



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	15
4.1.1. Cinemática directa	15
4.1.1.1. Matriz de transformación homogénea	15
4.1.1.2. Convención de Denavit-Hartenberg	17
4.1.2. Cinemática inversa	17
4.2. Cinemática de la velocidad	18
4.3. Modelo dinámico	18
4.3.1. Formulación Lagrangiana	18

4.3.2. Formulación Newton-Euler	18
Bibliografía	19
Anexos	20
Anexo 1. Matriz de transformación homogénea	20

Índice de figuras

3.1. Diagrama de requerimientos	12
4.1. Boceto del brazo robótico propuesto	14
4.2. Cadena cinemática ¿free body diagram?	14
4.3. Diagrama cinemático	16

Índice de cuadros

4.1. Parámetros Denavit Hartenberg	17
--	----

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

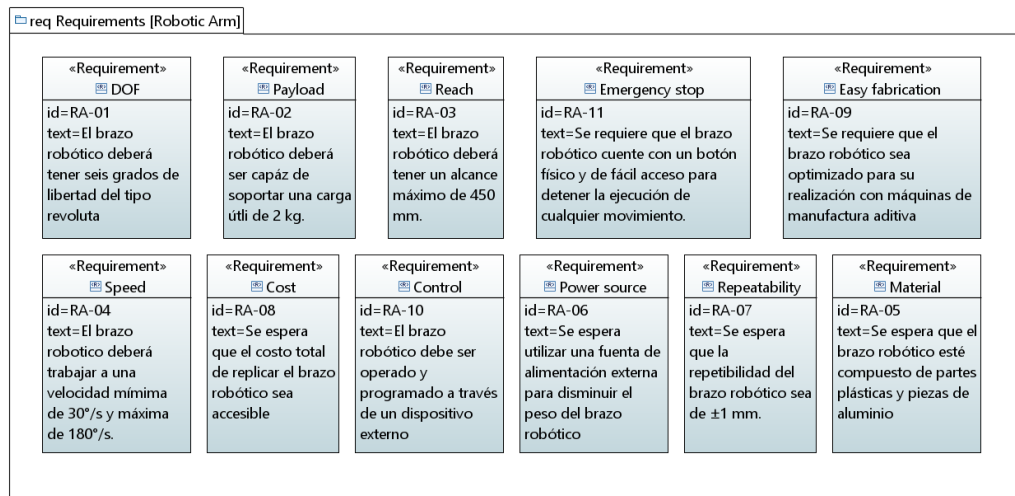


Figura 3.1: Diagrama de requerimientos

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.

Como podemos apreciar en el diagrama de requerimientos de la figura 3.1, es necesario que el robot tenga seis grados de libertad del tipo revoluta, así, el diagrama de cuerpo libre de la cadena cinemática se expresa en la figura 4.3.

Otros requerimientos necesarios para el desarrollo del modelo matemático es el alcance total del brazo, el cual deberá ser de mínimo 450 mm, la velocidad, la cuál deberá estar en un rango entre 30 °/s y 180 °/s, por último, la carga útil deberá ser de 2 kg.

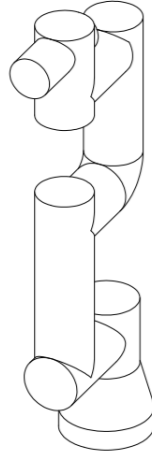


Figura 4.1: Boceto del brazo robótico propuesto

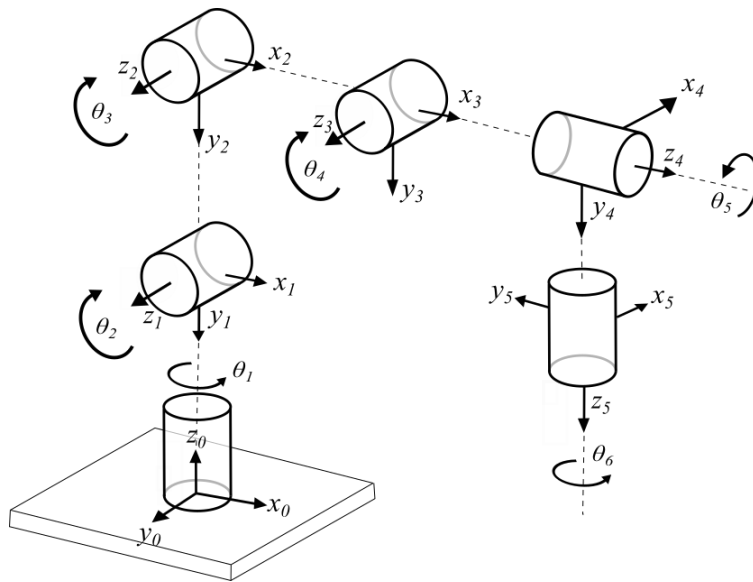


Figura 4.2: Cadena cinemática ¿free body diagram?

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

Las distancias, masas e inercia de las articulaciones las podemos observar en la tabla x.

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

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, por esto, está descrita con siete marcos de referencia y se obtiene con la ecuación siguiente:

$${}^8T_0 = {}^1T_0 {}^2T_1 {}^3T_2 {}^4T_3 {}^5T_4 {}^6T_5 {}^7T_6 \quad (4.1)$$

$${}^1T_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & a_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad {}^2T_1 = \begin{bmatrix} 0 & -s_{\theta_1} & c_{\theta_1} & -b_1 c_{\theta_1} \\ 0 & c_{\theta_1} & s_{\theta_1} & b_1 s_{\theta_1} \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

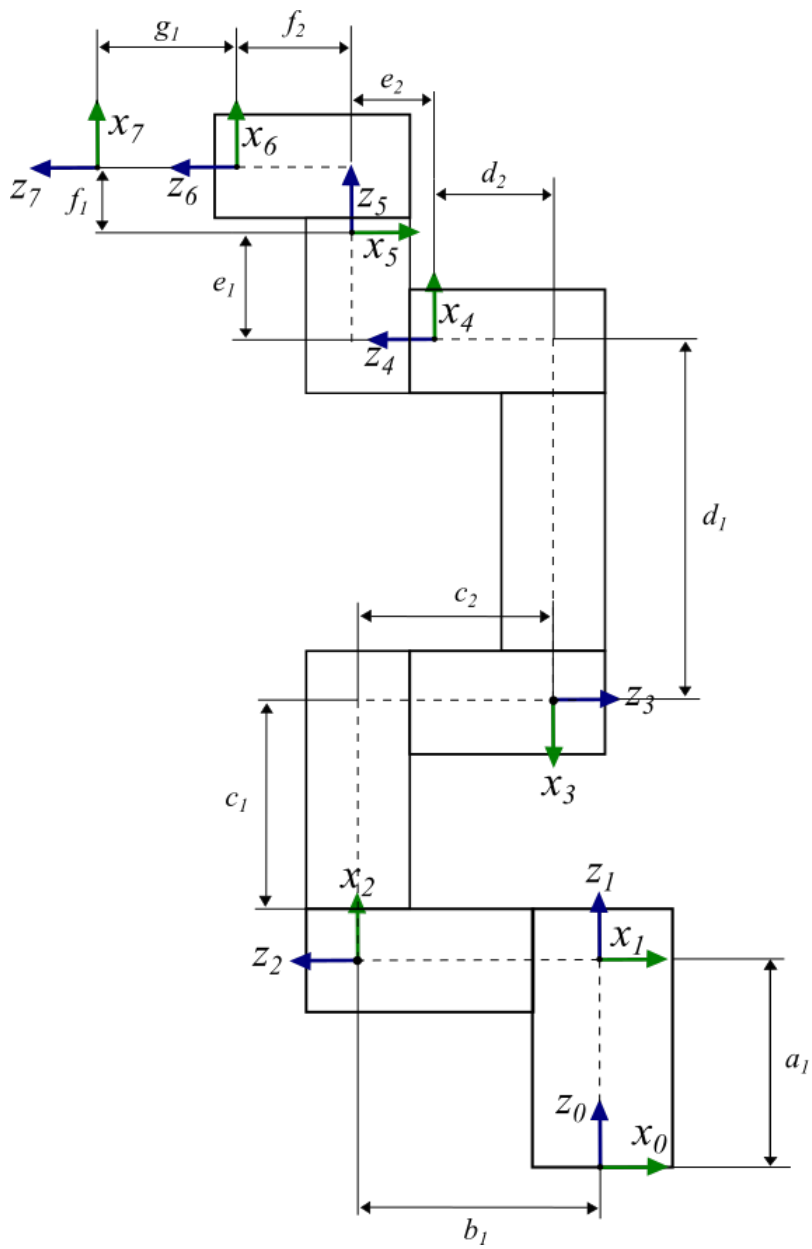


Figura 4.3: Diagrama cinemático

$$\begin{aligned}
{}^3_2T &= \begin{bmatrix} -c_{\theta_2} & -s_{\theta_2} & 0 & c_1c_{\theta_2} \\ -s_{\theta_2} & c_{\theta_2} & 0 & c_1s_{\theta_2} \\ 0 & 0 & -1 & -c_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
{}^4_3T &= \begin{bmatrix} -c_{\theta_3} & -s_{\theta_3} & 0 & -d_1c_{\theta_3} \\ -s_{\theta_3} & c_{\theta_3} & 0 & d_1s_{\theta_3} \\ 0 & 0 & -1 & -d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
{}^5_4T &= \begin{bmatrix} 0 & -s_{\theta_4} & c_{\theta_4} & e_1c_{\theta_4} \\ 0 & c_{\theta_4} & s_{\theta_4} & e_1s_{\theta_4} \\ -1 & 0 & 0 & e_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
{}^6_5T &= \begin{bmatrix} 0 & -s_{\theta_5} & -c_{\theta_5} & -f_2c_{\theta_5} \\ 0 & c_{\theta_5} & -s_{\theta_5} & f_2s_{\theta_5} \\ 1 & 0 & 0 & f_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
{}^7_6T &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & g_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

Para realizar la ecuación 4.1 se programó un algoritmo en MATLAB que tiene como datos de entrada un vector *tetha* con los seis ángulos de las articulaciones del robot y calcula la posición del efector final. Dicho algoritmo se puede consultar en el Anexo 1.

4.1.1.2. Convención de Denavit-Hartenberg

Cuadro 4.1: Parámetros Denavit Hartenberg

	θ [rad]	a [m]	d [m]	α [rad]
Articulación 1	0	0	0.1519	$\frac{\pi}{2}$
Articulación 2	0	-0.24365	0	0
Articulación 3	0	-0.21325	0	0
Articulación 4	0	0	0.11235	$\frac{\pi}{2}$
Articulación 5	0	0	0.08535	$-\frac{\pi}{2}$
Articulación 6	0	0	0.0819	0

4.1.2. Cinemática inversa

No estoy seguro para que me servirá, si lo hará el software. MoveIt o MATLAB.

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.

Anexos

Anexo 1. Matriz de transformación homogénea

```
% Universidad Veracruzana
% Facultad de la Construccion y el Habitat
% T E S I S
% Diseno y construccion de un brazo robotico
    colaborativo para sistemas de
% manufactura flexible
% Angel Ernesto Trujillo Elizondo
% Anexo 1. Cinematica directa

clear;
clc;

% Datos iniciales
tetha = [0,0,0,0,0,0]; % Vector de angulos para el
    brazo robotico en grados
a1 = 10;
b1 = 10;
c1 = 10;
c2 = 10;

T0_1 = [1 0 0 0; 0 1 0 0; 0 0 1 a1; 0 0 0 1];
T1_2 = [0 -sind(tetha(1)) cosd(tetha(1)) -b1*cosd(
    tetha(1)); 0 cosd(tetha(1)) sind(tetha(1)) b1*
    sind(tetha(1)); -1 0 0 0; 0 0 0 1];
T2_3 = [-cosd(tetha(2)) -sind(tetha(2)) 0 c1*cosd(
    tetha(2)); -sind(tetha(2)) cosd(tetha(2)) 0 c1*
```

```

        sind(tetha(2)); 0 0 -1 -c2; 0 0 0 1;];
T3_4 = [0 0 0 0; 0 0 0 0; 0 0 0 0; 0 0 0 0];
T4_5 = [0 0 0 0; 0 0 0 0; 0 0 0 0; 0 0 0 0];
T5_6 = [0 0 0 0; 0 0 0 0; 0 0 0 0; 0 0 0 0];

T0_6 = T0_1*T1_2*T2_3%*T3_4*T4_5*T5_6

%sind(tetha(2))
%cosd(tetha(2))

```