

单位代码: 10359  
学 号: 2018170337

密 级: 公开  
分 类 号: TP242.2



合肥工业大学  
Hefei University of Technology

# 硕士学位论文

MASTER'S DISSERTATION

(专业硕士)

论文题目: 基于ROS的七自由度双臂协作  
机器人控制系统研究

学科专业: 控制工程

作者姓名: 从永正

导师姓名: 都海波 教授 姜苍华 副教授

完成时间: 2021年4月



单位代码: 10359  
学 号: 2018170337

密 级: 公开  
分 类 号: TP242.2

合肥工业大学

Hefei University of Technology

硕士学位论文

MASTER'S DISSERTATION

论文题目: 基于 ROS 的七自由度双臂协作  
机器人控制系统研究

学位类别: 专业硕士

专业名称: 控制工程

作者姓名: 从永正

导师姓名: 都海波 教授 姜苍华 副教授

赵松 高级工程师

完成时间: 2021 年 4 月

合 肥 工 业 大 学

专业硕士学位论文

基于 ROS 的七自由度双臂协作机器人控制  
系统研究

作者姓名： 从永正

指导教师： 都海波 教授 姜苍华 副教授

赵松 高级工程师

专业名称： 控制工程

研究方向： 智能控制系统

2021 年 4 月

A Dissertation Submitted for the Degree of Master

**Research on control system of seven-degree-of-freedom  
dual-arm cooperative robot based on ROS**

By

Cong Yongzheng

Hefei University of Technology

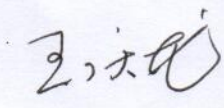
Hefei, Anhui, P.R.China

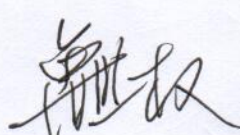
April, 2021

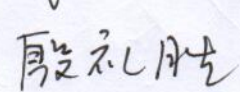
# 合肥工业大学

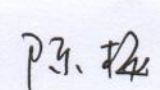
本论文经答辩委员会全体委员审查,确认符合合肥工业大学硕士学位论文质量要求。

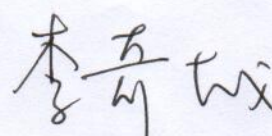
## 答辩委员会签名(工作单位、职称、姓名)

主席: 合肥学院, 教授 

委员: 合肥工业大学, 教授 

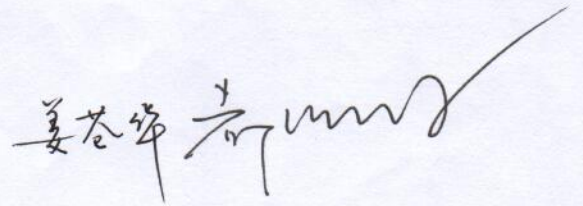
合肥工业大学, 副教授 

合肥工业大学, 副教授 

合肥工业大学, 副教授 

导师: 合肥工业大学, 教授

合肥工业大学, 副教授



## 学位论文独创性声明

本人郑重声明：所提交的学位论文是本人在导师指导下进行独立研究工作所取得的成果。据我所知，除了文中特别加以标注和致谢的内容外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得合肥工业大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。对本文成果做出贡献的个人和集体，本人已在论文中作了明确的说明，并表示谢意。

学位论文中表达的观点纯属作者本人观点，与合肥工业大学无关。

学位论文作者签名：从永正 签名日期：2021年5月26日

## 学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解合肥工业大学有关保留、使用学位论文的规定，即：除保密期内的涉密学位论文外，学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子光盘，允许论文被查阅或借阅。本人授权合肥工业大学可以将本学位论文的全部或部分内 容编入有关数据库，允许采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

(保密的学位论文在解密后适用本授权书)

学位论文作者签名：从永正

指导教师签名：姜苍华

签名日期：2021年5月26日

签名日期：2021年5月26日

论文作者毕业去向

工作单位：

联系电话：

通讯地址：

E-mail：

邮政编码：

# 致 谢

子在川上曰：“逝者如斯夫，不舍昼夜！”。时间总在不经意间从我们身边悄悄溜走，转眼间，三年的研究生学习生涯很快就要告一段落。在合肥工业大学的三年里，我收获颇多，学习了做科研时的严谨，学习了面对失败时的不馁，学习了面对挫折时的不屈。在即将结束三年硕士生涯的时刻，我要衷心感谢那些帮助我、鼓励我的人们，是你们的细心、耐心和关心支持我顺利完成学业。

在硕士三年中，我要特别感谢我的导师都海波老师和姜苍华老师。作为我学术研究路上的领路人，都老师科研上的严谨态度让我由衷钦佩。在三年的学习中，知识渊博的都老师对我的指导是仔细认真的、是无微不至的，给予的意见是有极为重要价值的。都老师从零开始教会了我如何进行选题、如何研究、如何撰写学术论文，这些对我以后的人生都会产生非常积极的影响。本论文的顺利完成离不开都老师的悉心指导，在即将毕业之际，由衷向都老师表达真诚的感谢和深深的敬意。同时，也感谢姜苍华老师、赵松高级工程师在学习中的给予的指导。

三年中的学习离不开同门师兄的相互帮助。感谢朱文武师兄、吴笛师兄在控制理论学习上的指导和帮助，感谢周俊师兄在研究生刚入学时给予的细心指导，感谢周送刚同学在硕士论文内容研究中的相互学习交流，感谢师弟王福全、常帅、葛展展等在 ROS 学习中给予的帮助。感谢刘碧波、杜庆秋、王利楠、俞波、魏佳佳等同学在日常学习中的鼓励与帮助。感谢同实验室的各位同学，一起打造了安静整洁的科研环境。感谢室友张允、秦朗、蒋成成在学习和生活中提供的帮助。祝各位同学前程似锦！

感谢东南大学甘亚辉老师在本论文选题、开题和展开研究等方面的悉心指导，感谢东南大学王正伟博士在 ROS 学习上给予的指导。感谢各位论文评审老师和答辩老师。

良师益友缺一不可，感谢汪元礼、汪陈松、丁杰、褚超凡、范文文等好友在生活和学习上的帮助和支持，祝各位好友事业有成！

特别感谢阡雨同学，感谢与你相遇，感谢你的鼓励，感谢你的陪伴，愿这种美好永续。祝你学业有成，心想事成，幸福美满！

最后，感谢父母对我多年的养育恩情，感谢父母在学业上的支持，是你们无微不至的关系和无所保留的爱以及经济上的支持让我成长。再次感谢你们对我的关心和爱护，祝你们健康幸福长寿！

作者：从永正  
2021年4月8日

## 摘要

自工业机器人问世以来，工业生产格局发生了很大变化。随着工业场景的复杂化以及任务的多样性，传统的六自由度工业机器人已不能完全满足需求。相比于传统六自由度机械臂，带有冗余关节设计的双臂七自由度机器人具有较好的容错性、柔顺性和避障能力，也提升了机械臂的工作效率。双臂协作也使机器人的作业能力得到巨大提升，双臂机器人的协作控制成为一个重要内容。机器人应用开发涉及到底层的数值计算、上层应用开发以及机器人位置控制等问题，是一个繁琐过程。因此，对双臂机器人协作运动轨迹规划及机器人应用开发过程进行研究具有重要的应用价值。本文以七自由度双臂协作机器人为研究对象，研究了其运动学分析、协作运动规划、基于 ROS 的控制器开发方法等内容，具体如下：

首先，研究了基于 DH 建模的双臂机器人运动学建模与分析问题。针对本文研究的七自由度双臂协作机器人，采用 DH 建模方法对机械臂进行运动学建模，采用齐次变换矩阵的方式进行正运动学描述，建立正向运动学方程；采用基于冗余度参数的方法求解机器人逆运动学；还借助 MATLAB 机器人工具箱对运动学分析结果进行仿真验证，验证结果表明了文章采用方法的正确性。

其次，研究了基于约束保持算法的双臂机器人协作运动控制算法研究。针对双臂协作情况下的轨迹规划问题，首先探讨了非协作情况下的笛卡尔空间下两种常见轨迹的规划原理；然后基于约束保持理论，推导了两种协作情况下的双臂约束保持关系。

再次，研究了基于 ROS 的机器人控制系统开发方法。在对 ROS 的基本运作原理进行系统阐述后，使用 ROS 平台及开发工具对前述推导的轨迹规划方法进行仿真验证。

最后，研究了基于 PC 控制器的机器人伺服控制系统与 ROS 的通信接口开发问题。在该部分中，描述了基于 EtherCAT 总线的机器人伺服控制系统通信网络及 PC 控制界面开发，分析了 ROS 通信接口开发方案，完成了 ROS 和 PC 控制器的通信接口设计。

**关键词：**双臂协作机器人；七自由度；协作轨迹规划；机器人操作系统；通信接口



# ABSTRACT

Since the advent of industrial robots, the pattern of industrial production has changed a lot. With the complexity of industrial scenes and the diversity of tasks, the traditional six-degree-of-freedom industrial robot can no longer fully meet the needs. Compared with the traditional 6-DOF manipulator, the dual-arm 7-DOF robot with redundant joints has better fault tolerance, flexibility and obstacle avoidance ability, which also improves the working efficiency of the manipulator. Dual-arm cooperation also greatly improves the working ability of the robot, and the cooperative control of the dual-arm robot becomes an important part. The development of robot application involves the numerical calculation of the bottom layer, the development of the upper layer and the position control of the robot, which is a tedious process. Therefore, it is of great application value to study the cooperative motion trajectory planning of dual-arm robot and the robot application development process. In this thesis, the 7-DOF dual-arm cooperative robot is taken as the research object, and its kinematics analysis, cooperative motion planning, ROS-based controller development method and other contents are studied as follows:

Firstly, the kinematics modeling and analysis of dual-arm robot based on DH modeling are studied. Aiming at the seven-DOF dual-arm cooperative robot studied in this thesis, the DH modeling method was used to model the kinematics of the manipulator arm, and the forward kinematics equation was established by using the homogeneous transformation matrix. The inverse kinematics of the robot was solved by a method based on redundancy parameters. The results of kinematics analysis are simulated and verified with the help of MATLAB robot toolbox. The verification results show that the method used in this paper is correct.

Secondly, the research of cooperative motion control algorithm of dual-arm robot based on constraint preserving algorithm is studied. Aiming at the problem of trajectory planning in the case of two-arm cooperation, two common trajectory planning principles in the case of non-cooperative Cartesian space are firstly discussed. Then, based on constraint preserving theory, the two-arm constraint preserving relation is derived for two kinds of cooperation cases.

Thirdly, the development method of robot control system based on ROS is studied. After the basic operation principle of ROS is systematically described, the trajectory

planning method deduced above is simulated and verified by ROS platform and development tools.

Finally, the development of communication interface between robot servo control system and ROS based on PC controller is studied. In this part, the communication network and PC control interface development of robot servo control system based on EtherCat bus are described, the ROS communication interface development scheme is analyzed, and the communication interface design between ROS and PC controller is completed.

**KEYWORDS:** Dual-arm cooperative robot; Seven degrees of freedom; Cooperative trajectory planning; Robot operating system; Communication interface

# 目 录

第一章 绪论.....	1
1.1 课题的研究意义.....	1
1.2 双臂协作机器人国内外研究现状.....	2
1.2.1 双臂机器人的研究现状.....	2
1.2.2 双臂机器人协作控制研究现状.....	4
1.2.3 机器人开发平台研究现状.....	4
1.3 本论文的工作和主要内容安排.....	5
第二章 基于 DH 建模的七自由度双臂机器人运动学建模与分析.....	7
2.1 引言.....	7
2.2 基于 DH 方法的七自由度机器人建模.....	8
2.2.1 双臂机器人基本结构.....	8
2.2.2 双臂机器人 DH 建模.....	8
2.3 机器人运动学分析与运动学方程求解.....	9
2.3.1 机器人正运动学求解.....	10
2.3.2 机器人逆运动学求解.....	12
2.4 运动学正逆解验证.....	15
2.5 本章小结.....	19
第三章 基于约束保持算法的双臂机器人协作运动控制算法研究.....	20
3.1 引言.....	20
3.2 非协作情形下的机械臂轨迹规划.....	21
3.2.1 直线轨迹规划.....	21
3.2.2 圆弧轨迹规划.....	21
3.3 基于约束保持算法的双臂协作运动轨迹规划.....	24
3.3.1 耦合协作下的运动约束方程.....	25
3.3.2 叠加协作下的运动约束方程.....	26
3.4 本章小结.....	27
第四章 基于 ROS 的双臂机器人控制器开发方法与运动仿真.....	28
4.1 引言.....	28
4.2 ROS 机器人操作系统.....	28
4.2.1 ROS 基本框架.....	28
4.2.2 ROS 机器人开发工具.....	29
4.3 基于 ROS 的机器人建模与运动规划.....	31

4.3.1 机器人三维建模.....	31
4.3.2 机器人三维可视化显示与运动规划.....	31
4.3 基于 Rviz 的轨迹规划仿真 .....	33
4.3.1 非协作情形下的机械臂运动规划仿真.....	33
4.3.2 双臂耦合协作运动规划仿真.....	34
4.3.3 双臂叠加协作运动规划仿真.....	39
4.5 基于任务的机器人协作演示 .....	42
4.6 本章小结 .....	44
<b>第五章 基于 PC 控制的机器人伺服控制系统通信接口开发 .....</b>	<b>45</b>
5.1 引言 .....	45
5.2 基于 EtherCAT 的伺服控制系统.....	46
5.3 ROS 与 PC 控制器通信接口开发 .....	47
5.3.1 ROS 接口设计分析 .....	47
5.3.2 基于 socket 的通信接口开发.....	49
5.3.3 ROS 通信接口开发 .....	51
5.4 本章小结 .....	54
<b>第六章 本文工作总结与展望.....</b>	<b>55</b>
6.1 总结 .....	55
6.2 未来展望 .....	55
<b>参考文献 .....</b>	<b>57</b>
<b>攻读硕士学位期间的学术活动及成果情况 .....</b>	<b>62</b>

## 插图清单

图 1.1 国外双臂协作机器人产品 .....	3
图 1.2 国产双臂协作机器人 .....	3
图 2.1 双臂协作机器人结构示意图 .....	8
图 2.2 机械臂关节坐标系建立示意图 .....	9
图 2.3 $\psi$ 定义示意图 .....	13
图 2.4 关节 4 的角度求解示意图 .....	13
图 2.5 MATLAB 机器人示教界面 .....	16
图 2.6 基于 MATLAB 的机械臂直线运动规划 .....	17
图 2.7 机械臂直线运动规划过程中各关节角度变化曲线 .....	17
图 2.8 基于 MATLAB 的机械臂圆弧运动规划 .....	18
图 2.9 机械臂圆弧运动规划过程中各关节角度变化曲线 .....	18
图 3.1 圆弧规划插补点坐标求解 .....	23
图 4.1 ROS 架构 .....	29
图 4.2 MoveIt! 结构框架 .....	30
图 4.3 机器人三维设计效果图 .....	31
图 4.4 Rviz 可视化界面 .....	32
图 4.5 ROS 中各节点运行关系 .....	32
图 4.6 非协作情况下机器人运动规划仿真 .....	33
图 4.7 直线运动规划中机器人右臂各关节角度变化曲线 .....	34
图 4.8 圆弧运动规划中机器人左臂各轴角度变化曲线 .....	34
图 4.9 耦合协作下的机器人直线运动规划 .....	36
图 4.10 直线耦合协作运动时主/从机械臂末端的笛卡尔坐标变化曲线 .....	36
图 4.11 直线耦合协作运动时主机机械臂各关节角度变化曲线 .....	37
图 4.12 直线耦合协作运动时从机械臂各关节角度变化曲线 .....	37
图 4.13 耦合协作下的机器人圆弧运动规划 .....	38
图 4.14 圆弧耦合协作运动时主/从臂终端笛卡尔坐标变化曲线 .....	38
图 4.15 圆弧耦合协作运动时主机机械臂各关节角度变化曲线 .....	39
图 4.16 直线耦合协作运动时从机械臂各关节角度变化曲线 .....	39
图 4.17 叠加协作下的机器人直线运动规划 .....	40
图 4.18 直线叠加协作运动时主/从机械臂末端笛卡尔坐标变化曲线 .....	41
图 4.19 直线叠加协作运动时主机机械臂各关节角度变化曲线 .....	41
图 4.20 直线叠加协作运动时从机械臂各关节角度变化曲线 .....	42

图 4.21 机器人协作搬运动作演示 .....	43
图 4.22 机器人协作装配动作演示 .....	43
图 5.1 基于 EtherCAT 的主/从式通信网络 .....	46
图 5.2 PC 控制器控制界面 .....	47
图 5.3 通信接口开发设计方案分析示意图 .....	48
图 5.4 基于 ROS 与 PC 控制器的双臂机器人伺服控制系统结构框架 .....	49
图 5.5 TCP/IP 体系下 socket 通信原理 .....	50
图 5.6 socket 通信流程 .....	50
图 5.7 joint_states 话题的具体内容 .....	52
图 5.8 luban_gazebo_socket 节点的消息订阅 .....	53
图 5.9 luban_gazebo_socket 节点的订阅结果 .....	53
图 5.10 PC 控制器接收 ROS 数据界面 .....	54

## 表格清单

表 2.1 机器人 DH 参数 .....	9
表 2.2 机器人正运动学分析结果验证 .....	16





# 第一章 绪论

## 1.1 课题的研究意义

自上世纪五十年代世界首台工业机器人诞生以来，全球工业生产格局开始逐渐发生改变。特别是七十年代以来，机器人发展进入了新的阶段。工业机器人已经由传统的单一示教模式发展为具有视觉、触觉感知和对复杂环境自适应的智能模式，同时这一时期机器人商业化运用也迅速发展。1974年，著名机器人公司 ABB 推出世界工业机器人发展史上首款全电动微处理器控制的工业机器人，开启现代机器人发展的新篇章。随着互联网和制造业的迅猛发展，机器人已经广泛应用工业、农业、医疗、服务等行业中<sup>[1-4]</sup>，并以其优越性能促进了行业的发展。

经过几十年的技术革新，总体来说，市场上常见的工业机器人以采用伺服电机方式驱动为主，配有转动关节和平动关节，其中六自由度机械臂是工业机器人中的典型代表，广泛应用于喷漆、焊接、码垛等工业场景<sup>[5-7]</sup>。随着工业任务复杂化以及对机器人系统可靠性要求提高，传统单臂六自由度机器人已经不能够满足这一要求。具有冗余自由度设计的双臂机器人提升了机械臂的工作效率，也进一步提升工业机器人的作业能力。相比于传统六自由度机械臂，双臂七自由度机器人具有如下优势：

(1) 具有更好的动作柔顺性。七自由度机械臂在逆运动学求解过程中，各关节旋转角度幅度的分配比六自由度机械臂更均匀，机械臂动作更加柔顺。

(2) 具有更高的效率。双臂机器人既可以双臂协作完成较为复杂的任务，也可双臂独立完成各自的任务。相比于单臂机器人，提升了工作效率。

(3) 具有更好的避障能力。由于冗余关节的存在，针对普遍存在的障碍物，不仅给机械臂提供传统的避障方案，而且还能根据结构冗余特性，利于自运动进行避障，同时还能保持机械臂末端位姿固定，在某些特殊任务中有重要意义。

(4) 具有更强的容错能力。当六自由度机械臂的某一关节伺服电机出现故障、电机抱死时，机械臂退化为五自由度机械臂，不能保证机械臂末端能够到达某一位姿，限制了机械臂的使用。而七自由度机械臂具有冗余，在某一关节伺服电机发生故障时仍能够重新规划运动轨迹，以六自由度机械臂形式继续工作，增强机器人系统的容错能力。

(5) 低占地率与低成本。传统的协作系统是由两个（或多个）机器人组成的双机（或多机）系统，其占地面积大，设备成本高，而能够实现两臂协作的双臂机器人避免了这两个缺点。

虽然机器人在给工业生产带来巨大方便，机器人开发过程是一个复杂的过程，涉及内容包括但不限于运动学/动力学建模与求解、自碰撞检测与轨迹规划、机器人关节位置控制以及数据通信等问题。特别是随着工业应用场景的复杂以及对机器人性能要求的提高，诸如避障检测、视觉处理等也逐渐加入到工业机器人系统中，这也提高了机器人系统开发的难度。由此可见，选取科学高效的机器人开发方法对于机器人的开发应用是极为重要的。

综上所述，研究七自由度双臂机器人的协作控制与控制系统开发方法具有重大意义。

## 1.2 双臂协作机器人国内外研究现状

### 1.2.1 双臂机器人的研究现状

鉴于双臂机器人具有的优越性能，许多机器人公司开始研发具有协作能力的双臂机器人。2015年，ABB公司推出双臂协作机器人 YuMi<sup>[6-7]</sup>，这是一款由两个七自由度机械臂组成的双臂机器人，并在两臂末端配有夹持工具，双臂之间能够协作完成相应任务，并且可以实现人机协作，也是首款真正意义上的实现人机协作的双臂机器人。Rethink Robotics公司的Baxter<sup>[8-9]</sup>双臂协作机器人是全球首款制造级的人形机器人，除了具有双七自由度机械臂，机器人头部还有声呐和视觉传感器用于感知环境，该机器人目前广泛应用于全球27个国家的四百多所高校和研究所中。除上述两款外，市场上常见的双臂协作机器人还有日本科技公司THK Inteches与KAWADA Robotics合作研发的协作机器人Nextage<sup>[10]</sup>以及日本川崎重工业(KHI)研发的协作型机器人DuAro<sup>[11]</sup>。以上四款机器人产品如图1.1所示。

国内机器人行业相对于西方发达国家起步较晚，特别是智能机器人产业与国外先进水平相差巨大。在双臂协作机器人领域，国内同类型产品种类更少。图1.2(a)所示为中国电子科技集团研发的双臂协作机器人，该机器人在2019年中国(国际)小电机技术研讨会暨展览会上展出。该机器人为双臂七自由度机器人，通过在机械臂末端安装夹爪，最小可以夹取直径为0.03mm的物体，最大夹持重量为3Kg。该机器人的零件国产率达到95%以上，其研发单位拥有全部自主知识产权。图1.2(b)所示的是DSCR3双臂协作机器人，是由沈阳新松机器人公司研发，该机器人集成了两个SCR3单臂七自由度机器人，双臂可协同工作。DSCR3的重复定位精度达 $\pm 0.02\text{mm}$ ，末端最大直线速度为 $1\text{m/s}$ ，单臂最大负载为3Kg。



图 1.1 国外双臂协作机器人产品

Fig 1.1 Foreign products of dual-arm cooperative robot



(a)

(b)

图 1.2 国产双臂协作机器人

Fig 1.2 Domestic two-arm cooperative robot

### 1.2.3 双臂机器人协作控制研究现状

对应着双臂协作机器人的优越性能<sup>[12]</sup>，其开发难度也随着增加。双臂机器人的双臂协调控制问题是开发双臂机器人的重点内容，许多研究人员对其开展研究工作。从工程上看机器人的协作控制主要从轨迹协调规划和力矩协调控制两方面考虑。

主/从控制是常用于双臂协作中机械臂末端执行器位姿控制的常用方法，该方法通常设其中一个机械臂为主机械臂（Master），另一机械臂为从机械臂（Slave）。在主/从控制中，在协作控制中首先设置主臂运动轨迹，然后根据主/从关系获得从臂的运动轨迹，即可完成双臂协作运动。Tianliang Liu 等<sup>[13]</sup>在文中针对人形机器人双臂搬运的协调控制问题，分别从位置级、速度级和加速度级分解运动控制，根据搬运物体的目标轨迹和约束关系，计算主臂的轨迹，继而得到从臂的轨迹。Huang Y 等<sup>[14]</sup>考虑双臂机器人装配问题，采用将主臂设置为固定臂、从臂设置为移动臂的方式完成孔内装配任务。主/从控制主要基于机器人运动学模型，不考虑机械臂本身物理属性的影响，采用主/从位置约束关系的使得从臂跟踪主臂运动，这种方法使用方便，主要适用于低速、被操作物不易变形、任务复杂度低的任务场景，可能会产生从臂相对于主臂运动迟滞的现象。

机械臂力控制可以用来解决主/从控制中的从臂迟滞问题，力/位混合控制可以改善主/从控制中的可能会出现的问题。力/位混合控制<sup>[48]</sup>在主/从位置控制的基础之上，加入力控制，实现对执行器与被操作物之间作用力的控制，可以使得机器人能够更好的完成复杂任务，如零件装配等。王美玲博士<sup>[15]</sup>将机器人的双臂协作分为双臂独立、部分约束和全约束三种情况，针对这三种情况，分别对双臂、被操作物的动力学以及双臂与物体的整体动力学进行了建模分析。由于在控制过程中的不断切换控制空间，力/位混合控制不能保证双臂机器人系统的柔顺性，而且抗干扰能力较差。

阻抗控制<sup>[16-18]</sup>也可以应用在双臂协调控制的任务中，通过双臂末端执行机构的位置和与被操作物之间的相互作用力的变换关系实现预期的运动。阻抗控制适用于在线轨迹规划，对来自系统内部以及环境的干扰有很好的抑制作用。

### 1.2.3 机器人开发平台研究现状

机器人系统是一个复杂的系统，其开发过程也极其复杂。随着机器人技术和软件技术的发展，一些功能强大的机器人软件开发系统为机器人开发提供了极大便利。

Microsoft Robotics Studio<sup>[19-20]</sup>是微软公司开发的一款机器人开发平台，该开发环境采用简化的模块化程序，降低编程难度，该软件平台在非商业方面免费使用。同时，微软也提供了一个机器人控制仿真平台 Microsoft Robotics Developer Studio

(MRDS) [21-22], 帮助用户完成机器人算法的仿真验证。Webots<sup>[23-25]</sup>是 Cyberbotics 公司开发的基于 ODE 的开源机器人动力学仿真平台, 提供完整的开发环境对机器人进行运动学、动力学建模, 控制代码编程和运动仿真。OROCOS (Open Robot Control Software) [26-27]是一个 C++框架, 是一个通用的工业软件框架, 主要提供机器人底层系统级的实时控制与数据通信。OROCOS 侧重于底层控制器设计, 主要包含机械臂运动学 KDL 数值求解、贝叶斯滤波、实时控制等, 以及其他工具。ROS (Robot Operating System) [28-31]是一个开源的、适用于机器人开发的操作系统, 类似于 OROCOS, ROS 也汇集了多种机器人开发工具, 但 ROS 更侧重于上层的规划应用层开发, 在机器人底层开发中, ROS 提供丰富的功能插件供开发者使用, 极大的减少底层开发的重复工作, 提升了开发效率与开发成本。鉴于 ROS 的开源性、便利性、可移植性等优点, 现已广泛应用在各机器人公司、研究机构 and 高校中。

### 1.3 本论文的工作和主要内容安排

本文主要针对双臂七自由度机器人的协作控制及开发问题展开研究。一般来说, 机器人的协作控制及开发问题主要包括机器人运动学建模及分析、协作控制策略、以及机器人开发平台。

本文各章节的主要内容为:

第一章首先介绍了课题的来源与研究意义, 进而叙述了国内外在双臂协作机器人领域的研究成果; 其次重点介绍了双臂机器人协作控制的研究现状, 以及介绍了目前主流机器人开发平台的基本情况。

第二章以双臂七自由度机器人运动学分析求解为主体, 首先详细介绍了基于 DH 方法的机器人运动学建模过程, 进而解算出机器人正向运动学方程; 其次考虑机械臂结构冗余性, 研究了基于冗余度的七自由度机械臂逆运动学求解流程, 获得机器人逆向运动学求解结果; 最后采用 MATLAB 机器人工具箱的方式验证了机器人运动学分析方法的正确性。

第三章研究了双臂机器人协作轨迹规划问题。首先, 讨论了在非协作情况下机器人轨迹规划问题, 研究了直线轨迹和圆弧轨迹生成的基本原理; 然后, 在机器人协作情况下, 基于机械臂末端位姿约束保持理论, 研究两种协作情况下的机械臂运动情况, 分别推导了协作运动位姿约束方程。

第四章研究了基于 ROS 的双臂机器人开发流程。首先, 介绍了 ROS 的基本框架、原理以及相应的机器人开发工具, 详细说明 MoveIt!的组织形式与应用方法; 其次, 研究了双臂机器人三维建模流程及其在 ROS 中可视化的操作方法; 然后, 基于第三章的机器人轨迹规划原理以及双臂协作运动位姿约束方程, 针对每种情

况，在 ROS 下进行相应的运动仿真；最后，基于实际任务，给出双臂机器人在 Rviz 下的动作仿真。

第五章研究了 ROS 与双臂机器人伺服控制系统的通信接口开发问题。首先，介绍了基于 EtherCAT 的伺服控制系统架构以及 PC 控制器及交互界面；然后，基于 MoveIt! 工作流程，分析通信接口开发方案；最后，详细说明了 ROS 端通信接口开发过程。

第六章是全文的总结部分，总结了本文的主要工作，并提出了本文下一步有待研究的内容。

## 第二章 基于 DH 建模的七自由度双臂机器人运动学建模与分析

### 析

#### 2.1 引言

在连杆型机器人应用研究领域，机械臂执行机构的位置和姿态是最值得注意的信息。因此，在对机械臂展开研究的时候，首先需要寻找一种合理且准确的方法用于计算在任意时刻时机械臂执行机构的位姿。从机械臂的构造来看，机械臂各关节的角度值是决定执行机构位姿的唯一因素，因此，求取执行机构位姿本质上就是建立位姿与关节角度之间的函数关系，也就是机器人正向运动学求解问题。反过来，当给定机械臂执行机构的一个目标位姿时，反向求解此位姿下机械臂各关节角度值成为了另一个重要课题，也就是逆向运动学求解问题。传统六自由度机器人主要依靠运动学方程中的六个约束关系求解出八组解，依靠上一时刻各关节值以及关节限位选出一个最优解。但是对于七自由度机械臂，无法根据运动学的六个约束关系求出七个关节的角度值。因此寻找一种高效求解七自由度机械臂逆运动学方法是进行机械臂运动控制域的基础。

机器人逆运动学求解方法主要采用数值法<sup>[32]</sup>和几何法<sup>[33]</sup>。采用数值迭代求解机器人逆运动学方法较为通用，一般不受限于机器人的结构类型。文[34]研究了基于蜂群算法的七自由度机器人逆运动学求解方法。文[35]研究了基于动态微分优化算法求解任意类型机械臂的逆运动学问题。考虑到机器人运动学逆解的多解问题，文[36]提出了基于唯一域求解方法。一般来说，数值法求解具有一定的缺陷，不仅计算量较大，而且求解成功率不高。依靠机器人构型而设计的几何法则能克服数值法的缺点，几何法依赖机器人的结构，不同构型的机器人需采用不同的几何求解法，不具有通用性，但几何求解法速度快，能够保证解的唯一性。文[37]采用双参数搜寻的方式，针对带有偏置的七自由度机械臂，提出了一种基于几何方法的逆运动学求解方法。文[38]采用基于机械臂可行空间的分析方法求解机器人逆运动学。

本章主要讨论了双臂七轴机器人的运动学建模与分析问题。首先，介绍了研究对象（双臂七轴机器人）的基本结构及基本特征；然后，研究了基于 DH 建模的双臂机器人运动学分析方法，根据 DH 建模原则确立机械臂 DH 参数，并以齐次变换矩阵表示相邻关节的旋转变换关系，通过六次逐次变换，可获得机械臂执行机构相对于基坐标系的位姿变换关系，建立机器人正向运动学方程；其次，采用

几何求解的方法，研究了基于冗余度参数的七自由度机械臂逆运动学求解方法；最后，通过数值仿真验证了方法的可行性。

## 2.2 基于 DH 方法的七自由度机器人建模

### 2.2.1 双臂机器人基本结构

本文以与东南大学合作开发的自主设计双臂七轴机器人为研究对象，机器人左臂和右臂设计为对称结构，每一个臂均有七个关节，由七个电机分别驱动，双臂机器人模型结构示意图如下图 2.1 所示。

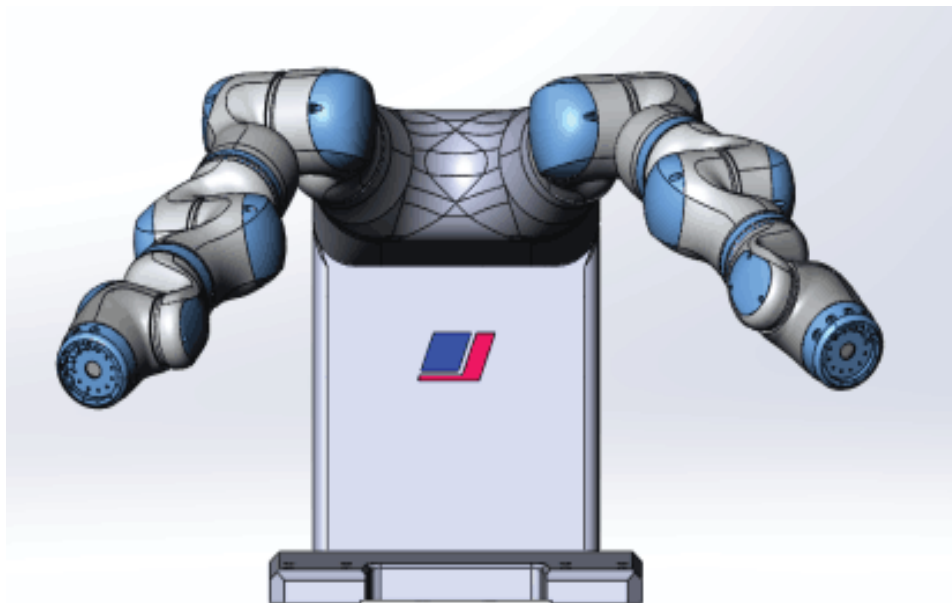


图 2.1 双臂协作机器人结构示意图

Fig 2.1 Structure diagram of dual-arm cooperative robot

本课题研究的双臂协作机器人具有以下特征：

- (1) 机器人所有关节均为旋转关节；
- (2) 机器人左右臂为对称结构设计，双臂各参数完全一致；

### 2.2.2 双臂机器人 DH 建模

由于机器人双臂为对称结构，因此在建模分析时，仅对其中一个臂进行分析。针对此类只有旋转的串联型关节机械臂，建模的关键完成相邻杆件之间的旋转描述。在此部分中，采用 DH 方法，依据其建模规则分别在机械臂各关节建立坐标系，获得机械臂的 DH 参数表。

依据 DH 建模规则，文中研究的机器人其中一臂的关节坐标系可建立如图 2.2 所示的关节坐标系，可得到机器人 DH 参数如表 2.1 所示。



表 2.1 机器人 DH 参数

Table 2.1 DH parameters of the robot

关节 $i$	连杆长度 $a_i$ (mm)	连杆距离 $d_i$ (mm)	连杆扭角 $\alpha_i$ ( $^\circ$ )	连杆转角 $\theta_i$ ( $^\circ$ )
1	0	232	90	90
2	0	0	-90	0
3	0	234	90	0
4	0	0	90	90
5	0	234	-90	0
6	0	0	-90	0
7	0	97.2	0	0

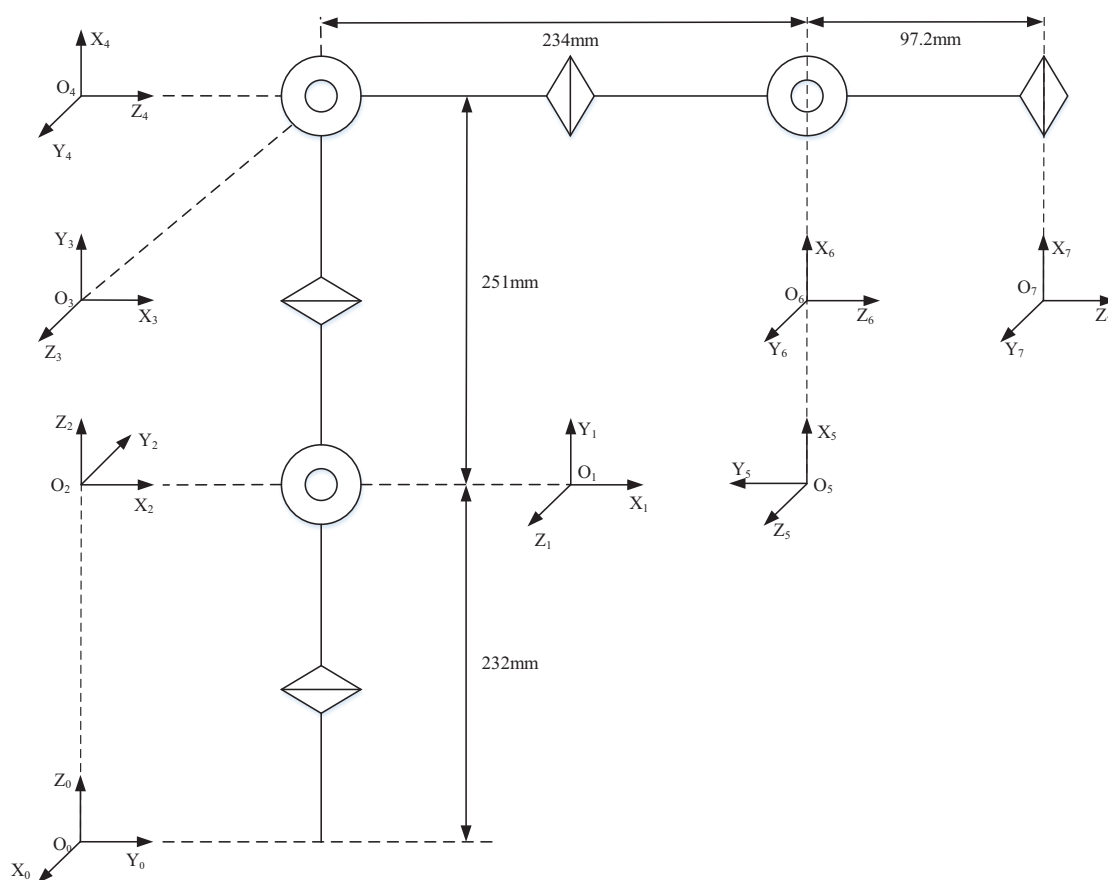


图 2.2 机械臂关节坐标系建立示意图

Fig 2.2 Schematic diagram of establishment of joint coordinate system of manipulator arm

### 2.3 机器人运动学分析与运动学方程求解

对机器人进行运动学分析是进行机器人应用开发的前提。在机器人运行过程中，获得执行机构的实时位姿对机器人开发是极其重要的，正向运动学解决了这个问题，通过各轴的角度值即可计算执行机构位姿；相对应的，当知道执行机构的某一目标位姿的，控制各轴运动到指定角度即可使得执行机构到达预定位姿，

各轴的目标角度就是通过逆向运动学求解获得的。本小节主要研究了正向运动学和逆向运动学的求解过程。

### 2.3.1 机器人正运动学求解

针对只有旋转关节的机械臂，建立相邻关节的齐次变换矩阵是求解正运动学的基础。为实现坐标系 $\{O_i\}$ 中的点在母坐标系 $\{O_{i-1}\}$ 中表示，可以由 $\{O_{i-1}\}$ 经过下列顺序变换得到齐次变换矩阵：

- (1) 将 $\{O_{i-1}\}$ 绕 $Z_{i-1}$ 轴旋转 $\theta_i$ 角，使 $X_{i-1}$ 轴与 $X_i$ 轴平行并指向同一方向；
- (2) 将 $\{O_{i-1}\}$ 沿 $Z_{i-1}$ 轴平移距离 $d_i$ ，使 $X_{i-1}$ 轴与 $X_i$ 轴重合；
- (3) 将 $\{O_{i-1}\}$ 沿 $X_i$ 轴平移距离 $a_i$ ，使 $\{O_{i-1}\}$ 的原点与 $\{O_i\}$ 的原点重合；
- (4) 将 $\{O_{i-1}\}$ 沿 $X_i$ 轴旋转 $\alpha_i$ 角，使 $Z_{i-1}$ 轴与 $Z_i$ 轴在同一直线上。

根据上述变换顺序，可得从坐标系 $\{O_{i-1}\}$ 到坐标系 $\{O_i\}$ 的齐次变换矩阵 ${}^{i-1}T_i$ ：

$$\begin{aligned}
 {}^{i-1}T_i &= \text{Rot}(Z, \theta_i) \cdot \text{Trans}(0, 0, d_i) \cdot \text{Trans}(a_i, 0, 0) \cdot \text{Rot}(X, \alpha_i) \\
 &= \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & 0 \\ s\theta_i & c\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 &\quad \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c\alpha_i & -s\alpha_i & 0 \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.1) \\
 &= \begin{bmatrix} c\theta_i & -c\alpha_i s\theta_i & s\alpha_i s\theta_i & a_i c\theta_i \\ s\theta_i & c\alpha_i c\theta_i & -s\alpha_i c\theta_i & a_i s\theta_i \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

其中， $c\theta_i$ 为 $\cos\theta_i$ 的简写， $s\theta_i$ 为 $\sin\theta_i$ 的简写， $c\alpha_i$ 为 $\cos\alpha_i$ 的简写， $s\alpha_i$ 为 $\sin\alpha_i$ 的简写。

根据表 2.1 中的机器人 DH 参数，可得机械臂各相邻坐标系的齐次变换矩阵：

$$\begin{aligned}
{}^0T_1 &= \begin{bmatrix} c\theta_1 & 0 & s\theta_1 & 0 \\ s\theta_1 & 0 & -c\theta_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0.232 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & {}^1T_2 &= \begin{bmatrix} c\theta_2 & 0 & -s\theta_2 & 0 \\ s\theta_2 & 0 & c\theta_2 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
{}^2T_3 &= \begin{bmatrix} c\theta_3 & 0 & s\theta_3 & 0 \\ s\theta_3 & 0 & -c\theta_3 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0.251 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & {}^3T_4 &= \begin{bmatrix} c\theta_4 & 0 & s\theta_4 & 0 \\ s\theta_4 & 0 & -c\theta_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
{}^4T_5 &= \begin{bmatrix} c\theta_5 & 0 & -s\theta_5 & 0 \\ s\theta_5 & 0 & c\theta_5 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0.234 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & {}^5T_6 &= \begin{bmatrix} c\theta_6 & 0 & s\theta_6 & 0 \\ s\theta_6 & 0 & -c\theta_6 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
{}^6T_7 &= \begin{bmatrix} c\theta_7 & -s\theta_7 & 0 & 0 \\ s\theta_7 & c\theta_7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0.0972 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

通过逐次建立齐次变换矩阵，即可获得末端坐标系相对于基坐标系的齐次变换矩阵：

$${}^0T_7 = {}^0T_1 \cdot {}^1T_2 \cdot {}^2T_3 \cdot {}^3T_4 \cdot {}^4T_5 \cdot {}^5T_6 \cdot {}^6T_7 \quad (2.2)$$

公式 (2.2) 即为机器人一臂的正运动学。

将公式 (2.2) 简化：

$${}^0T_7 = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & P_1 \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & P_2 \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & P_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^0R_7 & {}^0P_7 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

其中， ${}^0R_7$  为末端坐标系 $\{O_7\}$ 相对于基坐标系 $\{O_0\}$ 的旋转矩阵， ${}^0P_7$  为末端坐标系 $\{O_7\}$ 相对于基坐标系 $\{O_0\}$ 的平移向量。

记  $\sin(\theta_i)$  为  $s_i$ ， $\cos(\theta_i)$  为  $c_i$ ，则式 (2.3) 中矩阵  ${}^0T_7$  的各元素分别为：

$$\begin{aligned}
R_{11} &= c_7 * (s_6 * (s_4 * (s_1 * s_3 - c_1 * c_2 * c_3) + c_1 * c_4 * s_2) \\
&\quad - c_6 * (c_5 * (c_4 * (s_1 * s_3 - c_1 * c_2 * c_3) - c_1 * s_2 * s_4) - s_5 * (c_3 * s_1 + c_1 * c_2 * s_3))) \\
&\quad + s_7 * (s_5 * (c_4 * (s_1 * s_3 - c_1 * c_2 * c_3) - c_1 * s_2 * s_4) + c_5 * (c_3 * s_1 + c_1 * c_2 * s_3)) \\
R_{12} &= c_7 * (s_5 * (c_4 * (s_1 * s_3 - c_1 * c_2 * c_3) - c_1 * s_2 * s_4) + c_5 * (c_3 * s_1 + c_1 * c_2 * s_3)) \\
&\quad - s_7 * (s_6 * (s_4 * (s_1 * s_3 - c_1 * c_2 * c_3) + c_1 * c_4 * s_2) - c_6 * (c_5 * (c_4 * (s_1 * s_3 - c_1 * c_2 * c_3) \\
&\quad - c_1 * s_2 * s_4) - s_5 * (c_3 * s_1 + c_1 * c_2 * s_3)))
\end{aligned}$$

$$R_{13} = -c_6*(s_4*(s_1*s_3 - c_1*c_2*c_3) + c_1*c_4*s_2) - s_6*(c_5*(c_4*(s_1*s_3 - c_1*c_2*c_3) - c_1*s_2*s_4) - s_5*(c_3*s_1 + c_1*c_2*s_3))$$

$$R_{21} = -c_7*(s_6*(s_4*(c_1*s_3 + c_2*c_3*s_1) - c_4*s_1*s_2) - c_6*(c_5*(c_4*(c_1*s_3 + c_2*c_3*s_1) + s_1*s_2*s_4) - s_5*(c_1*c_3 - c_2*s_1*s_3))) - s_7*(s_5*(c_4*(c_1*s_3 + c_2*c_3*s_1) + s_1*s_2*s_4) + c_5*(c_1*c_3 - c_2*s_1*s_3))$$

$$R_{22} = s_7*(s_6*(s_4*(c_1*s_3 + c_2*c_3*s_1) - c_4*s_1*s_2) - c_6*(c_5*(c_4*(c_1*s_3 + c_2*c_3*s_1) + s_1*s_2*s_4) - s_5*(c_1*c_3 - c_2*s_1*s_3))) - c_7*(s_5*(c_4*(c_1*s_3 + c_2*c_3*s_1) + s_1*s_2*s_4) + c_5*(c_1*c_3 - c_2*s_1*s_3))$$

$$R_{23} = c_6*(s_4*(c_1*s_3 + c_2*c_3*s_1) - c_4*s_1*s_2) + s_6*(c_5*(c_4*(c_1*s_3 + c_2*c_3*s_1) + s_1*s_2*s_4) - s_5*(c_1*c_3 - c_2*s_1*s_3))$$

$$R_{31} = s_7*(s_5*(c_2*s_4 - c_3*c_4*s_2) + c_5*s_2*s_3) - c_7*(c_6*(c_5*(c_2*s_4 - c_3*c_4*s_2) - s_2*s_3*s_5) + s_6*(c_2*c_4 + c_3*s_2*s_4))$$

$$R_{32} = c_7*(s_5*(c_2*s_4 - c_3*c_4*s_2) + c_5*s_2*s_3) + s_7*(c_6*(c_5*(c_2*s_4 - c_3*c_4*s_2) - s_2*s_3*s_5) + s_6*(c_2*c_4 + c_3*s_2*s_4))$$

$$R_{33} = c_6*(c_2*c_4 + c_3*s_2*s_4) - s_6*(c_5*(c_2*s_4 - c_3*c_4*s_2) - s_2*s_3*s_5)$$

$$P_1 = -0.251*c_1*s_2 - 0.0972*[c_6*(s_4*(s_1*s_3 - c_1*c_2*c_3) + c_1*c_4*s_2) + s_6*(c_5*(c_4*(s_1*s_3 - c_1*c_2*c_3) - c_1*s_2*s_4) - s_5*(c_3*s_1 + c_1*c_2*s_3))] - 0.234*[s_4*(s_1*s_3 - c_1*c_2*c_3) + c_1*c_4*s_2]$$

$$P_2 = 0.0972*c_6*(s_4*(c_1*s_3 + c_2*c_3*s_1) - c_4*s_1*s_2) - 0.251*s_1*s_2 + 0.234*[s_4*(c_1*s_3 + c_2*c_3*s_1) - c_4*s_1*s_2] + 0.0972*s_6*(c_5*(c_4*(c_1*s_3 + c_2*c_3*s_1) + s_1*s_2*s_4) - s_5*(c_1*c_3 - c_2*s_1*s_3))$$

$$P_3 = 0.251*c_2 + 0.234*c_2*c_4 - 0.0972*s_6*(c_5*(c_2*s_4 - c_3*c_4*s_2) - s_2*s_3*s_5) + 0.0972*c_6*(c_2*c_4 + c_3*s_2*s_4) + 0.234*c_3*s_2*s_4 + 0.232$$

### 2.3.2 机器人逆运动学求解

为了求解本文研究的七自由度机械臂的逆运动学，定义冗余度参数 $\psi$ ，用于表示机械臂的自运动。如图 2.3 所示， $\psi$  定义为目标平面和参考平面的夹角。其中目标面为关节 2、4、6 构成的平面。参考平面为当 $\theta_3 = 0$ 时关节轴 2、4、6 构成的平面。

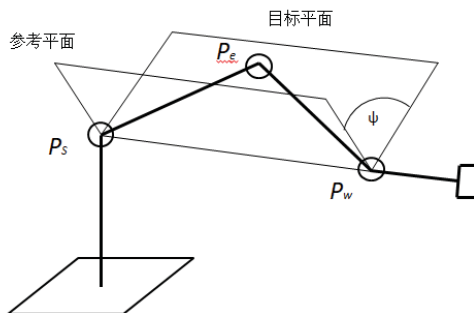


图 2.3  $\psi$  定义示意图

Fig 2.3 Schematic diagram of definition of  $\psi$

(1) 求解关节轴 4 的角度

从图 2.2 中可以看出，关节 2、关节 4、关节 6 存在着一定的几何关系，如图 2.4 所示，已知轴 2 与轴 4 的距离为  $l_{24}$ ，轴 4 与轴 6 的距离为  $l_{46}$ ，若知轴 2 与轴 6 的距离  $l_{26}$ ，则可得公式 (2.4)

$$\cos \theta_4 = \frac{l_{24}^2 + l_{46}^2 - l_{26}^2}{2 \times l_{24} \times l_{46}} \quad (2.4)$$

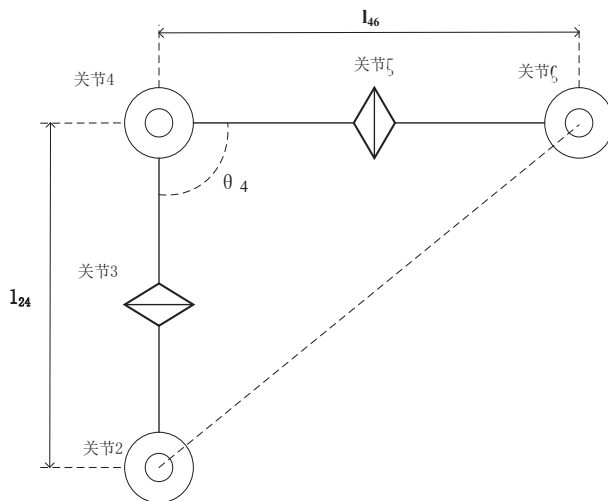


图 2.4 关节 4 的角度求解示意图

Fig 2.4 Schematic diagram of Angle solution of joint 4

设机械臂执行机构相对于基坐标系的位置向量为  ${}^0P_7$ ，旋转矩阵为  ${}^0R_7$ ，轴 6 相对于轴 7 的位置为  ${}^7P_6$ ，轴 2 相对于基坐标系的位置为  ${}^0P_2$ ，则轴 2 和轴 6 的位置向量相对于基坐标系表示为公式 (2.5)

$${}^0P_{26} = {}^0P_7 - {}^0R_7 * {}^6P_7 - {}^0P_2 \quad (2.5)$$

可得  $l_{26} = |{}^0P_{26}|$ ，通过公式 (2.4) 即可求出关节轴 4 角度  $\theta_4$ 。

(2) 求解关节轴 1、2、3 的角度

设  ${}^3U_{24} = [0 \quad l_{24} \quad 0]^T$ ,  ${}^4U_{46} = [0 \quad 0 \quad l_{46}]^T$ ，2 轴到 4 轴的位置向量在相对于基坐标系可以表示为  $L_{24} = {}^0R_3 \cdot {}^3U_{24}$ ，4 轴到 6 轴的位置向量在相对于坐标系可以表示为  $L_{46} = {}^0R_4 \cdot {}^4U_{46}$ ，可得

$${}^0P_{26} = {}^0R_3 \cdot {}^3U_{24} + {}^0R_4 \cdot {}^4U_{46} = {}^0R_3 ({}^3U_{24} + {}^3R_4 \cdot {}^4U_{46}) \quad (2.6)$$

如果机器人末端的位置和姿态已经固定，那么 2 轴到 6 轴的方向向量  ${}^0P_{26}$  也为一个常量，因此关节轴 6 的位姿会受冗余度参数  $\psi$  影响， $\psi$  的旋转矩阵为

$${}^0R_\psi = I_3 + \sin\psi \left[ \frac{{}^0P_{26}}{|{}^0P_{26}|} \times \right] + (1 - \cos\psi) \left[ \frac{{}^0P_{26}}{|{}^0P_{26}|} \times \right]^2 \quad (2.7)$$

其中  $I_3$  为单位矩阵， $\left[ \frac{{}^0P_{26}}{|{}^0P_{26}|} \times \right]$  为  $\frac{{}^0P_{26}}{|{}^0P_{26}|}$  的反对称矩阵。 ${}^0R_\psi$  为  $\psi$  的旋转矩阵，表示从参考平面旋转到目标平面的旋转矩阵。

故可得出以下关系

$${}^0R_3 = {}^0R_\psi {}^0R_3^0 \quad (2.8)$$

其中  ${}^0R_3^0$  为当目标平面和参考平面重合，即  $\theta_3 = 0$  的时候  ${}^0R_3$  所对应的传递矩阵。

当  $\theta_3$  角度为零时可以将公式 (2.5) 变形为

$${}^0P_{26} = {}^0R_1^0 \cdot {}^0R_2^0 \cdot {}^0R_3^0 \cdot ({}^3U_{24} + {}^3R_4 \cdot {}^4U_{46}) \quad (2.9)$$

由公式 (2.8) 可以推导出此时的  $\theta_1^0, \theta_2^0$ ，因此也可以得出：

$${}^0R_3^0 = {}^0R_1^0 \cdot {}^0R_2^0 \cdot {}^0R_{3|\theta_3=0}^0$$

将公式 (2.7) 带入到公式 (2.8) 中，可以得到

$${}^0R_3 = K_s \sin\psi + L_s \cos\psi + M_s \quad (2.10)$$

取  ${}^0D_{26} = \frac{{}^0P_{26}}{|{}^0P_{26}|}$ ，式 (2.10) 中的  $K_s, L_s, M_s$  分别如下：

$$K_s = [{}^0D_{26} \times] {}^0R_3^0, L_s = -[{}^0D_{26} \times]^2 {}^0R_3^0, M_s = [{}^0D_{26} \times {}^0D_{26}^T] {}^0R_3^0$$

同时  ${}^0R_3$  也可以表示为

$${}^0R_3 = \begin{bmatrix} * & -c_1 s_2 & * \\ * & -s_1 s_2 & * \\ s_2 c_3 & c_2 & s_2 s_3 \end{bmatrix}$$

从矩阵中可以找到  $\psi$  和  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  的关系：

$$\begin{cases} \theta_1 = \arctan\left(\frac{-k_{s22} \sin \psi - l_{s22} \cos \psi - m_{s22}}{-k_{s12} \sin \psi - l_{s12} \cos \psi - m_{s12}}\right) \\ \theta_2 = \arccos(k_{s32} \sin \psi + l_{s32} \cos \psi + m_{s32}) \\ \theta_3 = \arctan\left(\frac{k_{s33} \sin \psi + l_{s33} \cos \psi + m_{s33}}{k_{s31} \sin \psi + l_{s31} \cos \psi + m_{s31}}\right) \end{cases} \quad (2.11)$$

其中  $k_{sij}, l_{sij}, m_{sij}$  是矩阵  $K_s, L_s, M_s$  的元素  $(i, j)$ , 因此参数  $\psi$  给定时, 根据以上的分析可以求出轴 1、2、3 轴的角度值。从公式 (2.11) 可以看出, 轴角度求解方程涉及三角函数, 因此求解时可能会有存在多组解。在实际求解中, 还需要机械臂上一时刻对应轴的角度值以及关节限位来排除多余解。

### (3) 求解关节轴 5、6、7 的角度

前述已经求解出轴 1、2、3、4 的角度值, 即可求出  ${}^0R_4 = {}^0R_1 {}^1R_2 {}^2R_3 {}^3R_4$ , 取三阶矩阵  $W$ , 满足  $W = {}^4R_7 = {}^0R_4^{-1} {}^0R_7$ , 则可得

$$W = {}^4R_7 = \begin{bmatrix} * & * & c_5 s_6 \\ * & * & s_5 s_6 \\ -s_6 c_7 & s_6 s_7 & c_6 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

可得

$$\begin{cases} \theta_5 = \arctan\left(\frac{W_{23}}{W_{13}}\right) \\ \theta_6 = \arccos(W_{33}) \\ \theta_7 = \arctan\left(\frac{W_{32}}{W_{31}}\right) \end{cases} \quad (2.13)$$

其中,  $W_{ij}$  表示矩阵  $W$  对应的元素。根据公式 (2.13) 可以求得轴 5、6、7 的角度值。

## 2.4 运动学正逆解验证

为了说明前述运动学求解方法的可行性, 本小节采用 MATLAB 验证机器人运动学分析结果的正确性。

### (1) 正运动学验证

正运动学验证采用基于 DH 建模方法获得的齐次变换矩阵计算结果与基于 MATLAB 机器人工具箱示教结果相对比。齐次变换矩阵计算采用式 (2.3) 给出的结果, MATLAB 机器人工具箱采用系统给出的机器人示教功能给出的结果。为了两个结果比较的方便, 文中仅给出机器人末端位置的比较结果, 如表 2.2 所示, 从表中可以看出, 通过给出六组不同的关节角度组合, 两种方法获得的机器人末端位置是一致的, 数据差距是由于 MATLAB 示教界面有效数字位数导致。图 2.5 为 MATLAB 机器人示教界面。

表 2.2 机器人正运动学分析结果验证

Table 2.2 Verification of forward kinematics analysis results of robots

关节角度 $\theta_i$ ( $^\circ$ )	计算获得位置 (m)	MATLAB 示教获得位置(m)
[0 0 0 0 0 0]	(0, 0, 0.1518)	(0, 0, 0.152)
[30 -50.6 20 0 -10 50.6 20.5]	(-0.0129, 0.0359, 0.1534)	(-0.013, 0.036, 0.153)
[40 30.6 -35 20 35 -46.5 58.4]	(0.0583, 0.0557, 0.2198)	(0.058, 0.056, 0.220)
[-45 -45 -7.5 105 -7.5 -52.5 97.5]	(0.2410, -0.3111, 0.1994)	(0.241, -0.311, 0.199)
[-58.6 20.8 7.5 -100 -90 -30 47.5]	(-0.2809, 0.2892, 0.4102)	(-0.281, 0.289, 0.410)
[28.4 -16.8 -20 82 -80.5 25 -26.5]	(0.3529, 0.1097, 0.3449)	(0.353, 0.110, 0.345)

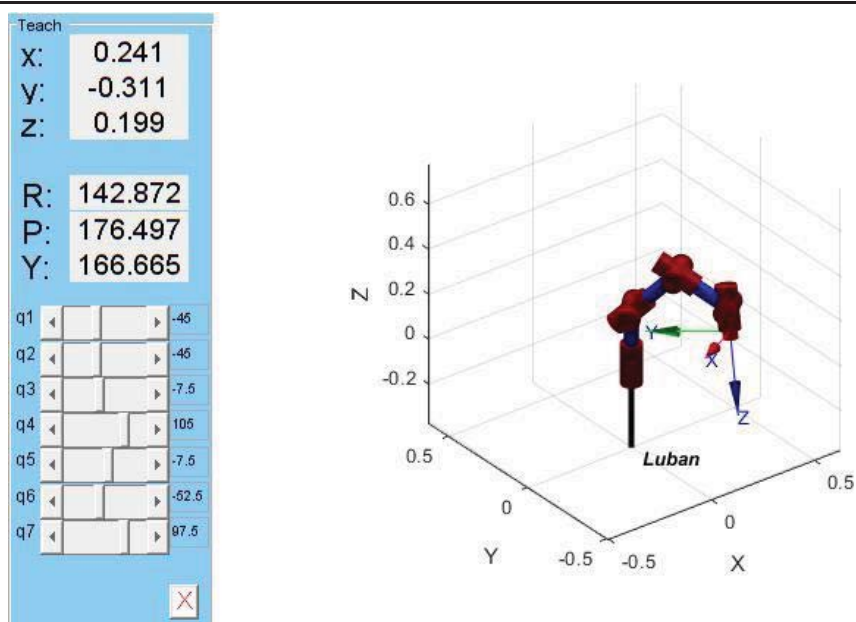


图 2.5 MATLAB 机器人示教界面

Fig 2.5 MATLAB robot teaching interface

## (2) 逆运动学验证

此部分内容主要用于验证基于冗余度的七自由度机械臂逆运动学求解方法的可行性，以 MATLAB 机器人工具箱为验证工具，以机械臂的直线运动和圆弧运动为验证手段。在机器人工具箱中，采用机械臂各关节坐标系模型为主体，设置冗余度参数为  $0^\circ$ 。运动规划功能由机器人工具箱提供，逆解算法采用基于冗余度的运动学求解方法，通过运动规划结果展现逆解算法的可行性。

### a. 直线运动规划

直线运动规划采用 MATLAB 机器人工具箱提供的直线轨迹规划函数，取起始点为  $P_s(0.40, -0.20, 0.50)$ ，目标点为  $P_t(0.40, 0.20, 0.50)$ 。规划结果如图 2.6 所示，红色直线即为机械臂行进路径；图 2.7 中的曲线展示了机械臂行进过程中各轴角度的变化情况，其中  $\theta_7$  角度的突变出现是由于关节角度限位所致。



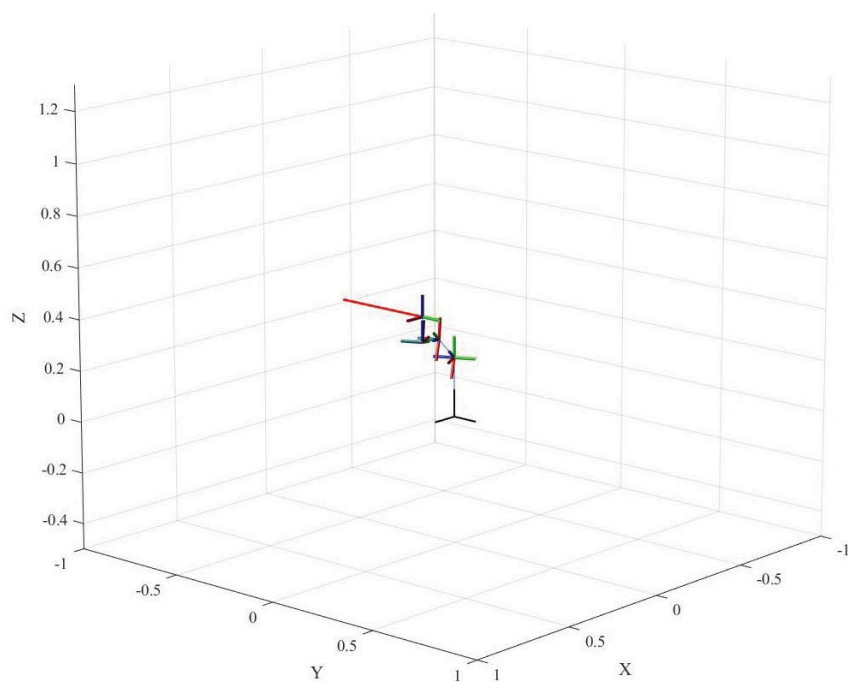


图 2.6 基于 MATLAB 的机械臂直线运动规划

Fig 2.6 Linear motion planning of manipulator based on MATLAB

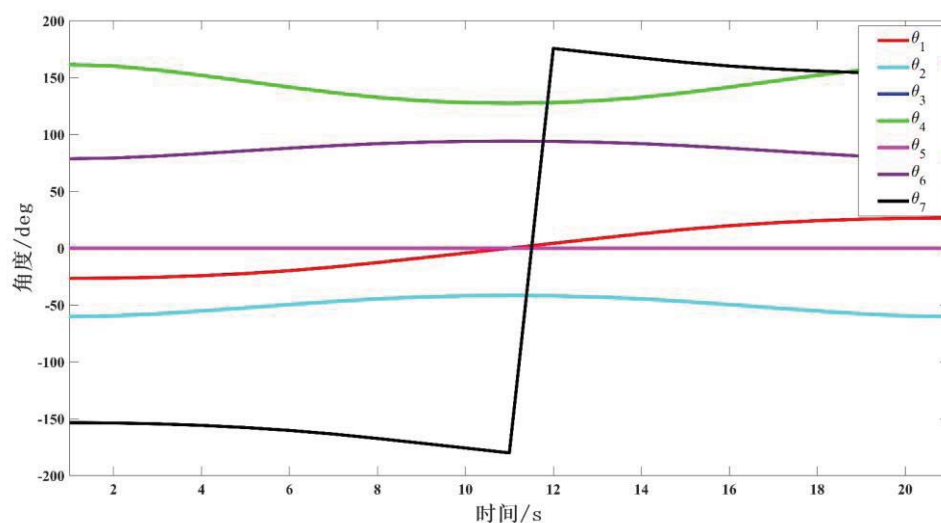


图 2.7 机械臂直线运动规划过程中各关节角度变化曲线

Fig 2.7 Angle change curve of each joint during linear motion planning of manipulator

## b. 圆弧运动规划

圆弧运动规划采用 MATLAB 机器人工具箱提供的圆弧轨迹规划函数，取起始点为  $P_s(0.20, 0.30, 0.35)$ ，经点  $P_r(0.25, 0.10, 0.45)$ ，到达目标点  $P_t(0.32, -0.25, 0.10)$ 。规划结果如图 2.8 所示，红色圆弧线即为规划结果；图 2.9 展示了机械臂圆弧运动过程中各关节角度的变化曲线，其中  $\theta_7$  角度的突变出现是由于关节角度限位所致，角度变化曲线只有六条曲线的原因在于  $\theta_3$  与  $\theta_5$  变化曲线一致。

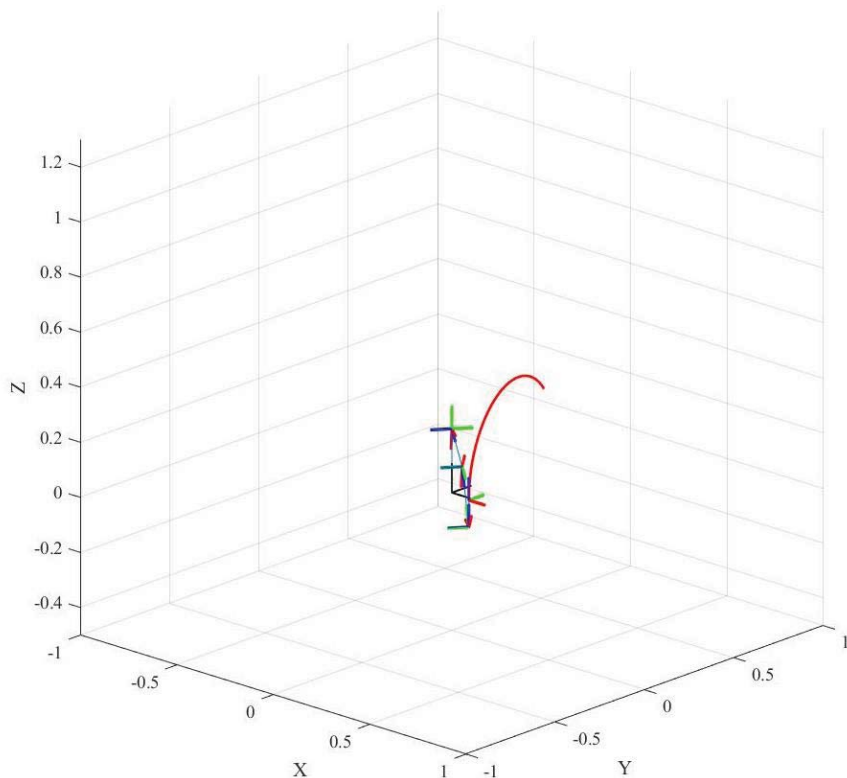


图 2.8 基于 MATLAB 的机械臂圆弧运动规划

Fig 2.8 Arc motion planning of manipulator based on MATLAB

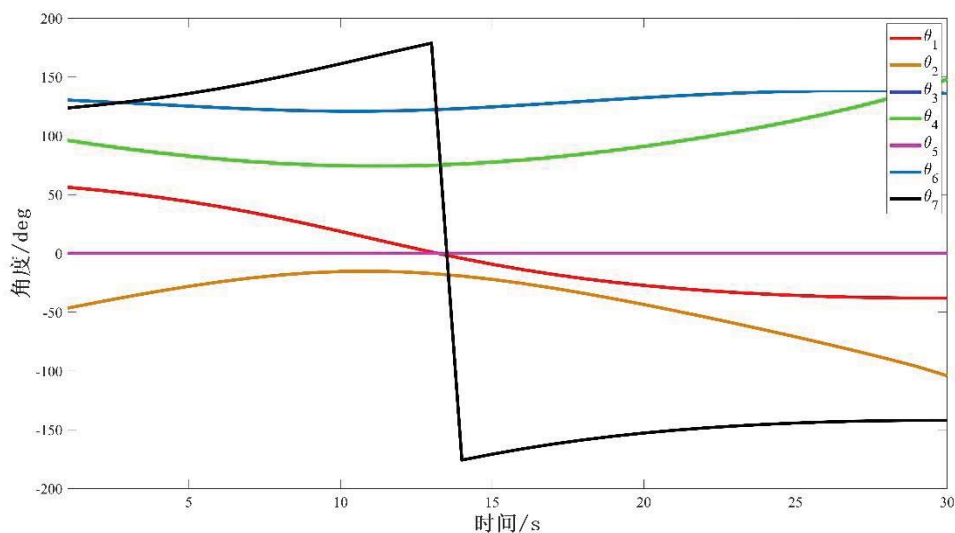


图 2.9 机械臂圆弧运动规划过程中各关节角度变化曲线

Fig 2.9 Angle change curve of each joint during circular arc motion planning of manipulator

从以上内容可以看出，使用的 2.3 节中的逆运动学求解可以帮助运动规划器生成运动过程中机械臂各关节的变化曲线。综上所述，本文采用的基于冗余度的七自由度机械臂逆运动学求解方法适用于文章研究的七自由度双臂机器人，能够为后续轨迹规划、双臂协作等场景应用提供了数据基础。

## 2.5 本章小结

本章主要讨论了双臂七轴机器人的运动学建模与分析问题。首先，介绍了研究对象（双臂七轴机器人）的基本结构及基本特征；然后，研究了基于 DH 建模的双臂机器人运动学分析方法，根据 DH 建模原则确立机械臂 DH 参数，建立相邻关节的齐次变换矩阵，通过逐次变换，可获得机械臂执行机构相对于基坐标系的齐次变换关系，建立机器人正向运动学方程；其次，采用几何求解的方法，研究了基于冗余度参数的七自由度机械臂逆运动学求解方法；最后，通过 MATLAB 机器人工具箱数值仿真验证了方法的可行性。

## 第三章 基于约束保持算法的双臂机器人协作运动控制算法研究

### 3.1 引言

控制机械臂从一个位置点运动到另一个位置点是工业机器人开发的重要内容。在实际应用中，点到点的轨迹类型是至关重要的。如在的焊接任务中，若焊接直线焊缝，机器人末端的焊枪需沿着直线焊缝运动。因此，轨迹规划是工业机器人应用开发中的重要环节。

传统的轨迹规划根据规划空间不同，主要分为关节空间规划和笛卡尔空间规划。在关节空间下，通过起点和终点两个状态下的各轴关节值，对行进过程中各轴角度变化曲线进行规划，通过伺服系统控制各轴按预定变化趋势运动即可。多项式插值法和样条法<sup>[39-42]</sup>是最主要的两种关节轨迹规划方法，基本原理都是采用插值的各轴角度变化曲线进行插补处理。与关节轨迹规划相比，笛卡尔空间轨迹规划<sup>[43-45]</sup>更直观，该方法直接对执行机构的轨迹类型进行规划，然后再根据逆运动学解法计算出机械臂行进中各轴角度的变化曲线，从而实现机器人执行机构沿着预定轨迹移动。在工程应用中，直线轨迹和圆弧轨迹<sup>[46-47]</sup>是最为常见的轨迹类型。然而上述的规划方法通常用于单臂机器人，对于双臂协作机器人来说，在协作过程中需要双臂相互配合，因此采用双臂分别进行轨迹规划的方法是不可取的，一些用于双臂协作性机器人或协作机器人系统的轨迹协调控制方法被提出。文献[15]采用双臂末端位置姿态的全约束和部分约束方法实现双臂同步规划运动。文[49-50]采用基于力方向可操作度的方法双臂协调控制方法。文[48]采用双臂力/位控制混合控制方法，提高双臂机器人协调运动的柔顺性。

本研究采用主/从式双臂轨迹规划方法，将机器人的双臂分为主机械臂和从机械臂。研究过程中，将机器人双臂协作问题转换为双臂末端执行器位姿约束问题，并按照实际协作任务中双臂末端之间的关系，将协作类型分为耦合协作和叠加协作。在协作运动过程中，双臂末端保持相对静止的运动过程称之为耦合协作运动，双臂末端有相对运动的运动过程称之为叠加协作运动。在主/从式协作规划的方式下，首先确定主机械臂的运动轨迹，进而通过主/从臂之间的约束关系计算从机械臂的运动轨迹，达到双臂协作的运动效果，因此在协作运动中，重点在于建立运动过程中主/从臂之间约束关系。

本章在对机器人运动学进行分析求解的基础上，研究双臂机器人的轨迹规划与协作运动问题。首先，在非协作的情形下，研究机械臂笛卡尔空间下轨迹规划问题，探讨了实际应用中最常见的直线和圆弧类型轨迹生成的基本原理；然后，

在双臂协作情形下，基于双臂末端位姿约束的思想，推导了两种协作运动情况下双臂末端之间的位姿约束关系。

### 3.2 非协作情形下的机械臂轨迹规划

非协作情况下，两个机械臂各自运动，互相之间除了避免相互碰撞外，没有其他联系，因此在这种情况下，机械臂的轨迹是相互独立的，可分别规划。从实际应用需求看，笛卡尔空间下的轨迹规划方法更为直观方便。本节以直线和圆弧两种基本轨迹类型为例，研究轨迹规划生成的原理。

#### 3.2.1 直线轨迹规划

直线类型轨迹就是要求机器人在行进过程中其末端执行机构的运动轨迹是直线。在这种轨迹类型的生成中，需实现获悉执行机构在起始点和目标点的位姿信息。

设起始点为  $P_s(x_s, y_s, z_s)$ ，目标点为  $P_t(x_t, y_t, z_t)$ ，设两点间有  $N$  个插补点，那么在第  $i(i \leq N)$  个插补点的坐标  $P_i(x_i, y_i, z_i)$  满足：

$$\begin{cases} x_i = x_s + i \cdot \frac{x_t - x_s}{N+1} \\ y_i = y_s + i \cdot \frac{y_t - y_s}{N+1} \\ z_i = z_s + i \cdot \frac{z_t - z_s}{N+1} \end{cases} \quad (3.1)$$

#### 3.2.2 圆弧轨迹规划

与直线类型轨迹不同，圆弧轨迹类型不仅需要起始位置和目标位置的信息，还需要设计的轨迹曲圆弧线上第三个点的位置信息，这样由空间中三个点的确定的一条圆弧线即为设计的轨迹曲线，在机器人行进过程中，机械臂执行器将从起点开始，经过第三点（中间点），到达终点，其轨迹为一条圆弧。

设起始点为  $P_s(x_s, y_s, z_s)$ ，目标点为  $P_t(x_t, y_t, z_t)$ ，中间第三点  $P_r(x_r, y_r, z_r)$ 。若此空间中的三点不共线，那么经过该三点的圆弧即可确定并且唯一。设该圆弧的圆心坐标为  $P_0(x, y, z)$ ，则  $P_s$ 、 $P_t$ 、 $P_r$ 、 $P_0$  满足关系：

$$\begin{vmatrix} x_0 & y_0 & z_0 & 1 \\ x_s & y_s & z_s & 1 \\ x_r & y_r & z_r & 1 \\ x_t & y_t & z_t & 1 \end{vmatrix} = 0 \quad (3.2)$$

由此可得到如下关系式：

$$A_1x_0 + B_1y_0 + C_1z_0 + D_1 = 0 \quad (3.3)$$

其中  $A_1, B_1, C_1, D_1$  为:

$$\begin{cases} A_1 = y_s \cdot z_r - y_s \cdot z_t - z_s \cdot y_r + z_s \cdot y_t + y_r \cdot z_t - y_t \cdot z_r \\ B_1 = -x_s \cdot z_r + x_s \cdot z_t + z_s \cdot x_r - z_s \cdot x_t - x_r \cdot z_t + x_t \cdot z_r \\ C_1 = x_s \cdot y_r - x_s \cdot y_t - y_s \cdot x_r + y_s \cdot x_t + x_r \cdot y_t - x_t \cdot y_r \end{cases}$$

设该圆弧半径为  $R$ ，且与  $P_s, P_t, P_r, P_0$  满足关系:

$$\begin{cases} R^2 = |x_s - x_0|^2 + |y_s - y_0|^2 + |z_s - z_0|^2 \\ R^2 = |x_r - x_0|^2 + |y_r - y_0|^2 + |z_r - z_0|^2 \\ R^2 = |x_t - x_0|^2 + |y_t - y_0|^2 + |z_t - z_0|^2 \end{cases} \quad (3.4)$$

由公式 (3.4) 可得

$$\begin{cases} A_2 x_0 + B_2 y_0 + C_2 z_0 + D_2 = 0 \\ A_3 x_0 + B_3 y_0 + C_3 z_0 + D_3 = 0 \end{cases} \quad (3.5)$$

其中  $A_2, B_2, C_2, D_2, A_3, B_3, C_3, D_3$  为:

$$\begin{cases} A_2 = 2(x_t - x_s) \\ B_2 = 2(y_t - y_s) \\ C_2 = 2(z_t - z_s) \\ D_2 = x_s^2 + y_s^2 + z_s^2 - x_t^2 - y_t^2 - z_t^2 \\ A_3 = 2(x_r - x_s) \\ B_3 = 2(y_r - y_s) \\ C_3 = 2(z_r - z_s) \\ D_3 = x_s^2 + y_s^2 + z_s^2 - x_r^2 - y_r^2 - z_r^2 \end{cases}$$

联合公式 (3.4) (3.5)，可得:

$$\begin{bmatrix} A_1 & B_1 & C_1 \\ A_2 & B_2 & C_2 \\ A_3 & B_3 & C_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

解得圆的圆心坐标与半径为

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} A_1 & B_1 & C_1 \\ A_2 & B_2 & C_2 \\ A_3 & B_3 & C_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} \\ R = \sqrt{|x_s - x_0|^2 + |y_s - y_0|^2 + |z_s - z_0|^2} \end{cases} \quad (3.7)$$

如图 3.1 所示， $O_0$  为圆心，A 为起始点，B 为目标点，C 为中间第三点。在 OAB 扇形平面内，以  $O_0$  为原点， $\overline{AO}$  为  $X_0$  轴正方向，建立坐标系  $\{O_0\}$ 。

坐标系  $\{O_0\}$   $X_0$  轴方向向量为:

$$\overline{X}_0 = \overline{AO} = (X_{0x}, X_{0y}, X_{0z})$$

坐标系  $\{O_0\}$  的  $Y_0$  轴方向向量为:

$$\vec{Y}_0 = \vec{OA} \times \vec{OB} = (Y_{0x}, Y_{0y}, Y_{0z})$$

坐标系  $\{O_0\}$  的  $Z_0$  轴方向向量为:

$$\vec{Z}_0 = \vec{X}_0 \times \vec{Y}_0 = (Z_{0x}, Z_{0y}, Z_{0z})$$

由上可求得坐标系  $\{O_0\}$  的坐标轴在基坐标系的方向余弦:

$$\begin{cases} (\cos \alpha_x, \cos \beta_x, \cos \gamma_x) = \left( \frac{X_{0x}}{|\vec{X}_0|}, \frac{X_{0y}}{|\vec{X}_0|}, \frac{X_{0z}}{|\vec{X}_0|} \right) \\ (\cos \alpha_y, \cos \beta_y, \cos \gamma_y) = \left( \frac{Y_{0x}}{|\vec{Y}_0|}, \frac{Y_{0y}}{|\vec{Y}_0|}, \frac{Y_{0z}}{|\vec{Y}_0|} \right) \\ (\cos \alpha_z, \cos \beta_z, \cos \gamma_z) = \left( \frac{Z_{0x}}{|\vec{Z}_0|}, \frac{Z_{0y}}{|\vec{Z}_0|}, \frac{Z_{0z}}{|\vec{Z}_0|} \right) \end{cases}$$

故坐标系  $\{O_0\}$  下的某点坐标为  $(x_0, y_0, z_0)$  的点变换到基坐标系下的变换关系为:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{X_{0x}}{|\vec{X}_0|} & \frac{Y_{0x}}{|\vec{Y}_0|} & \frac{Z_{0x}}{|\vec{Z}_0|} & X^0 \\ \frac{X_{0y}}{|\vec{X}_0|} & \frac{Y_{0y}}{|\vec{Y}_0|} & \frac{Z_{0y}}{|\vec{Z}_0|} & Y^0 \\ \frac{X_{0z}}{|\vec{X}_0|} & \frac{Y_{0z}}{|\vec{Y}_0|} & \frac{Z_{0z}}{|\vec{Z}_0|} & Z^0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

其中  $X^0, Y^0, Z^0$  是坐标系  $\{O_0\}$  的原点在基坐标系下的笛卡尔坐标。

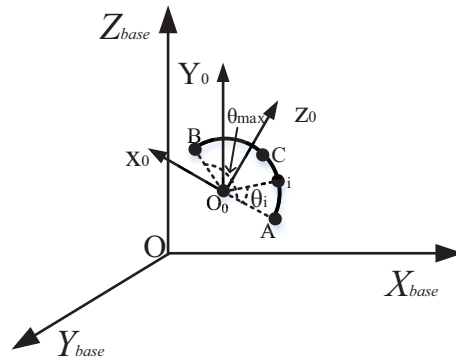


图 3.1 圆弧规划插补点坐标求解

Fig 3.1 Solving the coordinates of interpolation points in circular arc planning

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/908027030063006041>