基于互相关的自动聚焦方法

董 代 刘 荣 孙明磊 宗光华

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100083)

摘 要: 针对自动聚焦系统,提出了基于互相关的自动聚焦算法. 分析了传统自动聚焦算法在速度和精度方面存在的不足,引入互相关原理,定义基于互相关的模板相关算法 F_{TC}. 由于选择模板图像的不同,实验的结果不同,进而导致自动聚焦分析的算法也不相同. 根据模板图像和实验结果,得出该算法存在 2 种形式——模板相关的第 1 种形式和第 2 种形式. 模板图像为聚焦前位置图像,称为模板相关的第 1 种形式,该形式的实验曲线是由小到大,再减小的过程;模板图像为聚焦图像时,称为模板相关的第 2 种形式,该形式的实验曲线是由大到最小,再增大的过程. 2 种形式的图像处理实验结果,与其他几种主要聚焦评价函数(平方梯度函数,Brenner 函数)进行比较,结果表明该算法简单,原理容易实现,实验曲线能避免各种波动,因此基于互相关的自动聚焦算法提高了自动聚焦的精度和速度. 该算法应用于微流控芯片对准装配自动聚焦系统中,取得了良好的聚焦效果.

关 键 词: 自动聚焦; 互相关; 相关原理

中图分类号: TP 242.6^{+}2

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)03-0306-05

Auto-focusing algorithm based on cross correlation

Dong Dai Liu Rong Sun Minglei Zong Guanghua

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

Abstract: Aiming auto-focusing system, auto-focus algorithm based on cross correlation was brought forward. The limitation of conventional auto-focusing in definition and velocity was analyzed. Correlation principle was introduced, and template correlation algorithm based on cross correlation was defined. Owing to difference of template image selected, the result of experimentation is different, so that auto-focus analysis algorithm is different. Based on different template image and the result of experimentation, two forms of correlation function were presented, including the first template correlation and the second template correlation. If the place of template image is before focusing, the form is named the first form, curve of which changes from small value to big, then to small, if the template image is focusing image, the form is named the second form, curve of which changes from big value to least, then to big. The result which two forms processes image was compared with the result of experimentation of other focus evaluating functions, such as square gradient function, correlation function. By experimentation comparison, it concludes that the auto-focusing algorithm based on cross correlation improves definition and velocity of auto-focus algorithm. The algorithm has been successfully tested to be effective on micro-fluidic alignment assembly auto-focusing system. It shows that the algorithm has achieved better auto-focus effects.

Key words: auto-focusing; cross correlation; correlation theory

收稿日期: 2005-06-09

基金项目: 国家 863 基金资助项目(2004AA404260)

作者简介: 董 代(1980-),女,山东日照人,硕士生, mxgu1999@vip.sohu.com.

在获取清晰图像的过程中,快速、准确的自动聚焦十分重要. 自动聚焦主要解决的问题是提高聚焦的精度和速度,精度将影响后期图像处理的结果;因场景中被摄景物离拍摄的距离时刻发生变化,故快速的聚焦十分必要. 聚焦速度的提高,取决于聚焦评价函数的选择. 聚焦评价函数用来衡量图像聚焦与否,但由于图像噪声、冗余信息及其他干扰因素,选择的评价函数应具有较强的抗噪声性和良好的唯一性、单调性. 围绕自动聚焦问题,国内外学者做了大量研究,提出一些经典的算法,如平方梯度函数、Brenner 函数、灰度熵函数等[1]. 传统的算法或在时间域上或在频率域上作一些处理,导致这些算法存在一定不足,大多数聚焦技术采用时域的被动聚焦方法,但其聚焦分辨率低,即聚焦的精度问题;基于频域的聚焦判据计算量大,难以实现自动聚焦的实时性,即聚焦的速度问题.

本文提出的基于互相关自动聚焦算法,具有较强的抗噪声稳定性,. 对比实验表明,该算法简单,原理容易实现,实验曲线避免各种波动,提高了自动聚焦的速度和精度.

1　互相关原理

若 $F[x(t)]=X(\omega)$, $F[y(t)]=Y(\omega)$;则 $F[C_{XY}(\tau)]=X(\omega)\cdot Y(\omega)$.

两函数互相关的傅里叶变换等于其中第 1 个函数变换与第 2 个函数变换取共轭二者之乘积,这就是相关定理(correlation theory).

根据相关定理,设 2 个函数 $x_1(t)$, $x_2(t)$,则

$$C(\tau)x_1(\tau)=\int_{-\infty}^{+\infty}x_1(t)x_1(t-\tau)\mathrm{d}t \qquad (1)$$

称为 $x_1(t)$的自相关函数;

$$C(\tau)x_1(\tau)x_2(\tau)=\int_{-\infty}^{+\infty}x_1(t)x_2(t-\tau)\mathrm{d}t \qquad (2)$$

称为 $x_1(t)$和 $x_2(t)$的互相关函数.

由于数字图像表示成矩阵形式,是离散的,对于离散函数,相关函数的表达式为

$$D(I,T)=\sum_{(i,j)\in M}I(\kappa+i,\tau+j)\cdot T(i,j) \qquad (3)$$

展开式(3),则有

$$D(I,T)=\sum_m\sum_n(I_{mn}-\bar{I})^2-2\sum_m\sum_n(I_{mn}-\bar{I})\cdot(T_{mn}-\bar{T})+\sum_m\sum_n(T_{mn}-\bar{T})^2 \qquad (4)$$

式中,I,T 均为 $M\times N$ 的灰度图像阵列;$I(i,j)$, $T(i,j)$表示在各自图像坐标中像素点(i,j)的灰度值;$\bar{I}$,$\bar{T}$,分别为各自图像的灰度算术平均值.

互相关的实现, 是对 2 组图像进行分析, 寻找互相关函数的峰值, 然后确定互相关函数峰值所在的位置. 具体的实现方法有多种,本文采用以下相似函数 $C(I,T)$ 作相似性判据:

$$C(I,T)=\frac{\sum_m\sum_n(I_{mn}-\bar{I})(T_{mn}-\bar{T})}{\sqrt{\left(\sum_m\sum_n(I_{mn}-\bar{I})^2\right)\left(\sum_m\sum_n(T_{mn}-\bar{T})^2\right)}} \qquad (5)$$

由柯西-施瓦兹不等式可知,式(5)中 $0<C(I,T)\leqslant 1$,并且仅当 $I_{mn}=T_{mn}$时,$C(I,T)$取最大值(等于 1). 函数 $C(I,T)$可以准确评价图像 I 和图像 T 之间的相似程度,精确度高,因此 $C(I,T)$被认为最佳的相似性判据之一[2].

2　自动聚焦的实现

2.1　自动聚焦系统结构

视觉单元完成单元器件微标记的图像信息获取,其系统结构如图 1 所示. 视觉单元的硬件是由图像数字化设备和光路 2 部分构成. 其中,数字 CCD 与图像接口卡构成视觉系统中的图像数字化设备,CCD 摄像机采用德国 Basler 公司的产品 A320f,具有 780×582 的面阵数字 CCD,该数字 CCD 为 1 394 传输协议;显微镜头、变焦(zoom)系统和同轴光源则构成视觉系统中的光路. 整套系统放置于隔震台上,单元器件放置于载物台上,宏动平台先进行粗聚焦,然后 z 轴直线运动平台实现自动聚焦的精聚焦. 该聚焦系统可实现 3 mm 行程的精密聚焦运动(即聚焦范围是 0 ~ 3 mm).

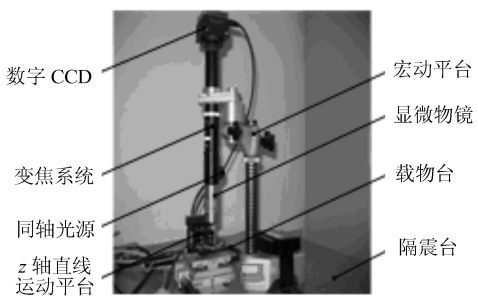


图 1　自动聚焦实验系统

2.2　自动聚焦的算法

根据互相关原理,利用相关算子对机器领域的图像特征进行运算,发现由于模板图像的不同,导致聚焦的结果有很大的不同;另外,对于相同条件下的 1 组图像,由于 $\bar{I}=\frac{1}{mn}\sum_m\sum_n I_{mn}$,如果每个 I_{mn}具有相同的干扰,$\bar{I}$ 与 I_{mn}相关,$\bar{I}$ 也具有与 I_{mn}相同的干扰,$(I_{mn}-\bar{I})$能避免相同干扰,因此提

高了互相关评价图像之间的相似精度. 由上所述,提出基于互相关的自动聚焦算法——模板相关(TC,Template Correlation)算法 F_{TC}. 该算法通过相似函数实现,即式(5).

在聚焦方向上,以聚焦位置为中心,聚焦之前的图像为聚焦前位置图像;聚焦之后的图像为聚焦后位置图像. 根据模板图像位置的不同,进而分析得出模板相关的2种形式. 如图2所示,模板图像为聚焦前位置图像,称为模板相关的第1种形式;模板图像为聚焦图像时,称为模板相关的第2种形式.

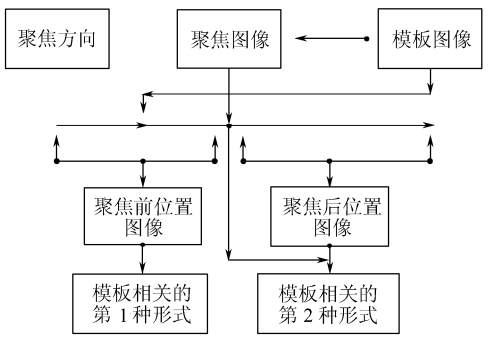
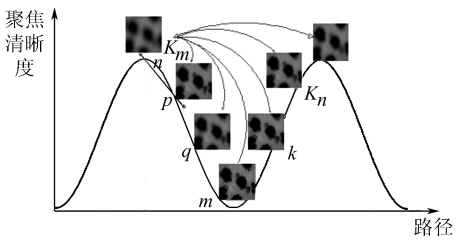


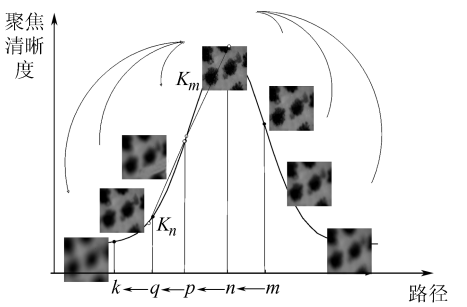
图2 模板形式的划分

第1种形式如图3a所示,模板图像为聚焦前位置图像. 首先,系统在起始点 n 采集第1帧图像,前进1个步长到达点 p,采集第2帧图像,将第2帧图像与第1帧图像进行相关,得到数值 D_1,继续前进1个步长,到达点 q,采集第3帧图像,第3帧图像与第1帧图像进行相关,得到数值 D_2. 根据斜率公式 $K=\frac{y_2-y_1}{x_2-x_1}$,由此求得由点 p 和点 q 确定的直线斜率 K_1. 如果 K_1 大于零,退回到点 n,按相反方向采集图像,相反方向即为图像采集的正确方向,采集的图像继续与第1帧图像进行相关得到数值,计算过相邻2点直线的斜率 K_2;如果 K_1 小于零,按步长继续在此方向采集图像,此方向即为图像采集的正确方向,继续计算过相邻2点直线的斜率 K_2. 由于初始图像为聚焦前图像,斜率 K_2 将先小于零,经过聚焦图像后,K_2 将大于零. 根据式(5),由于 $I_{mn}=T_{mn}$,初始数值是1,随着图像逐渐清晰,相似程度逐渐减小,数值也将减小,当到达聚焦图像时,相关性最小,相关数值最小,然后随着图像逐渐模糊,相似程度增大,数值将逐渐增大.

第2种形式是模板图像为聚焦图像,如图3b所示,首先,系统在起始点 n 采集第1帧图像,前进1个步长到达点 p,采集第2帧图像,将第2帧图像与第1帧图像进行相关,得到数值 D_1,继续前进1个步长,到达点 q,采集第3帧图像,第3帧图像与第1帧图像进行相关,得到数值 D_2. 同理,求出由点 p 和点 q 确定的直线斜率 K_1,如图3b所示. 模板图像是聚焦图像,所以除聚焦图像外,其他所有图像与模板图像相关的数值小于1,由此得出聚焦前位置 K_1 大于零,聚焦后位置 K_1 小于零,因此该组数值的变化是一个从较小逐渐增大,到达最大,又减小的过程.



a 模板相关的第1种形式



b 模板相关的第2种形式

图3 相关原理

3 实 验

国内外文献中提出各种聚焦算法,其中被广泛应用的主要有18种,分别为Brenner函数 F_{Bre}、绝对梯度函数、平方梯度函数 F_{SG}(Square Gradiet function)、Roberts算子梯度函数、Sobel算子梯度函数、Tenengrad函数、有效像素灰度值和函数、有效像素灰度值方差和函数、有效像素数函数、灰度熵函数、灰度最大差值函数等[3]. 文献[1]中的加拿大Toronto大学先进微纳米系统实验室对这些函数进行大量实验,这些函数分别对139 500帧图像进行分析处理,所有图像是12种图片分别以100×、400×和3种检测方法、2种放大倍数采集到的. 并分别用精度、取值范围、峰值点(最大值点除外)的数量、宽度、噪声水平对处理结果进行评估,综合这5个参数值,得到函数的最终评估值,从而得出最优聚焦函数.

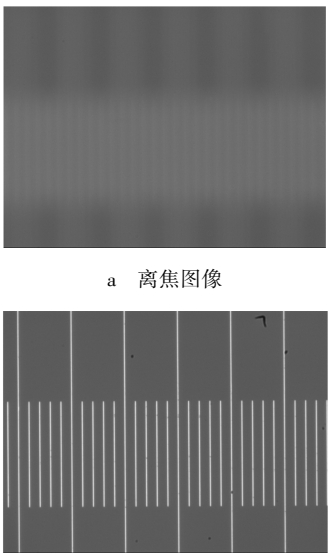
根据大量的实验数据,加拿大Toronto大学先进微纳米实验室综合评出Brenner函数、绝对梯度函数、平方梯度函数、Tenengrad函数、方差函

数、标准方差函数、AutoCorrelation 算子、Standard Deviation 函数为最优聚焦函数.

本文选择最优聚焦函数——Brenner 函数和平方梯度函数 F_{SG} 作为比较函数. 模板相关算法针对以微小步长连续调焦情况下得到的模糊—清晰—模糊的图像序列.

3.1　模板相关与 F_{SG} 的比较

自动聚焦系统对标定尺采集图像. 聚焦系统采用模板相关的 2 种形式对图像进行处理,系统以步长 $\mu=20$ μm($\mu<Z_{dof}$,Z_{dof} 为景深)向焦点作单向运动,采集 24 帧图像,如图 4a,图 4b. 图 4a 为离焦图像,图 4b 为聚焦图像.



a　离焦图像

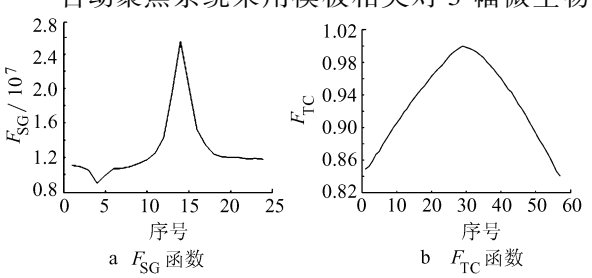
b　聚焦图像

图 4　图像特征

用 F_{SG} 对 24 帧图像进行分析,归一化后曲线见图 5a;模板相关 F_{TC} 分析图像时,得到 24 个值,归一化后曲线见图 5b. 模板相关曲线为第 2 种形式(模板图像为聚焦图像)的图像处理结果. 由图 5 中 F_{SG} 和 F_{TC} 实验曲线可知:F_{SG} 曲线有波动,波动可能导致聚焦方向的误判断. 而 F_{TC} 避免 F_{SG} 中的各种波动,曲线平滑,避免误判断的发生.

3.2　模板相关 F_{TC} 与 F_{Bre} 的比较

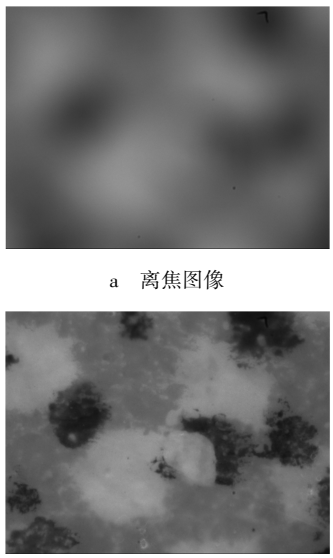
自动聚焦系统采用模板相关对 3 幅微生物(大肠腺瘤病、鲸鱼皮组织细胞、肝细胞)印刷品采集图像. 选择这些图片作为例子,是因为微生物图片包含大量、丰富的信息,对于自动聚焦,图片包含的信息内容越多,才足以得出正确的聚焦结论.



a F_{SG} 函数　　b F_{TC} 函数

图 5　函数曲线

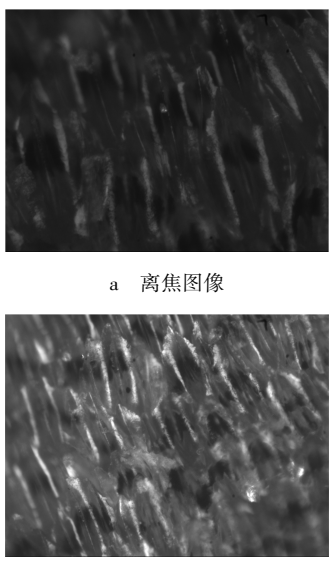
系统以步长为 7 μm 向焦点作单向运动,每幅图片分别采集 41 帧图像,如图 6 ~ 图 8 所示.



a　离焦图像

b　聚焦图像

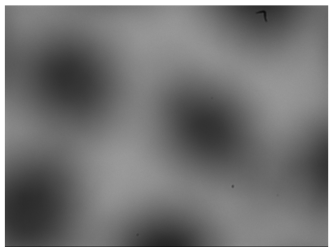
图 6　大肠腺瘤病微生物图像特征



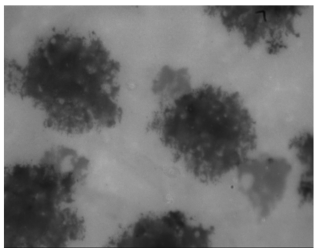
a　离焦图像

b　聚焦图像

图 7　鲸鱼皮组织细胞图像特征



a 离焦图像



b 聚焦图像

图 8 肝细胞图像特征

用模板相关和 Brenner 函数分别对图像进行分析处理,绘制相应的归一化曲线,如图 9 所示. 模板相关曲线仅列出第 1 种形式(模板图像为聚焦前位置图像)的图像处理结果. 由图 9 中实验曲线可知:模板相关 F_{TC} 能避免 F_{Bre} 曲线的波动,曲线平滑. 模板互相关计算复杂程度较小.

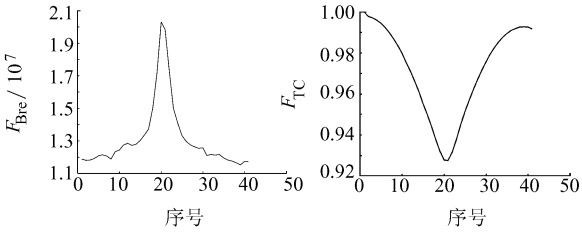


图 9 函数曲线

3.3 算法实验结果

PMMA 微流控芯片微对准自动装配系统应用基于互相关的自动聚焦算法,对微流控芯片的基片标记和盖片标记进行自动对准,多次实验都取得良好的聚焦效果,如图 10 所示.

图 10a、图 10b 为微流控芯片的基片与盖片对准前,采集的各自的标记图像,图10c为对准封装后基片标记与盖片标记重合的图像.



a 基片标记 b 盖片标记 c 芯片标记

图 10 基、盖片标记及其对准完毕后图像

4 结 论

本文提出的基于互相关的自动聚焦算法具有良好的抗噪性. 与其它经典的评价函数(平方梯度函数,Brenner 函数等)相比,能更有效避免各种波动,提高了自动聚焦系统的速度和精度. 该算法简单,可以达到良好的聚焦效果. 实验曲线具有单调性、对称性、单峰性. 大量实验验证了该相关算法的有效性和正确性. 该算法已应用于微流控芯片对准装配自动聚焦系统,实现了自动聚焦,取得了较好的聚焦效果.

参考文献 (**References**)

[1] Sun Y, Duthaler S, J Nelson B. Auto-focusing in computer microscopy: selecting the optimal focus algorithm[J]. Microscopy Research and Technique, 2004, 65: 139 ~ 149

[2] 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 Minglei, Zong Guanghua, Yu Zhiwei, *et al*. Automatic focusing system of micro to vision based on image analysis[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2005,31(2):192 ~ 196(in Chinese)

[3] 祝世平,房建成,周 锐,一种新的能量谱-熵图像聚焦评价函数[J]. 北京航空航天大学学报, 1999,25(6):720 ~ 723
Zhu Shiping, Fang Jiancheng, Zhou Rui. New kind of energy-spectrum entropy image focusing evaluation function[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1999, 25(6):720 ~ 723(in Chinese)

[4] 任四刚,李见为,谢利利. 基于灰度差分法的自动聚焦技术[J]. 光电工程,2003, 30(2):53 ~ 55
Ren Sigang, Li Jianwei, Xie Lili. Automatic focusing technique based on gray scale difference method[J]. Opto to Electronic Engineering,2003 ,30 (2) :53 ~ 55(in Chinese)

[5] 谢 攀,张 利,康宗明,等. 一种基于尺度变化的 DCT 自动聚焦算法[J]. 清华大学学报(自然科学版),2003,43(1):55 ~ 58
Xie Pan, Zhang Li, Kang Zongming, *et al*. Window scale-based automatic focus algorithm using DCT transformation[J]. J Tsinghua Univ(Sci & Tech), 2003, 43(1):55 ~ 58(in Chinese)

[6] Chen Guojin, Zhang Kesong, Gong Ye. Research on image definition function using in real time auto-focusing system[A]. In: Zhang Guangjun, Zhao Huijie, Wang Zhongyu. Fifth International Symposium on Instrumentation and Control Technology [C]. Beijing, 2003

[7] Hughlett E, Cooper K. A video based alignment system for X-ray lithography[A]. SPIE Sympos on Microlithography[C]. Beijing,1991