



Universidad Veracruzana

Universidad Veracruzana

Facultad de Ingeniería de la construcción y el habitat

TESIS:

**Diseño y construcción de un brazo robótico
colaborativo para sistemas de manufactura
flexible**

Presenta Ángel Ernesto Trujillo Elizondo, para obtener el
grado de Maestría en Ingeniería Aplicada

Asesor:

José Alejandro Vasquez Santacruz

Índice general

Agradecimientos	5
Resumen	6
Abstract	7
1. Introducción	8
1.1. Objetivos	8
1.2. Justificación	8
1.3. Hipótesis	9
2. Marco teórico	10
2.1. Brazos robóticos	10
2.2. Robótica colaborativa	10
2.3. Sistemas de manufactura flexible	10
2.4. Ingeniería de sistemas basado en modelos	10
3. MBSE	11
3.1. Diagrama de requerimientos	11
4. Modelo matemático	13
4.1. Cinemática directa e inversa	14
4.1.1. Cinemática directa	14
4.1.1.1. Matriz de transformación homogénea	14
4.1.1.2. Convención de Denavit-Hartenberg	15
4.1.2. Cinemática inversa	16
4.2. Cinemática de la velocidad	16
4.3. Modelo dinámico	16
4.3.1. Formulación Lagrangiana	16

4.3.2. Formulación Newton-Euler	16
Bibliografía	17
Anexos	18
Anexo 1. Función de creación del brazo robótico	18
Anexo 2. Cinemática directa	18
Anexo 2. Cinemática directa	19

Índice de figuras

3.1. Diagrama de requerimientos	12
4.1. Boceto del brazo robótico propuesto	14
4.2. Cadena cinemática	15

Índice de cuadros

4.1. Parámetros Denavit Hartenberg	16
--	----

Agradecimientos

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico recibido durante la realización de este posgrado.

Agradezco profundamente a mi asesor, el Dr. José Alejandro Vásquez Santacruz por su apoyo y paciencia durante la realización de esta investigación.

Resumen

Aquí va un resumen, pero cuando acabe.

Abstract

Here goes an abstract, but i'll do it when I finish.

Capítulo 1

Introducción

Aquí empieza el viaje

1.1. Objetivos

El objetivo general de esta investigación consiste en diseñar y construir un brazo robótico de seis grados de libertad para sistemas de manufactura flexible.

Los objetivos específicos se mencionan a continuación:

- Desarrollar el modelo matemático cinemático y dinámico de un brazo robótico de seis grados de libertad.
- Construir un brazo robótico de coste accesible y fácil fabricación, así como compartir su diseño y componentes con una licencia de código abierto.
- Optimizar el modelado de piezas para su correcta manufactura con máquinas de manufactura aditiva.
- Desarrollar ¿utilizar? una metodología apegada a la ingeniería de sistemas basadas en modelos.

1.2. Justificación

El desarrollo de un brazo robótico de seis grados de libertad para sistemas de manufactura flexible que se pretende realizar es relevante en diversos

ámbitos del conocimiento.

Por último, al estar pensado como un desarrollo de código abierto, contribuirá al acervo tecnológico de la humanidad y podrá ser copiado, modificado y mejorado alrededor del mundo.

1.3. Hipótesis

Capítulo 2

Marco teórico

2.1. Brazos robóticos

De acuerdo con Spong et al. [1, p. 1], la mayoría de las aplicaciones en el campo de la robótica se centran en brazos robóticos industriales que operan en fabricas con entornos estructurados, es por esto su gran importancia.

Un brazo robótico está compuesto de eslabones conectados por articulaciones para formar una cadena cinemática.

2.2. Robótica colaborativa

2.3. Sistemas de manufactura flexible

2.4. Ingeniería de sistemas basado en modelos

Capítulo 3

MBSE

3.1. Diagrama de requerimientos

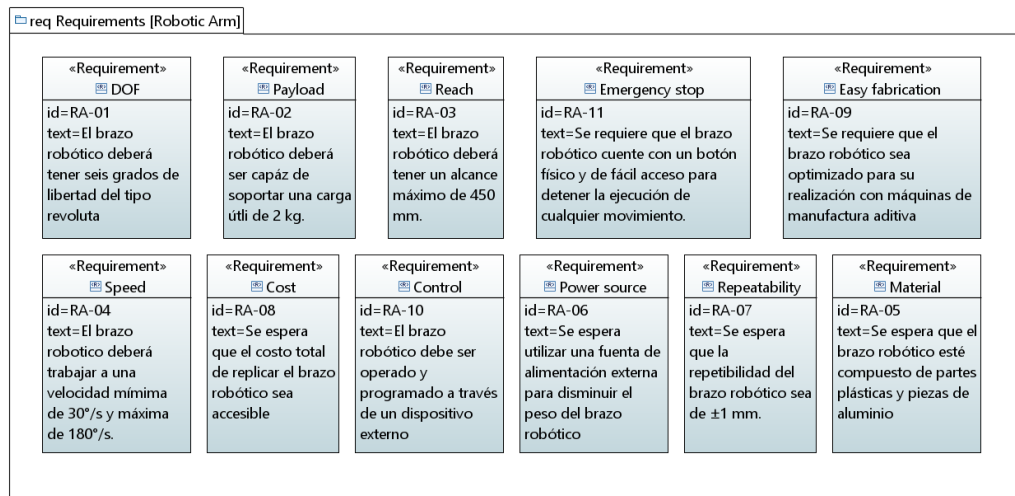


Figura 3.1: Diagrama de requerimientos

Capítulo 4

Modelo matemático

De acuerdo con [2, p. 14], el diseño y control de robots requiere diversos modelos matemáticos, tales como:

- Cinemática directa e inversa, es decir, encontrar la posición del efector final en términos de las coordenadas de las articulaciones y viceversa.
- Cinemática de la velocidad, encontrar la velocidad del efector final en términos de la velocidad de las articulaciones y viceversa.
- Modelo dinámico, el cual establece la relación entre los torques o fuerzas que ejercen los actuadores y las posiciones, velocidades y aceleraciones de las articulaciones.

En este capítulo se desarrollarán estos modelos matemáticos, los cuales son necesarios para simular y predecir el comportamiento del mismo.

Para realizar estos modelos, es necesario contar con los parámetros físicos y geométricos del robot, los cuales, para una primera aproximación se mencionarán a continuación.

Otros requerimientos necesarios para el desarrollo del modelo matemático es el alcance total del brazo, el cual deberá ser de mínimo 500 mm, la velocidad, la cuál deberá estar en un rango entre 5 RPM y 30 RPM, y por último, la carga útil deberá ser de 2 kg.

En la figura 4.1 podemos ver un boceto del brazo robótico que se planea implementar.

Con estos datos claros, es posible empezar la realización de los modelos matemáticos.

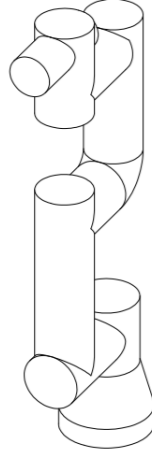


Figura 4.1: Boceto del brazo robótico propuesto

4.1. Cinemática directa e inversa

4.1.1. Cinemática directa

La cinemática directa de un robot se refiere al cálculo de la posición y orientación del marco de referencia del efector final desde sus coordenadas θ . [3]

4.1.1.1. Matriz de transformación homogénea

Según [3], existen tres usos principales para una matriz de transformación homogénea:

1. Para representar la configuración (posición y orientación) de un cuerpo rígido.
2. Para cambiar el marco de referencia en el cuál está representado un vector o un *frame*.
3. Para desplazar un vector o un *frame*.

Para el caso que nos ocupa, necesitamos la matriz de transformación homogénea desde la base fija del robot hasta su efector final, descrita con la ecuación siguiente:

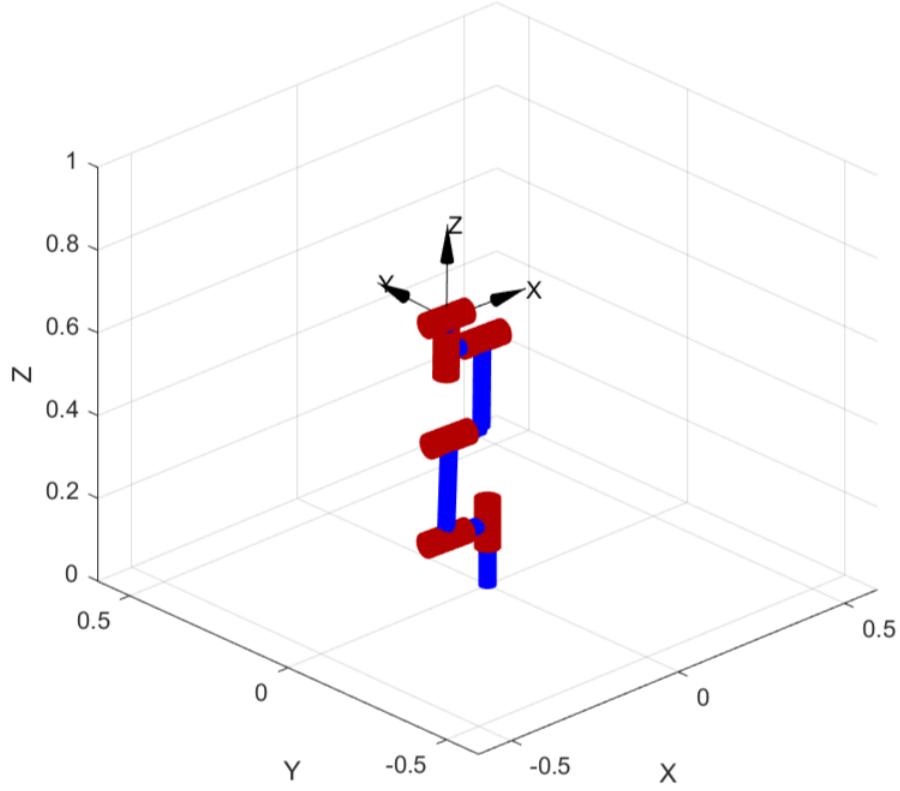


Figura 4.2: Cadena cinemática

$${}^7_0T = \mathcal{I}_z(a_1) \oplus \mathcal{R}_z(\theta_1) \oplus \mathcal{I}_x(b_1) \oplus \mathcal{R}_x(\theta_2) \oplus \mathcal{I}_z(c_1) \oplus \mathcal{R}_x(\theta_3) \oplus \mathcal{I}_z(d_1) \oplus \mathcal{I}_x(d_2) \oplus \mathcal{R}_x(\theta_4) \oplus \mathcal{I}_x(e_1) \oplus \mathcal{R}_z(\theta_5) \oplus \mathcal{I}_z(f_1) \oplus \mathcal{R}_x(\theta_6) \quad (4.1)$$

En la imagen 4.2 podemos observar la cadena cinemática de nuestro brazo robótico, fue creada con un algoritmo en MATLAB con ayuda de la herramienta Robotic Toolbox, desarrollada por Peter Corke [4], dicho código puede consultarse en el Anexo 1.

4.1.1.2. Convención de Denavit-Hartenberg

En muchas aplicaciones, es necesario representar los parámetros cinemáticos de forma simplificada con ayuda de la notación Denavit-Hartenberg, con

esta, podemos hacer uso de algoritmos de solución para encontrar los valores dinámicos, planeación de trayectorias, simulaciones, entre otras.

Peter Corke [5] propuso un acercamiento sencillo y sistemático para convertir una matriz de transformación homogénea como la de la ecuación 4.1 en los parámetros de Denavit-Hartenberg.

Se realizó dicho proceso con ayuda de Robotic Toolbox del mismo autor y se llegó a los resultados que se muestran en la tabla 4.1.

Cuadro 4.1: Parámetros Denavit Hartenberg

	θ [rad]	d [m]	a [m]	α [rad]
Articulación 1	θ_1	0.152	0	$\frac{\pi}{2}$
Articulación 2	θ_2	0	-0.244	0
Articulación 3	θ_3	0	-0.213	0
Articulación 4	θ_4	-0.012	0	$-\frac{\pi}{2}$
Articulación 5	θ_5	0.085	0	$\frac{\pi}{2}$
Articulación 6	θ_6	0	0	$-\frac{\pi}{2}$

4.1.2. Cinemática inversa

De manera parecida a como se manejó en la sección anterior, la librería de Robotic Toolbox tiene un método establecido para calcular la cinemática inversa dada una matriz de transformación homogénea.

En este texto se hará uso de la misma y no se abordará en mayor profundidad.

4.2. Cinemática de la velocidad

4.3. Modelo dinámico

4.3.1. Formulación Lagrangiana

4.3.2. Formulación Newton-Euler

Bibliografía

- [1] M. W. Spong, S. Hutchinson, and M. Vidyasagar, *Robot Modeling and Control*. WILEY, 2005.
- [2] W. K. Etienne Dombre, *Robot Manipulators: Modeling, Performance Analysis and Control (Control Systems, Robotics, and Manufacturing series)*. Wiley-ISTE, 2007.
- [3] K. M. N. University, I. Lynch, and F. C. S. N. U. Park, *Modern Robotics*. Cambridge University Press, 2017.
- [4] P. Corke, *Robotics, Vision and Control*. Springer International Publishing, 2017.
- [5] P. Corke, “A simple and systematic approach to assigning denavit–hartenberg parameters,” *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 23, pp. 590–594, jun 2007.

Anexos

Anexo 1. Función de creación del brazo robótico

```
function roboticarm = myroboticarm(a1,b1,c1,d1,d2,e1
    ,f1)
%This function crea un objeto del tipo SerialLink
% Con los parametros de mi brazo robotico
L1 = a1;
L2 = b1;
L3 = c1;
L4 = d1;
L5 = d2;
L6 = e1;
L7 = f1;
s = 'Tz(L1).Rz(q1).Tx(L2).Rx(q2).Tz(L3).Rx(q3).Tx(L4
    ).Tz(L5).Rx(q4).Tx(L6).Rz(q5).Tz(L7).Rx(q6)';
dh = DHFactor(s);
roboticarm = eval(dh.command('roboticarm')) )
```

Anexo 2. Cinemática directa

```
% Universidad Veracruzana
% Tesis
% Angel Trujillo
clear;
clc;
L1 = 0.152;
```

```

L2 = -0.120;
L3 = 0.244;
L4 = 0.104;
L5 = 0.213;
L6 = -0.104;
L7 = 0.085;
qn = [0 0 0 0 0 0];
robotarm = myroboticarm(L1,L2,L3,L4,L5,L6,L7);
robotarm.fkine(qn)

```

Anexo 3. Cinemática inversa

```

% Universidad Veracruzana
% Tesis
% Angel Trujillo

```

```

clear;
clc;
L1 = 0.152;
L2 = -0.120;
L3 = 0.244;
L4 = 0.104;
L5 = 0.213;
L6 = -0.104;
L7 = 0.085;
qn = [0 0 0 0 0 0];
robotarm = myroboticarm(L1,L2,L3,L4,L5,L6,L7);
robotarm.plot(qn)
T = robotarm.fkine(qn)
qi = robotarm.ikine(T)

```