

# 免散瞳眼底照相机中粗精结合自动聚焦方法

陈 健<sup>1,2</sup> 郑绍华<sup>1</sup> 潘 林<sup>1</sup> 余 轮<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 福州大学数字媒体研究院, 福建 福州 350002  
<sup>2</sup> 福建工程学院信息科学与工程学院, 福建 福州 350108)

**摘要** 自动聚焦是免散瞳眼底照相机的一项关键技术,在分析眼底照相机成像原理及眼底图像特点的基础上,提出了一种应用于免散瞳眼底照相机的粗精结合自动聚焦方法。提出结合眼底图像视场特点的内接正方形固定聚焦窗口选择方法,并结合 Robert 梯度函数实现粗聚焦。采用基于局部信息熵的自动聚焦窗口选择算法得到精聚焦中的聚焦窗口,并提出基于  $9\text{ pixel}\times 9\text{ pixel}$  尺寸泽尼克正交矩的图像清晰度评价函数实现精聚焦。实验结果表明该方法中基于内接正方形的固定聚焦窗口选择方法具有更好的稳定性,精聚焦中的图像清晰度评价函数具有更高的灵敏度与实时性。

**关键词** 图像处理;自动聚焦;聚焦窗口;内接正方形;泽尼克正交矩

**中图分类号** TP391.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.1110003

## Fine and Rough Combined Auto-Focusing Method for Non-Mydriatic Fundus Camera

Chen Jian<sup>1,2</sup> Zheng Shaohua<sup>1</sup> Pan Lin<sup>1</sup> Yu Lun<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> *Research Academy of Digital Media, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350002, China*  
<sup>2</sup> *School of Information Science and Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou, Fujian 350108, China*)

**Abstract** Auto-focusing is one of the key issues in the non-mydriatic fundus camera, a fine and rough combined auto-focusing method is presented after analyzing imaging principle of the fundus camera and the retinal image characteristics. Inscribed square fixed focusing window selection method combined with characteristics of fundus image field is presented, and Robert gradient function is used to realize the rough focusing. The focusing window for fine focusing is selected through auto-focusing window selection algorithm based on local entropy, and image sharpness evaluation function based on Zernike orthogonal moment with  $9\text{ pixel}\times 9\text{ pixel}$  mask is presented to realize the fine focusing. The experimental results show that the focusing window method based on inscribed square is more stable, and proposed image sharpness evaluation function for fine focusing has better sensitiveness and realtime performance.

**Key words** image processing; auto-focusing; focusing window; inscribed square; Zernike orthogonal moments

**OCIS codes** 100.2000; 260.5950; 110.2970; 110.4155

## 1 引 言

糖尿病性视网膜病变(DR)已成为四大致盲眼病之一,是导致 20~70 岁年龄组糖尿病患者致盲的主要疾病之一,其失明率是非糖尿病患者的 25 倍<sup>[1]</sup>,早期发现并及时进行恰当的治疗可以显著降低视力丧失的风险。

近年来,数字眼底照相机已经成为 DR 临床检查和研究的重要工具。由于记录准确、客观,且敏感性和特异性较高<sup>[2]</sup>,眼底照相机被广泛应用于眼科流行病学和人群疾病的筛查。其中,免散瞳眼底照相机由于无需散瞳且具有较高的安全性,更有利于大规模筛查的展开。在免散瞳眼底照相机中,聚焦

**收稿日期**: 2014-04-18; **收到修改稿日期**: 2014-07-01

**基金项目**: 国家自然科学基金(60827002)、福建省教育厅教育科研项目(JB13148)

**作者简介**: 陈 健(1981—),男,博士研究生,讲师,主要从事医学图像处理、远程医疗等方面的研究。

E-mail: jchen321@126.com

**导师简介**: 余 轮(1952—),男,硕士,教授,主要从事图像处理、远程医疗等方面的研究。E-mail: cgifd@126.com

技术是不可或缺的组成部分。免散瞳眼底照相机由于光照较弱,得到的眼底图像较暗,常采用双光楔裂像聚焦技术<sup>[3]</sup>,该聚焦技术操作简单,但需要增加光学部件,增大了光学设计难度,而且通过裂像聚焦得到的图像不一定是清晰的<sup>[4]</sup>。基于图像处理的自动聚焦能有效地避免上述问题。不同于裂像聚焦方式,基于图像处理的自动聚焦是让眼底曲面直接和光学系统聚焦点重合,即在移动成像物镜的过程中,得到一组眼底图像序列,自动聚焦就是从中找到最清晰的图像。基于图像处理的自动聚焦系统主要包括三个组成模块:聚焦窗口选择,图像清晰度评价函数及搜索算法。目前,学者们针对眼底图像的特点已经提出了各种应用于眼底照相机的自动聚焦方法:Zeimer等<sup>[5]</sup>以粗细血管为感兴趣区域,提出基于频域变换的图像清晰度评价函数,即采用感兴趣区域图像的频域变换累加值作为评价函数值完成眼底图像的自动聚焦;潘林<sup>[4]</sup>针对眼底图像以血管为主要特征及眼底图像序列中的噪声问题,提出基于嵌入可信度边缘检测的眼底图像血管分割,并以血管边缘的累加值作为评价函数值完成眼底图像的精聚焦;Moscaritolo等<sup>[6]</sup>以视盘处的血管为感兴趣区

域,完成标准中值滤波与数学形态学基础上结合方差的图像清晰度评价函数的设计与应用;Marrugo等<sup>[7]</sup>同样以视盘为感兴趣区域,使用不同的无参考图像清晰度评价函数完成对眼底图像的聚焦测试。

本文以免散瞳眼底照相机中基于图像处理的自动聚焦为研究内容,在对眼底图像成像原理及特点进行说明的基础上,首先提出粗精结合的自动聚焦方案;然后,针对聚焦窗口选择问题,提出应用于粗聚焦的结合眼底图像视场特点的内接正方形固定聚焦窗口选择方法,并采用基于局部信息熵的自动聚焦窗口选择算法选择图像中的细节区域作为精聚焦的聚焦窗口;接着,针对免散瞳眼底照相机中眼底图像序列对比度低的问题,提出应用于精聚焦的结合  $9\text{ pixel} \times 9\text{ pixel}$  尺寸泽尼克正交矩的图像清晰度评价函数。实验结果证明了该方法的有效性。

## 2 眼底图像成像及特点

### 2.1 眼底照相机成像原理

眼底照相机照相流程如图 1 所示<sup>[4]</sup>。眼底图像聚焦是在瞳孔定位与聚焦基础上的准聚焦过程。

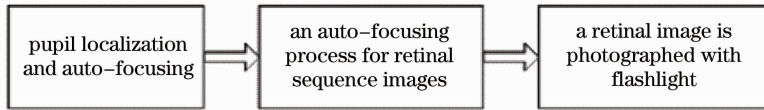


图 1 眼底照相流程图

Fig. 1 Fundus photography flow chart

在眼睛对外界物成像这一光学系统中,瞳孔的作用相当于光阑,限制进入眼球内部光束的孔径与能量。当使用强光照射眼底时,瞳孔受睫状肌的调节作用而有一定程度的收缩,限制了入射光与眼底反射光的孔径,使得光能量的利用率变得更低。此外,从光源的安全性角度,如果入射光辐射量太大,超过了人眼的光损伤阈值,会对眼底组织造成一定

的损伤,如视网膜灼伤、白内障等<sup>[8]</sup>。因此,眼底照相机中的照明光源一般采用红外光或近红外光<sup>[3,8]</sup>。

不同于常见成像系统[图 2(a)]中成像对象往往是处在不同物距上的物体,眼底照相机成像对象为眼底曲面[图 2(b)],其曲率半径约为  $12.5\text{ mm}$ 。

眼底照相机的成像光路都具有一定范围的景

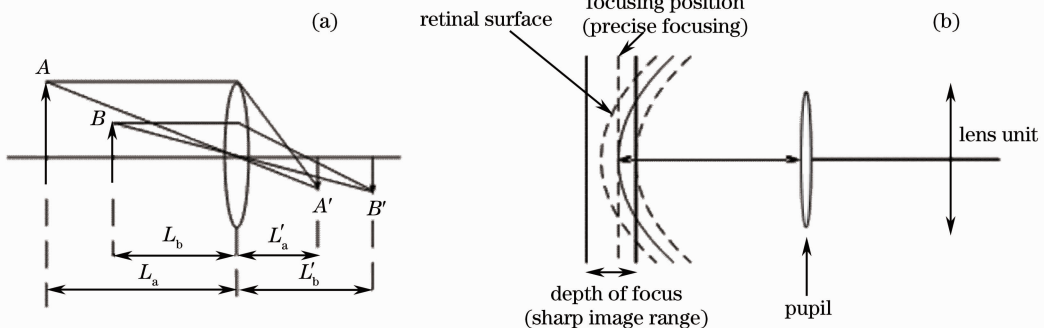


图 2 不同的成像系统。(a)常见成像系统;(b)眼底图像成像系统

Fig. 2 Different imaging systems. (a) Common imaging system; (b) retinal imaging system

深<sup>[8]</sup>，景深区域内眼底图像都是清晰的<sup>[4]</sup> [图 2(b)]。光学系统的景深和入瞳直径成反比，系统的入瞳直径越小，景深就越大<sup>[8]</sup>。眼底照相机选用入瞳直径为入瞳，正常人眼散瞳后直径为(6.89±1.39) mm，而免散瞳情况下瞳孔直径只有 3~4.5 mm。景深的大小还与镜头的焦距及光圈相关，正常人眼的有效焦距相对固定，约为 16.573 mm，而眼底照相机的光学系统光圈大，故其景深不大<sup>[8-10]</sup>。

根据光学成像原理[(1)式]，只要在眼底成像系统的景深区域内找到对应的感兴趣目标(区域)，即可得到相应的聚焦位置。

$$\frac{1}{L_a} + \frac{1}{L'_a} = \frac{1}{f}, \quad (1)$$

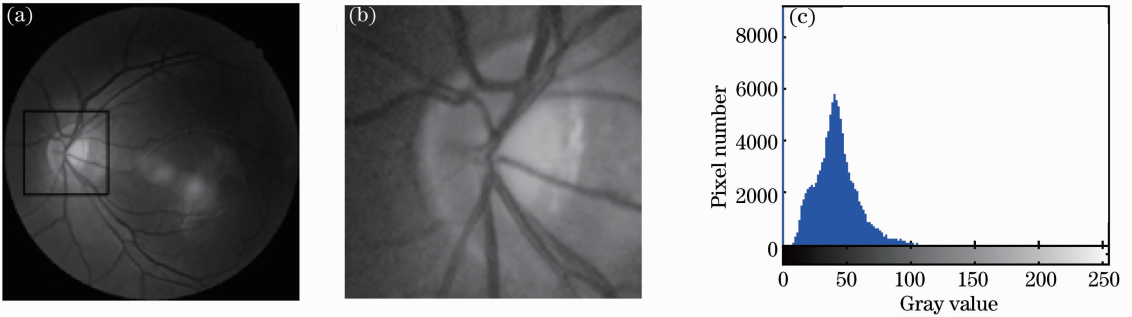


图 3 眼底图像及细节。(a)原始图像；(b)图像细节；(c)直方图

Fig. 3 Retinal image and detail. (a) Original image; (b) image detail; (c) histogram

此外，由(近)红外光源照明得到的图像对比度比较低，图 3(c)为图 3(a)所示原始眼底图像的直方图，可以看出除去边框(灰度级在 0~5 之间)的影响，眼底图像中自身的灰度级相差不大，对比度较低。

式中  $L_a$  表示物距,  $L'_a$  表示像距,  $f$  表示镜头焦距。

## 2.2 眼底图像的特点

普通电荷耦合器件(CCD)在低光照环境下所采集的图像往往细节不清晰<sup>[3]</sup>,不适用于基于图像处理的自动聚焦方法。因此,系统中采用低照度 CCD 作为眼底图像序列的采集设备。低照度 CCD 和成像物镜配合使用以获得被测对象的图像,当被测对象的信号较弱,并且有效面积较小时,由于器件本身的电子噪声和镜头成像误差的影响,会带入较大的噪声(主要为读出噪声),成为影响图像后续处理的主要因素。如图 3(b)即图 3(a)所示低照度 CCD 所拍摄眼底图像的细节(黑框部分),可以看出其噪声较为明显。

## 3 免散瞳眼底照相机自动聚焦流程

提出的应用于免散瞳眼底照相机粗精结合的自动聚焦流程如图 4 所示。

为了满足实时性,粗聚焦过程采用固定聚焦窗

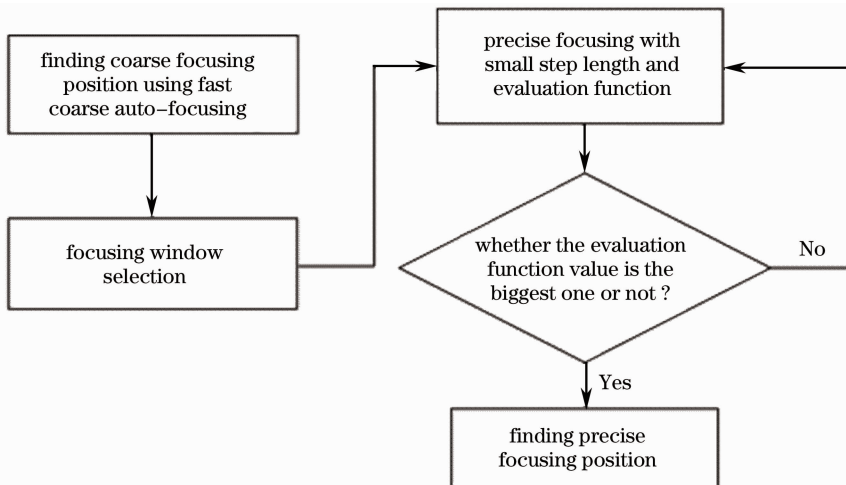


图 4 免散瞳眼底照相机自动聚焦流程图

Fig. 4 Auto-focusing flow chart for non-mydratic fundus camera

口选择法、Robert 梯度函数及较大等步长爬山算法获得准正焦位置,选择 Robert 梯度函数是因为该函数具有计算量小、响应快、抗干扰能力强的优点,从而在短时间内确定一个较小的聚焦区域。眼底照相机对自动聚焦系统精度要求高,因此精聚焦必不可少。在粗聚焦的基础上,采用自动聚焦窗口选择算法完成对图像细节区域的选择,并提出结合眼底图像低对比度特点的图像清晰度评价函数,精聚焦过程采用自适应变步长爬山法作为峰值搜索算法。

#### 4 免散瞳眼底图像聚焦窗口选择

自动聚焦时进行窗口选择的主要原因包括:1)选择聚焦窗口可以减少后续图像处理的计算量与硬件消耗;2)图像中一般包括目标与背景区域两部分,背景区域会对聚焦曲线产生负面影响,使得目标无法正确聚焦。以下将分别针对粗精结合的自动聚焦过程提出不同的聚焦窗口选择算法。

##### 4.1 粗聚焦中基于内接正方形的聚焦窗口选择方法

实时性是粗聚焦的重要特征之一,采用固定聚焦窗口选择算法可保证将窗口选择算法的运行时间降至最低。

眼底图像视场为圆形区域,而其周围黑色边框区域不反映任何眼底信息,结合此特点,提出以视场所对应圆形的内接正方形作为聚焦窗口的聚焦窗口选择方法,如图 5(a)中的虚线框所示。图 5(b)为实验系统所获取眼底图像采用该方案得到的聚焦窗口结果。该方法提取的聚焦窗口去除了无任何信息的黑

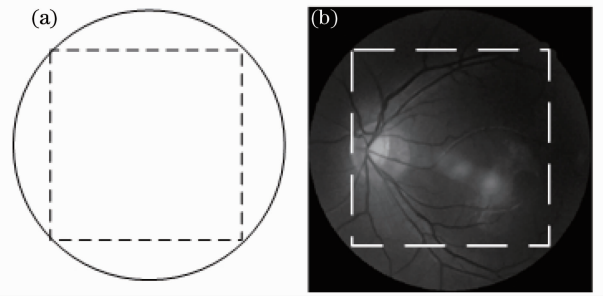


图 5 基于内接正方形的聚焦窗口选择算法。(a)内接正方形法;(b)聚焦窗口提取结果

Fig.5 Focusing window selection method based on inscribed square. (a) Inscribed square method; (b) focusing window selection result

色边框区域的影响,同时也保留了大部分主要信息。

##### 4.2 精聚焦中基于局部信息熵的自动聚焦窗口选择算法

眼底图像的特征如图 6(a)所示,主要包括血管、视神经乳头(即视盘)及黄斑中央凹等,其中视盘位于黄斑中央凹颞侧约 3 mm 处,直径约为 1.5 mm,呈圆盘状。应用于眼底照相机的自动聚焦方法主要是以血管<sup>[4-6]</sup>或视盘<sup>[7]</sup>为感兴趣区域,其中文献[7]说明了针对视盘的聚焦窗口选择算法,但文献[4-6]均未提出针对血管的聚焦窗口选择算法。此外,由于免散瞳眼底照相机的视场角度较小(一般在 20°~45°之间),视盘可能不会完整的出现在成像物镜中,而在某些角度下,甚至无法出现在成像物镜内[图 6(b)],因此,采用视盘作为主要特征存在一定的局限。

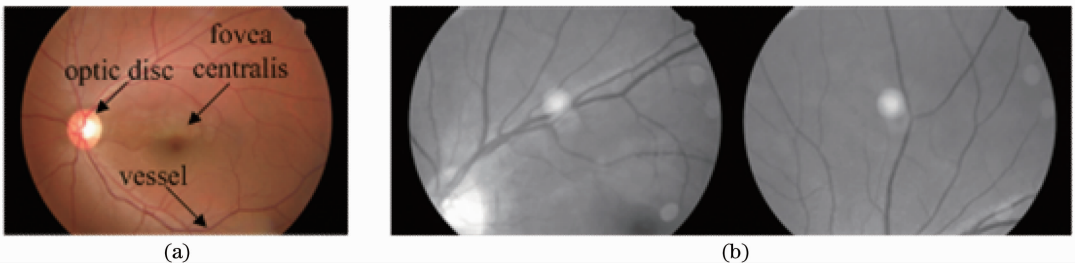


图 6 眼底图像。(a)眼底图像特征;(b)不同角度眼底图像

Fig. 6 Retinal image. (a) Retinal image characteristics; (b) retinal image with different angles

通过对眼底图像的特点及现有主要自动聚焦窗口选择算法分析可知,眼底图像中的细节区域分布较广,但细节密集区域又相对集中,即血管密集交错区域。因此,将在精聚焦中引入文献[11]提出的基于局部信息熵的自动聚焦窗口选择算法。

基于局部信息熵的自动聚焦窗口选择算法首先计算图像的局部信息熵,如(2)式所示:

$$E = - \sum_{i=0}^{L-1} P_i \log P_i, \quad (2)$$

式中  $L$  表示区域中最大的灰度级。 $P_i$  表示灰度级  $i$  的概率[(3)式所示]。

$$P_i = \frac{n_i}{M \times N}, \quad (3)$$

式中  $n_i$  表示灰度级为  $i$  的像素点个数, $M \text{ pixel} \times N \text{ pixel}$  表示图像划分后区域的大小。

图 7 即原始眼底图像及其在不同大小区域划分情况下局部信息熵的分布情况,图中区域块灰度值越小,表明对应区域的信息熵越大,细节越丰富。如果划分区域过大,不利于目标的准确提取,尤其是一些小目标,如果划分区域过小,则边缘区域可能成为

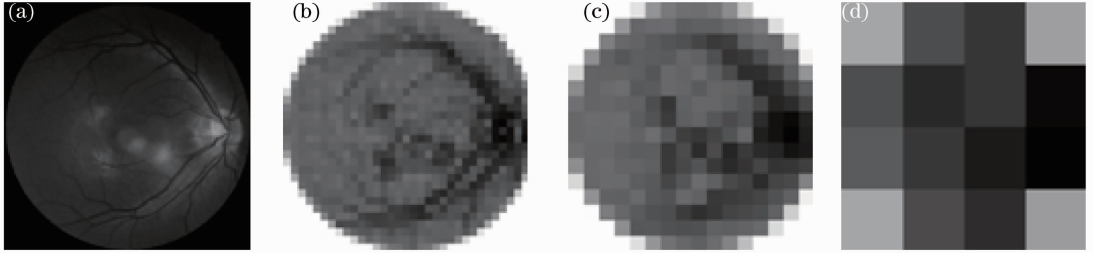


图 7 不同大小区域划分下的局部信息熵图。(a)原始图像；(b) 32×32 区域划分；(c) 16×16 区域划分；(d) 4×4 区域划分

Fig. 7 Local entropy images with different sizes of regional division. (a) Original image; (b) 32×32 division; (c) 16×16 division; (d) 4×4 division

## 5 精聚焦中基于 9 pixel×9 pixel 尺寸泽尼克正交矩的图像清晰度评价函数

### 5.1 算法的提出

正如前述,眼底图像的对比度低且含有一定的噪声,尤其是免散瞳眼底相机,目前应用于眼底照相机的图像清晰度评价函数均未就此问题进行深入研究。此外,传统的图像清晰度评价函数在对低对比度图像聚焦时得到的聚焦曲线灵敏度往往不高<sup>[12]</sup>。针对上述问题,学者们提出了不同的图像清晰度评价函数实现聚焦曲线的生成,包括频率变换改进算法<sup>[13-14]</sup>,去噪基础上噪声密度自适应的对比度测量方法<sup>[12]</sup>,区域对比度法<sup>[15]</sup>及矩函数法<sup>[16]</sup>。

相对于文献[12-15]的方法,文献[16]采用的泽尼克正交矩法具有较好的性能,该方法结合文献[17]计算的 7 pixel×7 pixel 尺寸模板得到不同阶泽尼克正交矩  $Z_{11}$ 、 $Z_{20}$ 、 $Z_{31}$ 、 $Z_{40}$ ,将不同阶泽尼克矩作为图像清晰度评价函数进行了实验分析,在分析不同聚焦曲线的基础上,整理得到最终的图像清晰度评价函数。结合上述分析结果,本文将结合文献[18]提出的结合 9 pixel×9 pixel 尺寸模板的不同阶泽尼克正交矩  $Z_{11}$ 、 $Z_{20}$ 、 $Z_{31}$ 、 $Z_{40}$  进行进一步的实验分析,并提出具有更优性能的图像清晰度评价函数。

### 5.2 泽尼克正交矩

Teague 等以复域泽尼克多项式为基,得到了具有正交、旋转不变性的泽尼克正交矩,其在特征表达

能力和低的噪声敏感度方面有较大的优越性<sup>[19]</sup>。方法将对整幅图像进行 4×4 划分的基础上(见 6.2 节),选择出信息熵最大的区域作为最终的聚焦窗口。此外,为了减少后续处理的计算量,首先对原始图像进行直接下采样。

能力和低的噪声敏感度方面有较大的优越性<sup>[19]</sup>。

$n$  阶泽尼克矩多项式  $V_m(\rho, \theta)$  定义为在极坐标系中  $\rho, \theta$  的函数:

$$V_m(\rho, \theta) = R_m(\rho) \exp(im\theta), \quad (4)$$

式中  $m, n$  属于整数并满足条件为:  $n \geq 0, n - |m|$  为偶数且  $|m| \leq n, i$  为虚数单位,实数值的径向多项式  $R_m(\rho)$  由下式给出,具体如表 1 所示:

$$R_m(\rho) = \sum_{s=0}^{(n-|m|)/2} \frac{(-1)^s (n-s)! \rho^{n-2s}}{s! \left(\frac{n+|m|}{2} - s\right)! \left(\frac{n-|m|}{2} - s\right)!}. \quad (5)$$

表 1 径向多项式  $R_m(\rho)$  的表达式

Table 1 Expression of radial polynomial  $R_m(\rho)$

$n \backslash m$	0	1	2	3	4
0	1	—	$2\rho^2 - 1$	—	$6\rho^4 - 6\rho^2 + 1$
1	—	$r$	—	$3\rho^2 - 2\rho$	—
2	—	—	$\rho^2$	—	$4\rho^4 - 3\rho^2$
3	—	—	—	$\rho^3$	—
4	—	—	—	—	$\rho^4$

泽尼克多项式在单位圆  $x^2 + y^2 = 1$  内是正交的<sup>[20]</sup>,即:

$$\iint_{x^2+y^2 \leq 1} V_m^*(\rho, \theta) V_n(\rho, \theta) dx dy = \frac{\pi}{n+1}, \quad (6)$$

当且仅当  $n=p, m=q$ , 其中 \* 表示复共轭。

图像  $f(x, y)$  的二维泽尼克矩定义为

$$Z_{nm} = \frac{n+1}{\pi} \iint_{x^2+y^2 \leq 1} f(x, y) V_m^*(\rho, \theta) dx dy, \quad (7)$$

在离散条件下,图像  $f(x,y)$  的二维泽尼克矩在  $x^2 + y^2 \leq 1$  条件下又可以表达为

$$Z_{mn} = \sum_x \sum_y f(x,y) V_{mn}^*(\rho, \theta). \quad (8)$$

### 5.3 基于 9 pixel × 9 pixel 尺寸泽尼克矩的图像清晰度评价函数

在离散情况下,泽尼克矩的计算通常是泽尼克模板与图像进行卷积得到,用单位圆进行采样,令图像  $f(x,y) = 1$ ,模板  $M_{mn}$  为

$$M_{mn} = \iint_{x^2+y^2 \leq 1} V_{mn}^*(\rho, \theta) dx dy. \quad (9)$$

可见,模板  $M_{mn}$  在图像正交矩的计算过程中起主导作用,不同的模板可推导出不同的  $Z_{mn}$ 。Ghosal 等<sup>[21]</sup>最早推导了泽尼克正交矩基于 5 pixel × 5 pixel 尺寸的泽尼克矩  $Z_{00}$ 、 $Z_{10}$ 、 $Z_{20}$ ;在此基础上,高世一等<sup>[17]</sup>在 Ghosal 的基础上,计算得到泽尼克正交矩基于 7 pixel × 7 pixel 尺寸的泽尼克矩  $Z_{00}$ 、 $Z_{10}$ 、 $Z_{20}$ 、 $Z_{31}$ 、 $Z_{40}$ ;韩瑞雨等<sup>[16]</sup>采用 7 pixel × 7 pixel 尺寸得到的不同泽尼克矩完成了图像清晰度评价函数的构建,如下式所示:

$$F_{Zernike} = \sum_{k=1}^4 W_k Z_k, \quad (10)$$

式中  $Z_k$  表示图像 1 至 4 阶的泽尼克矩,  $W_k$  表示权重系数。

在 7 pixel × 7 pixel 尺寸的基础上,引入文献[18]计算得到的 9 pixel × 9 pixel 尺寸,如图 8 所示。

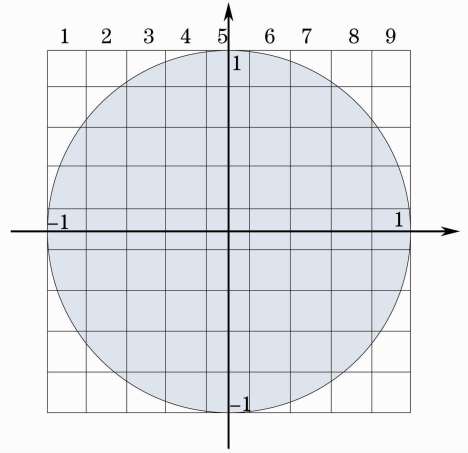


图 8 单位圆被划分为 9 pixel × 9 pixel 尺寸  
Fig. 8 Circular kernel of 9 pixel × 9 pixel masks

令  $f(x,y) = 1$  为图 8 所示第  $i$  行,第  $j$  列的正方形面积,  $C$  表示由  $x^2 + y^2 \leq 1$  围成的单位圆面积,模板  $M_{mn}$  的  $i$  行  $j$  列系数为  $M_{mn-ij}$ ,对应的积分域表示为  $\Omega_{ij} = C \cap S_{ij}$ ,则有:

$$M_{mn-ij} = \iint_{\Omega_{ij}} V_{mn}^*(\rho, \theta) dx dy, \quad (11)$$

由(11)式与(8)式可分别计算得到 9 pixel × 9 pixel 尺寸下的泽尼克正交矩  $Z_{11}$ 、 $Z_{20}$ 、 $Z_{31}$ 、 $Z_{40}$ ,表 2 至表 4 分别对应  $Z_{11}$  及  $Z_{40}$  的模板。

表 2  $Z_{11}$  模板的实部

Table 2 Real part of  $Z_{11}$  mask

0.0000	-0.0012	-0.0109	-0.0094	0.0000	0.0094	0.0109	0.0012	0.0000
-0.0016	-0.0254	-0.0219	-0.0110	0.0000	0.0110	0.0219	0.0254	0.0016
-0.0215	-0.0329	-0.0219	-0.0110	0.0000	0.0110	0.0219	0.0329	0.0215
-0.0380	-0.0329	-0.0219	-0.0110	0.0000	0.0110	0.0219	0.0329	0.0380
-0.0434	-0.0329	-0.0219	-0.0110	0.0000	0.0110	0.0219	0.0329	0.0434
-0.0380	-0.0329	-0.0219	-0.0110	0.0000	0.0110	0.0219	0.0329	0.0380
-0.0215	-0.0329	-0.0219	-0.0110	0.0000	0.0110	0.0219	0.0329	0.0215
-0.0016	-0.0254	-0.0219	-0.0110	0.0000	0.0110	0.0219	0.0254	0.0016
0.0000	-0.0012	-0.0109	-0.0094	0.0000	0.0094	0.0109	0.0012	0.0000

表 3  $Z_{11}$  模板的虚部

Table 3 Imaginary part of  $Z_{11}$  mask

0.0000	-0.0016	-0.0215	-0.0380	-0.0434	-0.0380	-0.0215	-0.0016	0.0000
-0.0012	-0.0254	-0.0329	-0.0329	-0.0329	-0.0329	-0.0329	-0.0254	-0.0012
-0.0109	-0.0219	-0.0219	-0.0219	-0.0219	-0.0219	-0.0219	-0.0219	-0.0109
-0.0094	-0.0110	-0.0110	-0.0110	-0.0110	-0.0110	-0.0110	-0.0110	-0.0094
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0094	0.0110	0.0110	0.0110	0.0110	0.0110	0.0110	0.0110	0.0094
0.0109	0.0220	0.0219	0.0219	0.0219	0.0219	0.0219	0.0220	0.0109
0.0012	0.0254	0.0329	0.0329	0.0329	0.0329	0.0329	0.0254	0.0012
0.0000	0.0016	0.0215	0.0380	0.0434	0.0380	0.0215	0.0016	0.0000

表 4  $Z_{40}$  模板  
Table 4  $Z_{40}$  mask

0.0000	0.0017	0.0116	0.0079	0.0051	0.0079	0.0116	0.0017	0.0000
0.0017	0.0114	-0.0149	-0.0223	-0.0219	-0.0223	-0.0149	0.0114	0.0017
0.0116	-0.0149	-0.0200	-0.0057	0.0019	-0.0057	-0.0200	-0.0149	0.0116
0.0079	-0.0223	-0.0057	0.0216	0.0335	0.0216	-0.0057	-0.0223	0.0079
0.0051	-0.0219	0.0019	0.0335	0.0470	0.0335	0.0019	-0.0219	0.0051
0.0079	-0.0223	-0.0057	0.0216	0.0335	0.0216	-0.0057	-0.0223	0.0079
0.0116	-0.0149	-0.0200	-0.0057	0.0019	-0.0057	-0.0200	-0.0149	0.0116
0.0017	0.0114	-0.0149	-0.0223	-0.0219	-0.0223	-0.0149	0.0114	0.0017
0.0000	0.0017	0.0116	0.0079	0.0051	0.0079	0.0116	0.0017	0.0000

针对  $9 \text{ pixel} \times 9 \text{ pixel}$  尺寸所得泽尼克矩的不同,对(10)式进行修正,得到如下式所示应用于眼底图像自动聚焦的图像清晰度评价函数:

$$F_{\text{Zernike}} = \sum_{n=0}^4 \sum_{m=0}^n W_{nm} Z_{nm}, \quad (13)$$

式中  $Z_{nm}$  代表  $9 \text{ pixel} \times 9 \text{ pixel}$  尺寸下的不同阶不同次数的泽尼克矩,  $W_{nm}$  代表不同权重系数,  $n$  与  $m$  必须满足  $n$  阶泽尼克矩多项式定义中的要求。

经过实验,最终选择  $Z_{40}$  为眼底图像精聚焦的

图像清晰度评价函数(见 6.3 节),权重  $W_{nm}$  取 1。

## 6 实验分析

为了验证算法的有效性,实验采用免散瞳眼底相机所获取的眼底图像序列,实验中采集多组不同的图像序列分别用于不同的实验分析过程。眼底图像序列大小为  $480 \text{ pixel} \times 640 \text{ pixel}$ ,其中主要信息区域大小为  $420 \text{ pixel} \times 420 \text{ pixel}$ ,如图 9 所示。

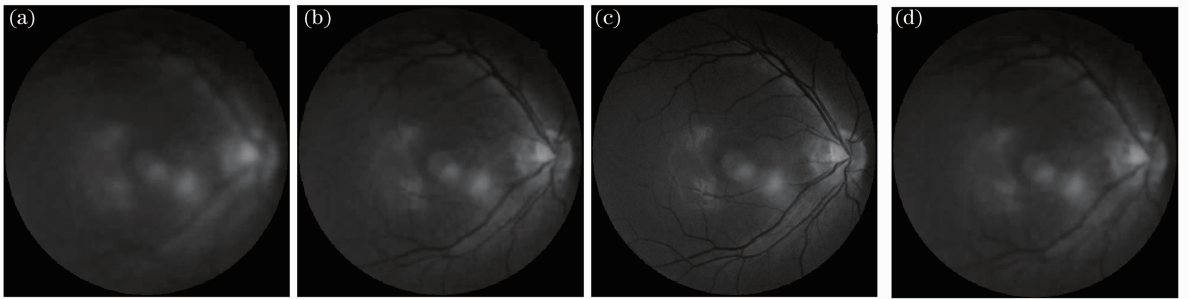


图 9 离焦-正焦-离焦灰度图像序列。(a)较大离焦;(b)离焦;(c)正焦;(d)离焦

Fig. 9 Defocus-focus-defocus gray image sequence. (a) Larger defocus; (b) defocus; (c) focus; (d) defocus

实验中用于测试的计算机为 2.27 GHz Intel (R) Core (TM) i5 CPU, 4.0 G RAM, 采用 Windows 7 操作系统,并结合 Matlab 7.0 仿真平台对主要算法进行仿真与分析。

### 6.1 粗聚焦中自动聚焦方法实验分析

为了验证粗聚焦中基于内接正方形的聚焦窗口选择方法的有效性,引入文献[22]的中央区域法及文献[23]的多区域选择法这两种典型的固定聚焦窗口选择方法进行对比,结合粗聚焦中使用的 Robert 梯度函数生成多组聚焦曲线<sup>[24]</sup>,如图 10 所示。图 10 为其中两组图像序列得到的聚焦曲线图,其中图 10(c)为细节不在中央区域的眼底图像[图 10(a)所示]所得聚焦曲线,图 10(c)中可以看出,由于细节未处于中央区域,采用中央区域法得到的聚焦曲

线灵敏度较低,而且出现局部极值,而多区域选择法由于引入了四个角落的边框,所以同中央区域法一样,灵敏度也低于提出的算法,且同样出现局部极值。图 10(d)为细节处于中央区域的眼底图像[图 10(b)所示]所得聚焦曲线,当细节处于中央区域时,中央区域法具有最好的灵敏度,提出的算法的灵敏度次之,且两种算法都未受噪声影响,但多区域选择法因为引入了边框区域,灵敏度仍然最差且受到噪声的影响,出现局部极值。

表 5 为采用上述三种聚焦窗口选择法的图像清晰度评价函数运行时间比较,从表中可以看出,该方法与文献[23]的多区域选择法,都高于文献[22]的中央区域法,主要原因是文献[22]的中央区域法所选择的窗口最小,仅占整幅图像的  $1/9$ 。

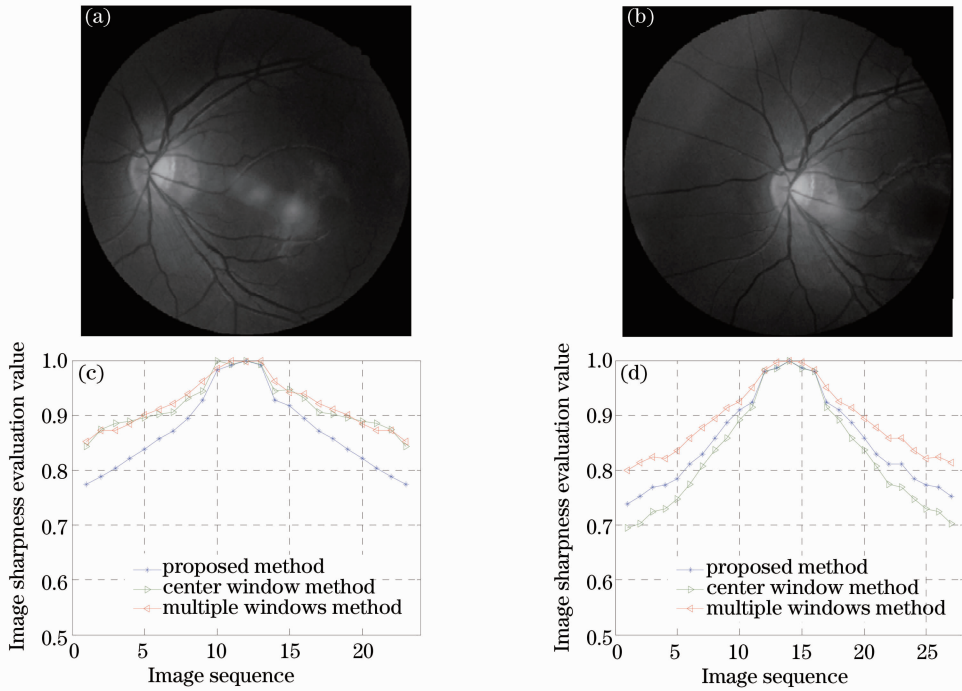


图 10 不同的固定聚焦窗口选择算法生成的聚焦曲线。(a)中央非细节区域眼底图像;(b)中央为细节区域眼底图像;  
(c)中央非细节区域聚焦曲线;(d)中央为细节区域聚焦曲线

Fig. 10 Focus curve with different fixed focusing window methods. (a) Fundus image without detail in the center part; (b) fundus image with detail in the center part; (c) focus curve without detail in the center part; (d) focus curve with detail in the center part

表 5 固定聚焦窗口选择算法的时间对比

Table 5 Runtime comparison with different fixed focusing window methods

Different methods	Center window method	Multiple windows method	Proposed method
Time /ms	1.2	5.2	5.0

## 6.2 基于局部信息熵的自动聚焦窗口选择算法参数选择及稳定性分析

对于眼底图像而言,如果聚焦窗口过大,周围非细节区域会对细节区域产生影响,降低聚焦曲线的灵敏度;如果聚焦窗口过小,则容易受到噪声的影响,因此,将对聚焦窗口的大小进行实验分析。

实验中采取如下方案:首先对整幅图像进行2:1的下采样,即图像大小由420 pixel×420 pixel下采样为210 pixel×210 pixel。针对不同的图像特点,对图像分别进行2×2、3×3及4×4区域划分,采用基于局部信息熵的自动聚焦窗口选择算法,结合应用于精聚焦的基于9 pixel×9 pixel尺寸的泽尼克正交矩的图像清晰度评价函数进行实验,为了进一步对比,实验中引入不进行区域划分的整幅图像进行对比。

由于精聚焦中的图像清晰度较高,因此,实验中采用清晰度较高的眼底图像序列进行实验。通过多

组图像序列,得到如图11所示聚焦曲线图。从图中可以看出,2×2、3×3及4×4区域划分情况下聚焦窗口所得到聚焦曲线基本一致,而以整幅图像进行聚焦时,由于边框等因素的影响,峰值出现了偏离。由于区域划分的越小,后续参与计算的像素数目就越少,考虑到聚焦实时性问题,最终采用4×4区域划分。

尽管精聚焦过程是在粗聚焦基础上的准聚焦过程,眼底图像仍可能处于离焦状态,且离焦程度是不确定的,自动聚焦窗口选择方法必须保证在不同的离焦情况下对应窗口位置还能保持相对稳定,如果在离焦情况下,窗口偏离图像细节区域,则会降低聚焦曲线的灵敏度。实验从多组眼底图像序列中提取出不同离焦程度图像,并采用4×4区域划分下基于局部信息熵的自动聚焦窗口选择算法进行窗口提取,如图12所示。从图中可以看出,不同离焦程度所取得的聚焦窗口位置稳定。



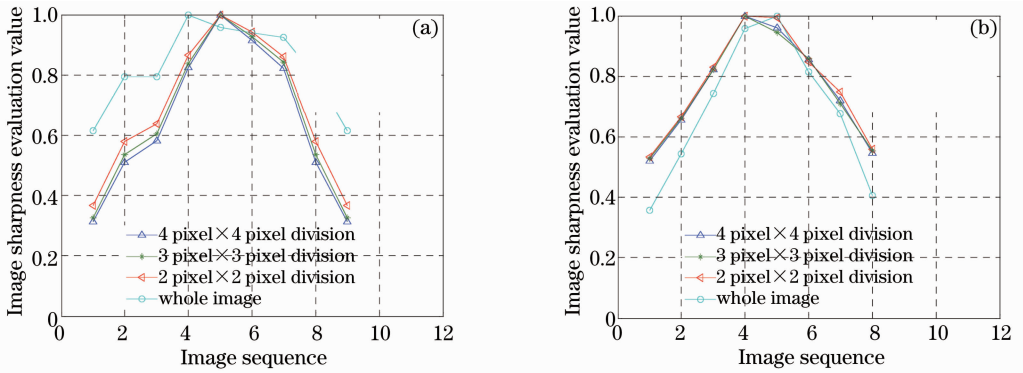


图 11 不同大小聚焦窗口情况下的聚焦曲线图

Fig. 11 Focusing curve with different sizes of focusing window

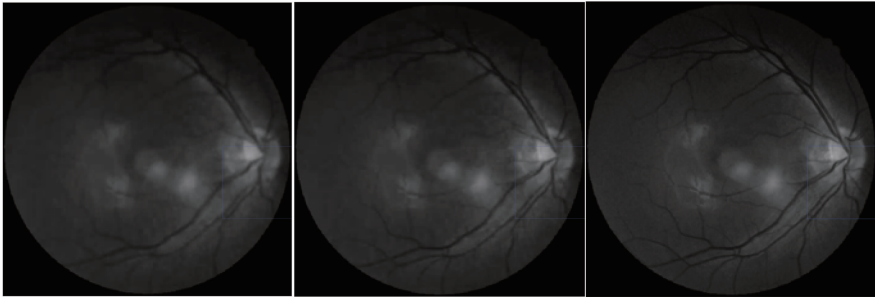


图 12 不同离焦图像的聚焦窗口提取结果

Fig. 12 Focusing window selection results with different defocusing images

结合上述实验，以下针对精聚焦的图像清晰度评价函数实验均采用  $4 \times 4$  区域划分下的基于局部信息熵的自动聚焦窗口选择算法得到的图像序列进行。

### 6.3 基于 $9 \text{ pixel} \times 9 \text{ pixel}$ 尺寸泽尼克正交矩的图像清晰度评价函数的选择

采用  $9 \text{ pixel} \times 9 \text{ pixel}$  尺寸获取得到  $Z_{11}$ 、 $Z_{20}$ 、 $Z_{31}$ 、 $Z_{40}$  4 个泽尼克矩，以下将通过实验从中选择合理泽尼克矩作为应用于精聚焦的图像清晰度评价函数。

图 13 为其中两组图像序列采用不同阶泽尼克矩得到的聚焦曲线，图中可以看出，不同阶泽尼克矩得到的聚焦曲线差别明显，其中  $Z_{40}$  具有最高的灵敏度， $Z_{11}$  的灵敏度最低，除  $Z_{11}$  外，不同阶泽尼克矩基本都具有较好的单峰性与无偏性。

文献[16]指出泽尼克矩的阶数越高则抗干扰能力越弱，主要针对较大离焦情况下的平滑区域，如图 14 所示。图 14 是引入应用于粗聚焦的离焦程度较大的图像序列采用上述泽尼克矩得到聚焦曲线，可以看出，当离焦程度较大时， $Z_{40}$  在聚焦曲线的相对

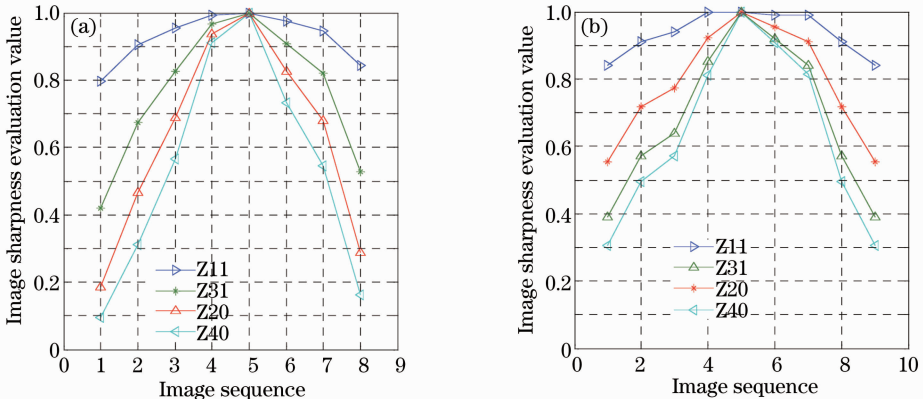


图 13 不同阶泽尼克矩所得聚焦曲线

Fig. 13 Focusing curves with different orders of Zernike moment

平滑区域出现了局部极值,即在远离正焦区域时, $Z_{40}$ 的抗干扰能力减弱。但与图 13 相似, $Z_{40}$ 在正焦区域附近,即精聚焦范围内未受到图像噪声的干扰,

其主要原因在于当图像进行精聚焦时,图像序列的清晰度较高,特征相对明显,而图像中噪声的干扰作用就相应减少。

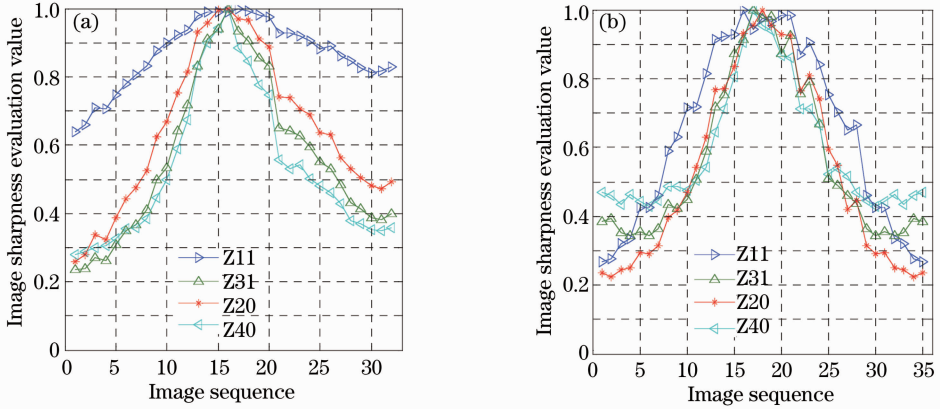


图 14 大离焦图像情况下不同阶泽尼克矩所得聚焦曲线

Fig. 14 Focusing curves with different orders of Zernike moment under larger defocusing images

综合上述分析,最终选择  $Z_{40}$  作为精聚焦时的图像清晰度评价函数。

[13]与文献[14]一样,均采用频域变换(离散余弦变换)的方法进行图像清晰度评价函数的设计,具有代表性。

#### 6.4 基于 $9 \text{ pixel} \times 9 \text{ pixel}$ 尺寸泽尼克正交矩的图像清晰度评价函数有效性分析

为验证算法的有效性,实验中引入多组不同于 6.3 节中所采用的眼底图像序列。图 15 所示为上述三种算法与提出算法的对比结果。从定性分析的角度可以看出,不同的算法均具有单峰性、无偏性且受噪声干扰较小,其中文献[16]与文献[15]的算法灵敏度较低,而提出的算法的灵敏度最高。

为了对比应用于低对比度图像的不同图像清晰度评价函数的性能,实验中引入文献[13,15-16]中的不同算法与提出的算法进行比较。选择上述三个算法主要原因如下:文献[16]同样采用泽尼克正交矩,而提出的算法是对其的改进,文献[15]采用基于区域对比度的时域方法,具有一定的特点,而文献

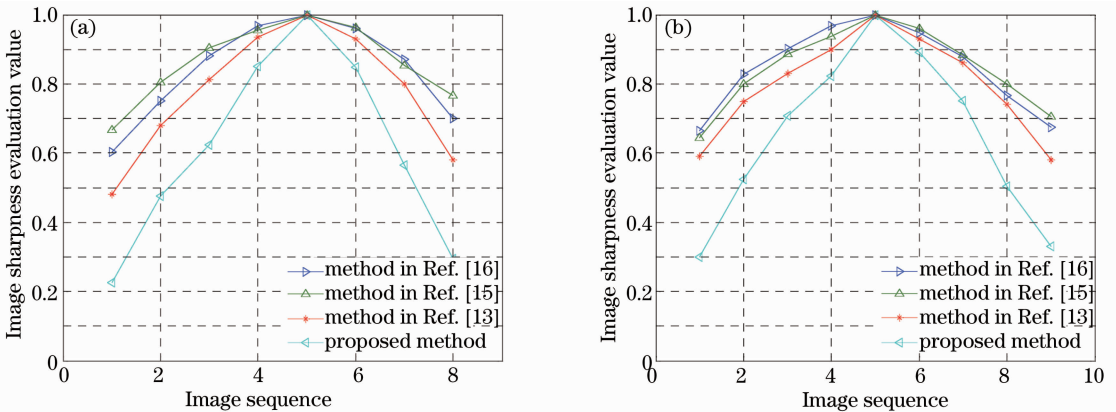


图 15 应用于低对比度图像的不同图像清晰度评价函数聚焦曲线

Fig. 15 Focusing curve with different image sharpness evaluation functions for low contrast image

表 7 为上述不同图像清晰度评价函数通过多组图像得出的定量指标对比结果,文中从文献[25-26]中引入清晰度比率、评价值变化范围、灵敏度这几个定量指标并加入运行时间比较,其中运行时间为多帧图像运行时间的平均值。从表中可以看出,提出的算法的实时性较好,仅次于文献[13],且与灵

敏度相关的三个定性指标方面,提出的算法均为最优。

为了对比应用于眼底图像自动聚焦的不同图像清晰度评价函数的性能,文中引入文献[4-7]与提出的算法进行比较。所引入的文献分别采用了频域函数<sup>[5]</sup>,基于滤波处理的方差函数<sup>[6]</sup>,无参考图像清

晰度评价函数<sup>[7]</sup>及基于血管边缘检测的方法<sup>[4]</sup>取得图像清晰度评价函数。需要说明的是,文献[4]与提出的算法一样,均用于眼底图像的精聚焦过程,而文献[5-7]则在自动聚焦中并不进行粗精聚焦的区分。

像序列情况下所获取的聚焦曲线,从图中可以看出,不同算法都具有无偏性、单峰性及抗噪声性能,文献[6]由于采用了标准中值滤波与数学形态学方法,所以灵敏度受到了严重的影响,提出的算法的灵敏度最高。

图 16 为上述不同算法与提出的算法在不同图

表 7 应用于低对比度图像的不同图像清晰度评价函数定量指标对比

Table 7 Quantitative index comparison for different image sharpness evaluation functions for low contrast image

Different methods	Method in Ref. [16]	Method in Ref. [15]	Method in Ref. [13]	Proposed method
Sharpness ratio	1.7	1.5	2	4
Evaluation function span	0.4	0.5	0.7	1.4
Sensitiveness	0.04	0.05	0.09	0.18
Time /ms	1	30	0.4	0.5

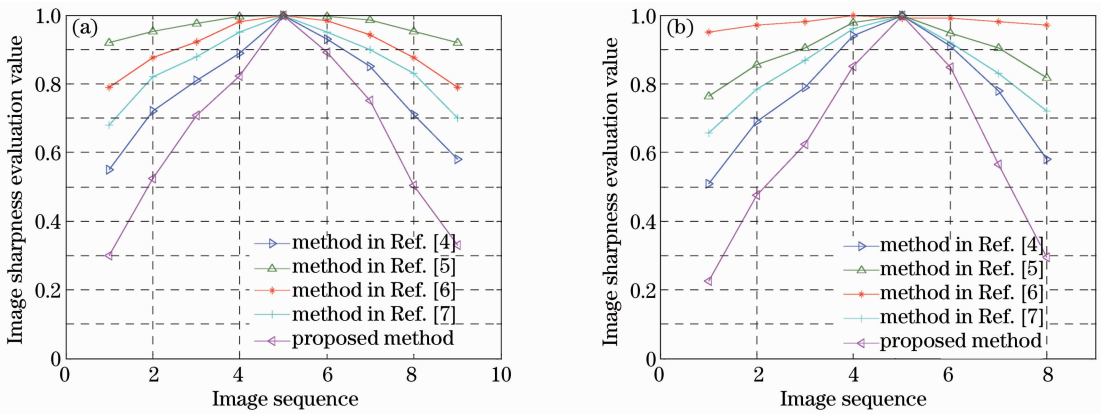


图 16 应用于眼底图像的不同图像清晰度评价函数聚焦曲线

Fig. 16 Focusing curve with different image sharpness evaluation functions for the retinal image

表 8 为上述不同图像清晰度评价函数通过多组图像得出的定量指标对比结果。从表中可以看出,

提出的算法具有最好的实时性,且与灵敏度相关的三个定量指标方面,提出的算法最优。

表 8 应用于眼底图像的不同图像清晰度评价函数定量指标对比

Table 8 Quantitative index comparison for different image sharpness evaluation functions for low contrast image

Different methods	Method in Ref. [7]	Method in Ref. [6]	Method in Ref. [5]	Method in Ref. [4]	Proposed method
Sharpness ratio	1.6	1.1	1.3	1.9	4
Evaluation function span	0.4	0.1	0.2	0.5	1.4
Sensitiveness	0.08	0.02	0.04	0.11	0.18
Time /ms	40	60	2	38	0.5

## 7 结 论

对免散瞳眼底相机中的自动聚焦算法进行了研究。结合眼底图像成像特点及眼底图像特征,提出了免散瞳眼底相机中粗精结合的自动聚焦方法。针对粗聚焦提出结合眼底图像视场特点的基于内接正方形的聚焦窗口选择方法,并采用 Robert 梯度函数完成粗聚焦。针对精聚焦采用基于局部信息熵的自动聚焦窗口选择算法完成图像聚焦窗口提取,

并提出基于 9 pixel×9 pixel 尺寸泽尼克正交矩的图像清晰度评价函数完成精聚焦。在实验部分,对粗聚焦中的固定聚焦窗口选择方法进行了实验分析;对基于局部信息熵的自动聚焦窗口选择方法进行了参数选择及稳定性分析;针对精聚焦中基于 9 pixel×9 pixel 尺寸的泽尼克正交矩的图像清晰度评价函数进行了参数选择及算法有效性分析。

## 参 考 文 献

- 1 D S Fong, L Aiello, T W Gardner, *et al.*. Retinopathy in diabetes [J]. *Diabetes Care*, 2004, 27(s1): s84-s87.
- 2 K Alsabti, S Raizada, V B Wani, *et al.*. Efficacy and reliability of fundus digital camera as a screening tool for diabetic retinopathy in Kuwait [J]. *Journal of Diabetes and its Complications*, 2003, 17(4): 229-233.
- 3 Zhang Yunhai, Zhao Gaina, Zhang Zhonghua, *et al.*. Accurate focusing of non-mydiatic fundus camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(5): 1014-1018.  
张运海, 赵改娜, 张中华, 等. 非散瞳眼底照相机的精密调焦[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(5): 1014-1018.
- 4 Pan Lin. Research on Tele-Screening System for Diabetic Retinopathy and Its Image Processing Key Technologies [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2011. 59-76.  
潘林. 远程糖尿病性视网膜病变筛查系统及若干图像处理关键技术研究[D]. 福州: 福州大学, 2011. 59-76.
- 5 R Zeimer, S Zou, T Meeder, *et al.*. A fundus camera dedicated to the screening of diabetic retinopathy in the primary-care physician's office [J]. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 2002, 43(5): 1581-1587.
- 6 M Moscaritolo, H Jampel, F Knezevich, *et al.*. An image based auto-focusing algorithm for digital fundus photography [J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 2009, 28(11): 1703-1707.
- 7 A Marrugo, M Millán, G Cristóbal, *et al.*. No-reference quality metrics for eye fundus imaging [C]. *Computer Analysis of Images and Patterns*, 2011, 6854: 486-493.
- 8 Huang Yang. Near-Infrared Fundus Camera Design [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2011. 13-19.  
黄阳. 近红外眼底相机的设计[D]. 南京: 南京理工大学硕士学位论文, 2011. 13-19.
- 9 Zhai Yongping, Zhou Dongxiang, Liu Yunhui. Large range autofocusing algorithm for microscopy with small depth of field [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(4): 0418001.  
翟永平, 周东翔, 刘云辉. 极小景深条件下显微镜大范围聚焦算法[J]. *光学学报*, 2012, 32(4): 0418001.
- 10 Wang Zhongxun, Pan Yiming, Yin Shaoyun, *et al.*. Laser processing lens of long focal depth and high resolution [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(2): 0222004.  
王仲勋, 潘一鸣, 尹韶云, 等. 长焦深、高分辨激光加工聚焦透镜[J]. *光学学报*, 2013, 33(2): 0222004.
- 11 J Jeon, I Yoon, D Kim, *et al.*. Fully digital auto-focusing system with automatic focusing region selection and point spread function estimation [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2010, 56(3): 1204-1210.
- 12 X Xu, Y Wang, J Tang, *et al.*. Robust automatic focus algorithm for low contrast images using a new contrast measure [J]. *Sensors*, 2011, 11(9): 8281-8294.
- 13 S Lee, J Yoo, Y Kumar, *et al.*. Reduced energy-ratio measure for robust autofocusing in digital camera [J]. *Signal Processing Letters*, 2009, 16(2): 133-136.
- 14 C Shen, H H Chen. Robust focus measure for low-contrast images [C]. *Digest of Technical Papers. International Conference on Consumer Electronics*, 2006. 69-70.
- 15 Zhang Yatao, Ji Shupeng, Wang Qiangfeng, *et al.*. Definition evaluation algorithm based on regional contrast [J]. *Journal of Applied Optics*, 2012, 33(2): 293-299.  
张亚涛, 吉书鹏, 王强锋, 等. 基于区域对比度的图像清晰度评价算法[J]. *应用光学*, 2012, 33(2): 293-299.
- 16 Han Ruiyu, Wang Jinjiang, Nie Kai, *et al.*. Adaptive autofocus technique under different contrast [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 41(2): 222-227.  
韩瑞雨, 王晋疆, 聂凯, 等. 不同对比度下自适应的自动调焦新算法[J]. *光子学报*, 2012, 41(2): 222-227.
- 17 Gao Shiyi, Zhao Mingyang, Zhang Lei, *et al.*. Improved algorithm about subpixel edge detection of image based on Zernike orthogonal moments [J]. *Acta Automation Sinica*, 2008, 34(9): 1163-1168.  
高世一, 赵明扬, 张雷, 等. 基于 Zernike 正交矩的图像亚像素边缘检测算法改进[J]. *自动化学报*, 2008, 34(9): 1163-1168.
- 18 Qu Yingdong, Li Rongde, Bai yanhua, *et al.*. A high-speed Zernike moments edge operator based on  $9 \times 9$  masks [J]. *Journal of Optoelectronics-Laser*, 2010, 21(11): 1683-1687.  
曲迎东, 李荣德, 白彦华, 等. 高速的  $9 \times 9$  尺寸模板 Zernike 矩边缘算子[J]. *光电子·激光*, 2010, 21(11): 1683-1687.
- 19 Wang Yaoming. Moment Function for Image: Principle, Algorithm and Application [M]. Shanghai: East China University of Science and Technology Press, 2002. 32-35.  
王耀明. 图像的矩函数: 原理, 算法及应用[M]. 上海: 华东理工大学出版社, 2002. 32-35.
- 20 Shi Jinfeng, Wu Qingwen, Zhang Jianping, *et al.*. Thermal-optical analysis for optical window of high-altitude and high-speed aerial camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(4): 0422004.  
石进峰, 吴清文, 张建萍, 等. 高空高速航空相机光学窗口的热光学分析[J]. *光学学报*, 2012, 32(4): 0422004.
- 21 S Ghosal, R Mehrotra. Detection of composite edges [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1994, 3(1): 14-25.
- 22 Han Ke, Zhu Xiuchang, Feng Quan. Research on auto-focusing approaches for different object distance [J]. *Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science)*, 2007, 27(6): 44-48.  
韩柯, 朱秀昌, 冯荃. 不同物距下的自动聚焦算法研究[J]. *南京邮电大学学报(自然科学版)*, 2007, 27(6): 44-48.
- 23 Wang Yong, Tan Yihua, Tian Jinwen. A new kind of sharpness evaluation function of image [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2007, 29(3): 124-126.  
王勇, 谭毅华, 田金文. 一种新的图像清晰度评价函数[J]. *武汉理工大学学报*, 2007, 29(3): 124-126.
- 24 Li Lihong, Zhang Minglu. Research of focusing evaluation function under a strong shot-noise background [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(11): 111103.  
李丽宏, 张明路. 强散粒噪声下聚焦评价函数的研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(11): 111103.
- 25 Shi Hongwei, Shi Yaowu, Yang Shuang. Evaluation and selection of estimating function for auto-focus system of optical microscope [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2013, 25(2): 235-240.  
史红伟, 石要武, 杨爽. 光学显微镜自动调焦指导函数的评价与选择[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2013, 25(2): 235-240.
- 26 Zhai Yongping, Zhou Dongxiang, Liu Yunhui, *et al.*. Design of evaluation index for auto-focusing function and optimal function selection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(4): 0418002.  
翟永平, 周东翔, 刘云辉, 等. 聚焦函数性能评价指标设计及最优函数选取[J]. *光学学报*, 2011, 31(4): 0418002.

栏目编辑: 张浩佳