

# Control y Programación de Robots

## 4º curso del Grado en Electrónica, Robótica y Mecatrónica

### Primera Parte: Trabajo de Control de Robots Manipuladores

#### Introducción

El objetivo de este trabajo dentro de la asignatura de Control y Programación de Robots es permitir al alumno poner en práctica los conocimientos teóricos adquiridos tanto en esta asignatura como en la asignatura Fundamentos de Robótica, a la vez que se familiariza con la herramienta de simulación de sistemas dinámicos MATLAB-Simulink.

#### Desarrollo del trabajo

Este trabajo trata los tres aspectos principales que componen los contenidos teóricos de la asignatura: análisis cinemático y análisis dinámico, estimación de parámetros y control de un robot manipulador.

Con objeto de personalizar el trabajo, cada alumno trabajará sobre un robot específico (*brazo*) que se le asigna, el cual consiste en una cadena cinemática abierta de tres grados de libertad. En el **apéndice A** pueden encontrarse la configuración del *brazo* que se empleará, así como algunos parámetros físicos que lo definen. La configuración particular que corresponde a cada grupo de alumnos puede encontrarse en el listado ubicado en el **apéndice B**. De este modo, cada grupo deberá desarrollar como mínimo los apartados que se describen, si bien, la calificación final del trabajo estará en relación con el volumen total del trabajo, valorándose todo el contenido de la asignatura que se haya aplicado al proyecto.

#### a) ANÁLISIS CINEMÁTICO Y DINÁMICO

1. Se calcularán las ecuaciones simbólicas del modelo cinemático directo e inverso que relacionan la posición del extremo del robot respecto a la base con las coordenadas articulares del mismo.
2. Se desarrollará un programa informático bajo *Matlab* utilizando cálculo simbólico para la obtención de las ecuaciones dinámicas del robot.

#### b) ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS DINÁMICOS DEL ROBOT

3. Partiendo del simulador del brazo proporcionado, el cual será considerado como robot real a partir de este punto, se añadirán elementos que simulen a medidas reales

de sensores. En concreto, se cuantizarán las medidas de posición a partir del número de pulsos por vuelta que se considere que va a tener el codificador de posición, y se añadirá un ruido aleatorio a la medida de la velocidad de un valor significativo del rango de dicha medida.

4. A partir de las pruebas que estime oportunas utilizando el robot real (incluido el sistema sensorial), se identificarán los parámetros dinámicos del mismo, realizando un análisis de fiabilidad de las estimaciones.
5. Con la estimación de dichos parámetros se creará un modelo estimado del robot, el cual será utilizado para la síntesis de los controladores.

### c) CONTROL CINEMÁTICO

6. Se desarrollará un *Generador de Trayectorias Cartesianas punto a punto* y se implementará en una función “.m” para ser utilizada en *Simulink*.

En el desarrollo del generador se tendrán en cuenta el *tiempo de inicio del movimiento*, la *duración* del mismo, así como las coordenadas iniciales ( $X_{ini}$ ,  $Y_{ini}$ ,  $Z_{ini}$ ) y finales ( $X_{fin}$ ,  $Y_{fin}$ ,  $Z_{fin}$ ) en el espacio de la tarea (que deberán estar incluidas dentro del espacio de trabajo del robot). Para este generador de trayectorias se utilizará un *interpolador trapezoidal*.

Se presentarán gráficas temporales de simulación que corroboren el correcto funcionamiento del generador de trayectorias.

7. Se desarrollará un *Generador de Trayectorias Cartesianas Lineal* (esto es, se pretenderá que el extremo del robot realice una línea recta en el espacio de la tarea) y se implementará en una función “.m” para ser utilizada en *Simulink*.

En el desarrollo del generador se tendrán en cuenta el *tiempo de inicio del movimiento*, la *duración* del mismo, las coordenadas iniciales ( $X_{ini}$ ,  $Y_{ini}$ ,  $Z_{ini}$ ) y finales ( $X_{fin}$ ,  $Y_{fin}$ ,  $Z_{fin}$ ) en el espacio de la tarea (que deberán estar incluidas dentro del espacio de trabajo del robot), así como el *número de puntos intermedios* para poder interpolar la trayectoria. Para este generador de trayectorias se podrán utilizar tanto *interpoladores polinómicos* como *perfiles trapezoidales de velocidad*, con las condiciones de contorno en velocidad en los puntos intermedios que se consideren oportunas.

Se presentarán gráficas temporales de simulación que corroboren el correcto funcionamiento del generador de trayectorias.

### D) CONTROL DINÁMICO

Para el desarrollo de este apartado del trabajo se considerarán simultáneamente dos configuraciones de las reductoras de los motores del robot: una correspondiente a la indicada en el apéndice A y otra considerando que el robot es de accionamiento directo.

8. Se diseñarán y se implementarán las estrategias de control propuestas en la asignatura (PD/PIDs articulares independientes, PD/PIDs con precompensación de gravedad, controladores con precompensación dinámica, y controladores por par calculado).

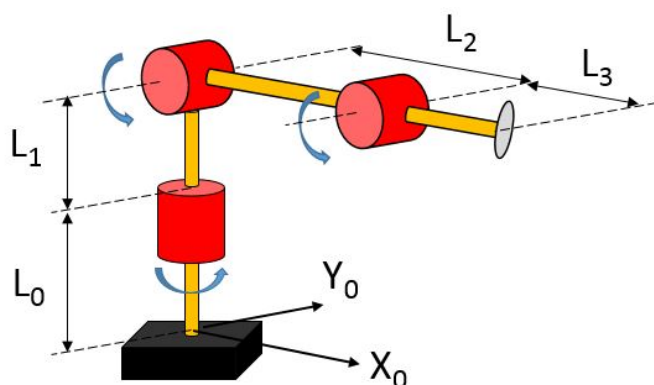
La implementación de los controladores se realizará en un archivo “.m”, simulando un controlador en tiempo discreto, que se ejecutará con un tiempo de muestreo apropiado.

9. Se realizarán pruebas de control utilizando los controladores dinámicos y el generador de trayectorias desarrollado en el apartado 9, y se presentarán resultados y conclusiones sobre el comportamiento proporcionado por los diversos controladores, atendiendo a las siguientes consideraciones:

- Factores de reducción de las articulaciones
- Incertidumbres del modelo (comparativas entre diseño con modelo perfecto y modelo estimado).
- Implementación de controladores en tiempo continuo/discreto
- Trayectorias deseadas
- ...

## APÉNDICE A.

### CONFIGURACIÓN DEL BRAZO



Function Block Parameters: R3GDL

Control y Programación de Robots (4 GIERM) (mask)

Robot de 3 grados de libertad RRR

Parameters

Nº de GRUPO

1

q1 inicial (rad)

0

q2 inicial (rad)

0

q3\_inicial (rad)

0

☐ Bloqueo q1

☐ Bloqueo q2

☐ Bloqueo q3

☐ Accionamiento directo

OK Cancel Help Apply

Parámetros Geométricos Brazos	$L_0$ (m)	$L_1$ (m)	$L_2$ (m)	$L_3$ (m)
Grupo 1	1.10	0.65	0.90	0.50
Grupo 2	1.05	0.50	0.80	0.50
Grupo 3	1.00	0.40	0.70	0.50
Grupo 4	0.95	0.40	0.60	0.55
Grupo 5	0.90	0.45	0.70	0.60
Grupo 6	0.85	0.45	0.60	0.50
Grupo 7	0.80	0.50	0.80	0.55
Grupo 8	0.75	0.50	0.90	0.60
Grupo 9	0.70	0.55	0.80	0.70
Grupo 10	0.65	0.55	0.90	0.75
Grupo 11	0.60	0.60	1.00	0.80
Grupo 12	0.55	0.60	1.10	0.70
Grupo 13	0.50	0.65	1.00	0.75
Grupo 14	0.45	0.65	1.10	0.80
Grupo 15	0.40	0.50	1.00	0.50
Grupo 16	0.45	0.50	1.10	0.60

<b>Grupo 17</b>	0.40	0.45	0.80	0.70
<b>Grupo 18</b>	0.35	0.50	0.75	0.65
<b>Grupo 19</b>	0.30	0.55	0.70	0.60
<b>Grupo 20</b>	0.25	0.60	0.65	0.55

**Notas:**

- Los eslabones se considerarán cuasi unifilares, con densidad lineal ( $\rho$  en kg/m) **no constante**, por lo que el centro de masas no tiene por qué estar en el centro geométrico de los mismos.
- Los factores de reducción de los motores (iguales para todos los grupos) son:  
 $R_1 = 50$ ,  $R_2 = 30$ , y  $R_3 = 15$
- Las constantes de par de los motores (iguales para todos los grupos) son:  
 $K_{t1} = 0.5 \text{ Nm/A}$ ,  $K_{t2} = 0.4 \text{ Nm/A}$ , y  $K_{t3} = 0.35 \text{ Nm/A}$ .
- El resto de parámetros dinámicos no especificados en la tabla anterior deben ser identificados, según se indica en enunciado del trabajo.

## **APÉNDICE B.**

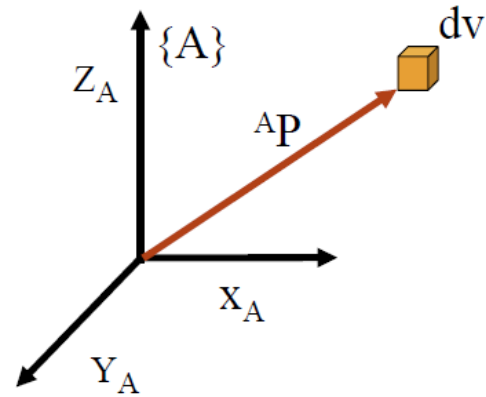
<b>Grupos</b>	<b>Alumnos</b>
1	WADE, ADBOULAYE ABOU GÓMEZ JIMÉNEZ, JAVIER ROSA DANTA, DANIEL
2	GILIBERT VALDÉS, ANA ISABEL CARRIZOSA RENDÓN, ÁLVARO MÁRQUEZ ARAQUE, JOSÉ
3	VAZ FERNÁNDEZ, FEDERICO ZAHÍNOS MARÍN, RAÚL CALVO MATOS, ÁLVARO
4	LÓPEZ PULIDO, MANUEL MARTÍNEZ CARRAL, BENITO UCEDA GALLEGOS, RAFAEL
5	PÉREZ MORALES, DAMIÁN JESÚS GIL GARCÍA, GUILLERMO MUÑOZ VELASCO, ÁLVARO
6	CASTILLO CAMPOS, ELENA CUERVA GUTIÉRREZ, JUAN MANUEL
7	CEJAS LAUREL, ANTONIO ROMERO FALCÓN, JOSÉ GARCÍA DOMÍNGUEZ, GUILLERMO
8	SOTO PAN, VICTORIA RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ, MARÍA HIDALGO MOREDA, ELISA
9	DÍAZ GARCÍA, PEDRO JOSÉ OLMO RUIZ, RAÚL
10	MOSCOSIO NAVARRO, EDUARDO MIGUEL RÍOS PÉREZ, MARIO ZARCO LÓPEZ, ANA
11	SÁNCHEZ ROMÁN, ALEJANDRO GIL GAMBOA, PEDRO SALINAS HERNÁNDEZ, JUAN
12	PARRA, KEVIN RIVERO, FRANCISCO REYES, JULIO
13	CASADO FAULÍ, ANA MARÍA LÓPEZ GONZÁLEZ DE QUEVEDO, MARTA JULIO GUTIÉRREZ JIMÉNEZ, PELAYO
14	CLAVIJO CALVO, DANIEL DE BAYAS DEL VALLE, ANTONIO MANUEL
15	LETRADO CASTELLANOS, ALEJANDRO ORTIZ RAMÍREZ, ISABEL KRYSTOF
16	CABRERA PÉREZ, PABLO
17	CHOZAS ROYO, JAIME GONZÁLEZ DE LA ROSA, VÍCTOR MORILLO CIUCIUMAN, RAÚL

## APÉNDICE C.

### Tensor de inercia

$${}^A I = \begin{pmatrix} I_{xx} & -P_{xy} & -P_{xz} \\ -P_{xy} & I_{yy} & -P_{yz} \\ -P_{xz} & -P_{yz} & I_{zz} \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} I_{xx} &= \iiint_V (y^2 + z^2) \rho dv & P_{xy} &= \iiint_V (xy) \rho dv \\ I_{yy} &= \iiint_V (x^2 + z^2) \rho dv & P_{xz} &= \iiint_V (xz) \rho dv \\ I_{zz} &= \iiint_V (x^2 + y^2) \rho dv & P_{yz} &= \iiint_V (yz) \rho dv \end{aligned}$$



### Teorema de Steiner (ejes paralelos)

$$I = I_{cdm} + m \left( \|r\|^2 I_{3 \times 3} - r \otimes r \right) = I_{cdm} + m \begin{pmatrix} r_y^2 + r_z^2 & -r_x r_y & -r_x r_z \\ -r_x r_y & r_x^2 + r_z^2 & -r_y r_z \\ -r_x r_z & -r_y r_z & r_x^2 + r_y^2 \end{pmatrix}$$

- $I_{cdm}$ : Tensor de Inercia en el centro de masas del cuerpo.
- $I$ : Tensor de Inercia en un punto genérico con una posición  $r = (r_x \ r_y \ r_z)^T$  respecto a la posición del centro de masas del cuerpo, y respecto a unos ejes paralelos a los considerados en el tensor  $I_{cdm}$ .
- $m$ : masa del cuerpo
- $I_{3 \times 3}$ : Matriz identidad

### Rotación del Tensor de Inercia

Sean dos marcos de referencia, A y B, con orígenes coincidentes pero con distinta orientación. Sea  ${}^A R_B$  la matriz de rotación que relaciona ambos marcos, de manera que cualquier vector X respecto a B pueda expresarse respecto a A mediante la relación:

$${}^A X = {}^A R_B {}^B X$$

Si  ${}^A I$  es el tensor de inercia de un cuerpo respecto al marco de referencia A, e  ${}^B I$  es el tensor de inercia del mismo cuerpo respecto al marco B, entonces se cumple la siguiente relación entre ambos tensores:

$${}^A I = {}^A R_B {}^B I {}^A R_B^T$$