

文章编号:1671-251X(2022)S2-0130-05

考虑能耗的煤矿井下水仓清挖机器人轨迹规划方法

彭海兵, 赵亚东

(国家能源集团神东煤炭集团有限责任公司 补连塔煤矿, 内蒙古 鄂尔多斯 017200)

摘要:井下环境的复杂性容易造成水仓清挖机器人行驶路径出现偏差,导致其能耗过高。为提升清挖机器人清挖效率,优化其轨迹规划性能,提出了考虑能耗的煤矿井下水仓清挖机器人轨迹规划方法。该方法基于B样条插值函数获取机器人动力学方程,完成机器人动力学分析;利用贝塞尔曲线方法对机器人光滑轨迹实施拟合,规划出机器人运动轨迹;在考虑清挖机器人能耗的情况下,采用粒子群算法对规划轨迹进行优化,确定最优规划轨迹,达到降低机器人能量消耗的目的,完成最终轨迹规划。实验结果表明,所提方法在有效避开障碍区域的同时实现了最优轨迹规划,且规划路径长度较短,规划时间短,可以更快地实现清挖工作。

关键词:煤矿井下水仓;清挖机器人;轨迹规划;动力学方程;贝塞尔曲线

中图分类号:TD67 文献标志码:A

Trajectory planning method of underground mine sump cleaning robot considering energy consumption

PENG Haibing, ZHAO Yadong

(Bulianta Coal Mine, CHN Energy Shendong Coal Group Co., Ltd., Ordos 017200, China)

0 引言

煤矿井下有很多井下水仓和煤泥水沉淀池^[1-2],用于保障煤矿的安全生产、水灾预防等。由于煤矿井下水仓的工作环境恶劣,水仓中的淤泥、淤积物较多,同时这些垃圾的含水量较大,对其清理时淤泥往往成为流态或半流态的状态。如果利用普通的清仓方式,会出现工作量大、工作效率低、清仓时间长、清理不干净的问题,所以选取煤矿井下水仓清挖机器人处理井下水仓出现的多种问题,在减轻工人劳动强度的同时还能快速清理水仓。但清挖机器人在运行过程中会出现耗能高、路径轨迹偏离的问题,所以针对这一问题,许多研究者对煤矿井下水仓清挖机器人轨迹规划开展了大量研究。吴铮等^[3]提出了基于方向选择的移动机器人路径规划方法,该方法首先对机器人环境周围的障碍物开展优先判断,并从中选取有利方向用作主要探索方向,将其与实际方向对比,当2个方向的夹角保持相同时,优先考虑可以扩展的方向,结合改进快速行进树方法(Fast Marching Tree, FMT*)递归扩展过程达到降低机器人复杂度的目的,以此实现机器人路径规划,但该方法

的判断结果不完善,存在规划效果差的问题。易欣等^[4]提出了利用自适应选择算子结合遗传算法的机器人路径规划方法,该方法优先建立种群,并利用遗传算法在种群中不断迭代,以此创建出新的路径,再将自适应算子对其余算子进行反复替代,经过不断搜索后实现机器人的路径规划,但该方法的替代效果不佳,存在规划性能低的问题。郭伟等^[5]提出了基于改进人工鱼群(IAFSA)算法和MAKLINK图的机器人路径规划方法,该方法将惯性权重因子引入获取的自适应算子内,集合均方差(Mean Square, MS)算法与IAFSA算法,实现对机器人路径的分布寻优,并对该路径优化用作全局最优路径,实现机器人的路径整体规划,但该方法取得的权重因子有误差,存在规划效率低的问题。

为解决上述方法中存在的问题,本文提出了考虑能耗的煤矿井下水仓清挖机器人轨迹规划方法。该方法基于B样条插值函数获取机器人动力学方程,完成机器人动力学分析;利用贝塞尔曲线方法对机器人光滑轨迹实施拟合,规划出机器人运动轨迹;在考虑清挖机器人能耗的情况下,采用粒子群算法对规划轨迹进行优化,确定最优规划轨迹,达到降低

收稿日期:2022-08-25;责任编辑:张强。

作者简介:彭海兵(1975—),男,河北卢龙人,高级工程师,现主要从事煤矿安全生产管理方面的相关工作,E-mail:zyd5102@163.com。

机器人能量消耗的目的,完成最终轨迹规划。

1 清挖机器人动力学分析及能耗计算

1.1 清挖机器人动力学分析

以煤矿井下水仓清挖机器人作为研究对象,首先确定清挖机器人的 B 样条插值函数,根据确定结果获取清挖机器人动力学方程表达式,计算出清挖机器人的机械能耗。

1.1.1 B 样条插值函数确定

以煤矿井下水仓清挖机器人为研究对象,对清挖机器人的 l 个离散笛卡尔位置点开展逆动力学转换,计算清挖机器人的各个关节位置的时间序列。

$$T_P = \{(\alpha_{z0}, \theta_{z0}), (\alpha_{z1}, \theta_{z1}), \dots, (\alpha_{zl}, \theta_{zl})\} \quad (1)$$

式中: T_P 为关节位置时间序列; α_{zl} 为时刻, $z=1, 2, \dots, m$, m 为清挖机器人关节数量; θ_{zl} 为关节角。

采用 B 样条插值方法获取清挖机器人各个关节角对应的平滑轨迹,共设置 7 次 B 样条曲线,令其全部经过清挖机器人的第 1 个关节与最后 1 个关节,7 次全部经过后所获取的 B 样条曲线方程表达式为

$$\begin{cases} S(t) = \sum_{i=0}^n d_i N_{i,7}(t) \\ t = \begin{cases} t_1, & i = 0, 1, \dots, 7 \\ t_i, & i = 8, 9, \dots, n \\ +t_{n+1}, & i = n+1, n+2, \dots, n+7+1 \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $S(t)$ 为控制参数为 t 时清挖机器人获取的 B 样条插值函数; d_i 为 B 样条的第 i 个控制点; $N_{i,7}(t)$ 为 B 样条基函数; n 为控制点个数。

经过上述操作后即可获取清挖机器人各个关节的速度运动轨迹,通过式(2)获取一个清挖机器人 B 样条轨迹 $n-l$ 附加方程:

$$s_i^{(r)}(t) = 7 \sum_{j=i}^{i+7} d_j^r \left(\frac{N_{j,6}^{(r-1)}(t)}{t_{j+7} - t_j} - \frac{N_{j+1,6}^{(r-1)}(t)}{t_{j+7+1} - t_{j+1}} \right) \quad (3)$$

式中: $s_i^{(r)}(t)$ 为在 t 时刻 r 阶导数时的清挖机器人的 B 样条插值函数; j 为加速度轨迹。

1.1.2 清挖机器人动力学分析

根据确定的清挖机器人 B 样条插值函数,将清挖机器人的连杆看作刚体,这时清挖机器人属于多刚体串联/并联结构。

当清挖机器人各个关节均属于转动关节时,从中获得清挖机器人转动关节的逆动力学方程表达式^[6-7],定义如下:

$$\begin{cases} \tau_i = {}^i n_i^{T_i} + \hat{Z}_i \\ {}^i n_i^{T_i} = {}^i N_{i+1} {}^{i+1} R {}^{i+1} n_{i+1} + {}^i P_G {}^i F_i + {}^i P_{i+1} {}^{i+1} R {}^{i+1} F'_{i+1} \\ {}^i N_{i+1} = {}^G I_{i+1} {}^{i+1} \omega_{i+1} + {}^{i+1} \omega_{i+1} {}^{C_{i+1}} I_{i+1} + {}^{i+1} \omega_{i+1} = M_{i+1}^{i+1} \dot{v}_{G+1} \end{cases} \quad (4)$$

式中: τ_i 为逆动力学方程; $\hat{Z}_i$ 为机器人刚体结构; N 为力矩; R 为旋转矩阵; P 为平移矩阵; F 为力; F' 为施加在连杆的力; ${}^{C_{i+1}} I$ 为惯性张量; C 为刚体坐标系; ω_{i+1} 为角加速度; M 为连杆质量; $\dot{v}_{G+1}$ 为机器人连杆质心加速度。

1.2 清挖机器人总机械能耗计算

根据获取的清挖机器人逆动力学方程表达式,计算清挖机器人的总耗能。

清挖机器人在有限环境内需要高效完成清挖任务,这时所消耗的能量较大,需降低清挖机器人在运动过程中所消耗的机械能,所以在不考虑清挖机器人电动机发热的情况下,计算出清挖机器人运动期间的总能耗 $f^{[8]}$ 。

$$\begin{cases} f = \min \sum_{j=0}^6 \sum_{i=0}^{n-1} \int_{t_i}^{t_{i+1}} |\lambda \cdot \dot{\theta}| + dt \\ \text{s. t.} \begin{cases} |\max d_{zi}^1| \leq v_{cz} \\ |\max d_{zi}^2| \leq a_{cz} \\ |\max d_{zi}^3| \leq \omega_{cz} \end{cases} \end{cases} \quad (5)$$

式中: λ 为关节力矩; $\dot{\theta}$ 为角速度; d_{zi}^1 为第 z 个关节的第 i 个控制顶点; v_{cz} 为关节速度; a_{cz} 为关节加速度; ω_{cz} 为角加速度。

2 考虑能耗的煤矿井下水仓清挖机器人轨迹规划

2.1 清挖机器人轨迹规划

基于清挖机器人动力学分析结果,采用三次贝塞尔曲线对清挖机器人光滑轨迹进行拟合。并在考虑清挖机器人机械能消耗的情况下,规划清挖机器人运动轨迹。

清挖机器人在接收下达口令前,会依据接收的路径点序列开展清挖路径轨迹规划,为此采用贝塞尔曲线对清挖机器人进行轨迹规划^[9]。 n 阶贝塞尔曲线方程表达式为

$$\begin{cases} P(t) = \sum_{i=0}^n Q_i J_{i,n}(t) \\ J_{i,n}(t) = C_n^i t^i (1-t)^{n-i} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $P(t)$ 为贝塞尔曲线控制的函数; Q_i 为机器人关节控制点坐标; $J_{i,n}(t)$ 为第 n 个控制点混合基函数; C_n^i 为元素组合数; t 为曲线的控制参数。

将清挖机器人的起始点与终点的姿态作为约束条件,可以直接利用三阶曲线规划出清挖机器人轨迹。

对方程(6)进行计算,获得清挖机器人的三阶贝塞尔曲线轨迹规划,定义如下:

$$\begin{cases} x(t) = \sum_{i=0}^3 p_{xi} + J_{i,n}(t) \\ y(t) = \sum_{i=0}^3 p_{yi} + J_{i,n}(t) \end{cases} \quad (7)$$

式中: $x(t)$ 为平面 x 轴运动轨迹; p_{xi} 为起点; $y(t)$ 为平面 y 轴运动轨迹; p_{yi} 为终点。

计算贝塞尔曲线长度,有利于规划清挖机器人关节速度,计算公式如下:

$$L = \int_0^1 \sqrt{[x'(t)]^2 + [y'(t)]^2} dt \quad (8)$$

式中: L 为贝塞尔曲线总长度; $x'(t)$ 与 $y'(t)$ 均定义对控制参数 t 的求导结果。

分解曲线中的 t , 划分成 K 份, 根据划分结果, 采用 Simpson 公式对 L 实施计算求解, 定义如下:

$$\begin{cases} D_{xy}(t) = \sqrt{[x'(t)]^2 + [y'(t)]^2} \\ L \approx \frac{1}{6K} \sum_{i=1}^K \left[K_{xy} \left(\frac{i-1}{K} \right) + D_{xy} \left(\frac{i}{K} \right) + 4D_{xy} \left(\frac{2i-1}{2K} \right) \right] \end{cases} \quad (9)$$

式中 $D_{xy}(t)$ 为 2 种求导结果的结合。

针对以上结果可知, 煤矿井下水仓清挖机器人在整个运行过程中应保证速度平滑, 令清挖机器人在最大加速度范围实现清挖工作。

利用跟踪微分器对清挖机器人贝塞尔曲线长度为 L 的轨迹进行有效规划, 以速度作为清挖机器人轨迹规划约束条件, 令其满足下述约束方程表达式(不考虑加加速度约束条件):

$$\begin{cases} a_{\text{ref}} = \text{fhan}(L_{\text{ref}}(k) - L, v_{\text{ref}}(k), a_{\text{ref_max}}, h) \\ L_{\text{ref}}(k+1) = L_{\text{ref}}(k) + v_{\text{ref}}(k) \cdot h \\ v_{\text{ref}}(k+1) = v_{\text{ref}} + a_{\text{ref}}(k) \cdot h \\ \text{if}(v_{\text{ref}}(k+1)) > v_{\text{ref_max}}, v_{\text{ref}}(k+1) = v_{\text{ref_max}} \end{cases} \quad (10)$$

式中: fhan 为函数; $L_{\text{ref}}(k)$ 为 k 个离散点长度; $a_{\text{ref_max}}$ 为最大加速度; h 为控制周期; $L_{\text{ref}}(k+1)$ 为第 $k+1$ 个离散点长度; $v_{\text{ref}}(k)$ 为参考速度; $v_{\text{ref}}(k+1)$ 为第 k 个离散点速度; a_{ref} 为加速度; $v_{\text{ref_max}}$ 为最大参考速度。

考虑加加速度的约束条件定义为

$$\begin{cases} j_{\text{ref}} = \text{fhan}(v_{\text{ref}}(k) - v_{\text{ref_max}}, a_{\text{ref}}(k), j_{\text{ref_max}}, h) \\ L_{\text{ref}}(k+1) = L_{\text{ref}}(k) + v_{\text{ref}}(k) \cdot h \\ v_{\text{ref}}(k+1) = v_{\text{ref}}(k) + a_{\text{ref}}(k) \cdot h \\ a_{\text{ref}}(k+1) = a_{\text{ref}}(k) + j_{\text{ref}} \cdot h \\ \text{if}(a_{\text{ref}}(k+1)) > a_{\text{ref_max}}, a_{\text{ref}}(k+1) = a_{\text{ref_max}} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $j_{\text{ref_max}}$ 为最大加加速度; j_{ref} 为加加速度。

根据设置的加加速度约束条件, 利用贝塞尔曲线对清挖机器人的参考轨迹实施拟合, 再在约束条件下, 采用跟踪微分器划分出清挖机器人平滑速度运动轨迹, 实现清挖机器人的轨迹规划。

2.2 考虑能耗的清挖机器人轨迹规划优化

清挖机器人的运动加速度大小、运动轨迹等都与机器人的机械能消耗有关联, 所以在考虑降低能量消耗的情况下, 采用粒子群算法对规划的清挖机器人运动轨迹进行优化^[10], 从中获取清挖机器人的最优轨迹路径, 达到降低能量消耗的目的。

2.2.1 粒子群算法

设置搜索空间 U 中有 q 个 $X = (X_1, X_2, \dots, X_q)$ 种群, 其向量为 $\mathbf{X}_e(t) = (X_{e1}, X_{e2}, \dots, X_{eq})^a$ (e 为粒子个数)。对粒子迭代时, 粒子种群与第 e 个粒子的速度和位置定义如下:

$$\begin{aligned} v_e(t+1) &= \bar{\omega} + v_e(t) + c_1 \xi_{1e}(o_e - x_e(t)) + \\ &c_2 \xi_{2e}(u_e - x_e(t)) + \mathbf{X}_e(t+1) = \mathbf{X}_e(t) + v_e(t+1) \end{aligned} \quad (12)$$

式中: v_e 为粒子速度; u_e 为粒子位置; $\bar{\omega}$ 为权重; c_1, c_2 为调整加速度因子; ξ_{1e}, ξ_{2e} 为随机数; o_e 为最优位置。

2.2.2 设置自适应惩罚函数

依据清挖机器人的约束问题, 利用自适应惩罚函数策略对其处理, 设置自适应惩罚函数为

$$R(t) = f(t) + W(t) \quad (13)$$

式中: $R(t)$ 为自适应惩罚函数; $f(t)$ 为轨迹函数; $W(t)$ 为惩罚函数。

设置 ϵ 为惩罚因子, 确立惩罚函数质量, 起到获取速度收敛最优解的目的。为此将 $\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_q$ 作为粒子群轨迹优化过程中的变化依赖, 令其依赖当前群体可行解比例 ρ , 这时惩罚因子 ϵ 相当于 ρ 的函数, $\epsilon(\rho) = 10^{\gamma(1-\rho)} - 1$, γ 为惩罚参数。

由此可知 $\epsilon(\rho)$ 的初始值会随着粒子群体的状态变化, 在清挖机器人轨迹规划优化过程中有动态自适应性。

2.2.3 基于粒子群算法的轨迹规划优化

根据上述定义结果, 将自适应惩罚函数与粒子群算法相结合, 对考虑能耗的煤矿井下水仓清挖机器人轨迹规划开展以下优化, 具体流程如图 1 所示。图 1 中 H 为迭代次数, 根据优化结果, 找寻出考虑能耗的煤矿水仓清挖机器人最优轨迹规划, 实现清挖机器人轨迹整体规划。

3 实验与分析

为了验证考虑能耗的煤矿井下水仓清挖机器人

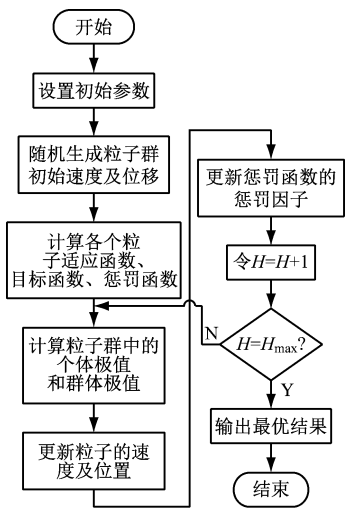


图1 基于粒子群算法的轨迹规划优化

轨迹规划方法的整体有效性,需要对该方法开展实验对比测试。采用考虑能耗的煤矿井下水仓清挖机器人轨迹规划方法(方法1)、基于方向选择的移动机器人路径规划方法(方法2)和利用自适应选择算子结合遗传算法的机器人路径规划方法(方法3)进行实验对比测试。

3.1 实验设置

为测试煤矿井下水仓清挖机器人轨迹规划效果及规划可行性,利用 Matlab 软件对其进行实验测试。首先将清挖机器人作为质点,设置机器人的初始位置为 $X_0=(0,0)$,终点位置为 $X_g=(10,10)$ 。同时在设定的环境中设置障碍物。

3.2 实验结果分析

由于障碍物对清挖机器人的轨迹规划造成极大影响,所以在煤矿井下水仓环境内放入相同的障碍物,并采用3种方法对清挖机器人的轨迹规划实施不同的测试比较。

在煤矿水仓环境中随机生成陷阱区域,利用方法1、方法2和方法3分别在存有陷阱区域的煤矿水仓环境对清挖机器人进行轨迹规划,如图2所示。从图2可看出,在煤矿井下水仓共设置了2个陷阱区域及多个障碍物、虚拟障碍物。清挖机器人在充满障碍物及陷阱区域的水仓环境运行时,方法1在有效避开障碍区域的同时实现了轨迹规划,且规划的路径长度比较短,可以更快地实现清挖工作。方法2陷入陷阱区域后,还可以找寻出正确路径,但整体轨迹路径较长。方法3进入陷阱区域后,没有探索到最佳路径,可见方法3的轨迹规划效果较差,不能完全实现最终路径规划。

在上述实验基础上,去除陷阱区域,令3种方法在不存有陷阱区域且仅有障碍物的水仓环境中实施轨迹规划,如图3所示。

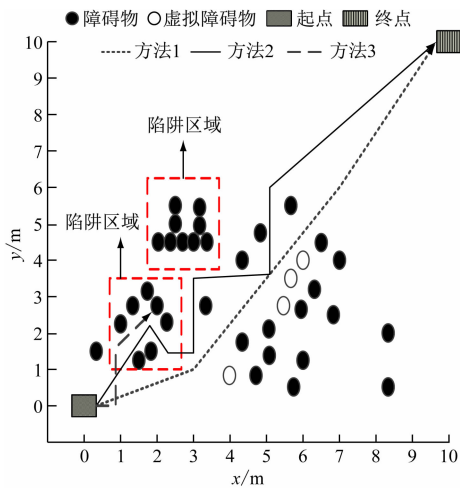


图2 存有陷阱区域的清挖机器人轨迹规划

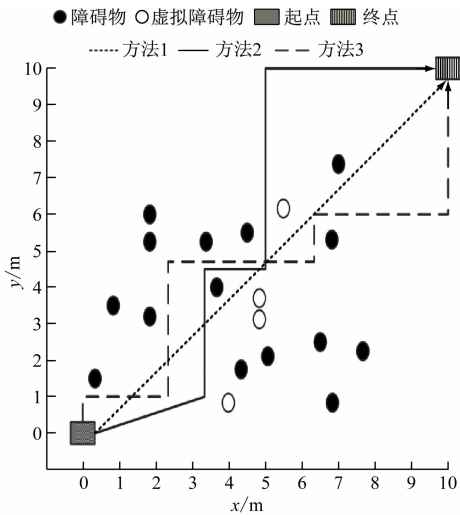


图3 不存有陷阱区域的机器人轨迹规划对比

从整体对比发现,在没有陷阱区域的情况下,3种方法都可精准完成机器人轨迹规划,但方法1规划的路径长度优于其余2种方法,证明方法1规划的轨迹在3种方法中最优。

采用方法1、方法2和方法3分别对清挖机器人轨迹规划运行时间进行测试,验证3种方法的轨迹规划效率,测试结果如图4所示。

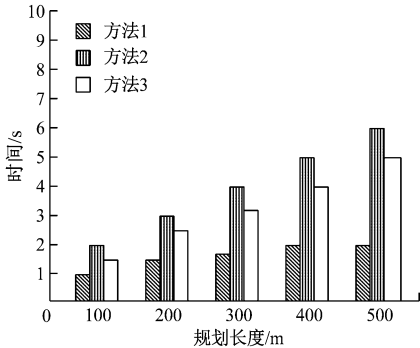


图4 规划时间对比测试

根据图4中的数据发现,从设置的轨迹规划长度来看,方法1的规划时间最短。方法2和方法3对500 m长度的轨迹规划时时间较长,说明方法2

与方法 3 在规划轨迹时效率较低,方法 1 的轨迹规划效率最优。

综上所述,方法 1 规划的轨迹最佳且效率最高,因为方法 1 在考虑能耗的情况下对规划轨迹进行了优化,提升了整体规划效率。

4 结语

清挖机器人轨迹规划不完善会导致机器人消耗过多的能量,针对这一问题,提出了考虑能耗的煤矿井下水仓清挖机器人轨迹规划方法。该方法根据清挖机器人的动力学分析获取机器人总能耗,再采用贝塞尔曲线方法规划出机器人运动轨迹,最终基于考虑能耗的情况下采用粒子群算法对规划的轨迹进行优化,从而实现机器人轨迹的最优规划。实验结果验证该方法在陷阱区域可以有效避开障碍区域,实现最短路径规划;在无陷阱区域中相比 2 种对比方法规划路径更短,且规划路径所用时间较短,效率更高。

参考文献:

[1] 曹亦俊,刘敏,邢耀文,等.煤矿井下选煤技术现状和展望[J]. 采矿与安全工程学报,2020,37(1):192-201.

[2] 曾飞,吴青,初秀民,等.带式输送机物料瞬时流量激光测量方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2015,42(2):40-46.

[3] 马广川.煤矿生产物流系统瓶颈的诊断与优化[D]. 青岛:山东科技大学,2011:1-10.

[4] 李鑫,李仲学,李翠平.基于 Agent 技术的井下运输仿真模型研究[J]. 金属矿山,2011,40(12):113-116,126.

[5] 张文军,舒新前,姜洪才,等.基于激光三维扫描的不规则煤场测量系统设计[J]. 煤炭科学技术,2009,37(5):111-114.

[6] 李瑜芳.彩色结构光条纹中心线提取方法研究[D]. 长春:吉林大学,2011.

[7] 付敏.彩色地图等高线的自动提取与补断研究[D]. 成都:四川师范大学,2013.

[8] 李汉超.基于激光三角法的物料体积计量方法研究

[2] 张睿.煤矿井下反循环取样钻杆中心管设计方法[J]. 煤矿安全,2020,51(4):105-108.

[3] 吴铮,陈彦杰,何炳蔚,等.基于方向选择的移动机器人路径规划方法[J]. 计算机集成制造系统,2021,27(3):672-682.

[4] 易欣,郭武士,赵丽.利用自适应选择算子结合遗传算法的机器人路径规划方法[J]. 计算机应用研究,2020,37(6):1745-1749.

[5] 郭伟,秦国选,王磊,等.基于改进人工鱼群算法和 MAKLINK 图的机器人路径规划[J]. 控制与决策,2020,35(9):2145-2152.

[6] 刘想德,何翔鹏,胡勇,等.基于方向决策 RRT 算法的移动机器人路径规划[J]. 计算机仿真,2022,39(6):444-448,495.

[7] 王成军,王智慧,金力,等.双臂型井下巡检机器人动力学分析[J]. 煤炭技术,2021,40(11):181-185.

[8] 柳强,金明河,刘宏,等.空间机器人最优能耗捕获目标的自适应跟踪控制[J]. 机器人,2022,44(1):77-89.

[9] 杨化林,钟岩,姜沅政,等.基于时间与急动度最优的并联式采茶机器人轨迹规划混合策略[J]. 机械工程学报,2022,58(9):62-70.

[10] 郭娟.基于粒子群算法的双臂机器人运动轨迹优化研究[J]. 中国工程机械学报,2020,18(4):324-329.

(上接第 107 页)

[D]. 合肥:合肥工业大学,2015.

[9] 查英,刘铁根,杜东.图像识别技术在零件装配自动识别中的应用[J]. 计算机工程,2006,32(10):178-179,185.

[10] 汪国云,李济顺.基于轮廓的物体识别与定位方法[J]. 河南科技大学学报(自然科学版),2006,27(6):42-45.

[11] ZHANG Zhengyou. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11):1330-1334.

[12] BOWYER A. Computing dirichlet tessellations[J]. The Computer Journal,1981,24(2):162-166.

[13] 张元刚,刘坤,杨林,等.煤炭工业监控大数据平台建设 with 数据处理应用技术[J]. 煤炭科学技术,2019,47(3):75-80.