

建筑弧形放线机器人方案研究*

张熙若¹, 赵亮², 宋建¹, 徐颖¹, 曹旺¹

(1. 中建一局集团第五建筑有限公司, 北京 100024; 2. 北京英赫世纪置业有限公司, 北京 100015)

[摘要] 传统人工放线方式因效率低、精度差、人力短缺等问题难以满足日益增长的测量需求, 建筑机器人成为推动行业智能化转型的重要方向。设计了一种可自主完成平面弧形放线任务的建筑机器人, 旨在提升施工现场放线作业的自动化水平与施工质量。该机器人基于 ROS 教育机器人平台, 集成编码器测距模块与自动喷墨装置, 构建具备行走与放线功能的硬件系统; 在软件方面, 采用 Python 提取 AutoCAD 图纸中的线段信息, 并结合改进型 A* 算法实现路径规划, 通过转向控制系统实现弧形行走。试验表明, 该机器人能够准确识别并执行直线与弧线放线任务, 具备良好的路径跟随性与施工稳定性, 为建筑施工自动化提供了可行的技术方案。

[关键词] 智能建造; 放线; 机器人; 自动化; 路径; 测距模块

[中图分类号] TU69

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)13-0022-05

Research on Scheme of Arc Discharge Robot for Building

ZHANG Xiruo¹, ZHAO Liang², SONG Jian¹, XU Ying¹, CAO Wang¹

(1. China Construction First Group Fifth Construction Co., Ltd., Beijing 100024, China;

2. Beijing Yinghe Century Land Co., Ltd., Beijing 100015, China)

Abstract: Due to the problems of low efficiency, poor accuracy, and shortage of manpower, the traditional manual setting-out method is difficult to meet the growing demand for measurement. Building robots has become an important direction to promote the intelligent transformation of the industry. A construction robot that can independently complete the task of plane arc setting out is designed to improve the automation level and construction quality of the setting out operation on the construction site. Based on the ROS education robot platform, the robot integrates an encoder ranging module and automatic ink-jet device to build a hardware system with walking and setting-out functions. In terms of software, Python was used to extract the line segment information in AutoCAD drawings, and the improved A* algorithm was used to realize the path planning, and the arc walking was realized by the steering control system. The test indicates that the robot can accurately identify and perform the task of straight line and arc line setting-out and has good path following and construction stability, which provides a feasible technical scheme for building construction automation.

Keywords: intelligent construction; launching; robot; automation; path; ranging module

0 引言

根据最新行业数据显示, 在人口老龄化背景下, 建筑业作为劳动密集型行业, 近 10 年来进入快速老龄化时期, 现如今 40~49 岁和 50 岁以上的建筑工人累计占比超过半数。当现有这批工人逐渐退休, 建筑一线工人将面临巨大的缺口。

为了解决相关问题, 国务院在《“十四五”数字经济发展规划》中提出以数字技术与实体经济深度融合为主线, 赋能传统产业转型升级, 培育新产业新业态新模式的观念, 同时住房和城乡建设部也提出加快推动智能建造和新型建筑工业化协同发展, 国内开始大力推动建筑行业数字化转型, 因此建筑机器人的推进与发展势在必行^[1-2]。

本文以建筑机器人的使用优势以及现有技术条件作为背景, 介绍一种可以自动进行平面放线的机器人设计方案。

* 中建一局集团第五建筑有限公司科技研发课题: 异形结构测量与监测关键技术研究(WGSKY-2023-05)

[作者简介] 张熙若, 工程师, E-mail: 670544634@qq.com

[收稿日期] 2025-03-20

1 建筑机器人的优势

建筑机器人作为能够有效替代人工的设备开始逐渐进入施工现场,机器人施工具有质量稳定、施工安全、工作高效等特点。

1.1 质量稳定

众所周知,工地的工作环境影响因素很多,常说的“人、机、料、法、环”五项因素均制约着现场的施工质量,很多工人面临高温、寒冷、风等自然因素影响,同时还受限于工人自身的身体状态,导致施工质量难以保证。而建筑机器人可以有效减少这些问题,只要提前设定好算法和程序,建筑机器人就可以有效开展施工作业。以整平机器人为例,可以实现地面自动化无人施工,经第三方检测,使用机器人后,混凝土完成面的水平度与平整度比传统人工提高了 10%,水平度合格率能稳定控制在 95%^[3]。

1.2 施工安全

建筑施工是高危行业,在众多安全事故中工人安全意识不足占比较大。其主要原因在于部分工人为了施工的便捷性忽视了对自身的安全保护,当然也存在着安全培训、安全交底不到位导致安全事故发生的案例。当采用建筑机器人进行危险施工作业时,在出厂前的设定程序中,只需将现有安全文明施工操作要点放入机器人编程中,就可以避免因安全意识问题导致的安全事故。同时机器人如何设定程序才能保证不发生安全事故,需要多次试验来证明。

1.3 工作高效

建筑机器人可以在工况允许的条件下做到长时间连续稳定作业。以墙面抹灰机器人为例,在材料充足的条件下,可以做到连续多小时不间断作业,仅需 1~2 人配合挪动设备位置即可,工作效率最高可达到 300m²/d。

2 现有放样机器人技术分析

本文所研究的放线机器人不同于常见的测量机器人,主要区别在于放线机器人可以独立自主完成放线工作,即在工地现场通过喷墨的方式将墙体或装饰的控制线喷洒至已施工完成的面层上。

以惠普 SitePrint 机器人为例,如图 1 所示,是 1 台装载打印机的三轮移动载具,该机器人设置有 1 个集成棱镜,用于机器人全站仪追踪。其操作模式为机器人全站仪的激光三角测量系统通过其追踪棱镜连续绘制 SitePrint 车辆的位置,并通过无线通信向车辆提供实时的 x,y 坐标。而 SitePrint 机器人将这些 x,y 坐标与 AutoCAD 下载的布局地图进

行比较,从而确定行驶路线。



图 1 SitePrint 机器人
Fig. 1 SitePrint robot

惠普 SitePrint 机器人费用较高,且需要特定公司的全站仪机器人配合才可完成放线操作。且此类放线机器人并不满足本工程实际需要,主要原因如下。

1) 技术费用昂贵。此类机器人没有成熟的应用经验,成本支出面临较大的风险。并且此类机器人还没有作为成熟的产品对外进行出售,其在应用推广阶段仍存在一定的问

题。
2) 弧形放线问题。通过对相关产品介绍的描述,惠普 SitePrint 机器人的行走模式可以认为是点对点的移动模式。即通过自身所在位置的平面坐标移动至下个平面坐标,移动指令如何包含弧线信息无从得知。

3) 智能程度不足。惠普 SitePrint 机器人的使用需要从机器人全站仪部署开始到 SitePrint 机器人操作,过程中可能需要 1~2 名专业技术人员进行辅助。虽然减少了硬性劳动力的投入,但对测量技术人员的要求较高。

针对以上分析,研发一种可以无人操作的弧形放线机器人对市场具有一定的吸引力。

3 弧形放线机器人方案设计

弧形放线机器人的目标是无人操作即可完成施工放线任务。常规的解决思路是机器人安装(辅助)定位系统,在平面放线过程中通过空间定位结合 AutoCAD 图形形成行走指令。现阶段空间定位除全站仪辅助配合外无其他解决思路。

本文所提出的方案设计思路与常规解决思路不同,拟在通过将 AutoCAD 图形中提取的线段信息进行关键数据的摘取,将线段长度、弧度作为指令,通过与放线机器人内置行走距离记录模块相结合,完成自动放线。

详细设计方案为:通过对机器人后台 AutoCAD 图纸中需要放线的线段信息进行提取,关键提取每条线段的初始坐标、终点坐标、线段长度、角度。通过放线机器人后台分析演算机器人行走路线。放

线机器人从初始坐标处行走至终点坐标点位,其中放线机器人内置行驶距离记录装置,当行驶距离记录装置所记录的行驶距离等同于行走的线段长度时停止行走,并通过下一条需放线线段的角度调整自身朝向。当进行弧形线段放线时,通过算法得出数据调整放线机器人底盘前轮旋转方向,使放线机器人可以按照弧形线行走并记录行驶距离。当放线机器人按照规定线路完成放线操作后即可完成任务。

上述内容所提出的弧形放线机器人方案设计仍存在一定问题,一方面是弧形放线机器人行驶距离记录装置的准确性,另一方面是弧线行走与机器人前轮转向的关系。此问题拟通过软硬件设计解决。

4 弧形放线机器人软硬件设计

4.1 硬件设计

4.1.1 载具模块

放线机器人载具应选择能自主移动行走的成品载具,推荐使用 ROS(robot operating system)教育机器人小车,其通常采用开源软件和硬件设计,在后期改造时可以自由地修改和扩展功能,具有多个编程接口,并能够搭载摄像头、红外线、北斗卫星接收器等装置。

ROS 教育机器人小车同样具备行走载具的各种功能,包括行走、智能操控等,可直接作为放线机器人载具及底盘使用。

4.1.2 测距模块

轮式智能小车测量行驶距离具体实现方法可分为 6 种,分别是编码器测距、轮式传感器测距、陀螺仪和加速度计测距、视觉里程计测距、激光测距、超声波测距,其工作原理如表 1 所示。

放线机器人主要应用场景为施工现场,因应用的建筑物不同、基层平整度不同,优选编码器测距的方案。其优势在于可以快速适应所有场景,学习成本较低,误差相对较小。

当使用编码器作为行进距离的传感装置,使用红外线、超声波、碰撞开关、可见光、激光或摄像头等作为导航定位的传感装置^[4]。选择反射式增量编码器的方法进行测距,实现方式为在放线机器人车轮轮盘上放置连续光学标靶,在车轮行驶过程中轮轴上的红外发射装置投射至轮盘的标靶上,通过间隔的反射信号进行累积计量,即放线机器人行驶距离为接受的反射信号次数与标靶间距的乘积。

表 1 行驶距离测量工作原理		
Table 1 Measuring principle of driving distance		
序号	名称	工作原理
1	编码器测距	通过计算车轮旋转时编码器产生的脉冲数量,可以精确计算出车轮旋转的角度,进而根据车轮的直径推算出行驶的距离;需要校准编码器与车轮之间的传动比,确保计数的准确性
2	轮速传感器测距	轮速传感器通常是基于霍尔效应或磁电效应,它们可以检测车轮或传动轴的旋转速度
3	陀螺仪和加速度计测距	将陀螺仪和加速度计的读数进行数学处理(例如使用滤波算法),以减少噪声和漂移的影响;对加速度进行双重积分可以得到位移,从而估算出小车的行驶距离
4	视觉里程计测距	特征点匹配和光流法是常用的视觉里程计算法;需要处理图像数据以提取特征点,并估计这些点在连续帧之间的运动,从而推算出小车的行驶距离
5	激光测距	通过旋转激光雷达或使用多个固定激光传感器,可以获得周围环境的 3D 点云;对比连续的点云数据,可以计算出小车的位置变化,从而得到行驶距离
6	超声波测距	通过计算超声波往返的时间差,并使用声速,可以确定传感器与障碍物之间的距离;如果小车上的超声波传感器持续测量与地面的距离,可以估算出小车的行驶距离

选择编码器测距的方案还有 1 个主要原因在于通常 ROS 教育机器人小车通常具备 4 个乃至更多的轮子,可以通过汇总多轮的测量数据进行误差纠偏,提高精度。

4.1.3 放线模块

参考一种自动喷射墨粉的小型装置,需要在 ROS 教育机器人小车内设置 1 个墨仓,在墨仓底部设置喷头,喷头的开启与放线机器人是否行走存在指令关系,即当放线机器人执行行走指令时喷头开启,反之关闭。

4.2 软件设计

4.2.1 提取系统

使用自动化脚本或程序来读取 AutoCAD 格式的文件,并将其中的几何数据解析出来,提取关键数据,具体操作流程如下。

1) 选择编程环境和 CAD 库,需要选择 1 个支持 CAD 文件读取的编程语言和相应的库。Python 可以使用-ezdxflib、-matplotlib-等库来处理 DXF 文件。C#可以使用-netDxf-库来读取和写入 DXF 文件。

2) 读取 CAD 文件,使用选择的库来加载 CAD 文件(通常是 DXF 或 DWG 格式)。

- 3) 在程序中遍历 CAD 文件中的所有实体,通常是线段(LINE)或者多段线(POLYLINE)。
- 4) 提取矢量线段信息对于每个线段实体提取其起点和终点坐标、线段长度以及弧度。
- 5) 提取的信息可以存储在文件中,如 CSV 或 JSON 格式。

需要注意的是,AutoCAD 中提取的数据不能仅是坐标点,还有坐标点之间的连接顺序。例如 1 道墙是由 4 条线段组成的多段线,那么提取的 4 个角点信息要按照放线的顺序来提取。

4.2.2 操作系统

放线机器人的操作系统主要是指行走系统,行走系统最重要的是路径规划系统,已知可以通过提取系统提取的 AutoCAD 数据获得墙体的转角点位以及每段墙体的位置信息,若要完成智能放线工作需设定好放线机器人路径规划系统。

放线机器人放线指令可以分为 2 个部分,其中包括连续墙体绘制和分段墙体绘制。其中连续墙体绘制时无需进行路径规划设计,只需按照提取出的点位顺序前进即可。

在进行分段墙体绘制时,前置条件是放线机器人已完成了一处连续墙体绘制的指令,此时放线机器人需寻找邻近墙体位置完成放线操作,借用无人驾驶汽车的算法来实现这一功能。常用的全局路径规划算法有 Dijkstra 算法、A* 算法、RRT 算法、蚁群算法,局部路径规划算法有遗传算法、人工势场法、动态窗口法。局部路径规划算法大多是为规避障碍物而设置,而在 AutoCAD 线段信息提取阶段便可以规避障碍物,所以不需要考虑,故而从全局路径规划算法中进行筛选。

上述全局路径规划算法的计算原理及优缺点如表 2 所示^[5]。

表 2 路径规划算法
Table 2 Path planning algorithm

算法名称	实现原理	优点	局限性
Dijkstra	求解有向图中 1 个节点到其他各个节点的最短路径	二维空间规划效率高	有向图中的节点较多时,效率低
A*	寻找路径中当前节点目标节点的最小估计代价	计算简单、路径较短	折线较多
RRT	通过不断采样直到包含目标点	概率完备,适合高维空间	随机采样,计算量大
蚁群算法	蚁群向信息高的地方聚集	鲁棒性好	容易陷入局部最优

因为放线机器人移动目的较为简单,选择 A* 算法进行全局路径规划,参考耿飏等^[6]提出的一种改进的 A* 路径规划算法,路径规划用时较少,可以满足连续放线的需要,同时因为现场点位之间距离不会太远,缩小的算法搜索空间满足要求。

4.2.3 转向系统

根据放线机器人方案设计内容,实现弧形放线操作主要依靠 ROS 教育机器人小车转向系统的操控,实现通过机器人小车转向行驶达成弧形放线操作有 2 种思路可供选择。一种是机器人小车在弧形行驶过程中不断调整角度,另一种是轮式小车将轮胎旋转至一定角度然后前进,机器人小车呈规则弧线行驶。

第 1 种思路所描述的机器人小车在行进过程中不断调整角度行驶无法绘制出完成的弧线,所以参考第 2 种思路。该思路的实现需要结合差速器应用、转向机构设计、转弯参数进行研究。

柴健等^[7]基于 Ackermann-Jeantand 模型对四轮实行转速控制或转矩控制结合轮毂电机的驱动特性,提出的四轮独立驱动轮毂式电动汽车转速转矩协调控制策略,对差速器的应用和电机的选择提供了参考。

而对于转向机构设计方面,需要转向控制单元实时采集转向角度信号,依据中央控制系统发出的指令,通过电机驱动模块控制电机工作,可以实现机器人小车转向控制与前进。但是对于机器人小车转向角度与行驶弧线的控制关系需要经过进一步函数计算与多次试验分析。

5 弧形放线机器人扩展设计

相较于以上软硬件研究结果,可以实现一种无人操控的智能放线机器人初步设计,但是现有技术条件以及研究成果误差无法避免,所以针对室内外两种环境,提供两种优化扩展方式。

5.1 卫星定位

室外较为粗犷的环境适应多种场合的放线机器人代替人工放线,可以极大提高放线效率。但是由于室外路径长,依靠自身测距判断行驶里程会产生较大的误差,冯佳琪等^[8]提出了基于北斗卫星导航系统得到自动放样小车设计,可以为弧形放线机器人室外应用提供参考。

同时结合现有研究成果,包括唐晓霁等^[9]基于北斗的高精度位置服务平台技术研究和赵爱萍等^[10]通过 PNT 体系下导航通信一体化试验构建的北斗+5G 联合定位技术,北斗卫星的精度可以满足室外放样的需要。

5.2 视觉系统扩展

建筑工程室内环境相对平整,放线机器人应用于室内时误差控制较为容易。提高精度的方法一般采用视觉辅助,即通过工业相机或摄像头,在机器人动态移动过程中锁定标靶的位置,通过标靶在视觉中的成像大小变化判断自身与标靶之间的距离。

人为设置标靶有违放线机器人设计的初衷,即实现放线操作无人化的设计,故而在室内放线时可以于放线机器人自身设置标靶投放仓。在机器人行驶至关键点时投放标靶或喷射带有信息的涂料,视觉扩展模块通过视觉成像锁定投放的标靶或带有信息的涂料,在动态移动中计算已行驶的距离。

6 结语

本文提出了一种建筑弧形放线机器人的设计思路,从现有建筑需求出发,提出了放线机器人发展的必要性,结合 ROS 教育机器人小车、编码器测距、自动喷墨墨仓作为硬件需求,以及 Python 算法对于 AutoCAD 数据的提取、A* 算法与转向单元的设计完成了一款自主在室内完成全部放线任务的机器人小车。同时通过对扩展模块的研究可以进一步提高室内外环境的放线精度,为建筑智能化的发展提供参考。

参考文献:

[1] 翟浩博,任宝双,陈洪敏,等. 房建施工机器人的应用及展望[J]. 施工技术(中英文),2023,52(23):20-26.
ZHAI H B,REN B S,CHEN H M,et al. Application and prospect of building construction robot[J]. Construction technology,2023,52(23):20-26.

[2] 段瀚,陈琳欣,郭红领. 人机合作背景下建筑机器人的施工策略研究[J]. 施工技术(中英文),2023,52(14):53-59.
DUAN H,CHEN L X,GUO H L. Construction strategy research of construction robot within the context of human-robot cooperation[J]. Construction technology,2023,52(14):53-59.

[3] 苏黎文,代江. 浅谈智能建造设备在建筑行业中的应用优势[J]. 技术与市场,2023,30(9):87-89.

SU L W,DAI J. On the application advantages of intelligent construction equipment in construction industry[J]. Technology and market,2023,30(9):87-89.

[4] 王俭. 轮式智能小车行驶距离和速度的检测[J]. 传感器技术,2005,24(7):66-68,75.
WANG J. Distance and speed measurement of intelligent dolly with wheels[J]. Journal of transducer technology,2005,24(7):66-68,75.

[5] 朱茂飞,胡方亚,李娜可,等. 无人驾驶汽车路径规划算法综述[J]. 农业装备与车辆工程,2023,61(11):18-22.
ZHU M F,HU F Y,LI N K,et al. Summary of path planning algorithms for driverless vehicle[J]. Agricultural equipment & vehicle engineering,2023,61(11):18-22.

[6] 耿飏,宋丽华,吴爱燕. 一种改进的 A* 路径规划算法研究及其 Qt 实现[J]. 人工智能与机器人研究,2023,12(2):115-125.
GENG B,SONG L H,WU A Y. An improved A* path planning algorithm and its qt implementation[J]. Artificial intelligence and robotics research,2023,12(2):115-125.

[7] 柴健,李旭宇,陈刚,等. 四轮独立驱动轮毂式电动汽车转向控制策略研究[J]. 公路与汽运,2014(5):1-5.
CHAI J,LI X Y,CHEN G,et al. Research on steering control strategy of four-wheel independent drive hub electric vehicle[J]. Highways & automotive applications,2014(5):1-5.

[8] 冯佳琪,陶庭叶,贺晗,等. 基于北斗卫星导航系统的自动放样小车设计[J]. 城市勘测,2019(3):131-134.
FENG J Q,TAO T Y,HE H,et al. Design of high-precision automatic lofting car based on Beidou satellite navigation system[J]. Urban geotechnical investigation & surveying,2019(3):131-134.

[9] 唐晓霏,张士柱,孙小超,等. 基于北斗的高精度位置服务平台技术研究[J]. 地理空间信息,2023,21(4):75-77,95.
TANG X F,ZHANG S Z,SUN X C,et al. High-precision location service platform technology research based on BDS[J]. Geospatial information,2023,21(4):75-77,95.

[10] 赵爱萍,武建锋,吴华兵,等. 北斗+5G 融合定位技术及应用[J]. 中国科技成果,2023(11):19-21.
ZHAO A P,WU J F,WU H B,et al. Beidou +5G integrated positioning technology and its applications[J]. China science and technology achievements,2023(11):19-21.