

Fundamentos de Robótica

Tercer curso del Grado en Ingeniería Electrónica Robótica y Mecatrónica

Trabajo de Curso 2024/25

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/trabajoCurso24-25/trabajoCurso.html>

Introduzca su número de DNI (sin letra) para acceder. Si su identificación contiene números y letras, elimine las letras e introduzca solo el número resultante (Por ejemplo, si su identificación es A34G453, deberá usar 34453 como identificador). Si tiene algún problema para identificarse en el sistema, envíe un email a 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:

- 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.
- 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 correspondientes (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 dependiendo de la convocatoria

Primera convocatoria

Se realizarán dos entregas parciales: La primera correspondiente al Apartado A (Análisis cinemático) y la segunda correspondiente a los Apartados B, C y D (Análisis dinámico). Las fechas son:

- Primera entrega parcial: 31 de marzo 2025
- Segunda entrega parcial: 1 de junio 2025

Segunda convocatoria

- Fecha de entrega: 1 de julio de 2025

Tercera convocatoria

- Fecha de entrega: día antes del examen de 3ª Convocatoria (por determinar)

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 θ_i , d_i , a_i , α_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 π radianes.
- Aquellos parámetros que se correspondan con grados de libertad deberán indicarse con la variable articular correspondiente, q1, q2, etc. Por ejemplo,

si la articulación 2 es prismática y tiene un offset de valor L2 se indicará como $d_2 = q_2 + L_2$

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 las variables articulares, q_1 , q_2 , etc. 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**¹.

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. No sustituya los parámetros geométricos 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. En esta ocasión si debe calcular la orientación, expresándola mediante los ángulos Euler (ϕ , θ , ψ) según el convenio ZXZ del marco de referencia 3 respecto a la base. Consulte este [enlace](#) para una aclaración respecto a los ángulos de Euler considerados. Las expresiones serán ahora numéricas y si debe sustituir los parámetros geométricos L0, L1, etc por sus valores particulares.

Esta función debe devolver por tanto dos vectores numéricos, posición (x,y,z) y orientación (ϕ , θ , ψ), 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 considere más apropiado, resolver el problema cinemático inverso del manipulador **considerando solo los tres primeros grados de libertad**, para obtener las expresiones analíticas del mismo.

¹ 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.

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) . No sustituya los parámetros geométricos $L0$, $L1$, etc en las expresiones, déjelas en forma simbólica
- **cinematicaInversa.m**, consignando las expresiones numéricas para las coordenadas articulares considerando como entrada la posición del extremo de la articulación 3, (x,y,z) y como salida las coordenadas articulares $q=[q1,q2,q3]'$.

Debe obtener **todas las soluciones matemáticamente posibles** del problema cinemático inverso. Si el problema cinemático tiene varias soluciones, se devolverá una matriz de modo que cada columna represente una posible solución diferente para los valores de entrada. En caso de no existir solución se devolverá una variable lógica **fueraRango** con valor Verdadero (true) y $q=[0;0;0]$ (Ver comentarios en fichero MATLAB).

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 seleccionar libremente el radio y centro para que dicha trayectoria esté enteramente contenida en el espacio de trabajo del robot que le ha sido asignado).

Complete el 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 coordenadas 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 directo e inverso de velocidades* lineales Se **considerarán solo los tres primeros grados de libertad.**

Realice un estudio de los posibles puntos singulares que tenga el brazo manipulador. Seleccione una configuración singular que considere significativa y explique qué restricciones de movimiento impone dicha configuración.

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. Diseño de controladores

Para el robot de 3 grados de libertad diseñe:

- Controlador PD descentralizado.
- Controlador PD descentralizado con compensación de gravedad
- Controlador PID descentralizado
- Controlador de par calculado

2. Simulación de controladores

Muestre los resultados de simulación de los controladores anteriores al implementarlos en *Simulink* con el modelo desarrollado en el apartado B.2. Para ello se generará una trayectoria de referencia rectilínea en cartesianas. La trayectoria tendrá por origen el punto en cartesianas correspondiente a la posición HOME, y como destino el punto en cartesiana correspondiente a un incremento en coordenadas articulares de valor $(\Delta q_1, \Delta q_2, \Delta q_3) = (0.5, 0.5, 0.5)$. El movimiento completo deberá durar 1 segundo.

3. Análisis de robustez

Repita las simulaciones del apartado anterior considerando que el efector final transporta una carga consistente en un cubo de 20cm de lado y una masa total de 30Kg. El centro de gravedad de dicho cubo se sitúe en el origen del marco de referencia 3 y sus aristas son paralelas a los ejes del marco de referencia. Modifique el modelo de simulación según sea necesario y discuta los resultado de manera comparada con los del apartado anterior.

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.**