



西安交通大学  
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

## 智能机器人 第一次实验

项目名称：智能机器人第一次实验

班级：自动化 2104

姓名：马茂原

学号：2216113438

提交时间：2024 年 3 月 24 日

**摘要：**本实验旨在对 PUMA560 六自由度串联机器人进行轨迹规划和运动控制的仿真研究。分别在笛卡尔空间和关节空间进行轨迹规划，并通过正运动学和逆运动学建立两空间的映射关系。两种空间的轨迹规划方法各有优劣，需要根据实际应用场景进行取舍。本实验验证了基于 Robotics Toolbox 对 PUMA560 进行运动学建模、轨迹规划和运动控制仿真的流程和方法。

**关键字：**正运动分析，逆运动学分析

**题目一. 对 PUMA560 机器人, 在笛卡尔坐标系中进行轨迹规划, 对正运动学进行仿真实验。**

## **1. 技术分析**

### **A. PUMA560 机器人结构简介**

PUMA560 是一种工业机器人, 它具有六个自由度的关节结构,使其能够在三维空间中灵活移动和定位。

下面是 PUMA560 机器人关节机械结构的简要介绍:

1. 底座关节:旋转关节,使机器人能够绕垂直轴旋转 360 度。
2. 肩部关节:旋转关节,使上臂能够绕水平轴旋转运动。
3. 肘部关节:旋转关节,控制前臂的旋转。
4. 腕关节 1:旋转关节,控制手腕的旋转运动。
5. 腕关节 2:环绕关节,使手腕能够向上或向下运动。
6. 腕关节 3:旋转关节,控制末端执行器的旋转。

### **B. 问题解决思路**

对于 PUMA560 机器人进行笛卡尔空间中的轨迹规划,需要利用其正运动学建立关节空间到笛卡尔空间的映射关系,然后在笛卡尔空间中规划出所需的轨迹,最后通过求解反运动学得到对应的关节空间轨迹[1]。具体步骤如下:

1. 建立 PUMA560 的运动学模型: 确定各关节类型。
2. 正运动学求解

将关节角度(或位移)代入同次变换矩阵, 计算出末端执行器在基坐标系下的位姿。

### 3. 笛卡尔空间轨迹规划

根据任务需求,规划出期望的位置轨迹和姿态轨迹, 可采用多项式插值、三次样条等方法生成平滑轨迹, 生成一系列位姿数据点。

4. 求解反运动学: 对插补后的每个位姿数据点,求解对应的关节角度位移等。

5. 轨迹规划与运动控制: 将求解的关节空间轨迹作为期望输入, 设计控制器,考虑伺服系统动力学, 实现对每个关节电机的精确控制。

## 2. 源代码

```
clc
clear
% 问题一
%% 构建机器人
L(1) = Revolute('d', 0, 'a', 0, 'alpha', pi/2);
L(2) = Revolute('d', 0, 'a', 0.43, 'alpha', 0);
L(3) = Revolute('d', 0.15, 'a', 0.02, 'alpha', -pi/2);
L(4) = Revolute('d', 0.43, 'a', 0, 'alpha', pi/2);
L(5) = Revolute('d', 0, 'a', 0, 'alpha', -pi/2);
L(6) = Revolute('d', 0, 'a', 0, 'alpha', 0);
robot = SerialLink(L, 'name', 'Puma 560');

%robot.teach

%关节坐标期望的起始点
q_start=[0,0,0,0,0,0];
q_end=[0.2,-0.1,-0.25,0.3,0.2,0.3];

number=100;
Time=linspace(1,10,number); %仿真时间

T_start=robot.fkine(q_start);
T_end=robot.fkine(q_end);

%在笛卡尔坐标系进行轨迹规划
T_answer=ctrj(T_start,T_end,number);
```

```

q_answer=robot.ikine(T_answer);

plot(robot,q_answer)

%所有关节 的角位移曲线
figure;
plot(Time,q_answer,LineWidth=3) %关节的角位移曲线
title("各个关节的角位移")
legend('1','2','3','4','5','6')
xlabel('时间/s')
ylabel('角位移/rad')

p=zeros(3,number);

for i = 1:number
p(:,i) = T_answer(1,i).t; % 提取出第 i 个路点的位置
end

figure;
plot3(p(1,1),p(2,1),p(3,1),'k*',LineWidth=3)
hold on
plot3(p(1,number),p(2,number),p(3,number),'r*',LineWidth=3)

k=1:number;
plot3(p(1,:),p(2,:),p(3,:), 'b',LineWidth=3)
title("机器人末端笛卡尔坐标的位移")
xlabel('米/m')
ylabel('米/m')
zlabel('米/m')
legend('起点',"终点")

hold off

```

### 3. 运行结果

Puma 560 机器人正运动学的结果， 如图 1-图 2 所示。

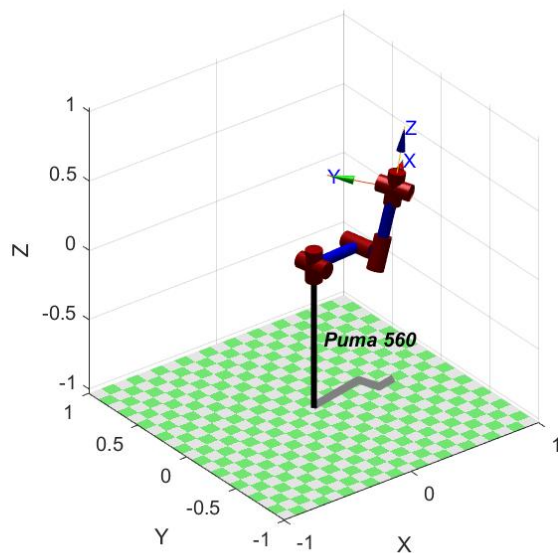


图 1 Puma 560 机器人运动结果展示

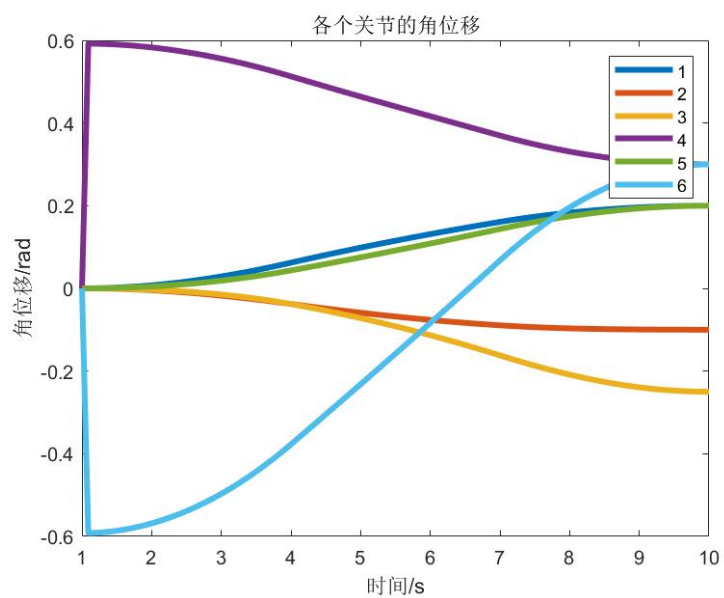


图 2 Puma 560 各个关节角位移

**题目二. 对 PUMA560 机器人，在关节坐标系中进行轨迹规划，对逆运动学进行仿真实验分析。**

### **1. 问题解决思路**

对于 PUMA560 机器人在关节空间中进行轨迹规划,需要直接在关节坐标系下规划出期望的关节角度轨迹,然后通过正运动学变换得到对应的笛卡尔空间轨迹[2]。具体步骤如下:

#### **1. 建立 PUMA560 的运动学模型**

确定各关节类型，建立连杆坐标系和变换矩阵，通过连接各变换矩阵,得到从基坐标系到末端执行器的同次变换矩阵。

#### **2. 关节空间轨迹规划**

根据任务需求,直接在关节空间规划出期望的关节角度轨迹，可采用多项式插值、三次样条等方法生成平滑关节角度曲线，对轨迹进行插补,生成一系列关节角度数据点。

#### **3. 运动学求解**

将插补后的关节角度数据代入运动学模型，计算出对应的末端执行器在基坐标系下的位姿数据序列。

#### **4. 轨迹评估与优化**

检查正运动学解是否满足期望运动范围和约束条件，如有必要,对关节空间轨迹进行局部或整体优化

#### **5. 运动控制**

将优化后的关节空间轨迹作为期望输入，设计控制器,考虑伺服系统动力学，实现对每个关节电机的精确控制。

## 2. 源代码

```
% 问题二
%% 构建机器人
clc
clear

L(1) = Revolute('d', 0, 'a', 0, 'alpha', pi/2);
L(2) = Revolute('d', 0, 'a', 0.43, 'alpha', 0);
L(3) = Revolute('d', 0.15, 'a', 0.02, 'alpha', -pi/2);
L(4) = Revolute('d', 0.43, 'a', 0, 'alpha', pi/2);
L(5) = Revolute('d', 0, 'a', 0, 'alpha', -pi/2);
L(6) = Revolute('d', 0, 'a', 0, 'alpha', 0);
robot = SerialLink(L, 'name', 'Puma 560');

%robot.teach
q_start=[0,0,0,0,0,0]; % 起始点关节空间矢量
q_end=[0.2,-0.1,-0.25,0.3,0.2,0.3]; %终止点关节空间矢量

%笛卡尔坐标系中运动起止点的期待值
T_start=robot.fkine(q_start);
T_end=robot.fkine(q_end);

%在关节坐标系进行轨迹规划
q_start=robot.ikine(T_start);
q_end=robot.ikine(T_end);

number=100;
Time=linspace(1,10,number); %仿真时间
[q,qd,qdd]=jtraj(q_start,q_end,Time); %关节空间规划

%plot(robot,q)

%所有关节 的角位移、角速度和角加速度曲线
figure;
plot(Time,q,LineWidth=3) %关节的角位移曲线
title("各个关节的角位移")
legend('1','2','3','4','5','6')
xlabel('时间/s')
ylabel('角位移/rad')
```

```

figure;
plot(Time,qd,LineWidth=3) %关节的角速度曲线
title("各个关节的角速度")
legend('1','2','3','4','5','6')
xlabel('时间/s')
ylabel('角速度/(rad/s)')

figure;
plot(Time,qdd,LineWidth=3) %关节 角加速度曲线
title("各个关节的角加速度")
xlabel('时间/s')
ylabel('角加速度/(rad/(s*s))')
legend('1','2','3','4','5','6')

%机器人末端轨迹图像
T=fkine(robot,q);
p=zeros(3,number);

for i = 1:number
p(:,i) = T(1,i).t; % 提取出第 i 个路点的位置
end

figure;
plot3(p(1,1),p(2,1),p(3,1),'k*',LineWidth=3)
hold on
plot3(p(1,number),p(2,number),p(3,number),'r*',LineWidth=3)

k=1:number;
plot3(p(1,:),p(2,:),p(3,:), 'b',LineWidth=3)
title("机器人末端笛卡尔坐标的位移")
xlabel('米/m')
ylabel('米/m')
zlabel('米/m')
legend('起点','终点')
hold off

```



### 3. 运行结果

Puma 560 机器人逆运动学轨迹规划的结果，如图 3-7 所示。

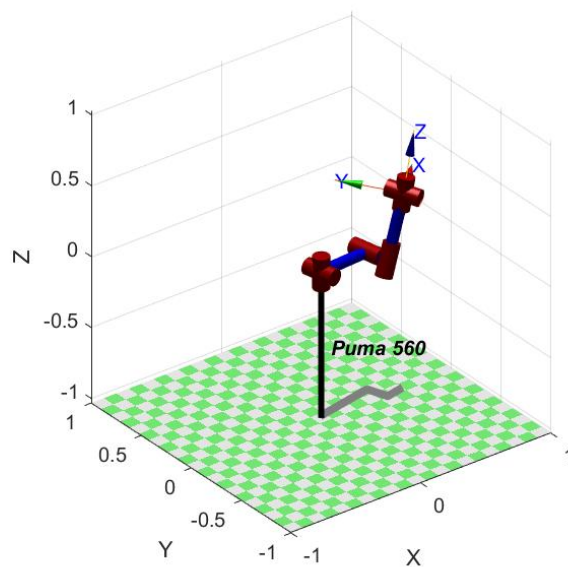


图 3 Puma 560 机器人逆运动学运动展示

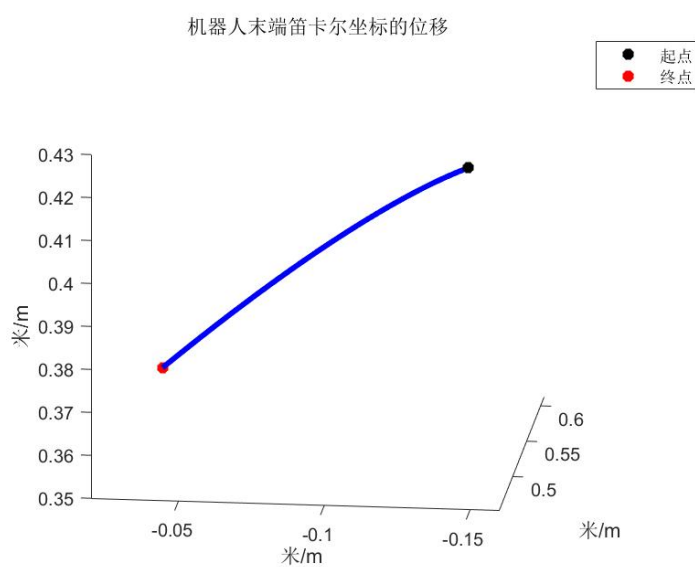


图 4 Puma 560 机器人末端笛卡尔位移

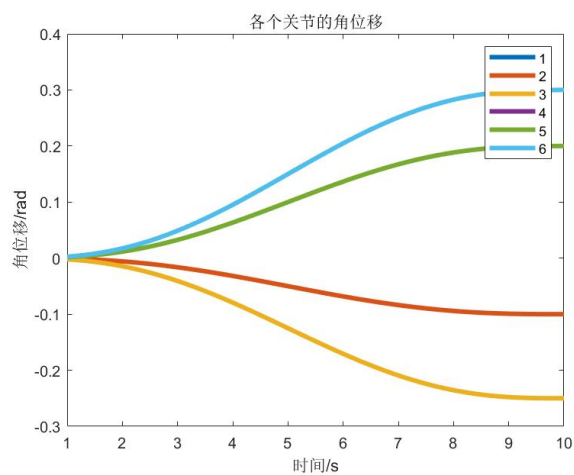


图 5 Puma 560 机器人各个关节的角位移

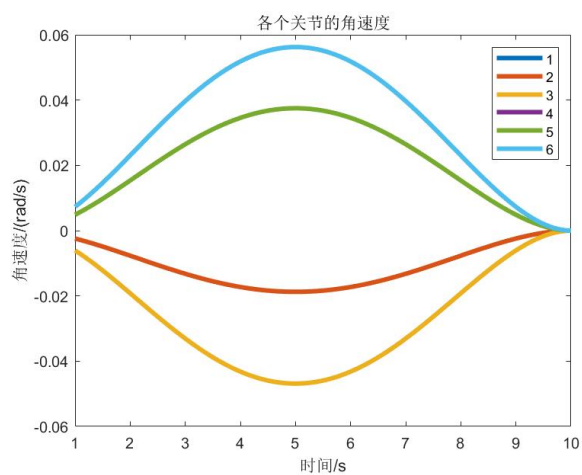


图 6 Puma 560 机器人各个关节的角速度

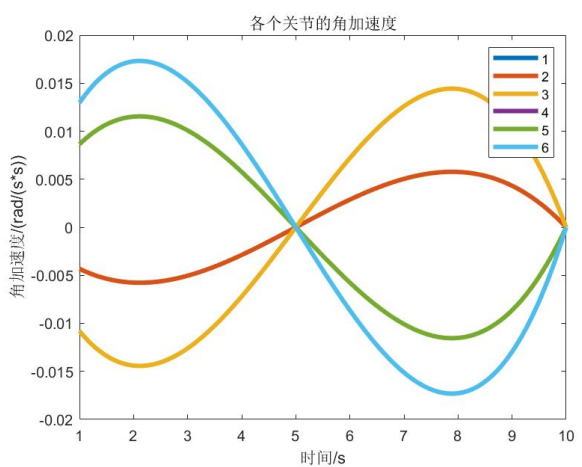


图 7 Puma 560 机器人各个关节的角加速度

## 实验总结

本实验通过 Matlab 的 Robotics Toolbox,对 PUMA560 机器人进行了笛卡尔空间和关节空间两种轨迹规划方式的仿真研究。

在笛卡尔空间规划中,首先构建机器人模型,设定起止位姿,然后利用 ctraj 函数规划出平滑的位姿轨迹序列,再通过逆运动学解析出对应的关节角度序列,最后绘制出关节运动曲线和机器人运动轨迹。这种方式的优点是轨迹规划直观,但在满足特定约束条件时可能会比较困难。

在关节空间规划中,直接插值生成期望的关节角度、速度、加速度序列,再由正运动学解析出机器人末端在笛卡尔空间的运动轨迹。这种方式的优点是可以方便加入关节极限等约束,并利用机器人机构本身的特点优化轨迹,但需要更多迭代优化以满足期望的笛卡尔空间运动轨迹。

本实验为控制系统的进一步设计和优化奠定了基础。

## 参考文献

- [1] “工业机器人-正逆运动学 - 百度文库.” Accessed: Mar. 25, 2024. [Online]. Available:  
[https://wenku.baidu.com/view/f070a8e90329bd64783e0912a216147917117ebf.html?\\_wkts\\_=1711348412211](https://wenku.baidu.com/view/f070a8e90329bd64783e0912a216147917117ebf.html?_wkts_=1711348412211)
- [2] “六自由度机器人（机械臂）运动学建模及运动规划系列（四）——轨迹规划,” 知乎专栏. Accessed: Mar. 25, 2024. [Online]. Available:  
<https://zhuanlan.zhihu.com/p/550310365>