

CONTROL Y PROGRAMACIÓN DE ROBOTS

Proyecto de robots manipuladores

Grado en Ingeniería Electrónica, Mecatrónica y Robótica



Autores: Montes Grova, Marco Antonio
Lozano Romero, Daniel
Mérida Floriano, Javier

Índice

1. Introducción al proyecto	3
2. Análisis Cinemático del brazo	4
2.1. Modelo Cinemático Directo	4
2.1.1. Parámetros y estudio del MCD según Denavit-Hartenberg	4
2.1.2. Matrices de transformación homogéneas del robot	4
2.1.3. Ecuaciones simbólicas del MCD	4
2.2. Modelo Cinemático Inverso	5
2.3. Jacobiano del robot y análisis de puntos singulares	6
3. Análisis Dinámico del brazo	6
4. Obtencion de los parametros dinamicos del robot	8
4.1. Obtencion del modelo para estimar los parametros	8
4.2. Estimacion de parametros dinamicos	8
4.3. Calculos estadisticos	8
4.4. Analisis de resultados	8
5. Control Cinematico del robot	9
5.1. Generador de trayectorias punto a punto	9
5.2. Generador de trayectorias lineal	9
5.3. Pruebas y conclusiones	9
6. Control Dinámico del brazo	10
6.1. Obtencion del modelo lineal de las articulaciones del brazo	10
6.2. Diseño de controladores	10
6.3. FANTASIA VARIADA DE GIL	10
7. Anexos	11
7.1. Conclusiones (A LO MEJON SI A LO MEJON NO)	11
7.2. Codigos de programacion	11
7.3. Montajes en Simulink	11

1. Introducción al proyecto

Como objetivo de este trabajo se encuentra el análisis cinemático y dinámico, así como la estimación de ciertos parámetros dinámicos del robot, como pueden ser inercias o fricciones viscosas. Además de ello, se diseñará un control cinemático y dinámico del brazo robótico.

El brazo sujeto a análisis será del tipo RRR, es decir, de tres articulaciones rotacionales.

El robot que se va a estudiar, representado por la estructura de la portada de este trabajo, posee los siguientes parámetros estructurales:

$$L_0 = 0,60m \quad L_1 = 0,60m \quad L_2 = 1,00m \quad L_3 = 0,80m$$

Además, también vienen dados los valores de factores de reducción de velocidad y constantes de par de los motores:

$$R_1 = 50; R_2 = 30; R_3 = 15$$

$$K_{t1} = 0,5 \frac{Nm}{A}; K_{t2} = 0,4 \frac{Nm}{A}; K_{t3} = 0,35 \frac{Nm}{A}$$

En primer lugar, se desarrollará un análisis cinemático del brazo robótico, tanto directo como inverso, es decir, se hallará la posición cartesiana del efector final en función de las variables articulares del brazo y viceversa.

Tras ello, será necesario estimar los parámetros dinámicos del brazo, ya que únicamente se conocen las longitudes del mismo. Se obtendrán diferentes parámetros en función de las condiciones supuestas para el brazo, principalmente las condiciones que se emplearan serán:

- Robot con medidas ideales con reductoras.
- Robot con medidas ideales de accionamiento directo.
- Robot con medidas reales con reductoras.
- Robot con medidas reales de accionamiento directo.

Para el robot con medidas reales, se evaluará qué condición es mas favorable. Por ejemplo, si se obtiene un mejor modelo matemático del robot empleando únicamente encoders que conozcan las posiciones de las variables articulares y derivando numéricamente para conocer las velocidades y las aceleraciones de las mismas, o el caso en el que se empleen encoders que conozcan la posición y tacómetros que conozcan las velocidades pero derivando numéricamente para obtener las aceleraciones.

Una vez se hayan obtenido los modelos matemáticos de las articulaciones de los robots, se diseñará un control cinemático del mismo, el cual será un generador de trayectorias que, a partir de una posición inicial, una posición real, un número de puntos y el tiempo en que se desea que vaya de un punto a otro, generará una trayectoria de las variables articulares del robot.

Por último, se diseñarán una serie de controladores dinámicos para el robot, en los cuales se observe la mejoría o empeoramiento de los mismos en función del tipo de robot empleado frente a otros.

2. Análisis Cinemático del brazo

2.1. Modelo Cinemático Directo

2.1.1. Parámetros y estudio del MCD según Denavit-Hartenberg

Uno de los modos de estudio del problema cinemático directo de un robot es el procedimiento de Denavit-Hartenberg, el cual se basa en la realización de cambios de sistema de referencia empleando las matrices de transformación homogéneas. Siguiendo una serie de pasos, se llegará a obtener los siguientes parámetros que definen la cinemática directa del robot.

Articulación	θ_i	d_i	a_i	α_i
1	θ_1	$L0+L1$	0	$\frac{\pi}{2}$
2	θ_2	0	$L2$	0
3	θ_3	$L3$	$L2$	0

2.1.2. Matrices de transformación homogéneas del robot

A continuación, se mostrarán las matrices de transformación homogéneas que definen los cambios de sistema de referencia que han hecho posible relacionar el sistema de referencia base con el del efector final. La matriz de transformación homogénea que relaciona un sistema de referencia con el siguiente se define como:

$${}^{i-1}A_i = Rot_z(\theta_i) * T(0, 0, d_i) * T(d_i, 0, 0) * Rot_x(\alpha_i) = \begin{pmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\alpha_i)\cos(\theta_i) & \sin(\alpha_i)\sin(\theta_i) & a_i\cos(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & \sin(\alpha_i)\cos(\theta_i) & -\sin(\alpha_i)\sin(\theta_i) & a_i\sin(\theta_i) \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Ahora que se ha definido la matriz general, se definirán las matrices de transformación homogéneas de cada cambio de sistema de referencia del robot:

$${}^0A_1 = \begin{pmatrix} \cos(\theta_1) & 0 & \sin(\theta_1) & 0 \\ \sin(\theta_1) & 0 & -\cos(\theta_1) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & L0 + L1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$${}^1A_2 = \begin{pmatrix} \cos(\theta_2) & -\sin(\theta_2) & 0 & L2\cos(\theta_2) \\ \sin(\theta_2) & \cos(\theta_2) & 0 & L2\sin(\theta_2) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$${}^2A_3 = \begin{pmatrix} \cos(\theta_3) & -\sin(\theta_3) & 0 & L3\cos(\theta_3) \\ \sin(\theta_3) & \cos(\theta_3) & 0 & L3\sin(\theta_3) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

2.1.3. Ecuaciones simbólicas del MCD

A partir de estos parámetros será posible obtener las matrices de transformación homogéneas asociadas a cada traslación y giro de sistema de referencia. Si se premultiplican las matrices desde la base hasta el punto final del brazo (efector final), la matriz de transformación obtenida será:

$${}^3T_0 = \begin{pmatrix} \cos(\theta_2 + \theta_3)\cos(\theta_1) & -\sin(\theta_2 + \theta_3)\cos(\theta_1) & -\sin(\theta_1) & \cos(\theta_1)[L3\cos(\theta_2 + \theta_3) + L2\cos(\theta_2)] \\ \cos(\theta_2 + \theta_3)\sin(\theta_1) & -\sin(\theta_2 + \theta_3)\sin(\theta_1) & \cos(\theta_1) & \sin(\theta_1)[L3\cos(\theta_2 + \theta_3) + L2\cos(\theta_2)] \\ \sin(\theta_2 + \theta_3) & \cos(\theta_2 + \theta_3) & 0 & L0 + L1 + L3\sin(\theta_2 + \theta_3) + L2\sin(\theta_2) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

Donde se puede extraer que la matriz de orientación del efector final y la posición del mismo respecto al sistema de referencia de la base son:

$$noa = \begin{pmatrix} \cos(\theta_2 + \theta_3)\cos(\theta_1) & -\sin(\theta_2 + \theta_3)\cos(\theta_1) & -\sin(\theta_1) \\ \cos(\theta_2 + \theta_3)\sin(\theta_1) & -\sin(\theta_2 + \theta_3)\sin(\theta_1) & \cos(\theta_1) \\ \sin(\theta_2 + \theta_3) & \cos(\theta_2 + \theta_3) & 0 \end{pmatrix}$$

$$p = \begin{pmatrix} \cos(\theta_1)[L3\cos(\theta_2 + \theta_3) + L2\cos(\theta_2)] \\ \sin(\theta_1)[L3\cos(\theta_2 + \theta_3) + L2\cos(\theta_2)] \\ L0 + L1 + L3\sin(\theta_2 + \theta_3) + L2\sin(\theta_2) \end{pmatrix}$$

2.2. Modelo Cinemático Inverso

En lo que a la resolución del modelo cinemático inverso del robot respecta, se basará en obtener los valores de las variables articulares a partir de la posición del efector final. Por tanto, se partirá de las ecuaciones del vector p :

$$\begin{aligned} px &= \cos(\theta_1)[L3\cos(\theta_2 + \theta_3) + L2\cos(\theta_2)] \\ py &= \sin(\theta_1)[L3\cos(\theta_2 + \theta_3) + L2\cos(\theta_2)] \\ pz &= L0 + L1 + L3\sin(\theta_2 + \theta_3) + L2\sin(\theta_2) \end{aligned}$$

Para obtener las ecuaciones que definen el valor de θ_1, θ_2 y θ_3 , se trabajará con las funciones que definen px, py y pz . Será necesario definir los ángulos empleando la función atan2 de *Matlab*, ya que de ese modo se distinguirá en qué cuadrante se encuentra la tangente.

Por tanto el objetivo es obtener el valor del seno y el coseno de cada ángulo.

Se comenzará obteniendo el valor de θ_1 . Para ello se define:

$$A = \sqrt{px^2 + py^2} = L3\cos(\theta_2 + \theta_3) + L2\cos(\theta_2)$$

de ese modo, se obtiene θ_1 como:

$$\theta_1 = \text{atan2}(\sin(\theta_1), \cos(\theta_1)) = \text{atan2}\left(\frac{py}{A}, \frac{px}{A}\right) \quad (3)$$

Para obtener el valor de θ_3 , se comenzará a partir de pz y, se definirá la siguiente variable auxiliar:

$$B = pz - L1 - L0 = L3\sin(\theta_2 + \theta_3) + L2\sin(\theta_2)$$

Si se trabaja con las dos variables auxiliares creadas, A y B, y se crea la nueva variable C, se conseguirá obtener el valor del ángulo deseado:

$$C = A^2 + B^2 = L2^2 + 2L2L3\cos(\theta_3) + L3^2$$

Cómo último paso para obtener el valor de θ_3 , se despejará el valor del coseno del mismo:

$$(\cos(\theta_3)) = \frac{C - L2^2 - L3^2}{2L2L3}$$

Por tanto, θ_3 se define como:

$$\theta_3 = \beta - \text{atan2}(\sin(\theta_3), \cos(\theta_3)) = \beta - \text{atan2}\left(\pm \sqrt{1 - \left(\frac{C - L2^2 - L3^2}{2L2L3}\right)^2}, \frac{C - L2^2 - L3^2}{2L2L3}\right) \quad (4)$$

Por último, se hallará el valor de la variable articular θ_2 . Para ello, se partirá de la ecuación A y se desarrollará empleando la fórmula del coseno del ángulo doble. La ecuación quedará de la forma:

$$A = L3\cos(\theta_2 + \theta_3) + L2\cos(\theta_2) = L3[\cos(\theta_2)\cos(\theta_3) - \sin(\theta_2)\sin(\theta_3)] + L2\cos(\theta_2) = \\ L3\cos(\theta_2)\cos(\theta_3) - L3\sin(\theta_2)\sin(\theta_3) + L2\cos(\theta_2)$$

donde será de ayuda despejar la función A en una suma de un término por el seno de θ_2 y otro término por el coseno del mismo ángulo. De ese modo será posible intentar obtener dicho ángulo empleando un cambio a coordenadas polares:

$$A = \cos(\theta_2)[L3\cos(\theta_3) + L2] - \sin(\theta_2)[L3\sin(\theta_3)]$$

$\rho\cos(\alpha) = L3\cos(\theta_3) + L2$ $\rho\sin(\alpha) = L3\sin(\theta_3)$	$\rho = \sqrt{(L3\sin(\theta_3))^2 + (L3\cos(\theta_3) + L2)^2}$ $\alpha = \text{atan2}(L3\sin(\theta_3), L3\cos(\theta_3) + L2)$
---	--

Sustituyendo en la ecuación A y empleando la fórmula del coseno del ángulo suma, se podría definir:

$$A = \rho\cos(\theta_2)\cos(\alpha) - \rho\sin(\theta_2)\sin(\alpha) \rightarrow A = \rho\cos(\theta_2 + \alpha)$$

Despejando el valor del coseno θ_3 se obtendrá:

$$\theta_2 = \text{atan2}\left(\pm\sqrt{1 - \left(\frac{A}{\rho}\right)^2}, \frac{A}{\rho}\right) - \alpha \quad (5)$$

De ese modo, la solución del problema cinemático inverso está formada por siguientes ecuaciones:

$$\theta_1 = \text{atan2}(\sin(\theta_1), \cos(\theta_1)) = \text{atan2}\left(\frac{py}{A}, \frac{px}{A}\right) \\ \theta_2 = \text{atan2}\left(\pm\sqrt{1 - \left(\frac{A}{\rho}\right)^2}, \frac{A}{\rho}\right) - \alpha \\ \theta_3 = \beta - \text{atan2}(\sin(\theta_3), \cos(\theta_3)) = \beta - \text{atan2}\left(\pm\sqrt{1 - \left(\frac{C-L2^2-L3^2}{2L2L3}\right)^2}, \frac{C-L2^2-L3^2}{2L2L3}\right)$$

2.3. Jacobiano del robot y análisis de puntos singulares

3. Análisis Dinámico del brazo

Una vez analizada la cinemática del brazo, se debe pasar a realizar un análisis dinámico del mismo. Este análisis nos muestra la relación que existe entre las intensidades aplicadas a los motores de las articulaciones del robot y las posiciones, velocidades y aceleraciones de dichas articulaciones.

La ecuación que permite obtener dicha relación es la siguiente:

$$K_t R I_m = (M(q) + J_m R^2) \ddot{q} + (C(q, \dot{q}) + B_m R^2) \dot{q} + G(q) + F(\dot{q}) \quad (6)$$

En la ecuación anterior, se tiene, en el término de la izquierda, las matrices de constantes de par de cada motor (K_t) y de reductoras (R) e intensidades (I_m) aplicadas a cada motor.

Por otro lado, en el término de la derecha encontramos las matrices de inercia de los eslabones ($M(q)$) y de los motores (J_m), la matriz de términos de Coriolis ($C(q, \dot{q})$) y la de términos viscosos de los motores (B_m), y las matrices de términos gravitatorios ($G(q)$) y de fricciones ($F(\dot{q})$), donde esta última no se tendrá en cuenta para la estimación del modelo.

Aparecen también los vectores columna q , qd y qdd que corresponden, respectivamente, a los valores de posición, velocidad y aceleración de las articulaciones.

Para tratar de hallar la ecuación anterior, se va a realizar un método recursivo que se basa en la segunda ley de Newton denominado algoritmo de Newton-Euler, el cual obtiene los esfuerzos/pares aplicados en cada articulación. Dicho algoritmo ha sido proporcionado en clase por lo que no se explicará aquí. Sí decir que como del robot sólo se conocen las longitudes de los eslabones y algunos parámetros dinámicos (reductoras y constantes de par) se realizará el cálculo con variables simbólicas que serán estimadas y sustituidas más adelante.

El resultado que se desea obtener con dicho algoritmo es el siguiente:

$$T = M(q)qdd + V(q, qd) + G(q), \quad (7)$$

donde el término $V(q, qd)$ hace referencia al conjunto $C(q, qd)qd$.

Como el algoritmo anterior obtiene el resultado total, se debe derivar el mismo para poder hallar las matrices aisladas. Por ello, el resultado T se deriva respecto a qdd para obtener la matriz $M(q)$. Acto seguido restar la matriz obtenida multiplicada por qdd al valor de T para eliminarlo y obtener las otras dos matrices.

El siguiente paso consiste en derivar la nueva T respecto a la constante de gravedad g , puesto que aparece únicamente en los términos gravitatorios. Así, y multiplicando por g a posteriori, se obtiene la matriz $G(q)$. Para hallar la matriz $V(q, qd)$ basta con restar a la T resultante de extraer la matriz de inercia la $G(q)$ anterior.

Una de las características que hay que tener en cuenta del algoritmo de Newton-Euler es que no tiene en cuenta las viscosidades e inercias de los motores, por lo que hay que añadirlas a posteriori obteniendo las matrices $Ma(q) = M(q) + J_m R^2$ y $Va(q, qd) = V(q, qd) + B_m R^2 qd$.

Una vez realizado todo esto se ha obtenido el modelo dinámico simbólico del robot, que se va a suponer correcto pues únicamente consiste en seguir unos pasos descritos en clase, pero que, si se deseara, se podría comparar con un robot diseñado en Robotics Toolbox de Matlab asignando valores a los parámetros y realizando un mismo experimento para ambos modelos, tomando como referencia correcta el último de ellos.

4. Obtencion de los parametros dinamicos del robot

Debido a que no se conocen los parametros dinamicos del robot, sera posible estimarlos mediante una serie de experimentos y aproximaciones. Se ha optado por aplicar el algoritmo de Newton-Euler, el cual es un procedimiento recursivo que se basa en la segunda ley de Newton. Este algoritmo nos dara los esfuerzos en las articulaciones.

Por tanto, trabajando con Matlab, si se definen todas esas variables del robot de manera simbolica y se corre el algoritmo, se obtendran los pares que sufren las articulaciones.

Las variables que se busca estimar del robot seran las siguientes:

$$I_{11} = \begin{bmatrix} I_{11xx} & I_{11xy} & I_{11xz} \\ I_{11yx} & I_{11yy} & I_{11yz} \\ I_{11zx} & I_{11zy} & I_{11zz} \end{bmatrix}$$
$$I_{22} = \begin{bmatrix} I_{22xx} & I_{22xy} & I_{22xz} \\ I_{22yx} & I_{22yy} & I_{22yz} \\ I_{22zx} & I_{22zy} & I_{22zz} \end{bmatrix} \quad \text{TERMINAR DE METER MATRICES LOCO}$$

- HABLAR UN POCO DE LA NECESIDAD DE ESTIMAR LOS PARAMETROS DE NEWTON EULER
- HABLAR DE COMO SE OBTUVO GAMMA SIM Y TETHA SIM
- HABLAR DE LA SIMPLIFICACION A PARAMETROS LI
- HABLAR DE LOS EXPERIMENTOS DE LOS SENOS
- HABLAR DE LA OPTIMIZACION Y ESTIMACION DE LOS PARAMETROS
- CONTRUCCION DEL MODELO A PARTIR DE LOS PARAMETROS
- COMPARATIVA ROBOT REAL Y MODELOS. CONCLUSIONES

4.1. Obtencion del modelo para estimar los parametros

4.2. Estimacion de parametros dinamicos

4.3. Calculos estadisticos

4.4. Analisis de resultados

5. Control Cinematico del robot

- HABLAR SOBRE QUE ES EL CONTROL CINEMATICO Y LAS MOVIDAS DE LOS GENERADORES DE TRAYECTORIAS

Una vez estudiado el análisis cinemático del modelo de brazo manipulador, y obtenidas las ecuaciones cinemáticas inversa y directa de este, se terminará de abordar el problema cinemático, al ser capaces de desarrollar el control sobre esta; para ello, se requiere poder generar trayectorias dentro del espacio articular, con tal de que el brazo manipulador pueda cumplir una ordenes de movimiento conocidas, en este caso dadas en un espacio cartesiano.

- TIPOS DE TRAYECTORIAS. COMO LA GENERAMOS

Visto esto, tenemos que conocer las consignas de movimiento, mejor vistas como condiciones de contorno o exigencias, que se le piden al robot; ejemplificado en este proyecto, el movimiento del efector final entre dos puntos del espacio cartesiano del robot, dado un tiempo limite para su realización.

- INTERPOLADORES DE TRAYECTORIAS

- IMPLEMENTACION, GRAFICAS Y CONCLUSIONES

5.1. Generador de trayectorias punto a punto

5.2. Generador de trayectorias lineal

5.3. Pruebas y conclusiones

Necesidad para el trabajo—>Ser capaces de que nuestro modelo de brazo manipulador ejecute ordenes de movimientos basados en trayectorias.

Como lo conseguimos—>Generar trayectorias de referencia en el espacio articular de nuestro modelo brazo manipulador, para conseguir

6. Control Dinámico del brazo

6.1. Obtencion del modelo lineal de las articulaciones del brazo

6.2. Diseño de controladores

6.3. FANTASIA VARIADA DE GIL

7. Anexos

7.1. Conclusiones (A LO MEJON SI A LO MEJON NO)

7.2. Codigos de programacion

7.3. Montajes en Simulink