

复杂场景下集成协作式木结构智能建造技术*

Intelligent Construction Technology of Integrated Collaborative Timber Structure in Complex Scene

张 隆^{1,2}, 谢佳硕¹, 乔文涛^{1,3}, 孟丽军¹

(1. 石家庄铁道大学, 河北 石家庄 050043; 2. 河北比智智能科技有限公司, 河北 石家庄 050000;
3. 道路与铁道工程安全保障省部共建教育部重点实验室(石家庄铁道大学), 河北 石家庄 050043)

摘要: 为提高木结构建造技术数字化水平, 将已有工艺与机械臂运动系统相结合, 形成数字化建造工具系统。以切割、开榫、铣削及开孔四种工艺为例, 对木结构数字建造技术进行剖析与设计, 辅以建造装备系统、控制系统形成高度集成化的加工系统, 借助可视化编程技术手段对工具系统运动轨迹、几何数据分析、自动适配工具及路径自动规划进行标准程序开发, 选取斗拱结构进行建造实践。结果表明: 所提出的加工系统可精确、高效完成非标准化、定制化异形结构建造任务, 开发的标准程序实现了建构逻辑集成化应用, 输入构件模型可自动生成机械臂可识别路径, 通过实际建造验证了加工系统和标准程序的可行性及适用性。

关键词: 数字建造; 古建筑; 榫卯节点; 机械臂; 参数化设计

中图分类号: TU366.2; TP242.2 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249(2024)02-0140-08

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.02.026

ZHANG Long^{1,2}, XIE Jiashuo¹, QIAO Wentao^{1,3}, MENG Lijun¹

(1. Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. Hebei Bizhi Intelligent Technology Co., Ltd., Shijiazhuang 050000, China;

3. Key Laboratory of Roads and Railway Engineering Safety Control (Shijiazhuang Tiedao University),
Ministry of Education, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: In order to improve the digital level of wood construction technology, the existing process and the robot arm motion system were combined to form a digital construction tool system. Taking cutting, tenoning, milling and hole-opening as examples, the digital construction technology of wood structure is analyzed and designed, and the highly integrated machining system is formed by the construction equipment system and control system. The standard program development of tool system trajectory, geometric data analysis, automatic adaptation tool and path automatic planning is carried out by means of visual programming technology. The bucket arch structure is selected for construction practice. The results show that the proposed machine system can accurately and efficiently complete the construction task of non-standardized and customized special-shaped structures. The developed standard program realizes the integrated application of construction logic. The input component model can automatically generate the identifiable path of the manipulator. The feasibility and applicability of the machine system and the standard program are verified by actual construction.

Keywords: digital construction; ancient building; mortise and tenon joint; robotic arm; parametric design

* 基金项目: 中央引导地方科技发展资金项目(206Z7601G); 河北省自然科学基金面上项目(E2020210074)。

作者简介: 张 隆(1997—), 男, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向: 智能建造相关研究。

通信作者: 乔文涛(1982—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 智能建造与装配式结构相关研究。

收稿日期: 2023-12-14

0 引言

长期以来,建筑业是劳动力较密集领域,其本身具有非结构化、个性化特征,因此传统建造工艺难以实现标准化、批量化、高效化生产。随着人口红利浪潮的逐渐退却,机器换人是未来建筑行业发展趋势,一些传统建造手段正在被高新技术所颠覆^[1-2]。机械臂技术的数字化建造技术加速了建筑业的快速转型,国内外相关学者针对机械臂在建筑领域应用已开展相关研究。2002年,格马奇奥·科勒研究所(Gramazio Kohler Research)^[3-5]研发了一种数控加工辅助控制应用,安装于手机端用以控制构件尺寸、材料等属性,实现了数控加工的自动化可控性;马蒂亚斯·科勒(Matthias Kohler)和法比奥·格拉玛齐奥(Fabio Gramazio)^[6]于2005年在苏黎世联邦理工学院成立了第一间基于机械臂技术的数字建造实验室;格马奇奥·科勒研究所^[7-8]于2016年自主设计建造了序列屋顶项目,该项目的实施标志着采用建筑机器人可完成非标木构件建造任务;清华大学徐卫国团队^[9-12]对基于机械臂的数字建造技术展开研究,将3D砂浆打印技术与建筑机器人结合,发明了基于机械臂的自动砌筑系统;实现了高度自动化、集成化数字建造系统;同济大学袁烽团队^[13-14]对机械臂控制系统和仿真模拟设计算法进行深入研究,致力于实现自动化、便捷化的机械臂控制,在理论研究方面对生形至建造 workflow 进行探讨实践;王泽雄等^[15]、Qiao等^[16]提出了一种新型的木结构榫卯连接形式,并针对榫卯节点复杂构造提出对应的基于建筑机器人及计算机技术的数字加工系统。借助机器人高度灵活运动性及开源硬件可拓展性可实现复杂增材与减材制造,但单一的建造技术很难满足复杂木结构建造任务,且工业化生产将设计阶段与建造阶段进行分化甚至割裂,数据转化流程过于依赖使用者编程基础^[17]。

随着研究的进一步深入开展,木结构智能建造技术将从实验研究向工业化生产应用领域渗透,为应对工厂端木结构榫卯节点多样化建造需求,不仅在建造工艺及应用工具上进行功能性创新,还在设计建造数据联接中实现路径编程的易操作性和集成性,便于使用者进行更高效的人机协作。针对榫卯连接构造特点,设计研发了基于机械臂控制的木构

加工系统,借助参数化设计方法在Grasshopper编程环境中按照特定的逻辑开发标准程序,包括机械臂路径自动规划与自动适配选择工具两部分,标准程序设计目的在于将设计数据与建造流程进行有效连接形成信息闭环,使用者以更为便捷、简单的协作方式介入数字化木构建造流程中。研究结果为木构建造技术集成化、柔性化应用提供了一定参考价值。

1 基于机械臂的木结构智能建造技术

木结构智能建造技术应用场景中,单一工具应用无法满足复杂多样化的生产环境,针对榫卯连接节点建造需求,设计了一种基于六轴机械臂的加工系统,由建造装备系统、工具系统及控制系统组成,整体设计方案如图1所示。

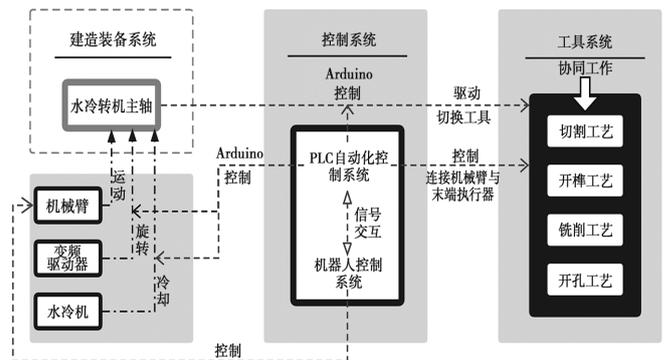


图1 木构加工系统
Fig.1 Wood processing system

1.1 建造装备系统

加工系统核心硬件设施为建造装备系统,由六轴机械臂(以KUKA机械臂为例)、水冷转机主轴、水冷机、变频驱动器及相关配件构成,机械臂本体是一种开源的应用工具,具有较高的可拓展性及灵活性,单一的机械臂运动只能完成6个轴的旋转工作,无法完成一项工序的加工,只有通过与其他外部设备、硬件工具集成才具备一定作业能力,在机械臂末端法兰盘处安装水冷转机主轴辅助工具系统完成建造任务。图2所示为建造装备系统连接示意图。变频驱动器借助PLC自动化控制系统调整水冷转机主轴运行频率、转动方向等参数,与机械臂控制系统协同工作完成复杂建造任务。水冷转机主轴集成了工具系统所需的驱动、信号等模块,为后续工具拓展及灵活配置奠定了基础。

研究与应用



图2 建造装备系统
Fig.2 Construction equipment system

1.2 工具系统

木构造系统中依据加工任务需求,将对应的减材工具集成于建造装备系统上,针对特定的应用场景进行工具组合及协同应用,形成具有拓展性、灵活性的工具系统。针对木结构榫卯节点构造特征,设计研发4种典型的木构造工具,可满足切割、开榫、铣削和开孔功能性应用,实现木结构连接节点的定制化、高效化减材加工。

1.2.1 切割工具

根据六轴机械臂运动特点选用圆锯完成切割工具设计,借助机械臂多自由度的灵活性,实现三维空间下的多样化切割建造任务,根据榫卯节点截面特点进行高效的多空间角度精准切割,将木构切割工艺提升到新的维度。如图3(a)所示为切割刀具工作示意,将木工专用圆锯片改装至水冷转机主轴末端,并通过变频驱动器控制旋转速率、旋转方向等运动参数。

1.2.2 开榫工具

设计一种用于高效建造方形榫孔的工具,由方凿和螺旋钻组合而成的方凿对矩形截面节点加工具有高度适配性,根据节点截面规格尺寸及方凿工具参数设计运动轨迹,并由六轴机械臂带动方凿进行线性往复式序列加工。如图3(b)所示为开榫刀具工作示意,螺旋钻内置于方凿之中,由水冷转机主轴带动其旋转开孔,方凿端部呈四个尖角型,用于辅助螺旋钻开出方形榫孔,且两侧设有U形排屑孔便于工作中碎木屑的排出。因方凿需固定于水

冷转机主轴上且不能跟随螺旋钻进行旋转,故设计刀具固定夹持装置,在Rhino软件中对该装置进行建构调试,并借助3D打印技术采用PLA材质进行实体模型制作。

1.2.3 铣削工具

为应对复杂异形木构件节点建造需求,借助六轴机械臂的运动性和灵活性辅助铣削工具完成三维体量个性化加工。如图3(c)所示为铣削刀具工作示意,铣削工作流程中,刀具高速旋转对所需处理的构件以切削的减材方式进行逐层加工,切下的切削层称为切屑。铣削工艺的运动原理包括主运动和进给运动两部分,主运动是铣削刀具在水冷转机主轴驱动下在构件表面完成切屑工作,进给运动是铣削刀具在六轴机械臂带动下按照预设运动轨迹进行持续切屑的工作过程。因铣削工艺的原理在于逐层对构件进行切屑,故其建造过程是一项及其耗时的加工工艺,但铣削工艺的精密性和可塑性是其他工艺无法替代的。

1.2.4 开孔工具

圆形榫眼是木结构榫卯连接中较为常见的一种形式,借助圆形开孔刀具可以准确、高效的在木构件上开出圆孔,辅助以六轴机械臂可节省放线、测量等工序,根据预设运动轨迹精准的完成连续性开孔工作,充分发挥六轴机械臂的运动性和集成性。图3(d)为圆形开孔刀具工作示意,根据构件孔径需求选择相应规格的圆形开孔刀具,刀具在六轴机械臂的驱动下向下按压开孔,调整六轴机械臂运动轨迹的工作平面也可实现倾斜开孔任务,可满足构件非标的定制需求。

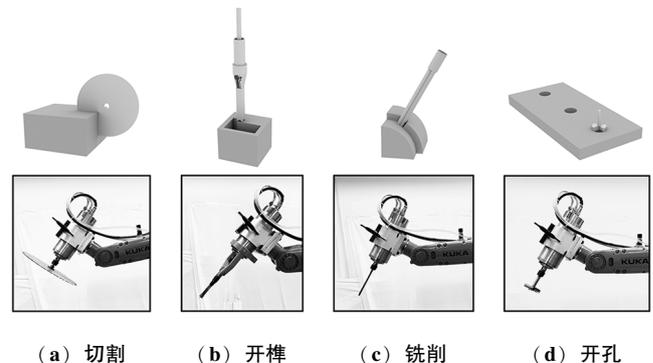


图3 工具系统
Fig.3 Tools system

1.3 控制系统

控制系统是 workflows 的核心逻辑，以建造装备及工具系统为载体，辅助以参数化设计方法并借助 Arduino、PLC 信号交互技术实现木构加工系统的自动化、协同化、集成化运行。如图 4 所示为控制系统运行流程，利用 Grasshopper、KUKA I Prc 等参数化设计软件对机械臂运动轨迹进行可视化编译，并通过

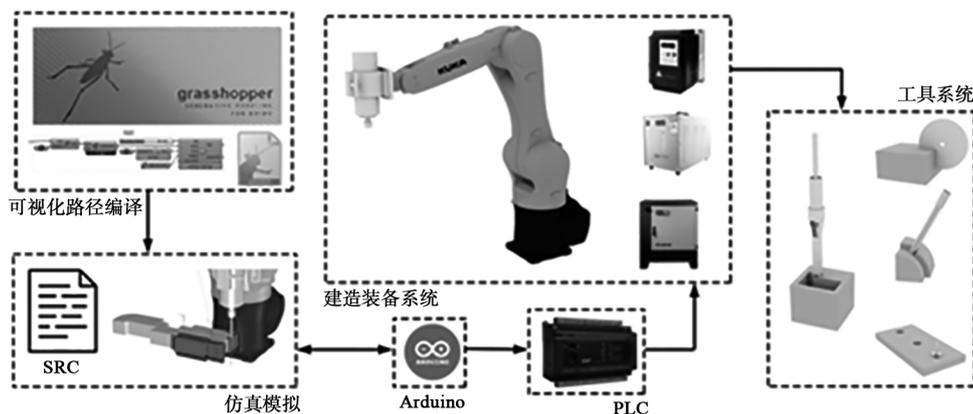


图 4 机械臂控制系统
Fig. 4 Robotic arm control system

2 基于参数化设计方法的路径编译

针对提出的多样化木结构智能建造技术，借助 Grasshopper 可视化编程软件进行模块化路径编译，路径数据转译过程可描述为以下步骤：初始模型创建—获取模型几何信息—建立几何信息逻辑—选取建造工艺—确立物理信息坐标参数—数据转译。几何信息参数由点位坐标、几何形状、轮廓曲率、向量等信息构成，根据相关参数分析选取相应的加工工艺、材料特征，将最终的几何数据转译成六轴机械臂可识别的数据，如坐标定位、运动姿态、运动速率等。

2.1 切割技术路径编译

根据圆锯工具线性切割和 Grasshopper 软件编程特点，将路径编译过程划分为平面切割和倾斜切割两种方式，路径编译中的每个控制点、控制向量都具有相应的工作平面及坐标信息，赋予控制点不同的工作平面可调整六轴机械臂运动姿态、运动轨迹等参数。

平面切割路径编译方法如图 5 所示，具体描述为以下步骤：（1）根据连接节点构造获取减材部分模

Rhino 图形窗口对建造流程展开仿真模拟，调整参数获取最优建造路径，最终得到机械臂可识别的 SRC 文件。PLC 是机械臂与外接设备的媒介控制器，用于连接水冷机、变频驱动器等设备，Arduino 微处理器协调整个加工流程中软硬件之间的工作逻辑，以实现木构自动化、智能化建造模式。

型；（2）对减材部分模型进行几何数据分析，提取其切割面及切割控制向量；（3）在切割控制向量上设定若干个控制点位；（4）将控制点位依序列进行连接并赋予其工作平面；（5）转译完成的数据输入至 KUKA I Prc 中生成路径。

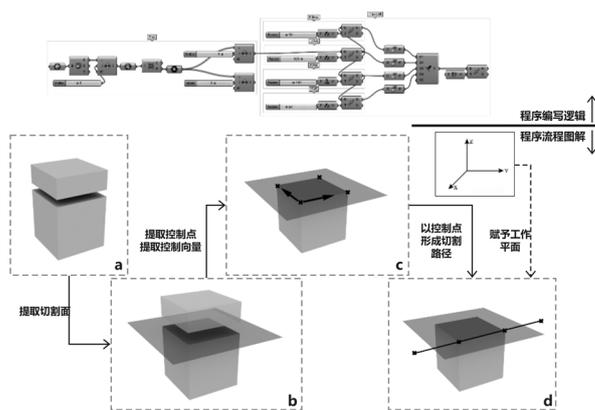


图 5 平面切割路径编译
Fig. 5 Plane cutting path compilation

倾斜切割路径编译方法如图 6 所示，与平面切割路径的不同点在于：在上述步骤 4 中，不能直接调用工作平面运算符，需由控制向量与基于切割面的法向量运算而成。

研究与应用

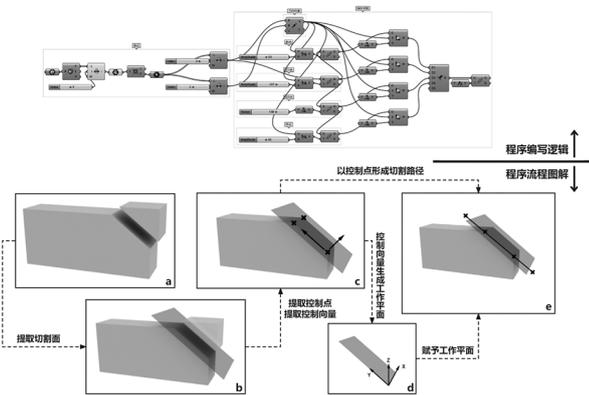


图 6 倾斜切割路径编译
Fig. 6 Tilt cutting path compilation

2.2 木构开榫技术路径编译

开榫工艺路径编译方法如图 7 所示，具体描述为以下步骤：(1) 根据木构连接节点构造获取减材部分模型；(2) 提取减材模型顶面，以此面为基础设计路径；(3) 以方凿端部轮廓为参数，将减材模型顶面划分网格，并提取所有网格的中点；(4) 将网格中点借助编织算法进行“之”字形排序；(5) 处理完成的网格中点复制至减材模型底面，并将顶面和底面的点进行交叉组合排序形成路径的控制点，赋予控制点工作平面输入至 KUKA | Prc 中生成路径。

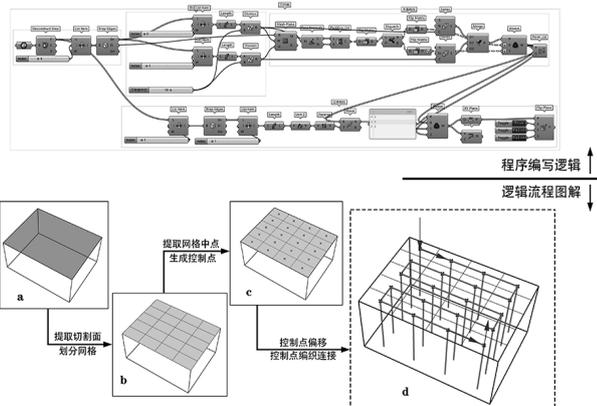


图 7 开榫工艺路径编译
Fig. 7 Tenoning technology path compilation

2.3 木构铣削技术路径编译

铣削工艺路径编译方法如图 8 所示，具体描述为以下步骤：(1) 根据木构连接节点构造获取减材部分模型；(2) 将模型进行等高线划分，高度为铣刀工作时的进给运动量；(3) 向内部中心偏移等高线，宽度为铣刀半径，并以此宽度向中心进行等差偏移，

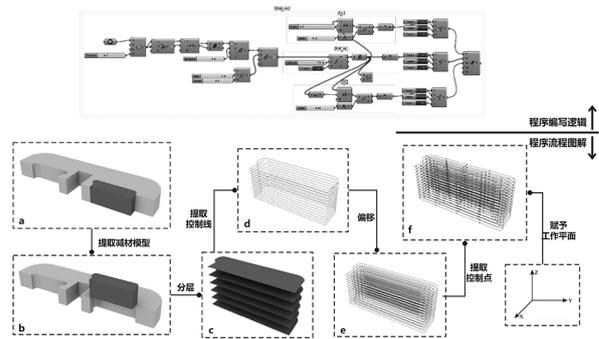


图 8 铣削工艺路径编译
Fig. 8 Milling technology path compilation

获取路径设计控制线；(4) 将控制点进行等距离划分，提取控制点，控制点个数用于调整构件切割面平滑度；(5) 对所有控制点进行排列组合，赋予工作平面输入至 KUKA | Prc 中生成路径。

3 标准程序开发

3.1 适配工具标准程序设计

将切割、开榫、铣削、开孔等建造技术组合形成工艺库，构件深化设计阶段提取几何数据信息后如何精准匹配最优的建造工艺是标准程序开发的关键。针对几何数据信息的提取、拆分、运算并自动选择适配的建造工艺进行相关研究，通过编写数据连接逻辑算法对输入的几何数据进行分析，并借助模块化算法对数据进行运算对比，自动匹配最优的建造工艺。构件加工中，榫卯连接节点是结构体系中最复杂且最重要的部分，采用凹凸截面相结合的方式连接，凹的部分为卯，凸的部分为榫，分析榫卯节点构造特征，将适配标准程序分为榫和卯两个模块，且各模块从工艺库中调用的建造工艺不同。

3.1.1 榫

榫模块适配工具标准程序开发以切割、开榫、铣削、开孔四种工具为例，借助 Grasshopper 软件编写程序运算逻辑。

选择不同的建造工具其加工效率迥然相异，适配运算程序中会优先选择圆锯，其次为方形凿、开孔刀具、铣刀，虽然铣刀具有良好的适用性，但其为逐层切削运动，相对其他几种工具效率较低，故将其放置于工具适配的最后部分。

榫模块适配工具标准程序逻辑图如图 9 所示，具体描述为以下几个步骤：(1) 提取减材模型轮廓线

研究与应用

形成独立的线单元；(2) 分析线单元判断模型是否含有曲面；若未包含曲面分流至步骤 3，若包含分流至步骤 6；(3) 将共面不相邻的线单元进行对比，判定是否相等，并对比对角线，若两者均相等则为矩形，分流至步骤 4，反之分流至步骤 7；(4) 提取矩形相邻三个线单元，与圆锯适用范围对比（圆锯范围设置为 20~125 mm），若两个以上线单元符合区间范围则适配圆锯，反之分流步骤 5；(5) 三个线单元中若有两个超过圆锯区间范围即可适配方形凿刀具，若不适配即表示减材模型体量较小，采用铣刀工作更加便捷高效，故适配铣刀工具；(6) 若包含曲面，

划分为圆柱体和异形曲面两种情况，判定是否具备三个面单元、轮廓线单元是否相等，若满足判定为圆柱体分流步骤 8，反之适配铣刀工具；(7) 若不为矩形，且不包含曲面，根据榫卯节点的常规性可判定为梯形体量，提取其中一个面的线单元，若所有边长均小于圆锯半径，即可适配圆锯工具，反之适配铣刀工具；(8) 模型为圆柱体，对比已有开孔刀具标准尺寸库，若符合选择对应的开孔刀具，反之适配铣刀工具；(9) 适配工具标准程序具有唯一性，在程序末端输出运算结果，即最优建造方案。

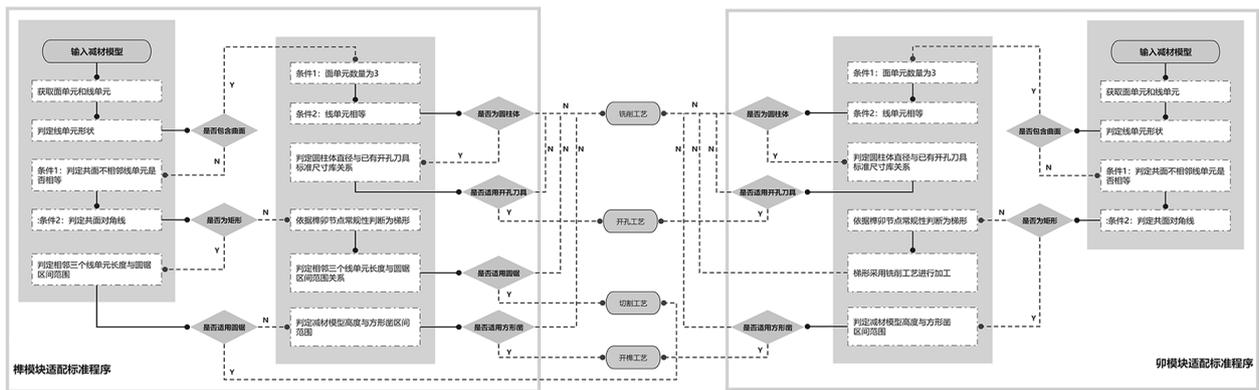


图 9 榫模块与卯模块标准程序
Fig. 9 Tenon module and mortise module standard procedur

3.1.2 卯

卯模块节点因其构造特殊，对卯口建造流程中不适配圆锯刀具，故程序开发选用方形凿、铣刀及开孔四种工具。如图 9 所示为卯模块适配工具标准程序逻辑图，该逻辑与榫模块的不同点在于：(1) 步骤 3 中模型判定为矩形后，分流至步骤 5；(2) 步骤 7 中减材模型若为梯形，则适配铣刀工具。

3.2 路径规划标准程序设计

减材模型数据完成适配工具程序运算后，数据输入至路径规划标准程序中，自动运算生成机械臂可识别的运动路径。程序设计分为榫和卯两部分，如图 10 所示为榫模块路径规划标准程序逻辑图，包含切割、开榫、铣削及开孔四种建造技术，借助编程技术手段将上文所述的路径编译过程封装为模块化程序，内置于路径规划程序中，模型数据经过适配程序运算后输入至路径规划程序中，接口输出适配工艺及机械臂运动路径。卯模块程序的不同点在于不适配切割技术。

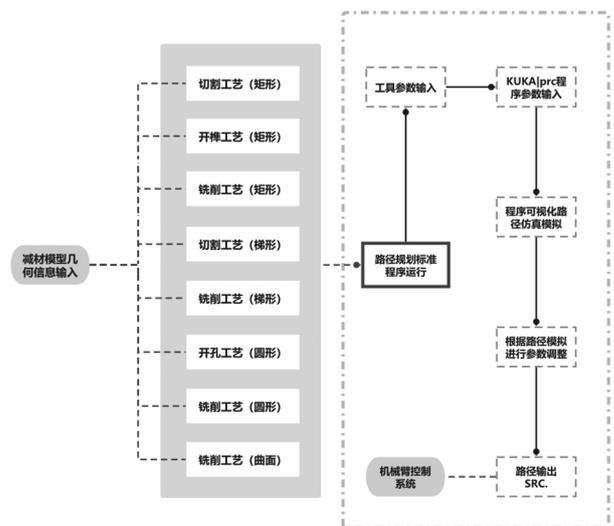


图 10 榫模块路径规划图
Fig. 10 Tenon module path planning

研究与应用

4 木构建造实践

4.1 模型建构

为验证加工系统及标准程序的可行性与适用性,通过一项具体实施案例进行设计建造,案例选取木建筑体系中最为复杂部分铺作层进行实践。铺作层又被称为斗拱,位于屋盖结构与柱顶之间,采用倒锥形设计,构件由弓形的短木和斗状的方木纵横交错叠合而成。利用 Rhino 和 Grasshopper 软件对斗拱模型进行设计建构,模型构件之间均采用榫卯连接形式,共包含 53 根构件,构件几何轮廓及尺寸规格差异性较大,采用传统木构建造技术会产生较大的工作量,针对该情况,借助六轴机械臂辅助木结构智能建造技术对模型进行实际建造,不仅可提高工作效率,还可在确保精度的基础上完成复杂异形的建造任务。图 11 所示为斗拱模型示意图。



图 11 斗拱模型
Fig. 11 Bucket arch model

4.2 数字建造

根据斗拱模型创建所有构件的减材部分模型,并对减材部分模型按照榫、卯两种类型进行划分,借助适配工具标准程序对已分类的减材模型进行分析运算,选择最优的建造工艺,完成适配的几何数据会自动传输至路径规划标准程序进行路径自动设计,最终借助计算机信息技术对完成路径规划设计的构件建造过程进行仿真模拟,避免出现六轴机械臂限位或碰撞问题。

将模拟完成后的路径规划导入至机械臂控制系统 KRC4 中,调整相关硬件参数借助木构加工系统完成构件实际建造,如图 12 所示为仿真模拟与实际建造过程(a. 切割, b. 开孔, c. 铣削),按照该流程依次对模型构件进行建造,最终将建造完成的构件

进行拼装,图 13 所示为斗拱拼装完成后的示意图。

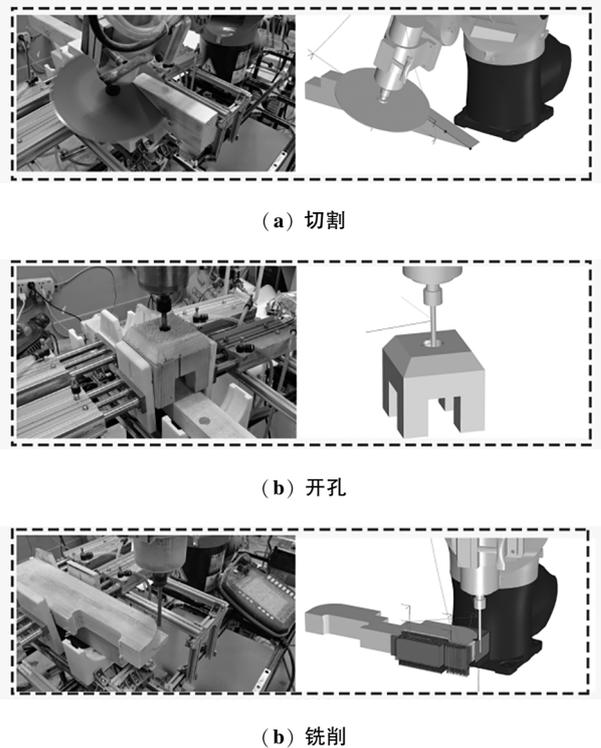


图 12 仿真模拟与实际建造过程
Fig. 12 Simulation and actual construction process

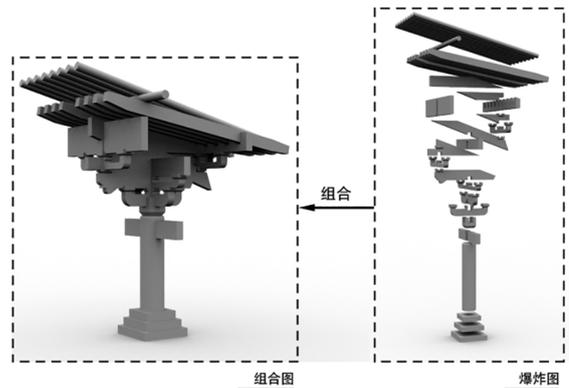


图 13 斗拱拼装示意图
Fig. 13 Bucket arch assembly diagram

5 结论

针对木结构智能建造技术展开研究,以六轴机械臂为核心设计数字化加工系统,并借助可视化编程技术将设计端与建造端的离散化数据进行有效连接,得到结论如下:

(1) 工具系统集成切割、开榫、铣削、开孔四种建造技术,可满足非标复杂建造需求,辅助以建

造装备系统、控制系统实现了自动化建造模式。

(2) 借助参数化设计软件开发的标准程序内置完整的建造逻辑, 输入几何数据后, 程序自动进行运算选择最优的建造方案, 并针对该方案输出机械臂可识别的运动路径。

(3) 斗拱结构属于非标准化的复杂体系, 构件截面各不相同, 借助加工系统及标准程序进行实际建造, 其误差控制在 2 mm 以内, 结果表明该技术具有可行性与适用性。

参 考 文 献

- [1] 丁烈云. 数字建造导论 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [2] DELGADO J M D, OYEDELE L, AJAYI A, et al. Robotics and automated systems in construction: understanding industry-specific challenges for adoption [J]. *Journal of Building Engineering*, 2019, 26: 100868.
- [3] LIU Y C. Robotic design construction: digital fabrication strategies for freeform masonry casting and mobile assembly [D]. Cambridge: Massachusetts Institute, 2009.
- [4] GRAMAZIO K A mTable, 2002, Customizable Table Series [EB/OL]. [2021-08-25].
- [5] 袁烽, 柴华. 面向批量定制的装配建筑数字建造技术体系——以装配式木构建筑创新为例 [J]. *新建筑*, 2022 (4): 9-14.
- [6] KRAMMER M. Individual serialism through the use of robotics in the production of large-scale building components [C] // *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design*, Springer, 2016: 461-467.
- [7] APOLINARSKA A A, KNAUSS M, GRAMAZIO F, et al. The sequential roof [M]. *Advancing Wood Architecture*, 2016.
- [8] 法比奥·格拉马齐奥, 马蒂亚斯·科勒, 扬·维尔曼, 等. 一种建造的新物学材料、工具与设计在数字建造技术下的关系 [J]. *时代建筑*, 2014 (3): 20-27.
- [9] 徐卫国, 黄蔚欣, 于雷. 清华大学数字建筑设计教学 [J]. *城市建筑*, 2015 (28): 34-38.
- [10] 赵夏瑀, 徐卫国. 3D 打印建造技术的研究进展及其应用现状 [J]. *中外建筑*, 2021 (10): 7-13.
- [11] 张超, 邓智聪, 侯泽宇, 等. 混凝土 3D 打印研究进展 [J]. *工业建筑*, 2020, 50 (8): 16-21.
- [12] 冯鹏, 张汉青, 孟鑫淼, 等. 3D 打印技术在工程建设中的应用及前景 [J]. *工业建筑*, 2019, 49 (12): 154-165, 194.
- [13] 袁烽, 杨智. 数控机器人的建造算法应用研究 [J]. *城市建筑*, 2012 (10): 53-56.
- [14] 袁烽, 柴华, 张啸. 基于建筑机器人的木结构建筑小批量定制化生产模式探索 [J]. *建筑结构*, 2018, 48 (10): 39-43, 55.
- [15] 王泽雄. 新型木建筑榫卯节点及其智能建造技术研究 [D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2021.
- [16] QIAO W T, WANG Z X, WANG D, et al. A new mortise and tenon timber structure and its automatic construction system [J]. *Journal of Building Engineering*, 2021 (44): 103369.
- [17] WAGNER H, ALVAREZ M, KYJANEK O, et al. Flexible and transportable robotic timber construction platform-TIM [J]. *Automation in Construction*, 2020 (120): 103400.

E-mail: fmhzhly@163.com/