

基于三维扫描技术的超高墩柱施工变形研究

吴国华¹, 马文龙¹, 展玉华¹, 董舒静¹, 赵瑜隆^{1,2*}

1. 山东交通学院交通土建工程学院, 山东 济南 250357;

2. 山东省智能建造装备关键技术与系统重点实验室, 山东 济南 250357

摘要:为解决超高墩柱在传统液压爬模施工工艺中存在的变形问题,采用一种液压爬模系统定位方法,按施工方案定位、组装支架,初步装配液压爬模。采用三维扫描技术对墩柱定位进行复测和微调,确保液压爬模系统能精确安装到位;以点法向量夹角、曲率差异等参数作为分割准则,采用优化区域生长算法进行墩柱点云平面分割,将获得的关键点三维点云数据转换至二维平面,通过线性拟合等确定坐标范围,反算对应三维空间中墩柱控制点坐标;采用软件 Revit 建立墩柱三维模型并进行平面分割,分析 z 轴方向上4个平面的变形情况,每个平面提取66个特征点坐标,采用最小二乘法进行曲面拟合与变形量计算。结果表明:4个平面在 x 轴方向的实际变形与设计变形的最大相对差为0.003 0 cm,施工过程中墩柱变形较小,满足施工控制要求,通过三维扫描技术可较好地预测墩柱在施工过程中的变形。

关键词:三维扫描技术;超高墩柱;三维模型;变形

中图分类号:U445.4

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2025)04-0068-08

引用格式:吴国华,马文龙,展玉华,等.基于三维扫描技术的超高墩柱施工变形研究[J].山东交通学院学报,2025,33(4):68-75.

WU Guohua, MA Wenlong, ZHAN Yuhua, et al. Construction deformation of ultra-high piers based on 3D scanning technology[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2025, 33(4): 68-75.

0 引言

随着桥梁结构向高墩、大跨、复杂结构形式发展,墩柱变形控制成为保障施工质量和结构安全的关键问题之一。在超高墩柱液压爬模施工过程中,若墩柱发生非预期偏移或扭转,会影响结构线形,导致爬模系统上升受阻,存在较大安全隐患。如何实现对墩柱在施工过程中的全过程、高精度、非接触式监测,成为工程实践中的重要研究课题。

传统墩柱线形测量方法主要采用全站仪、水准仪等仪器测量结构物的若干特征点,仅提供有限的二维位置信息,难以全面反映墩柱整体的空间变形特征,且测量流程繁琐、效率较低^[1]。随着大跨高墩桥梁建设的不断推进,对结构变形监测的实时性与精度提出更高要求,三维激光扫描技术因其非接触、高精度、自动化等优势,在结构施工监测领域得到快速发展。该技术可在短时间内采集大量高密度点云数据,实现结构表面形态的高度还原,适用于复杂环境下大尺度构件的几何测量与变形识别。三维扫描仪技术从微距测量到长距测量快速发展,市场上出现一批知名制造商及其产品,如奥地利 RiegI 公司的 VZ400

收稿日期:2024-06-11

基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2020QE274);山东省重点研发计划(2020RKB01602);山东省交通运输厅科技计划(2022B102)

第一作者简介:吴国华(1999—),男,山东济宁人,硕士研究生,主要研究方向为交通基础设施建设,E-mail:1692614593@qq.com。

***通信作者简介:**赵瑜隆(1988—),男,山东菏泽人,副教授,硕士研究生导师,工学博士,主要研究方向为道路与铁道工程,E-mail:zhylong@126.com。

具备长距离(大于 600 m)高精度扫描能力,适用于桥梁和隧道等大型结构的测量;瑞士 Leica 公司的 ILRIS-3D 具有高分辨率成像与大视角特性,可提高点云细节还原度;美国 Trimble 公司的 Trimble GX 系统融合高精度激光雷达与图像采集模块,可同时获取结构的三维几何与纹理信息,提高结构建模效率^[2]。部分三维扫描仪配备内置摄像头,可捕捉点云数据的颜色信息^[3]。国内三维激光扫描技术研究起步较晚,但发展较快,武汉大学自主研发了激光扫描仪^[4]。2013 年,中海达推出移动式地面测量系统 IScan,集三维扫描装置、里程计和全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)定位模块、全景摄像头、集成控制单元及高性能便携电脑于一体,已广泛应用于城市街景、道路路面、隧道与桥梁等场景的数据采集^[5]。

熊文等^[6]通过定期多次三维激光数字建模,提出一种基于点云模型与工程知识的桥梁形态变化识别与跟踪方法,可快速准确识别主梁弯曲扭转及桥墩偏移等,提高桥梁非接触检测结果的科学性与精准性。王浩琛等^[7]采用三维扫描技术提出一套主梁测点自动定位及桥墩变形批量提取方法,并将该方法应用于某座跨江大桥主线桥及其匝道桥的主梁线形、桥墩偏移与桥墩扭转测量中。骆义^[8]采用三维激光扫描技术进行结构施工监测,提出一种基于点云分割配准和图像匹配的结构位姿监测方法,通过现场测量构件吊装过程中的空间姿态,辅助完成结构的精确拼装。Shen 等^[9]通过删除掩码的概念改进经典的最近点搜索法(iterative closest point, ICP)算法,对三维激光扫描获取的多视角点云数据进行配准,与其他改进 ICP 算法对比,此方法能提高点云配准精度。Zhou 等^[10]采用移动激光扫描系统监测高墩柱在不同施工阶段的空间偏移情况,通过多源数据融合提高监测结果的稳定性。在液压爬模系统控制方面,冯玉祥等^[11]分析爬模导轨偏差与模板上升稳定性的关系,解决了液压爬模系统轨道偏差及爬架适应异型塔柱的复杂曲面线形等难题。李海峰等^[12]研究大型桥梁施工中爬模系统与结构同步控制策略,提出通过实时位移反馈调整模板推进路径。现有研究主要聚焦于桥梁构件层级的几何偏差分析,缺乏对超高墩柱施工全过程变形的系统识别与量化手段。三维扫描技术在结构施工控制中应用不足,尚未实现与液压爬模系统的联动集成与高精度反馈控制。

本文基于三维激光扫描技术构建超高墩柱施工变形识别与分析方法,采用优化区域生长算法提取结构特征点,结合三维建模与曲面拟合技术,量化墩柱在施工过程中的空间偏移规律,以期在液压爬模施工中墩柱变形监测与精度控制提供理论支撑和工程参考。

1 墩柱数据的研究方案

1.1 墩柱变形的测量方法

为实现墩柱施工过程中的高精度变形监测,采用三维激光扫描技术结合液压爬模系统定位控制方法。根据施工方案,采用全站仪进行理论定位并完成支架初步放样,再组装液压爬模系统,完成初始安装。扫描前将扫描仪进行空间标定,获取墩柱三维点云数据。

采集完成的点云数据通过软件 MATLAB 进行配准与降噪处理,提取墩柱关键控制点坐标。建立三维与二维的映射关系,将空间控制点与设计数据进行匹配比对,识别各控制点的偏移量并反馈至现场施工系统,实现墩柱线形的动态校正。通过比对实际点云与设计坐标,评估系统安装偏差并确定微调量,确保液压爬模系统精确就位。该测量方法可避免传统方法仅依赖少量特征点的局限,提高测量的完整性、精度与实时性,为后续变形分析提供数据基础。

1.2 墩柱点云数据平面分割

墩柱由多个平面组成,扫描仪获取的点云数据中通常还包括与墩柱无关的数据,手动从中分离与墩柱相关的点云数据既耗时又复杂,可采用改进的区域生长算法^[13]实现特征点云的自动分割技术。引入法向量角度差和曲率差等特征作为判定依据,并增加相应的约束条件,优化原有的种子区域点云分割方法,形成有效分割墩柱点云数据的方法。

在优化算法时,发现法向量夹角对点云分割算法的效率起决定作用。为精确计算每个点的法向量,

采用主成分分析(principal component analysis, PCA)法^[14],该方法的核心步骤为:对某点附近邻域内的 n 点进行平面拟合,所得拟合平面的法向量作为该点法向量。计算一点的法向量即转化为拟合平面。计算时通常选取 n 较小的邻域点,采用最小二乘法进行平面拟合。

将数据集去中心化,可假设平面一般方程^[15]为:

$$Ax + By + Cz = 0,$$

式中: A 、 B 、 C 为已知常数,且不同时为零; x 、 y 、 z 为点在空间的坐标位置。

拟合平面时的优化目标函数为:

$$\min \sum_{i=1}^n d_i^2 = \min \sum_{i=1}^n (ax_i + by_i + cz_i)^2,$$

式中: a 、 b 、 c 为已知常数,定义平面在三维空间中的法向量方向; x_i 、 y_i 、 z_i 为点 i 在三维空间中的坐标位置。

假设 $a^2 + b^2 + c^2 = 1$, 即单位向量,点云中各点到拟合平面的距离

$$d_i = (ax_i + by_i + cz_i) / (a^2 + b^2 + c^2)。$$

将优化目标函数分别对 a 、 b 、 c 求导:

$$\frac{\partial}{\partial a} = x_i \sum_{i=1}^n (ax_i + by_i + cz_i) = 0,$$

$$\frac{\partial}{\partial b} = y_i \sum_{i=1}^n (ax_i + by_i + cz_i) = 0,$$

$$\frac{\partial}{\partial c} = z_i \sum_{i=1}^n (ax_i + by_i + cz_i) = 0。$$

将目标函数对 a 、 b 、 c 求导后,可转化为一个特征值问题,通过求解最小特征值对应的特征向量,获得拟合平面的法向量。将目标函数分别对 a 、 b 、 c 求导后形成矩阵方程,寻找一个平面,使所有点距这个平面的距离平方和最小,矩阵方程为:

$$\begin{pmatrix} \sum x_i^2 & \sum x_i y_i & \sum x_i z_i \\ \sum x_i y_i & \sum y_i^2 & \sum y_i z_i \\ \sum x_i z_i & \sum y_i z_i & \sum z_i^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} = 0。$$

简化后可求法向量 $\mathbf{x}$, 简化公式为:

$$A\mathbf{x} = 0。$$

转化为最小特征值问题,求最小特征向量,公式为:

$$\min \sum_{i=1}^n d_i^2 = (A\mathbf{x})^T \mathbf{x} = (\lambda \mathbf{x})^T \mathbf{x} = \lambda,$$

式中: λ 为拟合平面的特征向量,即法向量。

得到 λ 后,可将法向量与参考向量进行点乘运算,判断法向量的方向:若点乘结果为正,二者方向大致相同;若点乘结果为负,二者方向大致相反。

1.3 墩柱特征点提取算法

根据点云拟合平面后,沿 z 轴方向划分为多个微小切割区段,研究点云密度较高、边缘清晰、曲面拟合误差较小的平面,分别定义为平面 1~4,获取关键点的点云数据,与下文墩柱设计数据进行对比分析。处理墩柱的三维点云数据时,点云数据通常以复杂的空间姿态存在,直接从中提取控制点并分析可能会较复杂且效率低下。为提高计算效率,简化流程,将三维点云数据转换至二维平面上,二维点云数据更直观且简化,通过线性拟合等确定 z 坐标最大值和最小值的位置,根据 z 坐标的范围,将平面点云分割成多段,对每个分段进行平面圆拟合,可在该局部区域内找到最佳拟合圆。通过拟合圆的中心点和半径,反算对应三维空间中墩柱控制点坐标。设墩柱控制点点云集合为 $P_{n \times 3} \in \{(x_i, y_i, z_i), i=1, 2, \dots, n\}$ 。

在 x - y 平面上对点云数据进行直线拟合,得到直线表达式为:

$$y=kx+b_1,$$

式中: k 为直线斜率, b_1 为直线截距。

采用最小二乘法拟合,优化目标函数为^[16]:

$$\min \|\delta\|^2 = \sum (kx_i + b_1 - y_i),$$

式中 x_i, y_i 为第 i 个点的平面坐标。

计算点云在 x - y 平面的投影坐标,需获取点云主方向与参考平面间夹角。

采用 MATLAB 中的 polyfit 函数执行多项式拟合,基于给定的数据点,寻找一个能与数据点距离最小化的多项式^[17-18]。通过多项式拟合方法计算空间点云在 x - z 平面上的拟合直线斜率 k_{xz} ,由此可求得该直线与 x - z 平面的夹角 $\theta = -\arctan k_{xz}$ 。坐标变换矩阵为:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}, \quad (1)$$

式中: x', y', z' 为变换后的新坐标, θ 为空间直线与 x - z 平面的夹角。

通过式(1)将三维点云数据通过坐标变换分别投影至 x - z 平面与 y - z 平面。在新平面上,使用 polyval 函数拟合投影曲线,确定坐标变化趋势。沿 z 轴将点云划分为多个微小区段,对每个区段进行局部圆拟合,获取拟合圆的中心点与半径,反算得到三维空间中墩柱轴线上的控制点位置。

1.4 墩柱三维特征点提取

为研究施工过程中墩柱的变形,分割各平面上的点云,分析墩柱平面上的特征点。通过 Revit 建立墩柱三维模型,如图 1 所示。截取墩柱设计特征点进行施工控制。将选中部分的表面进行表面分割(UV 分割,U 代表横向网格线,V 代表竖向网格线),设置分割点数,本文取横向网格线数 $U=10$,竖向网格线数 $V=5$ ^[18-19],如图 2 所示。主要分析超高墩柱变形,分析 z 轴方向上平面 1~4 的变形情况。完成表面分割后,每个平面上选取 66 个特征点研究变形情况。以横断面内的水平方向为 x 轴,道路前进方向为 y 轴,垂直方向为 z 轴,构建三维直角坐标系,提取部分设计特征点,如图 3 所示,图 3 括号中数字为特征点坐标。模型平面 1~4 设计特征点坐标如表 1 所示,平面 j 的坐标为 (x_j, y_j, z_j) , $j=1, 2, 3, 4$ 。将设计特征点与实际特征点对比得到相对差后,可为墩柱施工过程中产生的变形提供相应参考。

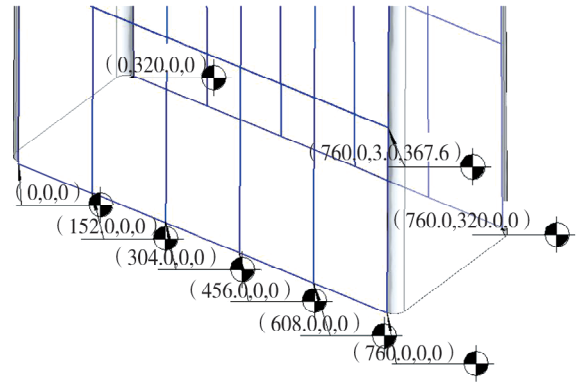
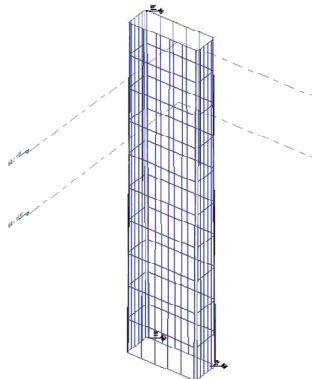
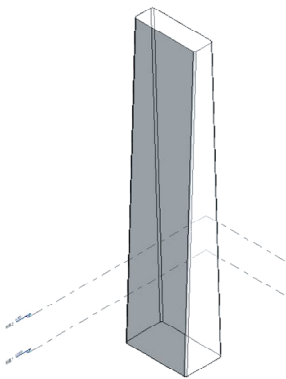


图1 墩柱三维模型示意图

图2 墩柱三维平面分割示意图

图3 墩柱平面特征点提取示意图

墩柱施工完成后,通过三维激光扫描获取原始点云数据模型,平面 1~4 对应特征点云如图 4 所示,红点为特征点。通过特征点提取算法,结合实际特征点的数据进行对比分析,验证墩柱特征点的变形。

由图 4 可知:点云分布较均匀,整体轮廓清晰,能较完整地反映墩柱结构的几何形态。该点云数据具备较高密度和空间连续性,为后续的平面分割、曲面拟合以及结构变形分析提供可靠的数据基础。局部存在一定的边缘起伏与偏移现象,可能存在施工误差或模板变形,需结合定量分析进一步判断。

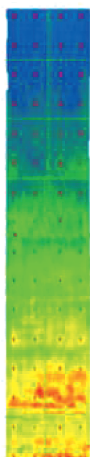
表 1 模型平面部分设计特征点坐标

单位:cm

编号	x_1	y_1	z_1	x_2	y_2	z_2	x_3	y_3	z_3	x_4	y_4	z_4
1	760.0	290.0	3 676.0	608.0	30.0	3 676.0		50.0	3 676.0		50.0	3 676.0
2	608.0	290.0	2 940.8	760.0	30.0	3 676.0		273.0	3 308.4		76.0	735.2
3	456.0	290.0	3 676.0	0	27.0	3 308.4		244.0	3 308.4		132.0	1 470.4
4	304.0	290.0	367.6	152.0	27.0	3 308.4		188.0	3 308.4		188.0	3 676.0
5	152.0	296.0	2 940.8	152.0	18.0	2 205.6		44.0	2 940.8		244.0	3 676.0
6	0	296.0	2 940.8	304.0	18.0	2 205.6	-20.0	279.0	2 573.2	780.0	188.0	1 838.0
7	760.0	299.0	2 573.2	456.0	18.0	2 205.6		244.0	2 573.2		244.0	1 838.0
8	608.0	299.0	2 573.2	608.0	18.0	2 205.6		188.0	2 573.2		285.0	1 838.0
9	456.0	305.0	1 838.0	760.0	12.0	1 470.4		26.0	735.2		32.0	1 470.4
10	304.0	305.0	1 838.0	0	9.0	1 102.8		297.0	367.6		76.0	1 470.4



a) 平面 1



b) 平面 2



c) 平面 3



d) 平面 4

图 4 平面 1~4 对应特征点云图

2 墩柱点云的三维扫描数据

2.1 墩柱曲面拟合

根据墩柱模型的关键点数据,将平面控制点数据生成 Excel 文件,并在 MATLAB 中构建最小二乘法拟合方程,进行空间曲面的拟合计算^[20-21]。

根据算法拟合 z 轴方向平面 1~4 拟合公式 $Z_1 \sim Z_4$:

$$Z_1 = -1\,064.097\,2 + 0.979\,1x \pm 190.494\,6y + 0.018\,4x^2 + 0.137\,4xy \pm 7.712\,8y^2,$$

$$Z_2 = 1\,357.152\,0 + 1.382\,4x \pm 171.845\,5y + 0.011\,3x^2 + 0.133\,7xy \pm 5.044\,2y^2,$$

$$Z_3 = -32\,044.910\,9 + 12\,849.181\,1x \pm 184.674\,0y - 1327.604\,8x^2 - 1.453\,4xy \pm 9.157\,8y^2,$$

$$Z_4 = -524.031\,0 - 408.706\,7x \pm 164.198\,4y + 43.579\,6x^2 + 32.363\,5xy \pm 11.619\,2y^2.$$

墩柱变形控制主要集中在 x 轴与 y 轴方向,对 z 轴方向公式反解,对 Z_1 进行变形计算,将 Z_1 改写为: $0.018\,4x^2 + (0.137\,4y + 0.979\,1)x + (-7.712\,8y \pm 190.494\,6)y + (-1\,064.097\,2 + z) = 0$ 。

这是一个关于变量 x 的二次方程,可通过求根公式求解 x 。二次函数求根^[22]公式为:

$$x = [-b \pm (b^2 - 4ac)^{\frac{1}{2}}] / (2a), \quad (2)$$

将 a 、 b 、 c 带入式(2)中,得到:

$$\begin{aligned} x_1 &= \{-0.1374y - 0.9791 \pm \sqrt{[(0.1374y + 0.9791)^2 + 0.1479z - 4206.7436]}\} / 0.0368, \\ x_2 &= \{-0.1337y - 1.3824 \pm \sqrt{[(0.1337y + 1.3824)^2 - 0.5016z - 36887.8369]}\} / 0.0226, \\ x_3 &= \{-14534y - 12849.1811 \pm \sqrt{[(14534y + 12849.1811)^2 + 5317.2096z - \\ &\quad 379660271624.963]}\} / -2655.2096, \\ x_4 &= \{-32.3635y + 408.7067 \pm \sqrt{[(32.3635y - 408.7067)^2 - 443.5796(11.6192y - \\ &\quad 164.1984)y - 17400.6496z + 953590.5579]}\} / 87.1592. \end{aligned}$$

平面 1~4 的曲面拟合趋势较一致,仅选取平面 1、2 展示结果,如图 5、6 所示。

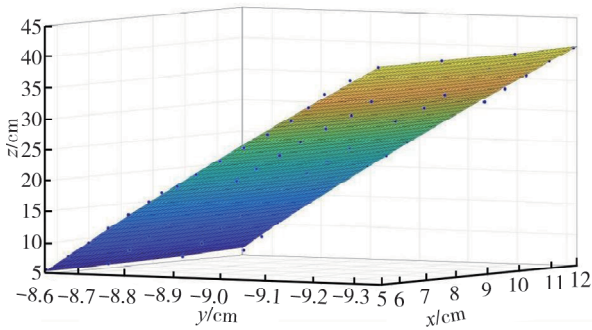


图5 平面 1 拟合后示意图

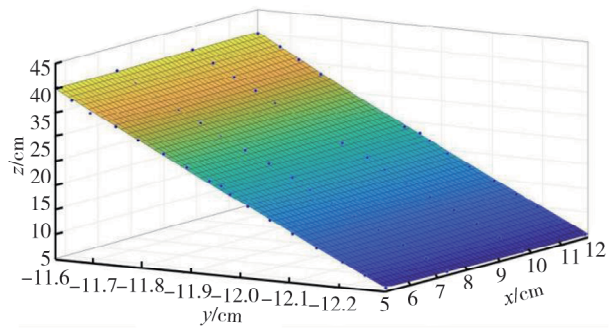


图6 平面 2 拟合后示意图

2.2 墩柱变形控制

提取点云特征点数据代入式(1)(2),得到平面 1~4 在墩柱 x 轴方向上的实际变形与设计变形,二者间相对差如表 2 所示。平面 j 在墩柱 x 轴方向的设计变形和实际变形分别为 x_{jD} 、 x_{jA} ,二者间相对差为 E_j , $j=1,2,3,4$ 。

表 2 平面 j 在墩柱 x 轴方向的变形对比

单位:cm

编号	x_{1D}	x_{1A}	$ E_1 $	x_{2D}	x_{2A}	$ E_2 $	x_{3D}	x_{3A}	$ E_3 $	x_{4D}	x_{4A}	$ E_4 $
1	19.692 9	19.692 3	0.000 6	5.686 2	5.687 8	0.001 6	5.099 1	5.096 7	0.002 4	5.070 0	5.071 9	0.001 9
2	19.706 3	19.709 0	0.002 7	5.683 7	5.685 4	0.001 7	5.099 8	5.098 0	0.001 8	7.349 7	7.350 9	0.001 2
3	21.753 2	21.750 8	0.002 4	7.970 9	7.970 9	0	6.233 6	6.232 0	0.001 6	9.645 4	9.647 6	0.002 2
4	21.753 8	21.751 7	0.002 1	7.969 5	7.972 1	0.002 6	8.534 0	8.537 0	0.003 0	11.942 7	11.942 7	0
5	19.847 3	19.848 8	0.001 5	10.265 9	10.264 3	0.001 6	8.536 7	8.534 3	0.002 4	14.242 5	14.242 7	0.000 2
6	20.028 8	20.030 7	0.001 9	10.265 1	10.268 1	0.003 0	10.831 4	10.832 1	0.000 7	5.074 3	5.076 9	0.002 6
7	21.756 8	21.756 2	0.000 6	12.562 0	12.560 3	0.001 7	10.836 2	10.838 6	0.002 4	7.356 0	7.353 7	0.002 3
8	21.759 7	21.762 3	0.002 6	12.560 8	12.562 5	0.001 7	13.135 9	13.136 5	0.000 6	9.659 2	9.660 5	0.001 3
9	5.667 5	5.670 1	0.002 6	14.862 6	14.863 2	0.000 6	13.139 3	13.137 8	0.001 5	11.953 5	11.954 1	0.000 6
10	5.672 7	5.670 1	0.002 6	14.861 7	14.862 8	0.001 1	15.437 8	15.440 7	0.002 9	14.249 2	14.246 4	0.002 8

由表 2 可知:墩柱的实际变形与设计变形间的最大相对差为 0.003 0 cm,相对差较小,说明在施工过程中墩柱的变形较小,能满足相关施工控制的要求,通过三维扫描技术可较好地预测墩柱在施工过程中的变形。

3 结束语

1)为解决超高墩柱在传统液压爬模施工工艺中存在的变形问题,采用三维扫描技术对墩柱定位进行

复测和微调,采用软件 MATLAB 编写算法,将三维扫描仪捕获的墩柱点云数据进行精确配准和降噪,提取液压爬模的关键控制点,与设计方案对比,分析二者间偏差,对液压爬模位置进行细微调整,确保高精度安装。

2)采用改进的区域生长算法实现特征点云的自动分割技术,根据点云拟合平面后的数据进行平面切割,获取关键点的点云数据,将三维点云数据转换至二维平面上,通过线性拟合等确定坐标范围,将平面点云分割成多段,在局部区域内求解最佳拟合圆的中心点和半径,反算对应三维空间中墩柱控制点坐标。通过 Revit 建立墩柱三维模型,在 z 轴方向分割为 4 个平面,每个平面提取 66 个特征点坐标,计算平面 1~4 在墩柱 x 轴方向上的实际变形与设计变形,二者最大相对差为 0.003 0 m,表明施工过程中墩柱变形较小,能满足施工要求。

在工程施工中可将三维扫描数据与设计数据对比,及时发现施工中的问题,便于及时改进,控制施工质量。

参考文献:

- [1] 张晨畅. 基于三维扫描的悬索桥结构空间形位检测方法研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2022.
- [2] 黄传朋. 基于三维激光扫描仪的三维地形获取及应用[D]. 天津:天津理工大学,2019.
- [3] 章涛,陈西江. 利用三维激光扫描技术监测桥梁振幅[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(5):300-310.
- [4] 何松霖,周志祥,楚奎,等. 基于车载三维激光扫描结果的桥面变形分析[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(8):268-276.
- [5] 司梦元,韩达光,郭杰明,等. 基于三维激光扫描点云的道路路面变形分析方法[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(24):386-391.
- [6] 熊文,李刚,张宏伟,等. 基于点云数据与工程知识的桥梁形态变化识别方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2022, 49(5):101-110.
- [7] 王浩琛,冯东明,吴刚,等. 基于三维激光点云的公路曲线桥梁三维形貌与变形测量[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2023, 53(5):756-764.
- [8] 骆义. 基于三维激光扫描技术的结构检测应用研究[D]. 南京:东南大学,2021.
- [9] SHEN N, WANG B, MA H, et al. A review of terrestrial laser scanning (TLS)-based technologies for deformation monitoring in engineering[J]. Measurement, 2023, 223:113684.
- [10] ZHOU Y, ZHU J Y, ZHAO L D, et al. High-precision monitoring method for bridge deformation measurement and error analysis based on terrestrial laser scanning[J]. Remote Sensing, 2024, 16(13):16132263.
- [11] 冯玉祥,汤明,罗东超,等. 高耸异形索塔自适应爬模系统数字化设计和施工技术研究[J]. 公路, 2024, 69(4):146-151.
- [12] 李海峰,吴巨峰,尹森浩,等. 大型桥塔模板施工数字化管理系统应用[J]. 世界桥梁, 2023, 51(1):71-77.
- [13] 廖云浩. 基于超体素类型的三维点云区域生长分割算法研究[D]. 长春:吉林大学,2022.
- [14] 苗雨阳. 基于 PCA 的地源热泵系统传感器的故障诊断研究[D]. 苏州:苏州科技大学,2019.
- [15] 同济大学数学系. 高等数学(下册)[M]. 7 版. 北京:高等教育出版社,2014.
- [16] 代涛. 最小二乘法在连续梁施工监控中的运用[J]. 智能城市, 2023, 9(10):126-128.
- [17] 杨丹. 数据拟合方法探讨[J]. 大众标准化, 2020(10):144-145.
- [18] ZHOU Y, XIANG Z F, ZHANG X S, et al. Mechanical state inversion method for structural performance evaluation of existing suspension bridges using 3D laser scanning[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2022, 37(5):650-665.
- [19] 余润泽,单伽钰,李培振,等. 基于三维点云的工程结构平面分割及表面检测[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2023, 54(6):2233-2243.
- [20] 屈文星,刘浩,秦楚,等. 基于 MATLAB 傅里叶曲线拟合的天线跟踪精度评估方法[J]. 电子测量技术, 2020, 43(12):91-95.
- [21] 赵栋. 基于三维激光扫描的轨道交通桥梁墩柱水平位移自动监测方法[J]. 北京测绘, 2023, 37(8):1097-1101.
- [22] 刘开兰. 浅析二次函数区间内最值问题[J]. 学苑教育, 2019(18):62-63.

Construction deformation of ultra-high piers based on 3D scanning technology

WU Guohua¹, MA Wenlong¹, ZHAN Yuhua¹,
DONG Shujing¹, ZHAO Yulong^{1,2*}

1. School of Civil Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China;

2. Shandong Key Laboratory of Technologies and Systems for Intelligent Construction Equipment, Jinan 250357, China

Abstract: To address the deformation issues of ultra-high pier columns in traditional hydraulic climbing formwork construction techniques, a hydraulic climbing formwork system positioning method is adopted. The support frame is positioned and assembled according to the construction plan, and the hydraulic climbing formwork is initially assembled. Three-dimensional scanning technology is used to re-measure and fine-tune the positioning of the pier columns, ensuring that the hydraulic climbing formwork system can be accurately installed. Using parameters such as the angle between point normal vectors and curvature differences as segmentation criteria, an optimized region growing algorithm is employed for plane segmentation of the point cloud of the pier columns. The obtained key three-dimensional point cloud data is converted to a two-dimensional plane, and the coordinate range is determined through linear fitting, which is then used to reverse calculate the coordinates of the control points of the pier columns in three-dimensional space. The software Revit is used to establish a three-dimensional model of the pier columns and perform plane segmentation, analyzing the deformation of four planes in the z direction. For each plane, 66 feature point coordinates are extracted, and the least squares method is used for surface fitting and deformation calculation. The results indicate that the maximum relative difference between the actual deformation and the designed deformation in the x direction for the four planes is 0.0030 cm. The deformation of the pier columns during construction is minimal, meeting the construction control requirements. Through three-dimensional scanning technology, the deformation of pier columns during the construction process can be effectively predicted.

Keywords: 3D scanning technology; ultra-high pier column; 3D model; deformation

(责任编辑:王惠)