

DOI:10.11784/tdxbz202505009

基于设计信息的桥梁实测点云补全方法

朱劲松^{1,2}, 杨瑞鹏¹, 王多吴¹, 韩伟男¹

(1. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072;

2. 滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室(天津大学), 天津 300072)

摘要: 针对三维激光扫描下桥梁实测点云因密度控制不足和遮挡造成的细节缺失、控制点难以提取的问题, 提出了基于设计信息的桥梁实测点云补全方法, 以实现桥梁施工监控工作中复杂结构高精度控制点坐标提取与空间姿态分析。首先, 提出基于 K 维树算法与主成分分析的断面点云分割算法, 通过调控切片厚度与方向实现点云断面的精确分割; 其次, 提出了基于 CAD 设计信息和粗精两阶段配准的断面点云补全算法, 生成高精度断面设计点云, 并配准设计与实测点云, 实现了断面点云补全, 并分析不同插值参数对补全精度的影响; 最后, 提取补全点云的控制点坐标并分析桥梁空间姿态。在针对天津滨海新区某跨海河东西走向待接续施工异型钢拱桥的检测中对上述方法进行了实验验证。结果表明: 本研究在 1 mm 插值间距下均方根误差为 0.315 mm, 实现了高精度断面点云补全; 实验桥梁两岸待施工断面的面内相对偏转角为 6.80×10^{-4} rad, 中心相对高差为 35.9 mm; 两岸主拱空间姿态为东岸向南偏转, 西岸向北偏转。本文所提方法可补全不完备的桥梁实测点云, 为桥梁空间姿态检测提供参考和算法支撑, 具有一定的工程应用前景。

关键词: 桥梁工程; 实测点云; 点云补全; 设计信息; 空间姿态分析

中图分类号: U446.2

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2026)08-0852-10

Measured Point Cloud Completion Method for Bridge Based on Design Information

Zhu Jinsong^{1,2}, Yang Ruipeng¹, Wang Duowu¹, Han Weinan¹

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety of Ministry of Education (Tianjin University), Tianjin 300072, China)

Abstract: To tackle the issues of missing details and difficult control point extraction in three-dimensional laser-scanned point clouds of bridges, which result from inadequate point density and occlusion, a method based on the design information is proposed for completing the measured point clouds of bridges, so as to enable high-accuracy coordinate extraction of control points and spatial posture analysis for complex structures during the monitoring of bridge construction. First, a cross-section point cloud segmentation algorithm is developed using a K -dimensional tree algorithm and principal component analysis, allowing an accurate segmentation of cross-section point clouds by adjusting the slice thickness and orientation. Second, a cross-section cloud point completion algorithm based on the CAD design information and coarse-to-fine two-stage registration is put forward to generate high-accuracy cross-section design point clouds, which are further used to complete the scanned sections with the registration of design and measured point clouds. In addition, the effect of different interpolation parameters on the completion accuracy is also analyzed. Finally, the coordinates of control points are extracted from the completed point clouds, and the bridge's spatial posture is also analyzed. The entire methodology was experimentally validated on an east-west special-shaped steel arch bridge, which was still under construction over the Haihe River in Tianjin Binhai New Area. Results demonstrate that the root mean square error was 0.315 mm at an interpolation spacing of 1 mm, realizing a high-

收稿日期: 2025-05-08; 修回日期: 2025-09-17.

作者简介: 朱劲松 (1975—), 男, 博士, 教授.

通信作者: 朱劲松, jszhu@tju.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52378310).

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52378310).

accuracy cross-section cloud point completion. The measured in-plane relative deflection angle between the two bank sections to be constructed was 6.80×10^{-4} rad, and the relative central height difference was 35.9 mm. The result of spatial posture analysis indicated southward deflection on the eastern bank and northward deflection on the western bank. The proposed method in this paper can complete incomplete measured point clouds of bridges and provide reference and algorithm support for spatial posture detection, demonstrating its potential for engineering applications.

Keywords: bridge engineering; measured point cloud; point cloud completion; design information; spatial posture analysis

桥梁作为跨越河流与地形障碍的重要基础设施,其特征点信息提取是监测桥梁空间姿态的重要技术手段,在桥梁施工监控中具有重要意义^[1-2]. 现有结构线形特征提取方法依赖高程传感器、全站仪、水准仪等设备,存在操作繁琐、测量周期长等问题^[3-5]. 三维激光扫描作为一种非接触式测量技术,通过激光束在物体表面的反射获取空间坐标,具有测量速度快、精度高等优点^[6]. 然而,复杂的桥梁结构和现场环境常导致扫描范围受限,点云存在数据缺失,难以通过传统的切片选点法准确提取控制点坐标^[7].

为实现基于三维激光扫描的桥梁线形特征提取, Kim 等^[8]开展点云-BIM 结合技术研究,实现大跨悬索桥主梁合龙断面角点距离精确检测,修正桥梁待合龙段并计算最佳合龙时间;齐宏拓等^[9]开展基于点云的复杂钢结构智能化施工研究,实现了拱肋提升变形的智能化监测. 在桥梁点云补全领域,石林泽等^[10]采用随机抽样一致算法,利用点云残缺平面周围监测点拟合完整表面,实现残缺平面补全;Li 等^[11]通过无人机倾斜摄影与地面三维激光扫描点云数据配准,实现系杆拱桥多源点云数据融合;Hu 等^[12]基于结合箱型主梁的设计参数与构造规则,构建参数化约束模型并采用平面点云平移策略补全等截面箱梁点云. 现有研究主要适用于简单断面结构的点云补全与特征提取,针对复杂桥梁结构的相关研究较少,且现有方法不适用于复杂结构点云.

因此,笔者针对复杂桥梁结构提出了基于设计信息的桥梁实测点云补全方法. 该方法结合主成分分析(principal component analysis, PCA)算法与 K 维树算法,实现了实测断面点云的精确分割;利用设计信息基于设定参数插值,生成设计断面点云,并采用特征点匹配实现粗配准,结合修正迭代最近点(iterative closest point, ICP)算法完成精配准实现断面补全;提取特征点,用以分析断面姿态. 以天津市某跨海河桥为工程案例,实现主拱横联控制断面的点云分割与补全,并进一步分析主拱空间姿态,验证了方法的可靠性,有效解决三维激光扫描中点云缺失问题,具有良好的通用性与应用价值.

1 实测控制断面点云分割

通过断面点云分割、断面点云补全、断面特征提取与分析等步骤实现了基于设计信息的桥梁实测点云补全,并提取了桥梁特征点以分析桥梁空间姿态,技术路线如图 1 所示. 在断面点云分割中,采用基于 K 维树算法与 PCA 的断面点云分割算法实现断面点云精细分割.

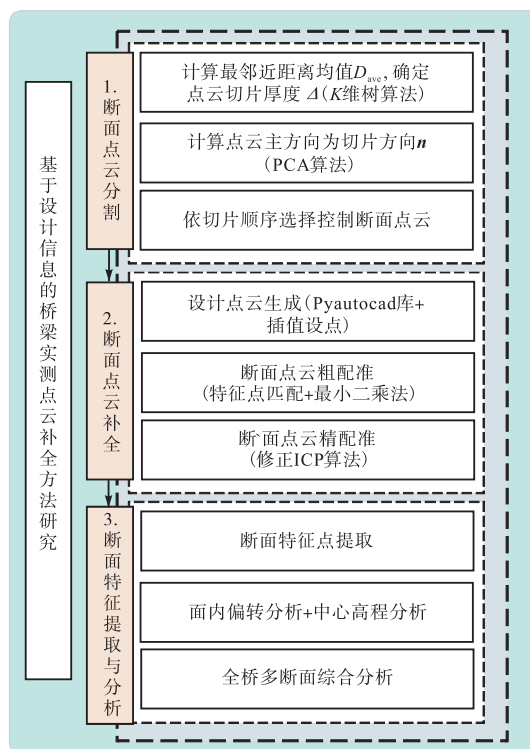


图 1 技术路线

Fig.1 Technical roadmap

1.1 切片方向与厚度计算

为实现各节段断面点云的精确分割,应优化断面点云切割的切片厚度与切片方向. 为了解构件点云的分布状态,依据点云分布间距实现点云的精细化切片,并采用 K 维树算法^[13]加速计算点云的最邻近距离均值 D_{ave} ,并依据香农采样定理^[14]与点云分析经验设定点云切片厚度 $\Delta = 2D_{ave}$,该厚度值通过 2 倍最邻

近距离均值,可依据结构点云分布状态实现灵活切割。 K 维树的组织方法为:在各支节点处计算当前点集各坐标方差并采用最大方差所在坐标为数据分割维度,以该坐标的子集中位数为分割阈值;依照该方法递归构建二叉树^[15]直至叶节点。在建立 K 维树后,通过两阶段搜索^[16]获取 K 维树中任意点 $i(x_i, y_i, z_i)$ 的最近邻点并计算两点距离为 i 的最近邻距离 D ,最后遍历节点点云计算最邻近距离均值 D_{ave} 。该方法在保留断面点云二维特征的同时,可保证断面数据的丰富性与完整性。以节点点云 Q 为例计算切片厚度,步骤如下。

步骤 1 下递归。从任意 i 点开始,沿 K 维树逐层向下。比较 i 点与下节点在分割维度的坐标值:若 i 点在分割维度坐标小于下节点坐标,进入左子树;否则进入右子树,逐步递归至叶节点 a ,计算 a 点与 i 点距离 $D(ai)$ 并设为当前最近点距离 $D(i)$ 。

步骤 2 上回溯与剪枝。自叶节点 a 点,基于当前最近点距离建立剪枝包围盒方程(见式(1))。逐级回溯父节点并判断父节点的分割轴坐标值是否位于剪枝包围盒内:若其不在剪枝包围盒内,则该节点另一侧子树可全部剪枝并继续上回溯;否则,需进入该侧子树继续搜索。搜索过程中动态更新 $D(i)$ 与剪枝包围盒方程。

$$\begin{cases} x_i - D(i) < x < x_i + D(i) \\ y_i - D(i) < y < y_i + D(i) \\ z_i - D(i) < z < z_i + D(i) \end{cases} \quad (1)$$

步骤 3 最近点距均值。遍历点云 Q 任意点计算最近点距离并输出均值 D_{ave} ,即

$$D_{ave} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N D(i) \quad (2)$$

式中 N 为总点数。

步骤 4 切片厚度。设定 $\Delta = 2D_{ave}$ 。

利用 PCA 算法^[17]计算点云主方向,PCA 主方向计算分为中心化处理、协方差矩阵计算和特征值分解共 3 阶段。计算得特征值 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 与对应单位特征向量 $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \mathbf{v}_3$,特征值反映点云在特征方向的分散程度。以点云 Q 为例进行 PCA 计算,并选择与符合结构形态的单位向量 $\mathbf{v}$ 为切片向量 $\mathbf{n}$ 。

1.2 断面分割与提取

根据厚度 Δ 与切片向量 $\mathbf{n}$ 进行控制断面点云分割,如图 2 所示,具体流程如下。

步骤 1 点云投影。对点云中的任意点 $i(x_i, y_i, z_i)$,计算它在切片方向 $\mathbf{n}$ 上的投影 P_i ,即

$$P_i = x_i n_x + y_i n_y + z_i n_z \quad (3)$$

式中 n_x, n_y 和 n_z 为向量 $\mathbf{n}$ 分量。

步骤 2 投影长度。找到所有投影值的最大值 $\max P_i$ 和最小值 $\min P_i$,并计算投影长度 L_Q ,即

$$L_Q = \max P_i - \min P_i \quad (4)$$

步骤 3 切片数:计算点云切片数 X' , $X' = L_Q / \Delta$ 。

步骤 4 点云切片:依据投影值 P 分割点云 Q 为 X' 组点云切片,分割公式为

$$\min P_i + (i-1)\Delta \leq P \leq \min P_i + i\Delta \quad i \in [1, X'] \quad (5)$$

步骤 5 切片选择。沿切割方向 $\mathbf{n}$ 依据切片次序从点云切片中选择处于控制位置的点云切片为实测断面点云。

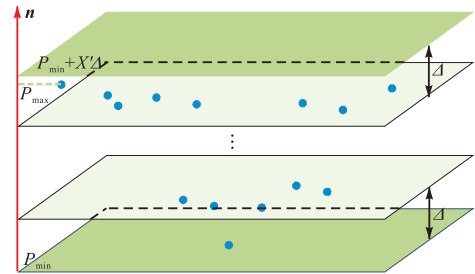


图 2 点云分割

Fig.2 Point cloud segmentation

2 控制断面点云补全与特征点分析

2.1 设计图点云化

利用 Pyautocad 库脚本实现设计信息提取,该库可实现 Python 脚本与 AutoCAD 软件交互,通过 iter_objects 函数自动遍历 AutoCAD 窗口中所有线形的特征信息,并基于设定参数实现数据点等距插值,生成断面设计点云,如图 3 所示。

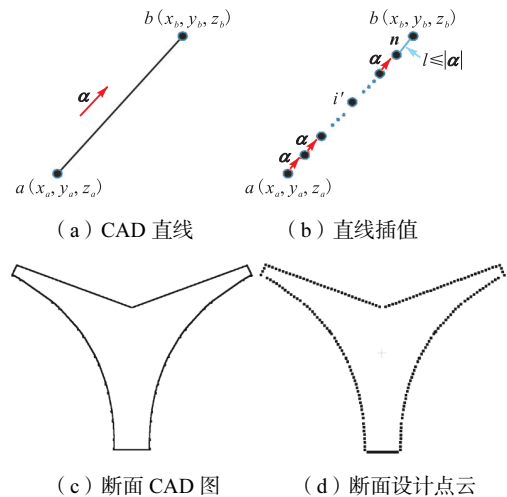


图 3 设计点云生成

Fig.3 Generation of design point clouds

以直线插值生成设计点云为例: 获取直线起点 $a(x_a, y_a, z_a)$ 与终点 $b(x_b, y_b, z_b)$ 坐标并计算直线长度 $L_{a,b}$; 设定插值距离 d , 沿递增向量 α 从起点 a 依次插入 n_1 个点.

$$\alpha = \left(\frac{x_b - x_a}{L_{a,b}} d, \frac{y_b - y_a}{L_{a,b}} d, \frac{z_b - z_a}{L_{a,b}} d \right) \quad (6)$$

$$n_1 = \frac{L_{a,b}}{d} \quad (7)$$

插值点 i' 的坐标为

$$(x_{i'}, y_{i'}, z_{i'}) = (x_a, y_a, z_a) + i' \alpha \quad i' \in [1, n_1] \quad (8)$$

2.2 实测断面点云补全

通过对断面的实测点云与设计点云进行粗配准与精配准完成断面点云补全. 粗配准采用多特征点最小二乘法匹配^[18], 以断面实测点云 Q 为目标点云, 设计点云 P 为待配准点云, 人工选取点云 Q 与点云 P 的 n_2 组 ($n_2 \geq 4$) 例如断面角点等分散的特征点对 (q, p) . 以特征点对的距离平方和 (见式 (9)) 最小为计算目标, 利用最小二乘法计算得旋转矩阵 R 与平移向量 t 并作用于实测点云.

$$(R, t) = \arg \min \sum_{i=1}^{n_2} (R p_i + t - q_i)^2 \quad (9)$$

针对设计点云与残缺实测点云配准时因对应点缺失导致传统 ICP 算法匹配失真、无法收敛的问题, 笔者提出一种基于分区随机采样的改进 ICP 算法. 该算法以设计点云为目标点云 T , 实测点云为待配准点云 S , 具体流程如下.

步骤 1 初始化. 设置最大迭代次数 $N_{\max}$ 与误差阈值 $\varepsilon_{\min}$.

步骤 2 二叉树构建. 自顶向下构建平衡二叉树: 递归地将点云沿 PCA 最大方差维度的中值进行二分, 直至生成 n_3 个叶节点, 每个叶节点为一个数据簇.

步骤 3 随机选点. 从每个数据簇中随机选一个点组成初始点集 $S' = \{s_{i'} \in S | i' \leq n_3\}$.

步骤 4 最近点搜索. 对每个点 $s_{i'}$, 在目标点云 T 中搜索最近点 $t_j \in T$.

步骤 5 变换参数计算. 利用最小二乘法计算旋转矩阵 R 与平移向量 t , 即

$$\min_{R, t} \sum_{i'=1}^{n_3} R s_{i'} + t - t_j^2 \quad (10)$$

步骤 6 变换更新. 对点云 S 应用刚体变换得到更新点云 S' , 即

$$S' = \{s_{i'}' = R s_{i'} + t | s_{i'} \in S\} \quad (11)$$

步骤 7 误差评估. 计算配准误差 ε (对应点平均

距离), 即

$$\varepsilon = \frac{1}{n_3} \sum_{i'=1}^{n_3} s_{i'}' - t_j^2 \quad (12)$$

步骤 8 收敛判断. 当 $\varepsilon \leq \varepsilon_{\min}$ 或迭代次数为 $N_{\max}$ 时, 结束迭代并输出变换参数 R, t , 否则返回步骤 2.

步骤 9 逆向作用. 将最终变换参数的逆变换作用于设计点云 T , 即

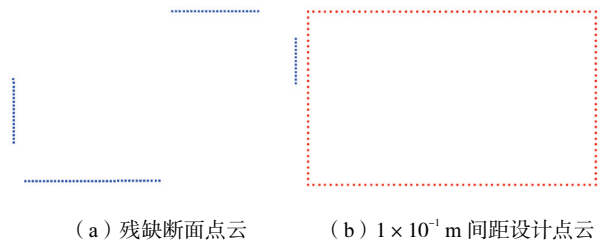
$$T_{\text{aligned}} = R^{-1} \cdot (T - t) \quad (13)$$

2.3 断面补全精度分析

为评估实测点云与设计点云之间的差异程度, 采用最近点间距均方根误差 (root mean square error, RMSE) 量化补全误差^[19]. 对实测点云中任意点 i , 在设计点云中寻找其最近邻点, 计算两者之间的欧氏距离 d_i . e_{RMSE} 的计算式为

$$e_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d_i^2} \quad (14)$$

为验证断面补全算法的精度, 选取设计形状为 $5 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ 的矩形断面为实验对象, 如图 4 所示, 对其进行残缺处理并开展补全实验. 设计点云的插值间距分别设置为 $1 \times 10^{-1} \text{ m}$ 、 $1 \times 10^{-2} \text{ m}$ 、 $1 \times 10^{-3} \text{ m}$ 和 $1 \times 10^{-4} \text{ m}$, 对应的补全结果与实测点云的 e_{RMSE} 值分别为 $2.87 \times 10^{-2} \text{ m}$ 、 $2.99 \times 10^{-3} \text{ m}$ 、 $3.15 \times 10^{-4} \text{ m}$ 和 $1.10 \times 10^{-4} \text{ m}$. 结果 (图 5) 表明: 随着插值间距的减小, e_{RMSE} 值逐步降低, 配准精度不断提升, 但其下降



(a) 残缺断面点云 (b) $1 \times 10^{-1} \text{ m}$ 间距设计点云

图 4 残缺断面点云与设计点云

Fig.4 Incomplete cross-sectional point cloud and design point cloud

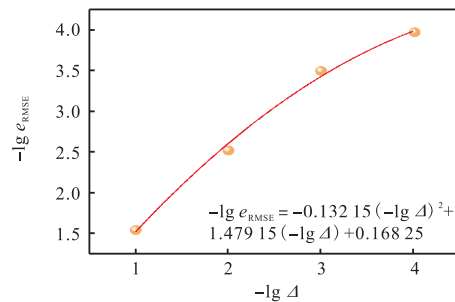


图 5 点云配准质量分析

Fig.5 Quality analysis of point cloud registration

趋势趋于平缓,显示出边际精度提升的有限性. 整体而言,断面补全结果与设计点云的一致性随插值间距的减小而增强,验证了补全方法在断面点云补全中的适用性与可靠性.

3 实桥验证

3.1 工程概况

天津市滨海新区某跨海河桥为主跨 230 m 大跨空间钢网拱桥. 桥梁由主拱、主梁、吊杆、斜撑等构件

组成,沿主跨中心面对称设计. 桥梁主拱分为箱型段与拱网段,箱型段单岸水平跨度为 31.6 m,已建拱网段单岸水平跨度为 51.2 m,未建拱网段的水平跨度为 54.2 m,如图 6 所示. 拱网段由 Y 型对称分布的 14 条拱肋与 19 道横联构成,横联设计间距为 8 m,已建拱网段包含 4~9 号横联,4 号横联邻近待施工断面,9 号横联邻近主拱箱型段,0~3 号横联处于未建拱网段,设计于主航道上空.

主跨采用满堂支架法施工,存在大量临时支撑结构,如图 7 所示. 因停工时间过长,钢支架出现大范

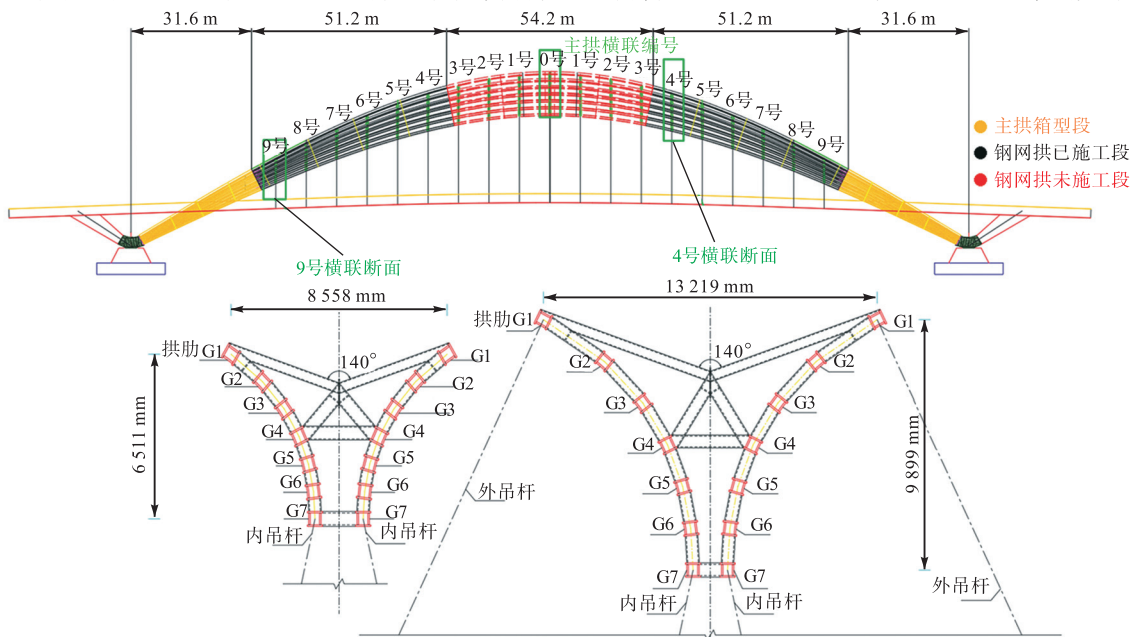


图 6 某桥梁主拱立面设计与断面设计图

Fig.6 Elevation design and section design drawings of main arch of certain bridge

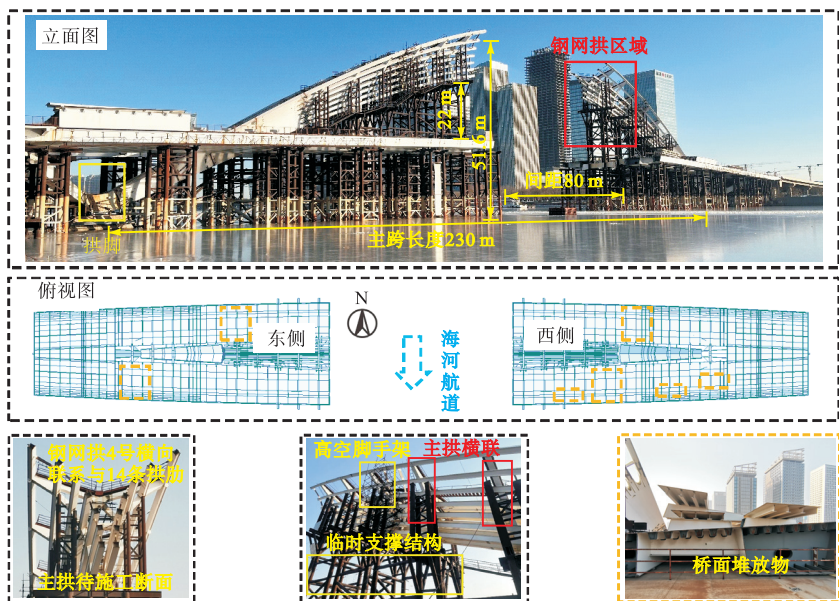


图 7 桥梁现场

Fig.7 Site of bridge

围锈蚀,可能出现不均匀沉降,需分析已建成桥梁节段的空间姿态,评估节段的面内偏转与高差变化,为后续施工提供参考数据。

3.2 横联断面实测点云

图 8 为桥梁点云配准,据现场环境设计并实施扫描与配准方案,具体流程如下。

步骤 1 坐标系建立. 东岸中线某处设零点 O 点,横桥北向为 X 轴正向,纵桥向为 Y 轴正向。

步骤 2 测站布设. 两岸绕主拱逆时针布设扫描

测站并设计扫描路径,东岸共 7 个测站,西岸共 6 个测站。

步骤 3 标靶布设. 相邻测站设置 3 个平面标靶,扫描标靶获取标靶中心坐标。

步骤 4 点云配准. 使用 Leica Cyclone 软件的 Register 模块分别配准单岸点云,使用 Leica TS16 全站仪建立高精度坐标系,基于控制点坐标配准两岸点云。

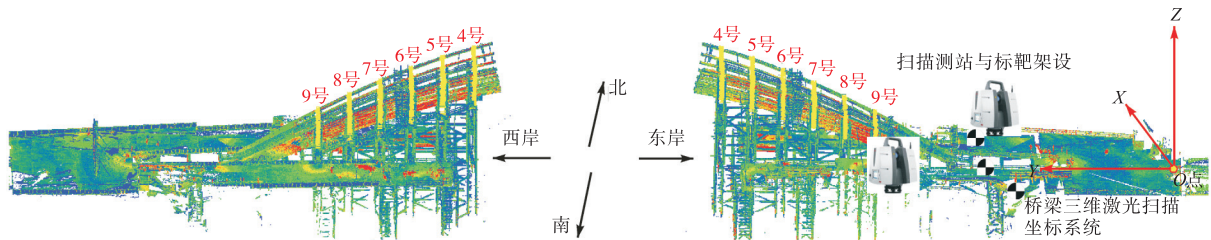


图 8 桥梁点云配准

Fig.8 Point cloud registration of bridge

采用基于 K 维树算法与 PCA 算法的断面分割法提取各横联控制断面实测点云,具体流程如下。

步骤 1 横联分割. 直通滤波分割横联点云,并初步降噪横联点云。

步骤 2 切片厚度. K 维树算法加速计算各横联点云最近点平均间距 D_{ave} , 计算切片厚度 Δ , 见表 1。

步骤 3 切片方向. PCA 算法计算横联点云特征值与特征向量,选择符合横联断面特征的向量为切割方向 n , 见表 2。

步骤 4 点云切割. 沿 n 方向投影点云并计算投

影范围与切片数 X' , 基于投影值分割出 X' 个点云切片。

步骤 5 断面选择. 依据切片次序提取控制位置切片为实测断面点云,采用直通滤波过滤噪声。

3.3 控制断面点云补全与控制点提取

设定直线插值间距 $d = 1\text{ mm}$. 首先,依据横联 CAD 图生成 4~9 号横联的设计点云,如图 9(a)、(b)所示。

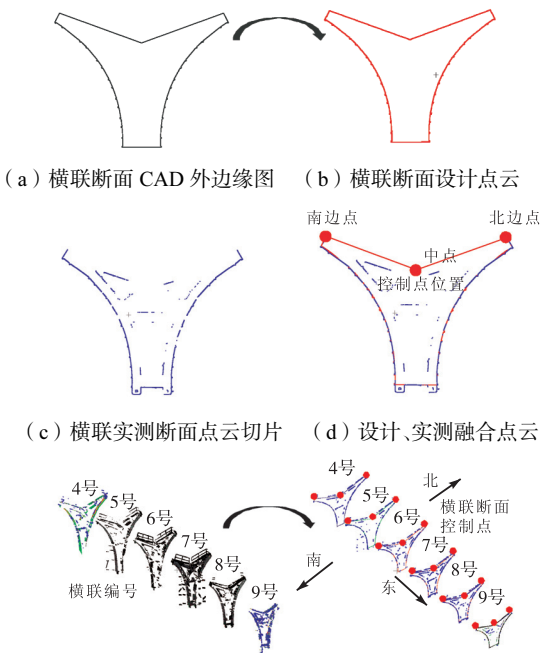


图 9 控制断面点云补全

Fig.9 Key section point cloud completion

表 1 合理切片厚度

Tab.1 Reasonable slice thickness

编号	切片厚度 Δ/mm	
	东岸	西岸
4 号	3.2	3.6
5 号	2.0	2.8
6 号	2.4	2.2
7 号	2.8	2.6
8 号	1.6	3.4
9 号	2.2	2.6

表 2 切割方向

Tab.2 Slice direction

编号	切割方向 n	
	东岸	西岸
4 号	(0, 1.00, -0.01)	(0, 1.00, 0)
5 号	(0, 1.00, 0.01)	(0, 1.00, -0.01)
6 号	(0, 1.00, -0.02)	(0, 1.00, -0.01)
7 号	(0, 1.00, 0.02)	(0, 1.00, -0.01)
8 号	(0, 1.00, 0)	(0, 1.00, -0.01)
9 号	(-0.01, 1.00, 0.02)	(0.01, 1.00, 0)

在粗配准阶段,以实测点云为目标点云,设计点云为待配准点云,选择实测点云与设计点云的 4 组以上对应点,计算变换参数 R 、 t 并作用于设计点云,完成粗配准. 修正 ICP 算法精配准阶段,以设计点云为目标点云,断面点云为待配准点云,运用 ICP 算法计算变换参数 R 、 t ,并将其逆向作用于设计点云,完成精配准实现横联断面点云补全,如图 9(d) 所示. 图 9(e) 对应于第 3.2 节中提取各横联控制断面实测点云具体流程中的步骤 1,图 9(c)对应于步骤 5.

3.4 断面特征提取与姿态分析

以横联两上边点 A_1 、 A_2 与中点 O 为断面姿态特征点,分析断面的面内偏转与整体高程. 计算两边点高差 Δh_1 与两边点间距 L ,分析断面偏转方向与偏转角 β ,如图 10 所示.

计算中点 O 实测与设计高程差 Δh_2 分析整体高程变化. 针对等截面直线结构,通过线形插值法可计算在相邻断面间任意位置处的偏转角 β 与中点高差 Δh_2 . β 的计算式为

$$\beta = \arcsin \frac{\Delta h_1}{L} \quad (15)$$

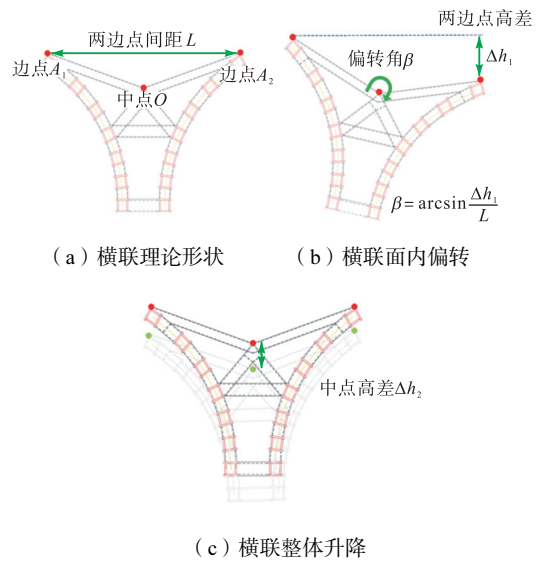


图 10 断面姿态分析

Fig.10 Analysis of sectional posture

3.5 数据分析

以横联断面上部的南、北边缘点及中点作为断面控制点,如图 9(f) 所示. 提取东、西两岸各横联的控制点坐标,见表 3.

表 3 横联控制点坐标

Tab.3 Coordinates of transverse bracing control points

m

横联编号	南边缘点坐标	中点坐标	北边缘点坐标
东岸 9 号	(-4.396 6, 75.405 5, 14.122 3)	(-0.024 8, 75.406 1, 12.574 6)	(4.319 1, 75.406 9, 14.199 2)
东岸 8 号	(-4.965 3, 83.406 6, 18.292 1)	(-0.018 3, 83.407 7, 16.517 0)	(4.912 3, 83.409 5, 18.337 0)
东岸 7 号	(-5.511 7, 91.405 2, 22.108 9)	(-0.023 2, 91.405 3, 20.132 4)	(5.451 8, 91.405 0, 22.146 2)
东岸 6 号	(-6.014 2, 99.407 6, 25.584 3)	(-0.034 9, 99.407 4, 23.431 6)	(5.929 2, 99.406 6, 25.625 9)
东岸 5 号	(-6.416 5, 107.402 2, 28.688 7)	(-0.031 5, 107.402 1, 26.376 0)	(6.346 3, 107.401 9, 28.708 7)
东岸 4 号	(-6.795 4, 115.400 8, 31.356 2)	(-0.030 3, 115.400 7, 28.891 4)	(6.736 3, 115.400 1, 31.351 9)
西岸 4 号	(-6.827 4, 179.288 0, 31.315 1)	(-0.090 7, 179.286 2, 28.855 5)	(6.650 9, 179.286 2, 31.301 6)
西岸 5 号	(-6.467 5, 187.293 9, 28.700 9)	(-0.103 9, 187.293 9, 26.377 9)	(6.264 1, 187.293 9, 28.688 8)
西岸 6 号	(-6.058 3, 195.318 5, 25.645 0)	(-0.113 6, 195.318 5, 23.465 3)	(5.841 4, 195.319 6, 25.616 7)
西岸 7 号	(-5.592 0, 203.303 0, 22.171 8)	(-0.127 5, 203.302 9, 20.174 3)	(5.342 5, 203.302 9, 22.156 6)
西岸 8 号	(-5.074 0, 211.299 4, 18.331 7)	(-0.128 7, 211.295 7, 16.530 2)	(4.817 6, 211.295 0, 18.328 9)
西岸 9 号	(-4.476 8, 219.279 5, 14.201 0)	(-0.123 1, 219.279 3, 12.595 8)	(4.243 8, 219.278 9, 14.164 7)

3.5.1 主拱横向分析

为分析横联的面内偏转状态,计算横联断面南、北边缘点的高差 Δh_1 ,其计算式为

$$\Delta h_1 = Z_n - Z_s \quad (16)$$

式中: Z_n 为横联断面北边点高程; Z_s 为横联的南边点高程.

分析结果表明: Δh_1 范围为 $-36.3 \sim 76.9$ mm,见表 4;东岸 9 号横联 Δh_1 值最高,为 76.9 mm;西岸 9 号横联 Δh_1 值最低,为 -36.3 mm;两岸的 9 号横联相对偏转最大,相对偏转角为 1.30×10^{-2} rad,如图 11 所示;东岸 4 号横联的 Δh_1 值为 -4.3 mm,西岸 4 号横联的 Δh_1 值为 -13.5 mm,两岸 4 号横联相对偏转角

为 6.80×10^{-4} rad,相对偏转角最小. 由分析可知主拱姿态为:东岸主拱整体由北向南偏转,西岸主拱整体由南向北偏转,相对偏转状况具有两侧向中间减小的趋势.

表 4 Δh_1 分布

Fig.4 Distribution of Δh_1

编号	Δh_1 /mm	
	东岸	西岸
4 号	-4.3	-13.5
5 号	20.0	-12.1
6 号	41.6	-28.3
7 号	37.3	-15.2
8 号	44.9	-2.8
9 号	76.9	-36.3

为分析横联间节段的扭转状态, 计算横联间节段东、西断面的扭转角度差, 其计算式为

$$\theta = \beta_e - \beta_w \quad (17)$$

式中: β_e 为节段东岸横联的偏转角; β_w 为节段西岸横联的偏转角。

结果表明: 东岸 8、9 号横联间节段的扭转角最大, 为 $42.77 \times 10^{-4} \text{ rad}$, 如图 12 所示; 西岸 4、5 号横联间节段的扭转角最小, 为 $-0.54 \times 10^{-4} \text{ rad}$; 拱网结构整体发生了正向的扭转, 但在西岸 6、7 号与 7、8 号横联间节段发生了较为明显的逆向扭转。两岸 8、9 号横联间节段均出现较明显的正向扭转。

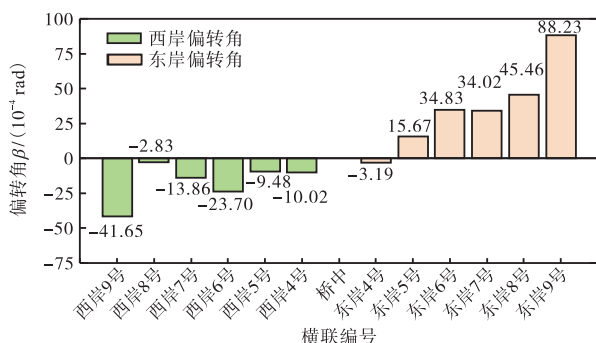


图 11 横联偏转分析

Fig.11 Deflection analysis for transverse bracing

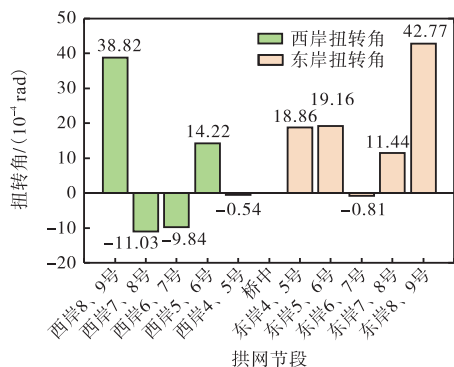


图 12 横联间节段的扭转分析

Fig.12 Torsional analysis of segments between transverse bracings

3.5.2 主拱纵向分析

为评估主拱纵向高程变化, 计算相邻横联中点的高差 H , 并减去设计高差 $\bar{H}$, 获得相邻横联高差偏差 Δh_2 , 见表 5, 其计算式为

$$H = Z_{ic} - Z_{jc} \quad (18)$$

$$\Delta h_2 = H - \bar{H} \quad (19)$$

式中: Z_{ic} 为小编号横联的中点高程; Z_{jc} 为大编号横联的中点高程。

分析结果表明: Δh_2 值范围为 $-50.1 \sim 48.5 \text{ mm}$, 如图 13 所示; 西岸 4、5 号横联 Δh_2 值最低, 为

-50.1 mm ; 东岸 8、9 号横联 Δh_2 值最高, 为 48.5 mm ; 两岸 5、6 号, 6、7 号和 7、8 号横联 Δh_2 值均小于 25.0 mm 。由分析可知主拱姿态为: 两岸 8、9 号横联之间的主拱节段高差增加超过 40.0 mm , 西岸 4、5 号横联之间的主拱节段高差降低约 50.0 mm , 两岸 6、7 号横联之间的主拱节段高差变化较小。

表 5 相邻横联中点高差

Tab.5 Height difference between adjacent transverse bracing midpoints

编号	设计高差 $\bar{H} / \text{m}$	东岸实测 H / m	东岸 $\Delta h_2 /$ mm	西岸实测 H / m	西岸 $\Delta h_2 /$ mm
4、5 号	2.527 7	2.515 4	-12.3	2.477 6	-50.1
5、6 号	2.923 5	2.944 4	20.9	2.912 6	-10.9
6、7 号	3.296 3	3.299 2	2.9	3.291 0	-5.3
7、8 号	3.619 3	3.615 4	-3.9	3.644 1	24.8
8、9 号	3.893 9	3.942 4	48.5	3.934 4	40.5

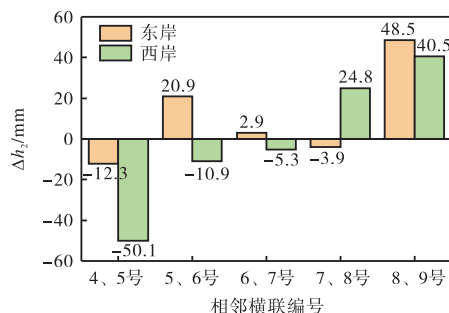


图 13 Δh_2 分布

Fig.13 Distribution of Δh_2

在设计图中两岸同编号横联中点高程相同, 设 Δh_3 为两岸同编号横联的中点实际高差, 其计算式为

$$\Delta h_3 = Z_{ec} - Z_{wc} \quad (20)$$

式中: Z_{ec} 为东岸相同编号横联中点高程; Z_{wc} 为西岸相同编号横联中点高程。

分析结果表明: Δh_3 范围为 $-41.9 \sim 36.0 \text{ mm}$, 如图 14 所示; 7 号横联 Δh_3 值最低, 为 -41.9 mm , 4 号横联 Δh_3 值最大, 为 36.0 mm ; 5 ~ 9 号横联 Δh_3 为负, 其中 5 号横联 Δh_3 为 -1.8 mm , 为最低绝对值。由分析可知主拱姿态为: 主拱 5 ~ 9 号横联之间的节段东

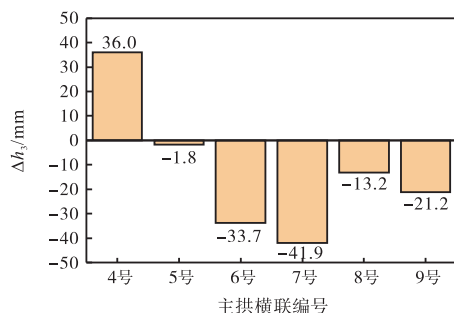


图 14 Δh_3 分布

Fig.14 Distribution of Δh_3

岸中心高程低于西岸的对应值,主拱的待接续施工断面东岸中心高程高于西岸的对应值 36.0 mm,在 5 号横联位置处的两岸中心点高差较小,东岸中心点高差低于西岸的对应值 1.8 mm.

由上述分析可知,桥梁主拱的偏转与不均匀沉降可能与由桥面堆积物的不均匀放置而导致的临时支撑结构地基的长期不均匀受力有关,且二者也与海河水流的长期冲刷改变了临时支撑结构的地质条件有关.

4 结 论

笔者提出了一种基于设计信息的桥梁实测点云补全方法,解决了不完整点云对桥梁空间姿态分析的影响的问题,并进行了实桥验证.本文的主要结论如下.

(1) 基于 K 维树算法和 PCA 的断面点云分割算法能够保障实测断面点云具有二维特征且有充足数据点表征断面形态,实现了断面点云的高质量分割.

(2) 通过开展断面补全精度分析实验,笔者发现点云补全精度随插值间距减小而得到显著提高,在 1 mm 插值间距下配准 e_{RMSE} 为 0.315 mm,点云配准误差较低,高质量完成了点云补全.

(3) 该方法解决了复杂结构因点云缺失而无法提取空间姿态的问题,通过点云补全能够定量分析断面位移并获取结构空间姿态.由分析可知 Y 型复杂结构 9 号横联处存在最大相对偏转角为 1.30×10^{-2} rad,验证了该方法具有实用性与通用性,其在桥梁姿态检测领域具有较广阔的应用前景.

参考文献:

- [1] 王凌波,王秋玲,朱 钊,等.桥梁健康监测技术研究现状及展望[J].中国公路学报,2021,34(12): 25-45.
Wang Lingbo, Wang Qiuling, Zhu Zhao, et al. Current status and prospects of research on bridge health monitoring technology[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(12): 25-45 (in Chinese).
- [2] 楚 玺,周志祥,段 鑫,等.桥梁结构连续线形监测方法[J].公路交通科技,2023,40(11): 157-163, 171.
Chu Xi, Zhou Zhixiang, Duan Xin, et al. A monitoring method for continuous line-shape of bridge structure [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2023, 40(11): 157-163, 171 (in Chinese).
- [3] 易有森,樊少彻.港珠澳大桥青州航道桥钢箱梁施工关键技术[J].桥梁建设,2021,51(3): 138-144.
Yi Youmiao, Fan Shaoche. Key construction technology of steel box girder of Qingzhou Channel Bridge of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge[J]. Bridge Construction, 2021, 51(3): 138-144 (in Chinese).
- [4] 朱 颖,郭 辉,孙大奇,等.运营期公铁两用悬索桥温度效应研究[J].铁道学报,2024,46(6): 156-166.
Zhu Ying, Guo Hui, Sun Daqi, et al. Investigation on temperature-induced effect on rail-cum-road suspension bridge during service life[J]. Journal of the China Railway Society, 2024, 46(6): 156-166 (in Chinese).
- [5] 吴迪军.桥梁工程测量技术现状及发展方向[J].测绘通报,2016(1): 1-5.
Wu Dijun. Current status and development trend of bridge engineering surveying techniques[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2016(1): 1-5 (in Chinese).
- [6] Rashidi M, Mohammadi M, Kivi S S, et al. A decade of modern bridge monitoring using terrestrial laser scanning: Review and future directions[J]. Remote Sensing, 2020, 12(22): 3796.
- [7] 王 贝,叶险峰,王军宁.利用点云切片提取技术分析桥梁形变[J].测绘通报,2022(4): 167-171.
Wang Bei, Ye Xianfeng, Wang Junning. Bridge deformation analysis based on point cloud slice extraction technique[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2022(4): 167-171 (in Chinese).
- [8] Kim D, Kwak Y, Sohn H. Accelerated cable-stayed bridge construction using terrestrial laser scanning[J]. Automation in Construction, 2020, 117: 103269.
- [9] 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.
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 (in Chinese).
- [10] 石林泽,赵 健,任延龙,等.基于三维激光扫描的钢桁拱桥吊索塔架施工线形监测研究[J].世界桥梁,2022,50(1): 79-85.
Shi Linze, Zhao Jian, Ren Yanlong, et al. Research on 3D laser scanning based line-shape monitoring for towers of cable-stayed cantilever assembly system used in steel truss arch bridge construction[J]. World Bridges, 2022, 50(1): 79-85 (in Chinese).
- [11] Li J, Peng Y P, Tang Z Y, et al. Three-dimensional reconstruction of railway bridges based on unmanned ae-

- rial vehicle-terrestrial laser scanner point cloud fusion [J]. Buildings, 2023, 13: 2841.
- [12] Hu G T, Zhou Y, Xiang Z F, et al. Fast and accurate generation method of geometric digital twin model of RC bridge with box chambers based on terrestrial laser scanning[J]. Remote Sensing, 2023, 15(18): 4440.
- [13] 王建军, 卢云鹏, 张茅匀, 等. 实现激光点云高效配准的 ICP 优化及性能验证[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(10): 20200483.
- Wang Jianjun, Lu Yunpeng, Zhang Jiyun, et al. Optimization and performance verification of high efficiency ICP registration for laser point clouds[J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(10): 20200483(in Chinese).
- [14] Liang H G, Shen H H, Liu P H, et al. Deep learning for sub-Nyquist sampling scanning white light interferometry[J]. Optics Letters, 2023, 48(22): 5976-5979.
- [15] 朱劲松, 王多吴, 杨瑞鹏. 基于点云数据的钢箱节段数字化预拼装方法[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2024, 44(6): 47-58.
- Zhu Jinsong, Wang Duowu, Yang Ruipeng. Digital pre-assembly method for steel box segments based on point cloud data[J]. Journal of Chang'an University(Natural Science Edition), 2024, 44(6): 47-58(in Chinese).
- [16] 李 岩, 张子毅, 王建柱. 基于特征点提取的 RANSAC-ICP 三维点云配准方法[J]. 山东大学学报(工学版), 2024, 54(5): 144-154.
- Li Yan, Zhang Ziyi, Wang Jianzhu. RANSAC-ICP 3D point cloud registration method based on feature point extraction[J]. Journal of Shandong University(Engineering Science), 2024, 54(5): 144-154(in Chinese).
- [17] 王太学, 江 智, 江德港, 等. 融合 PCA 的改进 ICP 激光点云配准算法[J]. 遥感信息, 2022, 37(2): 70-76.
- Wang Taixue, Jiang Zhi, Jiang Degang, et al. Improved ICP laser point cloud registration algorithm based on PCA[J]. Remote Sensing Information, 2022, 37(2): 70-76(in Chinese).
- [18] Sorkine-Hornung O, Rabinovich M. Least-Squares Rigid Motion Using SVD[R]. Zurich, Switzerland: ETH Zurich, 2017.
- [19] 余永维, 王 康, 杜柳青, 等. 点云模型的匹配点对优化配准[J]. 光学精密工程, 2023, 31(4): 503-516.
- Yu Yongwei, Wang Kang, Du Liuqing, et al. Matching point pair optimization registration method for point cloud model[J]. Optics and Precision Engineering, 2023, 31(4): 503-516(in Chinese).

(责任编辑: 武立有)