

# 基于点云数据的大型复杂空间结构数字孪生 施工监测技术

任振洋<sup>1</sup>, 黄皓铨<sup>2</sup>, 张国杰<sup>3</sup>, 易天琦<sup>4</sup>, 李晨<sup>3</sup>, 鲁涛<sup>3</sup>, 查晓雄<sup>2\*</sup>

(1. 深圳市建筑工务署工程管理中心, 广东 深圳 518033; 2. 哈尔滨工业大学(深圳)土木与环境工程学院, 广东 深圳 518055; 3. 中建科工集团有限公司, 广东 深圳 518107;  
4. 元宇智数(深圳)科技有限公司, 广东 深圳 518000)

**摘要:** 对于大型复杂空间结构具有构件数量多、节点构造复杂等特点, 采用传统建模方法存在效率低、计算难度高的问题, 难以满足这类大型结构的分析要求。针对该问题, 提出了一种基于三维激光扫描技术的大型复杂空间结构数字孪生施工监测方法, 并针对大型复杂空间结构的逆向建模技术展开研究。研究过程中, 首先借助三维激光扫描技术获取结构点云数据; 针对整体点云数据, 采用基准点全排列结合ICP算法进行配准处理, 并通过统计滤波和体素化方法实现降噪; 针对不同截面形式的梁柱, 提出采用基于RANSAC算法的中心线拟合方法以提取构件轴线; 针对构件的连接节点, 提出采用基于近邻点算法的方法进行轴线端点拟合。最后从数字孪生模型的几何精度与有限元分析适用性两方面进行验证。结果表明: 基于点云数据构建的数字孪生模型, 其精度和有限元结果与BIM设计模型具有高度一致性, 这验证了数字孪生技术在几何映射与性能预测方面的精确性, 为该技术在施工监测中的应用奠定了基础。

**关键词:** 大型复杂结构; 点云数据; 数字孪生技术; 逆向建模; 有限元分析; 施工监测

中图分类号: TU765, P225.2

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)09-0121-10

DOI: 10.13969/j.jzgigz.20240425001

## Digital Twin Construction Monitoring Technology for Large and Complex Spatial Structures Based on Point Cloud Data

REN Zhenyang<sup>1</sup>, HUANG Haokai<sup>2</sup>, ZHANG Guojie<sup>3</sup>, YI Tianqi<sup>4</sup>,

LI Chen<sup>3</sup>, LU Tao<sup>3</sup>, ZHA Xiaoxiong<sup>2\*</sup>

(1. Shenzhen Construction and Engineering Department Project Management Center, Shenzhen 518033, China;

2. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology (Shenzhen), Shenzhen 518055, China;

3. China Construction Science and Industry Co., Ltd., Shenzhen 518107, China; 4. Yuan Yu Intelligent

Digital (Shenzhen) Technology Co., Ltd., Shenzhen 518000, China)

\*Corresponding author: zhahero@126.com

**Abstract:** Due to the multitude of components and intricate joint structures in large complex space structures, traditional modeling methods are inefficient and computationally demanding, failing to meet the needs of such extensive

收稿日期: 2024-04-25

基金项目: 深圳市科技计划项目 (GJHZ20220913143007013、KCXST20221021111408021)

作者简介:

任振洋(1989—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事工程项目管理方面的工作。E-mail: 754912976@qq.com。

黄皓铨(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事建筑点云和数字孪生方面的研究。

通信作者:

查晓雄(1968—), 男, 博士, 教授, 主要从事钢-混凝土组合结构方面的研究。E-mail: zhahero@126.com。

structures. To address this problem, a 3D laser scanning-based digital twin method for monitoring large complex space structures is introduced to explore reverse modeling techniques. Initially, 3D laser scanning captures the structural point cloud. The complete dataset is then aligned using a full datum registration and the ICP algorithm, followed by noise reduction through statistical filtering and voxelization. For beams and columns with different cross-sectional forms, the RANSAC-based centerline fitting algorithm is proposed to extract the component axes; for the component connecting joints, the nearest-neighbor-point algorithm is proposed to carry out the axial end point fitting. Finally, the geometric accuracy and finite element analysis of the digital twin model are verified. The results show that the digital twin model based on point cloud data has high consistency with the BIM design model in terms of accuracy and finite element results. This verifies the accuracy of the digital twin technology in geometric mapping and performance prediction, and lays the foundation for the application of this technology in construction monitoring.

**Keywords:** large complex structure; point cloud data; digital twin technology; reverse modeling; finite element analysis; construction monitoring

随着工业4.0时代的来临,以数字信息技术创新为引领的智能建造,正逐步成为建筑业发展的新趋势。同时,在国内大力发展绿色低碳的装配式建筑及对建筑结构的寿命具有安全高要求的背景下,各类新兴技术如大数据、物联网、人工智能等逐渐被运用于土木工程当中<sup>[1-2]</sup>。其中,数字孪生(digital twin)概念最早源自美国 Grieves 教授于2003年提出的“信息镜像模型”<sup>[3]</sup>,直至2012年 NASA 首次引入了孪生的概念,并给出了数字孪生的明确定义。随后,许多学者开始对数字孪生展开了研究。陶飞等<sup>[4]</sup>提出了数字孪生的五维模型,在传统的数字孪生三维虚拟实体、物理实体和连接的基础上,增加了孪生数据和服务两个维度,搭建了数字孪生体的现有基本框架。在土木工程领域,刘占省等<sup>[5-6]</sup>在建筑工程交付模型、装配式建筑施工和预应力钢结构等应用场景中提出了实现数字孪生的关键方法;韩冬辰<sup>[7]</sup>就目前 BIM 模型的“信息-物理”交互策略中存在的不足进行了问题溯源,并研究了相应的解决方法;张建新等<sup>[8]</sup>基于 BIM、有限元和传感器等技术,提出了装配式钢节点混凝土框架结构的数字孪生建造方法。

在建筑领域中,数字孪生技术的实现涵盖了模型构建、数据集成、虚实交互及服务等多个关键环节<sup>[9]</sup>。这其中,模型构建是数字孪生的基础,是物理实体在虚拟环境中的数字化副本,可现实对结构进行可视化和性能评估。传统的三维初始模型基本是依据设计资料与施工图纸构建的,这在大部分情况下是可行的。而随着建筑行业的发展与演变,部分历史文化遗产建筑存在图纸缺失的情况;此外,由于施工偏差或结构加固改造,建筑结构的实际尺寸与设计图纸也会存在差异。针对此类问题,在实际工程中需要使用现场测量的数据来建立对应的虚拟模型。

随着建筑数字信息化和智能化技术的发展,三维激光点云技术在工程建设方面的运用愈加成熟。点云数据除了能提供建筑物表面各点的空间坐标信息,还包括构件的颜色和种类等属性,是建筑领域中数字化进程的重

要一环<sup>[10]</sup>。通过激光扫描仪或图像获取的点云数据可以快速准确地记录建筑相关对象的三维几何信息,相比于传统的测量技术,激光点云技术在建筑三维重建、质量监测和施工进度等方面具有速度更快、精度更高、性能更好等优点<sup>[11]</sup>。在数字孪生技术领域,通过三维点云扫描技术可以快速得到能准确反映物理实体外形、结构和功能的数字孪生模型。周绪红等<sup>[12]</sup>针对大型复杂钢拱桥的牛腿-拱间横梁节段及拱肋-拱肋节段,提出了智能化的预拼装方法,并对数字孪生理论框架下的虚拟预拼装技术进行了展望;齐宏拓等<sup>[13]</sup>针对大型复杂钢结构提出了基于点云算法的智能施工方法,并获取了合拢段的配切量;廖岳等<sup>[14]</sup>基于逆向建模和轴线提取等智能算法,提出了针对复杂龙骨-面板结构的智能施工和深化设计的方法;王鹏等<sup>[15]</sup>采用最小二乘法计算得到网壳结构节点的中心坐标,并对各节点进行三角网格化处理,构建出整体网壳模型;杨振发等<sup>[16]</sup>基于 RANSAC 算法提取平面特征,对场景中的平面等几何结构进行了重建。

目前,数字孪生技术在国内外的研究尚处于起步阶段,特别是在模型建立方面,大部分仅利用点云数据对结构表面进行了三维重建,且缺乏统一的方法框架,对于包含多种大型空间复杂结构的会展建筑中的应用研究也较少<sup>[17]</sup>。这类建筑结构构件数量多、重量大且多为复杂的空间结构形式,采用数字孪生技术存在扫描点云数据量大、计算难度高、建模复杂及效率低等问题。因此,需要对这类大型复杂空间结构中数字孪生施工监测方法的使用进行研究。

本文以深圳市金融文化中心项目为工程背景,开展基于数字孪生技术与三维激光点云扫描技术的大型复杂空间结构施工监测方法体系研究。针对工程中使用的方形钢管柱和工字形钢梁,提出采用点云分割算法对构件进行分类;提出采用 RANSAC 中心拟合算法实现对构件中性轴的提取;提出采用近邻点算法对构件节点进行拟合。结果表明,采用此方法可以获得高精度且轻量化的数字孪生体模型,论证了基于点云数据的数字孪生施工监测技术

在实际大型复杂空间结构中应用的可行性和潜力。

## 1 工程概况

深圳市金融文化中心项目位于广东省深圳市福田区(图1),结构长约115 m,宽约77 m,高约为37.4 m,主体为钢框架+空间网格结构。其中,塔楼框架的梁柱采用焊接矩形钢、H型钢、热轧型钢等钢材,地下室钢筋混凝土框架柱采用焊接矩形钢等钢材。由于该工程项目构件和节点数量多(图2)且结构复杂,采用传统的施工质量监督方法具有成本高、效率低等问题,且建立真实结构的数字孪生模型难度较大。因此,本项目针对大型复杂空间结构的数字化建模方法与技术体系展开了研究。



图1 深圳市金融文化中心

Fig. 1 Shenzhen financial and cultural center

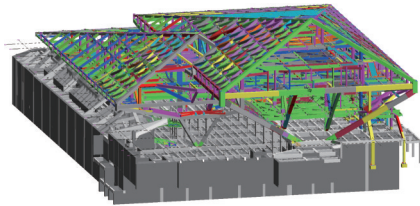


图2 BIM模型

Fig. 2 BIM model

## 2 钢结构逆向建模

### 2.1 点云采集与预处理

本文以深圳市金融文化中心的视觉样板间(图3)为研究对象,现场点云扫描仪采用徕卡 ScanStation P16 专业工程型激光扫描仪(图4),以黑白标靶格作为配准的基准点,并进行多站点云数据的采集,共采集了5站数据,包含结构的四个角点位置和结构内部位置(图5),其中单站扫描精度在 $\pm 2$  mm以内。各相邻站点之间均布置至少3个黑白标靶格用于数据配准。

#### 2.1.1 点云配准

多站点云数据因测站点不同,因此各有不同的坐标系,为获取统一坐标系下的点云数据,需要对各测站点云进行配准。首先采用标靶格检测算法对扫描数据中的标靶点云进行检测和提取,采用最小二乘法对标靶点云进行拟合,将得到的标靶中心坐标作为基准点<sup>[18]</sup>。最后,

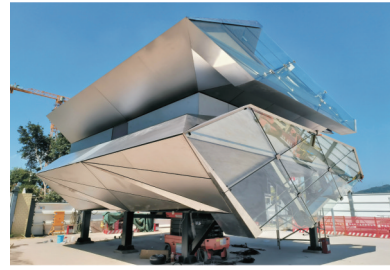


图3 视觉样板间

Fig. 3 Visual model room



图4 三维激光扫描仪

Fig. 4 3D laser scanner

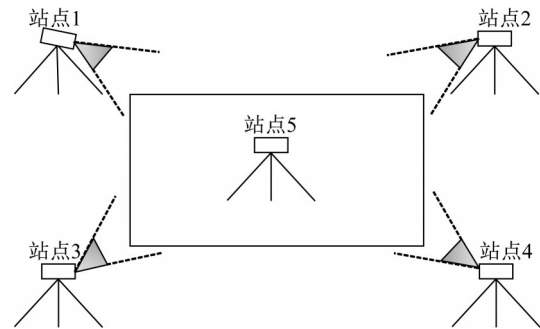


图5 三维激光扫描仪站点布置

Fig. 5 Arrangement of 3D laser scanner site

采用基准点全排列配准算法得到相邻两站数据的旋转矩阵 $R$ 和平移矩阵 $T$ ,实现各站点间点云数据的粗配准<sup>[19]</sup>。接着采用ICP算法,在初始配准的基础上,进一步计算各个点云之间的近似旋转平移矩阵,完成精配准<sup>[20]</sup>。其原理为存在两个点云 $P$ 和 $Q$ ,在点云 $P$ 中任意选择一点,标记为 $p_i$ ,从点云 $Q$ 中搜寻一个距离最短的点,标记为 $q_i$ ;通过 $p_i$ 、 $q_i$ 的三维空间坐标关系得到变化矩阵,经过多次迭代后获得最佳变化矩阵,实现点云间的精细配准,如图6所示。

#### 2.1.2 对象点云降噪

由于钢框架表面上覆盖有装饰面、格栅、玻璃幕墙等构件,且扫描作业位于施工现场,导致无效和干扰点云较多,会对后续结构特征信息的提取存在较大的影响,因此需要针对目标点云进行精细化降噪。

首先,样板间构件上的点云分布较为密集,围绕在构

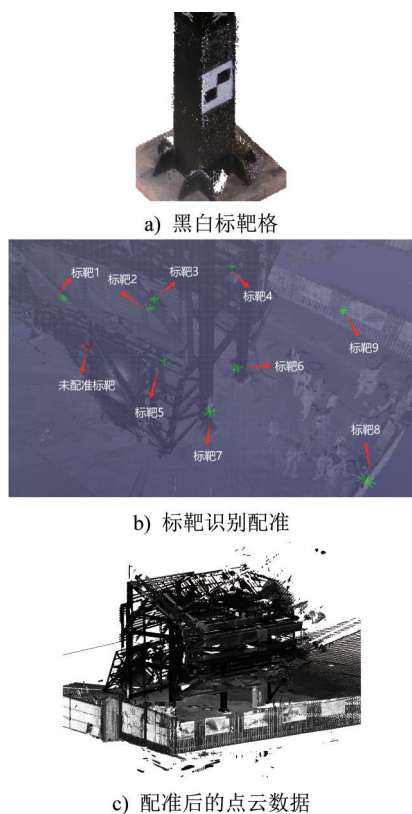


图6 三维点云配准

Fig. 6 3D point cloud alignment

件附近的噪声点、离散点及孤立点则相对稀疏,可采用 Statistical Outlier Removal 滤波器(即统计滤波方法)处理三维离散点云。统计滤波法<sup>[21]</sup>是三维离散点云处理中常用的一种方法,其原理为:对点云数据中每一个点的邻域进行统计分析,计算它到所有临近点的平均距离  $d$ 。假设计算结果服从高斯分布,其分布形状由均值  $\mu$  和方差  $\sigma$  决定,标准范围为  $[\mu - \alpha\sigma, \mu + \alpha\sigma]$ (其中  $\alpha$  为方差系数),则距离的阈值  $d_{\max} = \mu \pm \alpha\sigma$ 。所有平均距离超出该标准范围的点都会被过滤,进而去除与结构无关的离散点。

由于结构点云数据量庞大,直接处理的计算量较大,因此需采用体素降采样方法,在不破坏点云本身几何形状的同时,能减少点云的数据量。其原理为:将点云空间划分为一个个的立体方格(即体素)。然后对所有内部包含点云数据的体素进行计算,求解其质心(所有点坐标的平均值),并以该质心替代体素内的所有点集,从而减少点云的数据量,如图7所示。最后得到一个仅包含梁柱结构且完成体素采样降噪的点云模型。滤波降噪后的点云如图8所示。

### 2.1.3 点云聚类分割

对于整体结构的点云模型,为实现单根主梁、次梁和钢柱点云的区分,以便后续对结构特征提取,需采用点云

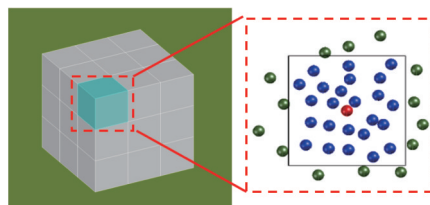


图7 体素化降采样示意

Fig. 7 Schematic of voxelised downsampling

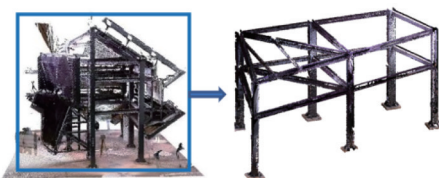


图8 结构点云滤波降噪效果示意

Fig. 8 Schematic of the noise reduction effect of structural point cloud filtering

分割算法对采集的点云数据中不同物体的位置和边界进行描绘分割,从而实现对主次梁及钢柱的精确分类,如图9所示。点云聚类分割是依据点云数据带有的空间、曲率、法线方向等特征,将具有相似特征的点云数据划分在单独的数据文件中<sup>[22]</sup>。因为梁柱之间的截面几何信息有所不同,在保持着各个构件空间连接关系的前提下,采用点云聚类分割将原始模型划分为梁和柱两个部分(图10),以便后续对结构特征的处理。接着对分割后的点云进行编号,钢柱为A1-A6,主梁为B1-B19,次梁为C1-C2,整体编号如图11所示。



图9 梁柱点云聚类分割

Fig. 9 Beam and column point cloud clustering segmentation

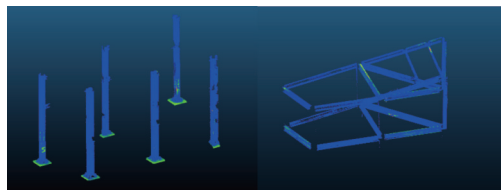


图10 点云分割后的梁柱点云

Fig. 10 Beam and column point cloud after point cloud segmentation

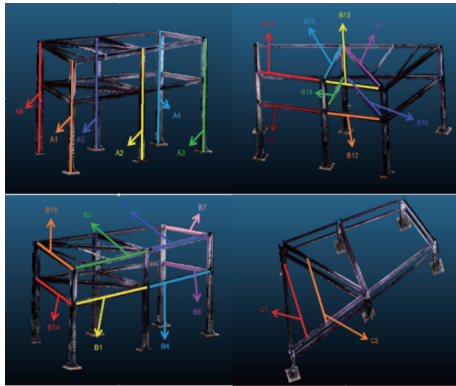


图 11 梁柱编号

Fig. 11 Beam and column numbering

## 2.2 结构特征提取

### 2.2.1 构件截面和轴线

由于大型复杂空间结构的点云数据量庞大,数字孪生模型的建立和计算难度较高,且效率较低。本文通过获取梁柱截面轴线的方式,实现数字孪生体中钢框架的逆向建模,因此需要对构件进行截面特征与轴线提取。

针对构件点云数据中轴线的提取,常用的两种算法是拉普拉斯收缩算法<sup>[23]</sup>和RANSAC迭代算法<sup>[24]</sup>,两种算法流程如图12所示。由于金融中心样板间的构件基本为等截面构件,采用RANSAC这种基于拟合平面的迭代算法能得到平顺准确的构件轴线;拉普拉斯收缩算法是基于近邻点的三角网格划分计算几何中心轴线,以此获取的轴线可能受截面形式及噪声点的影响,与真实的轴线存在一定差异。

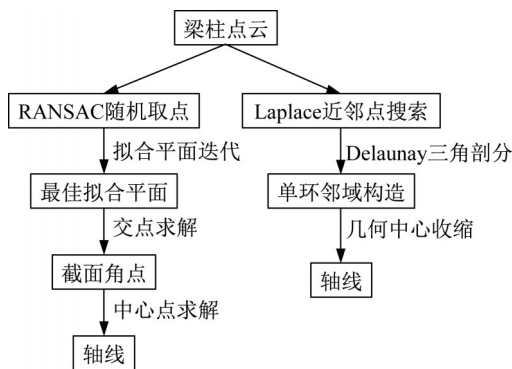


图 12 常用的两种轴线提取算法流程

Fig. 12 Flowchart of two commonly used axis extraction algorithms

RANSAC迭代算法的原理为:在点云数据中随机选定多点得到拟合平面,计算其他点到拟合平面之间的距离,并设定距离阈值,将距离小于此阈值的点称为局内点,并统计拟合平面内局内点的个数。接着对整体点云数据进行遍历操作,在迭代 $n$ 次后,选出局内点数最多的

平面,作为构件表面的最佳拟合平面(图13)。根据梁柱不同的截面形式会得到不同的拟合平面,将拟合平面的相交点作为截面的角点,再通过截面中心点的计算公式进行计算,以此得到构件的轴线。求解得到的梁柱轴线如图14所示。

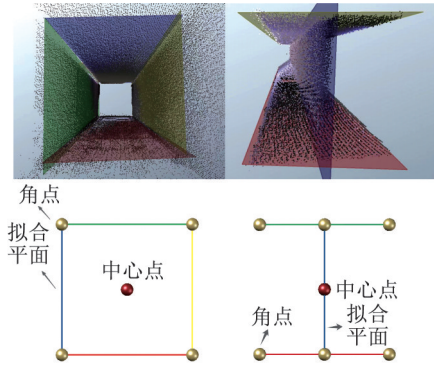


图 13 RANSAC拟合平面及截面中心点求解  
Fig. 13 RANSAC fitting plane and section center point solution

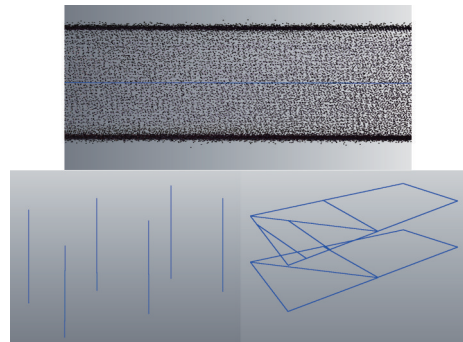


图 14 RANSAC迭代求解后的轴线

Fig. 14 Axis after RANSAC iterative solution

### 2.2.2 连接节点

利用点云数据获取数字孪生模型的构件轴线时,会遇到各构件连接节点处轴线点缺失或不相交的现象<sup>[25]</sup>,造成此现象有两方面的原因:一是因为真实结构构件的轴线本就无法相交于一点;二是点云扫描过程中在节点连接处的点云数据是缺失的,从而提取不到节点处的轴线信息。本文采用一种基于近邻点拟合的算法,对钢框架连接节点处的轴线点进行合并(图15)。其基本原理为:计算三维空间中各直线间的距离以及对对应距离的点,按照编号顺序对相邻距离点对进行合并,从而正确描述各构件轴线的空间连接关系,以此得到整体结构的梁柱完整轴线模型如图16所示。

### 2.2.3 模型建立

通过对构件截面形式、轴线和连接节点的特征进行提取,在CloudCompare中建立钢框架的梁柱轴线数字孪

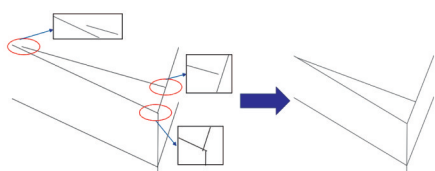


图15 节点拟合示意

Fig. 15 Schematic of node fitting

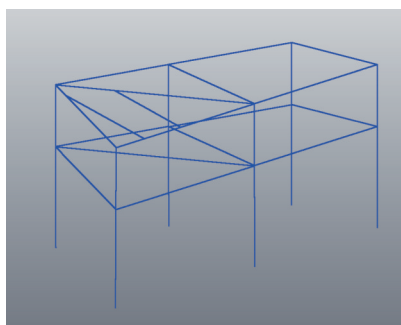


图16 钢结构轴线模型

Fig. 16 Steel structure axis model

生模型。基于截面轴线点和提取的截面特征,进行实体类创建组件(即截面扫描),将轴线两端点P、Q作为实体单元的起终点,生成钢结构的逆向模型如图17所示。基于CloudCompare生成钢框架的实体数字孪生模型,能将复杂空间结构可视化,并能协助现场施工指导管理和监测。

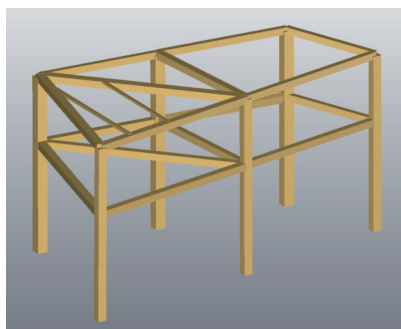


图17 数字孪生体模型

Fig. 17 Digital Twin (DT) model

### 3 精度验证

对逆向模型进行验证,以评估模型精度对现场施工指导与监测的适用性。其中,数据采集、配准、特征提取及模型重建等环节都会引入误差。物理实体映射轴线模型包含端点间距和轴线夹角两方面信息,分别以设计间距和轴线模型间距的差值、设计夹角和轴线模型夹角的差值为标准,对梁柱轴线模型进行精度验证。由于施工现场较为复杂,且直接对比测量数据存在一定难度,其核心难点在于测量选点与点云选点的匹配问题。为此,本

文通过计算从数据采集到模型建立全过程的误差,实现精度的间接验证。

点云的采集误差由2.1节可知为2 mm左右,现对点云配准、特征提取以及模型重建的误差进行分析计算。点云的配准误差是由不同测站点云对齐时产生的,包含两部分:配准全局误差和点云对点云误差,由表1可知配准全局误差整体在2 mm以内。特征提取及模型重建误差可通过实际模型与拟合模型的碰撞分析得到,其步骤为:在Revit中建立标准构件模型,将模型采样点云化,并对表面点云进行平面拟合及轴线计算,最后对比两种模型的平面和轴线位置关系。如图18所示,平面拟合的误差基本在亚毫米级(0.1~1 mm)内,而轴线提取的误差在微米级以下,由算法造成的误差可基本忽略不计(图18)。

表1 点云配准误差

Table 1 Point cloud alignment error mm

编号	配准全局误差	点云对点云误差
测站1	0.113	1.442
测站2	0.376	1.598
测站3	0.256	1.762
测站4	0.642	1.261
测站5	0.409	1.094

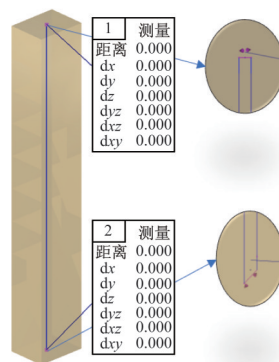


图18 拟合平面和提取轴线的误差(单位:mm)

Fig. 18 Errors in fitting planes and extracting axes (unit: mm)

间距精度和夹角精度检验结果如表2、表3所示。可见,基于点云数据重建的模型中,构件端点间距的差值可控制在20 mm以内,各构件之间夹角的差值控制在0.25°以内。考虑点云采集及配准带来的误差总和在4 mm以内,特征计算的误差较小可忽略,其余差值源于设计与施工之间的误差,基于上述方法建立的逆向模型,基本可满足数字孪生中几何信息的映射要求。

表2 间距精度检验结果  
Table 2 Pitch accuracy test results

编号	端点间距/mm			相对误差/%
	设计间距	模型间距	差值	
B1	5 600	5 603	3	0.05
B2	5 600	5 594	-6	0.11
B4	4 983	4 973	-10	0.20
B5	4 983	4 977	-6	0.12
B6	3 157	3 162	5	0.16
B7	3 157	3 162	5	0.16
B9	4 040	4 039	-1	0.02
B10	4 040	4 040	0	0
B12	3 700	3 705	5	0.14
B13	3 700	3 707	7	0.19
B14	5 943	5 938	-5	0.08
B15	5 943	5 937	-6	0.10
B16	5 920	5 932	12	0.20
B17	5 920	5 932	12	0.20
B18	4 298	4 309	11	0.26
B19	4298	4 315	17	0.39

表3 夹角精度检验结果  
Table 3 Clamping angle accuracy test results

编号	构件夹角/(°)			相对误差/%
	设计夹角	模型夹角	差值	
A1-B1	90.00	90.05	0.05	0.05
A1-B2	90.00	90.08	0.08	0.09
A1-B14	90.00	90.24	0.24	0.26
A1-B15	90.00	89.78	-0.22	0.24
B6-B4	84.23	84.39	0.16	0.19
B9-B18	84.79	84.68	-0.11	0.13
B12-B18	95.21	95.19	-0.03	0.03
B12-B16	46.34	46.33	-0.01	0.02
B16-B18	38.45	38.46	0.01	0.03
B14-B16	56.29	56.35	0.06	0.11

## 4 有限元分析及施工监测

### 4.1 BIM和数字孪生有限元分析

近年来,BIM(building information modeling)建筑信息模型的全面应用为智能建筑的发展带来了深远的影响。BIM作为一种应用于工程项目设计、建造与管理的

数据信息化建模技术,在建筑工程领域已得到广泛运用。随着信息技术的突破和示范工程的应用实践,BIM技术也逐步向智能化的方向发展,BIM模型的一体化管理,实现了工程建设项目之间各个阶段的信息共享。这种工程信息的实时反映,能显著提高项目各部门之间的沟通效率,从而提升施工质量控制精准度,保障施工项目的顺利推进和安全进行<sup>[26]</sup>。

而数字孪生技术不仅仅局限于数据信息化建模,它通过创建能真实反映物理实体的虚拟模型,结合实时数据、历史数据和预测模型,实现对物理实体状态的全面映射。经过点云逆向建模得到的孪生模型在满足高保真和可更新要求的同时,基于此基础再进行结构的分析计算,能反映结构真实的性能状态,实现施工过程的准确监测,为风险预警和后续决策提供了协助。二者的区别如表4所示。

表4 BIM和数字孪生的区别  
Table 4 Difference between BIM and digital twin

功能	BIM	数字孪生
3D模型可视化	√	√
数据交换(双向)	×	√
实时数据	×	√
项目模拟分析	√	√
数据算法自驱的模型更新	×	√

与静态的BIM相比,数字孪生始终是动态变化的,且具备真实性和实时性等特点,通过现场捕捉的数据信息,对孪生模型进行自更新,更加强调物理实体与虚拟模型之间的信息连接和数据分析<sup>[27-28]</sup>。虚拟模型能真实反映物理实体的真实状态,并对其进行优化和预测;物理实体的自身数据信息能实时映射到虚拟模型中,使其不断得到修正,进而实现实物—虚拟的孪生。虚拟模型要真实反映物理实体的真实状态,除了要实现几何信息的同步外,还需要能对物理实体的性能进行预测。

本文依据金融中心的视觉样板BIM设计模型和点云数据重建的数字孪生模型,运用ANSYS进行初步的有限元分析,来验证此类数字孪生模型在性能预测方面的精确性。本文还借助了ANSYS中APDL命令流来实现模型的快速计算分析,通过编写脚本来实现有限元分析过程的自动化。APDL命令流的前处理模块需要定义结构的几何参数和物理参数,逆向模型分析的几何参数由点云重建模型直接提供,物理参数如材料、边界、荷载等,从BIM信息模型中获取。其流程如图19所示,由点云重建的几何实体模型以IGES文件格式输入至命令流

中,其他几何参数以数据文本TXT文件格式输入至命令流中,再结合事先由BIM提供的物理参数信息,便可实现逆向模型的结构分析和性能预测,BIM模型同理。此处采用线荷载形式模拟后续浇筑楼板产生的荷载作用,通过对比二者的计算结果,得到初始几何缺陷对结构性能的影响。结果如图20~22所示。

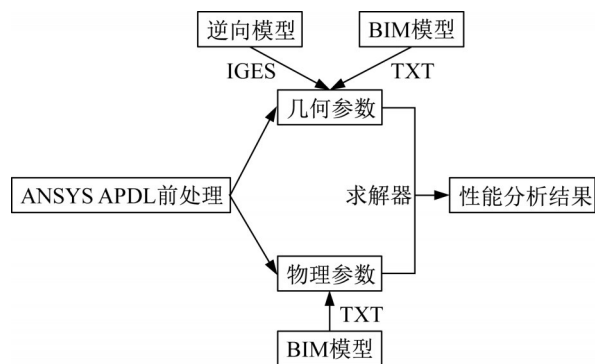


图19 APDL有限元分析流程

Fig. 19 APDL finite element analysis process

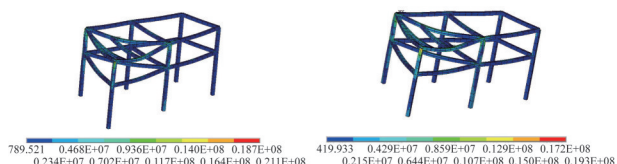


图20 BIM设计模型和逆向模型应力分布(单位:Pa)

Fig. 20 BIM design model and reverse model stress distribution (unit: Pa)

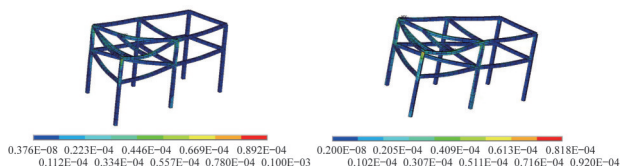


图21 BIM设计模型和逆向模型应变分布(单位:mm)

Fig. 21 BIM design model and reverse model strain distribution (unit: mm)

经对比逆向模型和BIM设计模型的有限元分析结果,其应力、应变及变形的分布有较高的一致性,最大变形都出现在次梁跨中处。如表5所示,应力、应变的相对误差控制在10%以内,变形的相对误差控制在15%以

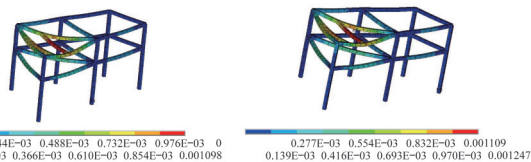


图22 BIM设计模型和逆向模型变形分布(单位:mm)

Fig. 22 BIM design model and reverse model distortion distribution (unit: mm)

内,考虑到二者仅在几何参数上存在区别,其造成误差的原因主要为施工过程中产生的几何偏差。

#### 4.2 施工监测中的运用

在施工监测方面,数字孪生模型的应用不仅提高了施工质量的监测效率,而且能将施工的误差数据引入到分析模型中,从而实现施工过程中对结构的质量、动态、和性能的把控。本文采用RANSAC平面拟合结合截面中心提取算法,从大量点云数据中获取钢结构构件轴线,并与设计图纸的空间位置关系进行对比,从而对施工质量进行监测。与全站仪单点测量等传统测量方式的局限性相比,其在效率和使用范围上都有着显著的提高,且在测量精度方面也满足数字孪生模型保真性的要求。同时,以往的施工模拟监测多以设计阶段确定的模型为基础进行计算,未考虑到施工过程中可能产生的偏差。而经过点云重建的几何孪生模型,可在APDL中作为有限元分析的几何参数输入,用于真实反映结构性能的预测及后续施工模拟,并在实时扫描过程中对该几何模型进行更新。

数字孪生技术通过记录施工现场构件和环境的信息,创建虚拟模型对施工全过程进行模拟,确保施工的安全进行<sup>[29]</sup>。因其在几何映射和性能预测方面的能力,该模型可用于施工过程监测。首先通过三维激光点云扫描技术得到点云模型,再经过预处理和特征提取创建数字孪生模型,将BIM模型和数字孪生模型进行对比分析,得到结构在施工全过程的状态响应;再对应力、应变和变形等指标的最不利位置进行监测,通过布置传感器将采集的数据返回至数字孪生模型中,从而对虚拟模型进行修正,进一步优化其预测性能,最终实现对工程项目施工全周期的结构状态把控。其技术路线如图23所示。

表5 有限元结构分析对比

Table 5 Comparison of finite element structural analysis

结构分析对比	BIM设计模型	数字孪生模型	绝对误差	相对误差/%
最大应力/MPa	21.10	19.30	1.80	8.5
最大应变	$10.00 \times 10^{-4}$	$9.20 \times 10^{-4}$	$0.80 \times 10^{-4}$	8.0
最大变形/mm	1.09	1.24	0.15	13.7

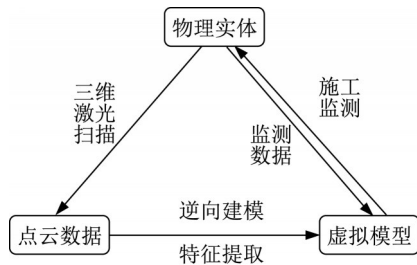


图23 数字孪生施工监测技术路线

Fig. 23 Digital twin construction monitoring technology route

## 5 结论

针对大型复杂空间结构在模型建立中存在的数据量大、构造复杂、时间长等问题,本文基于点云数据的数字孪生模型建立得到以下结论:

(1) 基于聚类分割、RANSAC迭代和空间直线最近邻点拟合算法及经典的点云处理技术,提出了一种钢结构逆向建模方法,作为数字孪生的基础模型。

(2) 对数字孪生模型开展几何精度验证和有限元分析验证,将差值控制在合理范围内,论证了模型的几何映射与性能预测的能力。

(3) 在实际应用中,通过计算和对比构件轴线与设计图纸的位置关系、孪生模型和BIM模型的分析结果,对结构施工质量和性能状态进行监测,可进一步考虑传感器的布置并对模型进行优化,建立更完整准确的数字孪生体。

## 参考文献:

- [1] 林楷奇,郑俊浩,陆新征.数字孪生技术在土木工程中的应用:综述与展望[J].哈尔滨工业大学学报,2024,56(1):1-16.DOI:10.11918/202306009.  
LIN Kaiqi, ZHENG Junhao, LU Xinzhen. Digital twin and its applications in civil engineering: Review and outlook [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2024, 56(1): 1-16. DOI: 10.11918/202306009. (in Chinese)
- [2] 徐阳,金晓威,李惠.土木工程智能科学与技术研究现状及展望[J].建筑结构学报,2022,43(9):23-35.DOI:10.14006/j.jzjgxb.2022.0087.  
XU Yang, JIN Xiaowei, LI Hui. State-of-the-art and prospect of intelligent science and technology in civil engineering [J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(9): 23-35. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2022.0087. (in Chinese)
- [3] JONES D, SNIDER C, NASSEHI A, et al. Characterising the digital twin: A systematic literature review [J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2020, 29: 36-52. DOI: 10.1016/j.cirpj.2020.02.002.
- [4] 陶飞,刘蔚然,张萌,等.数字孪生五维模型及十大领域应用[J].计算机集成制造系统,2019,25(1):1-18.DOI:10.13196/j.cims.2019.01.001.  
TAO Fei, LIU Weiran, ZHANG Meng, et al. Five-dimension digital twin model and its ten applications [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(1): 1-18. DOI: 10.13196/j.cims.2019.01.001. (in Chinese)
- [5] 刘占省,刘俊杰,及炜煜,等.基于数字孪生的建筑工程交付模型建立及应用研究[J].建筑结构学报,2024,45(4):97-106.DOI:10.14006/j.jzjgxb.2023.0025.  
LIU Zhansheng, LIU Junjie, JI Weiyu, et al. Research on establishment and application of delivery model of construction engineering based on digital twin [J]. Journal of Building Structures, 2024, 45(4): 97-106. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2023.0025. (in Chinese)
- [6] 刘占省,邢泽众,黄春,等.装配式建筑施工过程数字孪生建模方法[J].建筑结构学报,2021,42(7):213-222.DOI:10.14006/j.jzjgxb.2020.0475.  
LIU Zhansheng, XING Zezhong, HUANG Chun, et al. Digital twin modeling method for construction process of assembled building [J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(7): 213-222. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2020.0475. (in Chinese)
- [7] 韩冬辰.面向数字孪生建筑的“信息-物理”交互策略研究[D].北京:清华大学,2020.  
HAN Dongchen. Research on strategies of "information-physical" interaction oriented to building digital twin [D]. Beijing: Tsinghua University, 2020.
- [8] 张健新,翟越洋,赵茜娅.基于数字孪生的装配式钢节点混凝土框架结构建造技术[J].土木与环境工程学报(中英文),2024,46(1):130-138.DOI:10.11835/j.issn.2096-6717.2022.068.  
ZHANG Jianxin, ZHAI Yueyang, ZHAO Xiya. Construction technology of prefabricated concrete frame with steel connector based on digital twin [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2024, 46(1): 130-138. DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.068. (in Chinese)
- [9] JIANG F, MA L, BROYD T, et al. Digital twin and its implementations in the civil engineering sector [J]. Automation in Construction, 2021, 130: 103838. DOI: 10.1016/j.autcon.2021.103838.
- [10] RASHIDI M, MOHAMMADI M, SADEGHLOU KIVI S, et al. A decade of modern bridge monitoring using terrestrial laser scanning: Review and future directions [J]. Remote Sensing, 2020, 12(22): 3796. DOI: 10.3390/rs12223796.
- [11] 梁阳泽,蔡伟浪,杨超杰,等.点云技术在建筑施工管理领域研究进展与展望[J].施工技术(中英文),2023,52(14):1-8. DOI:10.7672/sgjs2023140001.  
LIANG Yangze, CAI Weilang, YANG Chaojie, et al. Research progress and prospect of point cloud technology in the field of construction management [J]. Construction Technology, 2023, 52(14): 1-8. DOI: 10.7672/sgjs2023140001. (in Chinese)
- [12] 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. DOI:10.19721/j.cnki.1001-7372.2021.11.001.

- ZHOU Xuhong, LIU Jiepeng, CHENG Guozhong, 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. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2021.11.001. (in Chinese)
- [13] 齐宏拓, 刘界鹏, 程国忠, 等. 基于点云数据的大型复杂钢结构智能化施工方法[J]. 土木工程学报, 2024, 57(1): 65-75. DOI: 10.15951/j.tmgxb.22090903.
- QI Hongtuo, LIU Jiepeng, CHENG Guozhong, et al. Intelligent construction of large and complex steel structure based on point cloud data[J]. China Civil Engineering Journal, 2024, 57(1): 65-75. DOI: 10.15951/j.tmgxb.22090903. (in Chinese)
- [14] 廖岳, 李汉涛, 刘界鹏, 等. 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[J/OL]. 土木与环境工程学报(中英文), 2024: 1-11 [2024-01-29]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=JIAN20240125001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- LIAO Yue, LI Hantao, LIU Jiepeng, et al. Intelligent digital construction for complex frame-panel structures based on point cloud data and heuristic algorithms [J/OL]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2024: 1-11 [2024-01-29]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=JIAN20240125001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>. (in Chinese)
- [15] 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. DOI: 10.11996/JG.j.2095-302X.2024010183.
- WANG Peng, XIN Peikang, LIU Yin, 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. DOI: 10.11996/JG.j.2095-302X.2024010183. (in Chinese)
- [16] 杨振发, 万刚, 曹雪峰, 等. 基于几何结构特征的点云表面重建方法[J]. 系统仿真学报, 2017, 29(11): 2684-2692. DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201711013.
- YANG Zhenfa, WAN Gang, CAO Xuefeng, et al. Surface reconstruction of point cloud based on geometric structure[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(11): 2684-2692. DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201711013. (in Chinese)
- [17] XU J H, SHU X, QIAO P, et al. Developing a digital twin model for monitoring building structural health by combining a building information model and a real-scene 3D model[J]. Measurement, 2023, 217: 112955. DOI: 10.1016/j.measurement.2023.112955.
- [18] YANG H, SHI J N, CARLONE L. TEASER: Fast and certifiable point cloud registration[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2021, 37(2): 314-333. DOI: 10.1109/TRO.2020.3033695.
- [19] CASE F, BEINAT A, CROSILLA F, et al. Virtual trial assembly of a complex steel structure by Generalized Procrustes Analysis techniques[J]. Automation in Construction, 2014, 37: 155-165. DOI: 10.1016/j.autcon.2013.10.013.
- [20] GUAN W, LI W T, REN Y. Point cloud registration based on improved ICP algorithm [C]//Proceedings of the 2018 Chinese Control and Decision Conference (CCDC). Shenyang, China: IEEE, 2018: 1461-1465.
- [21] ZHAO Q, GAO X R, LI J L, et al. Optimization algorithm for point cloud quality enhancement based on statistical filtering[J]. Journal of Sensors, 2021, 2021(1): 7325600. DOI: 10.1155/2021/7325600.
- [22] WANG X H, CHEN H W, WU L S. Feature extraction of point clouds based on region clustering segmentation [J]. Multimedia Tools and Applications, 2020, 79(17): 11861-11889. DOI: 10.1007/s11042-019-08512-1.
- [23] HE G Z, YANG J, BEHNKE S. Research on geometric features and point cloud properties for tree skeleton extraction [J]. Personal and Ubiquitous Computing, 2018, 22(5): 903-910. DOI: 10.1007/s00779-018-1153-2.
- [24] GHAREMANI M, WILLIAMS K, CORKE F, et al. Direct and accurate feature extraction from 3D point clouds of plants using RANSAC[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 187: 106240. DOI: 10.1016/j.compag.2021.106240.
- [25] HU H L, LI Z, JIN X G, et al. Curve skeleton extraction from 3D point clouds through hybrid feature point shifting and clustering[J]. Computer Graphics Forum, 2020, 39(6): 111-132. DOI: 10.1111/cgf.13906.
- [26] JIANG Y. Intelligent building construction management based on BIM digital twin [J]. Computational Intelligence and Neuroscience, 2021, 2021(1): 4979249. DOI: 10.1155/2021/4979249.
- [27] RADZI A R, AZMI N F, KAMARUZZAMAN S N, et al. Relationship between digital twin and building information modeling: A systematic review and future directions [J]. Construction Innovation, 2024, 24(3): 811-829. DOI: 10.1108/ci-07-2022-0183.
- [28] NGUYEN T D, ADHIKARI S. The role of BIM in integrating digital twin in building construction: A literature review[J]. Sustainability, 2023, 15(13): 10462. DOI: 10.3390/su151310462.
- [29] 郭樱, 李爱群. “城市-建筑-人”耦合视角下数字孪生技术应用与分圈层场景构建[J]. 工业建筑, 2023, 53(4): 180-189. DOI: 10.13204/j.gyjzg23012403.
- WU Ying, LI Aiqun. Application and circled layer scene construction of digital twin technology from coupling perspective of "city-building-people"[J]. Industrial Construction, 2023, 53(4): 180-189. DOI: 10.13204/j.gyjzg23012403. (in Chinese)