

文章编号 1004-924X(2018)06-1480-09

结核杆菌涂片显微视觉检测系统的自动聚焦

张从鹏*, 曹文政, 徐明刚, 宋来军

(北方工业大学 机械与材料工程学院, 北京 100144)

摘要: 结核杆菌医学涂片大多具有观察区内容稀疏不均匀、杂质较多的特点, 使用自动显微镜检方法进行图像采集时, 会出现清晰度区分困难、效率低下、甚至聚焦评价失效的问题, 为提高自动镜检的效率和准确度, 本文自主搭建了显微视觉计算机自动检测系统, 对结核杆菌涂片的自动聚焦技术进行系统的研究。首先, 对比研究 11 种常用聚焦函数对结核杆菌镜检玻片图像聚焦评价的优劣, 并分析了聚焦成功和失效的原因。在综合分析各聚焦函数对结核杆菌涂片的聚焦效果基础上, 提出了一种基于 Tenengrad 的改进型聚焦评价函数, 通过改进内容像素的聚焦权重提高聚焦准确度, 优化图像处理算法来提高图像采集效率。实验结果表明: 改进型 Tenengrad 聚焦函数 FTen-Q 在结核杆菌涂片的各类视野图像评价方面具有高灵敏度和准确度, 其聚焦成功率和运算效率分别提高了 13.884% 和 17.616%, 可以满足结核杆菌涂片类非均匀涂片的显微视觉自动检测应用要求。

关键词: 自动聚焦; 显微视觉; 聚焦函数; 聚焦权重; 图像处理

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182606.1480

Automatic focusing of micro-vision detection system of *Mycobacterium tuberculosis* smear

ZHANG Cong-peng*, CAO Wen-zheng, XU Ming-gang, SONG Lai-jun

(School of North China University of Technology, School of Mechanical
and Material Engineering, Beijing 100144, China)

* Corresponding author, E-mail: soaringroc@ncut.edu.cn

Abstract: Most of the medical smears of *Mycobacterium tuberculosis* have the characteristics of sparse and uneven content and more impurities in the observation area. There are some problems while observing the *Mycobacterium tuberculosis* smears to acquire image automatically, such as difficulty in distinguishing definition, low efficiency and focusing evaluation function invalid. To improve the efficiency and accuracy of automatic inspection, an automatic micro-vision detection system was developed independently to research the auto-focusing technology of the sputum smear images collection. Firstly, the sputum smear images focusing evaluation advantages and disadvantages of the eleven common focusing functions were studied comparatively, and the reasons for the image focusing failure were analyzed. According to the comprehensive performance of the various functions in the sputum smear images acquiring, an improved focusing evaluation function based on the Tenengrad focusing function

收稿日期: 2017-10-31; 修订日期: 2017-12-20.

基金项目: 北京市自然科学基金资助项目 (No. 3162011)

was proposed. The image focusing accuracy was enhanced through adjusting the focusing weight of the content pixels, and the image processing algorithm was optimized to improve the image collection efficiency. The experimental results show that the improved Tenengrad focusing function (FTen-Q) has high sensitivity and accuracy in the images evaluation of Mycobacterium tuberculosis smear. Compared with the traditional Tenengrad function, the image focusing success rate and computing efficiency are improved by 13.884% and 17.616%, respectively, which can meet the application requirements of this kind of nonuniform smear micro-vision detecting system.

Key words: auto-focusing; micro vision; focusing function; focusing weight coefficient; image processing

1 引言

显微视觉检测技术在医学、生物和微制造领域被广泛应用^[1]。自动聚焦技术是全自动显微成像系统中高质量图像获取的关键技术。自动聚焦技术可分为主动式调焦和被动式调焦两类。基于测距原理的主动聚焦结构简单、易于实现,在早期的图像式显微镜和合成孔径雷达调焦中应用广泛^[2]。但其需配备额外的测距设备,导致系统集成度降低、设备体积增大。被动式调焦更适用于空间和工作内容都极其微小的显微视觉自动聚焦系统^[3],通过计算图像清晰程度并分析当前聚焦状态,外部设备控制显微镜调焦螺旋调至聚焦状态最佳位置,即完成聚焦。其核心技术在于准确有效的评价图像的清晰度,而聚焦评价函数种类很多、形式各异,不同应用场景优劣区分明显。

目前,聚焦函数选取的研究主要从无偏性、单峰性、灵敏度和抗噪性等方面,针对普通成像情况进行对比和评估^[3-5]。在结核杆菌类涂片图像的自动聚焦中,还存在以下特点:玻片涂抹不匀导致内容分布不均衡,图像内容稀疏程度未知;景深极小,对聚焦精度要求很高,并且在聚焦函数评价起点距离焦平面较远时,聚焦函数值变化很小,极易聚焦失败;杂质、噪声等环境因素对聚焦评价结果影响较大,尤其在内容稀疏时,杂质景深覆盖较广、而梯度(聚焦值)变化较小,往往会掩盖其他内容的梯度变化;曝光不足等因素也将间接影响聚焦函数结果。此外,自动聚焦效率是工程应用中非常重要的性能指标,多数聚焦技术研究涉及较少。

针对上述问题,本文从结核杆菌类涂片的图像特点出发,分析典型聚焦评价函数的形态特点

和应用效果,设计出一种兼顾准确度和效率的复合型显微视觉聚焦方法,解决结核杆菌涂片类显微图像内容稀少、距离焦平面较远时聚焦函数值无明显变化而聚焦失败的问题,同时提高结核杆菌涂片显微视觉检测系统的图像采集质量和效率。

2 显微视觉系统与检测对象描述

自主研发医疗显微形态学智能检验平台,如图1所示。由XYZ-Z'调焦平台、光学成像系统、计算机图像采集系统、运动控制系统等组成。XYZ-Z'调焦平台可进行X-Y水平方向精调和Z-Z'调焦方向粗精双调,其精调的脉冲当量为 $0.025\ \mu\text{m}/\text{pulse}$ 。光学成像系统选用背光照明式奥林巴斯光学显微镜,搭配UPLFLN100X02油镜。图像采集端为高分辨率显微视觉专用相机和专用转接套件。图1中所示的玻片为实际医学检测所用结核杆菌涂片,检测区内容具有明显的不均匀分布特征。



图1 结核杆菌涂片显微视觉检测系统

Fig. 1 Micro-vision detection system of TB smear

3 显微视觉系统的自动聚焦

3.1 聚焦策略

自动聚焦系统中依据聚焦函数值变化进行极值、最值搜索的方法称为自动聚焦策略。聚焦策略的本质是一维寻找最值问题^[1],如爬山法:分步爬山法^[6]和三阶段聚焦法^[7];曲线拟合法:高斯曲线拟合法等。采用目前较为成熟且性能较优的分步爬山法聚焦搜索策略,结合实际应用的聚焦策略流程如图 2 所示。在本策略中,将聚焦过程分为“搜索聚焦”和“扫描聚焦”,搜索聚焦初始运动方向与真实焦平面所处位置关系未知、距离较远;扫描聚焦的聚焦起点为上一幅图像的焦平面位置,与焦平面距离较近,采用小范围的“微调”聚焦便可找到焦平面。聚焦轴从未知位置开始运动,采集第一幅图像的自动聚焦采用“搜索聚焦”方法;后续整张涂片进行“城垛式”连续采集,采用“扫描聚焦”方法。

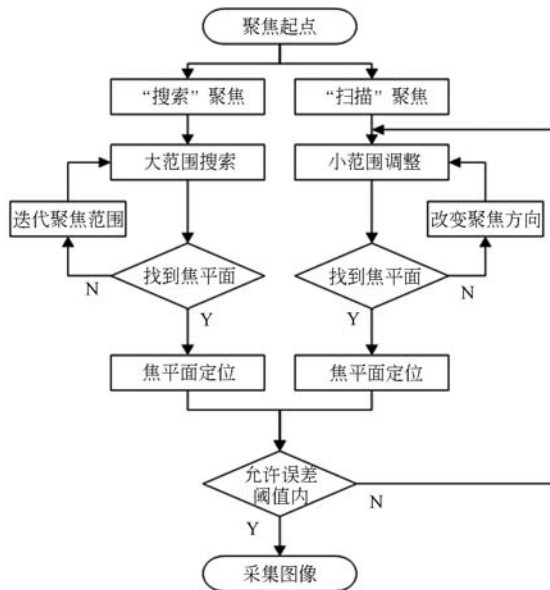


图 2 聚焦策略流程图

Fig. 2 Flow chart of auto-focusing strategy

3.2 聚焦评价函数

确定聚焦策略后,聚焦函数对图像的评价性能成为显微视觉自动聚焦的关键。从灰度梯度、信息学、统计概率和小波变换等角度提出几十种聚焦评价函数^[4,5,7-11]。按调焦原理主要分为 3 类:基于灰度梯度,通过计算序列化图像的梯度信

息确定他们离焦程度的变化情况;基于频域,通过频域变换分析图像高频分量的统计结果判断离焦程度;基于图像统计学、信息学和自相关,通过图像信息熵、直方图统计信息和自相关信息等判断图像离焦程度。基于灰度梯度的聚焦评价函数由于良好的抗噪性能和运算效率而广泛应用,本文主要对基于灰度梯度的聚焦评价函数进行详细分析。

对于连续函数,梯度可用连续偏导数计算,而对于由离散像素点组成的数字图像,基于梯度的聚焦函数则用差分替代连续偏导运算。典型灰度梯度聚焦函数如下式,为表达方便,下式用 $g(i, j)$ 表示图像坐标 (i, j) 处灰度值, \bar{g} 表示图像的灰度均值。

(1) 梯度能量函数 (EOG) 利用相邻像素点灰度值差分进行梯度能量计算:

$$F_{\text{EOG}} = \sum_{i,j} [|g(i, j) - g(i, j-1)|^2 + |g(i, j) - g(i-1, j)|^2]. \quad (1)$$

(2) 灰度差分绝对值和函数 (SMD) 改进梯度能量函数,避免平方运算:

$$F_{\text{SMD}} = \sum_{i,j} [|g(i, j) - g(i, j-1)| + |g(i, j) - g(i-1, j)|]. \quad (2)$$

(3) Roberts 函数 (Rob):

$$F_{\text{Rob}} = \sum_{i,j} [|g(i, j) - g(i+1, j+1)| + |g(i+1, j) - g(i, j+1)|]. \quad (3)$$

(4) Brener 函数 (Bre) 利用间隔 k 个像素点计算图像梯度:

$$F_{\text{Bre}} = \sum_{i,j} |g(i, j) - g(i+k, j)|^2. \quad (4)$$

(5) Sobel 函数 (Sob) 结合 Gaussian 平滑和微分,抗噪能力增强:

$$F_{\text{Sob}} = \sum_{i,j} [|G_x(i, j)| + |G_y(i, j)|], \quad (5)$$

$$G_x(i, j) = [g(i+1, j-1) + 2g(i+1, j) + g(i+1, j+1)] - [g(i-1, j-1) + 2g(i-1, j) + g(i-1, j+1)], \quad (6)$$

$$G_y(i, j) = [g(i-1, j+1) + 2g(i, j+1) + g(i+1, j+1)] - [g(i-1, j-1) + 2g(i, j-1) + g(i+1, j-1)]. \quad (7)$$

(6) Tenengrad 函数 (Ten) Sobel 衍生函数,对梯度进行平方,放大边缘梯度, G_x 、 G_y 同 Sobel 函数:

$$F_{Ten} = \sum_{i,j} [\sqrt{G_x^2(i,j) + G_y^2(i,j)}]^2. \quad (8)$$

(7)Laplacian 能量函数(Lap) 利用图像二阶差分的平方进行聚焦评价。

$$F_{Lap} = \sum_{i,j} [g(i-1,j) + g(i+1,j) + g(i,j-1) + g(i,j+1) - 4g(i,j)]^2. \quad (9)$$

(8)SML 函数(SML) 在 Laplacian 能量函数基础上提高了抗噪性能。

$$F_{SML} = \sum_{i,j} [|2g(i,j) - g(i-1,j) - g(i+1,j)| + |2g(i,j) - g(i,j-1) - g(i,j+1)|]^2. \quad (10)$$

(9)方差函数 利用像素点灰度值与灰度均值 \bar{g} 的差值累加大小评估图像的清晰程度。常见方差函数有三种形式:

一般方差函数(Var):

$$F_{Var} = \sum_{i,j} [g(i,j) - \bar{g}]^2. \quad (11)$$

归一方差函数(Nor):

$$F_{NorVar} = \frac{1}{g} \sum_{i,j} [g(i,j) - \bar{g}]^2. \quad (12)$$

绝对方差函数(Abs):

$$F_{AbsVar} = \sum_{i,j} |g(i+1,j) - g(i,j)|. \quad (13)$$

表 1 典型梯度聚焦函数的差分核

Tab.1 Differential kernel of typical gradient focusing function

$$\mathbf{h}_{E1} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{h}_{R1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{h}_{S1} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{h}_{E2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{h}_{R2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{h}_{S2} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{array}{ccc} h_{grad} = H(\mathbf{h}_{E1}, \mathbf{h}_{E2}) & h_{grad} = H(\mathbf{h}_{R1}, \mathbf{h}_{R2}) & h_{grad} = H(\mathbf{h}_{S1}, \mathbf{h}_{S2}) \\ \hline \text{EOG, SMD} & \text{Roberts} & \text{Sobel, Tenengrad} \end{array}$$

$$\begin{array}{ccc} \text{一般 } k=1 \text{ 时,} & & \\ \mathbf{h}_{grad} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & \mathbf{h}_{grad} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} & \mathbf{h}_{L1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -1 & 2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ \text{Brener} & \text{Laplacian} & \text{SML} \end{array}$$

进一步总结,如表 1,灰度梯度聚焦函数模型可归纳为一般梯度函数与不同差分核的卷积结果。

$$F_{grad} = grad(I) \otimes h_{grad}, \quad (14)$$

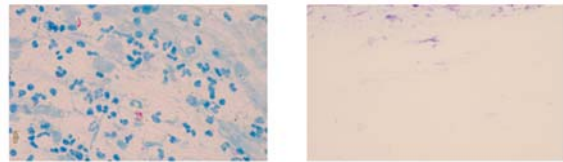
$$h_{grad} = H(h_1, h_2). \quad (15)$$

F_{grad} 为梯度聚焦函数值, h_{grad} 为不同梯度函数的差分核, h_1 和 h_2 为卷积方向掩模。聚焦函数性能差异的根本原因在于差分核的选取差异,主要体现在掩模方向、梯度统计方式上等。如 Tenengrad 函数和 Sobel 函数的差分核相比于 SMD 和 Roberts 函数而覆盖更多方向,则对梯度变化的捕捉能力更强。但是,后者对方向掩模的绝对值运算可提高函数的抗噪性。反之,平方运算放大梯度变化程度。

4 聚焦函数适用性测试

4.1 实验设计

(1)样本选取。为了测试聚焦函数在结核杆菌涂片类检测中的适用性,选取两种内容较为典型的结核杆菌图像,进行聚焦测试,如图 3 所示;



(a)TB-1(内容丰富) (b)TB-2(内容稀疏)
(a)TB-1(plentiful content) (b)TB-2(sparse content)

图 3 聚焦实验视野

Fig.3 Fields of focusing experiments

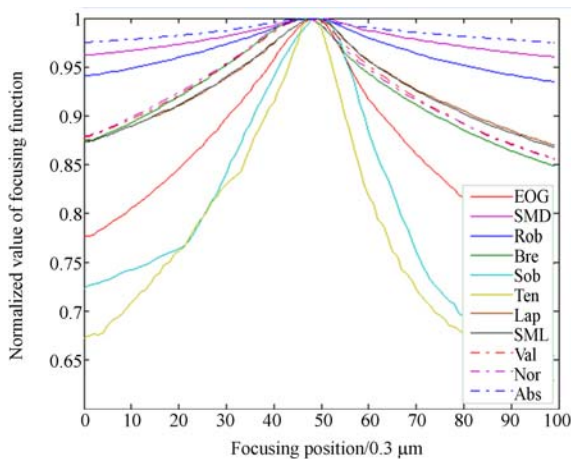
(2)测试过程。精调焦轴 Z' 微步扫描运动采集序列图像,采用公式(1)~(13)聚焦函数计算聚焦评价价值;

(3)数据处理。聚焦评价价值进行归一处理,绘制各聚焦函数的评价曲线,实验结果如图 4 所示。

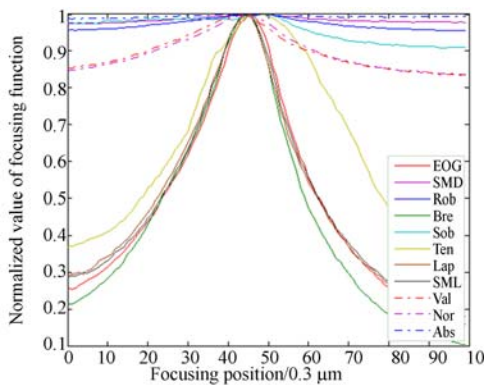
4.2 结果比较

按照陡峭区宽度、清晰度比率、陡峭度、平缓区波动量、局部极值因子和灵敏度等 6 种评价指标^[4]对图 4 所示测试结果分析如下:

(1)绝对方差和 Roberts 聚焦函数对两幅图像的聚焦效果均表现较差,函数清晰度比率、灵敏度、陡峭区宽度等各项性能指标均无法满足聚焦要求;



(a) TB-1 视野聚焦结果
(a) Focusing results of TB-1



(b) TB-2 视野聚焦结果
(b) Focusing results of TB-2

图 4 聚焦实验归一化结果

Fig. 4 Normalization results of focusing experiments

(2)一般方差和归一方差聚焦函数虽对两幅图像都满足基本使用要求,但清晰度比率、陡峭度和灵敏度表现较一般;

(3)Sobel 函数对内容均衡图像聚焦评价良好,但评价内容稀疏图像时,清晰度比率小、灵敏度低;

(4)Laplacian、SML 和 Brener 函数在涂片内容稀疏情况下表现良好,而在内容均衡情况下出现峰值较小、表现较差;

(5)Tenengrad 聚焦函数对两幅图像表现良好,EOG 函数次之。但 Tenengrad 受噪声等环境因素影响会产生局部波动。

5 改进聚焦评价函数

根据以上测试结果, Tenengrad 聚焦函数的

各项指标表现最优,但在内容稀疏或受环境影响情况下可能产生局部极值,且运算周期较长,不能满足应用要求,需在聚焦准确性和效率方面进一步改进。

5.1 改进聚焦评价函数

5.1.1 提高聚焦准确性

显微图像成像按像素可分为两类:内容像素和环境像素。内容像素(细菌等需要观察部分)的梯度变化是评价图像清晰与否的依据;杂质和背景等环境像素会影响聚焦评价的准确性。

为了提高结核杆菌涂片类显微图像聚焦准确性,剥离出内容像素并适当增加其评价权重,聚焦评价函数值将更为准确。选取 Tenengrad 函数作为原型,提出一种改进型聚焦函数 F_{new} ,如式(16):

$$F_{new} = \frac{1}{g} \sum_{i,j} [G_x^2(i,j) + G_y^2(i,j)] \cdot W, \tag{16}$$

其中 W 为聚焦权重,与内容像素的分割方式相关。

有效分割内容像素和环境像素的方式有两种:一是通过固定阈值分割^[12-13];二是根据梯度变化剧烈程度分割。前者简单高效但通用性差,后者根据梯度变化剧烈程度分割更为准确但需要额外焦距的图像进行计算,并需要注意窗口划分和权重配比问题。两种分割方式下,改进 Tenengrad 聚焦函数表达为:

方法一:固定阈值(F_{Ten-T})

$$T = \bar{g}(1 - T_c), \tag{17}$$

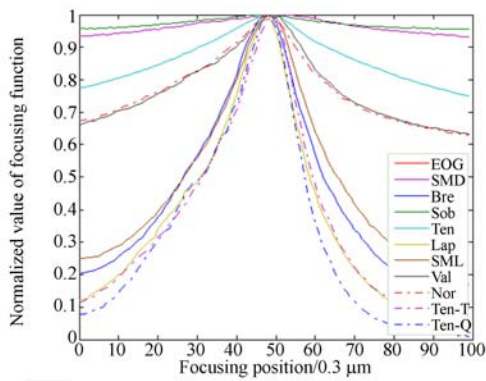
其中, T 为内容阈值($T \in [0, 255]$), T_c 为内容比例因子($T_c \in [0, 1]$), 图像内容越稀疏 T_c 越小。人为定义内容像素占据整个图像像素总数的 10% 以下为图像内容稀疏,所以设置 $T_c = 0.1$ 。

令 $W = T$, 则:

$$F_{new} = F_{Ten-T} = \begin{cases} \frac{1}{g} \sum_{i,j} \{ [G_x^2(i,j) + G_y^2(i,j)] (1 + T_c) \}, & g(x,y) < T \\ \frac{1}{g} \sum_{i,j} \{ [G_x^2(i,j) + G_y^2(i,j)] (1 - T_c) \}, & g(x,y) \geq T \end{cases}, \tag{18}$$

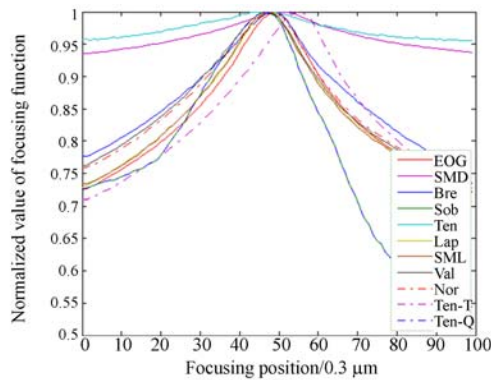
其中: $g(x,y)$ 为像素灰度值, F_{Ten-T} 为固定阈值改进型聚焦函数。

方法二:根据梯度变化(F_{Ten-Q})



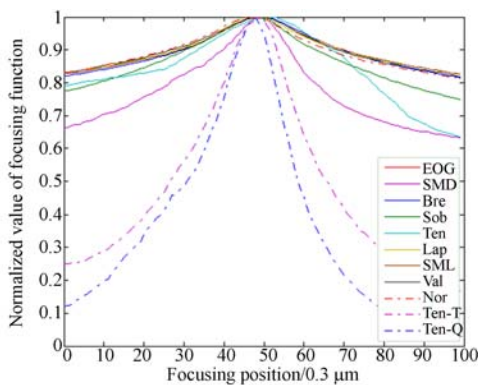
(b) TB-b 聚焦结果

(b) Focusing results of TB-b



(c) TB-c 聚焦结果

(c) Focusing results of TB-c



(d) BC-0 聚焦结果

(d) Focusing results of BC-0

图 7 改进型聚焦实验归一化结果

Fig. 7 Normalization results of improved focusing experiments

F_{Ten-T} 聚焦函数依赖灰度值分割导致图像丰富区域主导了聚焦函数的评价结果,发生聚焦函数峰值偏移。

(2)改进型聚焦函数 F_{Ten-Q} 在 4 个视野的聚焦

表现均优于 F_{Ten-T} 和 F_{Ten} 函数。陡峭区宽度、清晰度比率和灵敏度高于其他函数,使得 F_{Ten-Q} 函数在图像内容稀疏、距离焦平面较远的视野(例如内容稀疏的结核杆菌视野 TB-b 中表现优异,且视野 TB-c 中 F_{Ten-Q} 没有出现峰值偏移现象。

对 Tenengrad、 F_{Ten-T} 和 F_{Ten-Q} 函数的 6 种评价指标进行定量分析,结果如表 2 所示。

表 2 聚焦函数的 6 种评价指标值

Tab. 2 Six kinds of evaluation index values of focusing function

聚焦函数	陡峭区宽度	清晰度比率	陡峭度	平缓区波动的量	局部极值因子	灵敏度
F_{Ten}	48	1.218	0.007	0.009	0.040	0.149
F_{Ten-T}	53	1.329	0.105	0.006	0.087	0.136
F_{Ten-Q}	73	3.472	0.167	0.007	0.108	0.219

采用 5.1.2 提高效率措施,两种改进型函数与 Tenengrad 原函数的算法运算周期如表 3 所示。算法采用 C# 编程语言实现,计算机配置为 4 GB 内存、i7 处理器。可以看出:两种改进型 Tenengrad 函数在运算效率上都有所提高, F_{Ten-T} 函数提高 29.709%, F_{Ten-Q} 函数提高 17.616%。

表 3 聚焦函数运算周期

Tab. 3 Operation period of the focusing function

聚焦函数	Ten	Ten-T	Ten-Q
时间/ms	44.125	31.016	36.352
效率提高%	0	29.709	17.616

采用相同聚焦策略,将 Tenengrad 聚焦函数和 F_{Ten-Q} 改进型聚焦函数用于微形态学智能检验工作站,进行结核杆菌涂片的自动扫描检测。从临床试验情况看,扫描采集大量涂片的图像,高质量清晰图像比例由 82.237% 提高到 96.121%,图像采集速度也有明显提高,解决了医学玻片空白涂区图像扫描聚焦失败的问题,实现了高效、精确自动检测。

6 结 论

介绍了面向结核杆菌涂片等医学玻片的显微

图像自动聚焦系统,实验研究了11种典型灰度梯度自动聚焦函数在评价结核杆菌涂片图像中的性能表现,并分析了评价失效的原因。在Tenengrad聚焦函数基础上提出一种改进型聚焦函数 F_{Ten-Q} ,通过提高内容像素聚焦权重增加聚焦评价函数的准确性和灵敏度。提出了优化聚焦函数运

算周期的措施。显微形态学智能检验工作站临床检验结核杆菌涂片的结果表明:采用 F_{Ten-Q} 聚焦函数的自动聚焦系统中高质量清晰图像比例提高了13.884%、聚焦周期缩短了17.616%,满足显微视觉自动聚焦的技术要求,在实际显微视觉系统应用中取得良好的效果。

参考文献:

- [1] 宗光华,孙明磊,毕树生,等.显微视觉自动聚焦研究[J].光学学报,2005,25(9):1225-1232.
ZONG G H, SUN M L, BI S S, *et al.*. Research on Autofocus Technique in Micro-Vision[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(9):1225-1232. (in Chinese)
- [2] 屈玉福,浦昭邦,赵慧洁,等.调焦评价函数灵敏度的影响因素分析[J].光学学报,2005,25(7):902-906.
QU Y F, PU Z B, ZHAO H J, *et al.*. Influence Factor Analysis of Sensitivity of Focus Criteria Function[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(7):902-906. (in Chinese)
- [3] 孙明磊,宗光华,余志伟,等.基于图像分析的显微视觉自动聚焦系统[J].北京航空航天大学学报,2005,31(2):192-196.
SUN M L, ZONG G H, YU Z W, *et al.*. Automatic focusing system of micro-vision based on image analysis [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2005, 31(2):192-196. (in Chinese)
- [4] 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):234-244.
ZHAI Y P, ZHOU D X, LIU Y H, *et al.*. Design of evaluation index for auto-focusing function and optimal function selection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(4):234-244. (in Chinese)
- [5] 赵辉,鲍歌堂,陶卫.图像测量中自动调焦函数的实验研究与分析[J].光学精密工程,2004,12(5):531-536.
ZHAO H, BAO G T, TAO W. Experimental research and analysis of automatic focusing function for imaging measurement[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(5):531-536. (in Chinese)
- [6] 徐征,陈聿夫,孙谦,等.机器视觉精密测量中的显微光学聚焦[J].光学精密工程,2016,24(9):2095-2100.
XU Z, CHEN Y F, SUN Q, *et al.*. Auto-focusing in optical microscopy for machine-vision-based precise measurement[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(9):2095-2100. (in Chinese)
- [7] BODDEKE F R, VLIET L J V, NETTEN H, *et al.*. Autofocusing in microscopy based on the OTF and sampling[J]. *Bioimaging*, 2015, 2(4):193-203.
- [8] TENENBAUM J M. *Accommodation in computer vision*[M]. Stanford University, 1971.
- [9] NAYAR S K, NAKAGAWA Y. Shape from focus [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 1994, 16(8):824-831.
- [10] YANG G, NELSON B J. Wavelet-based auto-focusing and unsupervised segmentation of microscopic images [C]// *Ieee/rsj International Conference on Intelligent Robots and Systems*. IEEE, 2003:2143-2148 vol. 3.
- [11] VOLLATH D. Automatic focusing by correlative methods[J]. *Journal of Microscopy*, 1987, 147(3):279-288.
- [12] 李郁峰,陈念年,张佳成.一种快速高灵敏度聚焦评价函数[J].计算机应用研究,2010,27(04):1534-1536.
LI Y F, CHEN N N, ZHANG J C. Fast and high sensitivity focusing evaluation function[J]. *Application Research of Computers*, 2010, 27(04):1534-1536. (in Chinese)

- [13] 洪裕珍, 任国强, 孙健. 离焦模糊图像清晰度评价函数的分析与改进[J]. 光学 精密工程, 2014, 22(12):3401-3408.
HONG Y Z, REN G Q, SUN J, *et al.*. Analysis and improvement on sharpness evaluation function of defocused image [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(12):3401-3408. (in Chinese)
- [14] 翟永平, 刘云辉, 周东翔, 等. 稀疏图像内容情况下显微镜自动聚焦算法[J]. 软件学报, 2012, 34(05):1281-1294.
ZHAI Y P, LIU Y H, ZHOU D X, *et al.*. Auto-focusing Method for Microscopy with Low Image Content Density[J]. *Journal of Software*, 2012, 34(05):1281-1294. (in Chinese)

作者简介:



张从鹏(1975—),男,河南鲁山人,工学博士,教授,2000年于西南交通大学获得学士学位,2003年于北方工业大学获得硕士学位,2007年于北京航空航天大学获得博士学位,主要从事复杂机电装备系统的智能测控技术、机器视觉与图像检测技术、机电耦合动力学系统分析与控制方面的研究。E-mail: soaringroc@ncut.edu.cn



曹文政(1992—),男,河南安阳人,硕士研究生,主要从事机器视觉、图像处理方面的研究。E-mail: mayday_cwz@163.com