DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2021.01.042

基于 GA-PSO 的地砖铺设机器人作业点优化

张帅1,陈柏1,鞠锋1,席万强2

(1. 南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016; 2. 南京信息工程大学 滨江学院,江苏 无锡 214000)

摘 要:针对建筑移动机器人路径规划中移动小车作业点问题,提出了以最大可操作度为优化 指标,基于遗传粒子群混合算法搜寻移动小车作业点的方法。阐述了地砖铺设机器人系统的 组成及灵巧度优化指标:给出了移动机械臂铺砖的一般步骤:结合遗传算法和粒子群算法的优 点,以机械臂可操作度最大为原则进行优化,以快速准确地得到最优作业位姿点。利用 MATLAB软件编写程序对移动机器人贴地砖作业进行了仿真实验。结果表明:该路径优化方法 能够精确地得到合理的作业点位置。 关键词:移动机器人:路径优化:地砖铺设:遗传粒子群算法:可操作度

中图分类号:TP391.9:TP242 文献标识码:A 文章编号:1671-5276(2021)01-0164-03

Optimization of Construction Robot's Operation Point Based on GA-PSO

ZHANG Shuai¹, CHEN Bai¹, JU Feng¹, XI Wanqiang²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China: 2. Binjiang College, Nanjing University of Information Science and Technology, Wuxi 214000, China)

Abstract: Aiming at the operation point of construction robot in the path planning, this paper proposes a method to search the operation point of mobile car based on the GA-PSO with the maximum operability as the optimization index. The composition and dexterity optimization index of tile laying robot system are described. The general steps of laying tiles for moving manipulator are presented. By integrating the advantages of genetic algorithm and particle swarm optimization algorithm, optimization is carried out according to the principle of maximum manipulator maneuverability, so that the optimal operation position can be obtained quickly and accurately. MATLAB software is used to write the program to simulate the mobile robot's tiling operation. The results show that the proposed path optimization method, based on genetic particle swarm optimization, can accurately reach the proper position of the mobile robot.

Keywords: mobile robot; route optimization; automatic tiling; GA-PSO; manipulability measure

引言 0

近年来,随着经济建设水平的不断提高,建筑行业正 在持续高速发展。然而随着我国老龄化的不断加重,造成 了眼下的建筑行业劳动力短缺、劳动生产率低下等问 题^[1]。为了打破这种困局,大力发展建筑机器人以改变 传统作业模式势在必行。而地砖铺设作为房屋、楼宇建造 中不可或缺的部分,基于当前的机器人技术,发展应用于 地砖铺设作业的机器人是很有必要的[2]。

通常,应用于地砖铺设的建筑机器人是由地面移动模 块(如移动小车)以及空间作业的机械臂组成,亦可称为 移动机械臂,其作业方式是由两个独立的运动模块协调完 成的,因而如何规划移动小车与机械臂的运动完成指定的 任务是很重要的[3]。一般情况下,移动小车是先行驶到 靠近目标点的位置停下,然后位于小车上的机械臂进行后 续作业。国内外学者针对移动机械臂作业路径规划问题, 展开了相关研究。

然而,在移动小车路径规划中,作业点的选择,目前还 没有相关的研究。本文将针对此问题,研究使机械臂获得 最高灵活性,旨在得到移动机器人最佳的作业点位姿。文 中主要介绍灵巧度和遗传粒子群混合算法;描述了地砖铺 设机器人作业过程;以机械臂最大可操作度为目标,优化 了移动小车的作业点位姿,并做了相关仿真验证。

1 灵巧度分析

地砖铺设移动机器人由移动小车和机械臂组成,如图 1 所示。



图1 地砖铺设机器人

第一作者简介:张帅(1994—),男,江苏泰兴人,硕士研究生,研究方向为建筑机器人。

在进行作业任务规划时,移动小车作业点的位姿将会 影响机械臂的作业性能。本文将以地砖铺设移动机器人 机械臂的灵巧度为优化指标,采用智能搜索算法,以确定 移动小车最优的作业点。

1.1 可操作度

在串联机器人中,描述机器人灵活度的运动静力学性能指标,普遍使用 YOSHIKAWA T^[4]提出的可操作度指标,即

$$\boldsymbol{\omega} = \sqrt{|\boldsymbol{J}(q) \boldsymbol{J}^{\mathrm{T}}(q)|} \qquad (1)$$

式中:J(q)为机器人的雅可比矩阵; $J^{T}(q)$ 为雅可比矩阵的转置。

由矩阵的J(q)奇异值,可操作度可写为

$$\boldsymbol{\omega} = \boldsymbol{\sigma}_1, \boldsymbol{\sigma}_2, \cdots, \boldsymbol{\sigma}_m \tag{2}$$

可操作度 ω 反映了机器人在某一形位下各方向运动 能力的综合度量,用于衡量机器人的整体灵活性。在机器 人进行作业时,可操作度值越大,机器人的灵活性就越好。 当 ω 的值为 0 时,表明机器人处于奇异形位,应尽量避免 这种情况的发生。

1.2 可操作度优化函数

地砖铺设移动机器人在作业时作业点的位姿是以机 械臂具有最大的操作灵活性为原则进行优化选择的。可 操作度的适应度函数表示为

$$f_{\rm it} = \frac{1}{1 + 1/\omega} \tag{3}$$

式中ω为可操作度值。

2 地砖铺设机器人作业步骤

地砖铺设机器人的两运动模块协调作业时,移动小车 作业点位姿的好坏将直接影响机械臂的操作灵活性,所以 选择合理的作业点是有必要的。

本文所提出的方法是以机器人灵活性最大为优化目标,在地砖铺设作业范围内选取一个合适的作业点。

图 2 为地砖铺设机器人作业示意图。该系统由 1 个 平面移动小车以及 1 个 6 自由度串联机器人构成。具体 步骤如下:移动小车停靠在机械臂的工作空间满足贴砖作 业要求的位置,机械臂从初始状态运动至地砖正上方 5 cm 处,如图 2(a);机械臂末端手爪(吸盘)向下运行至最上方 地砖并吸附,如图 2(b);机械臂末端手爪运行至地面需贴 合地砖区域的正上方 5 cm 处,如图 2(c);机械臂末端手 抓向下运行直至地转与地面贴合,如图 2(d)。至此完成了 一个地砖的贴合过程;机械臂回归到状态图 2(a),小车沿着 贴砖路线运行至下一个作业点,开始新一轮的贴砖过程。



3 GA-PSO 混合算法

本文结合 GA 和 PSO 的优点,采用遗传粒子群混合算法(GA-PSO)对地砖铺设机器人的工作点位置进行优化,以能快速准确地得到作业点最优解。算法前期,依靠 GA 的交叉变异能力,全局探索以保证种群个体的多样性,提供初步的优化结果,保留全局搜索的优势。算法运行后期转为执行 PSO,强化局部搜索,提高收敛速度和计算精度^[5]。图 3 为 GA-PSO 算法流程图。

具体的步骤如下:

1)设置算法各参数值,并初始化种群信息,包括群体的规模 N 和维数 D,每个粒子的位置 x_{ij}和速度 v_{ij};

2) 计算种群中个体适应度值,确定当前种群最优位置 P_i以及全局最优位置 P_g;

3) 对种群中的个体进行选择、交叉和变异操作;

4) 重复步骤 3),直到新种群个体数与设定的种群数 相等,形成新的子种群;

5) 判断是否满足遗传算法收敛条件。若不满足则返 回步骤 2);若满足,则进行下一步操作;

6) 将经过 GA 操作后生成的种群作为 PSO 的初始种群;

7) 计算种群适应度,更新 P_1 和 P_2 的值;

8) 根据式(4)和式(5)更新粒子速度和位置;

 $v_{ij}(T+1) = \omega \cdot v_{ij}(T) + c_1 \cdot \operatorname{rand}(0,1) \cdot$

 $[p_{ij}(T) - x_{ij}(T)] + c_2 \cdot \text{rand}(0,1) \cdot [p_{gj}(T) - x_{ij}(T)]$ (4)

 $x_{ij}(T+1) = x_{ij}(T) + v_{ij}(T+1)$ (5)

式中: ω为惯性因子; c₁、c₂为加速因子, 值为正常数; 9) 判断是否满足终止条件, 若满足, 则输出最优解并 结束计算, 否则返回步骤 7)。

GA 与 PSO 运行次数比需要不断调整,以便算法具有 较高的搜索效率和精度。下面将运用 GA-PSO 混合算法 优化地砖铺设机器人工作点位置。



图 3 GA-PSO 算法流程图

4 实验仿真

设定地砖铺设机器人 6-DOF 串联机械臂的连杆参数 如表 1 所示,对应的空间初始状态如图 4 所示。

表1 6自由度串联机器人连杆参数

i	θ_i /rad	<i>d</i> _{<i>i</i>} /m	a_{i-1}/m	$\alpha_{i-1}/\mathrm{rad}$
1	0	0.1	0	$\pi/2$
2	0	0	0.5	0
3	$-p_i/2$	0	0	$\pi/2$
4	0	0.3	0	$\pi/2$
5	0	0	0	$\pi/2$
6	0	0	0	0



图 4 6 自由度串联机器人初始状态

因地面需贴合地砖的位姿是固定不变的,移动小车的 移动范围不能过大,否则可能导致超出机械臂的作业范 围。因此,有必要建立6自由度机械臂的工作空间。设定 各关节角的变化范围为 ($-\pi$, π),采用迭代法得出机械 臂的工作空间如图5所示。



考虑到机械臂末端手爪最后贴砖是与地面处于同一水平线,因此需要给出机械臂工作空间 z = d 时 xy 平面的 作业范围,其中 d 为小车车身的高度与机械臂第1个关节 的高度之和。设定机械臂中心点与移动小车上地砖中心 点的距离为 0.3 m;小车车身高度为 0.3 m,如图 6 所示。



图 6 贴砖机器人参数值示意图

对图 5 工作空间取 z=-0.4 m 的截面,即为机械臂末 端手爪在地面的运动范围,如图 7 所示。由图可知,机械 臂末端手爪在地面的作业范围为半径 0.6 m 的圆。



图 7 机械臂在地面的作业范围

建立地砖铺设机器人地面坐标系统,简图如图 8 所示。绿色方块为贴砖的位置;黄色区域为移动小车的移动 范围(因本刊为黑白印刷,有疑问之处可咨询作者)由图 可知,坐标点(-0.5,0.3)m距离原点最远,其距离值为 0. 583 m,<0.6 m,是满足机械臂地面作业范围要求的。



图 8 贴砖移动机器人作业停靠点 坐标系简图

任务要求:移动小车在长 0.6m,宽 0.4m 的矩形区域 内选择作业点,使得机械臂铺砖作业时的可操作度最大。 需要指出的是,由于砖块的形状并不是圆形,一般为正方 形或矩形,因此机械臂在作业时应保持其末端姿态不变。

上述可操作度优化目标的数学形式描述如下:

$$\begin{cases} \max & y = f_{\omega}(x, y) \\ \text{s. t.} & -0.5 \leq x \leq -0.1 \\ & -0.3 \leq y \leq 0.3 \end{cases}$$
(6)

式中 $f_{\omega}(x,y)$ 为可操作度优化函数。

由于在地砖铺设前3步骤中,机械臂每次都会执行这 一相同过程,作业点位姿的变化并不会带来可操作度值的 变化,因而可省略;而后3步骤中移动小车作业点位姿的 改变将带来机械臂作业过程中可操作度的变化,并且由于 第6步骤与4、5两步骤重复;所以只需计算4、5两步骤的 可操作度即可。

基于上一小节提出的 GA-PSO 混合算法对移动小车的停靠位置进行优化。

优化结果如下:

$$\begin{cases} x = -0.402 \text{ s m} \\ y = -0.093 \text{ 8 m} \end{cases}$$
(7)

对应的最大可操作度值为 0.0375 m。图 9 列出了小 车在黄色区域范围内,机械臂的可操作度散点图,不同的 颜色表示不同的数值大小,其中蓝色程度越深表示可操作 (下转第 192 页)



5 结语

复合式高速直升机从直升机模式转换到固定翼飞机模 式的过程中,存在操纵冗余和升力匹配问题,导致过渡过程 的操纵分配相当复杂。本研究对高速直升机进行了过渡模 式下的配平,获得约束条件下的过渡走廊,采用安全裕度最 大优化过渡路线,得到了过渡飞行过程中操纵和姿态对速度 的变化规律。仿真结果表明:最优过渡路线能确保高速直升 机在飞行模式转换过程中合理地分配各操纵量;有效解决了 操纵冗余问题,并确保了模式转换的安全性。

参考文献:

- [1] 吴裕平, 习娟, 范俊. 共轴刚性旋翼高速直升机配平及旋翼 系统气动特性研究[J]. 直升机技术, 2018(2): 1-7.
- [2] 段赛玉, 陈铭. 复合式共轴直升机飞行动力学数学模型研究 [J]. 飞机设计, 2011, 31(3): 13-17, 36.
- [3] 王强, 陈铭, 徐冠峰. 复合式共轴直升机过渡模式的操纵策 略[J]. 航空动力学报, 2014, 29(2): 458-466.
- [4] 陈琦, 江涛, 史凤鸣, 等. 倾转三旋翼无人机过渡模式走廊 曲线研究[J]. 电光与控制, 2017, 24(3): 24-27.
- [5] 万华芳. 倾转旋翼飞行器过渡段仿真研究[D]. 南京: 南京航 空航天大学, 2011.
- [6] 曹芸芸, 陈仁良. 倾转旋翼飞行器发动机短舱倾转角度-速 度包线分析[J]. 航空动力学报, 2011, 26(10): 2174-2180.
- [7] 严旭飞, 陈仁良. 倾转旋翼机动态倾转过渡过程的操纵策略 优化[J]. 航空学报, 2017, 38(7): 54-64.
- [8] 陈永, 龚华军, 王彪. 倾转旋翼机过渡段纵向姿态控制技术 研究[J]. 飞行力学, 2011, 29(1): 30-33.
- [9] 周志浩. 升力转换式无人机飞行模式转换控制方法研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2017.

收稿日期:2019-12-20

(上接第166页)

度值越小,黄色程度越深表示可操作度值越大。由图9可 知,可操作度值较大的区域主要分布在点(-0.4,-0.1)附 近。需要指出的是,在下一轮的铺砖作业过程中,不需要 重新计算机械臂作业的可操作度值,移动小车的最优作业 点依然为新的贴砖位置为原点的(-0.4023,-0.0938)坐 标点处。



5 结语

本文针对建筑移动机器人地砖铺设过程中,移动小车 作业点选择问题进行了较为深入的研究。以最大可操作 度为优化指标,并利用 GA-PSO 混合算法优越的搜索性 能,优化移动小车进行铺砖作业时的作业点,以保证机械 臂的操作灵活性。 为验证所提方法的有效性,本章利用 MATLAB 编写仿真 程序,最终得到了机械臂的可操作度在移动小车位于不同 作业点时的平面分布图,并通过 GA-PSO 混合算法得出 了移动小车的作业点位于坐标为(-0.4023,-0.0938)的点 处,其可操作度值最大。相关仿真结果表明,本文所提出 的基于 GA-PSO 混合算法的可操作度优化方法可以精确 地得到移动小车的作业点,解决了移动小车与机械臂协调 作业时路径规划的难题。

参考文献:

- [1] 齐伯文, 崔岩, 林彬. 建筑业中应用机器人的前景[J]. 信息 技术, 1995(3):33-37.
- [2] 顾军, 芮延年, 唐维俊, 等. 建筑机器人的研究与应用[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2007, 32(1):54-59.
- [3] 张波涛. 移动机械臂运动规划算法及其应用研究[D]. 上海: 华东理工大学,2012.
- [4] YOSHIKAWA T. Manipulability and redundancy control of robotic mechanisms [C]//Proceedings of 1985 IEEE International Conference on Robotics and Automation. St. Louis, MO, USA: IEEE, 1985:1004-1009.
- [5] MOUSAVI M, YAP H J, MUSA S N. A fuzzy hybrid GA-PSO algorithm for multi-objective AGV scheduling in FMS[J]. International Journal of Simulation Modelling, 2017, 16(1):58-71.

收稿日期:2019-11-15