

# 基于EPnP算法的激光雷达与可见光相机标定方法\*

戴云峰<sup>1</sup>, 丁亚杰<sup>1</sup>, 冯兴明<sup>1</sup>, 王瀚<sup>1</sup>, 王庆华<sup>2\*\*</sup>

(1. 国网江苏省电力有限公司盐城供电分公司, 江苏盐城 224000;

2. 常州中能电力科技有限公司, 江苏常州 213000)

**摘 要:** 针对激光雷达与可见光相机标定过程繁琐以及标定精度不高的问题, 提出了一种基于EPnP算法的激光雷达与可见光相机的联合标定方法。首先, 提出了基于先验信息的图像特征点提取方法, 利用标定板的颜色信息与边缘轮廓信息, 准确计算可见光图像中的特征点坐标; 其次, 提出了基于直线拟合的三维点云特征点提取方法, 根据标定板的尺寸信息与边缘轮廓信息, 准确提取三维点云中的特征点; 最后, 将在同步时序的可见光图像和激光雷达三维点云中提取的匹配特征点对作为EPnP算法的输入, 求解激光雷达与可见光相机之间的外参矩阵。实验结果表明, 与工业界广泛应用的Autoware标定工具箱相比, 文中提出的方法能够获得更高的标定精度, 并能简化冗杂的标定过程。

**关键词:** 激光雷达; 可见光相机; 联合标定; 特征点提取

**中图分类号:** TN958.98, TP381 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-488X(2023)02-0166-07

## Calibration Method of Lidar and Visible Light Camera Based on EPnP Algorithm

DAI Yunfeng, DING Yajie, FENG Xingming, WANG Han, WANG Qinghua

(1. Yancheng Power Supply Branch, State Grid Jiangsu Power Supply Co., Ltd, Yancheng Jiangsu 224000, CHN; 2. Changzhou Zhongneng Power Technology Co., Ltd, Changzhou Jiangsu 213000, CHN)

**Abstract:** Aiming at the problems of cumbersome calibration process and low calibration accuracy of lidar and visible light camera, a joint calibration method of lidar and visible light camera based on EPnP algorithm was proposed. Firstly, an image feature points extraction method based on prior information was proposed. The coordinates of feature points in visible light image were calculated accurately by using the color information and the edge contour information of the calibration plate; Secondly, the feature points in 3D point cloud were extracted accurately according to the size information and edge contour information of the calibration plate by using the feature points extraction method based on line fitting proposed in this paper; Finally, the matching feature points extracted from the synchro-

**收稿日期:** 2022-10-28

\* **基金项目:** 国网双创孵化培育资金项目(JF2022015)

**作者简介:** 戴云峰(1974—), 男, 高级工程师, 主要从事电力系统安全运行方面的研究;

丁亚杰(1988—), 男, 工程师, 主要从事电力系统安全运行方面的研究;

王庆华(1977—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事电气工程方面的研究。(E-mail: 1416363410@qq.com)

\*\* **通讯作者**

nous visible light image and the lidar three-dimensional point cloud were used as the input of the EPnP algorithm to solve the external parameter matrix between the lidar and the visible light camera. The experimental results showed that, compared with the Autoware calibration toolbox widely used in the industry, the proposed method could achieve higher calibration accuracy and simplify the tedious calibration process.

**Key words:** lidar; visual light camera; joint calibration; feature points extraction

## 引言

多传感器信息相较于单传感器信息而言,具有高容错、互补性等优点,被广泛应用在机器人、自动探测等领域中。激光雷达具有高精度、高分辨率的优势,因此其具有非常精确的测距能力<sup>[1]</sup>,可以准确获取待测目标的深度信息,但是其无法获取待测目标的颜色、纹理等信息;而单目可见光相机虽然可以准确获取待测物的颜色、纹理、边缘等信息,但是其难以获取待测物的深度信息<sup>[2]</sup>。因此,为了融合激光雷达的深度数据与可见光相机的图像数据,需要对这两种传感器进行联合外参标定<sup>[3]</sup>。激光雷达与相机的外参标定方法主要包括基于几何特征的方法和基于辅助信息的方法两类<sup>[4]</sup>。

基于几何特征的外参标定方法主要利用标定板等参照物的特征点、线、面等几何特征来构成约束条件以求解外参。康等<sup>[5]</sup>提出了一种基于多块标定板的外参求解方法,该方法根据点云中心迭代算法求出三块棋盘格标定板的中心点坐标,进而求解出外参,其缺点在于仅利用中心点的配准,无法保证旋转矩阵求解的精确性;谢等<sup>[6]</sup>提出了一种点线面约束的外参求解方法,该方法在单一角点约束的基础上加入了线-线约束和面-面约束信息,提高了标定的精度,其缺点是需要给定外参的初值;Yao等<sup>[7]</sup>和陈等<sup>[8]</sup>均提出了一种基于标定板的粗测与精调相结合的外参标定方法,这类方法虽然标定精度有所提高,但缺点是标定速度较慢;Ge等<sup>[9]</sup>提出了一种基于近远双目标的标定方法,通过近处的棋盘格标定板和远处的三面体分别估计相机和激光雷达的运动,再通过手眼校准方程求解外参,其缺点是参照物过多、标定过程繁琐。

基于辅助信息的外参标定方法主要利用运动信息、强度互信息、自然环境中的特征信息等构成约束条件以求解外参。肖等<sup>[10]</sup>提出了基于运动和基于互信息的双阶段标定法,先基于运动信息得到外参的粗估计,再基于互信息对外参进行优化,该方法的缺

点是对环境依赖性较强、标定速度较慢。

为了解决激光雷达与可见光相机标定过程繁琐、标定精度不高的问题,文章提出了一种基于EPnP算法的激光雷达与可见光相机联合标定方法。该方法仅需在同步的激光雷达三维点云和可见光相机二维图像中提取特征点对,再将提取的特征点对作为EPnP算法的输入求解激光雷达与可见光相机之间的外参。实验结果表明,文中方法能够极大地简化复杂的标定流程,并且具有更高的标定精度。

## 1 特征点坐标计算方法

文章提出的标定方法的流程如图1所示,该方法主要包括以下3个步骤:

- (1)采用基于先验信息的图像特征点提取方法,计算图2所示标定板中红色特征点在图像中的二维坐标;
- (2)利用基于直线拟合的三维点云特征点提取方法,计算图2所示标定板中红色特征点在点云中的三维坐标;
- (3)将提取的匹配点对作为EPnP算法的输入计算外参矩阵。

### 1.1 基于先验信息的图像特征点提取方法

首先将图像转化为HSV空间并根据标定板的颜色进行滤波从而初步分离出标定板平面,再利用形态学运算去除噪声并填补空隙,最后求出标定板

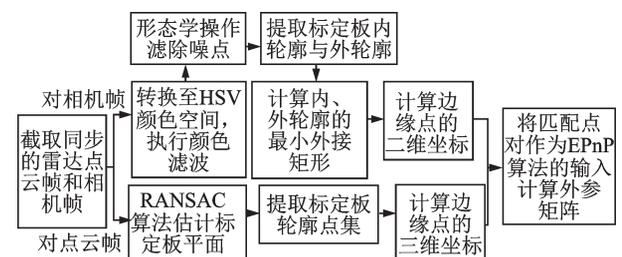


图1 标定方法流程图

Fig.1 Process of calibration method

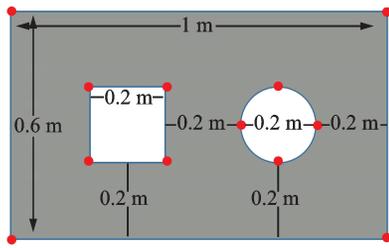


图2 标定板结构图

Fig.2 Structure of calibration plate

内、外轮廓及其对应的最小外接矩形,进而得到所需的特征点坐标。

### 1.1.1 图像空间转换与颜色滤波

相对于RGB空间而言,HSV空间能够更加直观地表示色彩的明暗、色调以及鲜艳程度<sup>[11]</sup>,方便进行颜色之间的对比,因此可以更加有效地通过颜色滤波将标定板平面从图像中分离出来。将图像由RGB空间转换至HSV颜色空间的转换公式如式(1)~式(3)所示,其中 $(r, g, b)$ 分别是RGB图像的三个颜色分量,取值范围是 $[0, 1]$ 。令 $max$ 为 $(r, g, b)$ 中的最大值, $min$ 为 $(r, g, b)$ 中的最小值。 $(h, s, v)$ 为HSV空间的三个分量,其中 $h \in [0^\circ, 360^\circ)$ ,而 $s, v \in [0, 1]$ 。

$$h = \begin{cases} 0^\circ, & \text{if } max = min \\ 60^\circ \times \frac{g-b}{max-min} + 0^\circ, & \text{if } max = r \text{ and } g \geq b \\ 60^\circ \times \frac{g-b}{max-min} + 360^\circ, & \text{if } max = r \text{ and } g < b \\ 60^\circ \times \frac{b-r}{max-min} + 120^\circ, & \text{if } max = g \\ 60^\circ \times \frac{r-g}{max-min} + 240^\circ, & \text{if } max = b \end{cases} \quad (1)$$

$$s = \begin{cases} 0, & \text{if } max = 0 \\ \frac{max - min}{max} = 1 - \frac{min}{max}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

$$v = max \quad (3)$$

再设定合适的色调阈值 $h_\theta$ 进行滤波,即可将标定板平面从图像中初步分离。

### 1.1.2 形态学处理

由于图像噪声的影响,可能有一些离散点会随标定板平面一起被提取出来,并且标定板中可能有一些细小的间隙,如图3(a)所示。借助形态学开运算和形态学闭运算能够消除这种噪声并填补间隙,其结果如图3中(b)和(c)所示。腐蚀运算的数学表达式如下:



(a) 二值图 (b) 开运算 (c) 闭运算

图3 开运算及闭运算结果

Fig.3 Results of opening operation and closing operation

$$E(x, y) = (I \ominus T)(x, y) = \underset{i, j=0}{\overset{m}{AND}} [I(x+i, y+j) \& T(i, j)] \quad (4)$$

其中 $E(x, y)$ 为腐蚀运算在图像坐标 $(x, y)$ 处的输出响应, $I$ 表示输入图像, $T$ 表示滤波核。腐蚀运算会删除图像高亮区域的某些边界,使得该区域面积减小。膨胀运算的数学表达式如下:

$$D(x, y) = (I \oplus T)(x, y) = \underset{i, j=0}{\overset{m}{OR}} [I(x+i, y+j) \& T(i, j)] \quad (5)$$

其中 $E(x, y)$ 为膨胀运算在图像坐标 $(x, y)$ 处的输出响应。膨胀运算会给图像高亮区域添加某些边界,使得其面积增加。

### 1.1.3 标定板轮廓提取

从图3可以看出,标定板的内、外轮廓并不完全准确,在一些地方依然存在缺失,因此直接使用图3中的标定板轮廓点集来推算图2中的红色特征点是不准确的。为了消除由于轮廓造成的特征点坐标计算误差,首先计算边缘轮廓点集的凸包,结合几何定理,通过枚举凸包的每一条边作外接矩形的方式来求解标定板内、外轮廓的最小外接矩形,进而获得图2中红色特征点的二维坐标。

## 1.2 基于直线拟合的三维点云特征点提取方法

首先利用平面拟合的方法初步将标定板平面从三维点云中分离出来,再根据点云表面的法向量求得标定板的边缘轮廓,最后利用直线拟合的方法补齐由于雷达对边缘扫描精度不高而损失的边缘信息,进而求得所需的特征点坐标。

### 1.2.1 平面拟合

通过随机采样一致性(Random Sample Consensus, RANSAC)算法<sup>[12]</sup>可以在杂乱的三维点云中拟合标定板平面,将标定板平面初步从三维点云中分离出来。如图4所示,利用RANSAC算法估计的平面“内点”基本符合标定板的形状,但是在标定板边缘处有点云缺失,这是激光雷达对于物体边缘扫描精度不够高所导致的。因此,为了精准计算图2中红色特征点的三维坐标,需要在后续处理过程中根



图4 标定板平面提取结果

Fig.4 Extraction results of calibration plate plane

据已经提取的标定板平面点云的坐标最值来推算这些点的三维坐标。

### 1.2.2 标定板轮廓提取

如图5所示,用 $n$ 表示最佳拟合平面的法向量, $N_c$ 为采样点, $N_i$ 为领域内的采样点, $N'_i$ 表示采样点的法向量投影至 $N_c$ 的最佳拟合平面的投影向量,通过 $N'_c$ 与 $N'_i$ 的最大夹角与给定阈值之间的大小关系判断采样点是否属于边界点<sup>[13]</sup>。

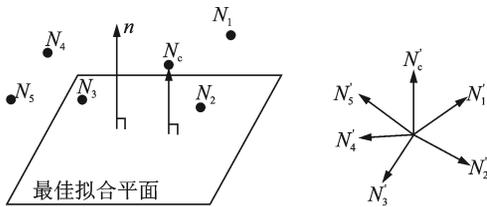


图5 边缘点与拟合平面的关系示意图

Fig.5 Relationship between the edge points and the fitting plane

### 1.2.3 直线拟合与特征点坐标计算

图6中的绿色点是提取的标定板边缘点,可以注意到标定板四个顶点处的点云是缺失的。因此,为了消除该误差,文章利用标定板的尺寸信息对边缘点云坐标进行计算。首先依据图6中边缘点集提取出标定板四条边的轮廓点集,再利用RANSAC算法<sup>[12]</sup>拟合其边缘直线方程。在标定过程中,因为标定板平面是近乎垂直于地面的,所以只需获得边缘直线关于水平面的斜率,即只需要拟合二维的直线即可。

假定标定板上边缘的直线斜率为 $k$ ,标定板左

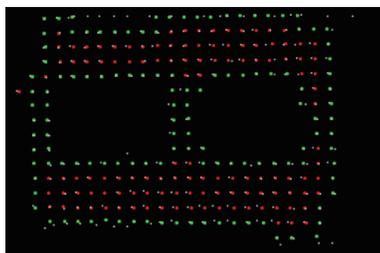


图6 标定板边缘点云提取结果示意图

Fig.6 Edge point cloud extraction results of calibration plate

上角 $P_{lu}$ 的坐标为 $(x_0, y_0, z_0)$ ,如图7所示。

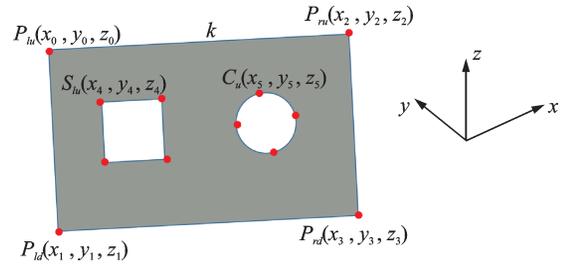


图7 标定板的特征点坐标示意图

Fig.7 Feature points coordinates of calibration plate

由于标定板的尺寸信息已知,则可以计算出图7中各特征点的坐标为:

$$\begin{cases} y_2 = y_0 - \sqrt{\frac{1}{k^2 + 1}} \\ z_2 = z_0 + \sqrt{\frac{k^2}{k^2 + 1}} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} y_4 = y_0 - \sqrt{\frac{0.04}{k^2 + 1}} \\ z_4 = z_0 - \sqrt{\frac{0.04 \cdot k^2}{k^2 + 1}} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} y_5 = y_0 - \sqrt{\frac{0.49}{k^2 + 1}} \\ z_5 = z_0 - \sqrt{\frac{0.49 \cdot k^2}{k^2 + 1}} \end{cases} \quad (8)$$

## 2 基于EPnP算法的外参求解方法

PnP(Perspective-n-Point)问题<sup>[14]</sup>定义为:给定 $n$ 个三维点坐标以及其对应的二维投影点坐标,计算三维坐标系与二维投影坐标系的转换矩阵。EPnP(efficient perspective n point)方法<sup>[15]</sup>是PnP问题的一种求解方法,其优点是计算量小、计算速度快。该方法的输入条件为文章在1.2小节求出的 $n$ 个特征点(参考点)的3D坐标、1.1小节求出的 $n$ 个特征点的2D坐标以及可见光相机的内参。

EPnP方法通过构造4组三维控制点的线性组合来表示所有三维参考点的坐标,使用控制点表示三维坐标的数学形式如下:

$$P_i^w = \sum_{j=1}^4 \alpha_{ij} C_j^w, \text{ with } \sum_{j=1}^4 \alpha_{ij} = 1 \quad (9)$$

其中, $P_i^w$ 表示世界坐标系下的三维参考点坐标, $C_j^w$ 为对应的控制点坐标, $\alpha_{ij}$ 是齐次重心坐标。当四个控制点满足不共面的条件时, $\alpha_{ij}$ 是唯一确定的。在

相机坐标系下用同样的线性组合来表示三维参考点:

$$p_i^c = \sum_{j=1}^4 \alpha_{ij} c_j^c, \text{ with } \sum_{j=1}^4 \alpha_{ij} = 1 \quad (10)$$

其中,  $P_i^c$  表示相机坐标系下的三维参考点坐标,  $C_j^c$  为对应的控制点坐标。假设  $K$  是相机的内参矩阵,  $\{u_i\}_{i=1, \dots, n}$  是三维参考点  $\{p_i\}_{i=1, \dots, n}$  在相机成像平面的二维投影点, 则有:

$$w_i \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} = K p_i^c = K \sum_{j=1}^4 \alpha_{ij} c_j^c \quad (11)$$

其中  $w_i$  是投影模型中的尺度因子, 是一个标量。将内参矩阵  $K$  以及控制点坐标  $C_j^c$  展开得到:

$$w_i \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_u & 0 & u_c \\ 0 & f_v & v_c \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \sum_{j=1}^4 \alpha_{ij} \begin{bmatrix} x_j^c \\ y_j^c \\ z_j^c \end{bmatrix} \quad (12)$$

将公式(12)展开, 消去最后一行可以得到两个线性方程:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^4 (\alpha_{ij} f_u x_j^c + \alpha_{ij} (u_c - u_i) z_j^c) = 0 \\ \sum_{j=1}^4 (\alpha_{ij} f_v y_j^c + \alpha_{ij} (v_c - v_i) z_j^c) = 0 \end{cases} \quad (13)$$

公式(13)中未知量只有4组控制点在相机坐标系下的坐标  $(x_j^c, y_j^c, z_j^c)$ , 共计12个参数。一组三维参考点和二维投影点的点对能够确定公式(13)中的两个线性方程, 当有  $n$  组匹配点对时, 记方程组为  $MX=0$ , 其中  $X$  是待求的12个未知量,  $M$  的大小为  $2n \times 12$ 。方程组  $MX=0$  的解可表示为矩阵  $M$  的零空间:

$$X = \sum_{i=1}^N \beta_i v_i \quad (14)$$

因此, 接下来只需要计算  $\beta_i$  便可得到方程组的解, 其中  $v_i$  是  $M$  的  $N$  个零奇异值对应的右奇异向量。利用控制点在世界坐标系和相机坐标系下的间距相同这个约束条件, 构建关于  $\beta_i$  的约束方程:

$$\|c_i^c - c_j^c\|^2 = \|c_i^w - c_j^w\|^2 \quad (15)$$

求出  $\beta_i, i \in [1, 4]$  后, 根据公式(10)可求出控制点在相机坐标系下的坐标  $c_j$  并恢复所有三维参考点在相机坐标系下的坐标  $p_i^c$ 。将世界坐标系的原点作为激光雷达坐标系的原点, 便可得到三维参考点分别在相机坐标系以及激光雷达坐标系下的坐标  $p_i^c$  和  $p_i^w$ 。此时问题转化为了已知匹配点对的三维坐标系外参求解问题, 可以通过最小化公式来求解:

$$E(R, t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \|p_i^w - (R p_i^c + t)\|^2 \quad (16)$$

最小化公式(16)可以得到一个解析解, 首先计算匹配点  $p_i^c$  和  $p_i^w$  的重心:

$$\begin{cases} p_c^w = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i^w \\ p_c^c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i^c \end{cases} \quad (17)$$

去除重心:

$$\begin{cases} p^c = \begin{bmatrix} (p_1^c)^T - (p_c^c)^T \\ \dots \\ (p_n^c)^T - (p_c^c)^T \end{bmatrix} \\ p^w = \begin{bmatrix} (p_1^w)^T - (p_c^w)^T \\ \dots \\ (p_n^w)^T - (p_c^w)^T \end{bmatrix} \end{cases} \quad (18)$$

令矩阵  $W = (p^c)^T p^w$ , 对矩阵  $W$  进行 SVD 分解:

$$U \Sigma V^T = SVD(W) \quad (19)$$

当  $W$  满秩时有唯一解:

$$R = UV^T \quad (20)$$

求得旋转矩阵  $R$  后, 平移向量  $T$  为:

$$T = p_c^c - R p_c^w \quad (21)$$

## 3 实验结果与分析

### 3.1 实验环境

图8为实际标定过程中的场景图像, 其中(a)图为标定板图像, (b)图是激光雷达与相机镜头的平台, (c)图为标定场景图。标定板与雷达的距离为12米。软件实验环境为 Ubuntu18.04 和 ROS 操作系统, 雷达的型号是北醒固态面阵激光雷达 CE30-D, 标定数据的采集为录制雷达和相机的 ROS 包。



图8 实际标定过程

Fig.8 Actual process of calibration

### 3.2 标定实验结果分析

图9展示了在相机图像中提取标定板内、外轮廓的最小外接矩形的结果, 其中最小外接矩形返回的信息是矩形的左上角坐标以及长和宽, 根据这些信息可以计算出标定板的四个角点以及镂空矩形、



图9 图像特征点提取结果示意图

Fig.9 Feature points extraction results of image

镂空圆形的角点坐标。从图中可以看出,提取的最小外接矩形符合实际情况,因此可以认为在二维图像中提取的特征点坐标是较为准确的。

图10展示了在激光雷达获取的三维点云中标定板的四个角点以及镂空矩形和圆形的边缘点的结果。从图中可以看出,采用直线拟合的方式补齐了由于激光雷达对标定板边缘扫描精度不高而丢失的边缘信息,提取的角点也基本符合实际情况。

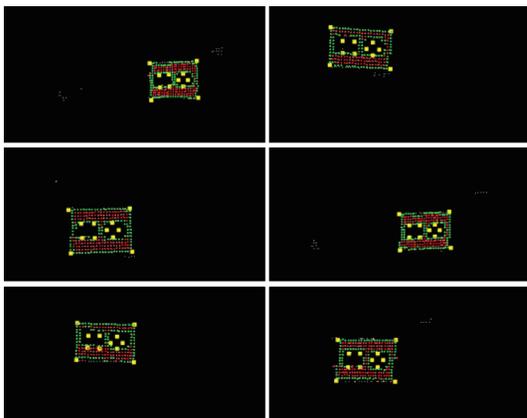


图10 三维点云特征点提取结果示意图

Fig.10 Feature points extraction results of 3D point cloud

### 3.3 点云重投影实验结果分析

为了验证可见光相机与激光雷达之间外部参数的标定精度,将标定板三维点云根据可见光相机的内部参数以及相机与激光雷达的外部参数重投影至相机平面,利用图像处理中的伪彩色方法对重投影像素按照深度值大小为其着色。

使用Autoware标定工具箱标定相机与激光雷达,并与提出的方法进行对比。图11展示了提出的标定方法与Autoware标定工具箱的实验结果差异,其中(a)组是Autoware标定工具箱的实验结果,(b)组是所提方法的实验结果。

图11中(a)组与(b)组相比,标定板区域的点云有明显的偏离。Autoware标定工具箱通过鼠标点



(a) Autoware标定工具箱实验结果



(b) 文中方法标定实验结果

图11 文中方法与Autoware标定工具箱对比实验结果

Fig.11 Comparison of experimental results between the proposed method and Autoware calibration toolbox

击图像和点云分别获取匹配点对的二维坐标和三维坐标,不可避免地产生误差,这是导致(a)组实验结果不理想的原因;而文中基于标定板的先验信息可以精确地提取同步时序的二维图像和三维点云中的特征点坐标,因此实验结果较为理想。

## 4 结 论

通过对相机和激光雷达标定方法的研究,提出一种基于EPnP算法的激光雷达与可见光相机的联合标定方法。现有标定方法大多通过对标定流程的改进以提高外参标定的精度,而忽视了特征点坐标的准确计算对外参标定的影响,文章从这方面着手以提高外参求解的精度。一方面,通过计算标定板内、外轮廓的最小外接矩形,提高了在二维图像中计算特征点坐标的精度;另一方面,通过计算标定板内、外轮廓的拟合直线,补齐了由于激光雷达对于物体边缘扫描精度不高而丢失的点云信息,进而提高了在三维点云中特征点坐标的计算精度。实验结果表明,与工业界应用广泛的Autoware标定工具箱相比,文中提出的方法能够简化复杂的标定过程、提高标定的精度,并且无需手动选取特征点。同时,文中标定算法的平均标定时间仅为683 ms,基本满足工业界应用的时效性需求。下一步将结合亚像素边缘检测的方法来研究如何进一步提高标定板内、外轮廓的提取精度,进而提高特征点坐标计算的精度。

### 参 考 文 献

[1] 黄慧妍. 无人驾驶激光雷达发射光学系统设计[J]. 光电子技术, 2018, 38(2): 127-131.  
 [2] 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.

- [3] Zhen W, Hu Y, Liu J, et al. A joint optimization approach of LiDAR-camera fusion for accurate dense 3-D reconstructions [J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2019, 4(4): 3585-3592.
- [4] 覃兴胜, 李晓欢, 唐欣, 等. 基于标定板关键点的激光雷达与相机外参标定方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(4): 400-407.
- [5] 康国华, 张琪, 张晗, 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.
- [6] 谢婧婷, 蔺小虎, 王甫红, 等. 一种点线面约束的激光雷达和相机标定方法[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2021, 46(12): 1916-1923.
- [7] Yao Y, Huang X, Lv J. A space joint calibration method for lidar and camera on self-driving car and its experimental verification[C]. 2021 6th International Symposium on Computer and Information Processing Technology (ISCIPT), Changsha, 2021: 388-394.
- [8] 陈凯阳, 李航, 彭程, 等. 一种三维激光雷达与双目相机的联合标定方法[J]. *软件导刊*, 2021, 20(12): 152-158.
- [9] Ge J, Liu C, Lv L, et al. LiDAR and camera calibration using near-far dual targets[C]. 2021 3rd International Conference on Advances in Computer Technology, Information Science and Communication (CTISC), Shanghai, 2021: 382-386.
- [10] 肖军浩, 施成浩, 黄开宏, 等. 单目相机-3维激光雷达的外参标定及融合里程计研究[J]. *机器人*, 2021, 43(1): 17-28.
- [11] 蔡式东, 杨芳. 一种基于HSV空间和粗糙集的彩色图像分割方法[J]. *光电子技术*, 2011, 31(1): 5-9.
- [12] Fischler M A, Bolles R C. Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography [J]. *Communications of the ACM*, 1981, 24(6): 381-395.
- [13] 孙殿柱, 范志先, 李延瑞. 散乱数据点云边界特征自动提取算法[J]. *华中科技大学学报*, 2008, 8: 82-84.
- [14] 王平, 周雪峰, 安爱民, 等. 一种鲁棒且线性的PnP问题求解方法[J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(9): 271-280.
- [15] Lepetit V, Moreno-Noguer F, Fua P. EPnP: Efficient perspective-n-point camera pose estimation [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2009, 81(2): 155-166.

#### (上接第 165 页)

文章从人眼凝视点位置变化的角度出发, 结合人眼视敏度模型, 提出一种基于人眼凝视点自适应的中心凹图像传输算法。该算法针对人眼凝视图像时存在大量数值相同的视角问题, 提出一种星形距离判别法, 降低求解视角的运算量, 并获得一组数量最少且数值互异的视角以及凝视点自适应的视敏度曲线。文章依据人眼低通滤波的特性, 构造高斯模糊图像集合和插值模糊图像集合, 通过关联高斯模糊图像集合和插值模糊图像集合, 获得像素和压缩比的关系图, 阐述了人眼凝视点自适应的图像融合过程, 展示了不同视距和不同凝视点位置下的人眼凝视效果图, 对比了文章所提算法和已有部分算法。实验结果表明, 基于人眼凝视点自适应的中心凹图像传输算法, 在符合人眼主观视觉感知的前提下, 去除视觉上的冗余信息, 有效地降低数据传输带宽。

#### 参 考 文 献

- [1] 刘崇进, 吴应良, 贺佐成, 等. 沉浸式虚拟现实的发展概况及发展趋势[J]. *计算机系统应用*, 2019, 28(3): 20-29.
- [2] Wallace R S, Ong P W, Bederson B B, et al. Space variant image processing [J]. *International Journal of Computer Vision*, 1994, 13(1): 71-90.
- [3] 杨中雷. 基于眼睛生理的凝视效果模拟[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- [4] Tadeja S K, Seshadri P, Kristensson P O. Aero VR: An immersive visualization system for aerospace design and digital twinning in virtual reality [J]. *The Aeronautical Journal*, 2020, 124(1280): 1615-1635.
- [5] 王季琴. 基于全局运动补偿的运动目标检测算法研究[D]. 本溪: 辽宁科技大学, 2012.
- [6] Krawczyk G, Myszkowski K, Seidel H P. Perceptual effects in real-time tone mapping [C]. *Proceedings of the 21st Spring Conference on Computer Graphics*, Zhejiang Hangzhou, 2005: 195-202.
- [7] 杜刚, 冯奇斌, 张乐, 等. 基于图像区域特征的分区调光算法[J]. *光电子技术*, 2022, 42(3): 193-201.
- [8] Foroughi S M, Gheisari M, Lo L J. Improving access to design information of paper-based floor plans using augmented reality [J]. *International Journal of Construction Education and Research*, 2021, 17(2): 178-198.
- [9] Li T S, Yu L, Wang H K, et al. A bit allocation method based on interview dependency and spatio-temporal correlation for multi-view texture video coding [J]. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 2020, 67(1): 159-173.
- [10] Yao C, Cheng D W, Wang Y. Matrix optics representation and imaging analysis of a light-field near-eye display [J]. *Optics Express*, 2020, 28(26): 39976-39997.