

# 基于图像梯度的透镜成像清晰度评估系统

程大骞<sup>1</sup> 付文智<sup>1</sup> 陈东杰<sup>1</sup> 王慕冰<sup>2</sup> 陈彦<sup>2</sup> 李朝荣<sup>2</sup>

(北京航空航天大学<sup>1</sup>物理科学与核能工程学院,<sup>2</sup>物理科学与核能工程学院物理实验中心,北京 100191)

**摘 要** 在透镜焦距的测量实验中,利用计算机视觉低成本方案代替人眼,基于图像梯度评估成像的清晰度,克服人眼对清晰度判断灵敏度低的问题,以节省时间,减小误差。

**关键词** 焦距测量;图像梯度;清晰度评估

## LENS IMAGING CLARITY EVALUATION SYSTEM BASED ON IMAGE GRADIENT

CHENG Daqian<sup>1</sup> FU Wenzhi<sup>1</sup> CHEN Dongjie<sup>1</sup> WANG Mubing<sup>2</sup> CHEN Yan<sup>2</sup> LI Chaorong<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> School of Physics and Nuclear Energy Engineering, <sup>2</sup> School of Physics and Nuclear Energy Engineering Physics Experiment Center, Beihang University, Beijing 100191)

**Abstract** In the experiments of measuring lens's focal length, the low cost scheme of computer vision is used to replace the human eyes, and the image clarity based on the image gradient is used to overcome the low sensitivity of the human eyes to the clarity, so as to save time and reduce the error.

**Key words** focal length measurement; image gradient; clarity evaluation

在薄透镜焦距测量实验中,需要判断透镜成像的清晰位置。然而由于人眼评估清晰度的灵敏度低,在一定范围内均认为清晰,因此实验中常通过测读法(从左至右与从右至左各寻找一个清晰点,重复至少 5 次或以上)来减小误差。即便如此,仍然存在一定误差,同时多次重复测读耗费大量时间。本文基于计算机视觉,搭建由低成本摄像头、计算机组成的系统,实时评估成像的清晰度。实验结果表明,本系统可以减小误差,并且节省 80% 的测读时间,同时使用的摄像头成本约为 200 元,且不改变实验的其他步骤,可以在实验课程中推广使用。

### 1 实验原理

透镜焦距测量的常用方法有自准直法、物距

像距法、共轭法和平行光管法等。在近轴光线条件下,薄透镜的成像规律可用公式(1)表示为

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f} \quad (1)$$

以共轭法为例<sup>[1]</sup>,设凸透镜的焦距为  $f$ ,使物与屏的距离  $L > 4f$  并保持不变,见图 1。移动透镜至  $x_1$  处,在屏上成放大实像( $A_1 B_1$ ),再移至  $x_2$  处,成缩小实像( $A_2 B_2$ )。令  $x_1$  和  $x_2$  间的距离为  $a$ ,物到像屏的距离为  $b$ ,由式(1)和图 1 中所给出

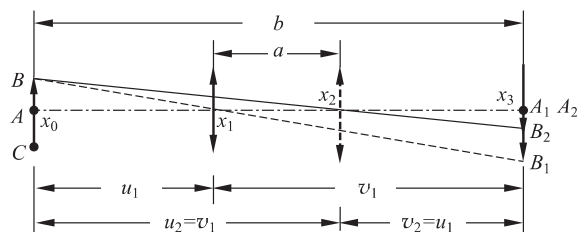


图 1 共轭法测凸透镜的焦距

收稿日期: 2017-09-13; 修回日期: 2018-06-19

通讯作者: 王慕冰,女,高级讲师,主要从事物理实验教学与研究,wangmubing@126.com。

引文格式: 程大骞,付文智,陈东杰,等. 基于图像梯度的透镜成像清晰度评估系统[J]. 物理与工程,2018,28(5):90-93.

的几何关系,可导出式(2),进而可求出焦距:

$$f = \frac{b^2 - a^2}{4b} \quad (2)$$

本系统使用摄像头对屏幕拍摄,输出实时清晰度评估,可用于任何测量焦距的实验方法。

## 2 系统概述

本文使用计算机视觉代替人眼,完成对透镜成像清晰度的评估。

硬件方面,本系统仅需电脑与低成本摄像头。本文使用 1/3 英寸 CMOS 感光元件的 USB 免驱动摄像头,售价约 200 元,方便在实验课程中推广。程序控制摄像头捕获一帧图像之后,首先进行预处理,包括去除椒盐噪声,并分割出成像区域;其次进行 Sobel 算子卷积,求得梯度图,再求梯度图的直方图统计;最后基于直方图,根据高梯度像素的数量和相对梯度的分布来评估成像清晰度。系统以 20Hz 运行,基于 OpenCV 实现<sup>[2]</sup>。系统运行框图见图 2。

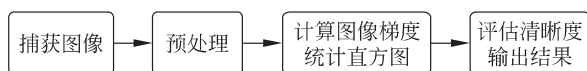


图 2 系统运行框图

为了提高系统的易用性与鲁棒性,本文借鉴测读法,实验中从左至右、从右至左各获取一个成像清晰的起始位置,取算术平均值作为成像清晰的位置。系统实物图如图 3 所示。

## 3 预处理

### 3.1 滤除椒盐噪声

由于在弱光下使用低成本摄像头,图像有明

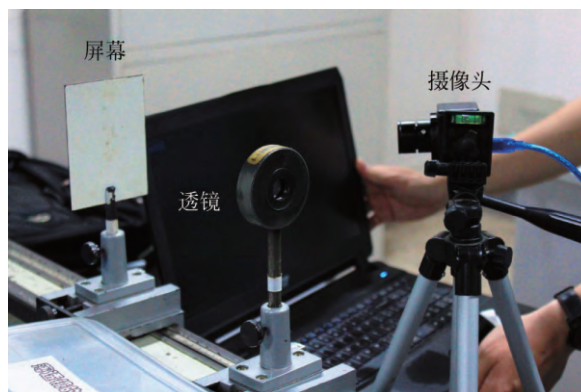


图 3 系统实物图

显的椒盐噪声,本文使用中值滤波过滤。相对于高斯滤波等降噪手段,中值滤波可更多地保留梯度。由图 4 可见,原图具有较明显的噪声,使用  $3 \times 3$  卷积核可以滤除一部分,使用  $5 \times 5$  卷积核可以基本滤除,因此使用后者。



图 4 原图(左)、 $3 \times 3$  卷积核中值滤波(中)、 $5 \times 5$  卷积核中值滤波(右)

### 3.2 对象提取

当成像较小时,由于透镜较小,屏幕周边会有光照影响,干扰之后的处理,需要滤除。

由于中心部位亮度显著大于周边光,统计直方图如图 5 所示(直方图略去低亮度部分),因此根据直方图,用二值化将高亮度部分滤出作为掩膜,再进行开运算消除暗噪声并放大掩膜,最后将得到的掩膜叠加在原图像上,得到提取之后的图像。

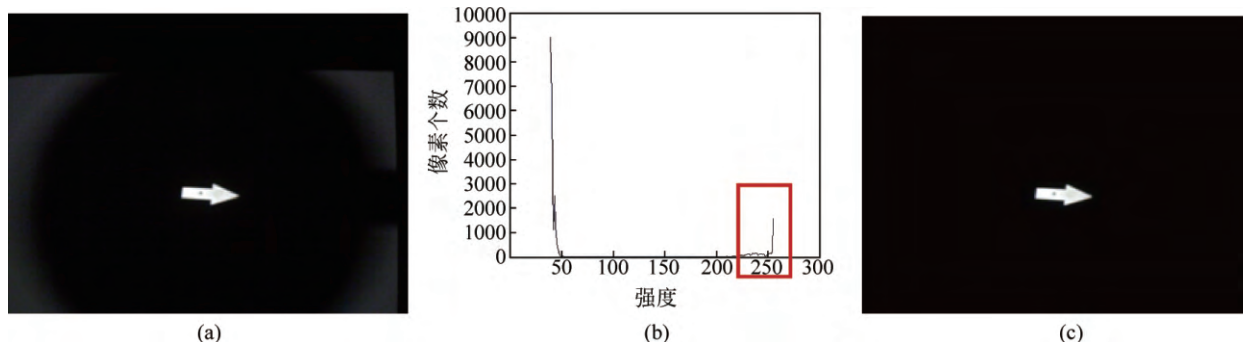


图 5 原图(a)、原图直方图分布(b)与对象提取结果(c)

#### 4 基于梯度评估清晰度

对焦清晰度评估算法非常成熟<sup>[3]</sup>,但在本实验中,场景单一、形状固定,而光照对比度大、亮度低、噪声较大,因此需要特殊设计算法,以克服以上约束。

本文提出的方法首先计算 Sobel 梯度图,并且对梯度图统计直方图分布。然后基于梯度图的直方图分布,评估成像清晰度。

##### 4.1 梯度图直方图

首先使用 Sobel 算子,得到预处理之后图像的梯度图。同样,使用不同大小的 Sobel 卷积核

可以得到不同结果,对比之后选用  $3 \times 3$  的卷积核,并求得直方图,如图 6 所示。

##### 4.2 基于直方图评估清晰度

由图 6 可看到,对焦清晰时边缘锐利,在梯度图中亮度高,亦即梯度图直方图中靠右的部分。图 7 为两张图像的梯度图局部与两梯度图的直方图,直观可见左图比右图更加锐利。

由图 7 两直方图可见,清晰图像的梯度分布更加靠右,也就是极高梯度的像素数更多。因此,我们同时考虑高梯度像素的数量与分布,设计算法。我们对梯度从高到低进行统计(即直方图从右到左),将某梯度值对应的像素个数与本梯度对

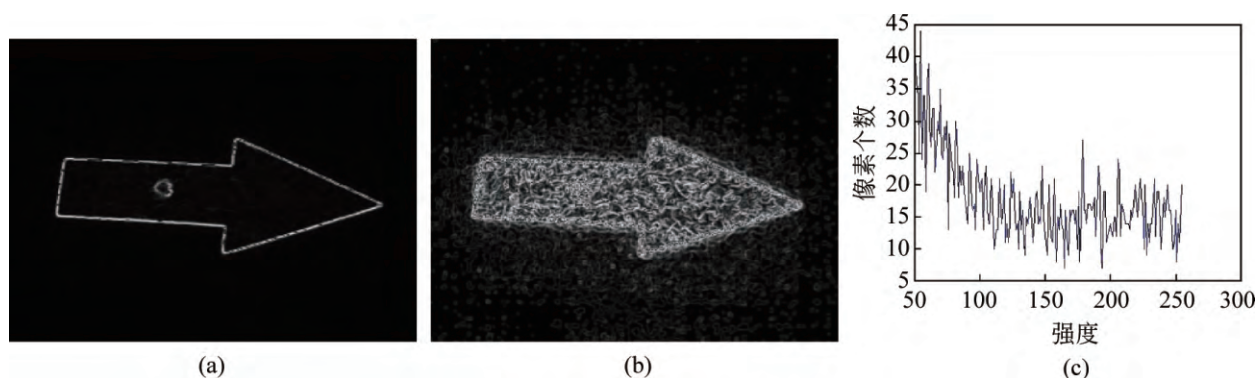


图 6 Sobel 梯度图与对应的直方图

(a)  $3 \times 3$  卷积核; (b)  $5 \times 5$  卷积核; (c) 对应的直方图

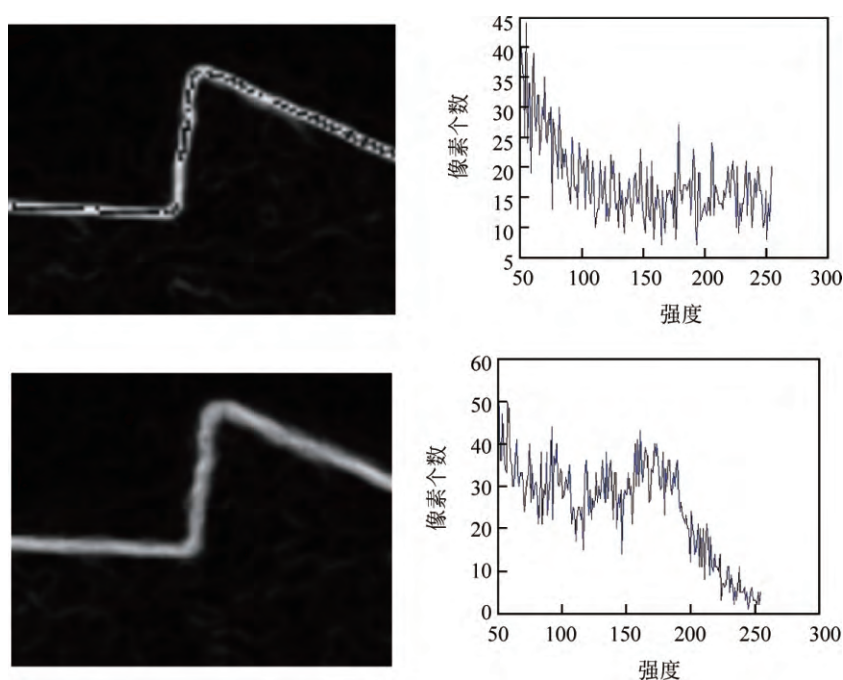


图 7 两幅图的梯度图局部与对应的直方图

应的权重相乘,再按梯度从高到低,以此把值相加,当和到达一定阈值时,以对应的梯度值为判断依据,称截止梯度  $n_{\text{off}}$ 。当截止梯度值高于一定值时,认为这幅图像是清晰的。权重的形式为指数,即满足式(3)。

本算法有 3 个参数,即分布权重底数  $a$ 、分布阈值  $u$  及总和阈值  $Sum_{\text{th}}$ 。实验中发现,本算法对参数选择并不敏感,本系统中选择  $a=1.95$ ,  $u=242$ ,  $Sum_{\text{th}}=4000$ 。最终将算法编写成应用程序。若评估清晰,则显示白色方框,如图 8 所示。

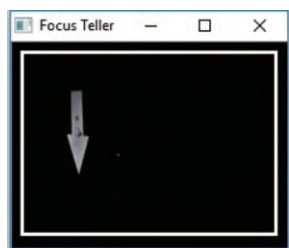


图 8 软件运行截图

使用者需要使用测读法,即将透镜(或其他光具)从左至右、从右至左各移动一次,记下来两次开始出现白框的位置,取算术平均值,即为清晰成像的位置。最终程序在 Python 下实现<sup>[4]</sup>,单帧图像的处理用时约为 5ms,可以实现 20Hz 的图像评估,满足实时性需求。

$$\begin{cases} \sum_{i=n_{\text{off}}}^{255} n_i a^{i-u} \leq Sum_{\text{th}} \\ \sum_{i=n_{\text{off}}-1}^{255} n_i a^{i-u} > Sum_{\text{th}} \end{cases} \quad (3)$$

## 5 实验设计与结果

本文使用计算机代替人眼评估清晰度,目的是减小误差并节省时间,实验围绕目的设计。

由于本文的评估对象是成像清晰度,亦即光具座的位置,难以获得真值,于是使用多人多次测读的方式获得一个误差很小的值来代替真值。具体方法是:4 人在同一实验条件下,分别测读 5 次,得到针对一个清晰成像点的 40 个数据(即 20 组),算术平均之后,可以得到方差仅为单次测量方差的

5%的测量值,作为真值。同时由本系统对同一条件下的清晰成像位置进行单次测量,与真值对比。

本文使用共轭法进行测量,即有一大一小两个清晰成像点,进而计算平均值,与计算机对比,结果如表 1 所列。

表 1 人与计算机测量结果对比

像的状态	人	计算机
大像左	90.104	89.61
大像右	91.789	92.14
清晰大像	90.947	90.875
小像左	72.773	72.81
小像右	74.922	74.91
清晰小像	73.847	73.86

结果表明,本系统可以输出较为精确的结果。同时,由于只需要单次往返测量,比实验中使用的 5 次测读法,可节省 80%的时间。

## 6 结语

本系统使用计算机和低成本摄像头,实现了对透镜成像清晰度的评估,可以减小误差,并且节省该实验的大量时间。系统基于图像梯度,利用高梯度像素的数量和分布,对成像清晰程度评估。本系统成本低廉,并且实现实时评估,可以应用在实验课程中。

## 参 考 文 献

- [1] 李朝荣,徐平,唐芳,等. 基础物理实验(修订版)[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2010.
- [2] MINICHINO J. OpenCV 图像处理编程实例[M]. 北京:机械工业出版社,2016.
- [3] 王任华,沈忙作. 自动对焦算法研究[J]. 光电工程,2000,27(4):11-13.  
WANG R H, SHEN M Z. An algorithm study for automatic focusing[J]. Opto-Electronic Engineering, 2000, 27(4): 11-13. (in Chinese)
- [4] Joe, Minichino. OpenCV 3 计算机视觉:Python 语言实现[M]. 北京:机械工业出版社,2016.