

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2024.084



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



基于装置协同与路径耦合的榫卯节点精加工技术

王萌博^a, 张隆^a, 乔文涛^{a,b}, 高天^a, 翟凝^a

(石家庄铁道大学 a. 土木工程学院; b. 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 050043)

摘要: 对于智能建造中的机械臂木结构建造, 榫卯木构铣削过程中产生的内角残留问题严重影响木构加工精度。针对这一问题, 提出一种基于遗传算法的内角残留去除精加工技术, 并开发高度集成化的木构加工装置。借助可视化编程技术对工具适配进行标准程序开发, 将已有木构加工技术与机械臂运动系统相结合, 构建木构协同加工系统。最后选取木结构中的卯结构进行建造实验。结果表明: 基于遗传算法的内角残留去除技术能精准切除残留内角, 有效解决铣削技术圆弧形内角残留问题, 提出的木构协同加工系统能高效、高精度地完成建造任务。通过实际建造验证了数字建造技术的可行性及适用性。

关键词: 数字建造; 木结构; 木构加工; 机械臂; 遗传算法

中图分类号: TU689; TU366.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2025)05-0118-07

Precision finishing technology for mortise and tenon joints based on device collaboration and path coupling using robotic arms

WANG Mengbo^a, ZHANG Long^a, QIAO Wentao^{a,b}, GAO Tian^a, ZHAI Ning^a

(a. School of Civil Engineering; b. Key Laboratory of Roads and Railway Engineering Safety Control, Ministry of Education, Shijiazhuang Tiedao University, Hebei 050043, P. R. China)

Abstract: This paper proposed a processing technology for removing residual inner corners, as well as a highly integrated wood processing device based on the genetic algorithm, solving the problem of residual inner corners in the milling process of mortise-tenon joints. Integrating visual programming technology, standard programs were developed for tool adaptation; existing wood processing techniques were integrated with robotic arm motion systems to create a collaborative wood processing system. An experiment was conducted on the mortise structures within wooden assemblies. Research findings indicate that the genetic algorithm-based technology for removing internal corner residues can effectively eliminate internal corners, thereby resolving the issue of arc residues in milling technology. The proposed collaborative wood processing system, featuring robotic arms, has the capacity to efficiently and precisely complete construction tasks. This system demonstrates the feasibility and applicability of digital construction technology through practical construction experiments.

Keywords: digital construction; timber structure; wood process; robotic arm; genetic algorithm

收稿日期: 2024-04-11

基金项目: 河北省杰出青年科学基金(E2022210084)

作者简介: 王萌博(1999-), 男, 主要从事智能建造研究, E-mail: wmb19991224@outlook.com。

乔文涛(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: qwt@stdu.edu.cn。

Received: 2024-04-11

Foundation item: Natural Science Foundation of Hebei Province for Distinguished Young Scholars (No. E2022210084)

Author brief: WANG Mengbo (1999-), main research interest: intelligent construction, E-mail: wmb19991224@outlook.com.

QIAO Wentao (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: qwt@stdu.edu.cn.

随着数字设计与智能建造的迅速发展,建筑施工开始突破传统的建造手段,建筑机器人技术已经成为当前建筑生产方式改革的热点方向^[1]。机器人和自动化系统早已在制造业广泛应用,并带来了巨大的生产变革^[2]。随着研究的深入,工业机器人技术在建筑业中的应用逐渐成熟^[3-4],智能建造技术^[5]将会是建筑工业化的发展趋势。区别于传统的施工方法,这种新型建造方式具有安全、高效、绿色、智能等诸多优势^[6]。

近年来,许多研究纷纷将目光投向新兴的机器人智能建造技术与传统木材的结合^[7],建筑联盟学院(AA School of Architecture)、苏黎世联邦理工学院(ETH Zurich)、德国斯图加特大学计算设计研究所(ICD, University of Stuttgart)等机构已经在该领域取得了许多显著的研究成果^[8]。在“瑞雪”建造过程中,高伟哲等^[9]充分利用数字化技术和现代化机器人技术,实现了设计、制造和施工的高度一体化。陶承宗等^[10]以机器人运动行程为指标,筛选出了最优木结构墙体装配路线。

同时,木构智能加工技术也逐步完善。Geno等^[11]描述了木构智能加工从参数化设计到机械臂智能建造的完整过程。曹平祥^[12]系统介绍了木构铣削技术及设备。Qiao等^[13]详细阐述了环切铣削法与行切铣削法的特点及使用场景,且提出使用Rhino中的可视化编程插件Grasshopper完成铣削路径设计。

目前关于智能木构加工的研究很多,袁烽等^[14]基于数字化结构性能找形技术,充分利用机器人高精度高效加工,提出新型设计、检测与建造一体化数字建筑工艺,实现了苏州木结构主题馆的建造。贾东等^[15]综合分析方榫与圆榫节点的稳定性和加工效率,创新设计了“方-圆节点”体系,并通过机械臂辅助的精准加工及实物模型验证了其可行性。但上述应用中对木构榫卯节点^[16]的残留圆弧一直未妥善解决。在榫卯节点加工过程中,工具切割或打磨的盲区,使加工不彻底,在卯口处留有圆弧状痕迹,影响榫卯的紧密度和结构的整体稳定性。

针对铣削木构件加工技术会残留圆弧的问题,笔者设计了基于遗传算法的内角残留去除技术。为解决烦琐的工具切换工作,对自动适配工具标准程序进行逻辑开发,提出一种新型木构协同加工体系,将建造流程与设计数据有效连接,从而实现复杂榫卯木构的精准化、快捷化、智能化建造。

1 内角残留去除技术

1.1 木构铣削技术

铣削是一种金属冷加工方式,首先需要将毛坯

固定,然后用旋转的铣刀在毛坯上走刀,得到所需的形状。因木构铣削技术具有可塑性、适用性以及高灵活性,因此成为木构加工过程中一种常用的加工方式。基于机械臂的铣削装置一般是由铣刀、水冷机、水冷机转机主轴以及变频驱动器组成,最后通过法兰将铣削装置与机械臂进行连接,使其成为工作整体。

木构铣削技术应用范围广泛,可替代其他加工技术完成构件加工,但其本身也存在一些不利因素,铣刀在进行减材建造加工时一般都会在减材模块孔的内角处残留圆弧,不能形成尖锐的内角,圆弧半径与铣刀截面尺寸有关。该圆弧的存在会对木构拼接产生不利影响,且在震动时容易使木构出现局部拔榫、节点松脱现象,从而对结构的稳定性造成严重影响。木构铣削加工过程中圆弧残留问题有待解决。

1.2 遗传算法基本原理

遗传算法是对生物进化过程进行模拟。首先从一个初始群体中通过逐代筛选,挑选出具有更高适应度的个体,并对其进行遗传操作,如变异和交叉,以产生新的解决方案。遗传算法具有较好的全局收敛特性和较快的收敛速率,不易陷入局部最优解,精英保留策略保留当代最优解并防止算法早熟收敛于局部最优。遗传算法在运算过程中不依赖传统优化算法必备的梯度信息及附加元数据,因此在寻找最优解等领域得到广泛应用。针对使用基于遗传算法的内角残留去除技术解决残留圆弧问题,计算前期应先设置群体数量、终止进化迭代数和交叉变异概率,最终经过 N 代循环运算获取用于内角去除加工工具的倾斜角度近似解。在Grasshopper中使用Galapagos遗传算法运算器,运行方式简单通用,具有较好的鲁棒性。

1.3 内角残留去除技术

当铣刀在模型内部进行木构铣削时,由于铣刀的截面状态,总会在木构内部角落处残留圆弧,圆弧半径一般为铣刀直径的一半,木构铣削完成后,残留圆弧模型如图1(a)所示。

针对铣削过程中残留的圆弧,可以用锥形铣刀切割铣削完成后的残留圆弧。如图1(b)所示。

内角残留去除技术是一种关键加工方法,确保模型与实体在角落细节处保持一致。在内角残留去除技术中,刀具轴向倾斜角度的计算是实现加工技术的难点,角度的确定直接影响加工精度和效率。在已知刀具尺寸规格及内角角度参数条件下,确定刀具轴向倾斜角度,并以此为基础,求解刀具与相邻面单元相切时的轴向倾斜角度。采用遗传算法对倾斜角度进行计算,流程图如图2所示。

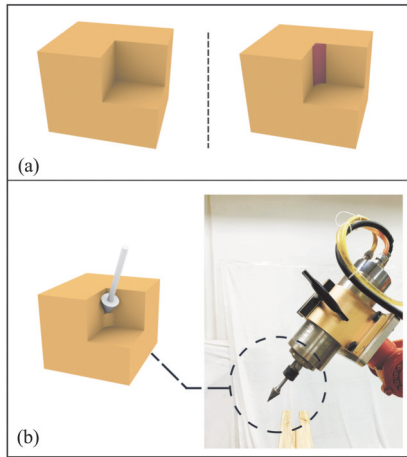


图 1 锥形铣刀

Fig. 1 Conical milling cutter

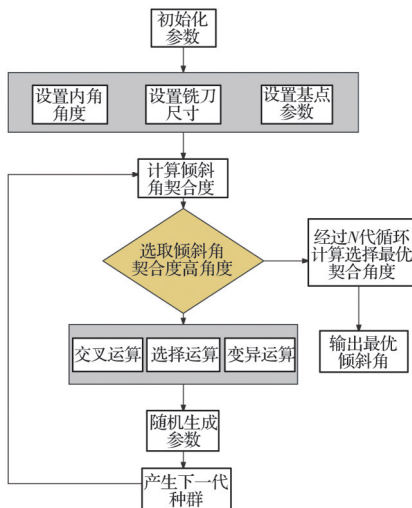


图 2 遗传算法计算倾斜角流程图

Fig. 2 Flowchart of tilt angle calculation using genetic algorithm

采用遗传算法对倾斜角度进行反向计算,设置遗传算法群体大小 $P_s=20$,迭代次数 $N=100$,交叉概率 $P_c=0.6$ 和变异概率 $P_m=0.05$ 。将倾斜角度作为待优化的参数变量、刀具与面单元的相交长度作为结果进行运算,不断产生新的倾斜角度解,并计算每个解的相交长度,将其作为适应度,选择适应度高的解进行交叉和变异操作,最终得到一组最优解,即最小相交长度的倾斜角度值。利用 Galapagos 运算器将倾斜角度设为基因,相交长度设为适应度,图 3 为运算器连接示意图。

1.4 内角残留去除技术路径设计

基于遗传算法运算原理,在 Grasshopper 软件中对内角残留去除技术路径进行规划设计。首先,提取出线单元、面单元以及基点参数,根据其参数信息建立锥形铣刀体量,由角平分线与两切面向量计算得到对角线向量,进而叉积得到其法向量,锥形铣刀法向量作为旋转主轴进行转动,与面单元参数

结合,计算相交面,提取出相交线长度,最后运用遗传算法计算出轴向倾斜角度。图 4 所示为路径设计流程图。

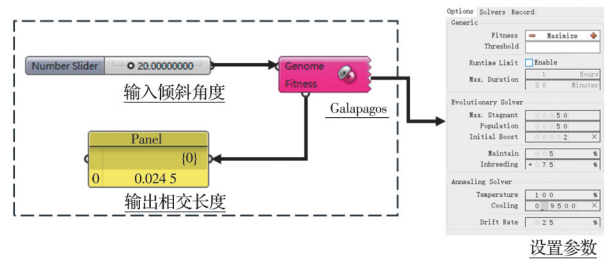


图 3 Galapagos 运算器连接示意图

Fig. 3 Schematic diagram of Galapagos componet connection

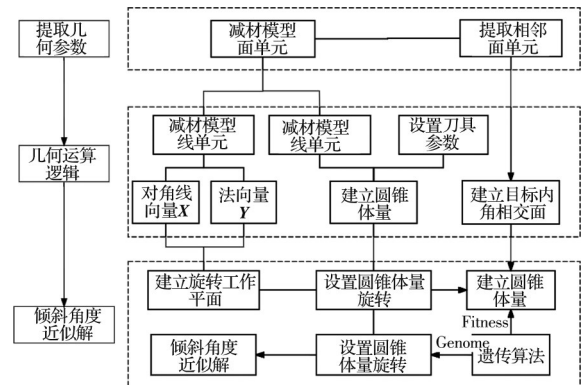


图 4 内角残留去除技术路径设计流程图

Fig. 4 Flowchart for path design of internal corner cutting technology

锥形刀具路径设计方法主要包括以下步骤:首先,将铣削减材模型进行拆分,提取面单元的角点,以计算切割每个内角所需的倾斜角度;其次,以实际锥形铣刀尺寸为参数,建立圆锥体量,以圆锥体量顶点为内角角点,进行仿真模拟;再提取相邻的内角面单元及线单元,建立旋转轴;然后,将圆锥体量绕旋转轴旋转,测量圆锥体量与相邻面单元的相交线长度;之后,以圆锥体量旋转角度为基因、相交线长度为适应度,寻找相交线最接近零时的旋转角度;随后,以该角度为工作平面,提取内角纵向边长作为运动路径,计算其中的加工路径;最后以该方法计算其余 3 个内角,并按照建造顺序组合形成最终路径。

2 榫卯结构实验结果对比分析

2.1 模型建构

通过一个案例对木构中卯结构残留的内角进行建造,以验证提出的基于遗传算法的切割技术及木材加工协同工作装置在实际使用中的适用性与可行性。利用 Grasshopper 对卯模型进行实际设计建构,最后借助六轴机械臂智能建造技术对卯结构

模型进行实际建造。

2.2 残留圆弧内角建造分析

首先,在 Rhino 软件中通过布尔运算方式获取所需的减材部分模型,并将模型批量化拾取至 Grasshopper 中。根据卯构件的减材模型,借助适配工具标准程序对减材模型进行分析运算,选出技术库中最优的建造技术,通过机械臂自由旋转及木材加工协同装置对加工工具进行选择控制,对卯结构残留内角去除进行建造。

在建造中,采用直径为 10 mm 的铣刀进行铣削,铣削完成后会残留圆弧。建造中选用直径为 10 mm 的铣刀,残留圆弧半径为铣刀直径的一半,即 5 mm。

通过实际建造对基于遗传算法的内角残留去除技术的可行性进行分析,利用木工协同加工装置选择性控制锥形削刀对木构件残留圆弧部分进行切割加工。图 5 为内角残留去除技术流程图。

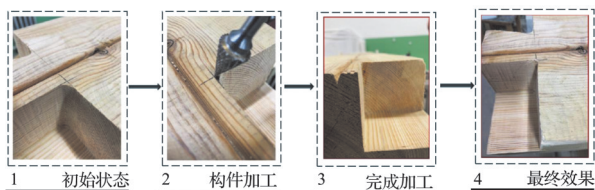


图 5 内角残留去除技术流程图

Fig. 5 Internal corner cutting technology flowchart

图 6 为基于遗传算法的内角残留去除技术加工对比图,左侧为铣削后存在圆弧内角,右侧为将圆弧切割后的内角。两者对比结果表明,基于遗传算法的内角残留去除技术能有效解决铣削技术残留圆弧的问题,且随着铣刀直径的增加,内角残留去除技术效果越显著。即同等规格减材模型加工建造可优先选择直径较大的锥形铣刀完成粗铣任务。

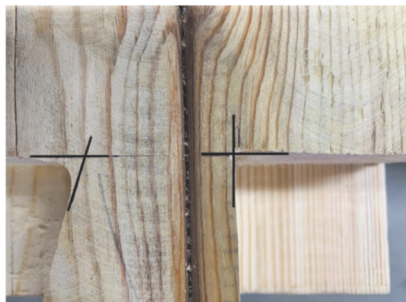


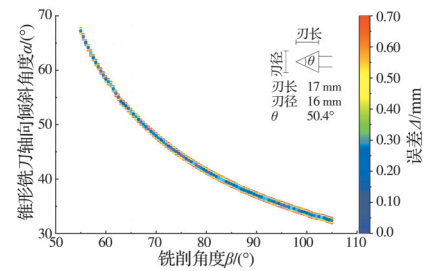
图 6 内角残留去除技术加工对比图

Fig. 6 Comparison diagram of internal corner cutting technology processing

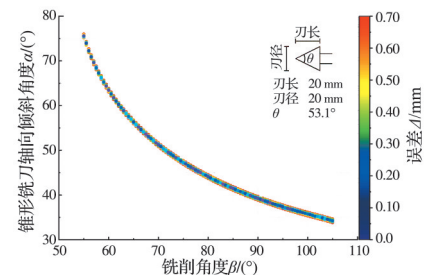
2.3 路径规划倾斜角度公式推导

为更好地验证锥形削刀与木构加工协同系统的实用性,在木材加工协同系统控制下,通过在机械臂末端工具处安装不同型号的锥形铣刀进行基

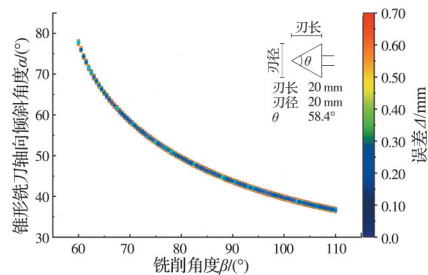
于遗传算法的内角去除,推导出角度值之间存在的关系,并将数据汇总,见图 7。



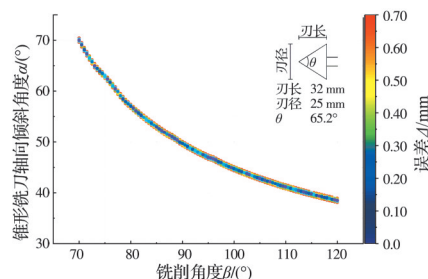
(a) 50.4° 削刀角度误差图



(b) 53.1° 削刀角度误差图



(c) 58.4° 削刀角度误差图



(d) 65.2° 削刀角度误差图

图 7 不同铣刀内角去除角度误差图

Fig. 7 Error diagram of cutting angle for different milling cutters

针对以上 4 组实验数据,首先对原始数据进行系统性预处理,以确保数据的准确性和一致性。为初步探讨并确定铣削角度 β 与铣刀轴向倾斜角度 α 之间的关系,设 $P_i(\alpha)$ 为铣削角度与铣刀轴向倾斜角度的关系多项式,随后运用最小二乘法对数据进行线性回归分析,如式(1)所示。

$$S = \sum_{i=0}^m [P_i(\alpha) - y_i(\alpha)]^2 \quad (1)$$

在完成初步线性回归分析后,将处理过的数据导入 MATLAB 软件,通过曲线拟合工具进行多次迭代优化和验证,推导出铣削角度 β 与铣刀轴向倾斜角度 α 之间的关系式,见式(2)。

$$P_i(\alpha) = 60\,300(\beta - \alpha)^{-1.73} + 0.128(\beta - \alpha) + 0.5\alpha \quad (2)$$

式中: α 与锥形削刀角度 θ 的关系为 $\alpha = 0.916\,4\theta - 45.86$ 。

在木材加工协同系统控制下,基于遗传算法的内角残留去除技术能切割出尖锐内角,确保榫卯节点拼装精度。该方案在确保加工精度的基础上不仅提高了工作效率,还减少了时间成本,具有较高的应用价值。

3 木构加工协同系统

3.1 木材加工协同工作装置

要完成以上高精度木结构榫卯节点的加工,单靠一种技术较难实现或效率低下,通过多次更换机械臂末端执行器,将多种加工工具相互配合应用才能更高效地完成复杂建造任务。切换末端执行器工作包括4部分,分别为更换设备、重新测定工具坐标及基坐标、坐标值输入至路径程序和输出加工路径至机械臂控制系统,较为烦琐。且在更换末端工具中会因测量坐标问题产生累积误差,导致基于机械臂的数字建造技术难以满足加工构件的精度要求。

为节省切换末端执行器花费的时间和满足加工精度要求,对末端执行器进行工具一体化研发。提出一种木材加工协同工作装置,如图8所示。

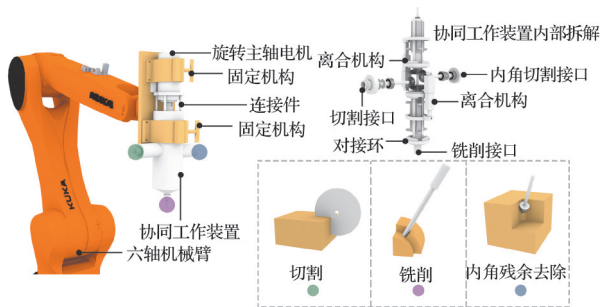


图8 木材加工协同工作装置

Fig. 8 Collaborative working device for wood processing

木材协同工作装置与旋转主轴电机通过固定机构相连,置于机械臂末端法兰盘处。由机械臂带动木材协同工作装置移动至木构加工区域,通过控制机械臂6轴旋转与木材加工协同工作装置实现对不同加工工具的选择性控制,进行木构的铣削、切割、开孔等木构加工工作。

3.2 木材加工协同工作装置控制系统

将木材加工协同工作装置通过法兰盘与机械臂连接,整个装置使用单一旋转主轴,电机统一提供驱动力,装置内部设有传动机构,为3种工具提供动力传输,并设有离合机构进行3种工具的单独选定与自由切换。通过机械臂6轴的旋转与木材加工协同工作装置相互配合,应用不同工具进行不同工序加工。

伸缩电机的自由控制是实现木材加工协同工作装置正常运行的核心,选取的微型直流推杆电机构造简单,正接电路即可推出,反接电路即可缩回。正反接主要通过继电器实现,继电器通过信号输入控制电路的通断和正反电路的接通。

采用 Arduino 等开源硬件组成控制系统,通过 Arduino IDE 自主编写控制程序,实现木材加工协同装置的工具体选定与切换功能,实现自动化控制。

该系统无需更换末端工具即可实现高效率、高精度的多种加工工艺。

3.3 机械臂工具适配标准程序设计

通过将开榫、开孔、切割、铣削、内角去除等木构数字建造技术进行组合,形成完整的技术库,构件深化设计阶段提取几何数据信息后精准匹配最优的建造技术。针对几何数据信息的提取、拆分、运算,自动选择适配的建造技术进行相关研究,通过编写数据连接逻辑算法对输入的几何数据进行分析,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技术。以榫卯结构为例,通过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,各模块从技术库中调用不同的建造工艺,如图9所示。

3.4 交互系统

机械臂运行木构加工程序时,木材加工协同工作装置需根据加工技术切换相应的工具,关键在于 Arduino 与机械臂控制系统的信息交互环节。

在控制板程序与加工程序中添加相应的信号输出与接收语句,通过 KUKA 控制柜可实现这一目的。控制柜中自带 PLC,可进行信号输出,将控制柜接口与 Arduino 的引脚相连,建立通信。

以控制柜1号和2号接口分别与 Arduino 的5号、6号引脚相连接为例,其接线原理如图10所示。

根据读取5号、6号引脚的高低电平分为4种情况,分别对应于:双伸缩电机不工作状态,即保持现选工具;上推杆电机收缩、下层电机不工作状态,即切换为开孔技术;上层电机伸出、下层电机收缩即切换切割技术;上层电机伸出、下层电机伸出,即切换铣削技术。

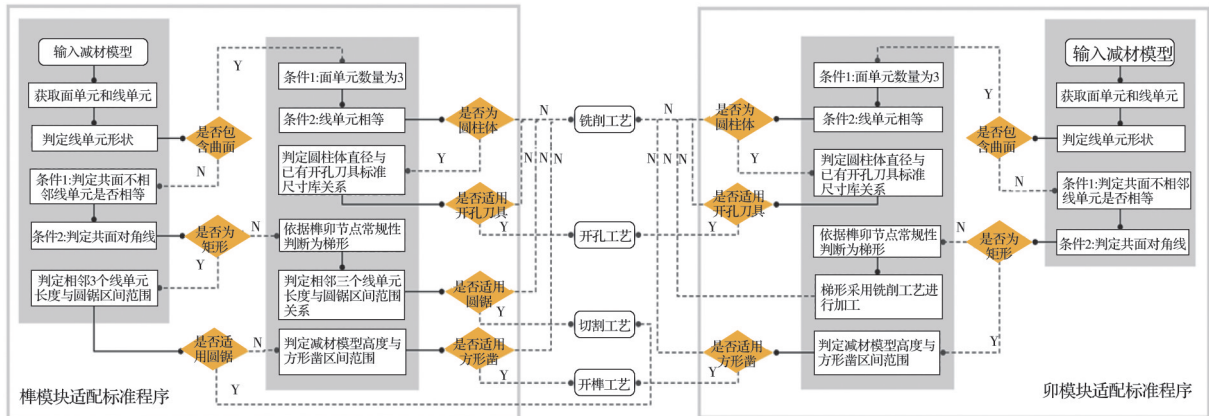


图9 适配工具标准程序设计

Fig. 9 Standard program design for adaptation tools

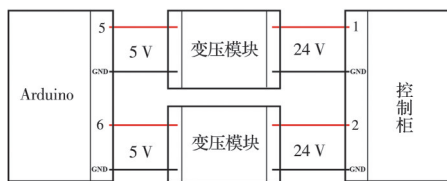


图10 信号交互原理图

Fig. 10 Signal interaction principle diagram

木构加工协同系统整体研发方案如图11所示。

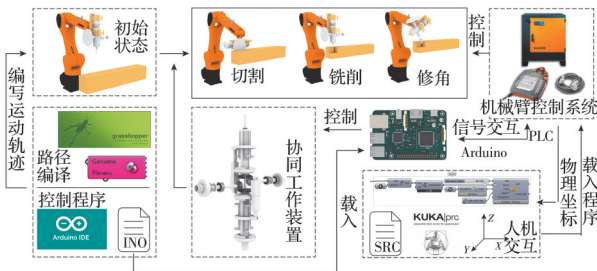


图11 木构加工协同系统

Fig. 11 Collaborative system for wood processing

通过工具适配标准程序对减材模型加工技术进行工具适配,机械臂带动木材加工协同工作装置,实现对不同加工工具的选择性控制。在对木材进行加工时,无需拆卸更换其他加工工具,通过机械臂自身的旋转带动木材加工协同工作装置工作,可以实现对木材的自动切断、铣削、钻孔等加工,大大节省了更换工具头的时间,使加工更加流畅,节省人力。作业效率得到大幅提升,进而降低了生产成本。

4 结论

对木结构智能建造技术进行研究,通过对内角精确加工算法和多工具协同工作装置的创新性研究,实现榫卯结构智能化加工,得到以下主要结论:

1)所提出的基于遗传算法的内角残留去除技术能快速、准确地计算出锥形刀具铣削时的轴向倾斜角度。

2)在木构加工协同系统中,通过机械臂与木材加工协同工作装置的交互控制,能实现对不同加工工具的快捷选择。

3)借助提出的木构加工协同系统,通过公式计算锥形刀具对原有铣削技术残留圆弧内角进行切割时的轴向倾斜角度,能精确去除残留圆弧,误差在1 mm以内,通过实例验证了公式以及协同系统工作的可靠性、高效性。

参考文献

- [1] ZHU A Y, PAUWELS P, DE VRIES B. Smart component-oriented method of construction robot coordination for prefabricated housing [J]. Automation in Construction, 2021, 129: 103778.
- [2] DACAL-NIETO A, AGRIPOPOULOS G, MÉNDEZ T, et al. TRAINMAN-MAGOS: Capture of dexterous assembly manufacturing know-How as a new efficient approach to support robotic automation [J]. Procedia Computer Science, 2022, 200: 101-110.
- [3] 刘红波, 张帆, 陈志华, 等. 人工智能在土木工程领域的应用研究现状及展望[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2024, 46(1): 14-32.
LIU H B, ZHANG F, CHEN Z H, et al. Applied research status and prospects of artificial intelligence in civil engineering field [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2024, 46(1): 14-32. (in Chinese)
- [4] 勾红叶, 杨彪, 华辉, 等. 桥梁信息化及智能桥梁2019年度研究进展[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(5): 14-27.
GOU H Y, YANG B, HUA H, et al. State-of-the-art review of bridge informatization and intelligent bridge in 2019 [J]. Journal of Civil and Environmental Engineer-

- ing, 2020, 42(5): 14-27. (in Chinese)
- [5] ZHAO H Z. The application of building information model in the structural design of intelligent buildings [J]. *Procedia Computer Science*, 2023, 228: 1047-1053.
- [6] 高文江, 兰晶晶, 曹鸿昂. 建设工程管理中智能建造技术的创新应用[J]. *智能建筑与智慧城市*, 2024(3): 97-99.
- GAO W J, LAN J J, CAO H A. Innovative application of intelligent construction technology in construction project management [J]. *Intelligent Building & Smart City*, 2024(3): 97-99. (in Chinese)
- [7] 柴华, 周鑫杰, 袁烽. 自然材料建构——材料性能驱动的原木结构设计与机器人建造[J]. *时代建筑*, 2023(6): 132-137.
- CHAI H, ZHOU X J, YUAN P F. Natural material tectonics: Material performance-driven design and robotic fabrication of raw wood structure [J]. *Time + Architecture*, 2023(6): 132-137. (in Chinese)
- [8] 袁烽, 杨智. 数控机器人的建造算法应用研究[J]. *城市建筑*, 2012, 9(10): 53-56.
- YUAN F, YANG Z. Research on fabrication algorithm of numerical control robots [J]. *Urbanism and Architecture*, 2012, 9(10): 53-56. (in Chinese)
- [9] 高伟哲, 孙童悦, 袁烽. 天府农博园“瑞雪”: 互承木壳体的机器人建构实践[J]. *建筑学报*, 2023(10): 62-71.
- GAO W Z, SUN T Y, YUAN P F. “Ruixue multi-hall” at Tianfu Agricultural Expo: Practicing robotic construction of reciprocal timber shell structure [J]. *Architectural Journal*, 2023(10): 62-71. (in Chinese)
- [10] 陶承宗, 陈海卫, 陈延斌. 木结构组合墙体自动装配系统的研究[J]. *制造业自动化*, 2022, 44(4): 25-28.
- TAO C Z, CHEN H W, CHEN Y B. Research on automatic assembly system of wood structure composite wall [J]. *Manufacturing Automation*, 2022, 44(4): 25-28. (in Chinese)
- [11] GENO J, GOOSSE J, VAN NIMWEGEN S, et al. Parametric design and robotic fabrication of whole timber reciprocal structures [J]. *Automation in Construction*, 2022, 138: 104198.
- [12] 曹平祥. 轻型木结构房屋加工的关键设备[J]. *木材工业*, 2010, 24(1): 19-22.
- CAO P X. Key machines used in light frame housing construction [J]. *China Wood Industry*, 2010, 24(1): 19-22. (in Chinese)
- [13] 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.
- [14] 袁烽, 柴华. 机器人木构工艺[J]. *西部人居环境学刊*, 2016, 31(6): 1-7.
- YUAN P F, CHAI H. Robot wooden structure technology [J]. *Journal of Human Settlements in West China*, 2016, 31(6): 1-7. (in Chinese)
- [15] 贾东, 张一承. 基于传统榫卯节点的装配式纯木结构构造节点简化研究[J]. *北方工业大学学报*, 2020, 32(3): 34-42, 48.
- JIA D, ZHANG Y C. Simplification of structural joints of prefabricated pure wood structures based on traditional tenon joints [J]. *Journal of North China University of Technology*, 2020, 32(3): 34-42, 48. (in Chinese)
- [16] GLATH J, MESNIL R, MIMRAM M, et al. Non-sequential assembly of mortise and tenon joints [J]. *Automation in Construction*, 2023, 154: 104986.

(编辑 胡英奎)