

基于点云与影像迭代渐进加权配准的车载相机外参标定方法

刘如飞¹, 西勇存¹, 俞家勇², 苏占文³

(1. 山东科技大学 测绘与空间信息学院, 山东 青岛 266590;

2. 安徽建筑大学 土木工程学院, 安徽 合肥 230601;

3. 青岛数字世界信息科技有限公司, 山东 青岛 266000)

摘要:针对车载道路快速巡检系统中激光雷达相机外参标定过程复杂、稳定性差的问题,提出一种基于点云与影像迭代渐进加权配准的标定方法。首先,通过畸变校正提高影像几何精度,提取影像与激光点云的同名特征点并进行匹配;其次,基于共线条件构建参数解算模型,采用反比距离加权为同名特征点赋予初始权重;最后,在模型迭代求解过程中,引入Huber权函数动态调整特征点权重,结合线性渐进式更新策略融合初始权重与动态权重,实现相机外参的标定。实验结果表明,所提方法重投影误差在2 pixel内,在受粗差点干扰的情况下仍优于4 pixel,具有较高的准确性和鲁棒性。

关键词:相机外参标定;点云与影像配准;移动测量系统;迭代渐进加权

中图分类号:P237

文献标志码:A

A calibration method for extrinsic parameters of vehicle-mounted cameras based on iterative progressive weighted registration of point clouds and images

LIU Rufe¹, XI Yongcun¹, YU Jiayong², SU Zhanwen³

(1. College of Geodesy and Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2. College of Civil Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China;

3. Qingdao Digital World Information Technology Co., Ltd., Qingdao 266000, China)

Abstract: To address the complex process and poor stability of LiDAR-camera extrinsic parameter calibration in vehicle-mounted rapid road inspection systems, a calibration method based on iterative progressive weighted registration of point clouds and images was proposed in this study. First, by using distortion correction, the geometric accuracy of the images was improved and corresponding feature points between the images and LiDAR point clouds were extracted and matched. Then, a parameter estimation model was constructed on the basis of the collinearity condition and initial weights were assigned to the corresponding feature points by using inverse distance weighting. Finally, during the iterative solving process, the Huber weighting function was introduced to dynamically adjust the weights of the feature points and a linear progressive updating strategy was employed to fuse the initial and dynamic weights, thereby achieving the calibration of the camera extrinsic parameters. Experimental results demonstrate that the proposed method, with a reprojection error within 2 pixels and below 4 pixels even under the interference of gross error points, has higher precision and robustness.

收稿日期:2025-02-16

基金项目:国家自然科学基金项目(42106180);山东科技大学“菁英计划”科研支持项目(0104060541613);山东省交通运输厅科技计划项目(2023B78-01)

作者简介:刘如飞(1986—),男,江苏南京人,副教授,博士,主要从事多平台激光点云数据处理、点云与图像目标特征识别、三维自动建模与GIS应用方面的研究. E-mail:liurufei@sdust.edu.cn

Key words: camera extrinsic parameters calibration; point cloud and image registration; mobile measurement system; iterative progressive weighting

车载道路快速巡检系统^[1]是一种集成了组合导航系统、激光扫描仪和单目相机等多种传感器的轻便型移动测量系统^[2],广泛应用于道路交通数字化、道路巡检等多个领域。激光点云数据具有精确的三维空间位置信息,影像数据具有丰富的纹理和色彩信息。将点云数据与影像数据进行配准融合,可以充分发挥两者的互补优势,实现对复杂道路环境的精细感知,为应用于多种行业提供更全面、可靠的基础数据支持。

在多传感器融合系统中,相机的外参标定是实现点云与影像融合的前提。目前,激光雷达与相机外参标定^[3]方法主要分为两大类:①基于人工标定板的方法,如 Puszta^[4]采用已知尺寸的简单纸板箱,实现了相机与激光雷达的标定。陈广永等^[5]通过自动匹配棋盘格标定板的角点,利用光束法平差求解相机外参,这类方法精度虽高,但依赖特制的标定板,实际应用受到限制。②基于点云与图像配准的标定方法^[6],从点云和图像中提取对应特征并进行配准,从而反算外参,具备自动化能力,更适合移动测量场景。现有方法受限于特征提取与匹配的不确定性,如何提升点云与影像配准的鲁棒性,已成为基于配准的相机外参标定方法研究的关键问题。

对点云与影像配准的主流方法可归纳为两类:基于数据维度转换的间接配准法和基于同名特征的直接配准法。①间接配准法,通过对点云或影像进行维度转换,将二者统一到相同维度后再进行配准。常见的实现策略包括将 2D-3D 配准问题转换为 2D-2D 配准问题,即通过重投影生成的强度图像与光学图像之间的对应关系实现点云与影像的配准^[7-8];或者将 2D-3D 配准问题转化为 3D-3D 配准问题,即通过单目影像重建三维点云,再与激光点云进行点云配准^[9-10]。这类方法有效提高了配准的灵活性和稳定性,但对数据量的要求较高,同时依赖初始参数,且计算复杂度高。②直接配准法,从点云与影像数据中提取同名特征,利用几何模型解算配准参数,其中同名特征主要包括点特征、线特征和面特征。点特征应用最为广泛,通常基于共线方程,通过增加约束条件或结合罗德里格矩阵等数学模型解算配准参数,或通过分析点云与影像之间的转换关系实现高精度配准^[11-12]。但点特征的配准效果易受点云离散度与影像分辨率限制。线特征适用于场景中具有明显线条的情况,通过线特征替代传统共线方程中的点特征,同时结合影像投影特性进一步提高融合精度和效率^[13-14]。面特征因二维影像平面与三维点云平面匹配的复杂性,目前应用较少^[15]。直接配准法具有较高的效率和精度,但容易受到数据质量的影响,进而削弱算法的稳定性。

为克服现有标定方法对数据数量和质量的依赖以及特征提取误差导致的标定稳定性下降的问题,本研究基于稳健估计理论^[16],提出一种基于点云与影像迭代渐进加权配准的车载相机外参数标定方法。通过在道路场景中布置简易靶标,提取同名特征点后,结合迭代渐进加权配准算法,调整同名特征点的初始权重与动态权重,从而获得准确的相机外参数。在保证效率与精度的同时,有效提高了外参标定的稳定性。

1 研究方法

1.1 影像畸变校正

车载道路快速巡检系统搭载的单目相机视场大,且未经过严格标定,采集的影像数据畸变严重,影响物点、像点与投影中心的共线性,导致标定结果不准确甚至迭代发散。因此,在进行相机标定前,需要对影像进行畸变校正。校正方法采用张正友标定法^[17],该方法介于传统标定和自检校标定方法,其优点是准确、简便、实用。具体步骤为:①相机静止状态下连续拍摄移动的棋盘格标定板,保证棋盘格在不同位置、不同角度下充分覆盖整个相机视场;②提取每张影像中棋盘格的角点,估计初始参数并采用非线性优化方法进行精确求解,获得相机内参和畸变参数;③计算影像的畸变映射关系,消除径向和切向畸变的影响,得到畸变校正后的影像。

1.2 同名特征点提取与匹配

相机外参的标定依赖于点云与影像之间的同名特征,本研究采用便携式人工靶标构建一种兼顾立体与平面特征的简易检校场。将靶标箱角点和靶标纸中心点作为同名特征点,并针对两种靶标的特性设计相应

的特征提取与匹配方法,以保证标定的精度与稳定性。

点云特征点提取步骤如图 1 所示。对于靶标箱,首先选择靶标箱所在区域的点云数据,通过随机抽样一致性(random sample consensus, RANSAC)算法拟合出三个互相垂直的外侧平面,对每个平面的法向量和位置参数构建线性方程组,通过求解三个平面的唯一交点,确定靶标箱角点的精确坐标。对于靶标纸,通过其高强度特性提取对应的点云区域,并结合其几何分布特征,利用主成分分析(principal component analysis, PCA)拟合出靶标纸点云的最小外包围盒,并以外包围盒的中心点作为靶标纸的中心点坐标,实现靶标纸特征的精确提取。

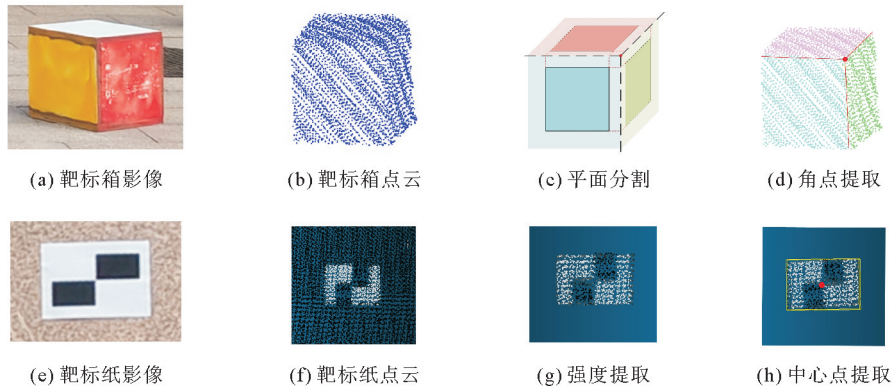


图 1 点云特征点提取

Fig. 1 Point cloud feature point extraction

在影像中,针对靶标箱的色彩属性,首先将影像转换至色相、饱和度与明度(hue, saturation, value, HSV)色彩空间,并选取色相与饱和度通道作为颜色特征向量输入;然后利用 K-means 聚类算法对图像的像素进行聚类分割,将不同颜色区域自动分为多个聚类区域;再根据区域几何属性(面积、位置与边界形状)筛选出符合靶标结构的面区域。针对每个有效区域,采用霍夫变换拟合边缘直线,并通过计算直线交点坐标获得靶标箱角点在图像中的精确位置。针对靶标纸,采用灰度化与自适应阈值分割提取两个黑色矩形块,用质心加交点法提取靶标纸的影像中心点,实现特征点的稳定提取。

完成点云与影像的特征点提取后,为克服数据维度差异及传统算法匹配不稳定的问题,首先将点云特征点投影至图像平面,并在局部窗口内搜索最邻近的图像特征点以实现初始配对;再采用 RANSAC 算法对初始匹配进行鲁棒性分析,剔除误匹配点,提取内点集合,完成同名特征点的匹配。

1.3 相机外参解算

车载道路快速巡检系统所采集的三维激光点云初始坐标系为世界大地坐标系,为了实现点云与影像的融合,需将点云转换至与相机相对位姿不变的惯导坐标系。点云从大地坐标系转换到惯导坐标系的过程见文献[12]。

融合参数即相机的外方位元素,包括摄影中心在惯导坐标系中的三维坐标(ΔX 、 ΔY 、 ΔZ)和三个角度(α 、 β 、 γ),共 6 个参数。根据图 2 所示的像点、物点与摄影中心之间的共线关系,可针对每对同名特征点建立对应的共线方程^[9]:

$$\begin{cases} x - x_0 = -f \frac{a_1(X - \Delta X) + b_1(Y - \Delta Y) + c_1(Z - \Delta Z)}{a_2(X - \Delta X) + b_3(Y - \Delta Y) + c_3(Z - \Delta Z)}, \\ y - y_0 = -f \frac{a_2(X - \Delta X) + b_2(Y - \Delta Y) + c_2(Z - \Delta Z)}{a_3(X - \Delta X) + b_3(Y - \Delta Y) + c_3(Z - \Delta Z)}. \end{cases} \quad (1)$$

式中: x 、 y 为像点的像平面坐标; x_0 、 y_0 为像主点坐标; f 为相机焦距; ΔX 、 ΔY 、 ΔZ 为相机外方位线元素,三者共同构成相机外参中的平移向量; X 、 Y 、 Z 为物点在点云坐标系中的坐标; a_i 、 b_i 、 c_i ($i=1,2,3$) 为相机外方位角元素。

由相机的外方位角元素可构建方向余弦阵^[14],即相机外参中的旋转矩阵

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\beta\cos\gamma & \cos\gamma\sin\alpha\sin\beta - \cos\alpha\sin\gamma & \sin\alpha\sin\gamma + \cos\alpha\cos\gamma\sin\beta \\ \cos\beta\sin\gamma & \cos\alpha\cos\gamma + \sin\alpha\sin\beta\sin\gamma & \cos\alpha\sin\beta\sin\gamma - \cos\gamma\sin\alpha \\ -\sin\beta & \cos\beta\sin\alpha & \cos\alpha\cos\beta \end{bmatrix}。 \quad (2)$$

在基于共线条件方程求解相机外参的过程中,最小二乘法是常用且有效的解算方法。然而,传统最小二乘法对离群点较为敏感,当同名特征点中存在粗差点时,这些点的残差往往较大,而普通最小二乘法会以平方形式放大粗差点的影响,从而降低优化精度,甚至导致迭代发散。为克服这一问题,本研究在传统最小二乘法的框架中引入两种权重机制:一是基于反比距离的初始权重,反映同名特征点与摄影中心距离的影响;二是基于残差的动态权重,动态评估同名特征点的偏差程度。结合这两种权重,提出一种线性渐进式更新策略,通过在迭代过程中逐步调整同名特征点的权重,降低离群点对优化结果的干扰,从而提高模型的鲁棒性和精度,具体步骤如下。

1) 根据特征点与摄影中心的距离,特征点初始权重为:

$$p_i^{(0)} = \frac{1}{1 + \theta d_i}, i = 1, 2, \dots, N。 \quad (3)$$

式中: d_i 为第 i 个特征点到摄影中心的距离, θ 为权重衰减速率参数, $p_i^{(0)}$ 为第 i 个特征点的初始权重, N 为特征点总数。

2) 利用每个特征点的初始权重,构建初始权重矩阵 $\mathbf{P}$,并建立标准加权最小二乘模型,求解融合参数 $\hat{\mathbf{x}}$ 的第一次估值:

$$\hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{L}。 \quad (4)$$

式中: $\hat{\mathbf{x}}$ 是待估融合参数向量, $\mathbf{B}$ 是系数矩阵, $\mathbf{L}$ 是常数项矩阵。

3) 根据当前参数估计值,利用共线方程计算每个特征点的投影点坐标 (x_c, y_c) ,并与实际像素坐标 (x, y) 比较,计算特征点残差:

$$r_i = \sqrt{(x_i - x_{ci})^2 + (y_i - y_{ci})^2}, i = 1, 2, \dots, N。 \quad (5)$$

式中, r_i 表示第 i 个特征点的残差。

4) 根据每个特征点的残差大小,采用 Huber 权函数^[16]计算残差驱动的动态权重 $p_i^{(r)}$:

$$p_i^{(r)} = \begin{cases} 1, & r_i \leq e, i = 1, 2, \dots, N; \\ \frac{k}{r_i}, & r_i > e, i = 1, 2, \dots, N。 \end{cases} \quad (6)$$

式中: $p_i^{(r)}$ 表示第 i 个特征点的动态权重, e 为残差阈值, k 为当前迭代次数。

结合初始权重 $p_i^{(0)}$ 与动态权重 $p_i^{(r)}$,采用线性渐进更新策略调整权重:

$$p_i^{(k)} = \lambda_k \cdot p_i^{(0)} + (1 - \lambda_k), \quad (7)$$

$$\lambda_k = \max(0, 1 - \frac{k}{K_{\max}})。 \quad (8)$$

式中: $K_{\max}$ 是最大迭代次数, $p_i^{(k)}$ 是第 k 次迭代的综合权重, λ_k 是控制初始权重影响的线性系数。

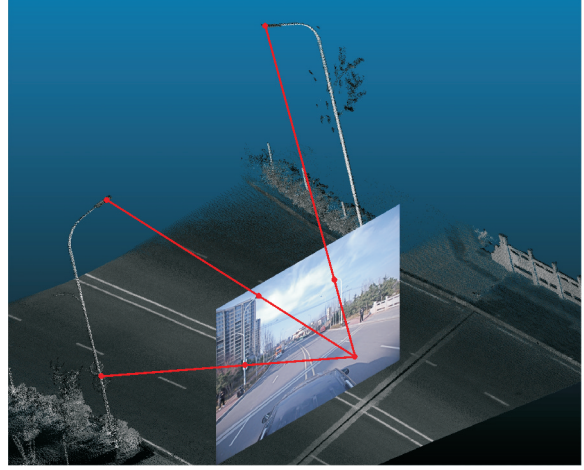


图 2 惯导坐标系下共线关系

Fig. 2 Collinear relationship in inertial navigation coordinate system

更新权重矩阵 $\mathbf{P}_k = \text{diag}(p_1, p_2, \dots, p_n)$, 重构加权最小二乘模型, 并进行下一轮迭代计算。

5) 根据更新的权重矩阵 $\mathbf{P}_k$, 重新求解加权最小二乘问题, 获得更新后的参数估计值 $\hat{\mathbf{x}}_{k+1}$,

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1} = (\mathbf{B}^T \mathbf{P}_k \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P}_k \mathbf{L} \quad (9)$$

重复步骤 2)~4), 直至改正量小于精度阈值或迭代次数达到上限 $K_{\max}$ 。

1.4 点云影像数据融合

为了充分体现上述方案的准确性、可行性, 利用点云和相机外参, 通过坐标转换和投影变换生成与影像匹配的点云深度图^[18], 并与原始影像叠加显示, 实现两类数据在同一位姿下的融合与直观展示。点云生成深度图的过程通过模拟相机的成像机制, 首先对点云进行坐标转换, 通过平移操作将坐标原点移动至相机中心, 并经过多次旋转对齐至相机坐标系; 再依据成像几何关系, 将三维空间点投影到像平面, 生成对应的二维平面坐标; 最后结合相机内参信息, 将二维平面坐标转换为像素坐标, 并通过深度值编码生成深度图, 从而实现点云与影像数据的空间对齐与融合。

2 实验与分析

2.1 实验数据

为验证上述相机外参标定方法的正确性与可靠性, 采用青岛秀山移动测量有限公司研发的 RFIS-L 车载道路快速巡检系统(图 3)进行数据采集。系统搭载的相机型号为 LBAS-GE120, 配备 8 mm/1.4 镜头; 扫描仪型号为禾赛 XT32 机械式扫描仪, 最大测量距离可达 120 m, 点云精度为 2 cm。所采集的数据包括三维点云、前景图像以及系统位置姿态数据。实验数据采集分三个阶段: ①采集 30 张多角度、多距离的棋盘格影像数据, 以获得可靠的畸变校正参数; ②选择一段车辆较少、路面平缓的路段构建便携型检校场, 靶标分布在系统的有效扫描范围内, 并设置在不同高度和平面上, 合理分布于近、中、远不同距离区域, 形成良好的三维空间分布; ③同步采集检校场的点云与影像数据(图 4), 为后续相机标定实验提供数据支持。

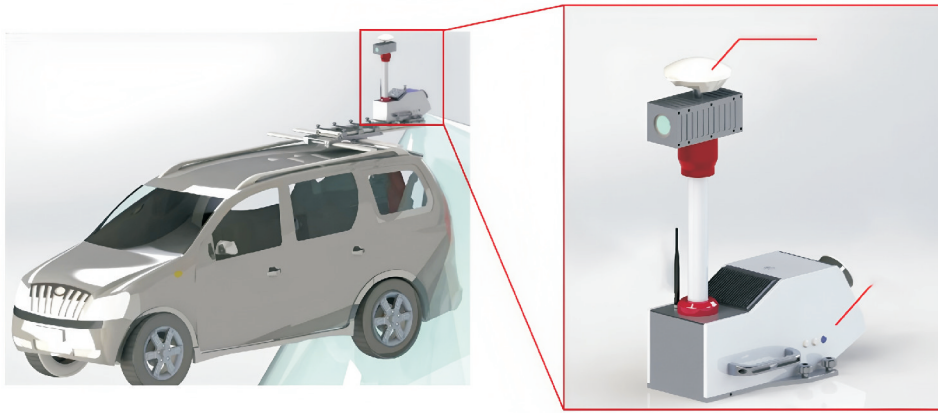


图 3 车载道路快速巡检系统

Fig. 3 Vehicle-mounted rapid road inspection system

2.2 同名特征点提取与匹配

利用 Matlab 2021 提供的标定工具, 通过导入多张包含棋盘格的标定图像, 提取角点位置并进行优化计算, 实现简便高效的张正友标定法^[17], 获取相机的内参矩阵、畸变参数和外参, 标定过程如图 5 所示。逐像素计算影像中各像素点的畸变量, 得到影像畸变分布图, 如图 5(d)所示, 直观展示像素畸变误差的空间分布特性。由图 5 可以看出, 畸变误差随着像素点与主点距离的增大而显著增加, 最大畸变超过 200 pixel, 这种显著的几何变形将对相机完成的标定结果产生重大影响, 充分说明了影像畸变校正的必要性。

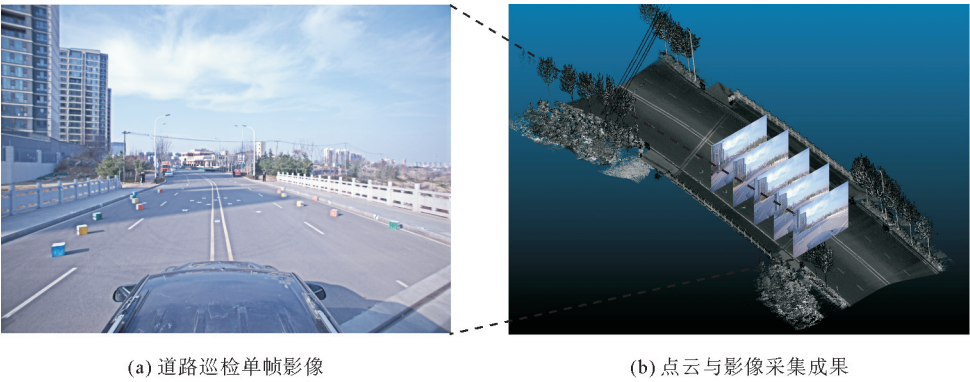


图 4 点云与影像同步采集结果

Fig. 4 Synchronous acquisition results of point clouds and images

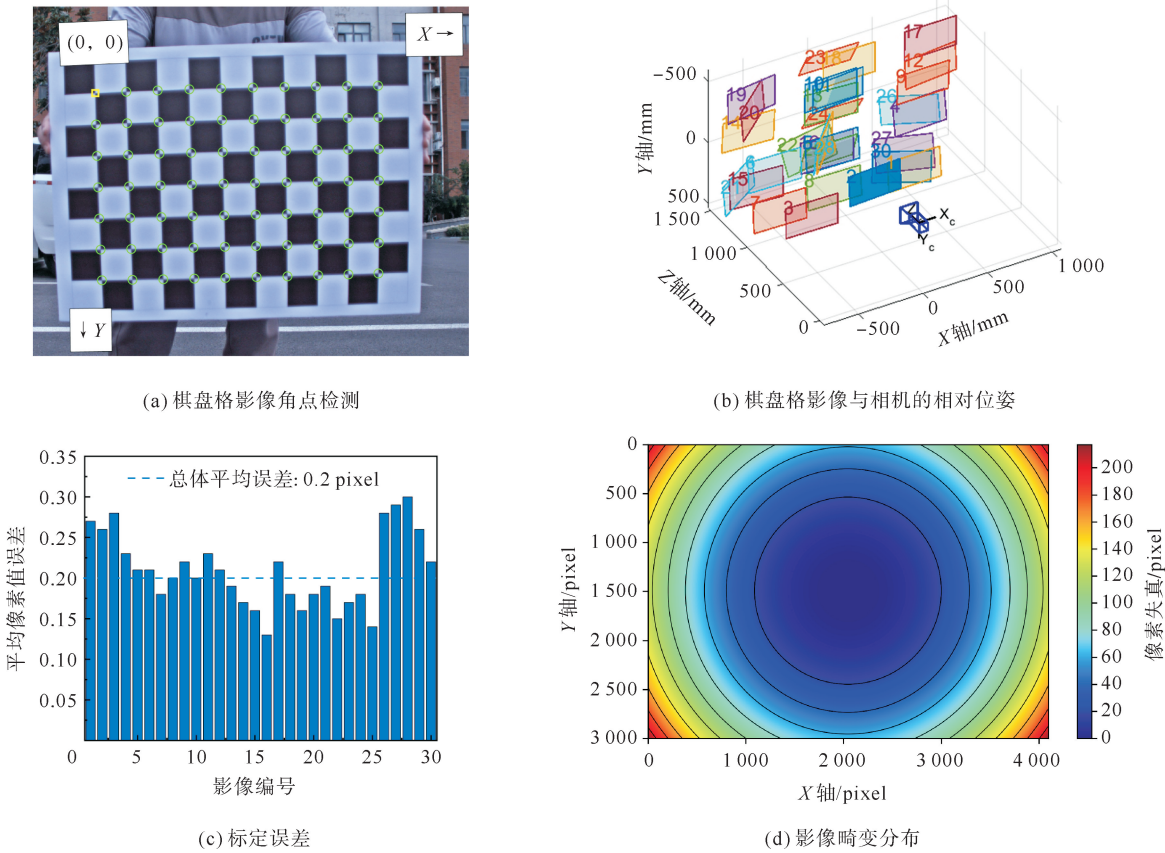


图 5 相机畸变标定过程

Fig. 5 Camera distortion calibration process

为定量评估特征点提取与匹配算法的可靠性,本研究将算法自动提取与匹配的同名特征点结果与人工手动提取的特征点进行精度对比。基于多组实验数据统计分析表明,算法成功匹配到的同名特征点对数达人工提取点对数的 78.3%,并可有效提取中近距离的特征靶标。点云与影像同名特征点匹配结果的可视化效果如图 6 所示。

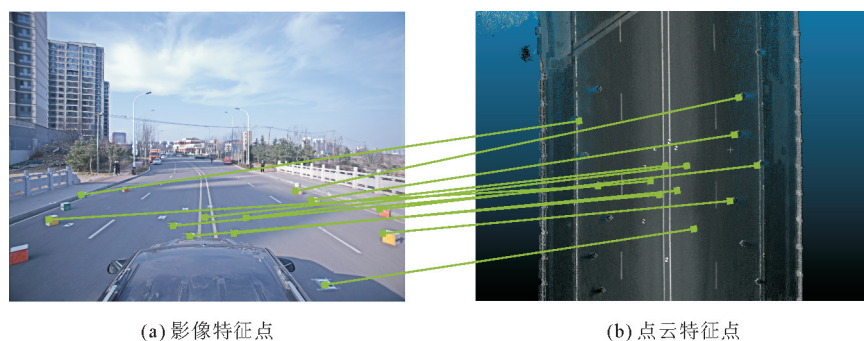


图 6 同名特征点匹配

Fig. 6 Corresponding feature points matching

2.3 精度分析

采用上述方案选取同名特征点计算相机外参后,从多张影像中随机提取 10 个像素点作为检查点,并从点云数据中选取对应的 10 个检查点。通过相机外参将点云检查点的三维坐标转换为影像上的像素坐标,并与真实影像中的像素坐标对比,进行点位误差分析。分别计算检查点在 X 和 Y 方向的误差值,量化标定误差, (x, y) 为影像检查点的像素坐标, (x', y') 为点云检查点利用相机外参转换后的像素坐标, $(\Delta x, \Delta y)$ 为二者坐标差值,即点位误差。数据对比结果如表 1 所示,大部分检查点的误差集中在 1~2 pixel,表明算法具有较高的稳定性和精度。

表 1 标定点位误差

Table 1 Calibration position error

pixel

点号	像素坐标		点云转换后像素坐标		点位误差	
	x	y	x'	y'	Δx	Δy
1	675	2 050	675.4	2 051.7	-0.4	-1.7
2	749	1 948	750.2	1 947.4	-1.2	0.6
3	1 364	2 438	1 363.1	2 436.6	0.9	1.4
4	1 898	2 189	1 899.8	2 188.2	-1.8	0.8
5	1 745	2 111	1 746.9	2 110.3	-1.9	0.7
6	1 632	2 054	1 633.2	2 054.7	-1.2	-0.7
7	1 844	1 986	1 843.7	1 986.9	0.3	-0.9
8	2 025	2 042	2 024.4	2 040.8	0.6	1.2
9	2 069	1 963	2 070.5	1 962.4	-1.5	0.6
10	2 180	1 985	2 179.0	1 982.7	1.0	2.3

为进一步验证本研究方法在不同数据条件下的稳定性,特别是标定参数在多次独立求解过程中的一致性,选取同一设备在近似条件下采集的 8 组数据,分别独立进行特征点提取与标定参数计算。所有数据均来自同一场景,但测量车行驶车道与行驶方向有所不同,因而特征点分布各不相同。实验结果如表 2 所示,标定结果在多次独立实验中均表现出良好的稳定性。平移参数的最大偏差均不超过 5%,其中 X 、 Y 、 Z 轴的最大偏差分别为 0.006 84、0.009 11 和 0.011 93 m,对应均值的相对偏差分别为 4.75%、5.08% 和 2.13%,位置稳定性较好。旋转参数中,俯仰角(Y 轴,主旋转轴)最为稳定,最大偏差仅为 0.523°,相对偏差为 0.58%;横滚角(X 轴)和偏航角(Z 轴)的最大偏差分别为 0.725°和 0.902°,相对偏差分别为 5.58% 和 7.20%,亦在可接受范围内。整体而言,各自由度参数的标准差较小,说明标定解算过程具备良好的重复性,

能够稳定输出一致的外参结果。

最小二乘法对粗差较为敏感,而本研究通过在迭代过程中降低粗差点的权重,实现对粗差点的“软剔除”,并与最小二乘法、四孔标定板法^[19]和语义分割法^[20]进行对比。对比实验设置两个组别,同名特征点数量分别为 10 和 20,并在每组中分别加入 0、1、2 个粗差点,以全面分析各方法在不同干扰条件下的稳健性与精度表现。

采用平均重投影误差作为标定精度的评价标准,实验结果如表 3 所示。在无粗差干扰的前提下,本研究方法与最小二乘法、四孔标定板法均表现出较高的标定精度;而在有粗差点的情况下,另外两种方法依赖特征点精度,其误差随着粗差点数量的增加显著增长,而本研究方法的误差波动则明显小于其他方法,表明其具有较强的抗差性。语义分割法虽不依赖于特征点,不受粗差点干扰,具有良好的稳定性,但在该实验场景中整体标定精度较低。综合分析表明,本研究方法兼顾了车载相机外参标定的鲁棒性与精度。

表 2 标定稳定性分析

Table 2 Calibration stability analysis

参数	均值	标准差	最大偏差
平移 X/m	0.144 088	0.003 15	0.006 84
平移 Y/m	0.179 526	0.004 32	0.009 11
平移 Z/m	0.560 254	0.005 77	0.011 93
横滚角/(°)	12.997	0.341	0.725
俯仰角/(°)	-90.353	0.278	0.523
偏航角/(°)	-12.531	0.493	0.902

表 3 标定精度对比

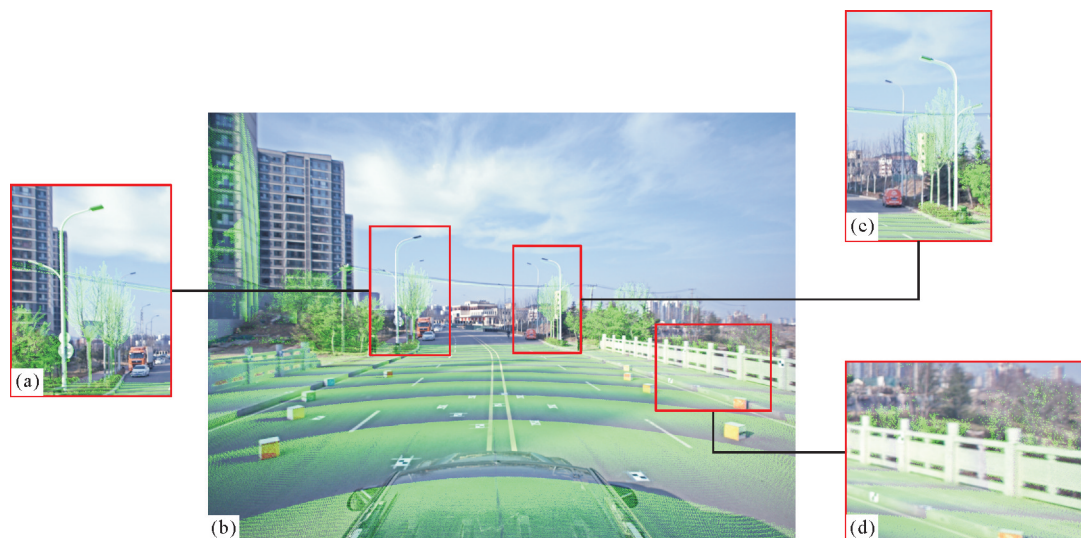
Table 3 Comparison of calibration accuracy

控制点数量/个	粗差点数量/个	重投影误差/pixel			
		本研究方法	最小二乘法	四孔标定板法 ^[19]	语义分割法 ^[20]
10	0	1.97	3.94	3.15	8.13
	1	3.43	27.82	15.54	7.62
	2	4.92	45.24	23.95	8.81
20	0	1.83	3.59	2.83	8.06
	1	2.75	18.73	12.47	7.97
	2	4.14	33.89	19.65	6.96

完成相机外参标定后,将点云重投影至图像平面生成深度图,并与影像叠加显示,以更加直观地体现标定精度。如图 7 所示,在实验场景中的不同区域,影像与深度图的边界几乎完全重合,因此影像中的细节信息与深度图中的空间几何信息能够实现精准对应。

3 结论

本研究针对车载道路快速巡检系统中激光雷达与单目相机外参标定的关键问题,提出一种线性渐进式更新特征点权重的相机外参计算方法。根据特征点分布情况赋予不同的初始权重,在迭代过程中逐步平衡初始权重与基于残差动态调整的权重比重。充分利用先验信息实现快速收敛,通过残差驱动的权重分配抑制粗差干扰,显著提高了相机外参标定的精度和鲁棒性。通过实测数据验证,本研究方法在不同特征点数量和粗差条件下均表现出较低的重投影误差,为车载道路快速巡检系统中激光点云与单目影像的融合应用提供了可靠的数据基础。后续研究将致力于探索不依赖人工靶标特征提取的标定方法,提升车载相机外参标定的自动化程度与环境适应能力。



(a)全局融合视图;(b)左侧路灯局部融合视图;(c)右侧路灯局部融合视图;(d)右侧护栏局部融合视图。

图7 点云深度图与影像融合效果

Fig. 7 Fusion effect of point cloud depth map and images

参考文献:

- [1] 李晓丽,刘如飞,汤玉兵,等.高精度矢量数据的路面三维自动建模方法[J].测绘通报,2021(7):70-73.
LI Xiaoli,LIU Rufe, TANG Yubing, et al. Three-dimensional automated road modeling method for high-precision vector data[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2021(7): 70-73.
- [2] 王鑫林,辛明真,于孝林,等.基于特征点位置约束的三维激光移动测量位姿改正方法[J].山东科技大学学报(自然科学版),2024,43(2):49-57.
WANG Xinlin, XIN Mingzhen, YU Xiaolin, et al. A pose correction method for 3D laser mobile measurement based on feature point position constraints[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2024, 43(2): 49-57.
- [3] 熊超,乌萌,刘宗毅,等.激光雷达与相机联合标定进展研究[J].导航定位学报,2024,12(2):155-166.
XIONG Chao, WU Meng, LIU Zongyi, et al. Review of joint calibration of LiDAR and camera[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2024, 12(2): 155-166.
- [4] PUSZTAI Z, HAJDER L. Accurate calibration of LiDAR-camera systems using ordinary boxes[C]//2017 IEEE International Conference on Computer Vision Workshops. Venice: IEEE, 2017: 394-402.
- [5] 陈广永,陈芳,叶方舟,等.自动匹配角点特征的激光雷达与光学相机标定方法[J/OL].激光杂志,1-8[2025-06-06].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1085.TN.20250208.1406.002.html>.
CHEN Guangyong, CHEN Fang, YE Fangzhou, et al. LiDAR-camera joint calibration based on automatically matched corner features[J/OL]. Laser Journal, 1-8[2025-06-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1085.TN.20250208.1406.002.html>.
- [6] TAYLOR Z, NIETO J. Motion-based calibration of multimodal sensor arrays[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA). Seattle: IEEE Press, 2015: 2639-2646.
- [7] MASTIN A, KEPNER J, FISHER J. Automatic registration of LiDAR and optical images of urban scenes[C]//Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Miami: IEEE Press, 2009.
- [8] 范生宏,王强,勾志阳,等.一种简易的激光雷达点云与光学影像自动配准方法[J].激光杂志,2021,42(3):157-162.
FAN Shenghong, WANG Qiang, GOU Zhiyang, et al. A simple automatic registration method for LiDAR point cloud and optical image[J]. Laser Journal, 2021, 42(3): 157-162.
- [9] 查陆九,夏永华,汪斌,等.移动测量的视频影像与激光点云配准方法[J/OL].激光与光电子学进展,2022,59(10):DOI: 10.3788/LOP202259.1013001.

- ZHA Lujia, XIA Yonghua, WANG Bin, et al. Registration method of video image and laser point cloud under moving measurement[J/OL]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(10): DOI:10.3788/LOP202259.1013001.
- [10] 李彩林, 苏本娅, 郭宝云, 等. 基于激光点云多条件约束的相机检校方法[J/OL]. *光子学报*, 2021, 50(4): DOI:10.3788/gzxb20215004.0415001.
- LI Cailin, SU Benya, GUO Baoyun, et al. Camera calibration method with multi-condition constraints based on laser points [J/OL]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(4): DOI:10.3788/gzxb20215004.0415001.
- [11] RAU J Y, HABIB A F, KERSTING A P, et al. Direct sensor orientation of a land-based mobile mapping system[J]. *Sensors*, 2011, 11(7): 7243-7261.
- [12] 卢秀山, 俞家勇, 田茂义, 等. 车载激光点云与序列化全景影像融合方法[J]. *中国激光*, 2018, 45(5): 245-252.
- LU Xiushan, YU Jiayong, TIAN Maoyi, et al. Fusion method of vehicle laser point cloud and serialized panoramic image [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(5): 245-252.
- [13] HOFMANN S, EGGERT D, BRENNER C. Skyline matching based camera orientation from images and mobile mapping point clouds[J]. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2014, II-5: 181-188.
- [14] 岳明宇, 康志忠. 利用球心投影与线特征的点云与全景影像配准[J]. *遥感信息*, 2017, 32(1): 10-16.
- YUE Mingyu, KANG Zhizhong. Registration of point cloud with panoramic images based on gnomonic projection and line features[J]. *Remote Sensing Information*, 2017, 32(1): 10-16.
- [15] KWAK T S, KIM Y I, YU K Y, et al. Registration of aerial imagery and aerial LiDAR data using centroids of plane roof surfaces as control information[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2006, 10(5): 365-370.
- [16] 方兴, 黄李雄, 曾文宪, 等. 稳健估计的一种改进迭代算法[J]. *测绘学报*, 2018, 47(10): 1301-1306.
- FANG Xin, HUANG Lixiong, ZENG Wenxian, et al. On an improved iterative reweighted least squares algorithm in robust estimation[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2018, 47(10): 1301-1306.
- [17] ZHANG Z Y. A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [18] 刘如飞, 柴永宁, 朱健, 等. 全景深度图像精度分析及优化方法研究[J]. *测绘科学*, 2021, 46(1): 170-176.
- LIU Rufe, CHAI Yongning, ZHU Jian, et al. Accuracy analysis and optimization of panoramic depth image[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2021, 46(1): 170-176.
- [19] 李新, 王肖霞, 杨风暴. 基于特征点匹配的激光雷达与相机间外参标定方法[J]. *现代电子技术*, 2025, 48(3): 19-25.
- LI Xin, WANG Xiaoxia, YANG Fengbao. Feature point matching based extrinsic parameter calibration between LiDAR and camera[J]. *Modern Electronics Technique*, 2025, 48(3): 19-25.
- [20] 史鹏涛, 危康乐, 吴昊, 等. 自动驾驶环境下基于语义分割的激光雷达与相机外参标定方法[J/OL]. *激光与光电子学进展*, 2024, 61(24). DOI:10.3788/LOP240934.
- SHI Pengtao, WEI Kangle, WU Hao, et al. External parameter calibration method of LiDAR and camera based on semantic segmentation in automatic driving environment[J/OL]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2024, 61(24). DOI:10.3788/LOP240934.

(责任编辑:高丽华)