

# 基于 3D 特征点的激光雷达与立体视觉配准方法

陈少杰<sup>1\*</sup>, 朱振才<sup>2</sup>, 张永合<sup>1</sup>, 郭明<sup>1\*\*</sup>, 支帅<sup>1\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>中国科学院微小卫星创新研究院新技术中心, 上海 201203;

<sup>2</sup>中国科学院微小卫星重点实验室, 上海 201203

**摘要** 激光雷达和双目相机作为无人驾驶领域中重要的环境感知设备, 两者之间外参配准是其联合应用的重要基础, 然而两种信息的融合意味着繁琐的校准过程。本文提出一种基于特征点对匹配求解的方法, 采用两块矩形木板, 分别提取双目相机与激光雷达坐标系下的木板边缘 3D 点云, 拟合空间直线求取角点坐标, 最后利用 Kabsch 算法求解配对的特征点之间坐标转换, 通过聚类法对多次测量结果去除异常值后并求取平均值。通过搭建实验, 可在 Nvidia Jetson Tx2 嵌入式开发板上实现, 且能够获得准确配准参数, 验证了理论方法的可行性。此配准方法简单易行, 可自动完成多次测量, 相比于同类方法精度也有所提高。

**关键词** 激光雷达; 双目相机; 配准参数; 刚体转换

**中图分类号** TP242 **文献标识码** A

## Extrinsic Calibration for Lidar and Stereo vision by using 3D features points.

Chen Shaojie<sup>1\*</sup>, Zhu Zhencai<sup>2</sup>, Zhang Yonghe<sup>1</sup>, Guo Ming<sup>1\*\*</sup>, Zhi Shuai<sup>1\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>Innovation Academy for Microsatellites of CAS New Technology Center, Shanghai 201203, China;

<sup>1</sup>Innovation Academy for Microsatellites of CAS Key Laboratory, Shanghai 201203, China

**Abstract** Lidar and stereo cameras are important environmental sensing devices in the field of unmanned driving. The calibration of external parameters between them is an important basis for their fusion. However, the fusion of the two kinds of information means a complex calibration process. In this paper, a method based on feature point pair matching is proposed. Two rectangular planks are used to extract the 3D point cloud of the edge of the board in stereo vision and lidar coordinate system. The spaceline is used to obtain the corner coordinates. Finally, the Kabsch algorithm is used to solve the coordinate transformation between the paired feature points. The clustering method is used to remove the outliers from the multiple measurements and obtain the average value. By setting up an experiment, it can be implemented on the Nvidia Jetson Tx2 embedded development board, and the accurate registration parameters can be obtained, which verifies the feasibility of the theoretical method. This registration method is simple and easy to execute, and can automatically perform multiple measurements, which is also improved compared to similar methods.

**Key words** lidar; stereo camera; calibration parameter; rigid-body transformation

收稿日期: 年-月-日; 修回日期: 年-月-日; 录用日期: 年-月-日 (格式保留, 具体日期不用填写)

基金项目: 上海市自然科学基金项目(16ZR1434800)、中科院国防科技创新基金(CXJJ-17S012)

\*E-mail: 1084010191@qq.com; \*\*E-mail: googlm@163.com; \*\*\*E-mail: zhishuai0705@163.com

# 1 引言

近年来,无人车行业迅速发展,预计到 2021 年,无人车将进入市场,从此进入新的阶段。无人车系统主要分为三个部分:算法端、Client 端、云端。其中算法端主要任务是:利用传感器获取原始数据并从中提取有用的信息以便了解周围环境状况,进而根据环境具体状况做出判断。无人驾驶中通常所使用的传感器包括:全球定位系统(GPS)、惯性测量单元(IMU)、激光雷达、摄像头等。GPS 与 IMU 融合是无人车里程计的主要数据来源,激光雷达与摄像头融合是环境感知、目标检测的主要设备。激光雷达测距远、精度高,但信息量少,无法获得颜色信息,目标检测受限,需融合视觉信息,形成优势互补。摄像头又可分为单目相机、双目相机、深度相机(RGB-D)相机。单目相机具有尺度不确定性,有一定局限性。RGB-D 相机分辨率低,且只适应于室内环境。双目相机不仅具有单目相机的全部优点,还可以通过视差感知深度信息。因此激光雷达与双目相机融合具有一定优势,本文主要涉及激光雷达与双目相机的配准。

目前激光雷达与相机配准的方法主要分为两大类:一是通过提取点、线等特征集,然后通过雷达点云与图像特征之间的匹配,求解两者之间的配准参数<sup>[1-5]</sup>。二是通过计算雷达点云与相机的图像之间的互信息损失函数,然后利用优化算法求解配准参数<sup>[6-10]</sup>,但此类方法只适用于传感器位移及旋转较小时。还有一些通过将 SFM 算法用于参数配准<sup>[11]</sup>,但其需要多个辅助摄像头,对硬件成本要求较高。

本文提出的方法属于通过提取特征点匹配求解,可以通过简单的实验装置,快速有效的求得激光雷达与双目相机之间的配准参数,为激光雷达与立体视觉数据融合提供基础。

## 2 基本原理

求解激光雷达与双目相机之间的配准参数,需要提取一组对应的雷达与相机各自坐标系下的 3D 点,我们选取两块木板的八个角点作为待求解的点。双目相机与激光雷达的角点提取采用相似的处理流程,即都是通过提取木板边缘 3D 点并拟合对应的直线,求取直线交点。下面将介绍算法的具体操作流程。

### 2.1 双目相机特征点提取

双目立体视觉模拟人类视觉处理景物方式,融合两只眼睛获得的图像并观察它们之间的差别,使我们可以感知深度。将空间中同一物理点在不同图像中的像素点匹配起来,建立特征间的对应关系,形成视差(Disparity)图。关于视差图计算,有很多种方法,其中最经典的就是 Semi-Global Matching (SGM) <sup>[12]</sup>,可以发现目前排名靠前的算法中,很多都是对 SGM 的改进,具有最强的实用价值。综合考虑效果与计算速度,选取 SGM 的一种改进算法: Semi-Global Block Matching (SGBM),通过此方法可以获得较精确的视差图,其算法整体框架如图 1 所示。

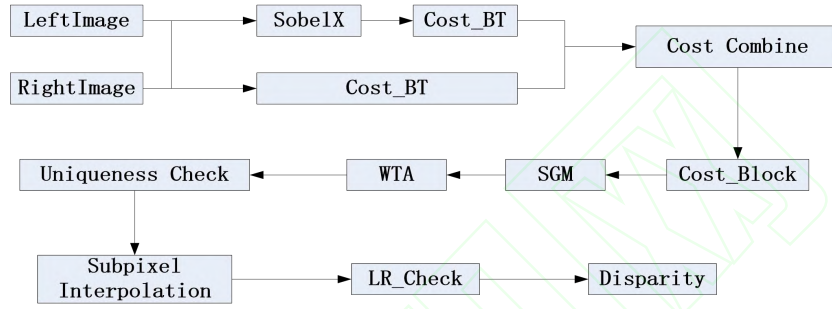


图1 SGBM算法框架

Fig. 1SGBM algorithm framework

在获得视差图的基础上,通过相机内参计算出深度,并进而计算出点云 x、y、z 坐标。具体转换原理如图 2 (a) 所示,  $P_1$ 、 $P_2$  为空间点 P 分别在左右像平面上的成像点,  $f$  为相机焦距(左右相机一样),  $O_L$ 、 $O_R$  分别为左右相机的光心。b 为基线,表示两光心之间的距离。XL、XR 分别为两个成像点距离各自所在图像的左边缘距离,  $X_L$  与  $X_R$  的差值成为视差。

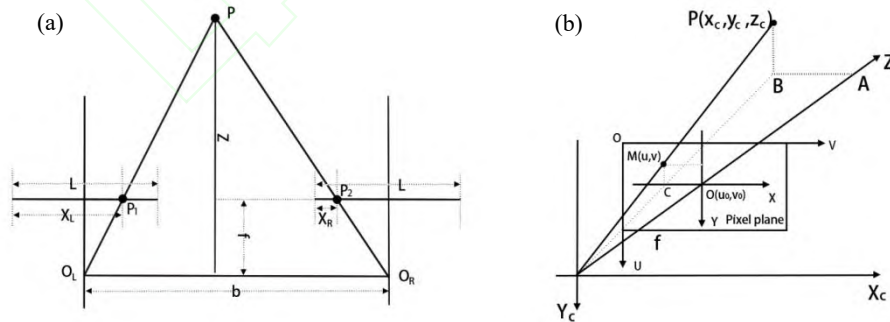


图2 成像系统 (a) 视差与深度几何关系; (b) 像素坐标到空间点;

Fig. 2Imaging system. (a) parallax and depth geometry; (b) pixel coordinates to spatial points

根据三角形相似原理可求得

$$Z = \frac{b * f}{X_L - X_R}, \quad (1)$$

其中  $X_L - X_R$  为视差值。若左右目相机内参中  $c_x$  不一致，深度值需修改为

$$Z = \frac{b * f}{(X_L - X_R) + doffs}, \quad (2)$$

式中：  $doffs$  为两个相机主点在  $x$  方向上的差距：  $c_{x1} - c_{x0}$ 。

求得的  $Z$  为深度值，也即使点云对应的  $Z$  轴坐标，继续求出  $X$  与  $Y$  轴坐标，即可获得点云空间坐标。如图 2（b）所示根据空间几何关系可得：

$$\begin{cases} X_c = \frac{(u - u_0)Z_c}{f} \\ Y_c = \frac{(v - v_0)Z_c}{f} \end{cases}, \quad (3)$$

式中：  $u_0$ 、  $v_0$ 、  $f_x$ 、  $f_y$  为相机内参，  $u$ 、  $v$  为待求点云在视差图上的像素坐标。

按照从左到右逆时针的顺序，依次提取图像中木板边缘，根据像素坐标可提取对应空间点云，利用随机抽样一致性算法（RANSAC）算法拟合点云的直线<sup>[13-14]</sup>。由于存在误差，拟合出的两条空间直线可能不会相交，我们选用直线间最短线段的中点作为待求的角点。

## 2.2 激光雷达特征点提取

目前激光雷达的特征提取有很多的方法与应用，如文献[15-17]中所采用的方法。本文激光雷达特征点提取选取的方法与双目相机提取过程类似。激光雷达默认坐标系  $Z$  轴朝上、 $X$  轴朝前，而双目相机坐标系  $Z$  轴朝前、 $X$  轴朝右，首先需要通过一个初始旋转矩阵  $R_0$  将雷达点云旋转至与双目相机坐标轴方向大致相同，方便后续操作，例如先绕  $X$  轴旋转-90 度，在绕  $Y$  轴旋转 90 度。

关于激光点云，按照<sup>[18]</sup>中的方法找到深度不连续性。木板平面中的每个点，被赋予一个幅度，表示相对于其邻居的深度差异，并设置一个差异阈值保留木板边缘上的点云。对于空间上点较难直接分割出边缘各自对应的点云，然而平面上的点去相对容易分割。可以利用所设置的初始旋转矩阵  $R_0$  与左目相机内参将过滤后的点云映射到相机左目像素平面上，此过程通过式（4）来计算完成，使得点云空间坐标与像素点联系在一起，可以达到选取像素点也就获得了对应点云空间坐标的目的。

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}, \quad (4)$$

从左到右逆时针依次框选木板的边缘，然后拟合直线，求取角点。其顺序与相机边缘拟合求解一致，目的是便于两者之间角点匹配。

## 2.3 配准参数求解

### 2.3.1 Kabsch 算法求解过程

用  $M$ 、 $N$  分别表示两组对应的点云， $M_i$ 、 $N_i$  分别表示  $M$ 、 $N$  集合内的点。那么优化的目标为

$$\min(E) = \sum_{i=1}^n \| (RM_i + t) - N_i \|^2, \quad (5)$$

对  $t$  求偏导，并令等式为零，得

$$t = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n M_i - R \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_i, \quad (6)$$

$$t = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n M_i - R \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_i, \quad (7)$$

(7) 代入优化目标函数 (5)，并令  $X_i = (M_i - \bar{M})$ ， $X' = RX$ ， $Y_i = (N_i - \bar{N})$  得

$$\sum_{i=1}^n \|X_i + Y_i\|^2 = \text{Tr}((X' - Y)^T (X' - Y)), \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^n \|X_i + Y_i\|^2 = \text{Tr}(X'^T X') + \text{Tr}(Y^T Y) + \text{Tr}(Y^T X'), \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^n \|X_i + Y_i\|^2 = \sum_{i=1}^n (|X_i|^2 + |Y_i|^2) - 2\text{Tr}(Y^T X'), \quad (10)$$

由 (10) 可知，求 (5) 最小值，相当于求  $\text{Tr}(Y^T X')$  最大值。

因为  $X' = RX$ ，所以

$$\text{Tr}(Y^T X') = \text{Tr}(Y^T R X) = \text{Tr}(X Y^T R), \quad (11)$$

对  $XY^T$  做奇异值分解 (SVD)，有

$$\text{Tr}(\mathbf{XY}^T \mathbf{R}) = \text{Tr}(\mathbf{UDV}^T \mathbf{R}) = \text{Tr}(\mathbf{DV}^T \mathbf{RU}) = \sum_{i=1}^3 d_i \mathbf{v}_i^T \mathbf{R} \mathbf{u}_i, \quad (12)$$

令  $\mathbf{Z} = \mathbf{V}^T \mathbf{RU}$ ，则有

$$\text{Tr}(\mathbf{Y}^T \mathbf{X}') = \sum_{i=1}^3 d_i \mathbf{Z}_{ii} \leq \sum_{i=1}^3 d_i, \quad (13)$$

因为  $\mathbf{R}$  和  $\mathbf{U}$  都是正交阵，所以  $\mathbf{Z}$  也为正交阵，则有  $\det(\mathbf{Z}) = \pm 1$

令  $\mathbf{Z}_{ii} = 1$ ，则有

$$\mathbf{Z} = \mathbf{I} \Rightarrow \mathbf{V}^T \mathbf{RU} = \mathbf{I} \Rightarrow \mathbf{R} = \mathbf{V} \mathbf{U}^T, \quad (14)$$

$\mathbf{R}$  必须是右手系下的旋转，因此(18)式修正为

$$\mathbf{R} = \mathbf{V} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & d \end{bmatrix} \mathbf{U}^T, \quad (15)$$

式中：  $d = \text{sign}(\det(\mathbf{UV}^T))$ 。

由于最初对雷达点云做过一次旋转变换，所以此处求解得到的旋转矩阵  $\mathbf{R}$  需乘上初始旋转变换才能得到最终激光雷达与双目的配准参数。

### 2.3.2 多次配准减少噪声影响

即使双目相机保持不动，在静止的封闭房间内，通过实时显示双目相机建立的点云，我们可以发现，点云并不是静止的，来自雷达的点云同样也是有一定的浮动范围。为了减少噪声影响，在程序运行中多次估计旋转和平移参数。

经过  $N$  次求解，对所有配准参数进行聚类去除异常值后求取均值作为最终的最优结果。对于旋转矩阵的均值求解不太容易，且由于四元数可以直接累加，因此可以先把旋转矩阵转换为四元数。四元数与旋转矩阵之间转换关系如下：

设四元数  $\mathbf{q} = q_0 + q_1 i + q_2 j + q_3 k$ ，对应的旋转矩阵  $\mathbf{R}$  为

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1-2q_2^2-2q_3^2 & 2q_1q_2-2q_0q_3 & 2q_1q_3+2q_0q_2 \\ 2q_1q_2+2q_0q_3 & 1-2q_1^2-2q_3^2 & 2q_2q_3+2q_0q_1 \\ 2q_1q_3-2q_0q_2 & 2q_2q_3-2q_0q_1 & 1-2q_1^2-2q_2^2 \end{bmatrix}, \quad (16)$$

反之，假设  $\mathbf{R} = \{m_{ij}\}$ ， $i, j \in [1, 2, 3]$ ，其对应四元数  $\mathbf{q}$  为

$$q_0 = \frac{\sqrt{\text{tr}(\mathbf{R})+1}}{2}, \quad q_1 = \frac{m_{23}-m_{32}}{4q_0}, \quad q_2 = \frac{m_{31}-m_{13}}{4q_0}, \quad q_3 = \frac{m_{12}-m_{21}}{4q_0}, \quad (17)$$



由于事实上一个旋转矩阵对应的四元数表示不唯一，还有其他一些转换方式，且当  $q_0$  接近 0 时，其余三分量会非常大，导致解不稳定需考虑其他解法，此处不再赘述。

### 3 实验环境搭建

本文所提出的方法中使用速腾聚创的 RS-LiDAR-16 激光雷达，相机机采用 ZED 双目，其主要由两个高分辨率镜头组成，可通过 GPU 加速计算。

实验装置为两块矩形木板，提供 8 个角点，方便提取特征点对。图 3 为装置图，为了避免周围物体的影响，通过将绳子固定在木板背面，倾斜放置，使木板竖直悬挂在空中。激光雷达与双目相机大概位于两块木板平面正前方 2m 左右，与木板中心大概处于同一水平面。这样做的目的是保证木板每条边都可以包含一定数量的雷达扫描线，以及木板位于双目相机的成像区域。另外，在开始矫正前，相机的内参为已知条件。

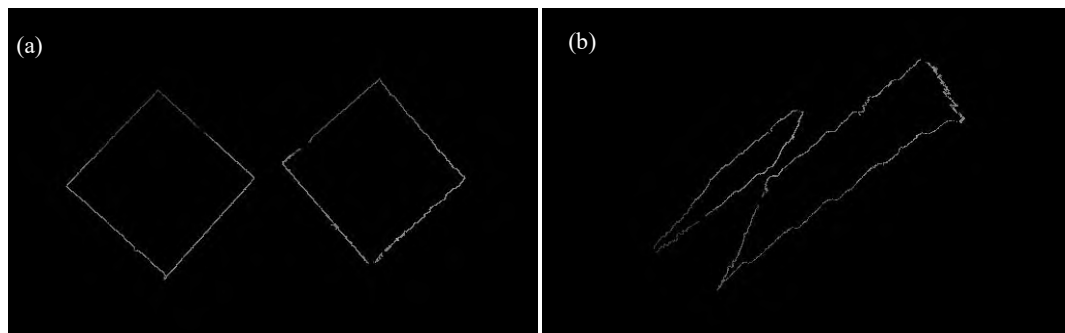


图3 实验装置图。(a) 木板设置图；(b) 激光雷达与双目相机放置图

Fig. 3 Experimental device diagram. (a) board setting diagram; (b) lidar and binocular camera placement diagram

### 4 实验结果

通过双目相机提取的木板边缘点云如图 4 (a)、(b) 所示，(a)、(b) 分别为同一提取结果的不同视角图。激光雷达提取边缘点云映射到像素平面上，并通过鼠标框选依次提取边缘对应雷达点云的效果如图 4 (c) 所示。



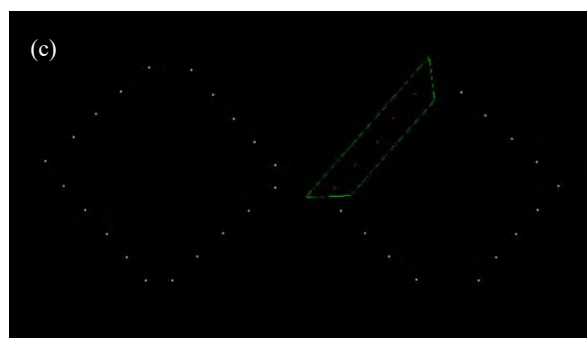


图4 边缘提取。(a) (b) 双目相机边缘提取结果的不同视角；(c) 激光雷达点云框选图

Fig. 4 Edge extraction. (a) (b) stereo camera edge extraction results; (b) lidar point cloud frame selection

我们采用三种方法来查看融合结果：一是，直接通过联合标定的外参融合激光雷达与双目相机的各自产生的点云；二是，通过将雷达点云通过相机的内参与联合标定的外参将激光雷达点云映射到双目相机的左目图像中；三是，通过相机与雷达外参传递，融合两个不同视角的双目点云，从而评估外参的准确性。

#### 4.1 结果验证

方法一：点云融合结果如图 5 所示，在两种不同场地上的结果，其中线条状点云为雷达获得的精确点云。从整体上、以及各个物体轮廓部分点云融合结果来看，从过本文提出的方法可以有效的对激光雷达与双目相机进行配准。

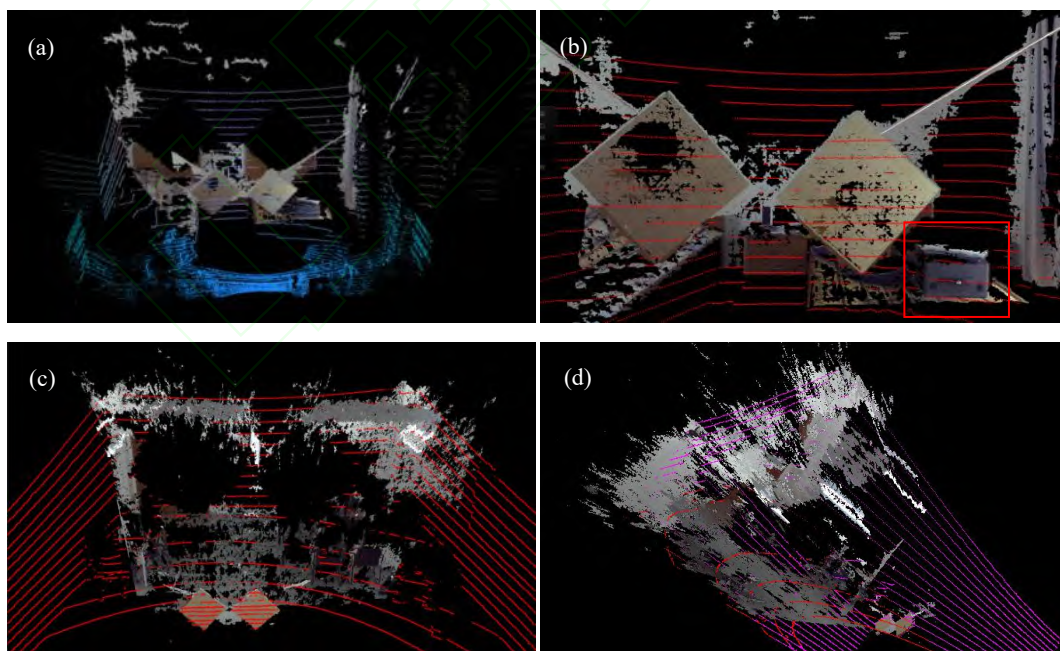


图5 两个场景下融合的不同视角。(a) (b) 场景一；(c) (d) 场景二

Fig. 5 Different perspectives of fusion in two scenarios. (a) (b) scenario one; (c)(d) scenario two

上图融合结果的意义在于：可以将视觉图像与雷达精确点云联合在一起，以达到通过图像目标检测并获得空间点云等不同应用的目的。例如图 5 (b) 方框中物体，单靠雷达难以



识别目标，联合双目后可以方便获取目标，并且可以融合雷达对应区域的准确点云数据。

方法二：为了体现效果，通过将木板上的雷达点云重投影到左目图像上进行轮廓比对，如图 6 所示。可以看到，通过雷达获得的木板像素点与通过双目成像的木板像素点轮廓吻合较好，说明配准参数比较准确。



图6 雷达点云变换后映射到左目图像

Fig. 6: Mapped to the left eye image after radar point cloud transformation

方法三：首先获得雷达与双目视角一的配准外参  $T_{LC1}$ ，保持雷达固定，移动双目相机，转换视角，获得配准外参  $T_{LC2}$ ，则两不同视角下的点云转换外参为  $T_{C2C1} = T_{LC1} \cdot T_{LC2}^{-1}$ 。两种双目视角左视图及融合结果如图 7 所示。



图7 双目两个不同视角点云融合。(a) (b) 两个视角的左视图；(c) 点云融合结果

Fig. 7 Fusion of two point clouds from different perspectives in stereo camera. (a) (b) left view of two perspectives; (c) the result of point cloud fusion

通过融合结果图中的木板、绳子、地面等物体轮廓，可以看出求得的配准参数很准确。此外，这种验证方法，也是配准参数的应用之一，可以通过此方法融合两个不同视角的双目相机，以达到扩大视场角的目的。

由以上三种方法验证结果可以看出，利用本文提出的方法可以很准确的获得激光雷达与双目相机的配准参数。

## 4.2 结果比较

为了体现本文方法的优越性，将与论文[4]中特征点匹配求解的方法进行比较。本文与[4]属于同种类型的方法，即都为通过提取特征点然后进行匹配参数求解。本文与[4]中方法主要区别有两部分：一是特征点提取方式不同，二是配准参数求解方法不同。[4]中采取拟合圆，提取圆心点对的方式，并通过 Iterative Closest Points (ICP) 的方法求解配准参数。由于本文是按照一定顺序（如逆时针提取边缘，并依次求取角点）提取角点，所以提取出的两组点匹配关系已知，可以直接采用 Kabsch 的算法进行求解，从而避免使用 ICP 算法求解陷入局部最优解的可能。

本文将采用两种比较方法，一是理论分析比较，二是结果图直观比较。

理论分析：首先[4]中采用带有四个圆形孔洞的大矩形平面木板，且其方法中对于木板平面的提取是直接在 XY 平面上进行提取并进而拟合圆心，意味着传感器坐标系 Z 轴必须与木板垂直，较容易引入不必要的误差。另外论文中方法拟合圆心所用的点太少，容易产生较大误差，如图 8 所示。若要产生更多的点，则相对需使圆形更大，意味着大木板尺寸太大而不宜实施。其次仅通过 4 个匹配点求取配准参数，可能会产生较大误差。本文中，在保证精度的前提下，装置容易设置，方便操作，同时通过 8 个匹配点求解得到的配准参数将更加准确。

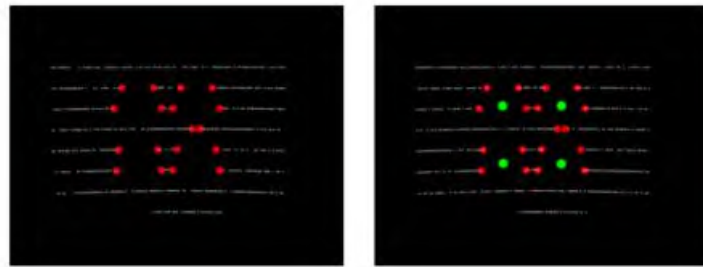


图8 论文[4]中方法融合结果图

Fig. 8 Method fusion result graph in paper [4]

结果展示：论文[4]中方法中融合结果如图 9 所示，从右侧圈出的三角形区域中可以看出映射到图像上的点云存在一些偏差，与本文结果图 6 进行比较，可以发现本文提出的方法有一定的优势。

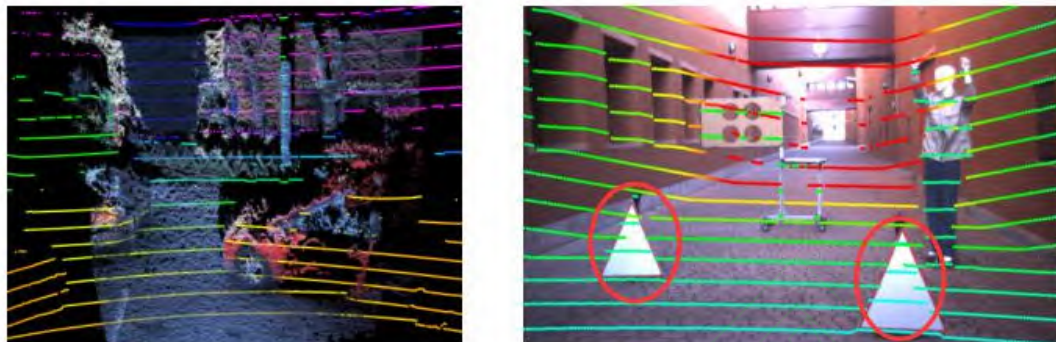


图9 论文[4]中方法融合结果图

Fig. 9 Method fusion result graph in paper [4]

## 5 结 论

本提出了一种基于 3D-3D 特征点的激光雷达与双目相机的外参配准方法。在已知双目相机的内参情况下，通过 SGBM 方法恢复视差图并获得点云，边缘提取算法提取木板边缘，拟合边缘求取木板角点，获得双目相机坐标系下的 3D 特征点；对于激光雷达，首先映射其点云到左目图像上，选取木板边缘对应的点云，拟合直线求取木板角点。最后利用 Kabsch 算法对两种途径提取的配对特征点云进行配准，准确求解激光雷达与双目相机之间的配准参数。此示方法实验装置简单，方便搭建。

## 参考文献

- [1] Zhou L, Li Z, Kaess M. Automatic Extrinsic Calibration of a Camera and a 3D LiDAR using Line and Plane Correspondences[C]//IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2018: 5562-5569.
- [2] Geiger A, Moosmann F, Car O, et al. Automatic camera and range sensor calibration using a single shot[J]. Proceedings-IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2012:3936-3943.
- [3] Guindel C, Beltrán J, Martín D, et al. Automatic extrinsic calibration for lidar-stereo vehicle sensor setups[C]//IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). 2017: 1-6.
- [4] Velás M, Španel M, Materna Z, et al. Calibration of rgb camera with velodyne

lidar[J].communication papers proceedings, 2014.

- [5] Castorena J, Kamilov U S, Boufounos P T. Autocalibration of lidar and optical cameras via edge alignment[C]//IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). 2016: 2862-2866.
- [6] Xia P F, YIN H L, He Y X. Registration of Lidar and Camera Based on Maximum Mutual Information[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018(1):34-41.  
夏鹏飞,尹慧琳,何艳侠. 基于最大互信息的激光雷达与相机的配准[J]. 仪器仪表学报, 2018(1):34-41.
- [7] Taylor Z, Nieto J. Automatic calibration of lidar and camera images using normalized mutual information[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2013.
- [8] Pandey G, McBride J R, Savarese S, et al. Automatic targetless extrinsic calibration of a 3d lidar and camera by maximizing mutual information[C]//Twenty-Sixth AAAI Conference on Artificial Intelligence. 2012.
- [9] Levinson J, Thrun S. Automatic Online Calibration of Cameras and Lasers[C]//Robotics: Science and Systems. 2013, 2.
- [10] John V, Long Q, Liu Z, et al. Automatic calibration and registration of lidar and stereo camera without calibration objects[C]//IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety (ICVES). 2015: 231-237.
- [11] Bok Y, Choi D G, Kweon I S. Generalized laser three-point algorithm for motion estimation of camera-laser fusion system[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2013: 2880-2887.
- [12] Hirschmuller H. Stereo processing by semiglobal matching and mutual information[J]. IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence, 2008, 30(2): 328-341.
- [13] Consensus R S. A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography[J]. MA Fischler, RC Bolles, 1981, 6: 381-395.
- [14] Sorkine-Hornung O, Rabinovich M. Least-squares rigid motion using svd[J]. Computing, 2017, 1(1).
- [15] Wang D L, Li Y. Lidar Point Cloud Building Edge Extraction Based on Rotation Difference Kernel Estimation[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(01):196-209.  
王岱良, 李玉. 基于旋转差值核估计的激光雷达点云建筑物边缘提取[J]. 中国激光, 2019, 46(01):196-209.
- [16] Miao S, Wang J J, Li Y L, et al. Automatic Extraction of Edge Line of Laser Point Cloud Based on Buildings to Improve DSM Accuracy[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, v.55;No.624(01):399-405.  
苗松, 王建军, 李云龙, et al. 基于建筑物激光点云边缘线自动提取提高DSM精度[J]. 激光与光电子学进展, 2018, v.55;No.624(01):399-405.
- [17] Chen G B, Gao Z H, He L. A Step-by-Step Automatic Calibration Method for External Parameters of Vehicle-borne 3D Lidar[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017(10):249-255.  
陈贵宾, 高振海, 何磊. 车载三维激光雷达外参数的分步自动标定算法[J]. 中国激光, 2017(10):249-255.
- [18] Levinson J, Thrun S. Automatic Online Calibration of Cameras and Lasers[C]//Robotics: Science and Systems. 2013, 2.



## 网络首发:

**标题:** 基于3D特征点的激光雷达与立体视觉配准方法

**作者:** 陈少杰,朱振才,张永合,郭明,支帅

**收稿日期:** 2019-07-10

**录用日期:** 2019-07-29

**DOI:** 10.3788/lop57.030102

## 引用格式:

陈少杰,朱振才,张永合,郭明,支帅. 基于3D特征点的激光雷达与立体视觉配准方法[J]. 激光与光电子学进展,2020,57(03):030102.

网络首发文章内容与正式出版的有细微差别, 请以正式出版文件为准!

---

## 您感兴趣的其他相关论文:

### 基于激光点云与建筑信息模型技术的复杂船舱容积计算方法

邬镇伦 程效军 辛佩康 张立朔 胡敏捷

同济大学测绘与地理信息学院, 上海 200092

激光与光电子学进展,2019,56(5):052802

### 结合不同极化数据的海冰漂移检测

张明 王军凯 吕晓琪 张晰 李菁 刘根旺 张婷

内蒙古科技大学信息工程学院, 内蒙古自治区模式识别与智能图像处理重点实验室, 内蒙古 包头 014010

激光与光电子学进展,2019,56(10):101008

### 激光雷达探测气溶胶光学特性的不确定性因素研究

项衍 刘建国 张天舒 吕立慧 付毅宾

中国科学院安徽光学精密机械研究所环境光学与技术重点实验室, 安徽 合肥 230031

激光与光电子学进展,2018,55(9):092801