

- 移动机器人规划与控制大作业报告
 - 一、文档作业
 - 题目 1：四元数姿态表示与绘制
 - 计算思路
 - 题目 2
 - 一、A* 轨迹规划的启发式与路径简化
 - 1. 现有 tie_breaker 对拓展顺序和路径平滑性的影响
 - 2. 想让无人机更偏好“平面飞行”该怎么改？
 - 3. pathSimplify 的 path_resolution 太大或太小会怎样？
 - 二、SO(3) 位置控制器的力姿态生成
 - 1. 各项在飞行中的作用
 - 2. 为什么在大误差或噪声大时要截断/限幅 ka？
 - 3. 换更重的机体，怎样调质量 mass 与 kx/kv？
 - 4. 对推力大小、姿态角度和稳定性的影响
 - 三、动力学建模与约束
 - 1. 质量、惯量与气动阻尼建模对控制分配的影响
 - 2. 加入气动阻尼应在控制层还是规划层实现？
 - 二、代码作业
 - 任务一：补全四旋翼飞机的动力学模型
 - 1. 平动动力学
 - 2. 转动动力学
 - 3. 姿态更新
 - 任务二：补充无人机的前端规划模块
 - STEP 1.1：补全启发式函数
 - STEP 1.2：补全 A* 算法主循环
 - STEP 1.3：追溯找到的路径
 - 实验结果

移动机器人规划与控制大作业报告

一、文档作业

题目 1：四元数姿态表示与绘制

计算思路

题目已给出：

$${}^B R_D(t) = \begin{bmatrix} \cos \omega t & -\sin \omega t \cos \alpha & \sin \omega t \sin \alpha \\ \sin \omega t & \cos \omega t \cos \alpha & -\cos \omega t \sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}$$

将矩阵转换为四元数。末端执行器在世界系下的姿态由两段旋转相乘得到：

$$q_{WD}(t) = q_{WB}(t) \otimes q_{BD}(t)$$

计算得到的四元数需进行归一化，并强制保证 `q_w > 0`，以避免符号跳变导致曲线不连续。

根据上述思路写出 MATLAB 代码，随后将其四个分量随时间绘制，即得到末端执行器在世界坐标系下的四元数变化曲线。

题目 2

一、A* 轨迹规划的启发式与路径简化

1. 现有 tie_breaker 对拓展顺序和路径平滑性的影响

- 对开集拓展顺序

当两个节点的 g 值相近时，离目标直线更近、启发值 h 更小的节点会更快被取出拓展。这会减少在起点附近和局部区域的横向试探，更多地沿着“朝向终点”的方向扩展，使得扩展区域更“瘦”，搜索节点数减少。

- 对路径平滑性的影响

在普通、未放大的启发函数下，很多 f 值相近的候选节点会被交替拓展，容易走出“一个格向东、一个格向北”的“之”字形路径。

轻微放大启发值后，靠近“直线”方向的节点在 f 值上更有优势，于是搜索更偏向直线，得到的离散路径“折线角度更小”，弯来弯去的“走之”现象减弱，路径更平滑、更接近直线。

2. 想让无人机更偏好“平面飞行”该怎么改？

- 应尽量减少不必要的高度变化，优先在同一高度层上飞行。可以在 `AstarGetSucc` 中对含有垂直分量的移动额外加权（例如增加代价）。

3. `pathSimplify` 的 `path_resolution` 太大或太小会怎样？

- `path_resolution` 过大

很多中间 waypoint 被删掉，只剩下少数关键点，得到长直线 + 大转角的粗路径。这些直线有可能贴着障碍边缘走，甚至直线本身穿过障碍附近的狭窄区域。理论上算法保证离原离散路径偏差不超过 `path_resolution`，但当原路径本身就贴得很近时，这个偏差足以越界。

- `path_resolution` 过小

Douglas-Peucker 算法很少删除点，路径几乎保持原始 A* 栅格路径，节点很密、折线很多。

路径虽然完全在空闲栅格里，但几乎每一两个栅格就要拐一次方向。

节点过多也增加轨迹优化/跟踪算法的计算负担，实时性变差，间接影响安全性。

二、 $\text{SO}(3)$ 位置控制器的力姿态生成

1. 各项在飞行中的作用

- `kx` · 位置误差：主要的位置刚度来源。
- `kv` · 速度误差：提供速度阻尼。
- `mass` · `des_acc`：使得理想情况下能准确跟踪参考轨迹。
- `mass` · `ka` · (`des_acc` - `acc`)：
 - 在中等误差区间，多给一点内环加速度反馈，快速补偿外界扰动、模型误差；
 - 在误差很小且 `totalError ≈ 0` 时，`ka` 很小，避免把加速度传感器的噪声直接放大到推力上。

2. 为什么在大误差或噪声大时要截断/限幅 `ka`？

- 加速度测量存在噪声，且瞬态不可靠；
- 大位置/速度误差时，外环的 `kx/kv` 已经给出很大控制力，无需再通过 `ka` 放大噪声。

3. 换更重的机体，怎样调质量 `mass` 与 `kx/kv`？

- `mass` 改为真实质量；
- `kx` 与 `kv` 都按质量同比例放大。

4. 对推力大小、姿态角度和稳定性的影响

- 推力绝对值增大，加速度水平基本不变；
 - 姿态角度不变；
 - 线性稳定性和响应速度与原机体基本一致。
-

三、动力学建模与约束

1. 质量、惯量与气动阻尼建模对控制分配的影响

- **质量估计偏差**
 - 过小：系统动作过猛，产生过冲与振荡；
 - 过大：系统反应迟钝，跟踪滞后，出现稳态误差。
- **惯量估计偏差**

主要影响姿态响应，导致姿态滞后或振荡。
- **忽略阻力或阻力建模简单**
 - 前飞时出现稳态偏差、滞后；
 - 减速时出现过冲或“甩尾”。

2. 加入气动阻尼应在控制层还是规划层实现？

- **控制层补偿**
 - 优点：高精度、高性能跟踪；
 - 缺点：模型依赖强，易因建模误差引发振荡，调参难度高。
 - **规划层处理**
 - 优点：最稳定、最鲁棒、实现简单；
 - 缺点：速度/加速度上限会变得保守，无法充分利用全部性能。
-

二、代码作业

任务一：补全四旋翼飞机的动力学模型

1. 平动动力学

根据

$$m\dot{v} = mg + R, T + F_{\text{ext}} + F_{\text{drag}}$$

```
// v_dot = 重力 + 推力 + 外力 - 阻力
v_dot = Eigen::Vector3d(0,0,-g)
+ (thrust/mass) * (R * ez)
+ external_force/mass
- drag_coeff * v;
```

其中 $R * ez$ 表示推力方向从机体系映射到惯性系。

2. 转动动力学

根据刚体方程

$$J\dot{\omega} = \tau - \omega \times (J\omega) + \tau_{\text{ext}}$$

```
omega_dot = J.inverse() * (
    moments + external_moment
    - omega.cross(J * omega)
);
```

3. 姿态更新

姿态矩阵满足

$$\dot{R} = R\omega^{\vee}$$

```
R_dot = R * omega_vee;
```

任务二：补充无人机的前端规划模块

STEP 1.1：补全启发式函数

采用欧氏距离 + tie-breaker 减少退化搜索：

```
heu = norm(node1 - node2);           // 欧式距离
tie = 1.0 + 1e-3;                   // tie breaker
heu *= tie;
```

STEP 1.2：补全A*算法主循环

核心流程：

```
current = pop_min(Open);           // 取 f 最小节点
if(current == goal) break;        // 终止判断
expand_neighbors(current);        // 邻域拓展
```

邻居更新：

```
if(neighbor unopened){
    g = tentative;
    f = g + getHeu(neighbor, goal);
    neighbor.Father = current;
    Open.insert(neighbor);
}
else if(better g found){
    update g,f,Father;
}
```

STEP 1.3：追溯找到的路径

终点找到后反向追溯：

```
path.push(goal);
ptr = goal.Father;
while(ptr exists){
    path.push(ptr);
    ptr = ptr.Father;
}
reverse(path);
```

实验结果

无人机可以正常运行仿真，通过评估脚本给出综合得分：

```
● stuwork@ubuntu:~/MRPC-2025-homework$ /bin/python3 /home/stuwork/MRPC-2025-homework/code/calculate_results.py  
计算得到的均方根误差 (RMSE) 值为: 0.0295260977912975  
轨迹运行总时间为: 73.61976170539856  
总轨迹长度为: 32.32545917926107  
是否发生了碰撞: 0  
综合评价得分为(综合分数越低越好): 27.094263735191426
```