

# 基于多激光雷达的电力线安全距离监测预警系统<sup>①</sup>



刘培贤, 丁超, 龚楷

(云南电网有限责任公司 玉溪供电局带电作业中心, 玉溪 653100)  
通讯作者: 刘培贤, E-mail: [376287614@qq.com](mailto:376287614@qq.com)

**摘要:** 针对电力线巡检需求, 本文设计并实现了一套基于低成本多激光雷达组合的电力线安全距离监测预警系统. 将单线激光雷达 (思岚 RPLIDAR S1) 安置在 RoboMaster GM6020 云台电机上构成一套设备可以进行三维环境感知, 在电力作业斗臂车四周安装 4 套同样的设备进行环境感知, 通过布设标靶纸, 同时采集点云数据并测量标靶纸全局坐标系坐标, 根据最小二乘原理进行 4 个激光雷达之间的空间位置关系标定并统一到同一个坐标系下. 通过网络通信将 4 套设备采集的点云实时数据传输至数据处理平台进行可视化显示、安全距离监测和报警, 可以有效避免安全隐患, 提高带电作业的安全水平.

**关键词:** 激光雷达; 标定; 电力线; 安全距离监测

引用格式: 刘培贤, 丁超, 龚楷. 基于多激光雷达的电力线安全距离监测预警系统. 计算机系统应用, 2021, 30(12): 103-108. <http://www.c-s-a.org.cn/1003-3254/8209.html>

## Power Line Safety Distance Monitoring and Early Warning System Based on Multiple LiDARs

LIU Pei-Xian, DING Chao, GONG Kai

(Live Line Operation Center of Yuxi Power Supply Bureau, Yunnan Power Grid Co. Ltd., Yuxi 653100, China)

**Abstract:** In response to power line inspection, a power line safety distance monitoring and early warning system based on multiple low-cost LiDARs is designed and implemented. The single-line LiDAR (RPLIDAR S1) and RoboMaster GM6020 gimbal motor are combined into three-dimensional equipment for environmental perception. Four sets of the same equipment are installed around an electric bucket for environmental perception. After a target paper is arranged, the point cloud data is collected, and the coordinates of the target paper's global coordinate system are measured simultaneously. Then the spatial position relationship among the four LiDARs is calibrated according to the least squares principle and unified in the same coordinate system. The real-time point cloud data collected by the four sets of equipment is transmitted to the data processing platform through network communication for visual display, safety distance monitoring, and early warning, which can avoid safety hazards and improve the safety level of live line work.

**Key words:** LiDAR; calibration; power line; safety distance monitoring

电力对现代社会活动至关重要, 为了保证电力设备的正常运转, 需要对电力线路进行有效的监测和维护, 在电力设施不足的情况下甚至需要带电作业. 我国现阶段输电线路巡检方法包括作业人员实地巡检和低

空巡检<sup>[1-3]</sup>. 实地勘察由于实际作业中配电线路结构复杂、作业项目难度高、作业组织流程多等因素, 存在着安全距离不足或触碰带电点或接地体接触等问题, 导致安全风险较高或发生触电事故; 低空巡检方法则主

① 收稿时间: 2021-02-19; 修改时间: 2021-03-18; 采用时间: 2021-04-06

要采用直升机进行肉眼巡查或手持仪器进行数据采集,劳动强度大,工作效率低,难以适应现代化电力网络建设与维护的发展<sup>[4]</sup>.带电作业是提高供电可靠性的有效手段之一,但在实际作业中由于配电线路结构的复杂性、作业项目的难度、作业组织流程多、现场安全管控能力不足、操作人员的技术技能水平及安全意识等综合因素影响,在作业过程会出现带电作业的安全距离不足或触碰带电体或与接地体接触,导致安全风险较高或发生触电事故.

传感器技术的发展使得非接触式巡检的成本降低,基于可见光航拍的电力巡检是目前的一种常用手段,通过摄像机采集照片、视频等图像数据进行事后数据处理,机器视觉技术的快速发展使得故障诊断的自动化程度和精度取得巨大的提高<sup>[5]</sup>.激光雷达测量技术是一种日渐成熟的高精度测量技术,可以获取目标地物的高精度空间位置信息,与基于图像的提取电力线检测方式相比,基于激光雷达点云数据的识别方法可以避免二维(2D)光栅图像不可避免的一些问题,如光照变化和背景混淆<sup>[6-8]</sup>.基于以上现状分析,本文设计并实现了一套基于非接触远距离高精度的激光雷达配电线路安全距离监测预警系统,用以安全距离测量、作业安全监测以及可视化监控,实现作业现场的实时管控,为作业人员的安全防护提供保障,避免安全隐患,提高带电作业的安全水平.

## 1 安全距离监测预警系统方案

为了实现 10 kV 配电线路带电作业周边环境安全距离测量与预警,在电力作业斗臂车四周安装 4 套单线激光雷达(思岚 RPLIDAR S1)与大疆 GM6020 云台电机的组合设备进行三维电力带电作业环境感知,这样的组合具备体积小、重量轻的特点.通过网络实时的将 4 套设备实时采集的点云数据传输至数据处理平台进行可视化显示、安全距离监测与预警.安全距离监测预警系统整体方案如图 1 所示.

思岚 RPLIDAR S1 是一款 TOF 激光雷达,小巧轻便,单个重量仅 105 g,采样频率 10 Hz,最大测量距离可达 40 m,典型角度分辨率为 0.391°,可以有效避免环境光与强日光的干扰,实现室外场景的稳定测距. RoboMaster GM6020 是一款内部集成驱动器的高性能直流无刷电机,电机重量仅约 468 g,电机采用空心轴设计,扭矩密度大、控制精度高、交互方式灵活、保

护功能强.点云采集通过集成的微型计算机(使用树莓派操作系统)进行控制,集成的点云采集设备如图 2 所示.

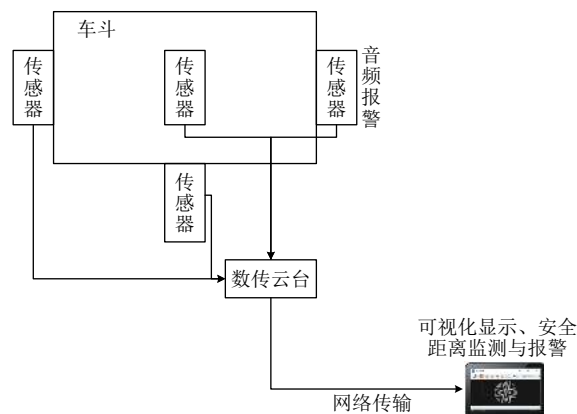


图 1 安全距离监测预警系统整体方案



图 2 单套集成激光雷达点云采集设备

## 2 多激光雷达标定

低成本激光雷达通常面临点云稀疏无法提取有效信息的问题,将多个激光雷达组合起来,能够增加激光雷达的有效测量范围<sup>[9]</sup>.单个激光雷达输出的原始数据为扫描点在该激光雷达自身坐标系下的三维坐标及反射率,由于思岚 RPLIDAR S1 单线雷达和 RoboMaster GM6020 电机的组合设备安装在斗臂车的侧面,相互

之间并不通视,单套设备只能感知到一个方向上的环境信息,因此需要融合4套设备点云数据以获取电力作业斗臂车全方位的环境信息.4套设备之间需要标定空间位置关系以进行多激光雷达点云融合,实际应用中应将点云归算到以斗臂车中心点为原点的坐标系下.

为了达到目的,我们需要精确的校准传感器之间的六自由度刚体变换,根据是否设置人工目标,标定方法大致被分为两种.近年来,有学者提出了一种利用场景反射强度提取点强度的方法实现多激光雷达的标定算法,根据点云的几何特征,使得能够离线的标定任意场景中多个二维激光雷达<sup>[10]</sup>.基于人工地标的的方法目前被普遍用于寻找传感器之间的对应关系.Xie等提出了一种通用的标定解决方案,在预先构建的环境中使用标签(apriltags)并联合了多个摄像头与激光雷达<sup>[11]</sup>.Röwekämper提出了一种跟踪的方法,利用重叠区域的运动目标对多个2D激光雷达进行标定<sup>[12]</sup>.程宇航等分析了5种点云拼接的精度,包括标靶拼接、已知后视点拼接、后方交会拼接、点云试图拼接、特征点拼接,结果表明在50 m测量距离范围内,基于标靶的点云拼接方法精度最高<sup>[13]</sup>.考虑到本文的设备在实际应用中4个激光雷达之间互相不共视,没有重叠点云,采用标靶标定的方式更适合于本文.本文采用了一种基于标靶纸(黑白格子)的三维激光雷达标定方法,我们在封闭的室内空间布设多组标靶,并利用高精度静态三维激光扫描仪确定标靶位置,将所有的激光点云标定到统一的坐标系下.

多激光雷达空间位置关系标定就是求解各个激光雷达坐标系相对于所选定的世界坐标系的旋转参数(Roll, Pitch, Yaw)和平移参数( $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ ).针对三维激光雷达外参标定求解问题,传统方法一般根据约束关系直接对所有标定参数进行最优估计,为了保证标定精度,通常采用特制的标志物,以建立严格的约束方程,利用约束关系同时求解6个参数.

本文在室内进行模拟实验来对4套激光雷达设备进行标定,标定场景如图3所示.在室内平整墙面上贴黑白格子标靶纸作为参照物,在场地中央假设架设法如(Focus 3D)高精度三维激光扫描仪,假设其为斗臂车中心点,在其四周摆放4套激光雷达设备进行数据采集.

法如高精度三维激光扫描仪和单线激光雷达采集

的三维点云如图4所示,在点云中可以快速便捷地提取出标靶纸的中心位置.



图3 标定实验场景



(a) 高精度三维静态扫描点云



(b) 旋转单线激光扫描点云

图4 高精度静态点云和单线激光雷达点云

使用开源软件 CloudCompare 提取标靶纸中心点的坐标,记场景中所有标靶纸的中心坐标在单线激光雷达坐标系 $L_1$ 下的坐标为 $\{(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2), \dots\}_{L_1}$ ,在世界坐标系 $W$ 即法如坐标系下的坐标系为 $\{(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2), \dots\}_W$ .世界坐标系与单线激光雷达坐标系 $L_1$ 之间的平移参数表示为向量 $T_{L_1}^W = (\Delta x, \Delta y, \Delta z)^T$ , $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 分别为沿着 X, Y, Z 轴的平移参数,旋转参数表示为旋转矩阵 $R_{L_1}^W(\alpha, \beta, \gamma)$ , $\alpha, \beta, \gamma$ 分别为绕 X, Y, Z 轴旋转的旋转角度参数,那么两套坐标系有如下转换关系:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_W = R_{L_1}^W(\alpha)R_{L_1}^W(\beta)R_{L_1}^W(\gamma) \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{L_1} + T_{L_1}^W(\Delta x, \Delta y, \Delta z) \quad (1)$$

其中,

$$\begin{cases} R_{L_1}^W(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & \sin\alpha \\ 0 & -\sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \\ R_{L_1}^W(\beta) = \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & -\sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix} \\ R_{L_1}^W(\gamma) = \begin{bmatrix} \cos\gamma & \sin\gamma & 0 \\ -\sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (2)$$

当旋转角度为小角度时,可取:

$$\begin{cases} \cos\alpha = \cos\beta = \cos\gamma = 1 \\ \sin\alpha = \alpha, \sin\beta = \beta, \sin\gamma = \gamma \\ \sin\alpha\sin\beta = \sin\alpha\sin\gamma = \sin\beta\sin\gamma = 0 \end{cases} \quad (3)$$

相应的坐标转换公式变为:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_W = \begin{bmatrix} 1 & \gamma & -\beta \\ \gamma & 1 & \alpha \\ \beta & -\alpha & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{L_1} + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} \quad (4)$$

写成误差方程的形式,可以得到:

$$\begin{bmatrix} V_X \\ V_Y \\ V_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_W - \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{L_1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & -Z_{L_1} & Y_{L_1} \\ 0 & 1 & 0 & Z_{L_1} & 0 & -X_{L_1} \\ 0 & 0 & 1 & -Y_{L_1} & X_{L_1} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} \quad (5)$$

改成矩阵的形式为:  $V = B \cdot X + \Delta$ , 其中  $X$  为待求转换向量,  $V$  为改正数向量,  $\Delta$  为测量噪声. 按照最小二乘法  $V^T P V = \min$  最小得原则, 取权值为距离的倒数, 可以列出法方程为  $B^T P B X + B^T P \Delta = 0$ , 其解为  $X = -(B^T P B)^{-1} B^T P \Delta$ . 为了求取 6 个转换参数, 至少需要 3 组公共点. Cereres solver 库<sup>[14]</sup> 构建并求解上述最小二乘优化解. 通过重复上述步骤可以依次计算 4 个激光雷达坐标系  $L_1$  与世界坐标系  $W$  的转换参数  $R_{L_1}^W, T_{L_1}^W; R_{L_2}^W, T_{L_2}^W; R_{L_3}^W, T_{L_3}^W; R_{L_4}^W, T_{L_4}^W$ , 这样可以将 4 个激光雷达的数据统一到同一个世界坐标系下, 实现多激光雷达点云的拼接, 标定结果如表 1 所示.

通过标定转换参数后, 截取 4 台激光雷达融合后产生的部分点云如图 5 所示, 可以看到点云重合度很高, 反映了标定参数的准确性, 统计同名点之间的差异,

其 RMS 为 0.03 m, 表明标定参数可以很好的融合不同激光雷达点云.

表 1 4 台激光雷达空间位置关系标定结果

	Roll(°)	Pitch(°)	Yaw(°)	$\Delta X(m)$	$\Delta Y(m)$	$\Delta Z(m)$
$C_{L_1}^W$	1.587	-0.621	-144.133	0.529	0.172	-0.668
$C_{L_2}^W$	1.155	-0.328	-139.137	0.501	-0.397	-0.663
$C_{L_3}^W$	-0.870	1.382	-49.821	0.803	-0.132	-0.669
$C_{L_4}^W$	0.608	0.516	128.404	0.260	-0.065	-0.655

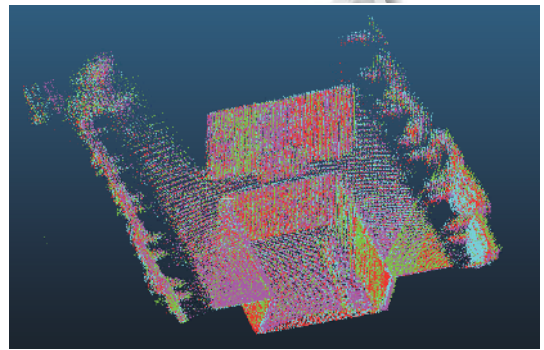


图 5 多激光雷达融合点云

### 3 软件系统开发与安全距离监测测试

本文采用网络通信方式将 4 套设备采集的点云数据实时的传输至数据处理平台, 在 Windows 10 操作系统下基于 QT 平台采用 C++ 程序设计语言开发实时采集、处理和可视化软件平台, 软件界面如图 6 所示. 软件功能主要包括: (1) 多台激光雷达传感器实时连接及数据采集; (2) 多视角点云切换 (前视, 侧视, 俯视等); (3) 点显示像素大小选择; (4) 视场内点云积分时间, 可以选择按照 100 ms, 200 ms, 500 ms, 1000 ms 时间显示点云; (5) 最邻近障碍物点探测, 当在设置的监测预警范围内出现障碍物时, 系统自动报警.

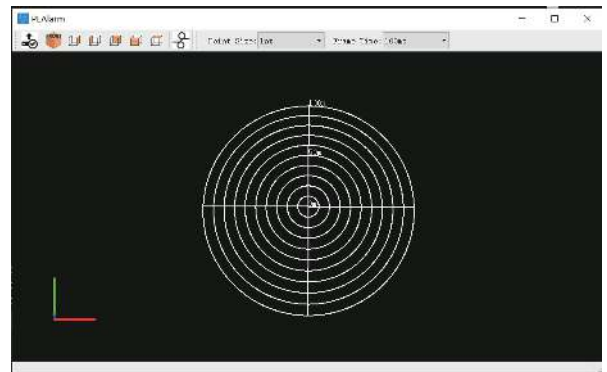


图 6 监测预警系统可视化界面

监测预警功能首先对每一帧点云进行降噪处理,然后遍历当前点云帧中的每一个点并计算其与坐标原点的距离,并找到最小距离,如式(6)所示,其中 $s_i$ 表示当前帧第 $i$ 个点的距离,如果最小距离在预警范围内,系统会自动语音提示报警,预警距离限值的确定是根据电力作业时的相关安全规程确定,本文中设定预警距离为0.5 m.

$$\text{mindist} = \min\{s_1, s_2, s_3, \dots, s_n\} \quad (6)$$

在国内某供电公司训练场 10 kV 电线附近进行测试,测试场景如图 7 所示.



(a) 设备安装



(b) 绝缘斗臂车升空作业

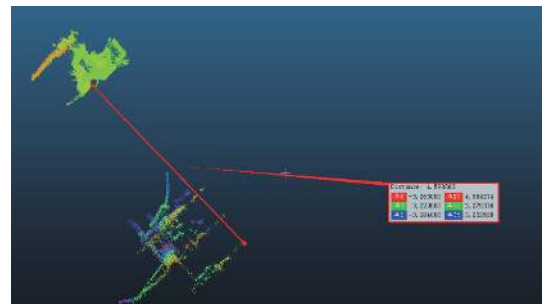
图 7 测试场景

测试时,电力维修工人在斗臂车内手持激光雷达采集设备,如图 7 所示.首先将绝缘斗臂车停于目标电

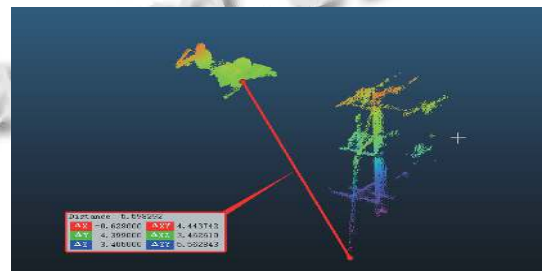
线附近,利用斗臂车绝缘斗将工作人员升到目标高度附近,作业面与导线的距离为 3 m,这种情况下,激光雷达能够采集的导线的最远点为 4.69 m,但导线的的数据点不够,不足以看出导线的形状,能够采集到比导线更细但反射强度更强的斜拉钢索,最远有效测量距离为 5.59 m.现场采集及最远距离测试结果如图 8、图 9 所示.



(a) 激光雷达至导线 1 距离



(b) 激光雷达至导线 2 距离



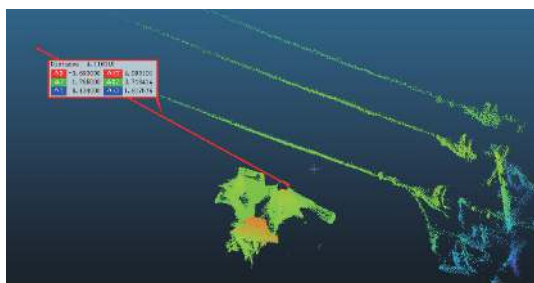
(c) 激光雷达至斜拉钢索距

图 8 现场采集点云数据

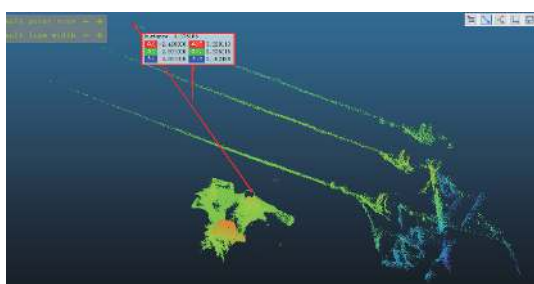
然后移动斗臂车的作业斗,使作业面与导线的距离为 0.5 m 的情况再次进行测量,由于设置安全监测距离为 0.5 m,因此此时设备自动报警,导线可测量的最远距离为 4.12 m.

经过现场测试得到结论,对于 10 kV 的导线,可以保证密度足够的 3 m 有效测量距离.对于金属拉线有效距离可以达到 5 m 以上,也可探测到地面大型地物,

如人员, 车辆等, 能够实现电力作业安全距离监测与预警功能。



(a) 激光雷达可测量导线 1 最远距离



(b) 激光雷达可测量导线 2 最远距离

图9 采集点云最远距离测试

## 4 总结

在本文中, 提出并实现了一种基于多激光雷达的电力线安全距离监测预警系统, 通过将单线激光雷达(思岚 RPLIDAR S1)与 RoboMaster GM6020 云台电机组合实现三维环境感知, 基于 Qt 平台采用 C++ 程序设计语言开发了一套实时采集、处理和可视化软件平台, 可实现 10 kV 带电作业安全距离监测预警功能, 可以有效避免安全隐患, 提高带电作业的安全水平。

### 参考文献

- 1 陈驰, 彭向阳, 宋爽, 等. 大型无人机电力巡检 LiDAR 点云安全距离诊断方法. 电网技术, 2017, 41(8): 2723–2730.
- 2 李啸啸, 范宝伟. 机载 LiDAR 点云电力线数据处理及安全检测. 测绘地理信息, 2020, 45(1): 110–113.
- 3 徐博, 刘正军, 王坚. 基于激光点云数据电力线的提取及安全检测. 激光杂志, 2017, 38(7): 48–51.
- 4 张继贤, 段敏燕, 林祥国, 等. 激光雷达点云电力线三维重建模型的对比与分析. 武汉大学学报·信息科学版, 2017, 42(11): 1565–1572.
- 5 Matikainen L, Lehtomäki M, Ahokas E, *et al.* Remote sensing methods for power line corridor surveys. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2016, 119: 10–31. [doi: 10.1016/j.isprsjprs.2016.04.011]
- 6 Qian JJ, Mai XM, Xuan YW. Real-time power line safety distance detection system based on LOAM slam. Proceedings of 2018 Chinese Automation Congress. Xi'an: IEEE, 2018. 3204–3208.
- 7 Yang JT, Kang ZZ. Voxel-based extraction of transmission lines from airborne LiDAR point cloud data. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2018, 11(10): 3892–3904. [doi: 10.1109/JSTARS.2018.2869542]
- 8 Azevedo F, Dias A, Almeida J, *et al.* LiDAR-based real-time detection and modeling of power lines for unmanned aerial vehicles. Sensors, 2019, 19(8): 1812. [doi: 10.3390/s19081812]
- 9 Kang J, Doh NL. Automatic targetless camera-LiDAR calibration by aligning edge with Gaussian mixture model. Journal of Field Robotics, 2020, 37(1): 158–179. [doi: 10.1002/rob.21893]
- 10 Yue R, Xu H, Wu JQ, *et al.* Data registration with ground points for roadside LiDAR sensors. Remote Sensing, 2019, 11(11): 1354. [doi: 10.3390/rs11111354]
- 11 Xie YF, Shao R, Guli P, *et al.* Infrastructure based calibration of a multi-camera and multi-LiDAR system using apriltags. Proceedings of 2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). Changshu: IEEE, 2018: 605–610.
- 12 Röwekämper J, Ruhnke M, Steder B, *et al.* Automatic extrinsic calibration of multiple laser range sensors with little overlap. Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Seattle: IEEE, 2015. 2072–2077.
- 13 程宇航, 林宇龙, 白征东, 等. 地面三维激光扫描数据拼接方法评估. 测绘工程, 2021, 30(1): 20–23, 29.
- 14 Agarwal S, Mierle K. Ceres solver: Tutorial & reference [Technical report]. Google Inc. 2.72. 2012: 8