Universidad de Ingeniería y Tecnología

FUNDAMENTOS DE ROBÓTICA

Prof. Oscar E. Ramos Ponce

Guía de Laboratorio 5:

Control Cinemático de Orientación

Lima - Perú

2017 - 1

Laboratorio 5: Control Cinemático de Orientación

1. Objetivos

- Controlar la orientación del efector final de un robot manipulador usando cuaterniones y cinemática diferencial.
- Controlar cinemáticamente la trayectoria de un robot móvil con configuración diferencial en lazo abierto y cerrado.

2. Control Cinemático de Orientación

La complejidad del control de orientación consiste en la definición del error para el caso de la orientación: no es posible realizar una simple resta entre matrices de rotación (como se haría con las posiciones). Una posible solución consiste en utilizar ángulos de Euler o roll, pitch, yaw pero esta alternativa presenta problemas cerca de las singularidades de la configuración. Una mejor alternativa consiste en definir el error a partir del eje/ángulo de la matriz $R^T R_d$, donde R es la matriz de rotación actual, y R_d es la deseada.

De manera alternativa, se puede definir el error de orientación en términos de cuaterniones. Considérese que $Q_d = (w_d, \boldsymbol{\epsilon}_d)$ es el cuaternión deseado para el efector final, y $Q = (w, \boldsymbol{\epsilon})$ es el cuaternión actual del efector final, donde w es la parte escalar y $\boldsymbol{\epsilon}$ la parte vectorial. El error entre ambos cuaterniones queda descrito por $Q_e = Q_d Q^{-1}$. Cuando ambos cuaterniones son iguales, el error es nulo y se tiene la identidad $Q_e = [1\ 0\ 0\ 0]^T$. Por este motivo, el error se define como la desviación de esta identidad deseable. El cuaternión de error Q_e, usando la definición de producto de cuaterniones, se puede escribir como

$$\begin{aligned} Q_e &= (w_d, \boldsymbol{\epsilon}_d)(w, -\boldsymbol{\epsilon}) \\ &= (w_d w + \boldsymbol{\epsilon}_d^T \boldsymbol{\epsilon},\ \ -w_d \boldsymbol{\epsilon} + w \boldsymbol{\epsilon}_d - \boldsymbol{\epsilon}_d \times \boldsymbol{\epsilon}) \\ &= (w_e, \boldsymbol{\epsilon}_e). \end{aligned}$$

Se define el error de orientación e_o con respecto a la identidad del cuaternión como

$$\boldsymbol{e}_o = \begin{bmatrix} w_e - 1 \\ \boldsymbol{\epsilon}_e \end{bmatrix}. \tag{1}$$

Para controlar tanto la posición como la orientación, se define el error de posición y orientación como

$$\boldsymbol{e} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{x} - \boldsymbol{x}_d \\ \boldsymbol{e}_o \end{bmatrix} \tag{2}$$

2.1. Control Cinemático

En resumen, el procedimiento para el control cinemático consiste en primero calcular la velocidad articular con

$$\dot{\boldsymbol{q}} = J^{\#}\dot{\boldsymbol{e}} \tag{3}$$

donde $J^{\#}$ representa la pseudo-inversa de Moore-Penrose o la pseudoinversa amortiguada, en el caso de haber configuraciones singulares. La referencia que se utiliza es

$$\dot{\boldsymbol{e}}^{*} = -k\boldsymbol{e} \tag{4}$$

donde el error está definido como en (2) y k es una constante. La velocidad articular es integrada usando una integración de Euler tal y como se realizó en el laboratorio anterior.

2.2. Jacobiano Analítico

Para el caso considerado aquí, la posición está dada en coordenadas Cartesianas $\boldsymbol{x} = [x \;\; y \;\; z]^T$ y la orientación está dada por un cuaternión $Q = [w \;\; \epsilon_x \;\; \epsilon_y \;\; \epsilon_z]^T$. El Jacobiano analítico con respecto a las derivadas temporales de estos elementos, para un robot con n grados de libertad está dado por

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial q_1} & \frac{\partial x}{\partial q_2} & \cdots & \frac{\partial x}{\partial q_n} \\ \frac{\partial y}{\partial q_1} & \frac{\partial y}{\partial q_2} & \cdots & \frac{\partial y}{\partial q_n} \\ \frac{\partial z}{\partial q_1} & \frac{\partial z}{\partial q_2} & \cdots & \frac{\partial z}{\partial q_n} \\ \frac{\partial w}{\partial q_1} & \frac{\partial w}{\partial q_2} & \cdots & \frac{\partial w}{\partial q_n} \\ \frac{\partial \epsilon_x}{\partial q_1} & \frac{\partial \epsilon_x}{\partial q_2} & \cdots & \frac{\partial \epsilon_x}{\partial q_n} \\ \frac{\partial \epsilon_y}{\partial q_1} & \frac{\partial \epsilon_y}{\partial q_2} & \cdots & \frac{\partial \epsilon_y}{\partial q_n} \\ \frac{\partial \epsilon_z}{\partial q_1} & \frac{\partial \epsilon_z}{\partial q_2} & \cdots & \frac{\partial \epsilon_z}{\partial q_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \boldsymbol{x}}{\partial q_1} & \frac{\partial \boldsymbol{x}}{\partial q_2} & \cdots & \frac{\partial \boldsymbol{x}}{\partial q_n} \\ \frac{\partial Q}{\partial q_1} & \frac{\partial Q}{\partial q_2} & \cdots & \frac{\partial Q}{\partial q_n} \end{bmatrix} \tag{5}$$

donde cada elemento puede calcularse mediante diferencias finitas. Por ejemplo, la primera columna puede calcularse como:

$$\frac{\partial \boldsymbol{x}}{\partial q_1} \approx \frac{\boldsymbol{x}(\boldsymbol{q} + \delta q_1) - \boldsymbol{x}(\boldsymbol{q})}{\delta q_1} \qquad \text{y} \qquad \frac{\partial Q}{\partial q_1} \approx \frac{Q(\boldsymbol{q} + \delta q_1) - Q(\boldsymbol{q})}{\delta q_1} \tag{6}$$

donde $\boldsymbol{x}(\boldsymbol{q})$ es la posición en función de las variables articulares, $Q(\boldsymbol{q})$ es el cuaternión en función de las variables articulares, y δq_1 es un pequeño incremento en la articulación 1. Notar que $\boldsymbol{x}(\boldsymbol{q})$ puede obtenerse a partir de la cuarta columna de la matriz de transformación homogénea que relaciona al efector final con respecto a la base. De igual modo, el cuaternión se puede obtener convirtiendo la parte rotacional de la matriz de transformación homogénea a cuaternión.

2.3. Implementación

Descargar el archivo `lab5_manip.zip`, descomprimirlo y copiar la carpeta `lab5` dentro de la carpeta `src` que se encuentra en el espacio de trabajo `lab_ws`. La carpeta `lab5` es ya un paquete y posee algunos archivos que serán usados y/o modificados en los pasos posteriores.

Para la implementación del control de orientación se seguirá un procedimiento similar al usado en el laboratorio anterior. Se utilizará cuaterniones y el error definido para los cuaterniones descrito anteriormente. La cinemática directa del robot IIWA ya se encuentra implementada.

Tareas.

1. ¿Cuál es el tamaño del Jacobiano de posición y orientación en este caso, considerando que la posición se da en coordenadas Cartesianas, la orientación en cuaternión y que el robot tiene 7 grados de libertad?

2. Implementar el Jacobiano de posición y orientación en una función que tenga el nombre `iiwa_jacobian`. Dicha función se debe completar en el archivo `functions.py`. Copiar en el reporte, la función implementada.

3. Completar el archivo `iiwa_pose` para implementar la el control cinemático de posición y orientación usando cuaterniones. Esta implementación debe usar la pseudoinversa de Moore-Penrose solamente cuando el sistema no se encuentra en singularidad cinemática. De lo contrario se usará la pseudoinversa amortiguada. Para probar el programa, lanzar `display_iiwa.launch` y luego ejecutar `iiwa_pose`.

4. Para 3 valores diferentes de k ($k = 0{,}5$, $k = 1{,}0$, $k = 2{,}0$), realizar las siguientes gráficas de los resultados: i) posición actual y deseada en función del tiempo, ii) orientación actual y deseada en función del tiempo, iii) posición actual y deseada en el espacio Cartesiano, iv) evolución temporal de las 7 articulaciones en un mismo gráfico. Comentar los resultados obtenidos.

5. Dar 4 valores diferentes de posición y orientación. Realizar una captura de pantalla de cada resultado final.

6. Modificar la referencia de tal modo que el efector final siga una circunferencia en x, y de radio $\sqrt{0{,}2}$ y con altura $z = 0{,}8$ manteniendo en todo momento la misma orientación (definida por defecto en la parte 4). Realizar algunas capturas de pantalla y realizar los siguientes gráficos: i) la trayectoria deseada y obtenida en el espacio Cartesiano, ii) Orientación deseada y obtenida en función del tiempo, iii) evolución de las articulaciones en función del tiempo.

7. En la parte 6, comparar la evolución de las articulaciones con el máximo valor que pueden alcanzar las mismas. ¿En algún momento se sobrepasa los límites articulares? ¿El movimiento obtenido sería implementable en un robot real? ¿Existen otros tipos de problemas? Comentar al respecto, y de no ser posible, brindar alternativas.

8. Realizar la misma trayectoria circular definida anteriormente, pero ahora modificar la orientación de tal modo que el eje y del efector final forme siempre 45 grados con la horizontal y eje z se siempre tangente a la circunferencia. Para este caso puede ser más fácil determinar la orientación deseada usando matrices de rotación. La función `mat2quat` convierte una matriz de rotación en un cuaternión y puede ser útil. Grabar algunas capturas de pantalla y graficar la orientación deseada con la obtenida en función del tiempo.

3. Conclusiones

Elaborar algunas conclusiones sobre el laboratorio desarrollado e indicarlas en el informe del laboratorio.