

基于标定板关键点的激光雷达与相机外参标定方法

覃兴胜¹, 李晓欢^{1*}, 唐欣², 苏昭宇¹, 廖泽吉¹

¹桂林电子科技大学信息与通信学院, 广西 桂林 541004;

²桂林电子科技大学信息科技学院, 广西 桂林 541004

摘要 针对 micro electro mechanical system (MEMS) 激光雷达与相机标定外参误差大的问题, 提出了一种基于标定板关键点的外参标定方法。首先对多帧点云进行叠加预处理, 然后基于 Hough 变换拟合标定板的边缘直线以确定关键点, 最后设立关键点及法向量对应的约束条件, 利用点面对应算法求出优化的标定外参。实验结果表明, 所提方法可精确提取关键点, 使得标定外参的平均误差相比现有的外参标定方法更低, 提高了标定外参的精度。

关键词 遥感; 激光雷达; Hough 变换; 关键点; 外参标定

中图分类号 TP381

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0428001

Extrinsic Calibration Method of Lidar and Camera Based on Key Points of Calibration Board

Qin Xingsheng¹, Li Xiaohuan^{1*}, Tang Xin², Su Zhaoyu¹, Liao Zeji¹

¹School of Information and Communication, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Gaungxi 541004, China;

²Institute of Information Technology, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Gaungxi 541004, China

Abstract Aiming at the problem of large extrinsic calibration error of micro electro mechanical system (MEMS) Lidar and camera, an extrinsic calibration method based on key points of calibration board is proposed. First, the multi-frame point clouds are superimposed for preprocessing, and then the edge line of the calibration board is fitted based on Hough transform to determine the key points. Finally, the constraints corresponding to the key points and normal vectors are set up, and the optimized calibration external parameters are obtained by using the point and plane correspondence algorithm. The experimental results show that the proposed method can accurately extract the key points, make the average error of calibrated external parameters lower than the existing external parameter calibration methods, and improve the accuracy of calibrated external parameters.

Key words remote sensing; Lidar; Hough transform; key point; extrinsic calibration

收稿日期: 2021-02-05; 修回日期: 2021-03-11; 录用日期: 2021-03-31

基金项目: 国家自然科学基金(61762030)、广西省自然科学基金(2019GXNSFFA245007, 2018GXNSFDA281013)、广西省科技计划(AA18242021, AB19110050, AA19110044, ZY19183005, AB20238033)、桂林市科技计划(20190214-3)、广西高校中青年教师基础能力提升项目(2021KY1654)

通信作者: *lxhguet@guet.edu.cn

1 引言

激光雷达的三维目标识别效果差,因此实际应用中常与相机进行信息融合,广泛应用于目标检测、三维重建和高精定位等领域^[1-2],其中外参标定是信息融合的关键^[3-4]。Micro electro mechanical system (MEMS) 激光雷达的点云稠密且成本比传统机械式激光雷达低^[5],是目前激光雷达应用的主要产品^[6]。但该雷达的误差较大,会影响外参标定的精度,进而影响信息融合的精度及鲁棒性,因此降低外参标定的误差是目前亟待解决的问题^[7]。

外参作为 MEMS 激光雷达与相机的空间对应关系,实质是点云相对于图像的旋转关系和平移关系。目前外参标定的方法主要包括基于辅助信息的方法和基于几何特征的方法两类。基于辅助信息的方法主要通过运动估计、强度互信息、强度相似性等信息进行标定^[8-9],这类方法对环境依赖性较强,且没有使用稳定特征点求解标定的平移向量,导致标定外参精度差。而基于几何特征的方法是根据标定板、三面体等稳定参照物的特征点、线或面的几何特征求解外参的,这类方法操作方便、精度高^[10-12]。Verma 等^[13]根据标定板的点云最值提取中心点,再根据点面对应算法求解外参,该方法仅用一个标定板即可完成标定,操作便捷,但是所提取的中心点误差大。Zhou 等^[14]利用 line segment detector (LSD) 算法提取标定板的边缘直线,再根据线面对应算法求解外参,但该方法仅依靠直线作为标定约束,平移偏差大。文献^[15]利用法向量的投影幅值先剔除边缘异常点,再根据多个标定板的点云中心迭代算法提取单帧中心点,但中心点的配准无法保证旋转的精确性。上述方法均未对激光雷达点云特征点进行精确的提取,而将其直接应用于 MEMS 激光雷达的外参标定,导致误差较大。多个特征点不仅可以表示线和面之间的旋转关系,还可以更精确地解算出平移关系,因此特征点的精确提取是提高 MEMS 激光雷达与相机的标定外参精度的有效手段^[3]。

综上所述,本文提出了一种基于标定板关键点的激光雷达与相机外参标定方法,该方法利用 Hough 变换拟合标定板边缘直线,进而提取出标定板关键点,再根据点面对应算法求解外参,降低因标定板关键点提取精度不高而产生的标定误差,进而提高标定外参的精度。

2 基本原理

2.1 外参标定原理

外参求解是指先从激光雷达和相机的同一帧中提取对应的点云-像素坐标,再根据对应坐标值来求解的过程。首先,在激光雷达与相机外参标定前获取相机的固有参数,即相机的内参 \mathbf{M} ,然后将外参求解转化为 perspective-n-point (PnP) 问题^[15]。相机图像的像素点坐标与相机坐标系坐标之间的转换关系为

$$\begin{bmatrix} u & v & 1 \end{bmatrix}^T = \frac{1}{Z_c} \mathbf{M} \begin{bmatrix} X_c & Y_c & Z_c \end{bmatrix}^T, \quad (1)$$

式中: (u, v) 表示像素坐标系中的坐标; (X_c, Y_c, Z_c) 表示相机坐标系中的坐标。相机坐标系坐标与激光雷达点云坐标系坐标之间的转换关系为

$$\begin{bmatrix} X_c & Y_c & Z_c \end{bmatrix}^T = [\mathbf{R}_l \quad \mathbf{t}_l] \begin{bmatrix} X_l & Y_l & Z_l \end{bmatrix}^T, \quad (2)$$

式中: (X_l, Y_l, Z_l) 表示激光雷达坐标系中的位置坐标; \mathbf{R}_l 表示激光雷达坐标系下点云到相机坐标系下图像像素的 3×3 旋转矩阵; \mathbf{t}_l ^[13] 表示三维平移向量,即待求解的标定外参。

根据(1)、(2)式可知,提取点云与图像对应点作为特征点是外参标定的必要过程。现有方法可精确提取图像中的棋盘标定板特征点,故所提方法采用棋盘标定板作为标定的参考目标。MEMS 激光雷达点云在标定板边缘有许多离散点,使得传统根据最值提取标定板点云特征点的方法难以应用于 MEMS 激光雷达,如图 1 所示。Hough 变换是图像检测领域常用的直线拟合方法^[16],具有较强的抗噪性,因此所提方法采用 Hough 变换拟合标定板的边缘直线,再根据拟合的直线求特征点。文献^[15]指出,精确标定外参的获取至少需要 3 个不同标定板的中心点。棋盘标定板是形状规整的长方形,顶点是显著的特征点,为方便外参标定,所提方法以单个标定板的 3 个顶点作为特征点的关键点。标定板倾斜放置,定义图像上标定板上顶点 $\mathbf{o}_1^{(c)}$ 、左顶点 $\mathbf{o}_2^{(c)}$ 和右顶点 $\mathbf{o}_3^{(c)}$ 为图像关键点,如图 2 所示;定义点云标定板的上顶点 $\bar{\mathbf{o}}_1^{(l)}$ 、左顶点 $\bar{\mathbf{o}}_2^{(l)}$ 和右顶点 $\bar{\mathbf{o}}_3^{(l)}$ 为点云关键点,如图 3 所示。

根据多对图像与点云对应标定板关键点可得到多组外参值,出于鲁棒性及操作简便性考虑,采用基于点面对应的外参标定方法求解误差最小的外参。首先通过最小化标定板点云平面法向量旋转后与图像平面的点积误差、点云平面法向量旋转后与图像

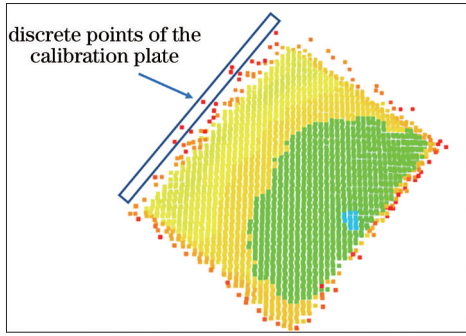


图 1 MEMS 激光雷达单帧扫描的标定板点云
Fig. 1 Point clouds in calibration plate from MEMS Lidar single frame scanning

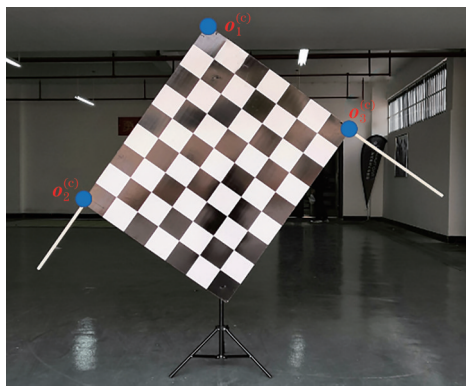


图 2 标定板图像示意图
Fig. 2 Schematic diagram of calibration board image

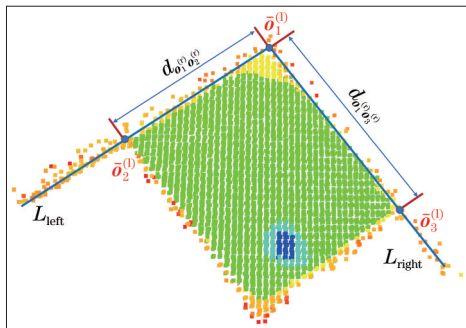


图 3 标定板点云示意图
Fig. 3 Schematic diagram of calibration plate point clouds
法向量的校准误差,求解最优旋转矩阵;然后求出点云关键点与图像关键点的平移向量,并将其平均值作为最优平移向量,进而确定最优的标定外参。

2.2 基于标定板关键点的外参标定算法

2.2.1 点云预处理

MEMS激光雷达的单帧点云虽然稠密,但顶角模糊且离散点多,因此标定板上有足够多的点时,才能获取精确点云边角特征进而提取标定板关键点。首先利用点云粗分割方法^[13]提取出标定板上

的点云,再利用时域多帧融合算法增加点云密度^[3],叠加多帧点云后得点云集 P 。 P 上的一些与标定板中心平面距离远的点为异常点。为剔除异常点,使用RANSAC^[17]算法来拟合最优平面,所得平面 P_1 的表达式为

$$Ax_1 + By_1 + Cz_1 + D = 0, \quad (3)$$

式中: A, B, C, D 是平面拟合的参数; (x_1, y_1, z_1) 表示平面 P_1 上的点。在点云集 P 中剔除与拟合平面距离远的点,然后再把剩余点投影到平面 P_1 上,即可得到点云集 P' 。

2.2.2 基于Hough变换的点云标定板关键点提取方法

经点云预处理后,点集 P' 上的点均在平面 P_1 上,但标定板边缘的离散点并没有完全剔除,标定时应避免使用这些误差大的离散点。因此,所提方法采用Hough变换拟合标定板点云上顶点的两条邻边,直线交点即为标定板的上顶点,并根据标定板实际边缘长度求标定板的左右顶点,进而确定标定板关键点的坐标值。

Hough变换利用点线对偶性,将图像中的直线转换为参数域的点,并通过统计参数域检测到的点数量确定图像域中的直线^[18]。因此,延长标定板边缘线段可增加边缘线的点云数量,使得边缘线有更优的辨识度,从而方便利用Hough变换精确地拟合标定板边缘直线。根据标定板两条边缘直线的交点及标定板实际边缘长度可求出关键点^[19]。在Hough变换的实际应用中,常采用极坐标的方式表示直线, X - Y 空间的直线 $y = kx + b$ 在极坐标空间的表示形式为 $\rho = x \cos \theta + y \sin \theta$, 直线对应参数空间点 (ρ, θ) , 其中 ρ 表示直线上点到原点的距离, θ 表示点到原点的线段所在直线与 X 轴的夹角,如图 4 所示。

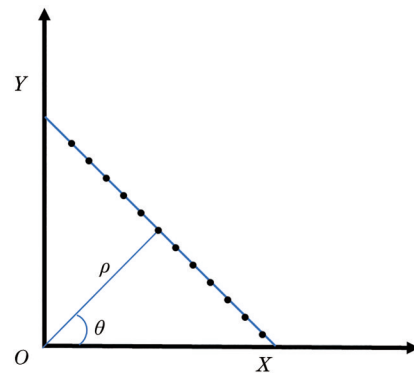


图 4 极坐标方程的几何表示形式
Fig. 4 Geometric representation of polar coordinate equation

文献[16]给出了 Hough 变换应用于三维点云的边缘直线拟合时的具体步骤。

1) 点云预处理。先拟合点云平面,再对点云进行重采样使其均匀分布,目的是将三维点云转换为二维点云。

2) 确定参数空间的取值范围,离散化参数空间,得到 $\theta_i (i=1, 2, \dots, m), \rho_j (j=1, 2, \dots, m)$;

3) 初始化用于累计参数空间点数的数组 $A(\rho, \theta)$ 、直线参数数量阈值 N_ρ 、合并参数阈值 σ_1, σ_2 、线段长度阈值 N_L 、空数组 L_{ine} 。

4) 遍历 $\theta_i (i=1, 2, \dots, m)$, 求解直线空间的 ρ 值, 然后与参数空间的 ρ_j 对比, 若 $\rho = \rho_j$, 数组 $A(\rho_j, \theta_i)$ 累加 1。

5) 当数组 $A(\rho_i, \theta_i)$ 的数量大于阈值 N_ρ 时, 判定 (ρ_i, θ_i) 为直线的参数。

6) 将 X-Y 空间的点代入 $\rho_k = x_i \cos \theta_i + y_i \sin \theta_i$, 记录满足 $\rho_k = \rho_i$ 的点, 并存放于数组 L_{ine} 中。

7) 合并近距离的直线, 若两条直线参数 $(\rho_1, \theta_1), (\rho_2, \theta_2)$ 满足 $|\rho_1 - \rho_2| < \sigma_1, |\theta_1 - \theta_2| < \sigma_2$, 则合并为一条直线的参数。

8) 按直线共线点的坐标大小进行排序, 最大值、最小值分别为拟合直线上的线段端点, 若线段长度 L_i 大于阈值 N_L , 则判定为有效直线。

9) 设共线点数量为 n , 根据最小二乘法拟合直线上的共线点, 求出直线的斜率 k 和截距 b , 表达式分别为

$$k = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i - n \sum_{i=1}^n x_i y_i}{\left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2 - n \sum_{i=1}^n x_i^2}, \quad (4)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i^2 \sum_{i=1}^n y_i}{\left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2 - n \sum_{i=1}^n x_i^2}. \quad (5)$$

MEMS 激光雷达的点云误差大、分辨率高, 对直线共线点的检测需要有一定的容错性。因此设共线点的容错阈值为 σ_ρ , 将步骤 4) 中条件 $\rho = \rho_j$ 改为 $|\rho - \rho_j| < \sigma_\rho$, 步骤 6) 中条件 $\rho_k = \rho_i$ 改为 $|\rho_k - \rho_i| < \sigma_\rho$ 。

需要拟合的直线为标定板上顶点的左邻边 L_{left} 和右邻边 L_{right} , 为增加所提取直线的辨识度, 在标定

板左右邻边处固定一根直径为 d 、长度为 L_{length} 的细管(该细管以上顶点为端点且大于标定板对角线长度)。设检测到的点云线段误差阈值为 σ_L , 将步骤 8) 中的判断条件改为若 $|L_i - L_{length}| < \sigma_L$, 当 $k > 0$ 时, 判断其为第 i 条左邻边 $L_{left}^{(i)}$; 当 $k < 0$ 时, 判断其为第 j 条右邻边 $L_{right}^{(j)}$ 。

$L_{left}^{(i)}$ 和 $L_{right}^{(j)}$ 交点即为上顶点 $\mathbf{o}_1^{(1,i,j)}$ 。设标定板左邻边和右邻边的实际边长分别为 $d_{\mathbf{o}_1^{(r)}\mathbf{o}_2^{(r)}}$ 和 $d_{\mathbf{o}_1^{(r)}\mathbf{o}_3^{(r)}}$, 进而推算出左顶点 $\mathbf{o}_2^{(1,i)}$ 和右顶点 $\mathbf{o}_3^{(1,j)}$ 。根据三角形的全等条件, 确定上顶点 $\mathbf{o}_1^{(1,i,j)}$ 、左邻边 $L_{left}^{(i)}$ 和右邻边 $L_{right}^{(j)}$ 长度后, 只需要确定 $\angle \mathbf{o}_2^{(1,i)} \mathbf{o}_1^{(1,i,j)} \mathbf{o}_3^{(1,j)}$ 或 $d_{\mathbf{o}_2^{(1,i)}\mathbf{o}_3^{(1,j)}}$ 。根据全等三角形 SAS 或 SSS 条件, 有且仅有一个三角形与 $\Delta \mathbf{o}_2^{(r)} \mathbf{o}_1^{(r)} \mathbf{o}_3^{(r)}$ 全等且与之重合, 在理想情况下, $\angle \mathbf{o}_2^{(1,i)} \mathbf{o}_1^{(1,i,j)} \mathbf{o}_3^{(1,j)} = \angle \mathbf{o}_2^{(r)} \mathbf{o}_1^{(r)} \mathbf{o}_3^{(r)} = 90^\circ$, $d_{\mathbf{o}_2^{(r)}\mathbf{o}_3^{(r)}} = d_{\mathbf{o}_2^{(1,i)}\mathbf{o}_3^{(1,j)}}$ 。但点云存在测量误差, 所提方法采用最小二乘法计算 $d_{\mathbf{o}_2^{(r)}\mathbf{o}_3^{(r)}}$ 与 $d_{\mathbf{o}_2^{(1,i)}\mathbf{o}_3^{(1,j)}}$ 的长度误差 $\sigma_d^{(i,j)}$,

$$\sigma_d^{(i,j)} = \left(\mathbf{o}_2^{(r)} \mathbf{o}_3^{(r)} - \mathbf{o}_2^{(1,i)} \mathbf{o}_3^{(1,j)} \right)^2. \quad (6)$$

然后依据 $\sigma_d^{(i,j)}$ 的大小排序, 当 $\sigma_d^{(i,j)}$ 取得最小值时, 得到标定板关键点 $\bar{\mathbf{o}}_1^{(1)} = \mathbf{o}_1^{(1,i,j)}, \bar{\mathbf{o}}_2^{(1)} = \mathbf{o}_2^{(1,i)}, \bar{\mathbf{o}}_3^{(1)} = \mathbf{o}_3^{(1,j)}$ 。

2.2.3 基于标定板关键点的外参标定方法

根据文献[13]所述, 使用一个标定板求外参 $(\mathbf{R}, \mathbf{t}_i)$ 中的参数时, 至少需要 3 个不同的位姿, 才能得到多组像素与点云对应标定板关键点, 再根据 (1)、(2) 式求解外参。因此, 使标定板在传感器视野范围内移动, 取得 $N (N > 3)$ 个不同的标定板位姿, 进而求取 N 组点云与图像对应的几何特征, 再根据标定板关键点及法向量的对应关系计算多组外参 $(\mathbf{R}_i, \mathbf{t}_i)$ 。根据 (3) 式可知, 平面 P_i 的法向量 $\mathbf{n}^{(1)}$ 经旋转矩阵 \mathbf{R}_i 变换后可得到 $\mathbf{n}^{(1,c)}$, 即 $\mathbf{n}^{(1,c)} = \mathbf{R}_i \mathbf{n}^{(1)}$ 。理想情况下, $\mathbf{n}^{(1,c)}$ 与图像平面向量的点乘应为 0, 但因系统测量误差的存在, 设平均点乘误差为 e_d , $\mathbf{n}^{(1,c)}$ 与图像平面法向量 $\mathbf{n}^{(c)}$ 的校准误差为 e_r , 表达式分别为

$$\begin{cases} e_d = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[(\mathbf{o}_{1,i}^{(c)} - \mathbf{o}_{0,i}^{(c)}) \cdot \mathbf{n}_i^{(1,c)} \right]^2 \\ e_r = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{\sum (\mathbf{n}_i^{(1,c)} - \mathbf{n}_i^{(c)})^2} \end{cases}, \quad (7)$$

然后即可求出最优旋转矩阵 $\hat{\mathbf{R}}_i$ 。

$$\hat{\mathbf{R}}_i = \min_{\mathbf{R}_i} e_d + e_r \hat{\mathbf{t}}_i, \quad (8)$$

式中： $\hat{\mathbf{t}}_1$ 为最优平移向量。所有点云关键点投影到图像上后，计算其与图像关键点之间的平均欧氏距离，作为平均误差。

$$e_t = \frac{1}{3N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=0}^2 \sqrt{\sum (\mathbf{o}_j^{(c,i)} - \mathbf{o}_j^{(l,c,i)})^2}, \quad (9)$$

式中： $\mathbf{o}_j^{(c,i)}$ 为第 i 个位姿上第 j 个图像关键点；第 i 个位姿上第 j 个点云关键点的投影点 $\mathbf{o}_j^{(l,c,i)} = \mathbf{R}_t \mathbf{o}_j^{(l,i)} + \mathbf{t}_t$ ， $\mathbf{o}_j^{(l,i)}$ 第 i 个位姿上第 j 个点云关键点。 $\mathbf{o}_j^{(l,i)}$ 与 $\mathbf{o}_j^{(l,c,i)}$ 的欧氏距离的方差为

$$v_t = \frac{1}{3N} \left\{ \sum_{i=1}^N \sum_{j=0}^2 \left[\sqrt{\sum (\mathbf{o}_j^{(l,i)} - \mathbf{o}_j^{(l,c,i)})^2} - e_t \right]^2 \right\}. \quad (10)$$

遍历候选外参值，取出使得方差 v_t 最小的外参值，然后使用该外参值重新计算点云关键点的投影点与图像关键点的平均欧氏距离，剔除欧氏距离大于平均欧氏距离的关键点。设剩余的点云关键点集为 \mathbf{O}_1 ，图像关键点集为 \mathbf{O}_c ，最优平移向量 $\hat{\mathbf{t}}_1$ 的表达式为

$$\hat{\mathbf{t}}_1 = \text{mean}(\mathbf{O}_c - \hat{\mathbf{R}}_t \mathbf{O}_1), \quad (11)$$

式中： $\text{mean}(\cdot)$ 函数表示按行取平均值。基于标定板关键点的外参标定算法流程如图 5 所示。

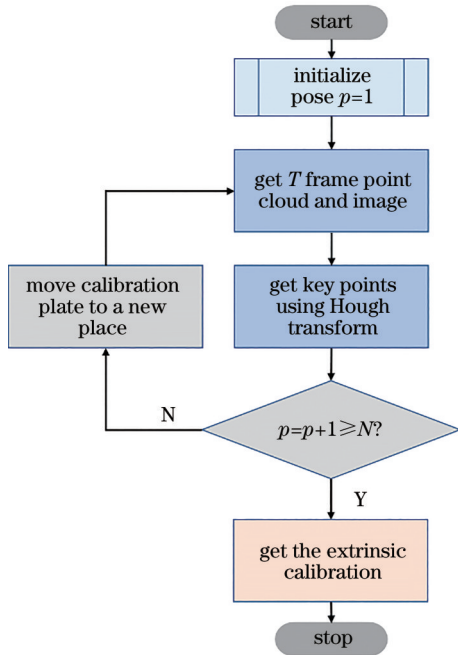


图 5 基于标定板关键点的外参标定算法流程

Fig. 5 Extrinsic calibration algorithm flow based on key points on calibration board

3 实验验证与分析

3.1 实验平台搭建与参数配置

实验采用的 MEMS 激光雷达是 RoboSense RS-LiDAR-M1，相机是 Basler acA2040-25gc，计算平台是 NVIDIA Jetson AGX Xavier。传感器的参数如表 1 和表 2 所示，传感器均采用网口通信，Xavier 只有一个网口，因此系统还需要一个交换机才能使 Xavier 同时与传感器进行通信，故实验的硬件连接图如图 6 所示。实验采用 8×6 黑白棋盘标定板，方格边长为 12 cm，标定板外边缘裁剪误差为 ± 0.2 cm，用于延长标定板边缘线段的细管直径 d 为 1 cm，长度 L_{length} 为 150 cm。为了使标定板同时落在激光雷达与相机的视野范围内，将标定板面正对激光雷达，与水平面成 60° 角，放置在距 MEMS 激光雷达中心前方 5 m 处，即可得到相对稠密且完整的单帧标定板点云。

表 1 RS-LiDAR-M1 参数

Table 1 Parameters of RS-LiDAR-M1

Parameter	Value
Distance /m	1-180
Precision /cm	± 5
Vertical angle of view /($^\circ$)	25
Horizontal angle of view /($^\circ$)	120
Vertical resolution /($^\circ$)	0.2
Horizontal resolution /($^\circ$)	0.2

表 2 Basler acA2040-25gc 参数

Table 2 Parameters of Basler acA2040-25gc

Parameter	Value
Distance /m	2-50
Resolution	1638 \times 1248
Focus /mm	6.5
Vertical angle of view /($^\circ$)	72
Horizontal angle of view /($^\circ$)	88

3.2 实验结果和分析

为验证 Hough 变换提取点云标定板关键点的准确性，将所提方法和文献[13]采用 LSD 算法提取标定板关键点的方法进行了对比。在同一位姿下进行实验，点云叠加帧数 T 取 6 时，点云预处理的效果最佳，可得到相对稠密且均匀的点云密度。

图 7 为 Hough 变换和 LSD 算法拟合标定板边缘直线效果图，其中实线、短虚线分别代表 Hough 变换、LSD 算法拟合的直线，长虚线是标定板实际

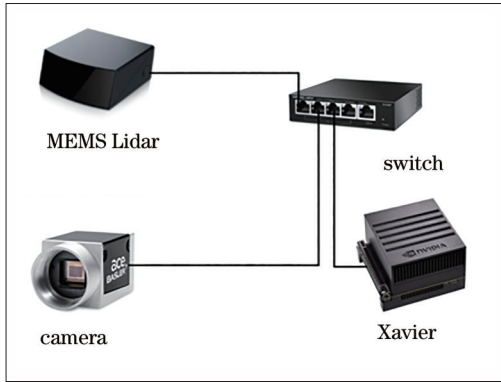


图 6 实验硬件连接图

Fig. 6 Experimental hardware connection diagram

的边缘直线,圆点代表对应直线的交点。从图 7 中可以看出,Hough 变换拟合的边缘直线与实际边缘直线偏差更小,直线交点确定的关键点与实际标定板关键点的距离更短,使得点云数据与图像数据有更优的空间匹配效果。实验选取了 20 个位姿的标定板点云数据,分别利用 LSD 算法和 Hough 变换拟合直线,求出点云关键点,并分别计算各关键点与实际关键点的欧氏距离,以平均欧氏距离作为两者的平均误差。利用 LSD 算法求关键点的平均误差为 6.25 cm,利用 Hough 变换求关键点的平均误差为 4.21 cm,说明相比于 LSD 算法,Hough 变换拟合标定板边缘直线误差更小,标定板关键点提取的精

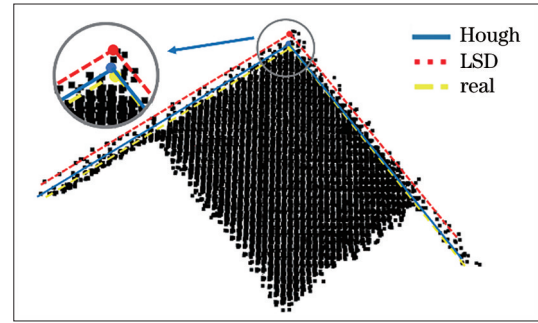


图 7 标定板邻边拟合及关键点提取效果图

Fig. 7 Effect drawing of adjacent edge fitting and key point extraction of calibration plate

度更高。

标定板在距离 MEMS 激光雷达中心前方 5.0~7.5 m 处缓慢移动,可得到 N 组不同的标定板位姿,实验选取 9 组位姿,即 $N=9$ 。通过 OpenCV 函数库求出图像标定板上顶点 o_1^i 、左顶点 o_2^i 、右顶点 o_3^i 坐标,再根据图 4 流程计算出最优外参 (\hat{R}_t, \hat{t}_t) 。

图 8(a)~(c)分别是利用标定板关键点、点面对应、线面对应算法求出的外参将点云投影到图像的效果图。对比点面对应、线面对应标定方法的投影效果可看出,基于标定板关键点的方法得到的外参使得标定板点云投影到图像具有更优的重合效果。

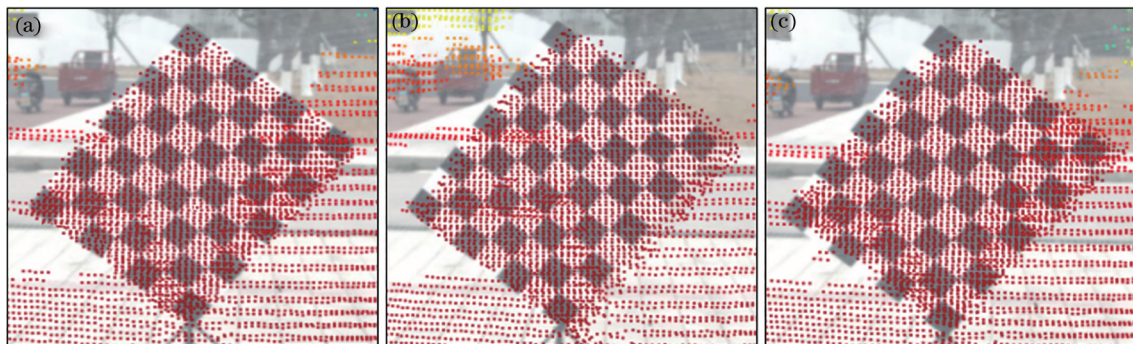


图 8 点云投影到图像的效果图。(a)标定板关键点;(b)点面对应;(c)线面对应

Fig. 8 Renderings of point clouds projected onto image. (a) Key points of calibration board; (b) point and plane correspondences; (c) line and plane correspondences

Normalized reprojection error (N_{RE}) 指标可评估不同距离下的标定精度^[12], N_{RE} 值越低表示标定误差越小,精度越高。因此,在测试标定精度的点云与图像的帧数确定的情况下,实验以 N_{RE} 的平均值 A_{VG} 及 N_{RE} 值分别小于 $p_e = 1$ 、 $p_e = 5$ 、 $p_e = 10$ 的帧数占总帧数的百分比作为评估指标,与基于标定板关键点的外参标定方法与点面对应标定方法^[13]、线

面对应标定方法^[14]进行了对比。计算结果如表 3 所示,其中 point and plane correspondences (PPC) 表示点面对应方法, line and plane correspondences (LPC) 表示线面对应方法, key points on the calibration board (KPCB) 表示基于标定板关键点的方法。

从表 3 可知,相比点面对应、线面对应标定方法,基于标定板关键点的方法求得的外参平均误差

表 3 标定外参的 A_{VG} 误差及 $N_{RE} < p_e$ 的帧数百分比
Table 3 A_{VG} error and $N_{RE} < p_e$ frame percentage of calibration of external parameters

Method	A_{VG} / cm	$p_e = 1 / \%$	$p_e = 5 / \%$	$p_e = 10 / \%$
PPC[13]	9.32	15.67	48.26	75.19
LPC[14]	11.55	10.32	30.32	60.54
KPCB	6.18	20.98	70.78	90.42

A_{VG} 更低;且在测量总帧数相同时,误差值 N_{RE} 分别小于 1、5、10 的情况下,基于标定板关键点的方法所测得的帧数占比更多,说明基于标定板关键点的外参标定方法的标定结果精度更高。

4 结 论

针对 MEMS 激光雷达因点云误差大而导致其与相机外参标定过程中精度低的问题,提出了一种基于标定板关键点的激光雷达与相机外参标定方法。所提方法利用 Hough 变换拟合标定板边缘直线,提取出标定板关键点,再根据点面对应算法求解最优标定外参。实验结果表明,基于 Hough 变换的方法所提取的标定板关键点比 LSD 算法精度更高,基于标定板关键点方法求得的标定外参的平均误差比点面对应方法、线面对应方法更低,得到的标定外参精度更高。

参 考 文 献

- [1] Cui Y D, Chen R, Chu W B, et al. Deep learning for image and point cloud fusion in autonomous driving: a review[EB/OL]. (2020-04-10)[2021-02-01]. <https://arxiv.org/abs/2004.05224>.
- [2] Wang Z J, Wu Y, Niu Q Q. Multi-sensor fusion in automated driving: a survey[J]. IEEE Access, 2019, 8: 2847-2868.
- [3] Cui J H, Niu J W, Ouyang Z C, et al. ACSC: automatic calibration for non-repetitive scanning solid-state LiDAR and camera systems[EB/OL]. (2020-11-17)[2021-02-01]. <https://arxiv.org/abs/2011.08516>.
- [4] Gong X J, Lin Y, Liu J. 3D LIDAR-camera extrinsic calibration using an arbitrary trihedron[J]. Sensors, 2013, 13(2): 1902-1918.
- [5] Raj T, Hashim F H, Huddin A B, et al. A survey on LiDAR scanning mechanisms[J]. Electronics, 2020, 9(5): 741.
- [6] Yoo H W, Druml N, Brunner D, et al. MEMS-based lidar for autonomous driving[J]. e & i Elektrotechnik und

Informationstechnik, 2018, 135(6): 408-415.

- [7] Wang D K, Watkins C, Xie H K. MEMS mirrors for LiDAR: a review[J]. Micromachines, 2020, 11(5): 456.
- [8] Pandey G, McBride J R, Savarese S, et al. Automatic extrinsic calibration of vision and lidar by maximizing mutual information[J]. Journal of Field Robotics, 2015, 32(5): 696-722.
- [9] Fu B, Wang Y, Ding X Q, et al. LiDAR-camera calibration under arbitrary configurations: observability and methods[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(6): 3089-3102.
- [10] Liu J Y, Tang X, Jia X H, et al. High efficient extrinsic parameter calibration method of 3D LiDAR-camera system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(11): 64-72.
刘今越, 唐旭, 贾晓辉, 等. 三维激光雷达-相机间外参的高效标定方法[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(11): 64-72.
- [11] Huang J K, Grizzle J W. Improvements to target-based 3D LiDAR to camera calibration[J]. IEEE Access, 2020, 8: 134101-134110.
- [12] Liao Q H, Chen Z Y, Liu Y, et al. Extrinsic calibration of lidar and camera with polygon[C]//2018 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), December 12-15, 2018, Kuala Lumpur, Malaysia. New York: IEEE Press, 2018: 200-205.
- [13] Verma S, Berrio J S, Worrall S, et al. Automatic extrinsic calibration between a camera and a 3D Lidar using 3D point and plane correspondences[C]//2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC), October 27-30, 2019, Auckland, New Zealand. New York: IEEE Press, 2019: 3906-3912.
- [14] Zhou L P, Li Z M, Kaess M. Automatic extrinsic calibration of a camera and a 3D LiDAR using line and plane correspondences[C]//2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), October 1-5, 2018, Madrid, Spain. New York: IEEE Press, 2018: 5562-5569.
- [15] Kang G H, Zhang Q, Zhang H, et al. Joint calibration of camera and lidar based on point cloud center[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(12): 118-126.
康国华, 张琪, 张哈, 等. 基于点云中心的激光雷达与相机联合标定方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(12): 118-126.
- [16] Zhang Y P. Study on the extraction of line feature from point cloud data based on Hough transforming [J]. Mine Surveying, 2019, 47(5): 62-66, 85.

- 张云鹏. 基于 Hough 变换的点云数据直线特征提取研究[J]. 矿山测量, 2019, 47(5): 62-66, 85.
- [17] Yang Q N, Ma T L, Yang C K, et al. RANSAC image matching algorithm based on optimized sampling [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(10): 101104.
- 杨琼楠, 马天力, 杨聪锐, 等. 基于优化采样的 RANSAC 图像匹配算法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(10): 101104.
- [18] Yang W S, Guo S P, Li X J, et al. Checkerboard corner detection based on Hough transform and circular template[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(18): 181510.
- 杨炜松, 郭帅平, 李学军, 等. 基于 Hough 变换和圆形模板的棋盘格角点检测[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(18): 181510.
- [19] Bai H Q, Xia Y H, Yang M L, et al. Multi-resolution 3D reconstruction of Karst caves based on the feature line extraction of 3D laser point cloud[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(20): 202802.
- 柏宏强, 夏永华, 杨明龙, 等. 基于三维激光点云特征线提取的溶洞多分辨率三维重建方法研究[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(20): 202802.