

鱼眼镜头径向畸变的校正方法*

宋 阳,周亚丽,张奇志

(北京信息科技大学自动化学院 北京 100192)

摘要:针对鱼眼图像存在的径向畸变,提出了一种通过计算鱼眼镜头径向畸变函数来校正鱼眼图像的方法。首先,根据鱼眼镜头本身的特性运用 Hough 变换获取鱼眼图像的圆心以及校正半径;运用所提出的圆柱形棋盘格模板来完成径向畸变的标定,通过多项式拟合出鱼眼图像直径上采样点到圆心的距离和实际该采样点像点对应的物点所在视角之间的关系,从而将鱼眼图像恢复到球形投影面上;最后运用平面投影模型校正出符合人类视觉感官的平面透视图像,并用一个圆柱形的投影面校正出了360°全景图。最后的实验结果证明了此方法的有效性。

关键词: 鱼眼图像;径向畸变;校正;球形投影面;圆柱形棋盘格模板

中图分类号: TP391 TH89 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4050

Correction method for radial distortion of fisheye lens

Song Yang, Zhou Yali, Zhang Qizhi

(School of Automation, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract: Aiming at the radial distortion in fisheye image, a method to correct the fisheye image by computing the radial distortion function is proposed in this study. First, the coordination of the image center and radius utilized for correction is obtained through Hough Transform according to characteristics of fisheye lens. The radial distortion calibration is accomplished by using the cylindrical checkerboard template which is proposed in this paper. The relation between the distance from the sampling points on radial direction of the image to the image center and the viewing angle of object points of the sampling points is achieved by fitting a polynomial. Then, the fisheye image is recovered to the spherical projective plane. Finally, the planar perspective image which is accord with human version is realized by using a planar projective model. A corrected 360° panorama is obtained by a cylindrical projective plane. The experimental results show that the proposed method is effective for correcting the radial distortion.

Keywords: fisheye lens; radial distortion; correction; spherical projective plane; cylindrical checkerboard template

1 引言

鱼眼镜头是一种极端的广角镜头,它的视角已经达到了180°甚至更高,超出了人眼所能看到的范围。鱼眼镜头因为这一特性而被广泛运用于机器视觉、安全监控、医疗检测、天文观测等领域,但是超大视角的获取也同时带入了严重的图像畸变。

鱼眼图像的畸变校正一直都是近年来的热点问题。

国内外也提出了许多关于鱼眼图像校正的方法,其中比较具有代表性的方法是基于球面透视投影约束的鱼眼镜头校正方法^[1]。这种方法提出了一种球形的投影面用于校正鱼眼图像,文献[2-5]中描述的方法都是以球面投影为基础展开的。除了球面投影模型之外,比较常见的还有正交投影模型,文献[6-7]中研究了正交投影模型的改进方案,用于去除鱼眼校正带来的图像模糊与参差不齐。文献[8-9]提出了抛物线投影模型以及小孔成像模型,但是它们的方法只是在特定的情况下才适用。

在鱼镜头的标定模板选择上,分为平面模板和立体模板两类。选择平面模板的研究比较多,例如运用空间直线到球形投影面的投影为大圆这一约束条件的平面直线模板^[2-3,5,10],比较经典的平面棋盘格模板^[9,11],用于处理径向畸变的平面标靶模板^[4],点阵模板^[12-13]以及与其类似的移动网格模板^[14]。运用立体标定模板的文献比较少,比较典型的是采用立方体网络模板^[15],立体标定模板与传统的平面标定模板不同,它的优势在于可以覆盖更广的视角,正好满足了鱼镜头的需求,这样就避免了像一些平面模板标定方法一样需要分区域分角度进行标定,但它的缺点是标定过程过于复杂。鱼镜头的标定一般需要实验设备拥有较高的精度,才能达到较为精准的校正。除了标定的校正方法之外还有一些方法没有进行镜头的标定,而是用某些特定的映射关系来进行鱼镜头的校正,比较具有代表性的是基于经纬映射模板^[16],基于双经度映射模板^[17]以及基于坐标投影^[18]的鱼眼图像校正方法,这种方法虽然实现简单,并且完成了鱼眼图像的展开,但是在校正效果上存在不足。

在球形投影面的基础上,本文提出了一种圆柱形棋盘格模板用于圆形鱼眼图像径向畸变的标定。这种模板相比于其他的模板不需要考虑透视关系以及镜头和模板之间的距离,且制作简单。用文中描述的方式拍摄标定板,根据图像的特征提取出其中采样点的坐标进而通过多项式进行曲线拟合得到半径和视角之间的关系,将鱼眼图像上的内容恢复到球形投影面上,再根据实际需要采用不同的投影模板来进一步校正图像。本文采用了两种不同的模板校正出了适合人眼视觉习惯的平面透视图和360°全景图。

2 球形投影模型

本文所有的校正都是以球形投影模型为基础进行。普通的平面投影模型只能投影视角在180°以内的物像,而鱼眼图像的成像视场达到了180°甚至更高,因此采用球面投影模型来校正鱼眼图像是一个不错的选择^[2]。球面投影模型如图1所示。以半球为例,球心 O 为摄影点,也可以将它看做人眼的观测点。假设 J 为空间内一点, J 的物像会沿直线 OJ 传递到 O 点。此时在观测点 O 和物体中间设立一个球形的投影面,则点 J 会在投影面上形成一个物像 K , K 在直线 OJ 上。如果整个180°空间内所有的物体都以 O 为观测点在半球面上投影成像,并把球形投影面上的像保存起来,那么人在 O 点观测这个投影面看到的景色会和 O 点观测物体本身没有差异,因为球形投影面上每个点都对应了 O 点到这个像点所成的一条直线上的光束,这样的投影符合人眼的

观测习惯,并且在视角大于180°时依然适用。本文在叙述中一直会强调观测点的位置,因为观测点的不同直接会改变物像的形状。

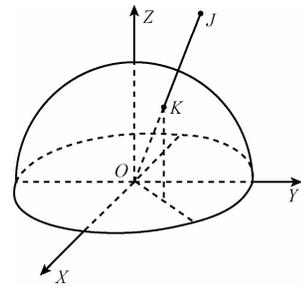


图1 球形投影模型

Fig. 1 Spherical projection model

3 径向标定

3.1 标定模板

本文采用的标定模板如图2所示。制作一个圆柱面,长度大于半圆柱面,圆柱面上覆盖等距离的平行直线,直线从模板边缘开始均匀铺满整个半圆柱面,圆柱面的半径和高度没有严格限制,平行直线个数可以根据实际需要进行调整,相应地,平行线的间距也要随着直线个数改变而改变。为了方便交点的识别,模板表面被分割的区域被填充成黑白相间的颜色,这样就可以用角点检测的方法提取交点^[19]。图3所示为标定模板的实拍图。图中相机支架用于固定鱼眼相机,位于支架上的圆柱体就是本实验用到的圆柱形模板。鱼镜头的摆放方式如图4所示,图4中的圆柱面为标定模板,该圆柱面垂直于 YOZ 平面并与 YOZ 平面相交于一圆弧 GH ,圆弧 EIF 为一半圆弧。 I 点为圆弧 EIF 的中点,鱼镜头位于 O 点,朝向 Z 轴负方向拍摄,另 I 点的像位于鱼眼图像的中心,也就是另鱼镜头的光轴经过 I 点。鱼眼图像的中心确定方法将在下一小节中介绍。

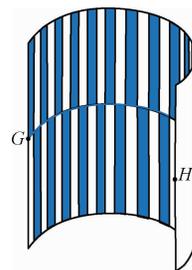


图2 圆柱形棋盘格模板

Fig. 2 Schematic diagram of the cylindrical checkerboard template

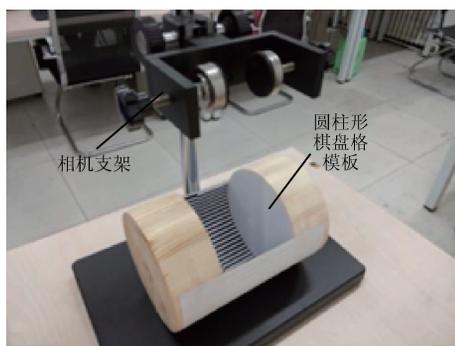


图3 圆柱形棋盘格模板

Fig. 3 The cylindrical checkerboard template

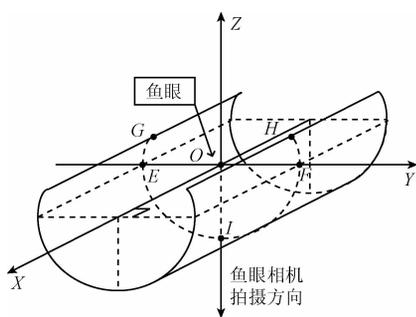


图4 鱼镜头的摆放方式

Fig. 4 Installation of the fisheye lens

圆柱形棋盘格模板的优势在于其制作简单,并且按照上述方法采集模板图像时,圆弧 GH 上的点的像能完全铺满鱼眼图像的一个径向区域,这些点的位置坐标将作为径向标定的依据。

3.2 确定鱼眼图像中心与半径

实验开始前需要先确定鱼眼图像中心的位置以及图像半径。

对于鱼眼图像中心的求取问题,本文采用的方法不从图像的轮廓出发。首先,用鱼镜头垂直拍摄一个画有一条直线的平面,移动鱼镜头直到直线在鱼眼图像中所成的像也是一条直线为止,这里需要运用 Hough 变换来检测拍摄到的像是否为直线并确定直线的方程。一旦直线的像也变成直线说明这个像经过鱼眼图像的中心,这里用到的约束条件是假如空间的一条直线在鱼镜头拍摄下所成的像经过图像中心,那么这个像也会是一条直线。确定这条过圆心直线的方程之后再镜头旋转一定角度进行拍摄,运用同样的方法确定另外一条直线方程,最后求取两个直线的交点,这个交点就是鱼眼图像的中心。

对于鱼眼图像半径的确定问题,不去计算鱼眼图像的半径,而是通过确定校正范围来取代鱼眼图像半径的计算。图4中过 Z 轴的平面与圆柱面的交线经过鱼镜头的采集之后,在鱼眼图像上呈现的仍然是直线。因为位于

鱼眼图像直径上的直线所对应的景物,在实际中位于该观测点所观测到的像也是直线。沿 X 轴方向移动镜头直到圆弧 EF 的中心落在鱼眼图像的中心上,则此时镜头的光轴经过圆弧 EF 中心, E 和 F 两点分别代表的是该圆弧上以 O 点为观测点, E 点所在方向为 0° 视角时,视角为 0° 和 180° 所代表的两个位置。圆弧 EF 能覆盖总共 180° 的视角,假如只选择校正图像中视角 180° 以内的图像,则校正直径就是圆弧 EF 在鱼眼图像中所成像的长度。对于视角大于 180° 的鱼镜头可以扩大校正范围,相应的在随后的校正中球面投影也不能只采用半球面,要适当地扩大投影面以覆盖更大的视角。鱼眼图像的边缘区域会因为光线和镜头本身的质量的问题而出现比较严重的失真,这种半径确定方式避开对鱼眼图像边缘的考察。

3.3 采样点检测

采样点即3.1节介绍模板时提到的模板上的等距平行线与圆弧 GH 的交点。这些交点的像点坐标将用于计算图像的径向畸变关系。

圆弧 GH 是模板上半部分棋盘格和下半部分棋盘格的分界线。假设圆弧 GH 的弧长为 l ,半径为 R ,模板上半部分的棋盘格的个数为 n ,圆弧 GH 上每两个采样点之间所覆盖的视角为 φ ,则:

$$\varphi = \frac{l}{nR} \quad (1)$$

假设以 G 点为起点,圆弧 GH 上第 i 个采样点所代表的视角为 γ_i ,则:

$$\gamma_i = \varphi(i-1) \quad 1 \leq i \leq n+1 \quad (2)$$

定义 α 为空间一点与镜头位置点的连线与镜头光轴的夹角。标定的目的就是要求出 α 与该空间点在鱼眼图像上对应的像点到图像中心的距离 d 之间的关系。 I 点对应的视角为 γ_i ,第 i 个采样点对应的夹角为 α_i ,则根据式(2)可得:

$$\alpha_i = |\varphi(i-1)| \quad 1 \leq i \leq n+1 \quad (3)$$

根据像点的坐标可以计算出它到鱼眼图像中心的距离 d_i ,这样就相当于获得了一组采样数据。由式(1)~(3)可知,通过改变模板上平行线的数量也就是棋盘格的个数 n ,可以获得同一径向不同视角对应的采样数据,通过旋转镜头可以得到不同角度径向的采样数据。最后通过多项式进行曲线拟合便可以得到 α 和 d 的关系为:

$$d = f(\alpha) \quad (4)$$

本文中鱼眼图像采样点的坐标通过 Harris 角点检测来获取。Harris 角点检测在用于检测平面棋盘格的交点时有不错的表现,本文提出的圆柱形棋盘格模板经过鱼镜头获取的图像也类似棋盘格,因此考虑用 Harris 角点检测来检测校正所需的径向采样点。但 Harris 角点检测的核心是检测图像中的角点而不是交点,因此在本实验中还需要作进一步处理。假设鱼眼图像为 $P(x, y)$,首

先要求出鱼眼图像的梯度 P_x, P_y , 进而得出 Harris 角点检测的特征矩阵为:

$$M(x, y) = \begin{bmatrix} A & C \\ C & B \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中:

$$A = \sum_{\omega} P_x(x, y)^2 \quad (6)$$

$$B = \sum_{\omega} P_y(x, y)^2 \quad (7)$$

$$C = \sum_{\omega} P_x(x, y)P_y(x, y) \quad (8)$$

这里依据求和代表的是对这几个项进行高斯滤波, 高斯滤波参数可以根据实际情况进行调整。在这之后根据矩阵 M 计算出判别函数 $R(x, y)$:

$$R(x, y) = \det M - \alpha (\text{trace} M)^2 \quad (9)$$

其中:

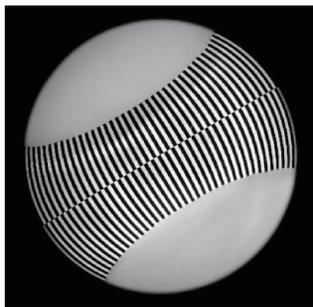
$$\det M = AC - B^2 \quad (10)$$

$$\text{trace} M = A + C \quad (11)$$

在求得的 R 中选择一个合适的阈值 t , 将所有小于 t

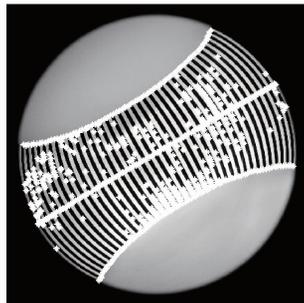
的 R 置为 0, 最后对 $R(x, y)$ 在 3×3 邻域内进行非极大值抑制, 局部最大值点就是图像 $P(x, y)$ 中的角点。本文中选取的阈值 $t = 0.01R_{\max}$, 其中 R_{\max} 表示的是判别函数 $R(x, y)$ 的最大值, 式(9)中的 α 取值范围在 $0.04 \sim 0.06$ 之间, α 的值越小, 角点检测的灵敏度越高, 这里选用 $\alpha = 0.04$ 来避免采样点的漏检。用图 4 所示的方式拍摄得到的模板图如图 5(a) 所示, 图 5(b) 所示为图 5(a) 经过角点检测之后得出的结果, 角点由星形点标出。

从检测结果中可以看出, 除了校正所需的采样点之外, 还因为拍摄条件的问题混入了很多并不感兴趣的点, 例如有些边缘点和缺陷点也会被识别为角点。这里要从中筛选出感兴趣点, 也就是采样点。首先, 求出该图的梯度图, 并进行二值化, 提取出图形的边缘, 这样就能使得图像的特征单一化, 排除灰度不均匀带来的干扰。处在边缘的点和处在交点处的点所在邻域所覆盖的边缘长度是不同的, 通过这一特征可以滤掉大部分处在边缘但被检测为角点的点, 得到的结果如图 5(c) 所示。



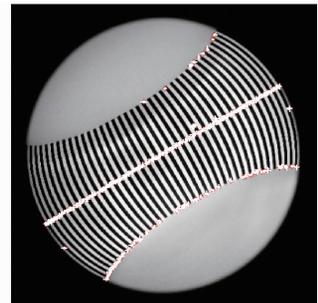
(a) 模板拍摄图

(a) Template photographed by fisheye camera



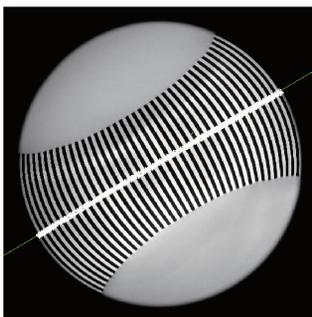
(b) Harris角点检测初步结果

(b) Preliminary result of Harris corner detection

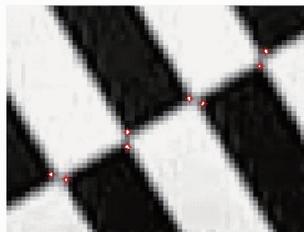


(c) 运用梯度图的筛选结果

(c) Screening result using gradient image



(d) 过圆心直线投票筛选结果
(d) Voting result using the line cross the center of circle



(e) 角点放大图
(e) Corner



(f) 计算平均值后得到的交点坐标
(f) Intersection coordinate calculated by finding the midpoint of adjacent corners

图 5 采样点检测示意图

Fig. 5 Detection of the sampling point

由于标定板的中心线在标定过程中要求过圆心, 因此采样点应该分布在过圆心的直线上, 且采样点分布密集, 即使在实验开始时标定板中心线没有落在圆心上, 采样点也会分布在靠近过圆心直线的位置上。这里构造一条过鱼眼图像圆心的直线, 直线的参数如图 6 所示。

假设圆心的坐标为, 则直线解析式为:

$$A(u - u_0) - B(v - v_0) = 0 \quad (12)$$

其中:

$$A = \sin(\theta + \pi/2) \quad (13)$$

$$B = \cos(\theta + \pi/2) \quad (14)$$

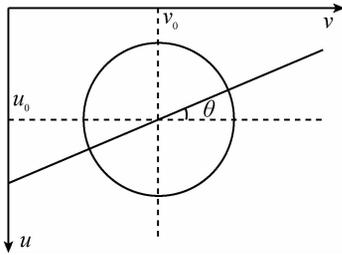


图6 用于角点投票的过圆心直线

Fig.6 Line passing through the center of the circle using forcorner vote

假设第 n 个角点的坐标为。则该点到直线的距离为:

$$D_n = \frac{|A(u_n - u_0) - B(v_n - v_0)|}{\sqrt{A^2 + B^2}} \quad (15)$$

根据实际情况设定一个合适的阈值 h , 当直线参数 θ 处在某一值时, 让每一个距离 $D_n < h$ 的角点给该直线投一票。通过旋转直线, 可以获得 $\theta \in (0, \pi)$ 时, 每个直线所得票数。本实验将 $\theta \in (0, \pi)$ 平均分成了 200 份, 得到的结果如图 7 所示。其中获得票数最多的那个点所代表的直线就是所需要的用于筛选采样点的直线。合适的阈值选取可以使得票数最大值点特别突出。最后以该直线为基准筛选出距离该直线较近的点就能得出表现采样点的角点, 本实验的筛选结果示例如图 5(d) 所示。将最后筛选出的角点进行平均值处理便能得到最终的采样交点坐标。图 5(f) 中的星形点就是图 5(e) 中的角点经过平均值处理后得到的交点坐标。

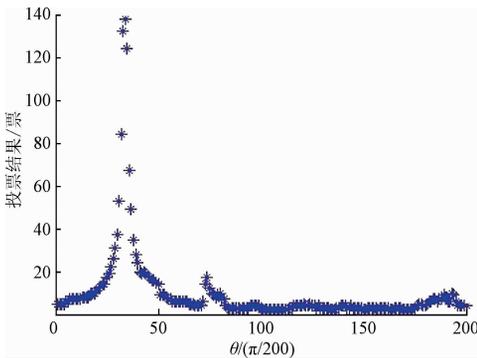


图7 角点对目标直线的投票结果

Fig.7 Result of the corner vote for target line

3.4 曲线拟合

用于拟合式(4)的多项式形式如下:

$$d = [\omega_k \quad \omega_{k-1} \quad \cdots \quad \omega_0] \begin{bmatrix} \alpha^k \\ \alpha^{k-1} \\ \vdots \\ \alpha^1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中: k 为多项式的阶数。阶数 k 的值由拟合结果的误差 e 决定。假设第 j 个参与拟合的样本对应的径向距离和视角分别为 d_j 和 α_j , 样本总数为 m , 则对于第 j 个采样点的估计误差为:

$$e_j = |f(\alpha_j) - d_j| \quad 1 \leq j \leq m \quad (17)$$

从 $k=1$ 开始拟合曲线, 假设误差 $e = (e_1, \dots, e_m)^T$, 设定一个误差值 ε , 逐渐增加 k 的值直到满足:

$$\|e\|_2 < \varepsilon \quad (18)$$

此时的阶数 k 就是最终用于拟合径向距离和视角的映射关系的多项式阶数。这种多项式拟合方法实现简单, 同时也可以得到不错的拟合结果。

4 图像校正

本文后续的校正以球形投影面为基础进行的, 接下来两个小节描述的校正方法选用的校正视角范围为 180° 。

4.1 从球形投影面到平面透视投影面

平面透视投影所能容纳的视角有限, 不能够达到 180° , 因此把一张鱼眼图像的所有内容校正到一个平面图像上并且符合人眼视觉习惯是不合理的。本文在运用平面投影进行图像校正时采取的是分区域校正方式, 一次只校正图像的一部分。

本节的校正模板示意图如图 8 所示, XOY 平面为鱼眼图像平面, O 点为图像中心, 平面上圆形区域内包含了 180° 视角的鱼眼图像。图中的球面即为鱼眼图像对应的球形投影面, 鱼眼图像的半径和球形投影面的半径都取为 r 。

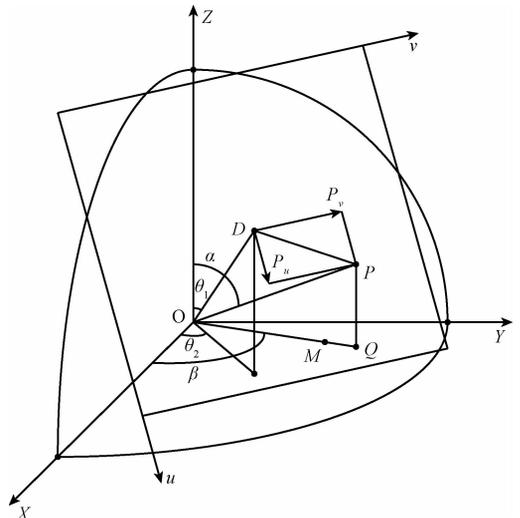


图8 平面透视投影校正示意图

Fig.8 Schematic diagram of correction using planar perspective projection

点 O 为投影中心,平面投影面与球形投影面相切于点 D , D 为平面投影面的几何中心。 θ_1 代表的是向量 \overrightarrow{OD} 与 Z 轴正方向的夹角, θ_2 代表的是 X 轴正方向到 \overrightarrow{OD} 在 XOY 平面的投影逆时针需要转动的角度。通过 θ_1 和 θ_2 就能确定平面投影面的位置。其中:

$$\overrightarrow{OD} = (r\sin\theta_1\cos\theta_2, r\sin\theta_1\sin\theta_2, r\cos\theta_1) \quad (19)$$

平面投影面的大小和形状可以根据实际需要适当选取,但是不可以太大,因为当投影平面过大时,处于投影平面边缘的图像会有很强的透视效果,不符合正常的人眼观测习惯,从而影响最终整体的校正结果。普通相机因为拍摄视角小,所以不会产生明显的畸变。本节选用的投影平面形状为正方形,正方形的两条边平行于 XOY 平面,边长为 2 倍的鱼眼图像半径。平面投影面也就是最后的校正图像。图中的 u 轴和 v 轴代表的是平面投影面的两个坐标轴,构成了校正图像平面坐标系。 P 为校正图像上任意一点, P 到 XOY 平面上的投影点为 Q 。点 P 和点 D 在校正图像平面坐标系上的坐标为 (u_p, v_p) 和 (u_d, v_d) 。为了方便求出 P 点在空间坐标系中的坐标,这里将向量 \overrightarrow{DP} 分解成向量 \overrightarrow{DP}_u 和向量 \overrightarrow{DP}_v ,这两个向量分别平行于 u 轴和 v 轴。根据几何关系可以得出:

$$|\overrightarrow{DP}_u| = |u_p - u_d| \quad (20)$$

$$|\overrightarrow{DP}_v| = |v_p - v_d| \quad (21)$$

$$\overrightarrow{DP}_u = (u_p - u_d)(\cos\theta_1\cos\theta_2, \cos\theta_1\sin\theta_2, -\sin\theta_1) \quad (22)$$

$$\overrightarrow{DP}_v = (v_d - v_p)(-\sin\theta_2, \cos\theta_2, 0) \quad (23)$$

$$\overrightarrow{DP} = \overrightarrow{DP}_u + \overrightarrow{DP}_v \quad (24)$$

$$\overrightarrow{OP} = \overrightarrow{OD} + \overrightarrow{DP} \quad (25)$$

由此可以求得 P 点的空间坐标,直线 OP 会和球形投影面相交于一点,根据第 2 节的描述,位于 O 点观测球形投影面时得到的像与实际相同,不会产生畸变,因此校正时取 OP 与球形投影面的交点为物点,而 P 点就是这一物点位于校正平面的像点。只要得出 α 和 β 就能根据式(4)求出点 P 在鱼眼图像上的对应点。因而进一步的假设 Z 轴、 X 轴、 Y 轴正方向上的单位向量分别为 Z_1 、 X_1 、 Y_1 ,则:

$$\cos\alpha = \overrightarrow{OP} \cdot Z_1 / |\overrightarrow{OP}| \quad (26)$$

$$\cos\beta = \overrightarrow{OP} \cdot X_1 / |\overrightarrow{OQ}| \quad (27)$$

$$\sin\beta = \overrightarrow{OP} \cdot Y_1 / |\overrightarrow{OQ}| \quad (28)$$

用反三角函数可以求出 α 。假设像点 P 对应的鱼眼图像上的点为 M ,则点 M 将位于直线 OQ 上,因此进一步可以得到:

$$\overrightarrow{OM} = |\overrightarrow{OM}|(\cos\beta, \sin\beta, 0) \quad (29)$$

其中,由式(4)可得出:

$$|\overrightarrow{OM}| = f(\alpha) \quad (30)$$

在确定 M 点在鱼眼图像上的位置之后再利用它相邻 4 个像素点进行灰度值的双线性插值,得到最终像点 P 对应的灰度值,进而计算得到整张校正图。

4.2 从球形投影面到 360°全景图

全景图的生成要视情况而选择不同的模板。文献[20]中所提到的全景图校正方法是将鱼镜头的光轴平行于地面,原地旋转采集 3 个不同方向的图片最后再对 3 个图像进行校正拼接获得 360°全景图。在文献[21]中,原始图像是由视角为 180°的鱼眼相机放置于地面,光轴垂直于地面朝上拍摄得到的,因而校正模板的选择也不同,采用的展开方式是沿径向均匀展开,详见文献[21]。

本文讨论的情况在原始图像采集方式上和文献[21]中是一样的,但是选用的投影方式和文献[21]略有不同,文献[21]采用的映射方式是建立在鱼眼图像径向距离和实际观测视角的关系是线性对应的前提之下,但这个前提并不适用于所有的图像。

本文采用的全景图校正模板如图 9 所示。如 4.1 节所述。 XOY 平面代表的是鱼眼图像平面, O 为鱼眼图像的中心。在鱼眼图像被恢复到球形投影面上之后,图像是依照视角均匀分布的。例如,图 9 中圆弧 AQ 的长度和 α 就是呈线性关系的。本节介绍的校正投影平面是一个圆柱面,图 6 中只展现了它的 1/4,本文圆柱面的半径取为鱼眼图像的半径,高度取圆弧 AB 的长度,也就是 0.5π ,这两个值也可以根据需要进行调整,投影面的大小会决定最终校正出的图像大小,但是不会提高图像精度。圆柱形投影面展开成平面之后就是最终校正得到的 360°全景图。图中 u 轴和 v 轴为全景图像的两个平面坐标轴,坐标原点在图像的左上角, v 轴正方向为圆柱面最上沿圆周的逆时针方向。 P 点代表的是全景图上的一个像点,它对应球形投影面上的像点 Q 。 O 、 P 、 Q 这 3 点共面,该平面垂直于鱼眼图像 XOY 平面。全景图上过 P 点与 u 轴平行的直线上的点,按照本小节前面描述的规律,应该和圆弧 AC 上的点线性对应,也就是说 P 点和向量 \overrightarrow{OQ} 与 Z 轴正方向所成的角 α 也是线性对应关系。假设 P 在全景图像平面上的坐标为 (u_p, v_p) ,则有如下关系式:

$$\alpha = \frac{0.5\pi \cdot u_p}{0.5\pi \cdot r} = \frac{u_p}{r} \quad (31)$$

$$\beta = \frac{2\pi \cdot v_p}{2\pi \cdot r} = \frac{v_p}{r} \quad (32)$$

已知 α 和 β 之后根据式(4)便可得出 M 点在鱼眼图像上的坐标。最后利用该点邻近的 4 个像素点进行灰度

值的双线性插值就能得出像点 P 对应的灰度值,进而计算得到整张全景图。

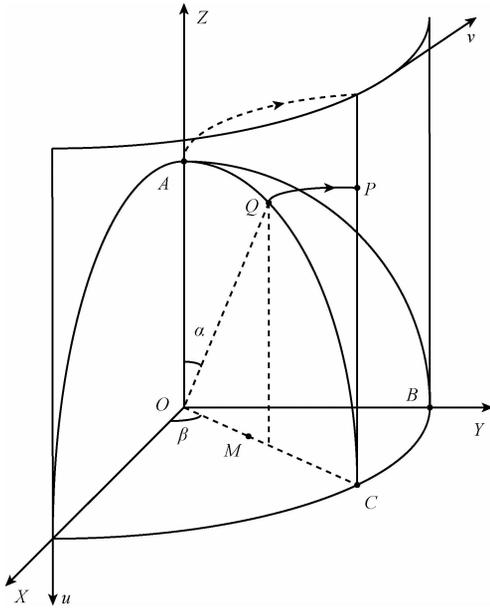


图9 360°全景校正示意图

Fig.9 Schematic diagram of correction for 360° panoramagram

5 实验校正效果

为了验证本文提出的校正算法,这里用如下两款鱼眼相机进行了实验校正测试:

1) 锐尔威视 RER-USB500W05G-V180 鱼眼相机, 视场角为 185°(以下简称 USB 鱼眼相机);

2) 海康威视 DS-2CD3942F-I 鱼眼相机, 水平视场角: 186°, 垂直视场角为 106°。

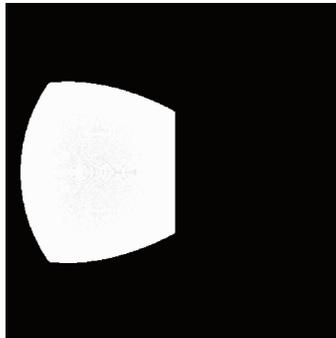
实验校正效果如图 10 和 11 所示。

5.1 基于平面透视投影面的校正实验

图 10(a) ~ (c) 是在 USB 鱼眼相机上实现的, 运用 4.1 节提到的校正方法进行校正, 平面透视投影面的位置角度取 $\theta_1 = \pi/4, \theta_2 = 3\pi/2$ (见图 8), 投影面为正方形, 边长取 2 倍的鱼眼图像校正半径, 得到了如图 10(c) 的校正结果。图 10(b) 为该位置下, 平面透视投影面上的像对应的鱼眼图像区域。从图 10(c) 中可以看出, 图 10(a) 中由于径向畸变而弯曲的门窗以及墙沿得到了很好的恢复, 并且因为平面透视投影面大小选取适当, 单次校正的视场不大, 所以处于图 10(c) 边缘的图像没有产生很强的拉伸效果, 符合人眼的视觉特性。



(a) USB鱼眼镜头拍摄原图
(a) Original image photographed by USB fisheye camera



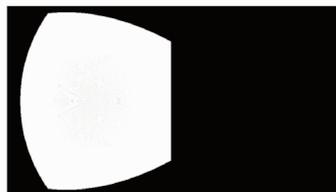
(b) 图10(a)的校正区域
(b) Correction area of Fig 10(a)



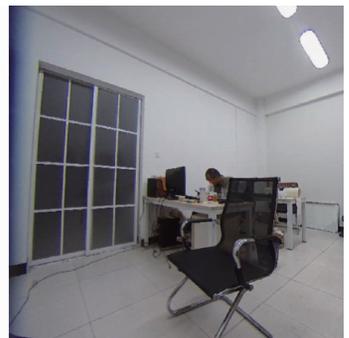
(c) 图10(a)平面透视投影校正图
(c) The corrected image of Fig 10(a) using planar perspective projection



(d) 海康威视鱼眼图像
(d) Original image photographed by HIK VISION fisheye camera



(e) 图10(d)的校正区域
(e) Correction area of Fig 10(d)



(f) 图10(d)平面透视投影校正图
(f) The corrected image of Fig 10(d) using planar perspective projection



图 10 平面透视投影校正实验结果

Fig. 10 Experimental results using planar perspective projection



图 11 360°全景图校正实验结果

Fig. 11 Experimental results of 360° panoramagram correction

图 10(d) ~ (f) 是在海康威视鱼眼摄像头上实现的。同样运用本文 4.1 节提到的校正方法进行校正。为了实验结果的可比性,图 10(d) 拍摄时选取与图 10(a) 相同的场景,平面透视投影面的摆放位置以及投影面的大小选取也与处理图 10(a) 时相同。从图 10(f) 中可以看出,原本在空间中属于直线的景物在图 10(d) 中所成的像也得到了很好的恢复,符合人眼的视觉特性。

在上述两个实验中,调整 θ_1 与 θ_2 的值可以改变投影面的位置,获取不同角度的校正图像,进而完成对整幅鱼眼图像的校正,这里由于篇幅限制不将实验结果一一列出。

图 10(g)、(h) 为海康威视鱼眼相机自带校正功能对图 10(d) 所得的校正效果截图,从图中可看出鱼眼图像本身所产生的畸变没有得到很好的恢复,场景中的门窗等处鱼眼图像边缘的景物所成的像还存在着一定程度的扭曲。图 10(i) 是运用文献[17]中提出的双经度模型对图 10(d) 进行校正得到的效果图。基于双经度模型的鱼眼图像校正方法是一种直接校正法,也就是舍去了标

定过程,虽然实现起来简单,但此方法的运用范围有限,并不是对所有的镜头都适用。从图 10(i) 中可以看出处于鱼眼图像边缘的畸变没有得到很好的恢复且单次校正视场较大使得校正结果不是很理想。相比而言本文提出的基于圆柱形黑白格模板的校正方案实现起来并不复杂,结合本文 4.1 节介绍的投影面可以得到理想的校正效果。

5.2 360°全景图校正实验

全景图校正实验是在 USB 鱼眼相机上进行的。图 11(a) 由 USB 鱼眼相机置于实验室地面仰拍得到,为了增强校正效果,在拍摄场景的 3 个方向上分别贴上了“1”、“2”、“3”三个数字,依照本文 4.2 节提出的全景图校正方法得到了如图 11(b) 所示的校正结果。从图 11(b) 中可看出本文 4.2 节提出的校正方案很好的完成了对图 11(a) 的展开。这种校正方法因为只采取了单次拍摄,所以不需要考虑多张图片所带来的拍摄角度以及图像拼接等问题,实现简单且生成的 360°全景图也很理想。

6 结 论

本文提出了一种运用鱼眼图像的径向畸变标定进行图像校正的方法,并设计了一种可以覆盖 180°甚至更多视角的圆柱形棋盘格模板来进行径向畸变分析。在球形投影面的基础上校正得到了多方向的平面透视图和全景图。实验结果证实了此方法的有效性。本文的校正方法实现起来比较方便,理想的校正效果使得此方法可被用于恢复鱼眼图像的畸变,让一般的图像算法可以被应用到鱼眼镜头拍摄的图像上,为鱼眼镜头在计算机视觉等领域的应用打下基础。

另外需要提出的是文中的径向畸变校正方案只能被应用于圆形的鱼眼图像上,因为本文在校正过程中采用了认为鱼眼图像各方向径向畸变一致的近似处理,忽略了图像中可能存在的细微的切向畸变。本文的校正方法虽然能获取拥有良好视觉效果的照片,但在校正精确度上还有待改进。近些年的研究已经慢慢开始将鱼眼图像校正推广到极端的非圆形图像场合下^[15,22]。为了加强校正方法的通用性和精确度,类似球面的可以覆盖整个拍摄视角的标定板设计可能会成为接下来的研究方向。

参考文献

- [1] 英向华, 胡占义. 一种基于球面透视投影约束的鱼眼镜头校正方法[J]. 计算机学报, 2003, 26(12): 1702-1708.
YING X H, HU ZH Y. Fisheye lense distortion correction using spherical perspective projection constraint[J]. Chinese Journal of Computers, 2003, 26(12): 1702-1708.
- [2] 黄有度, 苏化明. 一种鱼眼图像到透视投影图像的变换模型[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(1): 29-32, 52.
HUANG Y D, SU H M. A simple transforming model from fisheye image to perspective projection image[J]. Journal of System Simulation, 2005, 17(1): 29-32, 52.
- [3] 崔汉国, 陈军, 王大宇. 鱼眼图像校正及拼接的研究与实现[J]. 计算机工程, 2007, 33(10): 190-192.
CUI H G, CHEN J, WANG D Y. Study and implementation of distortion correction and mosaics of fisheye images [J]. Computer Engineering, 2007, 33(10): 190-192, 209.
- [4] 朱均超, 葛磊, 韩芳芳, 等. 基于分离参数标定的鱼眼镜头成像模型研究[J]. 传感技术学报, 2013, 26(7): 975-980.
ZHU J CH, GE L, HAN F F, et al. Research on fisheye lens imaging model based on the separated parameters calibration [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2013, 26(7): 975-980.
- [5] WANGZ L, LIANG H D, WU X, et al. A practical distortion correcting method from fisheye image to perspective projection image [C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Information and Automation, 2015: 1178-1183.
- [6] KIM D, PARK J, PAIK J. Extended fisheye lens model for practical geometric correction and image enhancement [J]. Optics Letters, 2014, 39(21): 6261-6264.
- [7] PARK J, KIM D, KIM D, et al. Non-dyadic fisheye lens correction model for image enhancement [J]. Journal of the Optical Society of America, 2015, 32(11): 2148-2155.
- [8] 张诚, 汪嘉业. 对鱼眼照片场景实现三维重建和虚拟浏览[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2004, 16(1): 79-84, 89.
ZHANG C, WANG J Y. 3D model reconstruction from fish-eye images and virtual walk-through [J]. Journal of Computer-aided Design and Computer Graphics, 2004, 16(1): 79-84, 89.
- [9] 涂波, 刘璐, 刘一会, 等. 一种扩展小孔成像模型鱼眼相机校正与标定方法[J]. 自动化学报, 2014, 40(4): 653-659.
TU B, LIU L, LIU Y H, et al. A calibration method for fish-eye cameras based on pinhole model [J]. Acta Automatica Sinica, 2014, 40(4): 653-659.
- [10] 贾云得, 吕宏静, 徐岸, 等. 一种鱼眼镜头成像立体视觉系统的标定方法[J]. 计算机学报, 2000, 23(11): 1215-1219.
JIA Y D, LU H J, XU A, et al. Fish-eye lens camera calibration for stereo vision system [J]. Chinese Journal of Computers, 2000, 23(11): 1215-1219.
- [11] ANDRADE J, KARAM L J. Robust radial distortion correction based on alternate optimization [C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing, 2016: 2956-2960.
- [12] 王保丰, 毛晓艳, 唐歌实. 月球车鱼眼相机的标定方法研究[J]. 宇航学报, 2011, 32(4): 933-939.
WANG B F, MAO X Y, TANG G S. A calibration method for fish-eye camera of lunar rover [J]. Journal of Astronautics, 2011, 32(4): 933-939.
- [13] 李茜. 小视场长焦距光电系统畸变测量校正方法研究[J]. 国外电子测量技术, 2012, 31(2): 35-38.
LI Q. Research on distortion measurement and calibration technology for narrow-field and long-focal-length optical system [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2012, 31(2): 35-38.
- [14] KIM H, CHAE E, PAIK J. Fisheye lens calibration using shifted lattice pattern and correction of barrel

- distortion using spatially adaptive interpolation [C]. Proceedings of the International Conference on Control, Automation and Information Sciences, 2014, 12(6): 148-152.
- [15] 郑利平, 徐刚强, 李琳, 等. 非线性畸变分布椭圆鱼眼镜头成像建模和校正[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(6): 1331-1337.
ZHENG L P, XU G Q, LI L, et al. Imaging modeling and correction of nonlinear distortion distribution ellipse fish-eye lens [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(6): 1331-1337.
- [16] 杨玲, 成运. 应用经纬映射的鱼眼图像校正设计方法[J]. 工程图学学报, 2010, 31(6): 19-22.
YANG L, CHENG Y. The designing methods of fish-eye distortion correction using latitude-longitude projection[J]. Journal of Engineering Graphics, 2010, 31(6): 19-22.
- [17] 魏利胜, 周圣文, 张平改, 等. 基于双经度模型的鱼眼图像畸变矫正方法[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(2): 377-385.
WEI L SH, ZHOU SH W, ZHANG P G, et al. Double longitude model based correction method for fish-eye image distortion [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(2): 377-385.
- [18] 霍薇薇, 王作栋, 高萌萌, 等. 基于坐标投影的鱼眼图像校正方法研究[J]. 电子测量技术, 2014, 37(5): 25-28.
HUO W W, WANG Z D, GAO M M, et al. Method of fisheye image correction based on coordinate projection[J]. Electronic Measurement Technology, 2014, 37(5): 25-28.
- [19] CHAN S X, ZHOU X L, HUANG C B, et al. A improved method for fisheye camera calibration and distortion correction [C]. Proceedings of the 2016 International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics, 2016: 579-584.
- [20] 陈明伟, 徐丹. 球面坐标定位校正鱼眼图片并合成全景图的方法[J]. 云南民族大学学报: 自然科学版, 2004, 13(3): 214-217.
CHEN M W, XU D. A panoramic mosaic method with fisheye images [J]. Journal of Yunnan Nationalities University: Natural Sciences Edition, 2004, 13(3): 214-217.
- [21] 邓松杰, 周松斌, 程韬波. 利用鱼眼镜头生成全景图像的方法[J]. 工程图学学报, 2010, 31(1): 135-138.

DENG S J, ZHOU S B, CHENG T B. Omni-direction image making based on fisheye lens [J]. Journal of Engineering Graphics, 2010, 31(1): 135-138.

- [22] ZHANG B K, WANG J, LI J K, et al. Fisheye lens distortion correction based on an ellipsoidal function model [C]. Proceedings of the International Conference on Industrial Informatics-Computing Technology, Intelligent Technology, Industrial Information Integration, 2015: 217-221.

作者简介



宋阳, 2015年于武昌首义学院获得学士学位, 现为北京信息科技大学硕士研究生, 主要研究方向为鱼眼镜头在机器视觉领域的应用。

E-mail: crazycorpse@163.com

Song Yang received his B. Sc. degree in 2015 from Wuchang Shouyi University. Now he is a master student in Beijing Information Science Technology University. His main research interest include application of fisheye lens in the field of machine vision.



周亚丽, 分别在1990年和1993年于沈阳工业大学获得学士学位和硕士学位, 2014年于北京科技大学获得博士学位, 现为北京信息科技大学教授, 主要研究方向为机器人控制及信号处理。

E-mail: zhouyali@bistu.edu.cn

Zhou Yali received her B. Sc. degree in 1990 and M. Sc. degree in 1993 both from Shenyang University of Technology, received her Ph. D. degree in 2014 from University of Science and Technology Beijing. Now, she is a professor at Beijing Information Science and Technology University. Her main research interests include robot control and signal processing.



张奇志, 分别在1986年和1989年于吉林大学获得学士学位和硕士学位, 1996年于东北大学获得博士学位, 现为北京信息科技大学教授, 主要研究方向为机器人控制及图像处理。

E-mail: zqzhim@bistu.edu.cn

Zhang Qizhi received his B. Sc. degree in 1986 and M. Sc. degree in 1989 both from Jilin University, received his Ph. D. degree in 1996 from Northeastern University. Now, he is a professor at Beijing Information Science and Technology University. His research interests include robot control and image processing.