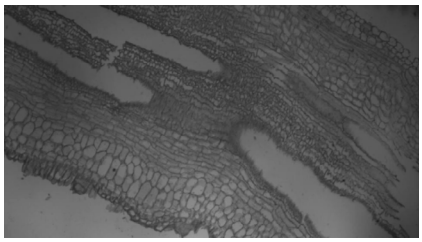
Opto-Electronic Engineering
光 电 工 程

Article

2017 年，第 44 卷，第 7 期

混合搜索法在显微镜自动对焦中的应用



江旻珊，张楠楠，张学典，顾　佳，李　雪，李　峰*

上海理工大学光电信息与计算机工程学院，上海 200093

摘要：针对基于显微镜的自动对焦系统，本文提出了一种爬山搜索法和函数逼近法相结合的混合搜索算法。该算法中的爬山搜索法采用粗精结合的两段式算法。在粗略对焦时，大步距选用速度较快的灰度方差函数；当精细对焦时，小步距采用灵敏度较高的 Laplacian 函数；通过比较三幅图片来缩小对焦区间并且在该区间内采用函数逼近法来拟合出最佳对焦位置。该方法不仅大大减少了自动对焦所需要的图片数量，而且可以大幅度提高搜索精度。经实验验证，提出的新的搜索算法可以使搜索精度优于 1 μm。

关键词：自动对焦；搜索算法；爬山搜索法；函数逼近法；混合搜索法

中图分类号：TH742　　文献标志码：A

Applications of hybrid search strategy in microscope autofocus

Minshan Jiang, Nannan Zhang, Xuedian Zhang, Jia Gu, Xue Li and Feng Li*

Institute of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

Abstract: For autofocus system of the microscope, this paper presents a hybrid search algorithm combining the mountain-climb search strategy with the approximation function strategy. In this algorithm, the mountain-climb search strategy adopts the two-stage algorithm of rough and fine focusing stage. In the rough focusing stage, the gray variance function is used to approach the focusing position quickly. In the fine focusing stage, the Laplacian function is used to locate the focusing position accurately. The algorithm narrows the focus interval by comparing three pictures and the approximation function strategy is used to fit the best focus in this range. This method greatly reduces the number of images required for autofocus and greatly improves the search accuracy. The experimental results indicate that this algorithm can make the search accuracy better than 1 μm.

Keywords: autofocus; search algorithm; mountain-climb search strategy; approximation function strategy; hybrid search strategy

DOI: 10.3969/j.issn.1003-501X.2017.07.004　　**Citation:** *Opto-Elec Eng*, 2017, **44**(7): 685–694

1　引　言

在计算机技术迅猛发展及互联网技术的普及下，数字化成为成像系统发展的主流方向。自动对焦技术作为关键技术之一，越来越受到人们的关注，已广泛应用于各种光学成像系统中，尤其是显微系统[1,2]。利用该技术，显微系统可以快速高效地实现自动对焦，获取目标的清晰细节。因此，研究出速度更快、精度更高的自动对焦技术对自动对焦显微镜的开发有着十分重要的意义。

收稿日期：2017–04–28；　收到修改稿日期：2017–06–24

*E-mail: lifenggold@163.com

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

基于数字图像处理的自动对焦方法，一般分为两类：离焦深度法[3,4]和对焦深度法[5]。离焦深度法从离焦水平的测量直接估计对焦位置，因此该方法的效率高，但是由于该方法所采集的图像数量少，所以精度比较低。对焦深度法是将光学系统形成的图像聚焦在特定的位置，而其他位置的对象模糊或者散焦。由于对焦深度法易于实现，因此得到广泛的应用。

Subbarao[6]等提出只用两幅图像就可以计算光学系统当前像面的离焦量方法，使自动对焦的速度有了很大的提高。Marrugo[7]等对现有的几种对焦搜索算法进行了分析，实验表明，爬山搜索法的速度和精度都比较高。

为了实现高效的自动对焦，本文主要研究了几种常用的搜索算法，并提出了一种新的低计算量的搜索算法，将改进的爬山搜索法和函数逼近法相结合的混合搜索算法，以实现精确、高效的自动对焦。

2 搜索算法

搜索算法是对焦深度法中的关键技术，其实际上是一个一维极值的最优化问题[8,9]，找到对焦评价函数曲线最高点对应的位置，即最佳对焦位置。

典型的搜索算法有：全局搜索法、爬山搜索算法、函数逼近法等[10,11]。

2.1 爬山搜索法

理想情况下的对焦曲线呈抛物线状，应该具有单峰性和单调性，即最佳对焦点的位置对应于峰值位置，当越过最佳对焦位置时对焦曲线递减，如图 1。爬山搜索法[12,13]就是根据这一原理提出的，对焦开始时，按照搜索步长以任意方向运动到下一位置，通过比较两个位置值来确定搜索方向并判断对焦位置。

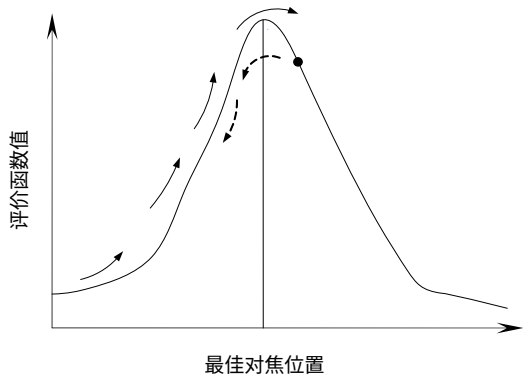


图 1 爬山搜索算法示意图.

Fig. 1 Mountain climbing search algorithm.

爬山搜索法原理简单，应用广泛。但是在实际应用中仍存在陷入局部峰值的问题。

2.2 改进后的爬山搜索法

在实际应用中，数码光学系统运行时，光电信号转换过程中会产生热噪声，由于噪声的存在，会使评价函数出现局部极值。改进的爬山搜索法[14]根据邻近三幅图像的清晰度评价函数的趋势来确定搜索方向。搜索的过程是：首先确定搜索的步长，按照同一方向连续采集三幅图像，并计算其对应的清晰度评价函数值。假设计算出的清晰度评价值分别为 FV_1、FV_2、FV_3，如果 $FV_1<FV_2<FV_3$，说明镜头正在向对焦位置靠近，应该按照此方向继续搜索；如果 $FV_1>FV_2>FV_3$，说明镜头正在远离对焦位置，应该改变方向搜索；如果 $FV_1>FV_2$ 且 $FV_2<FV_3$，说明曲线存在局部峰值，应该按照此方向继续搜索；如果 $FV_1<FV_2>FV_3$，则认为找到了一个对焦区间 $[V_1,V_3]$，最佳对焦点的位置在此区间内。随后减小搜索步长按上述步骤继续搜索，之后每次改变搜索方向时都需要减小搜索步长，直至找出最佳对焦位置。

改进后的爬山搜索算法可以降低陷入局部峰值的几率，但由于要采集的样本数量较多，数字图像采集和处理所消耗的时间较长，效率较低，不能用于实时性要求高的场合。

2.3 函数逼近法

函数逼近法[15]实质是根据数学上的曲线拟合方法发展而来的。理想的对焦曲线 $f(x)$具有单峰性和近似对称性，则可以按照曲线拟合的方法，选择一个合适的二阶或者三阶函数 $g(x)$去逼近 $f(x)$。由于可以利用解析的方法得出 $g(x)$的极值点，因此 $f(x)$的极值点可用 $g(x)$的极值点来表示。在函数逼近法中，常用的曲线拟合的方法是最小二乘法。

图 2 为当对焦评价函数为 Laplacian 函数时，得出的对焦评价曲线。在整个对焦范围内做 3 次最小二乘拟合，可以看出在全局范围内的拟合精度不好，拟合出的最佳对焦位置与实际最佳对焦位置偏差比较大。

当在极值点附近的小范围内使用函数逼近法对评价函数曲线拟合时，曲线如图 3 所示。函数逼近法的效果很好，能准确地拟合出最佳对点的对焦位置。

由图 3 可知，函数逼近法适合小范围内的搜索，理想情况下只需要利用峰值附近的几个评价值就可以拟合出对焦的近似曲线，实现高效自动对焦。因此，

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

函数逼近法在极值附近的效果比较好。但如果这几个值是在图像深度离焦时取得的，由于离焦位置的对焦评价函数曲线的斜率很低，拟合的曲线收敛性极差，因此通过曲线拟合求得的极值点误差较大。

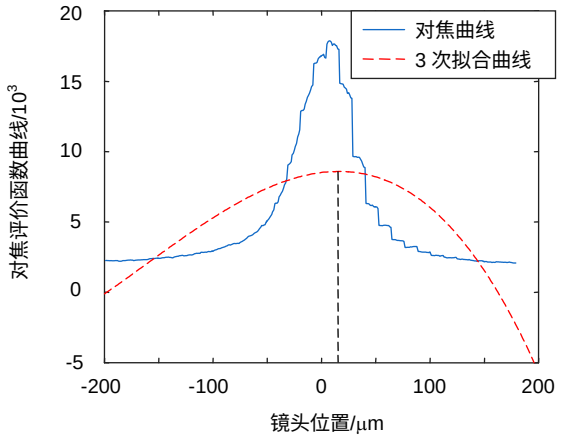


图 2　Laplacian 对焦评价函数曲线及全局对焦范围内的 3 次拟合示意图.

Fig. 2　Laplacian focus evaluation function curve and the global focus within the scope of 3 times fit diagram.

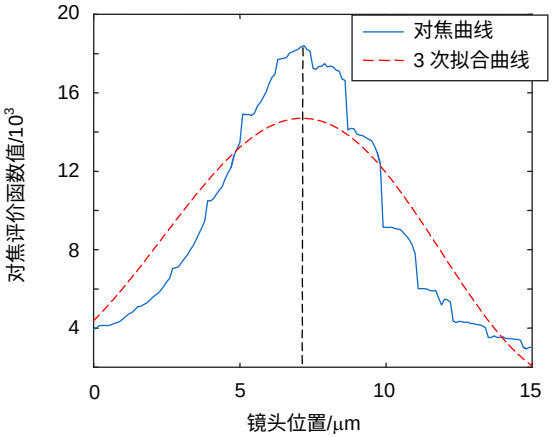


图 3　极值点附近小范围内的 3 次拟合示意图.

Fig. 3　Extreme point near the small range of 3 times fit diagram.

3　改进的爬山搜索法和函数逼近法相结合的混合搜索法

结合以上对改进爬山搜索法和函数逼近法的分析，为了实现快速的自动对焦，本文提出一个爬山搜索法和函数逼近法相结合的混合搜索算法。由上文可知，爬山搜索法采用逐步减少搜索步长和缩小搜索区域的方式来实现自动对焦的搜索过程，但是容易陷入局部峰值的影响，而改进后的爬山搜索法能够很好地减少局部峰值的影响。在此我们首先采用改进后的爬山搜索法来确定一个小范围的对焦区间。其次，将函数逼近法应用于改进的爬山搜索法所获得的对焦区间内，通过函数逼近法获得的峰值点被认为是最佳对焦位置。这样组合的搜索算法不仅可以实现快速的对焦，而且对实时工业测量系统具有较低的计算成本。

所提出的混合搜索算法的详细步骤如下：

第一步：在某一位置处，以固定的步长 m_1 连续采集三幅图像，分别计算这三幅图像所对应的对焦评价函数值(在粗略对焦时，从算法的快速性考虑[16]，采用灰度方差评价函数；精细对焦时，从算法的灵敏度考虑[16]，采用 Laplacian 函数)，计为 FV_1，FV_2，FV_3，比较这三个对焦评价函数值的大小。

第二步：若 $FV_1<FV_2<FV_3$ 或者 $FV_1>FV_2<FV_3$，则搜索方向正确，进入步骤三，继续往该方向搜索进行粗略对焦；若 $FV_1>FV_2>FV_3$，则搜索方向相反，改变搜索方向进行搜索；若 $FV_1<FV_2>FV_3$，则找出了一个对焦区间$[V_1, V_3]$，进入步骤四，进行精细对焦。

第三步：在第三幅图像位置处，继续以 m_1 的步长连续采集两幅图像，计算这两幅图像的对焦评价函数值 FV_4，FV_5，如步骤二的方法比较 FV_3，FV_4，FV_5 这三个评价值的大小。若 $FV_3<FV_4<FV_5$ 或者 $FV_3>FV_4$ 且 $FV_4<FV_5$，搜索过程继续循环下去；若 $FV_3<FV_4>FV_5$，则找出了一个对焦区间$[V_3, V_5]$，进入步骤四，进行精细对焦。

第四步：在找到的对焦区间内部进行反方向搜索，步长减小到原来的 1/3，连续采集两幅图像，计算这两幅图像的对焦评价函数值，并与处于对焦区间边缘处图像的对焦评价函数值进行比较，如步骤二，直到找到另一个更小的对焦区间$[V_m, V_n]$。

第五步：计算对焦区间的大小，即$|V_m-V_n|$，如果小于或等于一个阈值 δ(阈值可根据实际应用中对精度和速度的要求来设置，一般设置为景深)，即$|V_m-V_n| \leq \delta$，执行第六步，否则，执行第四步减小步长重新搜索。

第六步：为了快速获得最佳对焦位置，在对焦区间$[V_m, V_n]$中使用函数逼近法，继续以步长的 1/3 在区间$[V_m, V_n]$采集几幅图像并计算其对应的对焦评价函数值，采用曲线拟合法根据离散的对焦评价函数值拟合出最佳对焦点的实际位置，对焦结束。

整个过程的流程图如图 4。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

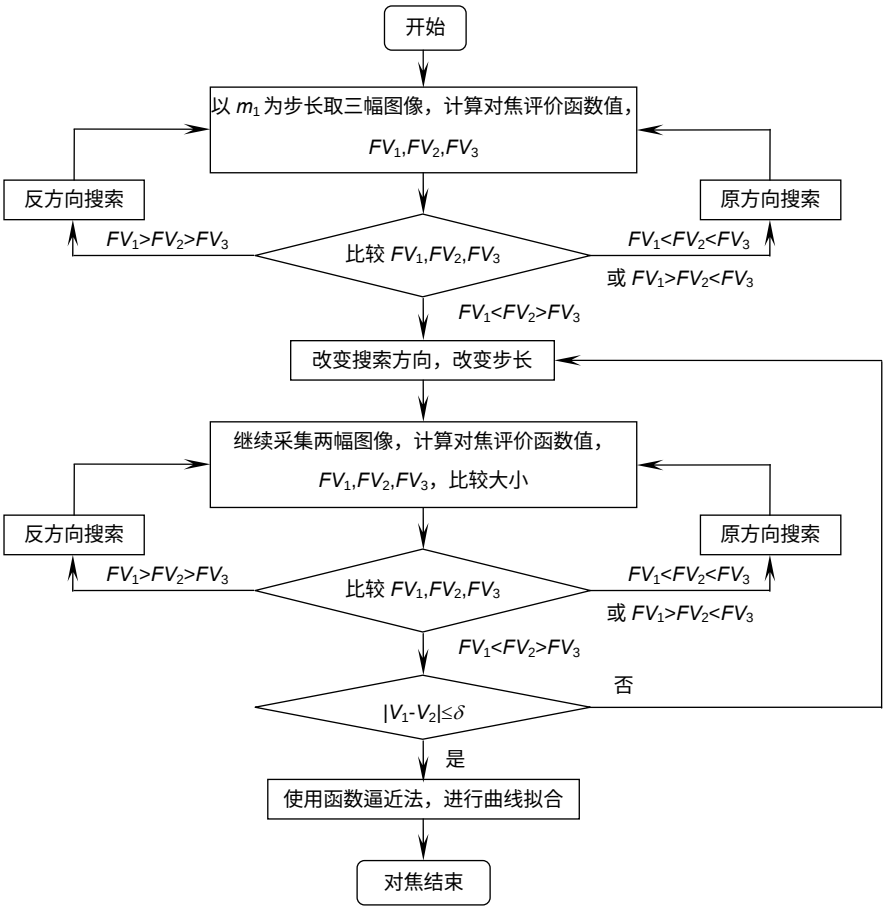


图 4　对焦过程流程图.

Fig. 4　Flow chart of focusing process.

4　实验验证

实验平台图 5 是由 PC 机(i7-6200, 8G RAM)控制的显微镜自动对焦系统。其组成为：显微镜(Olympus IX71，工作距离 18.5 mm，尼康物镜)，一个 CCD 照相机(Basler acA2000)，图像采集卡，可控的 LED 可见光光源和 Z 轴控制平台。

实验中，目标物体通过 CCD 把显微镜成的像采集到计算机中，计算机对实验得到的图像清晰度评价函数值进行分析后，向控制平台控制器发送指令，控制器控制平台在 Z 轴方向来回移动，改变物距，直至达到最佳对焦位置。

我们选用的是尼康 5x 的物镜，对应的景深为 33.5 μm。

实验中采用两种不同的目标物体进行实验，分别以 PCB 电路板和南瓜茎纵切标本为样品，每个样品进行 3 组实验，如图 6 所示。

显微镜物镜从底部移动到顶部的距离为物镜的可移动范围，以显微镜物镜可移动范围的中心为零点，上下选取 200 μm 的范围作为对焦范围（超过 200 μm 采集的图像对焦评价函数曲线平滑没有利用价值），以这个距离的十分之一为步长，即步长为 40 μm，开始

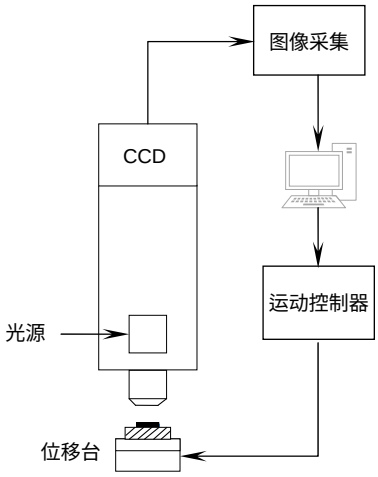


图 5　显微镜自动对焦系统示意图.

Fig. 5　Microscope autofocus system.

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

粗调阶段，采用灰度方差函数作为对焦评价函数得到清晰度评价函数值。

表 1 和表 2 分别为 PCB 电路板和南瓜茎纵切标本作为实验样品进行的三组实验，在粗略对焦时采用灰度方差函数得到的清晰度评价函数值。

从表 1、表 2 和图 7 可以看出，前六幅图像由于评价值没有出现 $FV_1>FV_2>FV_3$ 或者 $FV_1<FV_2>FV_3$ 的情况，因此按照原来的方向和步长继续往前搜索，直到采集到第 7 幅图像时，$F(6)<F(7)>F(8)$，说明已经越过了对焦位置。此时，找到了一个对焦区间$[V_6,V_8]$，即[-40，40]，对焦区间缩小成一个 80 μm 大小的区间，在此区间内改变方向往回继续搜索，进入精细对焦阶段。步长变为原来的 1/3，为 13 μm。在此阶段采用灵敏度较高的 Laplacian 函数得到清晰度评价函数值。

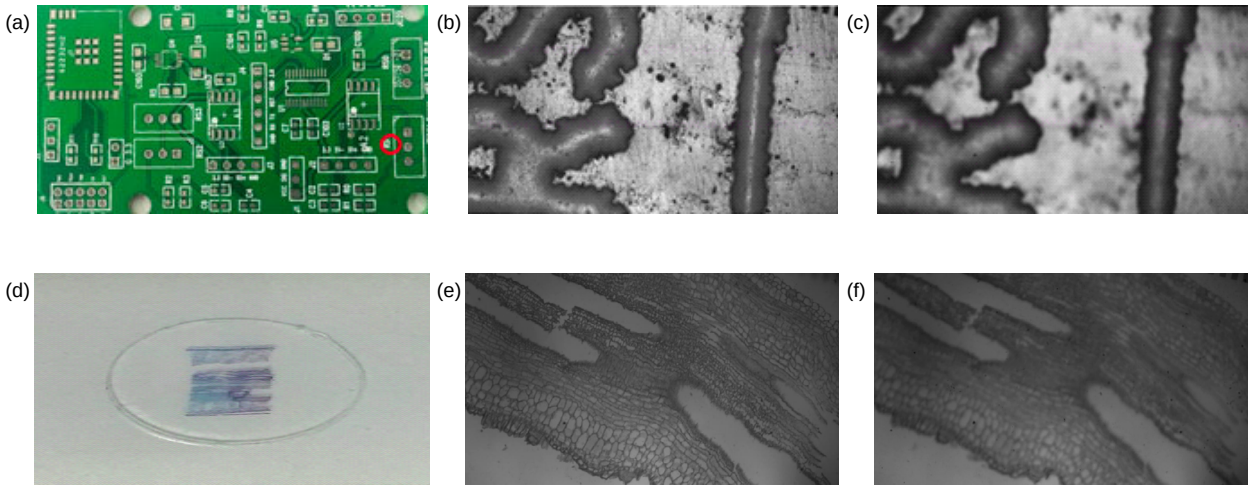


图 6　两种不同样品及其图像. (a) 电路板. (b) 对焦图像. (c) 离焦图像. (d) 南瓜茎纵切标本. (e) 对焦图像. (f) 离焦图像.

Fig. 6　Two different samples and their images. (a) The PCB circuit board. (b) The focus image of PCB. (c) The defocus image of PCB. (d) The longitudinal specimens of pumpkin stem. (e) The focus image of longitudinal specimens of pumpkin stem. (f) The focus image of longitudinal specimens of pumpkin stem.

表 1　PCB 粗略对焦时采用灰度方差函数得到的清晰度评价函数值.

Table 1　The value of the sharpness evaluation function obtained by gray variance function in the rough focusing stage of PCB.

图片数量	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
镜头位置/μm	-200	-160	-120	-80	-40	0	40	80	120	160
实验一	39.455	40.782	42.123	43.589	45.332	46.776	43.866	41.455	40.481	39.246
实验二	39.054	40.120	41.428	42.839	44.448	46.477	45.682	42.048	41.043	39.847
实验三	39.253	40.383	41.892	43.132	45.002	46.572	43.465	41.143	40.218	39.198

表 2　南瓜茎纵切标本粗略对焦时采用灰度方差函数得到的清晰度评价函数值.

Table 2　The value of the sharpness evaluation function obtained by gray variance function in the rough focusing stage of the longitudinal specimens of pumpkin stem.

图片数量	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
镜头位置/μm	-200	-160	-120	-80	-40	0	40	80	120	160
实验一	16.88	16.895	17.298	17.898	19.114	19.486	18.214	17.651	17.323	17.273
实验二	16.882	16.906	17.191	17.747	18.727	19.729	18.445	17.794	17.467	17.277
实验三	16.883	16.907	17.187	17.744	18.692	19.723	18.446	17.796	17.488	17.231

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

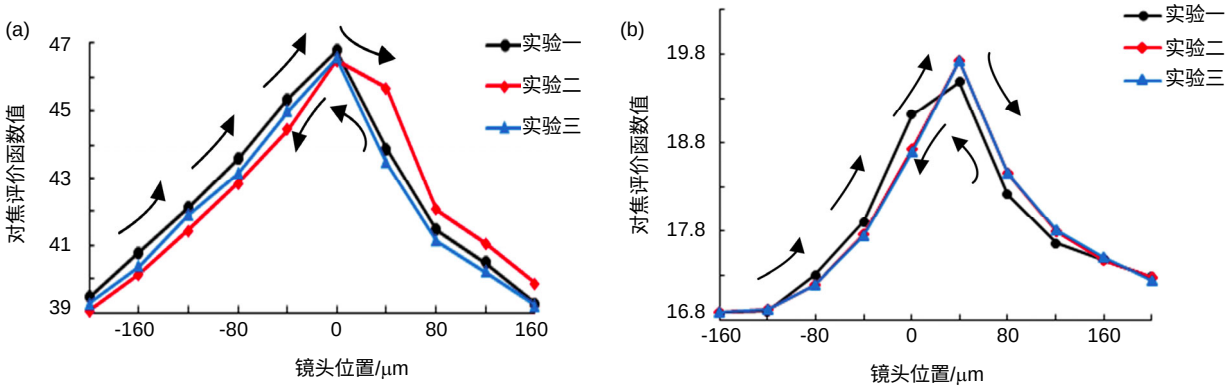


图 7　粗略对焦时的搜索过程. (a) PCB 板搜索过程. (b) 标本搜索过程.

Fig. 7　The search process of rough focusing stage. (a) The search process of PCB. (b) The search process of longitudinal specimens of pumpkin stem.

表 3　PCB 精细对焦时采用 Laplacian 函数得到的清晰度评价函数值.

Table 3　The value of the sharpness evaluation function obtained by Laplacian function in the fine focusing stage of PCB.

图片数量	11	12	13	14	15	16
镜头位置/μm	27	14	1	-12	-25	-38
实验一	12127.2	16181	16863	16760	13575	9763.1
实验二	10105	16883	17910	15755	11636	7899.2
实验三	9602.1	14585	17868	16300	12925	8063.9

表 4　南瓜茎纵切标本精细对焦时采用 Laplacian 函数得到的清晰度评价函数值.

Table 4　The value of the sharpness evaluation function obtained by Laplacian function in the fine focusing stage of the longitudinal specimens of pumpkin stem.

图片数量	11	12	13	14	15	16
镜头位置/μm	27	14	1	-12	-25	-38
实验一	30652	39865	42824	37756	27673	25517
实验二	26676	35137	42553	39014	33233	26619
实验三	31156	38861	42372	37646	28073	26095

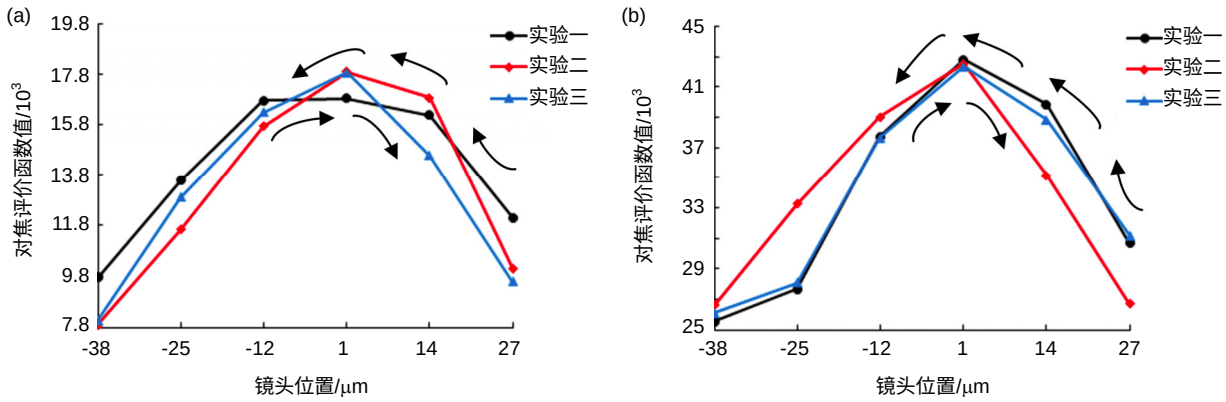


图 8　精细对焦时的搜索过程. (a) PCB 板搜索过程. (b) 标本搜索过程.

Fig. 8　The search process of fine focusing stage. (a) The search process of PCB. (b) The search process of longitudinal specimens of pumpkin stem.

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

由表 3、表 4 和图 8 可看出，精细对焦时采用 Laplacian 函数得到的清晰度评价函数值一直增大，则采用原步长按照相同方向继续搜索，直到采集到第 13 幅图像时，出现 $F(12)<F(13)>F(14)$，说明已经越过了对焦位置，找到一个长度为 26 μm 的对焦区间 $[V_{12},V_{14}]$，即[-12,14]，$|V_{12}-V_{14}|$≤景深，所以在这个区间内使用函数逼近法。以原来步长的 1/3(即 4 μm)在极值点附近取六幅图片求取对焦评价函数值进行拟合，由拟合求出极值。

PCB 电路板拟合曲线如图 9 所示。

表 5　PCB 曲线拟合阶段采用 Laplacian 函数得到的清晰度评价函数值.

Table 5　The value of the sharpness evaluation function obtained by Laplacian function in the curve fitting stage of PCB.

图片数量	17	18	19	20	21	22
镜头位置/μm	-8	-4	0	4	8	12
实验一	15682	16329	16813	17490	17670	17311
实验二	16715	17963	18111	17915	17210	17188
实验三	16759	16833	17869	17534	17524	14821

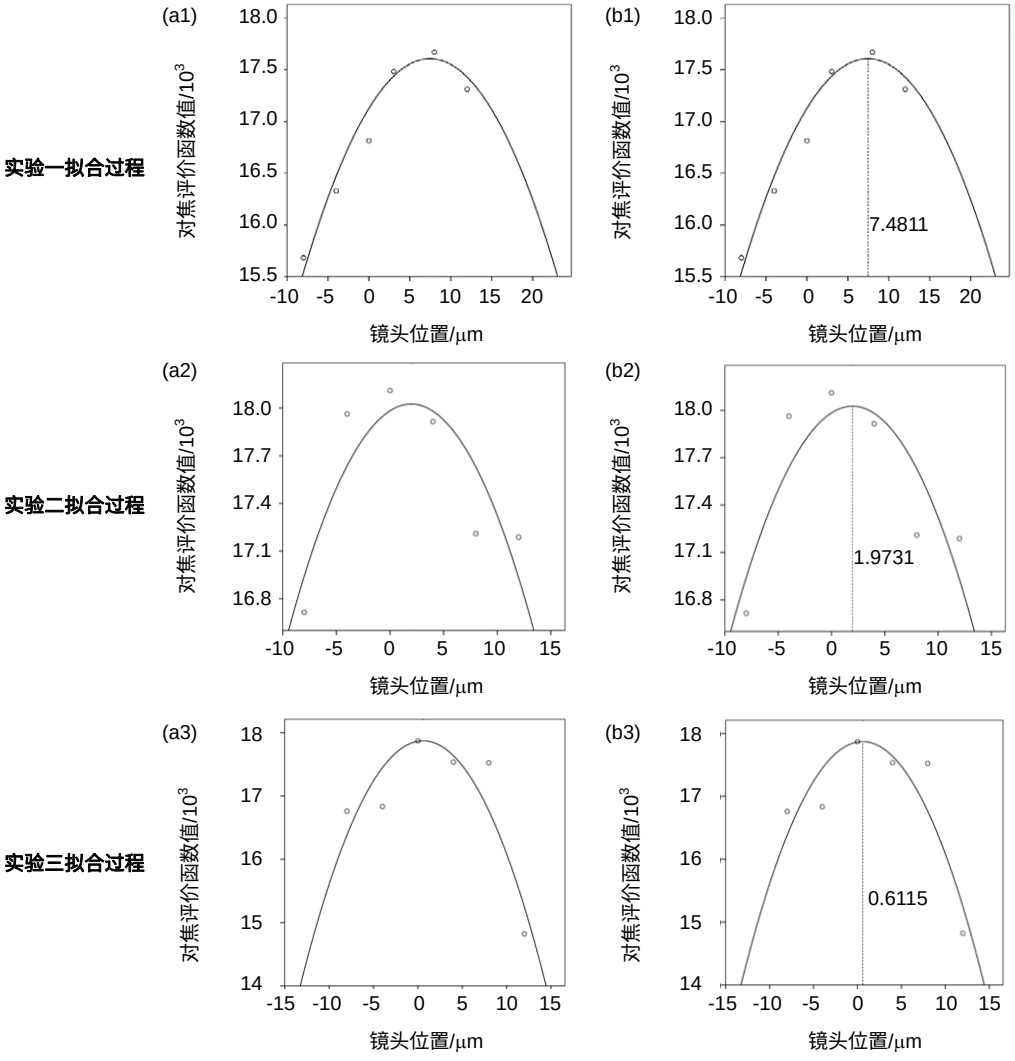


图 9　PCB 电路板曲线拟合的过程示意图. (a1)~ (a3) 极值点附近区域曲线拟合. (b1)~ (b3) 解析求出极值点.

Fig. 9　The curve fitting process diagram of PCB circuit board. (a1)~ (a3) Curve fitting near the extreme point. (b1)~ (b3) Analysis the extreme points .

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

由图 9 可知，三次实验经拟合曲线最后得出的对焦位置分别为 7.4811 μm、1.9731 μm、0.6115 μm。

如果用爬山搜索算法来寻找最佳对焦位置点，由表 5 PCB 评价函数可知，实验一需要在第 20 幅图像和第 22 幅图像之间，即[4，12]内改变方向减小步长继续搜索；实验二和实验三需要在第 18 幅图像和第 20 幅图像之间，即[-4，4]内改变方向减小步长继续搜索，此时步长减小为 1 μm，则需要继续采集 7 幅图像，如表 6。

由表 6 可以看出，实验一中第 27 幅图像的对焦评价函数值最大，此时的镜头位置在 7 μm 处，则认为最佳对焦位置在 7 μm 附近；实验二中第 25 幅图像的对焦评价函数值最大，此时的镜头位置在 1 μm 处，则认为最佳对焦位置在 1 μm 附近；实验三中第 26 幅图像的对焦评价函数值最大，此时的镜头位置在 0 μm 处，则认为最佳对焦位置在 0 μm 附近。

南瓜茎纵切标本拟合曲线如图 10 所示。

由图 10 可知，三次实验经拟合曲线最后得出的对焦位置分别为 1.0758 μm、0.2588 μm、1.5214 μm。

如果用爬山搜索算法来寻找最佳对焦位置点，由表 7 标本评价函数可知，对焦图像在第 18 幅图像和第 20 幅图像之间，即[-4，4]。在这个范围内改变方向减少步长继续搜索，此时步长减小为 1 μm，则需要继续采集 7 幅图像如表 8。

由表 8 可以看出，实验一中第 25 幅图像的对焦评价函数值最大，此时的镜头位置在 1 μm 处，则认为最佳对焦位置在 1 μm 附近；实验二中第 26 幅图像的对焦评价函数值最大，此时的镜头位置在 0 μm 处，则认为最佳对焦位置在 0 μm 附近；实验三中第 25 幅图像的对焦评价函数值最大，此时的镜头位置在 1 μm 处，则认为最佳对焦位置在 1 μm 附近。

传统的爬山搜索法需要 23 幅图片才能找到最佳对焦位置，进行 23 次重复计算，并且需 4 次改变搜索方向。而本文提出的混合搜索法的最佳对焦位置由拟合解析得出，只需要采集 17 幅图像，经过 17 次计算，并且仅需 3 次改变搜索方向，搜索时间要比普通爬山搜索算法小的多。

表 9 显示了两种搜索法的比较。

表 7　用爬山搜索法继续采集 7 幅 PCB 电路板图像的清晰度评价函数值.

Table 7　The evaluation function values of the seven PCB circuit board images collected by the mountain climbing method.

图片数量	23	24	25	26	27	28	29
镜头位置/μm	11	10	9	8	7	6	5
实验一	17416	17577	17641	17670	17675	17593	17504
图片数量	23	24	25	26	27	28	29
镜头位置/μm	3	2	1	0	-1	-2	-3
实验二	17947	18020	18232	18111	18079	18043	18006
实验三	17624	17776	17868	17869	17792	17633	16848

表 8　南瓜茎纵切标本曲线拟合阶段采用 Laplacian 函数得到的清晰度评价函数值.

Table 8　The value of the sharpness evaluation function obtained by Laplacian function in the curve fitting stage of the longitudinal specimens of pumpkin stem.

图片数量	17	18	19	20	21	22
镜头位置/μm	-8	-4	0	4	8	12
实验一	36674	37823	42724	41014	40882	40046
实验二	40078	41103	42779	42264	40189	39379
实验三	38332	38638	43099	41725	40622	39075

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

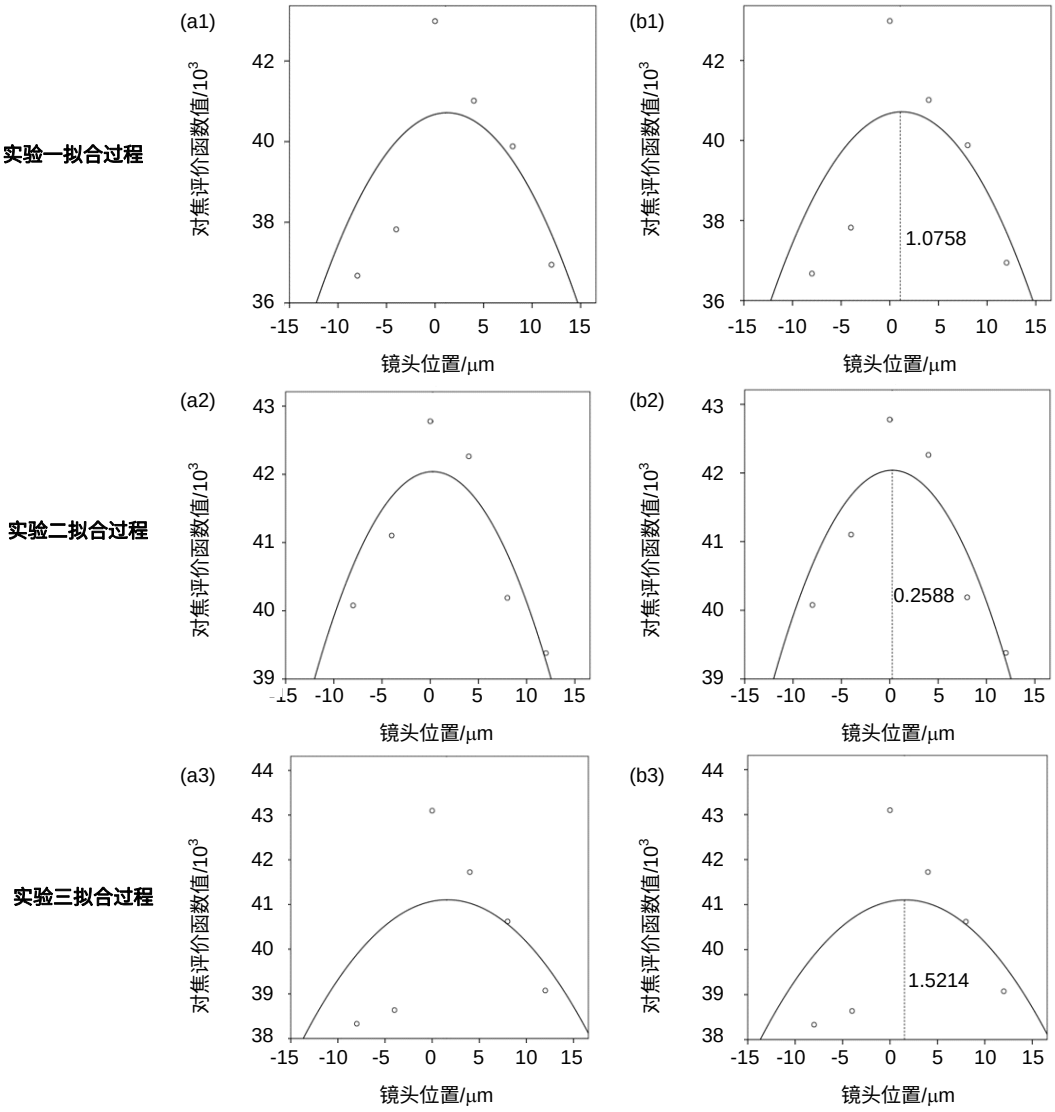


图 10　南瓜茎纵切标本曲线拟合的过程示意图. (a1)~(a3) 极值点附近区域曲线拟合. (b1)~(b3) 解析求出极值点.

Fig. 10　The curve fitting process diagram of pumpkin stem longitudinal specimens. (a1)~ (a3) Curve fitting near the extreme point . (b1)~ (b3) Analysis the extreme points.

表 9　用爬山搜索法继续采集 7 幅标本图像的清晰度评价函数值.

Table 9　The evaluation function values of the seven specimen images collected by the mountain climbing method.

图片数量	23	24	25	26	27	28	29
镜头位置/μm	3	2	1	0	-1	-2	-3
实验一	40599	42836	42987	42724	39051	38775	38250
实验二	42264	42444	42553	42779	42641	42499	41776
实验三	41805	42372	43360	43099	39818	39452	39039

由表 9 可以看出，本文所提出的混合搜索法的搜索效率是传统爬山搜索法效率的 1.7 倍。在实验过程中，由于采样率和采样起点不同，传统的搜索算法很有可能造成获得的具有全局最大对焦评价函数的位置不是真正的最佳对焦位置。在精细对焦时，传统爬山搜索法的步长为 1 μm，所以对焦精度仅能达到 1 μm，而本文采用曲线拟合法得出最佳对焦位置，可以精确到 0.0001 μm。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 10　传统爬山搜索法和混合搜索法的比较.

Table 10　Comparison between the traditional mountain-climb search strategy with the proposed hybrid search strategy.

对焦过程	传统的爬山搜索法	混合搜索法
采集图像	23	17
改变方向次数	4	3
总时间/s	4.398	2.587

5　结　论

本文提出的改进爬山搜索算法和函数逼近法相结合的混合搜索法是一种新的搜索算法。该算法中的爬山搜索法采用粗精结合的两段式搜索算法，在粗略对焦时，大步距考虑到算法的快速性，选用灰度方差函数快速逼近对焦位置；精细对焦时，小步距考虑算法的灵敏度，选用 Laplacian 函数精确对焦位置，通过比较三幅图片来缩小对焦区间并且在小区间内采用函数逼近法来拟合出最佳对焦位置。此方法仅需采集 17 幅图片，减少了图像采集和评估次数，没有增加电机运动行程，缩短了系统自动对焦的时间，提高了算法的搜索效率；而且通过比较连续三幅图像的评价函数值，避免陷入局部峰值。极值点由拟合解析给出，精度为 0.0001 μm 优于 1 μm，使其更加接近最佳对焦点的位置，大大提高了算法的精确度。

基金项目

国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ03065104)资助课题。

参考文献

1　Yazdanfar S, Kenny K B, Tasimi K, *et al*. Simple and robust image-based autofocusing for digital microscopy[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(12): 8670–8677.

2　Han J W, Kim J H, Lee H T, *et al*. A novel training based auto-focus for mobile-phone cameras[J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2011, **57**(1): 232–238.

3　Park B K, Kim S S, Chung D S, *et al*. Fast and accurate auto focusing algorithm based on two defocused images using discrete cosine transform[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, **6817**: 68170D.

4　Subbarao M, Surya G. Depth from defocus: a spatial domain approach[J]. *International Journal of Computer Vision*, 1994, **13**(3): 271–294.

5　Huang Detian. Study on auto-focusing method using image technology[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2013: 15–20.
黄德天. 基于图像技术的自动调焦方法研究[D]. 长春: 中国科学院大学(长春光学精密机械与物理研究所), 2013: 15–20.

6　Subbarao M, Choi T S, Nikzad A. Focusing techniques[J]. *Optical Engineering*, 1993, **32**(11): 2824–2836.

7　Marrugo A G, Millán M S, Abril H C. Implementation of an image based focusing algorithm for non-mydriatic retinal imaging[C]. Proceedings of the 2014 III International Congress of Engineering Mechatronics and Automation, 2014: 1–3.

8　彭娟. 基本恒定类表面模型及操作算子的研究[D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2010: 11–20.

9　Zhao Zhibin, Liu Jinghong. Auto-focusing method for airborne image equipment based on image processing[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2010, **25**(6): 863–868.
赵志彬, 刘晶红. 基于图像处理的航空成像设备自动调焦设计[J]. 液晶与显示, 2010, **25**(6): 863–868.

10　郭德伟. 基于新一代 GPS 的表面粗糙度规范与评定技术研究[D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2008: 1–30.

11　Xie Xiaofu, Zhou Jin, Wu Qinzhang. An adaptive autofocus method using no-reference structural sharpness[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2011, **38**(2): 84–89.
谢小甫, 周进, 吴钦章. 基于无参考结构清晰度的自适应自动对焦方法[J]. 光电工程, 2011, **38**(2): 84–89.

12　蒋婷. 基于图像处理的自动对焦理论和技术研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2008: 20–25.

13　Liu Shuxin, Liu Manhua, Yang Zhongyuan. An image auto-focusing algorithm for industrial image measurement[J]. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2016, **2016**: 70.

14　蒋凤林. 基于数字图像处理的自动调焦算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2008: 9–25.

15　莫春红. 基于图像处理的自动调焦技术研究[D]. 西安: 中国科学院研究生院(西安光学精密机械研究所), 2013: 20–30.

16　刘兴宝. 基于数字图像处理的自动对焦技术研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2007: 1–30.

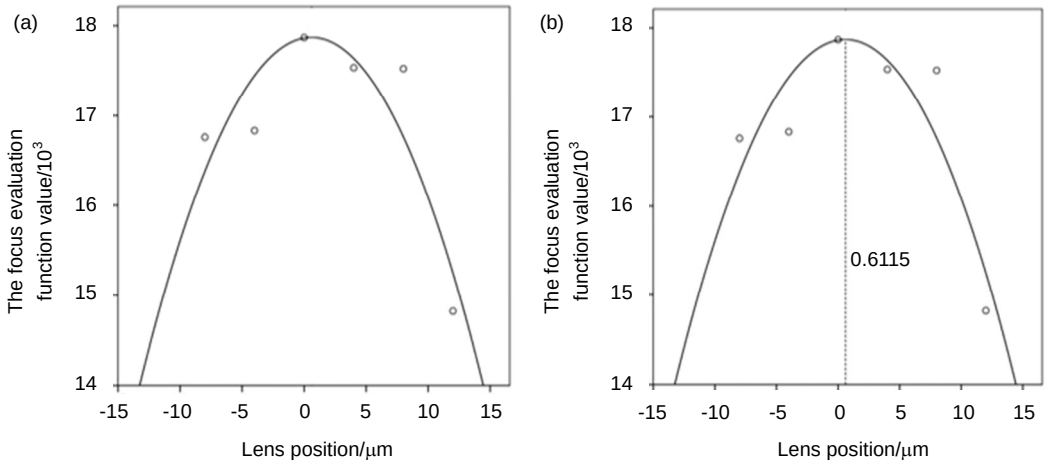
?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

DOI: 10.3969/j.issn.1003-501X.2017.07.004

Application of hybrid search strategy in microscope autofocus

Minshan Jiang, Nannan Zhang, Xuedian Zhang, Jia Gu, Xue Li and Feng Li*

Institute of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China



The curve fitting process diagram of PCB circuit board. (a) Curve fitting near the extreme point. (b) Analysis the extreme points.

Abstract: Auto-focusing is one of the key technologies in the area of robot vision, digital imaging systems and precision optical instrument. With the continuous development of science and technology and improved application demands, it is more and more urgent to develop an auto-focusing with high precision, fast speed and good stability. While the existing auto-focusing techniques can't meet the above requirements, a further study on auto-focusing makes a very important practical significance. The depth from defocus method and the depth from focus method are two typical passive auto-focusing methods of autofocus method based on digital image processing. The depth from defocus method is popularly used in depth estimation and scene reconstruction, which can measure the position of samples by just a few images. Therefore, the efficiency of the method is high. However, the accuracy of the depth from defocus method is relatively low because the small number of images is collected by the method. The depth from focus methods are based on the fact that the image formed by an optical system is focused at a particular distance whereas objects at other distances are blurred or defocused. Very high accuracy can be achieved by depth from focus methods. In order to achieve efficient autofocusing, several commonly used search algorithms are studied, and a new low-computational search algorithm is presented, which combines the mountain-climb search strategy with the approximation function strategy to realize the hybrid search algorithm accurate and efficient autofocus. In this algorithm, the mountain-climb search strategy adopts the two-stage algorithm of rough and fine focusing stage. In the rough focusing stage, the large step distance takes into account the fastness of the algorithm, and the gray variance function is used to approach the focusing position quickly. In the fine focusing stage, the small step distance takes into account the sensitivity of the algorithm and the Laplacian function is used to locate the focusing position accurately. The algorithm narrows the focus interval by comparing three pictures and in the range uses the approximation function strategy to fit the best focus position. This method makes greatly improve the search accuracy. The experimental results indicate that this the algorithm can make the search accuracy better than 1 μm. And the method only needs to capture 17 pictures, reducing the number of image acquisition and evaluation. As a result, the time of the autofocus system is shortened and the search efficiency of the algorithm is improved.

Keywords: autofocus; search algorithm; mountain-climb search strategy; approximation function strategy; hybrid search strategy

Citation: Jiang Minshan, Zhang Nannan, Zhang Xuedian, *et al.* Application of hybrid search strategy in microscope autofocus[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, **44**(7): 685-694.

See page 685 for full paper.

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net