远焦区聚焦性能分析与改善

孙明磊 石晶欣 董 代

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院，北京 100191) (北京航天控制仪器研究所，北京 100039)

宗光华

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院，北京 100191)

摘 要：传统聚焦测度函数在远焦区对图像高频能量解析性能较差；表现为聚焦曲线在远焦区呈现非单调性.利用傅里叶变换方法对图像频谱进行分析：在远焦区，聚焦图像序列的直流分量表现出强烈的波动性，并且直流分量在图像频谱中占据绝对比例，再加上传统聚焦函数滤除图像直流分量的能力较弱，导致误聚焦概率高.考虑到频域聚焦函数计算量大，提出基于时域的两个聚焦函数.实验结果表明：此二函数具有强的直流分量滤除能力，能有效改善聚焦曲线在远焦区的表现，同时具有高的聚焦分辨率.远焦区聚焦性能的改善对于提高显微视觉操作自动化的可靠性尤为重要.

关 键 词：视觉；聚焦；图像；傅里叶变换；微操作

中图分类号：TP 242.6^{+}2

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2008)09-1032-05

Performance analysis and improvement on acutely defocused scenes

Sun Minglei Shi Jingxin

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Dong Dai

(Beijing Aerospace Control Device Institute, Beijing 100039, China)

Zong Guanghua

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Some classic focusing measures such as gradient function, Brenner function and entropy function, et al, show poor performance in computing high frequency energy in acutely defocused images. Their focusing curves away from the focus show serious nonmonotonicity. The Fourier transform method for image series spectrum analysis was conducted. Three reasons for poor performance in far away focus region were proposed. Firstly, defocused image sequences show strong volatility in power of DC(direct current) component. Secondly, DC component of the image spectrum occupies an overwhelming proportion. Thirdly, the traditional measures have weak ability in filtering DC component of image. According to this, two spatial focusing measures were presented. Experiment results show that performance of focusing curves of acutely defocused images was significantly improved, and high focus resolution can be achieved. This method is particularly important in enhancing reliability of automatic micromanipulation based on microscopic vision.

Key words: vision; focus; image; Fourier transform; micro-manipulation

收稿日期：2007-08-27

基金项目：国家863计划资助项目(2004AA404260)；国家“十五”“211”学科建设资助项目

作者简介：孙明磊(1974—)，男，湖北襄樊人，博士后，sunminglei@gmail.com.

高分辨率、高放大倍数的光学显微镜自动聚焦技术不仅在生物学研究领域[1-2],而且在生物工程微操作、MEMS 器件微装配、IC 制造以及光电子器件封装等应用领域也已获得广泛的应用.传统的自动聚焦技术将研究的重点置于“近焦区”(聚焦点附件的区域).但在基于显微视觉信息传感的微操作/微装配任务中,微操作工作对象和微操作工具在光轴方向分布较远(相对于景深而言),需要视觉系统进行频繁的大范围搜索,此时,聚焦曲线在“远焦区”(离聚焦点较远的区域)的性能非常重要.目前,针对于此的研究很少.

1　传统聚焦函数的局限性

Santos 在聚焦函数的评价中引入了“Width”准则[2].根据“Width”准则以及聚焦曲线的特征,可将整个聚焦曲线划分为近焦区、中焦区和远焦区.近焦区位于焦点附近,聚焦曲线陡直;远焦区离焦点较远,聚焦曲线变化较为平缓;中焦区是二者的过渡区域.

在实践中发现:目前使用普遍的一些聚焦函数,如基于时域的平方梯度函数[3-5] $F_{\text{S-G}}$,Brenner 函数[6-7] F_{Brenner} 和熵函数 F_{Entropy},基于频域的快速傅里叶变换(FFT,Fast Fourier Transform)函数 F_{FFT},基于小波的聚焦函数 F_{Wavelet}[8] 等,在远焦区的性能较差.

在微装配显微视觉系统中,使用 25× 显微物镜(NA=0.28)对显微标定尺进行图像采集.从焦点位置一侧约 140 μm 处开始,以步长 2.8 μm 向显微镜方向移动标定尺,采集图像序列共 101 帧($I_1 \sim I_{101}$).

使用时域聚焦函数中具有代表性的 $F_{\text{S-G}}$ 对图像序列进行计算并给出聚焦曲线,见图 1.

在聚焦曲线峰值点两侧附近的区域:$I_{35} \sim I_{51}$,$I_{52} \sim I_{60}$,曲线严格单调;但在远焦区:$I_1 \sim I_{34}$,$I_{61} \sim I_{101}$,聚焦曲线出现起伏.表明 $F_{\text{S-G}}$ 对远焦区图像高频信息的解析能力有限.

使用复频域聚焦函数 F_{FFT} 对图像序列进行计算并给出聚焦曲线,见图 2.情况与 $F_{\text{S-G}}$ 类似,在远焦区,$I_1 \sim I_{34}$,$I_{61} \sim I_{101}$,聚焦曲线呈现非单调性.

使用在小波域定义的聚焦函数 $F^{\text{D1}}_{\text{db5_}2^7}$(选用 db5 小波,分解尺度为 2^7)[8],可以有效地改善对远焦区图像高频信息的解析能力.其中 D1 表示第 1 类离散小波变换.

图 3 将 $F^{\text{D1}}_{\text{db5_}2^7}$ 的聚焦曲线进行局部放大,在远焦区:$I_1 \sim I_{34}$,$I_{61} \sim I_{101}$,聚焦曲线在单调性上

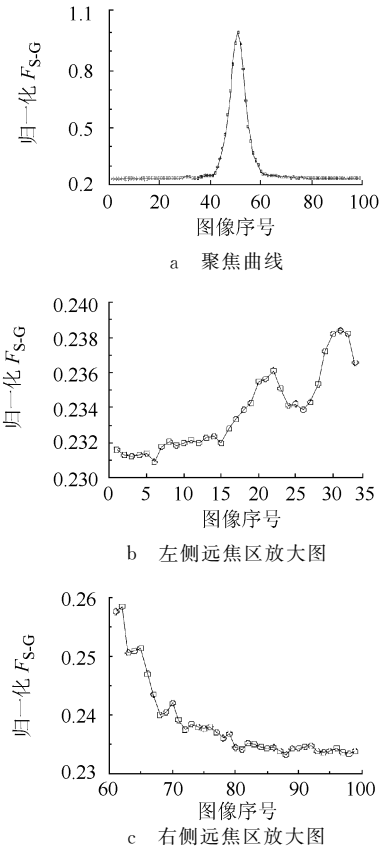


图 1　传统聚焦函数 $F_{\text{S-G}}$ 在远焦区的表现

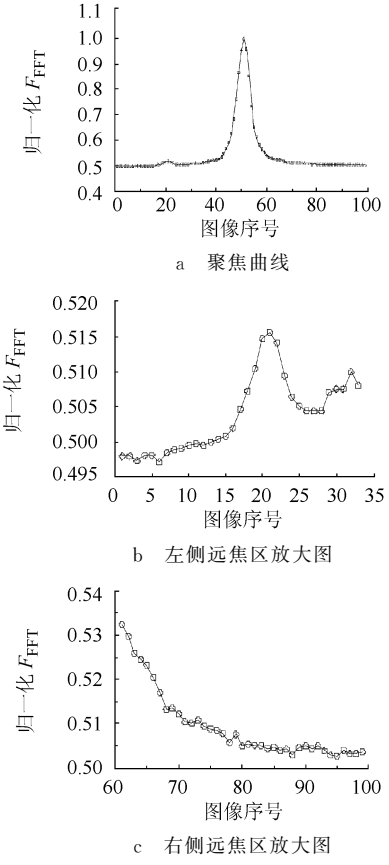
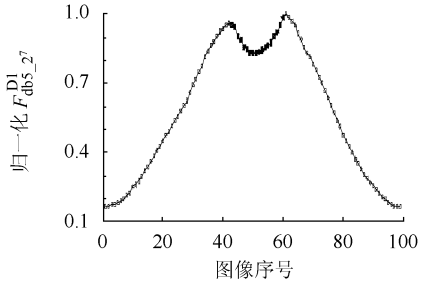
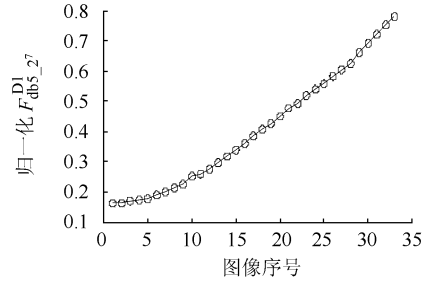


图 2　传统聚焦函数 F_{FFT} 在远焦区的表现

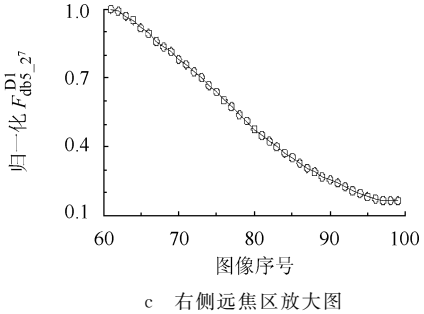
得到了明显改善;但在近焦区 $I_{40}\sim I_{60}$,曲线形状由"峰状"变为"谷状",并且曲线陡峭程度降低.小波域聚焦函数产生了副作用:改善了远焦区聚焦曲线性能的同时,削弱了近焦区的性能.



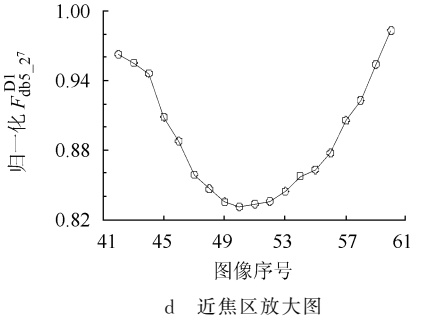
a 聚焦曲线



b 左侧远焦区放大图



c 右侧远焦区放大图

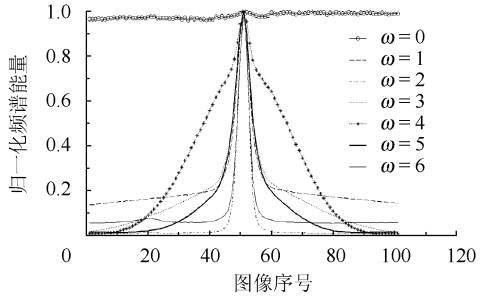


d 近焦区放大图

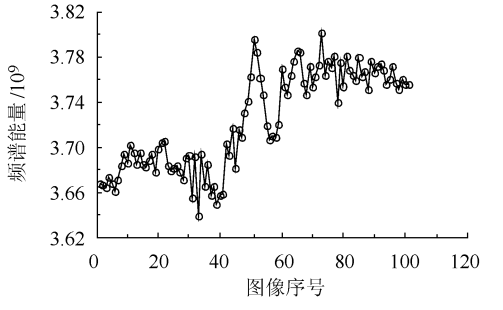
图3 小波聚焦函数在远焦区、近焦区的表现

2 频谱分析方法

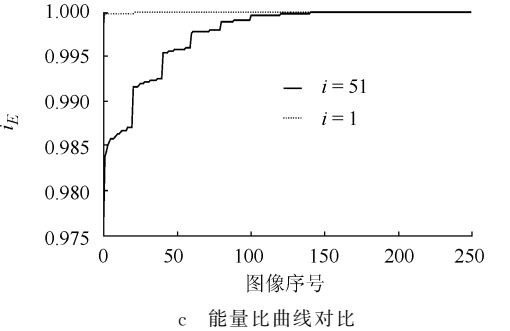
对一组聚焦图像序列进行快速傅里叶变换.对每帧图像,计算其 $\omega=0\sim255$ 的能量谱,$\omega=0$ 的能量谱即为图像直流分量(灰度均值).将图像序列中频率相同的能量谱归为一组,并绘制曲线,见图4a.由图4a可知,离焦图像直流分量($\omega=0$)与聚焦图像的直流分量差别不大;$\omega>0$ 的频谱能量则呈现较为明显的单峰性趋势,尤其是 $\omega=4$ 和 $\omega=5$ 的频谱信息,已经呈现严格的单边单调性与单峰性.



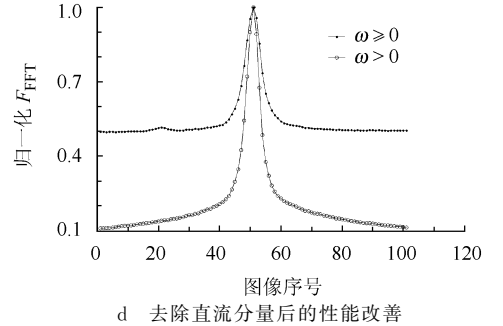
a 低频段频谱



b 图像序列直流分量



c 能量比曲线对比



d 去除直流分量后的性能改善

图4 图像序列频谱分析

重点考察图像序列的直流分量,见图4b.远焦区图像直流分量起伏很大,无规律性.另外,右侧远焦区直流分量的平均值高于左侧远焦区,主要原因在于右侧远焦区显微物镜距离被观察物更近.考虑到图像序列的直流分量曲线与理想聚焦曲线的差别较大,图像的直流分量应是影响聚焦曲线在远焦区性能的主要因素.

定义能量比:

$$i_E(n)=\sum_{\omega=0}^{n}E_\omega\Big/\sum_{\omega=0}^{255}E_\omega \tag{1}$$

其中 E_ω 为图像的 FFT 在频率 ω 处的频谱能量.

远焦区图像 I_1 与近焦区图像 I_{51} 的 i_E-ω 曲线见图 4c. 对于聚焦图像 I_{51},当 $\omega=0$ 时,有 $i_E(0)=97.56\%$;对于严重离焦图像 I_1,当 $\omega=0$ 时,有 $i_E(0)=99.85\%$. 由此可见直流分量在图像能量谱中所占的比重. 由于光路的传递函数误差,照明的波动性,被观察对象的反射、折射特性等因素,导致聚焦图像序列的直流分量产生较大波动,加上直流分量在图像能量谱中占据绝对比例,如果聚焦函数不能有效滤除图像直流分量,则其在远焦区对高频信息的解析性能将被直流分量干扰所掩盖.

式(2)为包含直流分量的频域聚焦函数,对比式(2)及式(3)的聚焦曲线,去除直流分量后,聚焦曲线在远焦区性能明显改善,见图 4d.

$$\left.\begin{aligned}&F_{\mathrm{FFT}}=\frac{1}{MN}\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N}\sqrt{R^2(i,j)+I_m{}^2(i,j)}\\&\omega\geqslant 0\end{aligned}\right\} \tag{2}$$

$$\left.\begin{aligned}&F_{\mathrm{FFT}}=\frac{1}{MN}\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N}\sqrt{R^2(i,j)+I_m{}^2(i,j)}\\&\omega> 0\end{aligned}\right\} \tag{3}$$

式中 $M\cdot N$ 为图像的大小.

3　滤除直流分量的时域函数

一些经典的基于时域的聚焦函数,如平方梯度函数 $F_{\mathrm{S\text{-}G}}$、Brenner 函数 F_{Brenner}、熵函数 F_{Entropy}、Sobel 算子 F_{Sobel} 等,滤除图像直流分量的作用较弱,在近焦区性能很好,但在远焦区性能较差.

基于复频域的聚焦函数经直流分量滤波后(式(3)),可以提高自动聚焦在远焦区的性能. 但是复频域聚焦函数计算复杂,实时性不好. 需要设计计算方法简单,同时可以有效滤除直流分量的时域聚焦函数. 在时域中,图像的直流分量表现为图像的均值,据此给出时域聚焦函数 F_{Var} 和 F_{Tam}[9]:

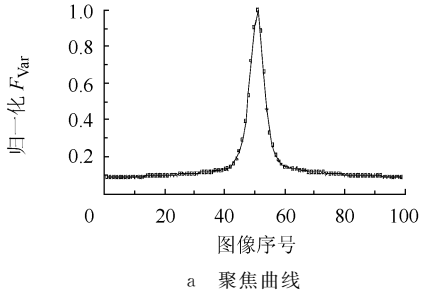
$$F_{\mathrm{Var}}=\frac{1}{MN\bar{I}}\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N}[I(i,j)-\bar{I}]^2 \tag{4}$$

其中,$I(i,j)$表示图像在像素(i,j)的灰度值;$\bar{I}$ 表示图像的灰度均值.

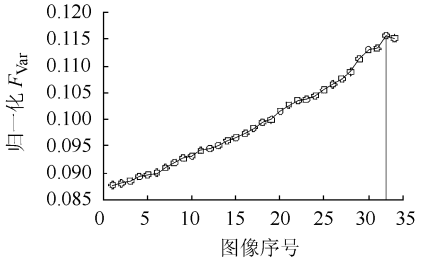
$$F_{\mathrm{Tam}}=\frac{\sigma}{\alpha_4{}^{1/4}}=\frac{\sigma}{[\mu_4/\sigma_4]^{1/4}}\approx\frac{\dfrac{1}{MN}\displaystyle\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N}[I(i,j)-\bar{I}]^2}{\left[\displaystyle\sum_{r=0}^{255}r^4P(r)\right]^{1/4}} \tag{5}$$

其中,μ_4 为四阶矩;σ^2 为方差;$P(r)$为灰度 r 出现的概率密度.

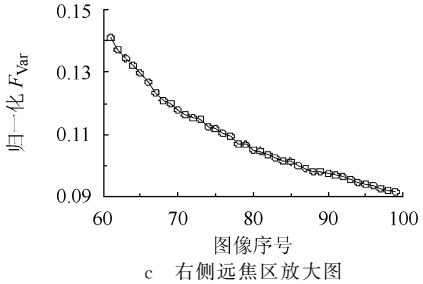
作为对比,图 5～图 7 分别给出了 F_{Var},F_{Tam} 以及 $F_{\mathrm{FFT}}(\omega>0)$对图像序列的聚焦曲线.



a　聚焦曲线



b　左侧远焦区放大图



c　右侧远焦区放大图

图 5　改进后聚焦函数 F_{Var}在远焦区的表现

利用下述两准则对本文中的聚焦曲线进行量化评估:

1) 误聚焦概率准则[2],定义为

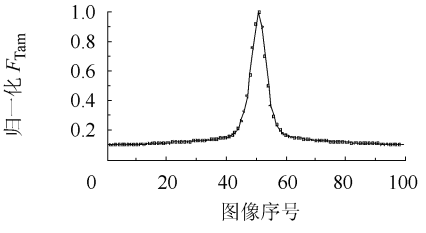
$$C_{\mathrm{P}}=\frac{n_{\mathrm{P}}}{N}\cdot 100\% \tag{6}$$

其中 n_{P} 表示除聚焦位置最值点外所有极值点的数目.

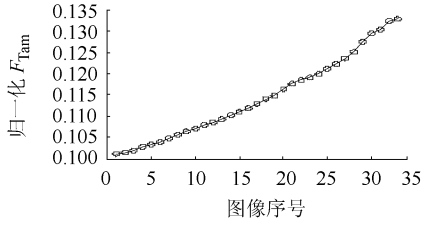
2) 分辨率准则[10],定义为

$$C_{\mathrm{Re}}=\frac{1}{\|f\|^2}\sum_{i=1}^{n}[(i-i_f)\cdot f(i)]^2 \tag{7}$$

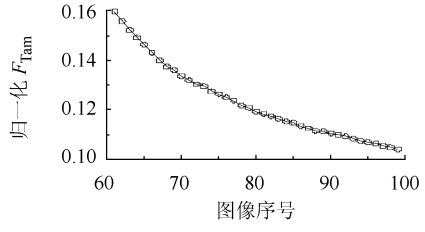
其中,$\|f\|=\|f\|_2=\sqrt{\displaystyle\sum_{i=1}^{n}[f(i)]^2}$ 为欧式范数. 计算结果见表 1.



a 聚焦曲线

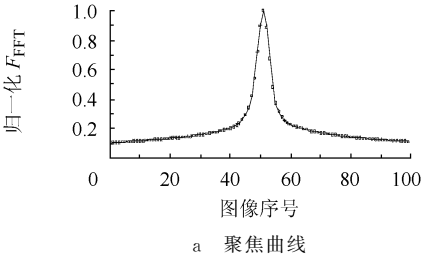


b 左侧远焦区放大图

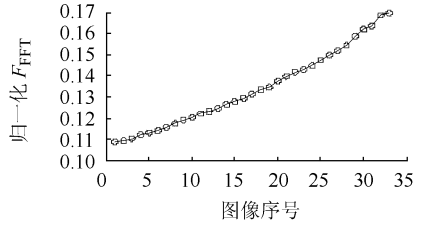


c 右侧远焦区放大图

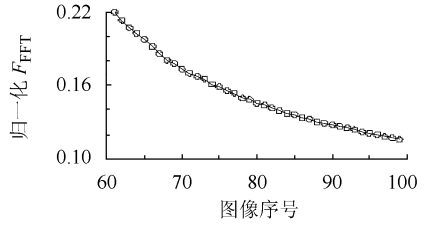
图 6 改进后聚焦函数 F_{Tam} 在远焦区的表现



a 聚焦曲线



b 左侧远焦区放大图



c 右侧远焦区放大图

图 7 改进后聚焦函数 F_{FFT} 在远焦区的表现

表 1 聚焦函数评估表

评价准则	$F_{S\text{-}G}$	$F_{FFT}^{\omega\geqslant 0}$	$F_{FFT}^{\omega>0}$	F_{Var}	F_{Tam}
C_P/%	20.8	11.9	0	1	0
C_{Re}	170.2	709.5	73.9	150.2	173.7

由表 1 可知，F_{Var} 和 F_{Tam} 可以在达到一定分辨率的基础上，有效改善聚焦测度在远焦区的性能，降低误聚焦概率.

4 结 论

①传统聚焦函数滤除图像直流分量的能力较弱，这是其在远焦区呈现非单调性，导致误聚焦概率高的重要原因；②提出基于时域的聚焦函数 F_{Var} 和 F_{Tam}；实验结果表明：此二函数具有强的直流分量滤除能力，能有效改善聚焦曲线在远焦区的表现，同时具有高的聚焦分辨率.

参考文献（References）

[1] Geusebroek J M, Cornelissen F, Smeulders A W M, et al. Robust autofocusing in microscopy[J]. Cytometry, 2000, 39: 1－9

[2] Santos A, Solorzano C O D, Vaquero J J, et al. Evaluation of autofocus functions in molecular cytogenetic analysis[J]. Journal of Microscopy, 1997, 188(3): 264－272

[3] Yeo T, Ong S, Sinniah R. Autofocusing for tissue microscopy [J]. Image Vision Comput, 1993, 11: 629－639

[4] Groen F, Young I T, Ligthart G. A comparision of different focus functions for use in autofocus algorighms[J]. Cytometry, 1985, 12: 81－91

[5] Vollath D. The influence of the secne parameters and of noise on the behaviour of automatic focusing algorithms[J]. J Microsc, 1988, 151: 133－146

[6] Allegro S, Chanel C, Jacot J. Autofocus for automated microassembly under a microscope[J]. Image Processing, 1996, 2: 677－680

[7] Brenner J F, Dew B S, Horton J B, et al. An automated microscope for cytologic research[J]. Cytometry, 1971, 24: 100－111

[8] Sun Minglei, Zong Guanghua, Bi Shusheng, et al. Research on wavelet based autofocus evaluation in micro-vision[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2006, 19(3): 239－246

[9] Tamura H, Mori S, Yamawaki T. Texture features corresponding to visual perception[J]. IEEE Trans on System, Man and Cybernetics, 1978, 8(6): 460－473

[10] Yang G, Nelson B J. Wavelet-based autofocusing and unsupervised segmentation of microscopic images[C]//Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robotics and Systems. Piscataway, NJ: IEEE, 2003, 3: 2143－2148

（责任编辑：文丽芳）