

文章编号 1004-924X(2011)04-0938-06

成像激光雷达与摄像机外部位置关系的标定

胡 峰, 胡春生, 王省书, 焦宏伟

(国防科技大学 光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 为了确定成像激光雷达与摄像机两种不同传感器的相互位置参数, 建立两者的一一映射关系, 在现有激光雷达与摄像机外部参数标定方法的基础上, 通过引入奇异值分解技术, 对现有标定算法进行了改进。首先, 介绍了改进标定算法的基本原理, 采用奇异值分解方法求解超定方程组, 得到成像激光雷达坐标系与摄像机坐标系之间的投影变换矩阵。为了降低噪声影响, 使用非线性优化算法优化初值。然后, 利用自制的立体标定靶进行了标定实验, 并使用已标定出的结果对成像激光雷达图像和摄像机图像进行了融合实验来验证提出的标定算法。实验结果表明, 该算法平均标定精度达到 $13.33 \mu\text{m}$, 标准差为 $7.49 \mu\text{m}$, 比原始算法提高了 1 倍, 基本满足图像融合对标定精度的一般要求。

关键词: 成像激光雷达; 摄像机; 外部参数; 标定; 图像融合

中图分类号: TN958.98; TP73 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111904.0938

Calibration of external relation between imaging laser radar and camera

HU Feng, HU Chun-sheng, WANG Xing-shu, JIAO Hong-wei

(College of Photoelectric Science and Engineering,
National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In order to determine the position parameters between an imaging laser radar and a camera and to establish the mapping relation between them, an improved calibration method was proposed based on Singular Value Decomposition (SVD) and present calibration arithmetics. Firstly, the calibration principle was introduced, then the SVD was used to solve overdetermined equations to obtain the projective transformation matrixes of laser radar coordinates and camera coordinates. To reduce the influence of noise, the initial result was optimized with the Levenberg-Marquardt algorithm. Then, the calibration experiments were carried out with a 3D calibration object and the image fusion experiment was performed according to the calibration result to validate the improved calibration arithmetic. Experimental results indicate that the average calibration precision of the arithmetic is $13.33 \mu\text{m}$ and the standard error is $7.49 \mu\text{m}$, which is doubled that of the original arithmetic. The precision of the improved calibration arithmetic can meet the requirement of image fusion.

Key words: imaging laser radar; camera; external parameters; calibration; image fusion

1 引言

城市和道路等外部场景重建在诸如建筑规划、3D地图、虚拟现实、地形导航等领域具有广泛的应用前景^[1]。为了产生真实的户外环境模型,需要精确的三维几何距离信息和纹理信息。

成像激光雷达是一种可以直接获取目标三维几何距离的激光雷达,是近年来蓬勃发展起来的新兴测量技术,已经广泛应用于遥感、测绘、大气探测、紧急避险等诸多领域^[2]。成像激光雷达可以得到目标的角度—角度—距离图像(三维图像)和角度—角度—强度图像。但由于受成像速率和脉冲激光器重复频率的限制,激光雷达获取的三维图像分辨率较低,并且只能获得目标的灰度图像,因此,不能反映目标的三维真实色彩信息。而摄像机能够获取目标的真彩和纹理信息,通过把激光雷达获得的三维距离图像与摄像机获得的二维彩色图像进行融合,可以较容易地重构三维场景,提高目标的检测和识别效率,高速实时地获得目标的三维精细信息,在三维场景重建、机器人导航以及战场侦察评估等领域具有重要的应用前景。

为了融合激光雷达与摄像机获得的图像信息,精确获得激光雷达坐标系与摄像机坐标系之间的对应变换关系是至关重要的。获得这一变换关系的过程称为激光雷达与摄像机的外部位置关系标定^[3]。二者外部参数标定的精度在很大程度上影响最后的图像融合精度和逼真度。近年来,国内外学者做了大量关于激光雷达与摄像机外部参数标定方法的研究。美国华盛顿大学机器人研究室最先提出了激光雷达与 CCD 的标定方法^[4]。陈远等人在此基础上对其进行了改进,提高了标定精度^[5]。Ganhua Li 等人提出了使用线特征标定激光雷达与摄像机外部参数的方法^[3],得到了较满意的结果。Florian Schweiger 等人提出了使

用平面模板标定摄像机与激光雷达参数的方法^[6],Sergio 等人采用圆形标定靶标定摄像机与激光雷达的外部位置关系,得到了激光雷达在摄像机坐标系下的姿态估计^[7]。文献^[8]介绍了摄像机与 3D 激光雷达联合标定的新方法,使用一块平面靶标,摆放在不同位置若干次,实现摄像机与激光雷达自身参数的标定以及两者的联合标定。

目前关于激光雷达与摄像机标定方法的研究多是集中在二维激光雷达与摄像机的标定方法上,且多是使用平面标定靶进行多次标定,标定过程较长。针对成像激光雷达与摄像机外部位置关系的标定方法讨论较少,文献^[9]初步讨论了成像激光雷达与 CCD 的标定方法,其在求解过程中使用最小二乘法,但标定精度较低。

为了提高成像激光雷达与摄像机外部位置关系的标定精度,本文对文献^[9]的标定方法进行改进,使用基于奇异值分解的方法求解成像激光雷达与摄像机之间的坐标变换矩阵。本文标定方法能有效降低外界噪声影响,从而提高了标定精度。

2 标定基本原理

成像激光雷达与摄像机外部位置关系的标定过程实质上是求解成像激光雷达坐标系与摄像机图像坐标系之间的坐标变换矩阵。设标定参考点在成像激光雷达坐标系中的三维位置坐标为 $M(X, Y, Z)$, 在摄像机图像坐标系中的图像坐标为 $m(u, v)$, 根据摄像机的成像模型^[10], 两坐标之间的关系可以表示为

$$Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{P}_{3 \times 4} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中, $\mathbf{P}_{3 \times 4}$ 表示从成像激光雷达坐标系到摄像机图像坐标系的投影变换矩阵, Z_c 为任一比例因子。消去式中的 Z_c , 可得

$$\begin{pmatrix} X & Y & Z & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -uX & -uY & -uZ & -u \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X & Y & Z & 1 & -vX & -vY & -vZ & -v \end{pmatrix} \mathbf{p}' = 0, \quad (2)$$

其中, $\mathbf{p}' = (p_{11}, p_{12}, p_{13}, p_{14}, p_{21}, p_{22}, p_{23}, p_{24}, p_{31}, p_{32}, p_{33}, p_{34})^T$, 对于每一标定点, 都对应式中的两个方程, 由于待求解的参数 \mathbf{p}' 有 12 个未知

变量, 因此至少需要 6 个标定才能求解出投影变换矩阵 $\mathbf{P}_{3 \times 4}$ 。为了减小标定误差, 通常选取的标定点数大于 6 个。设参与标定数为 $n (n >$

6), 则式(2)变成了超定方程组

$$\begin{pmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_1 X_1 & -u_1 Y_1 & -u_1 Z_1 & -u_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & -v_1 X_1 & -v_1 Y_1 & -v_1 Z_1 & -v_1 \\ & & & & & & & & & & & \vdots \\ X_n & Y_n & Z_n & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_n X_n & -u_n Y_n & -u_n Z_n & -u_n \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_n & Y_n & Z_n & 1 & -v_n X_n & -v_n Y_n & -v_n Z_n & -v_n \end{pmatrix} \mathbf{p}' = 0, \quad (3)$$

为表示方便,把式(3)简记为

$$\mathbf{L} \mathbf{p}' = 0, \quad (4)$$

其中 \mathbf{L} 代表式中的系数矩阵。

采用奇异值分解(SVD)方法求解超定方程组。由于系数矩阵 \mathbf{L} 中的元素为空间坐标或与图像像素坐标的乘积,数值较大,直接对其进行奇异值分解会使结果不稳定。因此,在求解前需要用坐标归一化方法对空间坐标和图像像素坐标进行归一化^[11]。设归一化后的系数矩阵为 \mathbf{L}_{new} , 空间坐标和图像坐标归一化变换矩阵分别为 \mathbf{T}_1 , \mathbf{T}_2 , 对新系数矩阵 \mathbf{L}_{new} 进行奇异值分解,得到

$$[\mathbf{U} \quad \mathbf{D} \quad \mathbf{V}] = \text{SVD}(\mathbf{L}_{\text{new}}), \quad (5)$$

记 \mathbf{V} 的最后一列对应的奇异向量为 \mathbf{P}_{new} , 则式(4)的解为

$$\mathbf{p}' = \mathbf{T}_2 / \mathbf{P}_{\text{new}} \mathbf{T}_1. \quad (6)$$

至此,便可以求得成像激光雷达坐标系到摄像机图像坐标系的投影变换矩阵 $\mathbf{P}_{3 \times 4}$ 。

由于受噪声影响,以上求得的变换矩阵 $\mathbf{P}_{3 \times 4}$ 不是最佳投影变换矩阵,需要利用 Levenberg-Marquardt 非线性优化算法对其进行进一步优化求精,得到最优求解结果。

3 标定过程

本文使用所在单位研制的三维成像激光雷达^[12], 该雷达采用直接探测脉冲激光测距体制,利用 APD 探测器进行探测,使用单一转镜实现二维扫描,完成对目标的三维探测。由于所用的成像激光雷达激光扫描点不可见,所以使用一种特殊立体标定靶作为标定物,它由 3 个平面构成,如图 1 所示。

整个标定过程如下:

(1)拟合立体标定靶 3 个平面。由于成像激光雷达的分辨率较摄像机低,不能直接得到网格交点在激光雷达坐标系中的三维坐标,所以首先

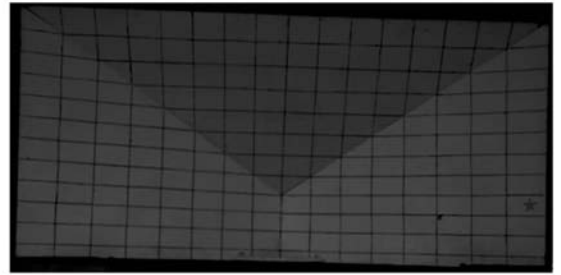


图 1 立体标定靶

Fig. 1 Stereo calibration object

需要根据标定靶在成像激光雷达坐标系中的三维坐标,采用最小二乘法拟合构成立体靶的 3 个平面方程。

(2)由拟合出的 3 个平面方程,结合网格线尺寸,计算出网格交点在成像激光雷达坐标系下的三维坐标。

(3)用图像处理的方法提取网格交点在摄像机图像坐标系中的图像坐标。

(4)对标定点空间三维坐标和图像坐标进行归一化处理。

(5)奇异值分解求解投影变换矩阵。

(6)非线性优化求精。由于噪声影响,上述利用奇异值分解求得的变换矩阵不是最优解,因此需要使用 Levenberg-Marquardt 非线性优化算法优化求精。

4 标定实验与结果分析

图 2 是实验系统装置图,摄像机固定在成像激光雷达一侧。标定时,让成像激光雷达和摄像机同步采集数据,由于使用了立体标定靶,所以只需一幅图像即可标定出成像激光雷达与摄像机坐标系之间的投影变换矩阵。

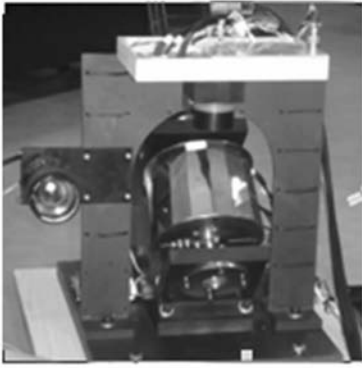


图2 标定实验装置图

Fig. 2 Experiment configuration of calibration

根据前面介绍的标定方法,最终求解出成像激光雷达坐标系与摄像机坐标系之间的投影变换矩阵为:

$$P_{3 \times 4} = \begin{bmatrix} 510.767 & 154.072 & 23.745 & -100.504 \\ 27.269 & 119.617 & -507.664 & -33.091 \\ 0.008 & 0.236 & 0.013 & -0.050 \end{bmatrix}.$$

为了评估算法的标定精度,引入空间三维点的再投影误差,如下式描述

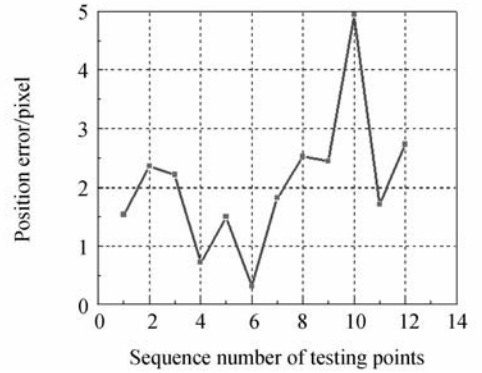
$$R_e = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{(u_{di} - \hat{u}_i)^2 + (v_{di} - \hat{v}_i)^2}. \quad (7)$$

其中, (u_{di}, v_{di}) 为提取的测试点实际图像坐标, (\hat{u}_i, \hat{v}_i) 为根据式(1)计算的投影点图像坐标, N 是参与评估用的测试点数。

在标定靶上选取未参加标定的测试点,根据上述评判标准,利用本次标定出的结果,求得 CCD 坐标系与激光雷达坐标系变换关系的标定精度为:平均精度 $R_e = 2.0663$ pixel,标准差 $d_{st} = 1.1613$ pixel。实验所用摄像机像元尺寸为 $6.45 \mu\text{m}/\text{pixel}$,折算后平均标定精度为 $13.33 \mu\text{m}$,标准差为 $7.49 \mu\text{m}$ 。

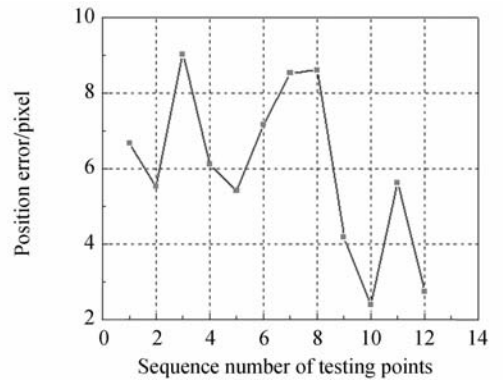
为了比较改进后的算法与文献[9]中的算法的标定精度,采用同样的标定数据,利用文献[9]中的标定算法重新进行了标定,并用同样的测试数据计算了其标定精度。图3示出了在两种标定算法下,各测试点在 CCD 图像上的实际像素点位置与投影位置的偏差,图(a)为利用本文改进后的算法得到的结果,图(b)为采用文献[9]中的算法得到的结果。

表1从测试点的平均位置偏差和标准差角度对两种算法的标定精度进行了比较。可以看出,改进后的算法标定精度得到了明显提高。



(a) 改进标定算法

(a) Improved calibration arithmetic



(b) 文献标定算法

(b) Calibration arithmetic in literature

图3 两种算法标定误差分布对比图

Fig. 3 Distributing comparison of calibration error using two calibration arithmetics

表1 两种算法的标定精度比较

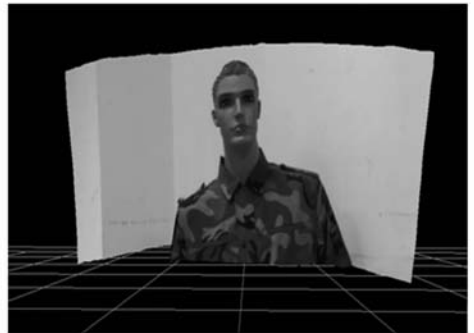
Tab. 1 Comparison of calibration precisions

	本文改进后 标定算法	文献中[9]的 标定算法
平均位置偏差 /pixel	2.066 3	5.997 6
标准差 /pixel	1.161 3	2.161 9

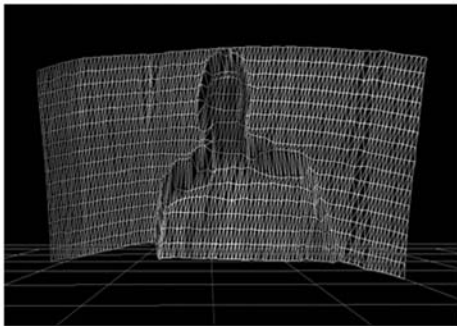
为了检验算法的标定效果,把成像激光雷达扫描的图像与摄像机图像进行融合。利用标定好的 CCD 摄像机和激光雷达对室内场景进行重建,图4(a)为摄像机获得的场景图片,是一个人物模型和墙角。图4(b)为激光雷达对场景重建获得的效果图,图4(c)为光顺处理后的重建场景图,图4(d)为 CCD 和激光雷达相融合对场景重建的



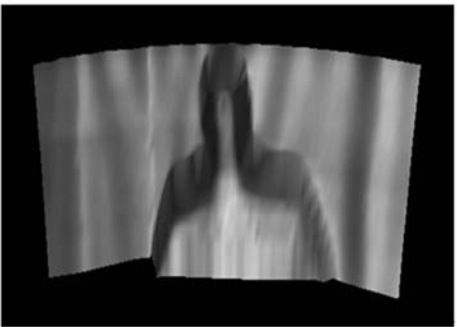
(a) 摄像机获得的场景图片
(a) Picture captured by camera



(d) 摄像机和成像激光雷达融合场景图
(d) Fusion image



(b) 成像激光雷达重建场景图
(b) Image captured by lidar



(c) 光顺处理后的重建场景图
(c) Image after smoothing

图 4 图像融合实验结果

Fig. 4 Experiment results of image fusion

效果图,其中加入了 CCD 图像的彩色信息。

从融合结果可以看出,利用本文算法标定出的结果在融合成像激光雷达与摄像机图像时,未发生明显的错位情况,基本可以满足图像的融合效果。实验结果表明,该方法的标定精度达到 2 pixel,能够满足图像融合的一般要求。同时,由于采用立体标定靶,只需一幅图像即可完成标定,提高了标定效率。因此,本文标定方法具有高精度、高效率 and 很高的使用价值。

5 结 论

本文在总结激光雷达与摄像机现有标定算法的基础上,对成像激光雷达与摄像机外部位置参数标定方法进行了改进。通过使用奇异值分解的方法求解超定方程组,有效降低了噪声的影响,提高了标定精度。实验结果表明,该方法的平均标定精度为 $13.33 \mu\text{m}$,标准差为 $7.49 \mu\text{m}$,较原始算法提高了 1 倍左右。同时,由于采用立体标定靶,只需一幅图像即可完成标定,提高了标定效率。本文标定方法兼有高精度和高效率,能够满足图像融合对标定精度的一般要求。

参考文献:

[1] XAVIER B, FRANCOIS G, MINES P, *et al.*. Modeling and calibration of coupled fish-eye CCD camera and laser range scanner for outdoor environment reconstruction[C]. *3DIM of IEEE*, 2007: 2939-2943.

[2] 张大勇,吴文启,吴美平. 机载激光雷达系统标定方法[J]. *光学精密工程*, 2009,17(11):2806-2812.
ZHANG D Y, WU W Q, WU M P. Calibration technology of airborne lidar[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(11):2806-2812. (in Chinese)

[3] GANHUA L, YUNHUI L, LI D, *et al.*. An algo-

rithm for extrinsic parameters calibration of a camera and a laser range finder using line features[C]. *Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2007, 8:3854-3859.

- [4] QILONG Z, ROBERT P. Extrinsic calibration of a camera and laser range finder[J]. *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2004,3:2301-2306.
- [5] 陈远,赵志敏,陈震. 激光雷达和 CCD 外部标定方法的改进及其应用研究[J]. *应用激光*, 2008, 28(3):219-223.
- CHEN Y, ZHAO ZH M, CHEN ZH. The Improvement of Extrinsic Calibration of Laser Rangefinder with CCD and its Applications[J]. *Applied Laser*, 2008,28(3):219-223. (in Chinese)
- [6] FLORIAN S, INGO B, ECKEHARD S. Joint calibration of a camera triplet and laser rangefinder[C]. *ICME of IEEE*, 2008,6:1201-1204.
- [7] SERGIO A, RODRIGUEZ F, VINCENT F, et al.. Extrinsic Calibration between a Multi-Layer Lidar and a Camera[C]. *Proceedings of IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems*, 2008,2:214-219.
- [8] 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 ZH 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. (in Chinese)
- [9] 林鸿生,胡春生. 三维成像激光雷达图像与摄像机图像的融合[J]. *内燃机与动力装置*, 2009,6(s):1-4.
- LIN H SH, HU CH SH. Image Fusion of the Camera and the Imaging Ladar [J]. *I. C. E&Powerplant*, 2009,6(s):1-4. (in Chinese)
- [10] 刘国忠,王伯雄,史辉,等. 足部三维测量系统中 CCD 传感器的全局标定[J]. *光学精密工程*, 2007,15(7):1124-1129.
- LIU G ZH, WANG B X, SHI H, et al.. Global calibration of CCD cameras in measurement system for 3-D foot shapes [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(7):1124-1129. (in Chinese)
- [11] RICHARD I H. In Defence of the 8-point Algorithm[J]. *IEEE*, 1995,8:1064-1070.
- [12] 胡春生. 脉冲半导体激光器高速三维成像激光雷达研究[D]. 长沙:国防科技大学,2005.
- HU C S. *Research of high-speed 3D-imaging lidar using a laser diode*[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005. (in Chinese)

作者简介:



胡峰(1983-),男,安徽界首人,博士研究生,2007年于电子科技大学获得学士学位,2009年于国防科技大学获得硕士学位,主要从事光电仪器与测控技术方面的研究。E-mail: hufeng683@163.com



胡春生(1976-),男,湖北浠水人,副教授,硕士生导师,1998年、2001年、2005年于国防科技大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事三维成像激光雷达、高精度惯性导航系统和姿态测量系统方面的研究。E-mail: trenthon@163.com



焦宏伟(1982-),男,吉林四平人,博士研究生,2004年、2006年于国防科技大学分别获得学士、硕士学位,主要从事光电仪器与测控技术方面的研究。E-mail: flyboynudt@yahoo.com.cn

导师简介:



王省书(1963-),女,浙江永康人,教授,博士生导师,1985年、2006年于国防科技大学分别获得学士、博士学位,现为国防科技大学光电科学与工程学院光电系统教研室主任,主要从事计算机应用、光电技术应用方面的研究。E-mail: gfkdxws@yahoo.com.cn