

焊接机器人在车间的步态轨迹路径规划方法

王兆琳¹
WANG Zhaolin

摘要

对焊接机器人在车间的步态轨迹路径规划时,存在无法保证机器人稳定运行,且路径规划的适应性差的问题,为此提出焊接机器人在车间的步态轨迹路径规划方法。首先用0或1表示任意时刻机器人脚末端的触地状态,进行焊接机器人步态因子分类;然后构建地形递增函数,并生成焊接机器人在车间的步态轨迹;最后划分焊接机器人运行中的扫描模式,规划焊接机器人作业路径。通过实验可知,所设计方法可以保证焊接机器人以更稳定状态运行,且路径的适应度较高,稳定性较好,保持匀速的步态轨迹运行,具有显著的效果。

关键词

焊接机器人;步态轨迹路径;路径规划;触地状态;地形递增函数

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2024.02.043

0 引言

焊接机器人作为一种自动化设备,在现代制造业中起着至关重要的作用,它的使用不仅提高了生产效率,还减少了人力投入,并且可以进行长时间连续作业,从而大大降低了生产成本和人员的劳动强度^[1-2]。步态轨迹路径规划是焊接机器人在车间中进行任务执行时的关键问题之一^[3-4]。精确而高效的路径规划可以保证机器人按照既定的轨迹进行工作,提高生产效率,减少资源浪费,因此对焊接机器人在车间的步态轨迹路径规划具有重要意义。

文献[5]提出基于改进人工势场法的电力巡检机器人自动避障轨迹规划,识别环境中的障碍物并规划避障路径,完成电力巡检机器人自动避障轨迹的规划。文献[6]提出基于多目标灰狼优化算法的工业机器人最优轨迹规划,添加相应的运动学约束条件,得到归一化处理后的机器人最优轨迹。

虽然上述研究取得一定进展,但是由于人为的原因,在焊接参数上会出现一些差异,很难达到质量的一致性要求。为此本文开展焊接机器人在车间的步态轨迹路径规划方法的研究。规划方法的核心思想是通过焊接机器人步态因子分类,生成焊接机器人在车间的步态轨迹,实现机器人步态轨迹路径的规划。通过合理的路径规划,可以提高焊接机器的工作效率和质量,进一步推动制造业的发展。

1 焊接机器人步态因子分类

在焊接机器人运行过程中,可以用0或1表示任意时刻机器人脚末端的触地状态,并形成该时刻焊接机器人触地状态的拓扑结构。当取值为1时,说明此时焊接机器人脚末端距离地面有一定高度,即与该脚末端连接的腿处于摆动状态;当取值为0时,说明此时焊接机器人脚末端与地面接触,即与该脚末端连接的腿此时处于支撑状态。在明确焊接机器人脚末端的触地状态拓扑结构后,可以利用焊接机器人在运行过程中前后两个时刻变化的脚末端触底状态列矢量形成表达函数,用以实现对焊接机器人基本步伐的描述^[7]。焊接机器人在运行的过程中区分三个状态,分别为腿状态,用 L 表示;轮状态,用 W 表示;抬空状态,用 S 表示。假设焊接机器人共有6个腿,为了实现焊接机器人的静态行走,在任意时刻需要保证至少有3个腿均为触地支撑状态,因此其他不同功能状态腿数应当满足下述公式条件:

$$D = L + W + S = 6 \quad (1)$$

$$\begin{cases} L + W \geq 4, W \leq 2 \\ L + W \geq 3, W = 3 \end{cases} \quad (2)$$

结合上述公式可以获得焊机机器人腿部功能状态的全部组合形式,每一种组合形式都可以定义为相应的步态因子^[8]。表1中记录了焊接机器人几种典型的步态因子类别。

表1 焊接机器人典型步态因子类型

序号	腿 L	轮 W	抬空 S	步态因子类别
1	0	6	0	六轮式步态
2	5	0	1	五足行走步态
3	5	1	0	5腿1轮步态
4	2	4	0	推滚、拉滚步态
5	4	0	2	踱步、慢跑、奔跑、跳跃步态
6	6	0	0	波动步态或三角步态

1. 甘肃机电职业技术学院 甘肃天水 741000

[基金项目] 校级一般项目: 基于FDM(熔融沉积制造)工艺的3D打印机的机械结构的设计研究(编号GSJD2023A01); 校级一般项目果园防霜机优化设计与实践(GD2023A03)

根据上述论述,实现对焊接机器人步态因子的分类,由多个类型的步态因子构成步态矩阵。在矩阵当中,每一列均可以实现对该运动分段焊接机器人步态各脚末端起始点和最高点位置的描述,而在终点位置上,则可以从矩阵中下一列的起点得到^[9-10]。焊接机器人的行走路径必须参照特定的工作条件和操作要求,因此结合实际焊接机器人型号、规格和焊接任务,可对焊接机器人步态因子分类进行适当调整。通过对焊接机器人的步态因子的分类进行分析,并应用适当的路径规划方法生成步态轨迹,可以确保焊接机器人在不同工作环境下具备高效性、稳定性和适应性。将步态因子的分析转化为实际路径规划的过程,从而使得机器人能够根据任务要求生成焊接机器人在车间的步态轨迹。

2 生成焊接机器人在车间的步态轨迹

焊接机器人在运动时,其内置的地物识别系统会持续地识别出前方地物的种类。根据当前的步态,将产生后续的行走步态,从而得到一个在地形递增矩阵中所对应的元素,进一步得到地形递增函数,公式为:

$$g = D \times [g_1, g_2, \dots, g_k, \dots, g_q]^T \quad (3)$$

式中: g_1 、 g_2 、 g_k 、 g_q 均表示元素,其中 g_k 可表示为第 k 个行的元素; q 表示基本地形总段数。在复杂的地形当中共包含 q 段基本地形,焊接机器人在完成整个运行的过程中,先后需要调用 q 个相应的基本步态^[11]。通过对现有地形递增函数的整合,可以对其进行参数化运算,也可以对其进行航迹规划。

因为步态的参数要根据特定的焊接机器人的性能和工作要求来确定,因此对参数矩阵进行定义,其中包含了整个步态的起点、终点、最高点等特征点,还需要对总体的步行时间进行分析和计算,从而对其进行定义^[12]。考虑到对焊接机器人驱动电机的保护,在设计步态轨迹时应当尽可能平滑,避免不可控的速度和加速度出现,造成对电机的损害^[13]。在一般的焊接作业环境中,由于环境结构相对简单,因此采用直行足式 33 行走模式,充分满足焊接作业路径所需^[14]。同时在焊接机器人实际运行过程中,速度曲线的优化可能会造成最大前进速度的降低^[15]。因此在设计的过程中需要在最大前进速度和最大步伐高度两方面进行取舍,最后生成焊接机器人在车间的步态轨迹,公式为:

$$F_x = F_s \times P_l \times J_r \times g \quad (4)$$

式中: F_s 表示焊接机器人在车间的步态轨迹吸附力, P_l 表示向下的压力分量, J_r 表示摩擦分量。

生成焊接机器人的步态轨迹决定了机器人在工作空间中的移动方式和姿态,在此基础上进一步规划焊接机器人作业路径,使焊接机器人在工作中更加高效地执行焊接任务,提高生产效率和焊接质量。

3 实验研究

3.1 实验准备

为了验证本文提出的规划方法是否能够实现对接焊机机器人在车间的步态轨迹路径精准规划,验证实际应用的可行性,设计如下实例应用验证。此次研究在 ADAMS 环境中进行,对本文规划方法应用后焊接机器人的运动性能进行测试。焊接机器人示意图如图 1 所示。



图 1 焊接机器人示意图

在图 1 所示的焊接机器人上增设一个负载为 150 kg 的焊枪机构,将焊接机器人的行走速度设置为 55 mm/s,由于机器人需要进行转向操作,因此将其转向速度设置为 3 °/s。设焊接机器人行走达到规定终点的方式为原地转向一直线行走一原地转向。根据上述要求利用本文提出的规划方法,完成对接焊机机器人在车间的步态轨迹路径的规划。焊接机器人安装在六足机器人上进行作业,从规定的初始位置出发,设置规划方案的必要性在于提高工作效率、确保生产质量、优化资源利用和提高安全性。通过合理安排移动路径和工作顺序,规划方案可以减少不必要的移动时间,确保每个焊接任务按既定方法进行,最大程度地利用设备和资源,预防安全风险,可使焊接人员和生产线更高效、安全、可靠地实现焊接任务。图 2 为此次实验的场景图。

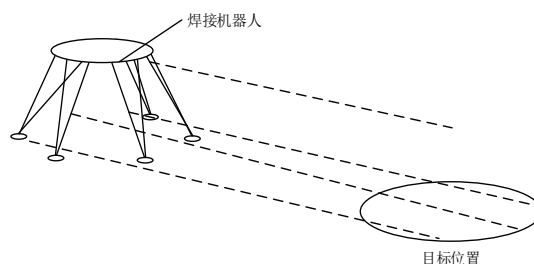


图 2 焊接机器人运动性能实验场景图

在图 2 中,虚线部分表示焊接机器人在运动过程中流线的轨迹和脚末端的运动轨迹。在焊接机器人运动的过程中,通过先进的传感器技术,能够精确测定其主链和各个支链的驱动力大小。研究发现,当主链的变化保持稳定,并且各个支链上的驱动力大小完全相等时,表明焊接机器人是按照规

划方法给出的路径规划方案运行的。这种状态下,机器人不会出现偏载现象,从而保证了其运行的稳定性。如果主链的变化不稳定,或者各个支链上的驱动力大小存在差异,意味着焊接机器人在按照路径规划方案运行时,可能存在偏载现象。进一步的研究表明,驱动力之间的差异越大,偏载现象就越明显,对机器人的稳定运行产生不利影响。因此,必须密切关注驱动力的大小,确保焊接机器人的稳定运行。焊接机器人运动性能实验场景提供了一种评估焊接机器人稳定运行的有效方案。

为进一步验证本文上述提出的规划方法在实际应用中是能够满足焊接机器人进行焊接工作的适应性需要,对本文规划方法给出的规划方案适应度进行计算,以此实现对规划方案应用适应性的量化评价。适应度的计算公式为:

$$\chi = \sum_{i=1}^n O_i \times x \quad (5)$$

式中: O_i 表示非障碍物个数; x 表示路径坐标; n 表示路径点个数。根据上述公式可以计算得出本文规划方法为焊接机器人设计的步态轨迹路径规划方案的适应度。在实验过程中,在焊接机器人的原始路径上设置不同障碍物数量条件,并计算得出每一组的路径适应度。通过计算得出的 χ , 取值在 0~1 范围内, χ 越接近 0, 则说明路径的适应度越低, 进一步说明本文规划方法的应用适应性差; χ 越接近 1, 则说明路径的适应度越高, 也进一步说明本文规划方法的应用适应性强。

3.2 规划方法应用下焊接机器人运动性能分析

根据上述实验准备, 对得到的实验结果进行记录, 将焊接机器人在运行过程中主链的驱动力变化以曲线的方式绘制成曲线, 结果如图 3 所示。

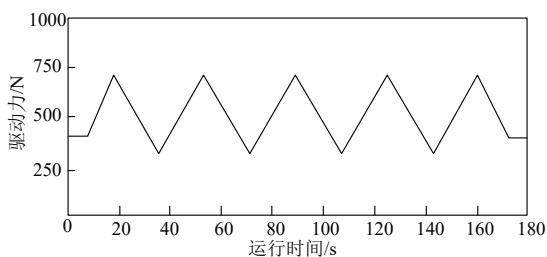


图3 焊接机器人运行中主链驱动力变化曲线图

从图3焊接机器人运行中主链驱动力变化可以看出, 在按照本文规划方法规划的方案运行时, 机器人的驱动力峰值与谷值均始终保持着固定数值不变。因此从主链驱动力变化角度分析, 焊接机器人按照规划方案运行时不会出现偏载现象。在此基础上, 将各个支链在机器人运行时的驱动力进行记录, 得到如表2所示的结果。从表2可知, 在同一时刻焊接机器人各个支链的驱动力均完全相同, 表明在机器人运行时, 每个支链受到的驱动力是统一的, 没有出现偏载的情况, 意味着焊接机器人的设计和控制方法能够有效地平衡各个支

链的负载, 确保共同协作并承担焊接任务。且每 30 s 为一个循环, 驱动力变化具备一定规律, 表明焊接机器人的驱动力控制与运动规划之间存在关联。结合上述理论可以综合证明, 焊接机器人根据本文提出的规划方法制定的规划方案运行时, 不会出现偏载现象, 可以在极大程度上提高焊接机器人运行的稳定性。

表2 焊接机器人运行中支链驱动力变化记录表

支链编号	10 s 驱动力 /N	15 s 驱动力 /N	20 s 驱动力 /N	25 s 驱动力 /N	30 s 驱动力 /N
01	220	500	750	500	220
02	220	500	750	500	220
03	220	500	750	500	220
04	220	500	750	500	220
05	220	500	750	500	220

3.3 路径规划适应度分析

结合上述实验内容, 完成对不同障碍物数量条件下的焊接机器人在车间的步态轨迹路径规划后, 将各组得到的路径适应度进行记录, 并得到如表3所示的实验结果数据。

表3 不同障碍物数量条件下路径规划适应度记录表

序号	障碍物数量 / 个	路径规划适应度
1	3	0.95
2	5	0.96
3	8	0.95
4	10	0.96
5	12	0.97

通过表3可知, 在不同障碍物数量条件下, 路径规划的适应度都在 0.95 以上, 表明规划方法具备十分理想的效果。同时随着障碍物数量的增加, 路径规划的适应度并没有受到影响, 可以为焊接机器人提供适应度更高的步态轨迹路径规划方案。无论面对多少个障碍物, 都能生成适应度较高的步态轨迹路径规划方法, 为焊接机器人的运行提供更加稳定和优化的解决方案, 能够应对复杂的工作环境, 并确保焊接任务的顺利执行。

3.4 路径规划稳定性分析

焊接机器人在车间的步态轨迹路径中横向、径向和斜向之间的变化情况能够反映轨迹规划过程中的效果。横向、径向和斜向之间的位置变化波动平缓, 表明焊接机器人在车间的步态轨迹路径规划过程中的稳定性较好, 处于稳定状态。在焊接机器人的行走速度设置为 55 mm/s、转向速度设置为 3°/s 的情况下, 获取焊接机器人横向、径向和斜向的稳定性结果, 如图4所示。根据图4结果可知, 焊接机器人在横向、径向和斜向上的位置输出特性基本一致、稳定性较好。其原因是所提方法下焊接机器人在按照规划方法给出的路径规划方案运行时, 不会出现偏载现象, 保证焊接机器人处于稳定状态, 一定程度上有利于保证运行的稳定性。

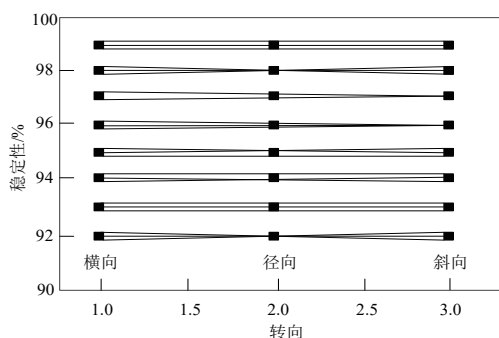


图4 焊接机器人在车间的步态轨迹路径规划稳定性结果

综上所述,焊接机器人的稳定性较优,可以完成焊接机器人在车间的步态轨迹路径规划。

3.5 路径规划跟随速度分析

当焊接机器人在车间环境中无序行走时,给出焊接机器人的速度曲线,结果如图5所示。

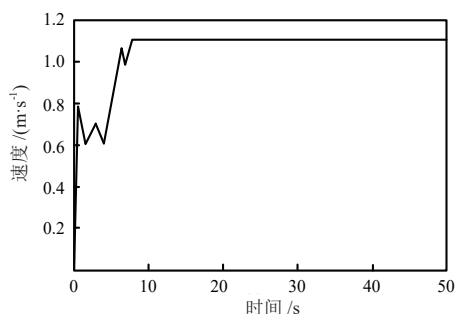


图5 焊接机器人跟随速度结果

分析图5可知,在应用本文所提出的方法对焊接机器人在车间内的步态轨迹路径进行规划时,当时间较短时,机器人的速度会出现较大的波动。随着时间的推移,焊接机器人的速度逐渐稳定,这一现象表明,本文方法在应对车间内的干扰因素时具有显著的效果,能够使焊接机器人保持匀速的步态轨迹运行,从而更加高效和可靠地完成焊接作业。

4 结语

在现代制造业中,焊接机器人已经成为一种不可或缺的自动化设备,它可以高效地完成焊接任务、提高生产效率和质量。步态轨迹路径规划作为焊接机器人在车间中的关键问题之一,对机器人的工作效率和准确性有着直接的影响。本文针对焊接机器人在车间的步态轨迹路径规划问题开展了一系列研究,通过研究设计了一种全新的规划方法,并从规划方法应用下焊接机器人运动性能和路径规划适应度两个方面实现了对该方法应用可行性的验证。通过对焊接机器人的步态轨迹路径进行规划和调整,可以提高焊接效率和稳定性。由于研究时间有限,本文在研究过程中也存在某些方面的不足,该规划方法能够使焊接机器人步态误差在时间趋于无穷时趋于零,如何能够确保其在有限的时间内使误差收敛到零是未来研究需要解决的重点问题。在实际应用中,需要考虑速度和精度的平衡,以保证路径规划的实时性和可靠性。在

可移动的机器人领域,焊接机器人具有广泛的研究与应用背景,利用最新的控制理论与方法,可以取得许多有意义的结果,值得进一步提炼与探索。

参考文献:

- [1] 许超斌,李霖智,杜俊龙,等.基于贝塞尔曲线的四足机器人足端轨迹规划研究[J].机械强度,2023,45(3):708-714.
- [2] 聂振邦,于海斌,曾鹏.动态环境下移动机器人增量式候选路径集生成及轨迹规划方法[J].计算机集成制造系统,2023,29(5):1506-1516.
- [3] 岑斌,徐锋,唐锴,等.基于机器视觉的喷涂机器人轨迹规划与涂装质量检测研究综述[J].控制与决策,2023,38(1):1-21.
- [4] 严宇,康文,肖奕,等.电力绝缘子智能除污机器人机械系统设计与轨迹规划研究[J].武汉纺织大学学报,2023,36(2):51-56.
- [5] 黄绪勇,王欣,唐标,等.基于改进人工势场法的电力巡检机器人自动避障轨迹规划[J].机械与电子,2023,41(4):22-25+30.
- [6] 郑运超,邹利华.基于多目标灰狼优化算法的工业机器人最优轨迹规划[J].科学技术创新,2023(9):208-211.
- [7] 黄崇富,常宇,刘力超.基于改进鲸鱼算法和神经网络的食品机器人能耗轨迹规划[J].食品与机械,2022,38(9):108-113+170.
- [8] 周开河,杨跃平,叶夏明,等.架空线路绝缘喷涂异物检测识别及机器人运动轨迹规划[J].电测与仪表,2023,60(6):32-39.
- [9] 张志军,陈贺,周娜,等.基于激光雷达的Bobac机器人S型障碍物避障轨迹规划研究[J].辽宁科技学院学报,2023,25(1):10-13.
- [10] 李成,周紫菱,汤卿.基于动态运动基元的机器人电子元器件装配轨迹规划方法研究[J].机械,2023,50(1):59-67.
- [11] 岳晓明,臧烁,徐作珂,等.基于6自由度串联机器人的电火花铣削加工轨迹规划及伺服控制策略研究[J].机械工程学报,2023,59(9):20-27.
- [12] 顾海华,胡兴柳,毛军辉.基于ADAMS与MATLAB的6R机器人运动学分析与轨迹规划联合仿真[J].盐城工学院学报(自然科学版),2022,35(4):62-68.
- [13] 周凌宇.基于MATLAB和Adams六轴焊接机器人运动学分析与轨迹规划[J].造纸装备及材料,2022,51(12):13-15.
- [14] 王青,叶明露,贾秀海.基于5次非均匀B样条曲线的4自由度机器人轨迹规划[J].轻工机械,2022,40(6):7-13+21.
- [15] 陈登钱,孔维宾,王德智,等.面向三自由度平面关节机器人的“S”形轨迹规划算法研究[J].软件工程,2022,25(12):44-49.

【作者简介】

王兆琳(1993—),女,甘肃天水人,本科,讲师助理,研究方向:焊接技术。

(收稿日期:2023-10-24)