

工业集装箱生产线码垛机器人运动单元轨迹控制

武交峰

(广东环境保护工程职业学院, 广东 佛山 528216)

摘要:传统的控制方法没有充分考虑工业集装箱生产线码垛机器人运动过程中, 连杆间的复杂关系和运动误差积累等因素, 导致机器人的轨迹控制中出现冲突, 只能以延迟平衡点等待时间的模式完成轨迹控制, 缺少对平衡点的灵活调整过程。因此, 提出一种工业集装箱生产线机器人轨迹控制方法。采用密码散列函数建立机器人运动的数学模型, 计算四个连杆的坐标乘积并设定矩阵, 求得各个连杆在标准状态下加速度和位姿, 查找当下位姿与目标位姿间的最低误差并转换为条件函数。计算机器人在不同工况下到达目标点的位姿和关节角速度变化, 设定一个超限范围并求解在范围内的机器人与平衡点间差值, 按照制约关系实现适当调整。采用粒子群优化算法在轨迹范围内查找目标点, 将位置与加速度等值实现模态拟合, 得到一个最终的控制阈值, 按照阈值实现合理控制。实验证明该方法控制精准度高, 轨迹角度和距离的控制效果好。

关键词:码垛机器人; 运动单元轨迹控制; 密码散列函数; 粒子群优化; 模态拟合

中图分类号:TP242

文章编号:1000-0682(2024)05-0071-05

文献标识码:A

DOI: 10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2024.05.014

Research on motion unit trajectory control of stacking robot in industrial container production line

WU Jiaofeng

(Guangdong Polytechnic of Environmental Protection Engineering, Guangdong Foshan 528216, China)

Abstract: Traditional control methods have not fully considered the complex relationship between linkages and the accumulation of motion errors during the movement of palletizing robots on industrial container production lines, resulting in conflicts in the trajectory control of the robots. The trajectory control can only be completed in a delayed equilibrium point waiting time mode, lacking a flexible adjustment process for the equilibrium point. There is a lack of flexible adjustment process for the equilibrium point, and the disadvantages are obvious. Therefore, a trajectory control method for industrial container production line robots is proposed. Using a cryptographic hash function to establish a mathematical model of robot motion, calculating the coordinate product of four linkages and setting a matrix, obtaining the acceleration and pose of each link in the standard state, searching for the minimum error between the current pose and the target pose, and converting it into a conditional function. Calculate the pose and joint angular velocity changes of the robot reaching the target point under different working conditions, set an exceeding range, and solve the difference between the robot and the balance point within the range. Adjust appropriately according to the constraint relationship. Using particle swarm optimization algorithm to search for target points within the trajectory range, achieving modal fitting by equating position and acceleration, obtaining a final control threshold, and implementing reasonable control according to the threshold. The experiment proves that this method has high control accuracy and good control effects on trajectory angles and distances.

收稿日期: 2024-03-22

基金项目: 2022 年广东省继续教育质量提升工程优质继续教育网络课程可编程控制器原理及应用(JXJYGC2022GX082)

第一作者: 武交峰(1978—), 女, 山西交城人, 硕士, 副教授, 研究方向为智能控制、数字孪生、工业机器人应用。E-mail: wj201a1@163.com

Keywords: palletizing robot; motion unit trajectory control; password hash function; particle swarm optimization; modal fitting

0 引言

码垛机器人作为工业生产、物流装箱和货物运输的重要设备,具有高灵活性和结构自由度,可实现复杂角度、位置的高精度运动,较普通工业机器人更稳定、灵活和敏感。然而,传统的控制方法无法充分考虑机器人运动过程中连杆间的复杂关系和运动误差积累等因素,导致码垛机器人在工业集装箱生产线的轨迹控制中出现精度不佳的问题。这意味着在复杂的操作环境中,传统方法难以满足高要求的轨迹精度,容易导致动作错位、碰撞风险以及时间效率和生产线平衡的影响。为更进一步提升机器人的运动能力,对其运动单元轨迹进行合理控制,在高精度运输的基础上实现稳定和高效作业。

近年,很多研究学者都提出了机器人控制的相关研究方案如:刘宜成^[1]等人建立一种以时间为控制单位的轨迹跟踪控制器。采用线性分析方法提取机器人运动的坐标信息变动规律,根据非奇异性设定运动时间,在短时间内对机器人完成控制收敛。这种控制方法应用的局限性较大,在实际应用环境中可能受路径长短、障碍物等多种因素影响,会导致控制算法存在误差;严浙平^[2]等人为了提高机器人的环境适应能力,建立运动数学模型,将机器人运动时的角速度与加速度参数相结合,通过转换函数分析二者之间的平衡制约点,按照平衡点的数据合理控制。由于机器人运动存在初始误差,在控制过程中需要不断调试弥补误差值,该方法没有考虑到该点导致控制结果受影响;Ding^[3]等人以机器人运动的多目标灵活转动为控制条件,计算运行环境的最佳条件函数,在条件函数约束下纠正机器人的局部误差姿态,通过不断的角度调试完成自适应控制。这种逐步控制的方式所需运算量较大,针对工业和运输业的工作环境局限性过大,实用价值不高;Wang^[4]等人建立偏微分方程函数,设置模态算法对机器人的运动轨迹进行空间离散,针对机器人运动的不确定性、饱和性以及刚柔耦合性实行反馈控制,通过调节机器人的未知边界的耦合参数完成控制。由于机器人运动的未知环境存在不确定性,采用耦合算法进行控制难度较大。

综上所述,提出一种工业集装箱生产线码垛机器人运动单元轨迹控制研究方法。考虑到机器人的

运行工况可能存在噪声、牵引力以及障碍物等因素影响,若直接对其进行单元轨迹控制可能导致控制结果存在误判性,影响因子过多会出现误差。为此先建立机器人运动数学模型,分析在重力、驱动力或其他势能作用力的牵引下,机器人关节在各个方向上的线性驱动值,并判断平衡点的变化。按照平衡点的随方向或位移距离的变化规律,不断调整机器人的关节的抓取角度和加速度,直至符合预设条件由此实现单元轨迹的合理控制。

1 位姿与目标位姿之间的差值下生产线码垛机器人加速度计算

码垛机器人的运动原理和核心是机械臂的关节转角,通过精准控制这些关节转角,机器人能够实现位置和姿态的精确转换。然而,在实际应用中,由于机械臂结构的复杂性和工作环境的多变性,机器人运动过程中的误差难以避免。为了解决这一问题,在进行单元轨迹控制前,采用正反解模拟算法分析机械臂关节角转动问题。建立码垛机器人的运动学模型^[5],得到坐标转换矩阵为:

$${}^0_4T = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: n_x, n_y, n_z 分别表示机器人在垂轴上的法向量^[6]; o_x, o_y, o_z 分别表示三方向轴上的姿态; a_x, a_y, a_z 分别表示三方向轴上的连杆偏距; p_x, p_y, p_z 分别表示三方向轴上的连杆转角。

根据上述参数可得到机器人各个关节之间的变换矩阵,对机器人的四个连杆坐标计算乘积:

$${}^0_5T = {}^0_1T {}^1_2T {}^2_3T {}^3_4T {}^4_5T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $r_{(.)}$ 为矩阵向量参数,包含了各连杆的位置和姿态信息。

研究码垛机器人的驱动结构,后两轮为两个独立驱动的驱动轮,前两轮则为导向轮^[7],基于这种结构,建立了机器人的运动学模型,用于描述机器人在不同驱动条件下的运动状态。该模型考虑了机器

人的加速度和位姿权重,数学表达式为:

$$P(t) = f(a(t), w) {}_5^0 T \quad (3)$$

式中: $P(t)$ 表示机器人在时间 t 的位姿, $a(t)$ 表示机器人在时间 t 的加速度; w 表示机器人位姿权重; f 为运动学模型函数。

为了计算当前位姿与目标位姿之间的差值,引入了位姿误差的概念。位姿误差通过比较当前位姿和目标位姿来计算得出,设机器人当下的位姿为 $P_c = (x_c, y_c, \theta_c)$, 目标位姿为 $P_r = (x_r, y_r, \theta_r)$, 计算当下位姿与目标位姿之间的差值为:

$$e = |P_c - P_r| \quad (4)$$

式中: e 表示位姿误差; $|\cdot|$ 表示范数运算,用于衡量两个位姿之间的差异。

为了寻找使位姿误差最小的合理加速度值,构建了条件函数。这个函数综合考虑了机器人在不同连杆上的加速度和位姿权重,通过优化算法求解出满足条件的最优加速度值。条件函数的数学表达式为:

$$\begin{cases} \text{minimize} & e(a(t), w) \\ \text{subject to} & \text{constraints on } a(t) \text{ and } w \end{cases} \quad (5)$$

式中: $e(a(t), w)$ 表示位姿误差作为加速度和位姿权重的函数, constraints 表示对加速度和位姿权重的约束条件。

2 运动单元轨迹可控性约束条件设计

在生产线码垛机器人的应用中,轨迹控制的精准性和稳定性对于保证生产效率和产品质量至关重要。为了实现这一目标,不仅需要深入分析机器人的运动误差,还需要对机器人的运动单元轨迹进行可控性约束。这一约束的设立,旨在利用前述过程中求得的驱动特性和运动学理论,确保机器人在各种工作条件下都能按照预设的轨迹进行精准而稳定的运动。

在控制过程中利用前述过程求得的驱动特性和运动学理论,对系统的线性可控和非线性可控进行合理分析。当机器人的重力、驱动力^[8]或其他势能之间的平衡关系被打破时,系统处于线性可控状态,可控性和全局性存在等价关系。为保证机器人运动单元轨迹的合理和精准控制,利用这种线性关系定义可控性分析函数为:

$$K_L(t) = f(x)e(a(t), w) + \sum_{i=1}^m g_i(x)u_i$$

$$|\vec{x}_i(t) - \vec{x}_0(t)| \cdot |\vec{v}_i(t) - \vec{v}_0(t)| \quad (6)$$

式中: $\vec{x}_i(t)$ 和 $\vec{v}_i(t)$ 分别为第 i 个关节在时刻 t 的位姿和关节角速度; f 为漂移矢量; m 为关节总数;

u_i 为驱动参数; g_i 为初始输入的矢量场^[9-10] 数值, $\vec{x}_0(t)$ 和 $\vec{v}_0(t)$ 分别为平衡点的位姿和关节角速度。

机器人的轨迹可控问题实际就是在一定区域内,控制轨迹从某一点经过规定时间到达目标点的过程。对于非线性可控性,设定每个关节都允许存在在一个固定输入值 Δu_i , 并且满足条件 $\sum_{i=1}^m \Delta u_i = 0$, 非线性可控参数定义为:

$$K_{NL}(t) = \left| \sum_{i=1}^N (\vec{x}_i(t) - \vec{x}_{eq}(t)) \cdot \Delta u_i \right| \quad (7)$$

式中: $\vec{x}_{eq}(t)$ 为平衡点的位姿^[11]。

为确保机器人运动的最佳可控状态,计算机器人在不同工况下到达目标点的位姿和关节角速度变化,并设定一个超限范围。求解在该范围内的机器人与平衡点间的差值,按照制约关系实现适当调整。制约关系定义为:

$$C(t) = V(t)(\alpha \cdot K_L(t) + \beta \cdot K_{NL}(t)) \quad (8)$$

其中, α 和 β 为权重系数,用于平衡线性可控性和非线性可控性的重要性。

当存在 $C(t) \leq \varepsilon$ 的情况(ε 为预设阈值)时,系统的可控时间被认为是最短的。此时,机器人的运动轨迹与预设轨迹的偏差最小,且稳定性最高。矢量场的集合序列^[12] 为:

$$V(t) = \vec{v}_1(t), \vec{v}_2(t), \dots, \vec{v}_m(t) \quad (9)$$

这些矢量场需满足平衡制约条件,即:

$$V(t) \in \Omega \quad \text{s.t.} \quad |\vec{v}_i(t) - \vec{v}_{eq}(t)| \leq \delta, \forall i \quad (10)$$

其中: Ω 为允许的矢量场集合; δ 为允许的偏差范围。

通过上述过程分析,得到了码垛机器人单元运动轨迹的可控条件。在进行单元轨迹控制时,可根据这些可控条件进行阈值调整,以提高控制的精准度。这确保了机器人在各种工作条件下都能实现精准而稳定的运动,从而保证了生产效率和产品质量。

3 码垛机器人运动单元轨迹控制

通过对工业集装箱生产线码垛机器人运动特性的深入分析和数学建模,以及计算连杆的出力权重和查找最低误差转换为条件函数,为精准控制机器人的运动轨迹提供了基础。然而,要实现精准控制,还需要有效管理运动单元轨迹。因此,采用粒子群优化算法来控制机器人的运动单元轨迹,通过不断优化粒子的速度和位置,逐步逼近最优解,实现精准、高效的轨迹控制,提高生产效率和产品质量。粒子群优化算法追随最优粒子在空间中的运动^[13],同

时追寻自身的最佳解和历史先验条件的最优解。通过调整粒子的速度和位置,实现迭代运动,从而完成对单元轨迹的控制。这种算法将进一步提升机器人运动轨迹控制的精度和效果。

设在一个 ξ 维搜索空间中,位置和加速度空间数据集分别为: $\mathbf{x}_i = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{i1n}\}^T$ 、 $\mathbf{v}_i = \{v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{i1n}\}^T$; 个体最优位置数据集为 $\mathbf{p}_i = \{p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{i1n}\}^T$ 。得到加速度和位置的粒子群模态拟合公式为:

$$\mathbf{v}_{id}^{t+1} = \mathbf{v}_{id}^t + c_1 r_1 (\mathbf{p}_{id}^t - \mathbf{x}_{id}^t) + c_2 r_2 (\mathbf{p}_{gd}^t - \mathbf{x}_{id}^t) \quad (11)$$

$$\mathbf{x}_{id}^{t+1} = \mathbf{x}_{id}^t + \mathbf{v}_{id}^{t+1} \quad (12)$$

式中: c_1, c_2 为机器人位置的粒子群阈值^[14]; r_1, r_2 为机器人加速度的粒子群阈值; \mathbf{p}_{id}^t 为空间最优的位置点; \mathbf{v}_{id}^t 为空间最优的加速度点; \mathbf{p}_{gd}^t 为空间最劣的位置点; \mathbf{x}_{id}^t 为空间位置的标准值。

对于码垛机器人来说,根据机器人的使用场景和需求,运动轨迹也会随之发生更改。设定一个运动特定点 (x_0, x_z) , 根据约束条件,抓取负载物体得到轨迹约束的数学表达式为:

$$\begin{cases} x = l_3 \sin \theta_1 + l_4 \cos \theta_2 = V(t) x_0 \\ z = l_1 \cos \theta_1 - (l_4 - l_2) \sin \theta_2 = V(t) z_0 + V(t) \frac{1}{2} a t^2 \end{cases} \quad (13)$$

式中: l_1, l_2, l_3, l_4 为机器人运动距离; z_0 为轨迹约束的加速阈值。设定了运动特定点的轨迹约束表达式,以限制机器人的运动距离:

$$D = C(t) (x_0 + \mathbf{x}_{id}^{t+1}) z_0 \mathbf{v}_{id}^{t+1} t^2 \quad (14)$$

式中: D 为机器人运动距离; t 为给定的约束时间。

为了实现精准控制,将位置与加速度等值进行模态拟合。通过比较实际位置和期望位置,以及实际加速度和期望加速度,不断调整粒子的速度和位置,得到一个最终的控制阈值,具体的拟合公式可以表示为:

$$K = D\beta \cdot \left(\frac{\sum_{i=1}^n |\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_{i,\text{target}}|}{n} + \gamma \cdot \frac{\sum_{i=1}^n |\mathbf{a}_i - \mathbf{a}_{i,\text{target}}|}{n} \right) \quad (15)$$

式中: K 为控制阈值; β 为位置误差的权重系数; γ 为加速度误差的权重系数; $\mathbf{x}_{i,\text{target}}$ 为机器人在同一位置的期望位置; $\mathbf{a}_{i,\text{target}}$ 为机器人在同一位置的期望加速度^[15]。

通过以上计算公式和约束条件,结合粒子群优化

算法的迭代运算,工业集装箱生产线码垛机器人的运动轨迹得以精准控制。这种方法能够提高生产效率和产品质量,实现对机器人运动轨迹的高效控制。

4 性能测试

4.1 测试环境

为验证提出工业集装箱生产线码垛机器人运动单元轨迹控制结果应用的有效性。测试机器人在某一场景下以相同位姿重复运动至目标点的动力偏差情况。为提高实验数据直观性便于分析观察,不考虑工况下载荷、温度、湿度等因素影响。在固定测量平台中放置多个传感器捕捉机器人的轨迹位姿信息,其中包含: X, Y, Z 轴体方向上角速度、角速度以及位姿距离等参数。实验平台选用的是微米位移的光栅传感器,其测量精度可根据机器人的实际抓取情况进行调整,在多种环境下都能实现信号采集与处理。码垛机器人工作单元包括机器人本体、物体托架以及放置平台,实验所用物块大小为 $250 \text{ mm} \times 250 \text{ mm} \times 250 \text{ mm}$, 额定转速为 90 r/s , 最大转速为 120 r/s 。模型如图 1 所示。



图1 生产线码垛机器人模型示意图

4.2 机器人运动单元轨迹控制结果

给出机器人末端执行器空间位移偏移量控制前和控制后的散点三维图像,如图 2、3 所示。

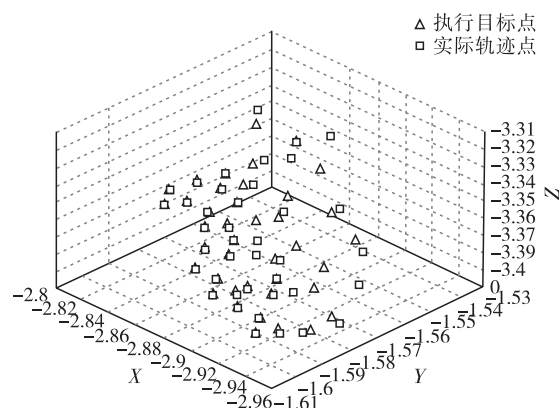


图2 控制前机器人末端执行器空间偏移量散点图

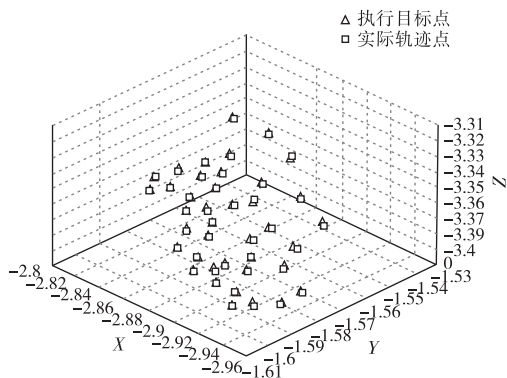


图3 控制后机器人末端执行器空间偏移量散点图

从图2、3中可以看出,控制前末端执行器空间偏移散点图呈现偏离目标点的情况,运动点与目标点之间存在较大差距。说明,在正常的行进环境中可能存在障碍物或其他影响,导致机器人运动轨迹出现偏差;而在对机器人轨迹进行合理控制后,其空间散点与目标点之间的偏移量得到了明显改善,目标点与运行点之间基本完全重合。对码垛机器人单元轨迹控制效果较好,实用价值较高。

为进一步验证所提方法对机器人轨迹控制性能的优异性,以机器人各关节的角度为目标进行对比分析,这两个关节是机器人运动中的关键部分,其角度变化的准确性直接影响到机器人的整体运动轨迹和性能。通过对比目标角度和实际角度,可以评估所提方法的控制精度和稳定性,得到的实验结果如图4、5所示。

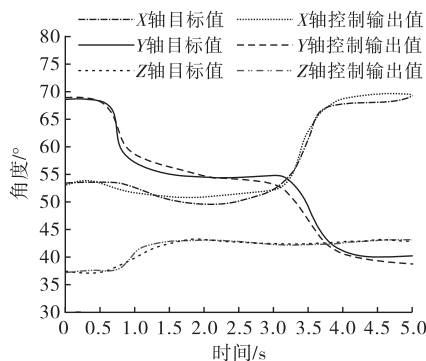


图4 机器人关节1各方向角度随时间变化曲线图

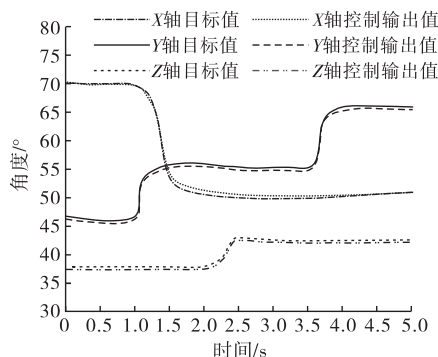


图5 机器人关节2各方向角度随时间变化曲线图

从图4、5中可以看出,经过控制后关节1和关节2在各个方向上的角度变化都与目标值相吻合,在各个时间点的角度控制结果都表现较为优异,曲线之间的吻合度较高。说明所提方法的控制质量较高,针对机器人关节的角度轨迹变化可以实现精准提取,根据现场环境情况对偏移角度进行合理补偿或更改,实现高效精准控制。所提方法的优异性能主要归功于其强大的优化能力和对机器人运动特性的深入理解。通过粒子群优化算法的不断迭代和优化,能够逐步逼近最优解,实现对机器人运动轨迹的精准控制。

5 结论

该文研究了工业集装箱生产线码垛机器人运动轨迹的影响成因和运动模型,通过模型分析机器人的正解和反解求得在各个方向上的运动规律。基于机器人运动的角度和位姿误差最小值,采用映射函数转换为约束条件,为后续机器人单元轨迹控制提供重要帮助。线性函数分析方法对机器人行进环境中存在的问题进行可控性分析,得到不同因素的影响结果和既定阈值,通过阈值确定目标点与平衡点之间的差距。该差距值即为轨迹控制的自适应值,建立几何空间通过多方向的角速、速度以及位姿调整,实现码垛机器人运动的单元轨迹控制。应用后的实际轨迹与目标轨迹之间差距较小,实用效果表现优异,具有一定的应用价值,可提高码垛机器人的工作效率,降低人工成本。

参考文献:

- [1] 刘宜成,杨海鑫,严文. 工业机器人关节轨迹预定义时间滑模跟踪控制[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2023(09):68-71.
- [2] 严浙平,杨皓宇,张伟,等. 基于模型预测—中枢模式发生器的六足机器人轨迹跟踪控制[J]. 机器人, 2023,45(01):58-69.
- [3] DING T, ZHANG Y, MA G, et al. Trajectory tracking of redundantly actuated mobile robot by MPC velocity control under steering strategy constraint[J]. Mechatronics: The Science of Intelligent Machines, 2022,84:102779.
- [4] WANG N, XIANG X, JIANG Y, et al. Modelling and vibration control for deep-sea robot lifting system with time variable length and nonlinear disturbance observer[J]. Ocean engineering, 2022,246(Feb. 15):110558. 1-110558. 11.
- [5] 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.

(下转第101页)

参考文献:

- [1] 程锦锋, 方贵盛, 高惠芳. 表面缺陷检测的机器视觉技术研究进展[J]. 计算机应用研究, 2023, 40(4): 967-977.
- [2] 杨传礼, 张修庆. 基于机器视觉和深度学习的材料缺陷检测应用综述[J]. 材料导报, 2022, 36(16): 226-234.
- [3] LI FE-FEI, FERGUS, PERONA. A Bayesian approach to unsupervised one-shot learning of object categories[C]. Proceedings Ninth IEEE International Conference on Computer Vision. Nice, France: IEEE, 2003: 1134-1141.
- [4] 史燕燕, 史殿习, 乔子腾, 等. 小样本目标检测研究综述[J]. 计算机学报, 2023, 46(8): 1753-1780.
- [5] YAN X, CHEN Z, XU A, et al. Meta R-CNN: towards general solver for instance-level low-shot learning[C]. 2019 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV). Seoul, Korea (South): IEEE, 2019: 9576-9585.
- [6] JING J, MA H, ZHANG H. Automatic fabric defect detection using a deep convolutional neural network[J]. Coloration Technology, 2019, 135(3): 213-223.
- [7] VALENTE A C, WADA C, NEVES D, et al. Print defect mapping with semantic segmentation[C]. 2020 IEEE (WACV). Snowmass Village, CO, USA: IEEE, 2020: 3540-3548.
- [8] YANG Y, WEI F, SHI M, et al. Restoring negative information in few-shot object detection[J]. 2020.
- [9] WANG Y X, GIRSHICK R, HEBERT M, et al. Low-shot learning from imaginary data[C]. 2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Salt Lake City, UT: IEEE, 2018: 7278-7286.
- [10] VINYS O, BLUNDELL C, LILLICRAP T. Matching networks for one shot learning[C]. 30th Annual Conference on Neural Information Processing Systems, NIPS 2016: 3637-3645.
- [11] SANTORO A, BARTUNOV S, BOTVINICK M, et al. Meta-learning with memory-augmented neural networks[C]. Proceedings of the 33rd International Conference on Machine Learning. PMLR, 2016: 1842-1850.
- [12] WOO S, PARK J, LEE J Y, et al. CBAM: Convolutional block attention module[M]. FERRARI V, HEBERT M, SMINCHISCESCU C, et al. Computer Vision - ECCV 2018: Cham: Springer International Publishing, 2018: 3-19.

(上接第75页)

- [6] 杨晓玉,富荣昌,王文远.基于 ADAMS 和 MATLAB 的双足机器人运动轨迹规划和控制的联合仿真[J]. 煤矿机械,2022,43(01):6-9.
- [7] 文旭,仲梁维.基于 FD on Desk 那智机器人在线控制及运动轨迹仿真[J]. 农业装备与车辆工程,2022,60(04):52-55.
- [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(06):1-9.
- [9] 张卉,朱永飞,刘雪飞,等.基于模糊迭代 Q-学习的冶金工业机器人轨迹跟踪控制研究[J]. 工程设计学报,2022,29(05):564-571.
- [10] 王英勋,李欣,蔡志浩,等.多约束条件下四旋翼机动轨迹跟踪一体化控制方法[J]. 北京航空航天大学学报,2024,50(01):48-60.
- [11] 谢立敏,于潇雁.输入受限的漂浮基多柔性空间机器人轨迹跟踪的混合控制及振动主动抑制[J]. 空间科学学报,2023,43(02):369-380.
- [12] 检测识别及机器人运动轨迹规划[J]. 电测与仪表,2023,60(06):32-39.
- [13] 朱雨琪,向国菲,马丛俊,等.基于建模优化的连续体机器人轨迹跟踪及扰动抑制策略研究[J]. 空间控制技术与应用,2022,48(02):29-38.
- [14] 窦钰涵,张金柱,王涛,等.可分体轮腿四足机器人的运动模态分析与轨迹切换[J]. 太原理工大学学报,2023,54(04):748-754.
- [15] 苗欣,李言民,江守亮,等.基于粒子群算法的磁悬浮列车控制参数优化[J]. 计算机仿真,2021,38(11):117-122.
- [16] 王雪闯,王会明,赵振华.基于改进型积分终端滑模控制方法的移动机器人轨迹跟踪设计与实验[J]. 控制与决策,2023,38(10):2881-2887.
- [17] 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(06):16-22.