



实验 6：机械臂抓取与搬运实验

机器人技术与实践实验报告

课程名称: 机器人技术与实践

小组成员: 金加康 吴必兴 沈学文 钱满亮 赵钰泓

组号: 第三组

指导教师: 周春琳

报告日期: 2025 年 12 月 14 日

目录

小组成员与分工	3
实验 6.1 实验 5 实物操作实验	3
1 实验任务与要求	3
1.1 实验目的	3
1.2 任务要求	3
2 结果与分析	3
2.1 实验结果	3
2.2 结果分析	4
3 实验原理	4
实验 6.2 机械臂抓取与搬运实验	5
1 实验任务与要求	5
1.1 实验目的	5
1.2 任务要求	5
2 结果与分析	5
2.1 实验结果	5
2.2 结果分析	6
3 实验原理	6
3.1 总体规划思路	6
3.2 轨迹规划方法	6
3.2.1 五次多项式轨迹规划	6
3.2.2 直线轨迹规划（三次样条插值）	7
3.2.3 带中间点的三次多项式规划	7
3.3 逆运动学求解	8
4 代码实现	8
4.1 五次多项式轨迹规划	8
4.2 直线轨迹规划	8
4.3 主控制循环	8
实验总结	9

实验 6：机械臂抓取与搬运实验

第 3 组 金加康 吴必兴 沈学文 钱满亮 赵钰泓

小组成员与分工

实验 6.1 实验 5 实物操作实验

§ 1 实验任务与要求

1.1 实验目的

1. 学习并掌握实物机械臂的基本操作方法。
2. 了解机械臂的基本结构和工作原理。
3. 学习使用 Python 语言+串口对机器人进行控制

1.2 任务要求

1. 实现对机械臂的控制
2. 将实验 5 中的轨迹规划程序移植到实物机械臂上运行，完成画圆、画方、圆锥绘制任务

§ 2 结果与分析

2.1 实验结果

通过对 ZJU-I 型机械臂的控制，成功实现了机械臂按照预定轨迹绘制圆形、方形和圆锥的任务。具体结果如下：

Tip

具体实验结果请参考上传的视频文件夹，下图仅展示部分关键帧截图。

1. 机械臂圆形绘制任务

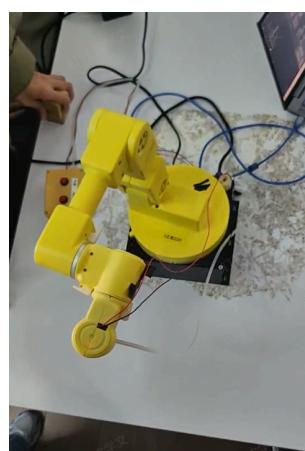


图 1 机械臂绘制圆形过程 1 图 2 机械臂绘制圆形过程 2 图 3 机械臂归位

2. 机械臂正方形绘制任务



图 4 方形过程 1



图 5 方形过程 2



图 6 方形过程 3

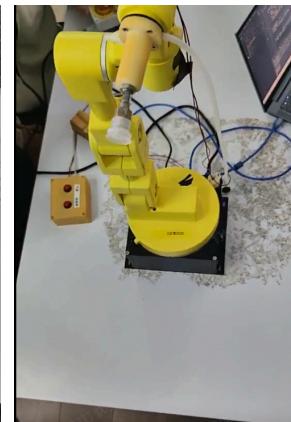


图 7 机械臂归位

3. 机械臂圆锥轨迹绘制任务



图 8 圆锥绘制过程 1



图 9 圆锥绘制过程 2



图 10 圆锥绘制过程 3



图 11 圆锥绘制过程 4

2.2 结果分析

- 对于绘制圆形任务，机械臂能够平滑地沿预定轨迹运动，圆形轮廓清晰，误差较小。
- 在绘制正方形过程中，机械臂在转角处的速度控制较好，能够准确到达各个顶点位置，整体形状符合预期。
- 圆锥绘制任务中，机械臂能够实现从底部到顶部的平滑过渡，圆锥形状明显，显示出良好的轨迹控制能力。

Note

实验过程中，由于圆锥绘制轨迹角度变化较大，因此在经过不断坐标调整和程序优化后，机械臂才可在规定最大旋转角度范围之内顺利完成任务。

§ 3 实验原理

由于实物机械臂的控制只支持位置控制接口，因此本实验主要通过位置控制方式实现轨迹跟踪。具体方法在实验五报告中已经有所阐述，此处不再赘述。

实验 6.2 机械臂抓取与搬运实验

§ 1 实验任务与要求

1.1 实验目的

1. 了解机械臂的轨迹规划方法。
2. 掌握机械臂的逆运动学求解方法。
3. 学习对机械臂的搬运任务进行目标点的选取和轨迹规划

1.2 任务要求

1. 编写程序控制 ZJU-I 型机械臂，实现木块抓取与搬运，具体流程为
 - (1) 机械臂从零位置启动，运行至起始区域；
 - (2) 启动真空吸爪，抓取起始区域内的木块，移动至 A 点 (370, -90, 115)；
 - (3) 移动过程中控制木块从 A 点沿直线路径运动至 B 点 (288, -288, 115)；
 - (4) 控制从 B 点到达目标区域，目标区域位置为机械臂 1 号关节旋转角度 90° 所在位置；
 - (5) 抓取第二个木块放置到目标区域，并堆叠在第一个模块上，二者姿态保持一致。
2. 程序中需要编写正、逆运动学求解代码、轨迹规划代码，要求机械臂无碰撞、所有关节速度平滑。

§ 2 结果与分析

2.1 实验结果

实验成功完成了两个木块的抓取、搬运和堆叠任务：

1. 第一个木块成功从起始位置搬运至目标区域，从 A 点运动到 B 点实现了直线运动。



图 12 机械臂抓取动作

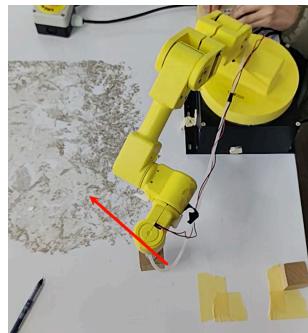


图 13 A 点起始

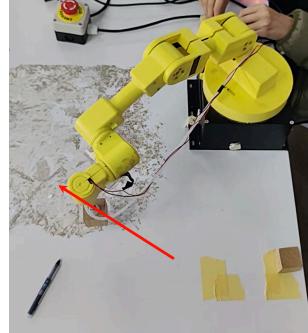


图 14 运动到 B 点

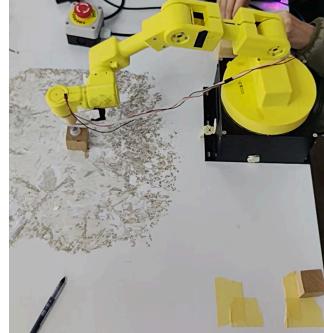


图 15 机械臂放置动作

2. 第二个木块堆叠在第一个木块上方

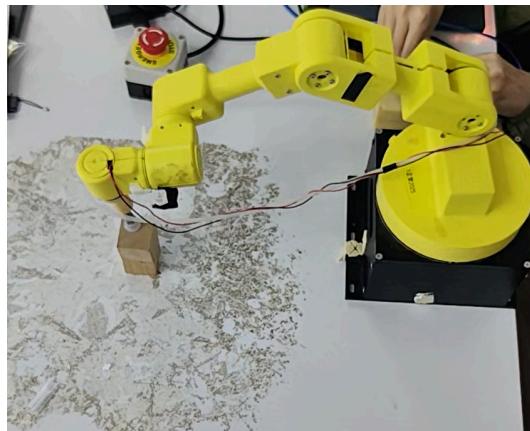


图 16 第二个木块堆叠在第一个木块上方

3. 机械臂运动过程中各关节速度平滑，无碰撞现象。

2.2 结果分析

1. 速度边界条件优化：通过在笛卡尔空间规划速度并利用雅可比矩阵转换到关节空间，实现了直线段前后的平滑过渡。
2. 中间点策略：在返回起始区域时设置中间过渡点，有效避免了关节角的剧烈变化和潜在碰撞。
3. 逆运动学解选择：对于多解情况，选择与当前关节状态最接近且无奇异性的解，保证了运动的连续性。
4. 时间分配合理：各段运动时间根据实际距离和速度限制合理分配，既保证了平滑性又提高了效率。

§ 3 实验原理

3.1 总体规划思路

机械臂操纵物块的过程分为 7 个关键状态，整体流程为：

1. 第一个物块搬运流程：
 - (1) q_0 : 机械臂初始零位姿态。
 - (2) q_1 : 移动到第一个木块上方的抓取位置。
 - (3) q_A : 抓取后移动至点 $A(370, -90, 115, \pi, 0, -\frac{\pi}{2})$ 。
 - (4) q_B : 沿直线运动至点 $B(288, -288, 115, \pi, 0, -\frac{\pi}{2})$ 。
 - (5) q_7 : 移动至目标区域上方的过渡点。
 - (6) q_2 : 放置第一个木块于目标位置。
2. 第二个物块搬运流程：
 - (1) $q_2 \rightarrow q_7$: 返回目标区域上方的过渡点。
 - (2) $q_7 \rightarrow q_{7'}$: 将关节 1 旋转 -90° 调整姿态。
 - (3) $q_{7'} \rightarrow q_3^{\text{up}} \rightarrow q_3$: 通过中间点避免碰撞，到达第二个木块位置。
 - (4) $q_3 \rightarrow q_6 \rightarrow q_A$: 抓取第二个木块并移动至染色池入口。
 - (5) $q_A \rightarrow q_B$: 沿直线运动通过染色池。
 - (6) $q_B \rightarrow q_5 \rightarrow q_4$: 移动至第一个木块上方并堆叠放置。

3.2 轨迹规划方法

3.2.1 五次多项式轨迹规划

五次多项式共有六个参数 $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$ ，通过给定的初始位置、初始速度、初始加速度、目标位置、目标速度、目标加速度，可以求解出这六个参数，从而得到一个五次多项式函数。该函数可以保证关节位置、速度、加速度的平滑性。

1. 五次多项式的形式：

$$\begin{cases} \theta(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4 + a_5 t^5 \\ \dot{\theta}(t) = a_1 + 2a_2 t + 3a_3 t^2 + 4a_4 t^3 + 5a_5 t^4 \\ \ddot{\theta}(t) = 2a_2 + 6a_3 t + 12a_4 t^2 + 20a_5 t^3 \end{cases} \quad (1)$$

2. 约束条件：

$$\begin{cases} \theta(0) = \theta_0, \dot{\theta}(0) = \dot{\theta}_0, \ddot{\theta}(0) = \ddot{\theta}_0 \\ \theta(T) = \theta_T, \dot{\theta}(T) = \dot{\theta}_T, \ddot{\theta}(T) = \ddot{\theta}_T \end{cases} \quad (2)$$

3. 矩阵形式：

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ T^5 & T^4 & T^3 & T^2 & T & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 5T^4 & 4T^3 & 3T^2 & 2T & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 20T^3 & 12T^2 & 6T & 2 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_5 \\ a_4 \\ a_3 \\ a_2 \\ a_1 \\ a_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \theta_0 \\ \theta_T \\ \dot{\theta}_0 \\ \dot{\theta}_T \\ \ddot{\theta}_0 \\ \ddot{\theta}_T \end{pmatrix} \quad (3)$$

本实验中，在 A、B 两点设置了非零的速度边界条件，以保证机械臂在直线段前后的运动更加连续平滑。具体做法是在笛卡尔空间中规划速度，然后用雅可比矩阵将其转化为关节空间的速度。

3.2.2 直线轨迹规划（三次样条插值）

为保证物块在染色池中的直线运动，采用在笛卡尔空间进行三次样条插值的方法。给定起点位姿 \mathbf{p}_A 、终点位姿 \mathbf{p}_B 和运动时间 T ，在笛卡尔空间生成 1000 个等间距插值点：

$$\mathbf{p}(t_i) = \mathbf{p}_A + (\mathbf{p}_B - \mathbf{p}_A) \cdot \frac{i}{N}, \quad i = 0, 1, \dots, N-1 \quad (4)$$

对每个笛卡尔位姿 $\mathbf{p}(t_i) = [x, y, z, r_x, r_y, r_z]^T$ ，利用逆运动学求解器求解对应的关节角：

$$\boldsymbol{\theta}(t_i) = \text{IK}(\mathbf{p}(t_i)) \quad (5)$$

然后利用 `move()` 函数直接驱动机械臂到达各关节角位置，实现笛卡尔空间的直线运动。

3.2.3 带中间点的三次多项式规划

当机械臂从目标区域返回起始区域时，为避免关节角的剧烈变化和碰撞，设置了中间过渡点。采用两段三次多项式规划，确保在中间点处速度和加速度连续。

1. 两段三次多项式的形式：

$$\begin{cases} \theta_1(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 \\ \theta_2(t) = a_4 + a_5 t + a_6 t^2 + a_7 t^3 \end{cases} \quad (6)$$

2. 约束条件：

$$\begin{cases} \theta_1(0) = \theta_0, \dot{\theta}_1(0) = \dot{\theta}_0 \\ \theta_1(T_1) = \theta_{\text{mid}}, \theta_2(0) = \theta_{\text{mid}} \\ \theta_2(T_2) = \theta_{\text{end}}, \dot{\theta}_2(T_2) = \dot{\theta}_{\text{end}} \\ \dot{\theta}_1(T_1) = \dot{\theta}_2(0), \ddot{\theta}_1(T_1) = \ddot{\theta}_2(0) \end{cases} \quad (7)$$

3.3 逆运动学求解

本实验采用自主编写的逆运动学求解器，基于 DH 参数和几何方法求解。求解器输入为末端执行器的位姿 $[x, y, z, \alpha, \beta, \gamma]$ ，输出为所有可能的关节角解。

关键步骤：

1. 根据末端位姿计算姿态矩阵的方向向量 $\mathbf{n}, \mathbf{o}, \mathbf{a}$ 。
2. 求解关节 1 角度 θ_1 : 利用几何关系 $\theta_1 = \arctan2(A, B) - \arctan2(d_4, \pm\sqrt{A^2 + B^2 - d_4^2})$ 。
3. 求解关节 5 角度 θ_5 : $\theta_5 = \arcsin(a_y \cos \theta_1 - a_x \sin \theta_1)$ 。
4. 求解关节 6 角度 θ_6 : 利用姿态约束。
5. 求解关节 3 角度 θ_3 : 利用位置约束 $\theta_3 = \arccos\left(\frac{E^2 + F^2 - a_2^2 - a_3^2}{2a_2 a_3}\right)$ 。
6. 求解关节 2 角度 θ_2 和关节 4 角度 θ_4 : 利用几何关系。

逆运动学求解器会返回多组解（最多 8 组），在实际应用中选择最接近当前关节状态且无奇异性的解。

§ 4 代码实现

本实验的核心代码包括三个主要模块：轨迹规划、逆运动学求解和主控制循环。

4.1 五次多项式轨迹规划

通过构建时间矩阵和边界条件矩阵，求解五次多项式系数：

```
1 def quinticCurvePlanning(qStart, qEnd, vStart, vEnd, duration):
2     timeMatrix = np.matrix([[0, 0, 0, 0, 0, 1],
3                             [T**5, T**4, T**3, T**2, T, 1],
4                             [0, 0, 0, 0, 1, 0],
5                             [5*T**4, 4*T**3, 3*T**2, 2*T, 1, 0],
6                             [0, 0, 0, 2, 0, 0],
7                             [20*T**3, 12*T**2, 6*T, 2, 0, 0]])
8     qMatrix = np.matrix([qStart, qEnd, vStart, vEnd, zeros, zeros]).T
9     return timeMatrix.I * qMatrix # Coefficient matrix
```

Python

4.2 直线轨迹规划

在笛卡尔空间生成 1000 个插值点，通过逆运动学求解对应的关节角序列：

```
1 def splinePlanning(startPos, endPos):
2     spline_points = [(startPos + (endPos - startPos) * i / 1000)
3                       for i in range(1000)]
4     return [iks.solve(np.append(p, [pi, 0, -pi/2]))[:, 2]
5            for p in spline_points]
```

Python

4.3 主控制循环

根据时间窗口判断当前应执行的轨迹段，计算关节角并发送给机械臂：

```
1 while t < t_tot:  
2     if t_points['1A'][0] <= t < t_points['1A'][1]:  
3         q = quinticCurveExcute(planners['1A'], t - t_points['1A'][0])  
4     elif t_points['AB'][0] <= t < t_points['AB'][1]:  
5         q = splineExcute(planners['AB'], t - t_points['AB'][0])  
6     # ... Other trajectory segments  
7  
8     r.syncMove(q)  
9     t += 0.02 # 20ms control period
```

Python

实验总结

本实验成功实现了机械臂的轨迹规划任务、机械臂的抓取与搬运任务，主要成果包括：

1. 掌握了五次多项式和三次样条插值两种轨迹规划方法，理解了它们在不同场景下的应用优势。
2. 实现了自主编写的逆运动学求解器，能够准确求解给定末端位姿对应的关节角，为轨迹规划提供了基础。
3. 学会了合理设置速度边界条件和中间过渡点，实现了平滑且高效的运动轨迹。
4. 完成了从理论到实践的完整流程，包括任务分析、轨迹规划、代码实现和实验验证。

通过本次实验，深入理解了机器人轨迹规划的原理和方法，掌握了实际编程实现的技巧，为后续更复杂的机器人控制任务打下了坚实基础。