

文章编号 1004-924X(2025)16-2491-11

动态扫描激光视觉三维测量系统及标定方法

杨洪涛*, 黄昌九, 庞好男, 范瑞琳, 梁光磊
(安徽理工大学 机电工程学院, 安徽 淮南 232001)

摘要:单线激光雷达具有结构简单、成本低、功耗小等优点,但由于其只能进行平面扫描,无法独立完成三维重构。视觉传感器虽能提供丰富的图像信息,但在几何测量精度和抗干扰能力方面存在不足。针对单线激光雷达无法直接获取空间三维信息以及单一传感器重构精度低的问题,本文设计了一个激光雷达与相机融合的三维重构系统,该系统通过滚轴丝杠机构驱动单线激光雷达实现垂直方向的扫描,从而获取空间三维数据,并结合深度相机获取的颜色纹理信息,提升重构质量。首先明确了系统组成与扫描测量原理,并分析了整个三维重构流程。然后完成了激光雷达与相机之间的内参与外参标定,进而实现点云数据的配准与融合,有效提升了三维重构的精度和完整性。同时搭建模拟巷道实际实验系统,利用参数标定后的三维重构系统,计算逐帧激光雷达点云坐标,对 11 个靶物进行重构。实验结果表明其配准误差为 6.8 mm,融合后的点云在 500 mm 测量范围内不超过 5.5 mm。并利用系统对大型室内地面进行三维重构实验,在 2 600 mm 测量范围内重构误差不超过 12 mm。

关键词:激光雷达;深度相机;垂直运动;联合标定;三维重构

中图分类号:TP391.41 **文献标识码:**A

doi:10.37188/OPE.20253316.2491

CSTR:32169.14.OPE.20253316.2491

Dynamic scanning laser vision three-dimensional measurement system and calibration method

YANG Hongtao*, HUANG Changjiu, PANG Haonan, FAN Ruilin, LIANG Guanglei

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Anhui University of Science and Technology,
Huainan 232001, China)

* Corresponding author, E-mail: lloyd@163.com

Abstract: Single-layer LIDAR offers advantages such as simple structure, low cost, and low power consumption; however, its sensing capability is limited to planar scanning, rendering it incapable of independently achieving three-dimensional 3D reconstruction. Although visual sensors provide rich image information, they suffer from limitations in geometric measurement accuracy and robustness against environmental interference. To address the inability of single-layer LIDAR to directly acquire 3D spatial information and the low reconstruction accuracy of single-sensor systems, this paper presented a LIDAR – camera fusion-based 3D reconstruction system. The system employed a lead screw and roller mechanism to drive the single-line LIDAR in vertical motion, enabling spatial 3D data acquisition. Simultaneously, the RGB-D camera captured color and texture information to enhance reconstruction quality. The system architecture and

收稿日期:2025-04-29;修订日期:2025-06-04.

基金项目:安徽省重点研究与开发计划(No. 202004a07020046)

scanning measurement principles were first established, followed by a detailed analysis of the 3D reconstruction pipeline. Intrinsic and extrinsic calibration between the LIDAR and the camera was performed to enable accurate point cloud registration and fusion, significantly improving the precision and completeness of the reconstruction. A simulated tunnel-like environment was constructed for validation. Using the calibrated system, point cloud coordinates were computed frame-by-frame for the reconstruction of 11 target objects. Experimental results show a registration error of 6.8 mm, with fused point cloud deviations not exceeding 5.5 mm within a 500 mm measurement range. Furthermore, a large-scale indoor floor reconstruction experiment demonstrates an overall reconstruction error within 12 mm over a 2 600 mm measurement range.

Key words: LIDAR; depth camera; vertical motion; joint calibration; 3D reconstruction

1 引 言

随着工业检测、机器人导航和数字化建模等领域对高精度三维测量需求的不断提升,光学三维测量方法因其非接触、高分辨率和高效率等优势,已成为研究热点。该类方法通过光学投影或激光反射获取物体表面结构信息,形成了多个成熟分支。其中,傅里叶变换轮廓术(Fourier Transform Profilometry, FTP)^[1]利用傅里叶频域分析提取包络并重建形貌;相位测量轮廓术(Phase Measurement Profilometry, PMP)^[2]则通过多幅相移条纹图像计算物体的高精度相位信息,具有较高的测量精度。莫尔轮廓术(Moiré Profilometry)^[3]通过将受表面形貌调制的变形条纹与基准光栅叠加,生成新频率的莫尔条纹,进而通过莫尔条纹图样中的等高线恢复出物体的三维形貌;计算莫尔轮廓术(Computer-Generated Moiré Profilometry, CGMP)^[4],基于莫尔轮廓术的基本原理,但无需实际形成莫尔条纹。该方法只需采集一帧变形条纹图,便可通过计算机合成莫尔条纹,从而完成三维重构;此外,调制度测量轮廓术(Modulation Measuring Profilometry, MMP)^[5]与传统的三角测量方法原理不同,它采用的是投影方向与探测方向一致的光路系统,通过求取采集到的条纹图样的调制度灰度分布情况确定待测物体的三维形貌。相位差轮廓术(Phase Differencing Profilometry, PDP)^[6]通过差分方式消除相位模糊,提高了解析精度。线激光扫描法(Laser Scanning Profilometry, LSP)^[7]通过将激光线投射到物体表面并结合相机捕捉变形图像,可实

现快速、稳定的轮廓重建。另一类为飞行时间法(Time-of-Flight, TOF)^[8],其原理是通过测量光脉冲从发射到接收的时间来估算物体距离,是当前激光雷达技术的核心基础之一。然而,上述光学三维测量方法多依赖复杂的光场控制、高精度成像设备和稳定环境条件,难以适应移动机器人在复杂、动态或光照变化显著的场景中进行实时测量的需求。例如,条纹投影类方法对光照干扰敏感,摩尔干涉法对系统刚性要求高,飞行时间法虽具实时性,但在小尺度高精度测量中受限。相比之下,视觉测量^[9]和激光雷达^[10]融合技术具备更强的环境适应性和系统灵活性,能够在无纹理、低照度或存在遮挡的场景中稳定工作,因而在移动机器人感知与建图任务中展现出更大优势。

因此,多传感器融合的三维测量策略逐渐成为国内外研究的热点方向。其中,空间配准作为实现多源数据有效融合的关键步骤,在多个关键应用场景中发挥着重要作用,如旋转物体的单视角重建^[11]、高反光物体的三维测量^[12]、机器人抓取^[13]与装配姿态估计^[14]、复杂特征目标配准^[15]、建筑构件的数字建模^[16]、辅助现场施工质量检查^[17]以及移动平台的环境感知^[18]等。面对上述实际需求,合理选择并应用具备良好精度与鲁棒性的配准算法,对提升融合效果具有重要意义。

另一方面,如何实现多源数据的高效融合,进一步提升系统的感知能力与三维建模精度,也成为研究者关注的重点,肖宇峰等^[19]将单线激光雷达与 Kinect 深度相机结合用于机器人障碍检测。钟雷声等^[20]提出了一种结合双目视觉与单

线激光雷达的三维场景重建系统与算法,实现了高精度且高效的三维环境重构。Xu等^[21]设计了一种基于差分进化PID和非线性跟踪补偿器的二维激光雷达与相机融合系统,显著提升了系统的跟踪性能和融合精度。Chen等^[22]提出了一种基于双重Transformer结构的激光雷达与相机融合方法,有效提升了三维目标检测的准确性和鲁棒性。Zhen等^[23]通过联合优化相机图像与LIDAR点云间的配准误差,同时优化外参和重建模型的三维融合方法,实现激光雷达与相机在无需预先标定的情况下高精度融合,用于稠密三维重建。Lin等^[24]利用LIDAR提供的几何结构与RGB相机提供的纹理信息,进行精确的姿态估计,实现高精度位姿估计和彩色点云建图的融合方法。

在上述研究基础上,本文设计了一种可垂直运动并调节高度的单线激光雷达系统,结合深度相机构建三维环境感知系统,搭载于移动载体上,应用于地下受限空间的巡检任务。该系统通过单线激光雷达在运动过程中的逐层扫描,获取高精度三维点云数据,并与深度相机所采集的信息在统一空间中融合,提升了三维重构的细节表达与整体精度。

2 三维扫描系统组成

2.1 三维扫描系统结构

为了提高利用单线激光雷达和深度相机的三维环境感知系统测量精度,本文设计了如图1

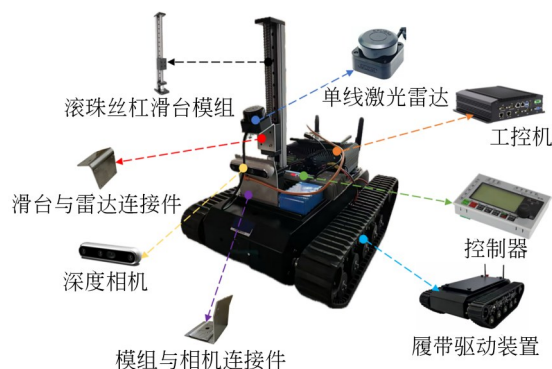


图1 三维扫描系统结构

Fig. 1 Structure of 3D scanning system

所示的测量系统,由深度相机、单线激光雷达、滚珠丝杆模组、履带式机器人、工控机及相应的夹具组成。两种传感器安装在机器人上,通过控制器控制往前运动进行测量,单线激光雷达安装在滚珠丝杆模组上,可以实现垂直运动和逐帧扫描采集不同高度、多个截面的环境点云数据,深度相机向前扫描进行测量获取相机点云数据。两种点云数据通过工控机进行处理,实现数据融合和三维重构。

2.2 三维重构和点云数据融合原理

首先,单线激光雷达与深度相机通过内参标定与外参标定统一坐标系,并基于硬件触发采样数据时间同步,确保时空基准一致性。然后在数据采集阶段,单线激光雷达通过发射激光脉冲并接收反射信号,实时生成单线测距数据。通过步进电机驱动的丝杠滑台沿Y轴方向以恒定速度进行往复直线运动,激光雷达在不同位置逐帧扫描并积累测距数据,最终将二维扫描线扩展为三维点云,如图2所示。

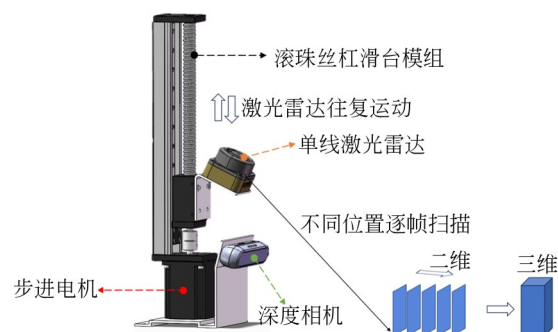


图2 单线激光雷达三维重建示意图

Fig. 2 Schematic diagram of 3D reconstruction with single-layer LIDAR

同时,深度相机基于ORB-SLAM3算法^[25]提取每帧图像中的特征点,通过连续帧之间的特征匹配与位姿估计,实现自身运动轨迹的恢复及稠密点云的构建。该过程使得深度相机能够在动态环境中连续获得场景的空间结构信息。通过上述设计,单线激光雷达与深度相机的数据可在统一的时空框架下进行融合。

然而实际系统中可能存在滑台运动引起的微小位姿扰动、硬件同步误差及传感器安装偏差

等因素,仅依赖静态标定难以实现毫米级精度的数据对齐。为此,本文在完成传感器标定的基础上,引入ICP(Iterative Closest Point)^[26]算法进行精配准,通过迭代优化激光雷达与深度相机点云之间的刚性变换矩阵,最小化点对间的欧氏距离误差,进一步提升配准精度。

在完成空间对齐后,采用基于LightGBM的点云属性映射融合方法,将深度相机点云中的属性信息映射至激光雷达点云坐标系中。由于两类点云已配准,可建立部分对应点对,以此构建监督样本集,并训练回归模型,实现两类传感器点云的属性融合。整体流程如图3所示。

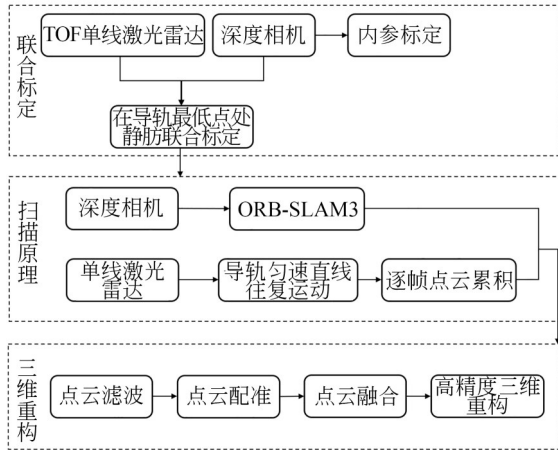


图3 扫描原理流程图

Fig. 3 Flowchart of scanning principle

3 标定原理

3.1 相机标定原理

为了实现高精度的深度相机与激光雷达点云空间配准,确保后续数据融合的准确性,需对两类传感器进行精确联合标定。为此,首先需完成相机自身参数标定。图4中, $O-XYZ$ 为相机坐标系, $o-xyz$ 为图像坐标系, $o-uv$ 为像素坐标系,且图像坐标系原点在像素坐标系中的位置为 (u_o, v_o) 。 O 为相机的光心。现实世界的空间点 P ,成像点为 P_i 。设 P 的坐标为 $[X_c, Y_c, Z_c]^T$, P_i 为 $[x, y, z]^T$,相机焦距为 f ,则 P 点和对应的图像像素坐标

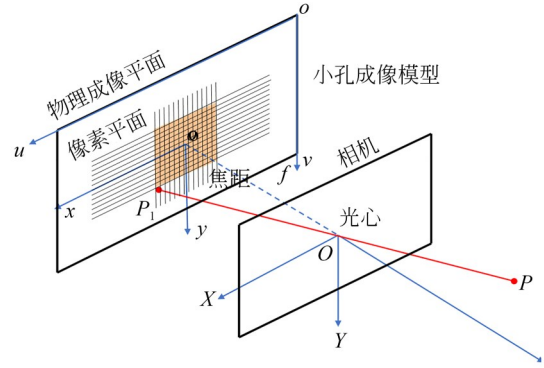


图4 针孔相机模型

Fig. 4 Pinhole camera model

$(u, v)^T$ 的关系为:

$$Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中: $K = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ 为相机的内参矩阵, c_x, c_y 修

改为图像坐标系原点在像素坐标系中的位置为 (u_o, v_o) 。

3.2 联合标定原理

联合标定过程中各坐标关系如图5所示,其中 $O_c-X_cY_cZ_c$ 为相机坐标系, $O_L-X_LY_LZ_L$ 为激光雷达坐标系, $O-uv$ 为像素坐标系。设现实世界的空间点 P ,在激光雷达坐标系中坐标为 $[X_L, Y_L, Z_L]^T$,深度相机和单线激光雷达两坐标系转换关系为式(2):

$$Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & T \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_L \\ Y_L \\ Z_L \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中: R 为激光雷达坐标系到相机坐标系之间的旋转矩阵, T 为两坐标系之间的平移向量。

旋转矩阵求取过程中,旋转轴以相机旋转轴为基准,旋转的示意图如图6所示。首先,将激光雷达左手坐标系转换到右手坐标系,用精度为 $\pm 2'$ 角度尺对两个连接件进行测量并计算视角差值为 10° ,所以将激光雷达坐标系 $O_L-X_LY_LZ_L$ 绕 X_c 轴逆时针旋转 80° ,再将绕激光雷达坐标系 $O_L-X_LY_LZ_L$ 绕 Z_c 轴顺时针旋转 90° ,最终可得两个三维坐标系之间的旋转矩阵 $R = R_3 R_2 R_1$ 。其中:

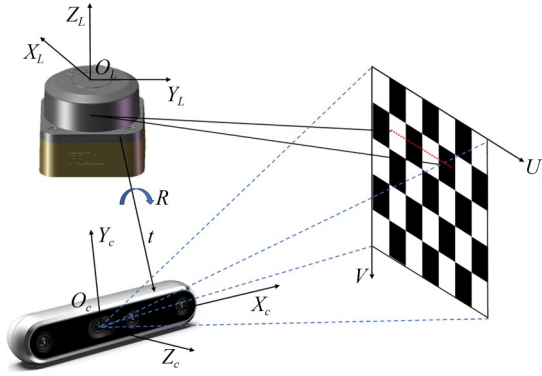


图 5 雷达在最低点时联合标定原理示意图

Fig. 5 Schematic diagram of joint calibration principle of LIDAR at the lowest point

$$R_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad R_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix},$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

在激光雷达匀速上升过程中,激光雷达与相机之间转换关系,平移向量随速度上升实时变换,确定每一帧运动速度乘以每一帧时间的运动距离,累加到平移向量中。相机在滑台最低处,二者坐标系重合后,随着滑台在 Y 轴方向匀速运动,每一帧像素点坐标 P_{uvj} 如式(3)表示:

$$P_{uvj} = K(RP_{Lj} + T_i), \quad (3)$$

其中: $T_i = [0, vt_z, 0]^T$, 为激光雷达每一帧的平移向量, v 是滑台运动的速度, t_z 是激光雷达每转一圈的时间。

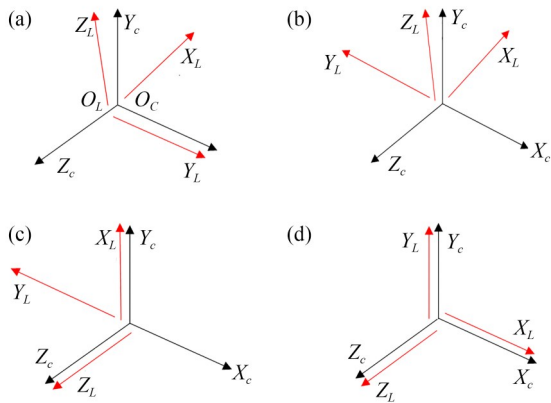


图 6 旋转矩阵示意图

Fig. 6 Diagram of rotation matrix

4 实验验证及结果分析

4.1 相机标定实验

相机选用 Intel RealSense D455 深度相机,适用于室内和室外环境的数据采集,该相机的 RGB 摄像头分辨率和帧率为 $1280 \text{ pixels} \times 800 \text{ pixels}$ 和 90 FPS (Frames Per Second)。其基本原理是通过左右成像器分别捕捉到场景的左右两幅图像,并计算同一物体在两幅图像中的视差,从而确定物体与相机之间的距离,生成深度信息。同时,RGB 颜色传感器用于捕捉场景的彩色信息,与深度信息结合,形成完整的 RGBD 图像。具体内部结构如图 7 所示。

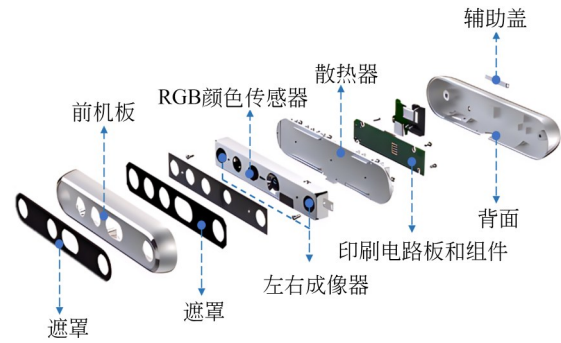


图 7 Intel RealSenseD455 深度相机内部结构图

Fig. 7 Internal structure diagram of Intel RealSenseD455 depth camera

标定过程中使用的是自制的棋盘格标定板,整个标定板棋盘格中正方形黑白小方格数目共有 9×12 格,每个格边长 25 mm。将相机固定,在相机视野范围内,任意不重复移动棋盘格标定板,同时相机采集不同姿态棋盘格标定板图像,相机总共拍摄 19 张棋盘格标定板图像,对采集的每个图像进行角点的提取,使用 MATLAB 2023a 中的 Camera Calibrate 工具进行标定处理操作,通过设置正确参数,最终求解出相机参数。标定板相对相机位姿标定完成后,得到的标定误差如图 8 所示,平均误差为 0.17 pixels,小于相机标定要求的最大误差 0.20 pixels,标定效果较好。标定得到如表 1 所示的相机内参。表中 f_x, f_y 是相机焦距, u_0, v_0 是相机原点坐标。



图8 标定误差
Fig.8 Calibration error

4.2 单线激光雷达与深度相机联合标定实验

激光雷达选用思岚 C1 单线激光雷达,采用激光飞行时间测距技术,测距半径可达 12 000 mm,测距盲区低至 50 mm,扫描频率 10 Hz。为

表 1 相机内参
Tab. 1 Camera internal parameters

参数	数值
f_x	1 145.159
f_y	1 142.111
u_0	635.702
v_0	343.228

实现精准运动,采用滚珠丝杆直线模组滑台,最大行程 200 mm,垂直最大载荷 ≤ 15 kg,定位精度可达 ± 0.03 mm。在联合标定的过程中,固定两传感器的相对位置,应保证标定板同时处于相机与激光雷达的视角范围内,从各个角度在不同位置移动标定板,选取标定板上的雷达点云,不同角度多帧重复进行点选操作。激光雷达点云在标定板上的投影如图 9 所示。

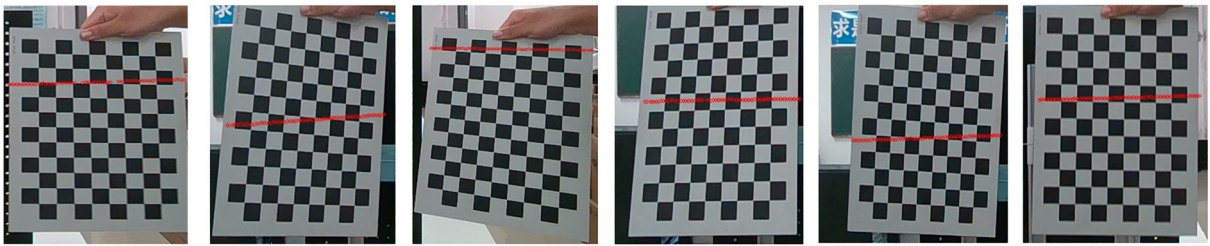


图9 相机在滑台最低处与激光雷达静态联合标定
Fig. 9 Static joint calibration of the camera and the LIDAR at the lowest position of the slide table

经过联合标定后的外参矩阵为:

$$\begin{bmatrix} R & T \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.1736 & 0.1028 & -0.9732 & 0.0156 \\ -0.9848 & 0.0124 & 0.1636 & -0.1082 \\ 0.0056 & -0.9893 & 0.0172 & 0.0423 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

在最低处标定完成后,在巷道内摆放 11 个靶物,如图 10 所示。设置滑台以 20 mm/s 运动,激光雷达每旋转一圈的时间为 0.1 s,即激光雷达在 Y 轴上的坐标每一帧移动距离为 2 mm,根据式(3),将每一帧雷达采集的点云坐标转换为图像平面上的像素坐标。为了去除图像中非目标区域的背景干扰,本文进一步对投影图像所对应的三维点云进行了裁剪与聚类处理,具体过程如下:首先,对原始点云数据进行了三维空间范围分析,统计点云在 X, Y, Z 轴上的最大最

小值,以明确其边界范围,为后续空间裁剪提供依据。在此基础上,手动设置了一个轴对齐的包围盒,选定目标建筑物所处的大致空间区域(即图中的蓝色区域,彩图见期刊电子版),利用 Open3D 提供的 crop 函数对点云进行空间裁剪,从而有效去除了建筑物以外的背景点云。最后,使用 DBSCAN 聚类算法将目标区域中的点云分组,进一步提取出各个靶物的特征结构,处理前后如图 11 所示,投影结果如图 12 所示。

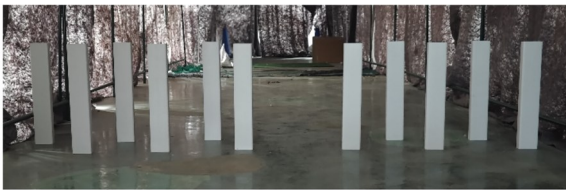


图10 巷道内摆放的 11 个靶标
Fig. 10 Eleven targets placed inside the tunnel.

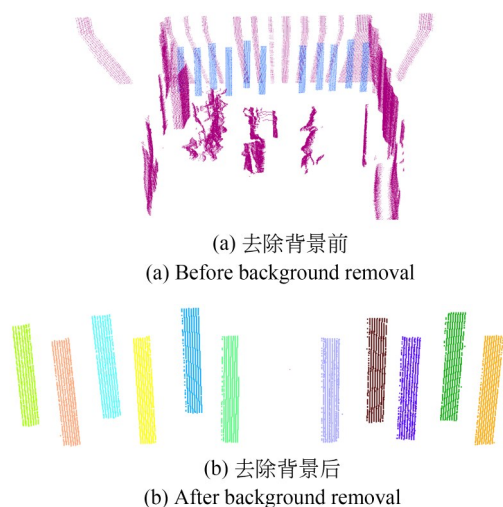


图 11 建筑物背景消除

Fig. 11 Building background elimination

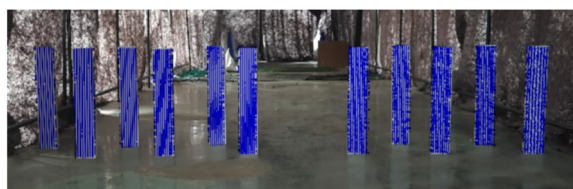


图 12 激光雷达映射到相机图像

Fig. 12 LIDAR mapping onto camera images

4.3 激光雷达与相机三维重构实验

图 13 所示为最终的配准结果。完成传感器标定后,本文将每一扫描帧的激光雷达点云依据位姿信息转换到统一的世界坐标系中。随后,将降噪处理后的激光雷达点云与深度相机采集的点云作为初始数据,通过 ICP 算法实现配准。具体步骤如下:

(1) 对源点云 A 中的每个点,在目标点云 B 中采用最近邻搜索建立对应点对;

(2) 计算两组点云的质心,并进行去中心化操作,消除平移影响;

(3) 基于中心化后的点集构建协方差矩阵,并通过奇异值分解(Singular Value Decomposition, SVD)获得最优旋转矩阵;

(4) 根据旋转后的质心差值计算平移向量,得到刚性变换矩阵;

(5) 将该变换应用于源点云并计算配准点对的均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE);

(6) 若当前误差与前一轮误差差值小于预设阈值(本文设置为 10^{-5}),则认为配准收敛,否则

继续迭代,直至满足收敛条件。

最终,结合双向最近邻匹配策略,计算得到 11 个靶物的均方根误差为 6.8 mm。

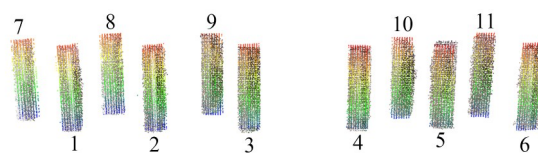


图 13 相机与激光雷达配准点云

Fig. 13 Point cloud of camera and lidar registration points

在完成点云配准并验证配准精度之后,对深度相机点云与激光雷达点云之间的空间属性进行映射融合。具体方法是,从已配准的两类点云中提取空间对应点对,构建监督学习样本集:以深度相机点的三维坐标作为输入,激光雷达中对应点的坐标作为回归目标。融合模型采用基于 LightGBM 回归算法,损失函数为均方误差(L2 loss),使用梯度提升策略进行训练。主要参数包括:学习率 0.05,最大深度 10,叶子节点数 40,最小样本数 2,特征和样本采样率均为 0.8,并每五轮进行一次数据采样以提升泛化能力。

最终,用精度为 ± 0.04 mm 的游标卡尺对 11 个靶物进行了精确标定,并用该系统测量激光雷达和相机点云中每个靶物的长和宽,测量结果如表 3 所示,点云测量图如图 14 所示。

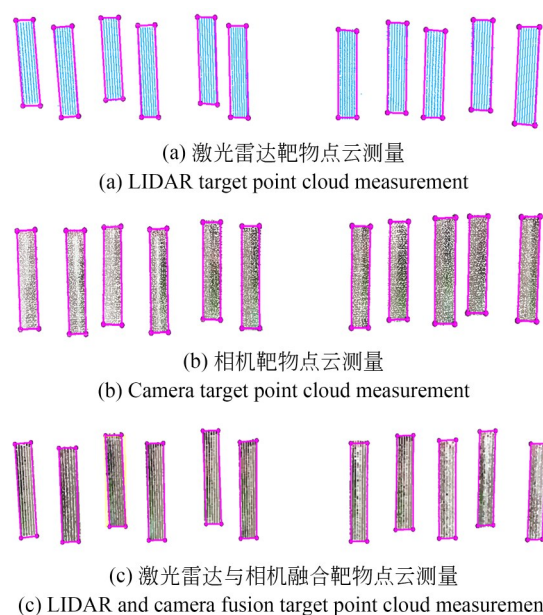


图 14 靶物点云测量图

Fig. 14 Point cloud measurement diagram of the target object

由表 2 和表 3 可知该系统得到的靶物重建长度虽然存在误差,在 500 mm 测量范围内,融合后的点云绝对误差不超过 5.5 mm,测量误差在允许范围内,满足实际测量需求。为了进一步验证系统性能,使用本文三维扫描系统从起点出发,顺时针对大型室内地面进行三维重建,实际场景示意图如图 15 所示。重建结果如图 16 所示,从重建地面中标记 a,b,c,d 四处关键位置,如图 16 中(a)所示。由表 4 可知该系统测量得到的尺寸值存在误差,其中因测量过程存在累计误差,所以 d 点误差最大,但是绝对误差不超过 12 mm。

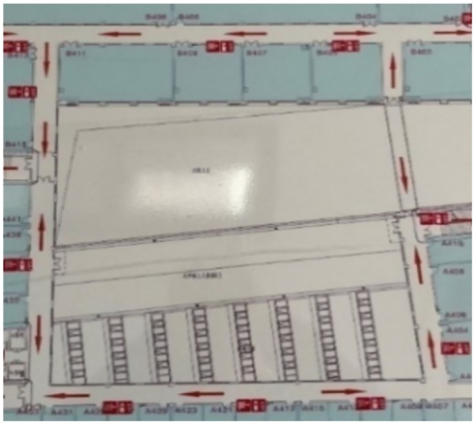


图 15 室内地面示意图
Fig. 15 Floor plan of the interior

表 2 11 个靶物点云长

Tab. 2 Length of point clouds of 11 targets (mm)

序列	实际尺寸	激光雷达靶物长	绝对误差	相机靶物长	绝对误差	融合的靶物长	绝对误差
1	100.30	95.82	−4.48	95.13	−5.17	96.32	−3.98
2	100.48	96.66	−3.82	95.78	−4.70	98.25	−2.23
3	100.02	102.95	2.93	96.52	−3.50	102.12	2.10
4	101.08	98.27	−2.81	104.39	3.31	97.85	−3.23
5	100.26	96.93	−3.33	95.34	−4.92	97.38	−4.48
6	100.02	104.86	4.84	106.7	6.68	103.22	3.20
7	100.00	105.34	5.34	106.57	6.57	104.18	4.18
8	101.40	105.29	3.89	105.87	4.47	104.01	2.61
9	100.26	104.13	3.87	104.68	4.42	103.07	2.81
10	100.22	103.81	3.59	104.53	4.31	102.21	1.99
11	101.00	95.91	−5.09	95.77	−5.32	97.65	−2.35

表 3 11 个靶物点云高

Tab. 3 Cloud point heights of 11 targets (mm)

序列	实际尺寸	激光雷达靶物高	绝对误差	相机靶物高	绝对误差	融合的靶物高	绝对误差
1	500.00	494.16	−5.84	492.86	−7.14	494.69	−5.31
2	500.10	494.81	−5.29	493.91	−6.49	495.08	−4.62
3	501.08	504.35	3.27	505.85	4.77	503.21	2.13
4	500.18	496.97	−3.21	496.17	−4.01	499.10	−1.08
5	500.44	495.66	−4.78	494.66	−5.78	496.82	−3.62
6	500.10	506.35	6.25	507.05	6.95	505.57	5.47
7	500.20	507.04	6.84	508.14	7.94	505.75	5.55
8	501.02	505.87	4.85	506.77	5.75	504.94	3.92
9	500.06	504.68	4.62	505.88	5.82	502.74	2.68
10	501.02	505.75	4.73	506.45	5.43	504.43	3.41
11	500.40	494.16	−6.24	493.16	−7.24	495.03	−5.42

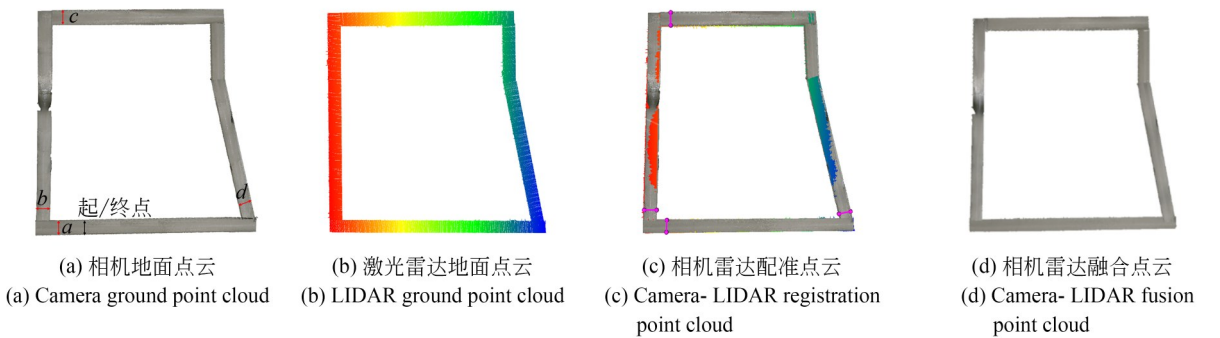


图 16 室内地面重建实验效果

Fig. 16 Experimental results of indoor floor reconstruction

表 4 深度相机与激光雷达室内地面建图尺寸

Tab. 4 Indoor ground mapping dimensions of depth camera and LIDAR (mm)

位置编号	实际尺寸	深度相机图测尺寸	绝对误差	激光雷达图测尺寸	绝对误差	融合图测尺寸	绝对误差
a	2 443	2 455	−12	2 451	−8	2 449	−6
b	2 636	2 645	−9	2 646	−10	2 643	−7
c	2 635	2 652	−17	2 646	−11	2 645	−10
d	2 666	2 648	−18	2 651	15	2 653	12

5 结 论

本文利用滚珠丝杆滑台模组与单线激光雷达相结合的方式,设计了一种单线激光雷达与深度相机融合的三维重建系统,通过分析两坐标之间的转换关系,以及激光雷达在运动中的动态平移向量,实现图像与点云之间的像素级关联。应用标定完的此系统,通过降噪处理后的点云数据进行配准、融合,对 11 个靶物进行配准与三维重构,配准误差为 6.8 mm,在 500 mm 测量范围内,激光雷达点云绝对误差不超过 7 mm,相机点云不超过 8 mm,融合后的点云不超 5.6 mm,并且完成了对实际大型室内地面场景的三维重构,相机点云绝对误差不超过 18 mm,激光雷达点云不超过 15 mm,融合重构结果与实际场景的误差不超过 12 mm。但是本文假设滚珠丝杆滑台运动

为匀速且无抖动,然而在实际应用中,滑台速度的微小变化和导轨的轻微抖动可能会对重构精度产生影响。非匀速运动会引入平移误差,并且导轨抖动可能引起激光雷达在运动过程中的微小旋转,导致多帧位姿估计累积误差放大。未来工作将针对这些问题,进一步优化滑台运动控制与误差补偿方法,以提升系统的整体性能和鲁棒性。

作者贡献声明:

- 杨洪涛:论文审核与基金支持;
黄昌九:论文构思与编辑写作,数据整理分析;
庞好男:实验的设计及数据整理和分析;
范瑞琳:实验数据整理与数据校对;
梁光磊:调查研究。

参考文献:

[1] LI B W, AN Y T, ZHANG S. Single-shot absolute 3D shape measurement with Fourier transform profilometry [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(19): 5219-5225.

[2] 龙清,李宏宁,杨明,等. 改进的结构光相位三维测量方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(24): 2410009.

LONG Q, LI H N, YANG M, *et al.* Improved three-dimensional measurement method for structured light phase[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(24): 2410009. (in Chinese)

- [3] MA R Y, LI J L, HE K L, *et al.* Application of moire profilometry in three-dimensional profile reconstruction of key parts in railway [J]. *Sensors*, 2022, 22(7): 2498.
- [4] 李城梦. 计算莫尔轮廓术算法研究[D]. 成都: 四川大学, 2021.
LI C M. *Research on Computational Moire Profilometry Algorithm* [D]. Chengdu: Sichuan University, 2021. (in Chinese)
- [5] 卢明腾, 苏显渝, 曹益平, 等. 同步扫描的调制度测量轮廓术三维面形重建算法[J]. 中国激光, 2016, 43(3): 308006.
LU M T, SU X Y, CAO Y P, *et al.* 3D shape reconstruction algorithms for modulation measuring profilometry with synchronous scanning[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(3): 308006. (in Chinese)
- [6] WEI Z M, CAO Y P, WU H T, *et al.* Dynamic phase-differencing profilometry with number-theoretical phase unwrapping and interleaved projection [J]. *Optics Express*, 2024, 32(11): 19578.
- [7] 方宇, 柯晓龙, 俞永恒, 等. 用于浮雕的线激光扫描三维重建系统[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(22): 2211007.
FANG Y, KE X L, YU Y H, *et al.* Three-dimensional relief reconstruction system based on laser line scanning [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(22): 2211007. (in Chinese)
- [8] CHEN B Q, SHI P, LI H S, *et al.* Three-dimensional imaging and reconstructions of objects under rainy conditions using the generation and propagation of coherent structured signal[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2022, 14(1): 7811010.
- [9] 程瑶, 吴哲滔, 石肖伊, 等. 基于双目结构光周视扫描的 3D 件三维重构与位姿估计研究[J]. 光学精密工程, 2025, 33(2): 337-347.
CHENG Y, WU Z T, SHI X Y, *et al.* Research of 3D reconstruction and position estimation of 3D pieces based on binocular structured light peripheral scanning[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2025, 33(2): 337-347. (in Chinese)
- [10] 王锐, 常锴, 符国浩, 等. 单线激光雷达与 GNSS/INS 的空间重构[J]. 光学精密工程, 2020, 28(4): 851-858.
WANG R, CHANG K, FU G H, *et al.* Space reconstruction using single-line LIDAR and GNSS/INS fused data[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(4): 851-858. (in Chinese)
- [11] YE Y P, SONG Z. An accurate 3D point cloud registration approach for the turntable-based 3d scanning system [C]. 2015 *IEEE International Conference on Information and Automation*. August 8-10, 2015, Lijiang, China. IEEE, 2015: 982-986.
- [12] 李明航, 曹益平, 吴海涛, 等. 一种高反光物体的三维测量方法[J]. 光学与光电技术, 2023, 21(2): 11-19.
LI M H, CAO Y P, WU H T, *et al.* Three-dimensional measurement for highly reflective object [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2023, 21(2): 11-19. (in Chinese)
- [13] YE B, WU Z, HE S K, *et al.* Recognition and robot grasping of disordered workpieces with 3D laser line profile sensor[J]. *Systems Science & Control Engineering*, 2023, 11(1): 2207584.
- [14] SAMARAWICKRAMA K, SHARMA G, ANGLERAUD A, *et al.* 6D Assembly Pose Estimation by Point Cloud Registration for Robotic Manipulation [C]. 2024 *IEEE 20th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*. August 28 - September 1, 2024, Bari, Italy. IEEE, 2024: 846-853.
- [15] 苟宸, 廖晓波, 李通, 等. 复杂空心涡轮叶片点云快速配准[J]. 光学精密工程, 2025, 33(5): 829-838.
GOU C, LIAO X B, LI T, *et al.* Fast registration of point cloud of complex hollow turbine blade [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2025, 33(5): 829-838. (in Chinese)
- [16] 卢昱杰, 王硕, 王明康, 等. 基于点云空间语义解析的既有建筑室内 BIM 自动化逆建模方法[J/OL]. 建筑结构学报, 1-15 [2025-07-13].
LU Y J, WANG S, WANG M K, *et al.* An Automated Reverse Modeling Method for Interior BIM of Existing Buildings based on Point Cloud Spatial Semantic Analysis [J/OL]. *Journal of Building Structures*, 1-15 [2025-07-13]. <https://doi.org/10.14006/j.jzjgxb.2024.0632>. (in Chinese)
- [17] LIU H, LIU D H, CHEN J J. Depth-informed point cloud-to-BIM registration for construction inspection using augmented reality [J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2024, 62: 102867.
- [18] YANG L, MA H W, NIE Z, *et al.* 3D LiDAR point cloud registration based on IMU preintegrated

- tion in coal mine roadways[J]. *Sensors*, 2023, 23(7): 3473.
- [19] 肖宇峰, 黄鹤, 郑杰, 等. Kinect与二维激光雷达结合的机器人障碍检测[J]. 电子科技大学学报, 2018, 47(3): 337-342.
- XIAO Y F, HUANG H, ZHENG J, *et al.* Obstacle detection for robot based on kinect and 2D lidar [J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2018, 47(3): 337-342. (in Chinese)
- [20] 钟雷声, 夏辉, 陈佳林. 基于双目视觉和单线激光雷达的三维场景重建系统和算法[J]. 测绘通报, 2024(5): 48-52, 59.
- ZHONG L S, XIA H, CHEN J L. 3D scene reconstruction system and algorithm based on stereo vision and single-line LiDAR[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2024(5): 48-52, 59. (in Chinese)
- [21] XU X B, ZHAO M H, LU Y H, *et al.* Design of 2D LiDAR and camera fusion system improved by differential evolutionary PID with nonlinear tracking compensator[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2021, 116: 103776.
- [22] CHEN M, LIU P F, ZHAO H C. LiDAR-camera fusion: Dual transformer enhancement for 3D object detection[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2023, 120: 105815.
- [23] ZHEN W K, HU Y Y, LIU J F, *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.
- [24] LIN Z P, GAO Z, CHEN B M, *et al.* Accurate LiDAR-camera fused odometry and RGB-colored mapping[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2024, 9(3): 2495-2502.
- [25] CAMPOS C, ELVIRA R, RODRÍGUEZ J J G, *et al.* ORB-SLAM3: an accurate open-source library for visual, visual-inertial, and multimap SLAM [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2021, 37(6): 1874-1890.
- [26] Proceedings Third International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling [C]. *Proceedings Third International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling*. May 28 June- 1, 2001, Quebec City, QC, Canada. IEEE, 2001.

作者简介:



杨洪涛(1972—),男,福建莆田人,博士,教授,博士生导师,1993年、2001年于安徽理工大学分别获得学士、硕士学位,2007年于合肥工业大学获得博士学位,现为安徽理工大学创新创业学院院长,主要从事精密测试技术、现代精度理论及应用等方面的研究。
E-mail: lloyd@163.com



黄昌九(1999—),男,安徽宿州人,硕士研究生,2021年于安徽理工大学获得学士学位,主要研究方向为点云处理,计算机视觉。E-mail: 2023200504@aust.edu.cn