

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.147



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 基于点云数据和启发式算法的复杂龙骨-面板 结构智能数字化施工方法

廖岳<sup>1</sup>, 李汉涛<sup>2</sup>, 刘界鹏<sup>1</sup>, 曾焱<sup>1</sup>, 李来安<sup>2</sup>, 马晓晓<sup>1</sup>, 崔娜<sup>1</sup>

(1. 重庆大学山地城镇建设与新技术教育部重点实验室; 土木工程学院, 重庆 400045;

2. 广州葛洲坝建设工程有限公司, 广州 511466)

**摘要:**大型复杂龙骨-面板结构建造过程中,龙骨发生弯曲且扭转,影响面板安装;传统面板深化设计过程存在效率不高、智能化程度低等缺点。以广州南沙国际金融论坛会址为工程背景,开展基于点云数据和启发式算法的大型复杂龙骨-面板结构智能建造技术研究:针对采光顶深化设计需求,提出适用于龙骨的逆向建模方法;针对骨架几何描述困难的问题,提出多边形弯扭构件轴线提取算法;针对手动划分面板效率低等问题,提出智能化的单元提取方法;基于 Guillotine 算法,采用不同策略生成面板排布方案并进行评估。研究表明:该逆向建模方法能以给定采样间距获取截面几何信息,所建立的龙骨模型重建偏差在 6 mm 以内,可用于面板深化设计;面板单元划分方法能自动提取各类面板尺寸信息,减少人工选点工作量;基于 Guillotine 算法生成的面板排布方案能将材料损耗率控制在 15% 以下。

**关键词:**空间结构;智能建造;点云;逆向建模;启发式算法

**中图分类号:** TU398.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2026)01-0174-10

## Intelligent digital construction for complex frame-panel structures based on point cloud data and heuristic algorithms

LIAO Yue<sup>1</sup>, LI Hantao<sup>2</sup>, LIU Jiepeng<sup>1</sup>, ZENG Yan<sup>1</sup>, LI Laian<sup>2</sup>, MA Xiaoxiao<sup>1</sup>, CUI Na<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area; School of Civil Engineering,

Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. Guangzhou Gezhouba Group Construction Engineering

CO., LTD., Guangzhou 511466, P. R. China)

**Abstract:** In the construction of large and intricate frame-panel structures, the curvature and twists of the backbone present a challenge in the assessment of the installation quality and the attachment of the panels. The classic method for panel detail design is associated with several drawbacks, such as low efficiency and the need for greater automation. In the context of the Nansha International Finance Forum project, we investigated intelligent construction techniques for large and intricate frame-panel structures, based on point cloud data

**收稿日期:** 2023-08-29

**基金项目:** 国家自然科学基金(52130801)

**作者简介:** 廖岳(1997-),男,博士生,主要从事智能建造研究, E-mail: Hill\_Liao@stu.cqu.edu.cn。

曾焱(通信作者),男,博士生, E-mail: yanzg@stu.cqu.edu.cn。

**Received:** 2023-08-29

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (No. 52130801)

**Author brief:** LIAO Yue (1997-), PhD candidate, main research interest: intelligent construction, E-mail: Hill\_Liao@stu.cqu.edu.cn.

ZENG Yan (corresponding author), PhD candidate, E-mail: yanzg@stu.cqu.edu.cn.

(PCD) and heuristic algorithms. A backward modelling method applicable to the frame was proposed to meet the demand for the detailed design of the daylighting roof, and to build the reconstruction model for detailed design. An algorithm for extracting the axes of a polygon's curved and twisted components was developed to assist in the geometric description. An intelligent cell extraction method was introduced to address the low efficiency of manual panel segmentation. Different strategies were used to generate and evaluate panel layout plans, based on the Guillotine algorithm. The results show that the proposed inverse modeling approach allows for the acquisition of profile geometry information with a defined sampling interval. Furthermore, the established frame model exhibits an accuracy better than 6 mm, making it suitable for panel deepening design applications. Panel cell partitioning methods could automatically extract information about various panel sizes, reducing manual point selection efforts. The material waste rate of the panel layout plan generated by the Guillotine algorithm could be limited to 15%.

**Keywords:** spatial structure; intelligent construction; point cloud; reverse modeling; heuristic algorithm

为体现建筑空间的延展性,以龙骨、特种玻璃构成的采光顶、天幕、穹顶和幕墙等为代表的大跨空间结构成为国际性体育场馆、博览会馆、金融论坛会场等地标性公共建筑中不可或缺的一部分,相关计算理论也逐渐趋于成熟<sup>[1-3]</sup>。然而,由于造型的独特性和空间的复杂性,龙骨建造过程中难免出现偏差,且偏差难以测量,给后续施工带来困难。随着建筑业的智能化发展,点云数据获取成本的降低和数据处理算法的开发推动了复杂构件智能化建造方法的发展,并在多项新建大型工程中得到应用,在提高建造质量的同时带来了可观的经济效益。周绪红等<sup>[4]</sup>基于三维激光点云技术对大型拱肋节段虚拟预拼装方法开展研究,实现了节段控制点偏差智能提取,有效指导了实际施工。程国忠等<sup>[5]</sup>提出基于点云数据的复杂高层结构尺寸检测综合算法,该算法涵盖扫描方案优化、点云数据分割与识别、误差可视化3个方面,解决了伸臂桁架安装困难的问题。Cheng等<sup>[6]</sup>综合考虑陆地式和手持式三维激光扫描仪的扫描范围和精度,提出多尺度点云数据采集及预处理方法,结合粒子群优化算法,实现了栓接杆件的虚拟预拼装。Pan等<sup>[7]</sup>通过视觉重建获取螺栓点云数据,基于多视角视觉目标检测器进行螺栓定位,借助局部点云的最小上凸包量化栓柄裸露长度,实现了螺栓松动检测和结构早期损伤预警。Grandio等<sup>[8]</sup>基于点云图像,提出一种多模态深度学习点云全景分割方法,可从大规模高密度点云数据中快速剔除无关数据,降低了点云计算量。Lamas等<sup>[9]</sup>提出一种点云实例分割方法,基于一系列无监督学习算法,仅需提供少量的参数信息即可实现桁架桥点云各构件的准确分割,在此基础上提出了密集点云生成桁架信息模型的IFC建模方法<sup>[10]</sup>,实现了桁架逆向建模和结构图自动获取。Xie等<sup>[11]</sup>通过深度学习网络PipNet实现了管道结构几

何参数提取,基于轴线拟合和连通性分析等算法,得到管道竣工模型,为建筑运维提供了数字模型基础。点云数据在建筑质量检测、预拼装、运维、三维重建等环节均得到广泛运用,但针对不同工程 and 不同结构特点,需定制开发相应算法。

合理的板材下料排布方案可减少材料浪费,降低材料成本。陈秋莲等<sup>[12]</sup>基于束搜索优化提出一种三阶段二维剪切下料算法,综合考虑了板材中毛坯的价值和余料的二次利用价值。姚怡<sup>[13]</sup>针对二维装箱问题,设计并提出三类启发式算法,通过实例验证所提算法在不同场景和约束条件下的适用性。Libralesso等<sup>[14]</sup>针对玻璃切割问题,提出了一种随时间树搜索算法,该算法通过设置引导函数、对称性破坏策略和伪优势规则,能够快速获得节省原材料的矩形排布可行解。Hadj Salem等<sup>[15]</sup>将剪板机约束下家纺行业剪裁问题分别抽象为切割库存问题和装箱问题并开展研究,发现装箱模型在该约束条件下生成的排布方案可节省原料。Mostajabdaveh等<sup>[16]</sup>综合考虑打印模式、数量和先后顺序对印刷行业二维切割问题进行研究,结果表明,非线性整数规划模型可用于求解小规模实例精确解,遗传算法在寻找大规模实例较优可行解方面表现优异。Parreno等<sup>[17]</sup>对缺陷板材切割排布问题进行研究,在满足三阶段切割条件下考虑堆叠顺序、材料浪费率等因素,提出了一种考虑实例修剪和板材缺陷的整数线性模型。以上研究结果表明,二维板材切割问题广泛存在于各行各业,在实例较少时可获得满足约束条件的最优解,而面对大规模实例模型时往往出现非确定性多项式难题,仅能获得较优的可行解。

笔者结合广州南沙国际金融论坛永久会址项目需求,开展基于点云数据和启发式算法的复杂龙骨-面板结构智能建造技术研究。针对多边形弯扭

结构几何描述困难等问题,提出多边形弯扭构件轴线提取算法;针对顶棚深化设计需求,提出适用于龙骨的逆向建模方法,并完成了采光顶棚钢骨架逆向模型的建立;针对手动提取玻璃面板效率低等问题,基于杆件邻接关系矩阵,提出玻璃面板角点智能提取与单元自动划分方法;基于 Guillotine 算法完成了玻璃面板排布方案的生成与评估工作。

## 1 工程背景

广州南沙国际金融论坛(IFF)永久会址为大湾区建设的标志性工程,总建筑面积 25.58 万  $\text{m}^2$ 。项目建成后将承担 IFF 全球年会、丝路国际联盟峰会等国际政商会议。为营造恢宏大气之势,建筑群顶棚、外立面多采用大跨空间结构。以建筑主体外立面玻璃幕墙和会议服务中心玻璃采光顶为代表的骨架-面板结构整体呈空间曲面形态,导致玻璃单元形状各异;且骨架竣工控制点数量多、测绘工作量大,因此需建立骨架竣工三维模型,用于辅助面板的深化设计与安装。然而,骨架局部各杆件多为弯曲且扭转的矩形管,其几何特征描述困难,针对该结构特点,亟待开发相应的逆向建模技术。此外,针对面板单元数量多、提取困难的问题,需建立基于邻接关系的面板自动提取方法;基于启发式算法的下料排布方式,可用于面板的智能排布。最终建立竣工骨架-数字模型-下料生产的数字智能化建造流程。由于玻璃幕墙与玻璃采光顶均为骨架-面板结构,故仅对钢骨架-夹胶玻璃采光顶的智能建造方法进行详细阐述。

## 2 钢骨架逆向建模

钢骨架逆向建模流程如图 1 所示,包括点云预处理、构件特征提取和逆向模型建立 3 部分。为提高点云配准过程中大场景点云中靶球的识别效率,在多球并行检测算法<sup>[18]</sup>基础上,对靶球点云进行手动粗分割;为排除噪点对球心坐标提取的影响,采用最小二乘法对被识别的靶球点云数据进行二次拟合;为获取最佳坐标变换矩阵,建立以靶球球心为配准基准点的评价函数;为实现骨架中圈梁、主梁及次梁的准确分割,根据结构特点,建立半自动点云分割方法。为获取各构件轴线及角点等特征信息,提出多边形管轴线提取算法,该算法对拉普拉斯-滚球混合算法<sup>[19]</sup>进行改进,以截面形状拟合代替原算法的三维球心拟合,通过轴线迭代提高算法精度,不仅可实现多边形弯扭构件轴线提取,还可准确获取各截面角点坐标。最后,基于 Revit 平台的二次开发技术,以获取的轴线和角点信息为

输入数据,采用密集截面扫描的方式建立钢骨架的竣工模型。

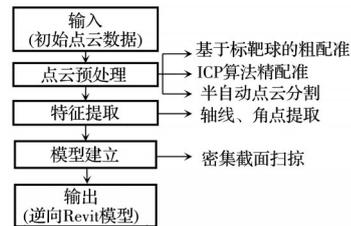


图 1 钢骨架逆向建模流程图

Fig. 1 Reverse modeling pipeline of steel frame

### 2.1 点云预处理

点云预处理包括数据采集、配准和分割 3 部分。采用 FARO150 对竣工骨架进行多站点云数据采集,共采集 9 站数据,其中单站扫描精度在  $\pm 2 \text{ mm}$  以内、作业耗时 15 min;为便于各站数据匹配,在相邻采集站之间摆放 3 枚固定靶球;综合考虑相邻站之间配准和扫描范围拓展需求,相邻站扫描重复率保持在 30% 左右。其中,典型站点扫描预览图如图 2 所示。



图 2 典型站点扫描预览图

Fig. 2 Scan preview of the typical site

手动筛选靶球点云耗时长且无必要,参照刘界鹏等<sup>[18]</sup>提出的多球并行检测算法对各站扫描数据中的靶球点云进行提取。考虑到各站数据与靶球数据尺度相差较大,为加快靶球提取速度,对靶球进行手动粗分割是经济可行的,如图 3 所示。

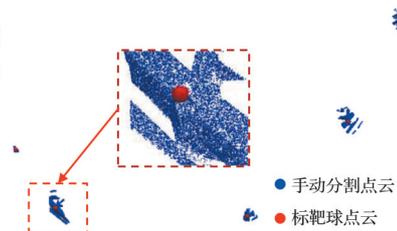


图 3 靶球的分割与识别

Fig. 3 Segmentation and recognition of target balls

当噪点与靶球点云距离小于随机抽样一致性算法(RANSAC)内外点判别阈值时,球心坐标的计算可能完全依赖于噪点,与实际坐标存在偏差。因此,需对多球并行检测算法获得的靶球球心进行

修正。首先通过密度聚类从识别的标靶球点云中分割出单个标靶球点云,然后使用最小二乘法对标靶球点云进一步拟合,获得修正后的标靶球球心,如图 4 所示。

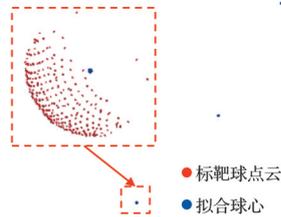


图 4 标靶球球心拟合

Fig. 4 Center fitting of target balls

采用基于基准点全排列的配准算法对各站数据进行配准:从待配准的两站标靶球中各选取 3 个球心作为基准点,通过坐标系转换算法求解旋转平移矩阵;若各站含有的标靶球数量为  $s$ ,则变换矩阵共需求解次数  $N$  如式(1)所示。所采集点云中,每站均含 6 个标靶球,经全排列计算,相邻两站数据配准需求解矩阵 400 次。

$$N = C_{s_i}^3 \times C_{s_{j+1}}^3 \quad (1)$$

式中: $C$ 为组合计算符号; $s_i$ 为第  $i$  站标靶球数量。

以经过坐标变换后的源基准点与目标点之间的欧式距离和作为评价函数(见式(2))。

$$f = \sum_{i=1}^3 d_i \quad (2)$$

式中: $d_i$ 为经过坐标变换后的第  $i$  个源基准点与目标点之间的欧式距离。

以评价函数最小时对应的旋转平移矩阵作为最终的变换矩阵,对源点云进行坐标变换。再经由迭代最近点(iterative closest point, ICP)算法精配准后,得到顶棚点云,如图 5 所示。

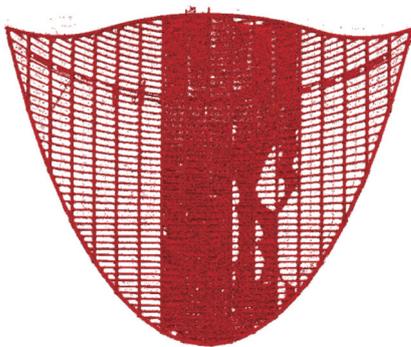


图 5 带防护网的顶棚骨架点云数据

Fig. 5 PCD of roof skeleton with protective net

骨架上表面覆盖防坠安全网,对后续特征信息提取存在较大影响,需进行去除;由于安全网点云密度较大,常用的去噪算法无法准确识别。可通过

骨架三维设计模型生成骨架标准点云,与扫描点云配准后提取标准点云的近邻点,进而获得干净的骨架点云。在无骨架三维设计模型下对防护网点云数据进行手动删除,得到仅含有圈梁、主梁、次梁的顶棚龙骨点云,如图 6 所示。

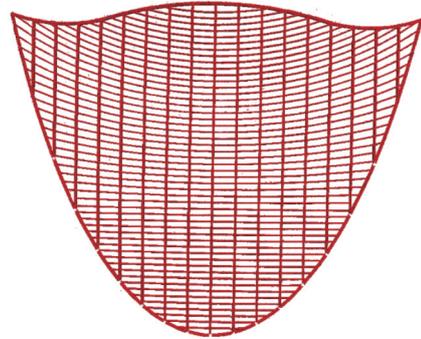


图 6 无防护网的顶棚骨架点云数据

Fig. 6 PCD of roof skeleton without protective net

为实现单根主梁、次梁及圈梁的分割,提出一种半自动点云分割方法,实现流程如图 7 所示。首先手动提取圈梁点云数据;然后对剩余主次梁点云进行主成分分析,选取前 3 个主成分对数据进行旋转且不丢失维度信息;旋转后的点云数据仅考虑 XY 平面坐标,基于考虑直线斜率阈值的随机采样一致性算法拟合直线,通过直线内点筛选获得粗分割的主梁点云数据;通过密度聚类获得单根粗分割主梁数据;由于主梁侧壁为平面,具有明显的方向特征,通过 10 mm 邻域计算每个点的法向量,通过法向量筛选可获得每根主梁的侧平面,根据点和平面关系获取侧平面中间点,得到细分割的主梁点云;最后,在主次梁点云中删除主梁点云即可获得次梁点云,完成所有分割(图 8)。

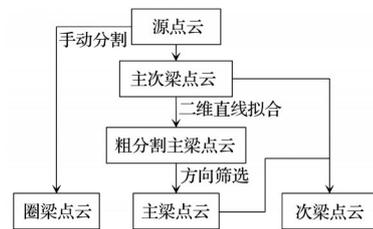


图 7 半自动骨架点云分割流程

Fig. 7 Semi-automatic pipeline for PCD segmentation of the skeleton

## 2.2 特征提取

通过梁截面扫描轴线实现钢骨架逆向建模,因此需进行截面特征与轴线提取。Liu 等<sup>[19]</sup>提出的拉普拉斯-滚球混合算法在复杂圆管轴线提取方面取得了良好效果,但该算法仅适用于圆形截面。根据弯扭矩形截面特点对此算法进行改进,得到适用于多

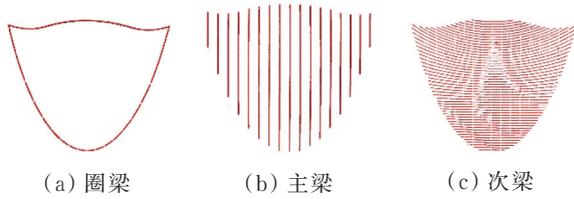


图 8 分割后点云数据

Fig. 8 PCD after segmentation

边形截面管的轴线提取算法,算法流程如图 9 所示。

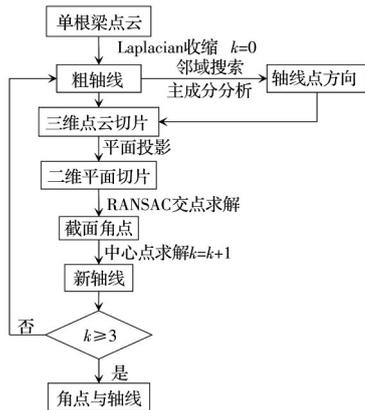


图 9 多边形管轴线提取算法流程图

Fig. 9 Pipeline of axis extraction for polygon tubes

依据轴线提取流程,首先采用 Laplacian 收缩算法,对梁轴线进行初步提取,如图 10 中蓝色点所示。基于粗骨架,取 5 cm 范围内的邻域点计算每个粗骨架点的法向量,沿法向量前后 5 cm 截取梁点云切片,并将其投影至粗骨架点与其方向向量构成的平面内;由于截面为矩形,采用 RANSAC 算法拟合 4 条直线;根据 4 条直线之间的夹角大小选择相邻直线,计算直线交点即可获得截面角点;角点中心即为轴线点,如图 11 所示。

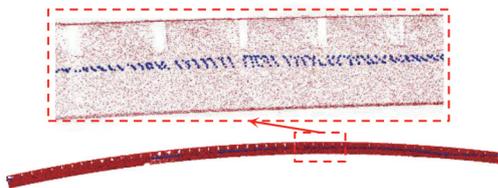


图 10 拉普拉斯收缩算法获得的轴线

Fig. 10 Axis obtained by Laplacian contraction

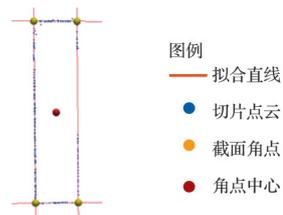


图 11 截面角点及轴线点提取

Fig. 11 Extraction of section corner points and axis points

Laplacian 收缩算法获得的粗轴线与真实轴线存在一定差异,基于此计算的轴线点方向与真实轴线方向存在偏差,截面投影出现如图 12 所示的偏转。



图 12 截面偏转

Fig. 12 Deflection of the section

在小范围内截取数据,即使截面投影沿梁宽(图 13(a))、梁高(图 13(b))或沿两个方向(图 13(c))发生偏转,其角点中心仍落在轴线上。因此,第 1 次迭代能获得较为准确的轴线,以新轴线作为粗轴线进行第 2 次迭代,获得较为准确的截面特征,通过更多的迭代次数进一步修正切片厚度带来的偏差,经 3 次迭代获得的轴线点如图 14 所示。值得注意的是,当具备骨架设计三维模型时,以设计轴线替代 Laplacian 收缩生成的粗轴线能通过更少迭代次数获取精度相当的轴线点。

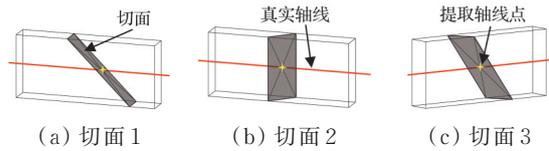


图 13 不同角度切面

Fig. 13 Sections at different angles

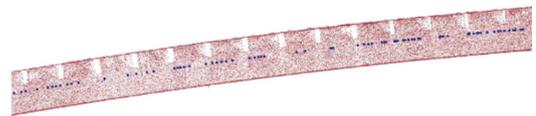


图 14 迭代后的梁轴线点

Fig. 14 Beam axis points after iterations

### 2.3 模型建立

基于 Revit 软件进行二次开发<sup>[20]</sup>,编写参数化建模脚本:采用不大于当前轴线点对应截面短边长的间距对轴线点进行下采样处理;基于实体类创建管状组件,管状组件两端截面由采样后相邻轴线点对应的截面角点构成;以左上角为起点,按顺时针方向对每组截面角点排序;基于截面角点以及相邻轴线点,使用“sweep”命令创建直线方柱(即密集截面扫掠)。自动生成顶棚骨架的逆向模型如图 15 所示。基于 Revit 平台,采用所提方法,可为其他形状的骨架-面板结构提供骨架竣工几何模型,将复杂空间结构可视化,协助面板深化设计与出图。由于模型建立过程未考虑相交构件节点的处理,在深化设计过程中,面板角点提取、单元划分工作依旧面临自动化程度不高的问题。

### 2.4 精度验证

对重建模型的精度进行验证,以评价模型精度

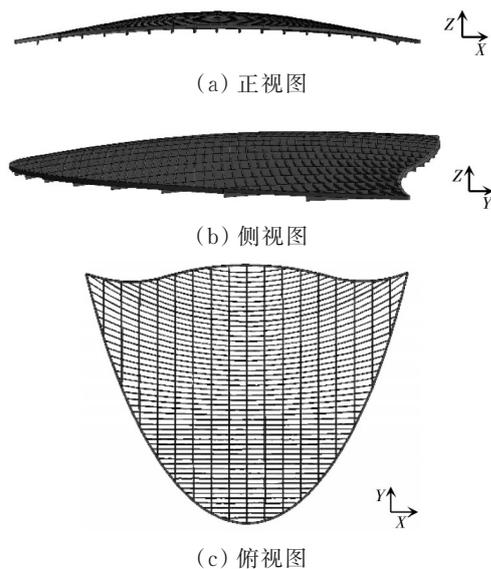


图 15 顶棚钢骨架重建模型

Fig. 15 Reconstructed BIM model of ceiling steel frame

对面板深化设计的适用性。数据采集、配准、特征提取以及模型重建均会引入误差,其中点云采集、配准偏差可通过配准后的骨架点云特征点间距与实测特征点间距之间的差值综合表征;特征提取以及模型重建偏差可采用重建模型特征点间距与实测特征点间距之间的差值综合表征。

面板深化设计时关注的尺寸信息为骨架交点间距,因此,对骨架整体尺寸精度、梁交点精度进行验证。为保证所选特征点在实测、点云以及重建模型中能被准确拾取,骨架整体尺寸精度验证选择圈梁内侧交点作为特征点;梁交点精度验证则随机选择骨架内部及边缘的梁交点作为特征点,如图 16 所示。

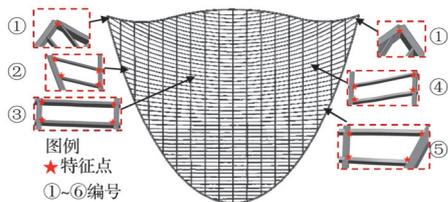


图 16 特征点布置

Fig. 16 Layout of key points

采用全站仪测量图 16 中编号①的圈梁内侧交点间距;采用卷尺测量图 16 中编号②~⑤的梁交点围成的四边形边长及对角线长;在点云及重建模型中手动拾取对应位置测点,计算特征点间距。获得的间距偏差如表 1 所示,其中点云间距偏差为点云间距与实测间距的差值,模型偏差为模型间距与点云间距的差值;由于点云精度与卷尺精度均为毫米级,因此测量结果均保留至毫米。可见,点云数据采集与配准过程的综合偏差在 4 mm 以内,特征提取及模型重建综合偏差在 2 mm 以内。因此,整个

模型重建偏差可控制在 6 mm 以内,面板接缝为 20 mm 时,允许的点位偏差为 10 mm,基于所提方法建立的骨架竣工模型精度能满足深化设计要求。

表 1 精度校验结果

Table 1 Accuracy verification results

编号	特征点间距/mm		
	实测间距	点云间距(偏差)	模型间距(偏差)
①	51 593	51 596(+3)	51 597(+1)
②	1 158	1 157(-1)	1 155(-2)
②	2 673	2 675(+2)	2 676(-1)
②	906	907(+1)	907(0)
②	2 254	2 258(+4)	2 256(-2)
②	2 175	2 174(-1)	2 175(+1)
②	3 078	3 076(-2)	3 074(-2)
③	713	711(-2)	713(+2)
③	2 709	2 710(+1)	2 708(-2)
③	693	694(+1)	694(0)
③	2 738	2 734(-4)	2 733(-1)
③	2 706	2 707(+1)	2 705(-2)
③	2 916	2 914(-2)	2 916(+2)
④	798	797(+1)	799(+2)
④	2 857	2 856(-1)	2 856(0)
④	783	787(+4)	786(-1)
④	2 857	2 856(-1)	2 854(-2)
④	3 067	3 066(-1)	3 065(-1)
④	2 699	2 701(+2)	2 700(-1)
⑤	864	867(+3)	869(+2)
⑤	2 393	2 391(-2)	2 389(-2)
⑤	1 043	1 045(+2)	1 044(-1)
⑤	1 963	1 962(-1)	1 962(0)
⑤	2 605	2 603(+2)	2 602(+1)
⑤	2 104	2 107(+3)	2 109(+2)

### 3 面板智能划分与下料

在完成骨架竣工模型重建后,可进行系统分类、轮廓及基本节点绘制等深化设计工作。骨架三维竣工模型虽然减少了实体骨架面板单元控制点坐标复测的外业工作量,但内业对形状各异的面板提取过程仍存在大量人工作业。由于骨架通过以直代曲的方式进行加工,构成板单元的梁段均为直线,因此,每块板单元均采用平板玻璃,不涉及冷弯与翘边加工。基于此,从板单元自动提取、排布下料两方面对玻璃顶棚的智能深化设计方法进行探索。

#### 3.1 控制点智能提取

为获得板单元尺寸信息,首先需对板单元角点进行提取。基于全站仪的板单元提取方法通常需在测量时记录角点编号<sup>[21]</sup>;采用点云获取控制点则需借助设计模型对节点进行分割<sup>[22]</sup>。由于所涉工程

没有骨架三维实体设计模型,通过该方法建立的骨架竣工模型也不包含节点信息,直接基于竣工模型进行幕墙深化设计需在模型中进行控制点的人工拾取。为提高控制点提取的自动化程度,进一步协助面板的深化设计,基于输出的轴线信息,提出控制点智能提取方法。

在面板单元的布置过程中,为兼顾便捷性和美观性,板单元接缝设置在骨架梁上,因此,各梁轴线交点与板单元角点在水平面上的投影重合。以主次梁交点处的板单元角点为例,对控制点提取方法进行说明。

1) 分别按 XY 轴对单根主梁和次梁的轴线点排序。

2) 遍历次梁轴线点,通过最近邻算法搜索距当前次梁轴线点最近的主梁轴线点,记录最小距离和当前次梁轴线点索引,并在每次遍历过程中进行更新。

3) 最小距离变大时,退出遍历,此时获得的次梁轴线最近点可能位于次梁起终点或轴线中部,中部点可能出现图 17 所示的两类情况。

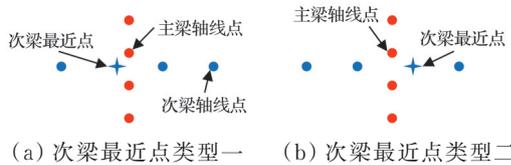


图 17 两类次梁最近点位置

Fig. 17 Nearest point positions of two secondary beam types

4) 局部的轴线点近似位于同一条直线上,提取次梁最近点的两个相邻轴线点对,计算平面直线 1 的方程式。

5) 遍历主梁轴线点,计算其与直线 1 的相对位置关系,分别提取位于直线 1 两侧的主梁相邻轴线点对,并计算平面直线 2 的方程式。

6) 遍历步骤 3) 提取的次梁最近点及其相邻轴线点,判断其与直线 2 的相对位置关系,从 3 个点中筛选出跨越直线 2 的相邻点对,并计算平面直线 3 的方程式。

7) 根据直线 2、直线 3 的方程式计算平面内交点,并根据交点的平面坐标在主梁最近点对间对 Z 轴进行插值,即可获得交点在主梁轴线上的投影。相应地,次梁、主梁与圈梁的交点均投影至圈梁轴线上。

8) 根据截面特征和轴线点的法向量沿 Z 轴向上抬升投影点,确保最终交点均落在顶棚骨架上表面。

参照以上步骤,共得到 729 个控制点,如图 18

所示。值得注意的是,输出的交点信息还附带主次梁的编号,这在后续面板单元智能提取中具有重要意义。

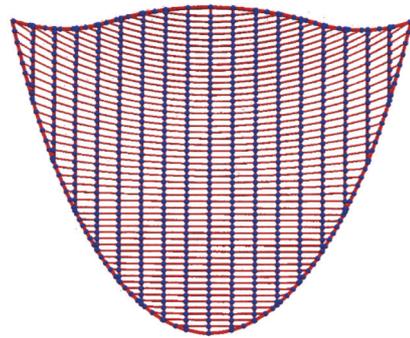


图 18 顶棚骨架点云及轴线交点

Fig. 18 Ceiling skeleton PCD and axis intersection points

### 3.2 面板单元智能提取

面板单元控制点彼此孤立,不包含构成面板单元的分组信息,进行控制点编号分组耗时且费力<sup>[21]</sup>。为从 729 个控制点中准确提取所有板单元,利用控制点提取过程中保留的主次梁编号信息,首先构建  $m$  行  $n$  列的主次梁邻接关系矩阵,其中  $m$  为次梁数,  $n$  为主梁数;每个控制点附带的主次梁信息作为行列索引,邻接关系矩阵对应索引的元素值为 1,代表此处存在主次梁交点,无对应索引位置的元素值为 0,邻接矩阵示意如图 19 所示的白色区域。在获得邻接矩阵后,将边界向外扩展一个元素(图 19 灰色区域),用于判断主次梁与圈梁相交的情况。

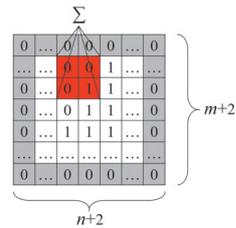
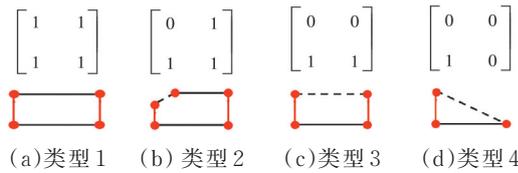


图 19 拓展一个元素的邻接矩阵

Fig. 19 Adjacency matrix with one expanded element

根据相交关系,采用  $2 \times 2$  的元素全为 1 的卷积核对邻接矩阵进行卷积操作。不同卷积结果代表不同的相交情况,典型的邻接矩阵局部元素如图 20 所示:类型 1 卷积结果为 4,代表两根主梁、两根次梁相交形成 4 个控制点,可根据坐标值大小、排序构成面板单元;类型 2 卷积结果为 3,代表主次梁各有一根与圈梁相连,即构成由圈梁、两根主梁、两根次梁围成的五边形;类型 3 卷积结果为 2,代表有两根主梁/次梁与圈梁相连,即构成由圈梁、两根主梁/次梁、一根次梁/主梁围成的四边形;类型 4 卷积结果为 1,表示圈梁、一根主梁、一根次梁围成的三角形。共提取面板单元 638 个,所有面板单元均保留主次梁编号,以便于面板定位。



注:红色圆点为轴线交点;红色直线为主梁轴线;黑色直线为次梁轴线;黑色虚线为圈梁轴线。

图 20 邻接矩阵典型局部及其对应关系示意

Fig. 20 Schematic of typical local part of adjacency matrix and its corresponding relationship

### 3.3 面板单元智能下料排布

#### 3.3.1 面板单元预处理

对于曲面网架结构,考虑接缝宽度以及不规则面板的合并,对提取的面板单元做如下处理:将短边小于 20 cm 的三角形与相邻五边形面板合并;基于主成分分析,将所有面板单元降维;假定面板间接缝为 2 cm,则所有面板沿边缘垂直方向内缩 1 cm;考虑到面板为双层夹胶玻璃,将面板单元数量乘以 2;对于主次梁围成的四边形面板单元,以面板长边作为矩形长边,建立外接矩形进行下料;对于圈梁参与围成的三角形或五边形面板单元,建立最小外接矩形进行下料。

#### 3.3.2 面板排布下料

每次切割均满足将板材一分为二的原则,最多经过 3 阶段分割可获得完整的矩形板材,如图 21 所示。

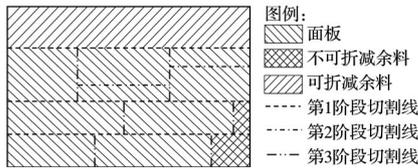


图 21 面板 3 阶段排布原则

Fig. 21 Three-stage layout principle for panels

参考 Jylänki<sup>[23]</sup>的研究成果,采用 Guillotine 策略对面板进行排布,该策略分为母材选择、剩余板材划分两个步骤。假设母材集合为  $F = \{F_1, F_2 \dots F_x\}$ , 单个母材表示为  $F_i = (w_i, h_i)$ ,  $w_i, h_i$  分别为母材的宽和高;面板集合为  $R = \{R_1, R_2 \dots R_y\}$ , 单个面板表示为  $R_j = (w, h)$ ,  $w, h$  分别为面板的宽和高。

##### 1) 母材选择策略

①最佳短边匹配。该策略遍历每块面板单元,然后按式(3)计算各单元放入不同母材的适应度  $f$ ,选择适应度函数值最小的面板母材组合方式进行排布,即优先排布面板与母材边长相近的对象。

$$f = \min(w_i - w, h_i - h) \quad (3)$$

②最佳长边匹配。该策略的适应度函数如式(4)所示,仍选择适应度函数值最小的组合优先排布,即排布后余料的长边最短。

$$f = \max(w_i - w, h_i - h) \quad (4)$$

③最佳区域匹配。该策略选择与面板面积相近的母材进行排布,旨在避免出现狭窄余料。

##### 2) 余料分割策略

每块面板均被放置在母材左下角,得到反 L 形余料,根据分割策略选择将余料沿水平或垂直方向(图 22)切割为两个矩形并添加至母材集合列表中。

①短/长轴分割,即沿母材短边或长边方向直接分割余料。

②剩余短/长轴分割,即基于所选母材与面板单元的边长差值  $\min / \max\{w_i - w, h_i - h\}$  沿短/长边方向分割。

③最大/小面积分割,即先将反 L 形余料沿垂直、水平方向虚拟划分为 3 块区域,再合并角部区域与端部区域中面积较大或较小的部分,以此作为最终的余料分割方案。



图 22 不同分割方式示意图

Fig. 22 Different segmentation modes

将 3 种母材选择策略与 6 种余料分割策略组合,共生成 18 种排布策略。母材选用市面上可购买的最大规格板材,尺寸为 3 300 mm × 16 000 mm。考虑面板旋转 90° 的情况,排布过程中各策略的面板排布结果如表 2 所示。其中浪费率定义为余料面积与母

表 2 Guillotine 策略排布结果

Table 2 Results of Guillotine strategy

母板选择策略	余料分割策略	母板数量	浪费率/%	折减浪费率/%
最佳短边匹配	短轴	155	14.41	14.30
	长轴	172	22.87	19.94
	剩余短轴	155	14.41	14.25
	剩余长轴	172	22.87	20.09
	最大面积组合	172	22.87	20.09
	最小面积组合	155	14.41	14.32
最佳长边匹配	短轴	160	17.08	15.96
	长轴	172	22.87	18.36
	剩余短轴	158	16.03	15.66
	剩余长轴	172	22.87	18.36
	最大面积组合	172	22.87	18.32
	最小面积组合	158	16.03	15.70
最佳区域匹配	短轴	157	15.50	14.34
	长轴	170	21.96	18.28
	剩余短轴	157	15.50	14.24
	剩余长轴	170	21.96	18.28
	最大面积组合	170	21.96	18.28
	最小面积组合	157	15.50	14.67

材总面积的比值;考虑到余料的可利用性,将第 1 阶段最后一次切割获得的最小边长超过 1 m 的矩形视为可折减余料,并计算扣除该部分面积后的折减浪费率。

由板材排布结果可知,最佳短边匹配的母材选择策略结合短轴、剩余短轴、最小面积 3 种分割策略的组合浪费率最低,相较于效果较差的排布策略,材料节省超过 8%。考虑到余料的可利用性,最终可选择折减浪费率最低的最佳短边匹配与剩余短轴分割策略组合。

最佳短边匹配策略中,最小折减浪费率和最大折减浪费率的典型布局如图 23 所示。由此可见,底层面板排布的紧凑性并不代表最终材料最省,恰当的排布策略能显著降低材料浪费。

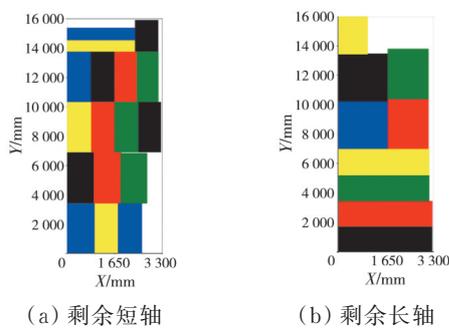


图 23 最佳短边匹配策略典型布局

Fig. 23 Typical layout of the optimal short-side matching strategy

在母材与面板单元尺寸相差较大时,选择排布策略显得更有意义。假设将母材边长放大 4 倍,得到如表 3 所示结果:最佳区域匹配结合短轴分割策略,此种情况下获得的最小折减浪费率仅为 7.60%;各排布策略中最大折减浪费率虽然下降至 17.08%,但与最优排布策略相比,差值扩大到最小折减浪费率的一倍以上。在不同母材与面板的相对尺度下,进行多种策略排布结果的比选是经济且必要的。

## 4 结论

针对大型复杂龙骨-面板结构弯扭构件几何描述困难、骨架竣工信息获取不全面、面板几何信息提取效率低下等问题,基于点云数据和启发式算法开展了如下工作:

1) 提出一种半自动骨架点云划分方法,实现了龙骨结构主梁、次梁以及圈梁点云数据的划分。

2) 提出一种适用于多边形弯扭管状结构的轴线提取方法,实现了龙骨轴线及截面特征提取,并据此建立可供面板深化设计的竣工逆向模型,模型重建偏差控制在 6 mm 以内。

表 3 大面积母板 Guillotine 策略排布结果

Table.3 Results of Guillotine strategy for large-area mother plates

母板选择策略	余料分割策略	母板数量	浪费率/%	折减浪费率/%
最佳短边匹配	短轴	10	17.08	8.83
	长轴	10	17.08	16.33
	剩余短轴	10	17.08	8.83
	剩余长轴	10	17.08	16.33
	最大面积组合	10	17.08	16.33
	最小面积组合	10	17.08	8.33
最佳长边匹配	短轴	10	17.08	10.36
	长轴	10	17.08	17.08
	剩余短轴	10	17.08	9.76
	剩余长轴	10	17.08	15.70
	最大面积组合	10	17.08	15.70
	最小面积组合	10	17.08	8.62
最佳区域匹配	短轴	10	17.08	7.60
	长轴	10	17.08	17.08
	剩余短轴	10	17.08	7.69
	剩余长轴	10	17.08	17.08
	最大面积组合	10	17.08	17.08
	最小面积组合	10	17.08	8.77

3) 提出一种相交轴线交点智能提取算法,实现了面板角点自动提取。

4) 基于邻接关系,提出面板智能提取算法,实现了板单元自动划分。

5) 基于 Guillotine 算法,对面板单元的智能下料排布方式进行了探索,并通过材料浪费率对排布方案进行评估,实现了面板单元的智能下料排布。

提出的弯扭多边形管状结构提取算法受点云数据完整性影响较大,数据缺失情况下轴线的准确获取有待完善;仅对面板深化设计部分环节进行数字智能化探索,所考虑的排布算法也较为单一,该方向的完善也是今后的工作重点之一。

## 参考文献

- [1] 柳明亮, 李翔宇, 邢国华, 等. 大跨空间轮辐式弦支桁架结构施工过程监测与模拟分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2023, 40(1): 95-102.  
LIU M L, LI X Y, XING G H, et al. Monitoring and simulation analysis of construction process for large-span spatial spoke chord-supported truss structure [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2023, 40(1): 95-102. (in Chinese)
- [2] 王泽逸. 大跨空间轮辐式弦支桁架结构动力性能及地震响应分析研究[D]. 西安:长安大学, 2022.  
Wang Z Y. Study on dynamic response and seismic response analysis of large-span spatial spoke-type chord-

- supported truss structure [D]. Xi'an: Chang'an University, 2022. (in Chinese)
- [3] 张爱林, 崔伟龙. 基于大空间空气升温模型的弦支穹顶结构抗火反应非线性有限元分析[J]. 钢结构, 2009, 24(3): 67-71, 44.  
ZHANG A L, CUI W L. Nonlinear finite element analysis of suspend-dome fire resistance based on the model of atmosphere temperature ascending in large space [J]. Steel Construction, 2009, 24(3): 67-71, 44. (in Chinese)
- [4] 周绪红, 刘界鹏, 程国忠, 等. 基于点云数据的大型复杂钢拱桥智能虚拟预拼装方法[J]. 中国公路学报, 2021, 34(11): 1-9.  
ZHOU X H, LIU J P, CHENG G Z, et al. Intelligent virtual trial assembly of large and complex steel arch bridges based on point cloud data [J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(11): 1-9. (in Chinese)
- [5] 程国忠, 周绪红, 刘界鹏, 等. 复杂超高层结构尺寸质量智能化检测方法[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(7): 264-271.  
CHENG G Z, ZHOU X H, LIU J P, et al. Intelligent inspection method for dimensional quality of complex high-rise structures [J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(7): 264-271. (in Chinese)
- [6] CHENG G Z, LIU J P, CUI N, et al. Virtual trial assembly of large steel members with bolted connections based on point cloud data [J]. Automation in Construction, 2023, 151: 104866.
- [7] PAN X, YANG T Y. 3D vision-based bolt loosening assessment using photogrammetry, deep neural networks, and 3D point-cloud processing [J]. Journal of Building Engineering, 2023, 70: 106326.
- [8] GRANDIO J, RIVEIRO B, LAMAS D, et al. Multimodal deep learning for point cloud panoptic segmentation of railway environments [J]. Automation in Construction, 2023, 150: 104854.
- [9] LAMAS D, JUSTO A, SOILÁN M, et al. Instance and semantic segmentation of point clouds of large metallic truss bridges [J]. Automation in Construction, 2023, 151: 104865.
- [10] JUSTO A, LAMAS D, SÁNCHEZ-RODRÍGUEZ A, et al. Generating IFC-compliant models and structural graphs of truss bridges from dense point clouds [J]. Automation in Construction, 2023, 149: 104786.
- [11] XIE Y, LI S Y, LIU T R, et al. As-built BIM reconstruction of piping systems using PipeNet [J]. Automation in Construction, 2023, 147: 104735.
- [12] 陈秋莲, 宋仁坤, 崔耀东. 考虑余料价值的三阶段二维剪切下料算法[J]. 图学学报, 2017, 38(1): 10-14.  
CHEN Q L, SONG R K, CUI Y D. A method for three-staged two-dimensional guillotine cutting with usable leftover [J]. Journal of Graphics, 2017, 38(1): 10-14. (in Chinese)
- [13] 姚怡. 二维装箱问题的启发式算法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- YAO Y. Research on two-dimension bin packing problem of heuristic algorithms [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [14] LIBRALESSO L, FONTAN F. An anytime tree search algorithm for the 2018 ROADEF/EURO challenge glass cutting problem [J]. European Journal of Operational Research, 2021, 291(3): 883-893.
- [15] HADJ SALEM K, SILVA E, OLIVEIRA J F, et al. Mathematical models for the two-dimensional variable-sized cutting stock problem in the home textile industry [J]. European Journal of Operational Research, 2023, 306(2): 549-566.
- [16] MOSTAJABDAVEH M, SALMAN F S, TAHMASBI N. Two dimensional guillotine cutting stock and scheduling problem in printing industry [J]. Computers & Operations Research, 2022, 148: 106014.
- [17] PARREÑO F, ALVAREZ-VALDES R. Mathematical models for a cutting problem in the glass manufacturing industry [J]. Omega, 2021, 103: 102432.
- [18] 刘界鹏, 程国忠, 周绪红, 等. 大型复杂钢结构智能数字化尺寸检测和预拼装技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2023: 60-62.  
LIU J P, CHENG G Z, ZHOU X H, et al. Intelligent digital dimension detection and pre-assembly technology for large complex steel structures [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2023: 60-62. (in Chinese)
- [19] LIU J P, FU L H, CHENG G Z, et al. Automated BIM reconstruction of full-scale complex tubular engineering structures using terrestrial laser scanning [J]. Remote Sensing, 2022, 14(7): 1659.
- [20] Autodesk, Inc. Revit API Docs [DB/OL]. [2022-09-03]. <http://www.revitapidocs.com/2021.1/>.
- [21] 段文付, 张大伟. 光谷国际网球中心弧面菱形点式玻璃幕墙关键施工技术[J]. 施工技术, 2017, 46(2): 24-26, 108.  
DUAN W F, ZHANG D W. Key construction technology of rhombic-arc-point styled glass curtain wall of optical valley international tennis center [J]. Construction Technology, 2017, 46(2): 24-26, 108. (in Chinese)
- [22] 王鹏, 辛佩康, 刘寅, 等. 利用最小二乘法的网壳结构点云节点中心坐标提取[J]. 图学学报, 2024, 45(1): 183-190.  
WANG P, XIN P K, LIU Y, et al. Extracting node center coordinates of point clouds in reticulated shell structure using least squares method [J]. Journal of Graphics, 2024, 45(1): 183-190. (in Chinese)
- [23] JYLÄNKI J. A thousand ways to pack the bin - A practical approach to two-dimensional rectangle bin packing [EB/OL]. <http://clb.demon.fi/files/RectangleBin-Pack.pdf>, 2010.