



INSITITUTO TECNOLÓGICO DE LEÓN

ROBOTICA

REPORTE DEL PROYECTO FINAL

PRESENTAN (EQUIPO 2):

- ESCOBAR RAMÍREZ MARCO ANTONIO DE JESUS
 - GODINEZ ZERMEÑO JESÚS ADRIÁN
 - MUÑOZ VERA IVÁN ALEJANDRO
 - RANGEL CONDE DANIEL ARTURO

PROFESOR:

M.C. CASILLAS ARAIZA MIGUEL ANGEL

CARRERA:

Ingeniería en mecatrónica.

LEÓN, GUANAJUATO

FECHA: 12/ Junio/ 2020

Contenido

1. Introducción	5
2. Marco Teórico	5
2.1. Definición y clasificación del robot	5
2.1.1. Definición del robot industrial	6
2.1.2. Clasificación del robot industrial	7
2.2. Morfología del robot	8
2.2.1. Estructura mecánica de un robot	8
2.2.2. Transmisiones y reductores	10
2.2.2.1. Transmisiones	10
2.2.2.2. Reductores	11
2.3. Actuadores	11
2.3.1. Actuadores neumáticos	12
2.3.2. Actuadores hidráulicos	13
2.3.3. Actuadores eléctricos	13
2.3.3.1. Motores de corriente continua (DC)	14
2.3.3.2. Motores paso a paso	15
2.3.3.3. Motores de corriente alterna (AC)	16
2.4. Elementos terminales	16
2.5. Herramientas matemáticas para la localización espacial	17
2.5.1. Representación de la posición	17
2.5.1.1. Sistema cartesiano de referencia	18
2.5.1.2. Coordenadas cartesianas	18
2.5.1.3. Coordenadas polares y cilíndricas	18
2.5.1.4. Coordenadas esféricas	18
2.5.2. Representación de la orientación	19
2.5.2.1. Matrices de rotación	19
2.5.2.2. Ángulos de Euler ZXZ	20
2.5.2.3. Ángulos de Euler ZYZ	21
2.5.2.4. Roll, pitch and yaw (alabeo, cabeceo y guiñada)	21

2.5.3. Matrices de transformación homogénea	22
2.5.3.1. Coordenadas y matrices homogéneas.....	22
2.6. Cinemática del robot	23
2.6.1. El problema cinemático directo	24
2.6.1.1. Algoritmo de Denavit-Hartenberg para la obtención del modelo cinemático directo	24
2.7. Cinemática inversa	25
2.7.1. Resolución del problema cinemático inverso por métodos geométricos	25
2.7.2. Resolución del problema cinemático inverso a partir de la matriz de transformación homogénea.....	25
2.7.3. Desacoplo cinemático	25
3. Antecedentes históricos	26
4. Definición del problema.....	30
5. Estado de la técnica	30
6. Justificación del proyecto de ingeniería	31
7. Impacto.....	31
8. Objetivos	31
8.1. Objetivo general	31
8.2. Objetivos específicos.....	31
9. Método de desarrollo.....	32
9.1. Construcción mecánica del drawbot.....	32
9.2. Representación de la posición	36
9.2.1. Teorema de Denavit-Hartenberg	36
9.3. Representación de la orientación	37
9.3.1. Matrices de transformación homogénea	37
9.3.2. Cinemática del robot	38
9.3.2.1. El problema cinemático directo	38
9.3.2.2. Cinemática inversa	38
9.3.3. Matriz Jacobiana	39
10. Implementación de la electrónica	39
11. Programación	40
12. Resultados	44
13. Pruebas o validación	44
14. Conclusiones	46

14.1. Conclusiones Técnicas.....	46
14.2. Conclusiones Personales	47
14.3. Trabajo a futuro	49
<i>15. Glosario de términos.....</i>	49
16. Bibliografía	51
17. Anexos	51
Lista de partes mecánicas.	55

1. Introducción

“La robótica es un concepto de dominio público. La mayor parte de la gente tiene una idea de lo que es la robótica, sabe sus aplicaciones y el potencial que tiene; sin embargo, no conocen el origen de la palabra robot, ni tienen idea del origen de las aplicaciones útiles de la robótica como ciencia. La robótica como hoy en día la conocemos, tiene sus orígenes hace miles de años. Nos basaremos en hechos registrados a través de la historia, y comenzaremos aclarando que antiguamente los robots eran conocidos con el nombre de autómatas, y la robótica no era reconocida como ciencia, es más, la palabra robot surgió hace mucho después del origen de los autómatas. Desde el principio de los tiempos, el hombre ha deseado crear vida artificial. Se ha empeñado en dar vida a seres artificiales que le acompañen en su morada, seres que realicen sus tareas repetitivas, tareas pesadas o difíciles de realizar por un ser humano. Dentro de la mitología griega se puede encontrar varios relatos sobre la creación de vida artificial, por ejemplo, Prometeo creó el primer hombre y la primera mujer con barro y animados con el fuego de los cielos. De esta manera nos damos cuenta de que la humanidad tiene la obsesión de crear vida artificial desde el principio de los tiempos. Muchos han sido los intentos por lograrlo. Los hombres creaban autómatas como un pasatiempo, eran creados con el fin de entretener a su dueño. Los materiales que se utilizaban se encontraban al alcance de todo el mundo, esto es, utilizaban maderas resistentes, metales como el cobre y cualquier otro material moldeable, esto es, que no necesitara o requiriera de algún tipo de transformación para poder ser utilizado en la creación de los autómatas. Estos primeros autómatas utilizaban, principalmente, la fuerza bruta para poder realizar sus movimientos. A las primeras máquinas herramientas que ayudaron al hombre a facilitarle su trabajo no se les daba el nombre de autómatas, sino más bien se les reconocía como artefactos o simples máquinas.” [Ogata, 2003]

2. Marco Teórico

2.1. Definición y clasificación del robot

- *Máquina operada automáticamente que sustituye el esfuerzo de los humanos, aunque no tiene por qué tener apariencia humana o desarrollar sus actividades a la manera de los humanos. [Enciclopedia Británica]*
- *Máquina que se asemeja a los humanos y desarrolla como ellos tareas complejas como andar o hablar. Un dispositivo que desarrolla de manera automática tareas complicadas, a menudo de manera repetitiva. Un mecanismo guiado por control automático. [Diccionario Merriam Webster]*

- *Española Máquina o ingenio electrónico programable, capaz de manipular objetos y realizar operaciones antes reservadas sólo a las personas [Diccionario de la Real Academia]*

En la siguiente tabla se puede mostrar los tipos de robot.

Tabla 1.- Tipos de robots considerados por el GtRob del Comité Español

Robots aéreos
Robots asistenciales
Robots autónomos
Robots caminantes
Robots celulares
Robots cooperantes
Robots de inspección
Robots de educación
Robots de entretenimiento
Robots escaladores
Robots espaciales
Robots de exteriores
Robots de servicio
Robots flexibles
Robots humanoides
Robots manipuladores
Robots marinos
Robots bio-médicos
Robots móviles
Robots paralelos
Robots personales
Robots submarinos
Sistemas multi robots
Tele robots
Manipuladores móviles
Mini y Micro robots

2.1.1. Definición del robot industrial

Los primeros intentos de establecer una definición formal de robot, surgen en el año 1979 por parte de la RIA (Robot Institute of America, actualmente Robotic Industries Association), según la cual:

- *Un robot industrial es un manipulador multifuncional reprogramable, capaz de mover materias, piezas, herramientas o dispositivos especiales, según trayectorias variables, programadas para realizar tareas diversas. [RIA]*

Esta temprana definición, matizada y acotada, ha sido la referencia para las sucesivas definiciones que se han ido dando al robot hasta llegar a la actual, establecida por la Asociación Internacional de Estándares (ISO), define al Robot manipulador industrial como:

- *Manipulador de 3 o más ejes, con control automático, reprogramable, multiaplicación, móvil o no, destinado a ser utilizado en aplicaciones de automatización industrial. Incluye al manipulador (sistema mecánico y accionadores) y al sistema de control (software y hardware de control y potencia). (ISO)*

2.1.2. Clasificación del robot industrial

Un robot puede ser clasificado atendiendo a diferentes criterios o características. Algunas de éstas serán dependientes de su propia esencia, otras de la aplicación o tarea a que se destinan.

- Clasificación atendiendo a la Generación: La generación de un robot hace referencia al momento tecnológico en que éste aparece. De este modo se puede considerar que se pasa de una generación a la siguiente cuando se da un hito que supone un avance significativo en las capacidades de los robots.

Tabla 2.- Clasificación de los Robots según generaciones.

1.ª Generación	Repite la tarea programada secuencialmente. No toma en cuenta las posibles alteraciones de su entorno.
2.ª Generación	Adquiere información limitada de su entorno y actúa en consecuencia. Puede localizar, clasificar (visión) y detectar esfuerzos y adaptar sus movimientos en consecuencia.
3.ª Generación	Su programación se realiza mediante el empleo de un lenguaje natural. Posee capacidad para la planificación automática de tareas.

- Clasificación atendiendo al Área de Aplicación: Desde el punto de vista del uso que se da al robot es posible clasificarlos bien en base al sector económico en el que se encuentran trabajando o bien en base al tipo de aplicación o tarea que desarrollan, independientemente de en qué sector económico trabajen.
- Clasificación atendiendo al tipo de Actuadores: Dependiendo de cuál sea el tipo de energía utilizada por los ejes principales del robot, éste puede ser clasificado como:
 - Robot Neumático:
 - Robot Hidráulico:
 - Robot Eléctrico:
- Clasificación atendiendo al Número de Ejes: Esta característica es aplicable a los robots o telerobot con cadena cinemática. Se entiende por eje cada uno de los movimientos independientes con que está dotado el robot. En la práctica, la mayor parte de los robots tienen 6 ejes, seguidos por los de 4. Los robots con más de 6 ejes son poco frecuentes, estando justificado este número para aumentar la capacidad de maniobra del robot y siendo en muchas ocasiones telerobots.
- Clasificación atendiendo a la Configuración: Esta clasificación es sólo aplicable a robots o telerobots con cadena cinemática.

Tabla 3.- Tipos de Configuraciones.

<ul style="list-style-type: none">• Cartesiano• Cilíndrico• Polar o Esférico• Articular• SCARA• Paralelo

2.2. Morfología del robot

Un robot está formado por los siguientes elementos: estructura mecánica, transmisiones, sistema de accionamiento, sistema sensorial, sistema de control y elementos terminales. Se estudia primero la estructura mecánica, haciendo referencia a los distintos tipos de articulaciones posibles entre dos eslabones consecutivos y a las configuraciones existentes. Seguidamente Se analizan los sistemas de transmisión y reducción necesarios para transmitir a cada una de las articulaciones el movimiento generado por los actuadores, que, como elementos con capacidad para desplazar la estructura mecánica, son examinados en el siguiente apartado. Se repasan después los denominados sensores internos, necesarios para el control de los movimientos del robot.

Finalmente, el último apartado se ocupa de los elementos terminales (pinzas, herramientas, dispositivos de sujeción, etc.), que, situados generalmente en el extremo del robot, sirven para que éste pueda interactuar con el mundo exterior realizando las operaciones que le han sido asignadas.

Aunque los elementos empleados en los robots no son exclusivos de éstos (máquinas herramientas y otras muchas máquinas emplean tecnologías semejantes), las altas prestaciones que se exigen a los robots han motivado que en ellos se empleen elementos con características específicas.

2.2.1. Estructura mecánica de un robot

Mecánicamente, un robot está formado por una serie de elementos o eslabones unidos mediante articulaciones que permiten un movimiento relativo entre cada dos eslabones consecutivos. La constitución física de la mayor parte de los robots industriales guarda cierta similitud con la anatomía del brazo humano, por lo que, en ocasiones, para hacer referencia a los distintos elementos que componen el robot, se usan términos como cuerpo, brazo, codo y muñeca.

El movimiento de cada articulación puede ser de desplazamiento, de giro, o de una combinación de ambos. De este modo son posibles los seis tipos diferentes de articulaciones, aunque, en la práctica, en los robots sólo se emplean la de rotación y la prismática.

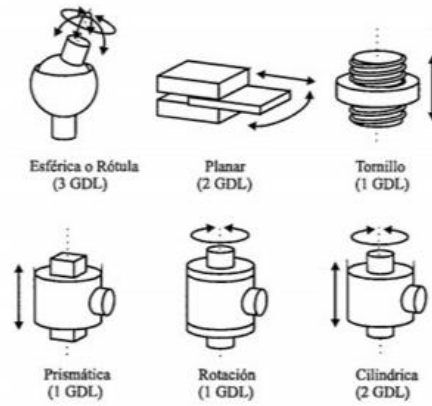


Ilustración 1.- Tipos de articulaciones en un robot.

Cada uno de los movimientos independientes que puede realizar cada articulación con respecto a la anterior, se denomina grado de libertad (GDL). El número de grados de libertad del robot viene dado por la Suma de los grados de libertad de las articulaciones que lo componen. Puesto que, Como se ha indicado, las articulaciones empleadas son únicamente las de rotación y prismática con un solo GDL cada una, el número de GDL del robot suele coincidir con el número de articulaciones de que se compone.

El empleo de diferentes combinaciones de articulaciones en un robot, da lugar a diferentes configuraciones, con características a tener en cuenta tanto en el diseño y construcción del robot como en su aplicación. Puesto que para posicionar y orientar un cuerpo de cualquier manera en el espacio son necesarios seis parámetros, tres para definir la posición y tres para la orientación, si se pretende que un robot posicione y oriente su extremo (y con él la pieza o herramienta manipulada) de cualquier modo en el espacio, se precisarán al menos seis GDL.

En la práctica, a pesar de ser necesarios los seis GDL comentados para tener total libertad en el posicionado y orientación del extremo del robot, muchos robots industriales cuentan con sólo cuatro o cinco GDL, por ser estos suficientes para llevar a cabo las tareas que se les encomiendan.

2.2.2. Transmisiones y reductores

Las transmisiones son los elementos encargados de transmitir el movimiento desde los actuadores hasta las articulaciones. Se incluirán junto con las transmisiones a los reductores, encargados de adaptar el par y la velocidad de la salida del actuador a los valores adecuados para el movimiento de los elementos del robot.

2.2.2.1. Transmisiones

Dado que un robot mueve su extremo con aceleraciones elevadas, es de gran importancia reducir al máximo su momento de inercia. Del mismo modo, los pares estáticos que deben vencer los actuadores dependen directamente de la distancia de las masas al actuador. Por estos motivos se procura que los actuadores, por lo general pesados, estén lo más cerca posible de la base del robot.

Esta circunstancia obliga a utilizar sistemas de transmisión que trasladen el movimiento hasta las articulaciones, especialmente a las situadas en el extremo del robot. Asimismo, las transmisiones pueden ser utilizadas para convertir movimiento circular en lineal o viceversa, lo que en ocasiones puede ser necesario.

Tabla 4.- Sistemas de transmisión para robots.

Entrada-Salida	Denominación	Ventajas	Inconvenientes
Circular-Circular	Engranaje Correa dentada Cadena Paralelogramo Cable	Pares altos Distancia grande Distancia grande — —	Holguras — Ruido Giro limitado Deformabilidad
Circular-Lineal	Tornillo sinfín Cremallera	Poca holgura Holgura media	Rozamiento Rozamiento
Lineal-Circular	Paral. articulado Cremallera	— Holgura media	Control difícil Rozamiento

La existencia de sistemas de transmisión junto con reductores para el acoplamiento entre actuadores y articulaciones.

Es de esperar que un buen sistema de transmisión cumpla una serie de características básicas: debe tener un tamaño y peso reducido, se ha de evitar que presente juegos u holguras considerables y se deben buscar transmisiones con gran rendimiento.

2.2.2.2. Reductores

En cuanto a los reductores, al contrario que con las transmisiones, sí que existen determinados sistemas usados de manera preferente en los robots industriales. Esto se debe a que a los reductores utilizados en robótica se les exige unas condiciones de funcionamiento muy restrictivas. La exigencia de estas características viene motivada por las altas prestaciones que se le piden al robot en cuanto a precisión y velocidad de posicionamiento.

Tabla 5.- . Características de reductores para robótica.

Características	Valores típicos
Relación de reducción	50-300
Peso y tamaño	0,1-30 kg
Momento de inercia	10^{-4} kg m ²
Velocidades de entrada máxima	6.000-7.000 rpm
Par de salida nominal	5.700 Nm
Par de salida máximo	7.900 Nm
Juego angular	0°-2°
Rigidez torsional	100-2.000 Nm/rad
Rendimiento	85%-98%

Se buscan reductores de bajo peso, reducido tamaño, bajo rozamiento y que al mismo tiempo sean capaces de realizar una reducción elevada de velocidad en un único paso. Se tiende también a minimizar su momento de inercia, de negativa influencia en el funcionamiento del motor, especialmente crítico en el caso de motores de baja inercia [FERRANDO-93].

2.3. Actuadores

Tabla 6.- Características de distintos tipos de actuadores para robots.

	Neumático	Hidráulico	Eléctrico
Energía	• Aire a presión (5-10 bar)	• Aceite mineral (50-100 bar)	• Corriente eléctrica
Opciones	• Cilindros • Motor de paletas • Motor de pistón	• Cilindros • Motor de paletas • Motor de pistones axiales	• Corriente continua • Corriente alterna • Motor paso a paso
Ventajas	• Baratos • Rápidos • Sencillos • Robustos	• Rápidos • Alta relación potencia-peso • Autolubricantes • Alta capacidad de carga • Estabilidad frente a cargas estáticas	• Precisos • Fiables • Fácil control • Sencilla instalación • Silenciosos
Desventajas	• Dificultad de control continuo • Instalación especial (compresor, filtros) • Ruidoso	• Difícil mantenimiento • Instalación especial • Instalación especial (filtros, eliminación aire) • Frecuentes fugas • Caros	• Potencia limitada

2.3.1. Actuadores neumáticos

En ellos la fuente de energía es aire a presión entre 5 y 10 bar. Existen dos tipos de actuadores neumáticos:

- Cilindros neumáticos.
- Motores neumáticos (de aletas rotativas o de pistones axiales).

En los primeros se consigue el desplazamiento de un émbolo encerrado en un cilindro, como consecuencia de la diferencia de presión a ambos lados de aquel. Los cilindros neumáticos pueden ser de simple o doble efecto. En los primeros, el émbolo se desplaza en un sentido como resultado del empuje ejercido por el aire a presión, mientras que en el otro sentido se desplaza como consecuencia del efecto de un muelle (que recupera al émbolo a su posición de reposo).

En los cilindros de doble efecto el aire a presión es el encargado de empujar al émbolo en las dos direcciones, al poder ser introducido de forma arbitraria en cualquiera de las dos cámaras.

Normalmente, con los cilindros neumáticos sólo se persigue un posicionamiento en los extremos del mismo y no un posicionamiento continuo. Esto último se puede conseguir con una válvula de distribución (generalmente de accionamiento eléctrico) que canaliza el aire a presión hacia una de las dos caras del émbolo alternativamente. Existen no obstante sistemas de posicionamiento continuo de accionamiento neumático, aunque debido a su coste y calidad todavía no resultan competitivos.

En los motores neumáticos se consigue el movimiento de rotación de un eje mediante aire a presión. Los dos tipos más usados son los motores de aletas rotativas y los motores de pistones axiales.

En general y debido a la compresibilidad del aire, los actuadores neumáticos no consiguen una buena precisión de posicionamiento. Sin embargo, su sencillez y robustez hacen adecuado su uso en aquellos casos en los que sea suficiente un posicionamiento en dos situaciones diferentes (todo o nada). Por ejemplo, son utilizados en manipuladores sencillos, en apertura y cierre de pinzas o en determinadas articulaciones de algún robot (como el movimiento vertical del tercer grado de libertad de algunos robots tipo SCARA).

2.3.2. Actuadores hidráulicos

Este tipo de actuadores no se diferencian funcionalmente en mucho de los neumáticos. En ellos, en vez de aire se utilizan aceites minerales a una presión comprendida normalmente entre los 50 y 100 bar, llegándose en ocasiones a superar los 300 bar. Existen, como en el caso de los neumáticos, actuadores del tipo cilindro y del tipo motores de aletas y pistones. Sin embargo, las características del fluido utilizado en los actuadores hidráulicos marcan ciertas diferencias con los neumáticos. En primer lugar, el grado de compresibilidad de los aceites usados es considerablemente inferior al del aire, por lo que la precisión obtenida en este caso es mayor. Por motivos similares, es más fácil en ellos realizar un control continuo, pudiendo posicionar su eje en todo un rango de valores (haciendo uso de servocontrol) con notable precisión.

Además, las elevadas presiones de trabajo, diez veces superiores a las de los actuadores neumáticos, permiten desarrollar elevadas fuerzas y pares.

Por otra parte, este tipo de actuadores presenta estabilidad frente a cargas estáticas. Esto indica que el actuador es capaz de soportar cargas, como el peso o una presión ejercida sobre una superficie, sin aporte de energía (para mover el émbolo de un cilindro sería preciso vaciar este de aceite). También es destacable su elevada capacidad de carga y relación potencia-peso, así como sus características de autolubricación y robustez. Frente a estas ventajas existen también ciertos inconvenientes. Por ejemplo, las elevadas presiones a las que se trabaja propician la existencia de fugas de aceite a lo largo de la instalación. Asimismo, esta instalación es más complicada que la necesaria para los actuadores neumáticos y mucho más que para los eléctricos, necesitando de equipos de filtrado de partículas, eliminación de aire, sistemas de es de control de distribución.

2.3.3. Actuadores eléctricos

Las características de control, sencillez y precisión de los accionamientos eléctricos han hecho que sean los más usados en los robots industriales actuales.

Dentro de los actuadores eléctricos pueden distinguirse tres tipos diferentes:

Motores de corriente continua (DC):

- Controlados por inducido.

- Controlados por excitación.

Motores de corriente alterna (AC):

- Síncronos.
- Asíncronos.
- Motores paso a paso.

2.3.3.1. Motores de corriente continua (DC)

Los motores DC están constituidos por dos devanados internos, inductor e inducido, que se alimentan con corriente continua:

- El inductor, también denominado devanado de excitación, está situado en el estator y crea un campo magnético de dirección fija, denominado de excitación.
- El inducido, situado en el rotor, hace girar al mismo debido a la fuerza de Lorentz que aparece como combinación de la corriente circulante por él y del campo magnético de excitación. Recibe la corriente del exterior a través del colector de delgas, en el que se apoyan unas escobillas de grafito.



Ilustración 2.- . Motor de Corriente Continua.

La velocidad de giro del motor puede ser regulada, bien variando la tensión de alimentación del inducido, como variando la del inductor. Al aumentar la tensión del inducido aumenta la velocidad de la máquina. Si el motor está alimentado a tensión constante, se puede variar la velocidad variando el flujo de excitación. Pero cuanto más débil sea el flujo, menor será el par motor que se puede desarrollar para una intensidad de inducido constante. En el caso de control por inducido, la intensidad del

inductor se mantiene constante, mientras que la tensión del inducido se utiliza para controlar la velocidad de giro. En los controlados por excitación se actúa, al contrario

2.3.3.2. Motores paso a paso

Los motores paso a paso no han sido considerados, generalmente, dentro de los accionamientos industriales, debido principalmente a que los pares para los que estaban disponibles eran muy pequeños y los pasos entre posiciones consecutivas eran grandes. Esto limitaba su aplicación a controles de posición simples.

En los últimos años se han mejorado notablemente sus características técnicas, especialmente en lo relativo a su control, lo que ha permitido fabricar motores paso a paso capaces de desarrollar pares suficientes en pequeños pasos, para su uso como accionamientos industriales.

Existen tres tipos de motores paso a paso [BARRIENTOS-95], [TENREIRO-94]:

- De imanes permanentes.
- De reluctancia variable.
- Híbridos.

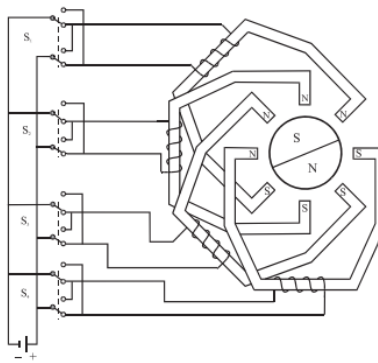


Ilustración 3.- Esquema de motor paso a paso de imanes permanentes con cuatro fases.

En los motores paso a paso la señal de control son trenes de pulsos que van actuando rotativamente sobre una serie de electroimanes dispuestos en el estator. Por cada pulso recibido, el rotor del motor gira un determinado número discreto de grados.

Para conseguir el giro del rotor en un determinado número de grados, las bobinas del estator deben ser excitadas secuencialmente a una frecuencia que determina la velocidad de giro. Las inercias propias del arranque y parada impiden que el rotor alcance la velocidad nominal instantáneamente, por lo que ésta y, por tanto, la frecuencia de los pulsos que la fija, debe ser aumentada progresivamente

2.3.3.3. Motores de corriente alterna (AC)

Este tipo de motores no ha tenido aplicación en el campo de la robótica hasta hace unos años, debido fundamentalmente a la dificultad de su control. Sin embargo, las mejoras que se han introducido en las máquinas síncronas hacen que en la actualidad sea la alternativa más utilizada en los robots industriales.

Esto se debe principalmente a tres factores:

- La construcción de rotores síncronos sin escobillas.
- Uso de convertidores estáticos que permiten variar la frecuencia (y así la velocidad de giro) con facilidad y precisión.
- Empleo de la microelectrónica que permite una gran capacidad de control.

En los motores síncronos, la velocidad de giro depende únicamente de la frecuencia de la tensión que alimenta el inducido. Para poder variar ésta con precisión, el control de velocidad se realiza mediante un convertidor de frecuencia. Para evitar el riesgo de pérdida de sincronismo se utiliza un sensor de posición que detecta la posición del rotor y permite mantener en todo momento el ángulo que forman los campos del estator y del rotor.

En el caso de los motores asíncronos, no se ha conseguido resolver satisfactoriamente los problemas de control que presentan. Esto ha hecho que hasta el momento no tengan aplicación en robótica.

2.4. Elementos terminales

Los elementos terminales, también llamados efectores finales (end effector) son los encargados de interaccionar directamente con el entorno del robot. Pueden ser tanto elementos de aprehensión como herramientas. Si bien un mismo robot industrial es, dentro de unos límites lógicos, versátil y readaptable a una gran variedad de aplicaciones, no ocurre así con los elementos terminales, que son en muchos casos específicamente diseñados para cada tipo de trabajo.

Se puede establecer una clasificación de los elementos terminales atendiendo a si se trata de un elemento de sujeción o de una herramienta. Los primeros se pueden clasificar según el sistema de sujeción empleado. Los elementos de sujeción se utilizan para agarrar y sostener los objetos y se suelen denominar pinzas. Se distingue entre las que utilizan dispositivos de agarre mecánico, y las que utilizan algún otro tipo de dispositivo (ventosas, pinzas magnéticas, adhesivas, ganchos, etc.).

En la elección o diseño de una pinza Se han de tener en cuenta diversos factores. Entre los que afectan al tipo de objeto y de manipulación a realizar destacan el peso, la forma, el tamaño del objeto y la fuerza que es necesario ejercer y mantener para sujetarlo. Entre los parámetros de la pinza cabe destacar su peso (que afecta a las inercias del robot), el equipo de accionamiento y la capacidad de control.

El accionamiento neumático es el más utilizado por ofrecer mayores ventajas en simplicidad, precio y fiabilidad, aunque presenta dificultades de control de posiciones intermedias. En ocasiones se utilizan accionamientos de tipo eléctrico.

2.5. Herramientas matemáticas para la localización espacial

La manipulación de piezas llevada a cabo por un robot implica el movimiento espacial de su extremo. Asimismo, para que el robot pueda recoger una pieza, es necesario conocer la posición y orientación de esta con respecto a la base del robot. Se aprecia entonces la necesidad de contar con una serie de herramientas matemáticas que permitan especificar la posición y orientación en el espacio de piezas, herramientas y, en general, de cualquier objeto.

Estas herramientas han de ser lo suficientemente potentes como para permitir obtener de forma sencilla relaciones espaciales entre distintos objetos y en especial entre éstos y el manipulador. Sin embargo, es necesario resaltar que estas son de aplicación general para el tratamiento de problemas de localización espacial y que, por tanto, no son de aplicación exclusiva en el campo de la robótica.

Los dos primeros apartados presentan los distintos métodos existentes para la representación de la posición y orientación espacial de un cuerpo rígido.

2.5.1. Representación de la posición

Para localizar un cuerpo rígido en el espacio es necesario contar con una herramienta que permita la localización espacial de sus puntos. En un plano el posicionamiento tiene dos grados de libertad, y por tanto la posición de un punto vendría definida por dos componentes independientes. En el caso de un espacio tridimensional será necesario emplear tres componentes. La forma más intuitiva y utilizada de especificar la posición de un punto son coordenadas cartesianas.

Existen además otros métodos, igualmente válidos, y también ampliamente extendidos, como son las coordenadas polares para dos dimensiones, y las cilíndricas y esféricas para espacios de tres dimensiones.

2.5.1.1. Sistema cartesiano de referencia

Normalmente los sistemas de referencia se definen mediante ejes perpendiculares entre sí con un origen definido. Estos se denominan sistemas cartesianos, y en el caso de trabajar en el plano (2 dimensiones). Si se trabaja en el espacio (tres dimensiones), el sistema cartesiano OXYZ está compuesto por una terna ortonormal de vectores coordenados OX, OY y OZ.

2.5.1.2. Coordenadas cartesianas

Si se trabaja en un plano, con su sistema coordenado OXY de referencia asociado, un punto a vendrá expresado por las componentes (x,y) correspondientes a los ejes coordenados del sistema OXY. Este punto tiene asociado un vector $p(x,y)$, que va desde el origen O del sistema OXY hasta el punto a . Por tanto, la posición del extremo del vector p está caracterizado por las dos componentes (AD') , denominadas coordenadas cartesianas del vector y que son las proyecciones del vector p sobre los ejes OX y OY.

2.5.1.3. Coordenadas polares y cilíndricas

Para un plano, es posible también caracterizar la localización de un punto O vector p respecto a un sistema de ejes cartesianos de referencia OXY utilizando las denominadas coordenadas polares $p(r, \theta)$. En esta representación, r representa la distancia desde el origen O del sistema hasta el extremo del vector p , mientras que θ es el ángulo que forma el vector p con el eje OX.

2.5.1.4. Coordenadas esféricas

También es posible utilizar coordenadas esféricas para realizar la localización de un vector en un espacio de tres dimensiones. Utilizando el sistema de referencia OXYZ, el vector p tendrá como coordenadas esféricas (r, θ, ϕ) , donde la componente r es la distancia desde el origen O hasta el extremo del vector p ; la componente θ es el ángulo formado por la proyección del vector p sobre el plano OXY con el eje OX; y la componente ϕ es el ángulo formado por el vector p con el eje OZ.

2.5.2. Representación de la orientación

Un punto queda totalmente definido en el espacio a través de los datos de su posición. Sin embargo, para el caso de un sólido, es necesario además definir cuál es su orientación con respecto a un sistema de referencia. En el caso de un robot, no es suficiente con especificar cuál debe ser la posición de su extremo, sino que en general, es también necesario indicar su orientación.

Por ejemplo, en el caso de un robot que tenga que realizar sobre una pieza curva una operación de pulido, no bastaría con especificar los puntos de la superficie para situar adecuadamente la herramienta, sino que será necesario también conocer la orientación con que la herramienta ha de realizar la operación.

Una orientación en el espacio tridimensional viene definida por tres grados de libertad o tres componentes linealmente independientes. Para poder describir de forma sencilla la orientación de un objeto respecto a un sistema de referencia, es habitual asignar solidariamente al objeto un nuevo sistema, y después estudiar la relación espacial existente entre los dos sistemas. De forma general, esta relación vendrá dada por la posición y orientación del sistema asociado al objeto respecto al de referencia. Para el análisis de los distintos métodos de representar orientaciones se supondrá que ambos sistemas coinciden en el origen, y que por tanto no existe cambio alguno de posición entre ellos. “(Barrientos, 1990).

2.5.2.1. Matrices de rotación

Las matrices de rotación son el método más extendido para la descripción de orientaciones, debido principalmente a la comodidad que proporciona el uso del álgebra matricial. Supóngase que se tiene en el plano dos sistemas de referencia OXY y OUV con un mismo origen O, siendo el sistema OXY el de referencia fijo y el sistema OUV el móvil, solidario al objeto.

Los vectores unitarios de los ejes coordenados del sistema OXY son i_x, j_y , mientras que los del sistema OUV son i_u, j_v . Un vector p del plano se puede representar como:

$$\mathbf{P} = p_u \mathbf{i}_u + p_v \mathbf{j}_v$$

Además, se verifican las igualdades siguientes (por tratarse de productos escalares).

$$\begin{cases} p_x = \mathbf{i}_x \mathbf{P} \\ p_y = \mathbf{i}_y \mathbf{P} \end{cases}$$

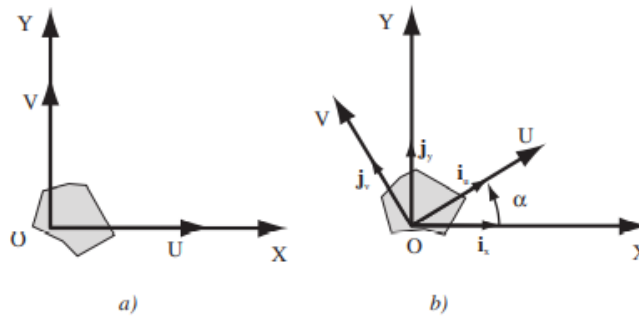


Ilustración 4.- Orientación de un sistema OUV respecto a otro OXY en un plano.

La matriz de rotación es la siguiente:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \mathbf{i}_x \mathbf{i}_u & \mathbf{i}_x \mathbf{j}_v \\ \mathbf{j}_y \mathbf{i}_u & \mathbf{j}_y \mathbf{j}_v \end{bmatrix}$$

Que define la orientación del sistema OUV con respecto al sistema OXY, y que sirve para transformar las coordenadas de un vector en un sistema a las del otro. También recibe el nombre de matriz de cosenos directores. Es fácil de comprobar que se trata de una matriz ortonormal, tal que $\mathbf{R}^{-1} = \mathbf{R}^T$.

2.5.2.2. Ángulos de Euler ZXZ

Es una de las representaciones más habituales entre las que realizan los giros sobre ejes previamente girados. Se le suele asociar con los movimientos básicos de un giróscopo. Si se parte de los sistemas OXYZ y OUVW, inicialmente coincidentes, se puede colocar al Sistema OUVW en cualquier orientación siguiendo los siguientes pasos:

1. Girar el sistema OUVW un ángulo con respecto al eje OZ, convirtiéndose así en el OU'V'W'.
2. Girar el sistema OU'V'W un ángulo O con respecto al eje OU', convirtiéndose así en el.
3. Girar el sistema OU'V'W un ángulo IV con respecto al eje OW, convirtiéndose finalmente

Es importante que estas operaciones se realicen en la secuencia especificada, pues las operaciones de giros consecutivos sobre ejes no son conmutativas.

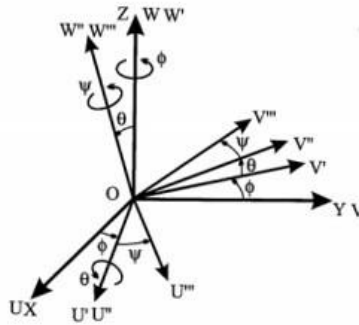


Ilustración 5.- Ángulos de Euler ZXZ

2.5.2.3. Ángulos de Euler ZYZ

Es otra de las representaciones más habituales entre las que realizan los giros sobre ejes previamente girados. Solo se diferencia del anterior en la elección del eje sobre el que se realiza el segundo giro. Si se parte de los sistemas OXYZ y OUVW, inicialmente coincidentes, se puede colocar al sistema OUVW en cualquier orientación siguiendo los siguientes pasos:

1. Girar el sistema OUVW un ángulo con respecto al eje OZ, convirtiéndose así en el OU'V'W'.
2. Girar el sistema OUV'W' un ángulo con respecto al eje OV', convirtiéndose así en el sistema OU''V''W''.
3. Girar el sistema OU''V''W'' un ángulo con respecto al eje OW'', convirtiéndose finalmente, en el como antes, es preciso considerar que el orden de los giros no es conmutativo.

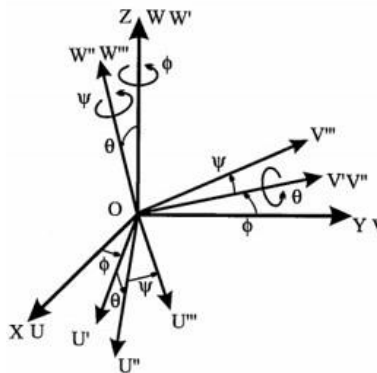


Ilustración 6.- Ángulos de Euler ZYZ

2.5.2.4. Roll, pitch and yaw (alabeo, cabeceo y guiñada)

Se trata de la representación utilizada generalmente en aeronáutica. Es también la más habitual de entre las que se aplican a los giros sobre los ejes del sistema fijo. Si se parte de los sistemas OXYZ y OUVW, al igual que en el caso anterior, se puede colocar al sistema OUVW en cualquier orientación siguiendo los siguientes pasos.

1. Girar el sistema OUVW un ángulo ψ con respecto al eje OX. Es el denominado Yaw o guiñada.
2. Girar el sistema OUVW un ángulo θ con respecto al eje OY. Es el denominado Pitch o cabeceo.
3. Girar el sistema OUVW un ángulo con respecto al eje OZ. ES el denominado Roll o alabeo.

2.5.3. Matrices de transformación homogénea

Las matrices de transformación homogénea, permiten esta representación conjunta, facilitando su uso mediante el álgebra matricial.

Se puede considerar que una matriz homogénea se haya compuesta por cuatro submatrices de distinto tamaño: una submatriz $R_{3 \times 3}$ que corresponde a una matriz de rotación; una submatriz $p_{3 \times 1}$ que corresponde al vector de traslación; una submatriz $f_{1 \times 3}$ que representa una transformación de perspectiva, y una submatriz $w_{1 \times 1}$ que representa un escalado global.

En robótica generalmente sólo interesará conocer el valor de $R_{3 \times 3}$ y de $p_{3 \times 1}$, considerándose las componentes de $f_{1 \times 3}$ nulas y la de $w_{1 \times 1}$ la unidad, aunque más adelante se estudia su utilidad en otros campos. Al tratarse de una matriz (4 X 4), los vectores sobre los que se aplique deberán contar con 4 dimensiones, que serán las coordenadas homogéneas del vector tridimensional de que se trate

2.5.3.1. Coordenadas y matrices homogéneas

Al objeto de poder representar y tratar conjuntamente la posición y la orientación de un sólido, se introducen las coordenadas homogéneas. Un elemento de un espacio n-dimensional, se encuentra representado en coordenadas homogéneas por n + 1 dimensiones, de tal forma que un vector p (x, y, z) vendrá representado por p(wx, wy, wz, w), donde w tiene un valor arbitrario y representa un factor de escala. De forma general, un vector $p = ai + bj + ck$, donde i, j y k son los vectores unitarios de los ejes OX, OY y OZ del sistema de referencia OXYZ, se representa en coordenadas homogéneas mediante el vector columna:

$$p = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} aw \\ bw \\ cw \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ 1 \end{bmatrix}$$

A partir de la definición de las coordenadas homogéneas surge inmediatamente el concepto de matriz de transformación homogénea. Se define como matriz de transformación homogénea T a una matriz de dimensión 4×4 que representa la transformación de un vector de coordenadas homogéneas de un sistema de coordenadas a otro.

$$T = \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & p_{3 \times 1} \\ f_{1 \times 3} & w_{1 \times 1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Rotación} & \text{Traslación} \\ \text{Perspectiva} & \text{Escalado} \end{bmatrix}$$

Se puede considerar que una matriz homogénea se haya compuesta por cuatro submatrices de distinto tamaño: una submatriz $R_{3 \times 3}$ que corresponde a una matriz de rotación; una submatriz $p_{3 \times 1}$ que corresponde al vector de traslación; una submatriz $f_{1 \times 3}$ que representa una transformación de perspectiva, y una submatriz $w_{1 \times 1}$ que representa un escalado global. En robótica generalmente sólo interesará conocer el valor de $R_{3 \times 3}$ y de $p_{3 \times 1}$, considerándose las componentes de $f_{1 \times 3}$ nulas y la de $w_{1 \times 1}$ la unidad, aunque más adelante se estudia su utilidad en otros campos. Al tratarse de una matriz (4×4), los vectores sobre los que se aplique deberán contar con 4 dimensiones, que serán las coordenadas homogéneas del vector tridimensional de que se trate.

2.6. Cinemática del robot

La cinemática del robot estudia el movimiento del mismo con respecto a un sistema de referencia sin considerar las fuerzas que intervienen. Así, la cinemática se interesa por la descripción analítica del movimiento espacial del robot como una función del tiempo, y en particular por las relaciones entre la posición y la orientación del extremo final del robot con los valores que toman sus coordenadas articulares.

Existen dos problemas fundamentales a resolver en la cinemática del robot;

1. Problema cinemático directo: Consiste en determinar cuál es la posición y orientación del extremo final del robot, con respecto a un sistema de coordenadas que se toma como referencia, conocidos los valores de las articulaciones y los parámetros geométricos de los elementos del robot.
2. Problema cinemático inverso: Resuelve la configuración que debe adoptar el robot para una posición y orientación del extremo conocidas.

Por otra parte, la cinemática del robot trata también de encontrar las relaciones entre las velocidades del movimiento de las articulaciones y las del extremo. Esta relación viene dada por el modelo diferencial expresado mediante la matriz Jacobiana.

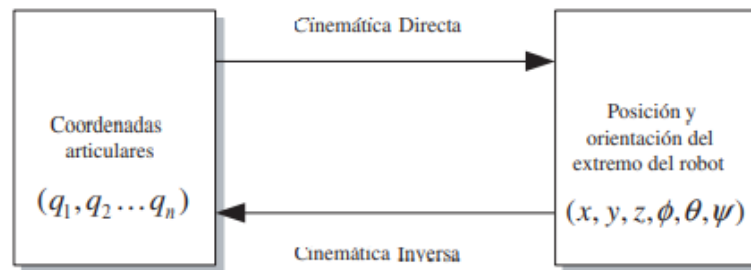


Ilustración 7.- Diagrama de relación entre cinemática directa e inversa.

2.6.1. El problema cinemático directo

La resolución del problema cinemático directo permite conocer cuál es la posición y orientación que adopta el extremo del robot cuando cada una de las variables que fijan la posición u orientación de sus articulaciones toma valores determinados.

Dado que son las variables articulares las que pueden ser leídas directamente de los correspondientes sensores por la unidad de control del robot, el modelo cinemático directo será utilizado por éste, entre otros fines, para presentar al usuario información relativa a la localización del extremo del robot.

2.6.1.1. Algoritmo de Denavit-Hartenberg para la obtención del modelo cinemático directo

Propusieron en 1955 un método matricial que establece la localización que debe tomar cada sistema de coordenadas $\{S_i\}$ ligado a cada eslabón i de una cadena articulada, para poder sistematizar la obtención de las ecuaciones cinemáticas de la cadena completa. Escogiendo los sistemas de coordenadas asociados a cada eslabón según la representación propuesta por D-H, será posible pasar de uno al siguiente mediante 4 transformaciones básicas que dependen exclusivamente de las características geométricas del eslabón.

Estas 4 transformaciones básicas consisten en una sucesión de rotaciones y traslaciones que permiten relacionar el sistema de referencia del elemento $i-1$ con el sistema del elemento i . Las transformaciones en cuestión son las siguientes (es importante recordar que el paso del sistema $\{S_{i-1}\}$ al $\{S_i\}$ mediante estas 4 transformaciones está garantizado sólo si los sistemas $\{S_{i-1}\}$ y $\{S_i\}$ han sido definidos de acuerdo a unas normas determinadas que se expondrán posteriormente):

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

2.7. Cinemática inversa

2.7.1. Resolución del problema cinemático inverso por métodos geométricos

Se va partiendo de las posiciones y las relaciones existentes entre las articulaciones, longitudes. Así como también se hace uso de identidades trigonométricas para encontrar relaciones y soluciones.

2.7.2. Resolución del problema cinemático inverso a partir de la matriz de transformación homogénea.

En principio es posible tratar de obtener el modelo cinemático inverso de un robot a partir del conocimiento de su modelo directo. Es decir, suponiendo conocidas las relaciones que expresan el valor de la posición y orientación del extremo del robot en función de sus coordenadas articulares, obtener por manipulación de aquéllas las relaciones inversas.

2.7.3. Desacoplo cinemático

Los procedimientos vistos en los apartados anteriores permiten obtener los valores de las 3 primeras variables articulares el robot, aquellas que posicionan su extremo en unas coordenadas (m , p_y , p_z) determinadas, aunque pueden ser igualmente utilizadas para la obtención de las 6 a costa de una mayor complejidad.

Ahora bien, como es sabido, en general no basta con posicionar el extremo del robot en un punto del espacio, sino que casi siempre es preciso también conseguir que la herramienta que aquél porta se oriente de una manera determinada. Para ello, los robots cuentan con otros tres grados de libertad adicionales, situados al final de la cadena cinemática y cuyos ejes, generalmente, se cortan en un punto, que informalmente se denomina muñeca del robot. Si bien la variación de estos tres últimos grados de libertad origina un cambio en la posición final del extremo real del robot, su verdadero objetivo es poder orientar la herramienta del robot libremente en el espacio.

El método de desacoplo cinemático saca partido de este hecho, separando ambos problemas; posición y orientación. Para ello, dada una posición y orientación final deseadas, establece las coordenadas del

punto de corte de los 3 últimos ejes (muñeco del robot) calculándose los valores de las tres primeras variables articulares que consiguen posicionar este punto. A continuación, a partir de los datos de orientación y de los ya calculados obtiene los valores del resto de las variables articulares. [Barrientos et al., 2007]

3. Antecedentes históricos

“A lo largo de toda la historia, el hombre se ha sentido fascinado por máquinas y dispositivos capaces de imitar las funciones y los movimientos de los seres vivos.

Los griegos tenían una palabra específica para denominar a estas máquinas: autómatas. De esta palabra deriva el actual autómata: máquina que imita la figura y movimientos de un ser animado.

Los mecanismos animados de Herón de Alejandría (85 d.C.) se movían a través de dispositivos hidráulicos, poleas y palancas y tenían fines eminentemente lúdicos.

La cultura árabe (siglos VIII a XV) heredó y difundió los conocimientos griegos, utilizándolos no solo para realizar mecanismos destinados a la diversión, sino que les dio una aplicación práctica, introduciéndolos en la vida cotidiana de la realeza. Ejemplo de estos son diversos sistemas dispensadores automáticos de agua para beber o lavarse.

También de ese período son otros autómatas, de los que hasta la actualidad no han llegado más que referencias no suficientemente documentadas, como el Hombre de hierro de Alberto Magno (1204-1282) o la Cabeza parlante de Roger Bacon (1214 - 1294). Otro ejemplo relevante de aquella época fue el Gallo de Estrasburgo (1352). Este, que es el autómata más antiguo que se conserva en la actualidad, formaba parte del reloj de la torre de la catedral de Estrasburgo y al dar las horas movía las alas y el pico.

Durante los siglos XV y XVI alguno de los más relevantes representantes del renacimiento se interesa también por los ingenios descritos y desarrollados por los griegos. Es conocido el León mecánico construido por Leonardo Da Vinci (1452 -1519) para el rey Luis XII de Francia, que se abría el pecho con su garra y mostraba el escudo de armas del rey. En España es conocido el Hombre de palo, construido por Juanelo Turriano en siglo XVI para el emperador Carlos V. Este autómata con forma de monje, andaba y movía la cabeza, ojos, boca y brazos.

Durante los siglos XVII y XVIII se crearon ingenios mecánicos que tenían alguna de las características de los robots actuales. Estos dispositivos fueron creados en su mayoría por artesanos del gremio de la relojería. Su misión principal era la de entretener a las gentes de la corte y servir de atracción en las ferias. Estos autómatas representaban figuras humanas, animales o pueblos enteros. Son destacables entre otros el pato de Vaucanson y los muñecos de la familia Droz y de Mailladert. Jacques Vaucanson (1709-1782), autor del primer telar mecánico, construyó varios muñecos animados, entre los que destaca un flautista capaz de tocar varias melodías y un pato (1738) capaz de graznar, beber, comer, digerir y evacuar.

El relojero suizo Pierre Jaquet Droz (1721-1790) y sus hijos Henri-Louis y Jaquet construyeron diversos muñecos capaces de escribir (1770), dibujar (1772) y tocar diversas melodías en un órgano (1773). Estos aún se conservan en el museo de Arte e Historia de Neuchâtel, Suiza. Contemporáneo de los relojeros franceses y suizos fue Henry Maillart, quien construyó, entre otros, una muñeca capaz de dibujar y que aún se conserva en Filadelfia.

A finales del siglo XVIII y principios del XIX se desarrollaron algunas ingeniosas invenciones mecánicas, utilizadas fundamentalmente en la industria textil, entre las que destacan la hiladora giratoria de Hargreaves (1770), la hiladora mecánica de Crompton (1779), el telar mecánico de Cartwright (1785) y el telar de Jacquard (1801). Este último utilizaba una cinta de papel perforada como un programa para las acciones de la máquina. Es a partir de este momento cuando se empiezan a utilizar dispositivos automáticos en la producción, dando paso a la automatización industrial.

La palabra robot fue usada por primera vez en el año 1921, cuando el escritor checo Karel Capek (1890-1938) estrena en el teatro nacional de Praga su obra Rossum's Universal Robot (R.U.R.). Su origen es la palabra eslava robota, que se refiere al trabajo realizado de manera forzada. Los robots de R.U.R. eran máquinas androides fabricadas a partir de la "fórmula". Obtenida por un brillante científico llamado Rossum. Estos robots servían a sus jefes humanos desarrollando todos los trabajos físicos, hasta que finalmente se rebelan contra sus dueños, destruyendo toda la vida humana, a excepción de uno de sus creadores, con la frustrada esperanza de que les enseñe a reproducirse.

El término posiblemente hubiera caído en desuso si no hubiese sido por los escritores del género literario de la ciencia ficción, algunos de los cuales retomaron la palabra, e incluso el mensaje de la obra de Capek: la dominación de la especie humana por seres hechos a su propia imagen. Así, en 1926, Thea von Harbou escribe Metrópolis, novela posteriormente llevada al cine por su marido Fritz

Lang, en donde la masa obrera de una sociedad súper industrializada es manipulada por un líder androide llamado María.

Pero sin duda alguna, fue el escritor americano de origen ruso Isaac Asimov (1920-1992) el máximo impulsor de la palabra robot. En octubre de 1945 publicó en la revista Galaxy Science Fiction una historia en la que por primera vez enunció sus tres leyes de la robótica. [Reyes, 2011]

1. Un robot no puede perjudicar a un ser humano, ni con su inacción permitir que un ser humano sufra daño.
2. Un robot ha de obedecer las órdenes recibidas de un ser humano, excepto si tales órdenes entran en conflicto con la primera ley.
3. Un robot debe proteger su propia existencia mientras tal protección no entre en conflicto con la primera o segunda ley.

El robot como máquina lleva un desarrollo independiente del término robot. Tras los primeros autómatas casi todos de aspecto humano, los progenitores más directos de los robots fueron los telemanipuladores.

En 1948 R.C. Goertz del Argonne National Laboratory desarrolló, con el objetivo de manipular elementos radioactivos sin riesgo para el operador, el primer telemanipulador. Este consistía en un dispositivo mecánico maestro- esclavo. El manipulador maestro, situado en la zona segura, era movido directamente por el operador, mientras que el esclavo, situado en contacto con los elementos radioactivos y unidos mecánicamente al maestro, reproducía fielmente los movimientos de este.

El operador además de poder observar a través de un grueso cristal el resultado de sus acciones, sentía a través del dispositivo maestro, las fuerzas que el esclavo ejercía sobre el entorno. Años más tarde, en 1954, Goertz hizo uso de la tecnología electrónica y del servocontrol sustituyendo la transmisión mecánica por otra eléctrica y desarrollando así el primer telemanipulador con servocontrol bilateral.

Otro de los pioneros de la telemanipulación fue Ralph Mosher, ingeniero del General Electric que en 1958 desarrolló un dispositivo denominado Handy-Man, consistente en 2 brazos mecánicos teleoperados mediante un maestro del tipo denominado exoesqueleto. Junto a la industria nuclear, a lo largo de los años sesenta la industria submarina comenzó a interesarse por el uso de los telemanipuladores. A este interés se sumó la industria espacial en los años setenta.

La evolución de los telemanipuladores a lo largo de los últimos años no ha sido tan espectacular como la de los robots. Recluidos en un mercado selecto y limitado (industria nuclear, militar, espacial, etc.) son en general desconocidos y comparativamente poco atendidos por los investigadores y usuarios de robots. Por su propia concepción, un telemanipulador precisa del mando continuo de un operador, y salvo por las aportaciones incorporadas con el concepto del control supervisado y la mejora de la telepresencia promovida hoy en día por la realidad virtual, sus capacidades no han variado mucho respecto a las de sus orígenes.

La sustitución del operador por un programa de ordenador que controlase los movimientos del manipulador dio paso al concepto de robot.

La primera patente de un dispositivo robótico fue solicitada en marzo de 1954 por el inventor británico C.W. Kenward. Dicha patente fue emitida en el Reino Unido en 1957 con el número 781465. Sin embargo, fue George C. Devol, ingeniero norteamericano, inventor y autor de varias patentes, el que estableció las bases del robot industrial moderno.

En 1954 Devol concibió la idea de un dispositivo de transferencia de artículos programada que se patentó en Estados Unidos en 1961 con el número 2988237.

En 1956 pone esta idea en conocimiento de Joseph F. Engelberger, ávido lector de Asimov y director de ingeniería de la división aeroespacial de la empresa Manning Maxwell y Moore en Stanford, Connecticut. Juntos, Devol y Engelberger comienzan a trabajar en la utilización industrial de sus máquinas, fundando la Consolidated Controls Corporation, que más tarde se convierte en Unimation (Universal Automation), e instalando su primera máquina Unimate (1960) similar a la de la *Figura 1.2* en la fábrica de General Motors de Trenton, Nueva Jersey, en una aplicación de fundición por inyección.

Otras grandes empresas, como la AMF, emprendieron la construcción de máquinas similares (Versatran, 1963), que más tarde por motivos comerciales se denominaron con el término robot procedente de la ciencia ficción y a pesar de no contar con la apariencia humana de aquellos.

En 1968 J.F. Engelberger visitó Japón y poco más tarde se firmaron acuerdos con Kawasaki para la construcción de robots tipo

El crecimiento de la robótica en Japón aventajó en breve a los Estados Unidos gracias a Nissan, que formó la primera asociación robótica del mundo, la Asociación de Robótica Industrial de Japón (JIRA) en 1972. Dos años más tarde se formó el Instituto de Robótica de América (RIA), que en 1984 cambió su nombre por el de Asociación de Industrias Robóticas, manteniendo las mismas siglas (RIA).

Por su parte Europa tuvo un despertar más tardío. En 1973 la firma sueca ASEA construyó el primer robot con accionamiento totalmente eléctrico, el robot IRb6, seguido un año más tarde del IRb60. En 1980 se fundó la Federación Internacional de Robótica con sede en Estocolmo, Suecia.

4. Definición del problema.

Para la materia de robótica, impartida a los alumnos de ingeniería en mecatrónica, se les asignó la tarea de armar un robot “drawbot”, partiendo de un diseño previo que, sea capaz de trazar trayectorias definidas en un programa.

El programa a realizar deberá dar las indicaciones para que el robot “drawbot” realice trazos para el fin de realizar la palabra “COVID-19”.

5. Estado de la técnica

En la ilustración 8, se muestran modelos de robot SCARA desarrollados por diferentes empresas, en la ilustración se puede observar que se muestran las características, así como la aplicación que se le puede dar a estos robots SCARA.

ROBOT	IMAGEN	CARACTERÍSTICAS	APLICACIONES	RADIO DE ACCIÓN (max)	FUNCIONES	CARGA MAXIMA
SCARA SR-61A		*Alta velocidad *Compacto *Alta precisión	*Industrial	650 mm.	*Para ensamble *De empaque *Pick and place *De manipulación	6 kg.
T52-40		*Alta velocidad *Para suelo *Para techo *Alta precisión	*Industrial *Rápido	480 mm.	*Pick and place	8.4 kg.
X-SERIES		*Compacto *Estanco	*Industrial *Sala blanca *Componentes electrónicos	1200 mm.	*Pick and place	20 kg.
IK-1000/1200		*Autoaprendizaje	*Industrial	1200 mm.	*Pick and place	50 kg.
RS3 SERIES		*Compacto	*Industrial *Rápido *De automatización	350mm	*De empaque *Pick and place	3 kg.

Ilustración 8.- Modelos de robot SCARA.

6. Justificación del proyecto de ingeniería

Con el desarrollo de este drawbot, tanto su construcción, modelaje matemático y programación, se pretende obtener los conocimientos esperados que comprende la materia de robótica. Se espera que cada uno de los integrantes del equipo pueda aprender a cómo opera un robot (en este caso el Drawbot), para poder realizar las operaciones necesarias para la localización, trayectoria y movimiento de este, tal como, se pretende operar el robot y poder comprender e funcionamiento de este.

7. Impacto

El impacto que se espera con el desarrollo de este proyecto de drawbot es meramente escolar. Esperamos, con la comprobación del diseño del robot SCARA de 3 grados de libertad.

Libertad que la comunidad estudiantil se acerque más al diseño de robots así como a la construcción de los mismos. Se espera también que el futuro ingeniero, tenga una noción más amplia de la complejidad de los robots y en un futuro, pueda aplicar sus conocimientos de manera responsable en el campo laboral.

8. Objetivos

8.1. Objetivo general

Construir un robot SCARA de 3 grados de libertad, para la creación de múltiples trazos previamente programados, con ayuda de un motor a pasos NEMA17.

8.2. Objetivos específicos.

10.1. Construir el drawbot a partir de un diseño existente

10.2. Elegir los componentes mecánicos y electrónicos adecuados

10.3. Definir con ayuda de un modelo matemático, el área de trabajo del robot

10.4. Utilizar teoremas y modelos matemáticos que nos ayuden a definir las trayectorias y velocidades del drawbot

10.5. Realizar un programa que nos ayude a definir las trayectorias del robot, lo más finamente posibles.

9. Método de desarrollo

9.1. Construcción mecánica del drawbot

A partir de la selección del robot se obtuvieron los diseños de la página web de thingiverse.com y posteriormente se principiaron los análisis de la estructura del robot en cinemática directa de acuerdo con la metodología de Denavit – Hartenberg al adoptar los diseños CAD al Software SolidWorks para posicionarlo en una posición óptima. Simultáneamente, dichos diseños fueron impresos en 3D con material PLA, lo cual nos dará ventaja en cuanto a dinámica e inercia por el peso ligero del material para poder moverlo con los motores a paso NEMA, controlados por una señal PWM desde la salida de un microcontrolador de la tarjeta de programación Arduino.

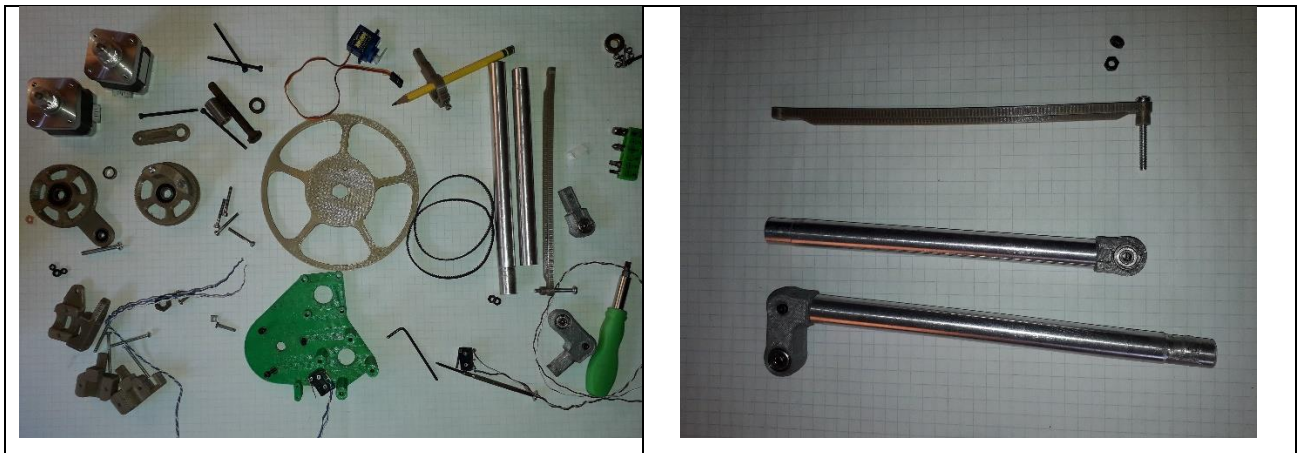


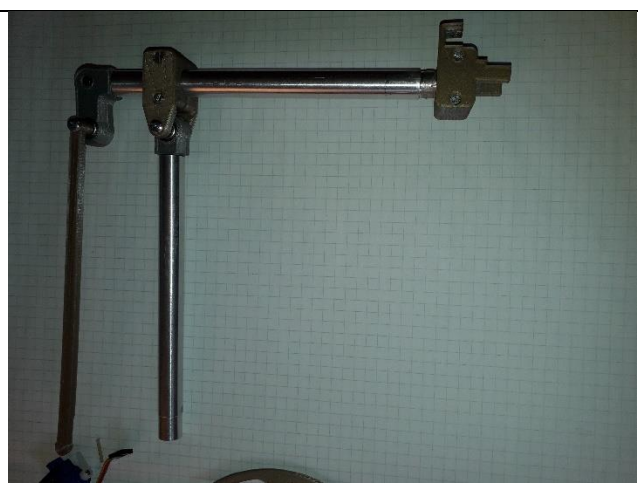
Figura 3.1: Pieza CAD del Drawbot en software SolidWorks.

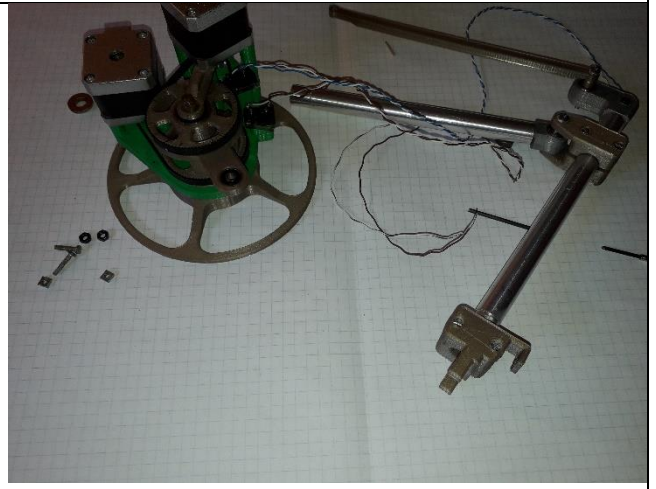
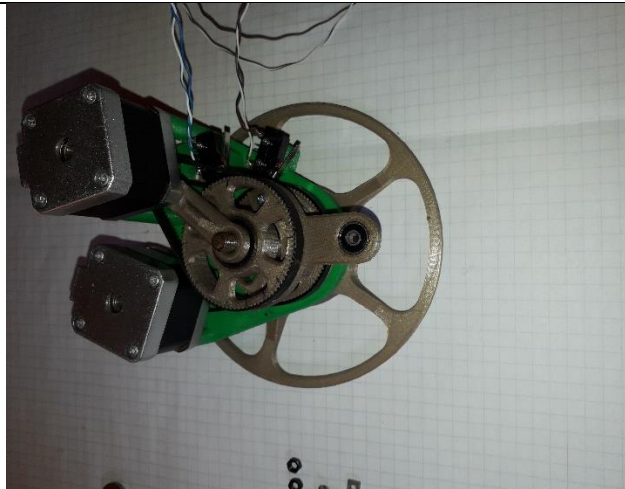
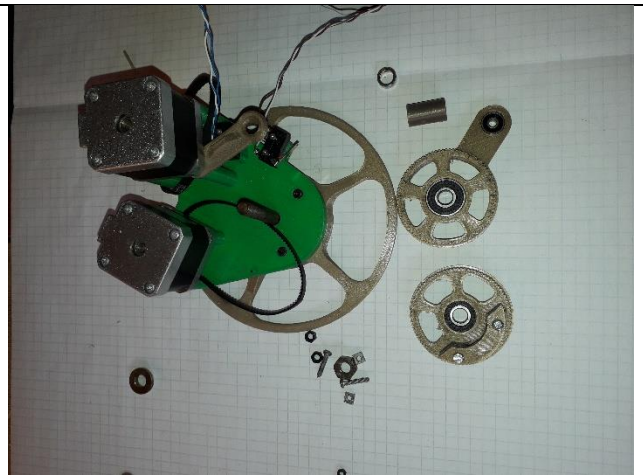
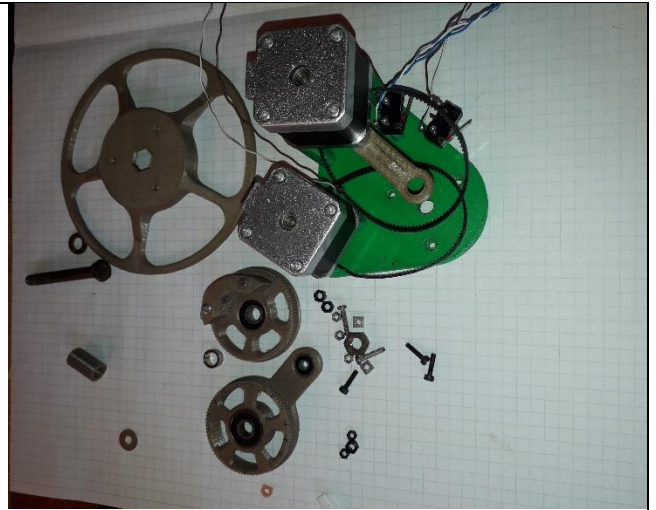
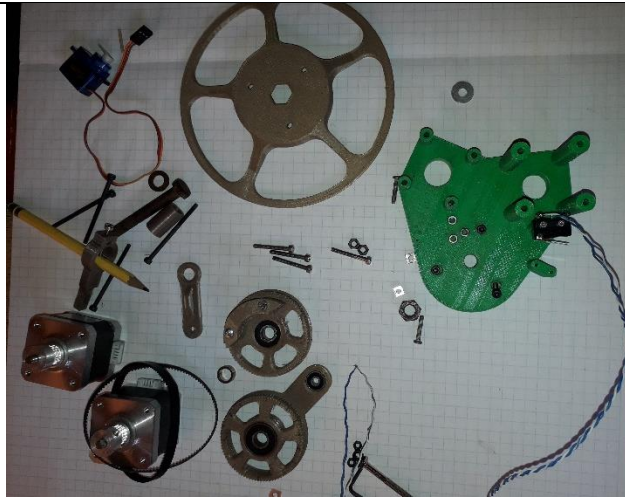
Ilustración 9.- Drawbot.

Las siguientes figuras, muestran el proceso en el cual armamos el robot con sus partes mecánicas impresas con impresora 3D y, los motores correspondientes:

Tabla 7.- proceso de armado del drawbot.







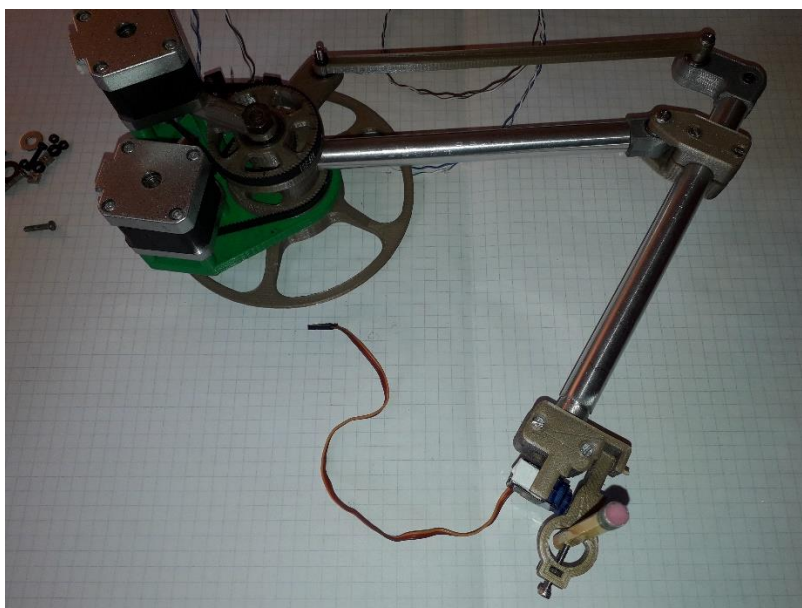


Ilustración 10.- Armado mecánico en su totalidad del Drawbot

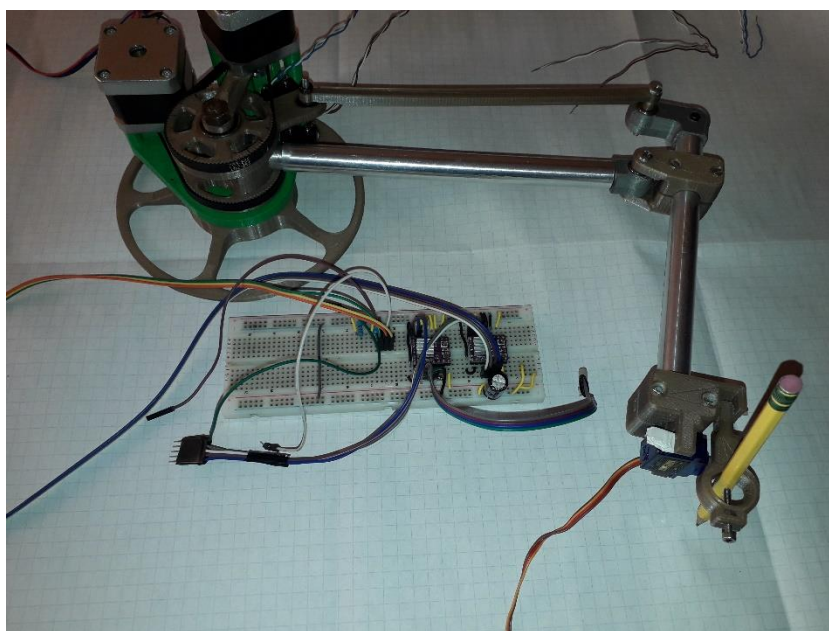


Ilustración 11.- Robot Drawbot con su circuito electronico.

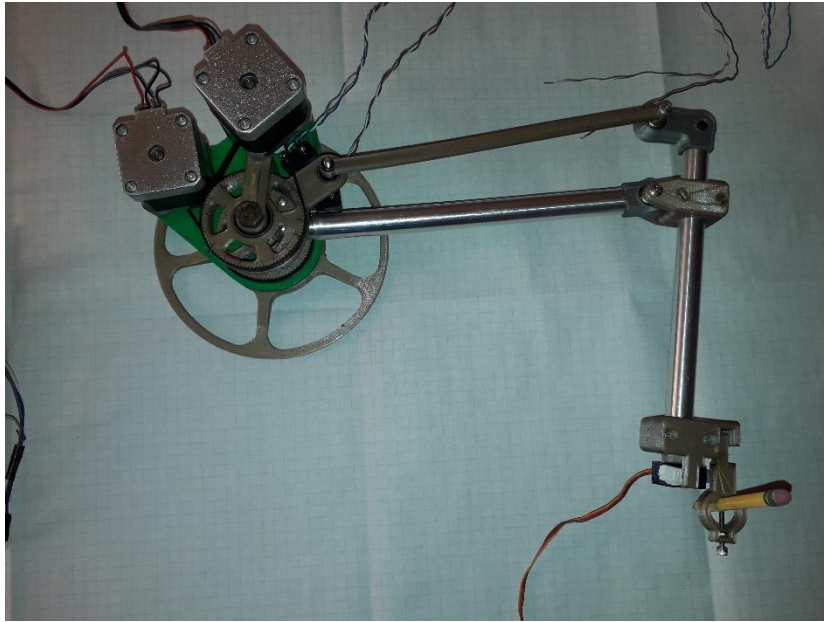


Ilustración 12.- Robot Drawbot.

9.2. Representación de la posición

Para localizar un cuerpo rígido en el espacio es necesario contar con una herramienta que permita la localización de sus puntos. En un plano el posicionamiento tiene dos grados de libertad y por lo tanto la posición de un punto vendrá definida por dos componentes independientes. En el caso de un espacio tridimensional será necesario emplear tres componentes.

Por lo que para saber la posición lleva diferentes tipos de sistemas los cuales son:

1. Sistema cartesiano de referencia
2. Coordenadas cartesianas
3. Coordenadas polares y cilíndricas
4. Coordenadas esféricas

9.2.1. Teorema de Denavit-Hartenberg

Un elemento fundamental para los cálculos que conllevan para el Desarrollo de las metodologías de la cinemática directa, Denavit-Hartenberg, e inversa, Matrices Homogéneas, es la matriz de transformación homogénea, que se determina a partir de los parámetros de Denavit-Hartenberg.

Tabla 8.- Parámetros de Denavit-Hartenberg para Drawbot

ART.	Q	d	a	A
1	Q1	L1	0	0
2	Q2	0	L2	0
2.5	-30	0	L3	0
3	0	d5	I4	0

Para poder determinar el alcance del robot para realizar los trazos se puntualiza el área de trabajo, con ayuda de un análisis geométrico para obtener los valores articulares del robot y codificando un algoritmo auxiliar con el software de Matlab que establece las coordenadas finales y precisas del robot.

9.3. Representación de la orientación

Un punto queda totalmente definido en el espacio a través los datos de su posición. Sin embargo, para el caso de un sólido es necesario definir cuál es su orientación con respecto a un sistema de referencia.

Una orientación en el espacio tridimensional viene definida por tres grados de libertad o tres componentes linealmente independientes.

Para llevar a cabo la orientación se debe de realizar:

- Matrices de rotación
- Ángulos de Euler

9.3.1. Matrices de transformación homogénea

Este método en si solo permite una representación conjunta de la posición y la orientación (localización). Para solventar este problema se introdujeron las denominadas coordenadas homogéneas lo cuales son las siguientes:

1. Coordenadas y matrices homogéneas
2. Aplicación de las matrices homogéneas
3. Significado geométrico de las matrices homogéneas
4. Composición de matrices homogéneos
5. Gráficos de transformación

9.3.2. Cinemática del robot

Estudia el movimiento de este con respecto a un sistema de referencia así se interesa por la descripción analítica del movimiento espacial del robot como una función del tiempo y en partículas con las relaciones de la posición y la orientación del extremo final del robot con los valores que toman sus coordenadas articulares

9.3.2.1. El problema cinemático directo

Un robot se puede considerar como una cadena cinemática formada por objetos rígidos o eslabones unidos entre sí mediante articulaciones se puede establecer un sistema de referencia fijo situado en la base del robot y describir la localización de cada uno de los eslabones respecto a dicho sistema de referencia.

El problema cinemático directo se reduce a encontrar una matriz homogénea de transformación T que relacione la posición y orientación extremo del robot respecto del sistema de referencia fijo situado en la base de este.

A continuación, veremos los puntos del problema cinemático:

1. Reducción del problema cinemático directo mediante matrices de transformación homogénea.
2. Algoritmo de Denavit Hartenberg para la obtención del modelo cinemático directo.
3. Resolución del problema cinemático directo mediante el uso de cuaternos

9.3.2.2. Cinemática inversa

El objetivo del problema de cinemática inversa consiste en encontrar los valores que deben adoptar las coordenadas articulares del robot para que su extremo se posicione y oriente según una determinada localización especial.

En seguida se mencionan los puntos de la cinemática inversa:

1. Resolución del problema cinemático inverso por métodos geométricos
2. Resolución del problema cinemático inverso a partir de la matriz de transformación homogénea
3. Desacoplo cinemático

9.3.3. Matriz Jacobiana

Permite conocer las velocidades del extremo del robot a partir de los valores de los valores de las velocidades de cada articulación. Dicha matriz permitirá conocer las velocidades articulares necesarias para obtener unas velocidades determinadas en el extremo del robot se estudiarán para la realización los siguientes temas:

1. Relaciones diferenciales
2. Jacobiana inversa
3. Configuraciones singulares

La Jacobiana de nuestro robot, quedó de la siguiente manera:

$$\begin{pmatrix} \dot{X}_{tcp} \\ \dot{Y}_{tcp} \\ \dot{Z}_{tcp} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -L1\sin(q1) + L2\cos(q1 + q2) - L3\sin(q1 + q2) & L2\cos(q1 + q2) - L3\sin(q1 + q2) & 0 \\ L1\sin(q1) + L2\sin(q1 + q2) + L3\cos(q1 + q2) & L2\sin(q1 + q2) + L3\cos(q1 + q2) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{q1} \\ \dot{q2} \\ \dot{q3} \end{pmatrix}$$

Ilustración 13.- la jacobiana analítica reducida.

10. Implementación de la electrónica

Para poder mover el robot, fue necesario hacer uso de una placa de arduino uno que fue el cerebro de nuestro robot, la siguiente figura muestra un diagrama de cómo se debe conectar.

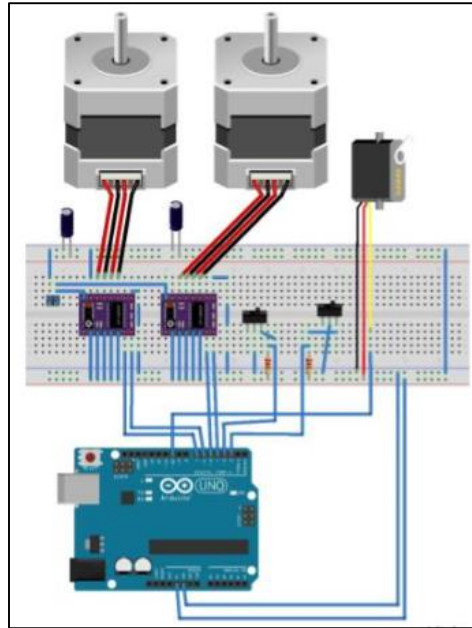


Ilustración 14.- Diagrama electrónico

11. Programación

Básicamente este código es usado para determinar las coordenadas articulares del robot y ya determinadas estas ser usadas en el código de arduino para que el robot pueda trazar lo deseado.

```
clc
close all
clear all

% Longitud de los eslabones en [MILIMETROS] :
A = 50;
B = 200;
C = 50;
D = 230;
SEG2 = 230;
L1 = D;
L2 = SEG2 - 50;
L3 = 30;
Lx = sqrt( L2^2 + L3^2 );
%Alpha = 10:0.5:109; %Intervalo del ángulo Alpha [en Grados]
%Phi = 30:-0.5:-150;

X_C = [ -96.22  -96.22  -96.22  -104.33  -111.47  -118.62  -118.62  -118.62
-118.62  -118.62  -118.62  -118.62  -111.47  -104.33  -96.22  -96.22  -96.22
];
Y_C = [ -311.94 -302.78 -293.43 -293.43 -293.43 -293.43 -304.72 -315.34
-326.77 -339.43 -351.06 -361.06 -361.06 -361.06 -361.06 -351.06 -
341.06];
X_o = [ -78.7  -78.7  -78.7  -78.7 -72.5 -65.8 -59.1 -59.1 -59.1 -59.1 -
59.1 -59.1 -59.1 -65.8 -72.5 -78.7 -78.7 -78.7 -78.7 ];
Y_o = [ -341.1 -347.2 -354.6 -361 -361 -361 -361 -354.6 -347.2 -341.1 -
334.1 -328 -320 -320 -320 -320 -328 -334.1 -341.1 ];
```



```

X_v = [ -44.1 -42.9 -41.3 -39.5 -38.2 -36.7 -33.92 -31.5 -29.5 -
27.8 -26.4 -24.8 -23.2 ];
Y_v = [ -320 -328 -334 -341.1 -347.2 -354.6 -361 -354.6 -347.2 -
341.1 -334 -328 -320 ];
X_i = [ -8.37 -8.37 -8.37 -8.37 -8.37 -8.37 -8.37 -8.37 -8.37 ];
Y_i = [ -300.1 -307.6 -320 -328 -334 -341.1 -347.2 -354.6 -361 ];
X_d = [ 28.53 20.86 13.1 7.9 7.9 7.9 7.9 7.9 13.1 20.86 28.53
28.53 28.53 28.53 28.53 28.53 28.53 28.53 28.53 28.53 ];
Y_d = [ -320.9 -320.9 -320.9 -328 -334 -341.1 -347.2 -354.6 -361 -361 -361
-354.6 -347.2 -341.1 -334 -328 -320.9 -312.9 -306 -300 -293 ];
X__ = [ 42.1 50.5 59.4 ];
Y__ = [ -334.1 -334.1 -334.1 ];
X_1 = [ 75.68 75.68 75.68 75.68 75.68 75.68 75.68 75.68 75.68 75.68
75.68 ];
Y_1 = [ -293 -300 -306 -313 -320 -328 -334 -341.1 -347.2 -354.6 -
361 ];
X_9 = [ 94.2 94.2 94.2 101.4 108.7 115.27 116.4 116.4 116.4 116.4
116.4 116.4 116.4 116.4 116.4 116.4 108.7 101.4 94.2 94.2 94.2 94.2
94.2 101.4 108.7 116.4 ];
Y_9 = [ -347.2 -354.6 -361 -361 -361 -361 -354.6 -347.2 -341.1 -334 -
328 -320 -313 -306 -300 -293 -293 -293 -293 -300 -306 -313 -320 -
328 -328 -328 -328 ];

X = [ X_C X_o X_v X_i X_d X__ X_1 X_9 ];
Y = [ Y_C Y_o Y_v Y_i Y_d Y__ Y_1 Y_9 ];

X = X - 30;
Y = Y + 14;
% Rango H: 270 <= H >= 393
==>
% X_inicio 218.6474
% Y_inicio -172.2531
% Y = - sqrt (H.^2 - X.^2);
H = sqrt (X.^2 + Y.^2);
% X_Y = [ X ; Y ]

%% CINEMÁTICA INVERSA
Phi_1 = atan2d(Y,X);
cos_Phi_3 = (L1^2 + H.^2 - Lx^2)/(2*L1*H);
Phi_3 = atan2d(sqrt(1 - cos_Phi_3.^2), cos_Phi_3);
q1 = Phi_1 + Phi_3;

cos_Theta_1 = (L1^2 + Lx^2 - H.^2)/(2*L1*Lx);
Theta_1 = atan2d(sqrt(1 - cos_Theta_1.^2), cos_Theta_1);
Theta_2 = atan2d(L3, L2);
q2 = Theta_1 - Theta_2;
%q1_q2=[q1;q2]

% q1 = phi-alpha
%vect_A + vect_B + vect_C = vect_D
vect_D = D*cosd(q1) + i*D*sind(q1);
vect_C = C*cosd(q1+q2-180) + i*C*sind(q1+q2-180);

% Se forma un triangulo entre : A, B y D-C
% Ley de los cosenos : A^2 = B^2 + C^2 - 2BC cos(a)
% Por lo tanto :
R = abs( vect_D - vect_C );

```

```

angle_d_c = radtodeg( angle( vect_D - vect_C ) );
r = ((A^2 + B^2 - R.^2) ./ (2*A*B));
a = ((B^2 + R.^2 - A^2) ./ (2*B*R));
b = ((R.^2 + A^2 - B^2) ./ (2*R*A));
r = acosd(r);
a = acosd(a);
b = acosd(b);

vect_A = A*cosd(angle_d_c + b) + i*A*sind(angle_d_c + b);
vect_B = B*cosd(angle_d_c - a) + i*B*sind(angle_d_c - a);
%vect_zero = vect_A + vect_B + vect_C - vect_D

q1Motor = q1;
q2Motor = radtodeg( angle(vect_A) );
qMotor = [q1Motor; q2Motor];

Alpha = q2Motor - q1Motor;
Phi = q2Motor;
Phi_Alpha = [ Phi ; Alpha ]

% vect_SEG2 = SEG2*vect_C / C;
% TCP = vect_A + vect_B + (i*30*vect_C/50) + vect_SEG2;
% TCPx = real(TCP);
% TCPy = imag(TCP);
% TCP = [ TCPx ; TCPy ]

%% CINEMÁTICA DIRECTA
for n=1:size(Alpha,2)
    phi = Phi(n);
    alpha = Alpha(n);
    int_phi = phi <= 30 & phi > -150;
    int_alpha = alpha < 110 & alpha >= 10;
    if alpha <= (160 + phi) & alpha >= phi & int_phi & int_alpha
        vect_A_d = A*cosd(phi) + i*A*sind(phi);
        vect_D_d = D*cosd(phi-alpha) + i*D*sind(phi-alpha);

% Se forma un triangulo entre : B, C y D-A
% Ley de los cosenos : A^2 = B^2 + C^2 - 2BC cos(a)
% Por lo tanto :
R = abs( vect_D_d - vect_A_d );
angle_d_a = radtodeg( angle( vect_D_d - vect_A_d ) );
r = acosd((B^2 + C^2 - R^2) / (2*B*C));
b = acosd((C^2 + R^2 - B^2) / (2*C*R));
c = acosd((R^2 + B^2 - C^2) / (2*R*B));

vect_B_d = B*cosd(angle_d_a + c) + i*B*sind(angle_d_a + c);
vect_C_d = -C*cosd(180 + angle_d_a - b) - i*C*sind(180 + angle_d_a -
b);

vect_SEG2 = SEG2*vect_C_d / C;
TCP_d = vect_A_d + vect_B_d + (i*30*vect_C_d/50) + vect_SEG2;
TCPx_d(n) = real(TCP_d);
TCPy_d(n) = imag(TCP_d);

%Mag = sqrt(real(TCP)^2 + imag(TCP)^2)
%vect_zero_d = vect_A_d + vect_B_d + vect_C_d - vect_D_d
end

```

```

end

%% GRÁFICA
scatter(TCPx_d, TCPy_d, 4,'filled');
title('Workspace')
grid on
ylim([-500 100])
xlim([-500 500])

%Mag = sqrt(TCPx_d.^2 + TCPy_.^2)
TCP_d = [ TCPx_d ; TCPy_d ]

%% JACOBIANA INVERSA
Vel_xy = 100;
X_ini = 218.6474; Y_ini = -172.2531;
Q1_ini = 30; Q2_ini = 0;
for h=1:size(Alpha,2)
    if(h == 1)
        Dir = (X(h) - X_ini) + i*(Y(h) - Y_ini);
    else
        Dir = (X(h) - X(h-1)) + i*(Y(h) - Y(h-1));
        %q1_vel(h) = (q1(h)-q1(h-1))/( abs(Dir) );
    end
    Dir_ang = radtodeg( angle(Dir) );
    Vel_X(h) = Vel_xy*cosd(Dir_ang);
    Vel_Y(h) = Vel_xy*sind(Dir_ang);

    C_q1 = cosd(q1(h)); S_q1 = sind(q1(h));
    C_q12 = cosd(q1(h)+(q2(h)-90)); S_q12 = sind(q1(h)+(q2(h)-90));

    Jac_inv_1 = [ -L2*S_q12-L3*C_q12      L2*C_q12-L3*S_q12      ];
    Jac_inv_2 = [ L1*C_q1+L2*S_q12+L3*C_q12      L1*S_q1-L2*C_q12+L3*S_q12 ];
    % Determinante
    Determi = L1*L2*C_q12.*C_q1 + L1*L3*C_q12.*S_q1 - L1*L3*S_q12.*C_q1 +
    L1*L2*S_q12.*S_q1;
    Jac_inv = [ Jac_inv_1 ; Jac_inv_2 ]./Determi;
    q_vel = (180/pi)*Jac_inv*[ Vel_X ; Vel_Y ];
end

%% CONSOLA DE COMANDOS
q_vel = abs(q_vel)
fprintf('Valor de Phi \n');
fprintf('%2.0f, ', Phi); fprintf('\n');
fprintf('Valor de Alpha \n');
fprintf('%2.0f, ', Alpha); fprintf('\n');
fprintf('Valor de q2_Vel \n');
fprintf('%2.0f, ', q_vel(1,:)); fprintf('\n');
fprintf('Valor de q1_Vel \n');
fprintf('%2.0f, ', q_vel(2,:)); fprintf('\n');

Servo = ones(1,120);
SizXC=size(X_C,2);SizXo=size(X_o,2);SizXv=size(X_v,2);SizXi=size(X_i,2);SizXd=size(X_d,2);
SizX_ =size(X__,2);SizX1=size(X_1,2);SizX9=size(X_9,2);

```

```

Servo(1) = 0;
Servo(SizXC+1) = 0;
Servo(SizXC+SizXo+1) = 0;
Servo(SizXC+SizXo+SizXv+1) = 0;
Servo(SizXC+SizXo+SizXv+3) = 0;
Servo(SizXC+SizXo+SizXv+SizXi+1) = 0;
Servo(SizXC+SizXo+SizXv+SizXi+SizXd+1) = 0;
Servo(SizXC+SizXo+SizXv+SizXi+SizXd+SizX_+1) = 0;
Servo(SizXC+SizXo+SizXv+SizXi+SizXd+SizX_+SizXl+1) = 0;
fprintf('Valor de boolServo \n');
fprintf('%1.0f, ', Servo); fprintf('\n');

```

12. Resultados

Teniendo el resultado al finalizar el recorrido nuestro Drawbot realizando la palabra COVID-19.



Ilustración 15.- Resultados de los movimientos del drawbot

13. Pruebas o validación

Se realizaron varias pruebas una vez que quedó lista la programación. Esto nos ayudó a calibrar las partes mecánicas del robot, colocar a la distancia adecuada la pluma de la superficie en la que iba a plasmar los trazos, anclar la base del robot al piso, etc.

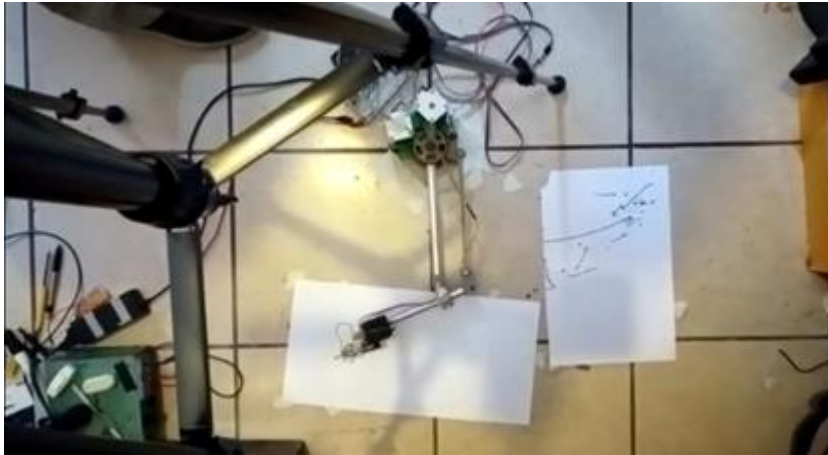


Ilustración 16.- Pruebas de Drawbot (1).



Ilustración 17.- Pruebas de Drawbot (2).



Ilustración 18.- Pruebas de Drawbot (3).



Ilustración 19.- Pruebas de Drawbot (4).

14. Conclusiones

14.1. Conclusiones Técnicas

- Escobar Ramírez Marco Antonio de Jesús:

Es importante tener en cuenta la teoría ya que sin esta no se habría podido concluir este proyecto, dos aspectos importantes que fueron de mucha utilidad fueron tanto la cinemática inversa como el modelo de velocidad inverso ya que estos son la base teórica para poder controlar los motores a pasos del drawbot, y este pudiera escribir la palabra correspondiente, en primera mediante la cinemática inversa base las coordenadas dadas nos produjera las coordenada angulares en cada motor y estas pudieran ir de un punto a otro, por otro lado el uso del modelo de velocidad inverso nos permitió tener una trayectoria más lineal de punto a punto, ya que sin esta el movimiento del robot sin el control de la velocidad de los motores efectúa lo deseado pero sin considerar una trayectoria clara, por lo tanto la visualización de la palabra o letra era muy escasa. Por ello, para el drawbot fue importante la utilización de estos dos métodos aplicados a la cadena cinemática del mismo, ya que la tarea deseada (escribir) se deben considerar tanto las posiciones angulares en función de la posición para ir de un punto a otro, como las velocidades angulares en este caso para definir una trayectoria que se visualizara mejor de un punto a otro.

- Godínez Zermeño Jesús Adrián:

Llevando de la mano toda la teoría que se vio durante todo el semestre, me pude dar cuenta que la teoría es muy importante ya que sin los cálculos pertinentes el robot no podría haber hecho los movimientos pertinentes para la conclusión de la apalabra COVID-19. Observamos que cada uno de

desde la cinemática del DRAWBOT y las velocidades que nos permitió realizar una programación adecuada para el movimiento de los eslabones y permitiendo el movimiento del TCP.

14.3. Trabajo a futuro

Este proyecto tiene potencial para realizar cualquier trazo, se puede mejorar la programación y la precisión, así como el diseño general para que el robot pueda imitar cualquier trazo que queramos, desde un dibujo hasta imprimir un documento.

Este proyecto puede rediseñarse de tal forma que pueda hacer trabajos complejos, con esta mejora, el proyecto pudiera venderse a múltiples áreas que les podría interesar.

15. Glosario de términos

Aceleración: En física, la aceleración es una magnitud derivada vectorial que nos indica la variación de velocidad por unidad de tiempo.

Actuador: Un actuador es un dispositivo capaz de transformar energía hidráulica, neumática o eléctrica en la activación de un proceso con la finalidad de generar un efecto sobre un proceso automatizado.

Algoritmo: Conjunto prescrito de instrucciones o reglas bien definidas, ordenadas y finitas que permiten llevar a cabo una actividad mediante pasos sucesivos que no generen dudas a quien deba hacer dicha actividad.

Cinemática: La cinemática es la rama de la física que describe el movimiento de los objetos sólidos sin considerar las causas que lo originan (las fuerzas) y se limita,

principalmente, al estudio de la trayectoria en función del tiempo. Para ello utiliza velocidades y aceleraciones, que describen como cambia la posición en función del tiempo.

Circuito impreso: Es una tarjeta o placa utilizada para realizar el emplazamiento de los distintos elementos que conforman el circuito y las interconexiones eléctricas entre ellos.

Encoder: Dispositivo electromecánico que permite codificar el movimiento mecánico en distintos tipos de impulsos eléctricos: digitales binarias, analógicas en función de una onda, pulsos, etc. De este modo, un encoder es una interfaz entre un dispositivo mecánico móvil y un controlador.

Error: Es la diferencia entre la señal de referencia y la señal de salida real. Fuerza:

Capacidad física para realizar un trabajo o un movimiento.

Grado de libertad: Cada uno de los movimientos independientes que puede realizar cada articulación respecto a la anterior.

Inercia: Propiedad de un sistema físico o social que hace que este se oponga a posibles cambios. En física se dice que un sistema tiene más inercia cuando resulta más difícil lograr un cambio en el estado físico del mismo.

Interpolación: Se denomina interpolación a la obtención de nuevos puntos partiendo del conocimiento de un conjunto discreto de puntos.

Ley de Inercia: La Ley de Inercia establece que en un cuerpo permanecerá en un estado de reposo (velocidad cero) o de movimiento rectilíneo a velocidad constante, siempre y cuando una fuerza externa neta no actúe sobre él.

Microcontrolador: Un microcontrolador es un circuito integrado digital que puede ser usado para muy diversos propósitos debido a que es programable. Está compuesto por una unidad central de proceso (CPU), memorias (ROM y RAM) y líneas de entrada y salida (periféricos).

Normatividad: Reglas o preceptos de carácter obligatorio, emanados de una autoridad

normativa, la cual tiene su fundamento de validez en una norma jurídica que autoriza la producción normativa, que tienen por objeto regular las relaciones sociales y cuyo cumplimiento está garantizado por el Estado.

22. PWM: La modulación por ancho de pulsos (también conocida como PWM, siglas en ingles de pulse-width modulation) de una señal o fuente de energía es una técnica en la que se modifica el ciclo de trabajo de una señal periódica (una senoidal o una cuadrada, por ejemplo), ya sea para transmitir información a través de un canal de comunicaciones o para controlar la cantidad de energía que se envía a una carga.

Reductor: Uno o varios pares de engranajes que adaptan la velocidad y potencia mecánica montados en un cuerpo compacto.

Señal de control: Es la señal que produce el controlador para modificar la variable controlada de tal forma que se disminuya, o elimine, el error.

Señal digital: Es una señal que solo toma valores de 1 y 0.

Set point: Es el valor que se desea que alcance la señal de salida.

Sistema de referencia: Un sistema de referencia es un conjunto de convenciones usadas por un observador para poder medir la

posición y otras magnitudes físicas de un sistema físico y de mecánica.

Transmisión: Se denomina transmisión mecánica a un mecanismo encargado de

transmitir potencia entre dos o más elementos dentro de una máquina.

Trayectoria: En cinemática, trayectoria es el lugar geométrico de las posiciones sucesivas por las que pasa un cuerpo en su movimiento.

16. Bibliografía

- Barrientos, A., Peñin, L. F., Balaguer, C., & Aracil, R. (2007). *Fundamentos de robótica*. Madrid: McGraw-Hill Interamericana.
- Casillas, M. (2020). Jacobiana Analítica reducida Inversa del robot Drawbot. junio 12, 2020, de independiente Sitio web: <https://classroom.google.com/u/1/c/NTM5MTE0ODk1OTNa/m/OTU0MDc0MDQyMzFa/details>
- Casillas, M. (2020). Cinematica Inversa del robot Drawbot. junio 12, 2020, de independiente Sitio web: <https://classroom.google.com/u/1/c/NTM5MTE0ODk1OTNa/m/OTQ1NjQxNDYzNzRa/details>

17. Anexos

Normativas aplicables. Robótica

- ISO TC 184/SC 02/WG 1: Vocabulario
- ISO TC 184/SC 02/WG 3: Seguridad Industrial
- ISO TC 184/SC 02/WG 7: Seguridad en cuidados a personas
- ISO TC 184/SC 02/WG 8: Robots de Servicio

Motores DC

- IEC 60034-1:2017 Rotating electrical machines - Part 1: Rating and performance.
- IEC 60072-1:1991 Dimensions and output series for rotating electrical machines.
- IEC 60034-2-1:2014 Rotating electrical machines - Part 2-1: Standard methods for determining losses and efficiency from tests.
- IEC 60034-5:2000 Rotating electrical machines - Part 5: Degrees of protection provided by the integral design of rotating electrical machines.
- IEC 60034-6: Rotating electrical machines - Part 6: Methods of cooling.
- IEC 60034-7: Rotating electrical machines - Part 7: Classification of types of constructions and mounting arrangements (IM Code).
- IEC 60034-9: Rotating electrical machines - Part 9: Noise limits

Normatividad Arduino

Los productos Arduino / Genuino destinados a la venta y uso en mercados mundiales cumplen con los requisitos internacionales aplicables para la seguridad del producto, compatibilidad electromagnética (EMC), información esencial de seguridad y uso, WEEE, RoHS, calidad y para su uso en ubicaciones peligrosas. Los productos entregados en el Espacio Económico Europeo (EEE) cumplen con las directivas de la Comunidad Europea (CE). Los productos entregados en América del Norte cumplen con sus respectivas directivas. Los productos llevan marcas CE y / o FCC que han sido probadas y certificadas por Arduino para cumplir con las directivas de EC y / o EE. UU.

Manufactura:

Todos los componentes y aleaciones de soldadura utilizados en este producto cumplen con la Directiva RoHS. La Directiva RoHS impide que todos los equipos eléctricos y electrónicos nuevos comercializados en el Espacio Económico Europeo contengan más niveles de plomo, cadmio, mercurio, cromo hexavalente, bifenilos policlorados (PBB) y éteres difenil polibromados (PBDE).

RoHS se refiere a la directiva 2002/95/CE de Restricción de ciertas Sustancias Peligrosas en aparatos eléctricos y electrónicos, adoptada en febrero de 2003 por la Unión Europea.

Seguridad:

Todas las placas están etiquetadas con el logotipo de FCC y CE, ya que cumplen con los estándares de compatibilidad electromagnética establecidos en sus respectivas jurisdicciones. Los productos Arduino / Genuino cumplen con los requisitos esenciales de la directiva europea 2001/95 / CE Directiva general sobre seguridad de los productos y la Directiva 93/68 / CE.

Conformidad con la fcc:

Este dispositivo cumple con la Parte 15 de las Reglas de la FCC. El funcionamiento está sujeto a las siguientes dos condiciones: (1) este dispositivo no puede causar interferencias perjudiciales, y (2) este dispositivo debe aceptar cualquier interferencia recibida, incluidas las interferencias que puedan causar un funcionamiento no deseado.

El Código Federal de Regulación (CFR) La FCC Parte 15 es un estándar de prueba común para la mayoría de los equipos electrónicos. La Parte 15 de la FCC cubre las regulaciones bajo las cuales un radiador intencional, no intencional o incidental que se puede operar sin un individuo licencia. La Parte 15 de la FCC cubre también las especificaciones técnicas, administrativas requisitos y otras condiciones relacionadas con la comercialización de los dispositivos de la Parte 15 de la FCC.

Dependiendo del tipo de equipo, verificación, declaración de conformidad o la certificación es el proceso para el cumplimiento de la Parte 15 de la FCC.

Pruebas:

Los productos están sujetos a triple prueba para asegurarse de que no sean defectuosos:

- Primero, las placas de circuito impreso se prueban minuciosamente para detectar cortocircuitos y conexiones abiertas.
- Luego, las placas se alimentan (y, en productos que contienen un microcontrolador, el gestor de arranque está programado) para verificar que no haya problemas macroscópicos que impidan que la placa se encienda.
- Finalmente, la prueba más profunda: la placa se coloca en un banco de pruebas de clavos personalizados y programados por un programa de prueba, que comprueba su funcionalidad general.

Normatividad circuitos impresos

- IPC dicta los siguientes estándares para circuitos impresos:
- Series IPC-2581 y series IPC-2610: Transferencia de datos y Documentación para productos electrónicos.
- Series IPC-2220: Diseño de la placa.
- IPC-4101, 4104, 4202, 4203, 4204: Materiales base para placas impresas.
- IPC-6011, 6012, 6013, 6017: Cualidades de las placas impresas:
- IPC-A-600: Aceptabilidad para placas impresas.
- J-STD-001: Requerimientos para Ensamblajes electrónicos soldados.
- IPC-A-610: Aceptabilidad de Ensamblajes electrónicos.
- IPC-A-620: Requerimientos y aceptabilidad para Ensamblajes de cable y alambre.

Normatividad electrónica

- NMX-I-101/02-NYCE-2001: VOCABULARIO ELECTROTECNICO. ELECTRONICA (CANCELA A LA NMX-I-101/02-1982).
- IEEE STD 1481-2009 - IEEE Standard for Integrated Circuit (IC) Open Library Architecture (OLA).
- NMX-I-207/01-NYCE-2001 SIMBOLOS (LITERALES Y GRAFICOS) EMPLEADOS EN ELECTRONICA-DIAGRAMAS, GRAFICAS Y TABLAS UTILIZADAS EN ELECTRONICA-PARTE 01-DEFINICIONES Y CLASIFICACION (CANCELA A LA NMX-I-207/01-1991).
- NMX-I-255/02-NYCE-2001 PRODUCTOS ELECTRONICOS- COMPONENTES- CONDENSADORES FIJOS PARA USARSE EN EQUIPO ELECTRONICO. PARTE 02: CONDENSADORES FIJOS DE CERAMICA CLASE 1, SELECCION DE METODOS DE PRUEBA Y REQUISITOS GENERALES (CANCELA A LA NMX-I-006/02-1984).
- NMX-I-280/02-NYCE-2001 PRODUCTOS ELECTRONICOS- COMPONENTES- RESISTENCIAS FIJAS-PARTE 02: RESISTENCIAS FIJAS NO
- BOBINADAS DE BAJA POTENCIA-SELECCION DE METODOS DE PRUEBA Y REQUISITOS GENERALES (CANCELA A LA NMX-I-013/02-1983).

Esquemas



Ilustración 20.- Esquema del Drawbot en partes.

Lista de partes mecánicas.

Motores nema 17

Este motor paso a paso NEMA 17 es bipolar, tiene un ángulo de paso de 1.8° (200 pasos por vuelta) y cada bobinado es de 1.2 A a 4 V, capaz de cargar con 3.2 kg/cm (44 oz-in).

Características:

- Tamaño: 42.3×48mm, sin incluir el eje (NEMA 17)
- Peso: 350 gramos (13 oz)
- Diámetro del eje: 5 mm "D"
- Longitud del eje: 25 mm
- Pasos por vuelta: 200 (1.8° /paso)
- Corriente: 1.2 Amperios por bobinado
- Tensión: 4 V
- Resistencia: 3.3 Ohm por bobina

- Torque: 3.2 kg/cm (44 oz-in)
- Inductancia: 2.8 mH por bobina

Servo motor SG90

El servo SG90 Tower Pro es un servo miniatura de gran calidad y diminutas dimensiones, además es bastante económico. Funciona con la mayoría de tarjetas electrónicas de control con microcontroladores y además con la mayoría de los sistemas de radio control comerciales. Funciona especialmente bien en aeronaves de aeromodelismo dadas sus características de torque, tamaño y peso.

Características

- Micro Servo Tower-pro
- Velocidad: 0.10 sec/60° @ 4.8V
- Torque: 1.8 Kg-cm @ 4.8V
- Voltaje de funcionamiento: 3.0-7.2V
- Temperatura de funcionamiento: -30 °C ~ 60 °C
- Ángulo de rotación: 180°
- Ancho de pulso: 500-2400 µs
- Longitud de cable de conector: 24.5cm