机械臂仿真实验报告

何滨 3170101284

实验一 正逆运动学仿真实验

一、实验目的

1、巩固正逆运动学基础概念。

2、了解正逆运动学在机械臂控制中的实际用途

二、实验内容

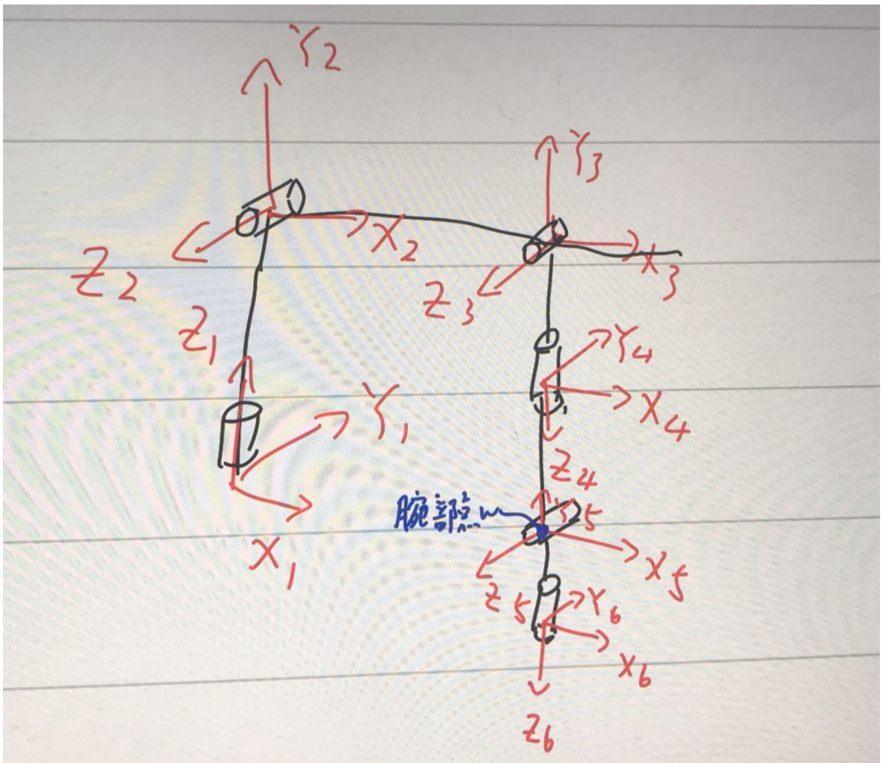
1、机械臂模型DH参数的计算

2、机械臂正运动学的计算

3、机械臂逆运动学的计算

三、实验原理与公式

1、由于gazebo仿真初始位置的机械臂位置不符合MDH的建系标准，因此根据机械臂结构重新自己建系(下图一)，并得到其DH参数(下图二)



i	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i
1	0	0	0	θ_1
2	90°	0	0	θ_2
3	0	0.225	0	θ_3
4	90°	0	0.252	θ_4
5	-90°	0	0	θ_5
6	90°	0	0.055	θ_6

由于这种建系方法，将第一轴和第二轴之间的偏置去除了，所以在实际利用正逆运动学进行计算时，需要加或减第一轴与第二轴之间的偏置距离0.284

2、**建立该机械臂的正运动学方程：**两连杆之间的变化矩阵${}^{i-1}_{i}T$的一般表达式为：

$$
{}^{i-1}_{\quad i}T = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s\theta_i c\alpha_{i-1} & c\theta_i c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1}d_i \\ s\theta_i s\alpha_{i-1} & c\theta_i s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1}d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
$$

将上述机械臂连杆的$D-H$参数带入上述相邻连杆的变化矩阵，并由传递公式有：

$$
{}^0_6T = {}^0_1T\,{}^1_2T\,{}^2_3T\,{}^3_4T\,{}^4_5T\,{}^5_6T
$$

由于建系的原因： $T(3,4) = T(3,4) + 0.284$

即可得到最终的末端位姿表达T.

3、**计算该机械臂的逆运动学方程：**由于给定的机械臂末端坐标是根据世界坐标系(固定坐标系)给出，故而结合已知的机械臂末端位置向量P，可以得到机械臂末端的变换矩阵为：

$$
R = Rot(Z,\theta)Rot(Y,\alpha)Rot(X,\beta)
$$
$$
T = \begin{bmatrix} R & P \\ 0 & I \end{bmatrix}
$$

由上述变化矩阵求出机械臂腕部坐标系坐标为：

$$
\begin{aligned}
x_{wrist} &= p_x + R(1,3)d_6 \\
y_{wrist} &= p_y + R(2,3)d_6 \\
z_{wrist} &= p_z + R(3,3)d_6
\end{aligned}
$$

首先，计算机械臂前三轴的关节角，腕部坐标系坐标的yaw角仅由连杆1提供

$$
\theta_1 = Atan2(y_{wrist}, x_{wrist})
$$
$$
s\theta_3 = \frac{\frac{y_{wrist}^2}{s\theta_1{}^2} + (z_{wrist} - 0.284)^2 - 0.1031}{0.1031}
$$
$$
c\theta_3 = \sqrt{1 - s\theta_3{}^2} \quad , \quad \theta_3 = Atan2(s\theta_3, c\theta_3)
$$
$$
k_1 = 0.229 \times c\theta_3 \quad , \quad k_2 = 0.225 + 0.229 \times s\theta_3
$$

由几何关系可得：

$$
\theta_2 = Atan2(y_{wrist}, s\theta_1(0.284 - w_{wrist})) - Atan2(k_2, k_1)
$$

由于θ_2有小于-90°和大于90°两种情况，当$\theta_2 \leq -90^{\circ}$时，$\theta_2 = \theta_2 + 90^{\circ}$

至此，前三轴的关节角已经解算完毕，根据求取$Z-Y-Z$欧拉角的方法可得:

$$
{}^3_6R = {}^0_3R^{-1}\,{}^0_6R = {}^3_6R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}
$$

$$
\theta_6 = Atan2(-r_{22}, r_{21})
$$

$$
\theta_4 = Atan2(r_{33}, r_{13})
$$

$$
\theta_5 = Atan2(\frac{r_{13}}{c\theta_4}, -r_{23}) + \pi/2
$$

四、实验步骤

1、根据上述给出的正运动学方程，利用Eigen库的矩阵运算功能列写正运动学转换程序，并带入以下三组关节角度计算对应的末端位姿，并通过位置控制使机器人运动到相应位置，将实际末端位置与你的计算值比较，求出绝对误差。由于上述建系方法与gazebo中实际的机器人坐标系不同，上述建系在gazebo中机械臂坐标系中关节角初始位置为[0, 90°, 0, 0, -90°, 0]

第一组：[0.927, -0.687, -0.396, 0, 1.083, 0.927]

第二组：[0.322, -0.855, -0.021, 0, 0.877, 0.322]

第三组：[-0.322, -0.636, -0.011, 0, 0.647, -0.322]

2、根据上述列写的逆运动学解算思路编写程序，带入一下三组末端位姿计算出对应的关节角度，并将逆运动学解算程序得到的关节角发布到相应的rostopic使得机器人运动到相应的位置，将实际末端位置与所给出的值进行比较，计算绝对误差

第一组：[0.2, 0.2, 0.2007,1.57, -1.57, 0]

第二组：[0.15 ,0.2, 0.2007, 0, 0, 0]

第三组：[0.3 ,0, 0.122, 1.57, 0, 0]

五、实验结果分析：

1、**计算正运动学解算绝对误差：**首先，定义绝对误差为运动学解算得到的末端位置与gazebo中机械臂末端实际运动到的位置的欧式距离：

第一组：$\delta = \sqrt{(0.150047-0.150035)^2+(0.199994-0.199922)^2+(0.20076-0.200783)^2} = 0.000077$

第二组：$\delta = \sqrt{(0.300121-0.300094)^2+(0.100124-0.100114)^2+(0.2008118-0.200833)^2} = 0.000031$

第三组：$\delta = \sqrt{(0.300029-0.299995)^2+(-0.100093+0.100083)^2+(-0.2720277-0.272040)^2} = 0.000037$

2、**计算逆运动学解算绝对误差：**定义绝对误差为逆运动学解算得到的关节发布后，控制gazebo中机械臂实际到达的位置与题目中给定的位置之间的欧氏距离：

第一组：$\delta = \sqrt{(0.2-0.199957)^2+(0.2-0.199950)^2+(0.2007-0.200793)^2} = 0.0011$

第二组：$\delta = \sqrt{(0.15-0.149953)^2+(0.2-0.199901)^2+(0.2007-0.200786)^2} = 0.00014$

第三组：$\delta = \sqrt{(0.3-0.299932)^2+(0+0.000001)^2+(0.122-0.122134)^2} = 0.00015$

3、**姿态之间的差距：**定义姿态之间的误差直接为相应roll、pitch、yaw各自的差值

正运动学姿态：

$$\text{第一组：}\quad \delta = 1.570801 - \pi/2 = -0.0000047$$
$$\text{第二组：}\quad \delta = 1.571116 - \pi/2 = -0.00031$$
$$\text{第三组：}\quad \delta = 1.570801 - \pi/2 = -0.0000047$$

逆运动学姿态：

$$\text{第一组：}\quad \delta_{roll} = 1.570801 - \pi/2 = -0.0053 \quad \delta_{pitch} = -1.570024 + \pi/2 = 0.00077$$
$$\text{第二组：}\quad \delta = 0.000774$$
$$\text{第三组：}\quad \delta = 1.570801 - \pi/2 = -0.0000047$$

具体运行情景图片，请见lab_1文件夹中相应的图片

实验二 速度传递仿真实验

一、实验目的

1、掌握雅可比矩阵的计算方法

2、掌握通过雅可比矩阵反解关节速度的方法

3、掌握实时刷新机械臂关节速度的方法

二、实验内容

1、编写计算雅可比矩阵的代码

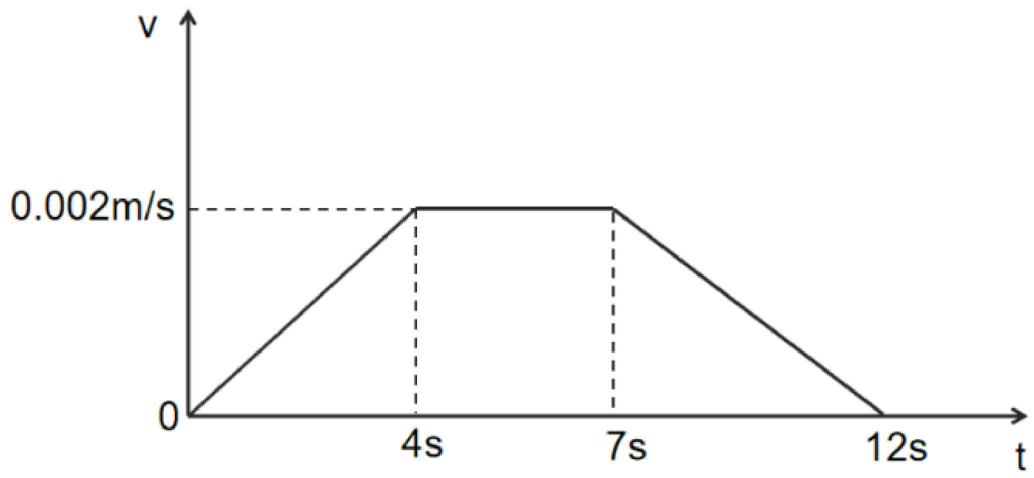
2、实现机械臂末端运动速度的控制

三、实验原理与公式

Jacobian矩阵是关节空间的微分变化（速度变化）与目标空间（速度变化）之间的关系，故而关节空间下的关节速度与笛卡尔空间下机械臂的末端速度可以同过Jacobian矩阵$J(\theta)$建立起联系，公式如下：

$$v_N^{(i)} = \dot{\theta}_i \vec{Z}_i \times (P_N - P_i)$$
$$\omega_N^i = \dot{\theta}_i \vec{Z}_i$$
$$v_N = \begin{bmatrix} \vec{Z}_1 \times (P_N - P1) & \vec{Z}_2 \times (P_N - P2) & \dots & \vec{Z}_{N-1} \times (P_N - P_{N-1}) \\ \vec{Z}_1 & \vec{Z}_2 & \dots & \vec{Z}_{N-1} \end{bmatrix} \dot{\theta}$$
$$J(\theta) = \begin{bmatrix} \vec{Z}_1 \times (P_N - P1) & \vec{Z}_2 \times (P_N - P2) & \dots & \vec{Z}_{N-1} \times (P_N - P_{N-1}) \\ \vec{Z}_1 & \vec{Z}_2 & \dots & \vec{Z}_{N-1} \end{bmatrix}$$

四、实验步骤



1、首先，根据仿真实验中速度要求，规划笛卡尔空间下机械臂的末端速度：

$$v=\begin{cases}0.005t \quad t\leq 4\\ 0.02 \quad 4<t\leq 7\\ 0.02-0.004(t-7) \quad 7<t\leq 12\end{cases}$$

由于题目中给定的机械臂末端最大速度为$[0.01414,\quad 0,\quad -0.01414,\quad 0,\quad 0,\quad 0]^T$，故而在机械臂的整个运动过程中，机械臂末端只存在$x$方向上的速度以及$z$方向上的速度。即，机械臂末端速度为$[v_x,\quad 0,\quad v_z,\quad 0,\quad 0,\quad 0]^T$，其中：

$$v_x=\begin{cases}0.005t\sqrt{2}/2 \quad t\leq 4\\ 0.02\sqrt{2}/2 \quad 4\leq t\leq 7\\ 0.02-0.004(t-7)\sqrt{2}/2 \quad 7<t\leq 12\end{cases} \qquad v_z=\begin{cases}-0.005t\sqrt{2}/2 \quad t\leq 4\\ -0.02\sqrt{2}/2 \quad 4\leq t\leq 7\\ -0.02+0.004(t-7)\sqrt{2}/2 \quad 7<t\leq 12\end{cases}$$

2、通过对上述v_x、vz运动学速度公式对时间进行积分可以得到理想控制的机械臂末端位置为$[x,\quad 0,\quad z,\quad 0,\quad 0,\quad 0]$，其中：

$$x=\begin{cases}0.2289+0.005t^2\sqrt{2}/4 \quad t\leq 4\\ 0.2289+0.004\times\sqrt{2}/2+0.02t\sqrt{2}/2 \quad 4<t\leq 7\\ 0.2289+0.1\times\sqrt{2}/2+(0.068-0.004t)(t-7)/2\sqrt{2} \quad 7<t\leq 12\end{cases}$$

$$z=\begin{cases}0.454-0.005t^2\sqrt{2}/4 \quad t\leq 4\\ 0.454-0.004\times\sqrt{2}/2-0.02t\sqrt{2}/2 \quad 4<t\leq 7\\ 0.454-0.1\times\sqrt{2}/2-(0.068-0.004t)(t-7)/2\sqrt{2} \quad 7<t\leq 12\end{cases}$$

3、通过逆运动学解算2中得到的机械臂末端位置，可以得到各个关节上的关节角值

4、将上述得到的各关节关节角带入正运动学，得到机械臂末端的位姿矩阵表示T，将其中相应的P_i、$\vec{Z}$带入到$Jacobian$矩阵$J(\theta)$的计算公式中，得到$J(\theta)$

5、利用ros::time记录当前时刻距计时开始时的时长，并得到当前时刻下的末端实际速度，并通过Eigen库中的矩阵运算功能，计算$\dot{\theta}=J(\theta)^{-1}v_N$从的解算出机械臂各个关节的角速度序列。

6、将得到的各个关节角速度序列发布到名为/anno_vel_control的rostopic中，在gazebo中观察机械臂运动，并将实际机械臂停止的位置与根据运动学公式计算出的理论上机械臂末端停止位置进行比较，计算绝对误差。

五、实验结果分析

运动学公式计算得到机械臂末端停止位置理论值：

$$x = 0.2289 + (12+3) \times 0.02/2\sqrt{2} = 0.3349$$
$$z = 0.454 - (12+3) \times 0.02/2\sqrt{2} = 0.3479$$

gazebo中机械臂末端停止位置为$[0.34861, -0.000002, 0.347941, 1.570801, 0.000003, 0.00]$

通过计算可以得到两者之间的误差为：

$$\delta = \sqrt{(x_{理论} - x_{末})^2 + (y_{理论} - y_{末})^2 + (z_{理论} - z_{末})^2}$$
$$\text{计算得：} \quad \delta = 0.0001$$

具体运行情景请见$lab_2/mission_2.mp4$

实验三 轨迹生成仿真实验

一、实验目的

1、巩固机械臂轨迹的五次多项式插值方法

2、掌握通过速度控制使机械臂按预期的轨迹去运动到制定位置

二、实验内容

1、使用五次多项式对机械臂轨迹进行插值

2、通过插值的五次多项式以速度控制的方式实现机械臂末端路径控制

三、实验原理与公式

1、**模型构建：**机器人每个关节是独立的，考虑某个关节在运动开始时刻t_i的角度为θ_i，希望该关节在时刻t_i运动到新的角度θ_f使用五次多项式对轨迹进行规划：

$$\theta(t) = c_0 + c_1 t + c_2 t^2 + c_3 t^3 + c_4 t^4 + c_5 t^5$$
$$\dot{\theta}(t) = c_1 + 2c_2 t + 3c_3 t^2 + 4c_4 t^3 + 5c_5 t^4$$
$$\ddot{\theta}(t) = 2c_2 + 6c_3 t + 12c_4 t^2 + 20c_5 t^3$$

2、**给定参数：**根据给定的路径段初始位移、初始速度、初始加速度、终点加速度、终点速度、终点加速度以及初始时刻和终点时刻等参数，带入上述公式可以得到如下约束条件：

$$\theta(0) = c_0$$
$$\dot{\theta}(0) = c_1$$
$$\ddot{\theta}(0) = 2c_2$$
$$\theta(T) = c_0 + c_1 T + c_2 T^2 + c_3 T^3 + c_4 T^4 + c_5 T^5$$
$$\dot{\theta}(T) = c_1 + 2c_2 T + 3c_3 T^2 + 4c_4 T^3 + 5c_5 T^4$$
$$\ddot{\theta}(T) = 2c_2 + 6c_3 T + 12c_4 T^2 + 20c_5 T^3$$

这些约束条件确定了一个具有6个方程和6个未知数的线性方程组，其解为：

$$c_0 = \theta_0$$
$$c_1 = \dot{\theta}_0$$
$$c_2 = \ddot{\theta}_0/2$$
$$c_3 = \frac{20\theta_f - 20\theta_0 - (8\theta_f + 12\dot{\theta}_0)t_f - (3\ddot{\theta}_0 - \ddot{\theta}_f)t_f^2}{2t_f^3}$$
$$c_4 = \frac{30\theta_0 - 30\theta_f + (14\theta_f + 16\dot{\theta}_0)t_f - (3\ddot{\theta}_0 - 2\ddot{\theta}_f)t_f^2}{2t_f^4}$$
$$c_5 = \frac{12\theta_f - 12\theta_0 - (6\theta_f + 6\dot{\theta}_0)t_f - (\ddot{\theta}_0 - \ddot{\theta}_f)t_f^2}{2t_f^5}$$

通过上述得到的解，带入原运动方程可以得到路径段内关节的运动特性

四、实验步骤

1、**计算关节空间各个关节路径点：** 由题目中给定的四个机械臂坐标系中的空间路径点位姿：

第一个点：[0.2289, 0, 0.454, 1.57, 0, 0]（初始门位置）

第二个点：[0.3, 0.25, 0.322, 1.57, -1.57, 0]

第三个点：[0.3, 0.1, 0.172, 1.57, -1.57, 0]

第四个点：[0.3, -0.1, 0.122, 1.57, -1.57, 0]

利用机械臂的逆运动学公式，得到上述四个机械臂坐标系中机械臂末端空间路径点的位姿所对应的关节空间下各个关节路径点。

2、**解算出运动学方程参数：**将步骤1中得到的机械臂关节空间下各个关节路径点带入五次多项式的运动学约束条件中，并且自己设定通过路径点的速度、加速度以及时间等参数(其中根据题目要求，机械臂通过第二和第三路径点的速度不为零)，解算得到描述各关节在相邻路径点间关节角随时间变化的五次多项式方程中的六个参数。

3、**求解关节速度：**已知描述各关节在相邻路径点间关节角随时间变化的五项多项式方程，将此公式对时间求导得到各关节在相邻路径点之间速度随时间变化的关系，通过时间求得该速度

4、并将得到的速度发送到名为/anno_vel_control的rostopic上，在gazebo中观察机械臂仿真的运动轨迹是否按照要求带速度经过了第二和第三路径点，是否到达了第四个路径点准确停止，计算相对误差。

五、实验结果分析

1、**观察机械臂是否按照要求带速度经过了第二和第三个路径点：**通过对名为/gazebo/link_states的rostopic进行订阅，可以获取到机械臂在运行过程中机械臂末端的位姿，因为在规划时设定了机械臂在相邻路径点中的运行时间，故而对时间进行判断，每当时间到达设定时间时就利用spinOnce()函数调用一次subscribe的回调函数，并将仿真回调得到的路径点坐标与设定的路径点坐标进行比较，衡量其误差大小

时间条件满足后，回调得到的机械臂末端位姿与速度如下：

```
link_vel 6 : (-0.018307 ,0.0374204 ,0.0542938)
link_pos 6 : (0.301846 ,0.246371 ,0.320886)
link_orientation 6 : (0.492912 ,-0.500078 ,0.497001 ,0.509853
link_vel 6 : (-0.0183848 ,0.0373307 ,0.0544666)
link_pos 6 : (0.301828 ,0.246408 ,0.32094)
link_orientation 6 : (0.493015 ,-0.500128 ,0.49696 ,0.509745
link_vel 6 : (-0.0184447 ,0.0372483 ,0.0545889)
link_pos 6 : (0.301809 ,0.246445 ,0.320995)
link_orientation 6 : (0.493117 ,-0.500178 ,0.496919 ,0.509636
link_vel 6 : (-0.0184779 ,0.0372053 ,0.0546527)
------------------------
```

第二个路径点的误差： $\delta=\sqrt{(x_{设定}-x_{末})^2+(y_{设定}-y_{末})^2+(z_{设定}-z_{末})^2}$

$$\delta=0.004031$$

经过第二个路径点的速度为：$(-0.0184779, 0.0372053, 0.0546527)$

```
link_vel 6 : (0.00987454 ,0.0174708 ,0.0171719)
link_pos 6 : (0.299607 ,0.0957422 ,0.171231)
link_orientation 6 : (0.490195 ,-0.500472 ,0.499538 ,0.509606
link_vel 6 : (0.00987577 ,0.0174731 ,0.0171693)
link_pos 6 : (0.299617 ,0.0957597 ,0.171248)
link_orientation 6 : (0.490212 ,-0.500503 ,0.499526 ,0.509572
link_vel 6 : (0.00987559 ,0.0174747 ,0.0171688)
link_pos 6 : (0.299627 ,0.0957772 ,0.171265)
link_orientation 6 : (0.490228 ,-0.500534 ,0.499513 ,0.509538
link_vel 6 : (0.00987455 ,0.0174759 ,0.0171697)
------------------------
```

第三个路径点的误差： $\delta=\sqrt{(x_{设定}-x_{末})^2+(y_{设定}-y_{末})^2+(z_{设定}-z_{末})^2}$

$$\delta=0.003824$$

经过第三个路径点的速度为：$(0.00987455, 0.0174759, 0.0171697)$

2、**观察机械臂是否到第四个路径点能准确停止：**计算第四个点实际到达坐标与设定点的坐标作为误差

```
link_pos 6 : (0.299211 ,-0.103469 ,0.123023)
link_orientation 6 : (0.486654 ,-0.50425 ,0.498997 ,0.509806
link_vel 6 : (-8.30591e-05 ,-0.000105116 ,-5.04541e-05)
link_pos 6 : (0.299211 ,-0.103469 ,0.123023)
link_orientation 6 : (0.486653 ,-0.50425 ,0.498997 ,0.509806
link_vel 6 : (-8.18448e-05 ,-0.000106161 ,-5.20105e-05)
link_pos 6 : (0.299193 ,-0.103493 ,0.123011)
link_orientation 6 : (0.486542 ,-0.504252 ,0.498984 ,0.509924
link_vel 6 : (-6.86601e-05 ,-9.22357e-05 ,-4.76767e-05)
------------------------
```

第四个路径点的误差： $\delta=\sqrt{(x_{设定}-x_{末})^2+(y_{设定}-y_{末})^2+(z_{设定}-z_{末})^2}$

$$\delta=0.003725$$

终点速度可以认为为零

通过上述分析可以看到，机械臂末端经过第二和第三路径点的速度不为零，满足要求的带速度经过第二、第三路径点。并且通过计算实际到达的末端坐标位置与设定的路径点坐标位置计算距离得到误差，可见末端经过三个路径点的误差都在0.001的数量级。

具体运行情景间$lab_3/mission_3.mp4$

实验四、定点转动仿真实验

一、实验目的

1、掌握顶点转动的计算并实际运用

二、实验内容

1、机械臂末端坐标始终保持不变，只改变姿态的运动

2、在仿真实验中，使机械臂末端保持初始位置坐标$[0.2289, 0, 0.454]$，在此处定点转动，在真实机器人实验中，可以自选位置，但定点转动幅度不可太小，转动角度需不小于40°

3、自选方法，生成机械臂末端定点转动的轨迹，并在机器人实现

三、实验原理与公式

可以通过$Jacobian$矩阵将笛卡尔坐标系下机械臂末端速度变换到关节空间下，实现从机械臂末端的规划到关节空间速度发送的变化。

末端顶点转动可以认为是末端只有角速度而不存在平移速度，即为$[0, 0, 0, \theta, \gamma, \omega]^T$，将其通过$Jacobian$矩阵推算到关节空间下：

$$\dot{\theta} = J(\theta)^{-1} v_N, \quad \text{其中} v_N = [0, 0, 0, \theta, \gamma, \omega]^T$$

四、实验步骤：

1、设定笛卡尔坐标系下，机械臂末端速度为$[0, 0, 0, \theta, \gamma, \omega]$，通过$\text{角速度} \times \text{时间}$计算得到机械臂末端理论上经过某一时间$t$后的姿态

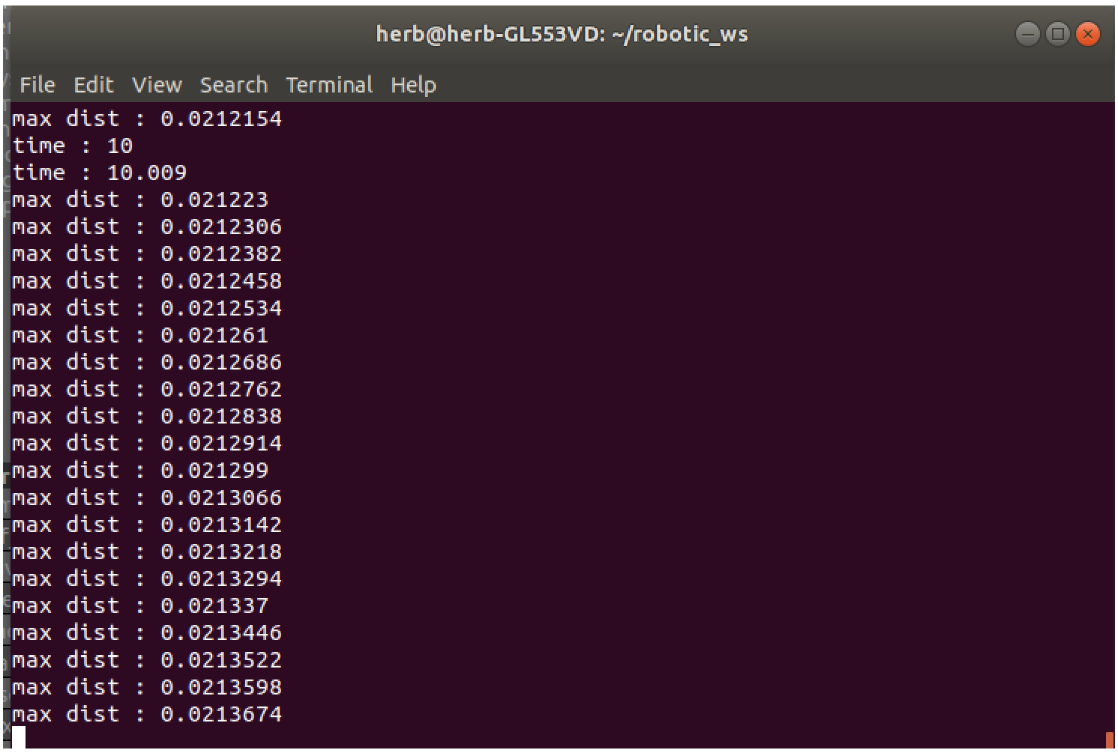
2、通过逆运动学解算2中得到的机械臂末端位置，可以得到各个关节上的关节角值

3、将上述得到的各关节关节角带入正运动学，得到机械臂末端的位姿矩阵表示T，将其中相应的值P_i、$\vec{Z}$带入到$Jacobian$矩阵$J(\theta)$的计算公式中，得到$J(\theta)$

4、将得到的各个关节角速度序列发布到名为/anno_vel_control的rostopic中，在gazebo中观察机械臂运动，并将实际机械臂停止的位置与根据运动学公式计算出的理论上机械臂末端停止位置进行比较，计算绝对误差。

五、实验结果分析

通过计算机械臂末端运动过程中，实际位置坐标与初始位置坐标之间的距离来表示误差的大小。并且机械臂实际运行过程中不断与先前的距离进行比较，得到一个运行过程中的实际坐标位置与初始坐标位置之间的最大距离来表征其误差。



有输出可见，机械臂在定点转动过程中与初始位置的最大距离为0.0213674，在误差允许的范围内可以近似认为机械臂末端未发生变化

具体运行情景请见$lab_4/mission_4.mp4$

实验五、机械臂避碰敲铃仿真实验

一、实验内容

1、使机械臂尽可能地避开障碍物往返运动并敲响铃铛，在规定的时间内，敲响铃铛次数越多，得分越高

二、考核要求

1、给定起始点A，中间路径点B 和终点C，终点C 处有一铃铛，同时给出中间障碍物的空间位置，请优化设计机械臂的轨迹，使之快速往返敲铃。

2、自行规划轨迹，使机械臂完成以下运动：

机械臂末端从初始门位置开始运动，经过路径点B，绕开中间障碍物，到达铃铛处敲响铃铛后，再返回路径点B，然后再去敲响铃铛，做快速的往复的敲铃运动。在100s 时间内敲铃次数多的，得分越高。

三、实验原理

1、利用实验三轨迹生成中已经搭建好的轨迹生成框架，设置中间点为$[0.26, 0.15, 0.008, 1.57, 0, 0]$、$[0.4, 0, 0.3, 1.57, 0, 0]$、$[0.28, -0.24, 0.08, 1.57, 0, 0]$

2、根据逆运动学求解上述中间点，得到关节空间下各关节的路径点并自己设置到达中间点的时间和坐标，再通过各关节的五次多项式运动约束条件，解算出各个关节上对应的运动学方程，并且按该运动学方程的约束向机械臂发送相应的指令。

四、实验结果分析

1、按本人规划，机械臂在100s的时间内敲铃次数可以达到**10次**

2、由于本人规划的时间与真实时间并不相同（真实世界的时间比起ros上的时间要慢不少），但是机械臂却能准确到点，思考是否是本人在程序中有耗时过大的的操作，或者是由于电脑配置问题导致ros的时间戳与真实世界中的时间并不相符，故而在程序运行的过程中，使用ros::Time对时间进行了计时，敲铃十次所用时间为：

```
herb@herb-GL553VD:~/robotic_ws$ ./build/probot_anno/probot_gazebo/mission_5_test
[ INFO] [1584958561.076727502, 488.529000000]: start
100.494
```

可以看到，经过在系统内对程序运行时间的计时，初步认定原因为由于电脑配置问题使得ros的时间戳与真实世界中的时间不相符。为了进一步验证假设，本人将自己的源代码发送给电脑上ros时间戳正常的同学帮忙录制，得到了真实世界与ros上时间戳一致的视频，完全证明了上述假设。(两个视频均已上交)

3、**计算是否敲到铃铛：**根据仿真中所给的铃铛理想位置[0.28, -0.24, 0.08]计算机械臂末端与其距离，gazebo中显示的机械臂末端坐标如下：

pose	
x	0.281472
y	-0.237503
z	0.081349
roll	1.572657
pitch	0.002167
yaw	0.007623

$$\delta = \sqrt{(x_{设定} - x_{末})^2 + (y_{设定} - y_{末})^2 + (z_{设定} - z_{末})^2}$$

$$\delta = 0.0032$$

根据上述欧氏距离，结合铃铛还有一定的体积，故而可以认为敲铃成功

具体运动情景时间戳与真实时间不符的情形见$mission_5_1.mp4$，而真实世界时间与ros时间一致的情形请见$mission_5_2.mp4$