

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2013.10.024

# 基于几何成像模型的鱼镜头图像校正算法和技术研究

李 根<sup>1</sup>, 费章君<sup>2</sup>, 杨仕友<sup>1\*</sup>

(1. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310007; 2. 南自信息技术有限公司, 江苏 南京 210012)

**摘要:** 鱼镜头是一种具有广视场角的摄像机镜头, 广泛应用于大场景视频监控领域, 但其成像存在严重的非线性径向畸变, 违反人类的视觉习惯, 且为测量和模式识别等应用带来了不便。为了实现鱼镜头图像的校正, 提出了一种基于几何成像模型的鱼镜头校正算法和技术, 通过研究鱼镜头成像模型, 根据鱼镜头类型采用了相应的几何模型校正图像; 以“等距投影”模型为例提出了校正公式和实现方法。最后针对工程应用的实时性要求, 提出了基于缓存的快速优化方法以及在保证一定精度的前提下快速实现双线性插值的优化方法。研究结果表明, 这种新方法可以高效地完成鱼镜头图像校正, 比传统方法适用面更广, 更易实现。

**关键词:** 鱼镜头; 径向畸变校正; 图像处理; 视频监控

中图分类号: TP391. 4

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2013)10-1268-05

## Fish-eye image correction method and technique based on geometrical imaging model

LI Gen<sup>1</sup>, FEI Zhang-jun<sup>2</sup>, YANG Shi-you<sup>1</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310007, China;

2. Nanzi Information technology Co., Ltd., Nanjing 210012, China )

**Abstract:** Fish-eye lenses with wide field of view (FOV) are widely used in the field of large scene video surveillance, but nonlinear radial distortion of fish-eye image violated the human visual habits and brought inconvenience to measurement and pattern recognition applications. In order to correct the fish-eye images, a new correction method and technique based on geometrical imaging model that corrects the images from different types of fish-eye lens by corresponding geometrical imaging model was proposed. Also, the implementation method of equidistant imaging model was developed. Finally, the optimization methods based on the cache and a fast bilinear interpolation implementation ensuring the accuracy aiming at the real-time application were presented. The results indicate that the new method works efficiently in a larger scale, and easier to implement.

**Key words:** fish-eye lens; radial distortion correction; image process; video surveillance

## 0 引 言

由于鱼镜头具有视场角广(可达180°)的优点, 特别适合于大场景视频监控应用, 近年来在视频监控领域的应用日渐广泛。由于鱼镜头拍摄图像带有大量的桶形径向畸变<sup>[1]</sup>, 故鱼眼图像不符合人类视觉习惯。为解决这个问题, 国内外学者提出了多

种方法以校正鱼镜头图像。应用最早的方法为基于多项式模型的校正算法<sup>[2-3]</sup>, Basu等<sup>[4]</sup>提出了基于对数运算的FET变换方法(Fish-Eye Transform), 以及基于抛物面成像模型的漫游及深度恢复算法<sup>[5-6]</sup>, Kedzierski等人<sup>[7]</sup>提出了一种基于微分几何的精确校正算法, Wang等人<sup>[8]</sup>提出了基于参数方程的鱼镜头畸变数学模型, 并将主光轴偏转也包含在内。

收稿日期: 2013-01-15

作者简介: 李 根(1984-), 男, 山东济南人, 主要从事视频监控技术方面的研究. E-mail: legendlegend518@gmail.com

通信联系人: 杨仕友, 男, 教授, 博士生导师. E-mail: shiyouyang@yahoo.com

需要说明的是,这些现有算法不是从鱼镜头的构造出发,或者没有区分不同类型的鱼镜头,因此无法针对不同的镜头类型的图像给出校正参数的解析解。

有鉴于此,本研究基于“非相似”成像理论,类比小孔成像模型构造不同鱼镜头的几何模型,提出一种鱼镜头图像校正算法;同时,为保证算法的实时性,还对算法的快速实现问题进行研究。

### 1 非相似成像理论

鱼镜头是人们模仿鱼眼工作原理而设计的镜头。其特点是视场角广,可以达到180°范围,但所获得的图像具有径向桶形畸变的特征。鱼镜头摄像机在水平视场角180°、垂直视场角160°拍摄的图像如图1所示。



图1 鱼镜头拍摄的图像

根据相似成像原理,普通光学镜头远距成像像高公式为:

$$y'_0 = f \tan \omega \tag{1}$$

式中:  $y'_0$ —理想像高度,  $f$ —镜头物方焦距,  $\omega$ —物方半视场角。

鱼镜头远距成像模型为非相似成像模型,针对不同镜头,有以下成像公式<sup>[9-10]</sup>:

$$y'_0 = 2f \tan\left(\frac{\omega}{2}\right) \tag{2}$$

$$y'_0 = f\omega \tag{3}$$

$$y'_0 = 2f \sin\left(\frac{\omega}{2}\right) \tag{4}$$

$$y'_0 = f \sin \omega \tag{5}$$

式(2~5)都可提供相应的径向桶形畸变,但是特点各不相同。其中式(3)称为“等距投影”成像,是应用最为广泛的鱼镜头成像模式。

### 2 等距投影成像几何模型

笔者以式(3)和式(5)为例,研究鱼镜头的几何模型。上述式(1)的几何模型为“小孔成像”模型,如

图2所示。

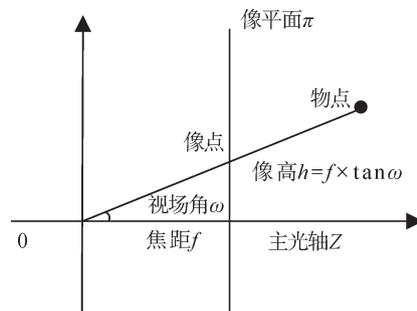


图2 小孔成像模型

根据图2,如果把像平面  $\pi$  替换为原点为  $O$ 、半径为  $f$  的半球面  $\pi_2$ ,则像高  $y'_0$  满足式(5)。由此推广,通过替换不同的曲面作为像面,可以做出不同鱼镜头的几何模型,几何模型如图3所示。

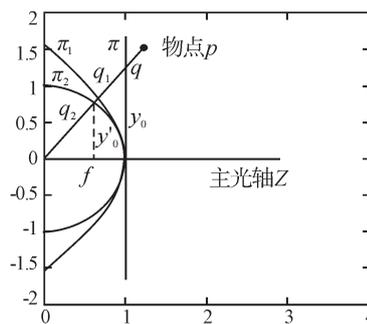


图3 鱼镜头成像几何模型

图3中,曲面  $\pi_2$  为球面,曲面  $\pi_1$  即满足式(3)的“等距成像”的像曲面。由式(3)以及鱼镜头的对称性,可知  $\pi_1$  的解析式为:

$$z = \left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{f}\right) \cot\left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{f}\right) \tag{6}$$

### 3 鱼镜头图像的校正算法

平面校正,就是去掉鱼镜头图像的畸变,使输出图像符合人类视觉习惯的操作。具体来说,没有畸变的图像是由小孔成像原理得出的,也就是在平面  $\pi$  上的成像。因此,如果能根据曲面  $\pi_1$  上的像计算出  $\pi$  上的像,即可得到校正图像。图3中的物点  $p$  在平面  $\pi$  和曲面  $\pi_1$  上分别形成像点  $q$  和  $q_1$ ,像高分别为  $y'_{00}$  和  $y'_{01}$ 。由式(1)和式(3)可得:

$$y'_{01} = f \arctan(y'_{00}/f)$$

通过左右移动平面  $\pi$ ,也就是改变小孔成像的焦距,就可以改变校正后图像的视场角,实现“拉近推远”(zoom)的效果。设校正后图像的成像焦距为  $f'$ ,原图像焦距为  $f$ ,则有:

$$y'_{01} = f \arctan(y'_{00}/f') \quad (7)$$

式(7)即为由几何模型得到的等距影鱼镜头图像平面校正公式。

同理可得对于式(2,4,5)的鱼镜头模型,其平面校正公式分别为:

$$y'_{01} = 2f \tan\left(\frac{\arctan(y'_{00}/f')}{2}\right) \quad (8)$$

$$y'_{01} = 2f \tan\left(\frac{\arcsin(y'_{00}/f')}{2}\right) \quad (9)$$

$$y'_{01} = f \arctan(\arcsin(y'_{00}/f')) \quad (10)$$

### 4 实时实现技术

计算机内部以像素为单位存储图像,所以必须将式(7)转化为以像素为单位的图像。为此,首先需要确定原图像的光学中心,即主光轴通过的位置。由图3知,水平和竖直视场角都为180°的鱼镜头拍摄的图像为圆形,其圆心就是光学中心,图像的其他部分为空白(实际为黑色)。如果图像的光学中心固定,可以事先获取一幅图像,鱼镜头图像如图4所示,本研究先使用形态学方法找到图像的圆形边缘,再使用Hough变换计算圆心坐标,应用于后续图像。光学中心示意图如图5所示。



图4 鱼镜头图像

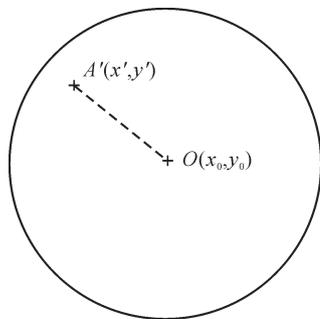


图5 光学中心示意图

为实现实时确定上述圆心(光学中心),本研究提出了一种快速计算方法。

通过观察图4可知,圆上最靠近图像左边缘的点和最靠近右边缘的点连接起来就是一条直径,而直径的中点就是圆心。所以本研究可以通过扫描图像找到这两个距边缘最近的灰度不为零的像素  $p$  和  $q$ ,从而快速求取圆心坐标。实际图像中由于采样间隔,可能找不到相应的像素,同时由于边缘找取的结果可能不光滑,从而影响算法的精确度。此时研究者可将与左、右边缘距离最小的各3个像素纵坐标分别取平均值,横坐标不变,构造出  $p$  和  $q$  的坐标。具体实现时,图像数据存储为二维数组,像素坐标即数组下标。如果从第一行开始扫描,将当前距左、右边缘距离最小的3个像素坐标分别缓存在数组中,如果遇到距离更小的点就替换缓存中的数据。最终找到距左边缘距离最小的3个点  $p_1$ 、 $p_2$ 、 $p_3$ ,距右边缘距离最小的3个点  $q_1$ 、 $q_2$ 、 $q_3$ ,则可得圆心坐标  $(x, y)$  和半径  $r$  分别为:

$$x = \frac{x_{p1} + x_{p2} + x_{p3} + x_{q1} + x_{q2} + x_{q3}}{6}$$

$$y = \frac{y_{p1} + y_{p2} + y_{p3} + y_{q1} + y_{q2} + y_{q3}}{6}$$

$$r = \frac{(x_{q1} + x_{q2} + x_{q3}) - (x_{p1} + x_{p2} + x_{p3})}{6}$$

另外,根据式(3)可知,摄像机焦距为:

$$f = \frac{2r}{\pi}$$

式中:  $r$ —圆的半径;  $f$ —焦距,单位为像素。

设校正后的图像高为  $h$ , 宽为  $w$ , 其上有一点  $A(x, y)$ , 对应原图像像点  $A'(x', y')$ 。假设校正后图像的光学中心位于几何中心,重合于  $O(w/2, h/2)$ , 则  $A'$  点像高和坐标为:

$$h'_A = \frac{2r}{\pi} \arctan\left(\frac{\sqrt{\left(x - \frac{w}{2}\right)^2 + \left(y - \frac{h}{2}\right)^2}}{\frac{2r}{\pi}}\right)$$

$$x' = \left(\frac{h'_A(x - \frac{w}{2})}{\sqrt{\left(x - \frac{w}{2}\right)^2 + \left(y - \frac{h}{2}\right)^2}}\right) + \frac{w}{2} \quad (11)$$

$$y' = \left(\frac{h'_A(x - \frac{h}{2})}{\sqrt{\left(x - \frac{w}{2}\right)^2 + \left(y - \frac{h}{2}\right)^2}}\right) + \frac{h}{2} \quad (12)$$

由式(11,12)可得校正后图像的任意像点对应原图像的像点位置,一般不为整数,笔者使用插值方法计算出像素颜色值。遍历所有像素点得到的校正后的图像如图6所示。

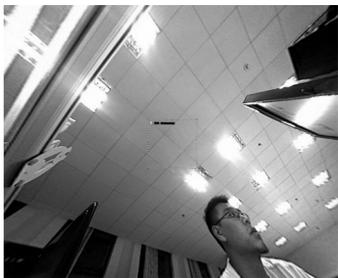


图6 校正后图像

在实际应用中,式(11,12)涉及到多次根号和三角函数运算,研究者可以采用映射表的方法提高算法效率。另外,具体实现中研究者可以根据需要,在满足精度要求的前提下,选择快速的插值算法以提高效率。

### 5 实时性优化

由于式(11,12)包含多次平方根和三角函数运算,如果逐点运算,复杂度太高,实际应用中可能达不到实时性要求。为了提高效率,研究者可以在参数确定的前提下提前算出所有结果,将其缓存为文件,程序启动时将数据读入内存。

由于式(11,12)的计算结果不为整数。为了减少计算量,可以直接缓存插值所需的参数。以双线性差值为例,某一点 $p(x,y)$ 的灰度值 $f(x,y)$ 计算公式为:

$$f(x,y) = \sum_{i=1,j=1}^{2,2} k_{ij} f(Q_{ij}) \quad (13)$$

式中: $Q_{ij}$ — $p$ 左上、右上、左下、右下的4个相邻点, $k_{ij}$ —双线性插值参数。

如果摄像机的参数不变,那么 $Q_{ij}$ 和 $k_{ij}$ 都不变,可以将它们缓存起来使用。数据结构可如下设计:

```

struct point_t{
    int x;
    int y;
};

struct element_t{
    struct point_t q11;
    struct point_t q21;
    struct point_t q12;
    struct point_t q22;
    double k11;
    double k21;
    double k12;
    double k22;
};

struct map_t {
    int width;
    int height;

```

```

    struct element_t elements[0];
};

```

这样的数据结构可以方便地存入磁盘或从磁盘中读取。

采用缓存之后,由于系数 $k_{ij}$ 不为整数,依然无法避免浮点数计算。在满足精度要求的前提下,可以使用整形变量近似浮点数变量。当浮点数赋值给整形变量时,小数部分将被忽略,无法保证精度,所以需要额外的处理。

观察式(13),如果将 $k_{ij}$ 乘以一个相同的系数,等式左边只要乘以同一个系数等式依然成立。所以可以使用“将 $k_{ij}$ 乘以一个系数 $m$ ”的方法,将 $k_{ij}$ 的小数部分中的一部分,移至整数部分。这样将 $k_{ij}$ 赋值给整形变量时,忽略的小数部分就可以按照研究者的要求增大或减小,改变 $m$ 的值就可以改变精度。计算出结果后,只要将 $f(x,y)$ 除以 $m$ ,即可得到实际的结果。因为计算机中的移位操作比除法效率高,笔者建议 $m$ 的取值为2的幂级数的形式,这样便可以用移位操作代替除法操作。

为说明本研究优化算法的计算效率,现以典型图像处理为例,计算考察了不同算法的实时处理能力。两种不同方法的性能比较结果如表1所示。显然,本研究算法的计算效率明显高于原算法的计算效率。

表1 不同算法性能对比

类型	算法性能 (640×480像素)/fps	算法性能 (2 048×1 536像素)/fps
优化前	9.524	9.107
优化后	66.667	6.623

### 6 结束语

本研究基于几何成像模型研究了鱼镜头图像的校正算法和技术。这种方法基于镜头成像原理,可对不同镜头的图像进行精确校正,并可通过参数调节实现校正后图像的视场角变化。本研究以“等距投影”模型为例,给出了其实现方法。最后,为解决算法工程应用的实时性,本研究提出了基于缓存的优化的快速计算方法和快速双线性插值实现方法。经过实验验证,根据上述方法开发的图像校正系统可以实现鱼眼图像实时精确校正。

因为鱼镜头图像畸变为非线性畸变,离光学中心越远的点畸变越大,校正后的图像较边缘的区域存在模糊和锯齿现象。如何减少锯齿和模糊现象,将是下一步研究工作的重点。

#### 参考文献(References):

[1] KANNALA J, BRANDT S S. A generic camera model and calibration method for conventional, wide-angle, and fish-eye Lenses [J]. **IEEE Transactions Pattern Analysis**

and Machine Intelligence, 2006, 28(8): 1335-1340.

[2] NOMURA Y, SAGARA M, NARUSE H, et al. Simple calibration algorithm for high-distortion lens camera[J]. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, 1992, 14(11): 1095-1099.

[3] 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]. 中国图象图形学报, 2000, 5A(7): 593-596.

[4] BASU A. Alternative models for fish-eye lenses [J]. **Pattern Recognition Letters**, 1995, 16(4): 433-441.

[5] 汪嘉业, 杨兴强, 张彩明. 基于鱼眼镜头拍摄的图像生成漫游模型[J]. 系统仿真学报, 2001(13): 66-68.

[6] 张 诚, 汪嘉业. 利用鱼眼照片恢复景物的深度信息[J].

工程图学学报, 2002(3): 71-84.

[7] KEDZIERSKI M, FRYSKOWSKA A. Precise method of fisheye lens calibration [C]// The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. China: [s.n.], 2008: 765-768.

[8] WANG J, SHI F, ZHANG J, et al. A new calibration model of camera lens distortion [J]. **Pattern Recognition**, 2008, 41(2): 607-615.

[9] 陈晃明, 陈向颖. 鱼眼镜头光学设计[J]. 北京理工大学学报, 1989, 9(12): 35-42.

[10] 王永仲, 鱼眼镜头光学[M]. 北京: 科学出版社, 2006.

[编辑: 李 辉]

(上接第 1249 页)

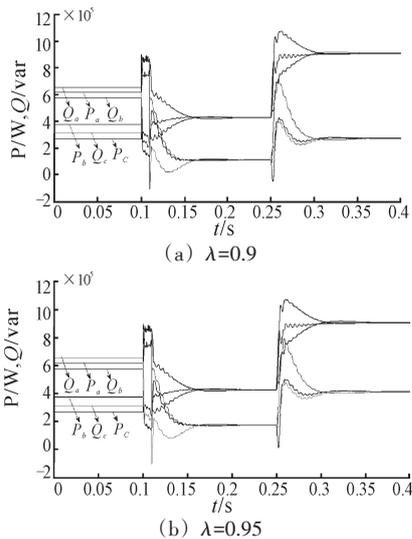


图 7 SVC 装置补偿效果图

表 2 SVC 投入后各相功率值 (单位: MW/Mvar)

$\lambda$ 给定值	$P_a$	$Q_a$	$P_b$	$Q_b$	$P_c$	$Q_c$
$\lambda=0.9$	0.413	0.195	0.417	0.197	0.414	0.193
$\lambda=0.95$	0.415	0.131	0.420	0.134	0.417	0.133

响应时间: 56 ms

表 3 第 2 组负荷投入后各相功率值 (单位: MW/Mvar)

$\lambda$ 给定值	$P_a$	$Q_a$	$P_b$	$Q_b$	$P_c$	$Q_c$
$\lambda=0.9$	0.901	0.422	0.898	0.421	0.902	0.423
$\lambda=0.95$	0.897	0.282	0.901	0.283	0.903	0.285

响应时间: 56 ms

## 6 结束语

本研究通过改进 Steinmetz 算法, 针对三相不平衡负荷推导出包含功率因数参变量的补偿导纳算法。笔者在电网电压矢量定向的基础上, 对负荷电流运用对称分量法及选用正序、负序同步旋转坐标变换, 通过低通滤波器滤除其交流分量, 求得用直流量表示的

负载电流基波分量(正序和负序), 以此为基础得到实用的补偿导纳公式。笔者通过 Matlab/Simulink 仿真实验验证了上述补偿导纳算法的正确性、有效性, 采用该算法的 SVC 装置具有较快的响应速度和较高的补偿精度, 防止了无功功率过补偿, 在维持系统稳定的同时降低了配电网电能损耗。

## 参考文献 (References):

[1] 刘小河, 赵 刚, 于娟娟. 电弧炉非线性特性对供电网影响的仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(6): 30-34.

[2] 袁佳歆, 李士杰, 张晨萌, 等. 电气化铁路三相不平衡协同补偿[J]. 电工技术学报, 2011, 26(1): 218-223.

[3] 杨 昆, 陈 磊, 陈国柱. DSTATCOM 补偿不平衡负载分序控制策略[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(7): 36-41.

[4] 丁仁杰, 刘 健, 赵玉伟, 等. 不平衡电路的瞬时功率分析及不对称负荷补偿方法[J]. 电工技术学报, 2007, 22(1): 120-124.

[5] 胡应宏, 王建勋, 任佳佳, 等. 不平衡负载的平衡分量法分解及补偿方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(34): 98-104.

[6] 邓文浪, 杨欣荣, 朱建林. 不平衡负载情况下基于双序 dq 坐标系双级矩阵变换器的闭环控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(19): 70-75.

[7] 王茂海, 孙元章. 通用瞬时功率理论在三相不平衡负荷补偿中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(11): 56-59.

[8] 丁仁杰, 刘 健, 张 隽, 等. 一种基于瞬时无功率理论的 SVC 控制方法[J]. 电工技术学报, 2006, 21(5): 47-51.

[9] 戴晓亮. 无功补偿技术在配电网中的应用[J]. 电网技术, 1999, 23(6): 11-14.

[10] 李 鹏, 石新春, 梁志瑞, 等. 对电弧炉平衡化补偿实用公式推导及验证[J]. 电工技术学报, 2001, 16(1): 77-80.

[11] LEE S, KANG J, SUL S. A new phase detecting method for power conversion systems considering distorted conditions in power system[C]// IEEE-IAS Annu. Meeting. Phoenix: [s.n.], 1999: 2167-2172.

[编辑: 洪炜娜]