

一种脉冲激光雷达与摄像机标定方法的研究

焦宏伟¹ 秦石乔² 胡春生¹ 王省书¹

(¹ 国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)
² 国防科学技术大学理学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 激光雷达和 CCD 摄像机各自都具有快速获取物体空间信息的能力, 广泛应用于真实场景的三维建模中。激光雷达与 CCD 摄像机数据融合面临的首要问题是二者之间坐标系的标定, 针对脉冲激光雷达和 CCD 的特点设计了一种三维标定靶, 提出了一种改进的外部标定算法, 利用主成分分析法拟合平面, 提高了标定精度。将激光雷达和 CCD 标定算法运用在物体三维建模中, 研究了基于外部标定算法的三维重建和纹理映射, 取得了较好效果。

关键词 激光技术; 激光雷达; CCD 摄像机; 坐标标定; 主成分分析法; 纹理映射

中图分类号 TN958.98 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0108006

Research on the Coordinates Calibration of Pulse Ladar and Camera

Jiao Hongwei¹ Qin Shiqiao² Hu Chunsheng¹ Wang Xingshu¹

(¹ College of Opto-Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)
(² College of Science, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract Ladar and CCD camera have the excellent ability of capturing 3D information of objects, and they are widely used in 3D modeling. The major problem of the fusion of ladar data and CCD camera data is the coordinates calibration between them. In consideration of the traits of ladar and CCD camera, a special 3D calibration object is designed, and an improved coordinates calibration method is proposed, which fits a plane by using principal components analysis and can highly improve the calibration precision. The improved coordinates calibration method is applied on the 3D reconstruction and texture mapping. Experiment results show that our algorithm gives good result in texture mapping.

Key words laser technique; ladar; CCD camera; coordinates calibration; principal components analysis; texture mapping

OCIS codes 100.0100; 110.0110; 140.0140; 330.0330; 150.0150

1 引 言

成像激光雷达和双 CCD 交会测量是目前正在发展中的两种主要三维成像技术^[1~3], 均可探测三维图像。由于两者的成像原理完全不同, 成像激光雷达和双 CCD 交会测量具有各自的特点。成像激光雷达的优点是可直接探测三维图像、作用距离大和获取数据快等, 缺点是分辨率低; 双 CCD 交会测

量的优点是测量分辨率高, 缺点是图像匹配复杂、作用距离近, 测量精度随距离增加而降低。因此, 如果能结合激光雷达高速获取数据的能力和 CCD 图像处理的快速与便利性^[4], 将提高三维重建的效率, 有着更为广泛的应用前景。

激光雷达与 CCD 数据融合面临的首要问题是二者之间坐标系的标定^[5~7], 激光雷达与 CCD 的标

收稿日期: 2010-05-31; **收到修改稿日期**: 2010-08-12

基金项目: 国家自然科学基金(60677041)资助课题。

作者简介: 焦宏伟(1982—), 男, 博士研究生, 主要从事激光雷达数据处理、图像处理及机器视觉等方面的研究。

E-mail: flyboynudt@yahoo.com.cn

导师简介: 秦石乔(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光电仪器与测控技术、光电精确制导技术等方面的研究。

E-mail: sqqin@nudt.edu.cn

定技术最先由美国华盛顿大学的机器人研究室提出^[8],较好地解决了激光雷达和 CCD 数据融合的问题,但在激光雷达坐标系与摄像机坐标系下同名点提取上存在较大误差。本文对一种脉冲激光雷达与 CCD 标定技术进行了改进,从而提高标定的精确度,并对其在三维重建的一些关键技术——纹理映射方面的应用做了初步的研究。

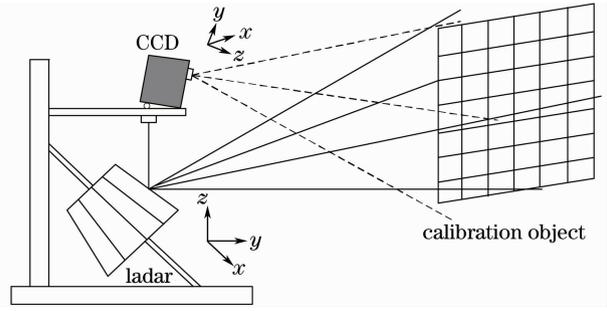


图 1 标定靶与激光雷达和 CCD 位置示意图
Fig. 1 Sketch map of lidar with CCD camera and calibration object

2 激光雷达和 CCD 摄像机的外部标定算法

在三维空间中,激光雷达和 CCD 摄像机都有其各自的坐标系,分别称为激光雷达坐标系和摄像机坐标系,以激光雷达坐标系作为世界坐标系。这里所研究的标定算法是基于一种机械扫描式脉冲激光雷达^[9],外部标定的基本方法是将一个标定靶置于激光雷达和 CCD 摄像机前,如图 1 所示。

标定靶作为联系激光雷达和 CCD 之间的一个中介物体,通过将标定靶同时被激光雷达和 CCD 摄

像机捕获的方法,求出激光雷达坐标系和摄像机坐标系之间的旋转和平移矩阵 \mathbf{R} 和 \mathbf{T} 以及内参矩阵 \mathbf{F} 。传统的摄像机标定方法^[10]利用平面靶板作为标定靶,通过标定板变换不同的位置以提供更多的约束条件。

根据针孔成像原理,由世界坐标点到理想像素点的齐次变换为

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{F}[\mathbf{R} \quad \mathbf{T}] \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{1,1} & m_{1,2} & m_{1,3} & m_{1,4} \\ m_{2,1} & m_{2,2} & m_{2,3} & m_{2,4} \\ m_{3,1} & m_{3,2} & m_{3,3} & m_{3,4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 \mathbf{M} 为投影矩阵, $[\mathbf{R} \quad \mathbf{T}]$ 为摄像机的外参矩阵, \mathbf{R} 和 \mathbf{T} 分别定义为

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & C_x \\ 0 & f_y & C_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{1,1} & r_{1,2} & r_{1,3} \\ r_{2,1} & r_{2,2} & r_{2,3} \\ r_{3,1} & r_{3,2} & r_{3,3} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{T} = \begin{bmatrix} r_{1,4} \\ r_{2,4} \\ r_{3,4} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 f_x, f_y 分别表示 x 方向和 y 方向上像点的物理坐标到图像坐标的比例系数; C_x, C_y 表示主光轴与像平面交点的图像坐标。

3 标定方法的改进

激光雷达坐标系与摄像机坐标系之间的标定的难点在于确定标定靶及特征点在激光雷达坐标系中

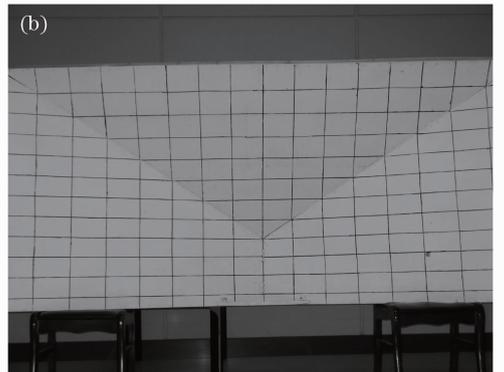
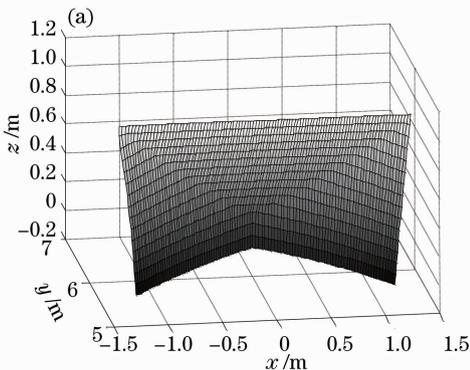


图 2 激光雷达立体标定靶。(a) 模型, (b) 实物

Fig. 2 Three-dimensional calibration object. (a) model, (b) real object

的精确位置。由于平面靶不具有显著三维定位特征,所以利用平面靶进行标定时,由激光雷达测得的平面靶位置有较大误差。根据脉冲激光雷达视场及扫描特点,设计了一种立体标定靶,其形状如图2所示,标定靶由3个面组成,左右平面约成 135° 角,上平面与地面约成 135° 角,在各个面上绘制出特征网格,网格的结点可以作为标志点,这样设计的目的是使激光雷达在靶上各个面的回波均匀,由激光雷达的测量引起的误差最小。

3.1 激光雷达数据滤波

受内部电路噪声影响,激光雷达获取的数据中包含噪声,采用的激光雷达测距精度为 ± 5 cm,应用这些数据之前,需对其进行滤波预处理。数学平均法能有效地滤除这种随机噪声,对连续 N 次采样值进行数学平均,其数学表达式为

$$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i, \quad (3)$$

式中 \bar{y} 为 N 个采样点的数学平均值, y_i 为第 i 个采样点的值。随着采样次数 N 的增加,平均误差逐渐减少, N 为50时平均误差减少70%左右^[11],这里取 N 为50。

3.2 标定靶特征点三维坐标提取

实际激光雷达对标定靶扫描数据经过滤波后成像效果如图3所示。

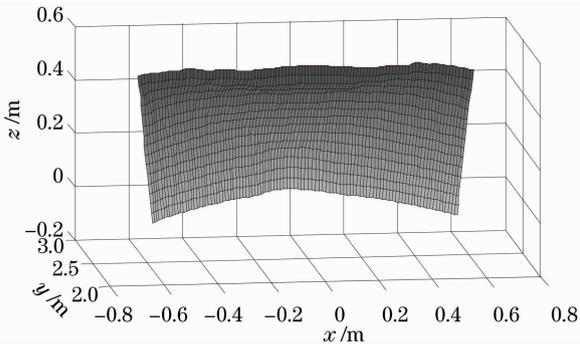


图3 标定靶激光扫描图

Fig. 3 Scan map of three-dimensional calibration object

对标定靶上的特征点三维坐标提取步骤如下:

1) 在激光雷达数据中分别提取出3个平面上

的点集 X_{1i}, X_{2j}, X_{3k} ,如图4所示。

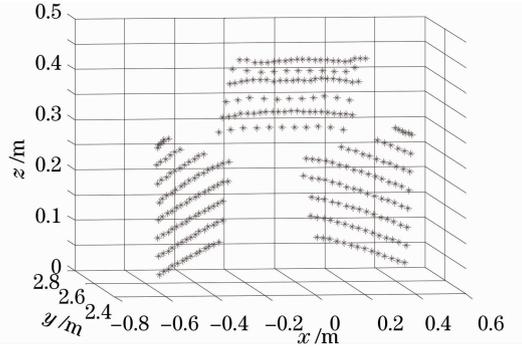


图4 激光雷达数据提取出的3个平面点集

Fig. 4 Three point sets got from ladar data

2) 对点集 X_{1i}, X_{2j}, X_{3k} 进行平面拟合,分别计算出3个平面的表达式 π_1, π_2, π_3 。

假设平面方程为 $z = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 y$,将 x, y 作为自变量, z 作为因变量,故求解平面方程的过程就是对 β 的估计过程,最小二乘估计为常用的估计方法。最小二乘估计具有优良的性质,但对于自变量和因变量无法区分的情况或者采样数据中存在突出点等情况,最小二乘估计的适应性较差,而本文正好符合这种情况,激光雷达数据的采样点 x, y, z 值均存在误差,且不能明确区分为自变量和因变量,雷达数据中也可能存在突出点的情况,对这种特征的采样数据进行分析,主成分分析法尤为适用。主成分分析^[12]的工作目标是在力求数据信息丢失最少的情况下,对高维变量进行降维处理,用少数综合变量取代原来变量,以达到简化数据、揭示变量间关系的目的。利用主成分分析法对点集进行分析,得到主成分向量 V_1, V_2 和 V_3, V_1 和 V_2 组成了拟合平面的一组基, V_3 与 V_1 和 V_2 正交,代表平面的法线方向,利用 V_3 和点集的中心点 \bar{X} 就可以得到平面的方程。利用采样点集到拟合平面的垂直距离的平方和来评估最小二乘估计和主成分分析法,得到的结果如表1所示。由表1可以看出主成分分析法拟合平面误差大大小于最小二乘法,因此可以大幅降低激光雷达标志点三维坐标提取误差。采用主成分分析法拟合的3个平面如图5所示。

表1 采样点集到拟合平面垂直距离的平方和

Table 1 Sum of squared perpendicular distance from each point to the plane

| | Left plane | Up plane | Right plane |
|-------------------------------|------------|----------|-------------|
| Least square approximation | 0.0217 | 9.2644 | 0.0449 |
| Principal components analysis | 0.0012 | 0.0120 | 0.0025 |

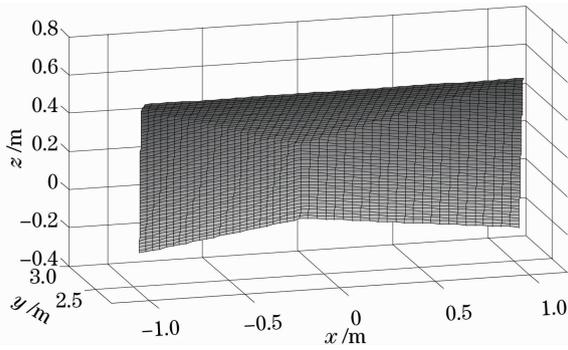


图 5 主成分分析法拟合得到的 3 个平面
Fig. 5 Three fitted planes got from principal components analysis

3) 对拟合得到的 3 个平面进行求交运算,可以得到 3 个平面的公共交点坐标和交线方程。

4) 根据其他点到公共交点的距离和各个平面的表达式,可以计算出标定靶上其他特征点的三维坐标。这样可以提取出特征点集 P_i 。

3.3 激光雷达坐标系与摄像机坐标系之间的标定

对 CCD 摄像机获取的图像进行处理,提取其中标志点的像素坐标,找出其中与特征点集 P_i 对应的图像坐标点集 u_i ,根据(1)式,只需特征点的数目大于 6 即可求出激光雷达坐标系和摄像机坐标系之间的旋转和平移矩阵 R 和 T 以及内参矩阵 F 。之后对

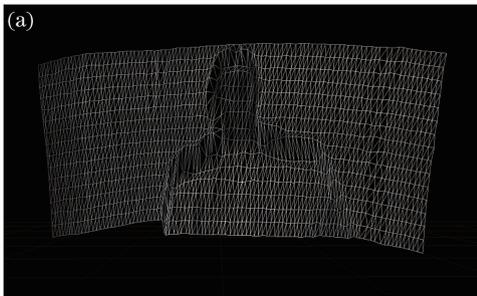


图 7 激光雷达重建效果图。(a)三维模型,(b)纹理映射后的重建效果
Fig. 7 Ladar reconstruction map. (a) three-dimensional model, (b) texture mapping

5 结 论

探讨了激光雷达和 CCD 摄像机的外部标定方法,然后针对一种脉冲激光雷达设计了独特的三维标定靶,利用主成分分析法对平面进行拟合,对标定方法进行了改进,使改进后的方法更符合实际雷达和摄像机系统,简化了标定程序,同时获得了较高的标定精度。将标定算法应用在三维重建和纹理映射,取得了满意的结果,表明该算法具有较好的应用前景。

这些参数进行优化^[13],以减少标定误差。

4 外部标定的应用

基于激光雷达和 CCD 外部标定技术,在三维模型重建和纹理映射等方面都能够用不同于以往的方法进行快速处理和计算,提高建模的效率。将外部标定技术应用在纹理映射^[14],对激光雷达重建的模型用 CCD 摄像机图像进行纹理映射。图 6 为 CCD 摄像机获得的场景图片,图 7(a)为激光雷达获得的数据经处理后所成的三维模型图,图 7(b)为经过标定后对三维重建模型进行纹理映射后所得的重建效果图。



图 6 CCD 获得的场景图片
Fig. 6 Scene map captured by CCD camera

参 考 文 献

- 1 Zhou Haibo, Ren Qiushi, Li Wanrong. Active optical 3D imaging techniques [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2004, **41**(10): 2~4
周海波,任秋实,李万荣.主动式光学三维成像技术[J].*激光与光电子学进展*, 2004, **41**(10): 2~4
- 2 Xing Yingjie, Zhang Yanfeng, Lu Haitao *et al.*. Image reconstruction from unorganized range data based on laser scanner aided stereo photography [J]. *Application Research of Computers*, 2004, **21**(8): 130~131
邢英杰,张艳峰,陆海涛等.基于激光扫描辅助立体摄影的无规则物体的三维重建[J].*计算机应用研究*, 2004, **21**(8): 130~131
- 3 Li Jiao, Tang Xinhua, Huang Xuanshao. Optical design of circular scanning laser vision sensor [J]. *Applied Laser*, 2007,

- 27(4); 295~299
李 姣, 唐新华, 黄宣劭. 环形扫描激光视觉传感器的光学系统设计[J]. 应用激光, 2007, 27(4): 295~299
- 4 Yu Xiaolei, Zhao Zhimin, Guo Linfeng. Research on the laser speckle interferometrial fringes based on CCD analysis technique [J]. *Applied Laser*, 2007, 27(5): 378~381
俞晓磊, 赵志敏, 郭林峰. 激光散斑干涉条纹的 CCD 分析技术 [J]. 应用激光, 2007, 27(5): 378~381
- 5 Li Mingjin, Xiong Xianming, Zhang Shaobing. A novel method of camera calibration based on openCV [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, 46(12): 99~102
李明金, 熊显名, 张绍兵. 一种基于 OpenCV 的摄像机标定新方法[J]. 激光与光电子学进展, 2009, 46(12): 99~102
- 6 Zhang Weiguang, Zhao Hong, Zhang Qi *et al.*. Calibration method for three-dimensional measurement system based on linear-structure light [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, 36(1): 182~188
张维光, 赵 宏, 张 琦 等. 线结构光三维轮廓测量系统的标定方法[J]. 中国激光, 2009, 36(1): 182~188
- 7 Liu Zhen, Zhang Guangjun, Wei Zhenzhong *et al.*. An accurate calibration method for line structured light vision sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(11): 3124~3128
刘 震, 张广军, 魏振忠 等. 一种高精度线结构光视觉传感器现场标定方法[J]. 光学学报, 2009, 29(11): 3124~3128
- 8 Qilong Zhang, Robert Pless. Extrinsic calibration of a camera and laser range finder (improves camera calibration) [C]. IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2004, 3: 2301~2306
- 9 Hu Chunsheng. Investigation into the High-Speed Pulsed Laser Diode 3D-Image Ladar [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005
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: 国防科学技术大学, 2005
- 10 Ma Songde, Zhang Zhengyou. Computer Vision: Compute Theory and Algorithms Foundation [M]. Beijing: Science Press, 1998
马颂德, 张正友. 计算机视觉-计算理论与算法基础[M]. 北京: 科学出版社, 1998
- 11 Chen Yuan, Zhao Zhimin, Chen Zhen. The improvement of extrinsic calibration of laser rangefinder with CCD and its applications [J]. *Applied Laser*, 2008, 28(3): 219~222
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): 219~222
- 12 I. T. Jolliffe. Principal Component Analysis [M]. Newyork: Springer Verlag, 2002
- 13 Wang Mingxin, Zhao Dongbiao, Shao Zeming. Research of calibration technology of intrinsic and extrinsic parameters of CCD camera [J]. *Machinery and Electronics*, 2004, (3): 12~14
王明昕, 赵东标, 邵泽明. CCD 摄像机内外参数标定技术研究 [J]. 机械与电子, 2004, (3): 12~14
- 14 D. Shreiner, M. Woo, J. Neider *et al.*. OpenGL Programming Guide [M]. Massachusetts: Addison-Wesley, 2001