

单幅圆形鱼眼图像的校正

张 军, 王志舟*, 杨正钊

(天津大学 电气与自动化工程学院, 天津 300072)

(* 通信作者电子邮箱 wangzhizhou@tju.edu.cn)

摘 要: 针对有效圆域提取不准确以及传统柱面投影校正法在垂直方向上校正视场角不能达到 180° 的问题, 分别提出了变角度线扫描法和纵向压缩柱面投影校正法。前者通过不断改变扫描线的倾斜角来寻找切点坐标, 并对无效切点进行滤除, 然后使用 Kasa 圆拟合法求取有效圆域的参数。后者则对传统柱面投影的光路进行了人为的弯折, 从而把投影到无穷远点的光线压缩回柱面上, 保留了图像有效信息。通过与经纬映射校正法以及墨卡托投影法的实验处理结果对比, 纵向压缩柱面投影法能弱化校正图像边缘的拉伸模糊效应, 使处理结果更加自然。

关键词: 鱼眼图像; 校正; 变角度线扫描; 纵向压缩; 柱面投影

中图分类号: TP391

文献标志码: A

Correction of single circular fisheye image

ZHANG Jun, WANG Zhizhou*, YANG Zhengling

(School of Electrical Engineering and Automation, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Focused on the issues that circular domain extraction is not accurate and effective correction field angle can not reach 180 degrees in the vertical direction, Variable Angle Line Scan (VALS) method and Longitudinal Compression Cylindrical Projection (LCCP) method were proposed respectively. By changing the inclination angle of the scan line, the VALS method got coordinates of those cut points, then it filtered out invalid cut points coordinates and further got the parameters of the circular domain by using the Kasa circle fitting method. As for the LCCP method, it artificially bended the optical path of traditional cylindrical projection so that the light projected onto the infinity point could be projected back on the cylindrical surface, thus preserved the image information effectively. The comparison with two known methods named longitude-latitude mapping and Mercator mapping proves the effectiveness of the proposed algorithm in weakening the blurring effect due to stretching caused by the edge of image correction. The result looks more nature.

Key words: fisheye image; correction; variable angle line scan; longitudinal compression; cylindrical projection

0 引言

鱼眼镜头视场角接近甚至超过 180° , 所能观察的范围远大于人眼的视角范围。它在视频会议、全景图像拼接、虚拟漫游、机器人导航以及大范围公共场所的安防监控等领域扮演着重要角色。但是由于鱼眼镜头的大视场角是以牺牲图像直观性为代价的, 所以用鱼眼镜头拍摄的图片都存在很大程度的畸变, 最显著的就是“桶形畸变”。这样的畸变给鱼眼镜头的应用带来了一些麻烦。

通常使用球面透视成像模型来描述鱼眼镜头的成像过程。如图 1 所示, 鱼眼镜头的表面可以看成是一个球面, 外界景物的光线投射到球面上, 形成一幅外界景物球面映射图, 景物光线通过光心 O 之后, 伴随光的折射, 以不同于入射光线直射的方向投射于相机的感光部件 (CCD 图像传感器阵列), 从而形成一幅鱼眼图像。

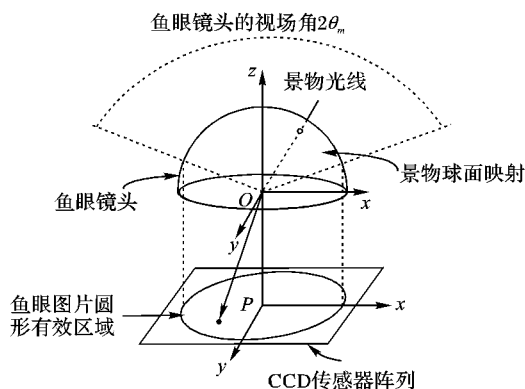


图 1 鱼眼镜头成像原理 (点 P 为图像主点)

1 相关工作

从单个视点看到的视觉信息可以被定义在以这个视点为中心的各单位视球面上, 鱼眼图像可以利用鱼眼成像模型, 反投影回单位视球面上, 所以对鱼眼图像的校正就是找到一种能

收稿日期: 2014-12-17; 修回日期: 2015-01-27。

基金项目: 天津市创新基金资助项目 (13ZXCXGX40500); 天津市小巨人创新基金资助项目 (2012-XJR21017)。

作者简介: 张军 (1964 -), 男, 天津人, 副教授, 硕士, 主要研究方向: 智能交通系统、计算机视觉与图像处理; 王志舟 (1991 -), 男, 山西朔州人, 硕士研究生, 主要研究方向: 数字图像处理; 杨正钊 (1964 -), 男, 河北灵寿人, 副教授, 博士, 主要研究方向: 复杂时间序列预测、人工智能、混沌理论。

够把视球面映射为正常平面图像的映射方法。制图员很早就意识到将球面映射为一个平面是非常困难的事,通常我们所看到的平面世界地图也不是完全没有畸变。他们发明了很多种方法,像正交投影、体视投影以及墨卡托投影^[1]等,但这些方法都不能满足将鱼眼畸变图像校正为正常图像的要求。

Zorin 等^[2]提出了一种轴对称的映射方法,这种方法在校正弯曲的直线和畸变的球面之间作了折中处理,但这种方法局限于一般线性透视投影的视场角范围内。Zelnik-Manor 等^[3]提出了另一种方法,他们先把鱼眼图像分割成不同部分,对它们分别进行校正,然后再把结果拼接回一张平面图。这种方法会在拼接边界产生严重的不连续,只适用于某些特定的图像。Kopf 等^[4]在 Zelnik-Manor 方法的基础上作了改进,他们只对那些畸变比较显著的局部区域进行校正,所以在拼接时需要重构图像。还有一些使用摄像机标定技术^[5-8]来进行校正的方法,但对于超广角的鱼镜头来说,这些方法的校正效果不很理想。

杨玲和成运应用了经纬度映射^[9]的方法来校正鱼眼图像,方法简洁易理解。这种方法先把鱼眼图像还原到视球面上,之后利用地球经纬度的概念标记视球面上的每一个点的坐标,最后把视球面上的经纬度网格点对应的像素映射到平面网格点对应的位置,由于存在球面经纬网到平面经纬网的拉伸映射,所以校正的结果会在视场角接近 180° 的图片边界区域出现一定程度的模糊现象。

此外,还有一些基于特定鱼眼图像内容的与优化计算相关的校正方法^[10-12]。

本文旨在寻求一种简单易行且易于操作的畸变校正方法,不依赖于实体相机,具有一定的普适性。

2 图像有效区域轮廓的提取

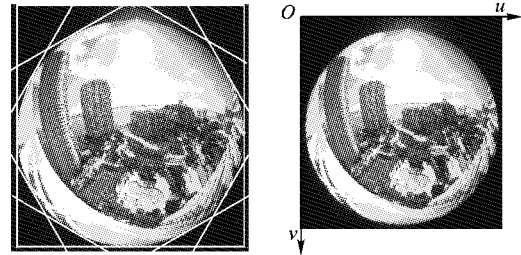
想要校正一幅鱼眼图像,首先要做的工作便是对圆形有效成像区域的提取(这里主要是针对圆心坐标和半径的参数求取),有效区域提取的准确与否直接关系到图像校正结果的好坏,本文在线扫描法^[13]的基础上作了改进,提出了变角度线扫描法。

传统线扫描法是将原始图像灰度化,然后在灰度图上,分别使用水平和垂直两对直线,从上、下、左、右 4 个方向夹逼圆形有效区域,获得 4 个切点的坐标,之后利用这两对坐标,计算出圆心坐标和半径大小。在扫描线移动的过程中,只要同一扫描线上的像素最大亮度值与最小亮度值之差大于设定的阈值,便认为该扫描线已经与圆形有效区域相切,最大亮度值的像素点即为切点。

考虑到传统的线扫描法仅仅从上、下、左、右 4 个方向逼近圆形区域,如果圆形区域刚好在这 4 个顶点附近存在较多噪声点,必然会导致该方法产生误差。本文使用成对的不同倾斜角的直线,从各个方向对圆形区域夹逼,按照与传统线扫描法相同的判断方法求取切点坐标,并对这些切点坐标进行筛选,剔除一些无效切点对,利用剩余的切点坐标进行圆拟合,进而计算出圆心坐标和半径。以下具体说明计算过程:

首先,令直线对的倾斜角从 0 开始,以 $\pi/2n$ 递增(为便于说明原理,这里 $n=3$,可以增大 n 的值来提高准确性),分别从圆形区域两侧逼近(如图 2(a)所示),从而找到各对切点的坐标值(这里的坐标是在图像坐标系下取得,以像素为单

位,图像坐标系以图片左上角为原点,向右为 u 轴正方向,向下为 v 轴正方向,如图 2(b)所示)。



(a) 扫描线逼近圆域

(b) 图像坐标系

图2 变角度线扫描法原理

之后,对图 2(a)中的切点坐标数据进行分析,如表 1 所示,从中发现一个规律:使用无效切点对计算出的半径明显大于有效切点对,例如表 1 所示的第一对和最后一对切点。所以,剔除无效切点的办法是:将所有切点对计算出的半径取平均值,然后把那些半径大于均值的切点对坐标剔除。

表1 剔除无效切点对的数据分析表

扫描线 倾斜角/(°)	切点 对序号	切点对坐标	对应 半径	与半径平均值 (419.30) 比较
0	1	(446, 6), (430, 881)	437.57	>
30	2	(229, 109), (625, 834)	413.04	<
60	3	(72, 270), (780, 692)	412.11	<
90	4	(21, 469), (846, 467)	412.50	<
120	5	(69, 665), (788, 258)	413.10	<
150	6	(531, 25), (224, 823)	427.50	>

表 1 中序号为 2~5 的切点对坐标为剔除后的有效切点坐标数据,使用这些数据进行圆拟合。

关于圆拟合有 3 种有效的方法,分别是: Taubin method^[14]、Pratt method^[15]和 Kasa method^[16]。前两种方法属于强健和精确的圆拟合,即使数据点只是在很小的圆弧范围内,也能得到令人满意的结果。本文采用 Kasa 圆拟合法,因为它的速度很快,计算式简单,但稳定性不如前两种方法。Kasa 圆拟合法的计算过程如下:

假设 $\{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)\}$ 是用于圆拟合的数据,对其进行列填充扩展,构造下面的两个矩阵:

$$\begin{cases} A = \begin{pmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & 1 \end{pmatrix} \\ B = \begin{pmatrix} x_1^2 + y_1^2 \\ x_2^2 + y_2^2 \\ \vdots \\ x_n^2 + y_n^2 \end{pmatrix} \end{cases} \quad (1)$$

令 $P = (p_1, p_2, p_3)^T$, 按式(2)计算(其中 A^{-1} 是 A 的伪逆矩阵):

$$P = A^{-1}B \quad (2)$$

则拟合圆的圆心坐标 (u_0, v_0) 和半径 R 为:

$$\begin{cases} u_0 = p_1/2 \\ v_0 = p_2/2 \\ R = \sqrt{(p_1^2 + p_2^2)/4 + p_3} \end{cases} \quad (3)$$

至此,圆形有效区域的参数提取工作完成。

3 鱼眼图像的校正

鱼眼图像的校正过程可以用图3表示。

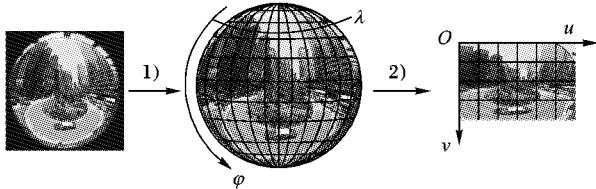


图3 图像校正流程

1) 利用鱼眼镜头的成像模型将畸变的图像还原到单位视球面上；

2) 将单位视球面通过特定的映射关系,变换成为我们通常所见的二维图像。

通常,鱼眼镜头在设计时是按照以下的几种成像模型^[7]进行的:

体视投影:

$$r = 2f \tan(\theta/2) \quad (4)$$

等距投影:

$$r = f\theta \quad (5)$$

等立体角投影:

$$r = 2f \sin(\theta/2) \quad (6)$$

正交投影:

$$r = f \sin(\theta) \quad (7)$$

其中: θ 是镜头光轴与入射光线的夹角, r 是成像点到图像主点的距离, f 是镜头光心到图像主点的距离(如图4(b)所示,其中 $\rho = r$), 这里假定图像的主点 P 与畸变图像圆形有效区域的中心 O 重合, 忽略相机生产时可能存在的微小误差。考虑到市场上应用等距投影模型设计的鱼眼镜头占大多数, 所以本文采用它作为成像模型, 将鱼眼畸变图像还原到单位视球面上。

3.1 畸变图像到视球面的转化

下面我们建立单位视球面上以经纬度 (λ, φ) 为坐标的点与鱼眼畸变图像上以图像坐标 (u, v) 为坐标的点之间的对应关系。

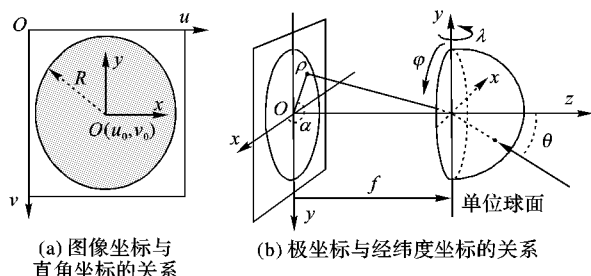


图4 平面鱼眼图像向视球面的转换

由图4(a)可知, 图像坐标系下, 圆形区域内一点 (u, v) , 满足 $(u - u_0)^2 + (v - v_0)^2 \leq R^2$, 转换为平面直角坐标 (x, y) 有:

$$\begin{cases} x = u - u_0 \\ y = -(v - v_0) \end{cases} \quad (8)$$

再转换为图4(b)中所示的极坐标 $\rho(\alpha)$ 有:

$$\begin{cases} \rho = \sqrt{x^2 + y^2} \\ \alpha = \begin{cases} \arctan(y/x), & x > 0 \\ \pi + \arctan(y/x), & x < 0 \\ \pi/2, & x = 0, y > 0 \\ 3\pi/2, & x = 0, y < 0 \end{cases} \end{cases} \quad (9)$$

考虑到鱼眼镜头的等距映射模型及图片圆域半径 R , 有 $\rho = r = f\theta$, 于是可以确定出参数 $f = R/\theta_m$, 其中 θ_m 是鱼眼镜头的半视场角, 从而:

$$\theta = \rho/f = \rho\theta_m/R \quad (10)$$

这样就得到了单位半球面上任一点的球面坐标参数 α 和 θ , 于是, 球面坐标为:

$$\begin{cases} x = \sin\theta \cdot \cos\alpha \\ y = \sin\theta \cdot \sin\alpha \\ z = \cos\theta \end{cases} \quad (11)$$

再转换为经纬度坐标 (λ, φ) , 如图4(b)右半部分的半球面所示, $\varphi \in [0, \pi]$, $\lambda \in [0, 2\pi]$, 实际上, 由这个经纬度参数可以确定另一个球面坐标, 它与式(11)得到的球面坐标存在如下关系:

$$\begin{cases} \sin\varphi \cdot \cos\lambda = -x \\ \sin\varphi \cdot \sin\lambda = y \\ \cos\varphi = z \end{cases} \quad (12)$$

至此, 视球面经纬度坐标与鱼眼图像坐标建立了对应关系: $(\lambda, \varphi) = F(u, v)$ 。

3.2 视球面向平面的转化

根据微分几何的知识, 球面不是可展曲面, 不能展开成平面或平面的子集。所以, 通常我们采用投影的方式来成像。实际上, 一般的相机镜头使用透视投影模型 $r = f \tan \theta$ ^[17], 只是当镜头的视场角 $2\theta_m$ 较小时, 可以忽略它所产生的畸变。标准镜头视场角在 30° 左右, 广角镜头的视场角都大于 90° , 而鱼眼镜头的视场角更是接近或超过 180° 。针对鱼眼镜头的大视场角, 本文使用柱面投影模型并对其进行了改进, 以适应鱼眼图像校正的需要。

本文可以把鱼眼镜头看作半个视球面, 然后将视球面映射到柱面上去, 把柱面摊平后就是平面校正图像, 如图5(a)所示。

半视球面上每一条经线都对应着柱面纵向的一条色带, 经线上每点按照其所在纬度以一定关系进行映射, 如果我们按照透视映射进行, 会发现当纬度 $\varphi \rightarrow 0$ 或 $\varphi \rightarrow \pi$ 时, 需要的柱面高度将会是无穷大(如图5(b)所示, 带箭头虚线是透视映射的轨迹), 为了解决这个问题, 本文采用将透视映射线人为的弯折一定角度之后再投射到柱面上去(图5(b)带箭头实线所示), 即视球面上一点到同经度 z 轴方向最高点的连线与投影线的夹角固定为 ω (实验时取 $\omega = \pi/2$), 这样就可以把本来投影到无穷远点的部分压缩到柱面映射生成的图像上。

在图5(b)中, 对 $\triangle ABC$ 应用正弦定理有:

$$\frac{BC}{\sin\omega} = \frac{AC}{\sin\angle ABC} \Leftrightarrow \frac{l}{\sin\omega} = \frac{AC}{\sin(\pi - \omega - \angle ACB)} \quad (13)$$

其中 $\angle ABC = \pi - \omega - \angle ACB$, $BC = l$ 。

对于直角三角形 $\triangle DAO$ 、 $\triangle DAC$, 由勾股定理知:

$AC^2 = AD^2 + DC^2 = AD^2 + (OC - OD)^2$, 又因为 $OA = OC = 1$ (单位半球), $AD = OA \cdot \cos\angle OAD$, $\angle OAD =$

$\angle AOy = \varphi, OD = OA \cdot \sin \angle OAD$, 所以得:

$$AC = \sqrt{\cos^2 \varphi + (1 - \sin \varphi)^2} \quad (14)$$

又因为 $\tan \angle ACB = \tan \angle DAC = \frac{DC}{AD} = \frac{1 - \sin \varphi}{\cos \varphi}$, 同时考虑到当 $\varphi \in [\pi/2, \pi]$ 时, $\cos \varphi \leq 0$, 为保证 $\angle ACB$ 是锐角, 我们对 $\cos \varphi$ 取绝对值, 从而有:

$$\angle ACB = \arctan \left(\frac{1 - \sin \varphi}{|\cos \varphi|} \right) \quad (15)$$

将式(14)和式(15)代入式(13)并整理得下式:

$$l(\omega, \varphi) = \frac{\sin \omega \cdot \sqrt{\cos^2 \varphi + (1 - \sin \varphi)^2}}{\sin \left(\pi - \omega - \arctan \left(\frac{1 - \sin \varphi}{|\cos \varphi|} \right) \right)} \quad (16)$$

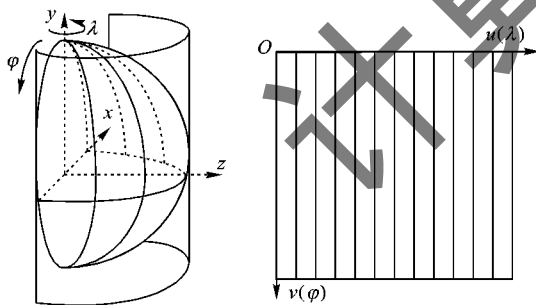
其中 $\omega \in (0, 3\pi/4), \varphi \in [0, \pi]$ 。

从而, 半视球面上的一点 (λ, φ) 与柱面展开结果图上的对应点 (u, v) 的坐标关系如下, ω 为指定常量:

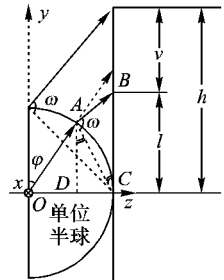
$$\begin{cases} u(\lambda) = \lambda \\ v(\varphi) = \begin{cases} h - l(\omega, \varphi), & \varphi \in [0, \pi/2) \\ h + l(\omega, \varphi), & \varphi \in [\pi/2, \pi] \end{cases} \end{cases} \quad (17)$$

其中 $h = l(\omega, 0) = \frac{\sqrt{2} \sin \omega}{\sin(3\pi/4 - \omega)}, \omega \in (0, 3\pi/4)$ 。

实际上, 计算机内部是处理离散数字信息的, 数字图像的处理也是一样, 所以校正后的柱面图像上的点和原来的畸变图像上的点不是满射关系。如果采用正向映射校正, 柱面上将因为部分像素与原图没有对应关系而空缺(如图6(b)、图7(b)所示), 所以在这里采用反向映射的校正方式, 即遍历柱面图上的每一个像素的位置, 根据之前推导的映射关系 $(\lambda, \varphi) = F(u, v)$, 逆向从原始图片中取出对应的像素, 至于对应不上的那一部分像素, 则采用双线性插值计算的方法来填补空缺。



(a) 视球面到平面的转化



(b) 投影原理示意图

图5 纵向压缩的柱面投影原理

4 实验结果与讨论

本文首先对两幅不同的图片分别用本文的校正方法、经纬映射校正法以及墨卡托投影法进行处理, 并比较处理结果,

如图6和图7所示。从第一个校正示例的处理结果来看, 使用经纬映射的校正方法没有完全把弯曲的楼栋校正过来, 而本文的校正方法却很好地弥补了这一点, 但本文的方法在水平方向上的校正有待进一步改进, 因为图中的车辆被明显拉长了。从第二个校正示例的处理结果来看, 使用经纬映射的校正方法在图片的边缘(尤其是左上角和左下角)产生了很明显的拉伸和扭曲且造成一定程度的模糊, 使处理结果显得很不自然, 而本文的校正方法弥补了这一点。从两个校正示例来看, 墨卡托投影校正方法在垂直方向上视场角接近 180° 的部分给出的校正效果不理想, 存在显著的拉伸畸变, 因为它会把视球面的极点投影到无穷远。

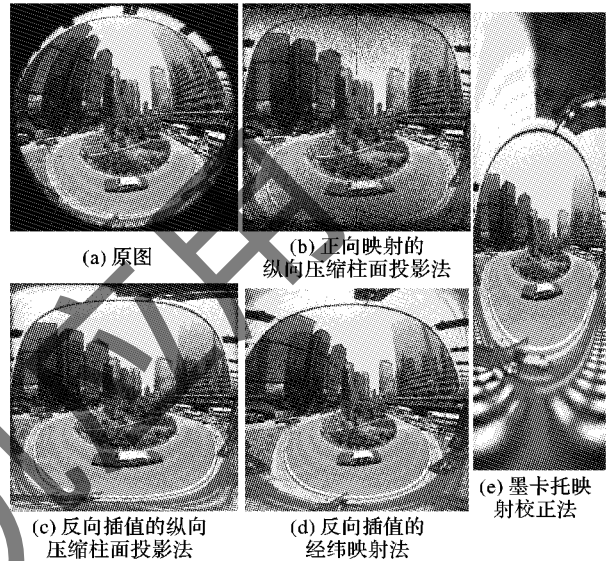


图6 鱼眼图像的校正结果比较1

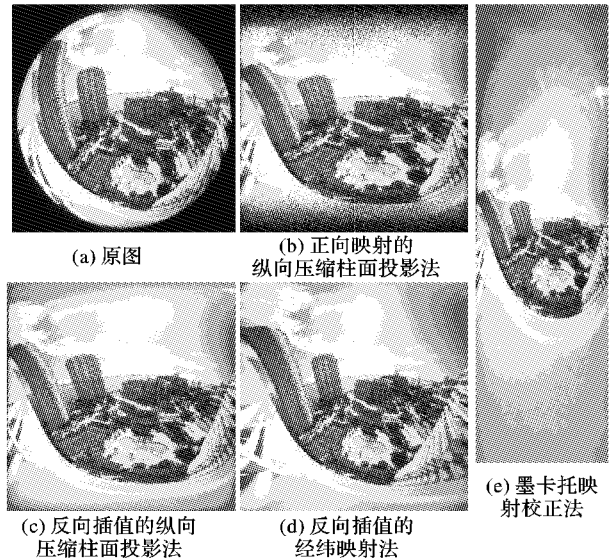


图7 鱼眼图像的校正结果比较2

5 结语

本文提出的变角度线扫描法, 对鱼眼图像圆形有效区域的提取有较高的抗干扰能力, 需要调节的参数个数较少。在校正鱼眼图像时提出的纵向压缩柱面投影算法, 克服了传统柱面投影不能在垂直方向上投影视场角为平角的鱼眼图像的限制, 算法在垂直方向上的校正效果较好, 对于水平方向上的弯曲校正需要进一步改善。

从应用的角度来看,鱼眼图像校正技术的发展可以促进公共场所大视场监控的自动化进程,以及降低全景监控的设备成本和布署难度,在未来的工作中,我们打算进一步改进校正方法,使鱼眼图像的校正过程自动化,并应用到智能交通监控中。

参考文献:

- [1] SNYDER J P. Flattening the earth: two thousand years of map projections[M]. Chicago: University of Chicago Press, 1997: 263 - 266.
 - [2] ZORIN D, BARR A H. Correction of geometric perceptual distortions in pictures[C]// Proceedings of the 22nd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York: ACM, 1995: 257 - 264.
 - [3] ZELNIK-MANOR L, PETERS G, PERONA P. Squaring the circle in panoramas[C]// Proceedings of the 10th IEEE International Conference on Computer Vision. Piscataway: IEEE, 2005: 1292 - 1299.
 - [4] KOPF J, LISCHINSKI D, DEUSSEN O, *et al.* Locally adapted projections to reduce panorama distortions[J]. Computer Graphics Forum, 2009, 28(4): 1083 - 1089.
 - [5] SWAMINATHAN R, NAYAR S K. Nonmetric calibration of wide-angle lenses and polycameras[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(10): 1172 - 1178.
 - [6] DEVERNAVY F, FAUGERAS O. Straight lines have to be straight[J]. Machine Vision and Applications, 2001, 13(1): 14 - 24.
 - [7] KANNALA J, BRANDT S S. A generic camera model and calibration method for conventional, wide-angle, and fish-eye lenses[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2006, 28(8): 1335 - 1340.
 - [8] HARTLEY R, KANG S B. Parameter-free radial distortion correction with center of distortion estimation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2007, 29(8): 1309 - 1321.
 - [9] 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. (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.)
 - [10] YING X, HU Z. Fisheye lense distortion correction using spherical perspective projection constraint[J]. Chinese Journal of Computers, 2003, 26(12): 1702 - 1708. (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.)
 - [11] WEI J, LI C, HU S, *et al.* Fisheye video correction[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2012, 18(10): 1771 - 1783.
 - [12] CARROLL R, AGRAWALA M, AGARWALA A. Optimizing content-preserving projections for wide-angle images[J]. ACM Transactions on Graphics, 2009, 28(3): 43.
 - [13] WANG D, CUI H, CHEN J. Improvement of fisheye image edge extraction algorithm[J]. Computer Engineering and Design, 2007, 28(12): 2878 - 2880. (王大宇, 崔汉国, 陈军. 鱼眼图像轮廓提取及校正研究[J]. 计算机工程与设计, 2007, 28(12): 2878 - 2880.)
 - [14] TAUBIN G. Estimation of planar curves, surfaces, and nonplanar space curves defined by implicit equations with applications to edge and range image segmentation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1991, 13(11): 1115 - 1138.
 - [15] PRATT V. Direct least-squares fitting of algebraic surfaces[J]. Computer Graphics, 1987, 21(4): 145 - 152.
 - [16] KASA I. A circle fitting procedure and its error analysis[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1976, 1001(1): 8 - 14.
 - [17] FLECK M M. Perspective projection: the wrong imaging model[R]. Iowa: University of Iowa, 1995: 1 - 27.
-
- (上接第1438页)
- [3] XU X. Research on image enhancement methods and applications[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2010. (许欣. 图像增强若干理论方法与应用研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2010.)
 - [4] AI-AMTI S S, KALAYANKAR N V, KHAMITKAR S D. Linear and non-linear contrast enhancement image[J]. International Journal of Computer Science and Network Security, 2010, 10(2): 139 - 143.
 - [5] MELAN L, SUSSTRUNK S. High dynamic range image rendering with a retinex-based adaptive filter[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(9): 2820 - 2830.
 - [6] RIZZI A, GATTA C, MARINI D. A new algorithm for unsupervised global and local color correction[J]. Pattern Recognition Letters, 2003, 24(11): 1663 - 1677.
 - [7] TAN R. Visibility in bad weather from a single image[C]// Proceedings of the 2008 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2008: 1 - 8.
 - [8] FATTAL R. Single image dehazing[J]. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(3): 1 - 9.
 - [9] HE K, SUN J, TANG X. Single image haze removal using dark channel prior[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2011, 33(12): 1 - 13.
 - [10] NARASIMHAN S G, NAYAR S K. Interactive weathering of an image using physical model[C]// Proceedings of the 2003 ICCV Workshop on Color and Photometric Methods in Computer Vision. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2003: 1387 - 1394.
 - [11] BARASH D. Bilateral filtering and anisotropic diffusion: towards a unified viewpoint[EB/OL]. [2014-06-20]. <http://www.hpl.hp.com/techreports/2000/HPL-2000-18R1.pdf>.
 - [12] LIN H, SHI C. A bilateral adaptive filter used in ultrasonic image denosing[J]. Journal of Jiangnan University: Nature Science Edition, 2010, 9(2): 169 - 172. (林红章, 石澄贤. 一种自适应双边滤波的超声图像去噪[J]. 江南大学学报: 自然科学版, 2010, 9(2): 169 - 172.)
 - [13] LIU C, JIN W, CHEN Y, *et al.* A self-adaptive nonuniformity correction algorithm for infrared images combined with two-point correction along the rim[C]// Proceedings of the 2010 International Computer Symposium. Piscataway: IEEE, 2010: 240 - 250.
 - [14] FANG S, WANG Y, CAO Y, *et al.* Restoration of image degraded by haze[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 10(10): 2279 - 2284. (方帅, 王勇, 曹洋, 等. 单幅雾天图像复原[J]. 电子学报, 2010, 10(10): 2279 - 2284.)