efector final es una ventosa neumática, se sintetizaron secuencias de transporte de piezas o materiales dentro del volumen de trabajo, debido a errores de retraso en la lectura de señales digitales en el software Matlab se obviaron los sensores magnéticos que previamente habían sido probados en secuencias programadas en lenguaje Arduino. Por consiguiente, el algoritmo computacional construido para las secuencias finales es comandado a razón del tiempo, sin lectura de señales digitales.

La ilustración de las secuencias será realizada por medio del método gráfico GRAFCET, que es una forma de realizar descripción de procesos, independiente a la tecnología exterior empleada y que puede ser interpretado por personas no especialistas en temas de

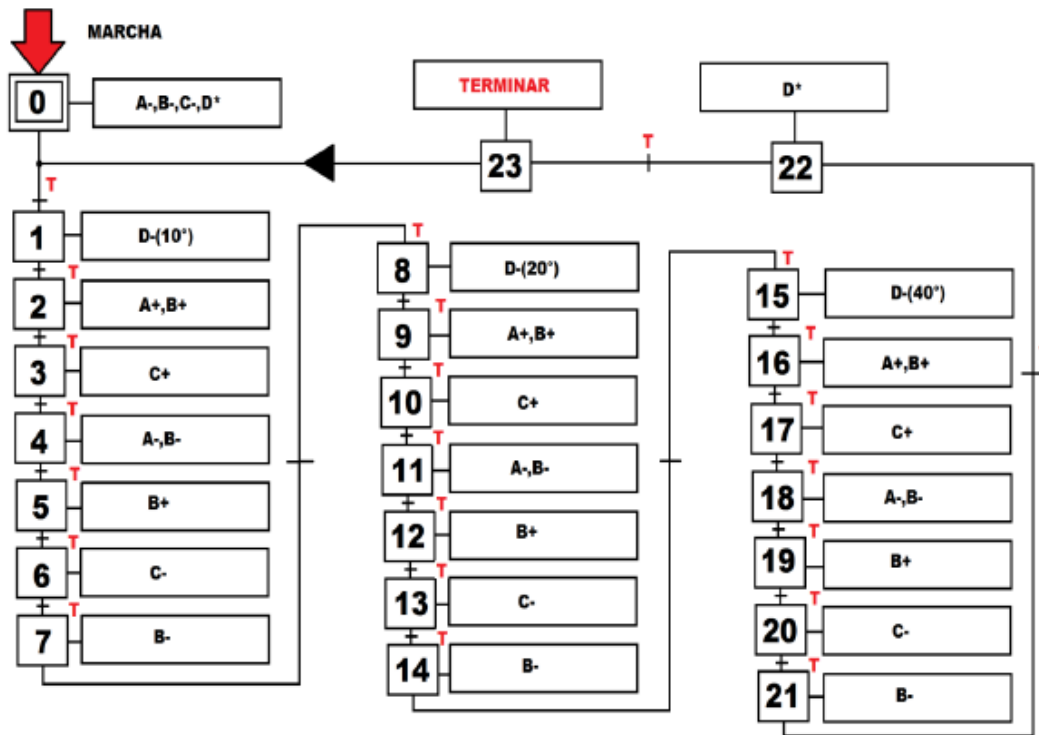
automatización. Actualmente, gran diversidad de autómatas programables traen incorporadas algunas instrucciones de programación que permiten introducir directamente el diagrama GRAFCET. En otros casos existen programas en capacidad de compilar el diagrama gráfico GRAFCET traduciéndolo al lenguaje de la máquina, con unas amplias ventajas de flexibilidad y rapidez de diseño. Es de resaltar que el GRAFCET no debe confundirse con un lenguaje de programación, es solo un método gráfico que permite explicar las acciones realizadas por un automatismo.

El diagrama GRAFCET cuenta con dos componentes elementales; las etapas y las transiciones. Las etapas son donde se albergan las acciones, que a su vez se pueden dividir en acciones más pequeñas llamadas micro-etapas, son las condiciones que se deben cumplir para pasar de una etapa a otra y albergan las receptividades que, en términos generales, son las condiciones para realizar el traslado de etapa, como por ejemplo; un final de carrera, la lectura de un sensor o un temporizador.

Tabla 2. Acciones

ACCIONES
A+ : Solenoide electroválvula actuador horizontal ON
A- : Solenoide electroválvula actuador horizontal OFF
B+ : Solenoide electroválvula actuador vertical ON
B- : Solenoide electroválvula actuador vertical OFF
C+ : Solenoide electroválvula ventosa neumática ON
C- : Solenoide electroválvula ventosa neumática OFF
D+(K°) : Orden de giro en sentido horario del servomotor (Siendo K el valor numérico de grados en el que se desea posicionar el objetivo, en un rango de 0 a 300 ° sentido anti horario)
D-(K°) : Orden de giro en sentido anti horario del servomotor (Siendo K el valor numérico de grados en el que se desea posicionar el objetivo, en un rango de 0 a 300 ° sentido anti horario)
D* : Orden de enviar el servomotor a su posición 0 °
RECEPTIVIDADES
T : Temporizador, pausa o retraso.

Figura 9. Grafset para la secuencia 1. (Aclarar que fueron 3 secuencias)



Análisis del servomotor

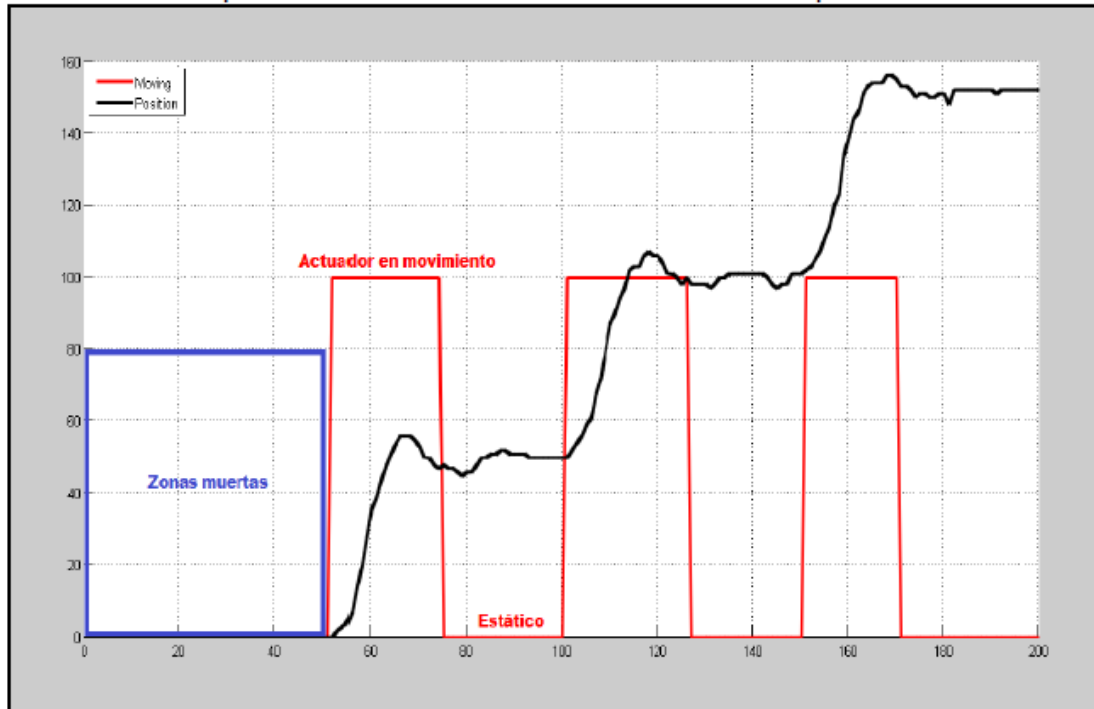
138

Para analizar el funcionamiento del servomotor en el sistema se realizaron diferentes secuencias de movimientos, con diferentes intervalos angulares. Se aprovecharon las características tecnológicas del servomotor al contar con un microprocesador interno que retorna información sobre su estado en general; es decir, temperatura, par, tensión, corriente, posición y velocidad. Cabe resaltar que el servomotor devuelve la información en forma de bytes, siendo 0 el valor mínimo y 1023 el máximo, para lo cual es necesario interpolar dichos valores a las unidades que se desean recibir en pantalla. Lógicamente; conociendo los rangos mínimos y máximos del servomotor en cada magnitud física; por ejemplo, el mínimo en posición es 0 ° y el máximo es 300 °, con estos dos valores se hace la relación de proporcionalidad de bytes a unidades angulares.

Se realizó una gráfica que muestra posición versus tiempo y movimiento vs tiempo, mostrando 1(100 para la escala de la gráfica) cuando el actuador se encuentra en movimiento y 0 cuando este se encuentra estático. El factor de escala en la gráfica de posición es 100 unidades por cada 30 °.

Prueba con intervalos de 15 ° iniciando en el punto 0 °. Esta secuencia cuenta con intervalos de 15°, pausas entre movimiento y movimiento de 0,5 segundos y tres movimientos entre el punto 0 de inicio y el punto 0 al final de la secuencia.

Figura 10. Prueba intervalos de 15 ° iniciando en el punto 0 ° (aclarar que se realizaron cuatro pruebas)



139

Los datos que retroalimentó el servomotor en pantalla en función de posición y par se observan en la siguiente tabla.

Tabla 3. Resultados de la prueba con intervalos de 15 ° iniciando en el punto 0 °

Cambio de posición	Posición real del servomotor en bytes:	Valor angular Real (°)	Par real (N-m)
Movimiento 1	0	0	2
Movimiento 2	48	14	2
Movimiento 3	101	30	2
Movimiento 4	152	46	2

Comprobación física de la cinemática directa

Para realizar la comprobación del modelo cinemático del manipulador, se utilizaron las herramientas matemáticas del software Matlab, mostrando para diferentes posiciones de las articulaciones móviles, los resultados de los parámetros de la matriz de transformación homogénea, recuerde que la estructura de la matriz de transformación homogénea es la siguiente:

$$-T = [N_x \ S_x \ A_x \ P_x; \ N_y \ S_y \ A_y \ P_y; \ N_z \ S_z \ A_z \ P_z; \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]$$

Finalmente los resultados que arrojó el programa realizado en Matlab, se contrastaron con medidas físicas, encontrando como resultado las mismas magnitudes.

Tabla 4. Comparación de los valores entregados por Matlab con las magnitudes físicas del manipulador.

PARÁMETROS DE ENTRADA	VALOR
Ángulo de giro articulación rotacional (°)	0
Recorrido lineal actuador horizontal (mm)	100
Recorrido lineal actuador vertical (mm)	100
PARÁMETROS DE SALIDA	VALOR
Nx	1
Sx	0
Ax	-1
PX	0
Ny	0
Sy	-1
Ay	0
PY	240
Nz	0
Sz	0
Az	-1
PZ	250

6. Conclusiones

Se identificaron las variables físicas que hicieron óptima la construcción del manipulador, como lo son, su geometría y requerimientos mecánicos. Obteniendo como resultado un manipulador con un alto grado de funcionalidad. Se definieron las especificaciones mecánicas, geométricas y de control del manipulador, logrando así que todas sus características culminaran en un modelo final óptimo.

Se logró calcular el modelo cinemático directo del manipulador, por medio del método de Denavit-Hartenberg, su cinemática inversa por medio de relaciones trigonométricas y su volumen de trabajo por deducción matemática. Se realizaron tres secuencias para el manipulador, simulando estas, diferentes aplicaciones en la industria, como el transporte de herramienta en una máquina CNC, el cambio de línea de un producto en manufacturación y el transporte de elementos en la industria farmacéutica. Se fortalecieron los conceptos teóricos prácticos adquiridos durante el pregrado de Ingeniería Mecánica en la Universidad Tecnológica de Pereira, en cursos como regulación y automatismo e instrumentación y control. Para mejorar la precisión del equipo y aumentar su flexibilidad de funcionamiento, se recomienda cambiar los actuadores neumáticos por servomecanismos lineales.

Para evitar la pequeña imprecisión que presenta el manipulador en el grado de libertad rotacional, se recomienda cambiar el servomotor por uno con mayor par, pues la inercia

hace que pierda tiempo buscando la posición deseada y oscile, lo cual provoca imprecisión en el sistema. Si se desea seguir trabajando con actuadores neumáticos, se recomienda instalar varios sensores de fin de carrera en cada actuador, para así manejar mas posiciones y aumentar la flexibilidad de operación del manipulador. Se propone realizar el modelo dinámico del manipulador, para así mejorar el conocimiento general de su funcionamiento y optimizarlo.

Referencias bibliográficas

- [1] R. Carlos. Automatización industrial: Áreas de aplicación para ingeniería. Universidad Rafael Landívar.2008. Agosto de 2013. Disponible en internet:<http://www.tec.url.edu.gt/boletin/URL_10_MEC01.pdf>.
- [2] V. Gallón. Sistemas automáticos de control. Medellín-Colombia, serie NABLA-DELTA No.21, 1991.
- [3] F. Cortés. Robótica, control de manipuladores. México D.F: alfaomega grupo editor S.A, 2011, p.15-53.
- [4] K. Fu, R. González y C. Lee, Robotics: control, sensing, visión and intelligence. United States of America. Mc Graw Hill, 1987, p 13-75.
- [5] A. Creus. Neumática e hidráulica. Segunda edición. México D.F. Alfaomega grupo editor, 2011, p. 1-7.
- [6] Guía básica Arduino. Tienda robótica.20 de enero de 2014. Disponible en <http://tdrobotica.co/tutoriales/81-arduino-2/345-guia-arduino>>.