

文章编号: 0253-2239(2005)09-1225-8

显微视觉自动聚焦研究*

宗光华 孙明磊 毕树生 于靖军 余志伟

(北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100083)

摘要: 提出一种评估空域聚焦函数的方法。从计算时间与聚焦曲线变化率两个方面, 提出四个参量作为评估依据, 可从多个函数中筛选出最佳聚焦测度。针对研制的微对准装配自动聚焦系统的评估结果表明: 灰度熵函数是适合于该系统的最佳聚焦测度。为克服聚焦搜索运动中的机械传动回差, 提出不同于传统聚焦策略的“定位法”。该方法的核心是建立聚焦函数值与离焦量之间的函数关系, 提出采用多项式拟合、高斯函数拟合以及样条插值拟合的方法可以构建这种函数关系; 并给出了计算结果。最后综合灰度熵函数与定位法策略进行自动聚焦实验, 得到自动聚焦精度为 $3.4 \mu\text{m}$; 完成一次自动聚焦平均时间为 3.3 s 。实验结果证明所述方法可以实现准确、实时地自动聚焦。

关键词: 信息光学; 自动聚焦; 聚焦函数; 聚焦策略

中图分类号: TP242.6⁺2 文献标识码: A

Research on Autofocus Technique in Micro-Vision

Zong Guanghua Sun Minglei Bi Shusheng Yu Jingjun Yu Zhiwei

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

Abstract: An evaluation method of autofocus function based on spatial domain is presented. Four features are proposed to evaluate the function on computation time and sharpness of the focus curve. An optimum can be filtrated from many classic functions. Entropy function is the evaluating result through experiments on the developed autofocus system of micro assembly workcell. A novel focus searching algorithm——positioning algorithm (PA) which is different from hill climbing searching algorithm (HCSA) and Fibonacci Searching Algorithm (FSA) is put forward. Setting up the relation between defocus value and focus function value is key factor of the algorithm. Three methods: polynomial fitting, Gaussian function fitting and cubic spline interpolation fitting are presented to realize PA. Then an autofocus system comprising entropy function and PA is set up. Experimental results indicate that focusing precision can reach $6.992 \mu\text{m}$ and one focusing processing can be done within 3.4 s . It proves that the evaluation method and the PA can realize autofocus accurately and quickly.

Key words: information optics; autofocus; focus function; focus searching algorithm

1 引 言

没有自动聚焦功能的显微视觉系统很难实现基于图像分析操作的工业化与自动化^[1]。因此, 自动聚焦技术在生化分析、生物工程微操作、微机电系统 (MEMS) 器件微装配、集成电路制造、光电子器件封装、三维视觉深度信息恢复以及图像模糊辨识等领域已获得广泛研究^[1~13]。文献[1]研究了用于半

导体制造领域的掩模/光刻对准的自动聚焦系统, 该系统能够在短时间内完成高精度的自动聚焦; 文献[2, 3]对生物细胞显微图像进行分析, 其中, 文献[2]试图建立一套适用于不同数值孔径显微镜、不同性质分析对象 (荧光图像、明域显微图像和相差显微图像等) 的较为通用的自动聚焦算法, 并对聚焦效果进行了量化分析; 文献[4~6]从模糊图像辨识与重构的角度对自动聚焦进行了研究; 文献[7]指出, 微操

* 国家 863 计划 (2002AA404460, 2004AA404260) 和国家“十五”、“211 工程”学科建设资助课题。

作者简介: 宗光华 (1943~), 男, 江苏宜兴人, 北京航空航天大学机械工程及自动化学院教授, 博士生导师, 主要从事机器人视觉、移动机器人传感器信息融合、生物芯片分配机理及视觉检测的研究。E-mail: ghzong@buaa.edu.cn

收稿日期: 2004-09-13; 收到修改稿日期: 2005-01-07

作工作对象和微操作工具相对于显微镜的焦深而言,其深度尺寸较大,如何定义与识别其焦平面是一个突出的问题,文中采用在工作对象与操作工具上制作附加标记来解决这一矛盾。但上述文献均未对自动聚焦函数评估与聚焦策略展开深入研究。

本文针对“聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)微流控芯片微对准自动装配系统”中的自动聚焦单元展开研究,阐述了如何选择聚焦函数与设计聚焦搜索策略以实现实时、准确地自动聚焦。

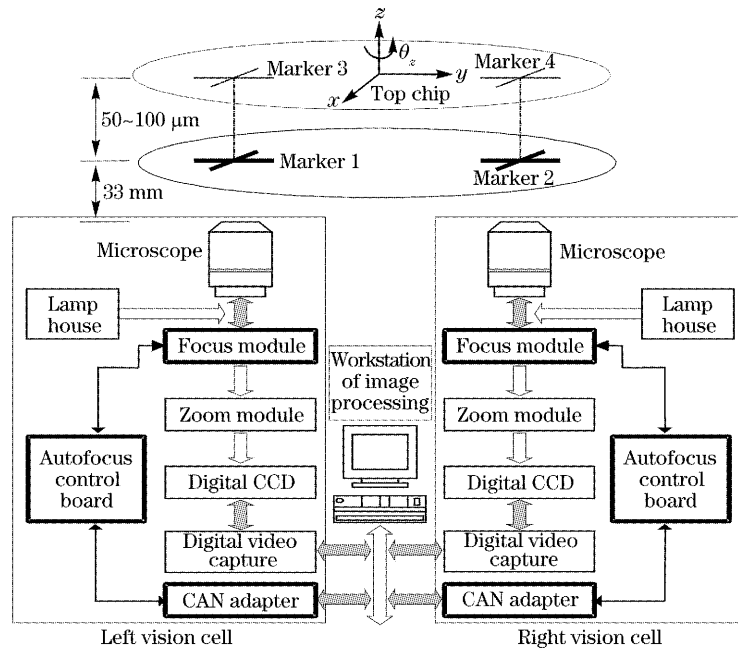


图1 自动聚焦系统构成

Fig. 1 Configuration of autofocus system

2.2 相关主要设备参量

显微镜为 Mitutoyo $10\times$ 物镜,数值孔径 $NA=0.28$;

使用 1394 接口的数字 CCD(Basler A302f)。782 pixel \times 582 pixel, $1/2''$ (6.4 mm \times 4.8 mm)成像靶面,像素尺寸 $8.3\ \mu\text{m}\times 8.3\ \mu\text{m}$,最大帧速 30 f/s;

图像接口卡为 Matrox 公司的 Meteor2/1394;

使用照度稳定的同轴光源照明, $\lambda\approx 510\ \text{nm}$;

自动聚焦运动分辨力: $0.2\ \mu\text{m}/\text{pulse}$;

所有算法及控制均在工控机(研华/Advantech, PCA-6184V, 1.8 GHz 主频, 512 MB RAM, Windows 2000)上实现。

另外,焦深是自动聚焦系统中的重要参量,是选取聚焦搜索步长以及衡量聚焦精度的重要依据。根据文献[8],有焦深:

$$\Delta Z = \lambda \left\{ 4n \times \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{NA}{n} \right)^2} \right] \right\}, \quad (1)$$

2 自动聚焦系统

2.1 自动聚焦系统硬件组成

微对准装配显微视觉系统由左、右两个视觉单元构成,如图 1 所示。微流控芯片的基片与盖片上各有两个标记。每个视觉单元完成一对标记图像信息的获取。基片位置固定,盖片由精密定位平台驱动,可以根据视觉信息的引导产生 3-DOF(x, y, θ_z)的微对准运动。要求自动聚焦系统能够实时、准确地将标记清晰成像。

其中 λ 为照明光波长, n 为折射率, NA 表示数值孔径。经计算, $\Delta Z = 3.2\ \mu\text{m}$ 。

以下实验数据均在此硬件基础上获得。

3 聚焦函数的研究

本文对聚焦函数的研究基于空域展开。

3.1 聚焦函数

基于空域的聚焦函数可归纳为以下三类:基于图像梯度的函数;基于灰度值统计规律的函数;其他特殊函数。

3.1.1 基于图像梯度的聚焦函数

图像的梯度反映图像的灰度变化情况,能够衡量图像中高频信息的多少。基于图像梯度的聚焦函数大多由一阶差分算子衍生而来:

Brenner 函数^[3,7]: F_{Brenner} ;

绝对梯度函数^[3]: $F_{\text{A-G}}$;

平方梯度函数^[9]: F_{S-G} ;

Roberts 算子梯度函数: $F_{Roberts}$;

Sobel 算子梯度函数: F_{Sobel} ;

Tenengrad 函数^[9]: $F_{Tenengrad}$;

Laplace 算子函数: $F_{Laplace}$ 。

3.1.2 基于灰度值统计规律的聚焦函数

有效像素灰度值和函数^[10]: $F_{Pixel-Add}$;

有效像素数函数^[10]: $F_{Pixel-Num}$;

灰度熵函数^[3]: $F_{Entropy}$ 。

3.1.3 其他聚焦函数

Vollath 函数^[3]: $F_{Vollath}$;

方差函数^[9]: $F_{Variance}$ 。

在焦点位置附近, 聚焦系统以步长 $u = 5 \mu\text{m}$ ($u < Z_{\text{dof}}$) 作单向运动, 摄取 21 帧图像。分别利用上述聚焦函数对 21 帧图像进行分析, 绘制相应的归一化聚焦曲线, 如图 2 所示。

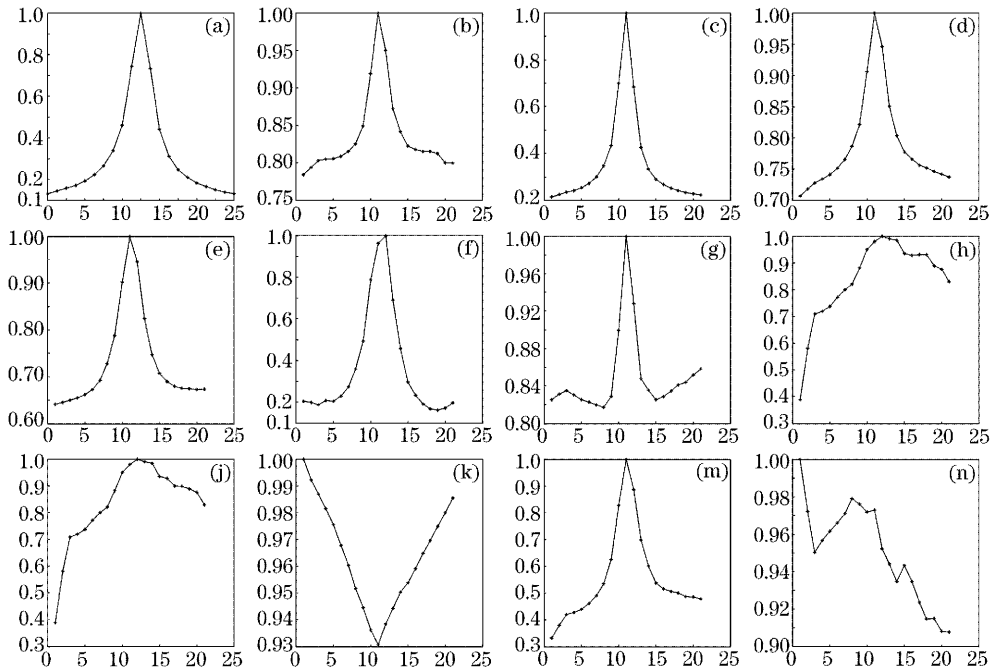


图 2 典型聚焦函数聚焦曲线对比

Fig. 2 Normalized experimental curves with different focus functions. (a) $F_{Brenner}$, (b) F_{A-G} , (c) F_{S-G} , (d) $F_{Roberts}$, (e) F_{Sobel} , (f) $F_{Tenengrad}$, (g) $F_{Laplace}$, (h) $F_{Pixel-Add}$, (j) $F_{Pixel-Num}$, (k) $F_{Entropy}$, (m) $F_{Vollath}$, (n) $F_{Variance}$

3.2 聚焦函数评估

对图 2 中各聚焦曲线进行定性分析: $F_{Brenner}$ 、 F_{Sobel} 、 F_{S-G} 、 $F_{Roberts}$ 、 F_{Sobel} 、 $F_{Entropy}$ 和 $F_{Vollath}$ 具有较好的单边单调、对称及单峰性, 均可作为聚焦测度来有效评估图像的离焦程度; 其余函数则不适于在本系统作为聚焦测度。

提出 4 个参量对 $F_{Brenner}$ 等 7 个聚焦函数进行评估:

评估参量一: T_c 。聚焦函数对一帧图像数据的计算时间用 T_c 表示。该参量直接影响到自动聚焦的实时性。在显微视觉操作领域, 自动聚焦实时性因素是最重要的要求。

评估参量二~四: M_{cfrl} 、 M_{cfr} 、 M_{cfr} 。用以衡量聚焦函数的变化率。根据聚焦曲线的特征, 通常将整个聚焦区域划分为“精聚焦区”(FFR)和“粗聚焦区”(CFR), 如图 3。精聚焦区位于焦点附近, 聚焦曲线

陡直; 粗聚焦区离焦点较远, 聚焦曲线变化较为平缓。文献[2, 11]取峰值的 50% 来衡量精聚焦区的性能, 本文则针对各种聚焦曲线的特征, 认为峰一峰值的 75% 作为聚焦区域划分阈值更为合适。

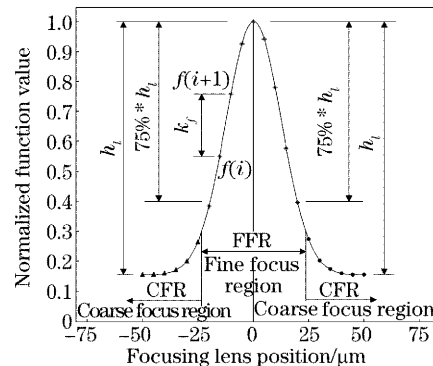


图 3 理想聚焦曲线特征

Fig. 3 Feature of perfect focusing curve

实际显微图像由于受到环境噪声及光路放大倍数轻微改变等因素影响^[6], 聚焦曲线并不能关于焦点对称, 如图 4 所示。须将左粗聚焦区(CFRL)与右粗聚焦区(CFRR)分开讨论。定义:

$$k_f = f(i+1) - f(i), \quad (2)$$

$$M_{cfl} = \min\{k_r | k_r = k_f/h_1, i \in \text{CFRL}\}, \quad (3)$$

$$M_{cfr} = \min\{k_r | k_r = k_f/h_r, i \in \text{CFRR}\}, \quad (4)$$

$$M_{ffr} = \min\{k_r | k_r = k_f/h_1, i \in \text{FFR}\}, \quad (5)$$

M_{ffr} 反映出聚焦曲线在精聚焦区域的特征, M_{ffr} 大, 则曲线在焦点附近陡直, 聚焦精度高, 误聚焦概率低。尚未有文献对聚焦函数在粗聚焦区域的性能进行讨论。本文提出 M_{cfr} 、 M_{cfl} 两个参量来反映聚焦曲线在粗聚焦区域的特征。 M_{cfr} 及 M_{cfl} 大, 则聚焦曲线在粗聚焦区域不会过于平缓, 甚至振荡。搜索焦点时, 将会很快完成粗聚焦、进入精聚焦阶段, 聚焦效率高。另外, 如果聚焦曲线在粗聚焦区更为“陡峭”, 也意味着粗聚焦区的范围更大, 说明显微镜头在离焦点较远的位置也能稳定可靠地自动搜索到焦平面位置, 这对于提高显微视觉操作自动化的可靠性尤为重要。

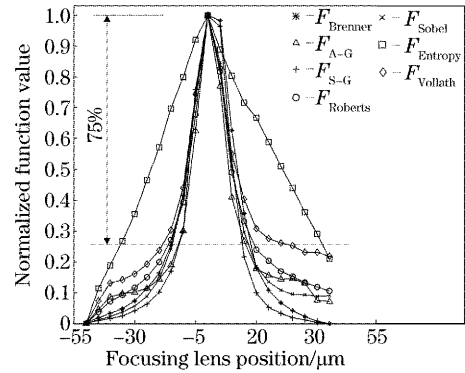


图 4 7 种函数归一化聚焦曲线

Fig. 4 Comparison of 7 functions at their normalized focusing curves

以 M_{cfl} 、 M_{ffr} 、 M_{cfr} 、 T_c 四个参量对 $F_{Brenner}$ 等函数进行评估, 实验数据见表 1。在每个参量下对七个聚焦函数进行了排序, 最优者赋“1”, 最差者赋“7”。然后将每个函数的各排序号相加, 即为该函数的总评估值 E_v 。从表 1 中, 得到灰度熵函数 ($F_{Entropy}$) 为适合本聚焦系统的最优聚焦函数, $F_{Roberts}$ 次之, 其余函数的评估值则大致相等。

表 1 最佳聚焦函数评估表

Table 1 Evaluating values of focus functions

Function	M_{cfl}	M_{ffr}	M_{cfr}	T_c/ms	E_v
F_{Brenne}	0.015 (3)	0.018 (7)	0.0079 (4)	1440 (3)	17
F_{A-G}	0.010 (5)	0.023 (6)	0.0022 (6)	1190 (2)	19
F_{S-G}	0.006 (7)	0.038 (3)	0.0038 (5)	2370 (4)	19
$F_{Roberts}$	0.022 (2)	0.033 (4)	0.0150 (2)	2680 (5)	13
F_{Sobel}	0.011 (4)	0.154 (1)	0.0016 (7)	9690 (7)	19
$F_{Entropy}$	0.110 (1)	0.048 (2)	0.0690 (1)	250 (1)	5
$F_{Vollath}$	0.010 (5)	0.033 (4)	0.0110 (3)	2870 (6)	18

4 聚焦策略

4.1 问题描述

聚焦策略的本质是一维寻优问题。爬山法(Hill Climbing Searching Alorithm, HCSA)是使用最多的焦点搜索策略。另外, 斐波那契法(Fibonacci searching algorithm, FSA)的应用也很普遍^[5,7]。

爬山法的一个突出特点是确定了峰值点位置后, 须反向运动返回至焦平面。这就带来反向运动定位精度的问题。目前, 绝大多数的显微视觉聚焦系统仍依靠齿轮传动与丝杠螺旋传动以实现镜头与被观察目标的相对运动, 反向运动不可避免存在回程间隙而损失定位精度。精密运动单元的回程间隙约为 $2 \sim 5 \mu\text{m}$, 普通传动单元的间隙约为 $10 \sim$

$20 \mu\text{m}$; 显微视觉系统的焦深通常不大于 $10 \mu\text{m}$, 回程间隙与焦深处于一个数量级上, 回程间隙对自动聚焦精度影响很大。斐波那契法需要更为频繁的往复运动^[3], 回程间隙对斐波那契法聚焦精度的影响更加明显。

文献[2]提出对反向运动误差进行补偿, 但效果并不理想。

4.2 定位法

定位法(Positioning Algorithm, PA)解决了上述问题。该方法的核心是建立聚焦函数值 $f(i)$ 与离焦量 x_i 之间的函数关系 $F(x)$ 。聚焦策略如图 5 所示。

1) 确定聚焦运动方向及 x 的正负。处于起始点 p_0 , 摄取图像并计算聚焦测度, 得到 $f(p_0)$; 然后有

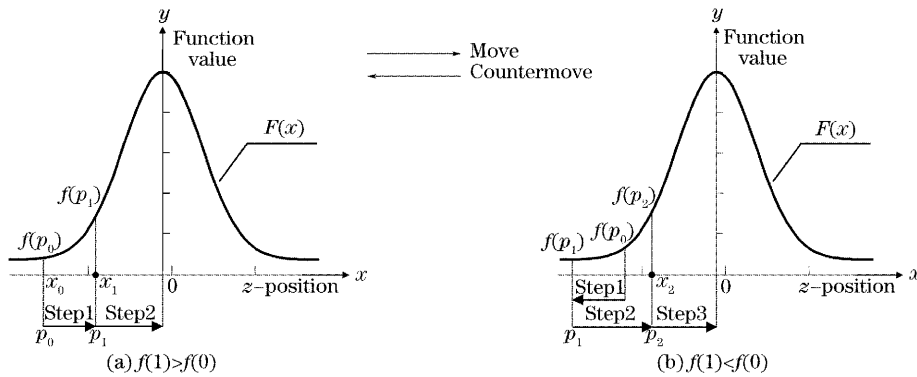


图 5 定位法

Fig. 5 Positioning algorithm

取正向运动至 p_1
 $\left\{ \begin{array}{l} \text{若 } f(p_1) > f(p_0) \Rightarrow \text{正向聚焦, } x < 0; \text{图 9(a)} \\ \text{若 } f(p_1) < f(p_0) \Rightarrow \text{负向聚焦, } x > 0; \end{array} \right.$
 负向运动至 p_1
 $\left\{ \begin{array}{l} \text{若 } f(p_1) < f(p_0) \Rightarrow \text{负向聚焦, } x > 0; \\ \text{若 } f(p_1) > f(p_0) \Rightarrow \text{正向聚焦, } x < 0; \text{图 9(b)} \end{array} \right.$

2) 根据函数 $y = F(x)$, 有

$$y = F(x), x \leq 0 \Rightarrow x = F_1^{-1}(y), \quad y = F(x), x \geq 0 \Rightarrow x = F_2^{-1}(y)$$

$\left\{ \begin{array}{l} \text{正向聚焦, } x < 0 \Rightarrow x_1 = F_1^{-1}[f(p_1)] \Rightarrow \text{正向运动 } -x_1; \text{图 9(a)} \\ \text{负向聚焦, } x > 0 \Rightarrow x_2 = F_2^{-1}[f(p_2)] \Rightarrow \text{负向运动 } x_2; \\ \text{负向聚焦, } x > 0 \Rightarrow x_1 = F_2^{-1}[f(p_1)] \Rightarrow \text{负向运动 } x_1; \\ \text{正向聚焦, } x < 0 \Rightarrow x_2 = F_1^{-1}[f(p_2)] \Rightarrow \text{正向运动 } -x_2; \text{图 9(b)} \end{array} \right.$

即可完成自动聚焦。

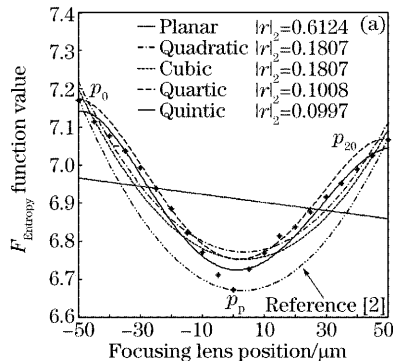
定位法聚焦策略对于视觉操作对象与视场环境背景相对比较固定的情况尤其适用。

4.3 聚焦曲线数学模型

如何确立 $y = F(x)$ 、即建立聚焦曲线的数学模型是实现定位法的关键。由于灰度熵函数是本聚焦系统的最佳空域测度,因此下文以灰度熵函数聚焦曲线数学模型的建立作为算例。

4.3.1 一元多项式模型

文献[2]用一元二次方程描述聚焦曲线:



$$F(x) = ax^2 + bx + c, \quad (6)$$

可以利用聚焦曲线上的 3 个数据点 p_0, p_p, p_{20} 求得 (6) 式中的结构参量,参量 a, b, c , 见图 6(a)。用该方法建立的聚焦曲线数学模型与原始实验数据点存在较大的误差。采用多项式拟合的方式求解多项式结构参量 $a_1, a_2, \dots, a_n, a_{n+1}$, 见 (7) 式。

$$F(x) = a_1x^n + a_2x^{n-1} + \dots + a_nx + a_{n+1}, \quad (7)$$

拟合结果见图 6(a)。可以看出:(7)式对灰度熵函数的拟合精度虽有提高,但仍无法满足应用要求。

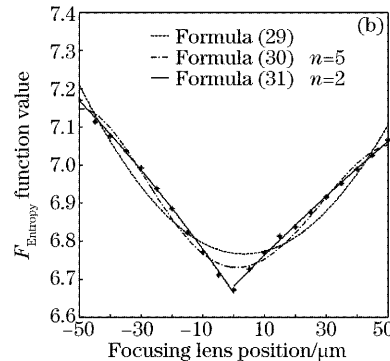


图 6 多项式拟合灰度熵函数聚焦曲线。(a) 多项式拟合,(b) 高斯函数拟合

Fig. 6 Fitting curves of entropy function. (a) Polynomial fitting, (b) gaussian function fitting

4.3.2 高斯模型

多数聚焦曲线的形状同高斯曲线类似,如图 2(a)、图 2(c)以及图 2(e)。文献[6]提出用高斯函数描述聚焦曲线。但直接利用(8)式描述灰度熵聚焦曲线依然误差较大。

$$F(x, f_p, \bar{x}, \sigma_F) = 2f_p - f_p \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x - \bar{x}}{\sigma_F}\right)^2\right], \quad (8)$$

将(8)式重新表达为

$$F(x) = \exp\{ax^2 + bx + c\}, \quad (9)$$

将(9)式线性化:

$$T(x) = \ln[F(x)] = ax^2 + bx + c, \quad (10)$$

甚至可将(10)式扩展至:

$$F(x) = \exp\{a_1x^n + a_2x^{n-1} + \dots + a_nx + a_{n+1}\}, \quad (11)$$

这样高斯函数的求解转化为多项式拟合问题。利用(11)式对灰度熵聚焦曲线的拟合结果见图 6(b)。同样地,由于个别数据点拟合误差偏大,在本系统中还不适于以高斯函数模型建立 $y=F(x)$ 。

4.3.3 插值实现定位法

将已有的原始数据点作为“基准数据”,进行插值计算,估算出基准点之间的其他点的函数值,可以得到离散函数:

$$F(x) = \underbrace{\{f(-n \cdot t), \dots, f(-i \cdot t), \dots, \overbrace{f(-t)}^{\text{插值点}}, \overbrace{f(0)}^{\text{基准点}}, f(t), \dots, f(i \cdot t), \dots, f(n \cdot t)\}}_{(2n+1)\text{个元素}}, \quad (12)$$

t 为插值密度,可以根据需要适当设定。

如果用(12)式实现定位法,则在聚焦策略中,不必求解 $F^{-1}(y)$ 。得到一帧图像并计算出 $f(p_2)$,在(12)式的离散函数值中顺序查找,直至满足:

$$f(i \cdot t) < f(p_2) < f\{(i+1) \cdot t\}$$

可得: $x_2 \approx i \cdot t$,镜头运动 $(i \cdot t)$ 距离即可聚焦。

分别以灰度熵函数、Brenner 函数的实验数据点作为基准样点,选择精度较高的三次样条插值方法对聚焦实验曲线进行平滑处理。考虑到本聚焦系统的焦深 $Z_{\text{dof}} = 3.2 \mu\text{m}$,设定插值密度 $t = 1 \mu\text{m}$ 。应有 $t < Z_{\text{dof}}$ 。若 t 过小,不但不能提高聚焦精度,反而会因为查找大量数据而降低聚焦速度。平滑结果见图 7,插值后的灰度熵聚焦曲线离散函数 $F(x)$ 为

$$F(x) = \underbrace{\{ \overbrace{7.1691}^{f(-50)}, \dots, \overbrace{7.020}^{f(-33)}, \dots, \overbrace{6.6724}^{f(-1)}, \overbrace{6.672}^{f(0)}, \overbrace{6.6776}^{f(1)}, \dots, \overbrace{6.9368}^{f(33)}, \dots, \overbrace{7.0653}^{f(50)} \}}_{101\text{个元素}}$$

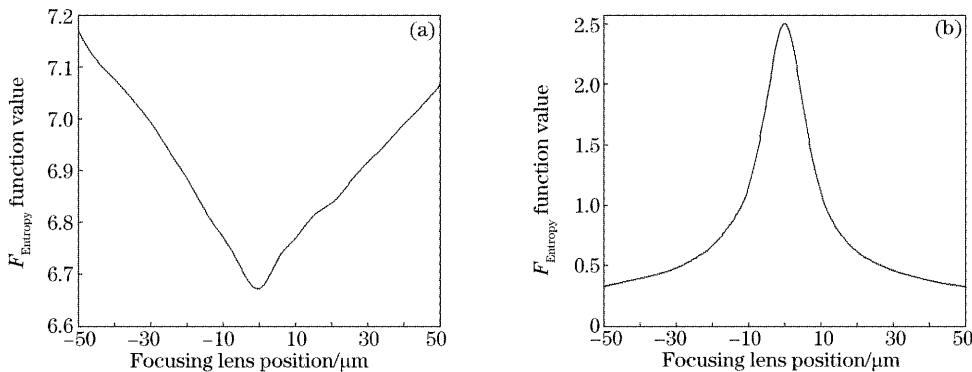


图 7 三次样条插值拟合灰度熵函数聚焦曲线

Fig. 7 Cubic spline interpolation fitting. (a) F_{Entropy} , (b) F_{Brenner}

如无法用简单的数学模型如多项式或高斯函数对聚焦曲线进行准确描述,插值法求离散函数 $F(x)$ 不失为实现定位法的通用、实用而且有效的方式。

4.4 聚焦策略的实时性

自动聚焦系统的实时性取决于三点:

1) 聚焦函数的计算时间;

2) 自动聚焦过程中需要摄取的图像数量^[3];

3) 搜索过程的运动时间。

其中,2)、3)同聚焦策略紧密相关。制订合理的聚焦策略,不但能提高聚焦精度,而且有益于操作的实时性。

本文提出的定位法,在避免机械传动回差,提高

聚焦精度的同时,还可以提高自动聚焦的实时性。如图 8 所示,同最简单的爬山法(HCSA)相比,定位法(PA)在函数计算、图像摄取、搜索运动所用时间上都具有明显的优势。

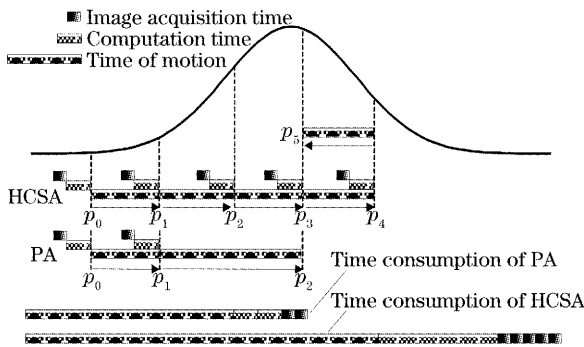


图 8 两种聚焦策略实时性对比

Fig. 8 Comparison of two algorithms PA and HCSA at real-time capability

5 自动聚焦实验

依据两个参量考查系统的自动聚焦性能:

1) 聚焦精度;从不同的离焦起始位置进行自动聚焦实验,使用精密测距仪器对每次自动聚焦搜索的焦平面位置进行量测,得到焦平面相对于某一选取基准平面的距离 l_i (单位: μm)。精密测距仪器可以是超声测距仪、激光测距仪或激光干涉仪等,文献[12]使用了阿贝比长仪。本聚焦系统由于安装空间所限,无法引入测距仪器,而通过读取精密定位平台的旋转编码器的位置获得 l_i 。经测量标定,该定位单元在聚焦运动方向上的重复定位精度为 $1.2 \mu\text{m}$,约为光学系统焦深的 $1/3$,可用作测量基准,同时可以近似得到测量仪器误差 $\Delta=1.2 \mu\text{m}$ 。

2) 聚焦速度;用每次自动聚焦所用时间来衡量聚焦的实时性。

采用灰度熵聚焦函数,以及“定位法”作为聚焦策略,系统硬件参量如 2.2 节所述。自动聚焦实验结果见表 2。

表 2 自动聚焦实验结果

Table 2 Experimental results of autofocus

No.	$l_i/\mu\text{m}$	T_i/ms	No.	$l_i/\mu\text{m}$	T_i/ms
1	63.447	3170	7	58.632	3123
2	57.321	3374	8	60.213	3200
3	66.972	3347	9	68.550	3428
4	66.534	3414	10	60.346	3289
5	65.320	3311	11	63.413	3455
6	69.345	3301	12	55.362	3371

定义

$$\delta = \pm \sqrt{\left[\frac{t_p(n-1)}{\sqrt{n}} \cdot S \right]^2 + \Delta^2} = \pm 3.4 \mu\text{m},$$

$$\bar{T} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i = 3.3 \text{ s},$$

δ 反映了自动聚焦的精度,即 l_i 以 95% 的置信概率出现在 $[59.567, 66.343]$ 内。 \bar{T} 则体现了自动聚焦的实时性,定位法聚焦策略 3.3 s 的平均聚焦时间较之于爬山法的 4.5 s 有明显提高。

图 9 为自动聚焦前、后的图像对比。

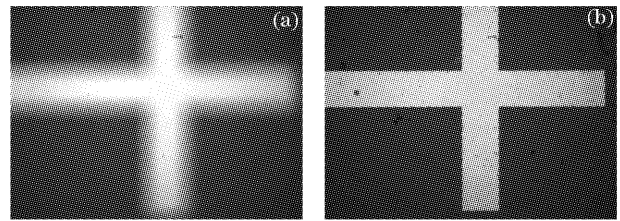


图 9 自动聚焦显微图像。(a)散焦时,(b)在焦点上

Fig. 9 Autofocus images under microscopy.

(a) In defocus, (b) in focus

6 结 论

准确、快速地自动聚焦是实现显微视觉伺服操作的前提。本文从聚焦函数和聚焦策略两方面讨论自动聚焦系统构筑的原则和方法。以“微流控芯片微对准自动装配系统”中的自动聚焦单元作为实验平台,对 Brenner 函数等 12 种聚焦函数进行实验对比研究,提出 4 个评估参量对其中 7 个有效聚焦函数进行评估,得到灰度熵函数为最佳。提出定位法聚焦策略,有效避免了机械传动回差,并提高了实时性。针对多项式拟合,高斯函数拟合对灰度熵函数描述的准确性较低的缺陷,采用样条插值的方法建立 $F(x)$ 。最后通过实验得到:自动聚焦精度 $3.4 \mu\text{m}$,完成一次聚焦平均用时 3.3 s。自动聚焦精度与实时性均满足显微视觉中 Look-and-Move 的操作控制要求。

本文对聚焦测度与聚焦策略的研究在生物细胞学分析、显微立体视觉等其他显微视觉的研究同样具有重要借鉴意义。

参 考 文 献

- 1 E. Hughlett, P. Kaiser. An autofocus technique for imaging microscope[J]. *Acoustics, Speech and Signal Processing*, 1992, 3: 93~96
- 2 J. M. Geusebroek, F. Cornelissen, Arnold W. M. Smeulders *et al.*. Robust autofocus in microscopy[J]. *Cytometry*, 2000, 39: 1~9
- 3 A. Santos, C. Ortiz De Solorzano, J. J. Vaquero *et al.*. Evaluation of autofocus functions in molecular cytogenetic

- analysis[J]. *J. Microscopy*, 1997, **188**(3): 264~272
- 4 F. Rooms, M. Ronsse, A. Pizurica *et al.*. PSF estimation with application in autofocus and image restoration[C]. *Proc. 3rd IEEE Benelux Signal Processing Symposium*, Leuven, Belgium, 2002. s02-1~s02-4
- 5 Liu Ke, Yang Jingyu, Quan Jun. Blur identification and restoration of images with out-of-focus blur[J]. *Acta Automatica Sinica*, 1994, **20**(1): 58~64 (in Chinese)
刘 克, 杨静宇, 权 军等. 离焦图像模糊辨识及复原方法研究[J]. *自动化学报*, 1994, **20**(1): 58~64
- 6 Shree K. Nayar, Yasuo Nakagawa. Shape from Focus[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1994, **16**(8): 824~831
- 7 S. Allegro, C. Chanel, J. Jacot. Autofocus for automated microassembly under a microscope[J]. *Image Processing*, 1996, **1**(16-9): 677~680
- 8 I. T. Young, R. Zagers, L. J. Van Vliet *et al.*. Depth of focus in microscopy[C]. *Proceedings SCIA93*, Tronto, Norway, 1993. 493~498
- 9 T. T. E. Yeo, S. H. Ong, Jsyasooriah. Autofocusing for tissue microscopy[J]. *Image Vision Comput.*, 1993, **11**(10): 629~639
- 10 Li Heqiao, Zhang Yimo, Chang Rongqing *et al.*. Study on automatic focusing of image collecting automatic biological microscope system[J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(8): 1106~1110 (in Chinese)
李贺桥, 张以谟, 常容青等. 图像采集自动生物显微镜系统自动调焦的研究[J]. *光学学报*, 1995, **15**(8): 1106~1110
- 11 L. Firestone, K. Cook, K. Culp *et al.*. Comparison of autofocus methods for automated microscopy[J]. *Cytometry*, 1991, **12**(3): 195~206
- 12 Guo Yanzhen, Qiu Zongming, Li Xin *et al.*. The method of tuning focus for image measurement technology[J]. *J. Xi'an University of Technology*, 2001, **17**(1): 40~42 (in Chinese)
郭彦珍, 邱宗明, 李 信等. 图像测量技术中一种调焦的判别方法[J]. *西安理工大学学报*, 2001, **17**(1): 40~42
- 13 Ding Yingchun, Zhang Shulian, Li Yan *et al.*. Experimental study on improving axial resolution of scan microscope[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(5): 551~553 (in Chinese)
丁迎春, 张书陈, 李 岩等. 提高激光反馈扫描显微镜轴向分辨率的实验研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(5): 551~553