

混凝土预制件表面整型机器人设计与实验

文艺博¹, 段中兴¹, 曹建福², 雷小康¹

(1. 西安建筑科技大学 信息与控制工程学院, 西安 710055;

2. 西安交通大学 自动化科学与工程学院, 西安 710049)

摘要: 为解决混凝土预制件 (PC, precast concrete) 复杂异型表面纹理的快速预制, 设计了多自由度表面整型机器人构型和末端刀具, 并提出一种建筑信息模型 (BIM, building information model) 驱动的机器人加工路径规划方法, 实现了异型表面纹理的快速自动化加工; 首先从表面纹理的减材成型机制出发, 分析纹理宽度与切削深度、刀具旋角等因素间的关系; 随后进行 BIM 驱动的机器人路径规划方法研究; 最后开发表面整型机器人原型系统进行了纹理最佳加工条件分析与纹理实际加工实验; 实验结果验证了所提系统及方法的可行性和有效性。

关键词: 混凝土预制件 (PC 构件); 表面整型; 建筑机器人; BIM 路径规划; 减材成型制造

Design and Experiment of Surface Finishing Robot for Precast Concrete

WEN Yibo¹, DUAN Zhongxing¹, CAO Jianfu², LEI Xiaokang¹

(1. School of Information and Control Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

2. School of Automation Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In order to solve the rapid prefabrication of complex and irregular surface texture of precast concrete (PC), a multiple degrees of freedom (DOF) surface finishing robot and its end-effector are designed, and a building information model (BIM) driven robot path planning method is proposed, which realizes the rapid automatic processing of PC components with the irregular surface texture. Firstly, the forming mechanism of the complex irregular surface texture is discussed, and the relationship between the width of the texture and the cutting depth, the rotation angle of end-effector and other factors is analyzed. Subsequently, an off-line path planning method is formulated, which can generate robot processing path from the BIM-driven directly. Finally, a prototype robot is developed to analyze the texture optimal processing conditions and perform some texture surface finishing experiments. The experimental results verify the feasibility and effectiveness of the designed robot and proposed method.

Keywords: precast concrete (PC component); surface finishing; construction robot; BIM path planning; subtractive molding manufacturing

0 引言

混凝土装配式建筑是一种标准化设计、预制化生产、装配化施工的新型建造方式, 具有建筑质量优异、生产快速、资源节约等诸多优点^[1-2]。这种新型建造模式通常基于建筑信息模型 (BIM, building information model) 一体化设计^[3-7], 经构件拆分后在工厂流水化完成各预制混凝土 (PC, precast concrete) 构件的生产, 最后运送至现场进行拼装。该技术是实现建筑工业化的核心技术之一, 受到国家的高度重视和大力推广^[8-9]。

近年来, 基于参数化设计的装配式异型建筑日益流行 (图 1), 此类建筑不仅具有极佳的艺术美感, 而且在平衡外部环境 (如适应复杂地形、风环境等) 与内部功能 (声学性能、热学性能^[10-11]等) 方面亦具有独特优势。然而, 由于现有的 PC 构件生产设备智能化程度不高, 作业自由度有

限, 一般仅能完成抹平、拉毛等简单表面整型处理, 导致此类含有大量非标准化自由曲线或曲面的复杂异型 PC 构件面临难于自动化高效预制的问题。



图 1 具有特殊表面纹理的建筑外墙

收稿日期: 2022-03-17; 修回日期: 2022-04-21。

基金项目: NSFC-深圳机器人基础研究中心集成项目(U1913603)。

作者简介: 文艺博(1997-), 男, 陕西延安人, 硕士研究生, 主要从事建筑机器人方向的研究。

通讯作者: 雷小康(1982-), 男, 陕西富平人, 博士研究生, 主要从事机器人与集群建造技术方向的研究。

引用格式: 文艺博, 段中兴, 曹建福, 等. 混凝土预制件表面整型机器人设计与实验[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(9): 170-176.

目前, 对于异型混凝土构件的制造主要采用增材成型^[12]和等材成型^[13]两种技术。增材成型方面, 以建筑 3D 打印相关技术为代表, 如美国南加州大学的轮廓工艺 (CC, contour crafting)^[14]、意大利学者 Enrico Dini 提出的 D 型工艺 (D-Shape)^[15]和米兰理工学院的激光粉床烧结成型工艺^[16]等, 主要关注异型建筑体或部件的整体制造问题。等材成型工艺方面, 目前主要关注于异型模具的快速制作, 如韩国汉巴大学的自由形式模具 (Free-form Panel)^[17]、瑞士苏黎世联邦理工学院的网格模具 (Mesh-Mould)^[18]等。上述两类成型工艺适用于非规则混凝土构件的整体预制, 但不适应异型表面纹理的加工。为解决此问题, 卡内基梅隆大学提出增材混合制造工艺^[19], 利用机械臂 3D 打印形成标准尺寸的混凝土块, 再通过异型刀具刮除余料创建出异型表面纹理。该方法加工灵活性高, 然而由于沿袭自混凝土一体化成型模式, 因此并不契合 PC 构件的流水化生产方式。

针对以上问题, 本文提出一种面向 PC 构件流水化生产线的减材表面整型机器人系统, 实现 BIM 模型驱动的复杂异型表面纹理的自动化快速作业。首先分析减材制造下的纹理成型机制, 建立整型刀具及其加工轨迹与纹理成型之间的关系, 进而提出异型纹理 BIM 模型驱动的机器人离线路径规划方法。结合 PC 生产线的实际需求, 完成了表面整型机器人的机构及末端刀具设计, 并开发了原型实验系统。相关实验验证了提出的 PC 构件表面整型机器人系统的可行性和有效性。

1 PC 构件异型表面纹理成型机制

利用传统数控雕刻的方式在硬化后的混凝土墙板表面上刻画纹理是最常见的一种减材表面纹理加工方法, 然而该方法可能对混凝土强度造成潜在的危害, 因此如何在混凝土预制墙板上刻画出具有复杂曲线纹理的表面样式就成了一个极具挑战性的问题。本文选择在混凝土墙板没有完全凝固的状态下进行表面纹理加工作业, 在混凝土未凝固状态下作业有以下两点优势: (1) 可保证加工后混凝土墙板的强度不受影响。混凝土在凝固前是不具备强度的, 其成型的最终形体与凝固前的形体相一致, 并且随养护时间的增加^[20], 其强度将逐渐增大, 这样就避免了雕刻刀对凝固后混凝土强度的破坏。(2) 混凝土未凝固前更易加工出多样化的表面纹理。凝固前的混凝土具有优良的可塑性, 刮除余料时刀具所受的阻力更小, 配合形状各异的加工刀具, 将具备比单一化的圆柱铣刀更强的表面纹理加工能力。因此本节后续将着重进行混凝土加工特性分析以及基于未凝固混凝土的减材表面纹理成型机制分析。

1.1 混凝土特性分析

混凝土构件的生产原料为预拌混凝土, 这是一种在凝固前具有优良可塑性的流变性材料^[21], 因其由多种材料搅拌混合而成, 在一定的凝结时间后, 砂粒、石子以及水泥分析之间相互的粘结力逐渐增大抵消水泥浆的流动, 从而可以在边模拆除后维持其形状不发生坍塌, 即所谓的可塑

性。此时混凝土拥有一定的强度, 可承受一定的刀具刮除力而不变形, 即该阶段混凝土具备一定的可加工性。随着时间的推移, 水泥水化反应不断加剧, 水分不断蒸发, 混凝土内部的粘结力成倍增加, 即混凝土开始失去塑性并硬化, 此时便不再具备可加工性。因此, 表面纹理加工应在混凝土硬化前具有最佳可加工性即最佳可塑性的凝结阶段。值得注意的是, 不同的配比和材料种类拌合而成的混凝土的最佳可塑性的阶段不同, 故通过调整原料配比和选择最佳加工时间, 可获得适宜的可加工性来进行纹理加工。

1.2 减材表面纹理成型机制分析

基于减材制造的表面纹理成型即是利用预拌混凝土的可塑性, 在混凝土未完全凝固的条件下结合末端刀具和走刀轨迹完成复杂表面形状的加工。图 2 给出了几种复杂纹理的参数化设计建模的样式, 可见不同切除路径配合三角形、圆弧形等切除轮廓可产生样式各异的表面纹理。其中第一列由规则平面曲线形成的等深纹理。第二列是具有深度信息的等间隔直线纹理, 即刀具进行垂直运动。第三列为具备深度信息的不规则曲线形成的非标准复杂异型表面。值得注意的是, 后两类纹理难以通过传统模具或混凝土 3D 打印来制作。

减材制造模式下, 改变纹理形状的关键为切除路径和切除轮廓, 分别对应于走刀轨迹和刀具轮廓, 如图 3 (a) 所示。其成型过程可看作是末端刀具在混凝土表面沿预设路径进行的一系列刮除动作, 刀具轮廓将显著改变纹理的截面形状。同时, 纹理截面还受到刀具绕垂直轴旋转角度 θ 的影响, 如图 3 (b) 所示。当 θ 不变时, 纹理截面宽度 W 为刀具轮廓在路径法线方向上的投影。反之, 当刀具平面法线与路径切线方向始终平行时, 纹理截面宽度 W 等于刀具截面宽度。注意此处的纹理截面指刀具没入混凝土表面以下部分的轮廓。

表 1 分别以三角形、圆弧形和拱形刀具为例, 给出了当刀具平面法线始终与路径切线平行时, 实际切削宽度 W 与刀具宽度 W_{tool} 、刀具深度 H_{tool} 和切削深度 H 间的关系。当 θ 为 0, 且不随路径变化时, 实际切削宽度为:

$$W = W_{\text{tool}} \cdot \cos\theta' \quad (1)$$

其中: θ' 为相邻两路径点连线与 X 轴的夹角:

$$\theta' = \arctan \left[\frac{\sum_{i=0}^n P_i N_{i,k}(t_{i+1})[1] - \sum_{i=0}^n P_i N_{i,k}(t_i)[1]}{\sum_{i=0}^n P_i N_{i,k}(t_{i+1})[0] - \sum_{i=0}^n P_i N_{i,k}(t_i)[0]} \right] \quad (2)$$

式中, $\sum_{i=0}^n P_i N_{i,k}(t)$ 为刀具运动路径的参数化表达式, 其确定了离散路径点的坐标, 详见第 3 节。

可见, 减材模式下 PC 构件表面纹理成型的主要因素包括: 1) 走刀轨迹; 2) 切削轮廓; 3) 刀具平面绕垂直轴的旋转角度。因此要完成纹理的自动化加工, 需设定刀具运动轨迹 (对应为走刀轨迹)、刀具的轮廓样式 (对应为切削轮廓) 和刀具旋角 (对应为刀具平面绕垂直轴的旋转角度) 等参数。那么基于机器人技术实现 BIM 模型驱动的表面高

效、高质量自动化加工，其中的技术挑战包括如下。

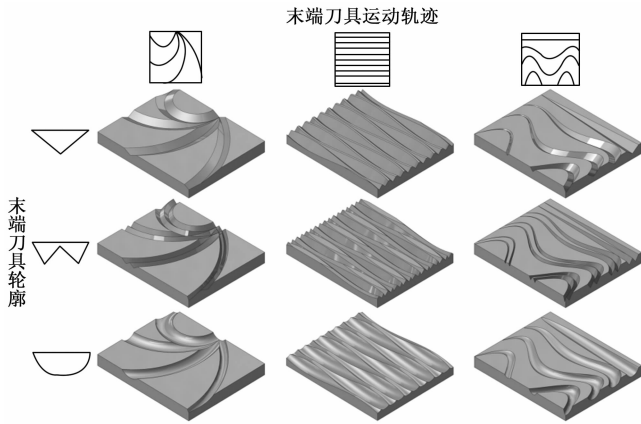


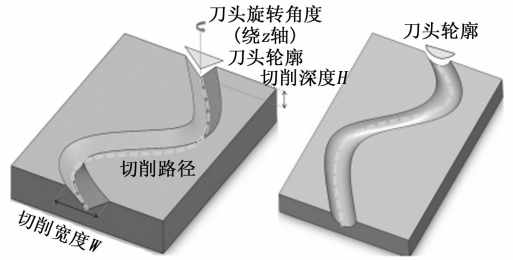
图 2 几种典型的表面纹理模型

1) 多自由度表面整型机器人构型和末端刀具设计。机器人结合定制刀具需实现复杂异型纹理的自动化加工，且 PC 构件实际生产场景为大尺度作业和相对恶劣的加工环境。因此机器人系统的设计在满足多样化纹理的加工以外，如何与流水线生产环境特征相适配也是一个研究重点，即该机器人与原有产线中的自动化集成，不同的机器人构型与产线集成后的效果不同，即对 PC 构件的生产节拍造成影响。此外，末端整型系统的设计也是十分关键的一点。对于纹理加工来说，机器人作为一个移动平台，起着携带末端刀具空间运动从而增多纹理的样式的作用，但纹理加工质量的好坏却取决于加工末端，其尺寸规格、刀具材料以及刀具的加工姿态等都会使纹理的加工品质发生变化。

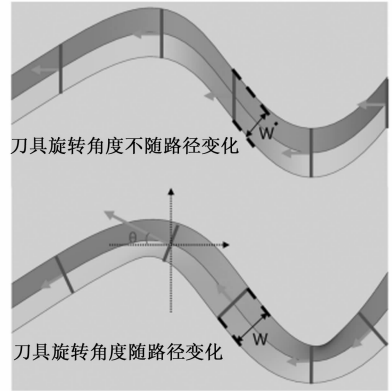
2) BIM 模型驱动的自动化纹理加工方法研究。对于异型表面纹理的设计建模，多通过使纹理子特征与主特征即 PC 构件产生依附和参考关系从而进行参数化设计。每个特征纹理在 BIM 中的表现形式为一系列路径控制点，那么如何将路径控制点转换成为机器人末端的运动路径就成为一个重要的研究内容。

表 1 3 种典型刀具下切削宽度与切削深度等的关系

刀具轮廓	纹理截面宽度表达式
	$W = 2 \left \sqrt{\left(\frac{W_{\text{tool}}}{2}\right)^2 - (r - H)^2} \right $
	$W = \frac{H}{H_{\text{tool}}} W_{\text{tool}}$
	$W = \left(\frac{W_{\text{tool}}}{2}\right) - \left \sqrt{\left(\frac{W_{\text{tool}}}{2}\right)^2 - H^2} \right $



(a) 刀具轮廓、刀具路径等因素对纹理截面的影响



(b) 刀具绕 z 轴旋转角度对纹理形状的影响

图 3 表面纹理成型影响因素示意图

2 表面整型机器人构型设计

本文提出一种机器人化的 PC 构件表面纹理自动化加工方案，并结合目前 PC 构件生产线的实际状况，设计了多自由度表面整型机器人构型与末端刀具。

考虑到表面整型是 PC 构件流水化生产的一环，表面整型机器人需兼容上下游工序，满足以下要求：1) 工作空间。典型的 PC 构件（如预制叠合板）长度一般为 2.2~4 m，预制填充墙最长可达 6 m，要求机器人能够大范围移动；2) 自由度。依据前文纹理成型机制分析，机器人至少须具备 5 个自由度以实现多样化复杂表面纹理的加工，包括三维空间移动的 3 个平移自由度与改变末端刀具姿态的 2 个旋转自由度，以实现纹理特殊点位的加工以及加工倾角的控制；3) 可靠性。PC 构件生产中存在大量粉尘和污水，机器人须保证长时间稳定运行并便于保养维护^[22]；4) 速度与精度。PC 构件的制造误差要求在 1~3 mm 以内^[23]，加工速度过快会导致混凝土开裂，故机器人需满足低速、大负载和非高精度作业的要求。

综合上述因素，本文基于高可靠性的桁架构型设计表面整型机器人系统，总体结构如图 4 (a) 所示。此系统具有 5 个自由度，X、Y、Z 三个平移自由度（移动范围为 10 m×5 m×0.5 m）满足刀具平面移动及深度控制需求。末端具备两个旋转自由度，其中绕 z 轴旋转的自由度控制刀具平面绕垂直轴的旋转；绕 y 轴旋转的自由度则为控制刀具倾斜度（刀具平面与混凝土表面的夹角），以便压实混凝土。此外，考虑到振动对混凝土的稀化效应可显著提高余料的刮除效率，在末端设置振动电机，其与机器人通过

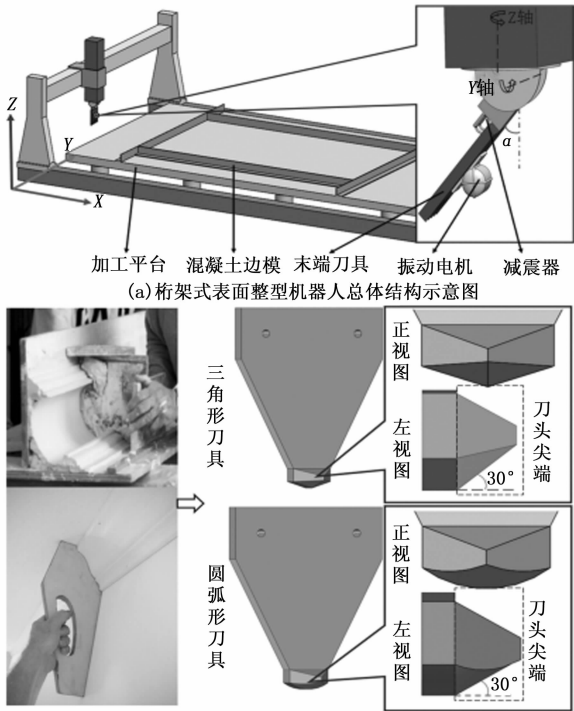


图 4 表面整型机器人总体结构与末端刀具示意图

减震器连接, 使振动有效传导至刀具末端而减少对机器人本体运动精度的影响。

末端刀具的设计需满足两方面要求, 一是与纹理截面适配的刀具轮廓, 二是余料的高效刮除。与传统薄片式抹灰刀相比, 本文采用立体式设计。以图 4 (b) 所示的三角形和圆弧形刀具为例, 定制刀具尖端用于切割分离前方堆积的混凝土, 提高刮除效率。刀头前 30 度倾角可增加与混凝土表面的接触面并压实混凝土, 提高成型后的表面平整度。

3 BIM 驱动的机器人路径规划

PC 构件异型表面纹理的 BIM 模型一般通过参数化建模生成。为实现设计模型的高效自动化加工, 由 BIM 模型直接生成机器人加工路径, 其关键是模型中刀具切除轨迹的自动识别与提取, 并通过坐标变换将路径点转换为机器人末端位姿。

BIM 中多采用准均匀 B 样条曲线描述异型表面。此类曲线具有过首尾控制点的性质^[24], 易于确定路径起点和终点坐标。故采用准均匀 B 样条曲线表示纹理成型的刀轨, 即机器人末端的作业路径。

为建立 BIM 模型和机器人运动路径的联系, 将 BIM 模型的控制点坐标 P_i 作为输入, 输出为机器人的三维路径点坐标 $D_{x,y,z}$ 。设某三维曲线 C 有 $P_0(x_0, y_0, z_0), P_1(x_1, y_1, z_1), \dots, P_n(x_n, y_n, z_n)$ 共 $n+1$ 个控制点, 则基于三维空间内准均匀 B 样条曲线的参数化方程, 可得到 $D_{x,y,z}$ 与 P_i 之间的表达式如下式:

$$\begin{cases} D_{x,y,z}(t) = [P_0 \ P_1 \ \dots \ P_n] \begin{bmatrix} B_{0,k}(t) \\ B_{1,k}(t) \\ \vdots \\ B_{n,k}(t) \end{bmatrix} = \sum_{i=0}^n P_i N_{i,k}(t) \\ 0 \leq t \leq 1, \quad 3 \leq k \leq n \end{cases} \quad (3)$$

式中, t (0 到 1 之间的有理数) 为路径点分辨率控制参数。给定一组参数 t , 将获取到的控制点坐标 P_i 代入式 (3) 中可得到机器人离散化路径点。 k 为阶数, 阶数越小, 曲线路径越逼近控制点。取 $k=3$, 即可复现 BIM 中的样条曲线。 $N_{i,k}(t)$ 为基函数即控制点系数表达式, 通常表示为:

$$\begin{cases} N_{i,k}(t) = \begin{cases} 1, & \text{if } u_i \leq t \leq u_{i+1}, \quad k=1 \\ 0, & \text{others} \end{cases} \\ N_{i,k}(t) = \frac{t-u_i}{u_{i+k}-u_i} N_{i,k-1}(t) + \frac{u_{i+k+1}-t}{u_{i+k+1}-u_{i+1}} N_{i+1,k-1}(t), \\ \text{define } \frac{0}{0} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中基函数节点向量 u 为 0 到 1 区间内的非递减序列 $[u_0, u_1, \dots, u_k, u_{k+1}, \dots, u_n, \dots, u_{n+k}]$, 并且向量中两端节点有重复度 k , 所有内节点均匀分布, 即 u_0 至 u_{k-1} 均为 0; u_{n+1} 至 u_{n+k} 均为 1; u_{k-1+j} 至 u_n 分别为 $\frac{1}{n-k+2}, \frac{2}{n-k+2}, \dots, \frac{n-k+1}{n-k+2}$, 表达式如下:

$$\begin{cases} u_0 = u_1 = \dots = u_{k-1} = 0 \\ u_{k-1+j} = \frac{j}{(n+1)-(k-1)} = \frac{j}{n-k+2}, 1 \leq j \leq n-k+1 \\ u_{n+1} = u_{n+2} = \dots = u_{n+k} = 1 \end{cases} \quad (5)$$

式 (3) 中参数 t 控制生成的机器人路径的离散化程度, 即输出路径点的数量。参数 t 可采用均匀间隔取值, 亦可采用非均匀间隔取值, 如在曲率自适应取值下可提高加工精度。为简便起见, 本文采用均匀离散化方式, 并且通过改变 t 取值的间隔, 实现机器人加工路径从粗略到精细的分辨率控制。

此外, 鉴于切削余料堆积过多会导致混凝土坍塌, 不能一次加工到位, 实际中可进一步采用分层加工的模式。与之相对应, 机器人加工路径可采用分层规划, 即进行多次重复路径加工, 每层加工深度逐步增加以实现表面纹理的逐步凸显。将纹理加工路径点 $D_{x,y,z}(t)$ 的 z 坐标同时增加或减小 Δz 即为下一层路径点坐标 $D_{x,y,z \pm \Delta z}(t)$ 。综上, 即可实现 BIM 模型到机器人加工路径的自动生成。

4 表面整型机器人原型系统开发

为验证上述方案的可行性, 开发了一款 10 : 1 的缩比实验系统 (图 5), 包括机器人本体、控制系统、人机交互界面、末端工具及环境传感器等三部分。

本文只关注于刀具旋转角度不随路径变化情况下的表

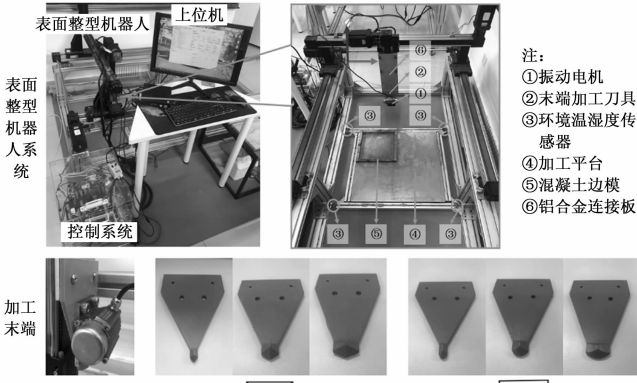


图 5 表面整型机器人系统

面纹理加工，因此机器人本体采用三轴桁架构型。考虑到 PC 构件的加工制造精度要求在 1~3 mm，属于非高精度，且加工速度在 50 mm/s 以内，故采用三套两相四线制的 86 步进电机驱动整机运动，其中垂直方向选用具备电磁抱闸功能的电机以实现断电自锁，提高机器人系统的安全性。分别选用移动距离为 1 000 mm、800 mm、500 mm 的直线模组来搭建表面整型机器人的机械结构。首先通过光轴和联轴器将两条 X 导轨连接以保证同步运动，并将两个立柱分别固定在 X 滑块上。Y 轴导轨两端分别固定于两个立柱，Z 轴导轨与 Y 轴滑块固定。最终的平面加工范围为 600 mm × 600 mm，垂直方向最大移动距离为 300 mm，末端最大速度 200 mm/s，末端定位精度为 2~3 mm，最大负载 10 kg。

控制系统由网络型运动控制卡、步进驱动器构成，各轴均设限位开关构成。运动控制卡的型号为摩升泰 NMC3401，单卡最多支持 4 轴连续轨迹运动。步进驱动器为与 86 步进电机适配的 DM860H 驱动器。限位开关选择 TL-Q5MC1-Z 常开型感应式接近开关，感应距离为 5 mm，即当金属靠近该限位开关 5 mm 以内时，信号线输出高电平。每个轴两端分别安装一个限位开关，一端为正限位，另一端为原点限位和负限位。值得注意的是，原点和负限位共用一个限位开关，即将该限位开关的输出信号共同接至运动控制卡的轴负限位和轴原点限位。

人机交互界面功能模块包括以下四部分：①单轴点位运动控制；②多轴多点连续插补运动控制；③原点归零；④机器人本体各关节运动信息及加工路径信息的显示。每个模块中，用户均可方便设置各轴的位置、速度、加速度、点动模式、回原点方式等参数，用户与表面整型机器人的交互更加友好，还可以实时监测各轴的位置和运行速度，显示当前机器人的离散运动路径点。在该界面顶部，还增加了运动控制卡的打开、关闭功能以及急停。此外，还具备缓冲区剩余空间的计算和显示的能力。

整型末端是表面纹理加工的关键部件，由定制刀具和振动电机构成，不同的刀具结合机器人多样化的运动轨迹即可完成复杂异型纹理的制作。定制整型刀具由 PLA 材料 3D 打印而成，可手动更换。本节按照第 2 节中设计的刀具

轮廓进行实际制作，共制作出了两组不同轮廓（三角形和圆弧形）、不同规格（刮除宽度分别为 10 mm、20 mm 和 30 mm）的整型刀具，刀具刮除深度均为 5 mm。外部振动采用可调频偏心振动电机，该电机固定于末端刀具，使其发散振动限制在机器人行进方向。振动频率在 1~100 Hz 范围内连续可调。此外，机器人四周布置多个温湿度传感器，以研究环境变化对混凝土性能的影响。

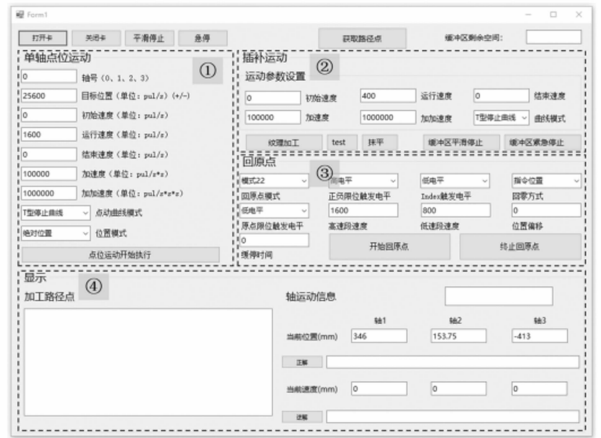


图 6 表面整型机器人上位机界面

5 表面整型实验与分析

参照实际 PC 构件加工的原料配比，实验选择水、P.C42.5 型水泥、细砂（粒径在 2 mm 以内）的配合比为 0.4 : 1 : 0.5。此配比混凝土具备足够的可加工性，可保证成型过程中纹理维持形状不坍塌。混凝土试件尺寸为 300 mm × 250 mm × 20 mm（长 × 宽 × 高）。环境温度为 26~28 °C，空气相对湿度为 60~72%。PC 构件表面纹理 BIM 模型利用 Revit 软件建立，通过参数化设计和二次开发获取纹理路径的控制点坐标，利用第 3 节中的路径规划方法离线规划出机器人的末端作业路径。

5.1 减材表面纹理加工步骤

为验证基于减材工艺的混凝土表面纹理自动化加工的可行性，采用较为简单的等厚分层的方式进行作业，且经过多次实验总结后，规定表面纹理的精细加工主要由表面抹平、纹理粗加工、纹理精加工和纹理修整四步组成，各步骤的具体表述如下。

1) 表面抹平。混凝土浇筑后立即进行人工或自动抹平，一般做平面往复运动以清除多余的堆积物，为机器人纹理加工提供平整的表面。这是纹理加工的前序步骤，混凝土表面平整与否将很大程度上影响加工效果的评判。

2) 纹理粗加工。多次重复振动刮除，每次刮除深度增加 1~2 mm，使纹理特征逐步凸显。此步骤可减小切削过程中余料对周围材料的压力，避免单次切削过深使余料堆积的问题。

3) 纹理精加工。加工深度增加 0.5 mm，利用高频振动对混凝土的稀化作用使水泥浆填补上一步粗加工产生的纹理凹陷，再次清除余料及表面水，提高平整度。

4) 纹理修整。经以上步骤后会使得混凝土表面泌水并在纹理凹槽中聚集, 即水泥浆回流现象。待混凝土静置凝固 15 分钟并重新清理刀具表面后再次对纹理进行加工, 刮除深度与步骤 (3) 相同, 旨在清除纹理积水并提高平整度。

以上步骤是从粗加工逐步向精加工过渡。后续实验均基于此流程进行。

5.2 表面纹理最佳加工条件分析

为获得理想的纹理加工效果, 通过实验分析不同加工时机和振动频率对纹理成型的影响规律。

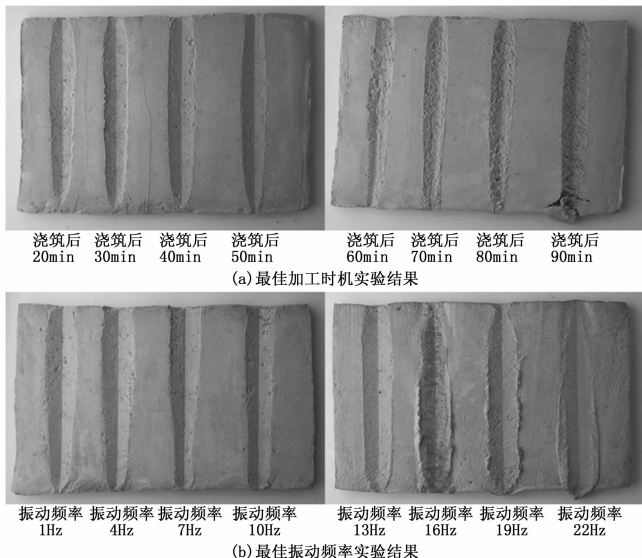


图 7 表面纹理加工条件实验结果

1) 最佳加工时机实验与分析。

最佳加工时机即混凝土浇筑完成至开始加工的凝结时长 T 。在原材料种类和配合比不变的条件下, 凝结时长会改变混凝土的流动性和可加工性, 影响纹理成型的效果。凝结时间过短会导致坍塌度大, 凝结时间过长又使得混凝土硬度太高而无法加工。采用三角形刀具, 加工深度 5 mm, 运动路径为直线, 分别在浇筑后 20~90 min 时进行整型加工, 实验结果如图 8 (a) 所示。很明显, 随着加工开始时间延后, 纹理表面粗糙度逐渐降低并且纹理轮廓特征愈发明显, 最终在凝结 50 min 时成型效果最佳。加工时机继续推迟, 纹理表面粗糙度上升并出现裂缝。具体而言, 浇筑 20 min 内混凝土因凝固时间太短, 坍塌度大, 无法加工。凝固 20~30 min 时其具备一定的可塑性, 但粘度较大, 机器人行进时聚集刀头的余料会附带刮除额外的材料, 导致纹理宽度超出刀头轮廓宽度, 使纹理表面平整度降低。当凝固时间超过 60 min 后, 混凝土浆体逐渐失去塑性, 开始凝结硬化。浇筑后 60~80 min 时加工, 纹理特征逐渐模糊, 并出现表面撕裂现象, 平整度降低。浇筑后 90 min 时, 由于混凝土硬度过高而导致边缘塌陷。

2) 最佳振动频率实验与分析。

混凝土在捣振过程中表面会产生浮浆^[25], 少量浮浆可

防止表面过快干燥, 便于表面修整。基于此现象, 考虑在机器人运动过程中引入外部振动, 通过调节振动频率 f , 在加工过程中使砂浆泌出部分拌合水并聚集在刀具末端, 使得表面趋于平整。在最佳加工时机的基础上进行振动实验, 振动频率从 1~22 Hz 变化。

实验结果如图 8 (b) 所示, 相较于无振动, 振动频率为 1~13 Hz 时可明显增强纹理的轮廓特征, 并在 10~13 Hz 时具备较好的表面平整度。振动使得刀具尖端得以更高效的破除前方混凝土材料, 但振动频率超过 16 Hz 时, 纹理边缘出现余料堆积现象, 并且振动稀化作用使得纹理特征逐渐弱化。因此, 适度振动可提高刀具刮除效率, 但过高的振动频率会使混凝土稀化甚至坍塌。

综上, 在给定混凝土配比下, 浇筑后 50 min 并配合 13 Hz 的振动可获得最佳表面整型效果。值得注意的是, 最佳加工时间和振动频率会随混凝土材料配比和环境湿度的不同而发生变化, 实际应用中开展实验具体确定。

5.3 表面纹理成型实验验证与分析

本节验证不同刀具轮廓与轨迹组合的纹理实际成型效果。如图 8 所示, 共设计了 3 种纹理样式, 每种样式分别用三角形和圆弧形刀具加工。样式 1 为相同轮廓、不同宽度刀具在同一混凝土试件上加工的效果。样式 2 的刀具路径由直线和准均匀 B 样条曲线路径构成。样式 3 展示了刀路交叉的纹理特征。实验结果证明, 基于减材制造的 PC 构件表面纹理自动化加工方法具备创造异型表面的能力, 末端刀具轮廓和机器人运动规划所形成的刀轨使表面纹理具有灵活广阔的设计空间。相比于圆弧形刀具, 三角形刀具刻画的纹理线条特征更为锋锐, 特别在样式 3 的刀具轨迹交接区域, 其纹理边缘突变明显, 轮廓阴暗对比强烈。

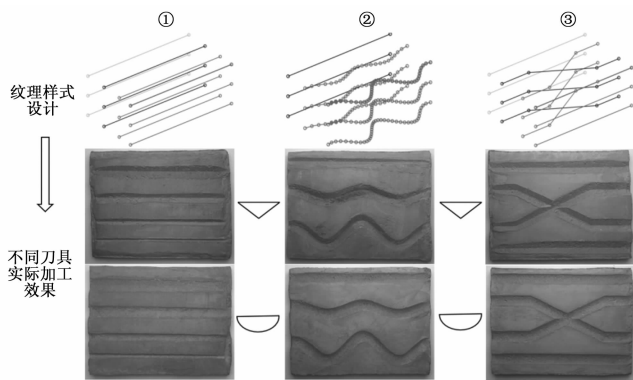


图 8 不同刀具轮廓与不同路径形成的表面纹理实际加工验证

实验中也发现了一些问题, 如: 1) 余料堆积, 其产生的压力会导致混凝土塌陷。2) 刀具旋转角度一定程度上限制了刀轨交叉纹理的加工。刀具尖端必须保证面向机器人的行进方向, 否则刀具轮廓特征无法在纹理上清晰体现。为此, 可增加末端旋转轴, 使刀具姿态成为受控变量, 提高加工自由度。3) 纹理加工的效果难以准确评判。可结合三维激光扫描和 BIM 技术量化纹理加工的误差^[26]。

6 结束语

本文设计实现了一种 PC 构件表面整型机器人系统, 可完成复杂异型表面纹理的自动化快速加工。在减材制造模式下, 分析了表面纹理的成型机制, 并提出异型表面纹理 BIM 模型驱动的机器人路径规划方法。根据 PC 构件生产线的实际情况和纹理加工需求, 设计了多自由度表面整型机器人构型及末端工具, 并开发了原型系统。最后进行了纹理的最佳加工时机、振动频率实验和复杂表面纹理的实际加工实验, 验证了所提表面整型机器人方案及技术路线的可行性和有效性。

后续工作将重点关注以下内容: 1) 整型效果量化评价方法研究。包括整型结果和模型间的几何重合度及其表面粗糙度测定。2) 机器人构型优化及智能加工末端改进。增加机器人作业末端自由度, 提高加工灵活性; 设计定向线性振动装置, 开展单方向线性振动和多方向混合振动的影响研究。3) 面向大粒径骨料的机器人走刀轨迹优化和针对表面纹理热学、声学等性能的机器人路径规划方法研究。

参考文献:

[1] OESTERREICH T D, TEUTEBERG F. Understanding the implications of digitisation and automation in the context of Industry 4. 0: A triangulation approach and elements of a research agenda for the construction industry [J]. *Computers in Industry*, 2016, 83 : 121 - 139.

[2] BOCK T. The future of construction automation: Technological disruption and the upcoming ubiquity of robotics [J]. *Automation in Construction*, 2015, 59: 113 - 121.

[3] ASPRONE D, MeENNAC, BOS F P, et al. Rethinking reinforcement for digital fabrication with concrete [J]. *Cement and Concrete Research*, 2018, 112: 111 - 121

[4] ZHENG J. Design method of assembly architecture based on BIM Technology [J]. *International Journal of New Developments in Engineering and Society*, 2017, 1 (4): 43 - 46.

[5] LIU Z, LU Y, PEH L C. A review and scientometric analysis of global building information modeling (BIM) research in the architecture, engineering and construction (AEC) industry [J]. *Buildings*, 2019, 9 (10): 210.

[6] LU Y, WU Z, CHANG R, et al. Building Information Modeling (BIM) for green buildings: A critical review and future directions [J]. *Automation in Construction*, 2017, 83: 134 - 148.

[7] SACKS R, GIROLAMI M, BRILAKIS I. Building information modelling, artificial intelligence and construction tech [J]. *Developments in the Built Environment*, 2020, 4: 100011.

[8] WANGLER T, LLORET E, REITER L, et al. Digital concrete: opportunities and challenges [J]. *RILEM Technical Letters*, 2016, 1: 67 - 75.

[9] KENNY J J. Digital Fabrication and the Future of Architecture [J]. *Advances in Robotics & Automation*, 2021, 10 (3) : 1 - 2.

[10] CUPKOVA D, Promoppatum P. Modulating Thermal Mass Behavior Through Surface Figuration [C] // ACADIA 2017:

Disciplines & Disruption. 2017.

[11] CUPKOVA D, Azel N. Mass regimes: geometric actuation of thermal behavior [J]. *International Journal of Architectural Computing*, 2015, 13 (2): 169 - 193.

[12] LIM S, Buswell R A, Le T T, et al. Developments in construction-scale additive manufacturing processes [J]. *Automation in construction*, 2012, 21: 262 - 268.

[13] STAVRIC M, Kaftan M. Robotic Fabrication of Modular Framework for Non-Standard Concrete Structures [C] // ECAADE Conference. Faculty of Architecture, 2012: 431 - 437.

[14] KHOSHNEVIS B. Automated Construction By Contour Crafting-Related Robotics [J]. *Automation in Construction*, 2004, 13 (1): 5 - 19.

[15] CESARETTI G, Dini E, Kestelier X D, et al. Building components for an outpost on the Lunar soil by means of a novel 3D printing technology [J]. *Acta Astronautica*, 2014, 93 : 430 - 450.

[16] CAPRIO L, Demir A G, Previtali B, et al. Determining the feasible conditions for processing lunar regolith simulant via laser powder bed fusion [J]. *Additive Manufacturing*, 2020, 32: 101029.

[17] LEE D, LEE S G, KIM S. Composite phase-change material mold for cost-effective production of free-form concrete panels [J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2017, 143 (6): 04017012.

[18] HACK N, LAUER W V. Mesh - Mould: Robotically Fabricated Spatial Meshes as Reinforced Concrete Formwork [J]. *Architectural Design*, 2014, 84 (3): 44 - 53.

[19] BARD J, CUPKOVA D, WASHBURN N, et al. Robotic concrete surface finishing: a moldless approach to creating thermally tuned surface geometry for architectural building components using Profile-3D-Printing [J]. *Construction Robotics*, 2018, 2 (1-4): 53 - 65.

[20] 苏沛东, 甄红卫, 柴娜, 等. 一种混凝土预制构件智能循环养护系统设计 [J]. *计算机测量与控制*, 2019, 27 (11): 239 - 242.

[21] 洪雷. 混凝土性能及新型混凝土技术 [M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2005.

[22] STYLIANOS D, SONG S G. Building robotics design for construction Design considerations and principles for mobile systems [J]. *Construction Robotics*, 2019, 3 (2) : 1 - 10.

[23] 中国建筑标准设计研究院. JGJ 1-2014 装配式混凝土结构技术规程 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.

[24] 施法中. 计算机辅助几何设计与非均匀有理 B 样条 (修订版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2013.

[25] SAFAWI M I, IWZKI I, MIURA T. A study on the applicability of vibration in fresh high fluidity concrete [J]. *Cement and concrete research*, 2005, 35 (9): 1834 - 1845.

[26] 钱海, 马小军, 包仁标, 等. 基于三维激光扫描和 BIM 的构件缺陷检测技术 [J]. *计算机测量与控制*, 2016, 24 (2): 14 - 17.