

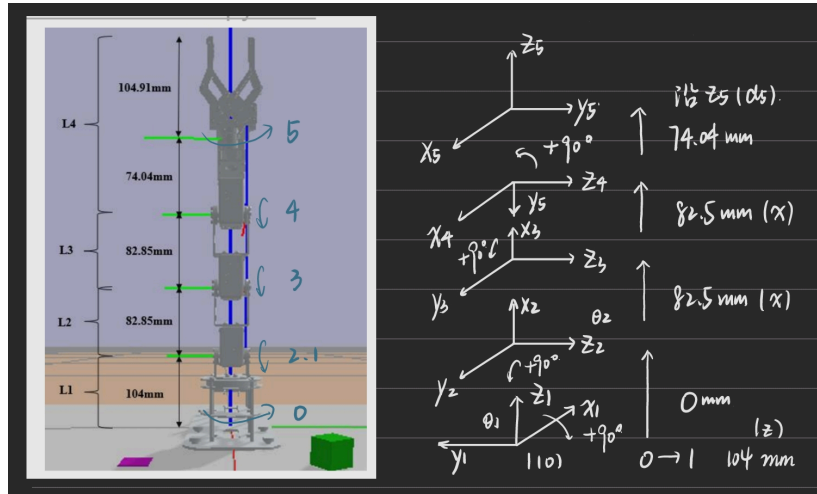
# 机器人学大作业报告

电院 2283 522030910158 宋源<sup>①</sup>

December 5, 2024

## 1 机械臂仿真部分

首先根据机械臂建立 DH 参数，建系方式如下：对应的 DH 参数为

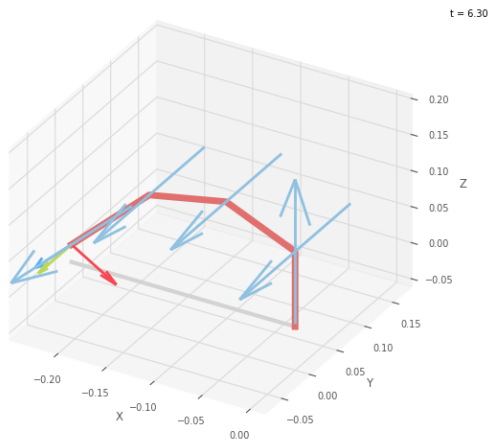


i	$a_{i-1}$	$\alpha_{i-1}$	$d_i$	$\theta_i$
1	0	0	$l_1$	$\theta_1$
2	0	$90^\circ$	0	$90^\circ + \theta_2$
3	$l_2$	0	0	$\theta_3$
4	$l_3$	0	0	$90^\circ + \theta_4$
5	0	$90^\circ$	$l_4$	$\theta_5$

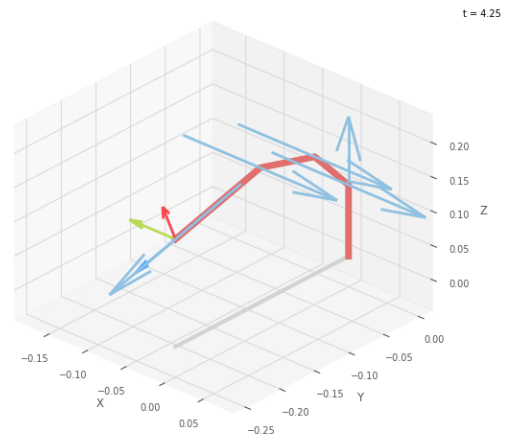
$a_{j-1}$	$\alpha_{j-1}$	$\theta_j$	$d_j$
0	0.0°	q1	0.104
0	89.99999846476551°	q2 + 90°	0
0.08285	0.0°	q3	0
0.08285	0.0°	q4 + 90°	0
0	89.99999846476551°	q5	0.12842

### 1.1 Part1: 求解正运动学

参考 part1 demo 代码，求出正运动学姿态仿真和 DH 矩阵分别如下：



(a) demo1-0



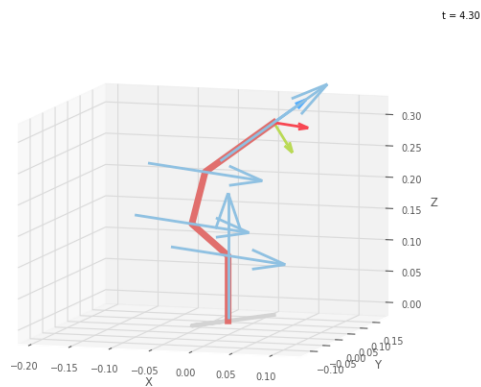
(b) part1-1

```
demo0:
  0.7771    1.686e-08 -0.6293    -0.2326
 -1.686e-08 -1        -4.762e-08 -5.58e-09
 -0.6293    4.762e-08 -0.7771    0.02418
  0         0         0         1
```

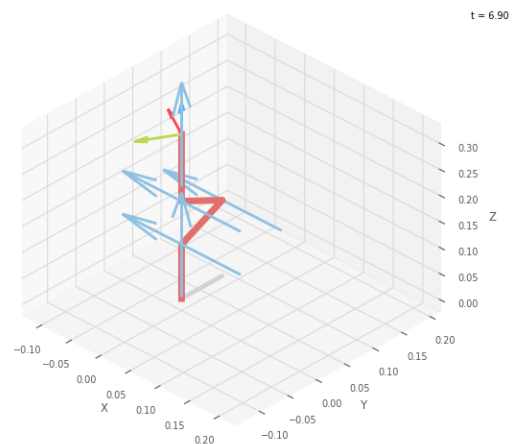
(c) demo1-0

```
part1:
  1.983e-08 -1        9.592e-09 -4.666e-09
 -0.309     -1.525e-08 -0.9511    -0.2496
  0.9511     1.589e-08 -0.309     0.1569
  0         0         0         1
```

(d) part1-1



(e) part1-2



(f) part1-3

```
part2:
  0.866     0.25     0.433     0.03704
 -0.5       0.433     0.75      0.06415
  3.66e-08 -0.866     0.5       0.3068
  0         0         0         1
```

(g) part1-2

```
part3:
 -0.866     -0.5       0         2.22e-09
  0.5       -0.866    -5.359e-08 -9.102e-09
  2.679e-08 -4.641e-08 1         0.3153
  0         0         0         1
```

(h) part1-3

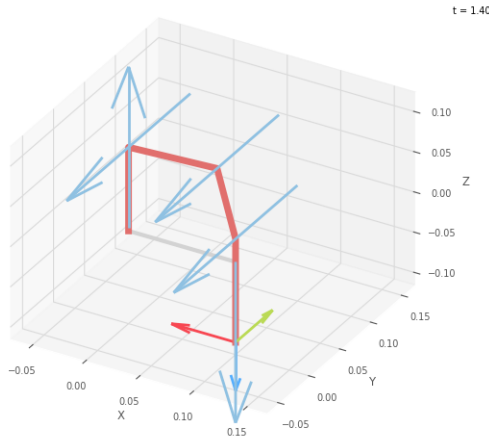
Figure 1: Part1 正运动学结果

## 1.2 Part2: 求解逆运动学

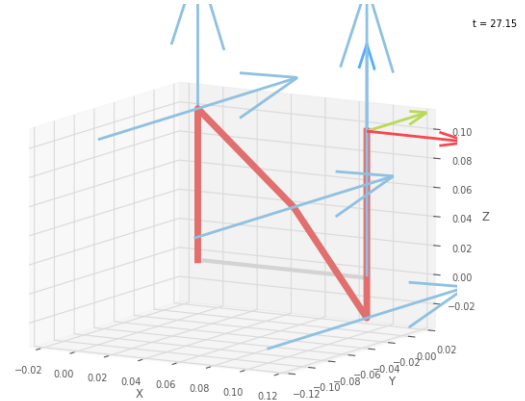
参考 part2 demo 代码，构建余下三个逆运动学的计算。需注意 roboticstoolbox.DHRobot.ik\_LM 函数使用迭代收敛的方式计算关节角度，关节初始值设置不同会影响结果，所以在 2 和 3 中，初始值设置为 0，详细请见代码。得到结果见下一页（均转化为角度制）：

```
ikine0: [-8.27799748e-03 -8.62187906e+01 -8.17460193e+01 -1.20351482e+01
1.79991727e+02]
ikine1: [-1.79999521e+02 1.37138992e+02 1.16040276e+01 -1.48742449e+02
-4.81675757e-04]
ikine2: [-21.13284743 66.40888812 -37.25028293 120.85879292 33.19620406]
ikine3: [ 59.99998548 -44.67730933 59.47902577 45.19821539 -90.00035872]
```

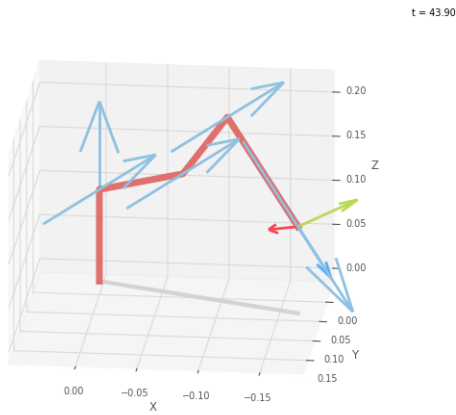
(a) part2-ikine



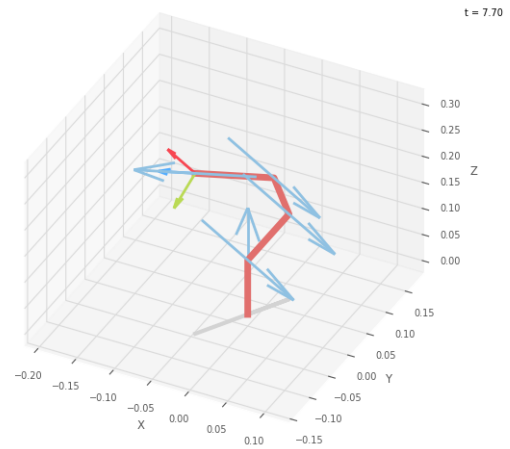
(b) demo2-0



(c) demo2-1



(d) demo2-2



(e) demo2-3

Figure 2: Part2 逆运动学结果

### 1.3 Part3: 绘制工作空间

采用随机采样，在每个关节可达范围内，对每个关节随机取值，共形成 1000 个点，使用 Python 的 matplotlib.pyplot 库绘制图像。具体代码见文件。

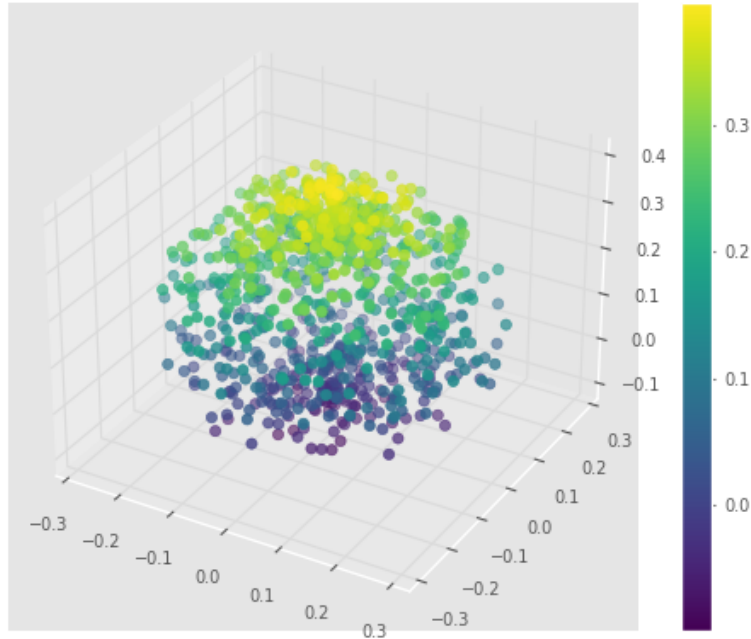


Figure 3: 机械臂工作空间

### 1.4 Pybullet: 仿真物块抓取

机器人操作臂 DH 建系方式与先前保持相同，在每个位置添加适当的 offset，更有助于物体的夹取。

采用有限自动机的方式，将物块抓取分为如下几个状态之间的转移和对应的状态转移判据：

- 初始状态  $INITIAL\_STATE = 0$ ：机械臂处于起始位置。状态转移判据为到达目标抓取位置一定范围内。
- 抓取状态  $GRASP\_STATE = 1$ ：机械臂处于物块初始位置并准备抓取。状态转移判据为已抓取物体两秒。
- 提升状态  $LIFT\_STATE = 2$ ：机械臂已抓取到物块并延  $z$  方向提升 2cm。状态转移判据为到达目标提升位置一定范围内。
- 放置状态  $PUT\_STATE = 3$ ：此状态代码内提供，但无需使用。
- 移动状态  $MOVE\_STATE = 4$ ：机械臂将物块移动到目标放置位置。状态转移判据为到达目标放置位置一定范围内。
- 返回状态  $BACK\_STATE = 5$ ：机械臂放下物块并松开。该状态仅会自转移。判据为到达松开抓夹的目标位置一定范围内。

在每个状态下，通过不断获取关节变量，检查是否满足相关的转移判据，并根据当前状态和目标位置计算新的关节变量，施加对应的控制指令，直到到达标定位置结束程序。具体见代码文件及注释，详细过程见视频文件。

## 2 实机演示

我们接下来进行实际操作。操作平台选择的是 VMware+ubuntu20.04. 性能十分堪忧。此外，机器人操作系统也选择的是古老的 ros\_neo，而不是新的 ros2. 对于 mac 用户不友好。

### 2.1 路径规划和抓取策略

#### 2.1.1 路径规划

在本次实验中，机械臂的路径规划采用线性插值方法。线性插值路径规划的主要思想是通过计算起始点与目标点之间的直线上的一系列中间点，逐步移动机械臂的关节至目标位置。这种方法简洁易实现，适用于需要快速规划路径的场景。实现步骤：

1. 起始位置和目标位置设置：确定机械臂抓取物块的初始位置和放置物块的目标位置。
2. 插值点计算：将起始位置和目标位置之间的关节角度进行分段，生成多个中间关节角度点和线性插值段。
3. 逐步执行关节角度指令：依次发送插值得到的关节角度指令，控制机械臂运动。

该方法实现简单，计算速度快。路径较为直接。但是问题在于每次运动过程中都会有一定的机械臂震动问题，多次运动可能导致机械臂在运动过程中产生较大的震动和误差。

#### 2.1.2 抓取策略

本次实验的抓取策略分为标定抓取和分阶段执行两个步骤，以确保机械臂能够准确抓取并放置物块。实现步骤：

1. 标定抓取所需的关节空间数据：通过初始标定，获取机械臂抓取物块所需的准确关节角度数据，包括抓取位置和放置位置。并记录各个关节在抓取过程中的关键角度，以便后续的分阶段执行。
2. 分阶段执行抓取任务：
  1. 机械臂从初始位置移动到物块上方，执行抓取动作，将物块夹持住。
  2. 机械臂将物块移动到目标放置位置上方。
  3. 机械臂执行放置动作，将物块释放到目标位置。
  4. 机械臂张开夹爪返回。

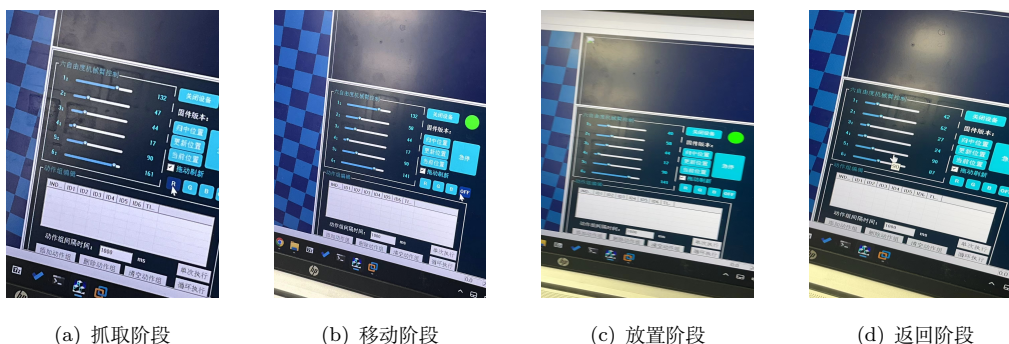


Figure 4: 机械臂操作对应的关节参数记录数据

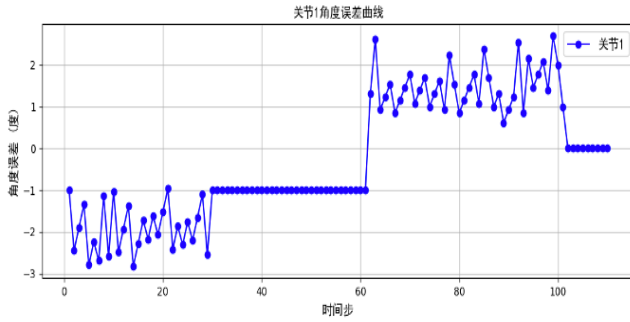
抓取策略采用了分阶段执行，可以降低单次动作的复杂性，减少误差积累。初始标定有助于得到准确的关节角度，提高抓取的可靠性。但是实现过程中需要对每个阶段的关节角度进行精确控制。如果标定数据不准确，可能导致抓取失败。

## 2.2 机械臂关节空间数据采集策略

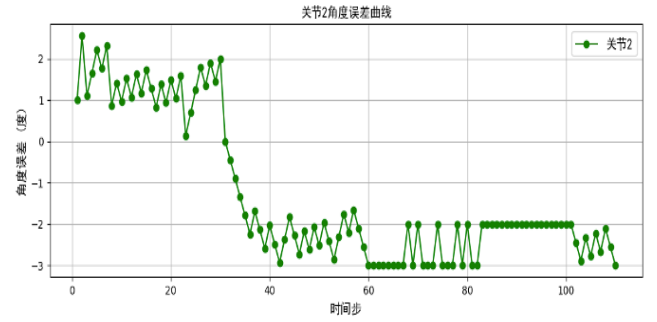
在本次实验中，机械臂的关节空间数据采集主要通过打印输出的方式实现。在机械臂执行路径规划和抓取策略的过程中，每个关节的目标角度和实际角度通过代码中的 `print` 语句实时输出到控制台，以便于后续的数据记录和误差分析。

## 3 关节空间目标位置与实际位置的角度误差分析

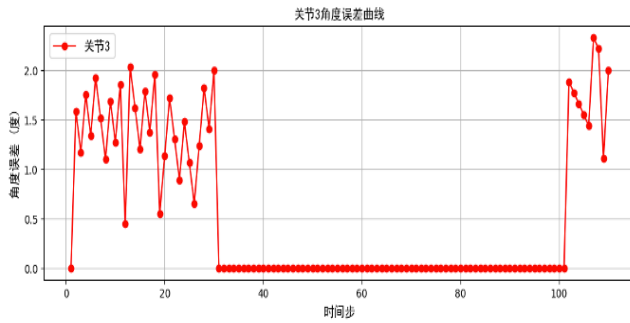
在本次实验中，通过记录机械臂各关节的目标位置与实际位置的角度变化，绘制了五个关节（除夹爪外）的角度误差曲线。以下是误差分析的详细内容。



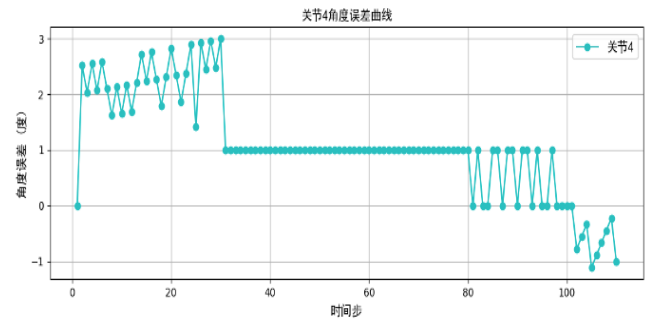
(a) 关节 1



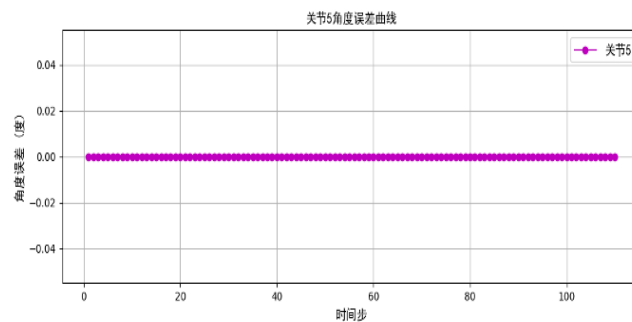
(b) 关节 2



(c) 关节 3



(d) 关节 4



(e) 关节 5

Figure 5: 各个关节的误差曲线

### 3.1 存在误差的原因

控制系统误差来源：

1. 控制算法的精度有限，可能存在微小的计算误差，导致实际关节角度与目标角度存在差异。

2. 机械臂关节角度的实际位置通常通过传感器反馈，传感器难免会受到环境影响产生噪声，噪声会导致测量误差。
3. 关节驱动执行器的响应存在延迟，且执行精度不高，会导致目标角度与实际角度之间产生偏差。
4. 机械臂的结构本身具有刚度限制，也存在一定的摩擦力和空气阻力等，这会影响关节运动的准确性，容易产生位置误差。
5. 控制算法的响应速度与机械系统的动态特性会有轻微的差别，导致控制信号滞后和延迟，产生位置误差。

总的来说，关节空间目标位置与实际位置的误差主要来源于控制系统的精度限制、传感器和执行器的噪声与不精确性，以及机械系统本身的结构特性。这些因素共同作用，导致实际关节角度无法完全精确地达到目标角度。

### 3.2 机械臂的运动与误差间的相关联系

误差曲线形状分析：

1. 当机械臂处于某个固定目标位置时，误差曲线呈现恒定值，也就是系统的静态偏移。这通常由系统的偏置误差或控制算法的固定偏差引起。例如可以看到关节 1、3、4 在夹持的途中均出现过一段基本恒定的误差曲线。而关节 5 由于不进行运动所以误差恒定为 0。
2. 在机械臂快速移动或变换方向时，误差曲线会出现波动或振荡。这与控制算法的响应速度、系统的惯性和阻尼特性密切相关。快速运动容易引发系统的超调和振荡，导致短期内的较大误差。例如在机械臂运行的前半段时间，关节 1、2、3、4 均呈现出不同程度的误差振荡，而这是因为机械臂正在弯曲和旋转来夹持物体。而后半段时间机械臂旋转和放下物体时这种振荡再度出现。
3. 机械臂旋转的方向不同，造成的误差也会相反，例如可以看到在机械臂运行的前半段和后半段，关节 1 和关节 4 都呈现了相反方向的误差（从正到负或从负到正），这是因为机械臂移动到夹持的位置和移动到放下的位置的旋转方向不同。而旋转的过程也会导致关节 2、关节 3 产生误差。

通过分析误差曲线的形状，可以有效诊断机械臂控制系统中存在的问题，并针对性地进行优化调整，以提高系统的控制精度和稳定性。

### 3.3 减小关节空间误差

为了减小机械臂关节空间目标位置与实际位置之间的误差，可以采取以下方法：

- 优化控制算法：可以通过调节比例、积分、微分增益，提高控制系统的响应速度和稳定性，减少超调和稳态误差。引入前馈和反馈控制，结合模型预测，提前补偿系统的动态特性，提高控制精度。
- 提高系统硬件精度：使用更高精度的编码器和传感器，减少测量噪声和误差。采用精度更高、响应速度更快的执行器，减少执行误差和动态响应迟滞。
- 机械结构改进：优化机械臂的结构设计，增加关节和链接的刚度，减少因结构松弛引起的误差。采用低摩擦材料或润滑油等润滑措施，提升关节运动的平滑性和精确性。
- 使用多组传感器进行关节角度的双重监测，结合传感器融合算法，提高测量的可靠性和准确性。
- 软件滤波与信号处理：对传感器信号进行滤波处理，去除高频噪声，提升信号的信噪比。

通过综合运用上述方法，可以有效减小机械臂关节空间的控制误差，提高系统的控制精度和任务执行的可靠性。

## 4 附录

- 仿真部分所有具体代码和演示在 demo 文件夹中。
- 实机部分所有具体代码和实机演示在 real 文件夹中。