

实验1-5仿真报告

高钰满, 3170105242

代码见 `code/probot_gazebo/src`, 代码注释完整

仿真结果见 `/vedio`

节点运行方式见 `ReadMe.pdf`

实验一 机械臂正逆运动学

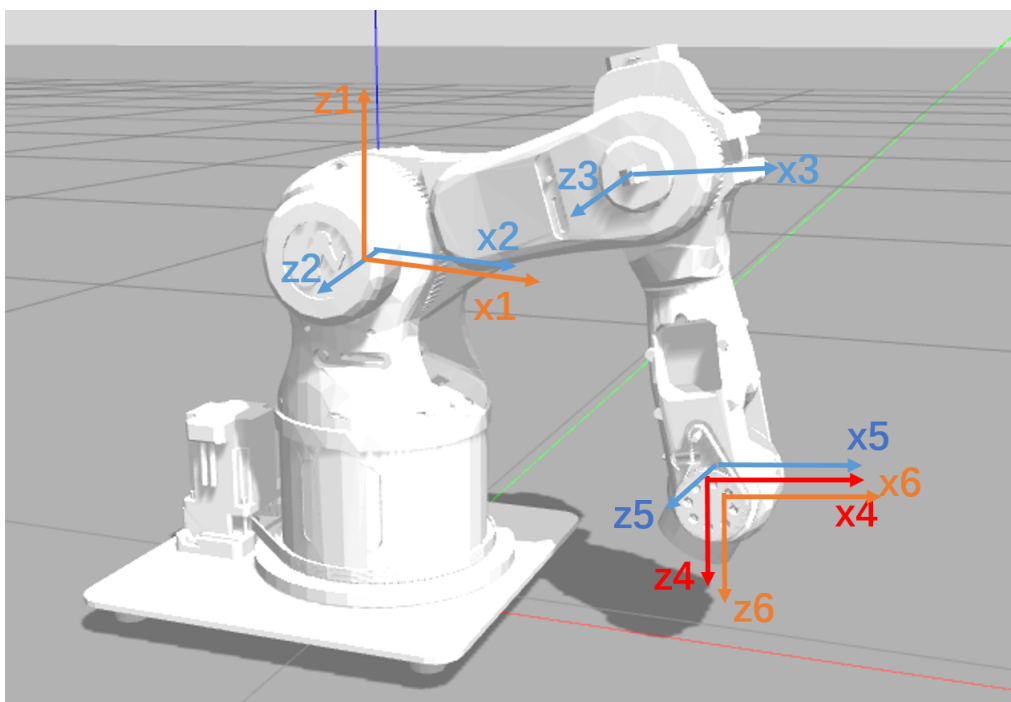
一、实验目的

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、实验内容及计算原理

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。

(1) 建立机械臂坐标系



DH参数表

(单位: mm)

| 关节i | α_{i-1} | a_{i-1} | d_i | θ_i |
|-----|----------------|-----------|------------|------------|
| 1 | 0 | 0 | D1 (284) | $\Theta 1$ |
| 2 | 90° | 0 | 0 | $\Theta 2$ |
| 3 | 0 | A3 (225) | 0 | $\Theta 3$ |
| 4 | 90° | 0 | D4 (228.9) | $\Theta 4$ |
| 5 | -90° | 0 | 0 | $\Theta 5$ |
| 6 | 90° | 0 | 0 | $\Theta 6$ |
| 7 | 0 | 0 | D7 (55) | 0 |
| 8 | -90° | 0 | 0 | 0 |

关节1-6为实际机械臂关节，对应实际的机械臂旋转；

关节7为最末端机械臂的长度平移；关节8为适应gazebo中末端坐标系的角度旋转；

根据机械臂的实际关节零点位置需要对关节2加偏置： $\pi/2$, 对关节5加偏置： $-\pi/2$.

(2)建立机械臂正运动学方程

根据连杆连体坐标系的变换矩阵：

$${}_{i-1}^iT = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \sin \theta_i \cos \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \cos \alpha_{i-1} & -\sin \alpha_{i-1} & -\sin \alpha_{i-1} d_i \\ \sin \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

将六个连杆坐标变换阵相乘：

$${}^0_8T = \prod_{i=1}^8 {}_{i-1}^iT$$

$${}^0_8T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

得到 0_8T 齐次变换矩阵后，该矩阵 $[p_x, p_y, p_z]$ 部分即为末端位置。

固定角表示

现在已经得到 0_8T 齐次变换矩阵，可由其中的旋转矩阵部分解得 $X-Y-Z$ 固定角，进而表示姿态。

旋转矩阵与固定角间有如下关系：

$$R_{XYZ}(\gamma, \beta, \alpha) = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & -\sin \gamma \\ 0 & \sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix}$$

任意一个正交旋转矩阵都能反解出 $\alpha/\beta/\gamma$:

$$\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} = R_{Z'Y'X'}(\alpha, \beta, \gamma)$$

$$\beta = \text{Atan } 2 \left(-r_{31}, \sqrt{r_{11}^2 + r_{21}^2} \right)$$

$$\alpha = \text{Atan } 2 (r_{21} / \cos \beta, r_{11} / \cos \beta)$$

$$\gamma = \text{Atan } 2 (r_{32} / \cos \beta, r_{33} / \cos \beta)$$

综上所述, 在0坐标系下用 $[p_x, p_y, p_z]$ 和固定角 $X-Y-Z$ 表示机械臂末端位姿, 则从关节变量到机械臂末端的**运动学方程**为:

$$p_x = \frac{1}{5}s_1 - \frac{s_5(s_1s_4 - c_1c_2c_4)}{10} - \frac{c_1c_5s_2}{10} - L_3c_1s_2$$

$$p_y = \frac{s_5(c_1s_4 + c_2c_4s_1)}{10} - \frac{c_1}{5} - \frac{c_5s_1s_2}{10} - L_3s_1s_2$$

$$p_z = L_3c_2 + \frac{c_2c_5}{10} + \frac{c_4s_2s_5}{10}$$

$$\beta = \text{Atan } 2 \left(-r_{31}, \sqrt{r_{11}^2 + r_{21}^2} \right)$$

$$\alpha = \text{Atan } 2 (r_{21} / \cos \beta, r_{11} / \cos \beta)$$

$$\gamma = \text{Atan } 2 (r_{32} / \cos \beta, r_{33} / \cos \beta)$$

其中, r_{ij} 见第二部分推导.

(3)求出机械臂的逆运动学解

现已知基坐标系下的机械臂末端位姿 $[p_x, p_y, p_z, roll, pitch, yaw]$, 可以由公式计算齐次变换矩阵 0_8T :

$$R_8^0 = \begin{bmatrix} C\alpha C\beta & C\alpha S\beta S\gamma - S\alpha C\gamma & C\alpha S\beta C\gamma + S\alpha S\gamma \\ S\alpha C\beta & S\alpha S\beta S\gamma + C\alpha C\gamma & S\alpha S\beta C\gamma - C\alpha S\gamma \\ -S\beta & C\beta S\gamma & C\beta C\gamma \end{bmatrix}$$

$$P_8^0 = [p_x, p_y, p_z]$$

$${}^0_8T = \begin{bmatrix} R_8^0 & P_8^0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

现需要解算各关节变量:

尝试使用PIPER法进行逆运动学求解

由于PIPER法要求机械臂的最后3个轴相交, 故先将坐标系6的齐次变换矩阵算出:

$${}^0_6T = {}^0_8T ({}^8_7T^{-1}) ({}^6_7T^{-1})$$

以下将 0_6T 作为已知量, $[x, y, z]^T$ 为 0_6T 中的位置矢量

前3关节角

满足如下关系：

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^0P_{4ORG} \\ 1 \end{bmatrix} = {}^0_1T {}^1_2T {}^2_3T \begin{bmatrix} {}^3P_{4ORG} \\ 1 \end{bmatrix}$$

逐层计算：

$$\begin{bmatrix} {}^2P_{4ORG} \\ 1 \end{bmatrix} = {}^2_3T \begin{bmatrix} {}^3P_{4ORG} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ 1 \end{bmatrix}$$

其中，

$$\begin{cases} f_1 = d_4 S_3 + a_2 \\ f_2 = -d_4 C_3 \\ f_3 = 0 \end{cases}$$

$$\begin{bmatrix} {}^1P_{4ORG} \\ 1 \end{bmatrix} = {}^1_2T \begin{bmatrix} {}^2P_{4ORG} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ g_3 \\ 1 \end{bmatrix}$$

其中，

$$\begin{cases} g_1 = C_2 (d_4 S_3 + a_2) + d_4 S_2 C_3 \\ g_2 = 0 \\ g_3 = S_2 (d_4 S_3 + a_2) - d_4 C_2 C_3 \end{cases}$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^0P_{4ORG} \\ 1 \end{bmatrix} = {}^0_1T \begin{bmatrix} {}^1P_{4ORG} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 g_1 - S_1 g_2 \\ S_1 g_1 + C_1 g_2 \\ g_3 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

由上式可得：

$$r = x^2 + y^2 + z^2 = d_4^2 + a_2^2 + 2d_4 a_2 S_3 \quad (2)$$

$$z = S_2 (d_4 S_3 + a_2) - d_4 C_2 C_3 \quad (3)$$

解 θ_3 ：

由 (2)：

$$\theta_3 = \arcsin\left(\frac{r - d_4^2 - a_2^2}{2d_4 a_2}\right)$$

解 θ_2 ：

由 (3) , 令 $u = \tan(\theta_2/2)$:

$$(d_4 C_3 - z) u^2 + 2(d_4 S_3 + a_2) u - (d_4 C_3 + z) = 0$$

$$\theta_2 = 2 \operatorname{atan}(u)$$

解 θ_1 :

由 (1) 可得:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 g_1 - s_1 g_2 \\ s_1 g_1 + c_1 g_2 \end{bmatrix}$$

$$\theta_1 = \operatorname{acos}(x/g_1)$$

θ_1 需满足:

$$y = \sin \theta_1 g_1$$

后3关节角

进一步通过欧拉角求解最后三个关节角:

首先算出坐标4相对于基坐标的姿态:

$${}^0_4 R|_{\theta_4=0} = {}^0_3 R {}^3_4 R|_{\theta_4=0}$$

则最后三个关节的旋转矩阵为:

$${}^4_6 R|_{\theta_4=0} = {}^0_4 R^{-1}|_{\theta_4=0} \cdot {}^0_6 R$$

由旋转矩阵求解 $Z - Y - Z$ 欧拉角公式得:

$$\begin{aligned} \beta &= \operatorname{Atan} 2 \left(\sqrt{r_{31}^2 + r_{32}^2}, r_{33} \right) \\ \alpha &= \operatorname{Atan} 2 (r_{23} / \sin \beta, r_{13} / \sin \beta) \\ \gamma &= \operatorname{Atan} 2 (r_{32} / \sin \beta, -r_{31} / \sin \beta) \end{aligned}$$

最终求解各关节变量.

三、实验步骤及结果

(1) 正运动学验证

给出关节角, 计算末端位置:

第一组

关节角: $[0.927, -0.687, -0.396, 0, 1.083, 0.927]$

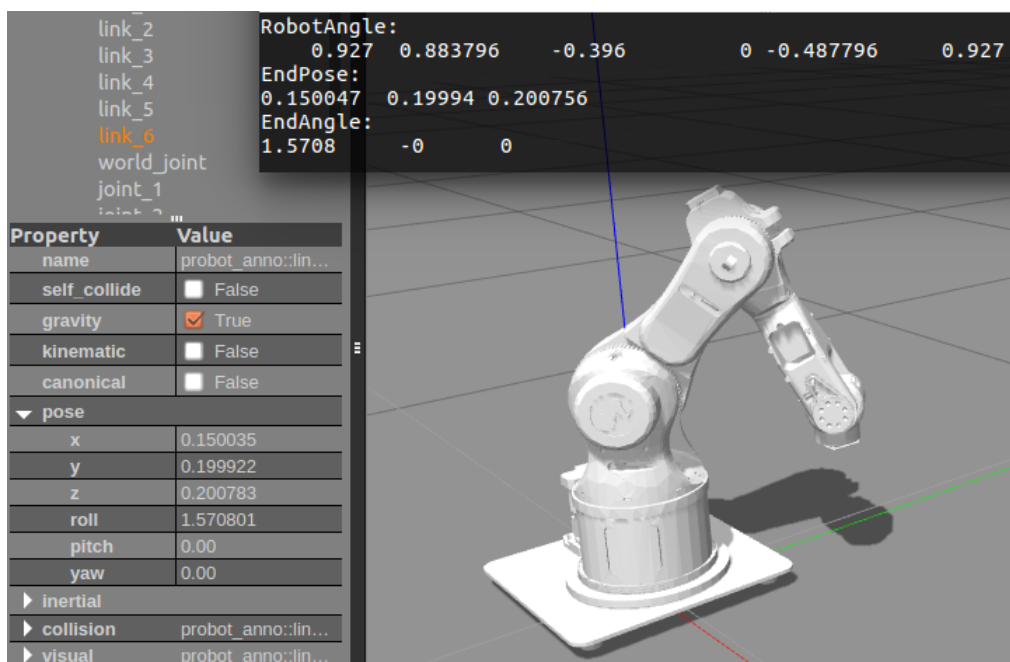
正运动学计算末端位姿: $[0.150047, 0.19994, 0.200756, 1.5708, 0, 0]$

Gazebo仿真种末端位姿: $[0.150035, 0.199922, 0.200783, 1.570801, 0, 0]$

位姿绝对误差: $[0.000012, 0.000018, -0.000027, -0.000001, 0, 0]$

误差极小, 几乎可以忽略不计.

运行结果: (注: 图中 RobotAngle 关节角是根据前述DH参数增加偏置前的关节角)



第二组

关节角: $[0.322, -0.855, -0.021, 0, 0.877, 0.322]$

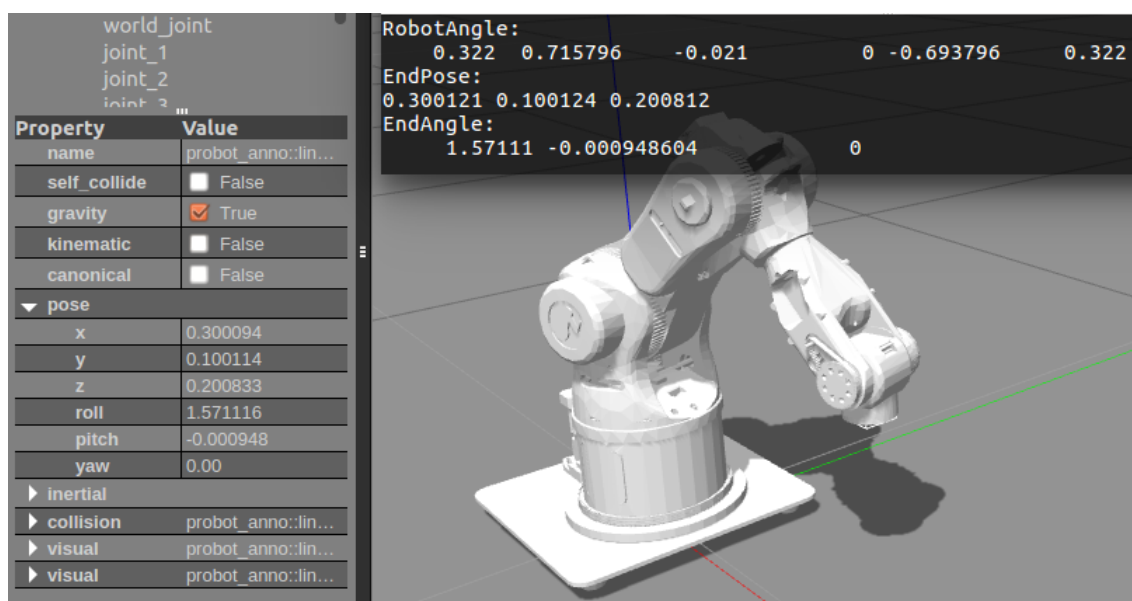
正运动学计算末端位姿: $[0.300121, 0.100124, 0.200812, 1.571110, -0.000950, 0]$

Gazebo仿真种末端位姿: $[0.300094, 0.100114, 0.200833, 1.571116, -0.000948, 0]$

位姿绝对误差: $[0.000027, 0.00001, -0.000021, -0.000006, -0.000002, 0]$

误差极小, 几乎可以忽略不计.

运行结果: (注: 图中 RobotAngle 关节角是根据前述DH参数增加偏置前的关节角)



第三组

关节角: $[-0.322, -0.636, -0.011, 0, 0.647, -0.322]$

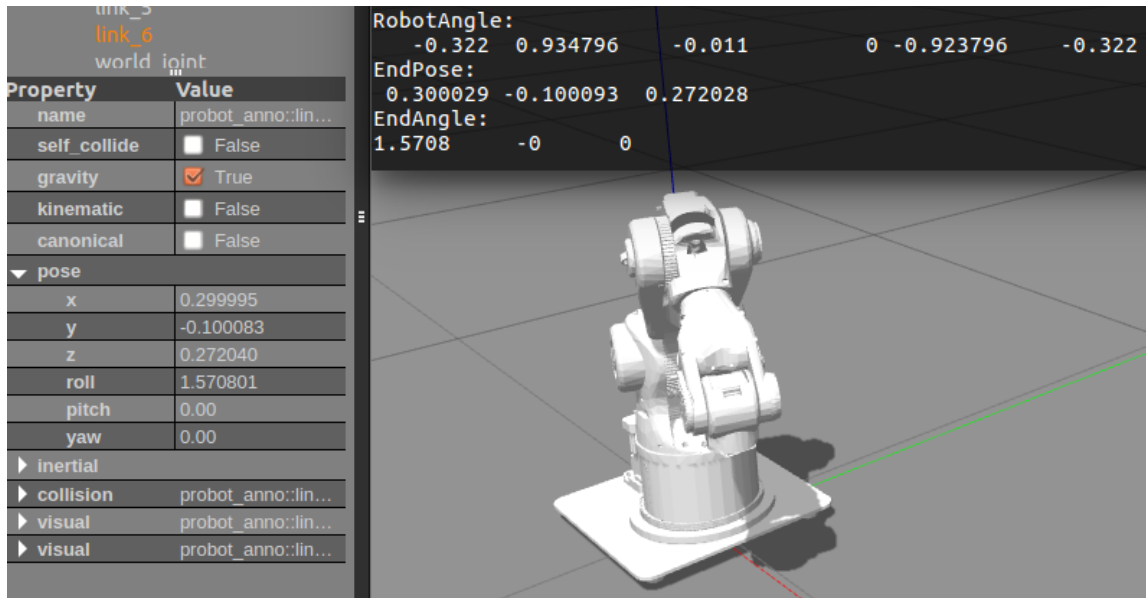
正运动学计算末端位姿: $[0.300029, -0.100093, 0.272028, 1.5708, 0, 0]$

Gazebo仿真种末端位姿: $[0.299995, -0.100083, 0.272040, 1.57081, 0, 0]$

位姿绝对误差: $[0.000034, -0.00001, -0.000022, -0.000001, 0, 0]$

误差极小, 几乎可以忽略不计.

运行结果: (注: 图中 RobotAngle 关节角是根据前述DH参数增加偏置前的关节角)



(2) 逆运动学验证

给出末端位置, 计算关节角:

若不考虑关节角转动范围限制, **每个末端位置可解出8个解**, 解出所有解后再取符合关节范围的解, publish 验证.

第一组

末端位姿: $[0.2, 0.2, 0.2007, 1.57, -1.57, 0]$

逆运动学计算关节角:

在范围内共有4组解:

```

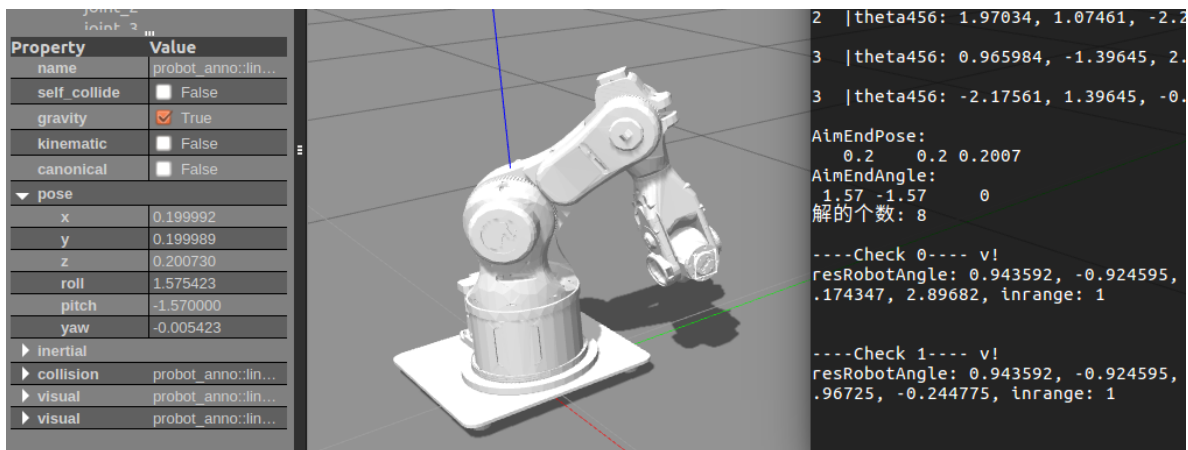
1  ----Check 0----
2  resRobotAngle: 0.943488, -0.924743, -0.347274, -2.17673, 0.173647, 2.89722
3
4  ----Check 1----
5  resRobotAngle: 0.943488, -0.924743, -0.347274, 0.964865, 2.96795, -0.244375
6
7  ----Check 2----
8  resRobotAngle: -2.1981, 0.924743, 3.48887, 0.964865, 0.173647, 2.89722
9
10 ----Check 3----
11 resRobotAngle: -2.1981, 0.924743, 3.48887, -2.17673, 2.96795, -0.244375

```

Gazebo中末端位姿与预设位姿误差: $[-0.0054, -0.000011, 0.00003, 0, 0, 0]$

运行结果:

(4组解的gazebo执行结果见 [vedio/逆运动学-第1组-4个解.mp4](#))



第二组

末端位姿: $[0.15, 0.2, 0.2007, 0, 0, 0]$

逆运动学计算关节角:

在范围内共有4组解:

```

1  ----Check 0----
2  resRobotAngle: 1.03907, -1.00894, -0.0831629, -0.585271, -0.408274, 1.31351
3
4  ----Check 1----
5  resRobotAngle: 1.03907, -1.00894, -0.0831629, 2.55632, 3.54987, -1.82808
6
7  ----Check 2----
8  resRobotAngle: -2.10252, 1.00894, 3.22476, 2.55632, -0.408274, 1.31351
9
10 ----Check 3----
11 resRobotAngle: -2.10252, 1.00894, 3.22476, -0.585271, 3.54987, -1.82808

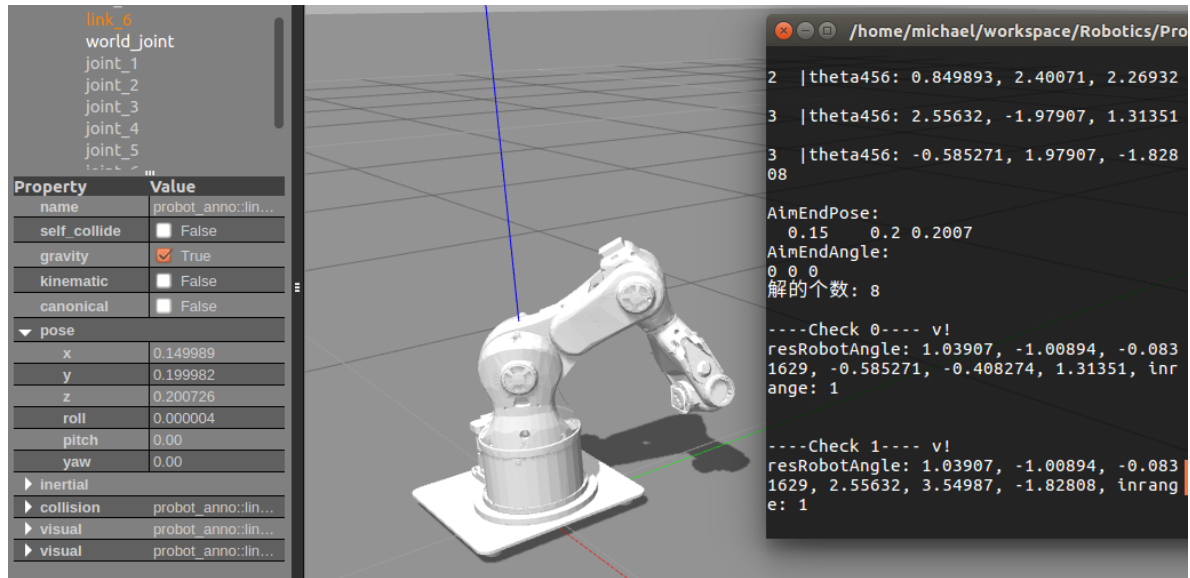
```


Gazebo中末端位姿与预设位姿误差: $[-0.000011, -0.000018, 0.000026, 0.000004, 0, 0]$

误差极小, 几乎可以忽略不计.

运行结果:

(4组解的gazebo执行结果见 [vedio/逆运动学-第2组-4个解.mp4](#))



第三组

末端位姿: $[0.3, 0, 0.122, 1.57, 0, 0]$

逆运动学计算关节角:

在范围内共有3组解:

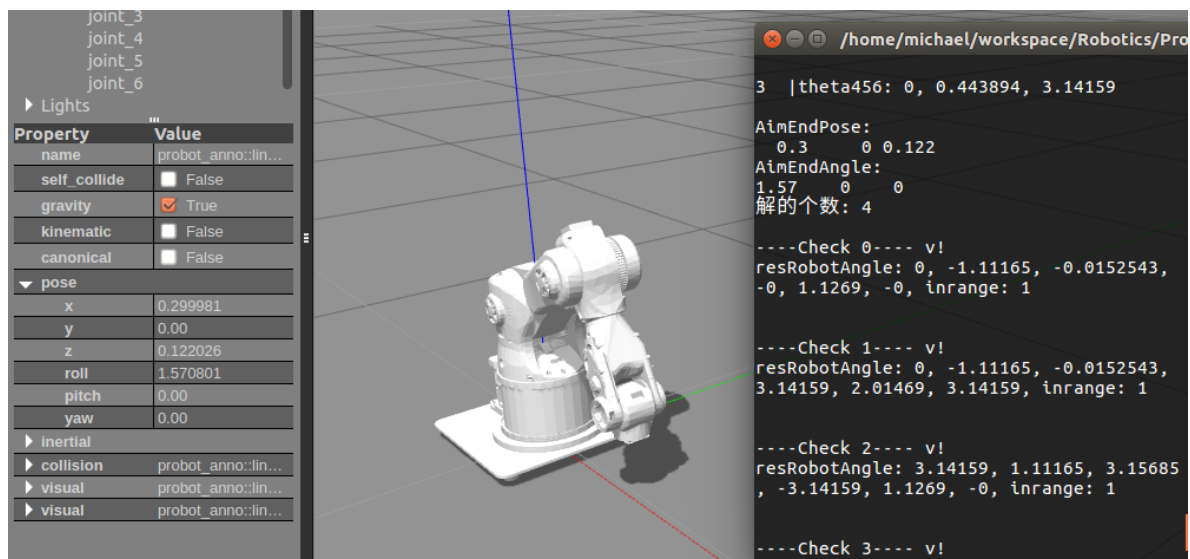
```
1 ----Check 0----
2 resRobotAngle: 0, -1.11165, -0.0152543, -0, 1.1269, -0
3
4 ----Check 1----
5 resRobotAngle: 0, -1.11165, -0.0152543, 3.14159, 2.01469, 3.14159
6
7 ----Check 2----
8 resRobotAngle: 3.14159, 1.11165, 3.15685, -3.14159, 1.1269, -0
9
10 ----Check 3----
11 resRobotAngle: 3.14159, 1.11165, 3.15685, 0, 2.01469, 3.14159
```

Gazebo中末端位姿与预设位姿误差: $[-0.000019, 0, 0.000026, 0.000801, 0, 0]$

误差极小, 几乎可以忽略不计.

运行结果:

(4组解的gazebo执行结果见 [vedio/逆运动学-第3组-4个解.mp4](#))



实验三 速度传递实验

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、实验内容及计算原理

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

定义笛卡尔速度矢量： $v_N = \begin{bmatrix} v_N \\ \omega_N \end{bmatrix}$ 和关节角空间矢量 $\dot{\theta} = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \vdots \\ \dot{\theta}_N \end{bmatrix}$

雅可比矩阵形式：

$$v_N = \begin{bmatrix} \hat{Z}_1 \times (P_N - P_1) & \hat{Z}_2 \times (P_N - P_2) & \cdots & \hat{Z}_{N-1} \times (P_N - P_{N-1}) & 0 \\ \hat{Z}_1 & \hat{Z}_2 & \cdots & \hat{Z}_{N-1} & \hat{Z}_N \end{bmatrix} \dot{\theta}$$

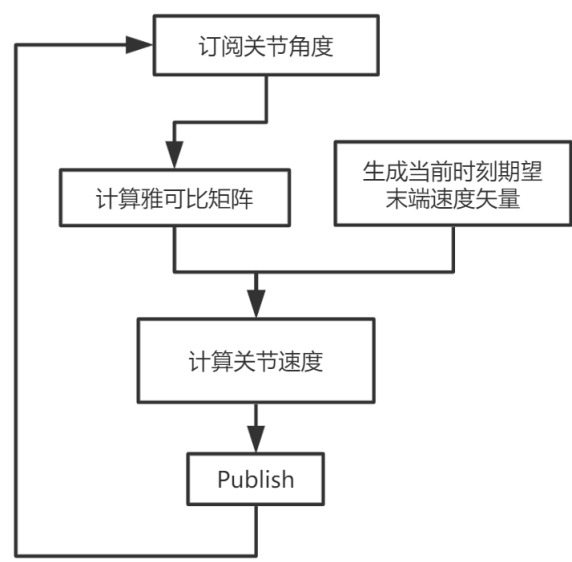
其中， P_i 为齐次变换矩阵最右侧一列前三项 $[p_x, p_y, p_z]$ ， \hat{Z}_i 为旋转矩阵最右侧一列 $[r_{13}, r_{23}, r_{33}]$ ：

$$T_i = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

齐次变换矩阵计算见实验一。

三、实验步骤及结果

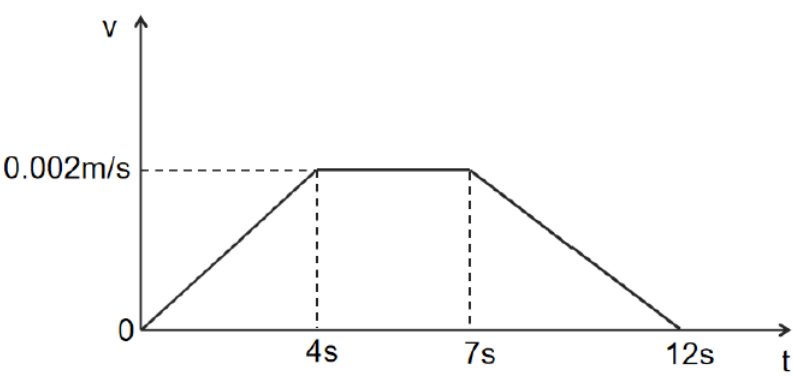
程序流程图：



初始末端位置：[0.229, 0, 0.454]

期望运动距离：[0.15, 0, -0.15]

速度曲线：



运行结果：

(gazebo执行结果见 vedio/速度传递.mp4)

joint_4

| Property | Value |
|--------------|--|
| name | probot_anno::lin... |
| self_collide | <input type="checkbox"/> False |
| gravity | <input checked="" type="checkbox"/> True |
| kinematic | <input type="checkbox"/> False |
| canonical | <input type="checkbox"/> False |
| ▼ pose | |
| x | 0.378651 |
| y | -0.000001 |
| z | 0.303826 |
| roll | 1.570801 |
| pitch | 0.000003 |
| yaw | 0.00 |
| ► inertial | |
| ► collision | probot_anno::lin... |
| ► visual | probot_anno::lin... |
| ► visual | probot_anno::lin... |

```
angle speed: 0.000, 0.000, 0.000
-----
probot_anno::link_6
Pose:
 0.379 -0.000 0.304
linear speed: -0.000, -0.000, -0.000
angle speed: 0.000, 0.000, -0.000
-----
probot_anno::link_6
Pose:
0.379 -0.000 0.304
linear speed: 0.000, 0.000, -0.000
angle speed: 0.000, 0.000, 0.000
-----
probot_anno::link_6
Pose:
 0.379 -0.000 0.304
linear speed: 0.000, 0.000, -0.000
angle speed: 0.000, 0.000, 0.000
```

结束时末端位置：[0.379, 0, 0.304]

运动距离：[0.15, 0, -0.15]

无误差。

实验四 轨迹生成实验

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指定位置

二、实验内容及计算原理

(1) 逆运动学求解

推导计算过程见实验一

(2) Mini-jerk 五次多项式最优轨迹生成

轨迹采用5次多项式进行拟合，保证位置、速度、加速度均连续。

该机械臂的6个关节轨迹可以分别进行规划，以下对其中一个关节进行轨迹规划。

已知一个关节需要到达的M个角度，利用多项式拟合会有 (M-1)段轨迹，表示如下：

$$f(t) = \begin{cases} f_1(t) \doteq \sum_{i=0}^N p_{1,i} t^i & T_0 \leq t \leq T_1 \\ f_2(t) \doteq \sum_{i=0}^N p_{2,i} t^i & T_1 \leq t \leq T_2 \\ \vdots & \vdots \\ f_M(t) \doteq \sum_{i=0}^N p_{M,i} t^i & T_{M-1} \leq t \leq T_M \end{cases}$$

每段轨迹都用多项式表示，该轨迹集合需要满足以下约束条件：

a) 期望角度约束

每段轨迹的起点和终点固定为M个角度中的对应值：

$$\begin{cases} f_j^{(k)}(T_{j-1}) = x_{0,j}^{(k)} \\ f_j^{(k)}(T_j) = x_{T,j}^{(k)} \end{cases}$$

b) 连续性约束

相邻轨迹的速度和加速度连续：

$$f_j^{(k)}(T_j) = f_{j+1}^{(k)}(T_j)$$

选择代价函数为所有轨迹的jerk值，使其最小。

代价函数表示如下：

$$J(T) = \int_{T_{j-1}}^{T_j} (f^3(t))^2 dt = \sum_{i \geq 4, l \geq 4} \frac{i(i-1)(i-2)j(l-1)(l-2)}{i+l-5} (T_j^{i+l-5} - T_{j-1}^{i+l-5}) p_i p_l$$

将上述等式写为矩阵形式：

$$\min \begin{bmatrix} \mathbf{p}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{p}_M \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_1 & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \ddots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{Q}_M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{p}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{p}_M \end{bmatrix}$$

$$\text{s.t. } A_{\text{eq}} \begin{bmatrix} \mathbf{p}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{p}_M \end{bmatrix} = \mathbf{d}_{\text{eq}}$$

此问题是经典的凸优化问题：QP二次优化问题，可以快速求解。

因此能够自动地选择最优的中间点速度和加速度，进而生成最优轨迹。

机械臂关节的速度和加速度需要满足如下要求：

| 各关节加速度与速度限制 | Joint1 | Joint2 | Joint3 | Joint4 | Joint5 | Joint6 |
|-----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| v_max (rad/s) | 0.7854 | 0.6981 | 0.7854 | 0.9599 | 0.9599 | 0.9599 |
| a_max (rad/s ²) | 0.3491 | 0.2618 | 0.3491 | 0.4363 | 0.4363 | 0.4363 |

三、实验步骤及结果

(1) 逆运动学求解路径点对应关节角

给定路径点如下：

- 1 第一个点：[0.2289, 0, 0.454, 1.57, 0, 0]（初始门位置）
- 2 第二个点：[0.3, 0.25, 0.322, 1.57, -1.57, 0]
- 3 第三个点：[0.3, 0.1, 0.172, 1.57, -1.57, 0]
- 4 第四个点：[0.3, -0.1, 0.122, 1.57, -1.57, 0]

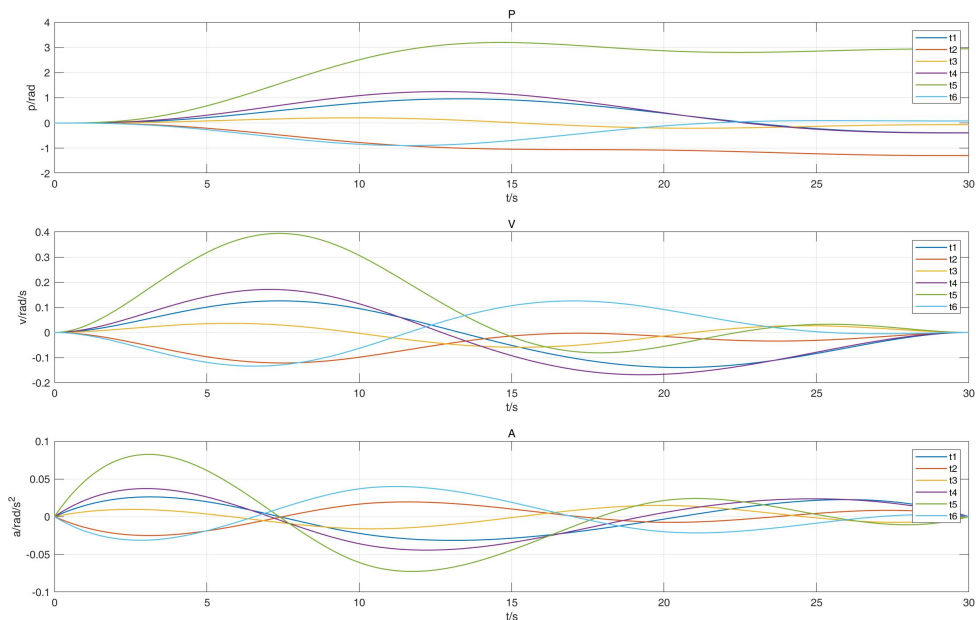
根据实验一求得四个路径点的关节角：

- 1 $\mathbf{p1} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0];$
- 2 $\mathbf{p2} = [0.795586 \ -0.772686 \ 0.205056 \ 1.08734 \ 2.51046 \ -0.842853];$
- 3 $\mathbf{p3} = [0.387677 \ -1.07517 \ -0.199884 \ 0.404374 \ 2.86768 \ -0.114923];$
- 4 $\mathbf{p4} = [-0.387371 \ -1.29256 \ -0.0658126 \ -0.394643 \ 2.94426 \ 0.0811483];$

(2) 生成最优5次多项式轨迹

根据上述计算原理，生成轨迹，一共4个路径点，共生成3段轨迹，每段轨迹耗时10s走完。

$P - V - A$ 曲线如下：

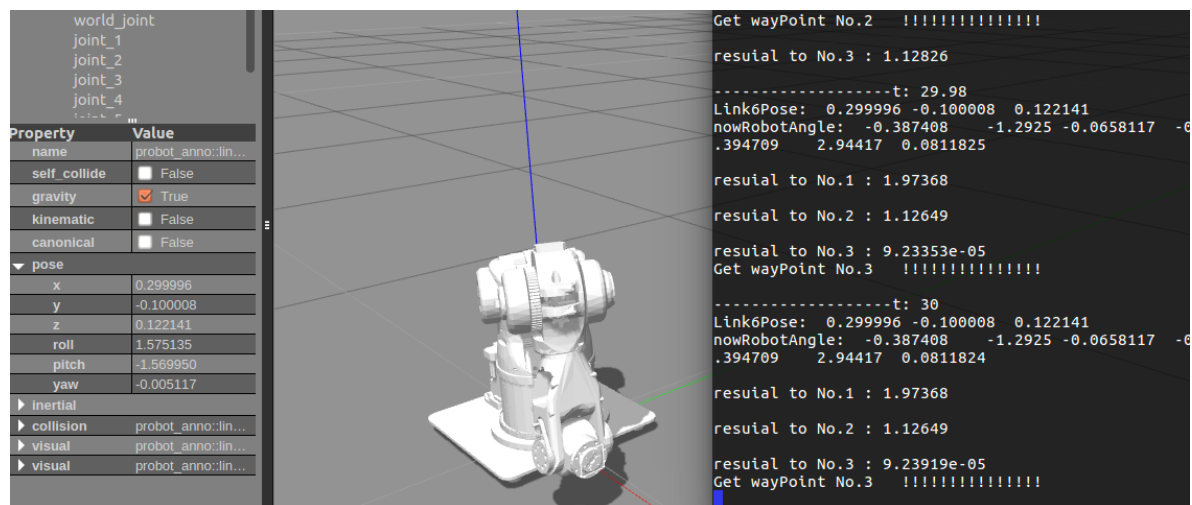


根据图像，关节的速度和加速度均满足要求。

(3) 速度生成

利用ROS自带的 `ros::time` 计时器获取当前时刻，代入求解出的轨迹参数即可获得速度。

将速度publish，Gazebo运行结果见 [轨迹生成.mp4](#)。



终点姿态误差： $[-0.000004, -0.000008, 0.000141, -0.005, 0.0001, -0.005]$

最大位姿相对误差 = $0.005/1.57 = 0.32\%$

由于代码订阅了机械臂末端位姿，故可通过末端位姿判断是否经过中间点：

第二个路径点：

```

1  -----t: 10
2  Link6Pose: 0.300681 0.249464 0.323145
3  nowRobotAngle: 0.79511 -0.772247 0.205088 1.08685 2.50919 -0.842585
4
5  resual to No.1 : 0.00094727
6  Get wayPoint No.1  !!!!!!!!!!!!!!!

```

第三个路径点：

```
1 -----t: 20.001
2 Link6Pose: 0.299868 0.100443 0.172244
3 nowRobotAngle: 0.388355 -1.07509 -0.199812 0.405073 2.86795 -0.115315
4
5 resual to No.2 : 0.000834903
6 Get wayPoint No.2 !!!!!!!!!!!!!!!
```

其中 `resual` 是所有位姿参数误差绝对值之和，可见经过了两个中间点。

实验五 定点转动实验

一、实验目的

1、掌握定点转动的计算与并实际运用

二、实验内容

1、定点转动指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门位置坐标[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.但定点转动的幅度不可太小，转动角度须不小于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、实验步骤及结果

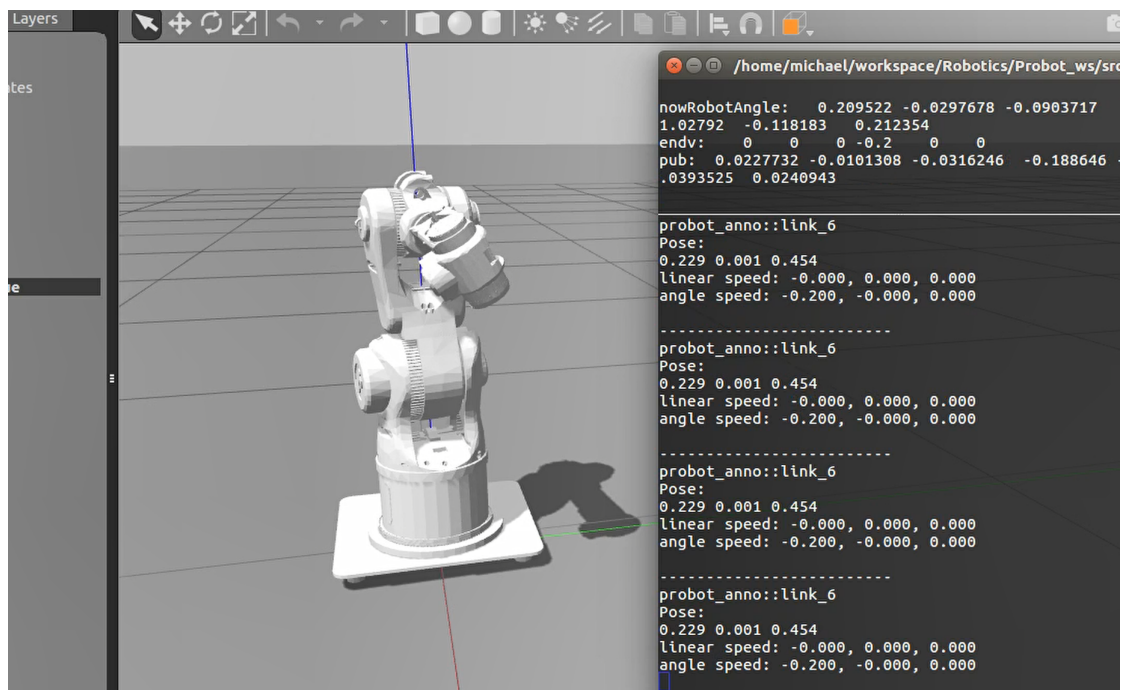
利用速度传递实验中的Jacobi矩阵，机械臂末端定点转动即为末端线速度为0，只有绕一个轴的角速度为一定值即可。

此实验中，设定期望的末端速度为：

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -0.2 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

则机械臂末端绕x轴匀速转动，第五关节转动角度为360°。

Gazebo仿真结果见： `定点转动.mp4`



根据视频中机械臂运动状态和命令行中监听的机械臂末端位置，可以得到结论：

- 末端的坐标在整个运动过程中几乎没有改变，误差控制在毫米级别
- 定点转动十分连贯
- 定点转动幅度 $> 180^\circ$