



# 地面激光扫描点云与无人机影像 点云融合应用

彭仪普<sup>1</sup>, 李剑<sup>1</sup>, 邹魁<sup>2</sup>, 汤致远<sup>1</sup>, 李子超<sup>1</sup>, 韩衍群<sup>1</sup>

(1. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075;  
2. 湖南中大设计院有限公司, 湖南 长沙 410075)

**摘要:** 通过建立高精度的桥梁三维点云模型, 检查桥梁病害情况并拟合绘制出桥梁线形。首先以无人机近景摄影、环绕飞行、井字飞行获取某双线特大桥梁主体与细部纹理数据, 然后将不同航线采集的数据在Context Capture软件里面进行三维重建, 将桥梁主体与细部影像融合生成完整桥梁点云1。运用Trimble SX12仪器完成对桥梁一体化扫描, 获得完整桥梁点云2。提出基于双向KD-tree优化的ICP(Iterative Closest Point)算法对无人机航摄桥梁点云1与地面激光扫描桥梁点云数据2进行配准融合, 加密后的桥梁点云用于建立运营铁路双线特大桥精细化三维实景建模。提出基于KD-tree的PCA(Principal Component Analysis)算法完整提取出桥梁吊索点云, 运用最小二乘法拟合出桥梁拱轴线线形、RANSAC算法拟合出桥面线形。通过与单一无人机、单一地面激光扫描精度及完整性对比分析, 以验证融合建模的有效性。研究结果表明: 融合建模的模型水平精度1.71 cm、垂直方向精度1.25 cm, 较单一无人机建模精度在水平与竖直方向分别提升16.59%与20.89%; 融合建模的完整性为98.17%, 纹理效果更加真实, 并检查出桥墩存在蜂窝麻面、渗水等病害, 拱肋存在涂装锈蚀、破裂等病害。该研究可为桥梁三维点云模型应用研究提供思路参考, 具有较好的应用前景。

**关键词:** 运营铁路桥梁线形; 倾斜摄影测量; 地面激光扫描; 点云数据融合; 桥梁病害检测

中图分类号: P231; U446.2

文献标志码: A

文章编号: 1672-7029 (2024) 07-2804-11

## Integration application of terrestrial laser scanner point clouds and unmanned aerial vehicle image point clouds

PENG Yipu<sup>1</sup>, LI Jian<sup>1</sup>, ZOU Kui<sup>2</sup>, TANG Zhiyuan<sup>1</sup>, LI Zichao<sup>1</sup>, HAN Yanqun<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China;

2. Hunan Zhongda Design Institute Co., Ltd., Changsha 410075, China)

**Abstract:** This study was to establish a high-precision 3D point cloud model of bridges, inspect bridge health conditions, and fit and draw the bridge geometry. Firstly, close-range photography, orbiting flights, and grid flights with drones were employed to acquire detailed texture data of a certain large twin-line bridge. Subsequently, the data collected from different flight routes were processed in context capture software for 3D reconstruction, merging the main and detailed images to generate a comprehensive bridge point cloud 1. The

收稿日期: 2023-09-16

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(2019JJ40385); 国家自然科学基金资助项目(52078499, 52378424); 中国中铁股份有限公司科技研发计划(2020-重点-09)

通信作者: 彭仪普(1970—), 男, 湖南长沙人, 副教授, 博士, 从事桥梁健康监测与数字孪生技术等相关研究; E-mail: pengyp2003@163.com

Trimble SX12 instrument was used for integrated scanning of the entire bridge, obtaining a complete bridge point cloud 2. An iterative closest Point (ICP) algorithm based on a bi-directional KD-tree optimization was proposed to register and merge the drone-surveyed bridge point cloud 1 with the terrestrial laser-scanned bridge point cloud data 2. The encrypted bridge point cloud was then used to establish a refined 3D realistic model of the operational twin-line bridge for railways. Additionally, a Principal Component Analysis (PCA) algorithm based on KD-tree was introduced to extract the suspension point cloud of the bridge. The least squares method was applied to fit the bridge arch axis alignment, and the RANSAC algorithm was used to fit the bridge deck profile. Validation of the effectiveness of the fusion modeling was conducted through comparative analysis with the accuracy and completeness of single unmanned aerial vehicle (UAV) and terrestrial laser scanning. The results indicate that the horizontal accuracy of the fusion model is 1.71 cm. The vertical accuracy is 1.25 cm. This represents an improvement of 16.59% in the horizontal direction and 20.89% in the vertical direction compared to the accuracy of the single UAV modeling. The completeness of the fusion model is 98.17%, providing a more realistic texture effect. The model can identify bridge pier conditions, such as honeycomb surface and water seepage, as well as arch rib issues like painted rust and cracks. This study can provide valuable insights and references for the application research of 3D point cloud models for bridges, demonstrating promising prospects.

**Key words:** operating railway bridge alignment; oblique photogrammetric survey; terrestrial laser scanning; point cloud data fusion; bridge defect detection

实景三维模型是国家的重要新型基础设施,它能够准确传达人类生产生活与生态空间的信息,为数字政府和数字经济提供战略性的数据和生产要素。2023年3月,自然资源部发布《实景三维中国建设总体实施方案(2023—2025年)》,强调了构建全国范围的实景三维建设、加强科技创新支持,并促进高质量数据的整合和利用。桥梁精细化实景三维模型在辅助桥梁健康监测、线形分析、结构施工模拟等方面均有较好应用<sup>[1-3]</sup>。吴熠文等<sup>[4]</sup>总结出无人机倾斜摄影测量技术具有操作容易、时效性高等优点,已成为大范围、高效率的地面上空数据信息采集的方法。张俊阳等<sup>[5]</sup>采用无人机对矿区地表沉陷与病害进行观测,其研究结果表明无人机遥感技术在生态科学治理,矿山智能转型具有重要作用。石雪飞等<sup>[6]</sup>提出桥梁线形无人机测量技术思路与控制参数,总结出桥梁悬臂施工线形测量优化方法。周云等<sup>[7]</sup>提出无人机倾斜摄影逆向技术有效构建了桥梁有限元模型,精度达到2%,用于分析桥梁模态频率及拟合曲面。然而单一无人机倾斜摄影测量对于近地部分的数据信息因遮挡而采集不到或精度不够而失真,底部纹理效果较差且建模精度较低。近年来,地面激光扫

描仪(Terrestrial Laser Scanner, TLS)可以高精度、灵活地获取地面物体的三维点云信息,并广泛应用于古建筑保护与修复、边坡变形监测以及建筑物三维模型重建等领域。周志祥等<sup>[8]</sup>提出采用移动式激光扫描获取桥梁点云数据,与传统测量方式相比误差在7%之内。熊文等<sup>[9]</sup>采用三维激光扫描技术获取桥梁高精度点云模型,对比两期点云模型来识别桥梁构件形态变化,确保桥梁安全。然而单一地面激光扫描仪由于遮挡问题难以获取目标物体顶部数据,造成的目标顶部扫描盲区,扫描距离和扫描角度导致的高层建筑物上部点云质量较差,点云模型出现空洞现象,同时地面激光扫描仪获取的纹理信息达不到模型数字化标准。利用地面激光扫描仪补充采集无人机拍摄不到区域的三维点云模型,将两种来源点云进行配准融合后再进行三维模型构建,有效解决模型漏洞与模糊不清的问题。针对地面激光点云数据与无人机点云数据融合的问题仍在探索阶段,目前仅有少量学者对该部分进行了研究。苑壮<sup>[10]</sup>结合无人机航测与机载三维激光扫描优势,通过获取点云数据构建数字高程模型并进行沉降信息提取,得到矿区地面沉陷情况的三维立体数据。利用传统测量

中实测水准点和已有GPS监测站数据，验证了无人机三维激光扫描系统可以满足矿区岩移沉降观测的精度要求。RAZALI等<sup>[11]</sup>以马来西亚柔佛巴鲁一栋单层建筑为应用案例，通过点对拾取方法(PPP)对一栋单层建筑的UAV点云与TLS点云进行融合，形成一个高密度的混合点云模型。然而这种人为选点对的方法，主观性较强，易产生较大误差。运营铁路双线特大桥梁因其杆件结构体系复杂，单一数据获取方式难以实现场景全覆盖，进而影响后续三维实景模型构建完整性，因此，开展点云数据融合技术具有重要意义。本文研究将无人机航摄点云与地面激光扫描点云数据融合建立桥梁三维实景模型，辅助检查桥梁病害；提

取出桥梁吊索点云，并拟合出桥梁线形；最后验证了该方法的有效性。

## 1 桥梁点云数据采集及融合

### 1.1 外业操作

倾斜摄影测量技术是在同一航高上从垂直和倾斜5个角度同时采集影像的技术。首先通过现场踏勘进行控制点布设，规划飞行航线并进行无人机影像采集，将地面激光仪扫描点云与无人机航摄点云数据融合，通过空中三角测量进行三维实景模型重建。桥梁三维实景模型构建流程如图1所示。

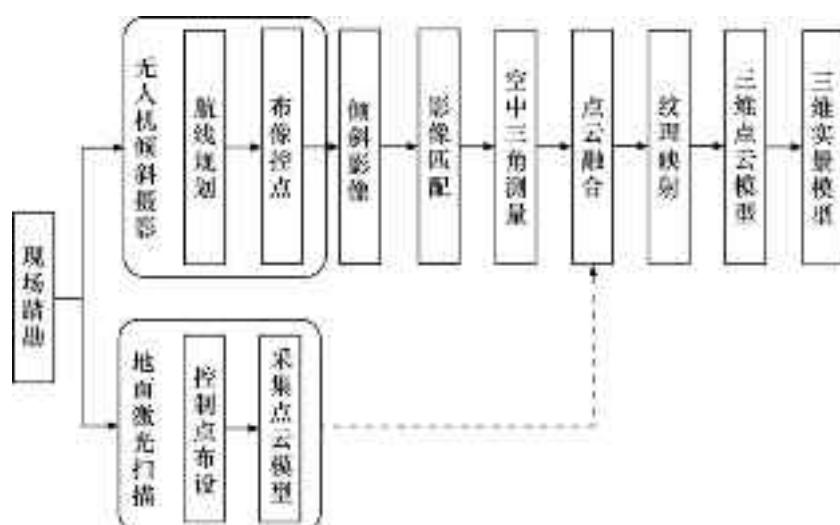


图1 桥梁三维实景模型构建

Fig. 1 Construction of a 3D realistic model of a bridge

无人机航摄时需要合理设置无人机的航高、旁向与航向重叠度等参数，以确保飞行安全、并同时保证影像分辨率和桥梁数据的完整性<sup>[12-14]</sup>。旁向重叠与航向重叠的详细解释示意如图2所示。

参数定义表示如下：

$$\begin{cases} R_1 = \frac{Y-M}{y} \\ Y = \frac{(y \times h)}{f} \end{cases} \quad (1)$$

$$y = c_m \times a \quad (2)$$

其中： $R_1$ 表示航向重叠度； $Y$ 表示影像高在地面投影； $M$ 表示曝光间距； $H$ 为航高； $f$ 为焦距； $y$ 为传感器高； $c_m$ 为最短边像素。

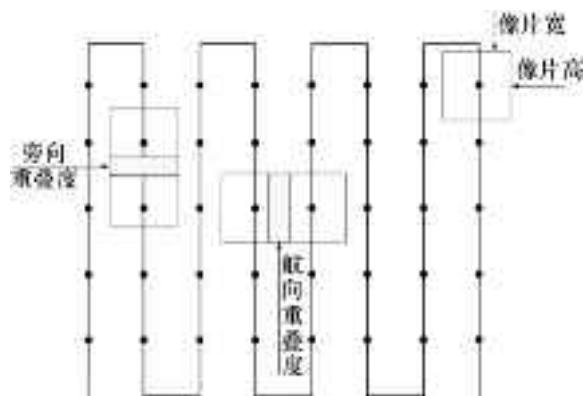


图2 航向重叠与旁向重叠示意图

Fig. 2 Schematic diagram of heading and lateral overlaps

旁向重叠表示相邻航线上2张影像重叠部分占每张影像的百分比，根据相邻2条航线上2张照片

的宽在地面投影范围的重叠, 计算左右2张影像重叠区域的长度是影像宽减去航线间距, 2张影像未重叠区域为航向间距。旁向重叠度可表示为:

$$\begin{cases} R_2 = \frac{X-N}{x} \\ X = \frac{(x \times h)}{f} \end{cases} \quad (3)$$

$$x = c_n \times a \quad (4)$$

其中:  $R_2$  表示航向重叠度;  $X$  为影像宽在地面的投影;  $N$  为航线之间的距离;  $x$  为传感器的宽度;  $c_n$  为最长边像素。

## 1.2 点云融合及内业操作

数据融合处理主要分为2个方面: 一是不同地面激光扫描测站之间的点云配准, 二是无人机影像点云与地面激光扫描点云融合。对于多个地面激光扫描测站的点云配准, 在 Trimble Business Center 软件里面通过同名特征点进行手动配准即可

达到模型精度要求。ICP 配准算法第1步为对应点匹配, 需要查找后一帧点云中的一个点在前一帧点云最近的一个点。针对最近点存在多对一的情况从而影响 ICP 算法配准效率的问题, 为优化查询效率, 采用 KD-tree 优化解决 k 维空间中为数据集建立索引的问题, 对 k 维空间切分<sup>[15-17]</sup>。提出双向构建 KD-tree 算法, 步骤如下:

- 1) 构建 P、Q 点云的 KD-tree。
- 2) 在 Q 内搜索  $P_i$  的最近点  $Q_i$ 。
- 3) 如果在 P 内搜索  $Q_i$  最近点是  $P_i$ , 则  $P_i$  与  $Q_i$  为表示对应关系的最近点。
- 4) 如果在 P 内搜索  $Q_i$  最近点不是  $P_i$ , 则继续查找下一点  $Q_{(i+1)}$  在 Q 内的最近点。
- 5) 遍历搜索点云 P 内所有点云。

基于双向 KD-tree 优化的 ICP 算法流程如图 3 所示。

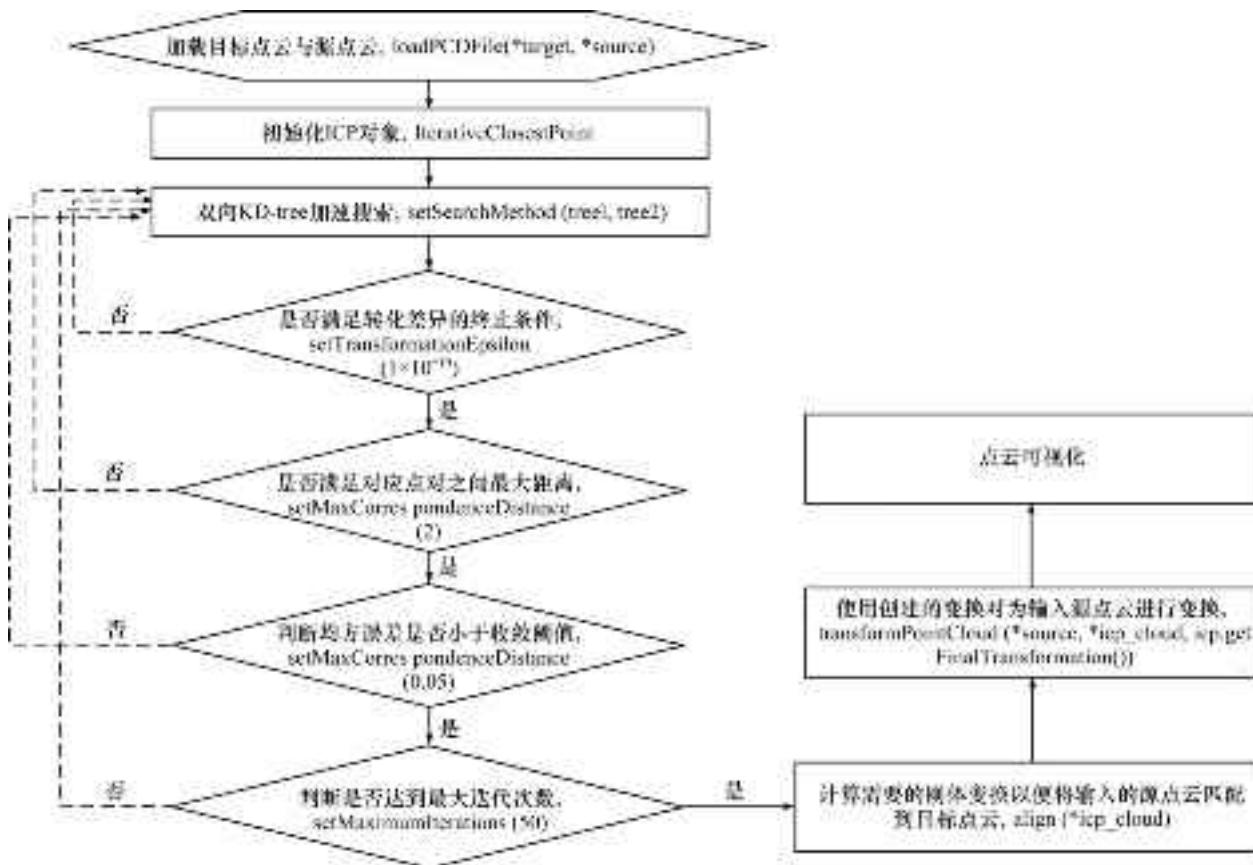


图3 基于双向KD-tree的ICP加速迭代处理图

Fig. 3 ICP Iterative processing with kd-tree acceleration

双向 KD-tree 优点是可以确定一一对应的最邻近点对, 虽然搜索时间为 KD-tree 的 2 倍, 但是双

向 KD-tree 算法迭代时间大大降低。对于无人机航摄点云与地面激光扫描点云, 通过构建基于双向

KD-tree对粗配准后的点进行最近邻搜索，去除欧式距离大于阈值的配准关键点，保存高配准精度的点云<sup>[18]</sup>。根据上述原理，可快速选择剔除配准精度较低的点，保留高精度的点，这样可剔除误差较大的点，以及优化剩余关键点质量。将融合好的桥梁点云导入Context Capture软件中建立高精度实景模型<sup>[19]</sup>。

## 2 案例对象及数据采集

### 2.1 案例概况

该案例为某运营铁路重点控制性桥梁工程<sup>[20]</sup>，通航净高不小于13 m，最高通航水位 $H=10.09$  m，

设计为预应力钢筋砼整孔箱梁桥，主桥为 $2\times 128$ 下承式钢管混凝土系杆拱桥。现场试验环境条件均满足桥梁扫描的要求：天气晴，温度22℃，风力1~2级，卫星信号状态良好。

### 2.2 数据采集

#### 2.2.1 无人机数据采集

控制点应选在交角良好的细小线状地物的交点或地物拐角处，目标须清晰明显，满足GPS观测的要求。控制点采用中海达V5移动站RTK测量，外业采集的数学基础为国家大地坐标系(CGCS2000)，高斯投影中央子午线108°，高程系统为大地高，摄区范围内均匀布设7个地面控制点，布设情况如图4所示。



图4 地面控制点的布设

Fig. 4 Distribution of control points

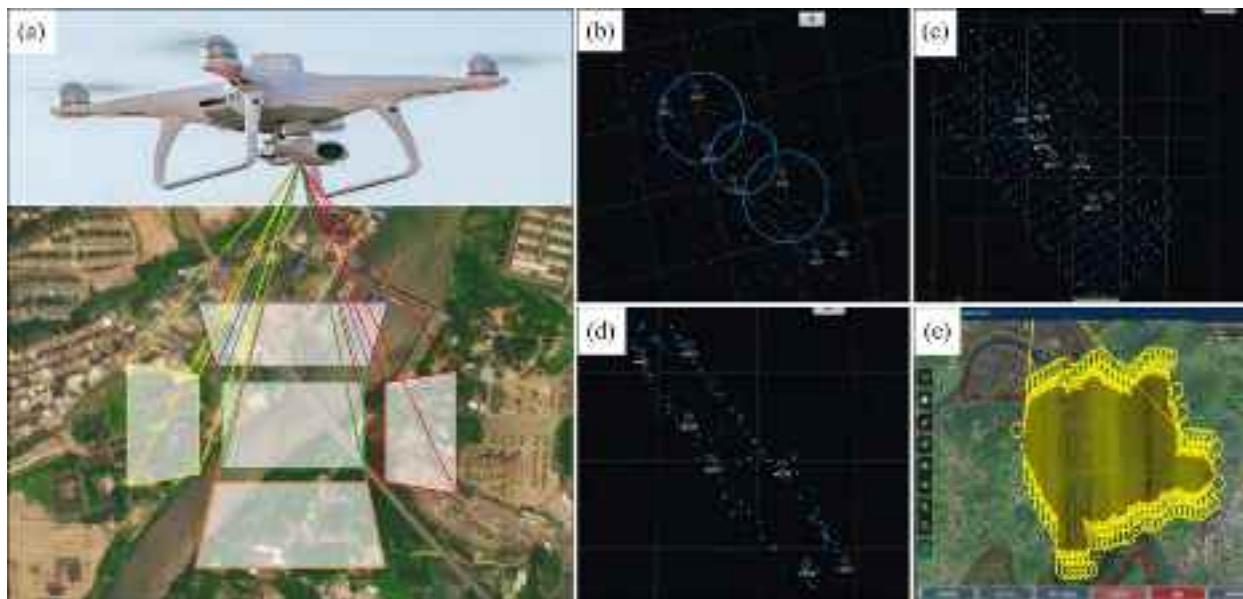
无人机使用的是大疆Phantom 4 RTK多旋翼航拍设备，最高升限400 m，巡航速度12 m/s，续航时间可达30 min。同一航线上最大航高与最小航高之间不大于10 m。采集目标桥梁多视图影像数据，旁向重叠度75%与航向重叠度80%，云台俯仰角度-60°，旁向覆盖超出测区边界不少于像幅20%，航向覆盖超出测区边界不少于1条基线。无人机不同飞行航线轨迹如图5所示。

本项目共获取影像约1 560万幅，影像数量约为12 GB，为保证生产进度，使用数据服务器1台，高性能计算机集群(3个节点)，大容量存储设备2套。

#### 2.2.2 地面激光扫描仪数据采集

地面激光扫描仪使用的是Trimble SX12是新一代影像扫描设备，扫描速度26 600点/s，最大扫描范围为600 m，配合使用Windows10系统的控制手簿，可以自动连续获取大量点云数据<sup>[21-22]</sup>。外业操作及内业数据处理如图6所示。

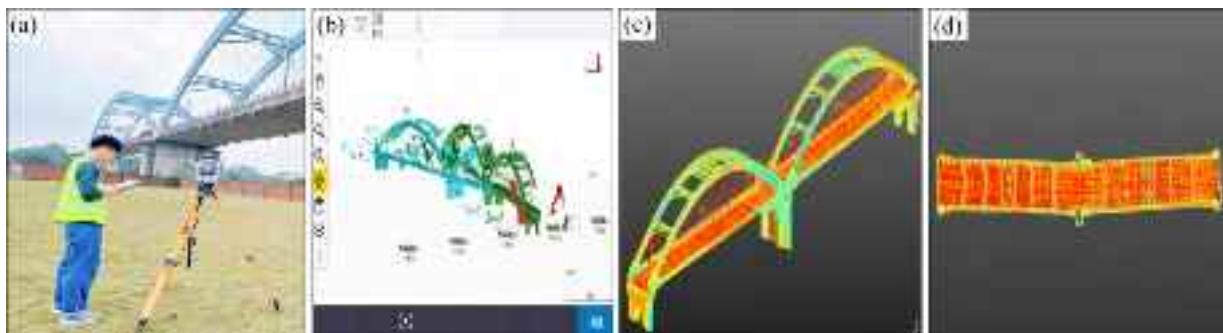
根据现场实际情况，对桥梁整体进行架站扫描，选择四边形的方式对区域进行有效覆盖，可提高扫描效率以及降低点云间误差。每站扫描完成后在手簿里检查点云间距，如果不满足要求，则进行加密扫描，使得点云间距在mm级内。



(a) 无人机摄影测量; (b) 无人机环绕飞行; (c) 无人机井字飞行; (d) 无人机近景摄影飞行; (e) 一个架次的航线示意图

图5 无人机不同航线飞行测量

Fig. 5 UAV measurements with different flight paths



(a) 地面激光扫描现场操作; (b) 在手簿里检查点云扫描情况; (c) 桥梁点云的正视图; (d) 桥梁点云的俯视图

图6 地面激光扫描外业操作及点云处理

Fig. 6 Field operations of ground laser scanning

### 3 点云融合应用研究

将无人机航摄点云与地面激光扫描点云通过基于双向 KD-tree 的优化的 ICP 算法配准到一起。将融合的桥梁点云模型转化为 E57 格式文件导入 Context Capture 软件进行三维实景模型的构建。融合过程见图 7。

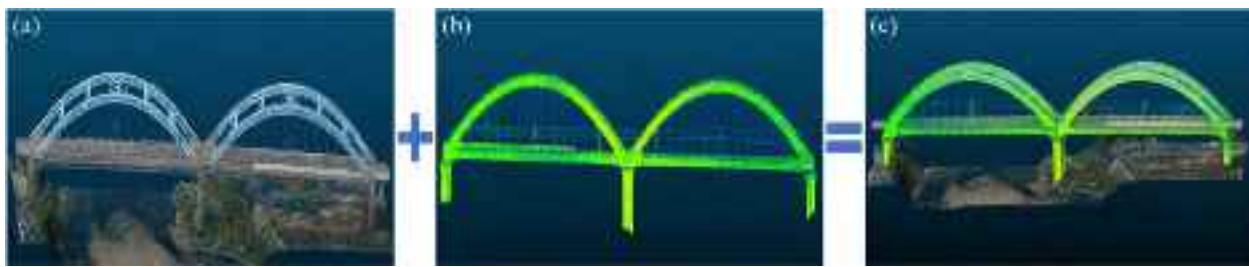
#### 3.1 拟合桥梁线形

##### 3.1.1 吊索提取

首先打开点云文件, int k=50, 对每个点搜索最近距离, 当当前簇停止生长时, 开启新簇, 将建立的点云设置为 KD-tree 输入, float radius=0.5, 对所有点都复制为 Y, 如果 maxHeight>0.8, 则将

该区域内的所有点的属性记作 N。将 i 点附近的邻域点计算主成分, 如果第 3 主成分大于 15 倍的第 2 成分, Point[points\_k\_near\_index[i][id]].att = 'N'。使用 Jacobi 法计算协方差的特征值和特征矩阵, 检查  $i < \text{Array.size}()$ 、 $j < \text{Array.size}()$ , if ( $i=j$ ), 则继续; if ( $\text{fabs}(\text{Array}[i][j]) > E$ ), 则退出。部分伪代码如表 1 所示。

吊索提取算法<sup>[23]</sup>流程如图 8 所示。算法提取的吊索点云, 可用于分析运营桥梁线形与设计桥梁线形的变化, 也可用于逆向工程建模, 对索力进行计算与桥梁的有限元受力分析。提取的吊索点云如图 9 所示。



(a) 无人机航摄点云; (b) 地面激光扫描点云; (c) 融合后的点云

图7 TLS点云与UAV点云融合

**Fig. 7** Fusion of TLS point cloud and UAV point cloud

表1 部分伪代码

**Table 1** Partial pseudocode

```

kdtree.setInputCloud(cloud);
float radius = 0.5;
for (int i = 0; i < n_points; i++)
    {po.index = i;
     po.att = 'Y';
     Point.push_back(po);}
for (int i = 0; i < n_points; i++)
    {printf("%d ", i);
     if (Point[i].att == 'Y')
         {auto& point = cloud->points.at(i);
          int n_near = kdtree.radiusSearch(point, radius, points_k_near_index[i], points_k_near_dist[i]);
          int maxHeightId = 0;
          int minHeightId = 0;
          for (size_t j = 0; j < points_k_near_index[i].size() - 1; j++)
              {if(cloud->points[points_k_near_index[i][j+1]].z > cloud->points[points_k_near_index[i][maxHeightId]].z)
               {maxHeightId = j + 1;}
               if (cloud->points[points_k_near_index[i][j+1]].z < cloud->points[points_k_near_index[i][minHeightId]].z)
                   {minHeightId = j + 1;}}
          double maxHeight=cloud->points[points_k_near_index[i][maxHeightId]].z-cloud->points[points_k_near_index[i][minHeightId]].z;
          if (maxHeight > 0.8)
              {PAC(index2vector(points_k_near_index[i]));
               if (TZ[0] / TZ[1] > 15)
                   {for (size_t id = 0; id < points_k_near_index[i].size(); id++)
                     {Point[points_k_near_index[i][id]].att = 'N';}}}

```

### 3.1.2 最小二乘法拟合圆弧

提取出各吊索点云上边缘点坐标，进而求解出要拟合圆弧的圆心及半径，运用最小二乘法<sup>[24]</sup>拟合成圆弧，假设拟合圆方程：

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = r^2$$

其中：(a, b)为圆心坐标，求出a、b、r 3个参数就可以确定该圆的方程，对吊索点云拟合完成后保留最左侧吊索与最右侧吊索连成的圆弧，即可得

到桥梁拱轴线线形。桥梁拱轴线形拟合结果如图10所示。

### 3.1.3 RANSAC算法拟合直线

RANSAC算法<sup>[25]</sup>是在一定置信概率条件下，子集采样数量N与大于一个良性采样子集概率P满足以下等式关系：

$$P = 1 - (1 - t^N)^m$$

式中：t表示数据集合中内点出现的概率；m表示

迭代次数,  $N$  表示计算模型参数需要的最小数据量。通过迭代  $m$  次, 求解迭代过程中模型参数下内点个数  $n$  的过程。在拟合桥梁平面线形至少需

要 2 个空间点, 取  $N=2$ 。置信度设置 99%, 迭代次数设置为 1 000 次。桥面线形拟合结果如图 11 所示。

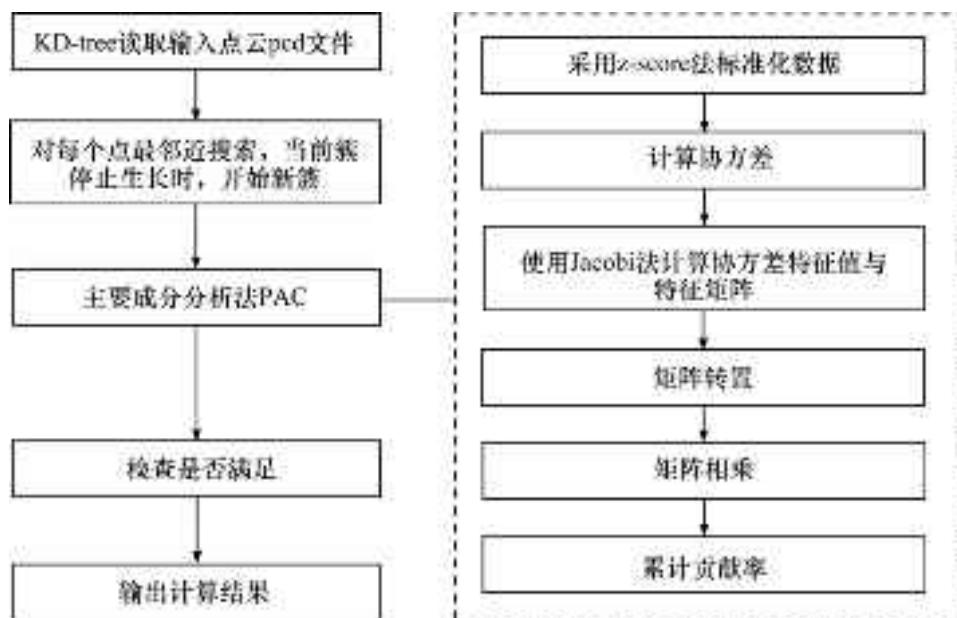
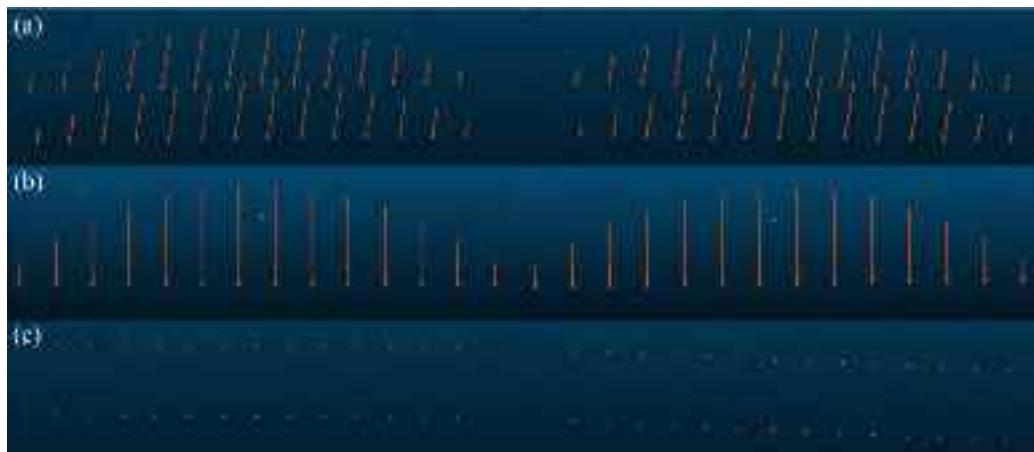


图 8 吊索提取算法的代码流程图

Fig. 8 Code flow diagram of the sling extraction algorithm



(a) 正视图; (b) 侧视图; (c) 俯视图

图 9 提取吊索点云

Fig. 9 Extract sling point cloud

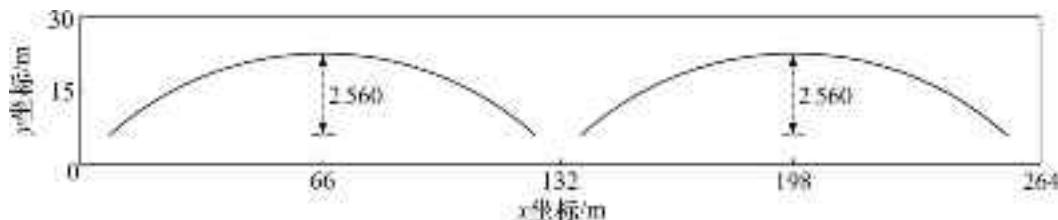


图 10 桥梁拱轴线形

Fig. 10 Bridge arch axis alignment

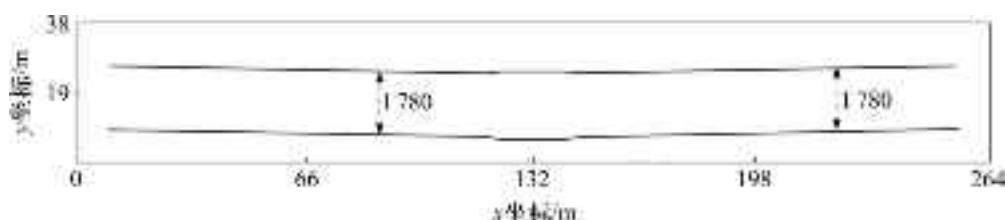


图11 桥梁桥面线形

Fig. 11 Bridge deck profile

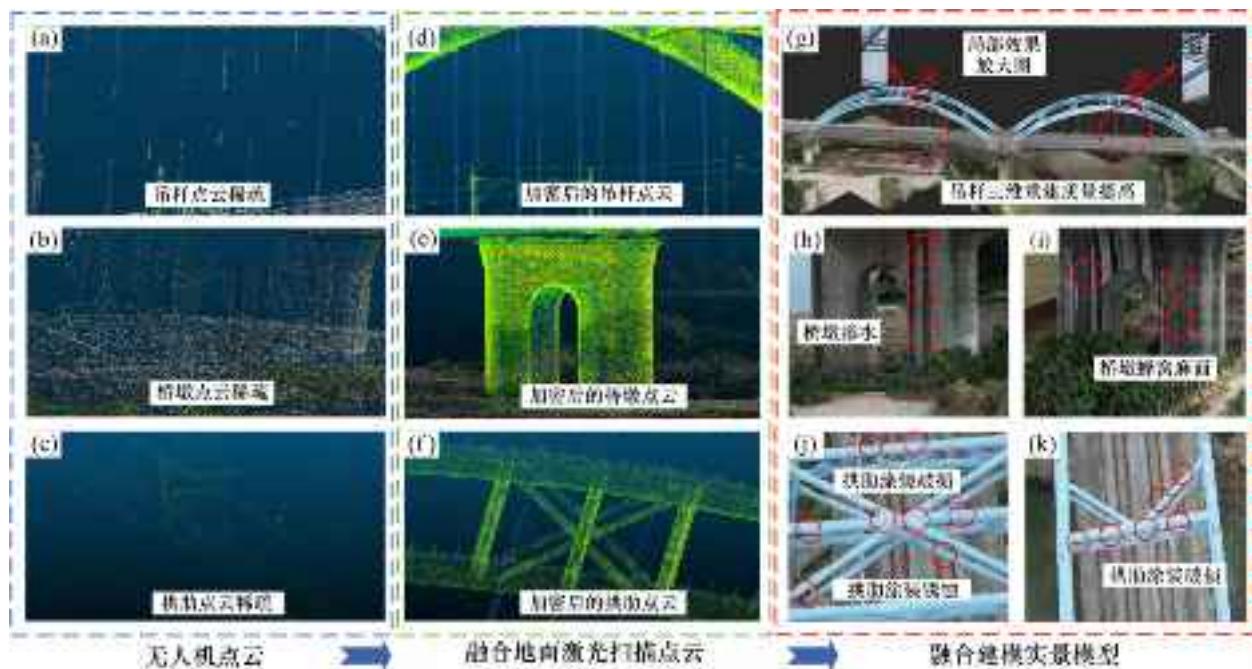
拟合出的拱轴线线形及桥梁线形可对比成桥后的理论线形计算分析,进而判断桥梁施工运营之后的状况,确保铁路桥梁安全平稳运行。

### 3.2 桥梁病害检查

将融合的桥梁点云模型转化为E57格式文件导入Context Capture软件进行三维实景模型的构建。对桥面系、桥墩及铁路钢桁架拱梁处外观质量检

查,融合后的效果及病害检查结果如图12所示。

在桥梁病害中部分梁底渗水痕迹明显见图12(h),墩上支座出现小面积锈蚀,影响桥墩耐久性,需加强排水措施。桥墩混凝土表面部分区域有局部的部分蜂窝、麻面现象见图12(i)。经无人机航拍及现场勘查,拱肋涂装部分出现锈蚀及破裂见图12(j)、12(k)。



(a) 无人机航摄的吊索点云; (b) 无人机航摄的桥墩点云;

(c) 无人机航摄拱肋点云; (d) 加密的吊索点云;

(e) 加密的桥墩点云; (f) 加密的拱肋点云;

(g) 桥梁三维实景模型; (h) 桥墩渗水;

(i) 桥墩蜂窝麻面;

(j) 拱肋涂装锈蚀;

(k) 拱肋涂装破损

图12 点云融合及三维重建应用

Fig. 12 Point cloud fusion and 3D reconstruction application

### 3.3 质量评估

通过将TLS扫描点云与UAV技术航摄图像在案例区域设置控制点(GPS)进行比较,为评估精度,三维模型与GPS之间的差异可以用均方根误差(RMSE)来衡量模型精度<sup>[26]</sup>。

$$R_{\text{mse}}(\text{xyz}) = \sqrt{R_{\text{mse}(x)}^2 + R_{\text{mse}(y)}^2 + R_{\text{mse}(z)}^2} \quad (5)$$

其中RMSE<sub>x</sub>可表示为:

$$R_{\text{mse}(x)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_i^2}{n}} \quad (6)$$

其中:  $\Delta x_i$  表示 GCP 坐标与由点云确定的坐标之差,  $n$  为控制点个数, 公式同样适用于  $R_{mse(y)}$  与  $R_{mse(z)}$ 。

基于 TLS 和 UAV 融合点云方程可表示为:

$$P_{cd(f)} = P_{cd(t)} + P_{cd(u)} \quad (7)$$

其中:  $P_{cd(t)}$  表示基于 TLS 的点云,  $P_{cd(u)}$  表示基于 UAV 的点云,  $P_{cd(f)}$  表示 TLS 与 UAV 融合的点云。融合后的精度及完整性结果如表 2 所示。

表2 点云融合与单一点云对比分析

Table 2 Point cloud fusion and single point cloud comparative analysis

模型/类	水平方向 RMSE/m	垂直方向 RMSE/m	完整性/%
UAV	0.020 5	0.015 8	89.76
TLS	0.008 0	0.005 0	94.39
UAV-TLS	0.017 1	0.012 5	98.17

地面激光扫描不能对桥梁顶部结构进行扫描, 桥梁完整性只能达到 94.39%, 将无人机航摄点云融合后, 模型完整度提升为 98.17%。根据《城市三维建模技术规范》中的规定, 对于建筑物的细节层次(LOD 标准), 该融合建模精度远超 0.2 m, 鉴定拱桥精度等级为 LOD4 级别, 满足精细化建模指标。

## 4 结论

1) 无人机融合地面激光扫描仪的数据采集方法, 建立纹理效果更真实的铁路桥梁三维实景模型, 可辅助检查桥梁桥墩、拱肋等病害情况。

2) 通过基于双向 KD-tree 优化的 ICP 配准算法将地面激光扫描点云与无人机航摄点云融合, 完整性提升了 8.41 个百分点, 实景三维模型水平方向精度提升至 1.71 cm、垂直方向提升至 1.25 cm。

3) 基于 KD-tree 的 PCA 算法可以完整提取出桥梁吊索点云, 并拟合绘制出拱轴线线形与桥面线形。

## 参考文献:

[1] 方淑君, 徐新桐, 王涛, 等. 运营状态下新建桥对邻近高铁桥梁沉降的分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(5): 1187–1195.

FANG Shujun, XU Xintong, WANG Tao, et al. Influence of new bridge loading on additional foundation settlement of existing bridge[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(5): 1187–1195.

- [2] ZENG Zhiping, LIU Fushan, WANG Weidong. Three-dimensional train-track-bridge coupled dynamics model based on the explicit finite element method[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2022, 153: 107066.
- [3] ZHI Peng, WU Yuching, RABCZUK T. Effects of time-varying liquid bridge forces on rheological properties, and resulting extrudability and constructability of three-dimensional printing mortar[J]. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 2023: 1–15.
- [4] 吴熠文, 余加勇, 陈仁朋, 等. 无人机倾斜摄影测量技术及其工程应用研究进展[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018, 45(S1): 167–172.  
WU Yiwen, YU Jiayong, CHEN Renpeng, et al. Research progress of UAV tilt photogrammetry technology and its engineering application[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2018, 45(S1): 167–172.
- [5] 张俊阳, 王昆, 赵同彬, 等. 矿区地表沉陷与裂缝无人机遥感观测研究现状及发展[J/OL]. 煤炭科学技术, 1–11 [2023–08–30].  
ZHANG Junyang, WANG Kun, ZHAO Tongbin, et al. Current status and development of unmanned aerial vehicle remote sensing observation on surface subsidence and cracks in mining areas[J/OL]. Coal Science and Technology, 1–11[2023–08–30].
- [6] 石雪飞, 许琪, 马海英. 桥梁施工线形无人机测量方法与参数优化[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2022, 50(1): 32–41.  
SHI Xuefei, XU Qi, MA Haiying. Parametrical study and optimization using unmanned aerial vehicle measurement in bridge construction alignment[J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2022, 50(1): 32–41.
- [7] 周云, 刘鹏, 郝官旺, 等. 基于无人机倾斜摄影技术的桥梁有限元逆向建模方法研究 [J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2023, 50(9): 13–23.  
ZHOU Yun, LIU Peng, HAO Guanwang, et al. Method on inverse establishment of bridge finite element model based on UAV oblique photography technology[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2023, 50(9): 13–23.
- [8] 周志祥, 姜腾蛟, 唐亮, 等. 移动式三维激光扫描系统在桥面全息变形监测的应用研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2018, 26(5): 1078–1091.  
ZHOU Zhixiang, JIANG Tengjiao, TANG Liang, et al. Application of mobile three-dimensional laser scanning system in bridge deformation monitoring[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2018, 26(5): 1078–1091.

- [9] 熊文,石颖,丁旭东,等.基于点云模型的桥梁构件形态变化趋势识别与分析[J].桥梁建设,2018,48(6): 35–40.  
XIONG Wen, SHI Ying, DING Xudong, et al. Identification and analysis of geometric shape change trends of bridges based on point cloud model[J]. Bridge Construction, 2018, 48(6): 35–40.
- [10] 范壮.基于无人机三维激光扫描技术的矿区岩移观测研究[D].青岛:山东科技大学,2020.  
YUAN Zhuang. Study on rock movement observation in mining area based on UAV 3D laser scanning technology [D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2020.
- [11] RAZALI A F, ARIFF M F M, MAJID Z. A hybrid point cloud reality capture from terrestrial laser scanning and uav-photogrammetry[J]. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2022, 46: 459–463.
- [12] OMAR T, NEHDI M L. Remote sensing of concrete bridge decks using unmanned aerial vehicle infrared thermography[J]. Automation in Construction, 2017, 83: 360–371.
- [13] LI Linyuan, MU Xihan, CHIANUCCI F, et al. Ultrahigh-resolution boreal forest canopy mapping: Combining UAV imagery and photogrammetric point clouds in a deep-learning-based approach[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2022, 107: 102686.
- [14] 彭仪普,程阳,韩征,等.基于多旋翼无人机航测的工程结构三维建模质量影响因素研究[J].铁道科学与工程学报,2019,16(12): 2969–2976.  
PENG Yipu, CHENG Yang, HAN Zheng, et al. Study on the influencing factors of three-dimensional modeling quality of engineering structure based on multi-rotor UAV aerial survey[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(12): 2969–2976.
- [15] 刘艳丰.基于kd-tree的点云数据空间管理理论与方法[D].长沙:中南大学,2009.  
LIU Yanfeng. Theory and methods of point cloud data spatial management based on kd-tree[D]. Changsha: Central South University, 2009.
- [16] ZHANG Zhengyou. Iterative point matching for registration of free-form curves and surfaces[J]. International Journal of Computer Vision, 1994, 13(2): 119–152.
- [17] SHI Xiaojing, LIU Tao, HAN Xie. Improved Iterative Closest Point (ICP) 3D point cloud registration algorithm based on point cloud filtering and adaptive fireworks for coarse registration[J]. International Journal of Remote Sensing, 2020, 41(8): 3197–3220.
- [18] LIU Dongsheng, HONG Deyan, WANG Siting, et al. Genetic algorithm-based optimization for color point cloud registration[J]. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 2022, 10: 923736.
- [19] WANG Pengfei, WANG Zixiong, XIN Shiqing, et al. Restricted delaunay triangulation for explicit surface reconstruction[J]. ACM Transactions on Graphics, 2022, 41(5): 1–20.
- [20] LI Jian, PENG Yipu, TANG Zhiyuan, et al. Three-dimensional reconstruction of railway bridges based on unmanned aerial vehicle-terrestrial laser scanner point cloud fusion[J]. Buildings, 2023, 13(11): 2841.
- [21] 方一鹏,宋占峰,李军.基于TLS数据的站场线路点云提取算法[J].铁道科学与工程学报,2024,21(2): 545–554.  
FANG Yipeng, SONG Zhanfeng, LI Jun. Point cloud extraction algorithm for station track based on tls data [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2024, 21(2): 545–554.
- [22] 梁涛,韩峰,陈国栋.基于连续点云数据的既有铁路轨面信息快速提取算法设计[J].铁道科学与工程学报,2021,18(10): 2544–2551.  
LIANG Tao, HAN Feng, CHEN Guodong. Algorithm design for fast extraction of rail-surface information for existing railway based on continuous point cloud data[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(10): 2544–2551.
- [23] ZHENG K, ZHAO X G, HAN C J, et al. Design and experiment of an automatic row-oriented spraying system based on machine vision for early-stage maize corps[J]. Agriculture, 2023, 13(3): 691.
- [24] 朱嘉,李醒飞,谭文斌,等.基于圆心约束最小二乘圆拟合的短圆弧测量[J].光学精密工程,2009,17(10): 2486–2492.  
ZHU Jia, LI Xingfei, TAN Wenbin, et al. Short Circular Arc Measurement of short arc based on centre constraint least-square circle fitting[J]. Optics Precision Engineering, 2009, 17(10): 2486–2492.
- [25] 李孟迪,蒋胜平,王红平.基于随机抽样一致性算法的稳健点云平面拟合方法[J].测绘科学,2015,40(1): 102–106.  
LI Mengdi, JIANG Shengping, WANG Hongping. A RANSAC-based stable plane fitting method of point clouds[J]. Science of Surveying and Mapping, 2015, 40(1): 102–106.
- [26] DRAPER C, REICHLE R, DE J R, et al. Estimating root mean square errors in remotely sensed soil moisture over continental scale domains[J]. Remote Sensing of Environment, 2013, 137: 288–298.

(编辑 蒋学东)