

针对鱼眼图像边缘校正失真的快速校正算法*

涂治洲 孙军艳 盛强 刘江山
(陕西科技大学机电工程学院 西安 710016)

摘要:针对现有鱼眼图像畸变校正算法校正后图像边缘区域存在失真的问题,在经度校正算法的基础上引入拉伸因子设计一种快速校正算法。首先利用快速扫描方法提取图像有效区域,得到畸变图像有效区域半径及圆心,其次在鱼眼图像畸变模型和径向畸变原理的基础上,确定畸变校正拉伸因子,然后分别在经度和纬度方向上增加拉伸因子进行校正,最终将校正结果与经度校正算法、经纬校正算法、双经度算法和重定心校正算法进行比较。结果表明,该算法能有效改善图片边缘的失真现象,且校正效率相比其它算法均有明显提高。综上所述,本文提出的算法能够快速有效地对鱼眼图像进行高质量的校正,为畸变校正质量提升相关研究提供借鉴。

关键词:鱼眼镜头;畸变校正;边缘失真;拉伸因子

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.6040

Fast correction algorithm for edge distortion of fisheye image

Tu Zhizhou Sun Junyan Sheng Qiang Liu Jiangshan

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710016, China)

Abstract: Aiming at the problem of distortion in the edge region of the existing fish-eye image distortion correction algorithm, a fast correction algorithm is designed by introducing the stretching factor based on the longitude correction algorithm. Firstly, the effective area of the image is extracted by the fast scanning method to obtain the radius and center of the effective area of the distorted image. Secondly, based on the fish-eye image distortion model and the radial distortion principle, the distortion correction stretching factor is determined, and then the stretching factor is added in the longitude and latitude directions for correction. Finally, the correction results are compared with the longitude correction algorithm, longitude and latitude correction algorithm, double longitude algorithm and the recentering correction algorithm. The results show that the algorithm can effectively improve the distortion of image edge, and the correction efficiency is significantly improved compared with other algorithms. In conclusion, the algorithm proposed in this paper can quickly and effectively correct the fish-eye image with high quality, and provide reference for the research on improving the quality of distortion correction.

Keywords: fisheye lens; distortion correction; edge distortion; stretching factor

0 引言

在航空航天、医疗检测、工业生产等领域中普遍采用大视场短焦距的镜头以获取目标景物的图像信息,但此类镜头在成像过程中存在一定程度的光学畸变,影响后续的图像分析和处理^[1],因此使用前必须进行畸变校正。目前国内畸变校正方法根据是否需要标定可以分为基于标定的畸变校正方法^[2]和基于投影变换的校正方法两大类。基于标定的校正方法主要是通过设置标定块,如棋盘格、同心圆

或点阵模板对鱼眼镜头的内、外参数进行标定,该类方法校正效果较为理想,目前国外最新研究均围绕该类方法进行^[3-9],但该类方法需提前对相机进行标定,校正效果依赖于标定结果的准确性。基于投影变换的校正方法则是根据透视投影原理,建立数学模型,将畸变图像还原成符合人类视觉习惯的透视投影图像,相对而言更加简洁方便,适用性更强。

本文在分析了鱼眼镜头成像模型及畸变校正原理的基础上,重点讨论基于投影变换的校正方法,该类方法根据投

收稿日期:2022-03-15

* 基金项目:陕西省工业科技攻关项目(2018GY-026)、陕西省社科基金(2020R043)、陕西科技大学博士科研启动基金(2018BJ-12)项目资助

影变换类型分为 2D 投影和 3D 投影两类。Mundhenk 等^[10]最早提出了基于经度的 2D 投影校正方法,该方法将鱼眼图像的扭曲变形近似地用经线模型表示,经过校正后每条经线上像素点的横坐标被变换到实际位置,而纵坐标不变。杨玲等^[11]提出的经纬校正算法属于经典的 3D 投影校正算法,该方法将原始图像上点的像素点与球面经纬度网格点对应,计算每一点经过变换后的坐标,最后映射到目标平面上以达到校正的目的。该方法在垂直方向上效果较好,但在水平方向上仍存在拱形畸变。魏利胜等^[12]在经纬校正算法的思想,将经纬球面变为双经度球面,提出了双经度校正算法,该算法有效地改善了水平方向上的拱形畸变,但在图像上下两端及边缘部分仍有较为严重的拉伸现象。赵丹等^[13]在 Mundhenk 的基础上提出了一种基于经、纬两个方向上的快速校正方法。但由于边缘处坐标映射不如靠近中心处坐标映射更加贴合实际图像的原因,该类方法校正后图像边缘存在严重失真。

针对上述算法的不足,本文在经度校正算法的基础上提出一种针对鱼眼图像边缘失真的快速校正算法。根据鱼眼镜头畸变原理引入拉伸因子,对图像进行适当的放缩处理,并在此基础对经、纬两个方向上的畸变分别进行校正,有效地改善了图像边缘区域失真的问题。

1 成像原理及校正模型

1.1 鱼眼镜头成像原理

鱼眼镜头一般是由十几个不同的透镜组合而成的,在成像过程中入射光线经过不同程度的折射,投影到尺寸有限的成像平面上,使得鱼眼镜头与普通镜头相比起来拥有了更大的视野范围^[14]。为了将尽可能大的场景投影到有限的图像平面内,鱼眼相机会按照一定的投影函数来设计,现实中大部分的鱼眼相机采用等距投影模型成像^[15]。

鱼眼镜头畸变产生原理如图 1 所示,假设相机坐标系下有一物点 $P(x, y, z)$,按照无畸变的针孔相机投影模型,理想成像点为 $P_0(x, y)$,但由于鱼眼镜头的透镜为半球体,因此实际的像点为 $P(x', y')$,设理想成像点到图像中心的距离为 $r = x^2 + y^2$,实际成像点到图像中心的距离为 $r_d = x'^2 + y'^2$ 。根据径向畸变公式可得式(1)。

$$r = r_d(1 + k_1 r_d^2 + k_2 r_d^4 + k_3 r_d^6) \quad (1)$$

其中, k_1, k_2, k_3 为畸变因子, k_1 为低次项, k_2, k_3 为高次项。

1.2 基于投影的畸变校正原理

Mundhenk 在 2000 年提出的经度校正方法是典型的 2D 投影校正方法,其原理是将鱼眼图像的坐标都放在经线上,校正过程实际是把图像中扭曲的经线“拉直”以达到校正纵向畸变的目的。在图 2 所示的经度校正模型中,假设校正前图像上任意一点 $A(x, y)$ 通过校正后位置为 $B(u, v)$,其在零纬度线上的投影分别为 $C(x, y_0)$ 和 $D(u, y_0)$,且已知有效区域的圆心为 $O(x_0, y_0)$,半径为 R 。根据勾股定理

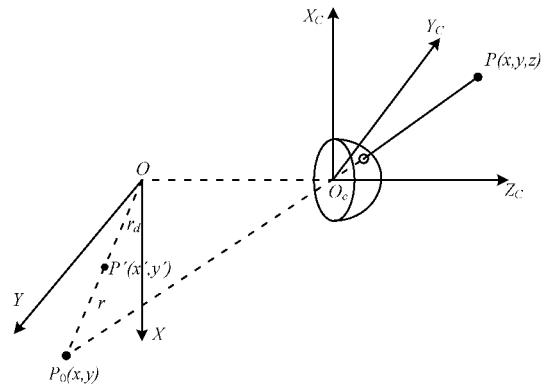


图 1 鱼眼镜头畸变模型

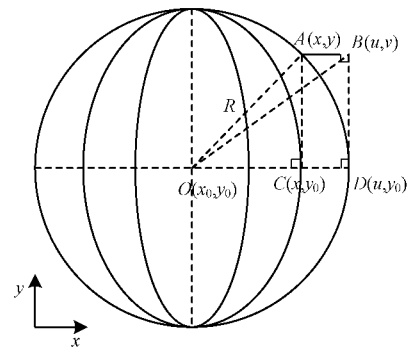


图 2 经度校正模型图

可得式(2),并可进一步得到校正后 B 点的横坐标如式(3)所示。这种传统经度校正方法的优点是简单、易行,在视域为 180° 及以下的场景应用广泛,但其仅在垂直方向上实现了畸变校正。

$$\frac{x - x_0}{u - x_0} = \frac{\sqrt{R^2 - (y - y_0)^2}}{R} \quad (2)$$

$$u = \frac{R(x - x_0)}{\sqrt{R^2 - (y - y_0)^2}} + x_0 \quad (3)$$

基于 3D 投影的畸变校正原理如图 3 所示,图中最左侧为鱼眼镜头拍摄的校正前图片,中间为 3D 投影的经纬球面,最右侧为校正后的图片。校正时,先将鱼眼图像上的点 $e(u, v)$ 经过不断转换得到其经纬坐标 $E(\lambda, \varphi)$,然后根据球面上同一纬度的点(G、E)校正后纵坐标相同,同一经度上的点(E、H)校正后横坐标相同的原理,将球面坐标变换为平面坐标 $E'(u', v')$ 完成畸变校正。该类校正算法通过两次映射,能够较好的实现经度方向的畸变校正,但在纬度方向尤其是靠近南北两极的区域仍然存在一定程度的拉伸变形。

2 鱼眼图像畸变校正

本文提出的边缘校正失真快速校正算法首先进行鱼眼图像的有效区域提取,并获得提取后的圆心 (x_0, y_0) 和图像半径 R ,其次在经度校正算法的基础上,引入畸变校正拉伸

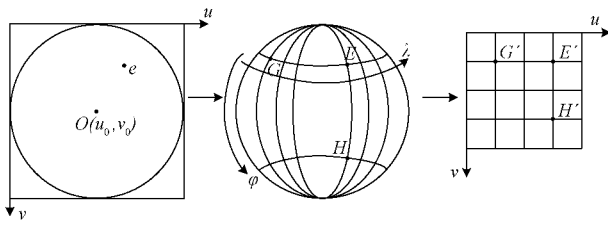


图 3 经纬校正原理

因子 k^* ，在横、纵两个方向上分别进行校正，最后通过反向差值完成畸变校正，算法的具体流程如图 4 所示。

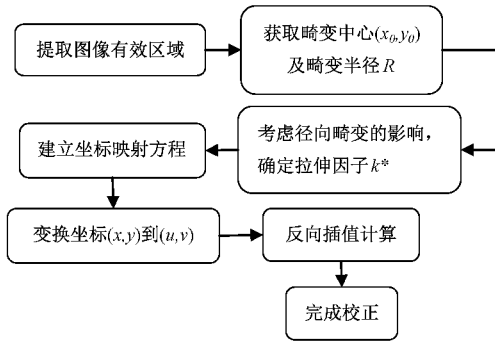


图 4 畸变校正流程

2.1 有效区域提取

在鱼眼图像校正过程中，有效区域的提取会直接影响到校正结果，常见的有效区域提取方法有：最小二乘法、面积统计法、逐行扫描法、区域生长法等。最小二乘法通过求解方程组得到图像的圆心和半径，计算量大且效率低。面积统计法把鱼眼图像内所有像素点的亮度均值作为阈值与图像内的像素一一比较，从而判定某像素点是否属于有效区域。逐行扫描法根据有效区域内像素亮度差远大于有效区域外像素亮度差的原理，用与有效区域外切的正方形确定边界。区域生长法是在面积统计法的基础上把鱼眼图像二值化，并通过区域特点标记黑色像素点，以此达到提取的目的。

考虑到有效区域外的图像亮度接近于 0，因此本文在逐行扫描法的基础上进一步精简，通过设定一个较小的阈值直接与图像亮度相比较来寻找有效区域边界，具体提取步骤如下：

步骤 1) 设定一个较小的阈值 $T(20 \sim 50)$ ，读取图像左侧第一列像素点亮度；

步骤 2) 当有一个点的亮度值大于 T 时，扫描下一列，当下一列的依然大于 T 时，这个时候则认为已经扫描到图像的左边界了；

步骤 3) 按照步骤 1)、2) 可以分别求得鱼眼图像有效区域的左、右、上、下边界；至此，完成鱼眼图像有效区域的提取。

分别采用本文提出的算法和上述算法进行有效区域提取，结果如图 5 所示，可以看出各算法提取效果差异不大，

但运算时间有较大差异，本文提出的算法运算时间仅为 0.062 s，明显优于其余 4 种算法，各算法运行时间如表 1 所示。本文提出的有效区域提取方法既能对图像进行有效提取，又在运算速度上具有明显优势。

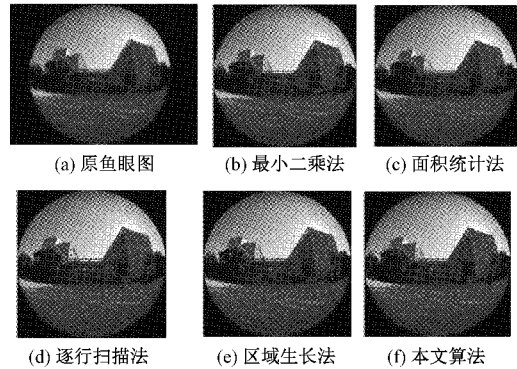


图 5 提取效果图

表 1 几种算法获得有效区域的时间比较

方法	提取时间/s
最小二乘法	0.134
面积统计法	0.087
逐行扫描法	0.085
区域生长法	0.096
本文改进算法	0.062

2.2 确定拉伸因子 k^*

根据鱼眼镜头畸变原理可知畸变同时存在于横、纵两个方向上，畸变大小与其到图像中心的距离有关，距离越大，畸变越大^[16]。根据式(1)可知图(3)中校正前像点到图像中心的距离 OA 与校正后像点到图像中心的距离 OB 存在如下关系式：

$$OB = OA(1 + k_1 OA^2 + k_2 OA^4 + k_3 OA^6) \quad (4)$$

鱼镜头成像时会有“桶形畸变”，在边缘处的放大率远小于靠近图像视野中心的放大率，导致边缘区域图像信息被压缩视觉上出现失真^[17]，此时引入拉伸因子 k^* ，其含义是将图像中所有点到图像中心的距离拉伸 k^* 倍，此时 $OB = k^* R$ ，并略去对畸变影响很小的高次项，得：

$$k^* OB = OA(1 + k_1 OA^2) \quad (5)$$

其中， $OA = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}$ 、 $OB = \sqrt{(u - x_0)^2 + (v - y_0)^2}$ ，进一步整理可得到关于 k^* 的隐式表达式如式(6)所示。

$$k^* = \frac{\sqrt{M^2 + (y - y_0)^2}}{\sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}} \times \frac{(1 + k_1 M^2 + k_1 (y - y_0)^2)}{\sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}} \quad (6)$$

$$\text{其中, } M = \frac{k^* R(x - x_0)}{\sqrt{(k^* R)^2 - (y - y_0)^2}}$$

由式(6)可以看到,拉伸因子 k^* 与图像上畸变点 (x, y) 到圆心 (x_0, y_0) 的距离、径向畸变因子 k_1 有关,当鱼眼为等距模型且视场角 $\theta > 180^\circ$ 时, k_1 的值很小,此时 k_1 对 k^* 的影响可不计,影响 k^* 的主要因素是畸变点距离中心之间的距离,考虑到提取有效区域后待校正图像的大小,此时 $|x - x_0|$ 和 $|y - y_0|$ 一般在 350~550 之间,带入特殊点计算 k^* 的值,取均值之后算得 k^* 的值在 1.12~1.56 之间比较符合实际需求,取 k^* 的值为 1.2。

2.3 基于 k^* 的畸变校正

引入拉伸因子后,分别在横向和纵向上对图像进行畸变校正。纵向上,校正后每个点的纵坐标不变,横坐标内加入拉伸因子,具体如式(7)所示。

$$\begin{cases} u = \frac{1.2R(x - x_0)}{\sqrt{(1.2R)^2 - (y - y_0)^2}} + x_0 \\ v = y \end{cases} \quad (7)$$

横向的畸变校正过程如图 6 所示,按照同样的方法在横向上对图像进行校正。校正后每个点的横坐标不变,纵坐标内加入拉伸因子,具体如式(8)所示。

$$\begin{cases} v = \frac{1.2R(y_1 - y_0)}{\sqrt{(1.2R)^2 - (x_1 - x_0)^2}} + y_0 \\ u = x \end{cases} \quad (8)$$

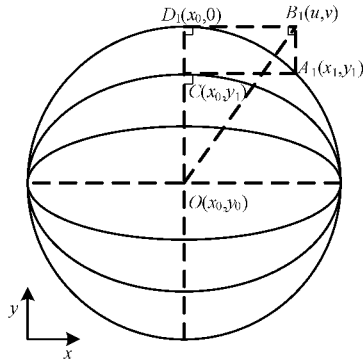


图 6 横向校正模型

本文在校正过程中,由于向后映射的方式在给像素赋值时存在的问题更少同时效率更高,因此,本文算法采用反向映射变换,即从目标图像上的每个坐标点出发,反向计算其在源鱼眼图上对应点的坐标;同时,考虑到校正后的图像相比于原图像有所增大,若直接采用原畸变图像到校正图像的映射变换,会导致校正后的图像上产生大量的空白点,变换之后的目标像素也并非恰好落至整数位置,因此需要对校正后的图像进行灰度插值,常见的插值方法有最邻近插值、双线性插值和三次卷积插值算法^[18],相比于其他两种插值方法,双线性插值较三次卷积插值计算复杂度大大降低,因此计算速度更高,同时较最邻近插值法精度更高,因此选择双线性插值法进行插值计算。

具体过程如图 7 所示,首先在水平方向上进行插值算得点 R_1 与点 R_2 的像素亮度值。

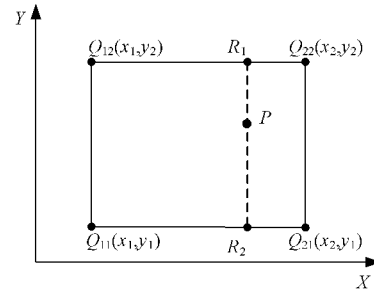


图 7 双线性插值法示意图

$$\begin{cases} f(R_1) = \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1}f(Q_{11}) + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1}f(Q_{21}) \\ f(R_2) = \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1}f(Q_{12}) + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1}f(Q_{22}) \end{cases} \quad (9)$$

然后在竖直方向上进行相同过程,即可得到目标点 P 的像素亮度值。

$$f(P) = \frac{y_2 - y}{y_2 - y_1}f(R_1) + \frac{y - y_1}{y_2 - y_1}f(R_2) \quad (10)$$

$$\begin{aligned} f(P) = & \frac{f(Q_{11})}{(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)}(x_2 - x)(y_2 - y) + \\ & \frac{f(Q_{21})}{(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)}(x - x_1)(y_2 - y) + \\ & \frac{f(Q_{12})}{(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)}(x_2 - x)(y - y_1) + \\ & \frac{f(Q_{22})}{(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)}(x - x_1)(y - y_1) \end{aligned} \quad (11)$$

3 实验结果及分析

本文的算法利用软件 MATLAB2016a 编程实现,图 8 分别为原始图像、文献[10-13]以及本文算法的效果比较图。

其中图 8(a)为校正前图像,图 8(b)为经度校正方法校正后的图像,该算法在纵向校正效果较好,但水平方向上的畸变未校正,楼的真实高度没有得到还原,图 8(c)中,水平畸变更加严重,整体图像向下坍塌,图 8(d)中大楼边缘存在明显畸变,地面向上凸起呈现明显的拱形畸变,图 8(e)中,大楼边缘轮廓存在扭曲变形同时四周有拉伸失真现象。从上述算法中可以看出,其校正后的图片在水平方向上的畸变都十分严重,且靠近四角的地方扭曲更加明显,从地面上黄色的界线在越靠近边缘的地方向上“翘起”的弧度越明显也可看出这个问题。图 8(f)为本文校正效果图,从图中可以看出,在竖直方向上,大楼基本不存在畸变,弯曲的外轮廓被还原为直线,水平方向上与前面的算法相比有了很大的改善,地面上交叉的界线弯曲现象已经不明显,靠近边缘部分的拉伸畸变大幅减弱。

为了直观反应各算法的校正效果,提取图片中大楼外轮廓及地面标线,如图 9 所示。从图中可以看出,本文算法相较于其他文献中的算法,校正后的轮廓更加贴合实际,图

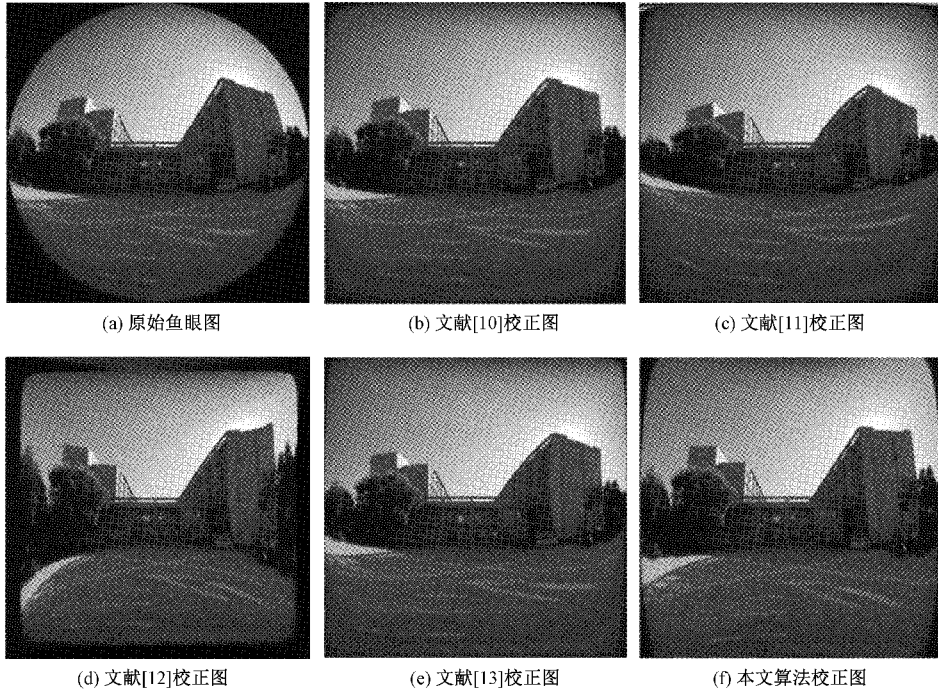


图 8 校正结果示意图

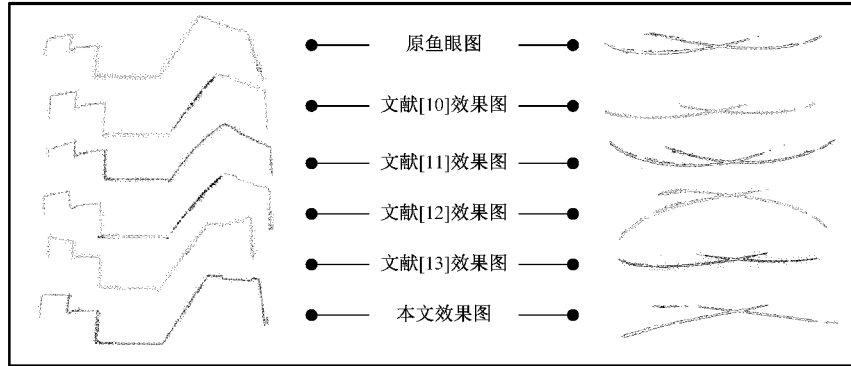


图 9 大楼轮廓及地面界线提取图

像边缘的拉伸变形更小,畸变校正状况要好于文献[10-13]中的算法。

同时,为了比较校正后的图像与未畸变源鱼眼图之间的差异,引入结构相似度的概念来补充说明本文算法的校正效果。结构相似度反映了图像在结构上的异同,即各种结构细节及轮廓上的相似程度,结构相似度越大,说明校正效果越好^[19]。用结构相似度来作为指标,能够很好比较各种算法的校正效果。

结构相似度的计算公式如下:

$$SSIM(f, g) = l(f, g) * c(f, g) * s(f, g) \quad (12)$$

其中, f, g 分别表示未畸变的图像和校正后的图像。 l, c, s 分别表示亮度变化、差异变化、结构变化。

同时,为了验证本文算法边缘校正效果,引入边缘图像的清晰度指标来进行评价。对于模糊的图像,其整个图像的灰度较为均匀,相邻像素之间的差值会很小,差值的

平方和也会很小;图像越清晰,那么,边缘跟其周围像素灰度的差值也越大,差值的平方和也会更大,因此边缘图像清晰度可以快速准确地来判断一副图像清晰的程度^[20]。边缘图像清晰度的公式为:

$$EOG = \sum \sum (I(i, j) - I(i + 1, j))^2 \times (I(i, j) - I(i, j + 1))^2 \quad (13)$$

其中, $I(i, j)$ 表示点 (i, j) 的灰度值,相关的比较信息如表 2 所示。

在算法运行时间方面,较之文献[10]的 3.12 s,文献[11]的 6.12 s,文献[12]的 2.82 s,文献[13]的 1.71 s,本文的算法的 1.25 s 在效率上有了巨大提升同时,由表 2 可以看出,在结构相似度方面,本文结果结构相似度的数值更高,校正后的图像与原来畸变图像之间的差异要小于其他算法的校正结果。在边缘图像清晰度上,可以明显看

表2 算法性能比较

算法	校正时间/ s	结构 相似度	边缘图像 清晰度
文献[10]	3.12	0.658 2	51.225
文献[11]	6.12	0.344 9	50.923
文献[12]	2.82	0.349 8	43.001
文献[13]	1.71	0.560 5	46.676
本文算法	1.25	0.770 9	52.061

出本文算法较其他算法清晰度更高,说明图像边缘失真现象得到有效改善。综上所述,本文算法能快速有效地对鱼眼图像进行校正。

4 结 论

本文利用投影模型分析了鱼镜头的畸变成因,针对传统畸变校正方法校正后边缘区域失真严重的问题,提出了一种针对鱼眼图像边缘校正失真的快速校正算法。首先在逐行扫描算法的基础上加以改进借此提取鱼眼图像有效区域,并在考虑径向畸变的情况下引入拉伸因子对提取图像的纵向、横向畸变进行校正,最后,运用 MATLAB 软件进行实验验证。实验结果表明,该算法无需标定,简单快速,校正效果明显,改善了图像在边缘的失真现象。同时,本文算法复杂度低,运算速度相较于传统校正方法大幅提高,能快速有效地对畸变图像进行校正,在航空航天、医疗检测、工业生产等采用大视场短焦距镜头获取目标景物图像信息的领域,有较好的实用价值。

参考文献

- [1] HE Y, XIONG W, CHEN H, et al. Fish-eye image distortion correction based on adaptive partition fitting[J]. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 2021, 126(1): 379-396.
- [2] LI W, QU Y, WANG Y, et al. A simulation method of specific fish-eye imaging system based on image postprocessing[J]. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 2021, 14(1): 238-247.
- [3] BAI X, WEN W, HSU L T. Using sky-pointing fish-eye camera and LiDAR to aid GNSS single-point positioning in urban canyons [J]. *IET Intelligent Transport Systems*, 2020, 14(8): 908-914.
- [4] ZHANG Y, ZHANG H, ZHANG W. Feature matching based on curve descriptor and local D-Nets for fish-eye images [J]. *JOSA A*, 2020, 37(5): 787-796.
- [5] QIAN Y, YANG M, ZHAO X, et al. Oriented spatial transformer network for pedestrian detection using fish-eye camera [J]. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2019, 22(2): 421-431.
- [6] JOHNSON T P, SASIAN J, COOK L G. Optical design using image distortion for orthorectification[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(22): G175-G184.
- [7] VRANJES M, CVEJIC Ž, TODOROVIC N, et al. Radial distortion of the arthroscopic transtibial portal: A2-dimensional in vitro model [J]. *Open Access Library Journal*, 2020, 7(1): 1-9.
- [8] MORAVEC J. A polynomial-division based correction model for camera calibration; A large comparative study[J]. *Sadhana*, 2020, 45(1): 1-17.
- [9] CHOI K H, KIM Y, KIM C. Correlation analysis of fish-eye lens camera for acquiring reliable orientation parameters[J]. *Sensors and Materials*, 2019, 31(11): 3885-3897.
- [10] MUNDHENK T N, RIVETT M J, LIAO X, et al. Techniques for fisheye lens calibration using a minimal number of measurements[C]. *Intelligent Robots and Computer Vision XIX: Algorithms, Techniques, and Active Vision*. SPIE, 2000, 4197: 181-190.
- [11] 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.
- [12] 魏利胜, 周圣文, 张平改, 等. 基于双经度模型鱼眼图像畸变矫正方法[J]. *仪器仪表学报*, 2015, 36(2): 377-385.
- [13] 赵丹阳, 吕勇, 李晓英. 鱼眼图像畸变的双向经度快速校正方法[J]. *红外技术*, 2019, 41(10): 956-962.
- [14] 杨宇, 赵成星, 张晓玲. 鱼眼相机的视觉标定及畸变校正[J]. *激光杂志*, 2020, 41(9): 20-23.
- [15] 李江华, 李恩德. 针对鱼眼图像边缘校正缺失的快速校正算法[J]. *小型微型计算机系统*, 2021, 42(3): 578-583.
- [16] 包俊, 刘宏哲, 褚文博. 环视鱼眼图像处理深度学习研究进展[J]. *中国图象图形学报*, 2021, 26(12): 2778-2799.
- [17] 王正家, 钱峰, 柯楠, 等. 两步式鱼眼图像畸变校正方法研究[J]. *现代电子技术*, 2020, 43(18): 146-149.
- [18] 何林飞, 朱煜, 林家骏, 等. 基于球面空间匹配的双目鱼眼全景图像生成[J]. *计算机应用与软件*, 2020, 37(2): 166-170, 239.
- [19] 侯国柱, 吕丽军. 变焦鱼镜头系统的设计[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(7): 195-204.
- [20] 覃丹, 崔岩, 刘兴林. 基于经纬映射与透视投影的球形图像校正[J]. *计算机技术与发展*, 2020, 30(11): 94-99.

作者简介

涂治洲, 硕士研究生, 主要研究方向为图像识别与机器学习。

E-mail: tuzhizhou77@163.com