

復旦大學

五自由度串联机器人设计与运动学

先进机器人与自动化小组汇报

袁铮 汪文胜 孙桥



CONTENTS



0
1

设计方法

0
2

运动学分析

0
3

机器人运动学仿真建模



01 设计方法

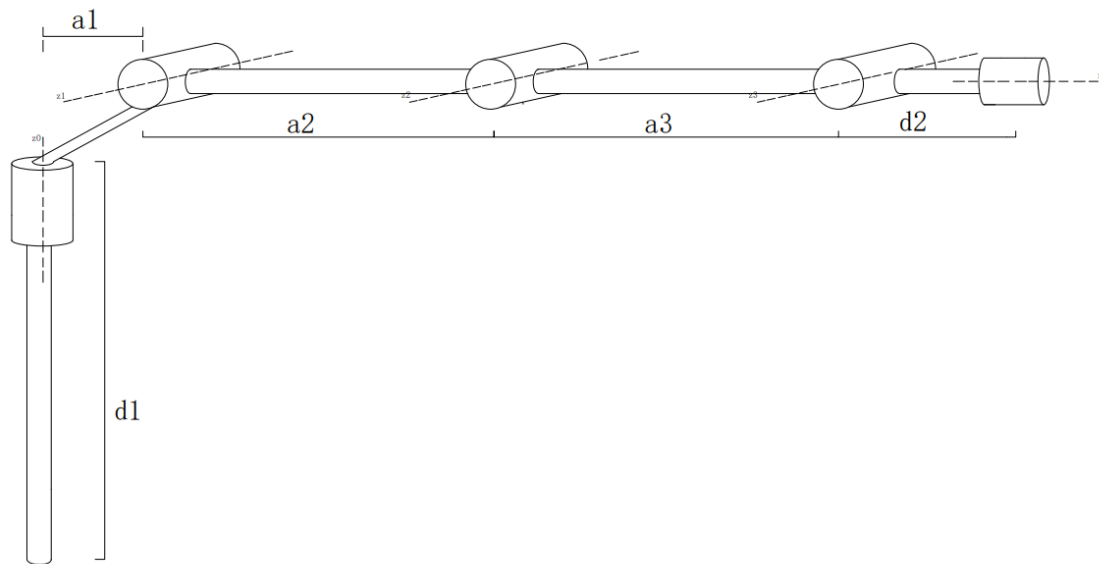


设计方法

- 用途和目的：设计可用于工业装配线生产的操作臂。
- 实现方案：采用刚体连杆设计方案。
- 设计理念：尽可能采用简单、易分析、低成本的机构设计，实现更大的工作空间。
- 首选旋转关节。

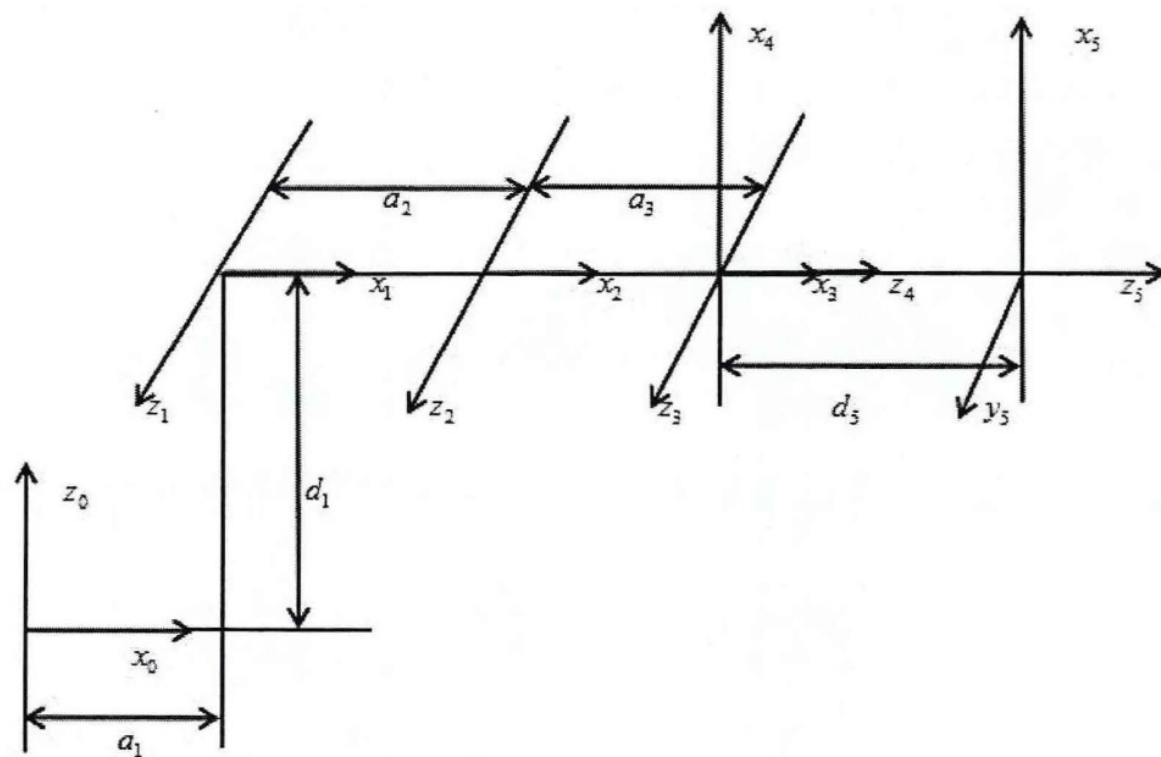
设计

- 串联机器人
- 5自由度
- 6-连杆
- 所有关节都是低副（旋转关节）





坐标系建立



- 优点

成本更低

更易于分
析

更易于控
制

- 缺点

较低的负
载能力

精度较低

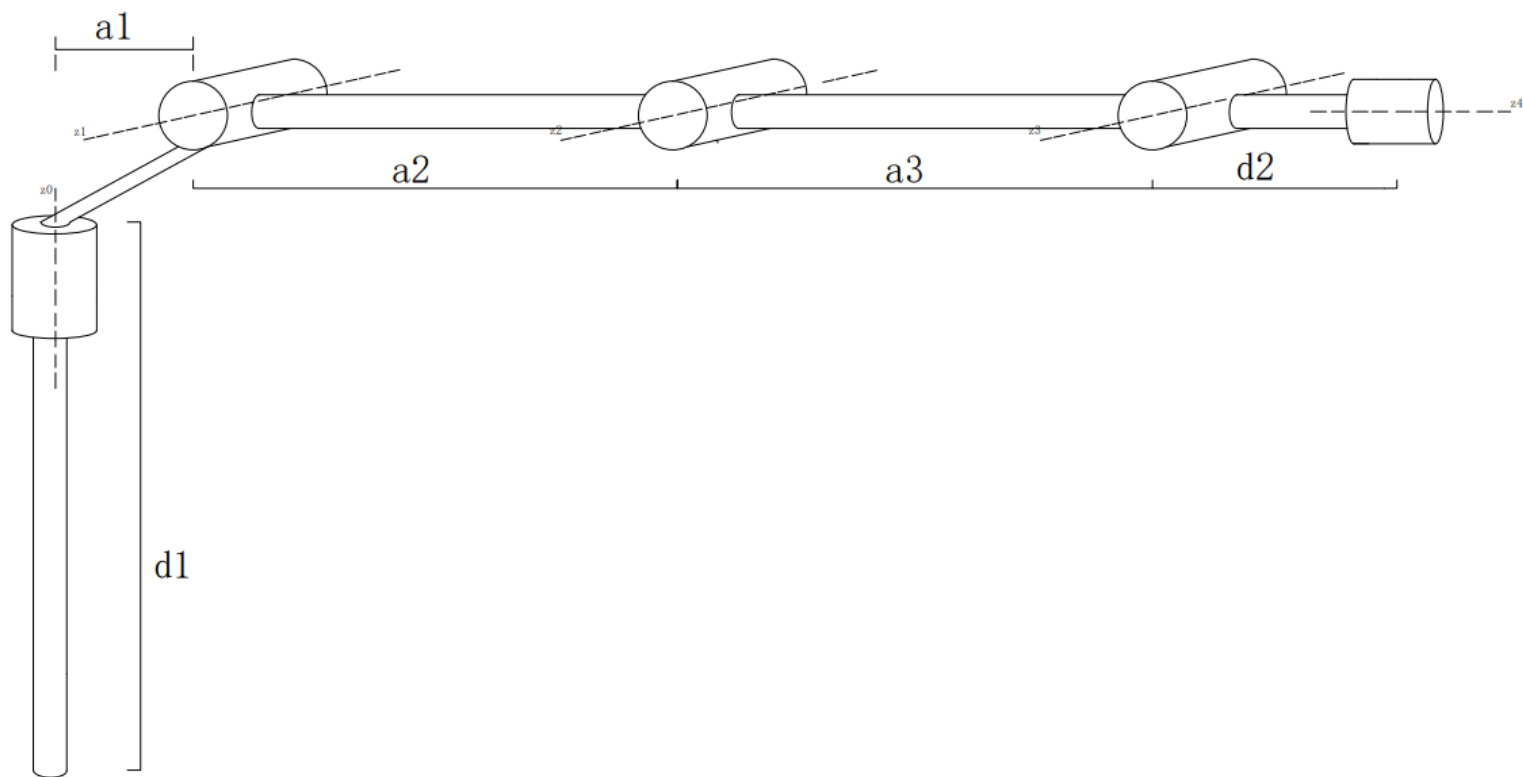
潜在应用

- 生产线：组装、灌装、拆卸、加工等
- 安防领域：排爆车
- 土木工程建设
- 物流与运输工程
- 自动售货机

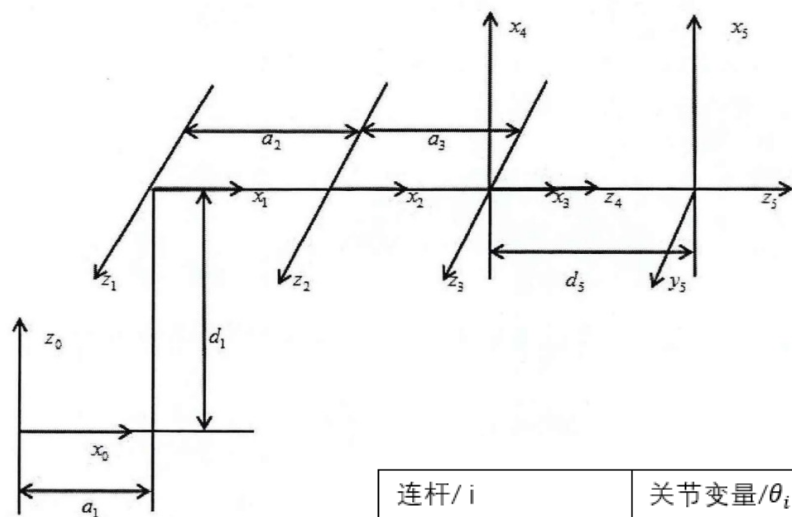


02 运动学分析

CAD 示意图



D-H 表



连杆/ i	关节变量/ $\theta_i(^{\circ})$	杆件扭脚/ $\alpha_i(^{\circ})$	杆件长度/ $a_i(mm)$	偏置量/ $d_i(mm)$
1	θ_1	90	a_1	d_1
2	θ_2	0	a_2	0
3	θ_3	0	a_3	0
4	θ_4	90	0	0
5	θ_5	0	0	d_5



正向动力学

相邻frame 变换矩阵:

$${}^{I-1}_I Y = \begin{bmatrix} C\theta_i & -S\theta_i C\alpha_i & S\theta_i C\alpha_i & a_i C\theta_i \\ S\theta_i & C\theta_i C\alpha_i & -C\theta_i S\alpha_i & a_i S\theta_i \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

0-1 变换矩阵

$${}^0_1 Y = \begin{bmatrix} C_1 & 0 & S_1 & a_1 C_1 \\ S_1 & 0 & -C_1 S\alpha_i & a_1 S_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

1-2 变换矩阵

$${}^1_2 Y = \begin{bmatrix} C_2 & -S_2 & 0 & a_2 C_2 \\ S_2 & C_2 & 0 & a_2 S_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$



正向动力学

0-5 变换矩阵

$${}^0_5T = {}^0_1T(\theta_1){}^1_2T(\theta_2){}^2_3T(\theta_3){}^3_4T(\theta_4){}^4_5T(\theta_5)$$

$${}^2_3Y = \begin{bmatrix} C_3 & -S_2 & 0 & a_3C_3 \\ S_3 & C_2 & 0 & a_3S_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

3-4 变换矩阵

$${}^3_4Y = \begin{bmatrix} C_4 & 0 & -S_4 & 0 \\ S_4 & 0 & -C_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

4-5 变换矩阵

$${}^4_5Y = \begin{bmatrix} C_5 & -S_5 & 0 & 0 \\ S_5 & C_5 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} C_5 & -S_5 & 0 & 0 \\ S_5 & C_5 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

其中:

$$\begin{aligned} S_i &= \sin\theta_i, \quad C_i = \cos\theta_i, \\ C_{23} &= \cos(\theta_2 + \theta_3) = C_2C_3 - S_2S_3, \\ S_{23} &= \sin(\theta_2 + \theta_3) = C_2S_3 + S_2C_3, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} n_x &= (C_1C_{23}C_4 - S_1S_4)C_5 - C_1S_{23}S_5, \\ n_y &= (S_1C_{23}C_4 + C_1S_4)C_5 - S_1S_{23}S_5, \\ n_z &= C_4S_{23}C_5 + C_{23}C_5, \\ o_x &= (C_1C_{23}C_4 - S_1C_4)(-S_5) - C_1S_{23}C_5, \\ o_y &= (S_1C_{23}C_4 + C_1S_4)(-S_5) - S_1S_{23}C_5, \\ o_z &= S_{23}C_4(-S_5) + C_{23}C_5, \\ a_x &= C_1C_{23}S_4 + S_1C_4, \\ a_y &= S_1C_{23}S_4 - C_1C_4, \\ a_z &= S_{23}S_4, \\ p_x &= C_1(a_1 + a_2C_2 + a_3C_{23}), \\ p_y &= S_1(a_1 + a_2C_2 + a_3C_{23}), \\ p_z &= d_1 + a_2S_2 + a_3S_{23} \end{aligned}$$



逆向动力学

代数法

$${}^0_5T = {}^0_1T(\theta_1){}^1_2T(\theta_2){}^2_3T(\theta_3){}^3_4T(\theta_4){}^4_5T(\theta_5)$$

$$= \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\theta_1 = \arctan\left(\frac{p_y}{p_x}\right)$$

$$\theta_3 = \pm \arctan\left(\frac{S_3}{C_3}\right), \quad \text{二解}$$

求解:

$$\theta_4 = \text{atan2}(-a_x S_1 + a_y C_1, a_y C_1 C_{23} - a_y S_1 C_{23} + a_z S_{23})$$

$$\theta_5 = \arctan(S_5, C_5)$$

$$\begin{aligned} & \theta_2 + \theta_3 \\ &= \text{atan2}[-(a_3 + a_2 C_3)p_z + (C_1 p_x + S_1 p_y)(a_2 S_3)p_z + (a_2 S_3)p_z, (a_2 S_3)p_z + (C_1 p_x + S_1 p_y)(a_2 C_3 + a_3)] \end{aligned}$$



03 机器人运动学 仿真建模

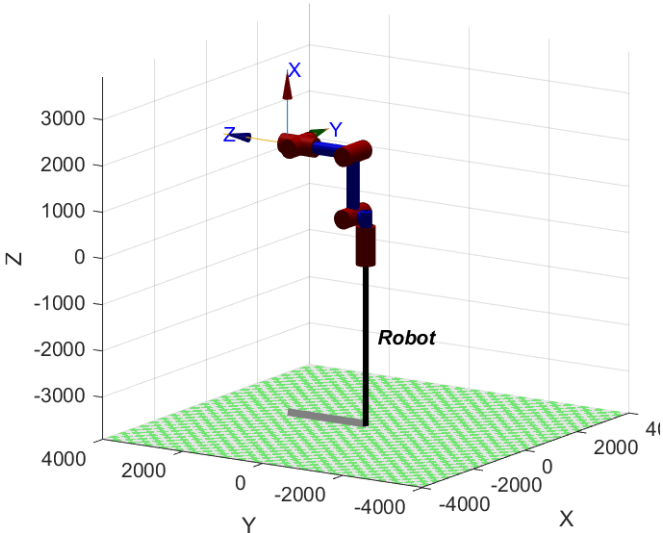


matlab仿真建模

Robot:: 5 axis, RRRRR, stdDH, slowRNE

j	theta	d	a	alpha	offset
1	q1	596	314	1.5708	0
2	q2	0	1350	0	0
3	q3	0	1348	0	0
4	q4	0	0	1.5708	0
5	q5	300	0	0	0

DH 表



仿真三维数学模型



正逆运动学分析

T1 =

0	0	1	3312
0	-1	0	0
1	0	0	596
0	0	0	1

初始值下的运行结果

```
25 q3=Robot.ikine(T2,'mask',[1 1 1 1 0])
26 → Tm= ctraj(T1,T2,50);%组成50个点构成笛卡尔轨迹
27
```

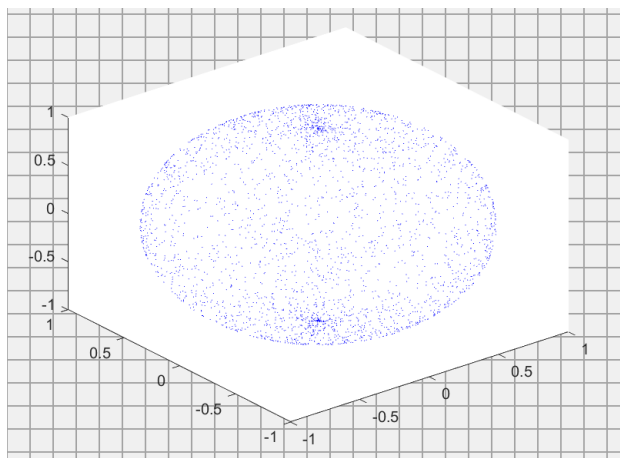
命令行窗口

	0	0	0	1
T2 =				
	0	1	0	0
	0	0	1	1962
	1	0	0	1946
	0	0	0	1
q3 =				
	1.5708	1.5708	-1.5708	1.5708
				0

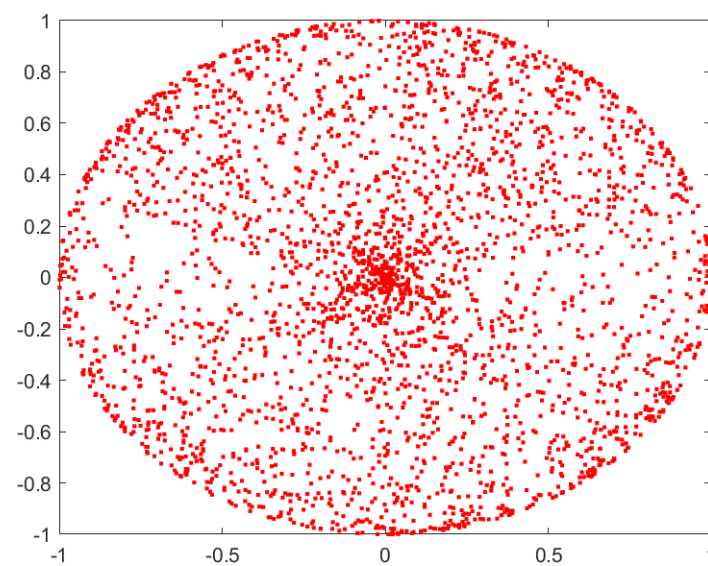
逆运动学方程验证



工作空间分析



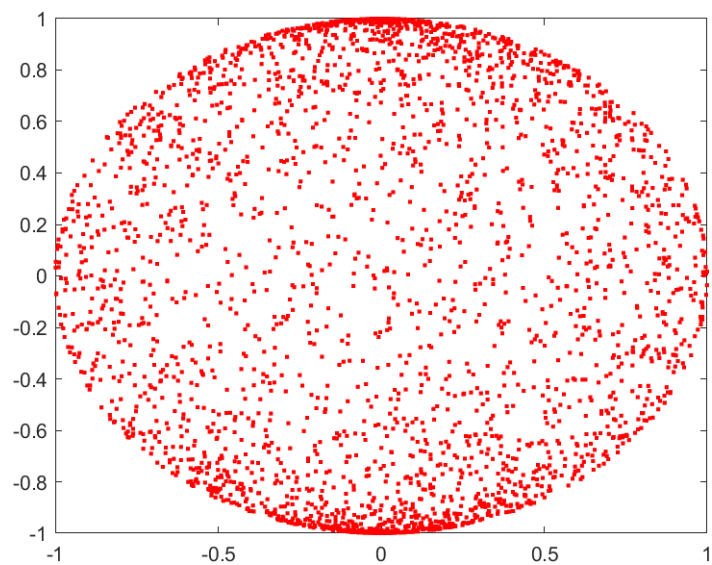
机器人末端可达工作空间范围



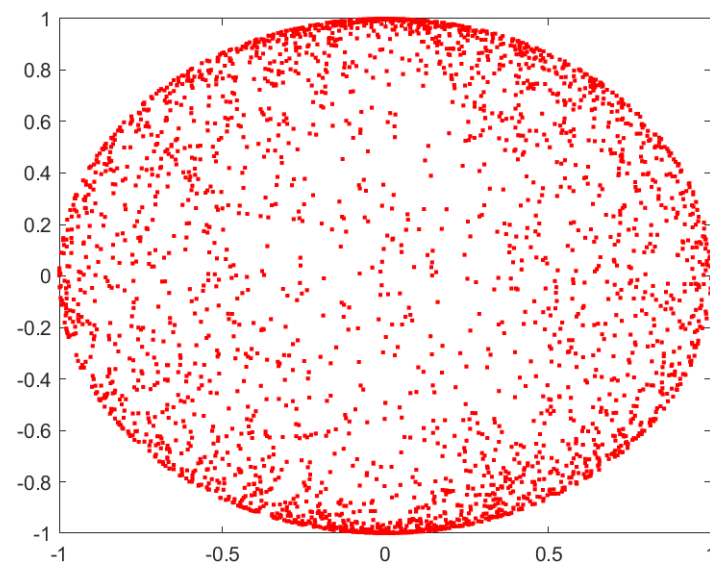
可达工作空间XOY面投影



工作空间分析



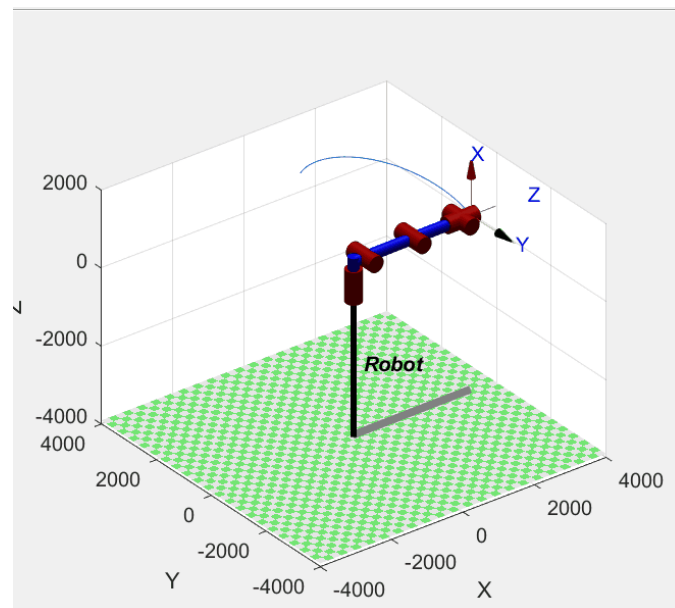
可达工作空间xoz面投影



可达工作空间yoz面投影



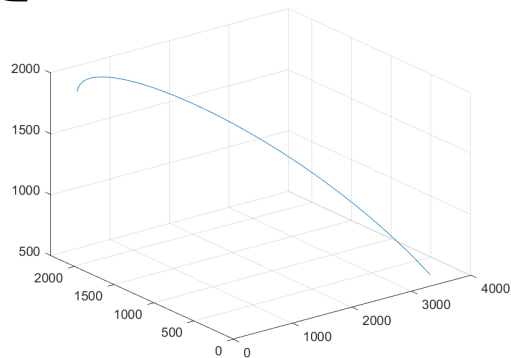
机器人动态轨迹



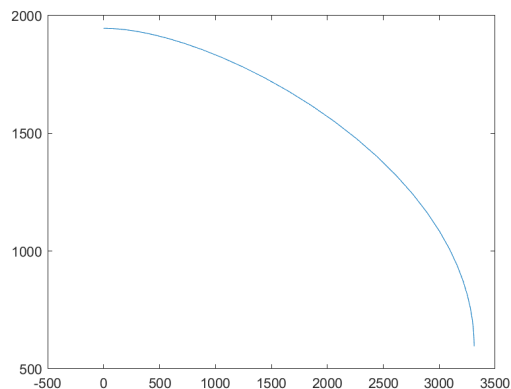
$[0 \ 0 \ 0 \ \pi/2 \ 0] \longrightarrow [\pi/2 \ \pi/2 \ -\pi/2 \ \pi/2 \ 0]$



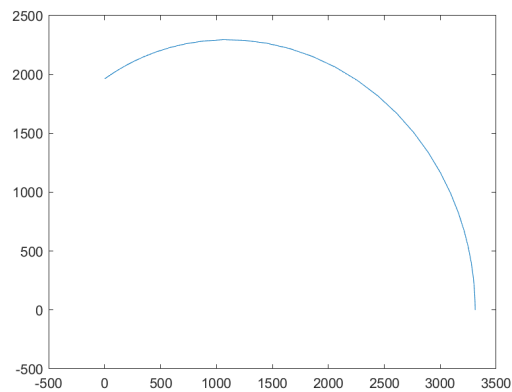
机器人动态轨迹



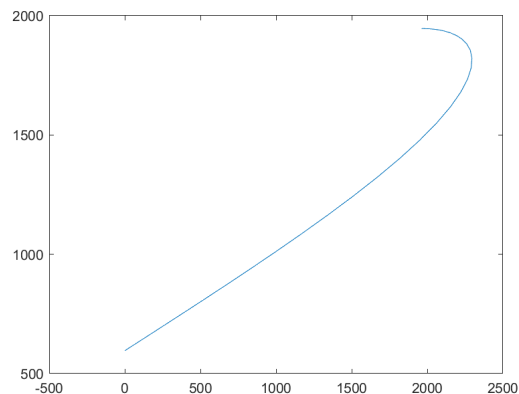
机器人末端轨迹



机器人末端轨迹XOZ投影



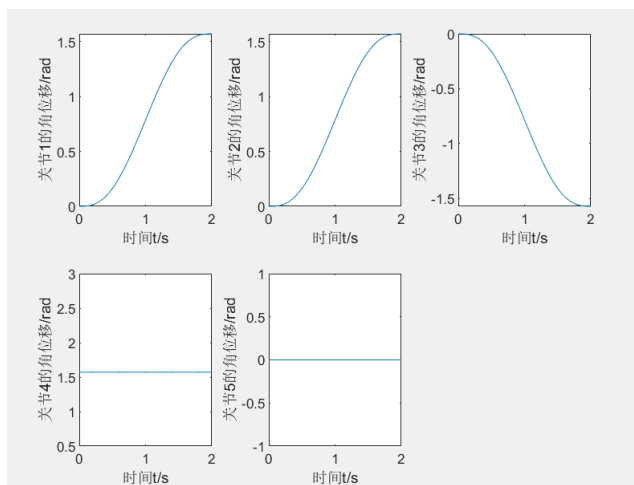
机器人末端轨迹XOY投影



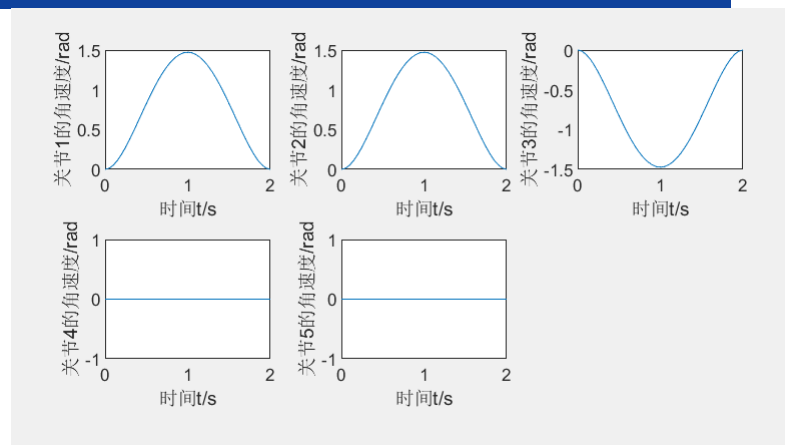
机器人末端轨迹YOZ投影



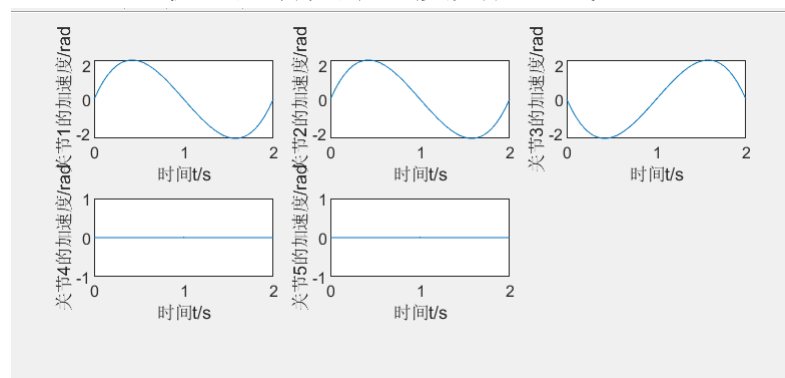
机器人各关节变量运动特性



机器人各关节位移变化曲线



机器人各关节速度变化曲线



机器人各关节加速度变化曲线

Thank You!