

doi:10.3788/gzxb20144311.1110001

# 眼底照相机自动调焦算法

陈健<sup>1,2</sup>, 郑绍华<sup>1</sup>, 潘林<sup>1</sup>, 余轮<sup>1</sup>

(1 福州大学 数字媒体研究院, 福州 350002)

(2 福建工程学院 信息科学与工程学院, 福州 350108)

**摘 要:** 基于眼底图像成像原理及特征, 提出一种结合自动调焦窗口选择的眼底照相机自动调焦方法. 根据改进阈值的局部信息熵调焦窗口选择算法实现调焦窗口的初步定位, 按照多方向步进算法实现调焦窗口的最终定位. 针对眼底图像对比度低的问题, 结合区域对比度的清晰度评价函数与梯度向量平方函数的特点提出眼底图像清晰度评价函数. 实验结果显示, 提出的自动调焦窗口选择算法可以保证调焦窗口的稳定性及准确性, 针对低对比度眼底图像的清晰度评价函数具有更好的灵敏度.

**关键词:** 自动调焦; 信息熵; 对比度; 评价函数

**中图分类号:** TP391.41

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2014)11-1110001-8

## Auto Focusing Method for Fundus Camera

CHEN Jian<sup>1,2</sup>, ZHENG Shao-hua<sup>1</sup>, PAN Lin<sup>1</sup>, YU Lun<sup>1</sup>

(1 *Research Academy of Digital Media, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China*)

(2 *School of Information Science and Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350108, China*)

**Abstract:** An auto focusing method based on auto focusing window selection was presented according to the imaging principle and characteristics of fundus images. The preliminary focusing window is extracted through the focusing window selection algorithm based on local entropy with improved threshold. The final window is located through multi-directional stepping algorithm. The image sharpness evaluation function combined with the characteristics of local contrast sharpness evaluation function and gradient vector square function was presented according to low contrast fundus images. Experimental results show that the presented auto focusing window selection algorithm ensure the stability and accuracy for the focusing window, and the image sharpness evaluation function has better sensitiveness for low contrast fundus images.

**Key words:** Auto focus; Entropy; Contrast; Evaluation function

**OCIS Codes:** 110.4155; 100.3008; 110.3000; 260.5950

## 0 引言

糖尿病是一种严重危害人类健康的多发病与常见病, 糖尿病性视网膜病变(Diabetic Retinopathy, DR)是其最常见的慢性并发症之一. 根据美国糖尿病学会的报告, 几乎所有的 1 型糖尿病病人和超过 60% 的 2 型糖尿病病人会发生视网膜病变, 3.6% 的 1 型糖尿病病人和 1.6% 的 2 型糖尿病病人失明<sup>[1]</sup>. 由于糖尿病性视网膜病变可能发生数年而不会出现视觉上的明显障碍, 所以及早和定期的视网膜病变筛查成为患者视力受损之前

及时发现病变并及时治疗的有效方法<sup>[2]</sup>.

由于记录的准确性、客观性、敏感性和特异性较高, 数字眼底照相机(Digital Fundus Camera)作为糖尿病性视网膜病变临床检查和研究的重要工具被广泛应用于眼科流行病学和人群疾病的筛查<sup>[3]</sup>. 自动调焦作为数字眼底照相机的一项关键技术也成为学者们的重要研究内容. 随着数字图像处理技术的快速发展, 基于图像处理的自动调焦系统逐渐取代早期需要大量复杂光路及测距系统的调焦系统成为现代调焦系统中的主要技术<sup>[3]</sup>. 基于图像处理的自动调焦方法可分为离焦

**基金项目:** 国家自然科学基金(No. 60827002)、福建省自然科学基金(No. 2012J05116)、福建省教育厅教育科研项目(No. JB13148)资助

**第一作者:** 陈健(1981—), 男, 讲师, 博士研究生, 主要研究方向为远程医疗、医学图像处理. Email: jchen321@126.com

**导师(通讯作者):** 余轮(1952—), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为远程医疗、图像处理、多媒体通信. Email: cgifid@126.com

**收稿日期:** 2014-01-14; **录用日期:** 2014-03-06

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

深度法和对焦深度法,其中,基于对焦深度法的自动调焦系统主要包括三个组成部分:调焦窗口选择算法,图像清晰度评价函数及搜索算法.调焦窗口选择是调焦成败的一个重要因素,进行调焦窗口选择主要包括两个原因<sup>[4-5]</sup>:1)调焦窗口的选择可减少参与后续处理的数据量,提高调焦速度,从而提高调焦的实时性;2)选择调焦窗口即完成对感兴趣目标所在区域的选取,从而消除背景区域对调焦曲线的影响.此外,调焦窗口的大小选取也十分重要,窗口过小会失去部分感兴趣目标区域,无法准确调焦,并且容易受到噪声影响;窗口过大会造成窗口内感兴趣目标所占区域远小于其周围背景所占区域,感兴趣目标同样无法准确调焦.

目前,已有不少学者针对眼底图像的特点提出了不同的眼底图像自动调焦方法. Zeimer<sup>[6]</sup>以粗细血管为感兴趣目标,采用基于频域变换的清晰度评价函数; Pan<sup>[7]</sup>考虑到眼底图像中血管为主要特征及眼底图像序列中的噪声问题,提出结合嵌入可信度的边缘检测方法完成对血管的分割,以血管边缘的累加值作为精确调焦的清晰度评价函数,并采用连通域法减少噪声的影响; Moscaritolo<sup>[8]</sup>以视盘处的血管为感兴趣目标,提出结合数学形态学与中值滤波的滤波方案,并以方差作为清晰度评价函数完成调焦算法的设计; Marrugo<sup>[9]</sup>以视盘为感兴趣区域,使用不同的评价函数完成对眼底图像的调焦测试.

本文以眼底照相机的自动调焦为研究对象,根据眼底图像的细节分布特点,提出结合改进阈值的局部信息熵方法及多方向步进算法完成眼底图像调焦窗口的选择,在此基础上,针对眼底图像灰度对比度低的问题,提出一种结合区域对比度与梯度向量平方函数的清晰度评价函数,得出最终的调焦曲线,实验结果证明了本文算法的有效性.

## 1 眼底图像成像原理及特点

眼底照相机照相流程如图 1<sup>[7,10]</sup>.

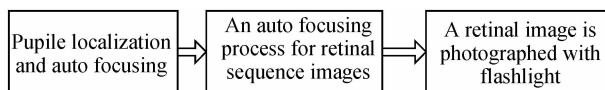


图 1 眼底照相流程

Fig. 1 Fundus photography flow chart

从图 1 中可以看出,眼底图像调焦是在瞳孔图像调焦基础上的准调焦过程<sup>[7]</sup>,眼底照相机首先通过固视点引导受检者完成瞳孔的定位与调焦,随后眼底照相机由外眼模式切换到内眼模式,进入眼底图像调焦阶段.眼底本身不发光,为了观察和照相,必须使用外部光源进行照明.为了不对眼睛造成过大的刺激,常用光源为近红外光源、红外光源或纳光源,其光强度足够观察眼底<sup>[10-11]</sup>.考虑到光线较弱,眼底照相机大多配备

黑白低照度 CCD 摄像机<sup>[12]</sup>,并完成眼底调焦的过程.随后切换到闪光灯(如氙闪光灯),采用单反相机完成清晰的彩色眼底图像拍摄.

眼底图像的成像原理如图 2,曲线代表眼底曲面,眼底图像在景深区域内都是相对清晰的.眼底照相机光学系统的光圈大,因此,其景深不大.如何在景深区域内准确定位清晰图像(精确调焦位置)即眼底图像自动调焦的研究内容.

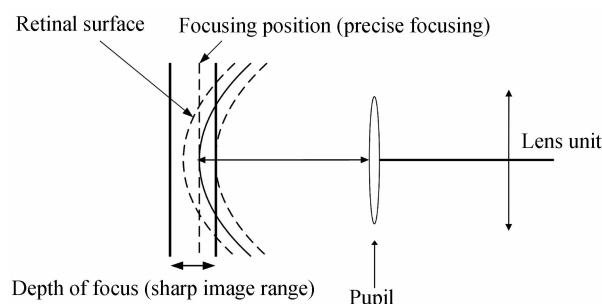
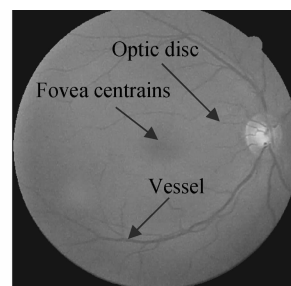


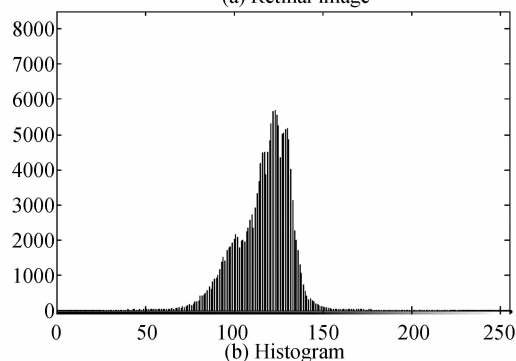
图 2 眼底图像调焦的成像原理

Fig. 2 Imaging principle of retinal image focusing

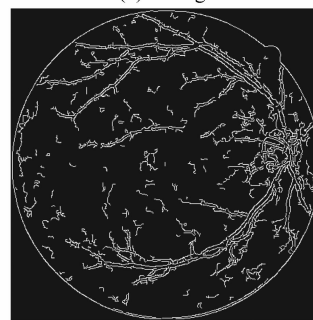
图 3(a)为 CCD 设备中采集得到的红外眼底序列图像中的一帧,图中可以看出,眼底图像的特征包括血



(a) Retinal image



(b) Histogram



(c) Vessel segmentation

图 3 眼底图像的特点

Fig. 3 Characteristics of retinal images

管、视神经(即视盘)、黄斑中心凹等.由(近)红外光源照明得到的图像对比度比较低<sup>[13-14]</sup>,从图3(b)的直方图中可以看出,除去边框(灰度级在0~10之间)的影响,眼底图像中自身的灰度级相差不大,因此眼底图像对比度较低.图3(c)为采用嵌入可信度边缘检测方法得到的血管边缘检测图<sup>[7]</sup>,可以看出虽然眼底图像中的血管分布相对均匀,但由于在视盘位置及部分区域有大量血管的交错,出现血管密集区域.

## 2 基于局部信息熵的自动调焦窗口选择

眼底图像的血管分布相对分散,考虑到调焦算法中清晰度评价函数的计算量基本与参与计算的像素数目成正比,若以整幅图像为处理对象,必然增加后续处理的运算时间,降低系统的实时性.此外,眼底图像中血管的分布密度具有不均匀性,且血管粗细各不相同,只需计算血管密集区域即可.因此,本文将血管密集区域作为调焦窗口.

传统的调焦窗口选择算法主要有以图像中心区域作为调焦窗口的中央区域法<sup>[15-16]</sup>,非均匀采样区域选择法<sup>[17-18]</sup>及选取整幅图像中具有代表性的多个区域的多区域选择法<sup>[19-20]</sup>等,上述算法均以中央区域或近中央区域为大权重区域,影响未处于中央区域的感兴趣目标调焦.基于此,学者们提出了多种以感兴趣目标为中心的自动调焦窗口选择算法:Jeon等<sup>[21]</sup>结合过渡区概念提出基于局部信息熵的调焦窗口选择算法,算法首先对图像进行窗口划分并计算子窗口的局部信息熵,通过特定的阈值将子窗口划分为细节窗口与非细节窗口,在此基础上完成调焦窗口的选择;张乐等<sup>[5]</sup>同样对图像进行窗口划分,并计算子窗口的局部自相关函数值,以整幅图像的自相关均值作为阈值并采用“重心”法获取调焦窗口的重心;Wang等<sup>[22]</sup>采用结合改进粒子群优化算法的阈值完成图像边缘检测,并采用灰度映射得到图像的“重心”,该方法在细节区域较多且分布不均的图像中容易出现调焦窗口的偏离.

通过对眼底图像的特点及上述几种自动调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(如视盘区域),因此,相对于基于灰度映射的“重心”查找法,阈值法可更好地自动匹配图像细节中心,而避免出现重心因为周围细节区域的影响而偏离,同时也可以避免固定窗口法中出现将非细节区域包含在窗口中的情况.因此,本文将在眼底图像自动调焦窗口选择中引入文献<sup>[21]</sup>提出的基于局部信息熵的算法,并针对眼底图像的特点对算法中的阈值加以改进.

局部信息熵法在完成对整幅图像划分的基础上计

算子窗口的局部信息熵<sup>[23]</sup>,即

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

式中, $L$ 代表子窗口中最大的灰度级, $P_i$ 表示对应灰度级 $i$ 的概率,即

$$P_i = \frac{n_i}{M \times N} \quad (2)$$

式中, $n_i$ 代表灰度级为 $i$ 的像素点的个数, $M \times N$ 代表子窗口图像的大小.

局部信息熵法需要将输入图像分成子窗口.图4中显示原始眼底图像及不同大小子窗口情况下局部信息熵的分布情况,图中灰度值越小(越接近黑色),表明对应子窗口的信息熵越大,细节越丰富.可以看出,如果子窗口过大,不利于目标的准确提取,尤其是一些小目标或者目标跨越两个子窗口的情况(如图4(f)),相反,如果子窗口过小,则边缘区域可能成为高信息熵区域,从而影响了目标的判断(如图4(b)~(c)).

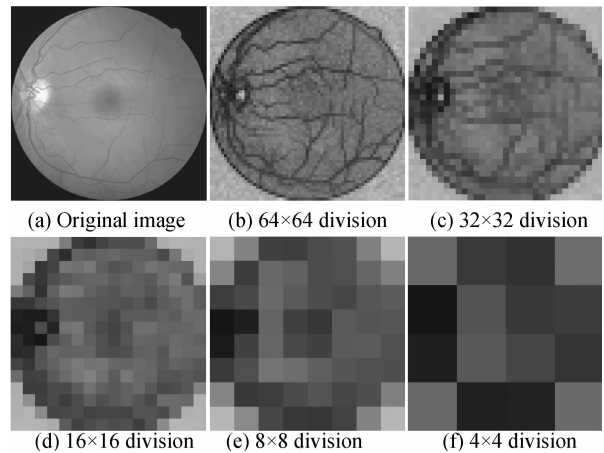


图4 不同大小子窗口下的局部信息熵图

Fig. 4 Local entropy images with different sizes of sub-window

由图(4)可知眼底图像中的最优调焦区域应该在血管相对密集的区域,该区域中灰度级较多,相应的局部信息熵较大.为了对局部信息熵的提取结果进行进一步的处理,原算法中引入熵阈值,即

$$V_{\text{threshold}} = \alpha E(X)_{\text{max}} + (1 - \alpha) E(X)_{\text{mean}} \quad (3)$$

式中, $E(X)_{\text{max}}/E(X)_{\text{mean}}$ 分别代表局部信息熵值最大值与平均值, $\alpha$ 为介于0与1之间的系数.对于目标区域的最佳提取中, $\alpha$ 的经验值设为0.85, $V_{\text{threshold}}$ 即为阈值,当局部信息熵大于阈值时,则认为子窗口属于细节窗口,否则属于非细节窗口,所有被划分为细节窗口的子窗口即最终的调焦窗口.

该算法存在的问题是调焦过程中大于阈值的子窗口数目在不同离焦程度的图像中具有不确定性<sup>[21]</sup>,为此,本文对阈值进行相应的修改,算法思想为:对局部信息熵 $E(X)$ 进行从大到小的排序,提取前 $N$ (根据子

窗口大小的不同取对应大小情况下的固定值)个子窗口作为调焦窗口,从而保证调焦窗口数目的稳定性.

在本文中,将序列图像进行  $4 \times 4$  划分,得到 16 个划分窗口(如图 4(f)),并在此基础上取最大的一个为调焦窗口,完成调焦窗口的初步定位.考虑到子窗口过大可能出现目标跨越两个子窗口的情况,本文提出基于多方向步进算法(Multi-directional stepping algorithm)对调焦窗口初步定位结果进行修正.算法思想为:以初步定位的调焦窗口为中心,顺时针方向以固定的角度与步长(像素数)完成调焦窗口的移动,并计算移动后调焦窗口的局部信息熵,在此基础上,取得最大信息熵所对应的窗口为最终的调焦窗口.即

$$\begin{cases} x_{(n,\theta)} = x_c + (n \cdot v) \cdot \cos \theta \\ y_{(n,\theta)} = y_c + (n \cdot v) \cdot \sin \theta \end{cases} \quad (4)$$

$$X = X_{\max(E_{x_{(n,\theta)}})} \quad (5)$$

式中,  $[x_c, y_c]$  表示初步定位得到的调焦窗口中心坐标;  $\theta$  表示顺时针的旋转角度,以  $y$  轴正向为 0 角度方向,如图 5(a) 所示为  $45^\circ$  方向;  $n$  表示步进数;  $v$  表示步长,即步进速度,以像素为单位;  $[x_{(n,\theta)}, y_{(n,\theta)}]$  表示经过  $\theta$  角度旋转与  $n$  步步长为  $v$  的步进得到的窗口中心坐标;  $X_{(n,\theta)}$  与  $E_{X_{(n,\theta)}}$  分别表示步进后得到的窗口位置及对应的局部信息熵;  $X$  表示最终的调焦窗口.

图 5(b)~(d) 为  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$  三个方向两步进( $n=1, 2$ , 步长为调焦窗口长与宽的  $1/4$ ) 情况下的窗口位置示意图.其中,实线框表示初步定位的调焦窗口,点划线框表示 1 步进下的窗口位置,虚线框表示 2 步进下的窗口位置.

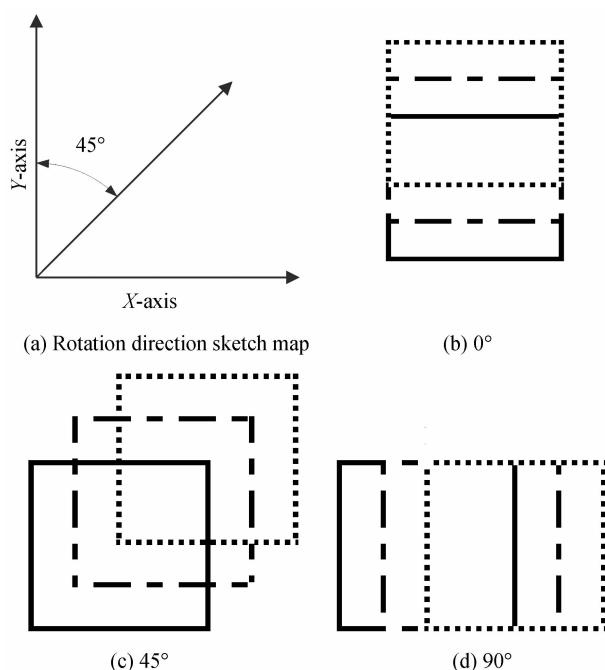


图 5 多方向步进算法示意图

Fig. 5 Multi-directional stepping algorithm sketch map

### 3 针对低对比度图像的清晰度评价函数

考虑到低光照的拍摄环境及 CCD 设备自身因素的影响时,噪声不可避免<sup>[24]</sup>,因此,许多学者都在调焦算法中考虑到了噪声滤除问题,以保证调焦曲线的单峰性.针对(近)红外光条件下 CCD 图像噪声种类较多的特点<sup>[13,24]</sup>,标准中值滤波算法成了合适的选择<sup>[8,13]</sup>,因此,本文算法中在进行清晰度评价函数值计算之前先进行图像的中值滤波.

针对(近)红外光条件下眼底图像的对比度较低的特点,常用算法(如信息熵法等)得到的调焦曲线的灵敏度较低.针对低对比度图像的调焦,陈静等<sup>[25]</sup>根据图像的灰度分布,运用三次多项式拟合图像的边缘实现亚像素定位,达到较高的定位精度;韩瑞雨<sup>[26]</sup>等在介绍 Zernike 正交矩,并在分析 Zernike 矩调焦函数曲线的基于上提出了一种新的基于 Zernike 正交矩的自动调焦算法,定义了算法的公式;张亚涛<sup>[27]</sup>等提出了一种基于图像区域对比度的清晰度评价方法,建立和分析了评价函数的数学模型,并对航空摄像机采集的序列图像进行实验和仿真.考虑到文献<sup>[25]</sup>与文献<sup>[26]</sup>的算法复杂度,本算法在对基于区域对比度清晰度评价函数进行分析的基础上,提出合理的改进算法.

基于区域对比度的图像清晰度评价函数结合信号信噪比方法的主要原理是:在每一个定义的区域中,计算区域内灰度的最大值与最小值之差,再除以最大值,称为该区域的区域对比度,对所有像素计算区域对比度并求其平均值,得到归一化的清晰度评价函数值<sup>[27]</sup>,即

$$F_i = \frac{1}{MN} \sum_M \sum_N \text{dev}(x, y) \quad (6)$$

式中,  $i$  表示自动调焦过程中的第  $i$  幅图像,  $F_i$  表示清晰度评价函数值,  $M$  与  $N$  分别表示区域(子窗口)划分所采样的行数与列数值,  $\text{dev}(x, y)$  为区域对比度,其定义为

$$\text{dev}(x, y) = \frac{\max [f_\Delta(x, y)] - \min [f_\Delta(x, y)]}{\max [f_\Delta(x, y)]} \quad (7)$$

式中,  $f_\Delta(x, y)$  表示所选择的图像区域,  $\max[\cdot]$  与  $\min[\cdot]$  分别表示图像区域中各像素点取最大值与最小值.该方法中区域的选择可以采用“滑动型”与“无重叠型”两种方式,如图 6.

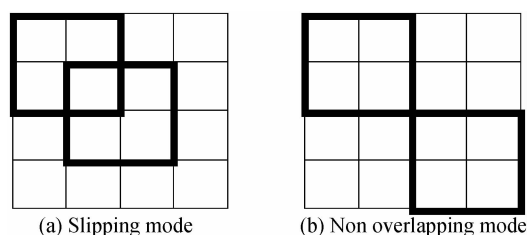


图 6 图像区域选择方式

Fig. 6 Image region selection methods

滑动型的区域选择方法是以像素为单位,以某种方式选择该像素的  $N \times N$  邻域,并且进行逐像素区域对比度计算,如图 6(a)为  $2 \times 2$  邻域,也可以采用数学形态学方法进行邻域划分;无重叠型的选择方法中不同区域之间没有重叠(图 6(b)所示),使用无重叠的方式可以较好地提高系统的实时性。

通过对常用清晰度评价函数的分析可知,梯度向量平方函数具有较好的灵敏度,即

$$F = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \{ [I(i+1, j) - I(i, j)]^2 + [I(i, j+1) - I(i, j)]^2 \} \quad (8)$$

式中,  $F$  表示清晰度评价函数值,  $M$  与  $N$  分别为图像的行数与列数。

结合梯度向量平方函数的思想,对基于区域对比度的清晰度评价函数进行改进,得到式(9)的算法。

$$F_i = \frac{1}{\max \{S_i\}} \sum_{M_i} \sum_{N_i} \{ \max [f_{i\Delta}(x, y)] - \min [f_{i\Delta}(x, y)] \}^2 \quad (9)$$

$$S_i = \sum_{M_i} \sum_{N_i} \{ \max [f_{i\Delta}(x, y)] - \min [f_{i\Delta}(x, y)] \}^2 \quad (10)$$

式中,  $i$  表示自动调焦过程中的第  $i$  幅图像,  $f_{i\Delta}(x, y)$  表示对应第  $i$  幅图像选择的图像区域,  $S_i$  表示第  $i$  幅图像的清晰度评价,  $\max \{S_i\}$  表示取所有图像中清晰度的最大值,用于进行归一化,  $F_i$  表示归一化后的第  $i$  幅图像的清晰度评价。

本算法中,由于采用了对区域中最大值与最小值差取平方的方案,进一步提高高低对比度图像的清晰度评价,同时,算法中只采用一次除法,即用  $\max \{S_i\}$  进行归一化,与区域对比度的方法相比,进一步减少了计算量,在实际应用中,归一化步骤可以省略以提高系统的实时性。

#### 4 自动调焦策略

本文采用的自动调焦流程如图 7,为粗细结合的调焦过程。

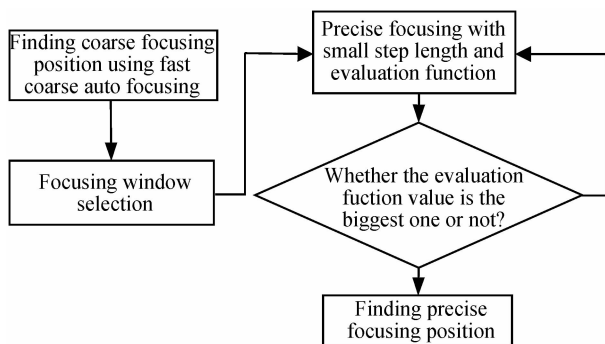


图 7 自动调焦流程

Fig. 7 Auto focusing flow chart

为了满足实时性,精确调焦前先利用 Robert 算子及较大步长的等步长爬山算法获得粗正焦区域,

Robert 算子具有计算量小、响应快的优点,从而在短时间内确定一个较小的调焦区域。

眼底照相机的自动调焦系统精度要求高,因此精调焦是必不可少的.在粗调焦的基础上,采用改进局部信息熵算法完成调焦窗口的选择,针对调焦区域中的图像在中值滤波的基础上采用基于区域对比度的清晰度评价改进算法完成评价函数值的计算,精确调焦过程采用自适应变步长爬山法作为峰值搜索算法。

#### 5 实验分析

为了验证精调焦过程中本文算法的有效性,实验中采用不同设备(低照度 CCD 设备及单反相机)拍摄不同离焦程度的序列图像与清晰度高的静态彩色图像进行测试.低照度 CCD 设备所获取的序列图像是眼底照相机在红外光条件下拍摄的眼底序列图像,由采集卡采集得到,为灰度序列图像,带有一定的噪声,考虑到本文中的调焦窗口选择算法与清晰度评价函数都是精调焦过程中应用的调焦方法,因此,采集的序列图像相对清晰.如图 8(a)~(c)为一组共 14 帧离焦-正焦-离焦序列图像中的 3 帧图像,其中,图 8(c)为第 6 帧正焦图像.静态彩色眼底图像是眼底照相机上所获取的原始图像,噪声较少,如图 8(d).需要说明的是,在实验过程中,眼底图像周围的大部边框不做处理,而静态彩色图像则转化为灰度图处理.实验中采用 Windows 7.0 操作系统,使用 2.27 GHz Intel(R) Core(TM) i5 计算机,结合 Matlab 7.0 仿真平台,分别针对调焦窗口选择算法,清晰度评价函数及自动调焦算法进行仿真实验。

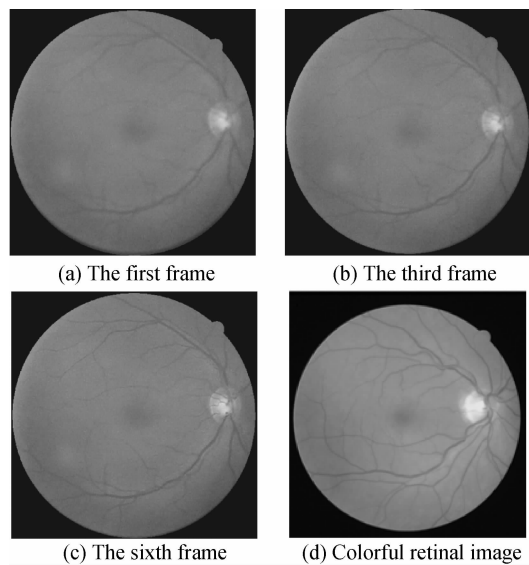


图 8 不同的眼底测试图像

Fig. 8 Different retinal images for test

##### 5.1 调焦窗口选择算法有效性分析

调焦窗口选择算法在粗调焦的基础上进行,图像

相对清晰,但清晰程度并不确定,因此,自动调焦窗口选择算法必须保证在不同离焦情况下调焦窗口位置保持相对稳定,如果在不同离焦情况下调焦窗口选择算法所选择的调焦窗口位置及大小差别太大则不利于后续调焦曲线的灵敏度.因此,实验中首先针对不同离焦程度的眼底图像,进行原算法与本文算法的对比,此外,为了体现本文算法的优势,实验中引入张乐<sup>[5]</sup>提出的基于图像一阶矩的自动调焦窗口选择算法加以对比,实验结果如图9.图9中第一行采用的原始图像是图8(b)所示的离焦图像,第二行采用图像8(c)所示的正焦图像.从图中可以看出,图像一阶矩方法由于采用的阈值较小,提取出的细节区域太多,加上“重点”法的使用,所以调焦窗口位置未必是完全的细节区域.局部信息熵法调焦窗口位置基本定位在细节区域,但不同离焦程度下,调焦窗口的个数不确定,主要因为在图像失焦时不同子窗口的局部信息熵差别较小,而图像清晰时,则相差较大.经过本文改进,调焦窗口的位置相对稳定,准确性也更高.

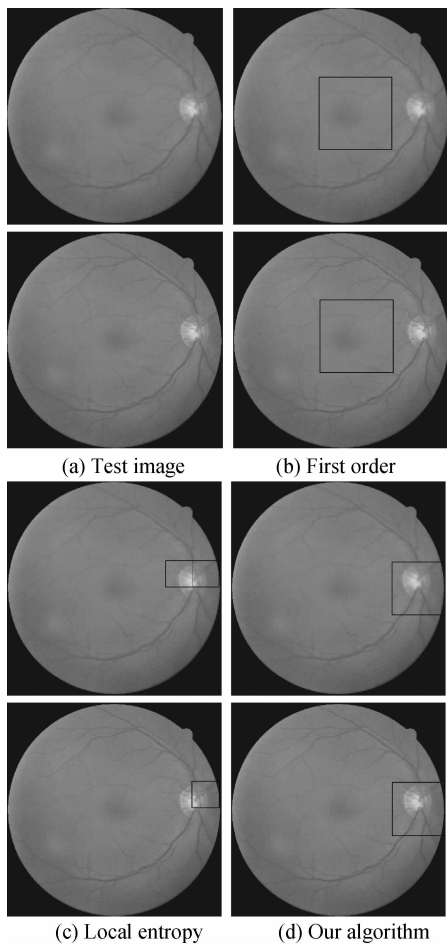


图9 不同算法调焦窗口选择结果

Fig. 9 Focusing window selection results with different algorithms

为了进一步验证算法的有效性,实验中引入来自不同受检者的静态眼底图像进行调焦窗口的提取.图

10为三幅不同静态眼底图像采用不同算法所获取的调焦窗口位置示意图.图10(a)为局部信息熵方法经过阈值改进后的窗口选择结果,调焦窗口位置与数量固定,图10(b)为多方向步进算法修正结果,可以看出调焦窗口位置移动到细节更为密集的区域.由算法原理可知,多方向步进算法中旋转角度越小,步进数越多且步进速度越小,则窗口选择结果将越精确,但将增加运算时间.本文实验中采用的是八方向两步进方法,步进速度取调焦窗口长与宽的1/4.

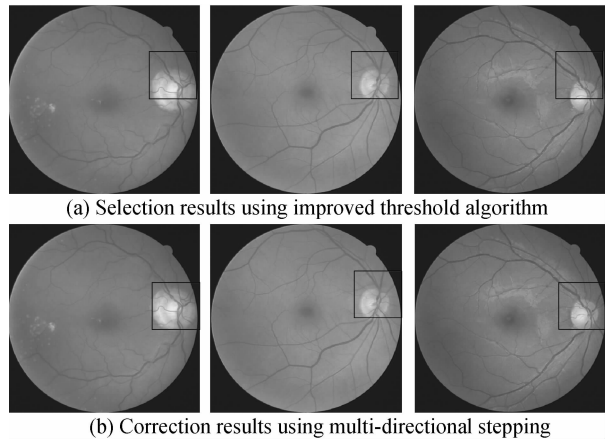


图10 不同静态眼底图像调焦窗口选择结果

Fig. 10 Focusing window selection results for different still images

### 5.2 清晰度评价函数有效性分析

为验证本文所提基于区域对比度的改进算法的有效性,实验中采用一组共14帧经过调焦窗口选择算法提取出的序列图像进行测试,窗口大小为 $115 \times 115$ ,其中第6帧是正焦图像.由于式(9)中所体现的算法是在文献[27]算法基础上的改进,因此,实验中对本文算法与原算法进行比较,得到如图11所示不同评价函数在不同区域分块情况下的调焦曲线.

从图11中可以看出,与原算法一样,修正后的算法仍然具有单峰性,且峰值位置也在第6帧图像的位置,即具有无偏性.此外,相对于原算法,经过平方处理

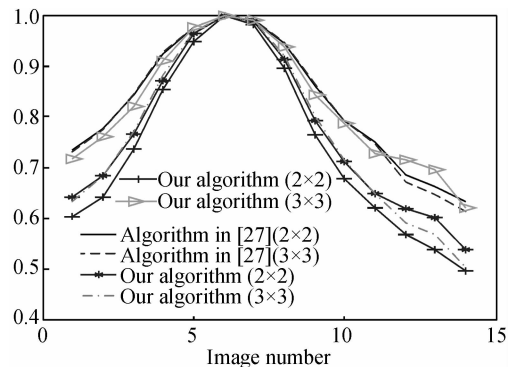


图11 两种算法在不同区域分块情况下的调焦曲线比较  
Fig. 11 Focusing curve comparison under two algorithms with different region division

改进得到的算法调焦曲线的灵敏度更好.而在使用平方改进算法中,不论采用何种区域分块方法产生的曲线区别不大,相对而言,“无重叠型” $2 \times 2$ 窗口具有最高的灵敏度,考虑到实时性及灵敏度等因素,实验中本文算法均采用 $2 \times 2$ 窗口下的无重叠取平方方式.

### 5.3 不同调焦算法的比较

为了体现本文调焦算法的优势,引入同样应用于眼底照相机的其他几种调焦算法与本文的算法进行比较,采用两组序列图像(一组为14帧,第6帧为正焦图像,另一组为10帧,第5帧为正焦图像)得到图12所示调焦曲线.从图12中可以看出,文献[9]、文献[8]、文献[7]及本文算法均在第6帧与第5帧图像时出现峰值,且算法得到的曲线只有一个峰值,均具有单峰性与无偏性,文献[6]则不具备.主要是因为针对噪声图像,文献[6]中未提出相应的噪声去除方案,因此曲线出现多个峰值;文献[7]采用的结合嵌入可信度边缘检测的调焦方法中应用连通域法去除噪声影响,保证了单峰性;文献[8]算法中引入了中值滤波及数学形态学方法保证了单峰性;文献[9]采用的信息熵法具备抗噪声能力,因此,也能保证曲线的单峰性;本文的算法中也引入了标准中值滤波同样通过引入中值滤波保证曲线的单峰性.

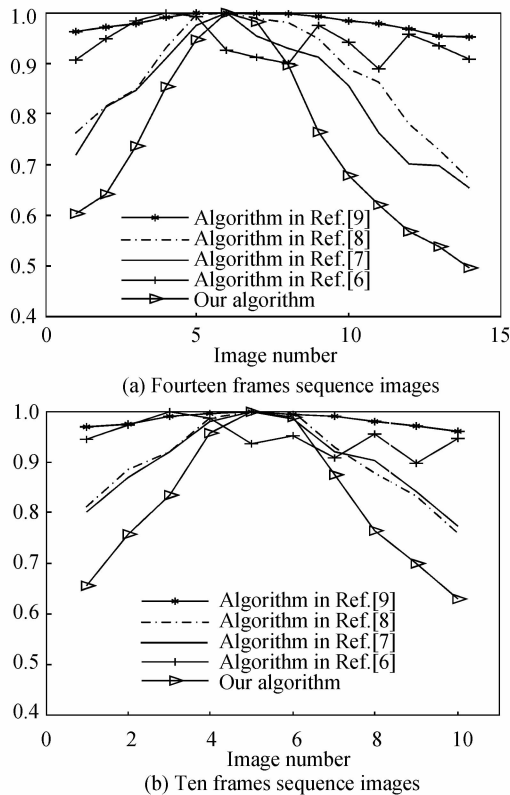


图12 不同调焦算法下调焦曲线比较

Fig. 12 Focusing curve comparison with different algorithms

从调焦曲线的灵敏度角度分析,文献[9]采用的信息熵法灵敏度最差,而本文算法结合了基于区域对比

度的清晰度评价函数与梯度向量平方函数的特点,调焦曲线具有最好的灵敏度.

表1为不同算法的运行时间对比,包括调焦窗口选择算法运行时间与每帧图像清晰度评价函数的运行时间.需要说明的是,文献[8],文献[7]和文献[6]中均只提到或直接采用血管密集区域作为调焦窗口,并未提出调焦窗口选择算法,因此,表1中没有对应文献的运行时间.与文献[9]的算法相比,本文算法在调焦窗口的运行时间上显然更具有优势.此外,在计算清晰度评价函数的运行时间时,除文献[9]外,其他方法使用本文选择的调焦窗口进行清晰度评价函数的计算,即保证了调焦窗口的大小一致性,并通过多帧图像的计算取平均得到表2所示的清晰度评价函数运行时间.从结果中可以看出,本文算法的运行时间优于文献[7]与文献[8],但多于文献[6]与文献[9],综合考虑不同算法在单峰性,无偏性及灵敏度方面的比较结果,可以得出,本文算法具有最优的性能.

表1 不同自动调焦算法运行时间比较

Table 1 Runtime comparison for different auto focusing methods

	Method in Ref. [6]	Method in Ref. [7]	Method in Ref. [8]	Method in Ref. [9]	Our Method
Runtime for auto focusing window selection/ms	None	None	None	295	23
Runtime for evaluation function/ms	3	22	62	0.5	9

## 6 结论

对眼底照相机中的自动调焦算法进行了研究.分析眼底图像成像原理与特点及现有应用于眼底图像的主要调焦算法,提出结合眼底图像特点的调焦算法.引入基于局部信息熵的调焦窗口选择算法,并针对原算法在不同离焦程度图像情况下窗口数量的不确定问题进行了阈值改进,保证了调焦窗口数量的稳定性,并提出多方向步进算法对调焦窗口位置进行修正,保证了调焦窗口的准确性.针对眼底图像对比度低的特点,提出基于区域对比度的改进算法,提高了调焦曲线的灵敏度.实验中,将改进后的局部信息熵调焦窗口选择算法与主要调焦窗口选择算法对比,验证了算法的稳定性与准确性.此外,结合调焦窗口选择算法提取出的图像,将本文的自动调焦算法与其他应用于眼底图像自动调焦算法比较,结果表明,本文算法具有明显优势.

### 参考文献

[1] FONG D S, AIELLO L, GARDNER T W, et al. Retinopathy in diabetes[J]. *Diabetes Care*, 2004, 27(suppl 1): s84-s87.  
 [2] PAN Lin, WANG Zi-liang, YU Lun. Auto-focus emulation of

- fundus camera system[J]. *Microcomputer Information*, 2009, **25**(10):15-17.
- 潘林,王子亮,余轮.眼底照相系统自动对焦的研究与设计[J].微计算机信息,2009,**25**(10):15-17.
- [3] KROTKOV E. Focusing [J]. *International Journal of Computer Vision*, 1988, **1**(3):223-237.
- [4] LIANG Min-hua, WU Zhi-yong, CHEN Tao. Auto-focusing adjustment of theodolites by largest the gradient method[J]. *Optical and Precision Engineering*, 2009, **17**(12):3016-3021.
- 梁敏华,吴志勇,陈涛.采用最大灰度梯度法实现经纬仪自动调焦控制[J].光学精密工程,2009,**17**(12):3016-3021.
- [5] ZHANG Le,JIANG Wei,GAO Zan. Automatic focusing region selection algorithm based on first order of digital image[J]. *Optical Technique*. 2008, **2**(3):163-165.
- 张乐,姜威,高赞.数字图像一阶矩的自动聚焦区域选择算法[J].光学技术,2008,**2**(3):163-165.
- [6] ZEIMER R, ZOU S, MEEDER T, 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.
- [7] PAN L, ZHOU T, ZHENG B, et al. Application of edge confidence detection in the auto-focus under fundus camera [C]. 2010 Second WRI Global Congress on Intelligent Systems, 2010:399-402.
- [8] MOSCARITOLLO M, JAMPPEL H, KNEZEVIK F, et al. An image based auto-focusing algorithm for digital fundus photography[J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 2009, **28**(11):1703-1707.
- [9] MARRUGO A, MILLAN M, CRISTOBAL G, et al. No-reference quality metrics for eye fundus imaging[M]. *Computer Analysis of Images and Patterns*, Springer Berlin / Heidelberg, 2011:486-493.
- [10] HUANG Lin. Realization and research on image processing technology for fundus camera [D]. Nan Jing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009:7-12.
- 黄琳.眼底照相机中图像处理技术的研究与实现[D].南京:南京航空航天大学,2009:7-12.
- [11] HUANG Yan. Near-infrared fundus camera design[D]. Nan Jing: 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,2011:13-19.
- [12] WANG Huai-jun, TIAN Ye, FANG Zhi-liang. Research and optical system design of a pupilometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(08):1622-1625.
- 王怀军,田野,方志良.瞳孔检测仪的研究及其光学系统设计[J].光子学报,2008,**37**(08):1622-1625.
- [13] LI Ming-xi, MAO Han-ping. On the study of the near-infrared image de-noising method compares experiments[J]. *Infrared Tehchnology*, 2007, **29**(11):657-661.
- 李明喜,毛罕平.近红外图像消噪方法的对比实验研究[J].红外技术,2007,**29**(11):657-661.
- [14] FU Na. Study on infrared image capturing, enhancement and segmentation processing [D]. Da Lian: Dalian University of Technology, 2006:26-52.
- 付娜.红外图像的采集、增强与分割处理研究[D].大连理工大学,2006:26-52.
- [15] KIM Y, LEE J, MORALES A W, et al. A video camera system with enhanced zoom tracking and auto white balance [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2002, **48**(3):428-434.
- [16] HAN Ke, ZHU Ziu-chang, FENG Quan. Research on auto-focusing approaches for different object distances[J]. *Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunication (Natural Science)*. 2007, **27**(6):44-48.
- 韩柯,朱秀昌,冯荃.不同物距下的自动聚焦方法研究[J].南京邮电大学学报(自然科学版) ISTIC, 2007, **27**(6):44-48.
- [17] LI Qi, FENG Hua-jun, XU Zhi-hai. Autofocus system experimental study using variational image-sampling[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(12):1499-1501.
- 李奇,冯华君,徐之海.自动对焦系统中图像非均匀采样的实验研究[J].光子学报,2003,**32**(12):1499-1501.
- [18] ZHU K, JIANG W, WANG D, et al. An effective focusing algorithm based on non-uniform Sampling [C]. *IEEE Workshop VLSI Design & Video Tech*, 2005:276-279.
- [19] LI Qi. Studies on the theory and implementation method of digital autofocus technology [D]. Hang Zhou: Zhejiang University, 2004:53-75.
- 李奇.数字自动对焦技术的理论及实现方法研究[J].杭州:浙江大学,2004:53-75.
- [20] YIN Ai-jun, ZHANG Yan, YANG Bin, et al. Roberts focused evaluation method and its application in mutli-windows mode [J]. *Journal of Chongqing University*, 2011, **34**(11):25-30.
- 尹爱军,张焱,杨彬,等.多窗口模式 Roberts 聚焦评价方法及其应用[J].重庆大学学报:自然科学版,2011,**34**(11):25-30.
- [21] JEON J, YOON I, KIM D, 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.
- [22] WANG Y, JIANG W, ZHENG Y. Dynamic autofocus region selection based on improved PSO [C]. 2010 3<sup>rd</sup> International Congress on Image and Signal Processing, 2010:2760-2764.
- [23] YAN C, SANG N, ZHANG T. Local entropy-based transition region extraction and thresholding [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2003, **24**(16):2935-2941.
- [24] WANG Jia-peng, WANG Shu-rong, SONG Ke-fei, et al. Image noise suppression and performance evaluation of ICCD [J]. *Journal of Optoelectronics & Laser*, 2008, **19**(08):1032-1034.
- 王加朋,王淑荣,宋克非,等.像增强型 CCD 的噪声抑制和性能评价[J].光电子·激光,2008,**19**(08):1032-1034.
- [25] CHEN Jing, SHANG Ya-ceng, TIAN Jun-wei. Fast polynomial fits sub-pixel edge detection algorithms [J]. *Journal of Applied Optics*, 2011, **32**(1):91-95.
- 陈静,尚雅层,田军委.快速多项式拟合亚像素边缘检测算法的研究[J].应用光学,2011,**32**(1):91-95.
- [26] HAN Rui-yu, WANG Jin-jiang, 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.
- [27] ZHANG Ya-tao, JI Shu-peng, WANG Qiang-feng, 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.