

融合BIM模型和3D激光点云技术的装配式建筑误差控制

郝华文¹,李 帅²,花昌涛¹,胡赛丽³,苗润智⁴

(1.池州职业技术学院 建筑与园林系,安徽 池州 247100;

2.河南城建学院 电气与控制工程学院,河南 平顶山 467044;

3.池州开放大学 教务处,安徽 池州 247100;

4.池州职业技术学院 电子信息与传媒系,安徽 池州 247100)

摘 要:拼接装配式建筑有效控制杆件之间的连接误差,有助于减少拆、装和调整工作,从而提高建筑结构的稳定性与结构强度。为此,在提出融合BIM模型和3D激光点云技术的装配式建筑误差设计与控制方法的基础上,设计装配式建筑的BIM模型,并使用3D激光点云技术提取建筑立面结构,推导出具体的建筑模型,实现基于BIM模型和3D激光点云技术的装配式建筑建模。同时建立整体坐标系,并根据线位移、角位移误差的取值,实施纠正与控制,完成装配式建筑误差设计与控制方法的设计。结果表明:应用上述方法可将实测误差控制在建筑体所允许的误差值范围内,对提高装配式建筑的稳定性与结构强度具有突出作用。

关键词:BIM模型;3D激光点云;装配式建筑;误差控制;立面结构;线位移误差;角位移误差

中图分类号:TP391 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-055X(2026)01-0094-09

当前,装配式建筑施工过程中的灵活性更强且整体施工效率较高,采用工厂预制和模块化方式,可以同时进行施工和制造,能够大幅缩短施工周期^[1]。误差控制是装配式建筑施工的关键,需要综合考虑应力结构、弹性模量分布等因素,同时还要考虑动态调整模型

收稿日期:2025-08-07

基金项目:安徽省高校中青年教师培养行动项目“青年骨干教师境内访学研修资助”(JNFX2025140);安徽高校自然科学研究重点项目“岩溶强发育地质条件下溶洞对高层建筑地基稳定性影响研究”(2022AH052863);安徽省质量工程高等继续教育改革重点项目“基于互联网背景下的继续教育线上线下融合发展的教学模式研究”(2023jxjy040)。

作者简介:郝华文,男,安徽怀宁人,副教授,高级工程师,主要从事工程质量与安全管理、智能建造、职业教育研究;李帅,男,辽宁辽阳市人,讲师,主要从事岩土工程研究;花昌涛,男,安徽霍邱人,主要从事建筑施工管理、职业教育研究;胡赛丽,女,安徽东至人,主要从事计算机应用技术、远程教育研究;苗润智,男,安徽巢湖人,主要从事影像制作、短视频处理研究。

的各种参数。苏宁等^[2]提出了基于极点配置的控制方法,通过配置响应传递函数的极点,使各级部件结构脉冲响应函数的衰减速度达到极值状态,并推导出TVMD的稳定性最大化优化参数解析公式,以实现对接建筑误差的控制与协调。然而,该方法的应用涉及复杂的运算流程,使得其对建筑误差的控制准确性受到一定影响。丁焱等^[3]提出了将BN-MNA模型融合在施工之中的控制方法,基于元网络分析模型对接装配式建筑的施工进度进行分析,通过贝叶斯网络构建BN-MNA模型,并对各项风险评估值进行定量计算,以实现对接建筑误差的针对性控制。贝叶斯网络可对已发生风险事件进行反向诊断,该方法的控制作用效果具有双向性,不能完全满足准确性控制的实际应用需求。

为了解决上述问题,在保证施工安全的基础上,实现对接装配式建筑误差的有效控制,针对融合BIM模型和3D激光点云技术的装配式建筑误差设计与控制方法值得研究。BIM模型是一种建筑信息模型,旨在利用数字技术进行建筑设计与施工管理,通过创建和使用模型来实现建筑项目的可视化、协作和数据管理^[4]。3D激光点云技术是基于激光测距原理的三维扫描技术,通过向目标物体发射激光脉冲并测量其反射回来的时间来获取目标物体表面离扫描仪的距离信息^[5],从而结合扫描仪的精确位置和姿态信息,可以构建出目标物体的三维点云数据。

1 基于BIM模型和3D激光点云技术的装配式建筑建模

装配式建筑的建模,就是利用BIM软件模型与3D激光点云技术提取立面结构,并基于此求解基础建设模型。基于BIM模型和3D激光点云技术的装配式建筑建模总体技术路线如图1所示。

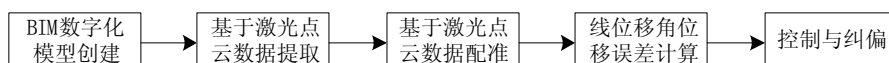


图1 融合BIM和3D激光点云装配式建筑建模技术路线

在BIM软件中,构建装配式建筑模型就是通过BIM技术创建数字化模型,用以表示建筑结构的各个方面。通过BIM技术,能够在建立装配式建筑构件库的同时,增加虚拟构件的数量以及规格水平,从而实现对预制构件库的标准化处理。该软件的三维特点使得装配式建筑设计更为直观化和可视化,且作为三维信息的集成平台,能够预演施工中可能出现的问题,并优化施工方案,从而降低施工风险^[5]。此外,BIM模型中的工艺设备等数据信息可以直接被主机元件用来进行数据分析,使建筑杆件拼接的协同水平相对较高。利用BIM模型可以模拟装配式建筑的施工过程,这种模拟不仅局限于构件的吊装、安装、连接等方面,还涉及立面结构的拼装,这也为后续结构单元信息的提取提供了数据支持。

1.1 基于3D激光点云技术下的建筑结构数据提取

在3D激光点云技术下,提取建筑立面结构数据就是使用激光雷达系统对建筑物进行

扫描,获取建筑表面的反射点。这些反射点按照三维坐标以点的形式分布在三维空间中,形成点云数据。BIM软件会对原始的点云数据进行预处理,以减少噪声和冗余数据,提高后续处理的效果^[6-7]。对于装配式建筑而言,3D激光点云技术主要利用平面拟合算法从点云数据中提取出地面所在平面。

定义地面所在平面为 A_0 ,点云数据相对于地面而存在的平面为 A_1 ,且 A_1 始终垂直于 A_0 ,则可将两平面间的点云数据表示见式(1):

$$S = \frac{\hat{g}}{\alpha^2} \cdot \sqrt{\chi \left| \vec{d}_{A_0} \times \vec{d}_{A_1} \right|} \quad (1)$$

式中: \vec{d}_{A_0} 表示 A_0 平面的法向量; \vec{d}_{A_1} 表示 A_1 平面的法向量; χ 表示点云运算系数; \hat{g} 表示反射点在三维空间中的排列特征; α 表示垂直平面间的拟合参数。

在公式(1)的基础上,推导3D激光点云技术下的装配式建筑立面结构提取见式(2):

$$G = (fS)^2 + \beta \frac{\sum_{\delta=1}^{+\infty} (h_{\max} - h_{\min})^{-1/\epsilon^2}}{|\Delta D|} \quad (2)$$

式中: f 表示激光扫描强度; δ 表示建筑立面的边界计值参数; β 表示点云数据的3D成像系数; ΔD 表示点云数据总量; h_{\max} 、 h_{\min} 分别表示BIM软件中反射点定义项的最大值与最小值; ϵ 表示三维坐标定义系数。三维点云数据投影到地面上的二维点云数据依然可以用来描述装配式建筑的结构模型,但只适用于平面结构。

1.2 点云融合的BIM模型推导

装配式建筑建模是指通过融合BIM模型和3D激光点云技术,将装配式建筑的各个组成部分(如预制构件、连接件等)在虚拟环境中进行数字化建模的过程。将建筑物抽象为由线条、曲面等基本元素组成的三维模型,可以准确地描述每个构件及其空间关系。在装配式建筑中,通过设置参数并定义相应规则,可以自动生成各种标准尺寸和形态的构件^[8-9]。通过BIM技术,可以将设计、制造和施工过程中的各类信息进行集成,以保证模型结构的准确性。而利用3D激光点云技术所获取的立面结构信息,则可以在软件模型中对建筑结构进行精准复原,以避免线位移、角位移出现较大偏差。

在图1所示装配式建筑模型中,规定横向连接杆件的数量为 k_1 ,纵向连接杆件的数量为 k_2 ,BIM软件所允许的最大建模夹角为 φ ($0 < \varphi < \frac{\pi}{2}$),联立公式(2),可将装配式建筑的基本模型定义为式(3):

$$H = \arg \min_{0 < \varphi < \frac{\pi}{2}} \sum_{\gamma=1}^{+\infty} \left[\frac{\sin \varphi}{\left\| \vec{j} \right\|} (k_1 + k_2) - \phi \bar{L} \right]^2 \quad (3)$$

式中: γ 表示点云信息集成参数; \vec{j} 表示装配式建筑结构的建模向量; \bar{L} 表示地面投影中建筑结构的长宽均值; ϕ 表示3D投影系数。基于BIM模型和3D激光点云技术

进行装配式建筑建模,能够最大化保障横向杆件、纵向杆件之间的垂直连接关系,从而使得后续误差控制过程中,线位移、角位移误差不会出现偏差值过大的情况。

2 装配式建筑误差的控制与纠偏

在基础建筑模型中,建立整体坐标系,并根据线位移、角位移误差的取值,实施针对性地纠正与控制,以实现融合BIM模型和3D激光点云技术的装配式建筑误差控制方法的设计。

2.1 3D激光点云数据提取与整体坐标系建立

装配式建筑主要关注的是其构造方式,即将建筑的主要部分采用预制件通过可靠的连接方式建造。在整体坐标系中,为了施工放样方便,通常会使用所采用的平面直角坐标系与建筑设计的轴线相垂直,即整体坐标系的 X 轴、 Y 轴、 Z 轴分别与不同的建筑设计轴线保持垂直关系^[10-11],如图2所示。

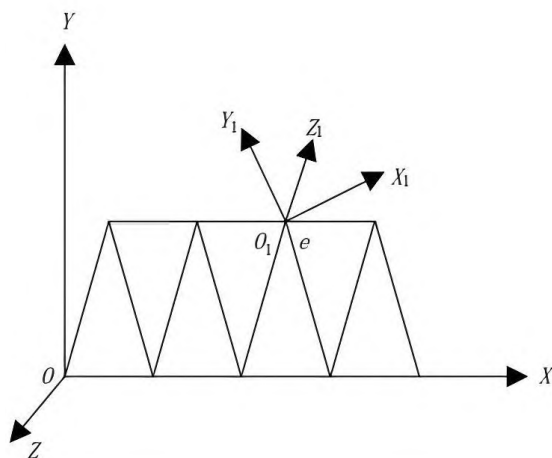


图2 装配式建筑的整体坐标系

在图2所示的整体坐标系中,规定 e 表示一个任意杆件,不与第一个及最后一个建筑节点相连,定义与 e 相连的坐标原点为 O_1 。该节点处与建筑结构 X 轴相对应的坐标轴为 X_1 ,与建筑结构 Y 轴相对应的坐标轴为 Y_1 ,与建筑结构 Z 轴相对应的坐标轴为 Z_1 ,联立公式(3),推导装配式建筑整体坐标系的定义为式(4):

$$J_{O_1} = \frac{\log(1-e)}{\log(\vec{c}_{X_1}\vec{c}_{Y_1}\vec{c}_{Z_1})^{-1}} \times \sqrt{\phi \left| \frac{v_{X_1}}{\vec{c}_{X_1}} + \frac{v_{Y_1}}{\vec{c}_{Y_1}} + \frac{v_{Z_1}}{\vec{c}_{Z_1}} \right|} \quad (4)$$

式中: \vec{c}_{X_1} 表示 X_1 轴方向上的法向量; \vec{c}_{Y_1} 表示 Y_1 轴方向上的法向量; \vec{c}_{Z_1} 表示 Z_1 轴方向上的法向量; t 表示先验系数; ϕ 表示杆件连接节点在坐标系内的映射项参数; v_{X_1} 表示 X_1 轴方向上的垂线段测量值; v_{Y_1} 表示 Y_1 轴方向上的垂线段测量值; v_{Z_1} 表示 Z_1 轴方向上的垂线段测量值。整体坐标系为了方便描述和定位建筑的不同部分与元素,因此,其所在位置会发生变化。

2.2 线位移、角位移误差计算

线位移误差是指建筑构件尺寸偏差或位置偏移,能够导致实际安装位置与设计位置之间出现偏差。线位移误差是不可避免的,只能通过BIM模型和3D激光点云技术手段来控制其数值水平^[12]。具体计算方法见式(5):

$$M_1 = \frac{1}{J_{O_1}} (1 - \hat{b})^\kappa \quad (5)$$

式中: \hat{b} 表示整体坐标系中的杆件尺寸偏差向量; κ 表示直线方向上的偏移参数。

装配式建筑所采用的构件材料在制造过程中可能存在尺寸不稳定、表面平整度不达标等问题,这些误差可能会影响构件之间的角度关系,这种不满足建筑标准的角度关系即为角位移误差。如果测量准确,且杆件不存在弯曲、变形等问题,角位移误差是可以避免的,即其运算结果可能为零^[13]。角位移误差的计算表达为式(6):

$$M_2 = \frac{\left| \frac{\lambda}{\hat{m}} \right|^2}{\frac{1}{J_{O_1}} \times |\Delta Q|} \quad (6)$$

式中: \hat{m} 表示整体坐标系中的杆件表面平整度; λ 表示横向角的偏移参数; ΔQ 表示连接杆件的单位长度。

通过提高测量精度、优化安装工艺、加强构件质量控制和使用高精度安装工具等手段,可以有效减少线位移、角位移误差的产生,从而确保装配式建筑的质量与稳定性。

2.3 装配故障的控制与纠偏

对于装配式建筑误差的纠正及控制,BIM模型可以精确地模拟建筑结构各个构件和部品部件,以及它们之间的连接方式和装配顺序。利用3D激光扫描仪对现场进行扫描,则可以快速地建立起建筑的三维影像模型,并与BIM模型进行对比分析。通过对比分析BIM模型和3D激光点云模型,可以找出两者之间的差异,即装配式建筑在实际建造过程中出现的误差^[14-15]。可通过模拟方式发现误差并进行及时纠正,调整构件尺寸,从而避免杆件之间出现较大的连接误差。

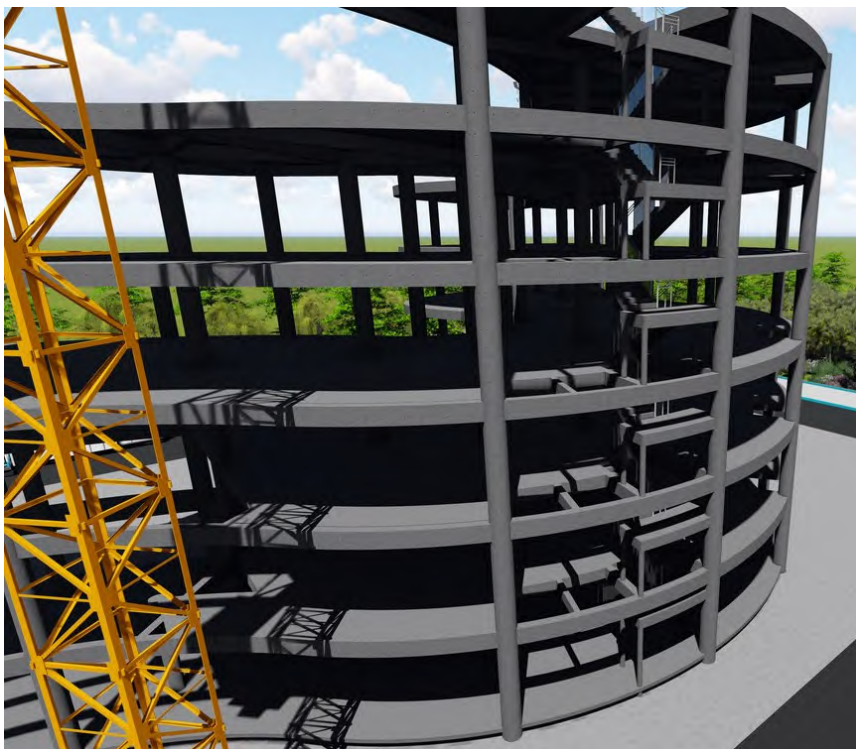
规定 p_1 表示BIM模型所允许的最大误差参量, p_2 表示3D激光点云模型所允许的最大误差参量,且 $p_1 \neq p_2 \neq 0$ 的不等式取值条件恒成立,结合公式(6)推导装配式建筑误差纠正及控制标准定义为式(7):

$$I = \frac{M_1 + M_2}{2} \cdot \sum_{\sigma=1}^{+\infty} \sqrt{\left| \frac{u_1}{p_1} \right| \cdot \left| \frac{u_2}{p_2} \right|} \quad (7)$$

式中: u_1 表示BIM模型下的误差测量值; u_2 表示3D激光点云模型下的误差测量值; σ 表示纠错向量。通过融合BIM模型和3D激光点云技术,可以实现对装配式建筑误差的精确识别、深入分析和有效控制,从而确保建筑质量。同时,这种技术融合也为装配式建筑的设计优化和协同工作提供有力支持。

3 工程实例

为验证融合BIM模型和3D激光点云技术的装配式建筑误差设计与控制方法的可行性及准确性,选取某高校的图书馆工程BIM建设为例,如图3所示。



注:建筑物的长宽高分别为35.5、24.5、15.5 m,占地面积1 000 m²,总建筑面积约6 000 m²。

图3 图书馆工程BIM实景图

图书馆建筑钢构件桁架由腹杆单元及上、中、下弦杆单元共同组成,各单元构件之间通过栓焊或焊接的方式进行固定与连接,且每个单元构件对制作精度的要求标准均相同,整体施工难度相对较大,部件结构的制作质量直接影响装配式建筑的稳定性与结构强度。桁架杆件最大截面达到了750 mm×525 mm×36 mm×36 mm,架构材质为Q345GJC,每类构件具有独立的编号前缀规则,如表1所示。

表1 建筑构件编号的前缀规则

编号	构件类型	起始编号	前缀
1	桁架	1	TR
2	柱	1	Z
3	水平支撑	1	H
4	垂直支撑	1	V
5	主梁	1	G
6	次梁	1	B

使用融合BIM模型和3D激光点云技术的装配式建筑误差设计与控制方法,随机采集1组装配式构件测控点(各10个),得到实体杆件的测控点三维坐标数据(为了数据统计简便,将3个轴向的数据拟合成一维数据),并与标准数据进行对比,最终装配误差结果如表2所示。

表2 装配误差结果

测控点编号	标准数据/cm	实测数据/cm	允许误差/cm	实测误差/cm	是否合格
1	990.00	990.11	3.00	+0.11	是
2	470.00	469.80	3.00	-0.20	是
3	182.30	181.76	3.00	-0.54	是
4	894.00	894.30	3.00	+0.30	是
5	101.00	102.03	3.00	+1.03	是
6	705.30	705.86	3.00	+0.56	是
7	339.30	339.87	3.00	+0.57	是
8	344.60	344.88	3.00	+0.28	是
9	255.30	255.05	3.00	-0.25	是
10	154.70	154.60	3.00	-0.10	是

从表2可以看出,图书馆工程误差控制结果显示所有构件均满足误差设计要求,将这些构件经过涂装后运往现场进行安装,可以保障装配式建筑施工项目的结构稳定性与结构强度。

在相同的条件下引入现有的极点配置方法和BN-MNA模型参与对比,各算法的数据点误差控制结果,如图4所示。

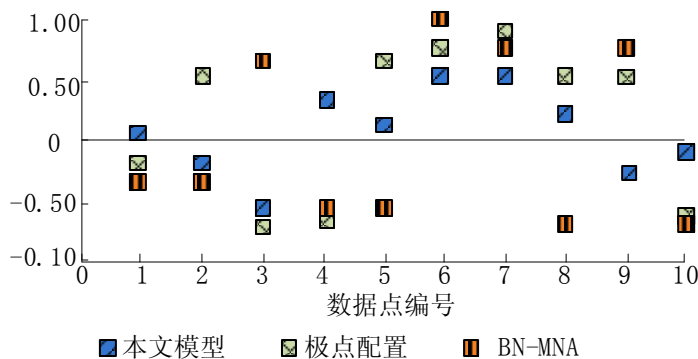


图4 误差数据点的仿真分布

4 研究结论

在装配式建筑的设计、制造与施工过程中,融合BIM模型和3D激光点云技术已成为提高精度、优化效率并降低成本的关键手段。这两种技术的融合不仅为装配式建筑带来了前所未有的便利和可能性,更在误差设计与控制方面展现了其独特价值。BIM模型能够实现建筑信息的集成与共享,为装配式建筑提供精确的设计依据;而3D激光点云技术则能够实时捕捉现场数据,确保设计与实际施工紧密衔接。二者的结合,使得装配式建筑在设计、制造、安装等各个环节中的误差得到了有效控制,从而提升了建筑的整体质量和效率。

5 参考文献

- [1] 王乾坤,申楚雄,郭曾,等. 基于建筑信息模型的装配式建筑施工能耗均衡的进度优化[J]. 武汉大学学报(工学版),2024,57(4):446-452.
- [2] 苏宁,彭士涛,洪宁宁. 基于极点配置的调谐黏滞质量阻尼器脉冲型振动响应控制[J]. 建筑结构学报,2023,44(9):115-123.
- [3] 丁垚,王人龙,李灵芝,等. 装配式建筑施工安全风险评估与控制的BN-MNA模型及应用[J]. 土木工程与管理学报,2022,39(4):153-161.
- [4] 刘昭,邓运成,李鸣. 一种基于BIM模型的铁路站场线路结构数据提取智能算法[J]. 铁道标准设计,2023,67(10):70-78.
- [5] 秦超,王亚飞,张宇超,等. 基于极端稀疏激光点云和RGB图像的3D目标检测[J]. 激光与光电子学进展,2022,59(18):447-458.
- [6] 刘宣广,李蒙蒙,汪小钦,等. 基于面向对象孪生神经网络的高分辨率遥感影像建筑物变化检测[J]. 遥感学报,2024,28(2):437-454.
- [7] 刘昌振,马威,马红,等. 建筑物轮廓方向计算和规则化的向量重组算法[J]. 测绘学报,2023,52(9):1584-1594.
- [8] 吴绍诚,王怀宝,王坚. GNSS与加速度计融合超高建筑动态监测数据分析[J]. 测绘科学,2023,48(2):45-53.
- [9] 谭金石,祖为国,刘丽. 激光扫描与倾斜摄影空地协同的建筑物三维模型构建方法[J]. 应用激光,2023,43(7):107-115.
- [10] 黄国庆,范宇航,姜言. 基于改进T-B谱方法的高层建筑风致疲劳损伤分析[J]. 振动与冲击,2022,41(5):243-250.
- [11] 强锋,方召欣,尚晓华,等. CCCW渗透结晶机理及在装配式建筑中的应用探索[J]. 建筑技术,2023,54(21):2662-2666.
- [12] 杨元元,赵延龙. 基于组合赋权二维云模型的装配式建筑构件吊装施工安全风险评价[J]. 自然灾害学报,2022,31(3):167-174.
- [13] 曹敏,方前程. 基于组合赋权一属性识别的装配式建筑绿色度评估模型研究[J]. 安全与环境学报,2022,22(4):2166-2175.
- [14] 王文静,孙峥峥,刘春原. 基于Markov过程的装配式建筑图像布局标定方法[J]. 计算机仿真,2022,39(1):190-194.
- [15] 丁垚,王人龙,李灵芝,等. 装配式建筑施工安全风险评估与控制的BN-MNA模型及应用[J]. 土木工程与管理学报,2022,39(4):153-161.

Error Control of Prefabricated Buildings by Integrating BIM Models and 3D Laser Point Cloud Technology

Hao Huawen¹, Li Shuai², Hua Changtao¹, Hu Saili³, Miao Runzhi⁴

- (1. Department of Architecture and Landscape, Chizhou Vocational and Technical College, Chizhou 247100, China;
2. School of Electrical and Control Engineering, Henan University of Urban Construction, Pingdingshan 467044, China;
3. Academic Affairs office, Chizhou Open University, Chizhou 247100, China;
4. Department of Electronic Information and Media, Chizhou Vocational and Technical College, Chizhou 247100, China)

Abstract: When assembling prefabricated buildings, effectively controlling connection errors between components can help reduce dismantling, assembly, and adjustment work, thereby improving the stability and structural strength of the building structure. Based on an error design and control methodology for prefabricated structures that integrates BIM models with 3D laser point cloud technology, this study designed a BIM model for prefabricated buildings. The 3D laser point cloud technology was employed to extract building facade structures, develop detailed architectural models, and create BIM models for prefabricated buildings using the integrated approach. Simultaneously, a global coordinate system is established to implement correction and control based on linear displacement errors and angular displacement errors, thus completing the design of the error correction method. The results indicate that the application of the above method can control the measured error within the allowable error range of the building, which has outstanding value in improving the stability and structural strength of prefabricated buildings.

Keywords: BIM model; 3D laser point cloud; Prefabricated buildings; Error control; Facade structure; Linear displacement error; Angular displacement error

[责任编辑:杨 洪 江 伟]