

面向建筑装修的智能填缝美缝机器人系统设计 与实践研究

张楚锋, 庄薇

广东建设职业技术学院, 广东 广州 510440

DOI:10.61369/ME.2025080026

摘 要 : 针对传统建筑装修中美缝施工存在的劳动强度大、效率低下、质量依赖工人经验等痛点, 本文设计并实现了一款集自主导航、精准识别与协同作业于一体的智能填缝美缝机器人系统。该系统以移动机器人为载体, 深度融合深度视觉传感与激光雷达技术, 实现了对瓷砖缝隙的精准识别与三维环境建模; 通过创新性的“定位架”结构设计, 将吸尘清理、打胶、压缝三功能模块集成于同一直线, 确保了施工流程的连贯性与精确性; 并配备了基于 STM32 微控制器与嵌入式 Linux 的智能控制系统, 实现了路径规划、出胶量自适应控制与多模态人机交互。本文详细阐述了机器人的整体架构、关键技术创新点, 并通过与传统施工方式的对比分析, 验证了其在施工效率、材料利用率与施工质量方面的显著优势。实验与应用表明, 该机器人能将传统需要数日的百平方米级美缝施工缩短至约 10 小时, 材料浪费率降低约 50%, 为建筑装修行业的智能化升级提供了切实可行的技术解决方案与装备支撑。

关 键 词 : 智能机器人; 美缝施工; 机器视觉; 路径规划; 结构设计; 建筑自动化

Design and Practical Research of Intelligent Jointing and Grouting Robot System for Building Decoration

Zhang Chufeng, Zhuang Wei

Guangdong Construction Polytechnic, Guangzhou, Guangdong 510440

Abstract : In response to the pain points of traditional building decoration and grouting construction, such as high labor intensity, low efficiency, and quality reliance on workers' experience, this paper designs and implements an intelligent grouting and grouting robot system integrating autonomous navigation, precise recognition, and collaborative operation. This system, with mobile robots as the carrier, deeply integrates depth vision sensing and lidar technology, achieving precise identification of tile gaps and three-dimensional environmental modeling. Through an innovative "positioning frame" structure design, the three functional modules of dust collection and cleaning, gluing, and joint pressing are integrated into a straight line, ensuring the continuity and accuracy of the construction process. It is also equipped with an intelligent control system based on STM32 microcontroller and embedded Linux, achieving path planning, adaptive control of glue output volume and multi-modal human-machine interaction. This article elaborates in detail on the overall architecture and key technological innovation points of the robot. Through comparative analysis with traditional construction methods, it verifies its significant advantages in construction efficiency, material utilization rate and construction quality. Experiments and applications show that this robot can shorten the traditional hundred-square-meter grouting construction that takes several days to about 10 hours, and reduce the material waste rate by about 50%, providing a practical technical solution and equipment support for the intelligent upgrade of the building decoration industry.

Keywords : intelligent robot; grouting construction; machine vision; path planning; structural design; building automation

引言

在建筑装修过程中, 地面瓷砖铺设是一项常见工序。为适应温差变化导致的热胀冷缩, 避免瓷砖发生断裂或拱起, 铺设时需相邻

瓷砖间预留一定尺寸的缝隙。这些缝隙在铺砖完成后，通常需采用专用美缝剂进行填充处理。美缝施工一般包括清理缝隙、填充美缝剂和压缝整平等工序，不仅有助于增强地面的防水与抗渗性能，还能防止日后使用中因污物积聚导致的缝隙变黑、发霉或滋生细菌等问题，进而提升整体铺贴效果的美观度。

目前，美缝施工多采用手动或电动美缝胶枪进行注胶作业。然而，这两种方式均要求施工人员长时间保持弯腰或蹲姿进行操作，属于全人工参与模式，易引发腰部肌肉劳损，影响工人健康。此外，为确保美缝质量，注胶前需对砖缝进行清理，去除内部灰尘与杂物；注胶后还需使用专用工具对美缝剂进行压实整平，以增强其与缝隙的粘结效果，保证填充均匀、表面平整。以上工序同样依赖人工完成，若在室外或面积较大的施工场所作业，不仅工作量大、劳动强度高，整体施工效率也较低^[1]。

另一方面，现有施工方法高度依赖施工人员的目视判断与手动操作，对操作技能要求较高。施工不当容易导致美缝位置偏移、填充不均匀、材料浪费及最终效果不稳定等问题，严重影响美缝质量。同时，由于砖缝通常呈纵横交错分布，各工序之间若衔接不畅——例如未能及时对已注胶缝隙进行压平处理——不仅会降低施工效率，也将对美缝的最终质量产生不利影响。

基于上述行业现状，本研究旨在研发一款集清缝、吸尘清理、注胶与压平等功能于一体的智能填缝美缝机器人，以降低美缝施工对人工经验的依赖，减轻施工人员的劳动强度，并有效提升美缝作业的效率与质量稳定性。

一、系统总体设计方案

本智能填缝美缝机器人系统采用模块化设计思想，整体架构可分为机械本体、感知系统、控制系统和执行系统四大模块。

（一）系统总体架构

机器人的设计目标是实现自主、高效、高质量的美缝作业。其核心工作流程为：通过感知系统获取环境与缝隙信息，经由控制系统进行决策与路径规划，最终驱动机械本体与执行系统完成协同作业^[2]。

（二）工作流程

1. 机器人启动后，利用激光雷达对施工区域进行360°扫描，构建二维环境地图，识别静态障碍物。同时，深度传感相机对地面进行图像采集。

2. 基于深度学习算法的视觉系统对深度相机图像进行处理，精确识别出瓷砖缝隙的走向、宽度、深度等关键几何参数^[3]。

3. 控制系统融合激光雷达地图与缝隙识别结果，规划出覆盖所有待作业缝隙的最优移动路径，并优化作业顺序^[4]。

4. 机器人沿规划路径移动。当抵达缝隙起点时，吸尘模块率先启动，清理缝隙灰尘；随后美缝胶枪在控制系统的精确控制下，根据缝隙尺寸自适应调整出胶量与移动速度，进行填充；最后，压缝组件对未固化的美缝剂进行压平整形，使其与瓷砖表面平滑过渡。

5. 操作人员可通过触摸屏或手机APP实时监控机器人电量、胶量、工作进度等信息，并可进行远程干预或模式切换。

二、关键技术与创新设计

本机器人的核心竞争力体现在其一系列针对特定场景的关键技术创新上。

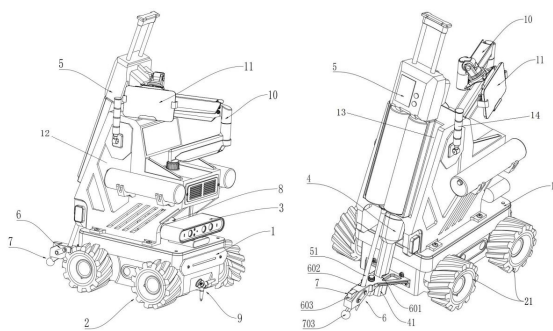


图1 智能填缝美缝机器人主要结构

1-机架；2-行走机构；3-摄像装置；4-吸尘器；5-美缝胶枪；6-定位架；7-压缝组件；8-激光雷达；9-导向组件；10-显示屏安装架；11-操作面板；12-外罩；13-安装槽；14-信号灯。

（一）基于多传感器融合的精准感知与导航技术

机器人采用了“激光雷达(SLAM) + 深度视觉”的多传感器融合方案^[5]。

1. 激光雷达(N10P)：作为宏观导航的核心传感器，其25m测距半径与0.4°~0.8°的可调角度分辨率，足以满足家庭及中小型商业场景的建图与避障需求。它确保了机器人在全局范围内的定位精度和移动安全性。

2. 深度传感相机(RGBD)：作为缝隙微观检测的“眼睛”，其0.6m~4m的深度感知范围专为地面作业优化。通过单目结构光与RGB信息的结合，不仅能识别缝隙的二维位置，更能精确测量其深度与宽度，为后续的自适应打胶提供了数据基础。数据融合算法将激光雷达的定位信息与视觉识别的缝隙坐标进行匹配，确保了作业工具能够精准对缝。

（二）三功能一体化的协同执行机构设计

执行机构的设计是确保施工质量的核心，其最大的创新在于

“定位架”结构。

1. 定位架上沿直线依次设置了安装孔（吸尘器吸嘴）、对位孔（美缝胶枪出胶口）和插接孔（压缝组件）。这种“三点一线”的布局从机械结构上保证了三个功能模块的中心始终与瓷砖缝隙对齐，从根本上避免了人工操作中常见的路径偏移问题。

2. 压缝组件采用可上下调节的插块与连杆机构，末端为压缝球。通过旋松/拧紧插接孔两侧的调节螺栓，可快速调整压缝球的高度，以适应不同深浅的缝隙或不同凸出度的美缝要求，确保了压缝效果的均匀性与一致性。

3. 机器人前端设计了可旋转、可拆卸的物理导向杆组件。在信号良好区域，依赖激光与视觉导航；在信号受限或对精度有极端要求的场景，可降级使用物理导向杆插入缝隙进行机械式循迹，增强了系统的鲁棒性与适应性^[6]。

（三）基于嵌入式 Linux 的智能控制系统

控制系统是机器人的“大脑”，其硬件核心为 STM32 微控制器，软件平台为嵌入式 Linux（ROS2）。

1. 控制系统基于获取的环境地图与缝隙信息，采用改进的栅格法或遗传算法进行全局路径规划，力求路径最短、转弯最少。同时，集成动态窗口法（DWA）用于局部实时避障^[7]。

2. 控制系统建立了“缝隙截面积（宽 × 深）—机器人行进速度—出胶泵速度”的数学模型。通过实时接收的缝隙几何参数，动态调整行进与出胶电机速率，实现“缝大胶多、缝小胶省”的精确用料，有效降低了材料浪费。

3. 提供触摸屏、手机 APP（蓝牙）、声控等多种交互方式，满足了不同应用场景和用户习惯的需求，提升了设备的易用性^[8]。

基于上述结构设计，该机器人能够实现美缝作业的自主化，操作更为便捷。它可沿砖缝精准完成清理、注胶与压平等工序，有效减轻施工人员的劳动负担，并显著减少因人工操作引起的美缝位置偏移、填充不均、材料浪费及效果不一致等问题。通过确保一砖缝各工序的连贯与及时执行，该系统整体提升了美缝施工的效率与质量水平。

三、系统性能测试与应用分析

（一）性能指标

1. 物理尺寸：420mm (L) × 230mm (W) × 650mm (H)，紧凑型设计便于在室内空间穿梭。

2. 运动性能：最高移动速度 1.4m/s（无级调速），美缝作业时推荐速度 2m/min（6档可调）。

3. 作业能力：打胶最大推力 800 ± 50kg，可处理标准 420g 双管美缝剂，单次充电（5300mAh）可持续工作约 5.5 小时。

4. 感知精度：深度相机对缝隙宽度识别精度达 ± 0.1mm，激光雷达建图精度 ± 2cm。

（二）效率与质量对比分析

在 100 平方米的标准瓷砖（缝宽宽度平均约 2mm）场地进行测试：

对比项目	传统人工施工	电动工具施工	本智能美缝机器人
施工耗时	约 24–32 人时 （3–4 天）	约 16–24 人时 （2–3 天）	约 10 机时（1–1.5 天）
材料用量	约 25 kg	约 23 kg	约 18 kg
材料浪费率	10%–20%	8%–15%	~5%–10%
质量一致性	依赖工人，波动大	较好，但仍依赖工人	高，由算法保证
人力投入	1–2 人全程高强度劳动	1–2 人操作	1 人监控，间歇操作

分析表明，本机器人在效率上约为熟练工人的 2–4 倍，在材料节省上可达 28%，并且能彻底消除因疲劳导致的质量波动。

四、讨论与展望

（一）技术优势与局限性

本研究成功验证了智能机器人在美缝施工场景下的可行性。其核心优势在于：技术集成度高，将多项机器人关键技术有效应用于特定工业场景；解决了行业真痛点，直指人工施工的瓶颈问题；具备商业化潜力，成本可控，投资回报周期短。

然而，当前系统仍存在局限性：对于极不规则或严重破损的缝隙，识别精度会下降；在非常复杂拥挤的环境中，移动灵活性可能受限。此外，初代产品的成本对于小型施工队仍构成一定压力。

（二）未来工作展望

基于现有成果，未来的研究工作将围绕以下几点展开：引入更强大的轻量化深度学习模型，提升对复杂、异形缝隙的识别与处理能力；开发面向墙面、阴阳角等特殊部位的作业末端执行器，实现全屋美缝覆盖；探索多机器人协同作业的可能性，并建立云平台，实现对机器人机队的远程监控、任务调度与大数据分析，迈向施工管理的全面数字化；通过优化供应链、改进设计，进一步降低制造成本，推动产品的规模化量产与市场普及。

（三）应用前景展望

中国庞大的地产存量与持续装修需求，为美缝行业提供了稳定市场^[9]。当前施工依赖人工，面临成本高、人力缺、质量不稳等挑战。本机器人以其突出优势在家装、工装及公共建筑等领域具备强大竞争力，潜在市场规模达数十亿级，替代空间巨大。契合国家“制造业智能化转型”与“数字经济”发展战略，不仅能将工人从繁重劳动中解放，还可通过数字化施工推动行业标准化，减少材料浪费，符合绿色建筑理念，社会与经济效益并重。不仅精准解决行业痛点，更以可演进的技术平台，推动建筑装饰行业向自动化、数字化与智能化迈进，前景广阔。

五、结论

本文设计并实践的智能填缝美缝机器人，通过创新性的机电结构与先进的智能技术融合，成功地将自动化、智能化技术引入传统建筑美缝领域。测试结果证明，该机器人系统能够显著

提升施工效率与质量，大幅降低材料消耗与人工成本，有效改善了工人的作业环境^[10]。该研究成果不仅为美缝行业提供了一款革命性的装备，也为建筑业其他类似细分领域的“机器人代”提供了宝贵的技术路径参考与实践经验，对推动整个建筑装饰行业的智能化转型升级具有积极的示范意义。

参考文献

-
- [1] 中国建筑装饰协会. 2023年中国建筑装饰行业发展报告 [R]. 北京, 2023.
 - [2] 王宏伟, 李志强. 建筑机器人技术发展现状与趋势综述 [J]. 机器人, 2022, 44(1): 100–116.
 - [3] 张建平, 刘永超. 基于机器视觉的工业机器人定位与识别技术研究 [J]. 自动化学报, 2021, 47(5): 1054–1066.
 - [4] 赵亮, 冯少康. 基于 ROS 的移动机器人 SLAM 与自主导航系统设计 [J]. 计算机工程与应用, 2020, 56(10): 224–230.
 - [5] Siegwart R, Nourbakhsh I R, Scaramuzza D. Introduction to autonomous mobile robots[M]. MIT press, 2011.
 - [6] 徐峰, 李娜. 机电一体化系统设计与实践 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2020.
 - [7] 黄俊, 周涛. 移动机器人路径规划算法综述 [J]. 控制与决策, 2021, 36(4): 769–780.
 - [8] 吴军, 王磊. 嵌入式 Linux 系统在智能机器人中的应用研究 [J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2022, 22(2): 88–92.
 - [9] 国家统计局. 中国统计年鉴 2023[M]. 北京: 中国统计出版社, 2023.
 - [10] 陈明, 刘晓宇. 建筑装修施工中人机工程学问题分析与改进 [J]. 建筑科学与工程学报, 2019, 36(3): 45–52.