doi: 10.7690/bgzdh.2016.07.015

基于 Chebyshev 插值算法的实时鱼眼图像校正

余　鑫，胡方德，吴　军
（湖南华南光电（集团）有限责任公司产品研发部，湖南 常德 415000）

摘要：针对鱼眼镜头由于视场大而导致畸变的问题，对其拍摄的视频图像进行畸变校正。采用 Chebyshev 插值算法，将鱼眼镜头的非线性校正函数转换为多项式校正函数，采用流水线法快速计算多项式校正函数，并通过实例进行实验验证。结果表明：该方法能实现 FPGA（field programmable gate array）平台上的实时鱼眼校正，其效果明显，实时性强。

关键词：Chebyshev 插值；鱼眼校正；FPGA
中图分类号：TP301.6　　**文献标志码**：A

Fisheye Image Real-time Correction Method Based on Chebyshev Interpolation

Yu Xin, Hu Fangde, Wu Jun
(*Research & Development Department*, *Hunan Huanan Optoelectronic* (*Group*) *Co*., *Ltd*, *Changde* 415000, *China*)

Abstract: According to the distortion of fisheye lens which caused by wide field, correction for its video should be used. The Chebyshev interpolation method for fisheye lens is taken for transforming nonlinear correcting function to polynomial correcting function, and the pipelining fast calculating method is used for calculating polynomial function, and experimental verification is carried out. The results show that this method can implement real-time correction for fisheye images based on FPGA (field programmable gate array) with its effect is obvious and its real-time performance is excellent.

Keywords: Chebyshev interpolation; fisheye image correction; FPGA

0　引言

鱼眼镜头是一种特殊的超广角镜头，有着宽广的视场，其视场通常接近或等于 180°，在监控、军事、摄影等方面得到广泛的应用[1]。也正是由于其视场大而导致了不可避免的畸变，对观测造成严重影响；因此，一般要对其拍摄的图像或视频进行畸变校正。进行视频畸变校正的主要困难在于非线性校正函数的计算以及保证视频校正的实时性。目前在 FPGA 平台上针对非线性计算主要采用 cordic 算法，这种算法局限性很大，且不利于全视场的校正；也有在 PC 机平台上用多项式进行拟合的，但是实时性差，而且耗费资源；还有一些神经网络方面的校正方法，应用较少。笔者通过研究，提出采用 Chebyshev 插值法结合多项式流水线计算方法来解决此问题，该方法可以方便地在 FPGA 平台上实施。

1　校正方法概述

鱼眼镜头的畸变属于桶形畸变，其畸变主要发生在径向方向上；因此，笔者只针对径向畸变做相关校正。校正过程分 3 步：1) 获取鱼眼镜头径向畸变函数（以下简称畸变函数），转换得到校正函数；2) 针对校正函数取样若干个点的数据，然后进行 Chebyshev 插值，得到一个多项式校正函数；3) 用 FPGA（field programmable gate array）逻辑实现多项式校正函数，实时对鱼眼视频图像进行校正。

2　获取畸变函数

畸变函数可通过光学理论计算和对鱼眼镜头进行实际测量 2 种方法得到，理论计算可得到一个畸变函数公式，而实际测量得到的是一个离散畸变函数表，两者对后续的 Chebyshev 插值几乎没有影响。为方便起见，笔者采取理论计算方式获取畸变函数。

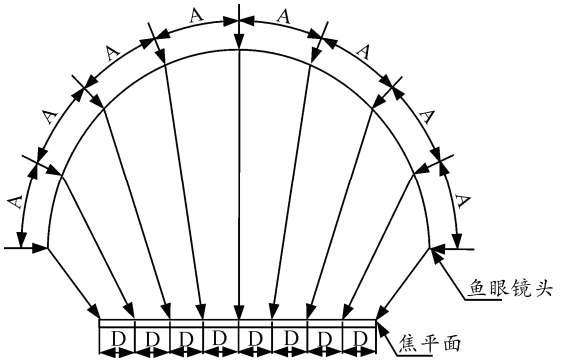

图 1　等距投影

鱼眼镜头的桶形畸变是设计时故意引入的，一般不当作像差处理，而认为是投影成像的结果。鱼眼镜头的光学系统类型按投影方法分为体视投影型、等距投影型、等立体角投影型和正投影型[2]。笔者采用一个焦距为 1.56 mm 的 180°视场鱼眼镜

收稿日期：2016-03-20；修回日期：2016-05-07
作者简介：余　鑫（1985—），男，湖南人，学士，工程师，从事自动控制技术及图像处理研究。

头，它是等距投影型的。等距投影的截面示意如图 1，视场被等分成若干个角度 A，每个角度为 A 的视场投影到焦平面的区域长度都等于 D，这就是等距投影。

等距投影的投影公式见式 (1)，其中：y'为像高；f 是鱼眼镜头的焦距；ω是视场半角，rad。而普通无畸变的投影公式为式 (2)，通过比较可推导出校正函数式 (3)。其中，r 为校正后像点极坐标半径；r^T 为校正前的像点极坐标半径(文中将鱼眼镜头全视场分成上、下、左、右及中心 5 个部分，只针对中心部分做详细阐述，因此取 $r^T \leqslant R/2$)；R 为视场是 180°鱼眼的投影半径。该校正函数是从校正后像素点的极坐标逆推校正前像素点的极坐标。

$$y' = f\omega 。 \tag{1}$$

$$y' = f\,\mathrm{tg}\,\omega 。 \tag{2}$$

$$r^T = \frac{2R}{\pi}\mathrm{arctg}(\frac{r}{R}) 。 \tag{3}$$

3 Chebyshev 插值

从公式 (3) 可以看出：校正函数含有反正切运算，其非线性特性使其在 FPGA 上进行实时计算十分困难。反正切函数可采取 cordic 算法[3]进行计算，但是 cordic 计算一般迭代步数多，延时较长，且只能计算某些初等函数，适用范围较窄。据此，笔者采用插值法将校正函数转换为多项式函数再进行并行计算，可以避免这些问题。通常采用的插值法有 Lagrange 插值法、Newton 插值法以及 Hermite 插值法等。Lagrange 插值法具有简单易用、光滑性好等特点，但是容易出现 Runge 现象；Chebyshev 插值法其实是 Lagrange 插值法的一种，具有 Lagrange 插值法的优点，但其插值节点选取的是 Chebyshev 节点，这样不但容易实施，能够达到非常高的精度，而且能最大限度地降低 Runge 现象[4]。具体做法是先针对校正函数用第一类 Chebyshev 多项式的根为采样点进行采样，然后进行多项式插值，用 Matlab 计算，取 4 次多项式得到

$$r^T = a_4 r^4 + a_3 r^3 + a_{\ 2} r^2 + a_1 r + a_0 。 \tag{4}$$

不考虑缩放关系，可以取 $R=1$，对公式 (3) 进行 4 阶多项式 Chebyshev 插值计算得 $a_4 = 0.116$，$a_3 = 0.165$，$a_2 = 0.006\,85$，$a_1 = 0.636$，$a_0 = 0$。根据式 (3) 和式 (4) 进行计算可以得到误差曲线如图 2。分析可知：插值误差绝对值小于 $\pm 2\times10^{-5}$，按一行 720 个像素计算，考虑缩放(缩放倍数小于 2)，该方法计算的最终误差也会小于 0.1 个像素。

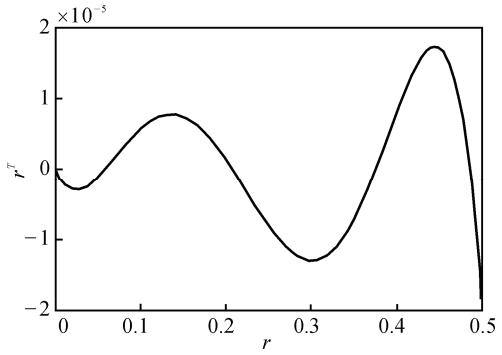

图 2 误差曲线

4 多项式校正函数的 FPGA 实现

多项式校正函数是一个 4 次的多项式，如果直接运算，会消耗 FPGA 大量乘法器和逻辑单元，而且会产生较长延时，无法满足实时性要求。因此，需要对公式 (4) 进行变形得：

$$r^T = (((a_4 r + a_3)r + \ a_2)r + a_1)r + a_0 。 \tag{5}$$

此公式可以实现流水化计算(如图 3)，自变量 r 按像素周期不断从左边输入，经过 4 次乘法和 4 次加法得到输出，延迟仅 4 个像素周期。当像素位于不同的校正区域时，只需要从参数输入口变更参数即可，从而实现全视场不同区域不同的校正函数。

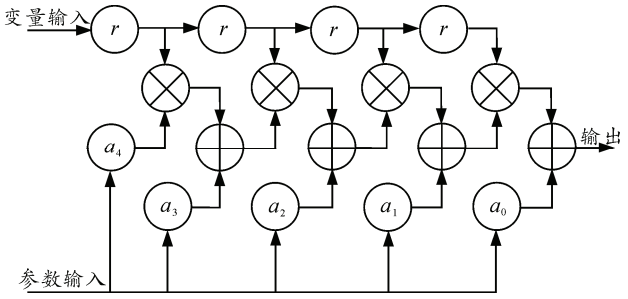

图 3 多项式校正函数流水线计算

5 实验结果

为了保持鱼眼视频所包含的信息，笔者不仅对视场的中心部分做了校正，而且对上、下、左、右都进行了校正(校正方法同中心部分类似，只有校正函数的形式根据投影方向发生相应改变)，同时将其缩放且拼凑成 4:3 全屏显示图像，使得校正前后视频显示大小一致。根据图 3 所示的计算方法，可以在不同校正区域方便地切换校正函数，保证了鱼眼的全景实时校正。

校正前的视频截图见图 4，校正后的视频截图见图 5。由于该鱼眼镜头的像面尺寸为 4.7 mm，而文中所用的 CCD 靶面为 1/3"(4.8 mm ×3.6 mm)；因此像面的上下被截去了一部分，校正后留下一个弧形的空白区域(图 5 的右上部分)。

(下转第 65 页)