第 40 卷 第 4 期 自 动 化 学 报 Vol. 40, No. 4
2014 年 4 月 ACTA AUTOMATICA SINICA April, 2014

一种扩展小孔成像模型的鱼眼相机矫正与标定方法

涂 波 [1] 刘 璐 [1] 刘一会 [1] 金 野 [1] 汤俊雄 [1]

摘 要 鱼眼相机由于其超宽的视场范围 (Field of view, FOV) (可以达到 180° 以上), 得到越来越广泛的应用. 常规的基于小孔成像模型的相机矫正与标定算法在超宽视场的鱼眼成像系统中已经不太适用, 为了兼顾小孔模型的特点, 本文提出了一种扩展小孔成像模型的鱼眼相机矫正与标定方法. 此方法是对小孔成像模型的进一步拓展, 不仅具备小孔模型实现简单、适合人眼视觉效果以及相机标定方便等优点, 同时将小孔成像模型适用的视场范围扩展到超宽视场领域. 其基本思路是: 在利用小孔成像模型对鱼眼相机 90° 左右视场范围进行矫正与标定的基础上, 使用非等间距的点阵模板, 并结合直线拟合以及自然邻点插值算法, 扩展小孔模型适用的视场范围. 本文使用鱼眼相机从不同的角度拍摄多幅模板图, 完成鱼眼相机的矫正与标定. 通过求取的小孔成像模型参数实现相机的标定; 对鱼眼相机拍摄的实际场景图进行畸变矫正测试, 结果表明此方法能够很好地矫正鱼眼相机存在的畸变, 得到符合人眼视觉效果的矫正图; 单幅矫正图视场范围达到 130°, 结合不同角度拍摄的多幅模板图, 可把矫正的视场范围扩展到 180°.

关键词 鱼眼相机, 矫正, 小孔成像模型, 直线拟合和自然邻点插值

引用格式 涂波, 刘璐, 刘一会, 金野, 汤俊雄. 一种扩展小孔成像模型的鱼眼相机矫正与标定方法. 自动化学报, 2014, **40**(4): 653−659

DOI 10.3724/SP.J.1004.2014.00653

A Calibration Method for Fish-eye Cameras Based on Pinhole Model

TU Bo[1] LIU Lu[1] LIU Yi-Hui[1] JIN Ye[1] TANG Jun-Xiong[1]

Abstract Fish-eye cameras are widely used in many occasions such as machine vision and so on due to their ultra-wide field of view (FOV) (about 180°). In this paper, a calibration method based on pinhole model is presented to correct the distortion of the fish-eye camera. First, the pinhole model is used to calibrate the 90° field of view of the fish-eye camera. Then, the unequal gap template of dot-matrix is used. Besides, the line-fitting and natural neighbor interpretation algorithm are combined to expand the calibration view of the pinhole model. The actual scene calibration results verify the feasibility and effectiveness of this algorithm. This algorithm which extends the calibration range of the pinhole model can correct the distortion of fish-eye camera well and obtain corrective scene graph that fits human eyes to watch. In addition, the calibration with a single image can result in a 130° FOV, while with multiple images being shot from different angles, the calibration can achieve the 180° FOV.

Key words Fish-eye cameras, calibration, pinhole model, line-fitting and natural neighbor interpretation

Citation Tu Bo, Liu Lu, Liu Yi-Hui, Jin Ye, Tang Jun-Xiong. A calibration method for fish-eye cameras based on pinhole model. *Acta Automatica Sinica*, 2014, **40**(4): 653−659

在机器视觉、全景摄影、安防监控以及虚拟现实等领域, 鱼眼相机由于其超宽的视场范围 (Field of view, FOV) (一般达到甚至超过 180°), 得到越来越广泛的应用[1−2]. 但是, 鱼眼相机存在严重的桶形畸变[3], 导致其使用受限. 如图 1 所示, 这是一幅用鱼眼相机拍摄的实际场景图, 它覆盖了半空间的场景, 但是, 由于畸变的存在, 其中空间直线的成像已经不再是直线.

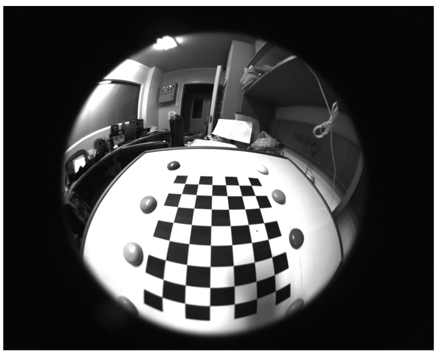


图 1 鱼眼相机拍摄的场景图

Fig. 1 A fish-eye image of the actual scene

截止到现在, 对鱼眼相机矫正与标定的研究很

收稿日期 2012-10-19 录用日期 2013-07-03
Manuscript received October 19, 2012; accepted July 3, 2013
国家高技术研究发展计划 (863 计划) (2013AA013602), 国家自然科学基金 (60807025)
Supported by National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2013AA013602), National Natural Science Foundation of China (60807025)
本文责任编委 章毓晋
Recommended by Associate Editor ZHANG Yu-Jin
1. 北京大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室 北京 100871
1. State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks, Peking University, Beijing 100871

多, 主要可分为基于硬件测量和基于图像处理算法等两类方法. 基于硬件测量的方法[4], 通过硬件装置测量特定空间点的位置坐标, 建立空间点与相应图像点之间的关系, 从而求解鱼眼相机的模型参数. 此类方法需要额外的测量装置、成本较高, 而且对装置的测量精度有较高要求. 基于图像处理算法的方法又可以分为基于单幅图像和基于多幅图像的方法. 其中, 基于单幅图像的方法[5−6], 其理论根据是直线的投影仍然是直线[7], 它通过 "把畸变后的直线恢复为直线" 的过程来确定畸变参数, 此类方法虽然灵活, 但是实现复杂、计算量大, 并且相机标定困难. 而基于多幅图像的方法[8−10] 是目前的研究热点, 它通过从不同角度拍摄多幅模板图像来求取投影模型参数, 实现简单, 但是当投影模型简单时, 其矫正与标定的精度较差, 而当投影模型复杂时, 又会大大增加模型参数求解的难度.

小孔成像模型相对其他投影模型[8−10] 实现简单、易于标定, 并且符合人眼视觉效果. 本文属于基于多幅图像的矫正与标定方法的范畴, 通过从不同角度拍摄多幅鱼眼模板图, 求取小孔成像模型的参数. 但是, 由于小孔成像模型适用的视场范围远小于 180° (一般适用于 90° 左右视场范围), 而鱼眼相机具有超宽的视场角 (一般达到甚至超过 180°), 不能够简单地使用小孔成像模型进行鱼眼相机的矫正与标定. 因此, 本文提出在小孔成像模型的基础上, 结合直线拟合[7] 以及自然邻点插值算法[11−12], 实现对整个鱼眼相机的矫正与标定, 并得到符合人眼视觉效果的矫正结果图.

接下来, 首先, 介绍基于小孔成像模型的畸变矫正的实现方法; 接着提出扩展小孔模型矫正视场范围的方法; 然后, 对实际场景图进行矫正测试; 最后, 进行总结.

1 基于小孔成像模型的鱼眼相机矫正与标定原理及实验

1.1 基于小孔成像模型的矫正与标定原理

通过小孔成像模型将空间中的点投影到图像平面, 投影公式可写为

$$s\cdot m = A[R\,|\,t]M \tag{1}$$

其中, s 是一个比例常数, $M:(X,Y,Z)$ 为空间点的坐标 (mm), $m:(u,v)$ 为投影在图像平面上的点的坐标 (像素), A 为相机内参 (投影) 矩阵, $[R\,|\,t]$ 为相机旋转−平移矩阵.

内参数矩阵 A 不依赖场景的视图, 对于某一个相机只要焦距固定, 就不再改变 (要对相机进行标定, 需要求取 A; 在接下来的分析中, 把相机的标定统一到矫正中). 而旋转−平移矩阵 $[R\,|\,t]$ 被称作外参数矩阵, 它用来描述相机相对于一个固定场景的运动, 即 $[R\,|\,t]$ 将空间点 (X,Y,Z) 的坐标变换到某个坐标系上, 这个坐标系相对于相机来说是固定不变的. 这个坐标系为相机坐标系, (x,y,z) 为相机坐标系上的点 (mm).

因此, 引入 (x,y,z) 为中间变量, 式 (1) 中的坐标系变换 (旋转平移: $[R\,|\,t]$) 可以写为

$$[x,y,z]^{\mathrm{T}} = R[X,Y,Z]^{\mathrm{T}} + t \tag{2}$$

通过小孔模型的投影变换, 式 (2) 中的相机坐标经过投影 (投影矩阵: A) 可以表示为

$$\begin{cases} x' = \dfrac{x}{z} \\ y' = \dfrac{y}{z} \\ u = fxx' + cx \\ v = fyy' + cy \end{cases},\ A = \begin{bmatrix} fx & 0 & cx \\ 0 & fy & cy \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3}$$

其中, cx, cy 是相机的基准点 (即光学中心, 通常在图像的中心, 单位像素), (fx, fy) 是以像素为单位的焦距.

对于鱼眼相机, 存在比较严重的畸变, 主要是径向形变, 也会有轻微的切向形变. 但是, 根据鱼眼镜头桶形畸变的特点, 在鱼眼图像的中间区域畸变较小, 可以采用低阶的多项式拟合其畸变参数. 式 (4) 中引入畸变, 得到如下表达式

$$\begin{cases} x'' = x'(1+k_1r^2+k_2r^4)+2p_1x'y'+p_2(r^2+2x'^2) \\ y'' = y'(1+k_1r^2+k_2r^4)+p_1(r^2+2y'^2)+2p_2x'y' \\ u = fxx'' + cx \\ v = fyy'' + cy \end{cases} \tag{4}$$

其中, (x'', y'') 为畸变后的相机坐标, $r^2 = x'^2 + y'^2$, k_1 和 k_2 是径向畸变系数, p_1 和 p_2 是切向畸变系数.

在得到了具体的投影方程后, 使用最小均方误差准则, 求解式 (5) 达到最小的解.

$$E = \sum_{i=1}^{K}\sum_{j=1}^{L} \|m_{ij} - \hat{m}(R_i, t_i, A, k_1, k_2, p_1, p_2, M_{ij})\|^2 \tag{5}$$

其中, K 为采集的含特定模板的图像的张数, L 表示每幅图像上特征点的个数 ($L = m\times n$, m、n 分别表示模板图像的一行、一列中含有的特征点个数), m_{ij} 是第 i 幅图像的第 j 个特征点的图像坐标, $\hat{m}(R_i, t_i, A, k_1, k_2, p_1, p_2, M_{ij})$ 是根据相机投影模型由空间坐标 M_{ij} 投影得到的坐标. 具体求解参数时, 选择收敛性强的 Levenberg-Marquadt (LM) 算法.

1.2　基于小孔成像模型的矫正与标定实验

图 2 是测试中使用的装置图, 主要由棋盘模板和鱼眼相机组成.

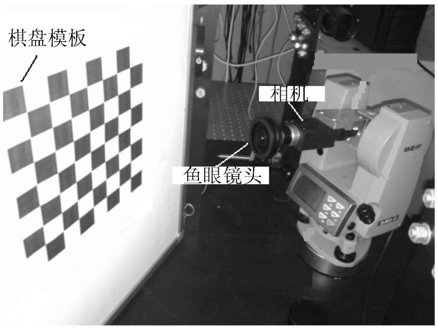


图 2　矫正测试装置图

Fig. 2　The test equipment

使用如图 2 所示测试装置, 测试过程由以下几个步骤组成:

1) 对鱼眼相机进行 "开窗" 处理, 设置中心 85° 左右视场范围的 "窗口".

2) 使用 "开窗" 后的相机, 从不同的角度拍摄棋盘模板图, 得到一序列的模板图像.

3) 通过角点检测, 提取模板图像中特征点 (角点) 的像素坐标, 建立空间点和图像点之间的关系.

在提取到所有的特征点后, 通过 LM 算法求取式 (5) 中的参数, 实现对相机的矫正与标定. 对于实际的一款鱼眼相机, 得到其畸变参数 $k_1 = -0.2856$, $k_2 = 0.0881$; $p_1 = 4.61 \times 10^{-4}$, $p_2 = -5.03 \times 10^{-4}$. 可以看出, 切向畸变系数 p_1 和 p_2 较小, 而径向畸变系数 k_1 和 k_2 较大, 说明鱼眼相机的切向畸变较小, 几乎可以忽略, 而径向畸变是鱼眼相机的主要畸变, 这与实际的情况相符合.

根据已经测量得到的相机参数, 对拍摄的实物图进行畸变的矫正. 矫正结果如图 3 所示, 其中, 图 3 (a) 是原图, 图 3 (b) 是相应的矫正结果图.

由以上矫正结果可以看出, 原图中由于畸变导致的弯曲, 在经过矫正后得到了很好的修正, 符合人眼观看效果. 接下来, 使用以上相同的方法, 开窗拍摄视场范围达到 100° 的鱼眼图, 然后, 求解此时小孔模型中的参数, 最后, 得到图 4 所示的实物图和相应矫正结果. 由矫正图的边缘部分可以看出, 使用此小孔模型对超过 90° 视场范围的图像进行矫正时, 其中间部分矫正结果较好, 但是边缘部分的直线没有被矫正, 矫正结果仍然存在很大残余误差.

接下来, 使用开窗 85° 得到的小孔模型, 对整个鱼眼图像进行矫正处理, 得到如图 5 所示的矫正结果图. 由图 5 可以看出, 鱼眼图像的中心区域 (85° 视场范围内) 的矫正结果较好, 边缘部分没有得到很好的矫正.

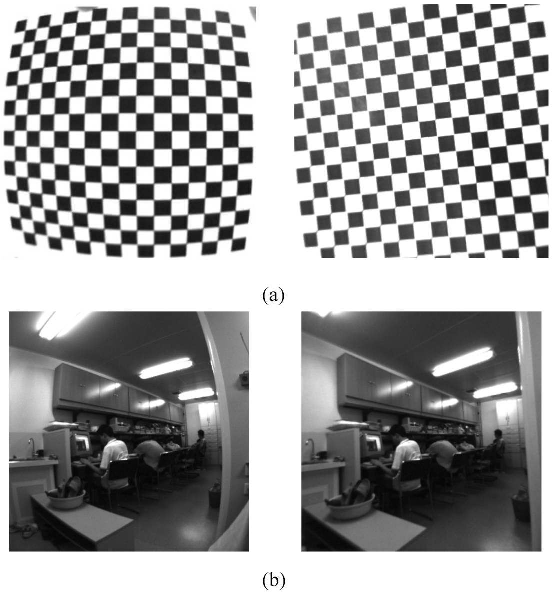


图 3　鱼眼拍摄的实物图与矫正结果 (视场范围 85°)

Fig. 3　The calibration results of the fish-eye image (85° field of view)

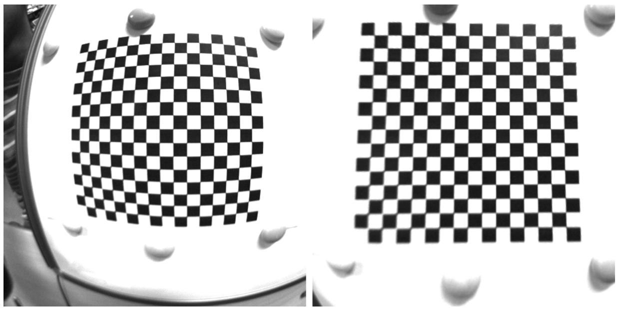


图 4　鱼眼拍摄的图像中间实物图与矫正结果 (视场范围 100°)

Fig. 4　The calibration results of the center of the fish-eye image (100° field of view)

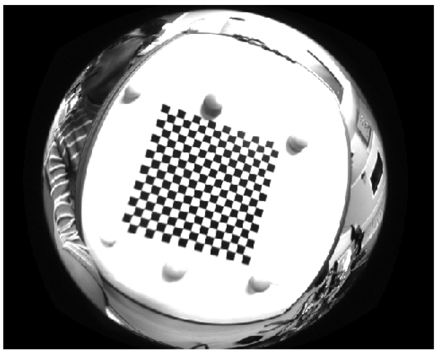


图 5　使用开窗 85° 的小孔模型对整个鱼眼图像矫正的结果

Fig. 5　The calibration of the whole fish-eye image with the 85° pinhole model

综合以上矫正结果, 可以看出, 此小孔模型适用于 90° 左右视场范围的畸变矫正, 再增大矫正的视

场范围, 矫正效果恶化. 因此, 由于小孔模型视场范围的局限性, 限制了小孔模型在鱼眼相机矫正与标定中的应用. 为了使用较简单的方式得到大的矫正视场范围, 并且同时保留小孔模型的优点 (易于标定、适合人眼观看效果等), 接下来在小孔成像模型的基础上, 结合直线拟合、自然邻点插值算法来扩展其适用范围.

2 直线拟合、自然邻点插值扩展小孔成像模型适用范围

2.1 特征点的直线拟合

对含有特定模板的鱼眼图像进行基于小孔成像模型的矫正, 然后, 对矫正结果中同一直线上的特征点进行直线拟合. 假设模板的某一行或者某一列上有 k 个特征点, 把这 k 个点拟合为直线 $ax+by=d$. 即, 使用最小均方误差准则, 求解使

$$E(a,b,d)=\sum_{i=1}^{k}[ax_i+by_i-d]^2 \tag{6}$$

达到最小时, a, b 和 d 的值.

如果模板含有 $m\times n$ (模板每行有 m 个点, 每列 n 个点) 个特征点, 则进行 $m+n$ 次直线拟合, 而任意两条直线的交点即为拟合后的新的特征点位置坐标.

2.2 自然邻点插值算法

获得经过拟合的特征点坐标后, 还需要使用插值算法, 求取图像上除特征点以外像素的新的坐标位置. 常用的两维插值算法有双三次样条插值算法、二元拉格朗日插值算法以及自然邻点插值算法等. 实际中, 由于模板与鱼眼相机之间的位置可以随意变动, 导致矫正图的模板上特征点 (插值节点) 不一定是矩阵排布的, 此时, 双三次样条插值算法就不太适用; 二元拉格朗日插值算法在插值节点较多时, 可能导致 "龙格" 现象, 插值精度不高; 自然邻点插值算法是一种散乱点插值算法, 具有实现简单、灵活以及高精度等优点. 基于以上原因, 本文选用自然邻点插值算法.

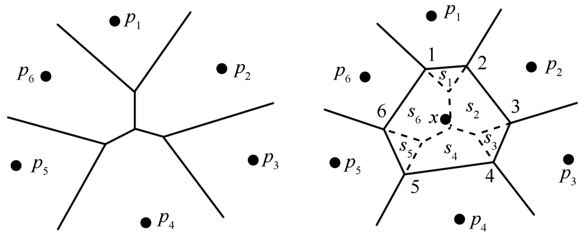
自然邻点插值算法是根据各个自然邻点对待插点的贡献率来计算该点的插值结果. 假设已知插值点 x 的自然邻点共有 M 个, 分别为 $p_1, p_2, \cdots, p_M$, 可构建如下所示的插值公式:

$$f(x)=\sum_{i=1}^{M}w_if(p_i) \tag{7}$$

其中, $f(x)$ 是待插值点 x 处的插值结果, $f(p_i)$ 是自然邻点 p_i 处的值, w_i 代表自然邻点 p_i 所占的权重系数.

通过 Delaunay 三角剖分算法来确定插值点 x 的自然邻点, 而权重系数 w_i 是按照如下的思想来确定, 如图 6 所示: 把待插值点 x 作为新节点, 加入已经生成的 Voronoi 图, 得到插入新节点后的 Voronoi 图. 假设待插值点 x 所在 Voronoi cell 的面积为 S_x, S_x 被其自然邻点分割成 M 个部分, 每个部分的面积分别为 s_1, s_2, $\cdots$, s_M, 则权重系数由各个部分的面积和总面积比值求得, 即

$$w_i=\frac{s_i}{S_x} \tag{8}$$



(a) 原始 Voronio 图
(a) The original Voronio figure

(b) 插入 x 后新的 Voronio 图
(b) The Voronio figure after interpolating node x

图 6 Voronio 图
Fig. 6 Voronio figures

从以上的分析可知, 对一个待插点 x 来说, 要确定它的各个自然邻点的权重系数 w_i, 就需要计算两次 Voronoi 图 (即插入 x 前后的 Voronoi 图), 这样的话, 系统计算量很大. 针对这个问题, Watson 提出了 Compound signed decomposition 法, 也就是 Watson 算法[13], 该方法无需计算 Voronoi 图, 而是直接处理外接圆中包含待插点 x 的所有 Voronoi 三角形, 来计算各个自然邻点所占的面积, 降低了系统的运算复杂度.

2.3 扩展小孔成像模型的适用视场范围

扩展小孔成像模型适用视场范围的基本原理是直线的投影仍然是直线. 此方法在小孔成像模型的基础上, 结合直线拟合以及自然邻点插值, 把矫正的视场范围扩大, 主要分为基于小孔模型的畸变矫正、特征点直线拟合以及自然邻点插值三个步骤. 具体实现如下:

1) 拍摄一幅含特定模板的鱼眼图像 (模板必须有部分置于鱼眼图像中心区域, 且模板上的特征点有序排列), 接着对鱼眼图像进行小孔模型的畸变矫正, 得到初步的矫正图. 此图的中间部分 (85° 以内视场范围) 的畸变已经得到初步矫正.

2) 对初步的矫正结果进行特征点检测, 得矫正后的特征点坐标 $(u_i,\ v_j)$, $i=1,2,\cdots,m$, $j=1,2,\cdots,n$, m 为每一行特征点的个数, n 为每一列

特征点的个数.

3) 对模板上在同一条直线上的特征点进行直线拟合, 得到新的投影坐标 (u'_i, v'_j), 这样就可以计算得到每个特征点实际位置与小孔模型得到的位置之间的偏差 (u''_i, v''_j), 其中

$$u''_i = u'_i - u_i$$
$$v''_j = v'_j - v_j$$

4) 把这些偏差 (u''_i, v''_j) 作为插值节点, 对这些特征点的行和列分别进行自然邻点插值, 从而得到模板区域内所有像素点的偏差 $(u''_{(x)}, v''_{(y)})$.

5) 拍摄另一幅鱼眼图像, 使模板置于鱼眼图像的不同区域, 然后, 重复以上操作, 从而获得整个鱼眼图像矫正后的偏差位置, 实现整个鱼眼图像的矫正.

3　扩展小孔成像模型的矫正结果

棋盘模板的特征角点是等间隔分布的, 在鱼眼图像中, 畸变导致边缘处多个特征点叠加在一起, 增加了特征点检测的难度. 为了便于边缘处特征点的检测, 在对小孔模型矫正效果进行扩展时, 使用如图 7 所示的非等间隔点阵模板.

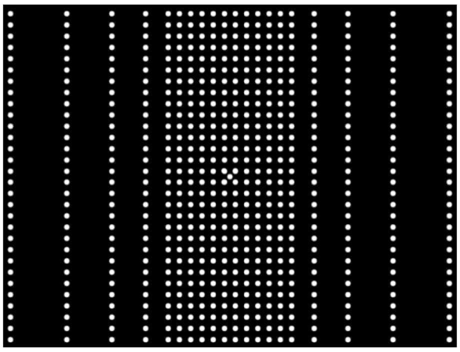


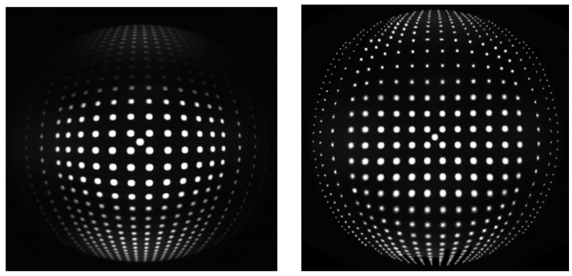
图 7　非等间隔点阵模板

Fig. 7　The dot-matrix template with unequal gap

把非等间隔点阵模板平面放置在鱼眼相机正前方, 对其拍摄一幅鱼眼图像, 得到如图 8 (a) 所示鱼眼非等间隔点阵模板图. 对图 8 (a) 进行小孔模型矫正以及图像增强处理, 结果如图 8 (b) 所示.

对于图 8 (b), 其中圆形特征点由于畸变而成像成为椭圆, 为了检测这些特征点, 如图 9 (a) 所示, 首先, 对图像进行阈值分割和边缘检测, 然后, 使用矩形对特征点边缘进行相切逼近处理, 取矩形的中心作为特征点坐标, 相应的特征点检测结果如图 9 (b) 所示.

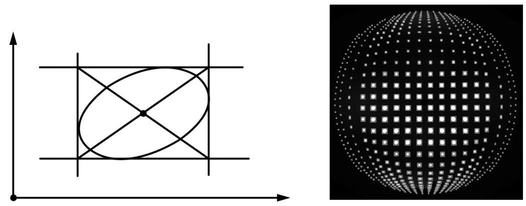
通过直线拟合, 得到每个特征点坐标位置的偏差值, 把这些偏差值作为插值点, 利用自然邻点插值算法对模板区域图像进行插值矫正, 得到如图 10 所示的结果图.



(a)　　(b)

图 8　鱼眼图像矫正测试 ((a) 鱼眼非等间隔点状模板图像; (b) 小孔矫正结果)

Fig. 8　The calibration test of the fisheye image ((a) The fish-eye image of the dot-matrix template with unequal gap; (b) The calibration result of pinhole model)



(a)　　(b)

图 9　特征点检测 ((a) 圆形点模板的特征点检测; (b) 特征点检测结果)

Fig. 9　The feature point detection ((a) The feature point detection of the circle template; (b) The detection result of feature point)

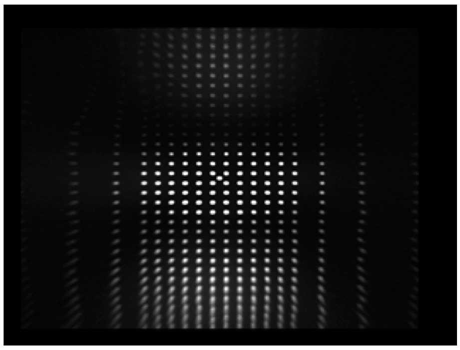


图 10　直线拟合与自然邻点插值算法矫正结果图

Fig. 10　The calibration result with the line-fitting and natural neighbor interpretation

由图 10 可以看出, 矫正图与原图基本一致, 但是在下边缘处仍然存在一定畸变, 造成此结果的原因是特征点在边缘的检测, 存在一定的误差. 为了提高矫正精度, 可以对检测出的特征点位置进行优化调整. 此时, 经过扩展小孔成像矫正算法, 能够使单次矫正视场范围达到 130°, 实际场景的矫正结果如图 11 所示.

由图 11 可以看出, 小孔模型和直线拟合、自然邻点插值算法结合, 能够扩展矫正的视场角, 测试结

果表明在 130° 左右还能达到较好的结果. 但是, 在单次矫正中, 视场角不能继续扩大, 因为继续增大视场角时, 特征点在边缘处的检测精度很低, 矫正误差会增大; 而且, 整个鱼眼的视场范围达到 180°, 其成像的范围是半空间, 在有限的成像面上不能无畸变地把半空间的图像恢复.

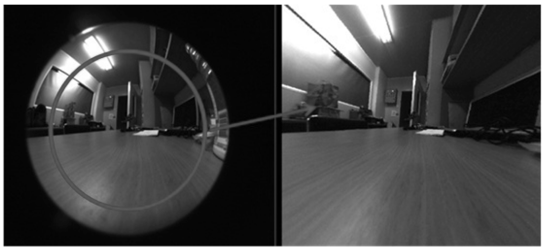
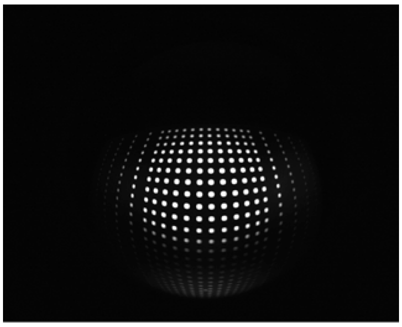


图 11 实际场景矫正结果图

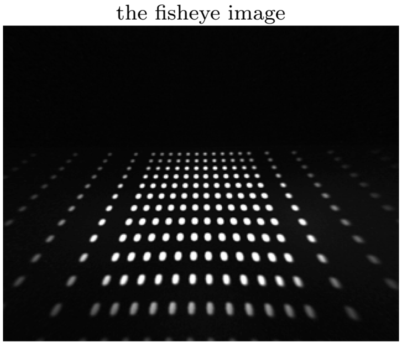
Fig. 11 The calibration result of the actual scene

为了达到对整个鱼眼相机视场范围的矫正, 可将非等间隔点阵模板置于不同区域, 然后, 进行以上扩展小孔模型的矫正操作. 注意: 非等间隔点阵模板必须有一部分位于鱼眼相机 90° 以内的视场区域, 从而保证小孔模型能够适用, 便于进行相机的标定、降低矫正残余误差等操作. 为了进一步验证本文算法的有效性, 我们对模板处于鱼眼图像非中心区域的情况进行矫正处理, 得到图 12 所示结果. 由矫正结果可以看出, 本文所提算法能够对鱼眼图像非中心区域进行矫正, 实现对整个鱼眼成像区域的矫正.



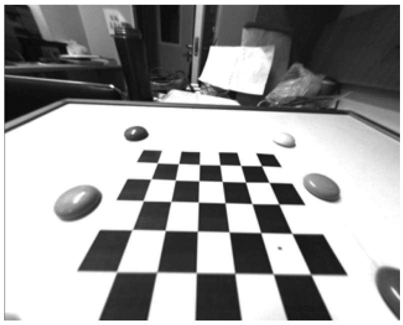
(a) 点阵模板处于鱼眼图下方

(a) The template in the bottom part of the fisheye image



(b) 图 12 (a) 的矫正结果

(b) The calibration result of Fig. 12 (a)



(c) 实际场景图 1 的矫正结果

(c) The calibration result of Fig. 1

图 12 模板不在鱼眼图像中心的矫正

Fig. 12 The fisheye image calibration with the template not in center

4 结论

鱼眼相机由于其超宽的视场范围, 得到越来越广泛的应用. 本文提出了一种基于小孔成像模型的鱼眼相机矫正与标定的方法. 此方法不仅具备小孔模型的特点 (易于标定、适合人眼观看效果等), 同时能够实现鱼眼相机超宽视场范围的矫正与标定. 测试结果表明, 此方法扩展了小孔成像模型的应用范围, 能够实现鱼眼相机的矫正与标定. 并且, 单次矫正的视场范围达到 130°, 并且通过移动点阵模板的位置, 可以得到鱼眼相机不同区域的矫正结果, 从而实现鱼眼相机整个成像区域的矫正与标定.

References

1 Yan A-Qi, Yang Jian-Feng, Cao Jian-Zhong, Zhu Qing, Zhang Zhi, Wu Deng-Shan, Wang Hao. Optical system design of space fisheye camera. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(10): 188−191
(闫阿奇, 杨建峰, 曹剑中, 祝青, 张志, 武登山, 王浩. 航天鱼眼相机光学系统设计的研究. 光学学报, 2011, **31**(10): 188−191)

2 Zhou Yu-Long. Image analysis of ultra-wide field of view infrared warning system. *Journal of Applied Optics*, 2010, **31**(6): 871−875
(周玉龙. 超大视场红外告警系统的成像特点分析. 应用光学, 2010, **31**(6): 871− 875)

3 Chen Sheng-Cong, Lin Feng. Research and design of super short-focus panoramic fish-eye lens. *Opto-Electronic Engineering*, 2012, **39**(2): 48−52
(陈圣聪, 林峰. 超短焦全景鱼眼镜头的研究与设计. 光电工程, 2012, **39**(2): 48−52)

4 Bakstein H, Pajdla T. Panoramic mosaicing with a 180° field of view lens. In: Proceedings of the 3rd Workshop on Omnidirectional Vision. Copenhagen, Denmark: IEEE, 2002. 60−67

5 Brown D C. Close-range camera calibration. *Photogrammetric Engineering*, 1971, **37**(8): 855−866

6 Kang S B. Semi-automatic Methods for Recovering Radial Distortion Parameters from a Single Image, Technical Report Series CRL, 97/3, DEC. Cambridge Research Labs, 1997

7 Devernay F, Faugeras O. Straight lines have to be straight. *Machine Vision and Applications*, 2001, **13**(1): 14−24

8 Mundhenk T N, Rivett M J, Liao X Q, Hall E L. Techniques for fisheye lens calibration using a minimal number of measurements. In: Proceedings of SPIE, 2000, **4197**: 181−190

9 Scaramuzza D, Martinelli A, Siegwart R. A toolbox for easily calibrating omnidirectional cameras. In: Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Beijing, China: IEEE, 2006. 5695−5701

10 Scaramuzza D, Martinelli A, Siegwart R. A flexible technique for accurate omnidirectional camera calibration and structure from motion. In: Proceedings of the 4th IEEE International Conference on Computer Vision Systems (ICVS). New York, USA: IEEE, 2006. 45

11 Sibsom R. A brief description of natural neighbor interpolation (Chapter 2). Barnett V. *Interpreting Multivariate Data*. Chichester: John Wiley, 1981

12 Sambridge M, Braun J, Mcqueen H. Geophysical parameterization and interpolation of irregular data using nature neighbors. *Geophysical Journal International*, 1995, **122**(3): 837−857

13 Watson D F. Computing the n-dimensional Delaunay tessellation with application to Voronoi polytopes. *The Computer Journal*, 1981, **24**(2): 167−172

涂 波 北京大学现代通信研究所博士研究生. 主要研究方向为图像处理, 无线光通信. E-mail: 10948851@pku.edu.cn
(**TU Bo** Ph. D. candidate at Institute of Modern Communication, Peking University. His research interest covers image processing and frees pace optical communication.)

刘 璐 北京大学现代通信研究所副教授. 主要研究方向为无线光通信, 光电测量. 本文通信作者.
E-mail: luliu@pku.edu.cn
(**LIU Lu** Associate professor at the Institute of Modern Communication, Peking University. His research covers optical wireless communication, precise measurement and controlling. Corresponding author of this paper.)

刘一会 北京大学应用电子研究所硕士研究生. 主要研究方向为生物电磁信号处理, 空间光通信领域的瞄准机构控制算法的研究.
E-mail: 349518159@qq.com
(**LIU Yi-Hui** Master student in the Department of Application Electronics, Peking University. His research interest covers MCG data processing and high accuracy coarse pointing control system in space optical communication.)

金 野 北京大学现代通信研究所教授, 主要研究方向为卫星与无线通信.
E-mail: jinye@pku.edu.cn
(**JIN Ye** Professor at the Institute of Modern Communication, Peking University. His research interest covers satellite and wireless communication.)

汤俊雄 北京大学量子电子研究所教授, 主要研究方向为无线光通信, 光电子, 量子电子. E-mail: jxtang@pku.edu.cn
(**TANG Jun-Xiong** Professor at the Institute of Quantum Electronics, Peking University. He research interest covers optical wireless communication, optoelectronics, and quantum electronics.)