

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.05.042

四轮工业机器人移动轨迹纠偏控制方法

周东宁^{1,2}

(1. 江苏科技大学, 江苏 镇江 212114; 2. 中车戚墅堰机车有限公司, 江苏 常州 213011)

摘要:针对工业机器人运行轨迹面临多偏差方向的选择问题,设计一种四轮工业机器人的移动轨迹纠偏控制方法。通过建立机器人运动学模型,分析当前轨迹与预期轨迹之间的距离偏差和航向角偏差。利用模拟退火算法,在复杂的轨迹偏差搜索空间中,寻找全局最优解或接近最优解。在优化传统模糊逻辑控制器后,以距离偏差和航向角偏差为输入,控制四轮移动工业机器人驱动轮转动,完成轨迹纠偏控制。测试结果表明:应用该方法后,实际轨迹与预期轨迹之间的距离偏差和航向角偏差均有所减小,改进模糊逻辑控制器控制下的距离偏差和航向角偏差小于另外两种控制器,证明该方法具有有效性。

关键词:工业机器人;误差分析;运行轨迹;纠偏控制方法;模拟退火;模糊控制

中图分类号:TP242.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2025)05-0212-07

Control Method for Movement Trajectory Correction of Four-wheel Industrial Robots

ZHOU Dongning^{1,2}

(1. Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212114, China;

2. CRRC Qishuyan Locomotive Co., Ltd., Changzhou 213011, China)

Abstract:To overcome the difficulty in selecting the multi-deviation direction for the trajectory of industrial robots, a control method for moving trajectory correction of four-wheel industrial robot is designed. The kinematic model of the robot is established to analyze the distance deviation and course Angle deviation between the current trajectory and the expected trajectory. With simulated annealing algorithm, the global optimal solution or near-optimal solution are sought in the complex trajectory deviation search space. Upon the optimization of the traditional fuzzy logic controller, the drive wheel rotation of the four-wheel mobile industrial robot is controlled by taking distance deviation and heading Angle deviation as input, and the trajectory correction control is completed. The results show that the distance deviation and course Angle deviation between the actual trajectory and the expected trajectory are reduced, and the distance deviation and course Angle deviation under the control of the improved fuzzy logic controller are smaller than the other two controllers, which proves the effectiveness of the designed method.

Keywords: industrial robots; error analysis; running trajectory; deviation correction control method; simulated annealing; fuzzy control

0 引言

机器人作为推动工业自动化发展的主要工具,已被工业企业广泛应用^[1]。其中四轮移动工业机器人(four-wheel mobile industrial robot, 4WMIR)作为现代工业自动化和智能制造的重要代表,改变了传统生产线的运作模式,显著提高了生产效率并降低了生产成本。这些机器人可以适应各种复杂的环境,同时具备高精度、高稳定性和高可靠性等特点,有助于大幅降低生产过程中的错误和事故的发生频率,提升产品质量和生产安全性。随着技术的不断进步和应用场景的不断扩

展,四轮移动工业机器人的未来发展前景广阔。然而,由于受到机器人自身误差、外部干扰等多种因素的影响,机器人在移动过程中可能会出现轨迹偏差^[2]。当机器人在复杂环境中运行时,这种轨迹偏差可能会导致机器人与障碍物碰撞或无法准确到达目标位置。因此,研究四轮移动工业机器人轨迹纠偏控制方法具有重要意义。

目前,针对四轮移动工业机器人轨迹纠偏控制方法已经有一些成果,其中部分研究主要集中在通过优化控制算法来提高机器人的轨迹精度。文献[3]结合蚁群算法和RBF神经网络算法来纠正机器人的移动轨迹。然而在实际工作中发现,

作者简介:周东宁(1999—),男,辽宁锦州人,助理工程师,硕士研究生,研究方向为转向架检修组装工艺, ZhoudongN1025@126.com。

在机器人面临多个可行进的方向时,该方法难以对不同方向偏差进行排序分析,这影响了实际的纠偏效果。文献[4]在改进常规强化学习算法的基础上,实现对机器人进行轨迹的控制与纠偏。该方法首先分析了机器人关节和连杆空间位置关系,根据分析结果规划机器人在下一时刻的运动方向与速度,再利用改进后的强化学习算法综合判断最优轨迹。基于此,通过动态化纠偏的方式,调整机器人关节位姿。但该方法会根据实际可进行的方向主动搜索范围,这可能会导致轨迹纠偏效果不明显。文献[5]通过矫正误差的方式实现轨迹纠偏。该方法首先使用蒙特卡罗定位技术获取机器人所处的位置及其姿态特征。然后计算当前位姿与超前点控制阈值之间的偏差,将计算结果输入至PID控制算法中,用于控制机器人的运动状态。然而,当面临多个偏差方向选择时,定位算法可能会受到环境变化、传感器噪声或运动模型不准确等因素的影响,导致姿态计算的不准确性。这可能会影响到后续的误差计算和轨迹纠偏控制的精度。文献[6]提出一种基于动力学模型的纠偏控制策略,将移动机器人在三维空间内的偏斜问题分解为两个垂直平面内的二维偏斜问题,并使用拉格朗日能量法建立了考虑未知环境干扰的掘进机纠偏动力学模型。基于此模型设计了误差符号积分鲁棒控制器以实现轨迹纠偏控制。该方法将三维偏斜问题分解为两个二维偏斜问题可能引入模型近似误差。这种分解可能无法完全考虑到三维空间内各个方向的偏差,从而导致姿态纠偏不够准确或产生额外的误差。

为提高四轮移动工业机器人的运动精度,本文提出一种新的轨迹纠偏控制方法。

1 四轮移动工业机器人轨迹纠偏控制研究

轨迹纠偏控制是机器人智能化的重要组成部分之一。通过轨迹纠偏控制,机器人可以自主感知、决策和执行任务,以适应复杂多变的环境和任务需求,从而提高机器人的智能化水平。针对四轮移动工业机器人轨迹偏差问题,本文提出一种轨迹纠偏控制方法。本方法主要分为轨迹偏差计算、模糊逻辑控制器的设计以及使用模拟退火算法优化控制器参数3个部分。

1.1 四轮移动工业机器人轨迹偏差计算

为了评估实际机器人运动与预定轨迹之间的

差异,可通过计算轨迹偏差确定机器人当前的轨迹位置与预期的轨迹位置之间的距离和方向误差。建立四轮移动工业机器人的运动学方程对于分析轨迹偏差至关重要。运动学模型可以描述机器人各部分之间的几何关系和动态关系,包括机器人的关节、连杆、轮子等组成部分。通过了解运动学模型,可以深入分析机器人的轨迹偏差,并研究可能影响轨迹偏差的各种因素。

在计算四轮移动工业机器人轨迹偏差前,需针对机器人的运动过程展开分析。这里涉及到两种坐标系。其中,全局坐标系是相对于整个机器人应用场景的坐标系。机器人局部坐标系是描述机器人相对于场景中的其他物体或参考点的位置,是用来描述机器人自身结构中的位置和姿态。

在全局坐标系中,令 A 点表示机器人的质心,其坐标可表示为 (x, y) 的形式。根据 A 点在局部坐标系中的速度与航向角,构建如下运动方程:

$$\begin{cases} x = v \cos \vartheta \\ y = v \sin \vartheta \end{cases} \quad (1)$$

式中: ϑ 为机器人在 A 点处的航向角; v 为机器人在 A 点处的速度。

针对参数 v ,通过安装在四轮移动工业机器人中部的编码器记录位移并计算差分得到。编码器是一种用于测量角度、位置或速度的装置,通常与机器人的驱动系统相连,以监测机器人的运动状态。编码器将测量结果发送给控制计算机,计算机通过比较两个相邻时刻机器人的位置信息来计算速度。例如,若机器人在第一个时刻位于 A 点,在第二个时刻位于 B 点,则可以计算出机器人在这两个时刻之间移动的距离,再结合移动时间,即可计算出点 A 在局部坐标系下的速度。

利用倾角传感器可以得到参数 ϑ 的数值。当倾角传感器检测到机器人的姿态发生变化时,它会输出相应的航向角值。这些值可以用于控制机器人的运动,例如调整机器人的方向、速度等^[7]。

根据机器人预期移动轨迹铺设引导轨线,根据引导轨线的位置和方向信息调整机器人的姿态和运动参数,以确保机器人能够准确地跟踪预设路径^[8]。然而,现实中受到多种因素的影响,如传感器误差、运动学误差、控制策略误差等会导致其四轮移动工业机器人实际运动轨迹偏离整个预期轨迹,出现轨迹偏差^[9]。

假设机器人沿预期轨迹运动时,机器人的理想位置与方向可表示为

$$\begin{cases} x' = v' \cos \vartheta' \\ y' = v' \sin \vartheta' \end{cases} \quad (2)$$

式中: (x', y') 为 A 点在全局坐标系中的理想坐标; v' 为 A 点在局部坐标系中的理想速度; ϑ' 为在局部坐标系中 A 点处的理想航向角。由此, 轨迹偏差表示为:

$$\begin{cases} \Delta x = x' - x \\ \Delta y = y' - y \end{cases} \quad (3)$$

$$\Delta \vartheta = \vartheta' - \vartheta \quad (4)$$

式中 $(\Delta x, \Delta y)$ 、 $\Delta \vartheta$ 分别为 A 点在全局坐标系中的位置偏差、航向角偏差。

由于 $(\Delta x, \Delta y)$ 、 $\Delta \vartheta$ 为全局坐标系下的轨迹偏差, 因此还需要将二者转换到机器人局部坐标系中。转换的方式为

$$\begin{bmatrix} \Delta \hat{x} \\ \Delta \hat{y} \\ \Delta \hat{\vartheta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \vartheta & 0 & \sin \vartheta \\ -\sin \vartheta & 0 & \cos \vartheta \\ \sin \vartheta & \cos \vartheta & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta \vartheta \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中 $(\Delta \hat{x}, \Delta \hat{y})$ 、 $\Delta \hat{\vartheta}$ 分别为局部坐标系下的坐标位置、航向角偏差。

根据 $(\Delta \hat{x}, \Delta \hat{y})$, 计算四轮移动工业机器人实际运动轨迹与预期轨迹之间的偏差距离如下:

$$\Delta \hat{d} = \sqrt{\Delta \hat{x}^2 + \Delta \hat{y}^2} \quad (6)$$

式中 $\Delta \hat{d}$ 为距离偏差。

1.2 基于改进模糊逻辑控制的轨迹纠偏

当前工业机器人运行轨迹面临多个偏差方向选择问题时, 无法通过尝试所有可能的选择来找到最佳解决方案。在这种情况下, 单纯的模糊控制策略可能只能使用次优解来完成轨迹的选择和控制, 导致控制的准确度不足。为了应对多随机性偏差方向决策过程, 引入模糊逻辑控制方法。根据模糊逻辑控制理论, 设计模糊逻辑控制器^[10]。模糊逻辑控制器以机器人的实际轨迹与预设轨迹之间的轨迹偏差和偏差变化率为输入, 控制器根据模糊推理规则计算出相应的控制量^[11]。四轮移动工业机器人左右侧电机电压与坐标位置、航向角有着直接的关系, 即

$$\begin{cases} \Delta \hat{d} = \frac{\pi r \Delta t [h(S_L + S_R) \sin \Delta \hat{\vartheta}]}{1800} \\ \Delta \hat{\vartheta} = \frac{\pi r \Delta t [h(S_L - S_R)]}{L} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} S_R = S_c + \Delta S_R \\ S_L = S_c + \Delta S_L \end{cases} \quad (8)$$

式中: r 为四轮移动工业机器人车轮半径; Δt 为时间; h 为电压与电机转速转化常数; L 为四轮移动工业机器人两驱动轮之间的距离; S_L 、 S_R 分别为机器人左、右侧电机输入的电压; S_c 为输入电压值; ΔS_L 、 ΔS_R 分别为左、右驱动轮的电压模拟量。

基于上述分析, 将四轮移动工业机器人左右侧电机电压作为输出的控制量, 应用于机器人的控制系统, 以实现机器人轨迹的纠偏^[12]。

改进模糊逻辑控制器结构如图 1 所示。

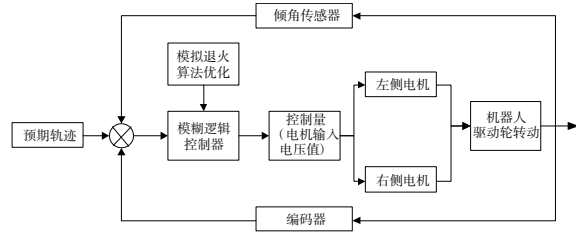


图 1 改进模糊逻辑控制器结构图

在模糊控制过程中, 输入的模糊量化因子是影响模糊化程度的主要因素^[13]。利用模拟退火算法能够通过随机性的搜索和接受劣解的策略, 在复杂的轨迹偏差搜索空间中寻找全局最优解或接近最优解。通过模拟退火算法寻优这些量化因子, 可以优化模糊规则集的覆盖范围和灵活性, 从而改善控制器的性能。这样可以使模糊控制器更准确地捕捉到系统动态特性, 提高其控制精度和响应速度。在使用模拟退火算法优化模糊控制器时, 可以按照以下步骤进行:

- 1) 初始化量化因子和模糊规则;
- 2) 定义优化目标函数, 如控制误差、控制时间等;
- 3) 定义初始温度、降温系数、最小温度等参数, 并开始模拟退火过程;
- 4) 在当前温度下, 计算目标函数的值, 并根据目标函数的值来更新量化因子;
- 5) 如果目标函数的值比之前更好, 则接受更新后的量化因子, 否则以一定的概率接受更新后的量化因子;
- 6) 降温并检查是否达到最小温度, 如果是则结束优化过程, 否则返回步骤 4 继续进行优化^[14]。

改进模糊逻辑控制器的轨迹纠偏控制过程如下。

步骤 1: 输入距离偏差 $\Delta \hat{d}$ 、航向角偏差 $\Delta \hat{\vartheta}$ 、距离偏差变化率 ΔE_d 以及航向角偏差变化率 ΔE_{ϑ} 。

步骤2:确定上述4项参数的论域范围,利用量化因子将这4项参数映射至模糊集论域。

步骤3:确定每个输入模糊量与输出模糊量之间的关系,然后根据关系建立输入-输出“三角形”的隶属度函数,如图2所示。

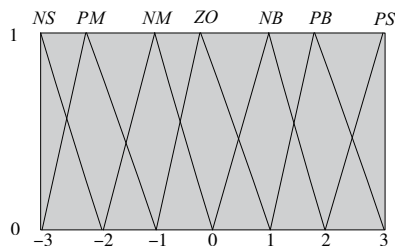


图2 输入-输出“三角形”隶属度函数

步骤4:基于输入-输出确定模糊控制规则表,如表1、表2所示。

表1 距离偏差及偏差变化率的模糊控制规则

Δd	ΔE_d						
	NS	PM	NM	ZO	NB	PB	PS
NS	NS	PM	NM	NB	NB	PB	PS
PM	NS	PM	NM	NB	NS	0	PS
NM	NS	NM	NM	PB	0	PB	NB
ZO	NM	NM	NM	0	NB	NS	PS
NB	PM	NS	0	PB	NB	NB	NB
PB	PM	0	NS	NS	NS	PB	NS
PS	NM	PB	NM	PB	PS	PB	PS

表2 航向角偏差及偏差变化率的模糊控制规则

$\Delta \theta$	ΔE_θ						
	NS	PM	NM	ZO	NB	PB	PS
NS	NS	PM	NB	PM	NB	PB	PS
PM	NS	PM	NM	NB	NS	0	PS
NM	NM	NB	NB	NM	0	PB	NB
ZO	NM	NM	NM	0	NM	PM	PS
NB	PM	NS	0	PB	NB	PS	NB
PB	PB	0	NS	PB	PB	PS	PM
PS	NM	NM	NM	PS	PS	PB	PB

步骤5:根据模糊规则得到模糊集合。

步骤6:对步骤5所得结果进行去模糊化处理,将其转换为数字控制信号,过程如下:

$$S_c = \max(\lambda_{out} \hat{S}_c) \quad (9)$$

式中: λ_{out} 为去模糊化的量化因子; $\hat{S}_c$ 为控制量模糊值,即电机输入电压模糊值; S_c 为精确的控制量,

即电机输入电压值; $\max(\cdot)$ 为最大隶属度函数。

根据电压值控制四轮移动工业机器人驱动轮转动,完成对四轮移动工业机器人轨迹的纠偏控制。

2 应用测试与分析

为了验证上述设计的四轮工业机器人移动轨迹纠偏控制方法的实际应用性能,设计如下实验。

2.1 测试环境设计

实验中以四轮转向(4WD-4WS)移动机器人为对象,该机器人具有较高的运动精度和稳定性,如图3所示。机器人控制结构包括如下4部分:

1)上位机为PC(Intel Core i5-6400, 64位win7系统);

2)运动控制芯片采用VA运动控制器,可以控制4个轴,并使用CAN通信接口,支持标准CANopen协议;

3)伺服驱动器采用EtherCAT总线伺服驱动器,采用单相AC200V电源输入方式;

4)伺服电机采用安川SGM7J-02AFC6S型伺服电机。

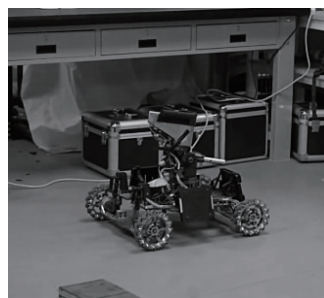


图3 四轮移动工业机器人

图3中四轮移动工业机器人的基本运动参数如表3所示。

表3 四轮移动工业机器人的基本运动参数表

参数	数值
机器人质量/kg	250
车体额定负载/kg	400
驱动轮半径/mm	70
重力加速度/(m/s ²)	10.0
启动加速度/(m/s ²)	1.0
制动加速度/(m/s ²)	0.80
滚动摩擦因数	0.02
最大额定速度/(m/min)	40

2.2 模拟退火算法调试

实验旨在对比应用模拟退火算法前后所得到的偏差解数量。在没有应用模拟退火算法之前,机器人面临多个偏差方向选择问题,难以搜索到最佳解决方案,因此导致偏差解数量较多。通过应用模拟退火算法进行优化,期望能够显著减少偏差解的数量。

实验中,记录并对比应用模拟退火算法前后所获得的偏差解数量,以评估该算法在工业机器人轨迹纠偏控制任务中的优劣势。应用模拟退火算法前后所得到的偏差解数量如图4、图5所示。

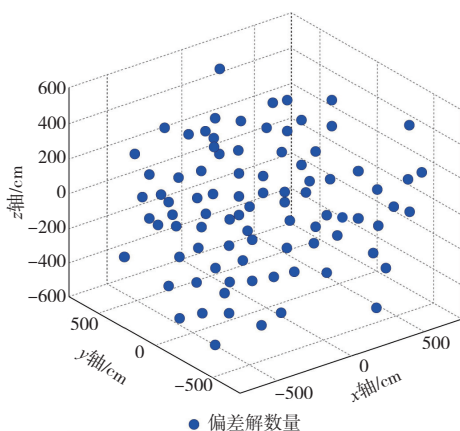


图4 应用模拟退火算法前的偏差解数量

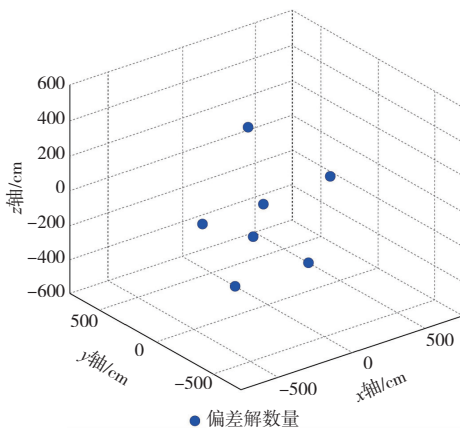


图5 应用模拟退火算法后的偏差解数量

分析图4、图5可以看出,应用模拟退火算法后,在复杂的轨迹偏差搜索空间中偏差解的数量显著减少。模拟退火算法通过其优化过程,能够在搜索空间中更全面地探索可能的解决方案,并通过迭代调整来寻找更优解。这意味着模拟退火算法能够有效地减少无效或非最优的偏差解,从而提高整体解决方案的质量。相比之下,若仅依赖传统的控制方法进行轨迹纠偏,会由于遍历所

有可能的选择以找到最佳解决方案,从而产生更多的无效或低质量的偏差解。

因此,上述实现结果表明:模拟退火算法在机器人轨迹纠偏控制任务中具有良好的适应性和优化能力,能够提供更可靠、准确和稳定的解决方案。

2.3 轨迹纠偏控制

假设让四轮移动工业机器人在 $500\text{ m} \times 500\text{ m}$ 的范围内运动,该空间内存在一定的障碍物,模拟复杂的工作环境,机器人从 $(0, 0)$ 点出发,到 $(500, 500)$ 终点,设置的预期轨迹路线如图6所示。

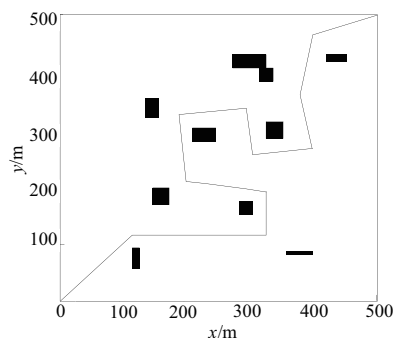


图6 预期轨迹路线

在控制程序中输入初始指令,启动机器人,在所研究的改进模糊逻辑控制器控制下,让四轮移动工业机器人按照图6预期轨迹路线运动,运动过程中改进模糊逻辑控制器计算出来的控制量如图7所示。

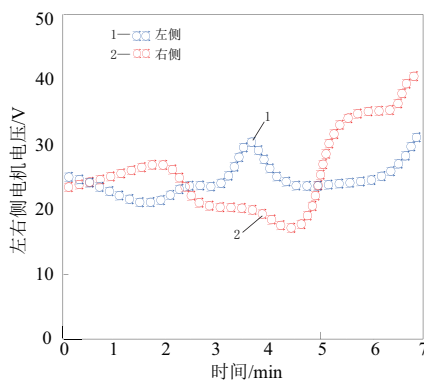


图7 轨迹纠偏控制量

2.4 对比分析

为验证所研究控制方法的控制效果,分别应用改进模糊逻辑控制器、普通模糊逻辑控制器、神经网络控制器,计算不同方法控制前后与预期轨迹之间的距离偏差、航向角偏差,计算结果如图8

和图9所示。

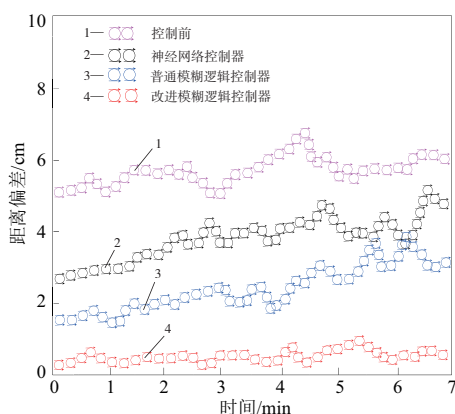


图8 距离偏差

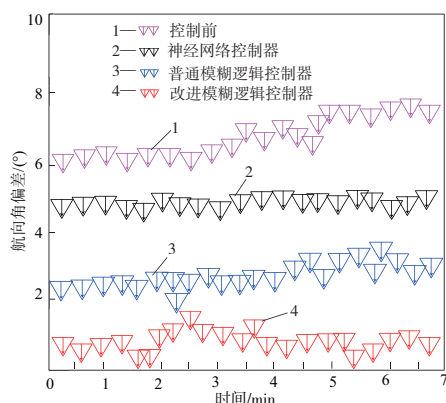


图9 航向角偏差

观察图8和图9可以发现,经过控制后,与预期轨迹之间的距离偏差和航向角偏差都较控制前有所减小,这说明控制器是有效的。进一步对比发现,本文所研究的改进模糊逻辑控制器控制下的距离偏差和航向角偏差都要小于其他两种控制器。这表明通过应用模拟退火算法优化控制器参数后,整体控制效果得到了显著的提升。模拟退火算法的优化过程能够全面搜索控制器参数空间,找到更优的参数组合,从而提高控制器的性能和适应性。通过使用模拟退火算法对控制器参数进行优化,可以使控制器更好地适应复杂的搜索空间和变化的环境条件,精确地调整机器人的运动轨迹并减小距离和航向角偏差。因此,应用模拟退火算法优化控制器参数后,可以提高在距离偏差和航向角偏差方面的控制精度,显著提升整体控制性能。

3 结语

对于许多工业应用来说,精确的轨迹控制是

实现高效、精确任务的关键。四轮移动工业机器人的轨迹纠偏控制方法通过精确调整机器人的运动轨迹,可以大大提高机器人在各种复杂环境中的适应能力,同时更好地满足生产线上的实际需求。本研究设计了一种四轮移动工业机器人轨迹纠偏控制方法。利用模拟退火算法在复杂的轨迹偏差搜索空间中寻找全局最优解或接近最优解,并优化传统模糊逻辑控制器,以控制四轮移动工业机器人驱动轮转动,完成轨迹纠偏控制。实验结果表明:所提方法可以有效地减少与预期轨迹的距离偏差和航向角偏差,控制后的轨迹更接近预期轨迹。与其他两种控制器相比,本文所研究的改进模糊逻辑控制器能够实现更小的距离偏差和航向角偏差。本研究成果不仅为四轮移动工业机器人在实际生产中的应用提供了有益的参考,也为其他类似系统的轨迹纠偏控制提供了新的思路和方法。未来可以进一步探索该控制方法在不同应用场景下的适应性和鲁棒性,为机器人在更多领域的应用提供技术支持。

参考文献:

- [1] 颜双权,胥建成. 工业机器人复杂B样条曲线轨迹控制精度补偿[J]. 机械制造与自动化, 2023, 52(5): 32-35.
- [2] 焦峰,梁文科,张鑫景,等. 基于MPC的煤矿巡检机器人轨迹跟踪技术研究[J]. 煤炭技术, 2022, 41(5): 212-215.
- [3] 吴瑾,姜紫阳,傅学振,等. 考虑气象因素的农业采摘机器人轨迹纠偏控制方法[J]. 机械与电子, 2022, 40(3): 76-80.
- [4] 陈宇翔,栗强强. 强化学习算法在机器人轨迹优化控制与智能纠偏中的应用[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2022(11): 111-114.
- [5] 陈鸿宇,彭彦卿,戴厚德,等. 地坪磨抛机器人轨迹纠偏算法研究与实现[J]. 机械设计与研究, 2022, 38(1): 67-71, 77.
- [6] 许增健,李阁强,董振乐,等. 基于动力学模型的全断面竖井掘进机纠偏控制策略[J]. 机电工程, 2023, 40(4): 562-570.
- [7] 张铁,曹亚超,邹焱飏,等. 具有线性位置解的3-CRU并联机器人轨迹跟踪[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2023, 51(6): 16-22.
- [8] 王书亭,付清晨,蒋立泉,等. 考虑绕障时耗的四轮全向移动机器人轨迹跟踪控制[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2023, 51(6): 1-9.
- [9] 符立华,沈仙兵. 一类轮式移动机器人的滑模轨迹跟踪控制研究[J]. 机械设计, 2023, 40(6): 85-91.
- [10] 赵子瑞,陶庆,杨涛,等. 基于DDPG的下肢康复机器

- 人轨迹跟踪控制[J]. 机床与液压, 2023, 51(11): 13-19.
- [11] 周俊, 赵涛. 基于广义二型模糊神经网络的移动机器人轨迹跟踪控制[J]. 计算机应用与软件, 2023, 40(4): 68-74, 79.
- [12] 周震, 崔国华, 潘颖, 等. 双臂机器人的轨迹跟踪控制方法研究[J]. 机床与液压, 2022, 50(24): 31-36.
- [13] 肖帆, 李公法, 章晓峰, 等. 基于参考轨迹实时修正的机器人轨迹跟踪控制方法[J]. 农业机械学报, 2023, 54(2): 441-449.
- [14] 马磊, 郭鹏远, 杨小强. 一种用于控制工业机器人运动轨迹误差的观测控制策略研究[J]. 机床与液压, 2022, 50(23): 56-60.
-
- 收稿日期: 2023-12-06

(上接第 144 页)

参考文献:

- [1] 陈理燃. 金属增材制造技术在航空零部件应用与发展研究[J]. 冶金与材料, 2024, 16(5): 82-84.
- [2] 许世娇, 权纯逸, 杨堃, 等. 金属增材制造技术在航空领域的应用现状及前景展望[J]. 粉末冶金工业, 2022, 32(3): 9-17.
- [3] 常坤, 梁恩泉, 张韧, 等. 金属材料增材制造及其在民用航空领域的应用研究现状[J]. 材料导报, 2021, 35(3): 3176-3182.
- [4] 雷力明, 侯慧鹏, 何艳丽, 等. 金属增材制造技术在民用航空领域的应用与挑战[J]. 航空制造技术, 2019, 62(21): 22-30.
- [5] 操宇恒, 陈超越, 郭铠, 等. 机器学习在金属增材制造技术中的研究进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2024, 44(11): 1454-1465.
- [6] 刘志远, 丁卯, 王沛, 等. 机器学习在金属增材制造中的应用现状和前景展望[J]. 航空制造技术, 2022, 65(增刊2): 14-28.
- [7] GONNSEN T. Component Application Publication: US 2018/0037339 A1[P]. 2018-02-08.
- [8] KOSSMANN M, ODEH M. Ontology driven requirements engineering system and method: US2013205190A1 [P]. 2013-08-08.
- [9] MEYER M, YU Z, GULATI P, et al. Ontologies for digital twins in smart manufacturing[J]. Whitepaper in Research Gate, 2020(2): 11346.
- [10] 徐享忠, 汤再江, 杨建东, 等. 本体理论与工程应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2019.
- [11] 吴华, 李湑, 张世贵, 等. STEP 中 EXPRESS 语言到 Java 语言的映射方法[J]. 机械工程师, 2022(2): 117-120.
- [12] 高金. 基于 RDB-RDF 模式映射的数据转换方法研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2024.
- [13] 王昊奋, 漆桂林, 陈华钧. 知识图谱方法、实践与应用[J]. 自动化博览, 2020, 37(1): 7.
- [14] 张栋豪, 刘振宇, 郑维强, 等. 知识图谱在智能制造领域的研究现状及其应用前景综述[J]. 机械工程学报, 2021, 57(5): 90-113.
- [15] 程豪, 张峥. 钛合金 3D 打印颠覆性创新研究的知识图谱分析[J]. 技术与创新管理, 2019, 40(3): 313-319.
- [16] 韩涛. 面向航空发动机设计的知识图谱关键构建技术研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2021.
- [17] 聂同攀, 曾继炎, 程玉杰, 等. 面向飞机电源系统故障诊断的知识图谱构建技术及应用[J]. 航空学报, 2022, 43(8): 625499.
- [18] 周航, 张泽, 马泽祺, 等. 基于知识图谱的航空领域问答系统设计[J]. 信息与电脑, 2021(24): 162-164.
- [19] 蓝波, 胡旭洁, 谭佳豪, 等. 基于本体的电子装配工艺知识建模与管理[J]. 机械制造与自动化, 2023, 52(1): 127-130.
- [20] 熊华平, 郭绍庆, 刘伟, 等. 航空金属材料增材制造技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2019.
-
- 收稿日期: 2024-09-03