

# 基于双经度模型的鱼眼图像畸变矫正方法<sup>\*</sup>

魏利胜 周圣文 张平改 孙驷洲

(安徽工程大学电气工程学院 芜湖 241000)

**摘要:** 针对鱼眼镜头拍摄图片桶形畸变大的问题,提出了一种基于双经度图像畸变矫正算法,以改善其视觉效果。首先,在未知镜头视角大小且鱼眼图像非圆形的情况下,利用鱼眼图像特征求得球面中心及其半径,并对半径大小做优化处理以减弱极点畸变;在此基础上采用双经度模型方法,通过正交投影策略将鱼眼图像映射到球面上,转化为球面横向经度和纵向经度坐标,从而投射为以横向、纵向双经度坐标为基础的正方形平面图像,实现图像的快速、精确变换。最后,利用2个实例验证了该文所提算法的有效性和可行性。

**关键词:** 鱼眼图像;畸变;矫正;双经度

**中图分类号:** TH85<sup>+</sup>5      **文献标识码:** A      **国家标准学科分类代码:** 510.4050

## Double longitude model based correction method for fish-eye image distortion

Wei Lisheng, Zhou Shengwen, Zhang Pinggai, Sun Sizhou

(School of Electrical Engineering, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of large barrel distortion of fish-eye lens that has wide field of view, a novel image distortion correction algorithm based on double longitude spherical model is proposed to improve the visual effect. First of all, under the condition that the camera lens angle is unknown and the fisheye image is non-circular, the center and radius of the spherical model is obtained using the fisheye image features, and then the radius is optimized to weaken the pole distortion. Based on above, adopting the double longitude model algorithm, the fish-eye image is mapped to the sphere with orthogonal projection strategy, and then is transformed into spherically horizontal and vertical longitude coordinates, thereby projected to the horizontal and vertical longitude coordinate based square plan image; and the fast and accurate image conversion is achieved. At last, the results of two experiment examples verify the effectiveness and feasibility of the proposed method.

**Keywords:** fish-eye image; distortion; correction; double longitude

## 1 引言

鱼眼镜头是一种焦距较短,视角接近甚至超过180°的超广角镜头,因其外形酷似鱼眼而得名<sup>[1-2]</sup>。其具有超大视角、信息量丰富、体积小且隐蔽性强等优点而被广泛应用于安全监测、视频会议、机器人导航、全景泊车、智能交通、医疗检测及机器视觉等领域<sup>[3-6]</sup>。然而由于其焦距短视场大的特点以

及光学原理约束,导致鱼眼镜头图像桶形畸变较为严重,视觉效果差,很难满足正常需求<sup>[4]</sup>。如何实现鱼眼图像畸变的精确矫正已成为国内外学者研究的热点。

2009年, Schneider 将鱼眼镜头投影成像模型分为4类:正交投影模型、等距投影模型、球面透视投影模型、等立体角投影模型<sup>[5]</sup>。目前,鱼眼图像畸变矫正主要采用两种方式,即基于投影变换模型的矫正方法<sup>[3, 6-11]</sup>和基于标定的鱼眼镜头畸变矫正方法<sup>[12-17]</sup>。其中基于球面透视投影主要是通过

收稿日期: 2014-12      Received Date: 2014-12

<sup>\*</sup> 基金项目: 国家自然科学基金(61203033, 6117213, 61271377)、安徽省自然科学基金(1208085QF124)资助项目

拟合多项式以优化目标函数,从而估计出矫正模型参数,推导出矫正后的图像,该方法研究较早,但计算复杂,实时性差<sup>[10]</sup>;基于标定的矫正算法,主要是通过借助外部设备对鱼眼图像内外参数进行标定,通过真实坐标与鱼眼成像平面坐标之间坐标转换,实现鱼眼图像畸变矫正,该方法矫正精度高,但对实验设备精度要求较高<sup>[3,13]</sup>。

为简化传统矫正算法复杂度,提高其视觉效果,国内外学者均提出一些具有价值的算法。文献[18]根据投影不变性原理以及径向畸变的几何特性,推导出畸变直线的斜率,提出一种基于几何性质的鱼眼图像矫正算法;杨玲等人<sup>[19]</sup>则提出了一种应用经纬映射的鱼眼图像校正设计方法,通过经纬映射图像关系,将扭曲的半球鱼眼图像投射为普通照片的四方形;刘红军等人<sup>[20]</sup>则采用球面透视投影和柱面展开两种算法对鱼眼图像进行校正,以满足全视场无盲区的监控要求;朱均超等人<sup>[21]</sup>通过对相机的物理参数进行分离标定,推导出鱼眼镜头成像模型;张春燕和邹伟结合成像宽视野范围需求和高畸变特性,给出基于椭圆检测和参数拟合的特征点高精度检测和可靠性排序算法,实现了适用于鱼眼标定;刘晓平等<sup>[22]</sup>采用非角对称光学系统设计原理,以及非线性畸变分布成像函数,建立一种全方向光线跟踪下的镜头成像混合畸变模型,并利用B样条曲面和曲线加以拟合径向和切向畸变函数,实现畸变图像的校正;黄有度等人<sup>[23]</sup>提出一种透视投影的简单数学模型,并利用鱼眼图像自身的特征计算其光学中心及球面模型半径;在文献[24]中,廖士中等人则提出利用多项式表示矫正前后像素点坐标之间的关系,并通过最小二乘法求得多项式参数,实现鱼眼图像矫正,该算法多项式次数越高,矫正效果越好,同时计算多项式参数耗时越长。

本文将在经纬矫正算法的基础上,针对其水平方向畸变大的现象,提出一种水平/竖直双经度畸变矫正算法,并采用球面模型半径大于鱼眼图像半径方法以减弱南北两极拉伸。考虑到实际应用中,可能很难获取鱼眼镜头的视角大小,导致无法直接从鱼眼图像中获得光学中心和球面半径,将依据鱼眼镜头畸变几何原理和矫正后图像视觉效果,通过优化球面模型半径,以进一步减弱极点畸变,最后通过示例验证了所提方法的有效性。

## 2 双经度畸变矫正算法

传统经纬矫正算法因其无需外部设备标定而被广泛使用,算法基本思想是通过建立鱼眼图像坐标点与半球面模型坐标点之间的映射关系,将球面点坐标转换为球面经纬度坐标,并采用等距投影或正交投影原理将球面上点经度映射为矫正图像水平坐标,纬度

映射为矫正图像垂直坐标,从而实现鱼眼镜头的畸变矫正<sup>[11,19,25]</sup>。

传统经纬矫正算法示意图如图1所示,图中球面上点 $m$ 、 $l$ 和 $k$ 经度/纬度映射为平面图像横向/纵向坐标 $m'$ 、 $l'$ 和 $k'$ ,其中相同经度上的点 $l$ 和 $k$ 矫正后具有相同的列坐标 $l'$ 和 $k'$ ,同一纬度上的点 $m$ 和 $l$ 矫正后具有相同的行坐标 $m'$ 和 $l'$ 。通常在忽略镜头误差的情况下,采用等距投影或正交投影建立鱼眼图像点与球面坐标点之间的映射关系,会导致矫正后图像,在 $x$ 轴方向拱形畸变得到一定的矫正,但 $y$ 轴方向上拱形畸变很难得到有效矫正,且靠近顶点位置拉伸更明显。

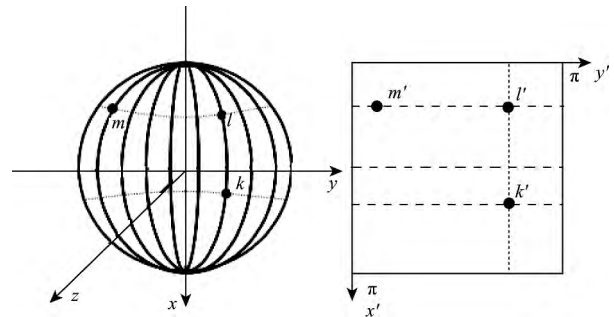


图1 传统畸变矫正算法示意图

Fig. 1 Schematic diagram of traditional distortion correction algorithm

为解决传统经纬矫正算法竖直方向矫正效果好,水平方向仍存在拱形畸变的这一缺点,本文提出一种基于球面的双经度畸变矫正模型。该模型拟通过横向经度和纵向经度对球面进行分割,建立鱼眼图像坐标点与球面双经度坐标的对应关系,然后将纵向和横向经度值映射为平面坐标的横坐标和纵坐标,如图2所示。

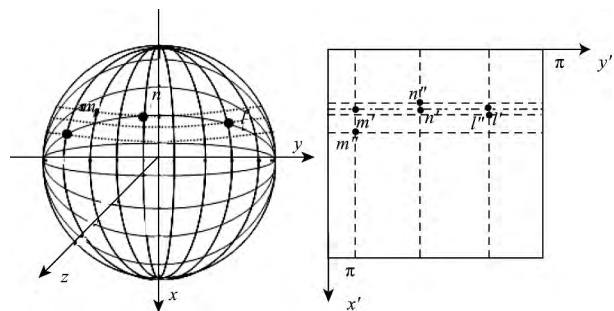


图2 双经度畸变矫正算法示意图

Fig. 2 Schematic diagram of double longitude distortion correction algorithm

图中显示球面上同一横向经度点 $m$ 、 $n$ 、 $l$ ,经过矫正后映射为平面上的点 $m'$ 、 $n'$ 、 $l'$ 具有相同行坐标。如果采用传统经纬矫正算法,由于 $m$ 、 $n$ 、 $l$ 3点在球面不同纬度线上,其对应的映射目标图像上矫正点分别为 $m'$ 、 $n'$ 、 $l'$ 点,可见3点对应水平位置基本保持不变,导致传统经纬矫正算法对水平方向拱形畸变矫正作用下降;而采用双经

度矫正算法后矫正后3点 $m'n'l'$ 位于同一行坐标,对水平方向拱形畸变起到较好的矫正效果,可见本文所提算法能够同时对鱼眼图像横向与纵向畸变进行矫正。考虑到在镜头视角未知的情况下,若以鱼眼图像中心与半径作为球面中心与半径的话,在接近经度顶点上下左右顶点位置,均将产生大幅度拉伸,为此,本文将球面模型半径设定大于鱼眼图像半径,鱼眼图像上像素点投影到球面上后均距极点一定距离,从而导致矫正后能有效减弱极点位置图像拉伸。双经度矫正算法具体步骤如图3所示。

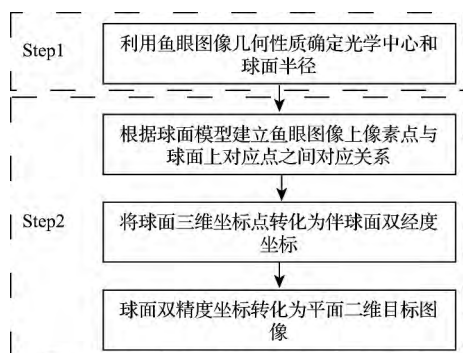


图3 双经度畸变矫正算法步骤

Fig. 3 The procedures of the double longitude distortion correction algorithm

$$L = \sqrt{\left( \frac{CD^2 - 2BDE + AE^2}{4(B^2 - AC)} + F \right) \left( \frac{A + C + \sqrt{(A - C)^2 + 4B^2}}{2(B^2 - AC)} \right)} \quad (4)$$

具体可按照如下流程进行椭圆参数的估计:

步骤1: 在鱼眼图像上选取真实空间为直线的畸变弧线,并在此弧线上进行采样,采样点数不低于8个,并记录个点的行列坐标;

步骤2: 采用最小二乘算法确定椭圆系数 $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$ 、 $E$ 、 $F$ ;

步骤3: 根据式(2)~(4)求得椭圆中心 $(u_0, v_0)$ ,长轴长度 $L$ 大小;

步骤4: 重复以上操作,继续采样至少2条弧线,并计算出 $(u_0, v_0)$ 、 $L$ 值;

步骤5: 对上述求取的各 $(u_0, v_0)$ 、 $L$ 取平均值,以获得较准确的中心与半径值。

上述方法,可迅速得到光学中心和球面半径,多次采样并求平均值的方式使算法更加精确。该方法对于非圆形且视角未知的鱼眼图像同理能估计出其 $180^\circ$ 视角时的光学中心与球面半径,以大大扩展矫正算法的使用范围,提升矫正算法的效果。

## 2.2 双经度畸变矫正

鱼眼图像坐标点最终映射到平面坐标时有部分点非

## 2.1 光学中心和球面半径 $R$ 的计算

由于球面半径及光学中心的选择对畸变矫正结果影响较大,传统球面投影经纬矫正算法均是针对圆形鱼眼图像,且假设其视角为 $180^\circ$ 的情况下,进行光学中心与半径的估计。而实际上视角并未达到 $180^\circ$ ,且有些图像也未必是圆形轮廓,因此此类方法无法计算,为避免此类情况以及使用外部设备进行标定而造成额外费用,本文将利用鱼眼图像自身特征进行估计。如文献[21]证明所述,根据鱼眼镜头球面模型成像几何性质,空间直线投影为球面上大圆,而球面上大圆投射为鱼眼图像上椭圆,椭圆的长轴的长度与球面模型的直径长度相等。因此,本文将对空间直线在鱼眼图像上对应的畸变曲线进行采样,然后根据采样点拟合椭圆方程,并求得中心位置及长轴大小,从而确定光学中心与球面半径。

假设椭圆方程:

$$Au^2 + 2Buv + Cv^2 + Du + Ev + F = 0 \quad (1)$$

式中: $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$ 、 $E$ 、 $F$ 为椭圆方程参数,且 $B^2 < AC$ , $A$ 、 $C > 0$ ,根据文献[21]的计算可得到椭圆中心 $(u_0, v_0)$ ,长轴长度 $L$ :

$$u_0 = \frac{CD - BE}{2(B^2 - AC)} \quad (2)$$

$$v_0 = \frac{AE - BD}{2(B^2 - AC)} \quad (3)$$

整数,导致大量图像空隙的产生,因此本文将采用逆向映射的方法,由平面二维目标图像出发,反向计算鱼眼图像上对应点的方法,然后通过双线性插值算法计算相应像素值。其主要流程图以及标图像逆向映射示意图分别如图4和5所示。

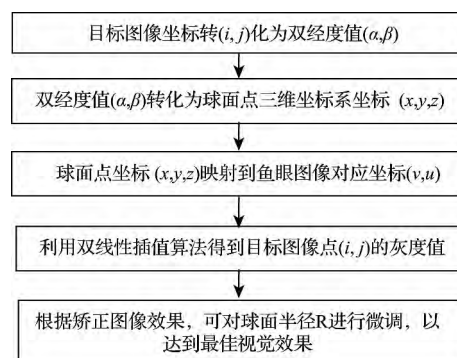


图4 双经度映射逆向矫正算法流程图

Fig. 4 The flow chart of double longitude mapping reverse distortion correction algorithm

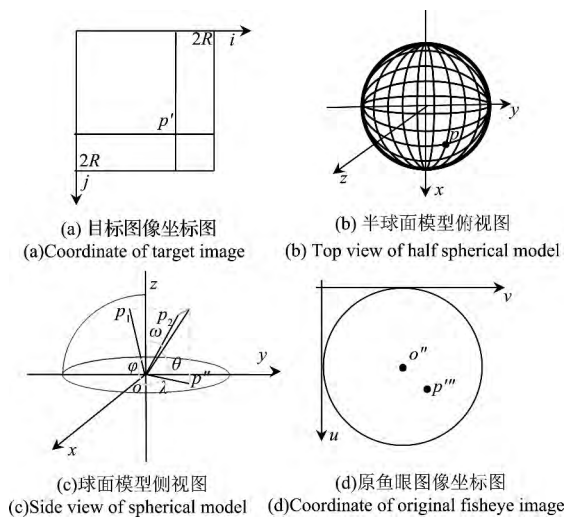


图5 目标图像坐标逆向映射示意图

Fig. 5 The schematic diagram of target image coordinate reverse mapping

在图5中,图(a)表示矫正后的目标图像坐标图, $p'$ 为目标图像上一点,其坐标为 $(i, j)$ ;图(b)表示半球面双经度俯视图,点 $p$ 为与目标图像上点 $p'$ 相对应的逆向映射点;图(c)为图(b)球面模型侧视图, $p$ 点与图(b) $p$ 点相对应,其坐标为 $(x, y, z)$ , $p_1, p_2$ 分别为 $p$ 点在 $xoz$ 面和 $yozy$ 面上的投影点, $\varphi, \theta$ 分别为 $op_1$ 与 $x$ 轴正向的夹角和 $op_2$ 与 $y$ 轴正向的夹角,设 $p$ 点的竖直方向经度线经度与水平方向经度线经度分别为 $\alpha, \beta$ ,则 $\alpha = \pi - \theta, \beta = \pi - \varphi$ , $p''$ 点为 $p$ 点在 $xoy$ 面上的投影点;图(d)表示原鱼眼图像坐标图, $p'''$ 对应图(c) $p''$ 。

当投影模型为半球面时,横向经度与纵向经度取值范围均为 $0 \sim \pi$ ,直接映射时目标图像太小。为保证目标图像与原图像大小相当,故以 $2 \times R$ 作为目标图像的行列数目。因此目标图像上点 $p'(i, j)$ 与其对应球面上双经度坐标 $(\alpha, \beta)$ 之间对应关系可由式(2)~(3)所示,如(5)和(6):

$$\frac{i}{2R} = \frac{\alpha}{\pi} \Rightarrow \alpha = \left(\frac{\pi}{2R}\right) \times i \quad (5)$$

$$\frac{j}{2R} = \frac{\beta}{\pi} \Rightarrow \beta = \left(\frac{\pi}{2R}\right) \times j \quad (6)$$

式中: $R$ 为球面模型的半径, $\alpha$ 表示双经度坐标中竖直方向经度线经度值, $\beta$ 为水平方向经度线经度值, $(i, j)$ 为目标图像上点 $p'$ 的坐标值。

由图5(c)可知, $p$ 点竖直方向经度 $\alpha$ 为 $op_2$ 与 $y$ 负半轴的夹角, $p$ 点水平方向经度 $\beta$ 为 $op_1$ 与 $x$ 负半轴的夹角,因此可得到等式(7)和等式(8):

$$\pi - \theta = \alpha \quad (0 \leq \alpha \leq \pi) \quad (7)$$

$$\pi - \varphi = \beta \quad (0 \leq \beta \leq \pi) \quad (8)$$

将式(5)~(6)代入式(7)~(8),并进行简化,可推出角度 $\varphi, \theta$ 与目标图像坐标点 $p'(i, j)$ 的关系如下:

$$\theta = \pi - \left(\frac{\pi}{2R}\right) \times i \quad (9)$$

$$\varphi = \pi - \left(\frac{\pi}{2R}\right) \times j \quad (10)$$

此外,根据球面特征以及角度与坐标之间关系,可建立角度 $\varphi, \theta$ 与 $p$ 点坐标值 $(x, y, z)$ 之间的对应关系,从而得到目标图像点 $p'$ 坐标值 $(i, j)$ 与 $(x, y, z)$ 之间的关系式。

$$x^2 + y^2 + z^2 = R^2 \quad (z \geq 0) \quad (11)$$

$$\tan(\varphi) = \frac{z}{x} \quad (0 \leq \varphi \leq \pi) \quad (12)$$

$$\tan(\theta) = \frac{z}{y} \quad (0 \leq \theta \leq \pi) \quad (13)$$

联立式(11)~(13)3个方程可得到 $(x, y, z)$ 与 $\varphi, \theta$ 的关系:

$$x = \frac{R}{\sqrt{\tan^2 \varphi + 1 + (\tan^2 \varphi) / (\tan^2 \theta)}} \quad (14)$$

$$y = \frac{R}{\sqrt{\tan^2 \theta + 1 + (\tan^2 \theta) / (\tan^2 \varphi)}} \quad (15)$$

$$z = \frac{R}{\sqrt{1 + 1/(\tan^2 \varphi) + 1/(\tan^2 \theta)}} \quad (16)$$

进一步将等式(9)~(10)的值代入(14)~(16)可得到球面点坐标 $(x, y, z)$ 与目标图像坐标 $(i, j)$ 的关系:

$$x = \frac{R}{\sqrt{\tan^2 \left(\pi - \frac{\pi}{2R} \times j\right) + 1 + \tan^2 \left(\pi - \frac{\pi}{2R} \times j\right) / \left(\tan^2 \left(\pi - \frac{\pi}{2R} \times i\right)\right)}} \quad (17)$$

$$y = \frac{R}{\sqrt{\tan^2 \left(\pi - \frac{\pi}{2R} \times i\right) + 1 + \tan^2 \left(\pi - \frac{\pi}{2R} \times i\right) / \left(\tan^2 \left(\pi - \frac{\pi}{2R} \times j\right)\right)}} \quad (18)$$

$$z = \frac{R}{\sqrt{1 + 1/\tan^2 \left(\pi - \frac{\pi}{2R} \times j\right) + 1/\tan^2 \left(\pi - \frac{\pi}{2R} \times i\right)}} \quad (19)$$

考虑到建立鱼眼图像点与球面坐标点之间的映射关系通常采用等距投影或正交投影等2种方式,下面将分别对应这2种方法分别推导球面上点坐标与鱼眼图像上投影点之间的坐标映射关系。

### 1) 正交投影

当采用正交投影方式时,通过图5(c)~(d)可知,球面点 $p(x, y, z)$ 在鱼眼图像上映射为 $p''(u, v)$ 点,此时线段 $pp''$ 垂直于 $xoy$ 面,因此球面坐标点 $p(x, y, z)$ 与鱼眼图像 $p''(u, v)$ 的对应关系可描述如下:

$$u = x + x_0 \quad (20)$$

$$v = y + y_0 \quad (21)$$

式中: $x_0, y_0$ 为鱼眼图像中心点 $o''$ 位置,将式(14)~(15)代入到式(20)~(21),并进行简化,可得映射关系式(22)和(23)。

$$u = \frac{R}{\sqrt{\tan^2 \varphi + 1 + (\tan^2 \varphi) / (\tan^2 \theta)}} + x_0 \quad (22)$$

$$v = \frac{R}{\sqrt{\tan^2 \theta + 1 + (\tan^2 \theta) / (\tan^2 \varphi)}} + y_0 \quad (23)$$

### 2) 等距投影

当采用等距投影方式时,如图5所示,设 $p'''(u, v)$ 距离 $o''$ 的距离为 $r$ ,线段 $op$ 与 $z$ 轴的夹角 $\omega$ 为入射角, $op'''$ 与 $x$ 轴的夹角为 $\lambda$ ,在等距投影情况下,存在以下关系:

$$r = R \times \omega \quad (24)$$

在点 $p(x, y, z)$ 坐标为已知的情况下,可得:

$$\cos(\omega) = z/R \Rightarrow \omega = \arccos(z/R) \quad (25)$$

$$\cos(\lambda) = x / \sqrt{x^2 + y^2} \quad (26)$$

$$\sin(\lambda) = y / \sqrt{x^2 + y^2} \quad (27)$$

通过化简可知 $r = R \times \omega = R \times \arccos(z/R)$ ,因此

$$u = r \times \cos(\lambda) + x_0 = R \times \arccos(z/R) \times (x / \sqrt{x^2 + y^2}) + x_0 \quad (28)$$

$$v = r \times \sin(\lambda) + y_0 = R \times \arccos(z/R) \times (y / \sqrt{x^2 + y^2}) + y_0 \quad (29)$$

根据以上2种投影方式可以得到球面点与鱼眼图像上相应点坐标之间的映射关系,将式及式(17)、(18)、(19)代入到式(22)、(23)或者式(28)、(29)中便可得到目标图像上点坐标与鱼眼图像坐标之间对应关系,从而通过该对应关系公式,反向查询目标图像上各坐标点所对应的鱼眼图像点位置,且对应点之间像素灰度关系为一一对应的,通过对鱼眼图像上对应点进行双线性插值得到目标图像上相应点的灰度值,最终完成双经度图像畸变矫正。

双线性插值算法在精度上高于最近邻插值算法,在

速度上快于3次卷积插值算法,因此用双线性插值算法进行插值运算。当所求点在图像上的坐标不是整数时,双线性插值算法通过该点周围的4个最近像素点的灰度值进行加权计算,以估计该点像素值,设点 $E(x_i, y_i)$ 为目标图像上非整数坐标点, $A, B, C, D$ 为周围4个邻点,如图6所示。

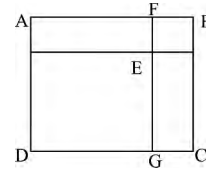


图6 双线性插值算法

Fig. 6 The bilinear interpolation algorithm

图6中 $A, B, C, D$ 4点的坐标分别为 $(x, y)$ ,  $(x+1, y)$ ,  $(x+1, y+1)$ ,  $(x, y+1)$ ,灰度可用 $I(A)$ ,  $I(B)$ ,  $I(C)$ 以及 $I(D)$ 表示,则点的灰度值可表示:

$$I(F) = (x_i - x) (I(B) - I(A)) + I(A) \quad (30)$$

$$I(G) = (x_i - x) (I(C) - I(D)) + I(D) \quad (31)$$

则点 $E(x_i, y_i)$ 的灰度值:

$$I(E) = (y_i - y) (I(G) - I(F)) + I(F) \quad (32)$$

## 3 实验验证

为验证本文算法的矫正效果,给出了2组不同场景的真实鱼眼图像进行矫正实验。实验平台为Window XP操作系统,CPU为3.3 GHz,内存2 G,编程环境MATLAB 7.0,原始鱼眼图像如图7所示。



(a) 鱼眼图像a  
(a) Fish-eye image a

(b) 鱼眼图像b  
(b) Fish-eye image b

图7 鱼眼图像

Fig. 7 Fish-eye images

利用上节所述的双经度畸变矫正方法分别对图7中的(a)、(b)2幅鱼眼图片进行实验,为验证方法的可行性和有效性,将进一步采用鱼眼图像中的有效线段作为测试特征样本集,与传统经纬矫正算法进行对比,可得图8和9。

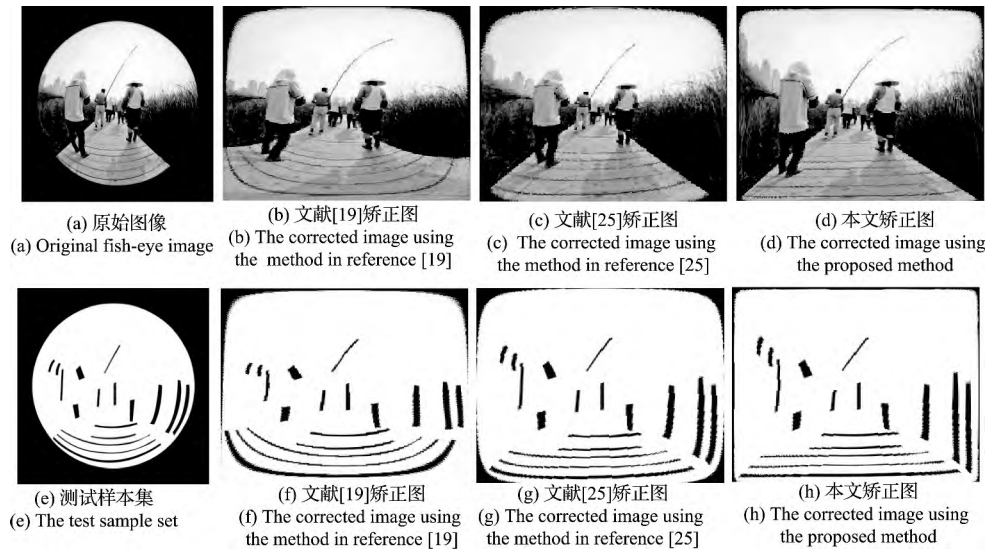


图8 矫正效果对比图7(a)

Fig. 8 Correction result comparison of fish-eye image 7( a)

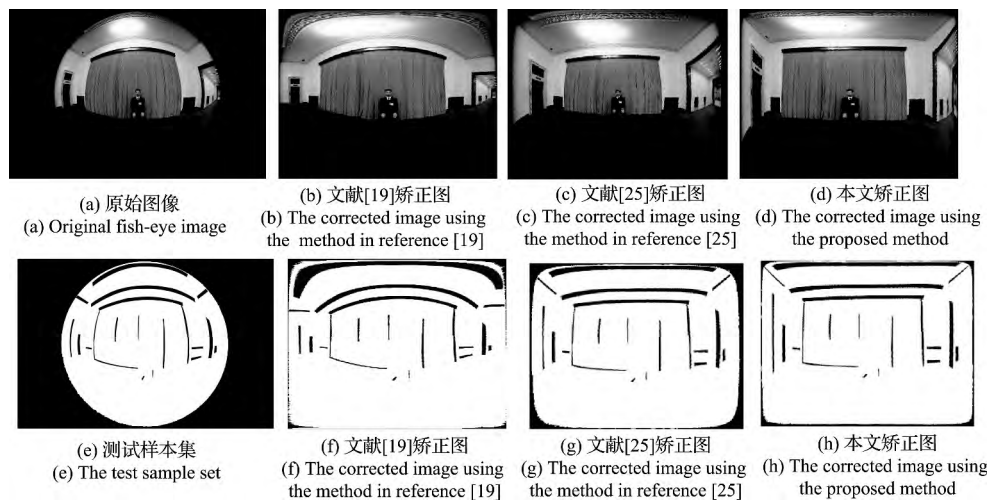


图9 矫正效果对比图7(b)

Fig. 9 Correction result comparison of fish-eye image 7( b)

从图8和9可知,以 $600 \times 600$ 网格图像为评判标准,分别双经度矫正模型对鱼镜头图像进行畸变处理,并传统经纬度算法进行了比较。其中图8(a)和图9(a)为从网络上下载的2幅视角未知的鱼眼图像;图8(b)和图9(b)分别是采用文献[19]经纬矫正算法得到结果,从主观视觉角度可以看到该算法在竖直方法矫正效果较好,但是在水平方向仍然存在拱形畸变且上下顶点位置拉伸较为严重;图8(c)和图9(c)分别是采用文献[25]图像矫正算法得到结果,与图8(b)和图9(b)相比较,该算法在竖直、水平方法矫正效果均得到较大改善,但图像边缘部分还存在一定的畸变;图8(d)和图9(d)为采用本文所提等距投影方式双经度算法得到

的矫正结果,从矫正图可以看出,该方法在水平和竖直方向均得到较好的矫正,视觉效果较好。相对图8(b)~(c)和图9(b)~(c)有更深的景深,图像边界区域图像分布更加均匀且更加贴合人的视觉特性。

为了进一步验证该方法的有效性,更加直观地说明其矫正的精确度,本文将通过线性拟合的方式,求取采用不同矫正方法的误差情况。首先,选取鱼眼图像上其实际空间为直线的物体,采用灰色线段标出,并将其他部分以白色替代,使观察效果更加明显,如图8(e)和图9(e)所示;然后分别采用上述的3种方法对处理后的图像进行畸变矫正,并得到相对应的矫正效果对比图;最后,分别对3种方法矫正后的水平方向与竖直方向线段进行直

线拟合,以计算出不同方法矫正的最大误差、最小误差和平均误差,并通过数据来分析该方法的可行性,具体数据如表1所示。

表1 测试特征样本集矫正误差比较

Table 1 Correction error comparison of the test sample set

图像	算法	水平方向(网格)			竖直方向(网格)		
		最大误差	最小误差	平均误差	最大误差	最小误差	平均误差
图像a	文献[19]	22.37	0.80	8.84	5.30	0.29	2.19
	文献[25]	7.174	0.37	2.98	5.82	0.31	2.64
	本文方法	3.45	0.38	1.35	3.96	0.26	1.87
图像b	文献[19]	23.86	0.49	10.67	4.15	0.30	1.63
	文献[25]	9.30	0.25	3.95	5.11	0.11	1.91
	本文方法	6.30	0.15	2.33	3.73	0.08	1.55

从表1中可以看出,本文方法水平和竖直方向的最大误差与平均误差均小于文献[19]和文献[25]方法,畸变矫正的精确度更高。可见,本文算法改善了畸变图像边缘区域的视觉,图像的整体质量明显提升,矫正效果更佳。

## 4 结 论

针对传统经纬矫正算法缺陷以及球面透视投影矫正算法损失部分边界像素的问题,本文提出双经度畸变矫正模型:该算法在镜头视角大小及光学中心未知,并且在鱼眼图像为圆形的情况下,无需借助外部校准设备,便能很好的计算光学中心及球面模型半径;相对传统经纬畸变矫正算法,该算法能较好恢复水平和竖直方向畸变,且极点拉伸较小,且该算法使用范围更广,对非圆形鱼眼图形仍能较好完成矫正;相对球面投影矫正算法损失部分边界区域像素,实验结果表明该算法在不损失像素的情况下,仍能达到较好的视觉效果。可见,本方法利用严重变形的投影信息,迅速恢复实际场景,转换成人眼习惯性视觉投影图像,省去了繁杂精确的外部校准设备标定过程,从而达到降低鱼眼图像畸变矫正成本的目的,具有很强的环境适应性和可操作性,能够精确恢复大场景稠密深度图的要求,为图像匹配以及目标的定位与距离估计等领域应用打下基础。

## 参考文献

- [1] LEE T Y, CHANG T S, WEI C H, et al. Automatic distortion correction of endoscopic images captured with wide-angle zoom lens[J]. Biomedical Engineering, IEEE Transactions on, 2013, 60(9): 2603-2613.
- [2] 赵振兵, 王乐. 一种航拍绝缘子串图像自动定位方法[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(3): 558-565.  
ZHAO ZH B, WANG L. Aerial insulator string image automatic location method[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(3): 558-565.
- [3] 赵瑞, 郝书珍. 一种大视角鱼眼图像校正算法的实现[J]. 河北农业大学学报, 2014, 37(3): 106-110.  
ZHAO R, HAO SH ZH. Implementation of correction algorithm for large-angle fisheye image [J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2014, 37(3): 106-110.
- [4] 许振辉, 张峰, 孙凤梅, 等. 基于邻域传递的鱼眼图像的准稠密匹配[J]. 自动化学报, 2009, 35(9): 1159-1167.  
XU ZH H, ZHANG F, SUN F M. Quasi-dense matching by neighborhood transfer for fish-eye images [J]. Acta Automation Sinica, 2009, 35(9): 1159-1167.
- [5] SCHNEIDER D, SCHWALBE E, MAAS H. Validation of geometric models for fisheye lenses[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2009, 64(3): 259-266.
- [6] YUAN X, QINGHAI Z, LIWEI G, et al. High-speed simultaneous image distortion correction transformations for a multi-camera cylindrical panorama real-time video system using FPGA[J]. IEEE Transactions on Circuits And Systems For Video Technology, 2014, 24(6): 1061-1069.
- [7] 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, 1: 135-138.  
DENG S J, ZHOU S B, CHENG T B. Omni-directional image making based on fisheye lens [J]. Journal of Engineering Graphics, 2010, 1: 135-138.
- [8] 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.
- [9] 苑英海, 方永纯, 张雪波. 基于全局代价函数优化的立体标定方法[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(10): 2228-2234.  
YUAN Y H, FANG Y CH, ZHANG X B. Stereo calibration based on global cost function optimization [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(10): 2228-2234.
- [10] SONG G Y, LEE J W. Correction of radial distortion based on line-fitting [J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2010, 8(3): 615-621.

- [11] HOU W, DING M, QIN N, et al. Digital deformation model for fisheye image rectification[J]. Optics express, 2012, 20(20): 22252-22261.
- [12] 冯为嘉, 张宝峰, 曹作良. 基于鱼镜头的全方位视觉参数标定与畸变矫正[J]. 天津大学学报, 2011, 44(5): 417-424.  
FENG W J, ZHANG B F, CAO Z L. Omni-directional vision parameter calibration and rectification based on fish-eye lens[J]. Journal of Tianjin University, 2011, 44(5): 417-424.
- [13] LU J S, HUO C L, YU Y H, et al. A novel calibration method based on heuristic B-spline model for fish-eye lenses[C]. System Science and Engineering (ICSSE), 2013 International Conference on. IEEE, 2013: 413-417.
- [14] 祝海江, 徐晓波, 周靖林. 基于球面透视投影旋转矩阵的鱼眼图像匹配[J]. 光学学报, 2013, 33(2): 1-8.  
ZHU H J, XU X B, ZHOU J L. Fisheye image matching based on rotation matrix under spherical perspective projection[J]. Acta optica Sinica, 2013, 33(2): 1-8.
- [15] 徐嵩, 孙秀霞, 刘树光, 等. 一种基于正交直线构造的摄像机畸变标定方法[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(9): 2118-2123.  
XU S, SUN X X, LIU S H, et al. Camera distortion calibration method based on orthogonal lines[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument 2013, 34(9): 2118-2123.
- [16] 张宝峰, 冯为嘉, 宗晓宁, 等. 基于鱼镜头的全景立体球视觉研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2012, (增刊2): 95-99.  
ZHANG B F, FENG W J, ZONG X N, et al. Panoramic stereo sphere vision[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2012, (suppl.2): 95-99.
- [17] 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.
- [18] 杨晶晶, 陈更生, 尹文波. 一种基于几何性质的鱼眼图像校正算法[J]. 计算机工程, 2012, 38(3): 203-205.  
YANG J J, CHEN G S H, YIN W B. Algorithm for fish-eye image correction based on geometric properties[J]. Computer Engineering, 2012, 38(3): 203-205.
- [19] 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, 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, 6: 19-22.
- [20] 刘红军, 陈琛, 苗立刚, 等. 鱼眼图像校正软件的关键技术研究[J]. 仪表技术与传感器, 2011, 7: 100-102.  
LIU H J, CHEN C H, MIAO L G, et al. Study of key technology of distortion correction software for fisheye image[J]. Instrument Technique and Sensor, 2011, 7: 100-102.
- [21] 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 C H, 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.
- [22] 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.
- [23] 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.  
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): 29-33.
- [24] 廖士中, 高培焕, 苏艺, 等. 一种光学镜头摄像机图像几何畸变的修正方法[J]. 中国图像图形学报, 2000, 5(7): 593-596.  
LIAO S H Z H, GAO P H, SU Y, et al. A geometric rectification method for lens camera[J]. Journal of Image and Graphics, 2000, 5(7): 593-596.
- [25] 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): 1-6.  
YING X H, HU Z H Y. Fisheye lense distortion correction using spherical perspective projection constraint[J]. Chinese Journal of computers, 2003, 26(12): 1-6.

#### 作者简介



魏利胜(通讯作者) 2009年获得上海大学博士学位, 现为安徽工程大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为图像识别与应用、嵌入式仪器仪表及系统、智能化网络控制理论、系统和仿真。  
E-mail: lshwei\_11@163.com.



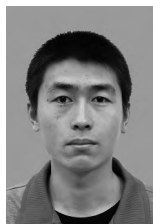
**Wei Lisheng** (Corresponding author) received his Ph. D. degree in 2009 from Shanghai University. Now, he is an associate professor and master student supervisor at Anhui Polytechnic University. His research interests include image recognition and application, embedded instrumentation and system, intelligent network control theory, system and simulation.



周圣文, 安徽工程大学硕士研究生, 主要研究方向为图像识别与应用、网络控制系统。

E-mail: zhoushengwen1988@163.com.

**Zhou Shengwen** is a master student in Anhui Polytechnic University. His research interests include image recognition and application, networked control system.



张平改, 安徽工程大学硕士研究生, 主要研究方向为嵌入式仪器仪表及系统。

E-mail: zhangpgling@163.com.

**Zhang Pinggai** is a master student in Anhui Polytechnic University. His research interest includes embedded instrumentation and sys-

tem.



孙驷洲, 安徽工程大学讲师, 主要研究方向为先进控制理论、智能优化算法以及计算机应用等。

E-mail: sszhou12345@163.com.

**SUN Sizhou** is a lecturer in Anhui Polytechnic university. His current research interests include advanced control theory, intelligent optimization algorithm and computer application.