

# **Fundamentos de Robótica**

## **Tercer curso del Grado en Ingeniería Electrónica Robótica y Mecatrónica**

### **Trabajo de Curso**

#### **1. Introducción**

El objetivo de este trabajo dentro de la asignatura de Robótica es permitir al alumno poner en práctica los conocimientos teóricos adquiridos en la misma, a la vez que se familiariza con la herramienta de simulación de sistemas dinámicos MATLAB-Simulink.

#### **2. Desarrollo del trabajo**

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

Con objeto de personalizar el trabajo, cada alumno trabajará sobre un robot específico. Siga el siguiente enlace para conocer el robot que le ha correspondido.

<https://asignatura.us.es/infogierm/trabajoCurso21-22/trabajoCurso.html>

Introduzca su número de DNI (sin letra) para acceder. Si tiene algún problema para identificarse en el sistema, envíe un email a [vivas@us.es](mailto:vivas@us.es) indicando su incidencia.

El enlace le proporciona la configuración articular, así como los parámetros cinemáticos y dinámicos de un robot de 6 grados de libertad con el que deberá trabajar los apartados que a continuación se relacionan.

#### **3. Entrega del trabajo**

La entrega del trabajo se realizará a través de enseñanza virtual. Se habilitará una actividad de entrega en la que deberá entregar un fichero comprimido en formato .zip con los siguientes ficheros:

- a. **Memoria explicativa** en formato pdf donde desarrolle el procedimiento empleado para obtener la solución a cada uno de los apartados, así como los esquemas, gráficas y resultados que considere oportunos.
- b. **Ficheros para verificación numérica** de resultados: Cada apartado lleva asociado uno o varios ficheros de MATLAB que deberá completar y entregar según se indique. Puede encontrarlos en el fichero comprimido `ficherosVerificacion.zip` en el enlace anterior. En la sección 5 se describen los apartados a desarrollar y se indican los ficheros de verificación

correspondiente (en color azul). Siga las indicaciones adjuntas en cada fichero como comentarios.

**IMPORTANTE:** antes de entregar los ficheros de verificación **debe validar su contenido** tal como se describe en la sección 6.

#### 4. Plazo de entrega

Para aprobar la asignatura es obligatorio desarrollar y entregar el trabajo en los plazos establecidos. Las fechas de entrega para el curso 2021/22 son:

- Primera convocatoria: 16 de junio de 2022
- Segunda convocatoria: 14 de septiembre de 2022
- Tercera convocatoria: 21 de noviembre de 2022

#### 5. Apartados a desarrollar

Deberán desarrollarse como mínimo los apartados que se describen a continuación, si bien, la calificación final del trabajo estará en relación con el volumen y calidad de contenidos entregados.

##### A) ANÁLISIS CINEMÁTICO

1. Calcular la tabla del manipulador completo (6 grados de libertad) según las reglas de Denavit-Hartenberg. Deberá dibujar los ejes correspondientes sobre un esquema del robot y entregarlo como parte de la memoria explicativa.

Complete la tabla Denavit-Hartenberg en el fichero de verificación numérica [tablaDH.m](#).

- Para cada grado de libertad, complete el valor de los parámetros correspondientes  $\theta_i$ ,  $d_i$ ,  $a_i$ ,  $\alpha_i$ .
  - Emplee expresiones simbólicas L0, L1, L2A, etc para las longitudes y valores en radianes para los ángulos (por ejemplo  $\pi/2$ ). Use el texto  $\pi$  en mayúsculas para referirse al valor  $\pi$  radianes.
  - Aquellos parámetros que se correspondan con grados de libertad deberán indicarse con la variable articular correspondiente,  $q_1$ ,  $q_2$ , etc. Por ejemplo, si la articulación 2 es prismática y tiene un offset de valor L2 se indicará como  $d_2 = q_2 + L2$
2. Calcular explícitamente de forma simbólica las matrices de transformación homogéneas correspondientes a cada par de articulaciones consecutivas, desde la base al extremo del robot para el robot completo (6 grados de libertad).

Complete la tabla Denavit-Hartenberg en el fichero de verificación numérica [matricesTH.m](#). Las matrices deben incluir los offsets correspondientes en la

variables articulares,  $q_1$ ,  $q_2$ ,  $q_3$ . Es decir, al sustituir todas las variables articulares por 0 (posición HOME), la configuración cinemática que representan las matrices de transformación homogénea debe corresponder exactamente a la figura del robot que le corresponda.

3. Calcular las ecuaciones del modelo cinemático directo. Para este apartado trabajará con el robot reducido **considerando solo los tres primeros grados de libertad**<sup>1</sup>.

Complete las expresiones de los siguientes ficheros de verificación:

- **cinematicaDirectaSimbolica.m**, consignando las **expresiones simbólicas** de posición (x,y,z). No es necesario obtener la orientación de modo simbólico.  
No sustituya los valores de L0, L1, etc en las expresiones. Déjelas en forma simbólica.
- **cinematicaDirecta.m**, consignando las **expresiones numéricas** de posición y orientación del extremo del eslabón 3 de su robot. Para la orientación, deberán obtener los ángulos Euler ( $\phi$ ,  $\theta$ ,  $\psi$ ) según el convenio ZYZ del marco de referencia 3 respecto a la base. Consulte este [enlace](#) para una aclaración respecto a los ángulos de Euler considerados.

Esta función debe devolver por tanto dos vectores numéricos, posición (x,y,z) y orientación ( $\phi$ ,  $\theta$ ,  $\psi$ ), cuando recibe de entrada un vector también numérico con las tres coordenadas articulares,  $q_1$ ,  $q_2$  y  $q_3$ .

En ambas funciones, igual que en el apartado anterior, las expresiones deben incluir los offsets correspondientes en las variables articulares,  $q_1$ ,  $q_2$ ,  $q_3$ .

4. Utilizando el método que desee, resolver el problema cinemático inverso del manipulador **considerando solo los tres primeros grados de libertad**, para obtener las expresiones analíticas del mismo.

Debe obtener **todas las soluciones matemáticamente posibles** del problema cinemático inverso

Complete las expresiones de los siguientes ficheros de verificación:

- **cinematicaInversaSimbolica.m**, consignando las expresiones simbólicas para las coordenadas articulares considerando como entrada la posición del extremo de la articulación 3, (x,y,z).
- **cinematicaInversa.m**, consignando las expresiones numéricas para las coordenadas articulares considerando como entrada la posición del extremo de la articulación 3, (x,y,z).

---

<sup>1</sup> Tenga en cuenta que al considerar solo las tres primeras articulaciones, es posible que tenga que modificar el marco de referencia 3 para adaptarlo al convenio de asignación de marcos de referencia de Denavit-Hartenberg.

En ambos casos, si el problema cinemático tiene varias soluciones, los ficheros de verificación devolverán una matriz de modo que cada columna represente una posible solución para los valores de entrada.

5. Aprovechando el resultado anterior, dibujar las trayectorias de las articulaciones cuando el extremo del eslabón tres del robot describe una trayectoria circular en el plano cartesiano X-Y (puede seleccionarla libremente para que dicha trayectoria esté enteramente contenida en el espacio de trabajo del robot que le ha sido asignado).

Complete el siguiente fichero de verificación:

**trayectoriaCircular.m**, que debe generar los vectores  $x, y, z$  con las coordenadas cartesianas de los puntos de la trayectoria (debe tomar al menos 72 puntos equiespaciados), así como las correspondientes coordenada articulares. Por ejemplo, si se toman 72 puntos en la trayectoria circular, estos estarán situados en las coordenadas  $x(i), y(i), z(i)$  con  $i$  entre 1 y 72. Del mismo modo,  $q1(i), q2(i), q3(i)$  representarán las correspondientes coordenadas articulares para cada uno de esos puntos.

6. Calcular los *Jacobianos directos e inversos de velocidades* lineales y realizar un estudio de las posibles singularidades que tenga el brazo manipulador. Se **considerarán solo los tres primeros grados de libertad.**

Complete el siguiente fichero de verificación:

**jacobiano.m**, que debe generar y devolver las matrices jacobianas directa e inversa en modo exclusivamente simbólico.

## B) ANÁLISIS DINÁMICO

1. Emplee el método que estime oportuno para obtener las ecuaciones de la dinámica inversa del robot considerando solo los tres primeros grados de libertad. Para el cálculo de las inercias se considerará que todos los eslabones son macizos, con geometría cilíndrica y de densidad constante igual a la asignada para su robot.

Complete los siguientes ficheros de verificación:

- **parametrosDinamicos.m**, que debe calcular las posiciones de los centros de gravedad de cada enlace, así como los tensores de inercia asociados, ambos referidos al marco de referencia local.
- **ModeloDinamico\_R3GDL.m**, que implementará las ecuaciones de la dinámica inversa del robot. Las ecuaciones serán de tipo numérico y deberán proporcionar las aceleraciones articulares en función de las posiciones y velocidades articulares, y los pares articulares generalizados.
- Adjunte también el fichero de cálculo de las ecuaciones dinámicas empleado, según se explica en las clases teóricas; bien el fichero **NE\_3GDL.m** o **L\_R3GDL.m**, en función del método de resolución elegido.

2. Crear un *simulador de la dinámica del robot* de 3 grados de libertad, implementado dichas ecuaciones en un archivo “.m” de *Simulink* e integrándolas convenientemente. Adjunte el fichero obtenido como parte de los ficheros de entrega.
3. Corroborar el correcto funcionamiento del simulador realizando comparativas apropiadas con los resultados obtenidos con el modelo de referencia *ModeloDinamico\_R3GDL\_Proof.p* proporcionado para su robot. Para ello, aplicar los mismos pares generalizados (aleatorios pero de magnitudes que no provoquen grandes aceleraciones iniciales) a ambos simuladores y representar conjuntamente las respuestas temporales tanto de las posiciones, como de las velocidades y aceleraciones articulares proporcionadas por ambos simuladores.

### C) CONTROL CINEMÁTICO

1. Probar el generador de trayectorias proporcionado en clase con los modelos cinemáticos directo e inverso desarrollados en los apartados A3 y A4, y representar gráficamente las trayectorias generadas.

### D) CONTROL DINÁMICO

1. Diseñe e implemente un controlador PD descentralizado para el robot de 3 grados de libertad.
2. Diseñe e implemente un controlador PID descentralizado para el robot de 3 grados de libertad.
3. Diseñe e implemente un controlador por Par Calculado para el robot de 3 grados de libertad.
4. Muestre los resultados de simulación con el robot asignado, obtenidos al implementar el controlador en *Simulink* con el modelo desarrollado en el apartado B.2. Para ello se generará una trayectoria de referencia para las articulaciones de manera que parta desde la posición de HOME del robot, y que termine en un punto situado en un **incremento** de coordenadas cartesianas  $(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z) = (-0.15, -0.15, 0.15)$  metros.

Se analizarán los resultados obtenidos para distintas velocidades de movimiento, y se realizará un resumen de conclusiones.

**Adjunte todos los ficheros de MATLAB necesarios para reproducir los resultados mostrados en este apartado.**

## 6. Verificación de los ficheros de MATLAB generados

Para comprobar que los ficheros de MATLAB que ha generado en el desarrollo del trabajo son sintácticamente correctos, se proporciona una herramienta de comprobación. Para usarla, ejecute el fichero de nombre `verificador.p` que se acompaña en el fichero comprimido.

Para ejecutarlo, escriba simplemente `verificador` en la ventana de comandos. El fichero `verificador` debe estar en la misma carpeta que los ficheros a comprobar.

La verificación es simplemente sintáctica, es decir, se comprueba que los ficheros pueden ejecutarse correctamente en MATLAB, pero no comprueba que los resultados generados sean correctos. **Si entrega ficheros sin verificar, aquellos que presenten errores no serán evaluados y el apartado asociado será puntuado como 0.**