

面向矿山自动驾驶的激光雷达和相机联合标定研究

杨国云

(华润水泥 (南宁) 有限公司 广西 南宁 530029)

摘要: 随着人工智能技术的快速发展, 自动驾驶已成为研究热点, 其中, 无人矿山卡车 (无人矿卡) 是自动驾驶应用落地的典型案例。通常, 无人矿卡采用同步建图和定位 (SLAM) 技术进行地图构建和位置导航, 并在此基础上实现路径规划和避障。高精度的 SLAM 建图和定位, 需要对激光雷达和相机等传感器进行标定。本文设计了一种 3D 激光雷达 - 相机的联合标定方法。首先, 通过激光雷达的扫描信息, 获取其安装的俯仰角和高度; 然后, 利用黑白棋盘格标定板获取相机相对传感器平台的姿态外参数; 最后, 综合激光雷达和相机的标定结果, 对激光雷达和相机联合标定。实验结果表明该方法具有较高的标定精度。

关键词: 激光扫描; 矿山场景; 相机标定; 配准; 自动驾驶

0 引言

近年来, 随着人工智能技术的发展, 移动机器人、测绘遥感、自动驾驶等领域取得了重要研究进展, 很多研究得到了实际应用, 无人矿山卡车是典型应用之一。无人矿卡需要对环境进行感知, 进而实现定位、建图、路径规划和避障等功能。这些功能的基础, 就是多种传感器的综合运用, 例如激光雷达、相机、毫米波雷达、GPS 等。在进行建图和定位时, 需要对多传感器进行融合, 形成统一的时空体系, 以便充分运用各种传感器采集的数据, 激光雷达和相机在多传感器融合中表现尤为突出。例如, 基于相机的视觉感知系统在自动驾驶中得到了广泛的应用, 具有成本低、性能高的优势。

然而, 在获取 3D 信息时, 单靠视觉感知系统无法提供自动驾驶所需的准确的 3D 信息, 特别是在背景纹理单一的情况下。另外, 纯视觉解决方案在获取 3D 信息时需要很高的计算成本, 例如 ZED 相机的双目立体视觉。在获取三维信息方面, 激光雷达具有宽广的测量范围、高准确度的距离值和角度值, 受光线影响小等优点^[1]。但激光雷达通常分辨率较低。为了充分发挥这两种传感器的优势, 通常将这两种传感器的数据信息进行融合, 信息互补。为了完美地融合这两种传感器, 除了要克服传感器本身影响融合效果的因素外, 还需要对两个传感器的外部参数进行准确的校准。两者的外部参数, 简称外参。外参的几何校准是一个外部参数估计问题, 需准确地将两个或多个传感器的二维像素值与现实世界中的三维点云进行关联。由于获取和存储数据的方法不同, 在不同数据模态中准确匹配同一参考点是一个难题, 这给传感器外参计算带来了挑战。

1 传感器外参校准方法及研究思路

1.1 传感器外参校准方法概述

早在 20 世纪 70 年代, 就出现了各种校准方法。例如 Heikkila 和 Silven 提出了较完整的校准过程, 包括特征点提取、模型拟合和图像校正。通过这一过程, 除了获得两个传感器的外部参数此外, 还可以获得相机模型的参数和失真系数; 可以有效地补偿图像失真。现代校正方法也基本上包括了这个方法的所有方面。如今的车载测绘设备、移动机器人等, 往往都是配备了多个不同的传感器, 以提高鲁棒性和覆盖率^[2]。

目前有的校准程序可以满足多传感器套件的校准需求, 如 Matlab 的相机校准工具等, 但是大多数方法仍然需要人工从激光扫描的点云和相机拍摄的图像中选取同名特征点, 这是一个耗时和耗力的过程。为了简化操作, 本文提出了便携的交互式激光雷达和相机外参校准工具。另外, 还提出了一个两阶段的解决方案, 首先自动校准相机参数, 然后进行相机 - 激光雷达校准。为了提高光照鲁棒性, 使用激光雷达和六个摄像头组成一个多传感器系统, 并通过拟合多个象棋的法线来校准外部参数。更进一步地, Heng 等人使用地图和自然特征来增强基于棋盘格标定的效果^[3]。

随着深度学习的发展, 基于深度学习的多传感器校准也成为研究热点。使用深度卷积神经网络来估计相机和激光雷达之间的外参, 它为配准提供了比较稳定的初值, 并动态修正后续的外参估计。利用几何监督对深度学习进行优化, 自动估计激光雷达和相机之间的外参, 它的特色是不需要初始估计值, 并且能实时估计激光雷达和相机之间的外参, 不需要标记点。从而提出了一种新型的基于 CNN (卷积神经网络) 的激光雷达 - 相机校

准算法。它在使用深度学习方法进行校准之前,需要收集大量准确标记的数据进行训练。

可以看到,传统的迭代或深度学习的动态估计,使得校准工作在准确性和稳健性方面有了很大的改进。但是,目前的校准方法仍然存在一些问题。(1)大多数方法仍然受限于激光雷达本身的测量精度的影响。虽然激光雷达测距数据的峰值位置分布不受最佳延迟和强度下的信号振幅的影响,并且接近于正态分布。然而,在实际测量过程中,不可避免地会受到各种因素的影响。(2)目前研究中采用的测量场景较简单,在复杂场景中,例如矿山场景(图1),校准的精度和准确度有待进一步改进。



图1 矿山场景

1.2 研究思路简介

本文旨在解决复杂场景下的激光雷达-相机校准的问题,使其能在矿山环境中进行有效的标定工作。为此,设计了一个激光-单目相机的刚体进行标定,其刚体结构如图2所示。所设计的这种刚体能稳定存在于复杂的室外矿山环境,其自带的太阳能电池板能解决矿山电源供应问题。为了应对点云-图像数据异构性、点云的稀疏性、数据采集的噪声和错误,本文构建了一套方法,利用激光点云和图像中的角点特征进行自动匹配。首先利用标定板,在空旷场地进行多位置的标定,自动识别点云和图像中标定板的角点;然后,利用标定板的先验知识进行角点的配对,得出每一个标定位置的外参;最后,根据距离和方位,指定配准的策略。这样,可以对



图2 激光-相机集成结构

空间中不同方向、不同距离的场景进行点云-图像配准,从而可以实现该结构下的激光雷达-相机标定。

2 相机和激光雷达联合标定

2.1 标定板设计

采用亚克力材料制作一个校准板,根据激光雷达的强度特性进行表面处理,以便棋盘格可以同时被激光雷达和相机有效采集,这为激光雷达和相机外参的自动校准提供了基础。该标定板是在标准的棋盘式标定板的基础上,根据实践中32线激光器而设计的,其格子数为 7×9 ,宽度为1200mm,高度为1400mm,厚度为8mm,如图3所示。

当激光雷达扫描外部的高反射材料时,获得比周围环境的扫描点更高的强度信息。根据这一特点,相机和激光雷达可以通过目标分割自动识别出棋盘格。在同一时间采集图像特征点信息和校准板的点云信息,从而使它们能够与其他特征点一起参与优化。激光雷达扫描标定板如图4所示,其中红色

框标识标定板的位置。

2.2 外参求解方法

外参求解时,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旋转矩阵。首先,在激光雷达与相机外参标定前获取相机的

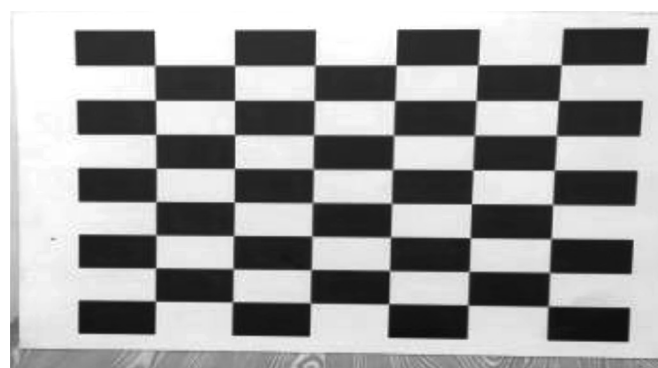


图3 棋盘格标定板

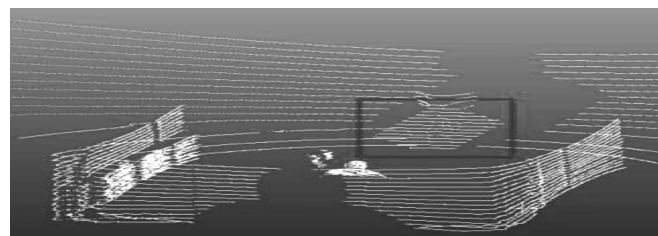


图4 标定场景示意图

固有参数，即相机的内参 M ，然后将外参求解转化为 perspective-n-point (PnP) 问题。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：

$$[u, v, 1]^T = M[X_c, Y_c, Z_c]^T \tag{1}$$

式中： (u, v) — 像素坐标系中的坐标；
 (X_c, Y_c, Z_c) — 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：

$$[X_c, Y_c, Z_c]^T = [R_t, t][X, Y, Z, 1]^T \tag{2}$$

式中： (X, Y, Z) — 激光雷达坐标系中的位置坐标；
 R_t — 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；
 t — 三维平移向量，即待求解的标定外参。

根据式 (1) 和式 (2) 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棋盘标定板的特征点，故所提方法采用棋盘标定板作为标定的参考目标^[4]。

根据图像与点云对应标定板的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值。首先设计标定点的布局，如图 5 所示，采用远中近三个距离，标记 a ~ e 五个点；然后，对每个点，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、与图像法向量的校准误差，求解最优旋转矩阵；然后求出点云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值；依次对五个点进行外参计算，得到不同位置的标定参数。

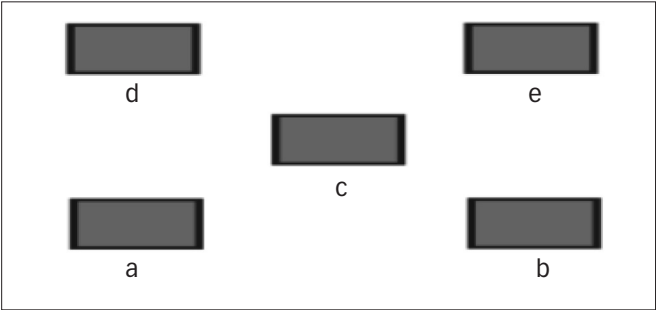


图 5 标定点布局示意图

3 实验验证与分析

3.1 实验设置

在实验中，采用 RoboSense 公司的 RS-LiDAR-32 多线激光雷达，相机采用海康威视 200 万像素的网络摄像机。

3.2 衡量标准

采用重投影误差作为评价的指标。重投影误差，是指真实三维空间点在图像平面上的投影（图像上的像素

点）和重投影（计算得到的虚拟的像素点）之间位置的差值。归一化的重投影误差（Normalized reprojection error, NRE）可评估不同距离下的标定精度，NRE 值越低表示标定误差越小，精度越高^[5]。

3.3 标定结果

进行了 10 组标定实验。取 10 组标定结果计算重投影误差的平均值，以对标定性能进行评估。在实验中，标定的中间结果如图 6 所示。

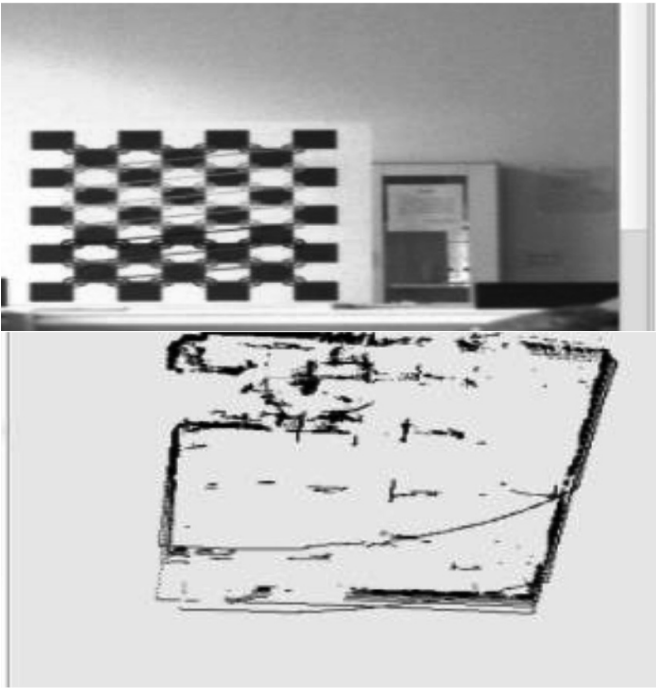


图 6 标定过程的中间结果展示

在每次的标定完成后，得到的结果包括：相机外参、相机内参、相机畸变系数，并且计算重投影误差。结果平均值如表 1、表 2 和表 3 所示。

根据 10 次标定的结果，计算得到重投影误差为 3.203 像素。该结果满足矿山场景下的无人矿卡作业需求^[6,7]。

表 1 激光雷达到相机的转移矩阵结果

7.65×10^{-2}	3.07×10^{-1}	-9.48×10^{-1}	20
-7.59×10^{-1}	6.34×10^{-1}	1.44×10^{-1}	-19.9
6.46×10^{-1}	7.08×10^{-1}	2.82×10^{-1}	-11.1
0	0	0	1

表 2 相机内参矩阵结果

4.31×10^3	0	8.13×10^2
0	4.37×10^3	6.24×10^2
0	0	1

表 3 相机的畸变系数矩阵结果

-6.44	-3.94×10^2	-36.2	-2.57×10^{-1}	-2.23
-------	---------------------	-------	------------------------	-------

（下转第 71 页）

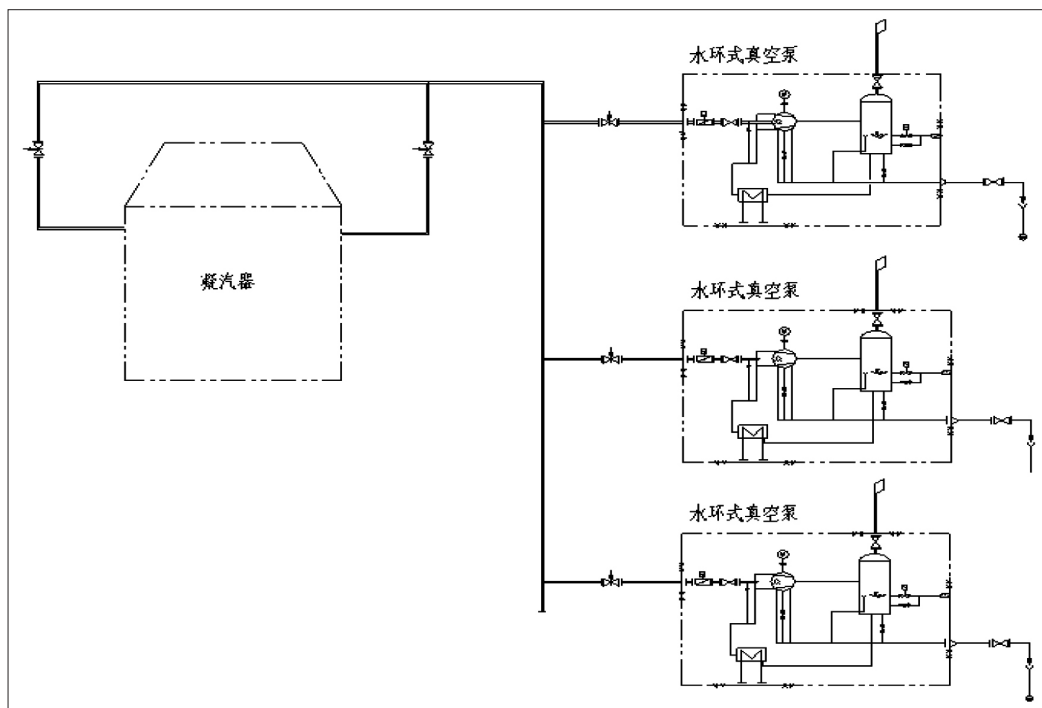


图 5 抽真空系统流程图

—水环真空泵系统中两种真空泵在结构、性能、系统构成和经济性等方面进行对比分析,选择更适合本项目的抽真空系统,并计算本工程的真空泵选型参数,推荐本工程每台机组设置 3 台 50%容量水环真空泵。并且根据以往工程设计经验及真空系统的特点,对抽真空系统进行优化,避免现场压力开关误动作,保证机组运行安全。

参考文献:

[1] 李斌,李晓辉,陈荣轩.火电厂真空系统的改造

与运行[J].电站辅机,2021,42(02):14-16.

[2] 张彦飞,牛佳.1000MW 机组真空系统节能技术研究与应

用[J].能源科技,2022,20(03):60-62.

[3] 高峰.机械抽真空技术在蒸馏装置上的应用[J].中国机械,2020(08):67-68.

[4] 杨作梁,杨森,马洪源,等.水环真空泵夏季工况性能下降应对措施对比研究[J].汽轮机技术,2020,62(01):53-56+60.

[5] 洪小江,曾名劭.高效气冷罗茨真空泵组在汽轮发电机组的节能应用[J].江西电力,2021,45(08):48-50.

[6] 张进治.真空泵系统工艺设计计算及选型[J].中国石油和化工标准与质量,2013,33(18):228+269.

[7] 中国电力企业联合会.大中型火力发电厂设计规范:GB 50660-2011[S].北京:中国计划出版社,2011.

作者简介:史良宵(1991.05-),男,汉族,河北衡水人,硕士研究生,工程师,研究方向:热机专业设计。

(上接第 67 页)

4 结语

本文针对无人矿卡作业场景下的传感器融合问题,提出了激光雷达-相机的联合标定方法。采用多距离、多方位的标定点布局,利用黑白棋盘格标定板获取相机相对传感器平台的姿态外参数,实现远景、中景和近景的图像和点云配准。实验结果显示本方法获得了小于 4 像素的重投影误差,有较高的标定精度。

参考文献:

[1] 王琰.基于多传感器融合的室内定位技术研究[D].徐州:中国矿业大学,2019.

[2] 余荣杰,田野,孙剑.高等级自动驾驶汽车虚拟测试:研究进展与前沿[J].中国公路学报,2020,33(11):125-138.

[3] 陈唯实,黄毅峰,卢贤锋.多传感器融合的无人机探测技术应用综述[J].现代雷达,2020,42(6):15-29.

[4] 刘博,于洋,姜朔.激光雷达探测及三维成像研究进展[J].光电工程,2019,46(7):15-27.

[5] 朱冰,张培兴,赵健,等.基于场景的自动驾驶汽车虚拟测试研究进展[J].中国公路学报,2019,32(6):1-19.

[6] 王国琿,钱克矛.线阵相机标定方法综述[J].光学学报,2020,40(1):175-187.

[7] 刘青松,谢晓方,张烜喆,等.用于聚焦型光场相机标定的棋盘角点检测算法[J].光学学报,2020,40(14):147-154.

作者简介:杨国云(1981.07-),男,汉族,湖南湘潭人,大专,工程师,研究方向:水泥、骨料露天矿山工程机械管理。