

doi:10.3788/gzxb20184706.0611002

# 基于 CPU+GPU 的大视场物镜成像畸变实时校正

李明杰, 胡明勇, 张健, 曹明坡, 王位

(合肥工业大学 光电技术研究院 特种显示技术教育部重点实验室; 特种显示技术国家工程实验室, 合肥 230009)

**摘 要:**针对工业大视场物镜畸变成像的实时校正问题, 提出一种校正算法和 CPU+GPU 并行加速方案。根据光学畸变理论和相机标定技术, 建立非球面畸变校正模型。利用棋盘样板计算光学中心和估计畸变系数, 设计校正算法, 在 CPU+GPU 并行加速方案基础上, 设计内核自适应维度算法并优化运行程序, 结合 OPENGL 驱动进行实时校正和显示。实验结果表明, 本文设计的实时校正系统对高分辨率的畸变成像校正率可以达到 98.2%, 单帧耗时 0.026 s, 平均综合加速比为 29.1。该系统精度高, 可移植性强, 简单易行, 能够广泛应用于成像畸变的实时校正。

**关键词:**大视场物镜; 光学畸变; 高分辨率; GPU 并行加速; 实时校正; OPENGL 显示

**中图分类号:** TP391

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2018)06-0611002-8

## Real-time Imaging Distortion Correction of Large-field Objective Lens Based on CPU+GPU Hybrid Platform

LI Ming-jie, HU Ming-yong, ZHANG Jian, CAO Ming-po, WANG Wei

(Key Laboratory of Special Display Technology of the Ministry of Education, National Engineering Laboratory of Special Display Technology, National Key Laboratory of Advanced Display Technology, Academy of Photoelectric Technology, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** To solve the real-time imaging distortion correction problem of industrial wide-field objective lens, a correction algorithm and CPU + GPU parallel acceleration scheme was proposed. Firstly, a distortion correction model of aspheric surface is established according to the optical distortion theory and the camera calibration technology. Secondly, a correction algorithm is designed by using optical center and estimating distortion coefficients. Finally, based on the CPU+GPU hybrid acceleration platform, the kernel adaptive dimension algorithm is designed and the optimized running program is proposed, combined with OpenGL driver for real-time correction and displaying. The experimental results show that the real-time correction system can achieve a correction rate of 98.2%, single frame time-consuming of 0.026 s, the average overall speedup of 29.1 for high resolution distortion imaging. The imaging system is higher precision, transplantable and more simple, and can be widely used in the real-time imaging distortion correction.

**Key words:** Large-field objective; Optical distortion; High-resolution; GPU parallel acceleration; Real-time correction; OPENGL display

**OCIS Codes:** 110.2960; 100.2000; 100.3190; 100.4994; 200.3050

## 0 引言

目前大视场物镜成像系统主要应用于工业监控、医疗内窥和机器识别等领域。对于成像畸变的实时校正问题, 国内外现有研究的校正算法主要分为两类: 基于标定对象和基于成像模式<sup>[1-2]</sup>。第一类方法主要利用样

**基金项目:** 大视场物镜成像畸变校正合作项目资助

**第一作者:** 李明杰(1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光学设计和图像处理。Email: jaylingli@126.com

**导师(通讯作者):** 胡明勇(1976—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为大口径、高精度光学。Email: humy8@126.com

**收稿日期:** 2017-12-08; **录用日期:** 2018-03-06

<http://www.photon.ac.cn>

板对象标定畸变多项式系数,主要运用在畸变校正精度要求高的领域.不依赖成像系统参数,已经能实现高精度和高分辨率图像畸变校正,但需要计算大规模复杂的矩阵方程<sup>[3]</sup>.第二类方法根据大视场物镜的光学成像原理和模型进行校正,主要应用在对校正精度要求不高的日常生活中的广角系统中.其运算量小、实用性强但校正精度低,依赖难以精确获取的复杂光学成像系统参数,已经能够快速完成畸变校正,但对于实时校正只能近似计算<sup>[4]</sup>.

对于畸变实时校正的问题,国内外的研究主要有数字信号处理(Digital Signal Processing, DSP)、现场可编程门阵列(Field-Programmable Gate Array, FPGA)和图形处理器(Graphics Processing Unit, GPU)三种加速方案.DSP加速方案已成为主流的实时校正方案,校正精度高、速度快,但可扩展性差,只适用于IO接口类的摄像机<sup>[5]</sup>.FPGA加速方案成本高、功能强大,主要应用在高端领域中的高精度畸变实时校正,但它的编程过程复杂性,开发周期很长,更新换代难<sup>[6]</sup>.以上两种加速方案在进行畸变校正处理后,需要将数据传输到计算机,进行下一步处理,这增加了传输的时间开销.近几年开始流行的GPU加速方案,是新型畸变实时校正方案,得到高速发展和广泛应用.它利用并行计算架构加速实时校正,具有简单易行、通用性和可移植性强、加速能力强等特点<sup>[7]</sup>.在畸变实时校正研究中,已经开始逐渐替代DSP和FPGA加速方案.

为了实现高分辨率畸变成像的实时校正和显示,本文在大视场物镜光学成像模型的基础上,将上述两类校正算法相结合,建立非球面畸变校正模型,并设计CPU+GPU加速平台.

## 1 大视场物镜成像畸变校正

### 1.1 畸变校正模型

由光学理论可知,畸变主要是光线通过光学系统后产生的偏移.由于加工工艺、制造、装配等影响因素,使镜头存在多种复杂的畸变,主要包括:径向畸变、离心畸变、薄棱镜畸变等.研究表明,径向畸变影响最终成像失真,成像模型如图1(a)所示.

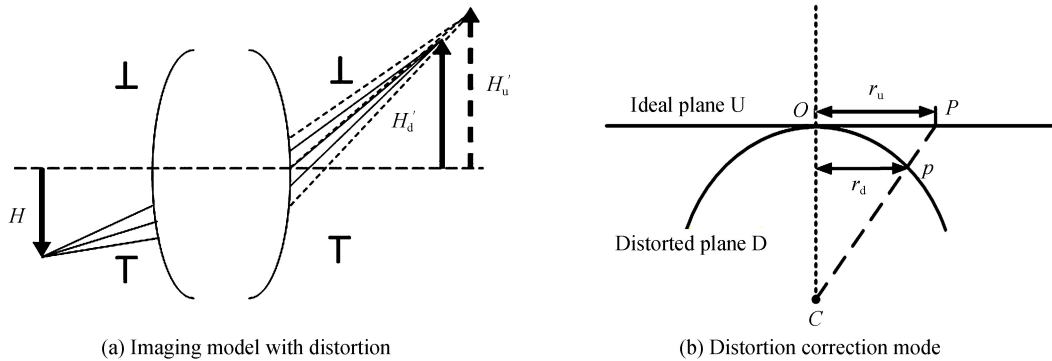


图1 畸变成像及校正示意图

Fig.1 Aberration imaging and correction schematic diagram

由于球差的存在,使不同视场的主光线通过光学系统后,与高斯成像面的实际交点高度  $H_d'$  不等于理想像高  $H_u'$ ,其差值就是系统的径向畸变  $\delta H'$ .设畸变成像平面为 D,对应的理想成像平面为 U,利用相对畸变  $Q'$  建立畸变模型,如式(1).

$$Q' = (\delta H' / H_u') \times 100\% = [(H_d' - H_u') / H_u'] \times 100\% \quad (1)$$

畸变值随着视场改变,可知  $H_d' = (1 + Q') \times H_u'$ .

将畸变模型和大视场物镜的光学设计理论相结合,由半球形畸变校正模型<sup>[8]</sup>和等效曲面模型<sup>[9]</sup>可知,像平面中图像点到光学中心的距离与物平面中对应的物点、光学中心、光轴三者间的角度成比例,如图1(b)所示.在视场(Field Of View, FOV)模型<sup>[10]</sup>的理论基础上,根据角分辨率与沿成像半径的图像分辨率成正比,采用反向映射方式,提出一种适合实时畸变校正的非球面畸变校正模型,即

$$\begin{cases} x = (1 + Q')X, y = (1 + Q')Y \\ Q' = H_d' / H_u' - 1 = r_d / r_u - 1 \\ r_d = \omega^{-1} \arctan(2r_u \tan(\omega/2)) - \lambda \ln(1 + r_u) \end{cases} \quad (2)$$

式中, $O(x_0, y_0)$ 为畸变中心点,畸变图上的点 $p(x, y)$ ,对应理想成像点 $P(X, Y)$ .其中 $r_d = \overline{Op}$ 为畸变径向距离, $r_u = \overline{OP}$ 为理想径向距离, $\omega$ 为视场角, $\lambda$ 为畸变系数.

## 1.2 畸变校正算法

根据畸变校正模型,求解相关参数,对像素点进行坐标变换和灰度插值.

### 1.2.1 计算畸变中心 $O(x_0, y_0)$

大视场物镜产生严重的畸变成像,使畸变中心发生偏移,不再与图像中心重合.由畸变原理可知,离畸变中心越近畸变越小.利用样板控制点技术求解畸变中心坐标,标定该位置的精准度直接影响畸变校正效果.相对于其他样板,棋盘样板具有制作成本低、简单易行、精度高等特点.故采用基于棋盘样板的方法计算畸变中心点的位置:

Step1:对 $M \times N$ 棋盘样板进行畸变成像,利用相机标定技术确定各角点坐标;

Step2:利用棋盘样板畸变图的水平、垂直和两条对角线方向角点 $p_v(x, y)$ 、 $p_h(x, y)$ 、 $p_{d1}(x, y)$ 和 $p_{d2}(x, y)$ ,中心角点 $p_c(x, y)$ .通过式(3)构造样本点集.

$$\begin{cases} L_V^m = \min\left(\sum |p_v(x, y) - p_c(x, y)|\right) & L_H^m = \min\left(\sum |p_h(x, y) - p_c(x, y)|\right) \\ L_{D1}^m = \min\left(\sum |p_{d1}(x, y) - p_c(x, y)|\right) & L_{D2}^m = \min\left(\sum |p_{d2}(x, y) - p_c(x, y)|\right) \end{cases} \quad (3)$$

以 $L_V^m$ 、 $L_H^m$ 、 $L_{D1}^m$ 和 $L_{D2}^m$ 选取的样本点集拟合4条直线;

Step3:计算这4条直线的 $n$ 个交点 $O_i(x_0^i, y_0^i)$ , $i = 1, 2, 3, \dots, n$ .即畸变中心 $O(x_0, y_0) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_0^i, y_0^i)$ .

### 1.2.2 估计畸变系数 $\lambda$

非球面畸变校正模型中的参数 $\lambda$ 控制着描述成像畸变曲面的准确性,即影响畸变校正的精度.对于不同视场角 $\omega$ 的镜头,需要计算出最优的 $\lambda$ 值.对于 $M \times N$ 的棋盘样板,内角点 $(i, j)$ 的实际坐标 $p(i, j)$ ,对应的理想坐标 $\hat{p}(i, j)$ .利用摄像机标定算法<sup>[11]</sup>计算镜头的参数.

$$\hat{p}(i, j) = p(i, j)(\mathbf{A}, \mathbf{K}, \mathbf{B}, C_{ij}) \quad (4)$$

式中, $\mathbf{A}$ 为内参矩阵, $\mathbf{K}$ 为畸变参数标定矩阵, $\mathbf{B}$ 为外参矩阵, $C_{ij}$ 为点 $(i, j)$ 的三维空间坐标.

求得样板的 $M \times N$ 控制点的理想坐标后,结合畸变校正模型求解的校正后坐标 $p_c(i, j)$ ,采用最小均方差法计算畸变参数 $\lambda$ ,即

$$\lambda = \min_{\lambda} \left( \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N |p_c(i, j) - \hat{p}(i, j)|^2 \right) \quad (5)$$

### 1.2.3 灰度内插

经过校正模型进行变换后,理想成像点 $P(X, Y)$ 对应畸变图上的像素点 $p(x, y)$ 可能不是整数,需进行图像内插.对于最邻近、双线性和双三次内插这三种灰度内插算法,考虑到校正精度和速度的要求,选择双线性内插算法.

## 2 实时校正及显示

在CPU平台上串行执行算法的参数初始化,GPU上并行执行畸变的实时校正,最后利用OPENGL驱动显示.

### 2.1 CPU+GPU实时校正方案设计

在非球面畸变校正算法的基础上,利用CPU+GPU平台方案进行加速,实现畸变视频的实时校正,并利用OPENGL进行实时显示,具体方案如图2.

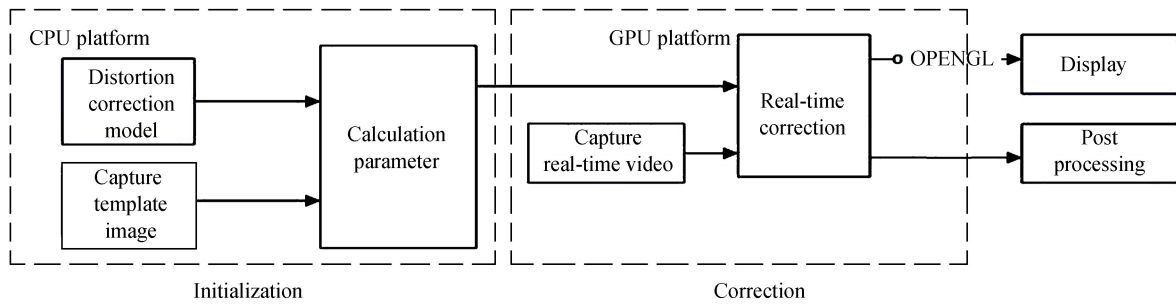


图2 基于CPU+GPU的畸变视频实时校正方案  
Fig.2 Scheme of real-time distortion correction based on CPU+GPU

### 2.2 GPU并行内核设计及优化显示

对于确定参数的大视场物镜成像的实时校正,在GPU显存的每个Block中输入和输出数据位置和比例是固定不变的,可以进行合并访问,并进行二维的棋盘划分.在保持每个Block中线程数量是32的整数倍基础上,为了减少访存地址时间<sup>[12]</sup>,设计内核自适应维度算法:

Step1:根据所用GPU型号和架构,在期望的流处理器簇(Streaming Multiprocessors, SM)资源占有率下,计算二维Block的 $(D_x, D_y)$ ;

Step2:根据图像的尺寸 $m \times n$ 计算Grid的尺寸 $(B_x, B_y)$ .

$$\begin{cases} B_x = \frac{(n + D_x - 1)}{D_x} \\ B_y = \frac{(m + D_y - 1)}{D_y} \end{cases} \quad (6)$$

应优先考虑Block的尺寸,后计算Grid的尺寸.并行架构(Compute Unified Device Architecture, CUDA) SDK中的CUDA occupancy calculator分析计算Block的维度和每个维度上的尺寸,如图3.

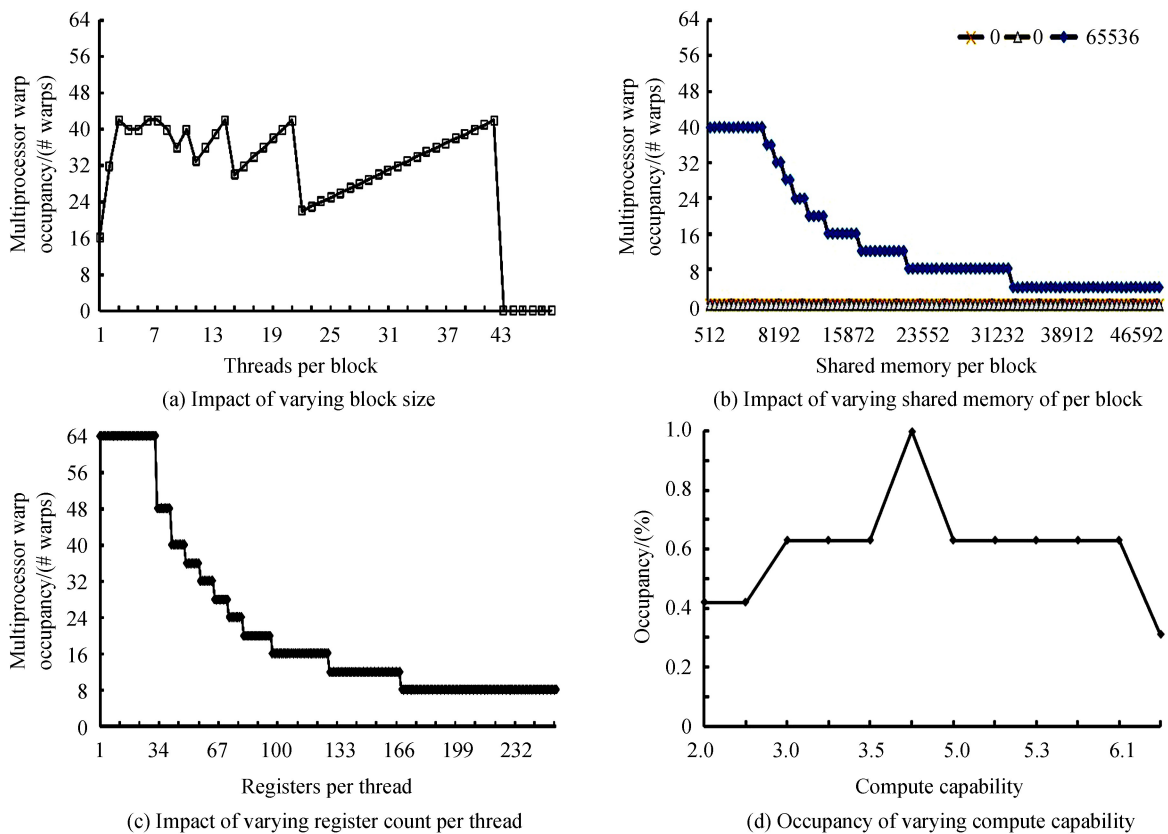


图3 GPU并行内核设计及优化设计  
Fig.3 Design and optimization design of GPU parallel kernel

对存储器访问优化,主要是减少 GPU 与 CPU 通信,进行异步执行,全局存储器、共享存储器访问优化,使用纹理存储器和常数存储器加速,对指令流优化,主要针对算术指令、控制流指令、访存指令以及同步指令的优化。

OPENGL 独立与硬件和窗口系统,在运行各种操作系统的各种计算机上都可用,并能在网络环境下以客户/服务器模式工作,是专业图形处理、科学计算等高端应用领域的标准图形库.为了加速畸变视频校正后的实时显示,通过 CUDA 与 OPENGL 驱动的互操作可以将 OPENGL 的缓冲对象映射到 CUDA 的地址空间,将校正后的数据写入 OPENGL 进行实时显示。

综上所述,设计基于 CPU+GPU 的大视场物镜成像畸变实时校正算法流程图,如图 4 所示。

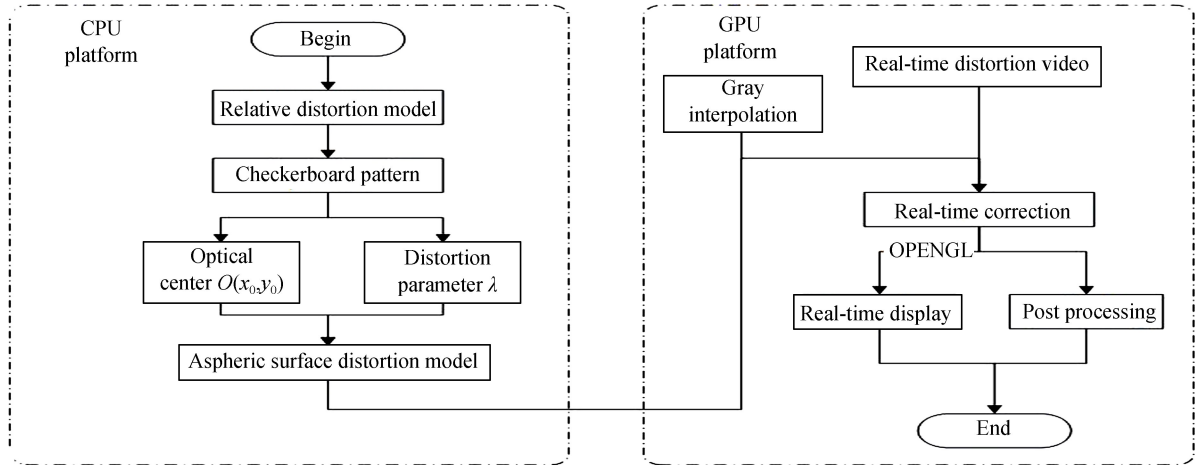


图 4 畸变实时校正算法流程

Fig.4 The real-time distortion correction algorithm flowchart

### 3 实验结果及分析

在 VS2013 环境下,用 C++ 开发应用程序,选用 Intel Core i5-7500 CPU 和 NVIDIA GeForce GTX 1060 GPU.摄像机靶面尺寸 1/1.8 英寸,视场角 125°的大视场物镜,成像尺寸 1 920×1 080,进行实时校正。

根据摄像机的相关参数和标定技术,对  $M \times N$  棋盘样板的建立理想状态下的线性成像模型<sup>[13]</sup>,计算棋盘格模板内角点  $(i, j)$  的理想像素坐标  $\hat{p}(i, j)$ .利用上述畸变校正模型,求解出校正后像素坐标  $p_c(i, j)$ .在近似畸变率计算方法<sup>[14]</sup>的基础上,结合平均校正误差,建立畸变校正率标定方程为

$$P = \left( 1 - \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \frac{|\hat{p}(i, j) - p_c(i, j)|}{|\hat{p}(i, j)|} \right) \times 100\% \quad (7)$$

分析不同规模的棋盘样板与畸变校正率、耗时的关系,如图 5 所示。

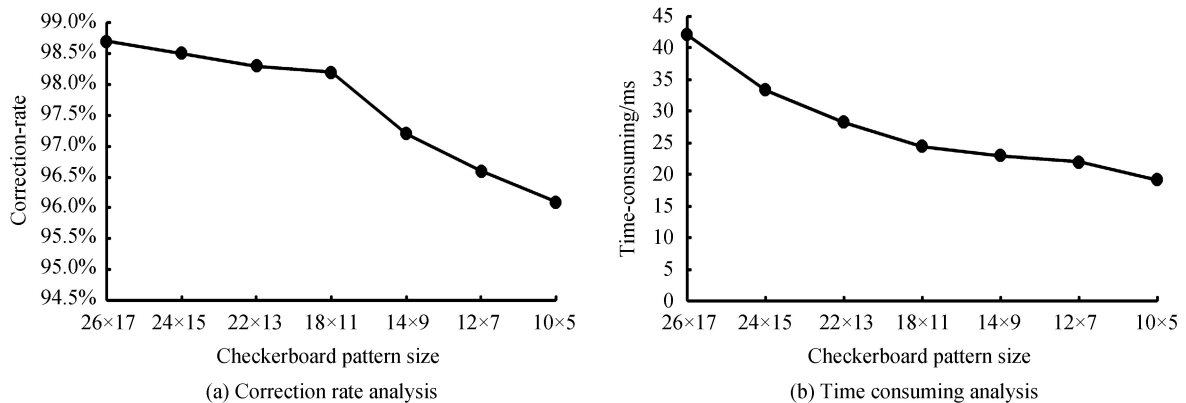


图 5 校正率校正耗时与棋盘模板规模的关系分析

Fig.5 Analysis of the relationship between correction rate correction time and board template size



分析图 5 可知当棋盘样板规模超过  $18 \times 11$  后,校正率变化不大,但校正耗时明显增大,并且规模大的棋盘样板的制作成本高.因此,选用  $18 \times 11$  的棋盘样板最合适,求解畸变校正模型参数如表 1 所示.

表 1 畸变校正模型参数

Table 1 Distortion correction model parameter

Parameter	Value
Distortion center $O$	(967.281, 532.763)
$\lambda$	1.189 593

根据本文的 CPU+GPU 实时视频校正方案,对棋盘样板进行校正.畸变失真的校正是对图像的水平坐标变换和像素点插值,畸变图 6(a)校正后的边缘视场会发生偏移变形,如图 6(b)所示的枕形图像.为了校正后的图像具有研究价值和较好的视觉效果,对图像进行最大化矩形裁剪,如图 6(c)所示.

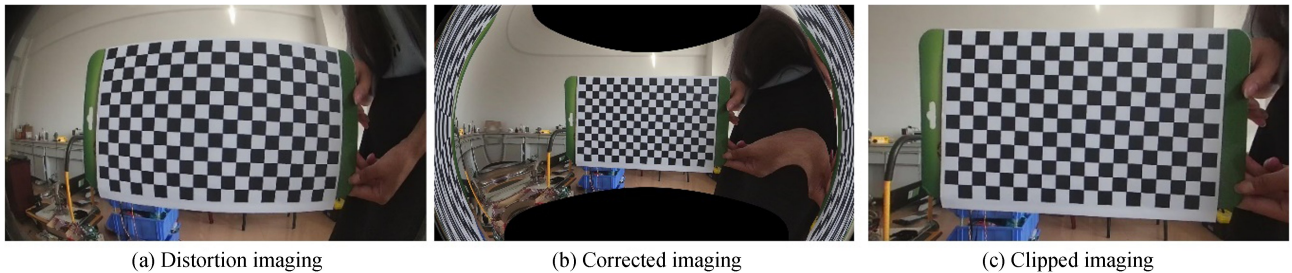


图 6 基于棋盘格模板的畸变参数标定

Fig.6 Calibration of distortion parameters based on checkerboard template

对利用 CPU+GPU 方案对大视场物镜成像畸变进行实时校正,效果如图 7 所示.

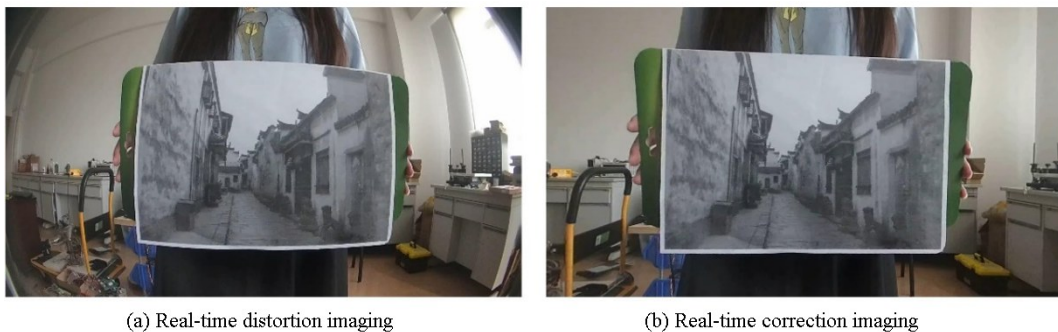


图 7 实时畸变校正系统

Fig.7 Real time distortion correction system

在不同输出图像分辨率下,将本文建立的非球面畸变校正模型的校正率、时间性能与经典校正模型<sup>[15]</sup>、球面校正模型<sup>[16]</sup>进行对比,如表 2、3 和图 8(a)所示.

表 2 不同校正模型的畸变校正率对比 (%)

Table 2 Distortion correction rate of different correction models (%)

Resolution of image	720×480	1024×600	1280×720	1920×1080	2048×1920	2560×1920
Classical model	97.76	97.94	98.03	98.10	98.34	98.42
Sphere model	97.81	97.98	98.07	98.12	98.47	98.53
Proposed model	97.95	98.14	98.20	98.28	98.56	98.69

表 3 不同校正模型时间性能对比 (ms)

Table 3 Time-consuming of different correction models (ms)

Resolution of image	720×480	1024×600	1280×720	1920×1080	2048×1920	2560×1920
Classical model	24	40	56	72	98	134
Sphere model	20	31	43	57	78	108
Proposed model	14	19	26	39	53	75

将基于本文校正算法的视频畸变实时校正和显示平台与传统 CPU 平台、DSP 平台<sup>[17]</sup>、传统的 CPU+

GPU平台<sup>[18-19]</sup>进行性能对比,计算加速比 $S_p$ ,即

$$S_p = \frac{T_0}{T_p} \quad (8)$$

式中 $T_0$ 是传统CPU平台的运行时间, $T_p$ 是加速平台的运行时间.

对大视场物镜成像系统进行畸变实时校正,得到并行计算加速比与视频分辨率关系,如表4和图8(b)所示.

表4 不同分辨率视频的加速比

Table 4 Speedup of video with different resolutions

Resolution of video	720×480	1024×600	1280×720	1920×1080	2048×1920	2560×1920
Traditional CPU platform	1	1	1	1	1	1
DSP platform	11.2	19.5	29.7	47.4	56.3	64.7
Classical CPU+GPU platform	10.6	18.6	28.6	45.2	54.7	60.8
Proposed CPU+GPU platform	11	18.7	29.1	47.1	56	63.9

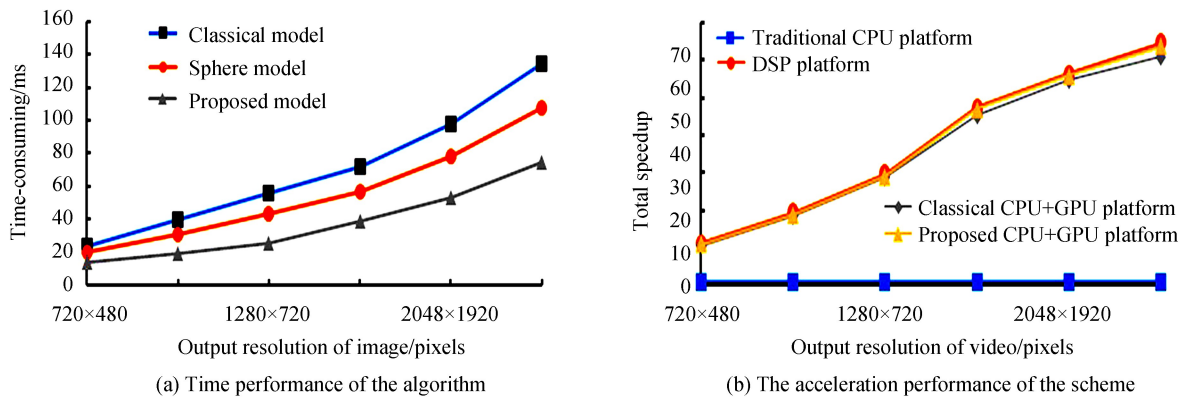


图8 畸变校正系统的算法及性能分析

Fig.8 Algorithm and performance analysis of distortion correction system

本文建立的畸变实时校正算法模型在不同分辨率下,校正率和时间性能都优于其他算法模型,特别在高分辨率下,耗时更少,性能更好,精度更高.设计的CPU+GPU实时校正及显示方案的综合加速比接近DSP平台,并优于传统的加速方案.

## 4 结论

对于125°大视场物镜的成像畸变的实时校正,在光学畸变理论上,建立非球面校正模型,并在CPU+GPU平台上,优化并行算法,对畸变视频进行实时校正和显示.对分辨率720p的视频,校正率可以达到98.2%,每帧图像的校正及显示时间为0.026s,加速比达到29.1,符合实时校正和显示的效果.与现有实时校正系统相比,本文提出的系统具有低耗时、高精度、简单易行、良好的可移植性、成本低等特点.适用于各种大视场物镜的实时校正,并在其他低端CPU+GPU平台上也可正常运行使用.

### 参考文献

- [1] WANG Ke-na, ZHOU Bei-ji, HUANG Wen-mei. A distorted image correction method based on neural networks[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2005, **10**(5): 603-607.  
王珂娜,邹北骥,黄文梅.一种基于神经网络的畸变图像校正方法[J].*中国图象图形学报*, 2005, **10**(5): 603-607.
- [2] LAN Hai-bing, WANG Ping, LONG Teng. Nonlinear aberration correction of lens in image mosaic[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(5): 1196-1202.  
兰海滨,王平,龙腾.图像拼接中相机镜头非线性畸变的校正[J].*光学精密工程*, 2009, **17**(5): 1196-1202.
- [3] MA Guang-bing, ZHANG Weng-yi, CHEN Fu. Study on image accurate geometric correction [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2007, **43**(9): 45-48.  
马广彬,章文毅,陈甫.图像几何畸变精校正研究[J].*计算机工程与应用*, 2007, **43**(9): 45-48.
- [4] ZHU Hai-jiang, XU Xiao-bong, ZHOU Jing-lin. Fisheye image matching based on rotation matrix under spherical perspective projection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, **33**(2): 122-129.  
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): 122-129.

- [5] MILANI P, PEDERSINI F. A DSP multiprocessor architecture for live camera calibration[C]. International Workshop on Image Analysis for Multimedia Interactive Services Wiamis, IEEE, 2010: 1-4.
- [6] ZHAO X, LUO Q, HAN B, *et al.* An image distortion correction algorithm based on quadrilateral fractal approach controlling points[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, **36**(5): 2676-2681.
- [7] DING Ying, LI Wen-hui, FAN Jing-tao, *et al.* Real-time calibration algorithm of distortion of wide-field view based on GPU[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2010, **40**(1): 189-194.  
丁莹,李文辉,范静涛,等. 基于 GPU 的大视场景物畸变实时校正算法[J]. 吉林大学学报(工), 2010, **40**(1):189-194.
- [8] KIM W. An efficient correction method of wide-angle lens distortion for surveillance systems[C]. IEEE International Symposium on Circuits and Systems, IEEE, 2009:3206-3209.
- [9] SMITH P W, JOHNSON K B, ABIDI M A. Efficient techniques for wide-angle stereo vision using surface projection models[C]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1999, **6**(1): 113-118.
- [10] CAPPUCCIO F P, STRAZZULLO P, MANCINI M. Straight lines have to be straight: automatic calibration and removal of distortion from scenes of structured environments[M]. Springer-Verlag New York, Inc. 2001:14-24.
- [11] ZHANG Z. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations[C]. The Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision, IEEE, 2002: 666-673.
- [12] ZHANG Shu, CHU Yan-li. GPU high performance computing of CUDA[M]. China Water&Power Press, 2009:141-189.  
张舒,褚艳利. GPU 高性能运算之 CUDA[M].北京:中国水利水电出版社,2009:141-189.
- [13] HU Ming-yong, LI Ming-jie, ZHAO Qi, *et al.* Design and imaging distortion correction of pin-hole objective lens with large field[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017(5): 274-280.  
胡明勇,李明杰,赵奇,等. 大视场针孔物镜设计及成像畸变校正[J].光学学报, 2017(5):274-280.
- [14] YANG Qiu-hui, YU Hao-xing, LI Tao-shen, *et al.* A distortion correction method for large field-of-view lens[J]. *Computer Applications and Software*, 2015(9): 136-140.  
杨秋慧,玉昊昕,李陶深,等. 一种大视场镜头的畸变校正方法[J].计算机应用与软件,2015(9):136-140.
- [15] YAO Na, LIN Zhao-rong, REN Chao-feng, *et al.* A distortion model suitable for nonlinear distortion correction of digital video camera[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, **51**(2): 167-174.  
姚娜,林招荣,任超锋,等. 一种适合摄像机非线性畸变校正的畸变模型[J].激光与光电子学进展, 2014, **51**(2):167-174.
- [16] HAN Guang-liang, SONG Jian-zhong. An equivalent surface model of image distortion and the correction algorithm[J]. *Optical Technique*, 2005, **31**(1): 122-124.  
韩广良,宋建中. 一种基于畸变等效曲面的图像畸变校正[J]. 光学技术, 2005, **31**(1):122-124.
- [17] MILANI P, PEDERSINI F. A DSP multiprocessor architecture for live camera calibration[C]. International Workshop on Image Analysis for Multimedia Interactive Services Wiamis, IEEE, 2010: 1-4.
- [18] BAO Xue-jing, DAI Shi-jie, GUO Cheng, *et al.* Nonlinear distortion image correction from confocal microscope based on interpolation[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, **46**(11): 1103006.  
鲍雪晶,戴仕杰,郭澄,等. 基于插值的共焦显微镜非线性畸变失真图像校正[J]. 红外与激光工程, 2017, **46**(11): 1103006.
- [19] RUI M, BARRETO J P, FALCAO G. A new solution for camera calibration and real-time image distortion correction in medical endoscopy-initial technical evaluation[J]. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2012, **59**(3): 634-644.

**Foundation item:** The Cooperation Project for Imaging Distortion Correction of Large-field Objective Lens

引用格式: LI Ming-jie, HU Ming-yong, ZHANG Jian, *et al.* Real-time Imaging Distortion Correction of Large-field Objective Lens Based on CPU+GPU Hybrid Platform[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(6):0611002

李明杰,胡明勇,张健,等.基于 CPU+GPU 的大视场物镜成像畸变实时校正[J].光子学报,2018,**47**(6):0611002