

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.05.02

移动轮式焊接机器人柔性联动控制算法研究

余 燕¹, 赵永江², 张 淳², 袁 飞¹, 冯消冰^{2*}

1. 江南造船(集团)有限责任公司 江南研究院, 上海 202150

2. 北京博清科技有限公司, 北京 102600

摘要: 针对移动轮式焊接机器人底盘与机械臂独立控制导致的运动协调性不足问题, 本研究提出一种基于二次规划(Quadratic Programming, QP)的柔性联动控制算法, 通过优化系统运动学链的协同控制, 提升焊接轨迹跟踪精度与动态稳定性。研究以 Omron LD-60 差速底盘与 7 自由度 Franka-Emika 机械臂集成的移动焊接机器人为对象, 构建包含微分运动学模型的整体雅可比矩阵, 建立底盘虚拟关节与机械臂关节的联动控制框架。算法将协同运动问题转化为带约束的二次规划优化模型, 通过最小化关节速度与松弛误差的加权目标函数, 同步优化底盘位姿调整与机械臂关节运动, 抑制末端执行器的轨迹突变与机械振动。仿真试验表明, 相较于独立控制策略, 该算法优化后的焊枪末端轨迹更为平滑, 机械臂运动协调性显著改善; QP 求解器对比显示, ProxQP 与 quadprog 在计算效率上表现更优。通过长直焊、立焊及复杂角焊缝试验验证, 算法能够协调全向移动底盘与机械臂的运动耦合, 焊接轨迹连续性增强, 断焊策略减少了材料损耗。本研究为复杂焊接任务提供了适应性更强的解决方案, 拓展了移动焊接机器人在船舶制造等场景的应用潜力。

关键词: 移动焊接机器人; 柔性联动; 二次规划; 智能化焊接

中图分类号: TG439.9 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)05-0012-08

Mobile Wheeled Welding Robots Research Based on Flexible Coordinated Control Algorithm

YU Yan¹, ZHAO Yongjiang², ZHANG Chun², YUAN Fei¹, FENG Xiaobing^{2*}

1. Jiangnan Institute of Technology, Jiangnan Shipyard(Group) Co., Ltd., Shanghai 202150, China

2. Beijing Botsing Technology Co., Ltd., Beijing 102600, China

Abstract: To address the insufficient motion coordination caused by independent control of the mobile chassis and manipulator in wheeled welding robots, this study proposes a flexible coordinated control algorithm based on Quadratic Programming (QP). The algorithm optimizes the collaborative control of the kinematic chain to enhance welding trajectory tracking accuracy and dynamic stability. A mobile welding robot platform is developed, integrating an Omron LD-60 differential drive chassis with a 7-DoF Franka-Emika manipulator. By constructing a unified Jacobian matrix incorporating a differential kinematic model, a coordinated control framework is established, linking the virtual joints of the chassis to the manipulator's joints. The algorithm formulates the motion coordination problem as a constrained QP optimization model, minimizing a weighted objective function of joint velocities and slack errors to synchronize chassis pose adjustments and manipulator motion, thereby suppressing abrupt trajectory changes and mechanical vibrations. Simulation results demonstrate that the proposed algorithm achieves smoother welding torch trajectories and improved motion coordination compared to independent control strategies. Comparative analysis of QP solvers reveals superior computational efficiency for ProxQP and quadprog. Experimental validations, including straight-line, vertical, and complex corner welds, confirm the algorithm's capability to coordinate omnidirectional chassis movement with multi-DoF manipulator motion, enhancing trajectory continuity and reducing material waste through intermittent welding strategies. This research provides an adaptive solution for complex spa-

收稿日期: 2025-03-17 修回日期: 2025-04-19

作者简介: 余 燕(1976—), 女, 学士, 高级工程师, 主要从事船舶设计与制造研究。E-mail: yuy@jnshipyard.com.cn。

通讯作者: 冯消冰, 博士, 正高级工程师。E-mail: fxb@botsing.com。

tial welding tasks, extending the application potential of mobile welding robots in shipbuilding and large-scale steel structure fabrication.

Keywords: mobile welding robot; flexible coordination; quadratic programming; intelligent welding

引用格式:余燕,赵永江,张淳,等. 移动轮式焊接机器人柔性联动控制算法研究[J]. 电焊机,2025,55(5):12-19.

Citation: YU Yan, ZHAO Yongjiang, ZHANG Chun, et al. Mobile Wheeled Welding Robots Research Based on Flexible Coordinated Control Algorithm[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(5): 12-19.

0 引言

固定式和导轨式焊接机械臂因其高精度和稳定性被广泛应用在船舱、甲板、储仓等焊接中。然而,这些机械臂通常局限于固定的工作位置或沿轨道运动,缺乏自由移动性,导致它们在处理复杂形状和大范围焊接任务时存在显著不足^[1]。例如,在船舶制造中,焊接区域广泛且形状不规则,固定式机械臂无法灵活应对不同位置的焊接需求,且每次工作范围变化都需要重新调整设备和工件^[2],如图1所示。导轨式机械臂虽然可以在一定轨道范围内移动,但仍然受到轨道长度和焊接区域的限制,无法在三维空间中自由移动^[3]。此外,这种有限的运动能力增加了工作周期和人工干预的需求,降低了整体自动化效率和焊接质量的一致性。因此,如何突破固定安装和轨道限制,实现更高灵活性的焊接机器人,成为提升焊接作业效率和适应性的重要研究方向。

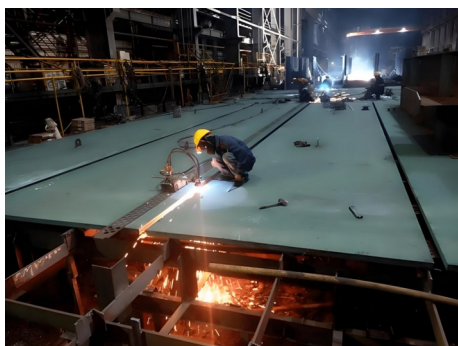


图1 船舶制造焊接场景^[1]

Fig. 1 Welding Scenarios in Shipbuilding

移动轮式焊接机器人因其在三维空间内的灵活性,越来越多地应用于大面积和复杂形状的焊接场景,如船舶制造、钢结构加工以及储罐焊接等。与固定式或导轨式机械臂不同,移动轮式焊接机器人可以在整个工作区域内自由移动,无需依赖固定

轨道或安装位置,从而有效解决了传统机器人在空间覆盖和灵活性方面的局限性^[4]。这种移动性使得移动轮式焊接机器人能够轻松应对大面积焊接任务,尤其适用于不规则和难以到达的焊接部位^[5]。此外,移动轮式焊接机器人还能够快速适应不同的工作环境和焊接任务,减少了设备调整和工件重新布置的时间,提高了作业效率^[6]。其独特的空间适应性和高灵活性,极大地提升了焊接自动化程度,并能够实现更高精度的焊接操作,尤其是在复杂和动态变化的环境中^[7]。

目前,移动轮式焊接机械臂在实际应用中通常采用分开控制的方式,即机械臂与底盘的运动并未形成有效的整体联动。大多数系统将机械臂的运动与底盘的移动独立控制,这种控制方式虽然简化了系统设计,但在焊接过程中会导致底盘与机械臂之间的运动协调性差,影响轨迹跟踪精度和焊接质量^[8]。具体而言,机械臂通常在预设的范围内进行精确运动,而底盘则主要负责平稳地移动设备,但这两者之间没有实时的协同控制^[9]。这种分开控制模式无法在动态焊接过程中实现平滑过渡,导致焊接过程中可能出现不连续的轨迹和不稳定的焊接效果^[10]。随着对焊接质量要求的提高,越来越多的研究开始关注如何通过整体联动控制优化移动轮式焊接机械臂的性能,确保底盘和机械臂的协调运动,以提高运动平稳性和焊接精度^[11]。

本文使用柔性联动控制算法能够在底盘与机械臂之间实现实时协调,确保它们的运动更加平滑,有效避免了机械臂运动中的突变和抖动。这种算法通过优化底盘和机械臂的运动轨迹,能够使机器人在执行复杂焊接任务时保持较高的运动精度和稳定性。此外,柔性联动控制还能减少设备的磨损和能源消耗,延长机器人系统的使用寿命。随着工业焊接任务的多样化和对自动化精度要求的提

高,研究并实现移动轮式焊接机械臂的柔性联动控制算法,将大大提升焊接机器人的整体性能,为智能制造和高效焊接提供可靠保障。

1 联动控制方法

1.1 移动焊接机器人

本文使用移动焊接机器人 Frankie 进行以下试验。Frankie 机器人由 Omron LD-60 两轮差速驱动底盘和一个 7 自由度的 Franka-Emika Panda 机械臂组成,并在其末端配备焊枪以执行焊接任务,如图 2 所示。此外,还构建了一个模拟中的 Omni-Frankie 模型,该模型采用全向底盘(通过麦克纳姆轮实现),用于展示具备全向移动能力的焊接机器人的整体操作效果。Frankie 和 Omni-Frankie 的仿真模型均作为 Python 机器人工具箱(Robotic Toolbox for Python)的一部分提供,以便于控制与路径规划的研究^[12]。

在真实世界的试验中,Omron LD-60 移动底盘利用其内置 LiDAR 传感器在嵌入式计算机上执行定位与地图构建(SLAM),确保机器人能够准确导航至焊接位置。Frankie 还配备了 Intel i5 NUC 和 Nvidia Xavier,用于图像处理和焊接路径规划,结合计算机视觉技术检测焊接目标位置,并优化焊接轨迹。本研究通过结合移动底盘、焊枪操作臂及智能



图 2 移动轮式焊接机器人

Fig. 2 The Mobile Wheeled Welding Robot

感知系统,探索高效、稳定的移动焊接机器人控制方法^[12]。

1.2 柔性联动控制算法原理

机器人的末端执行器位姿为:

$${}^0T_e = {}^0T_b(x, y, \theta) {}^bT_a {}^aT_e(k_a, q_a) \quad (1)$$

式中 $\{0\}$ 是世界参考坐标系, ${}^0T_b$ 是移动基座 $\{b\}$ 相对于世界坐标系的位姿, ${}^bT_a$ 是从移动基座坐标系到机械臂基 $\{a\}$ 的常量相对位姿, ${}^aT_e$ 是机械臂的前向运动学,其中末端执行器坐标系为 $\{0\}$, k_a 是机械臂的运动学参数, q_a 是机械臂的关节坐标。

本文的方法基于微分运动学,旨在确定基座速度与关节角速度 $\dot{q}_a$ 以及末端执行器空间速度 v_e 之间的关系。

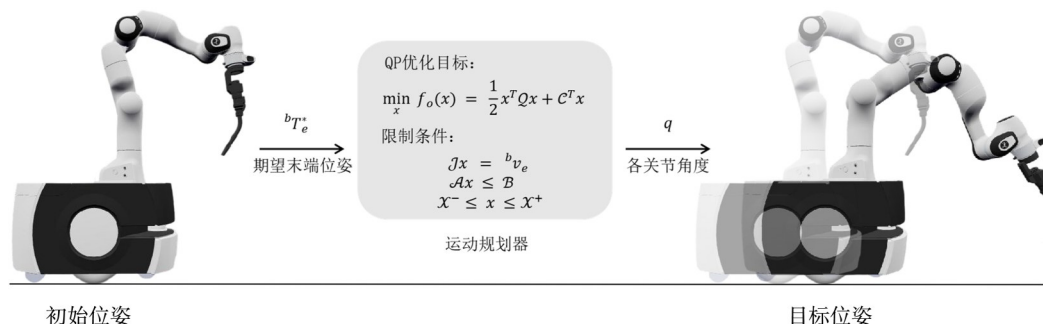


图 3 柔性联动算法流程

Fig. 3 The flowchart of flexible coordination algorithm

为了实现这一点,在运动链(1)中引入了一个无穷小变换,以表示基座瞬时运动:

$${}^0T_e = {}^0T_b({}^bT_b(\delta_\theta, \delta_d)) {}^bT_a {}^aT_e(k_a, q_a) \quad (2)$$

式中 δ_θ, δ_d 分别表示非完整约束基座的无穷小旋转和前向平移。可以将其视为一个简单的转动-平

移机器人,其虚拟关节坐标为 $q_b \in R^2, \|q_b\| \rightarrow 0$ 并且 $\dot{q}_{b,0} = \dot{\delta}_\theta$ 和 $\dot{q}_{b,1} = \dot{\delta}_d$ 。最终得到的表达式与串联链式机械臂的前向运动学类似,将微分运动学表示为:

$${}^0v_e = {}^0J_e(x, y, \theta, q) \begin{pmatrix} \dot{q}_b \\ \dot{q}_a \end{pmatrix} \quad (3)$$

该方程将移动操作系统各轴的速度映射到末端执行器的空间速度,其中 $q=(0_2, q_a)^T \in R^n$,且 n 为虚拟关节和实际关节的数量。整体操控器雅可比矩阵 ${}^aJ_e(\cdot)$ 是在世界坐标系中表示的。虚拟基座关节的速度与轮子的角速度之间的关系为:

$$\dot{q}_{b,0} = \frac{R}{W}(\bar{\omega}R - \bar{\omega}L), \dot{q}_{b,1} = \frac{R}{2}(\bar{\omega}R + \bar{\omega}L) \quad (4)$$

式中 R 为轮子半径, $\bar{\omega}R$ 、 $\bar{\omega}L$ 分别为机器人右轮和左轮的角速度, W 是两轮之间的距离。对于某些控制行为,使用不同坐标系表达速度是有用的。例如,在基座坐标系 ${}^b v_e$ 或末端执行器坐标系 ${}^e v_e$ 中,分别可以推导出相应的雅可比矩阵 ${}^b J_e(q)$ 和 ${}^e J_e(q)$ 。

利用整体操控器雅可比矩阵,我们可以构建一个解决速率的运动控制器:

$$\dot{q}^*(t) = {}^b J_e(q)^+ {}^b T_e^*(t) \quad (5)$$

式中 $(\cdot)^+$ 表示摩尔-彭若斯伪逆, $\dot{q}^*$ 是使移动操控系统的末端执行器实现所需空间速度的关节速度,且 ${}^b v_e^* = (v_x, v_y, v_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z)^T$ 。该控制器代表了移动操作系统最基本的反应式和整体控制形式。

所需的关节速度 $\dot{q}^*$ 被分解为基座虚拟关节速度 $\dot{q}_b^*$,这些速度通过单轮车运动学模型转换为左轮和右轮的速度(使用式(4)),而 $\dot{q}_a^*$ 则对应于机械臂的关节速度。

该控制器输出关节速度 $\dot{q}$,以实现所需的末端执行器速度 ${}^b v_e^*$ 减去一个松弛向量(有意的误差偏差) δ ,其中松弛分量用于允许控制器更好地最小化成本并满足特定约束条件。如图3所示,该控制器被表示为一个QP问题:

$$\text{优化目标: } \min_x f_o(x) = \frac{1}{2} x^T Q x + C^T x \quad (6)$$

$$\text{限制条件: } Jx = {}^b v_e^*, Ax \leq B, X^- \leq x \leq X^+$$

式中 $x=(q, \delta)^T$ 是决策变量, Q 包含关节速度和松弛成本, C 包含操控性最大化和辅助性能任务, J 包含增广的操控器雅可比矩阵, A 和 B 用于实现关节位置极限避免, $X^\pm$ 限制决策变量的最大值和最小值。

2 仿真结果与分析

仿真环境如图4所示,图中的移动轮式焊接机

器位于坐标原点,焊枪末端距离地面约0.5 m。机器人基座采用轮式设计,可以在平面上进行移动。焊枪位于机器人臂部,呈现一定的角度,当前未接触地面。图中背景为灰色,且坐标轴明显可见,显示出机器人的位置和方向。试验的目的是通过控制机器人移动,将焊枪末端从当前位置精确地移动到目标点(4.5, 0, 0),即沿X轴方向平移4.5 m,保持Y轴和Z轴坐标不变。图中的坐标轴可视化了目标点和机器人的相对位置,帮助观察机器人的运动轨迹。这种仿真环境常用于研究移动机械臂的精确定位、路径规划和任务执行能力,尤其是在执行复杂任务如焊接时,确保机器人在操作中的稳定性、精准度和响应速度。

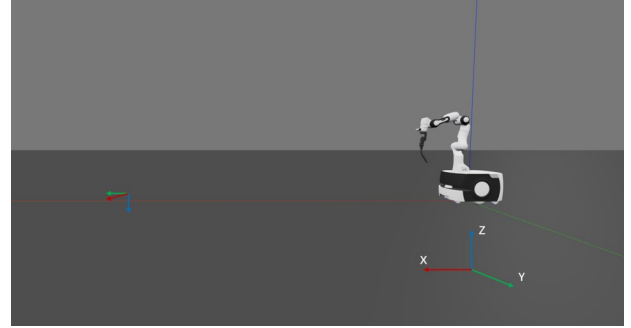
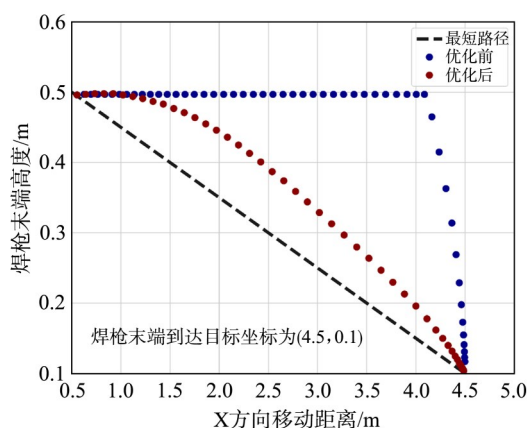


图4 仿真环境

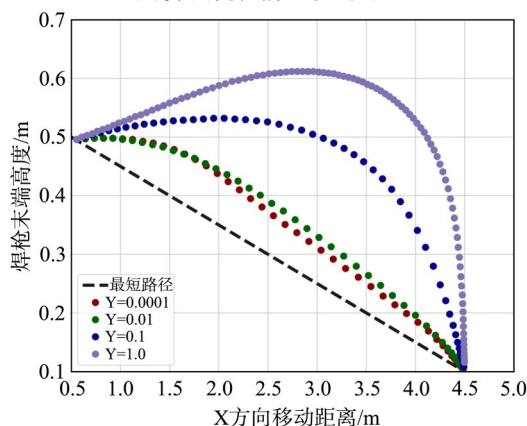
Fig. 4 Simulation environment

图5为QP算法优化前后焊枪末端运动路径的变化,以及关节速度增益对末端轨迹的影响。在图5a中,虚线表示最短路径,蓝色曲线为优化前的路径。从图中可以看到,焊枪末端在移动过程中只有在底盘到达4 m时才开始做出动作,表现为路径的突然改变。相比之下,红色曲线表示优化后的路径,焊枪末端的运动过程变得平滑且连续,表明通过QP优化,机器人的运动更加稳定和高效,避免了不必要的突变。

图5b分析了不同关节速度增益 Y 对末端轨迹的影响。通过对比不同增益值(分别为0.001、0.01、0.1、1.0)的情况,发现当关节速度增益设置为0.001时,轨迹保持了平滑的曲线,表现为最优控制效果。而当增益增大至1.0和0.1时,轨迹出现失控现象,显示了过高的关节速度增益会导致机器人运动的不稳定。因此,选择适当的增益值对于保证机器人末端执行器精确控制至关重要。



(a) 算法优化前后轨迹对比



(b) 关节增益对末端的影响

图5 焊枪末端运动轨迹点线图

Fig. 5 Welding torch end motion trajectory point-line diagram

图6为底盘线速度、角速度以及各关节角度在不同增益参数下的变化曲线。图6a对应关节增益为0.01的情况下,各关节的角度变化较为平稳,整体曲线趋于平滑,说明系统在此增益参数下运行较为稳定。图6b对应关节增益为0.001时,各关节的角度变化呈现明显的抖动现象,尤其是在X方向移动距离大于2.0 m后,振荡逐渐增强。这表明较低的增益参数可能导致系统响应过于灵敏,引起较大幅度的抖动。此外,线速度(绿色曲线)在两种增益情况下均表现出相似的趋势,表明增益参数主要影响关节角度的动态响应。

图7为关节2和关节6的角度随X方向移动距离的变化情况,对比了两种不同条件下的关节角度变化特性。图7a为一种控制参数配置下的关节角度曲线,其变化趋势较为平稳,整体呈现缓慢上升的趋势。在X方向移动距离3.5 m之后,曲线依旧

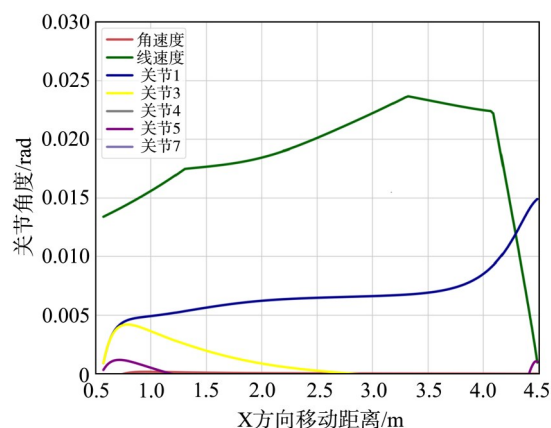
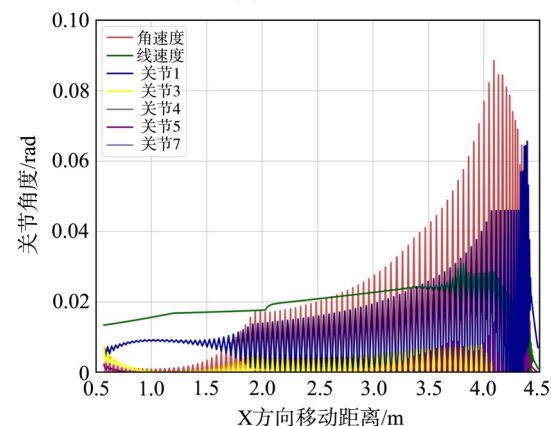
(a) $Y=0.01$ (b) $Y=0.001$

图6 增益参数对底盘和机械臂的影响

Fig. 6 The effects of gain parameters on the chassis and manipulator

保持平稳,仅有轻微变化,绿色框标注区域显示此阶段的特性。图7b对应另一种控制参数配置,在相同的X方向移动距离范围内,整体趋势与左图相似,但在3.5 m之后的区域,关节2和关节6的角度曲线出现了较明显的波动,表现出一定程度的抖动,红色框标注了此变化区域。该图表明不同的控制策略对关节角度的动态稳定性具有显著影响,为优化关节运动控制提供了参考依据。

图8为未使用联动算法时焊枪末端的移动轨迹,以黄线表示末端路径。图8a为机器人初始位置,机械臂未进行控制,焊枪处于静止状态。图8b中机器人开始沿X方向移动,但由于未对机械臂进行同步控制,焊枪末端轨迹呈现直线,说明焊枪的运动仅由底盘移动驱动,而非机械臂协调调整。图8c中机器人接近目标点后停止移动,并通过机械臂调整焊枪末端位置,使其到达目标点,这一过程使

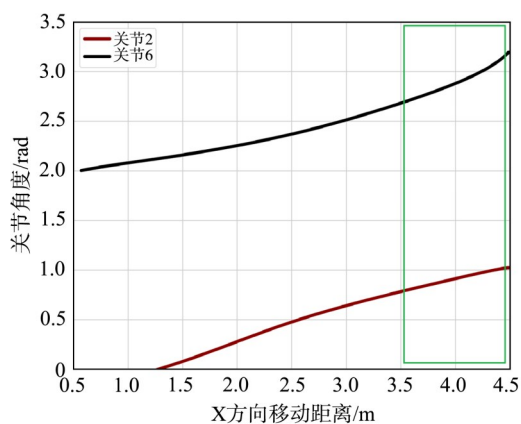
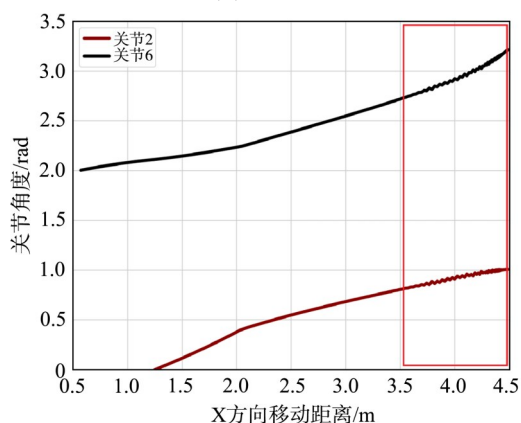
(a) $Y=0.01$ (b) $Y=0.001$

图7 增益参数对机械臂2,6轴的影响

Fig. 7 The effect of gain parameters on arm axes 2 and 6

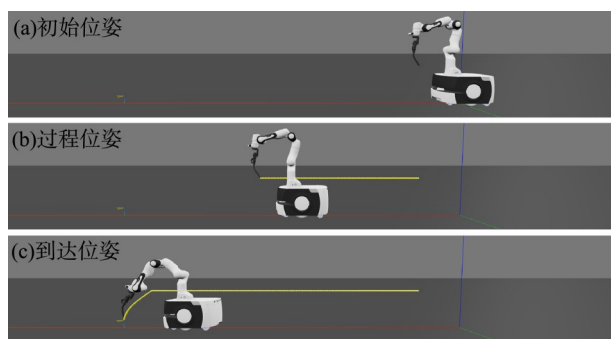


图8 未使用联动算法时焊枪末端的移动轨迹

Fig. 8 The trajectory of welding torch end without coordinated control algorithm

轨迹发生显著弯曲。该图直观地反映了缺少联动算法时的焊枪轨迹特性,存在较大位置误差和突兀的轨迹调整。研究表明,在此情况下,焊枪末端的运动效率较低,可能影响焊接精度。

图9为使用联动算法时焊枪末端的移动轨迹,图中的黄线表示焊枪末端的路径变化。与未使用

联动算法的情况不同,此方法在机器人移动的前期就对机械臂进行了协调控制,使焊枪轨迹呈现连续的曲线变化。图9a中机器人处于初始位置,机械臂和焊枪准备执行任务。图9b中机器人沿X方向移动,联动算法控制机械臂同步调整,使焊枪末端轨迹呈现平滑的曲线,而非简单的直线运动,避免了突兀的末端位置修正。图9c中机器人逐步接近目标点时,机械臂继续调整焊枪末端的位置,使其顺利到达目标点,整个过程轨迹更加自然流畅。该图直观地表明,使用联动算法能够有效优化焊枪轨迹,使末端移动更加平稳,减少位置误差,提高焊接精度,为机器人焊接路径规划提供了优化依据。

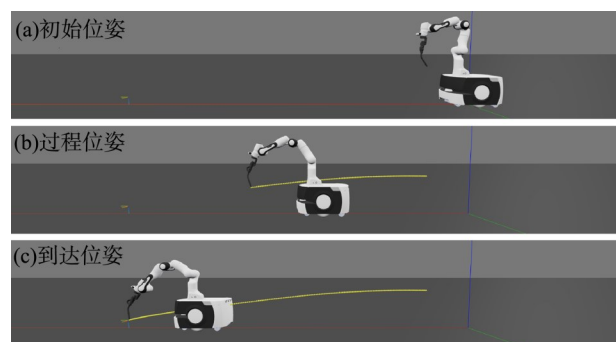


图9 使用联动算法时焊枪末端的移动轨迹

Fig. 9 The trajectory of welding torch end with coordinated control algorithm

表1为不同QP求解器的运行时间,用于比较各算法在多个试验运行中的计算效率。列出了七种不同的求解算法,分别是Clarabel锥优化求解器(Clarabel)、Python凸优化工具包(CVXOPT)、嵌入式锥优化求解器(ECOS)、算子分裂二次规划求解器(OSQP)、近端二次规划求解器(ProxQP)、带线性约束二次规划求解器(quadprog)、分裂锥优化求解器(SCS),纵向表示三次不同的运行试验结果。从数据来看,ProxQP和quadprog在第2次试验中表现最佳,分别为6.863 s和6.896 s,在所有试验中平均运行时间较低,表现出较强的计算效率。ECOS和SCS在部分试验中也展现了较短的计算时间,如ECOS在第1次试验中仅用7.007 s,SCS在第1次试验中也达到了7.027 s。

相对而言,CVXOPT的计算时间较长,三次试验中均高于10 s,说明其在该任务上的计算效率较低,可能受限于算法结构或实现方式。Clarabel、

表 1 不同 QP 求解器的运行时间(单位:s)

Table 1 The execution time of different QP solvers

次数/算法	Clarabel	CVXOPT	ECOS	QSQP	ProxQP	quadprog	SCS
1	7.191	11.680	7.007	7.228	6.916	6.902	7.027
2	7.231	10.852	7.145	7.076	6.863	6.896	7.139
3	7.176	11.027	7.203	7.116	6.952	6.925	7.214

OSQP 和 ECOS 在不同试验中的表现较为均衡,时间分布稳定。总体来看,ProxQP 和 quadprog 具有较好的计算效率,适用于高效求解二次规划问题,而 CVXOPT 在该测试中计算时间最长,可能更适用于其他类型的优化任务。

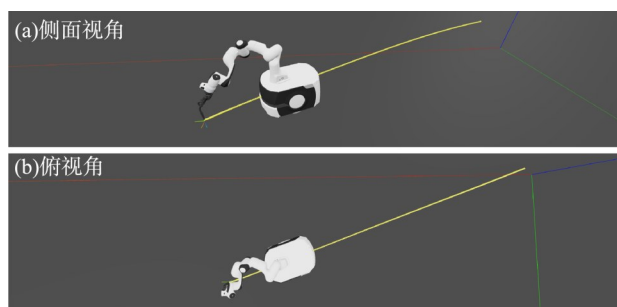


图 10 任意目标点焊枪末端的移动轨迹

Fig. 10 Arbitrary target point welding torch end movement trajectory

图 10 为给定任意目标点下使用联动算法时焊枪末端的移动轨迹,以黄线表示焊枪在机器人移动过程中的路径。图 10a、10b 分别从不同视角呈现机器人在焊接任务中的运动特性。在图 10a 中,可以观察到机器人底盘和机械臂协同运动,使得焊枪末端的轨迹呈现平滑的曲线,而非突兀的线性变化。

这表明联动算法在机器人移动过程中对机械臂进行了实时调整,使焊枪保持稳定的运动路径。图 10b 展示了机器人从不同角度的轨迹情况,确认焊枪的运动轨迹在整个过程中是连续且自然的。与未使用联动算法的情况相比,该方法能够有效减少焊枪末端的剧烈调整,使其在整个焊接任务中保持平稳的轨迹,提高焊接精度和运动稳定性^[13]。

图 11 为移动焊接机器人在不同焊接任务中采用断焊技术,以节省材料并加快焊接时间。图 11a 为长直焊缝的焊接过程,机器人沿直线轨迹进行焊接,以确保焊缝的连续性和强度。图 11b 为立焊缝焊接,焊枪在垂直方向上稳定运动,实现均匀的焊接熔接。而图 11c、图 11d 分别为立焊和仰焊中的断焊过程,通过间歇性熄弧减少焊接材料的使用,同时优化热输入,防止工件因高温变形。图 11e、图 11f 为直角焊缝的断焊,采用断续焊接策略,确保焊接点之间具有足够的连接强度,同时减少焊接时间,提高生产效率。整体来看,该试验表明,断焊技术能够在保证焊接质量的同时,有效降低材料消耗,优化热管理,并显著提高焊接作业的整体效率。

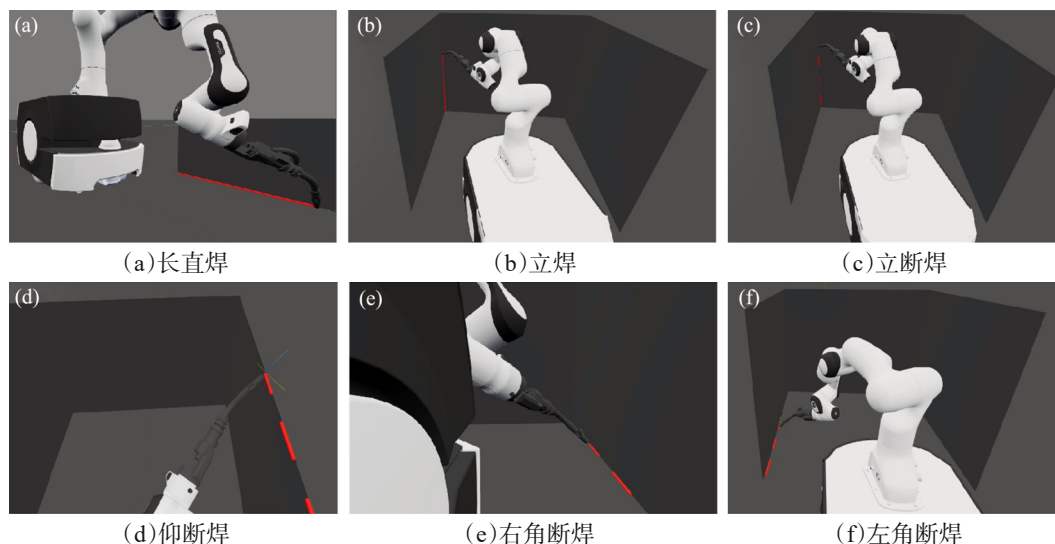


图 11 焊接仿真

Fig. 11 Welding simulation

3 结论

(1)本研究围绕移动轮式焊接机器人的柔性联动控制算法展开,旨在提高机器人在大面积复杂焊接环境中的适应性和焊接质量。传统的固定式和导轨式焊接机械臂因受限于安装位置和运动轨迹,难以满足船舶、储仓等复杂焊接任务的需求,而移动轮式焊接机器人凭借其自由移动能力,能够覆盖更广的焊接范围。

(2)现有大多数移动焊接机器人采用独立控制模式,即机械臂与底盘的运动未形成联动,导致轨迹跟踪误差大、焊接精度低,并影响整体作业效率。为解决上述问题,本文提出了一种基于QP的柔性联动控制算法,实现底盘与机械臂的协同运动,使焊枪末端能够保持平滑轨迹,减少机械臂的突变和抖动,提高焊接精度和稳定性。

(3)试验结果表明,该算法有效优化了机器人运动轨迹,显著提升了轨迹跟踪能力,减少了焊接过程中因不协调运动导致的焊缝偏差。此外,断焊策略的应用进一步节省了焊接材料,并缩短了焊接时间,提高了整体生产效率。

参考文献:

- [1] 曹正,步斌,尹子涵,等. 焊接机器人的工作空间分析与运动学仿真分析[J]. 中国高新科技, 2024(06): 97-98+131.
CAO Z, BU B, YIN Z H, et al. Workspace analysis and kinematic simulation of welding robot[J]. China High-Tech, 2024(06): 97-98+131.
- [2] 谢小正,吕伟前. 6R焊接机械臂的运动性能及其工作空间仿真[J]. 机械设计与制造工程, 2023, 52(08): 1-6.
XIE X Z, LV W Q. Motion performance and workspace simulation of 6R welding manipulator[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2023, 52(08): 1-6.
- [3] 卢文龙,靳华伟,陈建. 基于粒子群优化算法的焊接机械臂轨迹规划[J]. 四川轻化工大学学报(自然科学版), 2024, 37(04): 28-35.
LU W L, JIN H W, CHEN J. Trajectory planning of welding manipulator based on particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Sichuan University of Science & Engineering (Natural Science Edition), 2024, 37(04): 28-35.
- [4] 徐浩,郭为忠. 轮式机器人: 创新设计与试验研究[J]. 集成技术, 2022, 11(04): 3-18.
XU H, GUO W Z. Wheeled robot: innovative design and experimental research[J]. Integration Technology, 2022, 11(04): 3-18.
- [5] 何成文. 焊接机械臂结构设计研究[J]. 机械管理开发, 2022, 37(03): 65-67.
HE C W. Research on structural design of welding manipulator[J]. Mechanical Management and Development, 2022, 37(03): 65-67.
- [6] 胡胜, 罗雨, 焦向东, 等. 轨道式管道焊接机器人焊缝跟踪方法研究现状[J]. 河北科技大学学报, 2015, 36(02): 126-133.
HU S, LUO Y, JIAO X D, et al. Research status of seam tracking methods for rail-type pipeline welding robots[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2015, 36(02): 126-133.
- [7] 张晓莹, 陈鹿民, 温小隆, 等. 轮式移动焊接机器人运动学分析与仿真[J]. 机械设计与制造, 2010(11): 138-140.
ZHANG X Y, CHEN L M, WEN X L, et al. Kinematic analysis and simulation of wheeled mobile welding robot[J]. Machinery Design & Manufacture, 2010(11): 138-140.
- [8] 张华, 王海东, 徐健宁, 等. 基于旋转电弧传感的新型轮式自主移动焊接机器人系统[J]. 机器人, 2003, (06): 536-538+553.
ZHANG H, WANG H D, XU J N, et al. A novel wheeled autonomous mobile welding robot system based on rotating arc sensor[J]. Robot, 2003, (06): 536-538+553.
- [9] 张鑫, 刘长润, 李旭, 等. 液压支架顶梁焊接机械臂的运动学分析与仿真[J]. 机床与液压, 2024, 52(13): 169-175.
ZHANG X, LIU C R, LI X, et al. Kinematic analysis and simulation of welding manipulator for hydraulic support canopy[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2024, 52(13): 169-175.
- [10] 叶建雄, 张华, 谢剑峰. 轮式焊接机器人的设计[J]. 微计算机信息, 2006(05): 209-211.
YE J X, ZHANG H, XIE J F. Design of wheeled welding robot[J]. Microcomputer Information, 2006(05): 209-211.
- [11] 王海东, 张华, 徐健宁. 轮式自主移动焊接机器人协调控制策略[J]. 焊接学报, 2004(03): 4-6+129.