硕士学位论文

基于参数化方法的焊接机器人与变位机协 同规划算法研究 Research on Collaborative Planning Algorithm of Welding Robot and Positioner based on Parameterization Method

<u> </u>	级	学	科	电子	^z 信息
<u> </u>	级	学	科	人口	智能
作	者	姓	名	王	清锋
指	导	教	师	谢斌	副教授

2024年05月

中图分类号<u>TP242.2</u> UDC 004.8 学校代码 <u>10533</u> 学位类别 专业学位

硕士学位论文

基于参数化方法的焊接机器人与变位机协 同规划算法研究

Research on Collaborative Planning Algorithm of Welding Robot and Positioner based on Parameterization Method

作者姓名	王清锋
一级学科	电子信息
二级学科	人工智能
研究方向	机器人运动规划
二级培养单位	自动化学院
指导教师	谢斌

论文答辩日期2024年5月25日 答辩委员会主席 73

中 南 大 学 2024年05月

学位论文原创性声明

本人郑重声明,所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研 究工作及取得的研究成果。尽我所知,除了论文中特别加以标注和致 谢的地方外,论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果,也 不包含为获得中南大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材 料。与我共同工作的同志对本研究所作的贡献均已在论文中作了明确 的说明。

申请学位论文与资料若有不实之处,本人承担一切相关责任。

学位论文作者签名: 建属锋 日期: 2024年4月27日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者和指导教师完全了解中南大学有关保留、使用学 位论文的规定:即学校有权保留并向国家有关部门或机构送交学位论 文的复印件和电子版,允许本学位论文被查阅和借阅。本人授权中南 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进行检索 和公开传播,可以采用复印、缩印或其它手段保存和汇编学位论文。 本人同意按《中国优秀博硕士学位论文全文数据库出版章程》规定享 受相关权益。本人保证:毕业后以学位论文内容发表的论文作者单位 注明中南大学;学位论文电子文档的内容和纸质学位论文的内容相一 致。

延缓公开论文延缓到期后适用本授权书,涉密论文在解密后适用本授权书。

本学位论文属于:(请在以下相应方框内打"√") □公开 □延缓公开,延缓期限(___年_月_日至___年_月_日) 学位论文作者签名: <u>引</u> 日期: <u>2024</u>年<u>5</u>月27日 日期: <u>2024</u>年<u>5</u>月27日

基于参数化方法的焊接机器人与变位机协同规划算法研究

摘要:焊接机器人和变位机组成的焊接工作站,具有较强的柔性制造能力,能够胜任复杂焊件的焊接任务。两台设备在进行协同作业过程中,焊接机器人需要在末端执行器精确追踪指定路径的同时,保证整个系统运动的连续性和安全性。这种问题归属于路径逆运动学问题。通常而言,机器人系统需要利用运动学冗余来适应上述多任务焊接场景。为此,需要将冗余机械臂的冗余处理技术应用于处理焊接工作站的协同作业问题。然而,由于工作站中的两台设备的自由度在物理上是相互独立的,因此很难将冗余机械臂的规划技术直接应用于该系统,并解决其路径逆运动学问题。本文针对此问题展开了深入研究,主要开展了以下工作:

(1)针对目前的方法都是独立考虑两台设备自由度的问题,提 出了一种将整个焊接工作站联合建模成一台冗余机械臂的方法。所提 的方法首先将变位机的末端作为整个系统的基坐标系,将原本的两条 运动链耦合成单条运动链。然后,通过将两台设备的基座之间的相对 位置关系抽象为一系列虚拟关节和连杆,并结合Denavit-Hartenberg 串联连杆建模方法将焊接工作站建模成冗余机械臂。所提出的建模方 法能够推广至设备配置更加复杂的焊接工作站系统中。最后,基于所 建立的冗余机械臂模型完成正向运动学推导。此外,为了验证所建运 动学模型的正确性,本文依据实际情况在机器人操作系统(Robot Operating System)中搭建了双臂仿真模型,并验证了双臂模型与单 臂模型在运动学上的一致性。

(2) 对参数化方法的数学原理和实际应用方式进行了探究。首 先通过分析参数化方法获取解析解的过程,阐述了单个机械臂存在多 组参数化关节的原因,并提出了确认参数化关节数量和选择参数化关 节对象的方法。接着以焊接工作站的冗余机械臂模型的正向运动学方 程为例,获取了三组参数化关节,并完成其解析表达式的推导和求解 精度的验证。最后,利用从单个位姿的解流形的几何特征说明了三种 参数化关节之间差异性,并提出合适的参数化关节能够有效提升运动 规划算法的性能。

(3) 提出了一种在线配置参数化关节方法,并完善了结合参数

Ι

化方法和搜索算法的路径逆运动学求解框架。首先简要介绍了焊接工 作站的路径逆运动学问题。其次,详细介绍了路径逆运动学求解框架 的各个模块,针对运动学问题的决策空间具有非线性和非凸性,提出 使用搜索算法完成运动规划任务。接着,文章进一步从搜索算法优化 求解的角度,分析出参数化方法的本质是选出对目标运动贡献最大的 关节,并将其划分为非参数化关节。基于该结论进一步提出使用该部 分的可操作度作为选择最优参数化关节的评判指标,并完善了路径逆 运动学求解框架。然后,通过大量采样关节构型,发现各分参数化关 节部分的可操作度的相对大小关系不是唯一的,从而证明了在线配置 参数化关节必要性。最后,通过实验验证了在线配置参数化关节的方 法能够有效提升基于参数化方法的路径逆运动学算法的性能。

(4)为了有效解决焊接工作站的协同作业问题,首先将其视为 冗余机械臂的路径逆运动学问题,并基于改进的路径逆运动学求解框 架设计了求解算法。该算法基于 MOEA/D 框架,融合了在线配置参 数化关节的方法,并采用了两种基于路径信息的加速策略。接着,详 细介绍了本文需要处理的焊接工件,需要优化的任务目标和算法的参 数配置。最后,使用包括所提算法在内的三种算法来解决该问题,并 从整体运动幅度、关节靠近其极限次数和求解时间三个方面对比了三 种算法的求解性能。实验结果表明,所提出的联合建模方法和路径逆 运动学求解算法能够有效用于焊接工作站的协同作业规划。

图32幅,表15个,参考文献67篇

关键词:焊接工作站;路径逆运动学;多目标优化算法;参数化方法;机器人可操作性

分类号: TP242.2

Research on Collaborative Planning Algorithm of Welding Robot and Positioner based on Parameterization Method

Abstract: The welding workstation composed of a welding robot and a positioner has a strong flexible manufacturing capability and is capable of performing welding tasks for complex weldments. In the process of collaborative work between the two devices, the welding robot needs to ensure the continuity and safety of the whole system motion when the end-effector precisely traces the specified path. This problem is defined as the path-wise inverse kinematics(IK) problem. In general, robotic systems need to utilize kinematic redundancy to adapt to the above multi-task welding scenarios. For this purpose, the redundancy processing technique of redundant manipulators needs to be applied to deal with the problem of cooperative operation of welding workstations. However, the degrees of freedom(DOFs) of the two devices in the workstation are physically independent of each other. It is difficult to apply the planning technique of redundant manipulators directly to this system and solve its path-wise IK problem. In this thesis, we have conducted an in-depth study on this problem and carried out the following works:

(1) Due to the current methods mostly considering the degrees of freedom of two devices independently, a method is proposed to jointly model the entire welding workstation as a redundant manipulator. The proposed method first couples the original two kinematic chains into a single kinematic chain by using the end of the shifter as the base coordinate system of the whole system. Then, the welding workstation is modeled as a redundant manipulator by abstracting the relative positional relationship between the bases of the two devices as a series of virtual joints and links and incorporating the Denavit-Hartenberg tandem linkage modeling method. The method can be extended to welding workstation systems with more complex equipment configurations. Finally, the forward kinematic derivation is completed based on the established redundant manipulator model. In addition, to verify the correctness of the

kinematic model, this thesis builds a dual-arm simulation model in the Robot Operating System (ROS) according to the actual situation and verifies the kinematic consistency between the dual-arm model and the single-arm model.

(2) The mathematical principles and practical application methods of the parameterization method are explored. Firstly, by analyzing the process of obtaining the analytical solution of the parameterization method, the reasons for the existence of multiple sets of parameterized joints in a single manipulator are elaborated, and the methods of confirming the number of parameterized joints and selecting the objects of parameterized joints are proposed. Then, taking the forward kinematics equations of the redundant manipulator model of the welding workstation as an example, three groups of parameterized joints are obtained, and the derivation of their analytical expressions and the verification of the solution accuracy are completed. Finally, the geometric features of the solved manifolds from a single bit position are used to illustrate the differences among the three parameterized joints, and it is proposed that the appropriate parameterized joints can effectively improve the performance of the motion planning algorithm.

(3) An online configuration parameterized joint method is proposed and a path inverse kinematics solution framework combining the parameterized method and search algorithm is refined. Firstly, the path inverse kinematics problem of the welding workstation is briefly introduced. Next, the modules of the path inverse kinematics solving framework are introduced in detail, and the use of search algorithm is proposed to accomplish the motion planning task for the kinematics problem where the decision space is nonlinear and nonconvex. Then, the article further analyzes that the essence of the parametric method is to select the joints that contribute the most to the motion of the target from the perspective of search algorithm optimization solution. Based on this conclusion, it further proposes to use the operability of this part as a judgment index for selecting the optimal parameterized joints, and refines the path inverse kinematics solution framework. Then, through a large number of sampled joint configurations, it is found that the relative magnitude relationship of the operability degree of each subparameterized joint part is not unique, thus proving the necessity of online configuration of parameterized joints. Finally, it is experimentally verified that the online configuration of parameterized joints can effectively improve the performance of the path inverse kinematics algorithm based on the parameterization method.

(4) To effectively solve the cooperative operation problem of welding workstations, it is firstly regarded as a path inverse kinematics problem of redundant manipulators, and the solution algorithm is designed based on the improved path inverse kinematics solution framework. The algorithm integrates the MOEA/D algorithm, an online configuration parameterized joint method, and two acceleration strategies based on path information. Then, the welding workpieces to be processed in this thesis, the task objectives to be optimized, and the parameter configurations of the algorithm are described in detail. Finally, three algorithms including the proposed algorithm are used to solve the problem, and the solution performance of the three algorithms is compared in terms of the overall motion amplitude, the number of times the joints are close to their limits, and the solution time. The experimental results show that the proposed joint modeling method and path inverse kinematics solving algorithm can be effectively used for collaborative job planning of welding workstations.

Keywords: Welding Workstation; Path-wise Inverse Kinematics; Multi-objective Optimization Algorithm; Parameterization Method; Robot Manipulability **Classification**: TP242.2

第1章 绪论	1
1.1 选题背景和研究意义	1
1.2 国内外研究现状和发展动态	3
1.2.1 逆向运动学	3
1.2.2 运动规划	5
1.2.3 现状分析	7
1.3 研究目的	8
1.4 研究内容和文章结构安排	8
1.4.1 主要研究内容	8
1.4.2 文章结构安排	9
第2章 冗余机械臂路径逆运动学求解框架1	2
2.1 机械臂的运动学冗余1	2
2.2 路径逆运动学问题1	3
2.2.1 问题描述及算法要求1	3
2.2.2 数学模型1	4
2.3 冗余机械臂的路径逆运动学求解框架的介绍与改良1	4
2.3.1 关节配置1	4
2.3.2 任务组合1	5
2.3.3 关节空间搜索算法1	6
2.3.4 参数化关节组合的优化方案1	7
2.4 本章小结1	7
第3章 焊接工作站的运动学建模1	8
3.1 焊接工作站简介1	8
3.2 焊接工作站运动学模型1	9
3.3 正向运动学推导2	21
3.4 运动学模型的可靠性实验验证2	23
3.4.1 ROS 模型建立和可视化演示2	24
3.4.2 正向运动学验证2	26
3.5 本章小结	29

目 录

第4章 基于参数化方法的焊接工作站的逆向运动学	31
4.1 参数化方法的数学机理	31
4.1.1 参数化方法简介	31
4.1.2 参数化关节的确定	32
4.1.3 任务空间的参数化	33
4.2 焊接工作站的参数化解析逆解	34
4.2.1 工作站的参数化关节配置	34
4.2.2 参数化解析逆运动学推导	35
4.3 解析逆运动学解的验证	39
4.4 参数化解析表达式的解流形分析	43
4.5 本章小结	46
第5章 最优参数化关节的在线配置方法	47
5.1 参数化关节的最优性分析	47
5.2 基于可操作性的最优参数化关节配置方法	48
5.2.1 焊接工作站的雅可比构造	48
5.2.2 机械臂的可操作度	49
5.2.3 单点的最优参数化关节分析	50
5.3 在线配置参数化关节方法的算法设计	51
5.3.1 优化问题描述	51
5.3.2 性能评价指标	52
5.3.3 基于 MOEA/D 的路径逆运动学算法设计	53
5.4 在线配置参数化关节方法的有效性实验验证	56
5.4.1 目标路径介绍	56
5.4.2 参数设置	56
5.4.3 实验结果与结果分析	57
5.5 本章小结	58
第6章 焊接机械臂与变位机的协同作业规划	59
6.1 焊接工件和焊接任务描述	59
6.1.1 焊接工件及焊接路径描述	59
6.1.2 焊接任务描述	60
6.1.3 任务空间的参数化	61
6.2 基于改进路径逆运动学算法框架的协同规划算法设计	61
6.2.1 焊接工作站的决策空间分析	61

6.2.2 算法实现	. 63
6.2.3 基于路径的加速算子介绍	. 64
6.2.4 有效个体的生成	. 65
6.3 焊接工作站的协同作业仿真实验	. 66
6.3.1 算法参数设置	. 66
6.3.2 实验结果与数据分析	. 67
6.4 本章小结	. 71
第7章 总结与展望	. 72
7.1 论文总结	. 72
7.2 工作展望	. 73
参考文献	. 75
攻读硕士期间主要成果	. 81
致谢	82

第1章 绪论

1.1 选题背景和研究意义

在过去几十年的发展中,机器人焊接技术已经取代了人工焊接技术,成为全 球焊接作业市场的主导力量^[1],并在汽车制造业、造船业、航空航天业和工程机 械行业等多个领域得到广泛应用。焊接机器人的使用不仅有效地解决了劳动者逐 年对从事手工焊接的意愿下降的问题^[2],同时能够提高工作效率、缩短任务完成 周期、降低劳动力成本并提高操作安全性^[3-5]。近年来,伴随着新兴技术的迭代 升级,全球制造业进入了新的发展阶段。为了推进我国制造业迈向高质量发展, 国家工信部等十五个部门联合印发的《"十四五"机器人产业发展规划》指出,要 重点推进焊接机器人相关技术的研究,推动产品的高端化智能化发展^[6]。

在焊接过程中,通常希望焊接点能始终保持船型焊姿态。船型焊姿态是指焊 接点的切矢量呈水平方向、法矢量呈重力的相反方向的姿态。目前,已有大量实 践证明,在采用船形焊接姿态进行焊接时,可以获得良好的焊接质量和较高的焊 接速度^[7]。然而,随着工作环境日趋非结构化以及焊接工件的结构复杂程度增加, 单个焊接机器人已经无法在无人干预的情况下以船型焊姿态完成所有的焊接作 业。一种解决方案是在焊接系统中引入带有两个旋转关节的变位机,构成"焊接 机器人+变位机"系统(后统称为焊接工作站),见图 1-1。变位机为焊接系统引 入的额外的自由度,可以提升焊接系统柔性制造的能力。然而,这也带来了两台 设备进行协同焊接作业的挑战。具体而言,在焊接工作站完成指定焊接任务的过 程中,两台设备的运动要连续平滑且不发生碰撞;焊接机器人需要保证焊枪能精 确地抵达焊点且远离奇异位置;变位机必须时刻保证焊接点接近于船型焊姿态等。



图 1-1 变位机(左)和6轴焊接机器人(右)

当前,国内外工厂主要采用"示教和回放"模式^[8]和离线编程^{[9][11]}来规划焊接 机器人的运动。然而,在实际的焊接场景中,由于安装误差和加工误差的存在, 焊接目标的姿态常常是可变的。"示教和回放"的模式需要保证焊接场景的高度一 致化,其对于这种环境干扰造成的响应差,很难做到误差补偿^[12]。离线编程的方 法虽然能够完成机械臂运动仿真、防碰撞检测和运动规划等任务,但是这类方法 都是在离线状态下完成的,无法感知工业现场的变化,缺乏灵活性^[30]。近年涌现 了一些针对焊接工作站协同运动规划的研究,但大多基于"主从机械臂"的思想完 成指定规划任务。具体而言,它们将焊接系统建模成双臂机器人,并在规划阶段 先设定变位机的运动,再规划机械臂的动作。这类方法无法充分利用系统的冗余 特性,很难让焊接工作站完成上述挑战。

鉴于焊接工作站在运动学上属于冗余系统,另一种可行的思路是将焊接工作 站耦合成一个冗余机械臂^[13],并采用冗余机械臂的规划方法来解决其协同规划问 题。冗余机械臂是指机械臂的自由度大于工作空间自由度的一类机械臂,能利用 多余的自由度同时完成多项任务。回归到焊接规划本身,其本质上可以归属于冗 余机械臂运动规划中的路径逆运动学。

路径逆运动学是在指定的具有多种约束的笛卡尔路径下,生成能与目标路径 进行高精度匹配的可行且连续的最佳关节路径的过程。其常用的做法是先将目标 笛卡尔路径离散为密集的一连串目标点,然后对这一连串目标点进行逆运动学求 解,最后在关节空间将所有路径点的逆解连接起来。针对该问题,一类结合了参 数化方法和搜索算法的方法在同时处理高精度的末端匹配和最优化其他目标上 有着出色的表现^{[14][15]}。在这类算法中,所使用的参数化方法通过参数化特定的 关节来获取冗余机械臂的特殊解析解,保证了实时的高精度逆运动学解算,让冗 余机械臂能够充分利用剩余的自由度完成其他任务。这种方法与耦合后焊接工作 站非常适配,因为焊接机械臂本身能够获取解析解,所以可以自然地将双旋转轴 变位机的两个自由度选为参数化关节。然而,这并不意味着两者的耦合是毫无意 义的做法,因为将焊接机械臂与变位机组合成冗余机械臂后,其原本的运动学模 型结构会发生变化。这种变化可以为冗余焊接系统带来新的可供选择的参数化关 节,同时也衍生出最优参数化关节的选择问题。但截至目前都没有相对完备的理 论研究。

综上,焊接系统的智能化和路径逆运动学理论的发展目前面临上述的一些关键问题,这些问题直接影响着机器人焊接技术的提升和机械臂运动规划方法在实际应用中的效率和性能。因此,本研究通过深入探究并解决这些问题,希望为焊接系统的智能化和路径逆运动学理论的发展提供新的思路和方法。这不仅有助于提高焊接系统的自动化水平,减少人工干预,提高生产效率,还可以为工业机器

人的设计和应用提供更加可靠和高效的路径规划和控制策略。

1.2 国内外研究现状和发展动态

焊接工作站在进行作业时,需要依赖逆向运动学和运动规划技术,这两项技术的发展对其具有重要意义。通过深入研究这两个领域的发展脉络,可以找到满足焊接工作站需求的参考方案。

1.2.1 逆向运动学

机械臂的逆向运动学描述了将机械臂末端在笛卡尔空间的位置映射到关节 空间的过程,实时获得逆运动学解是实现高效的运动规划的基础^{[16]-[18]}。通常而 言,只有结构满足 Pieper 准则^[19]的自由度不大于 6 的机械臂能够获得解析逆向 运动学解(后简称解析逆解),其优点在于精确性和快速性;而不满足该准则的 机械臂只能采用数值解法来获取近似解。因此,现代工业生产线的焊接机械臂大 多都是基于 Pieper 来设计的。而对于由焊接机械臂和变位机耦合成的冗余机器人 无法用普通的解析解法进行求解,且对于指定的末端位姿会有无穷多个逆解。目 前针对冗余机械臂的逆运动学可以分为位置域的逆解方法和速度域的逆解方法。 (1)速度域的方法

速度域的方法利用机械臂关节空间的高阶微分来解决冗余机械臂的逆运动 学问题。基于雅可比矩阵的微分逆运动学是目前最为主流的方法,其核心思想是 通过机械臂的雅可比矩阵来描述末端位姿和关节空间之间的映射关系。在这种方 法中,通常假设已知初始关节构型和目标末端位姿。然后利用雅可比矩阵的逆矩 阵反复迭代出关节角度的变化, 直到末端位姿达到预先设定的精度收敛条件, 其 过程如图 1-2 所示。然而,冗余机械臂的雅可比矩阵通常因为其列不满秩而不可 逆。Buss^[20]等人提出了使用伪逆矩阵替代逆矩阵的方法,并在求解方程中引入零 状态空间,以避免关节奇异点和极限情况。Wampler^[21]提出了阻尼最小二乘法 (DLS),证明了在一定条件下 DLS 比基于雅可比伪逆矩阵和转置雅可比矩阵 的方法具有更好的性能。但是,上述方法都存在一个问题,如果机械臂的初始构 型处于距离关节极限较近的区域,那么迭代过程很可能会因为关节极限导致算法 陷入局部极值或者收敛失败的情况。Trac-IK^[22]在文中指出了该问题,并提出通 过随机重启策略和引入顺序二次规划(SQP)来提高成功率。然而,即使采用了 Trac-IK 中提出的改进方法,仍然存在一个问题未能得到充分解决:当目标位姿 远离初始位姿时,机械臂需要大幅度调整才能达到目标位置。在这种情况下,机 械臂可能会受到关节极限和奇异值的影响,导致运动变得难以预测。



图 1-2 雅可比迭代法

(2) 位置域的方法

相较于速度域的逆运动学方法而言,位置域的逆运动学方法具有精度高、重 复性好等优点,具有很强的应用价值。目前位置域的逆运动学主要有几何迭代法 和特殊的解析求解方法。

几何迭代法包括几何解析法和其他按照一定顺序对单一关节进行逐一调整 的算法,例如 CCD^{[23][24]}和 FABRIK^[25]算法。这一类算法最初被设计用于处理具 有简单几何结构的机械臂的逆运动学,其计算复杂度会随着关节数量的增加而显 著增加。后续基于 FABRIK 算法的改动成功解决了一款电缆驱动机械臂的运动 规划问题,实现了窄通道探索任务^{[26][27]}。但是这类方法是无法考虑末端的运动, 且很容易计算出机械臂无法执行的关节运动。

特殊的解析求解方法通常是对机械臂中的冗余进行参数化描述,实现达到机 械臂自由度与运动学约束数量相匹配,从而让机械臂能够得到"参数化解析解"。 文献^[28]中首次提出了用臂角描述机械臂的冗余特性。Shimizu 等^[29]遵循臂角的概 念,成功地将臂角参数化方法应用于 S-R-S 型机械臂,为其提供了解析解。该 方法能够通过臂角来表征冗余度机械手的自运动,给机械臂的运动作为新增的自 由度,实现约束和自由度的匹配,因此得到了广泛的应用。然而,该方法仅适用 于具有旋转关节和臂角特征的类人七轴机械臂。Lee 和 Bejczy^[30]提出了一种基 于参数化关节的方法来推导机械臂的解析表示,文中选用了两个关节作为参数化 关节完成了一款八轴机械臂的解析表达式的推导。Wu^[14]等人用该方法成功为一 款八轴喷浆机械臂找到了参数化解析解。但是,这两篇文章都没有对存在多种参 数化关节的可能性进行讨论。Qin 等人^[31]为了 SSRMS 机械臂找到了 4 种可行的 参数化关节方案,但是在研究中只选择了一组参数化关节用于运动规划,而这种 选择是没有理论判断依据的。Xie 等人^[32]为八轴喷浆机器人找到了 8 种可能得参

数化关节,并提出一种基于解流形特征的判断方法选出了一组最优的参数化关节 组合。但是该方法目前只被用于带有移动关节的特殊机械臂,尚不知道该方法在 一般机械臂上的效果。

1.2.2 运动规划

运动规划技术是焊接机械臂完成指定任务的重要组成部分,其通常被安排在 工艺流程规划完成之后^[33]。在这个阶段,焊接机械臂末端的焊接路径被初步确定, 需要进一步对焊接机器人的各个关节的运动进行规划。焊接机械臂和变位机的协 同规划方式会受到其运动学建模的影响,目前主要有两种方法:一种是将焊接工 作站分解为双臂进行协同规划,另一种是将焊接工作站视为整体,然后利用冗余 机械臂的规划方法来解决问题。

(1) 焊接机械臂和变位机的双臂协同规划

目前主流的建模方法都是以双臂机器人的思路完成整个系统的建模,焊接机 器人和变位机都以其基座为基础坐标系,然后沿着运动链向各自的末端依次建立 每个关节的坐标系,最后整个系统形成闭环的运动链,后续的规划将在此基础上 展开。Liu 等人^[34]用川崎焊接机器人和一台2自由度变位机协同完成了一个非理 想球管接头的焊缝的焊接规划。这个研究为了保证焊缝处于适合焊接的状态,先 完成了变位机的运动学解算,然后再利用 B 样条曲线完成焊接机器人的运动规 划。Chen 等人^[35]提出了一种机器人和变位机处理复杂空间曲线工件的同步协同 规划算法(SCPP)并针对交叉线工件的焊接场景,添加焊枪的 Y 轴的约束来优 化交叉线工件的取向信息,实验结果表明,焊接系统在整个运动中保持同步协作, 没有发生干扰现象,并且在焊接交叉线工件期间焊枪的取向基本保持不变,方法 中同样采用优先确定变位机角度的方式来处理整个系统的运动学问题。张东霖等 人[36]同样采用分开计算的方式完成了焊接机器人和变位机的协同规划任务。 Zhao 等人^[37]将变位机视为冗余自由度,以机器人的远离关节极限作为优化目标, 以关节极限、相邻焊点间关节的运动距离和变位机与机器人之间的运动学关系作 为约束,用遗传算法解决了机器人和变位机的关节规划问题,该研究先提高了关 节轨迹的平滑度, 增加了摩擦焊时的机体刚度, 但是该方法不具有处理多目标优 化的能力,无法适应更加复杂的焊接环境。Xu等人[38]通过找到焊接机器人关节 和变位机关节之间的解析表达式,但在文中只是简单地通过假设变位机角度已知

和固定机器人的特殊关节角度来完成整个系统的解析解。

(2) 冗余机械臂的运动规划

在使用冗余机械臂式的规划方法前,需要先对整个系统进行耦合式的运动学 建模。目前已经有了一些参考方案。Su 等人^[39]在无人机和机械臂之间设置了虚

拟关节,从而将飞行机械臂建模成一个整体,完成了飞行机械臂的顺序操作的规 划和控制。Haviland 等人^[40]同样采用耦合建模的方式完成了一台冗余移动机械臂 的运动规划和控制问题。My 等人^[13]以单旋转轴变位机作为整个系统的运动链的 起始端,将其与六轴焊接机械臂组成一台七轴冗余机械臂,并采用雅可比方法完 成运动规划。他们采用了积分和闭环控制相结合的方式对机械臂进行运动控制, 成功地完成了预选轨迹的仿真,提高了运动控制精度并减少了示教时间。然而, 该方法仅完成了末端精度任务,且并未考虑更为复杂的焊接系统的建模方式。在 这些方法中,对两部分的耦合建模能够很自然地能实现其自身冗余自由度的充分 利用,从而平滑地实现整机运动规划。

冗余机械臂的运动规划通常包括基于采样、基于雅可比和优化的方法。基于 采样的运动规划方法会利用随机样本来引导搜索策略,例如探索随机树(RRT)^[41] 和概率路图(PRM)^[42]。Jaillet 等人^[43]对 RRT 算法进行改进,提出了一种 T-RRT 算法用于机械臂关节空间搜索,实现了六自由度机械臂的运动规划。但是,由于 机械臂的关节空间过于庞大,这类方法通常无法在线使用。为此,动态路线图 (DRM)^{[44][45]}通过将关节配置编码为工作空间占用信息,在算法上减少了冲突 检查时间,具有一定的在线能力。这些算法目前主要应用于单一目标点的求解, 但是其在同时保持运动连续性、优化末端姿态和避障等方面的性能尚不清楚。

基于雅可比矩阵的运动规划方法是主要用于处理多任务的情况。任务可以由 等式约束(例如,跟踪笛卡尔轨迹)或不等式约束(例如,保持关节在其允许的 运动范围内)组成,并根据其各自的重要性呈现不同的优先级。一般而言,与安 全相关的任务,如执行避障^[46]、避奇点^[47]等保证本体运动能力完整的任务被认 为是最重要的,因此被赋予最高优先级;而操作任务只有在其执行不干扰高优先 级任务的完成时才可以被精确执行,如遵循预期的末端执行器轨迹;在完成上述 任务后才会考虑优化运动的指标,比如最大化可操作度^[48]。基于此,基于零空间 投影的任务优先级框架^[49]得到了广泛的推广。这类框架通过将次要任务的速度投 影到主要任务的雅可比矩阵零空间中,从而有效地处理多个子任务。然而,基于 雅可比矩阵的优先级处理框架的设置较为复杂且无法很好地处理不等式约束,且 同样对初始构型的选取具有很强的依赖性。此外,这类方法只工作于速度域,无 法分析全局关节空间^[29]的性质。

在基于优化类的方法中,一类做法是将目标笛卡尔路径和关节运动作为整体 来进行优化,如 CHOMP^[50]、STOMP^[51]和 TrajOpt^[52]。算法中为机械臂的平滑运 动和运动过程中的避障设计了适应度函数,最后通过特殊的梯度下降来解决了运 动规划问题。然而,使用这些方法计算的运动轨迹的质量和收敛性在很大程度上 取决于初始条件的质量。此外,这些方法通常根据预先计算的环境有符号距离场

来制定其环境碰撞避免目标函数,只适合于做离线规划。另一类做法是将运动规 划问题转换成路径逆运动学问题。为了求解该问题,已有部分研究被提出。 Rakita^[53]等人提出了 Stampede 算法,在一连串目标点形成的关节空间离散图上 使用动态规划算法完成关节空间运动的优化。但是该方法需要对可行的逆解进行 采样导致运行时间过长,因此只能用于离线求解。为了实现在线规划,该团队将 陆续提出了 RelaxedIK^[54]和 CollisionIK^[55],将路径逆运动学建模成一个单目标优 化问题,并基于贪心准则逐点完成指定路径的运动规划。然而,该方法是将多个 目标和软约束进行简单加权求和,不存在优先级概念,无法充分保证重要目标的 完成。此外,其本质上是局部规划器,缺少了全局求解能力。与之类似的工作中, 还有 Starke 等人^[56]提出的模因进化算法。该研究也将运动规划问题建模成单目 标优化问题,并采用搜索算法完成逆运动学求解,并在动画制作中取得了较好的 应用。最近的 TROM^[57]将整条路径作为优化对象,并利用两阶段梯度下降算法 完成了指定笛卡尔路径的逆运动学求解。上述方法在处理路径逆运动学问题都采 用了放松部分约束的方法找到一组关节运动,通常生成都是局部优秀的运动,且 在任务配置方面比较死板。为此,一些适用于全局优化 NP 难问题的进化算法如 遗传算法[58]、粒子群算法[59]等首先得到尝试。这些方法可以从全局角度获得最 优可行解,并且可以方便地添加子任务。不幸的是,随着机械臂自由度的增加, 其求解时间几何倍数增长,难以满足实时性要求。针对上述问题,Wu^[14]将参数 化方法和多目标优化算法相结合,有效减少了决策空间的维度。该算法中通过利 用解析解的特性保证了操作任务的充分完成,让搜索算法集中于软约束的优化。 虽然算法也是基于贪心准则完成指定路径的逆运动学求解,但搜索算法的使用在 一定程度上保证了算法的全局寻优能力。

1.2.3 现状分析

通过分析本课题的研究现状和发展动态,可以总结出以下几点:

1)焊接工作站的运动规划方法与其运动学建模方式紧密相连。现有的研究 大都是采用双臂协同的形式来完成系统的建模和运动学求解,通常会让焊接机器 人和变位机之间存在着主从机器人的概念。基于该模型的算法必须以找到变位机 关节数值作为前提才能找到剩余关节的数值,规划效率较低且大都属于离线规划。 针对焊接机器人和变位机的协同规划问题,随着焊接任务的复杂度增加,很多约 束和任务都需要同时考虑,比如避障,避奇异,焊接姿态优化。此时,这类方法 很难在有限的时间内完成多任务和多约束下的协同运动规划。相较而言,冗余机 械臂式的建模方法能够消除主从机械臂的概念,更好地利用变位机所带来的自由 度,但现有的研究缺乏对于焊接工作站的完备联合建模方法。 2)参数化方法是一种能够为冗余机械臂实时提供精确解的方法。尽管在实践中已验证其有效性,但是由于其几何意义不够明确,目前没有太多研究深入挖掘该方法的潜力。与此同时,现有研究表明参数化方法能够为冗余机械臂提供多种参数化关节。但尚未有研究深入探讨不同参数化关节对运动规划性能的具体影响,以及如何最优地选择参数化关节。因此,进一步的研究有必要探索参数化方法在冗余机械臂运动规划中的潜在优势和最佳应用策略。

3)焊接系统的运动规划问题多为已知焊接路径的路径逆运动学问题。在上 述提到的逆运动学和运动规划方法中,大部分方法都不适用于该问题。图搜索的 方法虽然能够在完整图中找到最优的关节运动,但是它们常需要花费大量的时间 来构建有效的关节空间图,不适合处理变化的规划场景。基于任务优先级的雅可 比矩阵迭代法旨在针对单一目标找到满足约束的最优解,当将其应用到一连串目 标点求解时,尤其是当目标路径点对应的有效关节构型主要分布在关节极限处时, 算法通常会陷入局部极值导致运动不连续。已有的路径逆运动学算法在多任务处 理和求解时间上往往难以取得良好的平衡,尤其是在需要获取高精度逆解的场景

1.3 研究目的

本研究针对上述问题提出了一系列解决方案,旨在有效应对焊接工作站的协同规划挑战。首先,将引入一种联合运动学建模方法,用于描述焊接机械臂与双旋转轴变位机之间的复杂运动关系。这种方法不仅适用于当前研究所涉及的焊接系统,还可以拓展到更加复杂的焊接系统中。其次,将焊接工作站的协同规划问题转化为冗余机械臂的路径逆运动学问题,并沿用了先前研究[15]中的求解框架来求解该问题,为规划焊接工作站的自主柔性作业提供了一种全新的思路。最后,对参数化方法的数学机理进行了详细的分析,并综合考虑参数化方法的优势和机械臂的特性,提出了在线选择最优参数化关节的方法。这一步骤的目的在于完善现有基于参数化方法的路径逆运动学算法的理论框架,以确保该框架在实际应用中能够更有效地解决焊接工作站的协同规划问题,从而提高协同规划的效率。

综合而言,这些解决方案的提出将为焊接工作站的协同规划问题提供新的思路和方法,为实现焊接系统的自主柔性作业奠定坚实的理论和技术基础。

1.4 研究内容和文章结构安排

1.4.1 主要研究内容

本研究旨在将智能化技术应用于焊接工作站的作业规划,以提高其柔性作业能力。焊接工作站在处理复杂工件的焊接任务时,其使用的规划算法需要具备准

确性、快速性、可行性等能力。规划算法的准确性是指算法中需要高精度的逆运 动学解。如果机械臂末端不能准确到达焊缝点,那么焊枪将无法与工件进行接触, 从而无法展开焊接作业。快速性要求算法完成规划的效率要高,这样才能满足工 业现场对于高效完成焊接任务的要求。可行性是指生成可行的机体运动轨迹,以 规避焊接工作站在作业过程中可能出现的机体碰撞风险和奇异位置。此外,还需 要考虑焊接工作站中设备的运动能力约束。在配合完成焊接规划的过程中,两台 设备需保证运动的连续性,并尽量使各关节处于其运动范围的中心位置,以最大 程度减少对关节的损伤。如果将两个设备作为独立的个体来协同完成上述所有任 务,对于算法的设计和鲁棒性验证而言将是一个极大的挑战。

本文的核心工作是将冗余机械臂的路径逆运动学求解技术与焊接工作站的 具有多约束和多任务焊接场景相结合。为实现此目标,首先需要将焊接工作站从 运动学上联合建模成一台冗余机械臂。然后,再在此基础上进行逆运动学求解和 设计规划算法。虽然变位机的关节由于焊接机械臂具有解析解,可以自然地作为 参数化关节,但焊接机械臂与变位机的运动学耦合可能会导致产生更多可选的参 数化关节。基于此,本文会深入分析参数化方法的数学机理,分析产生多组参数 化关节选择的可能性,并探讨不同参数化的关节选择对于运动规划效果的影响。 此后,本研究会将参数化关节的优化也加入路径逆运动学的求解框架中,用于辅 助其提升规划结果的性能。最后,本文将会基于完善后的框架设计焊接工作站的 规划算法。针对逆运动学约束的高度非线性和决策空间的非凸性,本文还将基于 机械臂运动连续性和相邻目标位姿的决策空间相似性设计算子,用于增强局部搜 索能力,加速算法收敛,从而解决复杂焊件的焊接任务,并在 ROS 中搭建仿真 系统并完成仿真验证。

1.4.2 文章结构安排

本文围绕焊接工作站中的双旋转轴变位机与焊接机械臂的协同作业规划问题开展研究,共分为六章。各章节的内容安排如下:

第一章:绪论。本章首先介绍焊接机械臂与变位机协同规划问题的时代背景, 明确该问题可以等效为冗余机械臂的路径逆运动学问题,并阐述使用冗余机械臂 技术解决焊接工作站协同规划问题的研究意义。接着,通过深入调研工业界应用 情况和相关理论研究现状,引出本文的研究内容和创新性。

第二章: 冗余机械臂路径逆运动学求解框架。主要提出了对于已有的基于参数化方法的路径逆运动学求解框架的改良方法。首先介绍了机械臂的运动学冗余和路径逆运动学的定义。然后,指出了路径逆运动学算法的设计要求,最后,针对现有框架的不足提出了改进方案。

第三章:焊接工作站的运动学建模。焊接工作站的运动学模型对其逆运动学 求解方法和运动规划方法的设计具有重要影响。本章中将重点介绍焊接工作站的 联合建模方法,并完成基于该建模方法的正向运动学公式的推导。此外,本章会 在机器人操作系统中建立焊接工作站的仿真环境,验证所建立的冗余机械臂模型 的正确性。

第四章:焊接工作站的逆向运动学。首先,本章中会深入阐明参数化方法的 数学机理,包括介绍参数化关节是如何应用于冗余机械臂的解析求解,以及提出 确定参数化关节对象和数量的方法。接着,本章会采用参数化方法给焊接工作站 提供多种参数化解析解。最后,文章将基于机械臂的解流形来分析不同参数化解 析解之间的区别。

第五章:最优参数化关节的在线配置方法。本章将探讨参数化方法的本质, 分析在线配置参数化关节的必要性。同时,文中会提出一种在线配置最优参数化 关节的方法,对基于参数化方法与搜索算法相结合的路径逆运动学求解框架进行 完善。最后,将多目标优化算法与不同的参数化关节配置方案相结合,通过处理 同一个的路径逆运动学问题,验证了所提在线配置参数化关节的方法能够提升规 划框架的性能。

第六章:焊接机械臂与变位机的协同作业规划。将路径逆运动学算法框架应 用与焊接工作站的实际作业中。首先,描述了焊接工作站需要处理的焊接工件和 焊机任务。接着介绍了焊接工作站的决策空间的性质,并基于此提出在算法中加 入路径信息以加速算法的收敛效率。最后通过实验验证了所提的冗余机械臂的建 模和路径逆运动学算法的有效性。保证了焊接工作站的高效规划。

第七章:总结与展望。本章将首先对全文进行了全面总结,回顾本文的主要 贡献和创新之处,深入探讨在解决焊接工作站协同规划问题方面所做的工作,并 对其进行全面梳理和评估。其次,文中将对研究成果的应用前景和未来的研究方 向进行展望,指出可以进一步深入探索和完善的领域,以期为焊接工作站的协同 规划问题和路径逆运动学问题的理论框架完善提供更多解决方案和创新思路。



图 1-3 论文整体框架

第2章 冗余机械臂路径逆运动学求解框架

本章主要提出一种对于基于最优参数关节配置方法的冗余机械臂路径逆运 动学求解框架。首先,本章将介绍机械臂的运动学冗余和冗余机械臂的定义,并 阐述将焊接工作站视为冗余机械臂在多任务场景中的优势;接着,本章将介绍路 径逆运动学问题定义,提出其与冗余机械臂结合时将会面临的诸多挑战,并给出 该问题的数学描述。最后,简要介绍结合了参数化方法与搜索算法的冗余机械臂 路径逆运动学的求解框架,并根据该框架中存在的不足提出改进方案。所提框架 应用于焊接工作站的具体细节将在后续章节中进行介绍。

2.1 机械臂的运动学冗余

在介绍机械臂的运动学冗余概念之前,先要明确机械臂的关节空间、关节构型、工作空间和任务空间等概念。

机械臂的构型空间是指机械臂所有关节的运动空间,其维度数量 n 就是关节的数量,也即机械臂的自由度数量,通常被记为 $\Theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n]^T \in R^n$;关节构型则是机械臂在特定时刻的一组关节位置或角度,不同的关节构型能够对应相同或者不同的工作空间中末端位姿。

机械臂的工作空间是指所有末端可达的位姿的集合,其大小取决于机械臂的 几何结构和关节运动极限。在机器人领域中,通常会用齐次变换矩阵 $X \in SE(3)$ 来 描述工作空间中的特定位姿。此外,也可以用笛卡尔坐标系中的一组的六维数据 $\hat{X} = [\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, \alpha, \beta, \gamma]^{\mathsf{T}}$ 描述机械臂的末端位姿。 $[\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}]^{\mathsf{T}}$ 和 $[\alpha, \beta, \gamma]^{\mathsf{T}}$ 分别表示一个三 维位置向量和一组欧拉角,代表末端刚体的6维自由度的方向。

机械臂的任务空间是指机械臂在执行目标任务时所需要的运动空间 R^m,与 机械臂的构型无关,其维度 m 为完成任务所需要的自由度数量。在具体的任务 中,或者某些末端的自由度对于指定任务是不必要的,或者因为特殊约束而无法 产生运动。此时,虽然单个末端位姿仍需要 6 维位姿数据来进行描述,但是从末 端运动的角度考虑,由于刚体的运动在某些自由度上不做功,这些自由度的数据 是不会发生变化的。比如在固定 6 轴机械臂朝向的末端移动任务中,关节的运动 只需要为机械臂的末端提供 3 维移动自由度,而剩下的 3 位旋转自由度可以保持 数值不变。

机械臂的运动学冗余通常是指机械臂的自由度数量 n 大于末端完成任务所 需要的自由度数量 m。当机械臂在指定任务中需要具备朝任意方向运动的能力 (即所需自由度数量 m = 6)时,需要机械臂的自由度数量大于 6 才能构成运动 学冗余,这类机械臂通常被称为冗余机械臂;而当任务空间维度低于 6 时,即使

是非冗余机械臂(即自由度不大于6)的机械臂也能够形成自由度的冗余,比如 在使用3轴机械臂在平面画圆时,任务空间只需要2维度的移动自由度,此时机 械臂中会有1维度的自由度冗余。

运动学上的冗余能够为机械臂提供自运动特性,使机械臂能够在完成主要目标的同时,利用冗余的自由度处理次要任务。比如只要求末端精确抵达指定位置时,可以利用剩余的自由度实现机体的避障。焊接机械臂和变位机组成的焊接工作站同样是一种冗余系统,变位机提供的冗余自由度能够显著提升机械臂的灵活作业能力。然而,大多数的协同规划方法在解决焊接工作站的协同作业时,会先预定义其变位机的动作,然后再规划机械臂的运动。这样的处理方法能一定程度上满足需求,但是当工件的形状发生变化,且环境中出现障碍物时,这样的方法是无法充分利用系统的冗余特性快速适应这种变化的。针对这种场景,需要将两者的自由度进行整合,然后以冗余机械臂邻域的冗余分解技术来处理复杂任务下的规划问题。

2.2 路径逆运动学问题

2.2.1 问题描述及算法要求

传统的机械臂逆运动学问题需要为单个指定的末端找到能够与之精确匹配 的关节构型。目前,这类问题已经有了非常成熟的解决方案。然而,在路径逆运 动学问题中,机械臂需要对一系列离散的路径点进行连续地逆运动学求解,所求 的逆解除了需要满足单点求解的精度以外,还需要保证相邻的点之间的运动是平 滑且安全的。

具体而言,在焊接作业中,焊接路径通常也会被离散成一系列路径点,机械 臂需要沿着依照路径点的序号依次移动到指定位置。一种可行的方式是使用成熟 的逆运动学方法对于路径点序列进行依次求解。但是在这个过程中,如果某些相 邻的路径点之间存在奇异位置或者障碍物,就可能发生相邻的关节运动出现大跳 变,机体与障碍物发生碰撞等状况。此外,当机械臂在处理大型路径的路径逆运 动学问题时,在路径点中可能会出现某个关节接近关节极限的情况。为了保证后 续路径点的逆运动学求解,该关节很可能会被强制进行大的运动跳变。

上述场景中对机械臂的各向运动能力都提出了较高的要求,因此只能选择冗 余机械臂利用其自身的冗余特性来同时解决这些问题。然而,上述的多约束和多 任务场景也给冗余机械臂的路径逆运动学算法设计带来了挑战。具体而言,所设 计的算法在处理路径逆运动学时要具备以下能力:

1) 求解精确性: 所求出的逆解要实现与指定路径中的末端姿态精确匹配;

2) 求解实时性:工程应用中对于算法的求解时间提出了较高的要求,需要

单个路径点的逆解能够在较短的时间内完成;

3)运动连续性:路径逆运动学的解是一系列的关节空间空间的运动,要求 这些关节运动不能发生跳变;

4)运动安全性:机体在运动过程要防止本身与环境中的障碍物发生碰撞, 且也要避免自碰撞的发生;

5) 鲁棒性:机械臂在作业时,其目标路径和任务可能会发生变化,所提的 算法需要有较强的多任务处理能力和路径适应能力,保证在不同场景下的算法成 功率。

2.2.2 数学模型

通常,路径逆运动学问题首先会按照特定规则对目标路径进行采样,然后将 每个路径点的逆运动学问题视为一个约束多目标优化问题。每个路径点上的优化 问题的数学表达可以描述为:

$$\min_{\Theta} \quad \{f_1(\Theta), f_2(\Theta), \cdots, f_k(\Theta)\}$$
s.t. $C_{ie}(\Theta) \le 0, C_e(\Theta) = 0$

$$(2-1)$$

其中, *f_i(·)*, *i* = 1,2,…,*k* 是优化任务的适应度函数, *k* 是优化目标的数量, *C_{ie}(***O**) 表示当前路径点上需要满足的不等式约束,比如关节极限约束, *C_e(***O**) 为路径点上的等式约束,在机械臂中通常表现为其运动学约束。在后续的章节中,会详细介绍上述优化目标和约束在路径逆运动学中的具体形式。

2.3 冗余机械臂的路径逆运动学求解框架的介绍与改良

研究[14]提出了基于贪心准则的解决方案来解决上述问题。该方案通过逐个 找到每个路径点对应的最优关节构型,实现关节空间中完整运动的求解。该研究 中提出的路径逆运动学求解框架包括了关节配置,任务组合和关节空间搜索算法 三个模块,各模块之间的信息传输如图 2-1 所示。目前,该方法已经被成功应用 到了一款八轴喷浆机器人的路径逆运动学问题的求解。然而,原框架中对于关节 配置部分的研究仅限于人为地选择一组参数化关节方案,并未讨论参数化方法带 来的多种参数化关节配置的可能性,以及不同参数化关节配置对于路径逆运动学 求解的影响。基于此,本文对于该框架的关节配置部分进行了完善。接下来将在 本节中简要介绍每个模块的功能。

2.3.1 关节配置

在 2.2.2 小节定义的约束多目标优化问题中,问题的决策变量就是所有的关 节变量。冗余机械臂的关节变量通常会张成的 6 维以上决策空间,而基于数值迭

代类的逆运动学方法法往往会因此花费较大的计算成本获取一个近似精确的逆 解。相对而言,参数化方法通过分离出一部分关节作为已知量,进而获取剩余关 节的解析解析表达式,以实现关节空间的降维。这种降维有两方面的作用:一方 面,通过对部分关节进行参数化,可以减少运动学方程中的自由度,使得单个目 标位姿可以得到解析求解,进而实现高效精确地冗余机械臂逆运动学解算。另一 方面,在对路径逆运动学的优化求解过程中,参数化方法通过构建参数化关节到 非参数化关节部分映射实现了决策空间的降维。



图 2-1 路径逆运动学求解框架

具体而言,以本文的研究对象焊接工作站为例,在不使用参数化方法时,原 始的优化问题中会涉及八维的决策变量。而采用参数化方法后,通过建立参数化 关节与非参数化关节之间的映射,使参数化关节成为问题的主动决策变量,有效 降低了决策变量的维度。

2.3.2 任务组合

任务组合模块主要根据所需完成任务的性质确定其处理方式。在机械臂运动 规划中,常见的任务包括避障、末端精确匹配和关节连续运动等。按照基于任务 优先级框架的逆运动学方法的定义,列举的三个机器人任务依次对应从高到低的 三个任务优先级,如图 2-2 所示。基于零空间投影的方法^[49]通过将低优先级任务 的速度投影到高优先级任务的零空间中,从而实现多任务的同时处理。然而,由 于优化层的任务处于最底层,这种方法很难保证这些任务的优化效果。 不同于零空间投影法,本框架中对于三种优先级任务的处理方式并不固定, 部分任务任务会同时当成硬约束和软约束参与到路径逆运动学的优化求解。具体 而言,当机械臂远离障碍物时,末端匹配的精度任务会被作为首要的硬约束被处 理。在本文框架中,逆运动学的求解精度已经通过参数化解析解得到了保障,剩 下的两类任务都可以作为软约束进行优化。然而,当障碍物出现在机械臂机体上 时,避障任务应当同时作为硬约束,以过滤掉不可行的解。通过这种方式,能够 在保证机体安全精确运动,并有效保证优化任务的优化效果。



图 2-2 任务优先级框架

2.3.3 关节空间搜索算法

关节空间搜索算法的选取需要综合考虑约束和解空间等多方面的性质。由于 机械臂自带对于末端精度的非线性运动学约束和关节极限关节约束,这些约束会 让解空间具备较强的非凸性。如果使用工作[30]中的梯度类的优化技术来进行逆 运动学的优化求解,虽然能在求解效率有较好地表现,但是很容易因为解空间的 非凸性而进入梯度消失的区域,此时只能通过梯度投影技术来获取进一步完成优 化,但是优化求解的精度难以得到保证。

相较而言,基于进化算法的多目标优化技术在处理这种 NP-难的问题上具有 较大的优势,这类方法具备一定全局搜索能力,同时还能方便地添加更多的子任 务,但是在优化效率上相对较差。为此,本文会结合路径信息提出多个加速算法 收敛的策略,提升搜索算法的优化效率。具体而言,在路径逆运动学问题中,相 邻末端位姿之间的关节运动需要具备较好的连续性,这意味它们的决策空间和决 策空间会存在一定的关联性。因此,可以将先前路径的历史求解信息来引导后续 末端位姿的逆运动学解算。 2.3.4 参数化关节组合的优化方案

在冗余完成任务的过程中,不同关节对于末端执行器的不同自由度方向的做 功能力是不同,比如机械臂的末端进行左右移动时,更需要能够提供对应运动的 关节来让末端有效做功。而使用参数化方法获取冗余机械臂的解析逆运动的学过 程,从形式上来看实际上是将某些特定的关节进行固定,并利用剩余的关节进行 运动。单个冗余机械臂通常会存在多种参数化关节配置方案,而这些不同方案对 于末端的影响的能力是存在区别的。这也导致了不同的参数化方案之间存在最优 性^{[31][32]},这一点会在后续的章节中进行具体的阐述。为此,本文将参数化关节 配置的优化也纳入上述求解框架,并提出实时优化参数化关节方法来辅助关节空 间搜索算法进行路径逆运动学的搜索求解。

本文中将会基于上述框架设计用于焊接机械臂与变位机协同规划的算法。算 法中将使用多目标进化算法保证多任务的处理,保证算法对于路径的鲁棒性和算 法的全局搜索能力;同时,本文中将使用区间搜索策略提升进化算法的收敛效率, 并使用参数化方法保证逆解的求解效率和求解精度,满足算法的求解实时性指标 和精确性要求;最后,通过多任务的灵活调节确保机体运动的灵活性和安全性, 并通过优化参数化关节辅助提升算法的规划性能。

2.4 本章小结

在本章中,首先介绍了机械臂系统的运动学冗余和本文中需要解决的路径逆运动学问题。此后,阐述了冗余机械臂与路径逆运动学问题的结合带来的一系列挑战,以及对于路径逆运动学问题的求解算法设计的要求。最后,介绍了基于参数化方法和搜索方法的冗余机械臂逆运动学求解框架,主要包括关节配置,任务组合和关节空间搜索算法部分。此外,指出了原有框架在关节配置模块的处理缺陷,并提出了对应的改进方案。所改进的框架将被用于由焊接机械臂与变位机组成的冗余焊接工作站的协同规划算法设计。之后将会把改进的框架用于解决焊接工作站的协同规划问题。

第3章 焊接工作站的运动学建模

本文研究的焊接工作站是一个具有冗余自由度的系统,它的运动学模型会影响其逆运动学求解方法和运动规划方法的设计。为了将前文提出的框架用于解决 焊接工作站的协同作业,需要将焊接工作站等效为冗余机械臂。首先,本章将介 绍焊接工作站的具体配置,并结合实际任务需求描述所有关节的运动配置;接着, 本章将提出焊接工作站的运动学耦合建模方法,把其建模成冗余机械臂,并完成 正向运动学公式的推导;最后将在机器人操作系统(Robot Operating System,简 称 ROS)^[60]中搭建焊接工作站的仿真环境,验证所建冗余机械臂模型的正确性。

3.1 焊接工作站简介

本文研究的焊接工作站由一台六轴工业机械臂和一台两轴"L"型变位机组成。两台设备会按照特定的相对位置进行摆放,且设备的底部固接于地面,其三 维模型如图 3-1 所示。在进行作业时,焊接靶材会被固定在变位机的 2 号轴线所 在的圆盘上。工业机械臂负责带动末端安装的焊枪沿着预定的焊接路径进行运动 (本模型中搭载的焊枪的折弯部分的角度为 135 度);而"L"型变位机利用其自 由度主动调整焊接靶材的姿态,保证靶材的待焊部分始终能保持较好的姿态。



图 3-1 六轴工业机械臂和"L"型变位机三维模型

在焊接工作站中,两个设备都只包含了旋转副,每个关节的运动极限见表 3-1。其中,变位机转轴1的实际关节极限为[-180,180]°,但是在实际作业中需 要根据实际需求来限制有效的关节运动范围。一方面,需要综合考虑工件夹持部 件的强度,当转轴1基于初始位置旋转±90°时,所有的夹持部件都会持续承受工 件的重力带来的拉应力,从而导致其自身会受损,这对于大批量加工而言是不利 的;另一方面,在焊接作业中通常要求工件的焊缝保持船型焊姿态,当转轴1的旋转角的绝对值超过90°时,大部分焊缝无法处于船型焊姿态,进而很难保证加工质量。基于上述原因,在本文中对变位机转轴1的运动极限进行了限制,根据多次试验将其限制在[-70,70]°。

运动副	初始旋转轴方向	运动类型	关节运动范围(°)
关节1	+Z	旋转	[-165, 165]
关节 2	+X	旋转	[-150, 90]
关节 3	+X	旋转	[-175, 45]
关节 4	+Y	旋转	[-180, 180]
关节 5	+X	旋转	[-135, 135]
关节 6	+Y	旋转	[-180, 180]
变位机转轴1	+Z	旋转	[-70, 70]
变位机转轴 2	+X	旋转	[-360, 360]

表 3-1 焊接工作站的运动副信息

3.2 焊接工作站运动学模型

传统的建模方法通常是以地面坐标系作为全局基坐标,利用将两台设备解耦 地建模成独立的单元,从而将焊接工作站作为具有主从特征的双臂来进行规划。 这样的规划方式很难在没有人工干预的情况下处理复杂的焊接任务。针对这个问 题,本文使用标准 D-H(SDH)法^[61]将整个焊接工作站建模冗余机械臂(单臂) 模型,并基于冗余机械臂的运动学和规划方法来充分利用系统的冗余特性,使其 能够自主完成复杂靶材的焊接工作。

为了将工作站建模成冗余机械臂,首先将模型基坐标系 $\Sigma_0 := O_0 - X_0 Y_0 Z_0$ 设置在变位机 2 号转轴所对应的工件安转盘的表面,然后将剩余的坐标系 $\Sigma_i (i = 1, 2, ..., 8)$ 沿着"变位机关节——机械臂关节"的臂依次进行设置,最后将坐标系 Σ_e 设置在焊枪的末端,具体的建系图如 3-2 所示。与此同时,本模型加入许多的虚拟连杆和关节。要注意的是,在 SDH 中,坐标系 Σ_i 是放置轴线 i + 1上的,例如坐标系 Σ_i 被放置在了其临近的下一个虚拟关节的轴线上。

图中用虚线绘制的圆柱代表放置的虚拟关节和虚拟连杆,实线绘制的圆柱表示实际存在的关节与连杆。在所有被放置的坐标系中,标红的坐标系是实际存在的关节的坐标系;黑色的坐标系均为虚拟关节所对应的坐标系,其作用主要有三点:①为了还原2轴变位机的运动, \sum_{vi} (*i*=1,2,3)被放置变位机中的不规则连杆的转折处;②机械臂底座和变位机底座之间实际上是没有直接连接的。为了将它

们整合成一个有机整体,本文将两者固接在大地上视为一种特殊的刚性连接,在两者的底座之间添加了两个虚拟连杆(连杆 i_{v3} 与 i_{v4}),并在两个连杆的末端防止虚拟关节 Σ_{v4} 与 Σ_{v5} ,实现了两台设备的串联建模;③辅助相邻的实际存在的关节之间根据 SDH 的规则进行坐标系变换。



图 3-2 单臂模型

在图 3-2 中标注的 D-H 参数见表 3-2,其中 θ_i 代表绕轴线 Z_{i-1} 的旋转, d_i 代表沿着轴线 Z_{i-1} 的位移, α_i 代表绕着轴线 X_i 的旋转, a_i 代表沿着轴线 X_i 的位移。

关节	$ heta_i(^\circ)$	$d_i(\mathbf{m})$	$\alpha_i(^\circ)$	$a_i(\mathbf{m})$	
1	$ heta_{ m l}$	$d_1 = -0.041$	0	0	
\mathbf{V}_1	0	0	0	$a_2 = -1.0095$	
V_2	-90	$d_3 = 0.363$	-90	0	
2	$ heta_2$	$d_4 = -0.224$	90	0	
V_3	0	$d_5 = -1.122$	0	0	
V_4	0	0	0	$a_6 = 1.0330$	
V_5	90	0	0	$a_7 = 0.774$	
V_6	-90	$d_8 = 0.735$	0	0	
3	$ heta_{3}$	$d_9 = 0.195$	-90	$a_9 = -0.165$	
4	$\theta_4 - 90$	0	0	$a_{10} = 0.550$	

表 3-2 焊接工作站的 D-H 参数表

关节	$ heta_i(^\circ)$	$d_i(\mathbf{m})$	$\alpha_i(^\circ)$	$a_i(\mathbf{m})$	
5	$ heta_{5}$	$d_{11} = 0.006$	90	$a_{11} = 0.210$	
6	$ heta_6$	$d_{12} = 0.7035$	-90	0	
7	$ heta_{_7}$	0	90	0	
8	$ heta_8$	$d_{14} = 0.115$	0	0	

表 3-2 焊接工作站的 D-H 参数表(续)

在这个运动学模型中,所设置的虚拟关节是可以替换成实际存在的关节的, 比如在虚拟连杆所在的位置安装移动滑轨。因此,本建模方式可以适用于 "*D_r* + *D_s* + *D_t*"的工作站配置,其中 *D_r* 为机械臂的自由度,*D_s* 为滑轨的数量,*D_t* 变位机的自由度。再结合后续章节中提出的运动规划方法,可以解决具有八到十 自由度的焊接工作站的焊接规划问题。

3.3 正向运动学推导

机械臂的正向运动学描述了从机械臂的关节空间到末端笛卡尔空间的映射 关系,其表达式可以写为式(3-1):

$$X = fkine(\Theta) \tag{3-1}$$

其中, $\Theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n]^T \in R^n$ 表示n维的关节空间, $X \in SE(3)$ 表示描述机械臂末端姿态的齐次变换矩阵,可以写为:

$$X = \begin{bmatrix} \vec{n} & \vec{o} & \vec{a} & \vec{p} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(3-2)

在该表达式中, $[\vec{n} \ \vec{o} \ \vec{a}] \in SO(3)$ 描述机械臂末端相对于基坐标系的姿态, $\vec{n}, \vec{o}, \vec{a} \in R^3$ 为一组单位正交基, $\vec{p} \in R^3$ 描述了末端相对于基坐标系的位置。 $fkine(\cdot)$ 表示正向运动学映射,可展开为n 个齐次矩阵连乘,具体形式见式(3-3)。

$$X = \prod_{i=1}^{n} T_{i-1}^{i}$$
(3-3)

式中的 T_{i-1} 表示将坐标系 Σ_{i-1} 变换为坐标系 Σ_i 的齐次变换矩阵,有:

$$T_{i-1}^{i} = Rot(Z_{i-1}, \theta_{i}) \times Trans(Z_{i-1}, d_{i}) \times Trans(X_{i}, a_{i}) \times Rot(X_{i}, \alpha_{i})$$

$$= \begin{bmatrix} \cos(\theta_{i}) & -\sin(\theta_{i})\cos(\alpha_{i}) & \sin(\theta_{i})\sin(\alpha_{i}) & a_{i}\cos(\theta_{i}) \\ \sin(\theta_{i}) & \cos(\theta_{i})\cos(\alpha_{i}) & -\cos(\theta_{i})\sin(\alpha_{i}) & a_{i}\sin(\theta_{i}) \\ 0 & \sin(\alpha_{i}) & \cos(\alpha_{i}) & d_{i} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(3-4)

其中, $Rot(I,\phi)$ 表示绕 I 轴旋转 ϕ 弧度的齐次变换矩阵, Trans(I,d)表示沿 I 轴移

动*d*米的齐次变换矩阵。结合表 3-2 中提供的 D-H 参数,可以求出所有的传递矩阵 T_{i-1}^i 。为了节省空间,此处会将虚拟关节的传递矩阵乘入其编号前方实际存在的关节的齐次变换矩阵中,具体表达式如式(3-5)至式(3-7)所示。其中 s_i 代表 $sin(\theta_i)$, c_i 代表 $cos(\theta_i)$ 。

$$A_{1} = T_{0}^{1}T_{1}^{\nu 1}T_{\nu 1}^{\nu 2} = \begin{bmatrix} s_{1} & 0 & c_{1} & a_{2}c_{1} \\ -c_{1} & 0 & s_{1} & a_{2}s_{1} \\ 0 & -1 & 0 & d_{1} + d_{3} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_{2} = T_{\nu 2}^{2}T_{2}^{\nu 3}T_{\nu 3}^{\nu 4}T_{\nu 4}^{\nu 5}T_{\nu 5}^{\nu 6} = \begin{bmatrix} c_{2} & 0 & s_{2} & a_{6}c_{2} + d_{5}s_{2} + d_{8}s_{2} \\ s_{2} & 0 & -c_{2} & a_{6}s_{2} - d_{5}c_{2} + d_{8}c_{2} \\ 0 & 1 & 0 & d_{4} + a_{7} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$(3-5)$$

$$A_{3} = T_{\nu 6}^{3} = \begin{bmatrix} c_{3} & 0 & -s_{3} & a_{9}c_{3} \\ s_{3} & 0 & c_{3} & a_{9}s_{3} \\ 0 & -1 & 0 & d_{9} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad A_{4} = T_{3}^{4} = \begin{bmatrix} s_{4} & c_{4} & 0 & a_{10}s_{4} \\ c_{4} & s_{4} & 0 & -a_{10}c_{4} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ A_{5} = T_{4}^{5} = \begin{bmatrix} c_{5} & 0 & s_{5} & a_{11}c_{5} \\ s_{5} & 0 & -c_{5} & a_{11}s_{5} \\ 0 & 1 & 0 & d_{11} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad A_{6} = T_{5}^{6} = \begin{bmatrix} c_{6} & 0 & -s_{6} & 0 \\ s_{6} & 0 & c_{6} & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_{12} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-7)$$
$$A_{7} = T_{6}^{7} = \begin{bmatrix} c_{7} & 0 & s_{7} & 0 \\ s_{7} & 0 & -c_{7} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad A_{8} = T_{7}^{8} = \begin{bmatrix} c_{8} & -s_{8} & 0 & 0 \\ s_{8} & c_{8} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_{14} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

在将上述矩阵连乘后,得到的是图 3-2 中坐标系 Σ_0 转换到坐标系 Σ_8 的齐次变换矩阵,需要再考虑从坐标系 Σ_9 到坐标系 Σ_e 的变换。在这两个坐标系之间存在一个末端执行器,其模型和坐标系转换关系如图 3-3 所示。

从图中可以看出,两个坐标系之间需要经过两次沿 Z 轴的平移和一次绕 Y 轴的旋转才能完成转换,具体表达式见式(3-8)。
表达式中的参数的具体数据为 $d_{15} = 0.230 \text{ m}$, $d_{16} = 0.183 \text{ m}$, $\beta = -45^{\circ}$ 。联立式(3-3) 到式(3-8),可以得到本模型从基坐标系到末端执行器的坐标系转换为:

$$X = A_1 A_2 A_3 A_4 A_5 A_6 A_7 A_8 T_8^{e}$$
(3-9)

通过给式(3-9)提供一组关节数值,即可获得当前机械臂末端相对于所设置的 模型基坐标系的位姿。



图 3-3 末端执行器及坐标系转换关系

然而,在焊接工作站的冗余机械臂运动学模型中,连杆的运动行为在实际作 业过程中是不可能实现的。因此,为了模型的可靠性,需要依照焊接工作站的实 际工作方式,在 ROS 仿真系统中建立其双臂模型,并基于该模型验证单臂模型 的运动学正确性和可靠性。

3.4 运动学模型的可靠性实验验证

本研究通过在 ROS 中建立仿真环境,旨在验证所构建的运动学模型的准确 性。选择仿真验证的理由主要有三点:首先,本文采用的三维模型由厂商提供, 具备较高的精确性,能够准确地反映实际设备的参数信息;其次,研究聚焦于焊 接工作站的运动学和运动规划,通过仿真环境可有效验证研究成果的实际效果; 最后,ROS 作为一款成熟的机器人操作系统,能够直观展示焊接工作站的位姿 特征,并实时直观地获取每个关节的信息。

在用 ROS 对机器人模型进行可视化演示时,主要采用了两个关键工具:统一机器人描述格式(United Robotics Description Format,简称 URDF)文件以及机器人可视化工具(Robot Visualization Tool,简称 RViz)。接下来,将依次介绍这两者在焊接工作站模型处理中的具体应用方式。

23

3.4.1 ROS 模型建立和可视化演示

URDF 文件是一种使用 XML 格式语言来撰写的文件,其中link>标签和 <joint>标签分别代表了机器人的连杆和关节组件,在两个标签中还能添加许多描述两者属性的子标签。其中,每个关节会使用<parent>和<child>来描述其与相邻 连杆的父子关系。对具有八个自由度、结构复杂的焊接工作站而言,直接手动编 写该文件容易导致较大的模型误差,同时也难以精准还原实际机器人的连杆几何 特征。为此,本研究在 SolidWorks2021 中使用 sw_urdf_exporter 插件^[61]来制作 URDF 文件。

由于在实际环境中,机械臂的底座和变位机的底座是与地面固接的,所以 ROS 中模型的模型基坐标系设置在地面,具体为图 3-2 中的坐标系Σ_{v5}。各坐标 系的相对位置也如图 3-2 所示,但建立的模型会变成双臂模型,具体的关节和连 杆的树状结构图如图 3-4 所示。图中的"xyz"表示当前关节坐标系相对其根节 点坐标系的位置,单位为米(m);而"rpy"表示当前关节坐标系相对其根节点坐 标系的姿态,该姿态以 RPY 角来描述,单位为弧度(rad)。



图 3-4 ROS 中的双臂模型

在仿真模型中共包含了12个连杆,其与图2-1中展示的模型的对应关系如

图 3-5。其中连杆"r_link6"中包含了关节 6 对应的连杆和末端执行器。值得注意的是,需要确保模型能够实时显示坐标系 Σ_0 和坐标系 Σ_e 的相对位姿关系。在 ROS中,为了实现坐标系的显示,必须将坐标系绑定到实体上。因此,在两个坐标系上都添加了一个底面半径为0.1mm,高度为0.1mm的圆柱作为实体(名为"ending"和"plate"),添加方向为对应坐标系的+Z 轴方向。在仿真过程中,这些实体的尺寸可以忽略不计。此外,图 3-5 中的"base_frame"记为坐标系 Σ_{base} ,与坐标系 Σ_{v5} 重合。



图 3-5 ROS 仿真模型中的连杆位置

模型中设置了 11 个关节,包括 8 个旋转关节和 3 个固定关节。其中,固定 关节用于安放基坐标系和两台设备的末端坐标系。这些关节与图 3-2 和图 3-3 中 的运动学模型中的坐标系的对应关系如表 3-3 和表 3-4 所示。此外,ROS 仿真模 型中,两台设备共用一个基坐标系,且模型中的机械臂的关节都以绕其所在坐标 系的+Z 轴的逆时针方向为正方向。

关节代号	对应坐标系	关节类型	备注
r_joint1	Σ_3	旋转	关节1
r_joint2	Σ_4	旋转	关节 2
r_joint3	Σ_5	旋转	关节 3
r_joint4	Σ_6	旋转	关节 4
r_joint5	Σ_7	旋转	关节5
r_joint6	Σ_8	旋转	关节 6
e_joint	Σ_{ρ}	固定	末端执行器末端

表 3-3 ROS 仿真模型中的机械臂关节位置

	100 1100 11 11 10		
关节代号	对应坐标系	关节类型	备注
t_base_joint	$\Sigma_{ m v5}$	固定	变位机基座
t_joint1	$\Sigma_{ m v2}$	旋转	变位机转轴1
t_joint2	Σ_1	旋转	变位机转轴 2
p_joint	Σ_0	固定	圆盘表面

表 3-4 ROS 仿真模型中的变位机关节位置

完成上述步骤后,即可通过 RViz 来实现模型的可视化,如图 3-6 所示。在 ROS 中,一个坐标系 Σ_b 在另一个坐标系 Σ_a 中的描述记为两个坐标系原点的相对 位置 $P_a^b = [\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}]^T$ 和两个坐标系的相对姿态 $O_a^b = [x, y, z, w]^T$ 。其中,x,y,z 分别表 示在坐标系 Σ_b 原点在坐标系 Σ_a 中位置的 X 轴, Y 轴和 Z 轴分量; x,y,z,w 为单 位四元数的四个分量,相对姿态可写为 $O_a^b = w + x\vec{i} + y\vec{j} + z\vec{k}$ 的形式。

在图中,机械臂与变位机都处于初始状态。此时,末端执行器末端 Σ_e 在基 坐 标 系 Σ_{base} 中 的 位 置 和 姿 态 描 述 分 别 为 $P_{base}^e = [0.007, 1.343, 1.561]^{T}$ m 和 $O_{base}^e = [0.653, 0.653, 0.271, -0.271]^{T}$;而圆盘表面的坐标系 Σ_0 在基坐标系 Σ_{base} 中的 位置和姿态描述分别为 $P_{base}^0 = [0.459, 1.037, 0.800]^{T}$ m 和 $O_{base}^0 = [0.0, 0.0, 0.0, 1]^{T}$ 。



图 3-6 焊接工作站在 ROS 中的可视化演示

3.4.2 正向运动学验证

通过前文的介绍可以知道,理论运动学模型与ROS中仿真模型在构造方法

和坐标系属性描述上存在差异。在 3.3 小节中,本研究提出以圆盘表面作为模型 基坐标系,建立了耦合式运动学理论模型,并使用齐次变换矩阵矩阵来描述末端 位姿;在 3.4 小节中,选用了机械臂基座与地面的接触位置作为模型基坐标系来 还原真实工况,而 ROS 系统中采用单位四元数描述坐标系姿态。为此,首先需 要统一坐标系的描述方式;然后通过匹配不同模型中的坐标系 Σ_0 和坐标系 Σ_e 的 相对关系,来验证运动学模型的正确性。

为了统一本文中对于旋转的描述方法,此处选择齐次变换矩阵来描述坐标系的旋转。四元数 $O_a^b = [x, y, z, w]^T$ 可转换为式(3-10)所示的旋转矩阵^[62]:

$$R_{a}^{b} = \begin{bmatrix} 1 - 2(y^{2} + z^{2}) & 2(xy - wz) & 2(xz + wy) \\ 2(xy + wz) & 1 - 2(x^{2} + z^{2}) & 2(yz - wx) \\ 2(xz - wy) & 2(yz + wx) & 1 - 2(x^{2} + y^{2}) \end{bmatrix}$$
(3-10)

结合 $P_a^b = [\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}]^{\mathsf{T}}$ 可以整合为其次变换矩阵:

$$T_a^b = \begin{bmatrix} O_a^b & P_a^b \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(3-11)

此外,由图 3-4 中的双臂模型转换到图 3-1 单臂模型时,需要按照式(3-12) 完成坐标系的转换,且两个模型中的变位机关节的编号顺序和旋转正方向相反。

$$T_0^e = T_0^{base} T_{base}^e = (T_{base}^0)^{-1} T_{base}^e$$
(3-12)

为了计算两个模型间的误差,分别就位置部分和姿态部分设置了两个评判函数,如式(3-13)和式(3-14)所示:

$$\Delta P = \left\| {}^{1}P_{0}^{e} - {}^{2}P_{0}^{e} \right\|_{2}$$
(3-13)

$$\Delta O = \left\| {}^{1}O_{0}^{e} - {}^{2}O_{0}^{e} \right\|_{F}$$
(3-14)

其中, ${}^{1}P_{0}^{e}$ 和 ${}^{2}P_{0}^{e}$ 分别表示单臂模型和双臂模型中的基坐标系原点和机械臂末端坐标系原点的相对位置; ${}^{1}O_{0}^{e}$ 和 ${}^{2}O_{0}^{e}$ 分别表示两个模型中基坐标系到机械臂末端坐标系的相对姿态; $\|\cdot\|_{r}$ 和 $\|\cdot\|_{r}$ 分别表示向量的二范数和矩阵的 Frobenius 范数,其中位置差的单位为米。接下来,将利用上述公式来验证两个模型间的一致性。

通过在 ROS 模型中随机采样了 50 个焊接工作站的关节构型来完成模型一致 性和正确性验证,在这里只演示三个构型(包括图 3-6 演示的初始构型)的模型 验证,这三个构型如图 3-6 到图 3-8 所示。图中左侧红框中的"ending"和"plate" 中的数据分别是机器人末端坐标系在机器人基坐标系和变位机基坐标系中的位 姿描述,右侧是焊接工作站中的所有关节的当前数值。

在图 3-7 中,末端执行器的坐标系 Σ_e 在基坐标系 Σ_{base} 中的位置和姿态描述分 别为 $P_{base}^e = [0.059, 0.482, 1.369]^{T} m 和 O_{base}^e = [0.821, 0.338, 0.037, -0.458]^{T}; 而圆盘表$

27

面的坐标系 Σ_0 在基坐标系 Σ_{base} 中的位置和姿态描述分别为 $P_{base}^0 = [0.460, 0.813, 0.891]^{\mathsf{T}} m 和 O_{base}^0 = [-0.021, 0.375, 0.926, 0.048]^{\mathsf{T}}$ 。



图 3-7 焊接工作站的关节构型一



图 3-8 焊接工作站的关节构型二

在图 3-8 中,末端执行器的坐标系 Σ_e 在基坐标系 Σ_{base} 中的位置和姿态描述分别为 $P_{base}^e = [-0.101, 1.054, 0.987]^{\mathsf{T}}$ m和 $O_{base}^e = [0.654, 0.715, 0.241, -0.060]^{\mathsf{T}};$ 而圆盘

表面的坐标系 Σ_0 位置描述分别为 $P_{base}^0 = [0.459, 1.137, 0.816]^T$ m, 姿态描述为 $O_{base}^0 = [0.119, -0.103, 0.649, 0.745]^T$ 。

在表 3-5 中演示了两个模型对于同一组关节构型计算齐次变换矩阵 T₀^e 的结果,以及两个模型间的位置误差和姿态误差。表中的"机械臂部分"构型依次设置 了机械臂的一号关节到六号关节的旋转角度;"变位机部分"构型依次设置了变位 机一号转轴到二号转轴的旋转角度。

	初始关节构型(rad)	关节构型一(rad)	关节构型二(rad)		
机械臂部分	[0, 0, 0, 0, 0, 0]	[1.110, 1.580, -0.90, -1.400, -1.600, 1.710]	[0.270, 0.380, -0.910, -2.030, -0.360, 1.890]		
变位机部分	[0, 0]	[-0.770, 3.040]	[0.320, 1.430]		
单臂模型T ₀	$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & -0.454 \\ 0.707 & 0 & 0.707 & 0.310 \\ 0.707 & 0 & -0.707 & 0.761 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.749 & -0.563 & 0.349 & 0.345 \\ -0.199 & -0.311 & -0.930 & 0.611 \\ 0.632 & -0.766 & 0.121 & 0.115 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.958 & 0.243 & 0.154 & -0.103 \\ 0.272 & -0.939 & -0.211 & 0.559 \\ 0.093 & 0.244 & -0.965 & 0.190 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$		
双臂模型T ₀ ^e	$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & -0.452 \\ 0.706 & 0 & 0.708 & 0.307 \\ 0.708 & 0 & -0.706 & 0.761 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.754 & -0.557 & 0.348 & 0.339 \\ -0.196 & -0.314 & -0.929 & 0.609 \\ 0.627 & -0.769 & 0.127 & 0.114 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.957 & 0.241 & 0.160 & -0.102 \\ 0.272 & -0.939 & -0.210 & 0.551 \\ 0.099 & 0.245 & -0.965 & 0.188 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$		
位置差Δ <i>P</i> (m)	0.0014	0.0089	0.0061		
姿态差∆O	0.0033	0.0061	0.0078		

表 3-5 模型验证结果

从表中的数据可以看出,两个模型的*T*₀^e之间是存在误差的,这个误差由两部分构成:一方面,这个误差属于建模误差,图 3-2 中的部分连杆和关节参数是经过近似处理的;另一方面,在进行单位四元数和旋转矩阵的转换中存在截断误差。从数值上来看,不同构型下的位置差和姿态差都非常小,表明两个齐次变换矩阵具有非常相近的变换效果。综上,可以验证所建立的单臂焊接工作站运动学模型正确性。

3.5 本章小结

本章对焊接工作站进行了运动学建模,完成了其正向运动学公式的推导和验证。首先,本章介绍了焊接工作站中的关键设备及其功能。接着,以变位机的二号旋转轴为系统基坐标系的坐标轴,将整个焊接工作站视为只包含了单条运动链

的系统。通过添加一系列虚拟关节和连杆,用 SDH 法将焊接工作站建模成一款 八轴冗余机械臂,并完成了其正向运动学公式的推导。最后,在机器人基座设置 系统基坐标系,利用 SolidWorks 软件将焊接工作站三维模型制作成 URDF 文件, 并使用 ROS 提供的 RViz 完成了焊接工作站参数的可视化。通过比对两个模型中 的机械臂末端与变位机末端的相对位姿,验证了所建立的单运动链焊接工作站运 动学模型的正确性。

第4章 基于参数化方法的焊接工作站的逆向运动学

本章中将使用参数化方法来获取焊接工作站的逆向运动学。首先,本章将深入分析参数化方法的运行机理,讨论参数化关节的确定方法。接着,将使用参数 化方法为本研究中的提出焊接工作站的冗余机械臂模型提供多组参数化解析解, 并通过仿真实验证明所推导的参数化解析表达式的有效性。最后,本章将设计了 一个生成解流形的遍历方法和解流形评价指标,并以此讨论不同参数化关节对完 整解流形的影响。

4.1 参数化方法的数学机理

4.1.1 参数化方法简介

参数化方法是一种能够为冗余机械臂提供"解析解"的方法。它选择特定的关节作为冗余参数,并利用这些参数得到冗余机械臂其他关节的解析表达式,进而获得所有关节的解析解。图 4-1 给出了参数化解析解的求解过程。



图 4-1 参数化解析解求解流程

在图 4-1 演示的流程中,参数化方法先将机械手的整个关节空间 $\Theta \in R^n$ 划分为参数化关节空间 $\Theta_n \in R^l$ 和非参数化关节空间 $\Theta_n \in R^{n-l}$,可将式(3-1)改写成:

$$X = fkine(\Theta_r, \Theta_n) \tag{4-1}$$

接着,将参数化关节空间中的关节变量*θ*_{*p*}视为已知量,结合正运动学方程 推导出非参数化关节空间中的关节*θ*_{*p*}的解析表达式,这个过程可以描述为:

$$\Theta_r = ikine_A(X, \Theta_p) \tag{4-2}$$

其中, *ikine_A*(·)为"参数化"解析逆运动学表达式, 描述了目标位姿矩阵 *X* 与非参数化空间 Θ_ρ之间的映射, 而该映射需要在参数化空间 Θ_ρ内进行。这个过程在后文中被称为参数化关节配置。不难看出, 参数化方法对冗余的关节空间进行降维处理, 实现运动学方程中的自由度数量和约束数量的匹配, 从而达到冗余机械臂逆运动学可进行解析求解的效果, 实现了解析解法在冗余机械臂领域的拓展。

4.1.2 参数化关节的确定

参数化方法的使用能够获得高精度的逆解,并能保证在多项式时间内完成求 解。然而,如何确定被参数化的关节对象和关节数量是目前应用参数化方法时的 亟待解决的问题。为了解决这个问题,先展开式(3-1),并将其改写成更加通用的 表达形式,有:

$$G_i(\tilde{X}_{\lambda}, \Theta_{\lambda}) = H_i(\tilde{X}_{\mu}, \Theta_{\mu}), i = 1, 2, \cdots, 12$$

$$(4-3)$$

其中, Θ_{λ} 和 Θ_{μ} 是全关节变量集合 { $\theta_i | i = 1, 2, ..., n$ } 的子集。 \tilde{X}_{λ} 和 \tilde{X}_{μ} 是末端位姿的齐次变换矩阵元素集合 { $t_{ij} | t_{ij} \in X, 1 \le i \le 3, 1 \le j \le 4$ } 的子集。 $G_i(\cdot)$ 和 $H_i(\cdot)$ 是由上述元素组合而成的表达式,而这个 12 个等式方程并不是线性无关,通常可以通过线性组合获得更少数量的方程。实际上,该式可以转换成只包含 6 个线性无关的方程组。具体而言,虽然逆向运动学方程组中存在 12 个超越方程,但是齐次变换矩阵中的单位正交基[$\vec{n} \ \vec{o} \ \vec{a}$]依据其定义能自然地消除 6 个约束(三个单位向量的模为一,且互为正交向量),所以方程组中只有 6 个实际有效约束。

接下来,在式(4-3)中寻找想要的参数化关节。参数化关节的确定与解析解的 求解过程紧密相关。在推导非冗余机械臂的解析解时,通常需要在式(4-3)中先找 到一个只包含一个关节变量的方程作为整个推导过程的突破口,然后再依次寻找 包含了已被求解的关节变量和一个未被求解的关节变量的方程,完成剩下关节的 解析表达式的推导。然而,只有结构满足 Pieper 准则的机械臂才能完成上述获取 解析解的过程。因为运动学方程多数为由大量三角函数构成的超越方程,由这些 方程构成的非线性方程组可能无法进行解析求解。相较而言,冗余机械臂的运动 学方程会更加复杂。如果任意选择多个关节进行参数化,可能会导致仍然无法求 解或求解错误的情况。

为此,参考解析解的推导过程,本研究使用的确定参数化关节和其数量的方法:首先,在机械臂的正向运动学中寻找具有最少关节变量的方程作为初始的求 解方程(根据式(4-1)中的定义,初始方程中会包含*l*+1个关节变量)。然后, 从中任意选择*l*个关节变量构成机械臂的参数化关节空间。值得注意的是,因为 一个机械臂的运动学方程中可能会有η个包含了*l*+1个关节变量的方程,所以 在其全关节空间中最多分出η·*l*个不同的参数化关节空间。

32

使用该方法寻找参数化关节时,非参数化关节数量*n*-*l*与式(4-3)中的6维运动学约束数量之间可能会存在三种数量关系:

$$\begin{cases} n-l > 6 & (1) \\ n-l = 6 & (2) \\ n-l < 6 & (3) \end{cases}$$
(4-4)

其中,第①种关系几乎不可能存在,因为该情况下关节空间中的自由度仍然是冗余的,其运动学方程组处于欠定状态,通常无法产生解析解;第②种是最理想的数量关系。此时,非参数化关节的数量会与工作空间中的6维运动学约束相匹配,式(4-3)正好会处于一个"可解"的状态;第③种关系中,非参数化关节数量小于有效运动学约束数量,非线性方程组处于超定状态,方程组中运动学约束可能会发生冲突,导致所求解的数值不稳定性。

此外,虽然随着参数化关节的数量的增加,非参数化关节的表达式的可解性 变强。但是,方程组的超定程度也会随之增强,方程中矛盾的运动学约束也会增 多,解析解的数值不稳定性也会越严重,而且这种数值不稳定性也会在②也会产 生。因此,在使用参数化方法时,需要尽可能减少全关节空间的被参数化程度, 并在选用推导每个非参数化关节的表达式的方程时,该选用包含最多已解非参数 化关节的方程,从而保证解析表达式的稳定性。

4.1.3 任务空间的参数化

在上文中,重点讨论了处理冗余机械臂的关节空间冗余自由度的方法。然而, 在机械臂作业过程中,任务空间中同样存在一些特殊的"冗余"。

广义的机械臂的运动学冗余的充要条件是机械臂的自由度数量 n 大于末端 完成任务所需要的自由度数量 m,系统中存在 n-m 个冗余自由度^[32]。对于使用 参数化方法(或者解析解)获取单个点的逆解而言,只有机械臂的自由度大于 6 的情况,才会存在关节空间的自由度冗余;而根据定义,机械臂的自由度不超过 6 时,也可以构成运动学冗余。先将末端位姿矩阵改写成如下形式:

$$\hat{X} = [\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, \boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\beta}, \boldsymbol{\gamma}]^{\mathrm{T}}$$
(4-5)

该式描述了机器人末端在笛卡尔空间中的六维自由度的方向,其中的 $[x,y,z]^{T}$ 和 $[\alpha,\beta,\gamma]^{T}$ 分别表示一个移动自由度和旋转自由度。

机械臂在运动过程中,由于部分参数会根据机械臂需要完成任务的特性或者 约束而被简化,所以任务自由度数 *m* 只会对应于 *X* 中的部分参数。比如,当机 械臂的末端为一个圆柱喷头时, *X* 中有一维描述姿态的欧拉角参数不会对末端 的姿态造成实际的影响,此时机械臂末端只需要 5 个自由度就能完成指定任务; 当机械臂的末端被要求保持水平或者垂直地面向下运动时,只需要考虑末端的位 置精度即可完成任务,此时末端执行器只需要3个位置自由度来完成运动。这种 运动学冗余可以视为任务空间的冗余。

在与参数化方法结合使用的过程中,可以根据任务空间中的冗余自由度的性质来确定其参数化方法。在上述例子中,可以分别做如下处理:①随机给定一个圆柱喷头关节的旋转角来辅助生成欧拉角;②将三个欧拉角都参数化为定值。 通过上述处理方法能够给参数化方法的使用带来更强大的灵活性。

4.2 焊接工作站的参数化解析逆解

4.2.1 工作站的参数化关节配置

本研究中使用的焊接工作站由机械臂和变位机组成,而所使用的机械臂的结构满足 Pieper 准则。因此,在本研究中建立的冗余机械臂中,参数化关节的最少数量能正好匹配其冗余自由度数量。开始推导焊接工作站的解析逆运动学。

首先,需要找到能够发起参数化解析解推导的初始方程。对式(3-9)中前三个 关节变量进行解耦,有:

$$A_{3}^{-1}A_{2}^{-1}A_{1}^{-1}X(T_{8}^{e})^{-1} = A_{4}A_{5}A_{6}A_{7}A_{8}$$
(4-6)

由于式中的T^e是一个常数矩阵,可以直接将其合并至末端姿态矩阵中,记为:

$$\overline{X} = X(T_8^e)^{-1} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(4-7)

联立式(4-6)和式(4-7)并展开,可以得到12个超越方程:

$$n_x(c_1s_3 + s_1c_2c_3) + n_y(s_1s_3 - c_1c_2c_3) - n_zs_2c_3 = c_{45}s_7c_8 + s_{45}c_6c_7c_8 - s_{45}s_6s_8$$
(4-8)

$$o_x(c_1s_3 + s_1c_2c_3) + o_y(s_1s_3 - c_1c_2c_3) - o_zs_2c_3 = -c_{45}s_7s_8 - s_{45}c_6c_7s_8 - s_{45}s_6c_8$$
(4-9)

$$a_{x}(c_{1}s_{3} + s_{1}c_{2}c_{3}) + a_{y}(s_{1}s_{3} - c_{1}c_{2}c_{3}) - a_{z}s_{2}c_{3} = s_{45}c_{6}s_{7} - c_{45}c_{7}$$
(4-10)

$$p_{x}(c_{1}s_{3} + s_{1}c_{2}c_{3}) + p_{y}(s_{1}s_{3} - c_{1}c_{2}c_{3}) - (p_{z} - d_{1} - d_{3})s_{2}c_{3} - (a_{2} + a_{7} + d_{4})s_{3} - a_{6}c_{3} - a_{9} = a_{10}s_{4} - d_{12}c_{45} - d_{14}(c_{45}c_{7} - s_{45}c_{6}s_{7}) + a_{11}s_{45}$$

$$(4-11)$$

$$n_{y}c_{1}s_{2} - n_{x}s_{1}s_{2} - n_{z}c_{2} = s_{45}s_{7}c_{8} - c_{45}c_{6}c_{7}c_{8} + c_{45}s_{6}s_{8}$$
(4-12)

$$o_{y}c_{1}s_{2} - o_{x}s_{1}s_{2} - o_{z}c_{2} = c_{45}s_{6}c_{8} - s_{45}s_{7}s_{8} + c_{45}c_{6}c_{7}s_{8}$$
(4-13)

$$a_{y}c_{1}s_{2} - a_{x}s_{1}s_{2} - a_{z}c_{2} = -s_{45}c_{7} - c_{45}c_{6}s_{7}$$
(4-14)

$$p_{y}c_{1}s_{2} - p_{x}s_{1}s_{2} - (p_{z} - d_{1} - d_{3})c_{2} + d_{5} + d_{8} + d_{9} = -a_{10}c_{4} - d_{14}s_{45}c_{7} - d_{14}c_{45}c_{6}s_{7} - a_{11}c_{45} - d_{12}s_{45}$$

$$(4-15)$$

$$n_x(c_1c_3 - s_1c_2s_3) + n_y(s_1c_3 + c_1c_2s_3) + n_zs_2s_3 = c_6s_8 + s_6c_7c_8$$
(4-16)

$$o_x(c_1c_3 - s_1c_2s_3) + o_y(s_1c_3 + c_1c_2s_3) + o_zs_2s_3 = c_6c_8 - s_6c_7s_8$$
(4-17)

$$a_{x}(c_{1}c_{3}-s_{1}c_{2}s_{3})+a_{y}(s_{1}c_{3}+c_{1}c_{2}s_{3})+a_{z}s_{2}s_{3}=s_{6}s_{7}$$
(4-18)

$$p_{x}(c_{1}c_{3} - s_{1}c_{2}s_{3}) + p_{y}(s_{1}c_{3} + c_{1}c_{2}s_{3}) + (p_{z} - d_{1} - d_{3})s_{2}s_{3} - (a_{2} + d_{4} + a_{7})c_{3} + a_{6}s_{3} = d_{11} + d_{14}s_{6}s_{7}$$

$$(4-19)$$

上述式中 $s_i = \sin(\theta_i), c_i = \cos(\theta_i), s_{ij} = \sin(\theta_i + \theta_j), c_{ij} = \cos(\theta_i + \theta_j)$,依此类推。联立 式(4-18)和式(4-19)可以得到:

$$(p_{x} - d_{14}a_{x})(c_{1}c_{3} - s_{1}c_{2}s_{3}) + (p_{y} - d_{14}a_{y})(s_{1}c_{3} + c_{1}c_{2}s_{3}) + (p_{z} - d_{14}a_{z} - d_{1} - d_{3})s_{2}s_{3} - (a_{2} + d_{4} + a_{7})c_{3} + a_{6}s_{3} = d_{11}$$

$$(4-20)$$

通过观察式(4-8)到观察式(4-20)可以发现,存在一个只包含三个关节变量的等式 (4-20),它涉及关节变量 θ_1 , θ_2 和 θ_3 ,可以构成三种不同的参数化关节组合,分 别记为 $P_{12} = \{\theta_1, \theta_2\}$, $P_{13} = \{\theta_1, \theta_3\}$ 和 $P_{23} = \{\theta_2, \theta_3\}$ 。接下来推导不同参数化关节组 合对应的参数化解析逆运动学表达式。

4.2.2 参数化解析逆运动学推导

在进行求解之前需要先介绍几个解析解中常用的三角函数方程的求解方法。 已知三角函数方程

$$\lambda\cos\theta - \mu\sin\theta = \xi \tag{4-21}$$

为了方便实现三角变换,令:

$$\lambda = \rho \sin \phi, \mu = \rho \cos \phi \tag{4-22}$$

其中:

$$\rho = \sqrt{\lambda^2 + \mu^2}, \phi = \operatorname{atan} 2(\lambda, \mu)$$
(4-24)

代入式(3-21)中,可以得到:

$$\theta = \operatorname{atan} 2(\lambda, \mu) - \operatorname{atan} 2(\xi, \pm \sqrt{\lambda^2 + \mu^2 - \xi^2}), (\lambda^2 + \mu^2 - \xi^2 \ge 0)$$
(4-25)

式中 atan2(y, x)是二元反正切函数,当其输入都为0时,没有对应的函数值,方程(4-21)处于奇异状态。此外,其值域为[-*π*,+*π*],更加符合机械臂关节变量的运动范围。同理,对于方程

$$\lambda\cos\theta + \mu\sin\theta = \xi \tag{4-26}$$

可以解得:

$$\theta = \operatorname{atan} 2(\xi, \pm \sqrt{\lambda^2 + \mu^2 - \xi^2}) - \operatorname{atan} 2(\lambda, \mu), (\lambda^2 + \mu^2 - \xi^2 \ge 0)$$
(4-27)

接下来推导上述三个参数化关节组合对应的解析逆运动学表达式。 步骤1 求解初始方程中非参数化关节

1) 参数化关节组合 $P_{12} = \{\theta_1, \theta_2\}$

将关节变量 θ1 和 θ2 作为已知量,对式(4-20)中元素进行展开和移项,有:

$$\lambda_1 c_3 + \mu_1 s_3 = d_{11} \tag{4-28}$$

其中:

$$\begin{cases} \lambda_1 = (p_x - d_{14}a_x)c_1 + (p_y - d_{14}a_y)s_1 - (a_2 + d_4 + a_7) \\ \mu_1 = (p_y - d_{14}a_y)c_1c_2 - (p_x - d_{14}a_x)s_1c_2 + (p_z - d_{14}a_z - d_1 - d_3)s_2 + a_6 \end{cases}$$
(4-29)

可以解得关节3的表达式:

$$\theta_3 = \operatorname{atan} 2(d_{11}, \pm \sqrt{\lambda_1^2 + \mu_1^2 - d_{11}^2}) - \operatorname{atan} 2(\lambda_1, \mu_1)$$
(4-30)

$$\lambda_2 c_2 + \mu_2 s_2 = \xi_1 \tag{4-31}$$

其中:

$$\begin{cases} \lambda_2 = (p_y - d_{14}a_y)c_1s_3 - (p_x - d_{14}a_x)s_1s_3 \\ \mu_2 = (p_z - d_{14}a_z - d_1 - d_3)s_3 \\ \xi_1 = d_{11} - (p_x - d_{14}a_x)c_1c_3 - (p_y - d_{14}a_y)s_1c_3 + (a_2 + d_4 + a_7)c_3 - a_6s_3 \end{cases}$$
(4-32)

可以解得关节2的表达式:

$$\theta_2 = \operatorname{atan} 2(\xi_1, \pm \sqrt{\lambda_2^2 + \mu_2^2 - \xi_1^2}) - \operatorname{atan} 2(\lambda_2, \mu_2)$$
(4-33)

3) 参数化关节空间 P₂₃ = {θ₂, θ₃}
 同理,将式(4-20)中进行重写,有:

$$\lambda_3 c_1 + \mu_3 s_1 = \xi_2 \tag{4-34}$$

式子中的参数为:

$$\begin{cases} \lambda_3 = (p_x - d_{14}a_x)c_3 + (p_y - d_{14}a_y)c_2s_3 \\ \mu_3 = (p_y - d_{14}a_y)c_3 - (p_x - d_{14}a_x)c_2s_3 \\ \xi_2 = d_{11} - (p_z - d_{14}a_z - d_1 - d_3)s_2s_3 + (a_2 + d_4 + a_7)c_3 - a_6s_3 \end{cases}$$
(4-35)

可以解得关节1的表达式:

$$\theta_1 = \operatorname{atan} 2(\xi_2, \pm \sqrt{\lambda_3^2 + \mu_3^2 - \xi_2^2}) - \operatorname{atan} 2(\lambda_3, \mu_3)$$
(4-36)

完成初始方程中的非参数化关节的解析表达式推导后,接下来所有关节的推导顺序和选用的推导方程都是一致的。

步骤2 求解关节5

分别计算"式(4-11)—
$$d_{14}$$
×式(4-10)"和"式(4-15)— d_{14} ×式(4-14)",有:

$$(p_x - d_{14}a_x)(c_1s_3 + s_1c_2c_3) + (p_y - d_{14}a_y)(s_1s_3 - c_1c_2c_3) - a_6c_3 - a_9 - (p_z - d_{14}a_z - d_1 - d_3)s_2c_3 - (a_2 + a_7 + d_4)s_3 = a_{10}s_4 - d_{12}c_{45} + a_{11}s_{45}$$
(4-37)

$$(p_{y} - d_{14}a_{y})c_{1}s_{2} - (p_{x} - d_{14}a_{x})s_{1}s_{2} - (p_{z} - d_{14}a_{z} - d_{1} - d_{3})c_{2} + d_{5} + d_{8} + d_{9} = -a_{10}c_{4} - a_{11}c_{45} - d_{12}s_{45}$$

$$(4-38)$$

两式的平方和为:

$$2a_{10}a_{11}c_5 + 2a_{10}d_{12}s_5 = \lambda_4^2 + \mu_4^2 - a_{10}^2 - a_{11}^2 - d_{12}^2$$
(4-39)

其中的系数为:

$$\begin{cases} \lambda_4 = (p_x - d_{14}a_x)(c_1s_3 + s_1c_2c_3) + (p_y - d_{14}a_y)(s_1s_3 - c_1c_2c_3) - \\ a_6c_3 - a_9 - (p_z - d_{14}a_z - d_1 - d_3)s_2c_3 - (a_2 + a_7 + d_4)s_3 \\ \mu_4 = (p_y - d_{14}a_y)c_1s_2 - (p_x - d_{14}a_x)s_1s_2 - (p_z - d_{14}a_z - d_1 - d_3)c_2 \\ + d_5 + d_8 + d_9 \end{cases}$$
(4-40)

可以解得关节5的表达式为:

$$\begin{cases} \theta_5 = \operatorname{atan} 2(\xi_3, \pm \sqrt{a_{11}^2 + d_{12}^2 - \xi_3^2}) - \operatorname{atan} 2(a_{11}, d_{12}) \\ \xi_3 = (\lambda_4^2 + \mu_4^2 - a_{10}^2 - a_{11}^2 - d_{12}^2) / (2a_{10}) \end{cases}$$
(4-41)

步骤3 求解关节4

重新联立式(4-37)和式(4-38),有:

$$\lambda_4 c_{45} - \mu_4 s_{45} = d_{12} + a_{10} s_5 \tag{4-42}$$

从而可以得到 $\theta_4 + \theta_5$ 的表达式:

$$\begin{cases} \theta_{45} = \operatorname{atan} 2(\lambda_4, \mu_4) - \operatorname{atan} 2(\xi_4, \pm \sqrt{\lambda_4^2 + \mu_4^2 - \xi_4^2}) \\ \xi_4 = d_{12} + a_{10}s_5 \end{cases}$$
(4-43)

进一步可以推出关节4的表达式为:

$$\theta_4 = \theta_{45} - \theta_5 \tag{4-44}$$

步骤4 求解关节6

对式(4-6)进行变换:

$$A_5^{-1}A_4^{-1}A_3^{-1}A_2^{-1}A_1^{-1}\overline{X} = A_6A_7A_8$$
(4-45)

找到其中两个方程:

$$n_{z}(c_{2}c_{45} - s_{2}c_{3}s_{45}) + n_{x}[s_{1}(s_{2}c_{45} + c_{2}c_{3}s_{45}) + c_{1}s_{3}s_{45}] - n_{y}[c_{1}(s_{2}c_{45} + c_{2}c_{3}s_{45}) - s_{1}s_{3}s_{45}] = c_{6}s_{7}$$

$$(4-46)$$

$$a_{x}(c_{1}c_{3}-s_{1}c_{2}s_{3}) + a_{y}(s_{1}c_{3}+c_{1}c_{2}s_{3}) + a_{z}s_{2}s_{3} = s_{6}s_{7}$$
(4-47)

推导出关节6的解析表达式:

$$\begin{cases} \theta_6 = \operatorname{atan} 2(\lambda_5, \mu_5) \\ \theta_6 = \operatorname{atan} 2(-\lambda_5, -\mu_5) \end{cases}$$
(4-48)

其中有:

$$\begin{cases} \lambda_{5} = \{n_{z}(c_{2}c_{45} - s_{2}c_{3}s_{45}) + n_{x}[s_{1}(s_{2}c_{45} + c_{2}c_{3}s_{45}) + c_{1}s_{3}s_{45}] \\ -n_{y}[c_{1}(s_{2}c_{45} + c_{2}c_{3}s_{45}) - s_{1}s_{3}s_{45}]\} / s_{7} \\ \mu_{5} = [a_{x}(c_{1}c_{3} - s_{1}c_{2}s_{3}) + a_{y}(s_{1}c_{3} + c_{1}c_{2}s_{3}) + a_{z}s_{2}s_{3}] / s_{7} \end{cases}$$
(4-49)

当时 $s_7 = 0$,关节6的表达式为:

$$\begin{cases} \theta_6 = \operatorname{atan} 2(\lambda_5, \mu_5) \\ \theta_6 = \operatorname{atan} 2(-\lambda_5, -\mu_5) \end{cases}$$
(4-50)

式中有:

$$\begin{cases} \lambda_5 = n_z (c_2 c_{45} - s_2 c_3 s_{45}) + n_x [s_1 (s_2 c_{45} + c_2 c_3 s_{45}) + c_1 s_3 s_{45}] - \\ n_y [c_1 (s_2 c_{45} + c_2 c_3 s_{45}) - s_1 s_3 s_{45}] \\ \mu_5 = a_x (c_1 c_3 - s_1 c_2 s_3) + a_y (s_1 c_3 + c_1 c_2 s_3) + a_z s_2 s_3 \end{cases}$$
(4-51)

步骤5 求解关节7

在式(4-45)中有:

$$a_{z}(c_{2}s_{45} + s_{2}c_{3}c_{45}) + a_{x}[s_{1}(s_{2}s_{45} - c_{2}c_{3}c_{45}) - c_{1}s_{3}c_{45}] - a_{y}[c_{1}(s_{2}s_{45} - c_{2}c_{3}c_{45}) + s_{1}s_{3}c_{45}] = c_{7}$$
(4-52)

得到关节7的解析表达式为:

$$\begin{cases} \theta_7 = \operatorname{atan} 2(\lambda_6, c_7) \\ \lambda_6 = \pm \sqrt{1 - c_7^2} \end{cases}$$
(4-53)

步骤6 求解关节8

在式(4-45)中有:

$$n_{z}(c_{2}c_{45} - s_{2}c_{3}s_{45}) + n_{x}[s_{1}(s_{2}c_{45} + c_{2}c_{3}s_{45}) + c_{1}s_{3}s_{45}] - n_{y}[c_{1}(s_{2}c_{45} + c_{2}c_{3}s_{45}) - s_{1}s_{3}s_{45}] = c_{6}c_{7}c_{8} - s_{6}s_{8}$$

$$(4-54)$$

得到关节8的解析表达式为:

$$\theta_8 = \operatorname{atan} 2(\lambda_7, \mu_6) - \operatorname{atan} 2(\xi_5, \pm \sqrt{\lambda_7^2 + \mu_6^2 - \xi_5^2})$$
(4-55)

式中的系数为:

$$\begin{cases} \lambda_{7} = c_{6}c_{7} \\ \xi_{5} = n_{z}(c_{2}c_{45} - s_{2}c_{3}s_{45}) + n_{x}[s_{1}(s_{2}c_{45} + c_{2}c_{3}s_{45}) + c_{1}s_{3}s_{45}] - \\ n_{y}[c_{1}(s_{2}c_{45} + c_{2}c_{3}s_{45}) - s_{1}s_{3}s_{45}] \\ \mu_{6} = s_{6} \end{cases}$$

$$(4-56)$$

在上述的推导流程中,由于三角函数的周期性,导致了多组解析逆解的情况。 解的树状图如图 4-2 所示。上述所有的参数化关节空间中,都对应有 32 组参数 化解析表达式。对于给定的焊枪位姿,会有 32 组逆解。每组解都需要进行正向 运动学验证,并根据实际的任务来选择出最优的一组解。



图 4-2 焊接工作站的 32 组解析表达式

4.3 解析逆运动学解的验证

在本节中需要验证推导出的逆运动学方程的正确性。验证的方法是:随机采 样多组末端位姿矩阵,然后使用获得参数化解析表达式对该位姿矩阵进行逆运动 学求解,最后分别对获取的32组逆解进行正向运动学验证。上述过程的具体流 程见图4-3。

在图 4-3 中,对于求解精度的要求为:

$$\|X_{cal} - X_i\|_{\infty} \le \varepsilon \tag{4-57}$$

其中, X_{cal} 为利用将解析逆解带入正向运动学方程获得的末端位姿矩阵, X_i 为采样的目标位姿矩阵, ε 为求解精度,在这里取10⁻⁶。该表达式的意义是两个矩阵

元素之差的绝对值的最大值要小于 ε 。



图 4-3 解析逆运动学解研究流程

在使用参数化解析表达式时,需要将对参数化关节空间的关节变量视为已知量。且根据三角函数的周期性,变除了变位机转轴2以外的关节需要将关节数值 调整到区间[-180°,180°]中。在这里这演示两个末端位姿的验证结果,其中两组 实验的解析解精度为 $\varepsilon = 1 \times 10^{-6}$ 。

(1) 末端位姿*X*₁

采样的末端位姿 X_1 的齐次变换矩阵如式(4-58)所示。求解参数化解析解时, 各参数化关节的初始值设置为 $\theta_1 = 78.498^\circ$, $\theta_2 = 6.818^\circ$, $\theta_3 = -33.890^\circ$ 。

$$X_{1} = \begin{bmatrix} 0.354 & 0.872 & 0.339 & 0.669 \\ -0.888 & 0.427 & -0.171 & -0.338 \\ -0.294 & -0.241 & 0.925 & 0.764 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(4-58)

接下来按照图4-3的流程分别使用三对参数化关节组合对应的解析表达式来 获取解析解,并将满足式(4-57)的逆解记录于表 4-1 到表 4-3 中。由于此处的逆 解结果不考虑关节极限约束,故会存在部分解超出关节极限的情况。

心口	关节数值							
狮方	$ heta_1(\degree)$	$ heta_2(\degree)$	$ heta_3(\degree)$	$ heta_4(\degree)$	$ heta_5(\degree)$	$ heta_6(\degree)$	$ heta_7(^\circ)$	$ heta_8(\degree)$
1	78.498	6.818	-33.890	44.493	-44.161	3.497	105.142	-19.864

表 4-1 参数化关节组合 P12 在位姿 X1 处的参数化解析逆解

编				关	专节数值			
号	$ heta_{ m l}(\degree)$	$ heta_2(\degree)$	$ heta_3(\degree)$	$ heta_4(\degree)$	$ heta_5(\degree)$	$ heta_6(\degree)$	$ heta_7(\degree)$	$ heta_8(\degree)$
2	78.498	6.818	-33.890	44.493	-44.161	-176.503	-105.142	160.136
3	78.498	6.818	-33.890	-99.663	-169.081	13.480	14.631	-33.836
4	78.498	6.818	-33.890	-99.663	-169.081	-166.520	-14.631	146.164
5	78.498	6.818	144.683	102.547	-20.555	-153.018	8.301	-46.140
6	78.498	6.818	144.683	102.547	-20.555	26.983	-8.301	133.860
7	78.498	6.818	144.683	-8.854	167.314	-176.223	83.888	-19.803
8	78.498	6.818	144.683	-8.854	167.314	3.777	-83.888	160.197

表 4-1 参数化关节组合 P12 在位姿 X1 处的有效参数化解析逆解(续)

表 4-2 参数化关节组合 P13 在位姿 X1 处的有效参数化解析逆解

编				关	节数值			
号	$ heta_{ m l}(\degree)$	$ heta_2(\degree)$	$ heta_3(\degree)$	$ heta_4(\degree)$	$ heta_5(\degree)$	$ heta_6(\degree)$	$ heta_7(\degree)$	$ heta_8(\degree)$
1	78.498	-59.326	-33.890	-23.325	-75.543	152.284	91.163	131.610
2	78.498	-59.326	-33.890	133.185	-37.699	79.352	151.762	30.174
3	78.498	-59.326	-33.890	133.185	-37.699	-100.648	-151.762	-149.826
4	78.498	6.818	-33.890	44.493	-44.161	3.497	105.142	-19.864
5	78.498	6.818	-33.890	44.493	-44.161	-176.503	-105.142	160.136
6	78.498	6.818	-33.890	-99.663	-169.081	13.480	14.631	-33.836
7	78.498	6.818	-33.890	-99.663	-169.081	-166.520	-14.631	146.164

表 4-3 参数化关节组合 P23 在位姿 X1 处的有效参数化解析逆解

心口	关节数值								
编兮	$ heta_1(\degree)$	$ heta_2(\degree)$	$ heta_3(\degree)$	$ heta_4(\degree)$	$ heta_5(\degree)$	$ heta_6(\degree)$	$ heta_7(\degree)$	$ heta_8(\degree)$	
1	78.498	6.818	-33.890	44.493	-44.161	3.497	105.142	-19.864	
2	78.498	6.818	-33.890	44.493	-44.161	-176.503	-105.142	160.136	
3	78.498	6.818	-33.890	-99.663	-169.081	13.480	14.631	-33.836	
4	78.498	6.818	-33.890	-99.663	-169.081	-166.520	-14.631	146.164	

在这组实验中,对于同一个目标位姿 X_1 ,三对参数化关节组合对应的解析 表达式能够获取的有效解数量存在区别,且使用参数化关节组合 $P_{12} = \{\theta_1, \theta_2\}$ 能 够获取最多的有效逆解。此外,还可以发现表 4-3 中的逆解同时包含于表 4-1 和 表 4-2,而表 4-1 和表 4-2 中的逆解有交集。

(2) 末端位姿*X*₂

采样的末端位姿 X_2 的齐次变换矩阵如式(4-59)所示。求解参数化解析解时, 各参数化关节的初始值设置为 $\theta_1 = -4.697^\circ$, $\theta_2 = 13.458^\circ$, $\theta_3 = 25.253^\circ$ 。

$$X_{2} = \begin{bmatrix} 0.442 & 0.876 & 0.195 & -0.908 \\ 0.697 & -0.198 & -0.690 & -0.012 \\ 0.565 & -0.441 & -0.698 & 0.335 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(4-59)

同理,本实验中根据图 4-3 获取三对参数化关节组合选择下的满足运动学约 束条件的有效逆解。为了便于分析和比较,将每组参数化关节组合在末端位姿 X₂ 处的有效逆解分别记录于表 4-4 到表 4-6。

编	关节数值							
号	$ heta_{ m l}(\degree)$	$ heta_2(\degree)$	$ heta_3(\degree)$	$ heta_4(\degree)$	$ heta_5(\degree)$	$ heta_6(\degree)$	$ heta_7(\degree)$	$ heta_8(\degree)$
1	-4.697	13.458	25.253	-12.694	-21.004	-177.371	22.906	-137.531
2	-4.697	13.458	25.253	-12.694	-21.004	2.629	-22.906	42.469
3	-4.697	13.458	25.253	-124.680	167.763	-178.962	99.663	-134.935
4	-4.697	13.458	25.253	-124.680	167.763	1.038	-99.663	45.065
5	-4.697	13.458	-155.453	99.204	30.327	1.471	107.058	-135.257
6	-4.697	13.458	-155.453	99.204	30.327	-178.529	-107.058	44.741
7	-4.697	13.458	-155.453	49.677	116.431	1.492	70.493	-136.189
8	-4.697	13.458	-155.453	49.677	116.431	-178.508	-70.493	43.811

表 4-4 参数化关节组合 P12 在位姿 X2 处的有效参数化解析逆解

表 4-5 参数化关节组合 P13 在位姿 X2 处的有效参数化解析逆解

编				关	节数值			
号	$ heta_{ m l}()$	$ heta_2(\degree)$	$ heta_3(\degree)$	$ heta_4(\degree)$	$ heta_5(\degree)$	$ heta_6(\degree)$	$ heta_7(\degree)$	$ heta_8(\degree)$
1	-4.697	13.458	25.253	-12.694	-21.004	-177.371	22.906	-137.531
2	-4.697	13.458	25.253	-12.694	-21.004	2.629	-22.906	42.469
3	-4.697	13.458	25.253	-124.680	167.763	-178.962	99.663	-134.935
4	-4.697	13.458	25.253	-124.680	167.763	1.038	-99.663	45.065
5	-4.697	-73.010	25.253	-24.934	-28.103	8.258	79.398	10.531
6	-4.697	-73.010	25.253	-24.934	-28.103	-171.742	-79.398	-169.469
7	-4.697	-73.010	25.253	-146.312	174.862	105.631	8.430	-93.733
8	-4.697	-73.010	25.253	-146.312	174.862	-74.369	-8.430	86.267

编				关	节数值			
号	$ heta_1(\degree)$	$ heta_2(\degree)$	$ heta_3(\degree)$	$ heta_4(\degree)$	$ heta_5(^\circ)$	$ heta_6(\degree)$	$ heta_7(^\circ)$	$ heta_8(\degree)$
1	-4.697	13.458	25.253	-12.694	-21.004	-177.371	22.906	-137.531
2	-4.697	13.458	25.253	-12.694	-21.004	2.629	-22.906	42.469
3	-4.697	13.458	25.253	-124.680	167.763	-178.962	99.663	-134.935
4	-4.697	13.458	25.253	-124.680	167.763	1.038	-99.663	45.065
5	-32.836	13.458	25.253	37.431	-55.941	-148.626	43.647	-178.960
6	-32.836	13.458	25.253	37.431	-55.941	31.374	-43.647	1.040
7	-32.836	13.458	25.253	-125.587	-157.301	-151.521	131.097	-135.525
8	-32.836	13.458	25.253	-125.587	-157.301	28.479	-131.097	44.474

表 4-6 参数化关节组合 P23 在位姿 X2 处的有效参数化解析逆解

在实验二中,三对参数化关节组合获取8组有效的参数化解析解,且表4-4 到表4-6中的有效解存在交集。

综合两次实验的结果可以发现,在全部的 32 组解析解中,只有部分解满足 求解精度达到10⁻⁶数量级,且在不同位置选用不同参数化关节组合求出的有效解 析逆解之间也存在差异。但是这不意味着求出来的逆解表达式部分是错误的。在 4.1.2 小节中,讨论了参数化方法在数学上会破坏机械臂原有的一些运动学约束, 从而导致部分逆解出现数值不稳定的情况,因此这是参数化方法本身具有的缺陷。 而通过上述的实验结果也可以发现,不同的参数化关节选择在获取有效解的能力 上是有区别的,这意味着不同的参数化关节可能会会对参数化解析解产生不同程 度的影响。为证明该推断,在下一节中会从解流形的角度讨论参数化关节对于逆 解的影响。

4.4 参数化解析表达式的解流形分析

首先需要明确解流形的定义:与一个特定的末端位姿匹配的所有关节构型的 集合。虽然,这个集合中有无穷多个元素,但它们都是客观存在的。然而,在求 解析解的过程中,一部分有用的关节构型可能会因为不满足某些解析表达式的定 义域而被舍弃,从而导致求出的解流形不完整,比如式(4-25)和式(4-27)的定义域。 这种解的确实对于优化方法(尤其是对进化算法而言)是极为不利的,因为更加 稀疏的决策空间会加长寻找问题最优解的时间。

此外,不同参数化关节空间对应的缺失程度也会有所区别。回顾 4.2.2 小节,步骤 1 里的第一个非参数化关节会随着参数化关节空间进行更换。从方程的角度 来看,其本质上是对方程因变量和自变量进行了更换,导致了后续关节的定义域

43

发生了变化,进而也会对各自的解流形产生影响。然而,由于参数化表达式的强 非线性,很难直接观测到上文描述的解的缺失现象。为了探究不同参数化关节配 置对于解流形的影响,本研究提出了一个获取解流形的遍历方法,其伪代码见算 法 4-1。

算法 4-1: 解流形的获取方法

输入:	目标末端位姿矩阵 X,参数化关节数量 l,参数化关节组合 P,
	关节变量 $ heta_i$ 的上下边界 $ heta_i^l$ 和 $ heta_i^{\prime\prime}$,每个关节的遍历步长 L_i ,
	机械臂的关节空间 Θ ,解的精度 ε
输出:	解流形 S
1: fo	r $i \leftarrow 1 \text{ to } l$ do
2:	for 每组采样的参数化关节数值 $\theta_p[i] \leftarrow \theta_{P[i]}^l$ to $\theta_{P[i]}^u$ by $L_{P[i]}$ do
3:	求非参数化关节的解析逆解 $\theta_r = ikine_A(X, \theta_p);$
4:	获取完整的解析逆解 $\theta_A = [\theta_r, \theta_p]$ 及其组数 row;
5:	for $j \leftarrow 1$ to row do
6:	if 第 j 组逆解在关节空间中 $\theta_A[j] \in \Theta$ do
7:	计算对应的末端位姿矩阵 $X_{cal} = fkine(\theta_A[j]);$
8:	if 与 X 的误差在可接受范围内 $ X_{cal} - X \le \varepsilon$ do
9:	记录该组解 $S \leftarrow \theta_A[j];$
10:	end
11:	end
12:	end
13:	end
14: en	d

在文献[15]中的机械臂中,由于同时存在移动关节和转动关节,遍历步长需要进行特殊处理。焊接工作站中的所有都是旋转关节,可以不用设置特殊的遍历步长,都为设置为0.1°。

首先求解表 4-7 中的末端位姿 X₂的解流形,三组参数化关节组合对应的解 流形如图 4-4 所示。图中所示的解流形具有很强的非凸性,且在标注区域的解的

稀疏度存在明显的差异。



图 4-4 三组参数化关节组合对应于末端位姿 X2 的解流形的子空间

在图 4-4 中展示了解流形的子空间 {*θ*₆,*θ*₇,*θ*₈} 中的解分布情况。其中,每组参数化解析表达式求出来的解流形是不一致的。为了对这些解流形之间的差异进行定量分析,同时考虑到实际获取的解流形是一个离散图形,定义了一个名为可行率的指标来评价其的饱满程度:

$$FR = \lambda_{FR} \frac{N_s}{N_a} \times 100\%$$
(4-60)

其中, N_s 代表所求解流形中的解的数量, N_a 表示整个关节空间在指定采样步长下的所有关节配置数量, λ_{FR} 是一个比例系数,将所有的 FR 值调整至合适的大小。该指标的大小能直观地反应出当前构型下不同参数化关节组合对应的解流形的饱满程度。随机采样工作空间中的 100 个位姿,并在此处展示三个末端位姿对应的 FR 值,取 $\lambda_{FR} = 10^{20}$ 。

	FR 值				
木垢位安	关节组合 P12	关节组合 P13	关节组合 P23		
$X_2 = \begin{bmatrix} 0.442 & 0.876 & -0.195 & -0.908 \\ 0.697 & -0.198 & 0.690 & -0.012 \\ 0.565 & -0.441 & -0.698 & 0.335 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	14.23%	5.63%	12.18%		
$X_3 = \begin{bmatrix} 0.710 & -0.461 & 0.533 & 1.059 \\ -0.348 & 0.429 & 0.834 & 0.871 \\ -0.612 & -0.777 & 0.144 & 0.059 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	18.19%	16.59%	31.47%		
$X_4 = \begin{bmatrix} 0.308 & 0.484 & -0.819 & -0.149 \\ 0.586 & 0.582 & 0.564 & 0.708 \\ 0.749 & -0.654 & -0.105 & 1.286 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	10.94%	14.27%	12.41%		

表 4-7 各解流形中的关节构型的数量和 FR 值

可以看到,对于不同的末端位姿,三组参数化关节对应的 FR 值之间的相对 大小是不同的。这意味每组参数化解析表达式擅长的工作区域是不同的。因此, 机械臂可以在进行规划前,根据当前路径所在的工作区域来选择解流形 FR 值最 大的参数化关节组合。但上述方法并不能很好地在运动规划过程中实时指导最优 参数化关节组合的选择,并有效提升路径逆运动学算法的性能。主要有两个原因: ① 通过大量采样工作空间来确认不同参数化关节组合擅长的区域是一个极为耗 时的预处理,且通常很难做到精细划分;② FR 值是从整体上来描述了解流形在 关节空间中的占有比例,可以反应解流形的稀疏程度。但是,只有当某组参数化 关节的 FR 值在特定的末端运动中一直保持绝对的优势时,该指标才能近似指导 最优参数化关节的选择,比如[15]中出现的冗余机械臂带有两个移动关节的情况; 在 FR 值相差不大时,机械臂的当前构型是否处于解流形中关节构型最密集的区 域,才是决定优化算法效果的重要因素。在下一章中,会提出一个不需要预处理 的在线选择最优参数化关节的方案。

4.5 本章小结

本章中首先介绍了参数化方法的运行方式,深入分析了参数化关节对象和数量的确认方法,并分析了不同参数化关节数量对参数化解析解的影响。考虑到参数化方法只处理关节空间相对于6维度工作空间的冗余,而任务空间自由度可能会低于工作空间的自由度,进一步讨论了任务空间的参数化方式,增加参数化方法应用的灵活性。接着,本章使用参数化方法为冗余焊接机械臂提供了三组不同的参数化解析表达式,并通过多个末端位姿的正向逆向运动学计算完成了参数化解析表达式的可靠性验证。最后,本章提出了一个生成不同参数化解析解的解流形的遍历方法和一个名为可行率的描述解流形稀疏性的评价指标。通过计算工作空间中多组末端位姿的可行率,证明了不同的参数化解析表达式会在工作空间的不同区域造成不同程度的解流形的缺失。同时,上述实验结果也说明,不同的参数化关节选择可能会对基于参数化方法的路径逆运动学算法的规划性能产生不同程度的影响。

第5章 最优参数化关节的在线配置方法

本章主要提出一种能够在线配置最优参数化关节的方法。首先从搜索算法优 化求解路径逆运动学问题的角度,阐述不同参数化关节之间的最优性。然后基于 该讨论,提出通过计算非参数化关节部分的可操作度来选择最优参数化关节的方 法,并验证在线选择最优参数化关节的必要性。最后,为了验证提出的在线配置 最优参数化关节的方法的有效性,本章将基于路径逆运动学框架为焊接工作站和 另一款八轴机械臂设计算法,并解决若干指定路径逆运动学问题。

5.1 参数化关节的最优性分析

在路径逆运动学问题中,通常期望机械臂在相邻的路径点之间的关节运动是 连续的。为了实现这一目标,需要相邻路径点之间的机械臂所有关节的运动幅度 都尽可能小。在使用本文改善的求解框架实现该目标时,会经历以下过程:

在参数化方法与多目标进化算法结合后,算法的决策空间会由原始的完整关 节空间变为参数化关节空间,而非参数化关节则成为参数化关节的因变量。在搜 索到达下一个目标位姿的最优关节构型的过程中,会先通过给定参数化关节的数 值,来获取非参数化关节的解流形,然后在解流形中寻找满足条件的最优解。在 理想情况下,即使参数化关节不动或者移动很小的距离,非参数化关节也以找到 使机械臂移动到下一个目标位姿的解,并使得整体的运动幅度最小。换言之,参 数化关节对于本次运动而言做出贡献最小的关节。

在上述过程中,不同的参数化关节对于整体运动幅度的影响是有区别的。一 方面,不同的非参数化关节部分对于指定的末端运动的贡献情况会有所差异。另 一方面,在4.4节中已经讨论过,在使用参数化解析表达式求解逆解时,不同的 参数化关节组合会导致可行解的缺失程度不同,进而影响到非参数化关节部分的 运动能力。综上,参数化方法的实质是找出能够对于指定任务做出最大贡献的非 参数化关节部分。一个精心配置的参数化关节方案能够最大化地保证机械臂连续 运动,并高效地优化其他任务。

可操作性指标作为评价运动能力的指标^{[47][63]},有助于量化非参数化关节部 分的运动能力,从而评估不同参数化关节组合下机械臂的运动性能。一种可行的 方法是在每次寻求下一个路径点的最优解之前,利用可操作性指标评估当前构型 下不同非参数化关节部分的运动能力。然后选出具有最大可操作度的参数化关节, 辅助优化路径逆运动学求解过程,其流程图如图 5-1 所示。

47



图 5-1 最优参数化关节配置方案流程

5.2 基于可操作性的最优参数化关节配置方法

目前,最常用的可操作性指标仍是基于可操作度椭球的相关度量^[64],这些度 量指标通常是基于机械臂的雅可比矩阵提出的。因此,首先需要了解机械臂的雅 可比矩阵的构造过程,然后,构造出基于参数化方法的机械臂雅可比矩阵。

5.2.1 焊接工作站的雅可比构造

雅可比矩阵描述了关节速度与末端速度之间的线性映射关系,如式(5-1)所示:

$$\hat{X} = J(\Theta)\dot{\Theta} \tag{5-1}$$

其中, \hat{X} 描述末端的速度, $\hat{\Theta}$ 是关节速度, $J(\Theta) \in R^{6*n}$ 是雅克比矩阵, 其与机械臂的构型强相关, 后都简写为J。对于机械臂而言, 最常使用的雅可比是几何雅可比。几何雅可比的求解通常是先分别计算雅可比矩阵的每一列 J_i , 然后再将它们合并。

不同关节类型的关节对于末端速度的影响是有区别的,如式(5-2)所示。

$$J_{i} = \begin{cases} [\vec{z}_{i}, 0]^{\mathrm{T}} & (1) \\ [\vec{z}_{i} \times (\vec{p}_{e} - \vec{p}_{i}), \vec{z}_{i}]^{\mathrm{T}} & (2) \end{cases}$$
(5-2)

其中, ①为移动关节对应的雅可比矩阵的列, ②为旋转关节对应的雅可比矩阵的 列。 \vec{z}_i 为当前构型下, 坐标系 Σ_i 的 Z 轴的方向向量, $(\vec{p}_e - \vec{p}_i)$ 为末端坐标系 Σ_e 相 对于 Σ_i 的位置向量。将它们合并形成完整的雅可比矩阵:

$$J = [J_1, J_2, \cdots, J_n]$$
(5-3)

其中, *J*_i表示第 i 个关节的运动速度对于末端速度的影响程度。可以将式(5-3) 中的雅可比矩阵分为两部分:

$$J = [J_p, J_r] \tag{5-4}$$

其中, *J*_{*p*}是参数化关节对于的雅可比矩阵部分, *J*_{*r*}是非参数化关节对于的雅可 比矩阵部分。在使用参数化方法时,机械臂中被参数化的关节*θ*_{*p*}可以视为被固 定的关节,从而不考虑其对于末端速度的影响。从构造过程上看,是将被参数化 关节的旋转矩阵 A_p 合并至与其临近的前一个旋转矩阵中,并重新参与雅可比矩阵的构建。然后,只需要重点考察非参数化关节对于末端运动的影响。

5.2.2 机械臂的可操作度

接下来介绍可操作度椭球的定义:关节空间中满足单位圆约束的速度在工作 空间中的映射^[64],可以理解为末端执行器速度相对于关节速度的比率。满足单位 圆约束的关节速度为:

$$\left\|\dot{\Theta}\right\|_{2}^{2} \le 1 \tag{5-5}$$

微分逆运动学的表达式为:

$$\dot{\Theta} = J^{-1}\hat{X} \tag{5-6}$$

其中, *J*⁻¹是雅可比矩阵的逆矩阵。然后, 冗余机械臂的雅可比矩阵通常是列不 满秩矩阵, 无法直接进行求逆运算。通常会采用右伪逆 *J*⁺ = *J*^T(*JJ*^T)⁻¹ 来代替逆 矩阵, 有:

$$\dot{\Theta} = J^{+}\dot{\hat{X}} = J^{T}(JJ^{T})^{-1}\dot{\hat{X}}$$
 (5-7)

将式(5-7)代入式(5-5),有:

$$\left\|J^{+}\dot{\hat{X}}\right\|_{2}^{2} \le 1$$
(5-8)

将其化简得:

$$\dot{\hat{X}}^{\mathrm{T}} (JJ^{\mathrm{T}})^{-1} \dot{\hat{X}} \le 1$$
 (5-9)

该表达式描述的是的高维工作空间中的速度超椭球。其中,二次型 JJ^T 决定超椭球的形状和方向。对雅可比矩阵 J 进行奇异值分解:

$$J = U\Sigma V^{\mathrm{T}} \tag{5-10}$$

其中,Σ是奇异值矩阵,U和V^T分别是左奇异矩阵和右奇异矩阵。将该二次型的核变换为:

$$JJ^{\mathrm{T}} = U\Sigma\Sigma^{\mathrm{T}}U^{\mathrm{T}} = U\begin{bmatrix} \sigma_{1}^{2} & & \\ & \sigma_{2}^{2} & \\ & & \ddots & \\ & & & \sigma_{k}^{2} \end{bmatrix} U^{\mathrm{T}}$$
(5-11)

式中的 $diag(\Sigma) = [\sigma_1, \sigma_2, \dots \sigma_k]^T$ 是雅可比矩阵的奇异值,也是超椭球的各个主轴 方向上的半轴长。 $U = [u_1, u_2, \dots, u_6]$ 描述了主轴的方向。以一个两轴机械臂为例, 上述映射过程如图 5-2 所示。



图 5-2 可操作性椭球的映射

可操作度近似描述了可操作度超椭球的体积,其定义为:

$$\omega(\Theta) = \sqrt{\det(JJ^T)} = \sigma_1 \sigma_2 \cdots \sigma_6 \tag{5-12}$$

其中, ω(Θ)数值越大,意味着末端的运动能力越强。此外,当机械臂处于奇异 位置时会有 det(*J*)=0,从而可操作度也会为0。接下来利用该指标来为焊接工作 站找到最优的参数化关节组合。

5.2.3 单点的最优参数化关节分析

在前文的描述中,本研究使用机械臂的非参数化部分的可操作度来选择最优的参数化关节配置。将不同参数化关节组合对应的非参数化关节记为 R_{ij} ,例如 $R_{i,2} = \{\theta_{i}, \theta_{i}, \theta_{$

$$\omega_r = \sqrt{\det(J_r J_r^T)} \tag{5-13}$$

为了对比不同参数化关节部分在不同构型下的运动能力,首先在关节空间中随机采样 500 组关节构型,并计算这些构型下的不同非参数化关节部分的可操作度。在表 5-1 中展现部分关节构型的计算结果。

~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~				
24 - ++ 14 Tul	非参数化关节的可操作度			
大卫构型	$R_{12}$	$R_{13}$	$R_{23}$	
构型一: [-4.697, 13.458, 25.253, -12.694,	0.393	0.093	0.184	
-21.004, 2.629, -22.906, 42.469]°				
构型二: [-69.602, -40.646 84.789, 78.989,	0.136	0.427	0.352	
-41.111, 72.581, 102.349, -79.990]°				
构型三: [-141.246, -30.422, -84.159, 84.984,	0.421	0.408	0.538	
4.988, -20.929, -127.053, 118.661]°				

表 5-1 不同构型下的非参数化关节的可操作度

从表中数据中可以知道两个个信息:①在相同的关节构型下,不同的非参数 化关节空间对于末端运动的影响能力是不同的。②在表中演示的三个关节构型下, 不同的非参数化关节部分的可操作度的相对大小并没有固定规律。对于构型一而 言,非参数化关节 R₁₂能为末端提供最大的运动能力;但在构型二和构型三下, 可操作度最大的分别为 R₁₃ 和 R₂₃。因此,需要在机械臂的运动过程中实时地调 整用于搜索的参数化关节配置,辅助算法的优化求解。这一点与 4.4 小节的结论 是一致的。然而,相对 4.4 节中的解流形的 FR 值,可操作度能够更加胜任最优 参数化的选择标准。一方面,该方法需要的时间代价远小于获取一次解流形的 FR 值;另一方面,基于可操作度的择优方法更具有可解释性。非参数化雅可比 对应的可操作度数值越大,意味着非参数化关节部分是对当次运动而言最关键的 自由度。换言之,可以用很短的时间选出对目标运动提供最大帮助的关节。接下 来,会设计实验来验证所提方法的有效性。

### 5.3 在线配置参数化关节方法的算法设计

在本节中会使用焊接工作站验证所提方法的有效性。焊接工作站都将对一条 指定的笛卡尔路径进行路径逆运动学问题求解,其中只考虑连续运动任务和远离 关节极限任务。在优化算法选择上,虽然 T-IK 算法^[14]在处理路径逆运动学问题 时具有优秀的性能。但是其中涉及大量与参数化关节相关的算子,可能会影响最 终结果的判断。因此,为了更好地观察在线配置参数化关节的方法对于规划效果 的影响,此处选择了最基本的 MOEA/D 算法^[65]来完成路径逆运动学算法的构建。 此外,后续所有的仿真实验都在具有 3.20GHz 处理器核心的 Legion R9000 笔记 本电脑上进行。

5.3.1 优化问题描述

上述路径运动学问题中,对于路径上每一个目标位姿的优化求解可以具体描述为:

$$\min \{f_{smooth}(\Theta), f_{limit}(\Theta)\}$$
s.t.  $X_i = fkine(\Theta), \Theta^I \le \Theta \le \Theta^u$ 

$$(5-14)$$

其中, X_i代表路径中的第i个末端位姿, Θ可以分为参数化关节部分Θ_p和非参数化关节部分Θ_p, Θ^l和Θ^u 是关节空间的边界。f_{smooth}(Θ)和f_{limit}(Θ)分别是评价机械臂运动平滑性和评价关节是否过于靠近关节极限的适应度函数。接下来分别介绍两个带函数的具体数学描述,并将它们的函数图像绘制在图 5-3 中。

(1) 运动平滑性的适应度函数

本文中使用的描述运动平滑性的适应度函数为:

$$f_{smooth}(\Theta) = 1 - e^{-\left(\frac{\Theta - \Theta_0}{\sigma_s}\right)^2}$$
(5-15)

其中, $\sigma_s$ 是调整函数形状的系数, $\Theta_0$ 是前一个关节构型。其函数图像为一个倒锥形曲线。当前求出的关节构型越靠近前一个关节构型,适应度函数的数值越小。可以通过 $\sigma_s$ 调节可以控制上升部分曲线的斜率, $\sigma_s$ 越小,该段曲线的斜率越大。 (2)远离关节极限的适应度函数

本文中评价远离关节极限程度的适应度函数为:

$$f_{limit}(\Theta) = \kappa \left( \frac{1}{1 + e^{\left(\frac{\Theta - \Theta'}{\sigma_{lim}}\right)}} + \frac{1}{1 + e^{-\left(\frac{\Theta - \Theta''}{\sigma_{lim}}\right)}} \right)$$
(5-16)

其中, κ是一个调节函数最大值的系数,可以根据所需要的适应度函数的幅值范 围来进行调节。σ_{im}是调整函数形状的系数,其数值越小,对应上升部分曲线的 斜率越大。



图 5-3 平滑度评价函数与关节离极限位置的评价函数曲线

5.3.2 性能评价指标

本节的仿真实验中主要需要对比在线配置参数化关节方法与固定参数化关 节方法对于算法性能的影响。为了做出量化评估规划结果的性能,定义了三个评 价指标:

(1) 整体运动幅度指标

单次的路径逆运动学求解中,每条路径中被均匀采样出 N_{pose} 个目标位姿。 每个关节的平均运动幅度可以描述为:

$$\Delta \theta_{i} = \frac{\sum_{j=1}^{N-1} (\theta_{i}^{j+1} - \theta_{i}^{j})}{N_{pose} - 1}$$
(5-17)

其中, θⁱ 表示第 j 个末端位姿的逆解中的第 i 个关节的角度值。由于搜索算法带 有随机性,因此通常需要对单个关节的平均运动幅度进行多次求解,并再次取关 于运行次数 N_{rm} 的均值,具体为:

$$\Delta \overline{\theta}_{i} = \left(\sum_{k=1}^{N_{run}} \Delta^{k} \theta_{i}\right) / N_{run}$$
(5-18)

其中, Δ^kθ_i表示第 i 个关节在第 k 运行中的平均运动幅度。在描述整体运动幅度 时,考虑到部分机械臂中同时存在量纲不一致的旋转关节和移动关节,因此对式 (5-18)的单个个关节的平均位移做归一化处理。机械臂的整体运动幅度评价指标 的数学描述为:

$$E_s = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta \overline{\theta_i}}{\theta_i^u - \theta_i^l}$$
(5-19)

其中,n是关节空间的维度数, $\theta_i^u$ 和 $\theta_i^l$ 分别是单个关节的上下关节极限。

(2) 平均靠近关节极限的次数

该指标是用于描述机械臂的各个关节靠近其关节极限的次数,在本文中,如 果运动过程中关节数值距离其关节极限的绝对值小于安全阈值时,就会被认为过 于靠近关节极限。具体而言,旋转关节的安全阈值为 2°,移动关节的安全阈值 为 50mm。其数学描述为:

$$E_{\rm lim} = \left(\sum_{k=1}^{N_{\rm run}} {}^{k}N_{\rm lim}\right) / N_{\rm run}$$
(5-20)

其中, ^kN_{lim}是第 k 次运行时, 所有关节靠近其极限的次数。指标的单位为次。

(3) 平均运行时间

算法的运行时间也是一个关键的评价指标,因为实际工程现场需要算法能够 尽快响应所给定的任务。其数学描述为:

$$E_{t} = \left(\sum_{k=1}^{N_{run}} {}^{k}t\right) / N_{run}$$
(5-21)

其中,^kt是第 k 次运行时,算法的运行时间。指标的单位为秒(s)。

5.3.3 基于 MOEA/D 的路径逆运动学算法设计

MOEA/D 算法是多目标优化算法中的经典算法,其核心思想是将多目标优化问题(MOP)分解成为多个单目标优化问题(SOP),并确保每个 SOP 问题的最优

解出现在最优解集中^[65]。本文将该算法用于处理路径逆运动学问题,对应算法的 伪代码如算法 5-1 所示。接下将介绍伪代码中的步骤。

#### 算法 5-1: 基于 MOEA/D 的路径逆运动学算法

- **输入:** 目标位姿*X*,前一个关节构型Θ₀,所有参数化关节组合*G*_P, 多目标优化问题,种群规模*N*,优化目标个数*M*,邻域中个体的数量*T*, 理想点*Z**
- 输出:最优种群 EP
- 1: 初始化:
- 2: 设置 $EP = \emptyset$ ;
- 3: 基于任务个数 M 生成均匀的权重向量  $[\vec{v}_1, \vec{v}_2, \dots, \vec{v}_M]^T$ ;
- 4: 计算每个权重向量v₁与其他权重向量的欧式距离,并选择距离最近的 T
   个向量作为分配邻居向量,记为 Neigh(i) = {n₁, n₂,..., n_T};
- 5: 根据前一个关节构型 $\Theta_0$ 确定参数化关节配置方案 $\theta_p \in G_p$ ;
- 6: 生成有效种群,种群中的个体记为Θ_i, j = 1, 2, …, N;
- 7: 计算初始种群中个体的适应度函数值 $Fit_{ii} = f_i(\Theta_i), i = 1, 2, \dots M;$
- 8: 初始化理想点 $Z^* = [z_1, z_2, \dots, z_M]^T$ ,  $z_i$ 为初代种群中在每一个任务维度上的最小适应度值,记为 $z_i = \min Fit_i$ ;
- 9: 个体更新:
- 10: 从邻居权重向量中随机抽取两个权重向量的序号n_k和n_l,并找到与之对
   应的个体Θ_k和Θ_l,对选中的个体按照一定规则进行交叉,变异生成新
   个体Θ';
- 11: 根据机械臂的运动学约束确认生成的新个体Θ'是否可行,不可行则重复
   步骤 10,超过一定次数后则放弃邻居个体的更新进入步骤 14;
- 12: 对新的子代个体进行适应度函数值评价  $Fit'_i = f_i(\Theta')$ ;
- 13: 更新理想点*Z*^{*};
- 14: 更新领域解;
- 15: 更新种群 *EP*;
- 16: 停止判断条件:
- 17: 满足收敛条件,则输出 EP 作为作为 Pareto 最优集;不满足收敛条件则 更新至下一次迭代;

 1)输入:所提出的算法基于贪心准则来处理路径逆运动学问题,因此每次 只针对一个指定的目标位姿求解。算法的输入中需要能够获取参数化关节逆解的 必要信息,包括了目标位姿矩阵 X,前一个关节的关节构型 Θ₀和所有的参数化

54

关节组合 $G_P = \{P_{12}, P_{13}, P_{23}\}$ 。此外,算法的输入还包含了基本 MOEA/D 的输入, 有多目标优化问题,种群规模 N,优化目标个数 M,邻域中个体的数量 T 和理想 点 $Z^*$ 等。

2)输出:算法满足收敛条件后输出的最终种群,种群中的每个个体都包含 了一组机械臂的关节数值。

3)参数化关节的确认:根据前一个关节构型 Θ₀ 计算不同参数化关节对应的 非参数化关节部分的可操作度 ω_r,选出 ω_r最大的参数化关节配置 P_optimal,并用 该参数化关节配置完成本次运动的最优关节构型生成。对应算法 5-1 的第五行。

4)变量编码:进化算法中的个体基因型的编码方式分为二进制编码和实数 编码。由于本文设计的算法对于算法的求解精度要求较高,所以选用了二进制编 码完成个体基因型的描述。算法中会通过给定二进制编码的精度来计算二进制数 的位数,见式(5-22)所示。

$$N_{bin} = \log_2^{\left(\frac{\theta'' - \theta'}{precision}\right)} + 1$$
(5-22)

5)生成有效种群:上述二进制编码生成的是参数化关节的基因型,将其转换为实际关节数值后,需要进一步与目标位姿矩阵 *X*结合求解非参数化关节的 逆解,然后并按照算法 4-1 中的第三行至第九行来生成有效的初始种群。这一步 是要确保求出每个个体代表的关节构型 Θ_i满足下列运动学约束:

$$X = fkine(\Theta_i), \Theta_i^l \le \Theta_i \le \Theta_i^u$$
(5-23)

6)适应度值计算:算法 5-1 中的第7行中, *Fit_{ij}*表示第*j*个个体中的关节构型在第*i*个适应度函数中的值,其求解公式为:

$$Fit_{ij} = \sum_{\mu=1}^{8} \kappa_{\mu} f_i(\theta_{\mu}^j)$$
(5-24)

其中,  $f_i(\cdot)$ 表示式(5-15)和式(5-16)描述的适应度函数表达式,  $\theta^j_\mu$ 表示关节构型  $\Theta_j$ 中的第 $\mu$ 个关节的数值,  $\kappa_\mu$ 表示每个关节在该任务中的权重。在本算法中, 各关节在两个任务中权重占比都是一致的。

7)选择:在算法 5-1 的第十行中,会完全随机的在邻域向量 Neigh(i) 中选取 邻居编号,然后找到对应的邻域个体执行交叉和变异操作。值得注意的是,为了 提升种群的多样性,算法会以一定的几率在全局邻域中挑选需要操作的个体。

8)交叉与变异:本算法中采取的交叉变异方法分别为多点交叉和多点变异。 具体而言,本问题中的基因型是将多个参数化关节的二进制编码进行拼接,而在 进行交叉变异操作时,会将部分参数关节的二进制编码分开进行处理。对选定个 体的二进制编码进行交叉时,会随机选取一个交叉点,然后将该交叉点序号后的 所有编码进行交换。在进行变异时,只会选择某一个个体进行变异,但同样是需 要同步对不同参数化关节的基因段进行变异。

9)子代个体的有效性验证:子代个体同样需要按照算法 4-1 第三行至第九 行来判断所生成的个体是否有效。如果经过交叉、变异的个体不满足运动学约束, 会考虑重新选择两个邻域的个体来生成新的个体;如果该过程的次数超过一定阈 值,则会放弃对于个体邻域的更新。

10)更新理想点:如果在第十一行中的生成了新的有效个体,需要更新整个种群的理想点,理想点的更新方式如式(5-25)所示。

$$z'_{i} = \begin{cases} f_{i}(\Theta') & \text{if } z'_{i} > f_{i}(\Theta') \\ z'_{i} & \text{if } z'_{i} \le f_{i}(\Theta') \end{cases}, i = 1, 2, \cdots M$$
(5-25)

该更新过程是更新每一代种群的每个任务的最小适应度函数值。

11)更新邻域个体:根据切比雪夫方法,判断新个体是否比旧个体更靠近参考点,如果是则更新旧个体。满足切比雪夫方法更新的条件为:

$$g^{teh}(\Theta' | \vec{v}_k, Z^*) \le g^{teh}(\Theta_k | \vec{v}_k, Z^*)$$

$$g^{teh}(\Theta_k | \vec{v}_k, Z^*) = \max_{1 \le i \le M} \{ \vec{v}_k | f_i(\Theta_k) - z_i \}$$
(5-26)

在本算法中,产生新解会更新旧领域中的两个个体。

12)更新种群 EP。需要将不被新个体Θ′支配的个体移入到种群中 EP。

13)判断算法收敛的条件:以一定的权重将每一代 Pareto 前沿面中的个体进行加权相加,记录最优个体的适应度值,如果连续多代的最优适应度值没有发生改变,则认为算法已经完成收敛。

5.4 在线配置参数化关节方法的有效性实验验证

5.4.1 目标路径介绍

焊接工作站的目标路径首先是通过使用三次 B 样条曲线^[60]拟合生成的平滑路径,然后以 0.07m 的间距进行均匀采样,生成其离散路径,路径中共包含 167个点。路径点的三维信息如图 5-4 所示。

5.4.2 参数设置

在算法中,每个种群中有 50 个个体,都采用二进制的形式完成编码。旋转 关节的编码精度为 0.01°。在优化过程中,交叉与变异的概率分别设置为 0.7 和 0.1,算法中选取全局邻居进行操作的概率为 0.1。在焊接工作站中,参数  $\sigma_s$  设置 为 {0.10, 0.014, 0.10, 0.045, 0.020, 0.140, 0.011, 0.170};在远离关节极限的适应度 函数中,后续所有调节函数幅值的系数  $\kappa = 2$ ,调节上升部分曲线斜率的参数  $\sigma_{lim}$  设置为{0.014, 0.014, 0.014, 0.014, 0.014, 0.014, 0.014, 0.014}。机械臂的初始构型为[-64.178, 52.668, -10.800, 17.387, 0.534, 152.009, 43.981, 12.430]°。



图 5-4 焊接工作站的目标路径

5.4.3 实验结果与结果分析

在仿真组实验中,每种参数化关节配置方案都要进行100次求解,并将结果 记录在表 5-2 中。

参数化关节配置方案	$E_s$	$E_{\rm lim}$	$E_t$
在线配置参数化关节	0.138	0.030	3.891
①参数化关节 $P_{12} = \{\theta_1, \theta_2\}$	0.140	0.050	4.043
②参数化关节 $P_{13} = \{\theta_1, \theta_3\}$	0.192	0.070	5.059
③参数化关节 $P_{23} = \{\theta_2, \theta_3\}$	0.162	0.040	3.667

表 5-2 焊接工作站各参数化关节对应的规划性能

首先单独比较三组参数化关节的性能。对于指定的复杂路径,焊接工作站的 第③种参数化关节配置方案在能够让关节在运动过程中,实时处于运动能力较好 的区域,算法搜索效率高,但在连续性的表现欠佳。与之相对的是第①种参数化 关节配置方案,该方案牺牲了前两项性能,只用于保证解的连续性。综合表中数 据,可以认为固定参数化关节的方案中,③为最优的选择。然而,这种选择必须 通过完成具体路径的规划后才能体现出来。这意味着需要在每次规划之前,先经 过多次测试之后才能选定相对最优的参数化关节。如果机械臂中存在大量可选的 参数化关节,这种做法无疑是低效的。

进一步观察表 5-2 中的数据,发现在线配置参数化关节能够在关节的连续运

57

动和远离关节极限两个任务上取得最好的表现,但是会牺牲部分的求解效率。这 代表着在线配置参数化关节能够有效集成不同关节配置的优势,但是会通过加大 时间的方式来换取性能。上述结果能够证明在线配置参数化关节方法对于路径运 动学算法的规划性能带来提升。

5.5 本章小结

在本章中,首先介绍了本文中需要解决的路径逆运动学问题以及用于处理该 类问题的规划框架。然后,从搜索算法寻优的角度分析出,参数化方法本质上是 找到当前运动最需要的非参数化关节部分。基于此,提出通过计算非参数化关节 部分的可操作度来选择当前构型下的最优参数化关节,并希望它能够在线提供参 数化关节的最优配置方案。接着,本章介绍了机械臂末端可操作度的定义,并提 出计算非参数化关节部分的可操作度的方法。通过对若干个关节构型的计算验证, 发现不同的非参数化关节部分为末端提供可操作性能力的程度是不同的。而这个 差异同样体现在不同构型对应的最优参数化关节存在差异,证明在线选择最优参 数化关节的必要性。为了证明在线配置参数化关节方案能够有效提升算法的规划 性能,本章设计利用 MOEA/D 算法结合不同的参数化关节方案来对指定复杂末 端路径进行路径逆运动学求解。在最后实验结果中发现,在线配置参数化关节的 方法能够综合单个关节配置方案的优势,提升规划算法的性能。同时,上述实验 结果可以说明,在求出所有可行的参数化关节后,无需再花费时间定义静态的最 优参数化关节配置。
# 第6章 焊接机械臂与变位机的协同作业规划

在本章中,会将前文提出的路径逆运动学算法应用到焊接机械臂与变位机的 协同作业场景中。首先,将详细地分析焊接工作站在协同焊接中需要实际处理的 问题,并为其设置目标函数。接着,介绍路径逆运动学问题的决策空间的特征和 基于路径的加速算子,并将该算子加入前文中设计好的路径逆运动算法中。最后, 使用所设计的算法求解指定焊接路径的路径逆运动学,并于通过定量分析现有方 法在处理同一规划问题的规划性能,证明所提方法的有效性。

6.1 焊接工件和焊接任务描述

6.1.1 焊接工件及焊接路径描述

本章中需要处理的焊接工件是一个具有多道焊缝的大型零件,三维模型如图 6-1 所示。在本次的焊接任务中,需要沿着两个外侧卡箍的轮廓进行焊接,焊接 路径如 6-2 所示。该焊接路径的基坐标系为圆盘轴"plate"所在的坐标系,其中共 离散出 297 个路径点,每个点的姿态都要求焊枪的 Z 轴朝向与焊缝的两侧垂直 面都呈 135°。此外,路径被分为三大段,第一大段是焊接距离机械臂最远的卡箍;第二大段是从右侧过渡到离机械臂较近的一侧的卡箍;第三大段则是完成最 后一段卡箍的焊接任务。



图 6-1 焊接工作站与工件的几何关系

不难看出,单纯只依赖机械臂的运动是无法完成指定的焊接任务的。在这个 任务中,要求变位机辅助机械臂沿着指定的工件上的路径完成规划运动。由于, 在前文中已经以圆盘表面作为基坐标系,将整个焊接工作站建模成为一个冗余机 械臂。此时,工件对于基坐标系而言是静止不动的,只需要"冗余焊接机械臂" 来连续地运动关节,完成指定的焊接作业。



图 6-2 焊接工件模型与焊接路径

6.1.2 焊接任务描述

在上述作业过程中,焊接工作站需要保证关节的连续运动,关节远离极限, 保证焊接姿态尽可能呈船型焊姿态。此外,焊接工作站中的机体之间需要实现自 避障,焊接机械臂在运动过程中也要避免机身与工件发生碰撞。前两个任务的目 标函数已经在 5.3.1 小节中得到了描述。接下来将主要介绍船型焊姿态优化任务 和避障任务的数学描述。

(1) 船型焊接姿态适应度函数

本文中使用的描述船型焊接姿态的适应度函数为:

$$f_{welding}(\gamma) = 0.5^{*}(1 - \cos\gamma)^{(2\sigma_{w})}$$
(6-1)

其中, $\sigma_w$ 是调整函数形状的系数, $\cos \gamma$  描述了焊枪在焊点处的实际 Z 轴朝向与地面的垂直程度。其函数图像为一个下凹的弧形曲线。当前焊枪的朝向越垂直于地面,适应度函数的数值越小。可以通过 $\sigma_w$ 调节焊枪 Z 轴垂直地面向下的容忍度,该系数越大,容忍度越强。

(2) 远离障碍物的适应度函数

本文中评价远离障碍物程度的适应度函数为:

$$f_{obstacle}(d) = \frac{\kappa'}{d - d_t} \tag{6-2}$$

其中, κ'是一个调节函数最大值的系数,可以根据所需要的适应度函数的幅值

范围来进行调节。d_t 是碰撞的安全阈值,为非负数。所有优化函数的函数图像如图 6-3 所示。



图 6-3 优化任务目标函数

### 6.1.3 任务空间的参数化

本实验中采用 XYZ 欧拉角来描述末端的位姿。在船型焊姿态优化任务中, 绕 Z 轴的旋转不会对船型焊姿态的确定带来影响。在远离障碍物任务和连续性 运动任务中,不合适的 Z 轴旋转可能导致两个任务发生冲突。具体而言,工作 站为了避障,可能会牺牲关节运动的连续性;而为了保证运动连续性可能会导致 搜不出避障的有效解。为此,可以放松姿态约束,将该维度的运动也作为参数化 自由度,让冗余工作站有能力保证剩余任务的完成情况。

6.2 基于改进路径逆运动学算法框架的协同规划算法设计

本节中以 5.3 节中的结合了在线配置参数化关节策略的 MOEA/D 算法作为 基本框架。为了完善该算法,需要先对单点的决策空间进行分析。

### 6.2.1 焊接工作站的决策空间分析

在前文的描述中,冗余机械臂仅在考虑运动学约束和关节极限约束时,其解 空间就显示出明显的强非凸性。以一定间隔在机械臂的工作空间采样 6 个末端位 姿,其在工作空间中的分布情况如图 6-4 所示。接着,使用 4.3 节提出的遍历方 法获取它们的解流形,并将其中的决策空间的部分特征展示在图 6-5 中。不难看 出,图中的决策空间同样呈现非凸性,而当任务数量提升后,该决策空间的非凸 性和非线性会进一步增强。



图 6-4 六个采样位姿的空间分布情况

进一步观察图 6-5,可以发现相邻末端位姿所对应的决策空间具有相似性。 一方面,这意味着前一个种群的最后一代种群可以直接为下一个末端位姿的逆解 生成提供指导。另一方面,当机械臂在相邻末端位姿之间连续运动时,下一个最 优的关节构型通常会位于前一个构型的附近。因此,可以以原始构型作为中心, 在其周围搜索解。这两种方法结合了决策空间的局部相似性和机械臂运动的连续 性,有助于提高算法的收敛速度。



图 6-5 各目标位姿的决策空间

6.2.2 算法实现

在工作[14]中,利用上述决策空间的局部相似性和机械臂运动的连续性提出 了两种算子:种群迁徙算子和区间搜索算子。这两种算子能够有效地利用过去的 信息来指导后续解的搜索,有效提升算法的收敛效率。这些算子将与在线配置参 数化关节的策略进行结合,构造出如算法 6-1 所示的路径逆运动学求解算法。

#### 算法 6-1: 改进的 MOEA/D 路径逆运动学算法

**输入:** 多目标优化问题,种群规模 *N*,优化目标个数 *M*,邻域中个体的数量 *T*, 理想点  $Z^*$ ,目标位姿  $\hat{X} = [x, y, z, \alpha, \beta]^T$ ,前一个关节构型  $\Theta_0$ ,前一个末 端 Z 轴转角  $z'_e$ ,所有参数化关节组合  $G'_p$ ,搜索区间范围 *SR*,种群继承率  $R_{mig}$ ,前一代最优 Pareto 面中个体的集合  $S_{best}$ 

**输出:**最优种群 EP

- 1: 初始化最优种群 EP = Ø; 初始化权重向量和其领域向量;
- 2: 根据前一个关节构型 $\Theta_0$ 确定参数化关节配置方案 $\theta_p \in G'_p$ ;
- 3: 种群继承;判断与前一个参数化关节配置 P'opt 是否一致,如果一致则按照继承率 Rmig 继承 Shest 中部分个体用于下个种群的初始化,否则重新生成种群。
- 4: 确定搜索区间 SR;
- 5: 生成有效种群,种群中的个体记为 $\Theta_i$ ,  $j = 1, 2, \dots, N$ ;
- 6: 计算适应度函数值 $Fit_{ii} = f_i(\Theta_i), i = 1, 2, \dots M$ ;
- 7: 初始化理想点 $Z^* = [z_1, z_2, \dots, z_M]^T$ ;
- 8: while 不满足停止条件 do
- 9: 选择父代个体进行交叉与变异,并根据运动学约束选中有效个体;
- 10: 对新的子代个体进行适应度函数值评价 *Fit*'_i =  $f_i(\Theta')$ ;
- 11: 更新理想点*Z*^{*};
- 12: 更新领域解;
- 13: 更新种群 EP;
- 14: **end**
- 15: 输出最优种群 EP

由于算法 6-1 是基于算法 5-1 改进而来的,许多重复的操作将不会重复介绍。 在上述讨论中,将目标位姿  $\hat{X}$ 中的最后一维旋转进行了参数化记为 $z_e$ ,故完整 的参数化关节组合记为 $\theta_p = \{\theta_i, \theta_j, z_e\}$ 。接下来将重点介绍两种基于路径的加速 算子的实现方式。其中,种群迁徙策略对应于上述算法的第三行,区间搜索策略 则主要应用于算法的第四行。 6.2.3 基于路径的加速算子介绍

### (1) 种群继承策略

种群继承策略是基于决策空间的局部相似性提出的,其过程见图 6-6。当两 个相邻路径点越靠近,它们的决策空间就会具备更多相似的性质。当算法在上一 个路径点上完成最优逆解的收敛时,该种群 Pareto 前面的解通常能够很好地指导 下一个末端位姿的逆运动学的收敛方向。因此,可以适当地利用前一个位姿的 Pareto 前沿面来辅助生成当前优化问题的初始种群,保证初始种群具有较好的性 能。然而,在本文改进的算法框架中,提出了在线选择参数化关节来辅助优化算 法的求解效果。当出现相邻路径点上的最优参数化关节配置方式变化时,会导致 路径逆运动学问题中的主动变量发生变化。此时,相邻两个路径点上需要的决策 变量不一致,前一个优化问题的 Pareto 前沿面的几乎无法为后续点的决策变量的 迭代提供有效信息,甚至会起到干扰作用。为此,该策略只能在相邻两个优化问 题的决策变量一致时才会被启用。



图 6-6 种群继承过程

### (2) 区间搜索策略

区间搜索策略是基于机械臂的运动学连续性提出的加速策略,其过程如图 6-7 所示。该策略是在在一个关节构型为中心的的超多边形内进行下一个关节构 型的搜索,属于局部加速收敛的策略。在邻近路径点间的距离合适时,能够有效 保证当前的最优关节配置会出现在前一个关节构型的附近。此外,如果前一个关 节构型在解流形中处于可行解分布稀疏的位置,则会逐步加大搜索范围,使机械 臂关节跳出当前的"不良"区域。



图 6-7 区间搜索过程

6.2.4 有效个体的生成

在算法 6-1 中,第五行和第九行都需要生成有效个体,此处指满足末端匹配 精度约束和关节极限约束的可行解其具体流程如算法 6-2 所示。

算法 6-2:有效个体的生成 **输入:**目标末端位姿矩阵 $\hat{X} = [\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, \alpha, \beta]^{\mathrm{T}}$ ,参数化关节数量 *m*,

参数化关节组合 $\theta_n = \{\theta_i, \theta_i, z_e\}$ ,机械臂的关节空间 $\Theta$ , 解的精度 $\varepsilon$ ,前一个关节构型 $\Theta_0$ ,前一个末端 Z 轴转角 $z'_e$ 输出:有效个体 1: 计算当前参数化关节的数值 $\theta_p = bintoreal(\theta_{p0}, z'_e, SR), \theta_{p0} \in \Theta_0$ ; 2: 计算当前目标位姿矩阵  $X = calmatrix(\hat{X}, z_a)$ ; 求非参数化关节的解析逆解 $\theta_r = ikine_A(X, \theta_n);$ 3: 3: 获取完整的解析逆解 $\theta_A = [\theta_r, \theta_p]$ 及其组数 row; 4: for  $i \leftarrow 1$  to row do 5: if 第 *i* 组逆解在关节空间中 $\theta_{a}[i] \in \Theta$  do 计算对应的末端位姿矩阵  $X_{cal} = fkine(\theta_A[i]);$ 6: if 与 X 的误差在可接受范围内  $||X_{cal} - X|| \le \varepsilon$  do 7: 8: 记录该组解*S* ←  $\theta_{A}[i]$ ; 9: end 10: end 11: end

 1)随机生成参数化关节的数值:使用区间搜索算子时,产生的二进制编码 不再与关节极限中数值一一对应。其本质上只会对上一个关节构型的邻域进行编码。而由二进制转换为实际数值的计算也转换为了式(6-1)中的形式。

$$\theta_{i} = \frac{2SR \cdot (\sum_{j=0}^{k} 2^{j}B_{j})}{2^{k} - 1} - SR + \theta_{i0}$$
(6-3)

其中, θ_i表示第 i 个关节的数值, B_j是的二进制编码的第 j 位, SR 是搜索区间的基元,用于控制最终实数的可达范围, θ_{i0}则是前一位姿下, θ_i的最优关节数值,其会控制二进制编码所对应的实数所在的区域。

2) 计算目标位姿矩阵:由于目标位姿中的欧拉角的最后一维 $z_e$ 是实时变化的,故在每个个体在计算逆解之前,都需要计算当前的目标位姿矩阵。目标位姿 $\hat{X} = [x, y, z, \alpha, \beta]^{T}$ 中的前三位数据描述的是末端的位置,剩下两位数据与 $z_e$ 共同组成 XYZ 欧拉角。

3)有效解筛选: 逆解被判定为有效解需要满足两个条件: 第一个条件是逆 解需要在关节极限内; 第二个条件是所求出的逆解要满足匹配目标末端位姿的精 度要求。在第4章中,本文讨论了使用参数化方法获取解析解时可能会导致某些 逆解只能满足部分运动学约束,从而造成数值错误问题。为此,此处参考 3.4.2 小节中的精度计算方法,分别就姿态精度和位置精度进行筛选。

$$\left\|O_{cal} - O\right\| \le \varepsilon_1 \tag{6-4}$$

$$\left\|P_{cal} - P\right\| \le \varepsilon_2 \tag{6-5}$$

6.3 焊接工作站的协同作业仿真实验

6.3.1 算法参数设置

在本算法中共具有 4 个目标函数。为了平衡多任务处理能力和规划效率,本 文通过预实验,将种群中个体数量设置为 56,算法终止条件设定为连续 20 代的 Pareto 面中最小适应度函数值保持不变。此外,其他与进化算法相关的参数设置 都与 5.4.2 小节保持一致。接下来介绍对于目标函数的设置。首先,连续性适应 度函数中的参数 $\sigma_s$ 设置为{0.05, 0.05, 0.15, 0.05, 0.20, 0.20, 0.15, 0.15};在远离关 节极限的适应度函数中,后续所有调节函数幅值的系数 $\kappa = 2$ ,调节上升部分曲 线斜率的参数 $\sigma_{lim}$ 设置为{0.014, 0.014, 0.014, 0.014, 0.014, 0.014}; 在船型焊接姿态优化任务中, $\sigma_w$ 系数设置 1.1;在远离障碍物的任务中,为了平 衡 该 适应度函数 对整体适应度值的影响,将两个系数分别设置为  $\kappa' = 0.01, d_r = 0.05$ 。机械臂的初始构型为[6.306, -33.273, -18.344, -22.357, 21.784, 40.700, -38.981, 23.503]°。三个参数化关节被选中时,其对应的搜索区间基元分别为 1.0°, 0.4°和 0.5°,任务空间中 Z 轴的初始值设置为-90.000°,其搜索 区间基元为 1.5°。此外,种群集成策略的继承率设置为 0.4。

6.3.2 实验结果与数据分析

使用本文中的改进算法框架对于该问题进行求解,并将在 ROS 中使用 Moveit!^[67]工具实现了完成规划效果的可视化演示。机械臂在各个阶段的连续运 动图如图 6-8 所示。从图 6-8(a)到图 6-8(d)是第①段路径中的焊接工况,在这个 阶段中,机械臂主要需要关注 5 号关节与变位机的避障问题。算法能够在保证变 位机运动很小的情况下,同步满足了焊点的船型焊姿态要求和机体避障要求等。 图 6-8(e)到 6-8(f)段演示了第②段路径的起止位置。在这段路径中,主要是通过 变位机的 2 号轴进行旋转将路径③所在的一侧调整至朝上的位置。图 6-8(g)到图 6-8(h)是第③段的焊接作业视图,机械臂能够在保持船型焊姿态的情况下完成剩 余路径的作业。



(e) 大过渡段起点 (f) 大过渡段终点 (g) 焊接段 7 (h) 焊接段 9

图 6-8 焊接工作站连续运动图

上述过程中的关节变化图如图 6-9 所示。图中各关节的运动都相对平滑,只 有机械臂的4号关节和6号关节在第②段路径的起点和终点处出现了较大的关节 跳变。这样的跳变一定程度上是由于指定路径的设置不合理导致的,路径段②与 其余两端路径的连接部分出现了生硬的直接变化。此外,这个阶段变位机会带动 工件转换方向,工件位置的变动会让强制机械臂末端关节进行避障。除了本文所 提出的算法以外,本文还利用基本的 MOEA/D 算法和 T-IK 算法^[14]对于该问题进行了求解。



图 6-9 基于改进 MOEA/D 算法的焊接工作站的关节运动

MOEA/D 算法求解路径逆运动学的伪代码可以参考 5.3.3 小节。与该小节内 容不同的地方在于,本章中加入了保证船型焊姿态和远离障碍物任务。相关的参数设置与 6.3.1 小节保持一致,其求解结果如图 6-10 所示。



图 6-10 基于 MOEA/D 算法的焊接工作站的关节运动

图 6-10 中展示的 MOEA/D 算法的规划效果中,所有关节的都在频繁地发生 幅度较大的跳变。相较而言,图 6-9 中演示的改进后的 MOEA/D 能够有更加平 滑的关节运动,因此可以证明所使用的区间搜索和种群继承的有效性。

T-IK 算法^[14]同样结合了参数化方法和搜索算法,解决了隧道喷浆机器人带 有移动副关节的逆运动学问题。该算法与本章提出的算法的区别在于该算法基于 NSGA-II,并通过固定参数化关节来求解逆运动学问题。本章开发了该算法的 C++版本用于处理焊接工作站的逆向运动学问题,其需要处理的目标任务同样包 括连续性,避开关节极限任务,保证船型焊姿态和远离障碍物任务。此外,不同 于本章中的处理,T-IK 算法没有将区间搜索策略应用于关节空间中的参数化变 量。算法的规划出的关节运动如图 6-11 所示。



图 6-11 基于 T-IK 算法的焊接工作站的关节运动

在图 6-11 中,T-IK 算法在关节平滑运动任务上同样具有较好的表现。进一步将 T-IK 算法的规划结果与改进后的 MOEA/D 算法的规划结果进行对比。可以 发现,图 6-11 的规划结果中的变位机关节的运动会有更加频繁的抖动,而机械 臂的 5 号关节相对平滑。基于该结果可以初步假设两种方法完成目标任务时使用 的主要关节变量存在区别。

为了更全面地分析和验证这种差异,可以使用 5.3.2 小节中定义的性能指标 来对三种算法的运动规划结果进行定量描述,具体的数据展示在表 6-1 中。除了 上述的指标外,为了具体衡量各个关节的运动特性,还会将每个关节的运动幅度 展现在表中。

	MOEA/D	T-IK	改进的 MOEA/D 算法
$\Delta \overline{ heta_{ m l}}$	166.068	0.959	0.946
$\Delta \overline{ heta}_2$	19.194	0.238	0.145
$\Delta \overline{ heta}_{3}$	14.318	0.931	0.712
$\Delta \overline{ heta}_4$	11.971	0.615	0.685
$\Delta \overline{ heta}_{5}$	11.716	0.612	0.951
$\Delta \overline{ heta}_6$	51.044	5.112	5.374
$\Delta \overline{ heta}_7$	43.638	2.251	1.922
$\Delta \overline{ heta}_{\!_8}$	28.879	6.222	5.425
$E_s$	1.237	0.053	0.050
$E_{\rm lim}$	9.500	15.000	7.000
$E_t$	146.25	169.224	170.037

表 6-1 三种算法的运动规划性能

在表中, $\Delta \bar{\theta}_i$ 表示算法运行 100 此后单个关节的平均运动幅度,对应式(5-18) 描述的内容。最后三行的三个指标分别描述了焊接工作站在完成整个运动过程中 的机械臂运动幅度  $E_s$ ,关节靠近其极限的平均次数  $E_{lim}$ 和求解效率  $E_t$ 。具体形 式见 3.5.2 小节。表中的 $\Delta \bar{\theta}_i$ 对应变位机 2 号关节的平均运动幅度, $\Delta \bar{\theta}_2$ 表示变位 机 1 号关节平均运动幅度。剩余的 $\Delta \bar{\theta}_i$ 表示机械臂的平均运动幅度。此外,在本 小节的实验中并未设置双臂规划算法的对照组,一方面可以通过全关节编码的算 法来帮助双臂规划出运动,但是 9 维度的决策空间给算法的求解效率提出了过大 的挑战,很难满足实时性要求;另一方法,可以通过固定变位机的运动,然后再 对机械臂进行规划。这样的方法也许能够快速的完成规划,但是,其实现过程一 定会存在人工干预,很难围绕上述定义的指标对算法进行评估。

从表中数据能够得到以下结论:①使用基本的 MOEA/D 算法求解路径运动 学问题时,虽然求解效率很高,但是关节会频繁地进行跳变。在焊接作业过程中, 机体的大幅跳动会显著降低焊接的质量。而在改进的 MOEA/D 算法中由于在线 配置参数话关节方法的引入,能够更好地保证运动的连续性,且能够让机械臂中 的关节处于较好的位置,证明了基于路径信息的加速算子对于路径逆运动学算法 提升的有效性。②相较于 T-IK 算法的规划性能,本章提出的改进 MOEA/D 算法 具有更小的整体运动幅度  $E_s$ 和远离关节极限性能  $E_{lim}$ ,但是在求解效率  $E_t$ 上会 较差。可以证明在线配置参数化关节的方法和任务空间的区间搜索的能够进一步 提升算法的规划性能,但是会带来一定的时间损耗。③从单个关节的平均位移  $\Delta \bar{\theta}_t$ 上来看,改进的 MOEA/D 算法能够规划出更平滑变位机运动。这更加符合

70

焊接作业的逻辑,即让变位机尽可能有小幅度的运动,让焊接件能够较为稳定地 保持某个待焊接的状态,然后利用机械臂的运动完成焊接作业。故本文提出的算 法更适合于实际的焊接作业。

### 6.4 本章小结

本章中成功将焊接工作站的联合建模与冗余机械臂的路径逆运动学算法进行了结合,解决了一个复杂焊件的焊接问题。首先,本章从焊接工作站的决策空间入手,分析了历史路径信息对于后续路径点逆解求解的影响。此后,描述了焊接对象和焊接路径的特征,并根据实际需求设计了优化焊接点姿态和远离障碍物的优化函数。接着,介绍了充分利用决策空间相似性和关节运动连续性的加速算法子,并结合改进后的路径逆运动学求解框架的特征,对这些算子的使用进行了约束。然后,本章结合在线参数化关节配置方法和前文中描述的提升算法性能的算子对 MOEA/D 算法进行了改进。最后,将改进后的算法解决了目标焊接问题,验证了所提解决方案的有效性。为焊接工作站的协同作业提供了新的解决思路。

# 第7章 总结与展望

### 7.1 论文总结

随着工作环境的日益复杂化和焊接工件的结构复杂度增加,焊接系统引入了 变位机,与焊接机械臂一同构成焊接工作站。在进行作业过程中,焊接工作站需 要在其中的机械臂末端精确到达一系列指定的焊接位置的同时,保证两台设备运 动的连续性和安全性。这种问题被定义为机器人的路径逆运动学问题。通常而言, 只有冗余机械臂具备处理上述多任务场景的能力。焊接工作站作为自由度冗余的 系统,其两台设备的自由度在物理上是相互独立的。一种可行的方法是将这两台 设备在运动学上耦合成冗余机械臂,就可以将原本的协同规划问题转化为单个冗 余机械臂的路径逆运动学问题。然而,目前尚未有工作通过这种方式解决焊接工 作站的协同规划问题。本文针对此问题展开了深入研究,主要开展了以下工作:

(1)焊接工作站的焊接作业任务可以归属为冗余机械臂的路径逆运动学问题。为了围绕该问题设计解决方案,首先阐述了机械臂的运动学冗余的定义和利用方法,指出将焊接机器人和变位机的自由度进行联合规划更能适应复杂场景的协同规划任务。接着,介绍了路径逆运动学问题的数学描述,并提出解决该问题的算法需要具备的能力。最后介绍了用于处理冗余机械臂路径逆运动学的求解框架,并结合先前研究中存在的缺陷,提出了对于原框架的改进方案。

(2)提出一种将焊接工作站建模成冗余机械臂的建模方法。首先,以变位 机的二号旋转轴为系统基坐标系的坐标轴,构建从该坐标系到达焊机机械臂末端 的单条运动链。接着,将两台设备的基座之间的相对位置关系抽象为一系列虚拟 关节和连杆,并用 SDH 法在所有关节上设置好坐标系,将焊接工作站建模成一 款八轴冗余机械臂。最后完成了该模型正向运动学公式的推导。此外,为了后续 演示所设计的算法在焊接工作站的实际效果,在 ROS 中搭建了焊接工作站的双 臂模型。通过比对两个模型中的机械臂末端与变位机末端的相对位姿,验证了所 建立的单运动链焊接工作站运动学模型的正确性。

(3)参数化方法通过对机械臂部分关节自由度进行参数化,实现对剩余关节的解析求解。为了将该方法用于实践,首先介绍了参数化方法的运行方式和参数确认方法,并探讨了参数化关节数量对解析解的影响。此外,考虑到参数化方法只处理关节空间相对于6维度工作空间的冗余,讨论了任务空间的参数化方式,增加了方法的灵活性。接着,使用参数化方法为冗余焊接机械臂提供了三种参数化解析表达式,并通过多组关节构型的正向逆向运动学计算验证了其可靠性。解流形是与一个特定的末端位姿匹配的所有关节构型的集合。提出了生成运动学约

72

束的解流形的遍历方法,并发现是参数化解析解会不同程度的让原本客观存在的可行解集出现缺失,导致解流形的稀疏程度发生变化。基于此,提出了"可行率" 评价指标,通过多组末端位姿的逆解求解证明了不同参数化解析表达式在工作空间中造成的可行解缺失情况,并进一步说明了参数化关节选择对于运动规划的重要性。

(4)从搜索算法优化的角度分析了参数化方法的实质,即确定当前运动中 最关键的非参数化关节部分。基于此,提出了一种通过计算非参数化关节部分的 可操作度来在线选择最优参数化关节的方法,并对原有框架进行了完善。随后, 结合机械臂末端的可操作度定义,提出了计算非参数化关节部分可操作度的具体 方法。通过对若干个关节构型的计算验证,发现不同的非参数化关节部分为末端 提供可操作性能力的程度是不同。此外,不同构型对应的最优参数化关节存在差 异,证明在线优化参数化关节的必要性。最后,将不同的参数化关节配置方案分 别与路径逆运动学算法相结合,并用它们求解同一个路径逆运动学问题,验证所 提出的在线配置方法能够提升算法的优化性能。

(5)为了验证路径冗余机械臂逆运动学算法在解决焊接工作站的协同规划 问题上的有效性,选择解决一个结构复杂且体积大的焊接工件的焊接作业问题。 本文以 MOEA/D 算法作为关节空间搜索算法框架,并通过集成在线配置参数化 关节策略和一些成熟的加速收敛算子形成了完整的算法。最终使用改进的算法完 成了目标焊接任务的路径逆运动学问题求解。

本研究针对焊接工作站的协同规划挑战提出了一系列解决方案。首先,引入 了一种通用的联合运动学建模方法,可描述复杂的机械臂与旋转轴变位机之间的 运动关系。其次,将协同规划问题转化为冗余机械臂的路径逆运动学问题,并利 用先前研究的求解框架来解决。最后,本文通过详细分析参数化方法的数学机理, 并提出针对多参数化关节选择的最优化方法,以完善路径逆运动学算法的理论框 架,提高协同规划效率。这些解决方案为焊接工作站的协同规划问题提供了新的 思路和方法,为实现焊接系统的自主柔性作业奠定了坚实的理论和技术基础。

7.2 工作展望

本文对变位机与焊接机械臂的协同作业规划展开研究,并对已有的路径逆运 动学框架进行了改良。虽然取得了一定的研究成果,但是后续还存在许多亟待解 决的工作:

(1)在本文中,提出了利用非参数化关节部分的可操作度来选择最佳的参数化关节,并已取得一定进展。然而,可操作度仅描述了末端可操作性椭球的体积,未考虑超椭球的几何特征。椭球的几何特征可能成为指导在线参数化关节的

73

关键因素。此外,雅可比矩阵包括线速度雅可比和角速度雅可比两部分。未来工作可根据完成任务所需关键自由度的性质,选择相应的雅可比矩阵部分,以辅助在线选择最佳参数化关节。

(2)本文中提出的联合运动学建模方法已成功应用于由"L"形变位机和焊 接机械臂组成的焊接工作站。在未来的工作中,需要进一步的验证该方法在具有 更加复杂配置的工作站中的有效性。

(3)参数化方法给算法带来了高精度的逆解,但这也让原框架比较难以处 理动态环境下的规划问题,尤其是对于目标路径点上突然出现障碍物的场景。未 来的工作可以从两个方面着手:一方面是在原始路径周围生成替代路径点,另一 方面是将现有框架与雅可比迭代方法相结合,以提升框架的灵活性。

# 参考文献

- Wang B, Hu S J, Sun L, et al. Intelligent welding system technologies: State-of-the-art review and perspectives[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2020, 56: 373-391.
- [2] 王海涵, 王豪. 智能技术来袭 焊工培育面对"变"与"不变"[N]. 中国青年报, 2024-04-01(007).
- [3] 刘政鑫.博清科技: 以理念守创业初心 以技术行尖端突破[J].机器人产 业,2024(01):76-81.DOI:10.19609/j.cnki.cn10-1324/tp.2024.01.007.
- [4] 夏宓. 机器人撑起智能焊接产业"半边天"[J]. 机器人产业, 2024(01): 28-31.
- [5] 朱真兵, 蔡丽娟, 牛婷. 打造工业 4.0 重庆版机器人产业[J]. 内燃机与配件, 2022(04): 197-199.
- [6] 工业和信息化部."十四五"机器人产业发展规划[R].北京:工业和信息化部,2021.
- [7] 李俊渊, 廖伟东, 高燕, 等. 基于船形焊的双机协作路径规划[J]. 机床与液压, 2022, 50(05): 62-65.
- [8] 陈成, 庄正浩. 基于变参数导纳控制的机器人示教方法研究[J]. 计量与测试 技术, 2022, 49(08): 64-66+70.
- [9] Villaviencio R A. Generation of Trajectories-Robot by Off-line Programming To Obtain High Quality MAG Welding Beads[C]. 2020 IEEE ANDESCON, 2020: 1-6.
- [10] 徐思尧, 董爱华. 一种基于数字孪生的工业机器人离线编程方法[J]. 仪表技术, 2022(06): 62-67.
- [11] Shen W. Research on virtual simulation design of ABB robot welding operation based on Robotstudio[C]. 2020 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Computer Applications (ICAICA), 2020: 894-897.
- [12] Pervez M R, Ahamed M H, Ahmed M A, et al. Autonomous grinding algorithms with future prospect towards SMART manufacturing: A comparative survey[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2022, 62: 164-185.
- [13] My C A, Bien D X, Tung B H, et al. Inverse kinematic control algorithm for a welding robot-positioner system to trace a 3D complex curve[C]. 2019 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC),

2019: 319-323.

- [14] Wu D, Hou G, Qiu W, et al. T-IK: An efficient multi-objective evolutionary algorithm for analytical inverse kinematics of redundant manipulator[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2021, 6(4): 8474-8481.
- [15] Wu D, Zhang W, Qin M, et al. Interval search genetic algorithm based on trajectory to solve inverse kinematics of redundant manipulators and its application[C]. 2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2020: 7088-7094.
- [16] Mari F, Giamou M, Hall A W, et al. Riemannian Optimization for Distance-Geometric Inverse Kinematics[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2022, 38(3): 1703-1722.
- [17] Trutman P, El Din M S, Henrion D, et al. Globally optimal solution to inverse kinematics of 7DOF serial manipulator[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2022, 7(3): 6012-6019.
- [18] Ames B, Morgan J, Konidaris G. Ikflow: Generating diverse inverse kinematics solutions[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2022, 7(3): 7177-7184.
- [19] Pieper, Donald Lee. The kinematics of manipulators under computer control[M]. Stanford University, 1969: AI-72.
- [20] Buss S R. Introduction to inverse kinematics with jacobian transpose, pseudoinverse and damped least squares methods[J]. IEEE Journal of Robotics and Automation, 2004, 17(1-19): 16.
- [21] Wampler C W. Manipulator inverse kinematic solutions based on vector formulations and damped least-squares methods[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1986, 16(1): 93-101.
- [22] Beeson P, Ames B. TRAC-IK: An open-source library for improved solving of generic inversekinematics [C]. 2015 IEEE-RAS 15th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids). IEEE, 2015: 928-935.
- [23] Luenberger D G, Ye Y. Linear and nonlinear programming [M]. Springer, 1984.
- [24] Wang L-C, Chen C-C, Automation. A combined optimization method for solving the inverse kinematics problems of mechanical manipulators [J]. IEEE Transactions on Robotics, 1991, 7(4): 489-499.
- [25] Aristidou A, Lasenby J. FABRIK: A fast, iterative solver for the Inverse Kinematics problem [J]. Graphical Models, 2011, 73(5): 243-260.
- [26] Li W, Xu W, Lin B and Yan L. Design, Kinematics and Control of a Modular

Cable-Driven Manipulator for Fine Manipulation[C]. 2022 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), Jinghong, China, 2022: 833-838.

- [27] Liu T, Yang T, Xu W, et al. Efficient Inverse Kinematics and Planning of a Hybrid Active and Passive Cable-Driven Segmented Manipulator[J]. in IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2022, 52(7): 4233-4246.
- [28] Kreutz-Delgado K, Long M and Seraji H. Kinematic analysis of 7 DOF anthropomorphic arms[C]. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1990: 824-830.
- [29] Shimizu M, Kakuya H, Yoon W, et al. Analytical Inverse Kinematic Computation for 7-DOF Redundant Manipulators With Joint Limits and Its Application to Redundancy Resolution[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2008, 24(5): 1131-1142.
- [30] Lee S, Bejczy A K. Redundant arm kinematic control based on parameterization[C]. 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE Computer Society, 1991: 458-465.
- [31] Qin L, Wei X, Lv L, et al. An Analytical Solution for Inverse Kinematics of SSRMS-Type Redundant Manipulators[J]. Sensors, 2023, 23(12): 5412.
- [32] Xie B, Wang Q F, and Wu D. Optimal Parameterized Joints Selection to Improve Motion Planning Performance of Redundant Manipulators[C]. 2023 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2023: 9672-9678.
- [33] Yang L, Liu Y, Peng J. Advances techniques of the structured light sensing in intelligent welding robots: a review[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 110(3): 1027-1046.
- [34] Liu Y, Tian X. Robot path planning with two-axis positioner for non-ideal sphere-pipe joint welding based on laser scanning[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 105(1): 1295-1310.
- [35] Chen L, Wang Z, Mo Y, et al. The Path Planning of Synchronous Cooperative Motion Control between Robot and Positioner for Complex Space Curve Processing[J]. Electronics, 2020, 9(11): 1917.
- [36] 张东霖, 邓志良. 焊接机器人系统协同运动分析及仿真[J]. 计算机仿真, 2018, 35(09): 353-357.

- [37] Zhao J, Duan Y, Xie B, et al. FSW robot system dimensional optimization and trajectory planning based on soft stiffness indices[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 63: 88-97.
- [38] Xu P, Yao X, Chen L, et al. Heuristic kinematics of a redundant robot-positioner system for additive manufacturing[C]. 2020 6th International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR), 2020: 119-123.
- [39] Su Y, Li J, Jiao Z, et al. Sequential manipulation planning for over-actuated unmanned aerial manipulators[C]//2023 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2023: 6905-6911.
- [40] Haviland J, Sünderhauf N, Corke P. A holistic approach to reactive mobile manipulation[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2022, 7(2): 3122-3129.
- [41] Zhang H, Wang Y, Zheng J, et al. Path planning of industrial robot based on improved RRT algorithm in complex environments [J]. IEEE Access, 2018, 6: 53296-53306.
- [42] Kavraki L E, Svestka P, Latombe J C, et al. Probabilistic roadmaps for path planning in high-dimensional configuration spaces[J]. IEEE transactions on Robotics and Automation, 1996, 12(4): 566-580.
- [43] Jaillet L, Cortés J, Siméon T. Sampling-based path planning on configuration-space costmaps[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2010, 26(4): 635-646.
- [44] Liu Y, Chen B, Zhang X, et al. Research on the Dynamic Path Planning of Manipulators Based on a Grid-Local Probability Road Map Method [J]. IEEE Access, 2021, 9: 101186-101196.
- [45] Leven P and Hutchinson S. A framework for real-time path planning in changing environments[J]. The International Journal of Robotics Research, 2002, 21(12): 999-1030.
- [46] Parent D, Colomé A, Torras C. Variable impedance control in Cartesian latent space while avoiding obstacles in null space[C]. 2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2020: 9888-9894.
- [47] Chang Y H, Liang C H, Lan C C. An end-effector wrist module for the kinematically redundant manipulation of arm-type robots[J]. Mechanism and Machine Theory, 2021, 155: 104064.
- [48] Yang H, Meng D, Wang X, et al. Manipulability Analysis for Cable-Driven Hyper-Redundant Manipulators[C]. 2021 IEEE 17th International Conference on

Automation Science and Engineering (CASE), 2021: 1480-1487.

- [49] Karimi M, Ahmadi M. A Reinforcement Learning Approach in Assignment of Task Priorities in Kinematic Control of Redundant Robots[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2021, 7(2): 850-857.
- [50] Ratliff N, Zucker M, Bagnell J A and Srinivasa S. CHOMP: Gradient optimization techniques for efficient motion planning[C]. 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2009:489-494.
- [51] Kalakrishnan M, Chitta S, Theodorou E, Pastor P and Schaal S. STOMP: Stochastic trajectory optimization for motion planning[C]. 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2011: 4569-4574.
- [52] Schulman J, Ho J, Lee A X, et al. Finding locally optimal, collision-free trajectories with sequential convex optimization[C]. Robotics: science and systems. 2013: 1-10.
- [53] Rakita D, Mutlu B, Gleicher M. Stampede: A discrete-optimization method for solving pathwise-inverse kinematics[C]. 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2019: 3507-3513.
- [54] Rakita D, Mutlu B, Gleicher M. RelaxedIK: Real-time Synthesis of Accurate and Feasible Robot Arm Motion[C]. Robotics: Science and Systems, 2018: 26-30.
- [55] Rakita D, Shi H, Mutlu B and Gleicher M. CollisionIK: A Per-Instant Pose Optimization Method for Generating Robot Motions with Environment Collision Avoidance[C]. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2021: 9995-10001.
- [56] Starke S, Hendrich N, Zhang J. Memetic evolution for generic full-body inverse kinematics in robotics and animation[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2018, 23(3): 406-420.
- [57] Kang M, Shin H, Kim D, et al. TORM: Fast and accurate trajectory optimization of redundant manipulator given an end-effector path[C]. 2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2020: 9417-9424.
- [58] Ahmad M, Kumar N, Kumari R. A hybrid genetic algorithm approach to solve inverse kinematics of a mechanical manipulator[J]. International Journal of Scientific & Technology Research, 2019, 8: 1772-1782.

- [59] Yang Y, Xu H, Li S, et al. Time-optimal trajectory optimization of serial robotic manipulator with kinematic and dynamic limits based on improved particle swarm optimization[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 120(1): 1253-1264.
- [60] TullyFoote. ROS Wiki: Documentation[EB/OL]. (2022-11-02)[2024-3-9]. https://wiki.ros.org/Documentation.
- [61] Denavit J, Hartenberg R S. A Kinematic Notation for Lower-Pair Mechanisms[J]. Journal of Applied Mechanics, 1955, 22: 215-221.
- [62] brawner. sw_urdf_exporter [EB/OL]. (2021-11-21)[2024-3-9]. https://github.com/ros/solidworks_urdf_exporter/releases.
- [63] Krasjet. 四元数与三维旋转 [EB/OL]. (2021-9-10)[2024-3-10]. https://krasjet.github.io/quaternion/quaternion.pdf.
- [64] Yoshikawa T. Manipulability and redundancy control of robotic mechanisms[C].1985 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 1985, 2: 1004-1009.
- [65] Zhang Q, Li H. MOEA/D: A multiobjective evolutionary algorithm based on decomposition[J]. IEEE Transactions on evolutionary computation, 2007, 11(6): 712-731.
- [66] Xu H, Hu Q. Approximating uniform rational B-spline curves by polynomial B-spline curves[J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2013, 244: 10-18.
- [67] rhaschke, nksas, et al. MoveIt Setup Assistant. [EB/OL]. (2023-6-2)[2024-3-9]. <u>http://ros-planning.github.io/moveit_tutorials/doc/setup_assistant/setup_assistant</u> _tutorial.html?highlight=assistant.

## 攻读硕士期间主要成果

一、发表的学术论文

[1] Xie B, Wang Q, Wu D. Optimal Parameterized Joints Selection to Improve Motion Planning Performance of Redundant Manipulators[C]. 2023 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2023: 9672-9678. (CCF B 类会议,本人二作) (对应本文第三、四章相关工作)

[2] 邝逸灵, 吴迪, 后国炜, 王清锋, 谢斌. 一种用于冗余机械臂解析逆运动 学的多目标优化方法[J/OL].机械科学与技术: 1-9[2023-07-31]. (本人四作)

### 二、参与的科研项目

(1)企事业单位委托项目:全自动焊接系统研发,2021.3-2023.3,项目组核心成员。

(2)企事业单位委托项目:多智能体任务分配和协同感知技术研究,2023.1-2023.8,项目组核心成员。

三、个人获奖情况

(1) 省部级, 第二届湖南省研究生人工智能创新大赛团队二等奖, 2021。

### 四、参加学术活动

(1) IEEE International Conference on Robotics and Automation Reviewer, 2023.

(2) PRE-ICRA2023 论文预分享, 2023.

# 致谢

三年前,我用通过本科的学习初步接触到了机器人,兴奋于了解到如此美妙 的事物的同时,也遗憾没能够早些深入这个领域;而三年后的这个时间点,我能 欣然地提交这份答卷,展现自己这三年来的成长。回望过往的三载时光,我度过 了一个十分精彩的研究生生活,有过论文投中的喜悦,有过初次出国参会的兴奋, 有过苦于病痛的无奈,也有过担忧未来的焦虑与迷茫。在这过程中,我体悟了许 多人生道理,也收获了许多关心和指导。在此,我诚挚地感谢所有给予我帮助和 支持的人。

感谢我的导师谢斌教授。在我的研究生生涯中,谢老师起到了至关重要的作用。不仅在学术上为我提供了指导,向我传递了作为科研人的严谨治学态度,也在日常事务中教会了我许多为人处世的准则。为了培养我的科研能力,谢老师给了我多次机会让我参与实验室的科研事务,并在我论文投中后鼓励我在国内外的会议中对自己的工作进行演讲。在日常生活中,谢老师也会在我有困难时伸出援手,尽自己所能地为我提供支持。非常感激谢老师这三年来对于我的指导和帮助,您的言传身教为我未来工作生活的提供了宝贵的经验!

感谢自动化学院的授课老师们,感谢你们细心认真的授课,让我能够在转专 业的情况下也能很好地掌握科研所需要的理论知识。也感谢刘雯辅导员,胡艳老 师和周杨老师,你们在我生病和毕业之际耐心地给我提供帮助,让我能够顺利地 完成学业。也感谢每一位审阅论文的老师,你们辛苦了!

感谢在实验室相识的每一位同门,感谢与你们在信息楼 220 和 221 的相遇和 共事。这两间实验室承载了我研究生生涯的大半回忆。这里有引领我走入冗余机 器人研究的吴迪师兄,师兄对于科学研究的创新敏感力和严谨治学的态度让我敬 佩,祝愿师兄攻读博士顺利;有与我一起奋斗到凌晨两点完成国自科材料提交的 振南,南哥是我最早结识的实验室的小伙伴,你在为人处世上的沉稳,在工作上 的尽职尽责都是值得我学习的品质,祝愿你工作顺心,希望未来还有机会重新组 建蒸菜小分队;有一起参加数模竞赛的海涛,我很佩服你在学术上的热情和动力, 能够找到自己想要奋斗的目标,并一心投入其中,祝愿你能够顺利拿到攻读博士 的机会;也有常与我在实验室交流研究想法的嘉明,你是我相处最愉快的师弟, 我们一起经历了十五所项目,在艰苦的项目环境里互相鼓励帮助,祝愿你未来一 切顺意,摆脱眼前的迷茫。还有浩然,欣玉,我们也一起度过了许多快乐的时光, 你们在实验室里也非常用功努力,祝愿你们这届研二都能够顺利毕业,都找到自

82

己称心的工作。新来的师弟师妹们,子清、硕清、德坤、思航和烁爽,也祝愿你 们能够稳扎稳打地提升自己,实现自己想要做的事,成为自己想要成为的人。祝 愿实验室能够不断突破,创造新高!

感谢我的家人们,感谢你们于我二十多年来的养育之恩,也感谢你们总是在 重要关头为我鼓劲,给我提供帮助。在我失意迷茫时,你们总会来安慰我,教会 我不要过于计较得失,相信现在的一切都是最好的安排,让我能够坚定地走完这 三年,希望你们能够身体健康,未来我会好好回报你们。感谢羽欣,与你的相识 相知是我的幸运,你让我在辛苦科研的间隙能够放松身心,并在我需要之际给予 我最大的支持。希望未来我们能够继续相互督促进步,相互支持守护,也祝愿你 能够心想事成,加油!

最后,感谢敢于突破自我的自己,让自己能够有机会在中南经历和成长。希望在这里所收获的一切都能成为未来工作生活的助力。也告诫自己,不要因为毕业就疏于学习,要将学习和提升自己当成一种习惯,不忘初心和理想,希望在下一个三年时能够有一个更好的自己,能够成为一个于国家和社会有用的人。

2024年5月23日于中南大学信息楼