

基于激光扫描的鱼眼相机三维标定方法

程梦娇^{1,2}, 申夏晶^{1,2}, 肖江剑², 宋文祥¹

¹上海大学机电工程与自动化学院, 上海 200072;

²中国科学院宁波材料技术与工程研究所, 浙江 宁波 315201

摘要 由于鱼眼相机成像存在较大的畸变,采用二维标定板的方法难以在图像边缘区域获得准确可靠的角点,从而导致标定精度下降,而传统的三维标定法存在标定场建造复杂,特征点数目有限等问题。为此,提出一种基于激光扫描的鱼眼相机三维标定方法。该方法首先通过激光扫描仪获取室内标定空间的三维点云图,然后利用尺寸不变特征变换匹配方法得到点云图与待标定相机照片的对应点的匹配关系,并进行分块随机抽样一致性(RANSAC)筛选,再根据对应点的图像坐标和物理坐标进行三维 RANSAC 筛选,估算最终的鱼眼相机内外参数。与经典的张正友标定法及其改进方法相比,该方法能够获得更多的有效特征点,使标定精度明显改善,从而较好地实现鱼眼相机的畸变校正。该方法简便、精确,有广泛的适用性。

关键词 机器视觉; 鱼眼相机标定; 激光扫描; 尺寸不变特征变换匹配; 随机抽样一致性算法

中图分类号 TP242.6 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0315001

Three-Dimensional Calibration of Fisheye Camera Based on Laser Scanner

Cheng Mengjiao^{1,2}, Shen Xiajing^{1,2}, Xiao Jiangjian², Song Wenxiang¹

¹ School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China;

² Ningbo Institute of Industrial Technology, Chinese Academy of Sciences, Ningbo, Zhejiang 315201, China

Abstract Due to the large distortion of fisheye camera images, the two-dimensional calibration board approaches are often difficult to obtain reliable corners around the board boundary, which may lower the calibration accuracy. Traditional three-dimensional calibration methods have some challenges on building a complex calibration field to obtain sufficient number of feature points. Therefore, a three-dimensional fisheye camera calibration method based on the laser scanner is proposed to achieve more accurate results. First, a laser scanner is used to obtain the point clouds of the fixed indoor environment. Second, an improved scale-invariant feature transform matching method is used to detect the corresponding features between point clouds and camera images. A two-round random sample consensus (RANSAC) algorithm is applied to rejecting outliers among the correspondences, and the internal and external parameters of fisheye camera are estimated based on the image and physical coordinates remaining corresponding points after the 3D RANSAC screening. Compared with the classical Zhang Zhengyou calibration method and its improved methods for various cameras, the proposed method can get more effective feature points to make calibration accuracy much higher, which can provide good lens distortion correction for fisheye camera. The proposed method is convenient, precise and extensively applicable.

Key words machine vision; fisheye camera calibration; laser scan; scale-invariant feature transform match; random sample consensus algorithm

OCIS codes 150.0155; 150.1488; 140.3460

收稿日期: 2016-07-08; **收到修改稿日期:** 2016-10-08

基金项目: 国家自然科学基金(61273276)、国家科技支撑计划(2015BAF14B00)、浙江省自然科学基金(R13F020014)

作者简介: 程梦娇(1991—),女,硕士研究生,主要从事计算机视觉方面的研究。E-mail: chengmengjiao@nimte.ac.cn

导师简介: 肖江剑(1972—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事计算机视觉、图像和视频处理、对地观测、车辆跟踪与智能交通、模式识别等方面的研究。E-mail: xiaojj@nimte.ac.cn(通信联系人)

1 引 言

鱼眼相机由于具有视场角大、景深大等优点,在导航、识别、虚拟现实、增强现实、三维重建等计算机视觉领域中有广泛的应用。为了较好地实现鱼眼相机畸变的校正,首先需要获得二维图像坐标和三维空间坐标之间的对应关系,即需要进行相机标定^[1-3]。相机标定按标定物进行划分可以分为三维标定法、二维标定法、一维标定法和零维标定法(即自标定)^[4]。自标定法不需要标定物,仅依靠多视图对应点之间的关系就可以直接进行标定^[5],此方法标定灵活,但稳健性差;一维标定法标定物简单易得,但要求一维标定物做某种特殊的运动;目前针对鱼眼相机的标定主要采用的是二维标定法和三维标定法。

张正友提出的基于棋盘格的张氏标定法是一种经典的二维标定方法^[6],该方法从不同的角度拍摄多幅棋盘格图像来求解相机的参数,对普通相机有很好的标定精度,但是用于鱼眼相机的标定时,棋盘格通常不能覆盖整个相机视场,即使能覆盖大部分视场范围,在棋盘格边缘处的角点仍存在检测误差大或角点检测不到等问题,因而标定精度无法得到保证。在三维环境中,边缘区域变形相对较小,可以清楚地检测到角点,因此采用三维标定法可以避免二维标定法的上述缺点,获得较高精度的相机标定^[4]。祝海江等^[7]采用3D包围式标定块来进行鱼眼相机标定,可以在整个视场范围获取精确的角点图像坐标,但由于标定块的限制,得到的角点个数有限,因此对标定精度有一定的影响。基于三维标定场的方法虽然可以得到较多的角点,但是精确的标定场的建造比较复杂,且需要不断进行维护^[8]。

本文提出一种基于激光扫描的三维标定方法。首先,通过激光扫描仪获取较为精确的室内环境的点云图,并利用尺寸不变特征变换(SIFT)匹配方法得到点云图与待标定相机照片对应点的匹配关系。然后,对它们进行分块随机抽样一致性(RANSAC)筛选,得到一组精确匹配的图像坐标和物理坐标,再对其进行三维RANSAC筛选,使得到的图像坐标和物理坐标的值更加精确。最后,根据筛选后得到对应点的图像坐标和物理坐标,用解析法求得相机内参和外参的初始值,采用视场(FOV)模型^[9]来描述鱼眼相机的畸变,在相机参数初始值的基础上用Levenberg-Marquardt(LM)算法^[6]进行非线性优化,求得各个参数的精确值。实验表明,该方法有较高的精度,能方便地对鱼眼相机进行标定,具有较高的实用价值。

2 基于激光扫描的三维标定算法

基于激光扫描的三维标定算法的具体过程可以分为两个部分:1)采用SIFT匹配算法得到鱼眼相机图片与激光扫描仪点云图之间对应的特征点对,通过分块RANSAC算法对这些特征点对进行筛选,根据筛选后的点对得到鱼眼图像上的特征点对应在激光扫描仪点云中的物理坐标;2)利用三维RANSAC对第一部分得到的特征点的图像像素坐标与对应的物理坐标进行进一步筛选,利用最终得到的坐标对应关系进行鱼眼相机标定。算法的整体流程如图1所示。

2.1 基于鱼眼的RANSAC区块匹配

提出的标定法首先需要得到鱼眼相机图片与激光扫描仪点云图之间对应的特征点对,相应地得到鱼眼相机图片上特征点对应的图像像素坐标和物理坐标,再根据坐标的对应关系进行标定。SIFT匹配算法是得到不同图像之间对应匹配点的经典算法,由于鱼眼相机图片与激光扫描仪点云图是异源异构的图像(图2),需要先进行一系列的变换,然后再进行SIFT匹配。为了获得较好的匹配效果,在SIFT匹配算法的基础上提出基于鱼眼图像的RANSAC区块匹配法来进行匹配。

2.1.1 激光扫描仪图像转换为球面投影图

激光点云图是反映反射率属性的图像,而鱼眼图是反映视觉属性的图像,直接进行SIFT匹配不易得到较好的结果,因此采用激光扫描仪内置相机得到的图像来进行匹配。

采用反向插值的方法将激光扫描仪得到的柱状展开图变换成类似于鱼眼图像的球面投影图。如图3所示,利用两个角度 θ 、 ψ 将两种投影图联系起来,由球面投影图的像素坐标求出这两个角度的值,也就可以求出对应柱面投影图的像素坐标,具体推导过程参见文献[10],变换结果如图4所示。

2.1.2 SIFT匹配

SIFT匹配算法在尺度空间中寻找极值点作为特征点,采用暴力匹配的方法进行匹配,鱼眼图像中距离

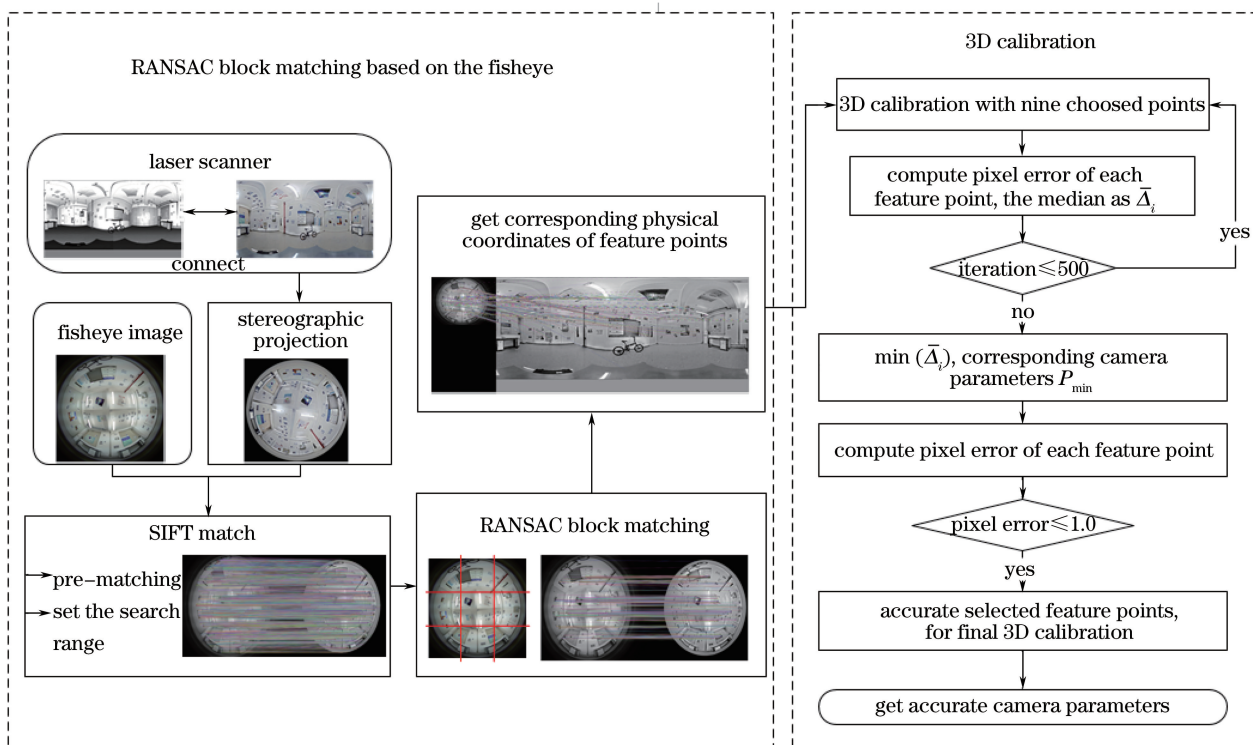


图 1 整体流程图

Fig. 1 Overall flow chart

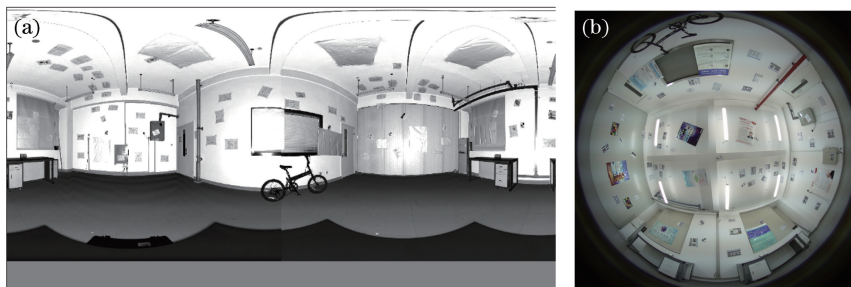


图 2 (a) 点云图与 (b) 鱼眼图

Fig. 2 (a) Point cloud image and (b) fisheye image

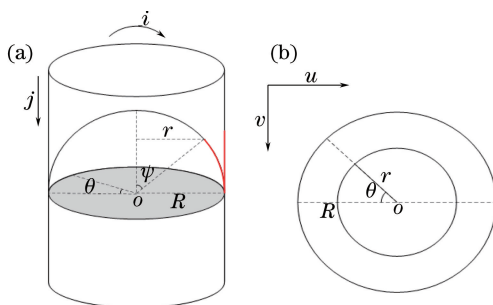


图 3 (a) 球面投影图展开为 (b) 柱面投影图

Fig. 3 (a) Spherical projection expands to (b) cylindrical projection

特征点较远的点会对算法产生干扰,导致匹配错误,限定特征点的比较范围可提高算法准确性。由图 2 和图 4 可以看出,激光扫描仪得到的图像球面投影图与鱼眼相机采集的图像差异比较大,需要对这两幅图进行预匹配。选取两张图像中 4 组对应的点对,由这 4 对对应点之间的关系 $(x_1 \ y_1 \ 1)^T = \mathbf{H} (x_2 \ y_2 \ 1)^T$ 组成方程组[其中 (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) 分别是不同图像上匹配点的像素坐标],计算两幅图像之间的单应性矩阵 \mathbf{H} ,



图 4 (a) 柱面投影图转换为 (b) 球面投影图

Fig. 4 (a) Cylindrical projection is transformed to (b) spherical projection

使其中一幅图像乘以变换矩阵, 变换为与另一幅图像视角相同的图像, 结果如图 5 所示。图 5(a) 是激光扫描仪图像的灰度图, 图 5(b) 是鱼眼相机图像的灰度图。设定一个搜索范围, 使一个特征点描述子只与其周围一个设定范围内特征点的描述子进行比较, 欧氏距离最小的点即为与其匹配的特征点。

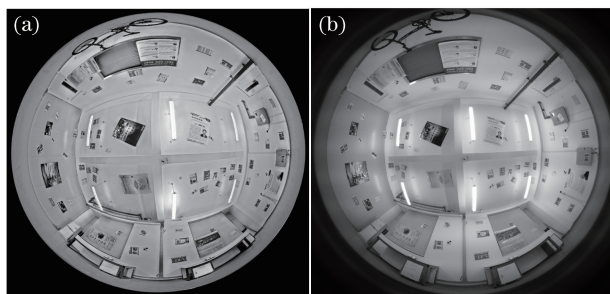


图 5 预匹配后两幅图的对对应关系。(a) 激光扫描仪图像的灰度图; (b) 鱼眼相机图像的灰度图

Fig. 5 Corresponding relationship between two pre-matched images. (a) Gray scale of the laser scanner image; (b) gray scale of the fisheye camera image

2.1.3 分块 RANSAC 筛选

由于鱼眼图片中间区域与边缘区域的畸变程度不同, 直接进行 RANSAC 筛选得到的点很少, 因而采用分块 RANSAC 算法来进行筛选。将图像分成 9 块区域, 如图 6 所示, 对每一块区域分别求匹配的两组点之间的单应性矩阵, 利用该矩阵将一幅图像上的特征点投影到另一幅图像上, 通过计算其与对应特征点之间的像素距离来筛选局外点, 剩下的点即是基于鱼眼的 RANSAC 区块匹配方法得到的正确匹配的特征点。图 7 是本文改进的匹配方法与直接用 SIFT 匹配算法得到的结果对比, 可明显看出, 本文方法匹配到的特征点更多且分布更均匀。

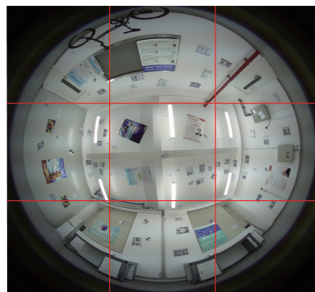


图 6 图像分块进行 RANSAC 筛选

Fig. 6 Image blocks for RANSAC screening

2.1.4 得到鱼眼图像上特征点对应的物理坐标

激光点云图变换后, 图像上特征点的图像像素坐标经过预匹配的逆过程, 变换为球面投影图上对应点的图像像素坐标; 利用球面投影图上的点与其对应的柱面展开图上的点的变换公式, 求得特征点在柱面展开图上的图像像素坐标, 即得到特征点在激光点云图上的图像像素坐标; 接着根据点云数据的存储方式索引得到

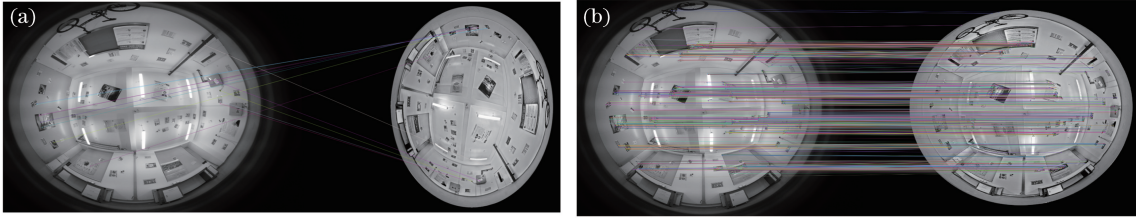


图 7 匹配结果对比。(a) 直接 SIFT 匹配结果；(b) 本文方法匹配结果

Fig. 7 Contrast of matching results. (a) Result of SIFT matching; (b) result of improved matching

点云图中特征点对应的物理坐标,从而得到鱼眼图像上特征点的图像像素坐标与物理坐标的对应关系。

2.2 三维标定

2.2.1 三维标定法

由于针孔成像模型具有成像简单、标定方便、符合人眼视觉效果等优点^[11],因此采用的三维标定方法是基于针孔模型进行的,也是两步法^[12]的一种改进方法。首先用直接线性变换(DLT)的方法^[13]求相机参数的初值,

$$z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ \mathbf{0}^T & \mathbf{1} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 $(X, Y, Z)^T$ 是特征点的物理坐标, $(u, v)^T$ 是特征点的图像像素坐标, z_c 是比例因子, f_x, f_y, u_0, v_0 是相机的内参, \mathbf{R}, \mathbf{t} 是旋转矩阵和平移向量。(1)式经过变换可得,

$$\begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_1 X_1 & -u_1 Y_1 & -u_1 Z_1 & -u_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & -v_1 X_1 & -v_1 Y_1 & -v_1 Z_1 & -v_1 \\ X_2 & Y_2 & Z_2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_2 X_2 & -u_2 Y_2 & -u_2 Z_2 & -u_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_2 & Y_2 & Z_2 & 1 & -v_2 X_2 & -v_2 Y_2 & -v_2 Z_2 & -v_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_N & Y_N & Z_N & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_N X_N & -u_N Y_N & -u_N Z_N & -u_N \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_N & Y_N & Z_N & 1 & -v_N X_N & -v_N Y_N & -v_N Z_N & -v_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{11} \\ m_{12} \\ m_{13} \\ m_{14} \\ \vdots \\ m_{32} \\ m_{33} \\ m_{34} \end{bmatrix} = \mathbf{0}, \quad (3)$$

求解这个方程组即可求出相机各参数的初值,具体求解过程参见文献[14]。

引入非线性畸变模型,本文采用 FOV 模型^[9],具体投影过程如下:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + \mathbf{t}, \quad (4)$$

$$x' = \frac{x}{z}, y' = \frac{y}{z}, \quad (5)$$

$$r_u = \sqrt{x'^2 + y'^2}, \quad (6)$$

$$r_d = \frac{1}{w} \arctan \left[2r_u \tan \left(\frac{w}{2} \right) \right], \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_x & 0 \\ 0 & f_y \end{bmatrix} \frac{r_d}{r_u} \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix}. \quad (8)$$

通过(4)~(8)式计算物理坐标对应的像素坐标 $m'(u, v)$,与实际对应的像素坐标 $m(u, v)$ 进行比较,求

得它们之间的欧氏距离 d , 采用 LM 非线性优化方法^[6]使 d 最小, 从而求出相机参数的精确值。该优化问题的数学表达为

$$\min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \|m_{ij} - m'_{ij}\|^2. \quad (9)$$

以解析法求得各参数作为迭代的初始值, 然后根据(4)~(8)式分别对 \mathbf{R} 、 \mathbf{t} 、 ω 、 f_x 、 f_y 、 u_0 、 v_0 求偏导, 构成一个雅可比矩阵 \mathbf{J} , 根据这个雅可比矩阵 \mathbf{J} 得到相机各参数(内参、外参、畸变参数)的增量, 得到一组新的参数, 更新 $m'(u, v)$ 值, 得到一个新的目标函数值, 经过不断的迭代, 使得目标函数[(9)式]值最小, 直至达到一个迭代终止条件, 此时相机各参数的值即认为是最终求得的精确值。

2.2.2 三维 RANSAC 筛选估计最终的标定参数

LM 非线性优化的结果与各参数迭代初始值有很大关系^[15], 如果选择的迭代初始值不佳, LM 优化可能收敛于局部最优值, 而得不到精确的相机参数。本文采用基于鱼眼的 RANSAC 区块匹配方法得到的特征点的图像坐标值和物理坐标值依然会存在一些偏差, 直接用解析法求得初值可能无法得到精确的优化结果。为了得到较高的标定精度, 提出通过三维 RANSAC 筛选来估计最终的标定参数, 从而得到较高的标定精度, 具体过程如下:

- 1) 将图像分成 9 块, 从每块图像的特征点中各随机选一个特征点;
- 2) 利用步骤 1) 中选取的 9 个特征点进行标定, 得到一组参数 $P_i (f_x^i, f_y^i, c_x^i, c_y^i, \omega^i, \mathbf{R}^i, \mathbf{t}^i)$, 然后对每一个特征点求一个像素误差 Δ_j , 再对这些像素误差进行排序, 选取这个序列的中值记为 $\bar{\Delta}_j$;
- 3) 重复步骤 1)、2), 选取 500 次, 得到 500 个中值, 比较得到这 500 个值中的最小值, 选取其对应求出的相机参数 P ;
- 4) 根据参数 P 对每一个特征点求其对应的像素误差, 设定 1 个像素为阈值, 当特征点对应的像素误差小于等于 1 时, 将这个点作为选取的特征点, 当特征点对应的像素误差大于 1 时, 则将这个点筛选掉, 最后可以得到一组精确特征点坐标;
- 5) 根据这组精确的特征点进行三维标定, 标定结果即为最终精确的标定结果。

上述求解过程不仅排除了坐标值有偏差的特征点, 而且避免了初始值不佳导致优化收敛于局部最优值的问题, 使鱼眼标定得到较高的标定精度。

3 实验结果与分析

选取一间贴有标志物的房间作为标定环境, 采用激光扫描仪 (Imager 5010C, Z+F Laser, 德国) 的 High 级别进行扫描, 用扫描仪自带的软件对扫描数据进行相关的处理。点云中的总点数为 44502216 个, 点云图的分辨率为 10000 pixel \times 5000 pixel, 按行进行存储的矩阵大小为 10014 \times 4444, 在扫描半径为 10 m 时, 每个像素可达到 6.3 mm 的精度。不失一般性, 分别选取焦距为 1.25 mm、视场角约为 180° 的鱼眼相机和视场角约为 230° 的全景相机 (WIPET S1, 优势科技, 中国) 来进行实验, 并与其他标定算法进行比较分析。

3.1 精确性

全景相机得到的照片分辨率为 4608 pixel \times 3456 pixel, 分别采用经典张正友标定法、基于 FOV 模型的张正友标定法、基于五阶多项式鱼眼变换 (PFET) 模型的张正友标定法^[9]、Opencv3.0 中的鱼眼标定方法 (Opencv3.0 开源库中开源的算法, 该方法参考斯坦福大学开发的摄像机标定工具箱中的 Calib_gui_fisheye

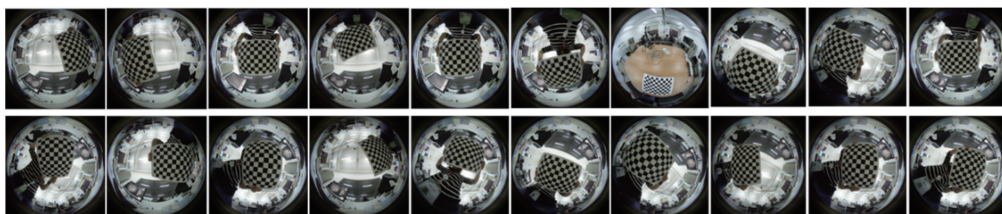


图 8 20 幅用于标定的图像

Fig. 8 20 images for calibration

部分的处理过程)以及本文提出的基于激光扫描仪的三维标定法对其进行标定,并对标定结果进行比较。本文方法标定只需要一幅图像,其他四种标定法需要多幅图像,图 8 为实验中其他四种标定方法使用的 20 幅图像。标定结果如图 9 所示,从图中可以明显看出,与其他四种标定方法相比,本文标定方法效果最好。

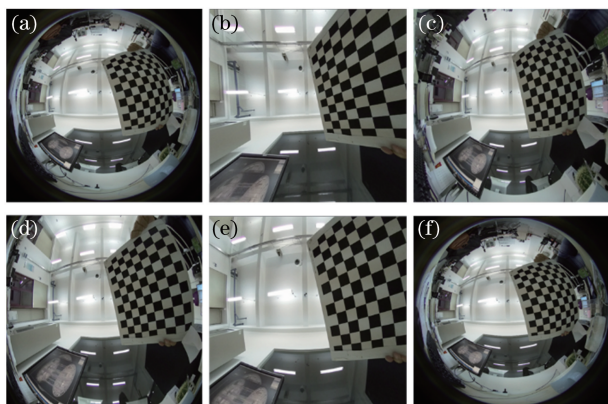


图 9 五种标定方法的结果对比。(a) 原图; (b) 本文方法结果(采用单张图); (c) Opencv3.0 中鱼眼标定方法的结果; (d) 经典张正友标定法的结果; (e) 基于 PFET 模型的张正友标定法的结果; (f) 基于 FOV 模型的张正友标定法的结果
 Fig. 9 Comparison of results of five calibration methods. (a) Original image; (b) result of the proposed method (using a single image); (c) result of fisheye calibration method in Opencv3.0; (d) result of classical Zhang Zhengyou calibration method; (e) result of Zhang Zhengyou calibration method with PFET model; (f) result of Zhang Zhengyou calibration method with FOV model

图 9 中棋盘格各角点的物理坐标通过不同标定方法所得的相机参数,可求得对应的图像坐标,将其与真实图像坐标相比较,即可求得均方根像素误差。表 1 列出了以上五种标定方法的像素误差(图中 20、29 分别表示标定相机所用图像的张数),本文标定方法由于没有使用标定板,无法通过标定板上的角点求得均方根像素误差并进行对比,故选取 204 个特征点,求得对应的均方根像素误差,由于这些特征点数量多于图 9 中棋盘格角点,且分布更广,通过像素误差可以在科学的范围内比较标定方法的精度。由表 1 可知,基于激光扫描仪的三维标定法的标定精度高于其他四种方法,对于分辨率为 4608 pixel×3456 pixel 的鱼眼图像,0.6 数量级的像素误差是一个较高的标定精度。

表 1 不同标定方法的像素误差
 Table 1 Pixel error of different calibration methods

Calibration method	Pixel error /pixel	Calibration method	Pixel error /pixel
Zhang Zhengyou method (20)	16.6832	Zhang Zhengyou method (29)	18.4525
Zhang's improved method+PFET (20)	15.9619	Zhang's improved method+PFET (29)	17.7829
Zhang's improved method+FOV (20)	42.4222	Zhang's improved method+FOV (29)	42.5859
Fisheye calibration method (20) in Opencv 3.0	2.87704	3D calibration based on laser scanner	0.623351

3.2 广泛性

当棋盘格畸变很大时,张正友标定法及其改进方法、Opencv3.0 中的鱼眼标定方法均无法获得角点,从而无法进行标定,因此前面的实验是在棋盘格畸变不大的情况下进行的。采用基于激光扫描的三维标定法得到的参数对棋盘格畸变较大的图片进行校正,得到了较好的效果,证明了所得参数是正确的,具体结果如图 10 所示。

采用本文方法标定得到的参数对图 10(c)鱼眼图进行柱面投影,结果如图 11 所示。从图中可以看出,柱面投影图在竖直方向的线条均为直线,从这个角度也可说明标定得到的参数是正确的。

对焦距为 1.25 mm 的鱼眼相机进行标定,标定结果如图 12 所示,表 2 则列出了五种标定方法的像素误差,可以看出,本文标定法对该鱼眼相机也能得到较好的标定结果。本文提出的基于激光扫描仪的三维标定法具有广泛性和普适性,既可以对相机拍摄的任意照片进行标定,也可以对任意鱼眼相机进行标定。

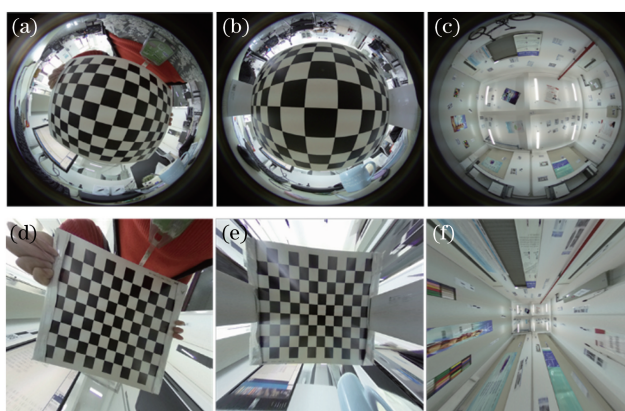


图 10 大畸变情况下的校正结果。(a)(b)(c) 原图；(d)(e)(f) 对应的本文方法标定结果

Fig. 10 Correction results under severe distortion. (a)(b)(c) Original images;
(d)(e)(f) corresponding results by the proposed method



图 11 鱼眼图片的柱面展开图

Fig. 11 Cylindrical expansion of fisheye image

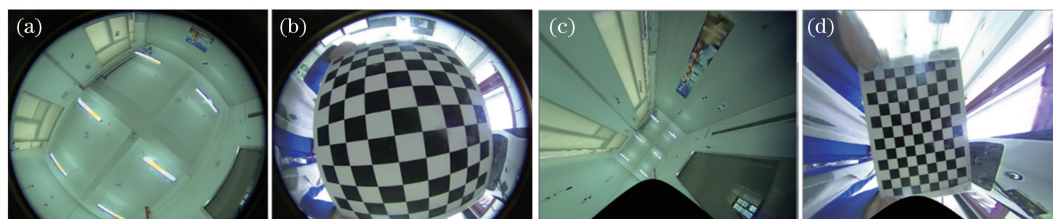


图 12 1.25 mm 焦距鱼眼相机的标定结果。(a)(b) 原图；(c)(d) 对应的本文方法标定结果

Fig. 12 Calibration results for a fisheye camera with 1.25 mm focal length. (a)(b) Original images;
(c)(d) corresponding results by the proposed method

表 2 不同标定方法的像素误差

Table 2 Pixel error of different calibration methods

Calibration method	Pixel error /pixel
Zhang Zhengyou method	5.00399
Zhang's improved method+PFET	4.79365
Zhang's improved method+FOV	25.86400
Fisheye calibration method in Opencv 3.0	3.34803
Proposed method	0.96033

4 结 论

在本文提出的鱼眼相机标定方法中,首先利用激光扫描仪获得数量较多且均匀分布的特征点,然后用基于鱼眼的 RANSAC 区块匹配方法在二维尺度对特征点进行筛选,得到较精确的匹配点,确保得到特征点坐标的精确性,最后对得到的特征点的图像像素坐标与物理坐标进行三维 RANSAC 筛选,确保得到较好的标定精度。实验结果表明,该方法具有较高的精确性,可以标定任意视场角的相机拍摄的任意照片,具有广泛的适用性。

参 考 文 献

- [1] Feng Weijia. Study on omnidirectional vision and panoramic stereo sphere vision based on fish-eye lens [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012: 1-7.
冯为嘉. 基于鱼镜头的全方位视觉及全景立体球视觉研究 [D]. 天津: 天津大学, 2012: 1-7.
- [2] Wu Zejun, Wu Qingyang, Zhang Baichun. A new calibration method for fisheye lens based on spherical model [J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(5): 0508006.
吴泽俊, 吴庆阳, 张佰春. 一种新的基于球面模型的鱼镜头标定方法 [J]. 中国激光, 2015, 42(5): 0508006.
- [3] Yan Aqi, Yang Jianfeng, Cao Jianzhong, *et al.* Optical system design of space fisheye camera [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(10): 1022004.
闫阿奇, 杨建峰, 曹剑中, 等. 航天鱼眼相机光学系统设计的研究 [J]. 光学学报, 2011, 31(10): 1022004.
- [4] Medioni G, Kang S B. Emerging topics in computer vision [M]. New Jersey: Prentice Hall, 2004: 4-43.
- [5] Maybank S J, Faugeras O D. A theory of self-calibration of a moving camera [J]. International Journal of Computer Vision, 1992, 8(2): 123-151.
- [6] Zhang Z Y. A flexible new technique for camera calibration [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [7] Zhu Haijiang, Li Shigang. 2D pattern vs. surrounding 3D pattern for fisheye camera calibration [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2008, 29(7): 1512-1516.
祝海江, 李仕刚. 基于 2D 模板与 3D 包围式标定块的鱼眼相机标定 [J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(7): 1512-1516.
- [8] Arfaoui A, Thibault S. Fisheye lens calibration using virtual grid [J]. Applied Optics, 2013, 52(12): 2577-2583.
- [9] Hughes C, Denny P, Jones E, *et al.* Accuracy of fish-eye lens models [J]. Applied Optics, 2010, 49(17): 3338-3347.
- [10] Xiong Youyi. Research on data registration and integration of terrestrial laser scanning point clouds and fisheye panoramic images [D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2014: 48-52.
熊友谊. 地面激光扫描点云与鱼眼全景影像的配准与整合研究 [D]. 北京: 中国矿业大学, 2014: 48-52.
- [11] Tu Bo, Liu Lu, Liu Yihui, *et al.* A calibration method for fish-eye cameras based on pinhole model [J]. Acta Automatica Sinica, 2014, 40(4): 653-659.
涂波, 刘璐, 刘一会, 等. 一种扩展小孔成像模型的鱼眼相机矫正与标定方法 [J]. 自动化学报, 2014, 40(4): 653-659.
- [12] Tsai R Y. An efficient and accurate camera calibration technique for 3D machine vision [C]. Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1986: 364-374.
- [13] Heikkila J, Silven O. A four-step camera calibration procedure with implicit image correction [C]. Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1997: 1106-1112.
- [14] Trucco E, Verri A. Introductory techniques for 3D computer vision [M]. New Jersey: Prentice Hall, 1998: 132-136.
- [15] Huang Junhui, Wang Zhao, Xue Qi, *et al.* Calibration of camera with rational function lens distortion model [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(5): 0508001.
黄军辉, 王昭, 薛琦, 等. 基于有理函数式镜头畸变模型的摄像机标定 [J]. 中国激光, 2014, 41(5): 0508001.