

DOI: 10.7672/sgjs2023110022

抹灰机器人施工研究*

肖维思¹, 庄 然², 唐务生¹

(1. 上海蔚建科技有限公司, 上海 200949; 2. 中交第三航务工程局有限公司, 上海 200032)

[摘要] 抹灰机器人实现了对抹灰工艺的自动化升级, 机器人施工前需进行图纸、场地调研, 将平面图纸转化为三维模型, 再通过模型自动规划路径、作业信息, 砂浆供应商提前沟通, 再根据材料特性确认砂浆的可泵性、垂挂性、配合比等指标, 以确保现场供料时工作顺畅, 利用机器人视觉作业特性进行作业线放设等前置作业, 待完成后, 机器人班组进场, 通过人机协作的方式进行自动化抹灰作业, 提升了抹灰质量, 提高了施工效率。

[关键词] 建筑机器人; 抹灰; 自动规划; 人机协作; 施工技术

[中图分类号] TU758.11

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2023)11-0022-05

Construction Research of Plastering Robots

XIAO Weisi¹, ZHUANG Ran², TANG Wusheng¹

(1. Shanghai Weijian Technology Co., Ltd., Shanghai 200949, China;

2. CCCC Third Harbor Engineering Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: Plastering robot realizes the automatic upgrade of the plastering process. Before robot construction, it was necessary to investigate drawings and building sites, to convert plan drawings into three-dimensional models, through models to conduct automatic planning of path and operation information, communicated with the mortar supplier in advance to confirm the performance of material, such as pumpability, thickness retention, mix proportion of mortar according to the material characteristics, so as to ensure material supply. According to the robot visual characteristics, the authors set up marking lines before construction, after pre-operation completed, the man-machine collaboration of plastering system was formed by robot team to plaster automatically, it improves the quality of plastering and construction efficiency.

Keywords: construction robot; plastering; automatic planning; man-machine collaboration; construction

0 引言

近年来国内城镇化进程加快, 促进建筑业快速发展, 建筑业成为国内重要的支柱产业^[1]。我国建筑业虽然庞大, 但一直处于智能化与信息化落后、劳动密集的低质量发展中, 因此国家于2016年起, 大力鼓励建筑业智能化转型, 从而摆脱现状^[2]。

近十年, 装配化、监测 AI、BIM 等技术逐渐投入商用, 近3年出现大批建筑智能设备研发公司, 涵盖建筑工程土方、主体结构、砌体结构、装修、质检等各阶段, 包括智能无人挖掘机、混凝土整平机器人、混凝土抹平机器人、混凝土智能布料机、砌筑机器人、墙地面打磨机器人、抹灰机器人、腻子喷涂机器

人、内外墙乳胶漆喷涂机器人、地坪漆涂刷机器人、幕墙安装机器人、实测量机器人、安全巡检机器人等产品^[3-8]。

虽然建筑机器人种类较丰富, 但投入商业用途的建筑机器人较少^[9-10]。抹灰机器人并未形成有效的施工体系进行适配, 因此现场准备及施工条件往往与机器人抹灰施工不符。本文根据已投入商用的抹灰机器人, 为解决大规模、高效率施工作业难题, 通过作业特性提出相应施工工法。该款抹灰机器人运用此工法累积施工逾30万m², 最高施工效率达660m²/d, 单台机器施工效率约为传统人工的13倍。

1 抹灰机器人施工流程设计

抹灰机器人施工流程如图1所示。

机器人作业系统如图2所示。

* 蔚建科技研发项目(Y1219019)

[作者简介] 肖维思, 博士研究生, E-mail: weisi.xiao@we-i-build.com

[收稿日期] 2022-12-28

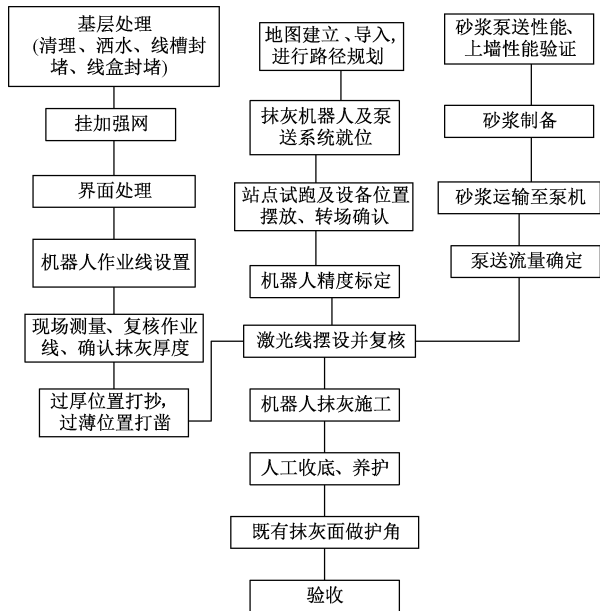


图1 抹灰机器人施工流程

Fig.1 Construction process of plastering robots

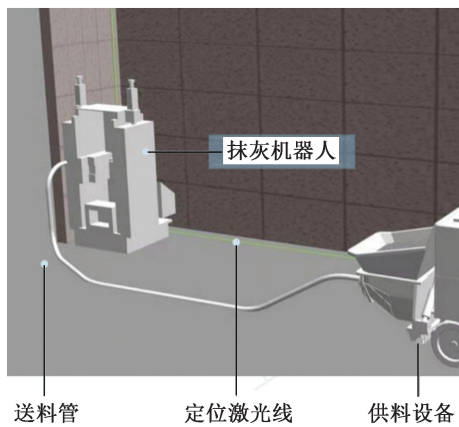


图2 抹灰机器人作业系统

Fig.2 System of plastering robots working

2 抹灰机器人自动作业规划

项目实施前,需收集建筑平面图、立面图、结构图等资料。其中建筑平面图可获得室内走廊、房间、拐角、门洞等尺寸信息,立面图可获得楼层净高、地面降板等信息。上述信息可判定机器人的通行、作业区域,从而判断机器人作业覆盖率及高度,以确定机器人所需选择的高度型号,行走过降板时应确定过桥板的尺寸,避免机器人在高低差路面行走时发生倾覆。

根据结构图可判断横梁与墙面的关系,预判机器人作业时是否与横梁发生干涉,以提前排版设计机器人作业宽度及高度,使机器作业覆盖率及作业效率达到综合最优,为机器人进场作业提供指导。

根据图纸及现场调研结果,对二维图纸进行三维翻模,通过软件生成作业信息及站点信息,于仿

真软件中生成站点信息及作业信息,给予导航路径规划,并测试抹灰效率及行走防碰撞效果。软件仿真完成后,上述作业信息及站点信息将为机器人作业提供相应参数。

由于存在施工临时设施及图纸变更等情况,使现场作业信息与自动规划作业信息不符,故开工前半个月需对现场进行调研,以获取最新图纸、穿插作业计划、前置工序计划、脚手架搭设、临时管线布置、坡道与洞口设计等信息,尽量调整各工序进度,为机器人作业创造必要条件。修改影响作业的临时设施站点位置,从而保证机器人进场前的自动作业。机器人自动作业规划如图3所示。

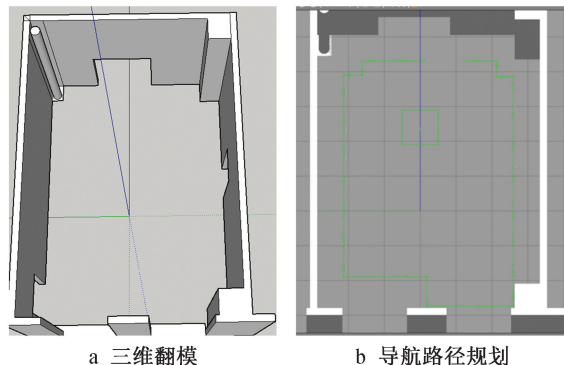


图3 机器人自动作业规划

Fig.3 Automatic work planning of robots

3 材料泵送、上墙性能

由砂浆材料供应商提供配合比检测报告并寄送样品,筛分本次抹灰所用砂浆材料,获得材料级配信息后比对送检报告,确认砂浆无误后进行砂浆泵送测试,以确保可泵性及泵送流量符合要求。同步验证砂浆上墙厚度,确保砂浆在抹灰厚度允许范围内的垂挂性能良好,避免抹灰时砂浆流坠,影响垂平度及观感。

4 机器人作业线设置

抹灰作业线为抹灰理论完成面的基准,作业线与理论完成面以一定距离成平行关系,进行视觉拍照时以此线为基准,根据设定厚度计算执行机构所需平移、旋转的位移量,从而确定抹灰完成面的位置,作业线顺直可保证抹灰完成面的平整度。

机器人作业线是抹灰作业的基准,关系着抹灰厚度、材料成本、方正度、阴阳角方正性、开间进深、施工难易程度,因此作业线的设置直接决定抹灰作业质量、成本、工期。抹灰过厚增加机器上墙难度,材料垂挂性能不足易发生流坠现象,损耗材料较多,同时增加材料物流运输压力。

4.1 作业线设置方式及依据

根据抹灰理论完成面,推出抹灰机器人作业

线,地面弹出的墨线用于表达机器人作业线位置。

根据图纸设计说明、做法说明、精装图部品安装尺寸要求,以及相关规范、施工方案等关于开间进深、方正度、阴阳角方正性、最薄抹灰厚度的要求,确认抹灰面折合理厚度及作业线间的位置关系。

规范要求最薄抹灰厚 5mm,普通抹灰厚度宜为 10~20mm,以保证抹灰完成面的观感良好,薄抹灰厚度根据项目要求确定,开间进深偏差反映房间方正度,根据规范要求,偏差应控制在 10mm 内,阴阳角方正性反映了阴阳角角度距直角的偏差,应控制在 4mm 内。

4.2 作业线设置流程

作业线应在二次结构、线槽封堵、场清、挂网、界面处理完成后设置,此时放线不仅可确认机器人作业线位置,也可提前打凿一次结构、二次结构、线盒或调整安装位置。作业线放线流程如图 4 所示。

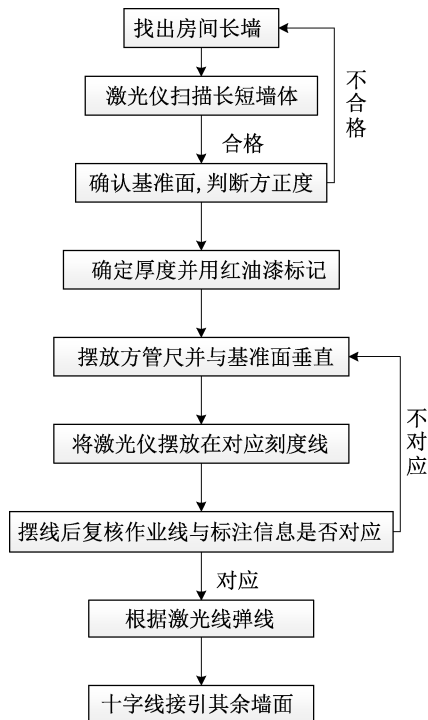


图 4 作业线放线流程

Fig.4 Process of working operation line

4.2.1 确认放线基准墙面

放线应遵循长墙就短墙的原则,若短墙作为基准放线时,产生微小的偏移角度,此时长墙端部抹灰厚度应根据偏转角度按长短比例成倍放大。

选定一面长墙,将激光仪放置于墙角,将十字激光线中的一条设置为长墙理论抹灰完成面,如图 5a 所示。每隔 2m 测量短墙抹灰厚度偏差,若短墙厚度差距不明显,则以该长墙作为基准墙体,如图 5b 所示。若抹灰厚度线性放大或缩小较明显,则长

墙与短墙两者垂直差距较大,需更换一面长墙作为基准面重新确认。如图 5c 所示,若以①墙为基准,会导致②,③,④墙体抹灰厚度偏差过大,不利于施工,且增加材料成本。

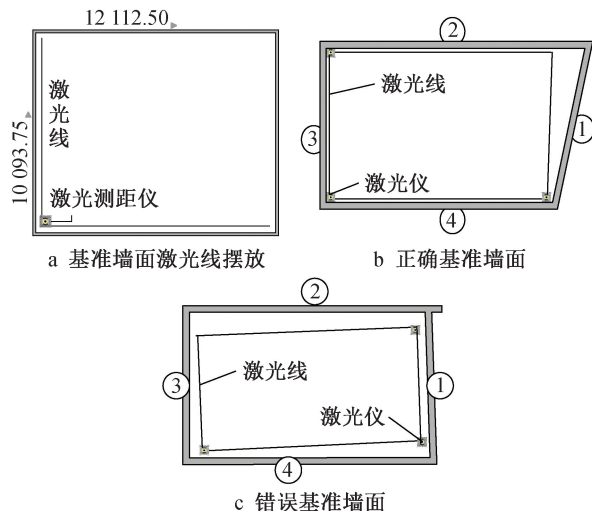


图 5 基准墙面确认

Fig.5 Confirmation of basic wall

4.2.2 确认抹灰厚度

确认抹灰理论厚度的激光线后,使用钢直尺顶压墙体,尺上读数即抹灰厚度,读数如图 6 所示。在墙体标记抹灰厚度,标记高度为 0.5, 2.2m, 间隔 1.0m。若抹灰厚度 > 20mm 标记打抄,若激光面与墙体干涉,则用圆圈圈出干涉部位,标记打凿,若打凿钢筋头超出抹灰面需切割,避免执行机构损坏。

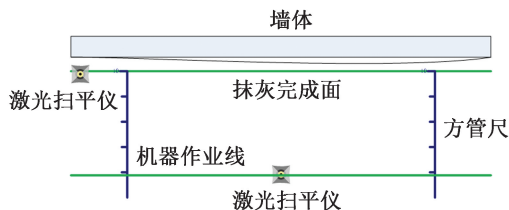


图 6 机器人作业线示意

Fig.6 Robot working lines

使用自研的抹灰专用测试方管尺,使尺子零点端与抹灰完成面代表的激光线齐平,方管尺应与激光线垂直。使用另一台激光扫平仪,将激光线照射在两旁方管尺对应的作业线刻度上。

4.2.3 作业线复核及确认

作业线摆放完成后,需进行复核,避免作业线错误导致机器人执行机构撞墙、抹灰厚度过厚、方正度不合格等问题。使用方管尺或卷尺复核作业线两端和中间距离是否符合标记厚度,复核内容如下:①抹灰厚度 在地面弹好线后摆放激光仪使两者重合,将方管尺零刻度端顶住墙面上线左右摆动

方管尺,测量墙面到激光线的距离,与墙面标记信息吻合;②开间进深 使用卷尺测量 2 条弹线两端的距离,两端距离均大于装修图纸尺寸且两端距离差 $<10\text{mm}$ (若有控制线则测量每个抹灰完成面两端到控制线的距离)。

5 人机协作

人机协作指人和机器人为实现共同目标进行协作的过程,在抹灰机器人施工工法中,作业人员与机器人的共同目标为保障安全、保证质量、增效降本。

抹灰机器人作业流程如下:载入地图→使用雷达确认环境并定位→自主行走至作业站点→识别作业线,确认自身位姿→执行机构定位至抹灰面→根据规划作业信息、泵送频率、压力、位移等传感器自动进行砂浆供料,并自主对执行机构进行运动控制。上述作业方式中的机器人作业时为 3 人/组,分别为机器人工程师、协作员、跟随大工。机器人工程师操作机器人转场、启停等,为机器人上料,并进行日常维护、修理、标定。协作员配合机器人抹灰,对泵机进行移动、清理、维护,机器人抹灰后进行场地清理。跟随大工随机器对抹灰面进行修补,完成机器人未能覆盖的边角区域。

5.1 人机协作安全

机器人工程师、协作员、跟随大工必须培训合格后才可上岗。机器人作业时需确保料管的安全使用,设备工作时应做到料管无弯折、无破损,机器移动时,应注意是否有人或登高工具跨越料管作业,避免料管拖拽拽倒相关协作人员。确认机器人进出施工电梯坡道可承重 650kg ,坡度 $\leq 10^\circ$,避免行走道路承载力不足或行走时坡度过大导致机器倾覆。

使用机器人作业前,应确认急停键是否正常,机器人进入施工电梯后将急停,避免机器人在电梯运行时碰撞施工电梯。

禁止非操作人员进入机器人作业区域,操作人员使用无线设备操作机器人时,需与机器人保持 2m 以上安全距离。

砂浆泵与机器人的间距应 $>3\text{m}$,避免楼板集中堆载,大跨度楼板处的设备尽量避免停靠在楼板跨中区域,严禁设备进入阳台等结构受力薄弱位置。

禁止将机器人作为攀爬工具进行踩踏,避免发生人员跌落事故、影响机器精度。

5.2 抹灰质量保证

1) 机器人垂直度、平整度 抹灰面作业垂直度由机器人提升精度确保,平整度及抹灰厚度由机器

人执行机构定位精度确保,机器人作业前必须标定 2 项精度。根据 JGJ/T 220—2010《抹灰砂浆技术规程》^[10],抹灰面垂直度、平整度误差控制在 4mm 内,机器人提升精度为 3m 高度偏差控制在 1mm 内,通过提升高垂直度,确保抹灰面垂直度误差控制在 2mm 内,机器人执行机构宽 900mm ,将其左右定位精度控制在 $\pm 0.5\text{mm}$ 内,可保证抹灰面平整度控制在 2mm 内,标定前需检查标定工具,确保标定正确性。

2) 空鼓率 抹灰机器人作业时,通过压力传感器监控执行机构的对墙压力,控制执行机构内部存料量,保证砂浆的墙面压实度为人工作业时的 4 倍以上,在砂浆级配合格、基面处理良好的情况下,压实度增加使机器人抹灰空鼓率降为人工的 $1/40$ 。

由于干粉砂浆在运输、填充时均发生离析现象,因此作业时需定期筛分干粉砂浆级配,确保粗、细骨料及水泥含量达标。若发现砂浆级配出现问题,需及时调整砂浆配合比,同时现场调整粗砂、细砂、水泥比例。

5.3 增效降本

现场实测机器人抹灰效率为 $660\text{m}^2/\text{d}$,机器作业的抹灰单价、机器成本、人均效率、人均收益分别为 $10\text{元}/\text{m}^2$, $3\text{元}/\text{m}^2$, $220\text{m}^2/\text{d}$, $1\ 540\text{元}/\text{d}$ 。人工作业时的抹灰单价、人均效率、人均收益分别为 $10\text{元}/\text{m}^2$, $50\text{m}^2/\text{d}$, $500\text{元}/\text{d}$ 。

抹灰机器人使作业效率提升 4.4 倍,工程师操作机器人抹灰时应尽量提高抹灰覆盖率,减少留白区域与人工抹灰区域,从而减少跟随大工工作量。

机器作业前,作业线放设需严格控制抹灰厚度,从而减少砂浆用量、材料运输压力。协作员应注意落料回收,避免浪费砂浆,通过优化施工组织,尽可能前置所有准备工作,使机器使用率最大化。

6 结语

本文针对机器人自动作业规划、材料性能、作业线设置、人机协作等问题,设计抹灰机器人的施工工法,保障抹灰机器人在满足质量标准的前提下顺利实施,且提高施工效率,为抹灰机器人大规模商业应用进行铺垫及指导。

参考文献:

- [1] 赵峰,王要武,李晓东,等. 2019 年上半年建筑业发展统计分析[J]. 工程管理学报,2019,33(4): 1-3.
ZHAO F, WANG Y W, LI X D, et al. Statistical analysis of construction industry development in the first half of 2019[J]. Journal of engineering management, 2019,33(4): 1-3.
- [2] 张珂,赵金宝,陆峰,等. 砌体墙砌筑机器人结构稳定性分析及优化[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2021,37(2):

- 346-353.
- ZHANG K, ZHAO J B, LU F, et al. Structural stability analysis and optimization of masonry robot for masonry walls [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University(natural science), 2021,37(2): 346-353.
- [3] 王福兴. 砌墙机器人结构设计与分析[D].青岛:山东科技大学, 2018.
- WANG F X. Structure design and analysis of wall-building robot [D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2018.
- [3] 陈翀,李星,邱志强,等.建筑施工机器人研究进展[J]. 建筑科学与工程学报,2022,39(4): 58-70.
- CHEN C, LI X, QIU Z Q, et al. Research progress of building construction robot [J]. Journal of architecture and civil engineering, 2022,39(4): 58-70.
- [4] 陈翀,李星,姚伟,等.BIM技术在智能建造中的应用探索[J]. 施工技术(中英文),2022,51(20):104-111.
- CHEN C, LI X, YAO W, et al. Application exploration of BIM in intelligent construction [J]. Construction technology, 2022,51(20):104-111.
- [5] 刘海波,武学民.国外建筑业的机器人化;国外建筑机器人发展概述[J]. 机器人,1994,16(2): 119-128.
- LIU H B, WU X M. Robotization in foreign construction industry: An overview of development of foreign construction robots [J]. Robot, 1994,16(2): 119-128.
- [6] 于军琪,曹建福,雷小康.建筑机器人研究现状与展望[J]. 自动化博览, 2016(8): 68-75.
- YU J Q, CAO J F, LEI X K. Present situation and prospect of construction robot research [J]. Automation panorama, 2016(8): 68-75.
- [7] 张英楠,汪小林,陈泽,等.面向工地作业环境的砌墙机器人研究[J]. 建筑施工, 2021, 43(10): 2170-2176.
- ZHANG Y N, WANG X L, CHEN Z, et al. Research on wall-building robot facing construction environment [J]. Building construction, 2021, 43(10): 2170-2176.
- [8] 费清琪.建筑机器人的轨迹规划和伺服控制技术研究[D].苏州:苏州科技大学,2018.
- FEI Q Q. Research on trajectory planning and servo control technology of building robot [D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2018.
- [9] 李朋昊,李朱锋,益田正,等.建筑机器人应用与发展[J]. 机械设计与研究, 2018, 34(6): 25-29.
- LI P H, LI Z F, YI T Z, et al. Application and development of building robots [J]. Machine design & research, 2018, 34(6): 25-29.
- [10] 陕西省建筑科学研究院,正太集团有限公司.抹灰砂浆技术规程: JGJ/T 220—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- Shaanxi Academy of Building Science, Zhengtai Group Co., Ltd. Technical specification for plastering mortar: JGJ/T 220—2010 [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2010.

(上接第21页)

- LI C, LI T, LI Z, et al. Prediction and analysis of tunneling parameters of composite formation shield based on BP neural network [J]. Journal of civil engineering, 2017, 50 (S1): 145-150.
- [4] 周小雄,龚秋明,殷丽君,等.基于BLSTM-AM模型的TBM稳定段掘进参数预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39 (S2): 3505-3515.
- ZHOU X X, GOGN Q M, YIN L J, et al. Prediction of mining parameters in stable section of TBM based on BLSTM-AM model [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2020, 39(S2): 3505-3515.
- [5] GAO M Y, ZHANG N, SHEN S L, et al. Real-time dynamic earth-pressure regulation model for shield tunneling by integrating GRU deep learning method with GA optimization [J]. IEEE access, 2020, 8: 64310-64323.
- [6] GAO X J, SHI M L, SONG X G, et al. Recurrent neural networks for real-time prediction of TBM operating parameters [J]. Automation in construction, 2019, 98: 225-235.
- [7] 陈仁朋,刘源,汤旅军,等.复杂地层土压平衡盾构推力和刀盘扭矩计算研究[J]. 地下空间与工程学报,2012,8(1): 145-150.
- CHEN R P, LIU Y, TANG L J, et al. Research on thrust and cutter head torque calculation of soil pressure balancing shield in complex stratum [J]. Journal of underground space and engineering, 2012,8(1): 145-150.
- [8] 李潮,周宏伟,左建平,等.土压平衡盾构刀盘扭矩计算方法与多因素量化分析[J].岩石力学与工程学报,2013,32(4): 760-766.
- LI C, ZHOU H W, ZUO J P, et al. Calculation method and multi-factor quantification analysis of torque of earth pressure balance shield cutter head [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2013,32(4): 760-766.
- [9] 段理文. TBM操作参数智能决策方法研究[D].杭州:浙江大学, 2019.
- DUAN L W. Research on intelligent decision method of TBM operating parameters [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.