

摄像机与3D激光测距仪外部标定新方法

刘成安^{1,2,3}, 王宁¹, 张华²

(1. 中国科学院地球化学研究所, 贵州 贵阳 550002; 2. 西南科技大学工程技术中心, 四川 绵阳 621010;
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:针对摄像机与3D激光测距仪外部标定问题,提出一种以镂空的棋盘格为标定模板的新方法.与传统标定方法不同,整个标定过程一次完成数据采集,根据图像和点云数据提取的角点实现外部标定,同时,仅采用同一块标定模板和一次数据采集完成整个标定过程,解决了以往因标定过程繁琐对标定精度带来影响的问题.实验结果表明,该方法简单实用,效果较好.

关键词:摄像机;激光测距仪;镂空棋盘格;角点;外部标定

中图分类号:TP24 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-8395(2014)02-0282-05

doi:10.3969/j.issn.1001-8395.2014.02.025

由于机器人技术的快速发展,使得其在核能利用、工业制造、航空航天等领域得到了十分广泛的应用^[1].摄像机和激光测距仪是机器人最常用的传感器,激光测距仪提供的距离信息和摄像机提供的色彩信息具有很强的互补性,这2种传感器的融合利用^[2]对于机器人跟踪控制、定位与导航、作业环境描述与地图创建和多传感器集成与信息融合等关键技术具有重要的作用,因此融合两者的信息成为现代机器人技术研究热点之一.

为了实现摄像机与激光测距仪的信息融合,精确获得激光测距仪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摄像机与激光测距仪的外部位置关系标定^[3].近年来,国内外学者做了大量关于摄像机与激光测距仪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测距仪与摄像机的标定方法^[4];G. H. Li等^[3]提出了采用直角三角形平板作为靶标,使用线特征标定激光测距仪与摄像机外部参数的方法;D. Scarramuzza等^[5]提出将激光测距仪采集的距离信息图通过变换,使场景自然边缘更清晰突出,再提取边缘线条与摄像机拍摄的照片中检测出来的边缘相匹配来实现外部标定;I. Bauermann等^[6]提出在传感器平台沿任意

轨道移动过程中针对固定靶标多次采集数据,通过最小化不同视角拍摄的多帧间场景点的欧式投影偏差来得到标定结果;S. Florian等^[7]提出了使用平面模板标定摄像机与激光测距仪参数的方法;A. Sergio等^[8]采用圆形标定靶标定摄像机与激光测距仪的外部位置关系,得到激光测距仪在摄像机坐标系下的姿态估计.项志宇等^[9]提出使用一块平面靶标,在不同位置摆放若干次,实现摄像机与激光测距仪的外部标定.

这些标定算法主要利用标定靶建立激光测距仪与摄像机的约束条件,通过标定靶(或者激光测距仪与摄像机)变换不同的位置以提供多个约束条件,求出激光坐标系和摄像机坐标系之间的外部参数.由于标定靶(或者激光测距仪与摄像机)位置变换需要多次采集数据,特征点或者边缘提取算法复杂,标定精度也会因标定过程繁琐而受到影响.针对这些不足,提出了一种基于角点提取的摄像机与3D激光测距仪外部参数标定的新方法.该方法采用一块镂空的棋盘格作靶标,摄像机与3D激光测距仪一次完成标定数据采集,无需变换标定靶(或者激光测距仪与摄像机)的位置.棋盘格因为其角点清晰,容易提取,可以很好的应用于摄像机.同时,由于镂空部分形成距离突变,使得边缘清晰,也易于从3D激光测距仪的点云数据中提取对应角点.

收稿日期:2013-03-20

基金项目:国防核能专项基金(20111137)和四川省科技厅应用基础研究基金(2011JY0059)资助项目

作者简介:刘成安(1965—),男,副教授,主要从事计算机测控技术的研究,E-mail:lch@swust.edu.cn

1 标定原理

1.1 图像角点检测算法 基于灰度图像的角点检测法是从图像灰度值估计角点的位置. 这种方法的特点是速度快,且独立于其他局部特征. 2 个具有代表性的算法:一种是 Susan 角点检测算法^[10];另一种是 Harris 角点检测算法,由于 Harris 算法采用了高斯滤波,具有很好的抗噪性^[11],是在实践中使用最广泛的角点检测算法.

Harris 角点检测算法是通过计算每一个像素点的梯度实现的. 如果 2 个方向上的绝对梯度值都大,则认为这是角点. Harris 角点检测算子通过(1)式定义

$$\begin{cases} R = \|M\| - ktr^2(M), \\ M(x,y) = \begin{bmatrix} I_u^2(x,y) & I_{uv}(x,y) \\ I_{uv}(x,y) & I_v^2(x,y) \end{bmatrix}, \\ I_u^2(x,y) = X^2 \otimes h(x,y), \\ I_v^2(x,y) = Y^2 \otimes h(x,y), \\ I_{uv}(x,y) = XY \otimes h(x,y), \\ h(x,y) = \frac{1}{2\pi} e^{-\frac{x^2+y^2}{2}}, \end{cases} \quad (1)$$

其中, $I_u(x,y)$ 和 $I_v(x,y)$ 是点 (x,y) 在 u 和 v 方向的一阶偏导数, $I_{uv}(x,y)$ 是二阶混合偏导数, k 是经验值, $h(x,y)$ 是高斯函数, X 和 Y 是一阶定向差值,它们可以通过灰度与在 u 和 v 方向的差分算子的卷积来计算,高斯函数用来减少噪声的影响,因为一阶差分算子对噪声非常的敏感. 如果 R 超过某一阈值,则认为该点是角点.

1.2 点云角点检测算法 点云的曲率计算方法较多,这些方法都是遵守这样的原则,那就是以尽量少的计算量且准确地反应曲线的曲率变化信息. 目前应用最多的是 k -cosine 法^[12].

设点的支撑区域是 $2k+1$, 则如图 1 所示, 曲线上点 $P_i(x_i, y_i, z_i)$ 和与它相距为 k 的 2 点 $P_{i+k}(x_{i+k}, y_{i+k}, z_{i+k})$, $P_{i-k}(x_{i-k}, y_{i-k}, z_{i-k})$, 所构成的矢量 \mathbf{a}_{ik} 和 \mathbf{b}_{ik} 为

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_{ik} &= (x_i - x_{i-k}, y_i - y_{i-k}, z_i - z_{i-k}) \\ \mathbf{b}_{ik} &= (x_{i+k} - x_i, y_{i+k} - y_i, z_{i+k} - z_i), \end{aligned}$$

则曲率角为

$$\theta_k(i) = \arccos \frac{\mathbf{a}_{ik} \times \mathbf{b}_{ik}}{|\mathbf{a}_{ik}| \times |\mathbf{b}_{ik}|}.$$

从图 1 可以看出, 某点的夹角大小与该点的曲率成正比关系, 即夹角越大, 曲率就越大. 当某点满足 $|\theta_k| > T$ 时, 将该点划分为候选角点, 在候选角点集合中, 选取局部区域内曲率的极大值, 就获得该局部区域的角点.



图 1 k -cosine 法
Fig. 1 k -cosine rule

1.3 外部参数标定算法 摄像机与 3D 激光测距仪的外部参数标定, 实际上就是获得摄像机坐标系与 3D 激光测距仪坐标系之间的变换关系, 如果空间一点 P 在摄像机坐标系和 3D 激光测距仪坐标系内坐标为 $P_C(X_C, Y_C, Z_C)$ 和 $P_L(X_L, Y_L, Z_L)$, 则它们的关系可由(2)式表示

$$\begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} X_L \\ Y_L \\ Z_L \end{bmatrix} + \mathbf{T}, \quad (2)$$

其中, \mathbf{R} 是一个 3×3 的旋转矩阵, \mathbf{T} 是平移矩阵.

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix}, \quad (4)$$

设标定 P_C 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, 2 坐标之间的关系可以表示为

$$Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & a_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \\ 1 \end{bmatrix} = M_1 X_C, \quad (5)$$

其中 M_1 由摄像机内部参数决定. 由(2)~(5)式, 可得

$$\begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \end{bmatrix} P^T = 0, \quad (6)$$

其中, $L_1 = (a_x^* X_L, a_x^* Y_L, a_x^* Z_L, 0, 0, 0, u_0^* X_L -$

$u^* X_L, u_0^* Y_L - u^* Y_L, u_0^* Z_L - u^* Z_L, a_x, 0, u_0 - u), L_2 = (0, 0, 0, a_y^* X_L, a_y^* Y_L, a_y^* Z_L, v_0^* X_L - v^* X_L, v_0^* Y_L - v^* Y_L, v_0^* Z_L - v^* Z_L, 0, a_y, v_0 - v), P = (r_{11}, r_{12}, r_{13}, r_{21}, r_{22}, r_{23}, r_{31}, r_{32}, r_{33}, t_x, t_y, t_z)$. 由于待求解的参数有 12 个未知变量, 因此至少需要 6 个标定才能求解出旋转矩阵 R 和平移矩阵 T . 为了减小标定误差, 通常选取的标定点数大于 6 个, 采用最小二乘法求解超定方程^[13], 可计算出旋转矩阵 R 和平移矩阵 T .

2 实验结果与分析

图 2 为将摄像机和激光测距仪固定在一起组成的融合系统实物图, 其中摄像机为 Bumblebee 双目相机, 激光测距仪为 Swiss Ranger 4 000 3D 激光测距相机. 图 3 为实验标定靶实物图, 采用镂空的棋盘格, 格子的尺寸为 6 cm × 6 cm, 标靶距 3D 激光相机大致为 2 m.

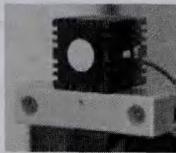


图 2 场景感知传感器
Fig. 2 Scene perception sensors

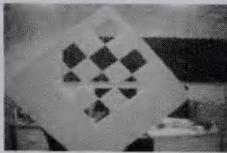


图 3 镂空的棋盘格
Fig. 3 The template of hollow checkerboard

实验中, 首先用双目相机的左目摄像机采集标定靶的图像数据, 用 Matlab 编程实现 Harris 角点检测算法, 对图像中镂空棋盘格的角点进行提取, 图像角点提取的部分结果如表 1 所示.

其次, 用 3D 激光测距相机采集镂空棋盘格的三维点云数据, 并根据相机到棋盘格大致深度, 设定阈值 t , 对大于 t 的深度数据予以滤除, 然后 VC++ 编程实现 3D 点云角点检测算法, 计算获得 3D 角点的三维信息 (x, y, z) , 镂空棋盘格点云数据与图像角点相应的角点的三维信息 (x, y, z) 如表 2 所示.

最后, 将表 1 和表 2 的对应数据带入方程(6), 并利用最小二乘法求解该超定方程, 可计算出摄像

像机和 3D 激光测距相机之间的旋转矩阵 R 和平移矩阵 T , 其结果如表 3 所示. 根据标定结果, 以 Matlab 和 VC++ 编程实现算法, 对一桌面场景目标进行空间目标的定位实验. 实验流程如下.

1) 使用 SR 4000 3D 激光测距相机和 Bumblebee 双目相机的左目摄像机同时采集同一桌面场景图像和点云数据, 图 4a、b 分别为桌面场景目标的图像和点云.

2) 用阈值法^[14] 去除深度较大的点云, 见图 5a, 然后用 RANSAC 算法^[15] 对桌面模型进行拟合, 提取桌面点云集, 见图 5b.

3) 分别对点云和图像进行分割, 分割结果分别如图 5c 和图 5d 所示.

4) 利用点云数据计算目标的三维特征, 完成 3D 模型的重构, 如图 5c 所示; 然后利用图像与点云的空间映射关系(由标定结果用 R 和 T 表示), 估计空间目标位姿、形状和大小, 实现空间目标的定位检测, 如图 5d 所示. 从图 5d 可以看到, 由目标物体的点云数据的三维特征映射到图像中目标物体的轮廓和位置等相当准确, 能准确实现空间目标的定位.

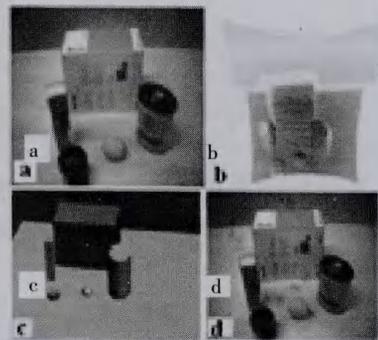


图 4 空间目标定位检测图
Fig. 4 The location of space objects

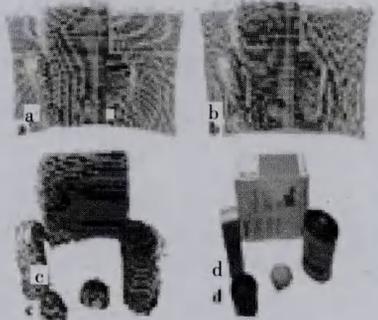


图 5 数据处理
Fig. 5 Data processing

3 结语

针对摄像机和3D激光测距仪系统外部参数的标定问题,提出一种新的标定方法.该方法采用一块镂空的棋盘格作靶标,摄像机与3D激光测距仪仅用一次标定数据采集就完成了外部参数的标定,无需变换标定靶(或者激光测距仪与摄像机)的位

置而进行多次数据采集,同时以镂空的棋盘格作靶标的图像与点云数据易于实现角点提取,算法也相当简单,从而消除了因标定过程繁琐对标定精度的影响,提高了标定效率.实验结果表明,该方法精度较高而且操作简单,具有较高的实用价值.

表1 图像角点

Table 1 The feature points of visible image(/pixel)

编号	<i>u</i>	<i>v</i>	编号	<i>u</i>	<i>v</i>	编号	<i>u</i>	<i>v</i>
1	297	48	9	306	353	17	189	215
2	248	85	10	356	314	18	326	186
3	198	130	11	400	277	19	279	223
4	149	172	12	407	192	20	227	266
5	144	260	13	372	147	21	365	231
6	183	305	14	334	95	22	317	271
7	226	353	15	287	136	23	268	311
8	260	395	16	239	176			

表2 3D点云角点

Table 2 The corner points of 3D point cloud(/cm)

编号	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>	编号	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>
1	2.59	13.13	74.07	13	-4.59	3.65	77.26
2	6.49	9.89	73.25	14	-0.51	9.44	77.77
3	12.21	5.77	74.48	15	3.22	5.45	76.00
4	16.13	2.39	74.49	16	7.88	1.43	75.90
5	17.08	-5.57	75.40	17	12.92	-2.05	77.16
6	14.24	-9.98	77.81	18	-0.50	0.81	77.17
7	9.84	-15.19	79.22	19	4.55	-2.97	77.60
8	7.02	-19.07	80.76	20	9.05	-6.50	77.39
9	2.49	-15.29	80.75	21	-3.72	-3.98	78.85
10	-2.52	-11.42	80.64	22	1.10	-7.58	79.34
11	-6.89	-8.83	81.39	23	5.73	-11.01	79.83
12	8.05	-0.13	80.19				

表3 标定结果

Table 3 The results of calibration

<i>R</i>			<i>t</i>
0.996 7	0.033 2	0.015 3	5.821
0.016 2	-0.467 1	-0.893 2	5.126
-0.018 7	0.902 1	-0.435 2	2.356

参考文献

- [1] 蔡鹤皋. 机器人将是21世纪技术发展的热点[J]. 中国机械工程,2000,11(1):58-60.
- [2] 陆建峰,唐振民,杨静宇,等. 多传感器的联合标定方法[J]. 机器人,1997,19(5):365-371.

- [3] Li G H, Li Y H, Li D. An algorithm 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] Zhang Q, Pless R. Extrinsic calibration of a camera and laser range finder[C]//IEEE International Conference on intelligent Robots and Systems, 2004, 3:2301 - 2306.
- [5] Scaramuzza D, Haratia A, Siegwart R. Extrinsic self - calibration of a camera and a 3D laser range finder from natural scenes [C]//Proceedings of the 2007 IEEE RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2007:4164 - 4169.
- [6] Bauermann I, Steinbach E. Joint calibration of a range and visual sensor for the acquisition of RGBZ Mosaics Erlangen[C]//Proceedings of VMV 2005, 2005:666 - 672.
- [7] Florian S, Lngo B, Ekehard S. Joint calibration of a camera triplet and laser range finder [C]//ICME of IEEE, 2008, 6: 1201 - 1204.
- [8] Sergio A, Rodriguez F, Vicent F. Extrinsic Calibration between a Multi - Layer Radar and a Camera[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Multi - sensor Fusion and Integration for Intelligent Systems, 2008, 2:214 - 219.
- [9] 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):1041 - 1045.
- [10] Smith S M, Brady J M. SUSAN - a new approach to low level image processing[J]. Computer Vision, 1997, 23(1):45 - 78.
- [11] 毛雁明, 兰美辉, 王运琼, 等. 一种改进的基于 Harris 的角点检测方法[J]. 计算机技术与发展, 2009, 19(5):130 - 133.
- [12] 杨雪娇. 点云的边界提取及角点检测算法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2009.
- [13] Schonemann P H. A generalized solution of theorthogonal procrustes problem[J]. Psychometrika, 1966, 31(1):1 - 10.
- [14] 杨晖. 图像分割的阈值法研究[J]. 辽宁大学学报:自然科学版, 2006, 33(2):135 - 137.
- [15] 曲天伟, 安波, 陈桂兰. 改进的 RANSAC 算法在图像配准中的应用[J]. 计算机应用, 2010, 30(7):1849 - 1851.

Novel Extrinsic Calibration Method of Camera and 3D Laser Range Finder

LIU Chengan^{1,2,3}, WANG Ning¹, ZHANG Hua²

(1. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002 Guizhou;

2. Center of Engineering and Technology, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010 Sichuan;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: This paper provides a novel method based on the calibration panel of hollow checkerboard for the external calibrating of camera and laser range finder. Compared with traditional method, this method needs only one data acquisition, and the external calibration by this method can be completed by using the angular points extracting from the image and point cloud data. This method is one of simple process because of one calibration panel and one data acquisition. And the problem of low accuracy because of complex process of the traditional method is avoided. Experimental results show this method is practical and effective.

Key words: camera; laser range finder; hollow checkerboard; angular point; extrinsic calibration

(编辑 郑月蓉)