

# 三维点云与可见光图像融合方法及可视化

张佳<sup>1</sup>, 唐义<sup>1\*</sup>, 卞子煜<sup>2</sup>, 孙天宇<sup>1</sup>, 钟凯杰<sup>2</sup>

<sup>1</sup>北京理工大学光电学院光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081;

<sup>2</sup>苏州朗晖光电科技有限公司, 江苏 苏州 215300

**摘要** 鉴于三维点云缺少颜色信息和光学图像缺少空间信息, 提出一种基于激光雷达与相机自动标定的融合方法, 融合后的数据兼有点云的空间信息和光学图像的颜色纹理信息。首先利用平面标定板对激光雷达和光学相机进行分步式自动标定, 其次通过共线方程建立坐标关系, 将光学图像的颜色纹理信息赋予点云进行融合并进行可视化。实验结果表明: 所提方法在提高自动化程度的同时也在一定程度上提高了融合精度; 与基于人工匹配的标定融合方法相比, 所提方法的精度提升了 51.7%; 与基于梯形棋盘格标定板的标定融合方法相比, 所提方法的精度提升了 36.4%。从多角度观测可视化结果, 所提方法都能从颜色和空间效果方面更好地还原真实场景。

**关键词** 激光雷达; 光学相机; 系统标定; 点云与光学图像融合

中图分类号 TH74 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP220566

## Fusion and Visualization of Three-Dimensional Point Cloud and Optical Images

Zhang Jia<sup>1</sup>, Tang Yi<sup>1\*</sup>, Bian Ziyu<sup>2</sup>, Sun Tianyu<sup>1</sup>, Zhong Kaijie<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System, Ministry of Education, School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

<sup>2</sup>Longrays Photoelectric Technology in Suzhou Co., Ltd., Suzhou 215300, Jiangsu, China

**Abstract** Due to the lack of color information of three-dimensional point cloud and spatial information of optical images, a fusion method based on lidar and camera automatic calibration is proposed in this work. The fused data contains both the spatial information of the point cloud and color texture information of the optical images. First, the planar calibration plate was used to automatically calibrate the lidar and optical camera in steps. Second, the coordinate relationship was established through a collinear equation, and the color texture information of the optical image is given to the point cloud for fusion and visualization. The experimental results show that the fusion accuracy and the level of automation of the proposed method are improved. Compared to the calibration fusion method based on manual matching, the accuracy of the proposed method is improved by 51.7%. Compared to the calibration fusion method based on a trapezoidal checkerboard calibration board, the accuracy of the proposed method is improved by 36.4%. Considering the visualization results from multiple angles, the proposed method can better restore the color and spatial effects of real scenes.

**Key words** lidar; optical camera; system calibration; fusion of point cloud and optical image

## 1 引言

近年来随着激光雷达设备的不断完善, 三维点云和可见光图像的融合技术日益成为研究热点。三维点云具有丰富的空间和反射率信息且不易受外界光照的影响, 但是分辨率低, 缺少真实的纹理和色彩信息。相反, 光学图像具有真实的纹理信息和色彩信息, 具有较高的分辨率, 但是在采集过程中受光照影响较大, 且不

能从中获取空间距离信息。因此快速准确地将可见光图像与三维点云图像融合可以极大地发挥两者的优势, 提升数据的信息量, 从而提高系统的整体性能。二者的融合结果可以实现对三维世界的真彩色表达, 融合可视化结果在多个领域具有重要意义。一方面, 可视化结果可以用于构建三维实景模型, 如在文物古迹保护方面, 真彩色点云可以完整保存本体数据, 为文物古迹的保护与修复提供信息支持<sup>[1]</sup>; 在智慧城市构建

收稿日期: 2022-01-10; 修回日期: 2022-01-17; 录用日期: 2022-01-21; 网络首发日期: 2022-02-08

基金项目: 预先研究基金(41415020205, 61424080213)

通信作者: \*tangyi4510@bit.edu.cn

方面,可视化结果可以用于三维可视化空间分析技术,在土地利用规划和城市建设等方面能够产生巨大的商业效益<sup>[2]</sup>。另一方面,融合后的点云具有7个维度的信息,能从中较好地地区分地面地物与非地面地物。伴随空天地一体化观测技术的发展,可视化结果对地物分类识别、自然资源分布研究有着重要意义<sup>[3]</sup>。另外,在军用方面,伴随着战争环境复杂性加剧,可视化结果可以为战争中目标场景分析提供更加全面完整的信息,实现全天候作战和提高制导武器精度<sup>[4]</sup>。

目前三维点云与光学图像融合方法有共线方程法、直接线性变换法、角锥体法等<sup>[5-6]</sup>。根据点云在图像中所对应的像素坐标,将像素值赋予对应点云,从而实现二者的融合。因此对三维点云和可见光图像进行融合,通常是以标定激光雷达和相机两种传感器为前提的<sup>[7]</sup>。该方法需要建立起两种传感器之间的数据关联,进而求解出激光坐标系和相机像素坐标系之间的几何映射关系,利用此关系进行匹配融合,获取三维彩色点云<sup>[8]</sup>。在激光雷达和相机联合标定前首先要对相机进行标定,张正友标定法<sup>[9]</sup>使用简便、成本低廉、稳定性好、精度高,得到了广泛的应用。国内外对系统标定进行了很多尝试。Scaramuzza等<sup>[10]</sup>提出手动匹配法,通过人为选取对应的三维点云和二维像素点来得到激光雷达和相机的外参关系。Unnikrishnan等<sup>[11]</sup>和浙江大学项志宇等<sup>[12]</sup>利用平面棋盘格建立平面约束,通过改变棋盘格标定板的位置完成系统标定。贾子永等<sup>[13]</sup>设计了一款梯形棋盘格标定板,该标定板由棋盘格矩形和空白三角形组成。其中三角形部分用于获取激光雷达安装的俯仰角和高度,黑白棋盘格用于相机内外参标定,最后结合激光雷达数据点和图像像素坐标的关系进行联合标定。Tóth等<sup>[14]</sup>提出一种使用球面目标自动标定激光雷达-相机系统的方法。Yuan等<sup>[15]</sup>提出了一种不依赖标定板,根据实验环境中的线特征实现像素级相机和激光雷达自动标定的方法。尽管上述方法已经取得了较多成果,但仍存在一些不足:

通过人工筛选同名点的交互性方法的整个过程自动化程度和精度较低;基于立体标定板和标定物的方法需要专门设计和制作复杂的标定物;而依赖环境特征的方法对环境场景要求较高。

本文提出了一种基于平面标定板的分步式激光雷达与相机自动标定方法,避免了以往联合标定需要人工选择特征点而造成误差较大的问题,同时不需要专门制作复杂的标定板,操作简单,可实施性强。利用系统标定结果和共线方程实现对三维点云和光学图像的融合并进行可视化。实验结果表明,所提方法可以获得更高精度的联合标定参数,实现了对三维点云和二维光学图像的融合,融合后的点云被赋予光学图像的颜色属性。与基于人工匹配的标定融合方法和基于梯形棋盘格标定板的标定融合方法相比,所提方法的精度分别提升了51.7%和36.4%。所提方法的可视化结果能够更加真实地还原真实场景,在后续点云目标识别、实景建模、地物分类等处理过程中有重要应用。

## 2 基本原理

实现三维点云和可见光图像的融合通常是以标定激光雷达和相机系统为前提的。提出一种基于平面板的激光雷达与相机系统的自动标定方法,通过自动提取同名特征点对系统进行标定。通过Canny算子和改进的Douglas-Peucker算法提取光学图像中的特征点,同时提出一种基于RANSAC算法的空间直线交点求解方法来提取点云图像中的同名特征点。将系统标定得到的映射矩阵参数代入共线方程,获得三维点云在光学图像中对应点的像素坐标,将对应像素的R、G、B信息赋值给点云实现融合。最后应用基于visualization toolkit(VTK)的点云库(PCL)对结果进行可视化,得到不同观测角度的空间立体真彩色点云图。具体流程如图1所示,首先对可见光相机进行内参标定,其次应用上述方法对激光雷达-相机系统进行系统联合标定,最后应用共线方程实现对三维点云和

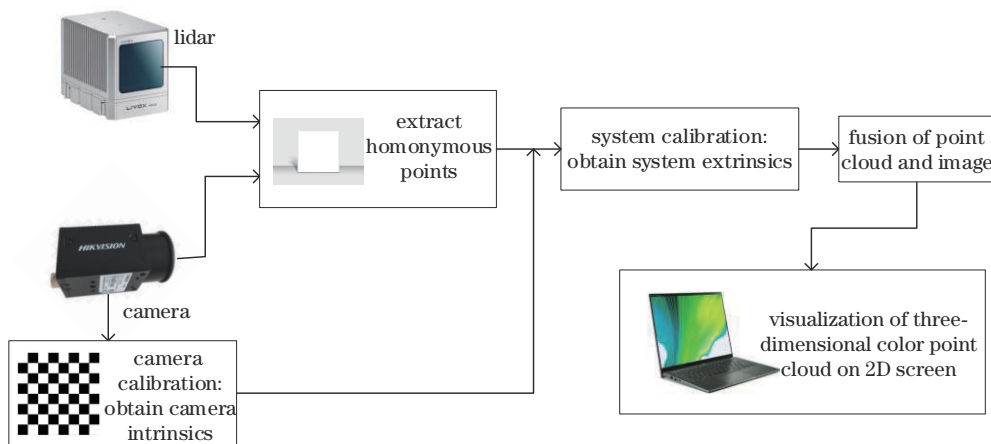


图1 三维激光点云与光学图像融合流程

Fig. 1 Fusion process of 3D laser point cloud and optical image

二维光学图像的融合,并对融合结果进行可视化。

## 2.1 激光雷达相机系统标定

对于激光雷达和相机系统,在共同视野范围内,激光雷达分辨率低于相机分辨率,因此每一个三维点云都有唯一的图像像素点与之对应,即激光雷达与相机系统的外参标定可以理解为求解三维激光雷达点云与图像像素点之间的映射矩阵。首先利用稳定性好、精度高的张正友标定法对相机进行标定,得到相机的内参矩阵;在相机标定完成后,从点云和光学图像中各自获取对应的特征点坐标,将外参标定转换为 perspective- $n$ -point(PNP)求解映射矩阵问题。标定原理如图 2 所示。

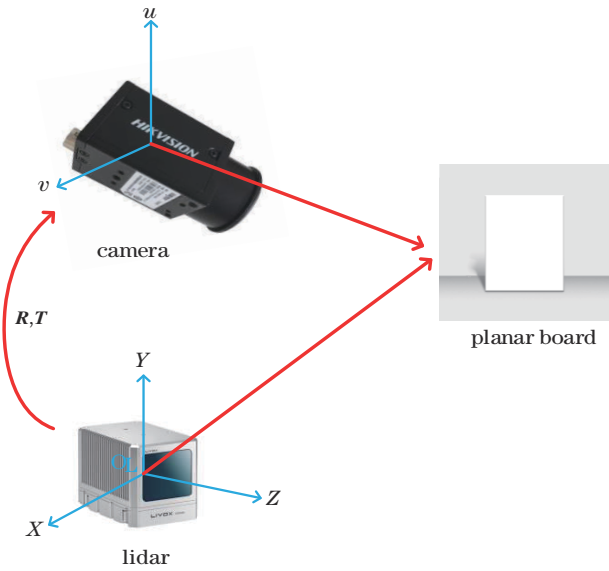


图 2 标定原理图

Fig. 2 Calibration schematic

当前在提取特征点的过程中需要大量的人工参与,通过人工进行特征点的提取。但由于信息量的匮乏和点云无规则且不连续的特性,即使有人工参与也不能保证控制点的精度。即使是光学图像,人工提取特征点也会产生一定的误差,会对后续的标定和融合结果产生很大影响。因此为精确提取同名特征点,提出一种基于平面标定板的特征点自动提取方法,即分别从光学图像和点云图像中提取平面板的四个顶点,以此作为特征点进行标定。

针对光学图像中的特征点,选用 Canny 算子和改进的 Douglas-Peucker 算法来获得特征点在图像坐标系中的坐标。首先通过 Canny 算子对图像进行低阈值边缘检测,查找图像中各个物体的轮廓;之后运用改进的 Douglas-Peucker 算法对图像中的轮廓进行多边形拟合,并用设置条件进行筛选,最终筛选出平面标定板的矩形轮廓。筛选条件可依据平面板特点对面积阈值、角度、标定板长宽比等进行设置而获得。其中,面积和长宽比需要根据标定板大小进行预判,从而设定适合标定板的面积阈值和长宽比范围。角度可以依据

轮廓中两两相邻直线夹角的余弦绝对值设定。最后提取筛选出的矩形轮廓的顶点坐标,所得即为光学图像中特征点的坐标。

针对三维点云中的特征点,应用一种基于 RANSAC 算法的空间直线交点求解方法,以此求解出同名特征点的三维空间坐标。首先应用 RANSAC 算法在场景中分割出标定板平面,同时计算平面法向量来提取平面板边缘点最外围的边界轮廓;然后采用 RANSAC 算法拟合出平面标定板轮廓的空间直线;从目标点云中随机选择两个点生成直线,计算剩余点云与该直线的距离,小于设定阈值的点可视为内点。重复该过程,将内点数目最多的点集通过最小二乘法拟合为直线,此直线即为所求。基于 RANSAC 的空间直线拟合算法具有较强的稳定性,可以剔除异常值,处理点云数据时具有较强的鲁棒性。同时, RANSAC 算法可以优化出空间直线模型的最优模型系数,以此为基础可以建立空间直线方程。将相邻空间直线方程联立即可求得空间直线交点,即所提的平面标定板的特征点。

假设通过上述步骤获取的特征点在激光雷达坐标系下的坐标为  $(X_L, Y_L, Z_L)$ , 在像素坐标系下的坐标为  $(u, v)$ , 二者可建立如下关系:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{K} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_L \\ Y_L \\ Z_L \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} X_L \\ Y_L \\ Z_L \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_L \\ Y_L \\ Z_L \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{K}$  表示相机内参;  $\mathbf{R}$  表示激光雷达坐标系到相机坐标系的旋转矩阵;  $\mathbf{T}$  表示平移矢量。

通过提取若干组激光雷达与图像对应特征点,建立约束方程组,求解矩阵  $\mathbf{M}$  中的 12 个元素。将式(1)展开,得

$$\begin{cases} u = m_{11}X_L + m_{12}Y_L + m_{13}Z_L + m_{14} \\ v = m_{21}X_L + m_{22}Y_L + m_{23}Z_L + m_{24} \\ 1 = m_{31}X_L + m_{32}Y_L + m_{33}Z_L + m_{34} \end{cases} \quad (2)$$

求解式(2)至少需 6 组特征点,通常情况下会多采集几组特征点以减小误差。应用最小二乘法求得映射矩阵初始解,并用 Levenberg-Marquarat 算法对其结果进行优化,得到最终结果。

## 2.2 点云与光学图像融合

点云与图像融合以两者配准为前提,通过对点云与图像数据的配准,建立点云各坐标点与图像各像素点之间的对应关系。首先将三维点云投影到光学图像获得对应的像素坐标  $(x, y)$ , 然后将像素点  $(x, y)$  处对应的色彩 R、G、B 信息赋值给点云,进而实现对三维点云数据的着色,使其具有真彩色纹理信息。利用 2.1 节中的方法对激光雷达和相机系统进行联合标定,得到优化后的外参矩阵,然后通过共线方程建立像点坐标和物方点云坐标的关系,将像点所具备的



R、G、B 信息赋予给对应的点云模型中的点,从而实现融合。共线方程表达式为

$$\begin{cases} x-x_0=-f\frac{a_1(X_L-X_C)+b_1(Y_L-Y_C)+c_1(Z_L-Z_C)}{a_3(X_L-X_C)+b_3(Y_L-Y_C)+c_3(Z_L-Z_C)} \\ y-y_0=-f\frac{a_2(X_L-X_C)+b_2(Y_L-Y_C)+c_2(Z_L-Z_C)}{a_3(X_L-X_C)+b_3(Y_L-Y_C)+c_3(Z_L-Z_C)} \end{cases} \quad (3)$$

式中:\$(x, y)\$为点云\$(X\_L, Y\_L, Z\_L)\$在像平面坐标系下对应的像素坐标;\$(X\_C, Y\_C, Z\_C)\$为像空间坐标系下相机的中心坐标;\$f\$为焦距;\$(a\_1, a\_2, a\_3, b\_1, b\_2, b\_3, c\_1, c\_2, c\_3)\$为旋转矩阵的系数。利用式(3)将\$(x, y)\$处相应的R、G、B颜色值赋予给相对应的点云数据。经过融合后的点云数据具备光学图像的颜色纹理信息。

当点云图像的密度足够大时,三维场景会更加具有真实感,因此利用对多帧点云进行帧间匹配的方法提高点云密度。点云提升密度后可以更加充分利用图像的彩色信息,在一定程度上提升可视化效果。应用VTK进行真彩色点云的可视化,一方面通过vtkRenderer实现点云可视化功能,另一方面通过vtkInteractorStyle-TrackballCamera实现点云旋转、平移的交互功能。

### 3 实验及结果分析

#### 3.1 实验设备与实验场景选择

采用LIVOX-Horizon激光雷达和海康工业相机对算法进行测试,设备相关参数信息如表1和表2所示。

在Windows系统下以Visual studio 2017软件为开发环境进行实验,通过OpenCV和PCL实现标定和融合算法,利用VTK进行可视化。实验选用了\$9 \times 6\$的

表1 LIVOX-Horizon激光雷达参数信息

Table 1 Parameter information of LIVOX-Horizon lidar

Parameter	Value
Detection range / m	260
Distance accuracy / cm	2
Precision of angle / (°)	0.05
Field of view angle / [(°) × (°)]	81.7 × 25.1
Point cloud data rate / s <sup>-1</sup>	240000

表2 MV-CA013-20GC海康工业相机参数信息

Table 2 Parameter information of MV-CA013-20GC

HIKVISION camera

Parameter	Value
Resolution	1280 × 1024
Pixel size / (μm × μm)	4.8 × 4.8
Focal length / mm	35

黑白棋盘格标定板用于海康相机内参标定,棋盘格尺寸为\$27 \text{ mm} \times 27 \text{ mm}\$。系统联合标定时可选用任意平面标定板,本实验中平面标定板的尺寸为\$0.7 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}\$,将标定板的四个顶点作为特征点,由于Livox激光雷达具有非重复性扫描的特点,采集到的点云密度较大,能够容易获得角点的位置。

通过多次实验可知,标定实验过程中应尽量选择无遮挡的场景,以便识别出标定板。

本实验场所无遮挡物,实验场地布局如图3(a)所示,实验场景如图3(b)所示。实验过程中要保证标定板同时在激光雷达和相机的观测范围内,并尽量采集到更多的点云。通过反复测试,标定板与激光雷达-相机系统间的水平距离应在\$3 \sim 6 \text{ m}\$,本文实验过程中水平距离约为\$4 \text{ m}\$。

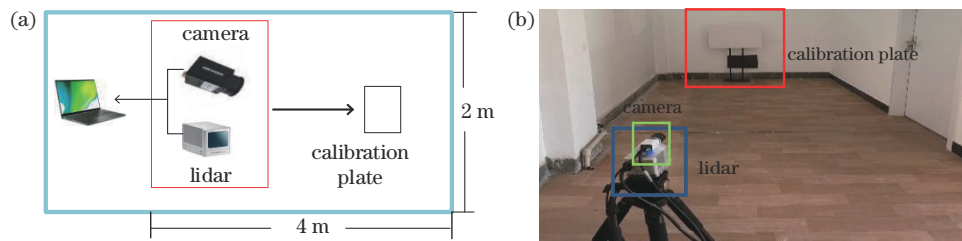


图3 实验场景图。(a)场地布局图;(b)实验实景图

Fig. 3 Experimental scene diagram. (a) Site layout; (b) actual scene of the experiment

#### 3.2 实验结果

分别展示光学相机标定、激光雷达-光学相机联合标定和点云-图像融合的实验结果。

##### 3.2.1 光学相机标定

首先利用黑白棋盘格标定板对相机内参进行标

定,实验中选择\$9 \times 6\$的黑白棋盘格标定板,棋盘格尺寸为\$27 \text{ mm} \times 27 \text{ mm}\$,采集20张图像用于标定,如图4所示。

应用张正友标定法对光学相机进行标定,得到的相机内参矩阵为

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 6953.09945458096 & 0 & 670.29874278235 \\ 0 & 6931.265241423053 & 504.7502538324101 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

最终平均重投影误差为\$0.03 \text{ pixel}\$,能够满足精度要求。

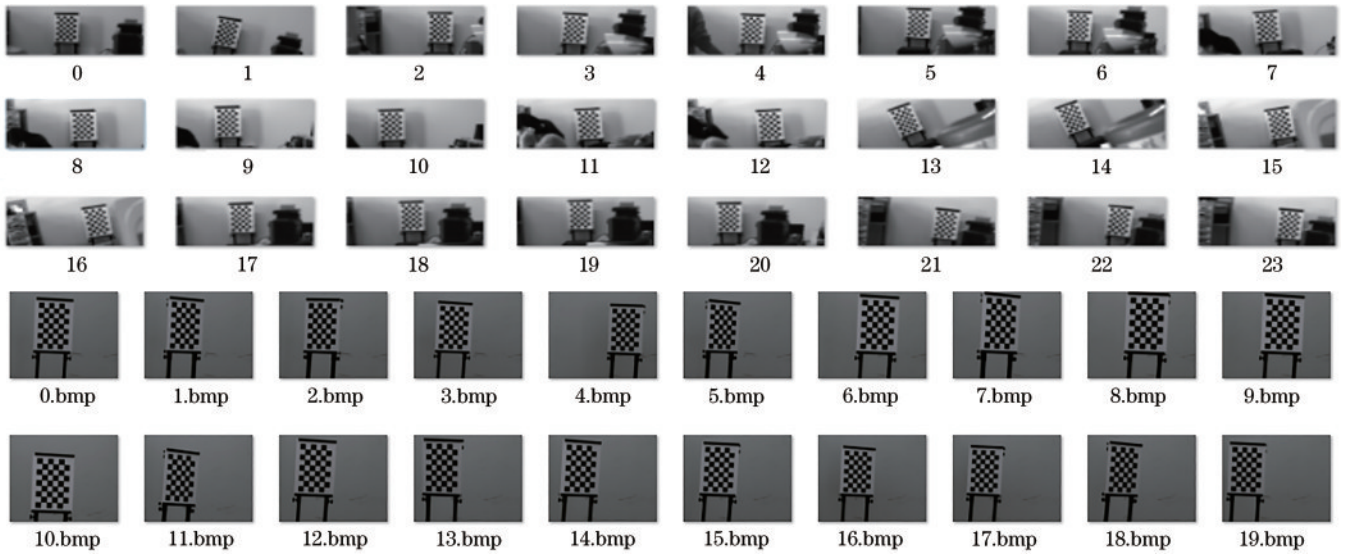


图 4 相机标定图像

Fig. 4 Images for camera calibration

### 3.2.2 激光雷达-相机系统联合标定

按照 2.1 节描述的方法提取至少 6 组激光雷达和对应图像同名特征点坐标,从每组图像和点云可以提取 4 组同名特征点。实验中共采集 8 组图像,提取 24 组同名特征点用于标定,以其中 1 组图像为例,提取同名特征点的结果如图 5 所示。其中,在光学图像

特征点提取过程中,设置的筛选条件为:MaxRegion 为 1320000,MinRegion 为 80000;轮廓中两两相邻直线夹角的余弦绝对值小于 0.1;aspect ratio 设定为 1~1.5。

将同名点的坐标代入方程,即可求解出激光雷达坐标系与相机坐标系之间的投影变换矩阵,结果为

$$[R \quad T] = \begin{bmatrix} 0.0941461 & -0.995504 & -0.0104157 & -0.0777297 \\ -0.0191968 & 0.00864498 & -0.999778 & 0.157867 \\ 0.995373 & 0.0943251 & -0.0182966 & -0.0792821 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

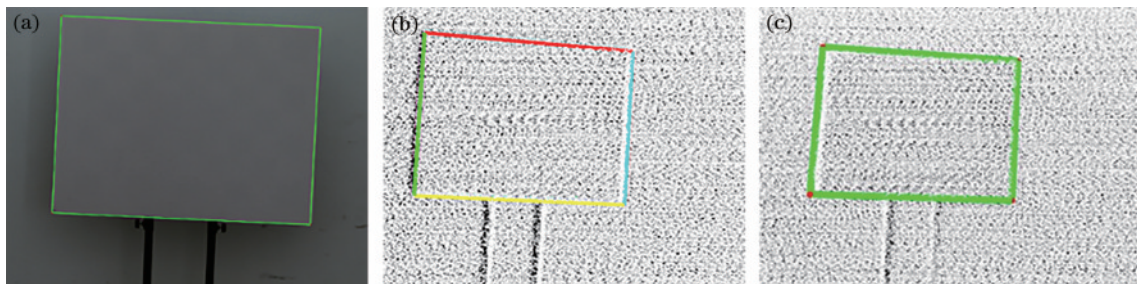


图 5 同名特征点提取。(a)光学图像特征点提取;(b)RANSAC 提取直线结果;(c)点云特征点提取

Fig. 5 Common feature point extraction. (a) Feature point extraction from optical image; (b) linear result extracted by RANSAC; (c) feature point extraction from point cloud

### 3.2.3 融合与可视化结果

根据获得的三维点云与光学图像的对应关系,进行数据融合处理及可视化,获取具有真实 R、G、B 值和纹理特性的点云图像。进行两个不同场景下的融合测试,两次测试结果如图 6~11 所示,分别包括光学图像、点云图像、不同角度的伪彩色点云图像、不同观测角度的融合效果图。

实验一处于不同梯度的多车辆空间场景,对场景进行测试,实验结果如图 6~8 所示。实验场景为三台

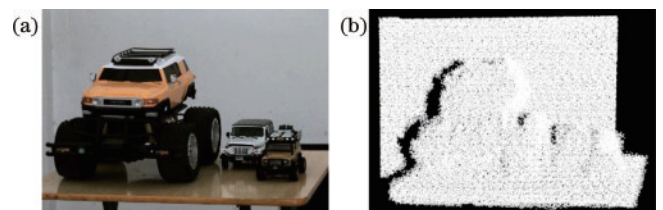


图 6 实验一原图。(a)光学图像;(b)点云图像

Fig. 6 Original image of experiment 1. (a) Optical image; (b) point cloud



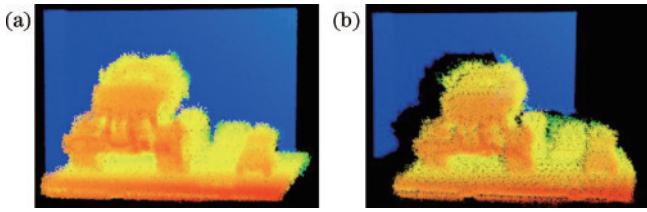


图 7 实验一伪彩色点云图。(a)伪彩色点云;(b)不同观测角度的伪彩色点云

Fig. 7 Pseudo color point cloud of experiment 1. (a) Pseudo color point cloud; (b) pseudo color point cloud from different angles

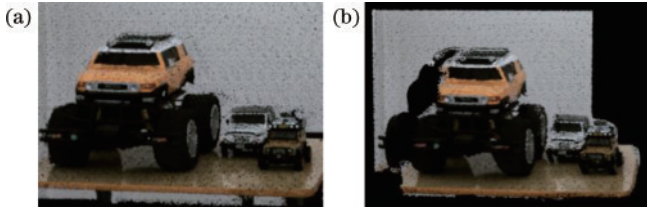


图 8 实验一融合效果图。(a)融合效果;(b)不同观测角度的融合效果

Fig. 8 Fusion image of experiment 1. (a) Fusion image; (b) fusion image from different angles

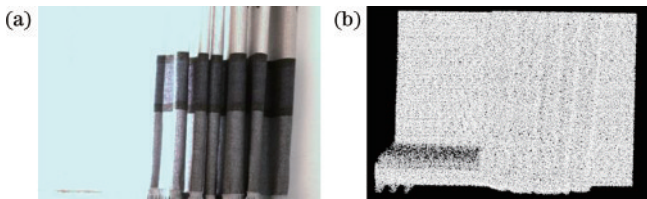


图 9 实验二原图。(a)光学图像;(b)点云图像

Fig. 9 Original image of experiment 2. (a) Optical image; (b) point cloud

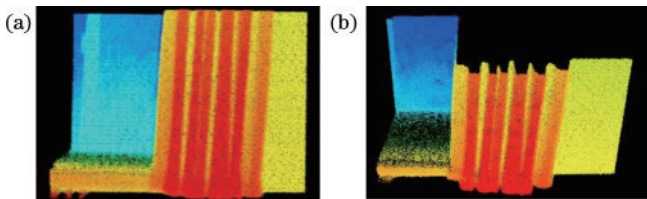


图 10 实验二伪彩色点云图。(a)伪彩色点云;(b)不同观测角度的伪彩色点云

Fig. 10 Pseudo color point cloud of experiment 2. (a) Pseudo color point cloud; (b) pseudo color point cloud from different angles

车辆模型,光学图像分辨率高,细节特征明显,无空间效果,如图 6(a)所示;点云图像和伪彩色点云图像细节分辨能力差,很难从中分辨车辆的真实形态,但是空间效果强于光学图像,如图 6(b)、图 7(a)、图 7(b)所示;融合后的图像兼具二者的优点,既具备真彩色纹理信息又具备空间信息,如图 8 所示。相较于原始点云和伪彩色点云,融合后的图像能够更加真实地还原场景;相较于光学图像,可以对融合后的图像进行多角度

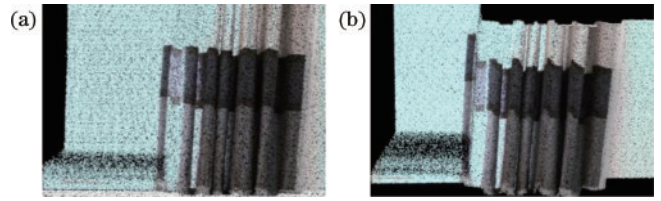


图 11 实验二融合效果图。(a)融合效果;(b)不同观测角度的融合效果

Fig. 11 Fusion image of experiment 2. (a) Fusion image; (b) fusion image from different angles

观测,融合后的图像能够更好地表达空间特征。但是由于激光雷达自身的局限性和遮挡问题,不可避免地造成点云数据缺失而产生孔洞,如图 6(b)和图 7(b)所示。因此融合可视化后的彩色点云也具有相同的问题。

实验二中对褶皱物体进行实验测试,如图 9~11 所示,融合后的图像实现了光学图像和点云的优势互补。相较于原始点云和伪彩色点云,从融合后的图像中能观察到颜色和真实的褶皱纹理,增强了细节特征,更加真实地还原了场景;相较于光学图像,融合后的图像增加了空间信息,可以对其进行多角度观测,能够更好地表达空间特征。但与实验一相同,会存在数据缺失的问题。

### 3.3 实验结果分析

对于主观评价,主要依靠观察者对融合效果和质量进行主观判断。从主观上来看实验结果:融合后的真彩色点云能够有比较好的视觉融合效果,相较于光学图像和点云,能更好地还原真实场景;从不同角度观测,也可以得到更加真实的场景;但因为激光雷达自身的局限性,也存在变换观测角度后点云稀疏和因遮挡产生孔洞的问题。

采用重投影误差进行精度评价,重投影误差不止考虑了单应矩阵的计算误差,也考虑了图像点的测量误差,因此精度更高。将激光雷达坐标投影到图像上,得到投影的图像坐标,比较投影点和真实点的像素差,即可得到重投影误差。对所提方法与基于人工匹配的标定融合方法、基于梯形棋盘格标定板<sup>[13]</sup>的标定融合方法进行比较,结果如表 3 所示。

表 3 不同算法的标定精度比较

Table 3 Comparison of calibration accuracy of different algorithms

Method	Reprojection error / pixel
Proposed algorithm	2.27
Method based on manual matching	4.70
Method based on trapezoidal board	3.57

如表 3 所示:所提方法利用 24 组同名特征点进行重投影误差计算,平均重投影误差为 2.27 pixel,基于人工匹配的标定融合方法的平均重投影误差为 4.70 pixel,基于梯形棋盘格标定板的标定融合方法的

平均重投影误差为 3.57 pixel。与两种方法相比,所提方法的精度分别提升了 51.7% 和 36.4%。因此实验结果验证了所提方法的有效性,所提方法可以实现对三维点云与图像的正确融合。

## 4 结 论

在总结了激光雷达与相机现有标定算法和点云与光学图像融合算法的基础上,提出了一种基于激光雷达与相机自动标定的融合方法。与基于人工匹配的标定融合方法和基于梯形棋盘格标定板的标定融合方法相比,所提方法的精度分别提升了 51.7% 和 36.4%。所提方法将光学图像的真彩色信息赋予点云,实现两种数据优势互补,并对融合结果进行可视化,更好地还原了真实场景。但是由于激光雷达自身的局限性,融合后的彩色点云存在孔洞的问题,可能会对后续处理产生影响。后续将对彩色点云数据进行边缘精细化处理和孔洞修补,确保点云数据完整,使融合后的彩色点云更加逼真,为后续处理研究奠定基础。

### 参 考 文 献

- [1] 张子健,程效军,曹宇杰,等.结合激光与视觉点云的古遗迹三维重建应用[J].中国激光,2020,47(11):1110001. Zhang Z J, Cheng X J, Cao Y J, et al. Application of 3D reconstruction of relic sites combined with laser and vision point cloud[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(11): 1110001.
- [2] 崔文,陈辉,刘万泉.激光三角网格点云孔洞曲面修补方法[J].激光与光电子学进展,2021,58(20):2014002. Cui W, Chen H, Liu W Q. Hole surface repairing for laser triangular mesh point cloud[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(20): 2014002.
- [3] 高莎,袁希平,甘淑,等.面向复杂山地的机载 LiDAR 与无人机影像融合应用[J].测绘通报,2021(7):65-69. Gao S, Yuan X P, Gan S, et al. Application of airborne LiDAR and UAV image fusion for complicated terrain[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2021(7): 65-69.
- [4] 韩义波,杨新锋,滕书华,等.激光与红外融合目标检测[J].红外与激光工程,2018,47(8):0804005. Han Y B, Yang X F, Teng S H, et al. Detection of laser and infrared fusion target[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(8): 0804005.
- [5] 王国利,王晏民.地面激光点云多源约束的稳健整体配准[J].测绘通报,2012(1):20-21,41. Wang G L, Wang Y M. Robust integrated registration of terrestrial LiDAR point cloud with multi-type constraints [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2012(1): 20-21, 41.
- [6] 王晏民,胡春梅.一种地面激光雷达点云与纹理影像稳健配准方法[J].测绘学报,2012,41(2):266-272. Wang Y M, Hu C M. A robust registration method for terrestrial LiDAR point clouds and texture image[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2012, 41(2): 266-272.
- [7] 薛艺舟.面向自动驾驶的激光雷达与相机联合标定方法研究[D].北京:北京建筑大学,2021. Xue Y Z. Research on the joint calibration method of lidar and camera for autonomous driving[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2021.
- [8] 闫利,曹亮,谢洪,等.车载全景影像与激光点云融合生成彩色点云方案[J].测绘科学,2015,40(9):111-114,162. Yan L, Cao L, Xie H, et al. Generation of colored point cloud by fusion of vehicle-borne panoramic images and LiDAR point clouds[J]. Science of Surveying and Mapping, 2015, 40(9): 111-114, 162.
- [9] Zhang Z Y. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [10] Scaramuzza D, Harati A, Siegwart R. Extrinsic self calibration of a camera and a 3D laser range finder from natural scenes[C]//2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, October 29-November 2, 2007, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2007: 4164-4169.
- [11] Unnikrishnan R, Hebert M. Fast extrinsic calibration of a laser rangefinder to a camera[D]. Pittsburgh: Carnegie Mellon University, 2005.
- [12] 项志宇,郑路.摄像机与3D激光雷达联合标定的新方法[J].浙江大学学报(工学版),2009,43(8):1401-1405. Xiang Z Y, Zheng L. Novel joint calibration method of camera and 3D laser range finder[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2009, 43(8): 1401-1405.
- [13] 贾子永,任国全,李冬伟,等.基于梯形棋盘格的摄像机和激光雷达标定方法[J].计算机应用,2017,37(7):2062-2066,2077. Jia Z Y, Ren G Q, Li D W, et al. Joint calibration method of camera and LiDAR based on trapezoidal checkerboard[J]. Journal of Computer Applications, 2017, 37(7): 2062-2066, 2077.
- [14] Tóth T, Pusztai Z, Hajder L. Automatic LiDAR-camera calibration of extrinsic parameters using a spherical target [C]//2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 31 - August 31, 2020, Paris, France. New York: IEEE Press, 2020: 8580-8586.
- [15] Yuan C J, Liu X Y, Hong X P, et al. Pixel-level extrinsic self calibration of high resolution LiDAR and camera in targetless environments[EB/OL]. (2021-03-02) [2021-06-25]. <https://arxiv.org/abs/2103.01627>.