

doi: 10.3788/gzxb20144304.0411002

基于 MTF 辅助正焦判断的自动调焦搜索算法

何祯鑫¹, 刘春桐¹, 黄先祥¹, 吴国俊², 张志利¹

(1 第二炮兵工程大学 兵器发射理论与技术国家重点学科实验室, 西安 710025)

(2 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

摘 要: 针对传统爬山搜索算法受调焦评价函数局部极值的干扰而不能准确聚焦的问题, 提出一种基于调制传递函数辅助正焦判断的自动调焦搜索算法. 该算法对爬山法进行改进, 在选择图像清晰度评价函数基础上, 同时考虑图像的调制传递函数值, 综合判断搜索方向; 采用改进的刃边法, 在自动完成刃边区域选择的基础上, 可精确计算图像的调制传递函数值, 并给出了改进算法的原理和实现. 为了衡量改进算法的性能, 验证调焦系统成像效果, 分别考虑搜索算法对不同调焦初始位置以及环境变化影响, 在经纬仪自动调焦系统平台上展开算法的调焦实验分析. 实验结果表明改进的自动调焦搜索算法能有效地排除局部极值干扰, 使系统准确、可靠的调焦.

关键词: 自动调焦; 调制传递函数; 评价函数; 爬山算法; 刃边法

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)04-0411002-8

Searching Algorithm of Auto-focusing Based on MTF Auxiliary Focal Judgment

HE Zhen-xin¹, LIU Chun-tong¹, HUANG Xian-xiang¹, WU Guo-jun², ZHANG Zhi-li¹

(1 State Key Discipline Laboratory of Armament Launch Theory and Technology,
The Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China)

(2 Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

Abstract: Traditional climbing search algorithm cannot usually focusing accurately due to the interference of evaluation function local extremum effected by measure environment. A searching algorithm of auto-focusing based on MTF auxiliary focal judgment was introduced to improve the climbing method. Definition evaluation function and MTF values of images were considered at the same time. And based on those results, search direction was judged. Slanted-edge method was improved to calculate the image MTF values accurately based on the auto-selection of slanted-edge area. At last, the principle and implementation of the improved algorithm was given. In the theodolite auto-focusing system, the system imaging effect was validated, and different initial position and circumstance were considered using the proposed searching algorithm. The experiment results of theodolite auto-focus system show that the improved climbing search algorithm can effectively eliminate the local extremum disturbance, and make the system searching focusing accurately and reliably.

Key words: Auto focusing; Modulation Transfer Function (MTF); Evaluation function; Climbing algorithm; Slanted-edge method

OCIS Codes: 110.3000; 100.2000; 120.4640

基金项目: 国家自然科学基金(No. 41174162)资助

第一作者: 何祯鑫(1986-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为导弹定位定向与方位传递技术. Email: hezhenxin1986@126.com

通讯作者: 刘春桐(1972-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光电技术及自动检测技术. Email: liuct1972@sina.com

导 师: 黄先祥(1940-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为导弹定位定向与方位传递技术及光电技术. Email: zhangyang8195@126.com

收稿日期: 2013-09-25; 录用日期: 2013-12-17

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

自动调焦的目的是准确、快速地调节目标成像位置到正焦平面,从而获得目标清晰像.较传统的自动调焦技术,基于图像处理的自动调焦技术因其不需要额外的硬件设施而受到重视^[1-2].基于图像处理的自动调焦技术原理为:根据不同环境选择合适的图像清晰度评价函数对采集图像进行评价,然后依据一定的搜索算法驱动调焦机构快速准确地到达正焦位置.

为提高对焦速度,M. Subbarao 等^[3]提出了一种基于空间域卷积/反卷积变换的离焦深度法,算法运算在空域内完成,对焦速度较频域得到较大提高. N. Kehtarnavaz 等^[4]选用平方梯度函数来测量离焦图像的高频分量,利用尺子搜索法寻找镜头的聚焦位置,并应用到数码相机上. Mark Gamadia 等^[5]提出了一种低光照下的自动调焦方法,先采用图像增强法以增加图像的对比度,再通过设计相应的调焦评价函数来测量图像的对比度,很好地解决了低光照下自动调焦失败的问题.针对不同对比度条件,文献^[6]提出一种用于会议电视摄像机的自动聚焦方法.李俊山等^[7]采用小波变换和自适应中值滤波器改进了 Canny 边缘检测算法,提高了图像边缘细节信号和抑制假边缘方面的性能.李奇等^[8]提出了一种与离焦深度法相结合的聚焦深度法,先采用离焦深度法对 3 个位置采集的图像进行离焦量估算,并直接调节镜头至聚焦位置附近,然后用小步长进行搜索,找到最佳聚焦位置.该方法在保持聚焦深度法的准确度优势的同时,将聚焦速度提高了 37%.韩瑞雨^[9]等为克服对比度变化引起的调焦曲线失去理想特性、陷入局部极小值甚至失去单峰性等问题提出 Zernike 正交矩的自动调焦算法.

由此可见,从图像清晰度评价函数、调焦搜索算法以及算法的环境适应性研究出发,提高调焦系统的测量准确度、缩短调焦时间和抗干扰能力,是基于图像自动调焦法的重要研究方向.目前,常见的自动调焦搜索算法有爬山算法、Fibonacci 搜索算法和曲线拟合算法等^[10-11],其中实际应用中广泛采用具有启发选择性的爬山搜索算法寻找最佳对焦点.但爬山搜索算法只能提供图像清晰的相对指标,加之图像清晰度评价易受噪音等因素干扰,使调焦结果出现局部峰值点而失败.

本文在分析三点爬山搜索算法的基础上,针对爬山搜索算法的不足,在正常调焦评价函数基础上增加具有绝对指标的图像调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 值评价,综合判断图像的正焦位置,提出了基于 MTF 辅助正焦评价的自动调焦搜索算法,增强自动调焦的可靠性,避免普通爬山算法在实际调焦过程中出现局部峰值现象;同时,为提高 MTF 的计算准确度和刃边区域选择的自动化,以经纬

仪瞄准系统为背景,采用改进的 MTF 刃边计算方法,在原理分析的基础上,从实验角度验证该算法的优越性.

1 基于图像的 MTF 计算

1.1 MTF 的理论基础

由于 MTF 既可以用来描述整个光学遥感器质量,又可以评价各个成像环节,同时 MTF 还以空间频率的函数形式存在,较之仅凭借某一个数字量(分辨率、清晰度等)来对成像系统进行质量评价更具有权威性.经过多年实践,用图像 MTF 来评价光学系统质量的方法已经得到普遍承认并得到广泛应用^[12].

光学系统成像就是把物平面上的光强分布图转换为像平面上的光强分布图,一般采用傅里叶分析法,将光学系统的作用视为空间频率的滤波器,引出 MTF 的概念.目标物体可分解为无数个点,每个物点所对应像的光强分布即为点扩散函数 (Point Spread Function, PSF),每个 PSF 叠加就构成了目标的像.假设物面上的光强分布为 $o(x, y)$,所对应像面上的光强分布为 $i(x', y')$,则满足

$$i(x', y') = \iint o(x, y) \text{PSF}(x' - x, y' - y) dx dy \quad (1)$$

上式是一个卷积过程,通过傅里叶变换可得到

$$I(u, v) = O(u, v) \cdot \text{OTF}(u, v) \quad (2)$$

式中, $O(u, v)$ 和 $I(u, v)$ 分别为 $o(x, y)$ 和 $i(x', y')$ 的傅里叶变换, u 和 v 分别为频域中沿两坐标轴方向的频率; $\text{OTF}(u, v)$ 为 $\text{PSF}(x, y)$ 的傅里叶变换,称为光学传递函数 (Optical Transfer Function, OTF),即

$$\text{OTF}(u, v) = \iint \text{PSF}(x, y) e^{-2\pi i(ux + vy)} dx dy \quad (3)$$

在一维的情况下,有

$$I(u) = O(u) \cdot \text{OTF}(u) \quad (4)$$

$$\text{OTF}(u) = \int \text{LSF}(x) e^{-2\pi i(ux)} dx = \text{MTF}(u) \cdot e^{-i\text{PTF}(u)} \quad (5)$$

式中, $\text{LSF}(x)$ 为系统的线扩展函数 (Line Spread Function, LSF); $\text{MTF}(u)$ 即为 $\text{OTF}(u)$ 的模; $\text{PTF}(u)$ 为 $\text{OTF}(u)$ 的相角,称为相传递函数.

设物面按一维正弦分布

$$o(x) = a + b \cos(2\pi u x) \quad (6)$$

由光学传递特性推导,得像面分布

$$i(x') = a + b \text{MTF}(u) \cos[2\pi u x' - \text{PTF}(u)] \quad (7)$$

对比式(6)、(7),像的光强分布相比于物的光强分布在幅值上衰减了 $\text{MTF}(u)$ 倍,故 MTF 体现了光学系统对各频率的传递能力,从频域角度全面地反映了系统的成像质量,其高频部分反映景物的细节传递情况,中频部分反映景物的层次传递情况,低频部分则反映景物的轮廓传递情况.

1.2 MTF 的刃边算法

一定环境下 CCD 采集的图像 MTF 应该是固定

的,作为系统是否正确对焦的“绝对指标”,基于图像的 MTF 计算方法必须保证具有良好的计算准确性和可操作性. 刃边法是目前常用的基于图像 MTF 计算方法,但计算通常需要手动选取刃边区域^[13],导致 MTF 的计算并不能完全实现自动化;传统刃边法要求刃边垂直于像素行,而在实际应用中,出现倾斜刃边的几率更大一些,文献[14]采用旋转一定角度使其垂直于像素行后再计算,不仅增加了算法的复杂度,而且因为图像旋转造成的锯齿效应而影响到计算准确度. 改进的刃边法可以合理、高效地自动选取刃边区域;同时,可实现在无需图像旋转的情况下,完成对倾斜刃边的高准确度 MTF 计算,具体步骤为:

Step 1: 刃边区域的自动选取

对采集到的图像进行边缘检测,可得到一幅二值化的图像. 然后对此二值化的图像进行 Hough 直线检测,在原图中包含直线段的多个区域中,选取目标范围内、长宽满足实际应用要求的刃边区域,刃边区域的提取效果如图 1.

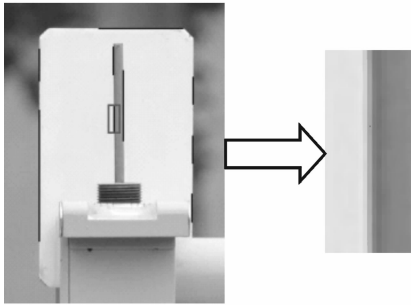


图 1 刃边区域提取结果

Fig. 1 The extracted slanted-edge area

Step 2: 建立“距离—灰度”关系

选取刃边区域内每行的灰度中心点,作为该行的刃边轮廓点进行线性拟合,得到刃边轮廓线. 计算刃边区域内每个像素到刃边轮廓线的垂直距离,获得此距离与像素灰度值的关系数据. 以垂直距离为横坐标、灰度值为纵坐标,描绘该区域像素分布图. 本步骤保证了算法在无需图像旋转的情况下,同时适用刃边垂直和倾斜的 MTF 计算.

Step 3: ESF 曲线拟合

边缘扩散函数 (Edge Spread Function, ESF) 是刀刃边缘景物成像后的光强分布函数,对 ESF 微分,即得到 LSF. 由于像素分布图常会受噪音影响,需构造 ESF 的函数模型才能拟合出贴近实际的 ESF 曲线.

常用的函数模型主要有多项式函数、组合函数和 Fermi 函数等^[15]. 本文中能够提取的刃边区域小、刃边数据点少,所以选择了适用于较少数据、有较强噪音抑制能力的 Fermi 函数来拟合 ESF 曲线. Fermi 函数的一般表达式为

$$f(x) = \frac{a}{1 + \exp[(x-b)/c]} \quad (8)$$

实验证明,3 个 Fermi 函数的线性组合即能保证拟合的准确度,故其常用表达式为

$$F(x) = \sum_{i=1}^3 \frac{a_i}{1 + \exp[(x-b_i)/c_i]} + d \quad (9)$$

用式(9)对像素分布数据进行拟合,得到的 ESF 曲线如图 2.

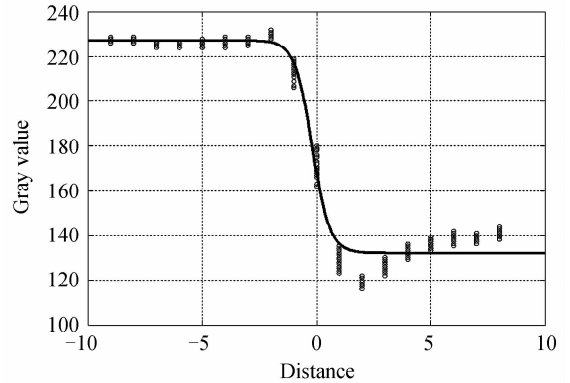
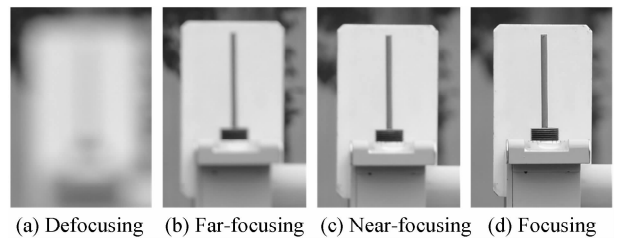


图 2 ESF 曲线

Fig. 2 ESP curve

Step 4: MTF 的计算

对 ESF 曲线进行求导得到 LSF 曲线,对 LSF 进行离散化,然后进行一维傅里叶变换,对得到的值取模并归一化,得到响应频率的 MTF 值,通常需要对空间频率进行归一化,1 表示截止频率,0.5 为截止频率的一半,即 Nyquist 频率. 为验证 MTF 的清晰度评价特性,对 CCD 相机采集到的一组由离焦模糊到正焦清晰的目标图像序列见图 3,分别进行 MTF 计算,得到的 MTF 曲线对比图见图 4.



(a) Defocusing (b) Far-focusing (c) Near-focusing (d) Focusing

图 3 目标图像序列

Fig. 3 Image sequences of the object

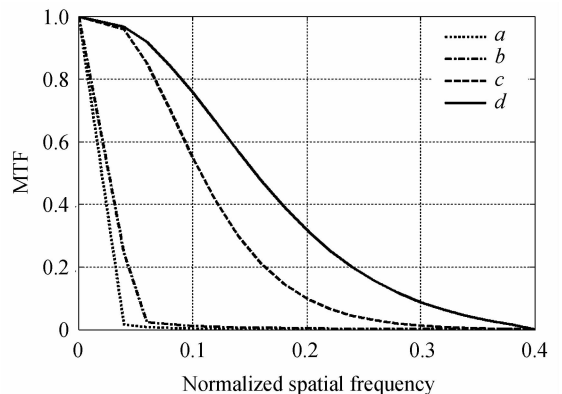


图 4 MTF 曲线对比

Fig. 4 The curve of MTF

计算得到图(3)各序列在 Nyquist 频率处的 MTF

值依次为 0.001 9、0.004 9、0.099 6、0.318 4,呈递增趋势。这表明离焦程度越大,图像越模糊,MTF 曲线下降越快,在 Nyquist 频率处的 MTF 值就越小;故可用 MTF 在 Nyquist 频率处的值作为图像清晰度辅助评价标准。

2 自动调焦改进算法设计

2.1 调焦评价函数的选择

根据几何光学理论,当物点偏离物面时,像点将变成弥散斑;在物平面两侧,图像的离散程度可认为关于物平面对称。与此对应,衡量一幅图像是否正焦的调焦评价函数应当满足单峰对称性、无偏性和信噪比高等特性。调焦评价函数目前有灰度梯度类函数、频域类函数、统计类函数、信息类函数和小波类函数等^[16]。基于图像灰度梯度的评价函数是应用最多的清晰度评价函数,主要包括绝对方差函数、Roberts 梯度和函数、Brenner 函数、能量函数、方差函数、Laplacian 函数、Tenengrad 函数等^[17]。实验中选择更适合经纬仪自动调焦的评价函数,设计了对标杆仪图像进行清晰度评价的对比实验:固定 CCD 摄像机与目标距离,调节焦距由近及远步进,并对目标进行图像采集,截取 414×590 像素部分,构成由模糊到清晰再到模糊的图像序列。不同清晰度评价函数得到的评价曲线如图 5。

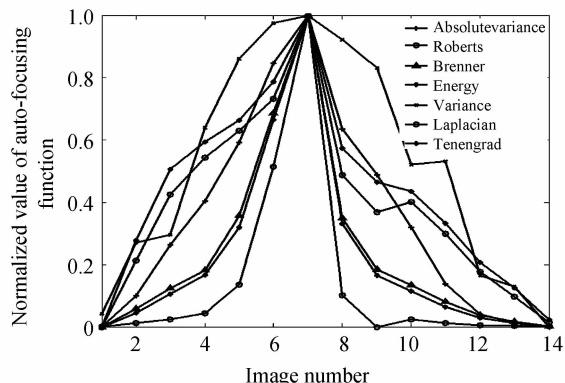


图 5 系列图像调焦评价函数值

Fig. 5 Auto-focusing function values of series images

由图 5 可知,Brenner 函数、能量函数的评价曲线有且仅有一个峰值点,且峰顶宽度较窄、灵敏度较高;其它函数有的出现多个峰值点,易产生误判,有的则灵敏度较差。同时,Brenner 函数对单一目标图像进行评价用时为 32 ms,比其它函数用时短。故选取综合性能较好的 Brenner 函数作为清晰度评价函数。

2.2 普通三点爬山搜索算法

本文基于普通三点爬山法进行搜索算法改进。三点爬山法基本原理为:理想的图像清晰度评价函数具有单峰性,在峰值两侧单调递减,爬山法即利用这一特性,通过上、下坡判断实现聚焦。其搜索过程为:调焦机构从初始位置出发,向某一方向步进调焦,并采集图像

计算评价函数值,每连续采集三幅图像就对下步动作做出判断。当三幅图像的评价函数值递增时,说明正处于上坡状态,按原步长和调焦方向继续采集图像;当递减时,说明正处于下坡状态,减小步长向相反方向调焦;若既非递增亦非递减时,则说明遇到了局部噪音干扰或在峰值点附近,需要按原步长和调焦方向继续采集图像。

因为系统图像采集过程中极易受到光照、温度等环境因素以及敏感元件噪音等的影响,使得调焦过程的清晰度评价函数常会出现多个局部峰值点,通过连续三次的评价函数值对比可增大算法的抗干扰性。但三点爬山法通常适用于清晰度评价函数曲线仅有个别局部峰值点,且这些峰值点范围较小的情况;对局部峰值点范围较大的情况,三点爬山法会出现调焦错误,而搜索到局部峰值点处,如图 6 中的 P' 点。

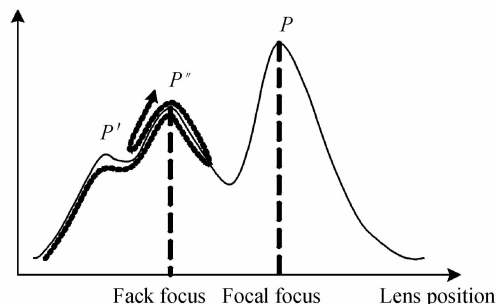


图 6 三点爬山法误调焦示意图

Fig. 6 Wrong focusing of three-point climbing algorithm

2.3 改进调焦算法原理与实现

在图 6 所示的三点爬山法误调焦过程中,若调焦机构停在 P' 位置时,有另一评价函数进一步判断出此点是否为正焦位置,则可避免误调焦的出现。由采集到图像计算出光学系统的 MTF 值,并与事先测得的正焦图像的 MTF 值相比较,即可完成此误调焦的判断。

光学系统的 MTF 不随所采集景物图像的变化而变化^[18],故 Nyquist 频率处的 MTF 值可事先通过对正焦时的光学系统检测,当用三点爬山法完成一次调焦并停在某一峰值点处时,对此时采集的图像计算 Nyquist 频率处的 MTF 值,当该值小于设定的标准时,表明此位置为局部峰值点,并不是真正的焦点,需继续进行调焦;只有当其在某一峰值点处时,采集的图像在 Nyquist 频率处的 MTF 值大于或等于设定标准时,才表明调焦正确。这即是本文提出的三点爬山法和 MTF 辅助正焦判断相结合的综合调焦搜索策略,可保证较快搜索速度同时,很好地避免因清晰度评价函数出现局部峰值点而发生误调焦。改进算法流程如图 7。具体实现过程为:

Step 1:检测光学系统在某一物距处的目标正焦时,采集图像在 Nyquist 频率处的 MTF 值 $MTF_{Nyquist}$,并将 $M = \alpha MTF_{Nyquist}$ ($0.90 \leq \alpha \leq 1$) 存储为正焦判断标

准. 再次用到该光学系统对同一物距处目标成像时, 其调焦过程可直接调用此 M 值.

Step 2: 调焦机构从焦距最近(或最远)位置出发, 以较大步长 L_n ($n=1, 2, 3 \dots$, 表示第 n 步调焦动作) 向焦距增大(或减小)方向运动并采集图像, 计算 Brenner 评价函数值. 每采集三幅图像即对评价函数值进行比较, 若 3 个评价函数值递增, 则以步长 L_n 沿原方向继续进行调焦; 若递减, 则以较小的步长 $L_{n+1} = \beta L_n$ ($0 < \beta < 1$, β 值可由实验获取) 向相反方向调焦; 为其它大小关系时, 则按原步长和方向继续调焦. 重复三点爬山法步骤, 直到满足步长 $L_n < \epsilon$ (ϵ 为设定准确度) 时

停止.

Step 3: 调焦机构停止时, 采集图像并计算其评价函数值 $f(m)$ ($m=1, 2, 3 \dots$, 表示已检测到的第 m 个峰值点 P_m), 及其在 Nyquist 频率处的 MTF 值 M_m . 若 $M_m \geq M$, 则该处为焦点位置, 调焦过程完成; 若 $M_m < M$, 则该处为局部峰值点, 调焦机构按初始状态以较大步长 L_1 向焦距增大方向运动, 并采集图像和计算检焦函数值, 当在新的位置得到的检焦函数值大于 $\max\{f(1), f(2) \dots f(m)\}$ ($m=1, 2, 3 \dots$) 时, 表明已经跳出此局部峰值点范围, 此后调焦机构可以向相反方向(焦距减小的方向)运动, 否则只能向焦距增大方向运动.

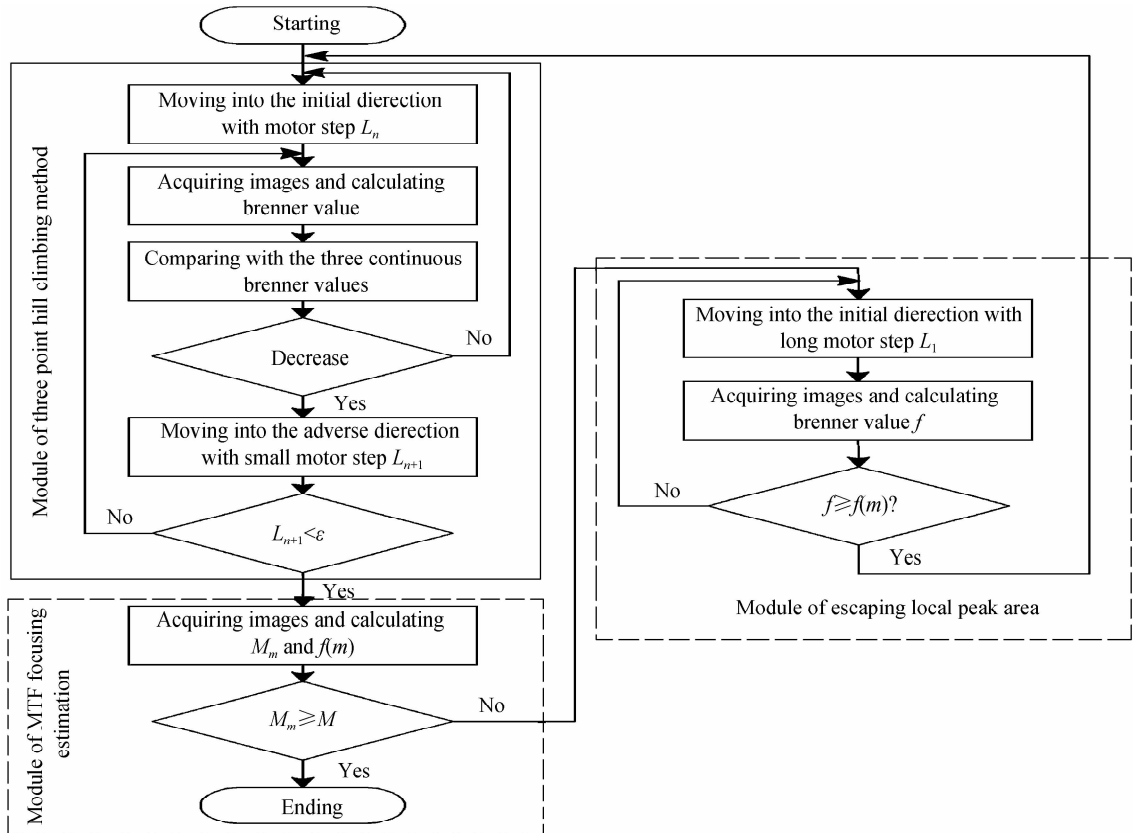


图 7 算法流程图

Fig. 7 Algorithm flow diagram

Step 4: 以步骤 2 的三点爬山法进行调焦, 当再次检测到极大值而调焦机构停止时, 以步骤 3 进行判断和决定下步动作.

Step 5: 重复进行 2~4 步, 直到在某峰值点处的 M_m 值不小于 M 时, 调焦完成.

3 自动调焦实验

为验证设计的搜索算法有效性, 进行了自动调焦实验. 实验平台由 MV-300 UC-D 工业 CCD 相机 (2048×1536 pix)、经改造的 J2 电子经纬仪 (加装 RM2414S 调焦步进电机驱动调焦手轮) 以及计算机图像处理系统组成, 其系统原理见图 8.

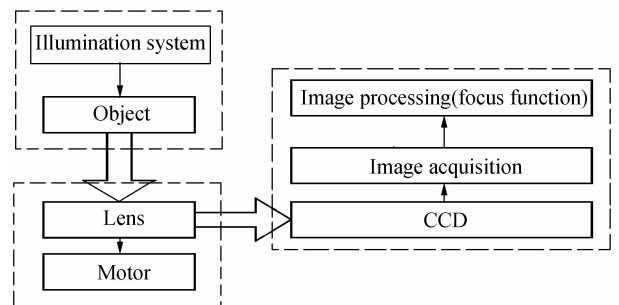


图 8 实验系统原理

Fig. 8 The schematic of experimental system

为分析算法性能, 利用实验系统分别进行了分辨率板成像实验、不同调焦初始位置下的调焦性能对比实验和环境变化时的搜索算法实验.

3.1 自动调焦系统分辨率板成像实验

分辨率板是光电成像系统评价工作中常用的工具之一,在系统性能评估工作中经常需要对分辨率指标进行评价.为说明自动调焦系统的成像效果,作为算法应用到该系统中的成像效果标准,利用上述实验平台进行分辨率板实验.实验中得到的分辨率板图像如图9.

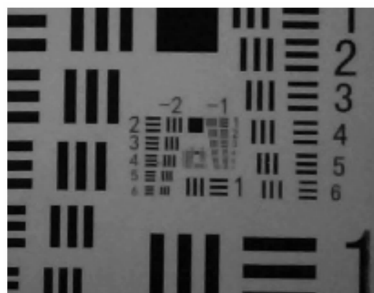


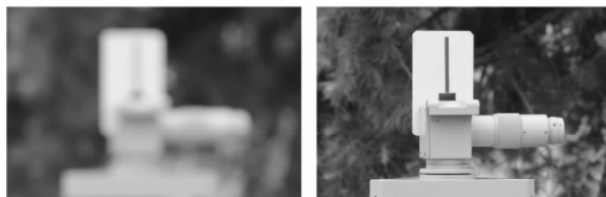
图9 分辨率板
Fig.9 Resolution checker

从图9可以看出,自动调焦系统的成像效果较好,能够为算法提供实验平台.

3.2 不同调焦初始位置调焦性能比较实验

实验方法为:1)将标杆仪安装到距离经纬仪10 m远的位置,手动调节经纬仪使其瞄准标杆,由采集的图像计算MTF值得到 $MTF_{N_{yquist}}$,并取合适的 α 值,作为

正焦辅助判断标准;2)将经纬仪调焦手轮调至近焦距处,由计算机控制经纬仪自动调焦并计时.共设计了4组实验,调焦手轮的起始位置分别记为 0° 、 2° 、 4° 、 6° .取第1组自动调焦前后的图像进行对比分析,对比图像如图10.



(a) Defocusing image (b) Focusing image

图10 自动调焦前后的图像对比

Fig.10 Image contrast between before and after auto-focusing

由自动调焦前后采集的图像观察可知,调焦效果明显,能够满足系统进一步目标识别和测量的要求.

4组调焦过程中的Brenner函数值曲线,如图11.由图11可知,虽然4组实验的电机起始位置并不完全相同,但最终的调焦结果较为一致,都在 84° 位置附近.清晰的正焦图像应该有比模糊的图像存在更大的轮廓灰度级差异,它们的Brenner函数和MTF值差异较大,因此图像之间的评价函数标准差可作为调焦结果比较的有效工具.调焦完成时,4次实验正焦图片的归

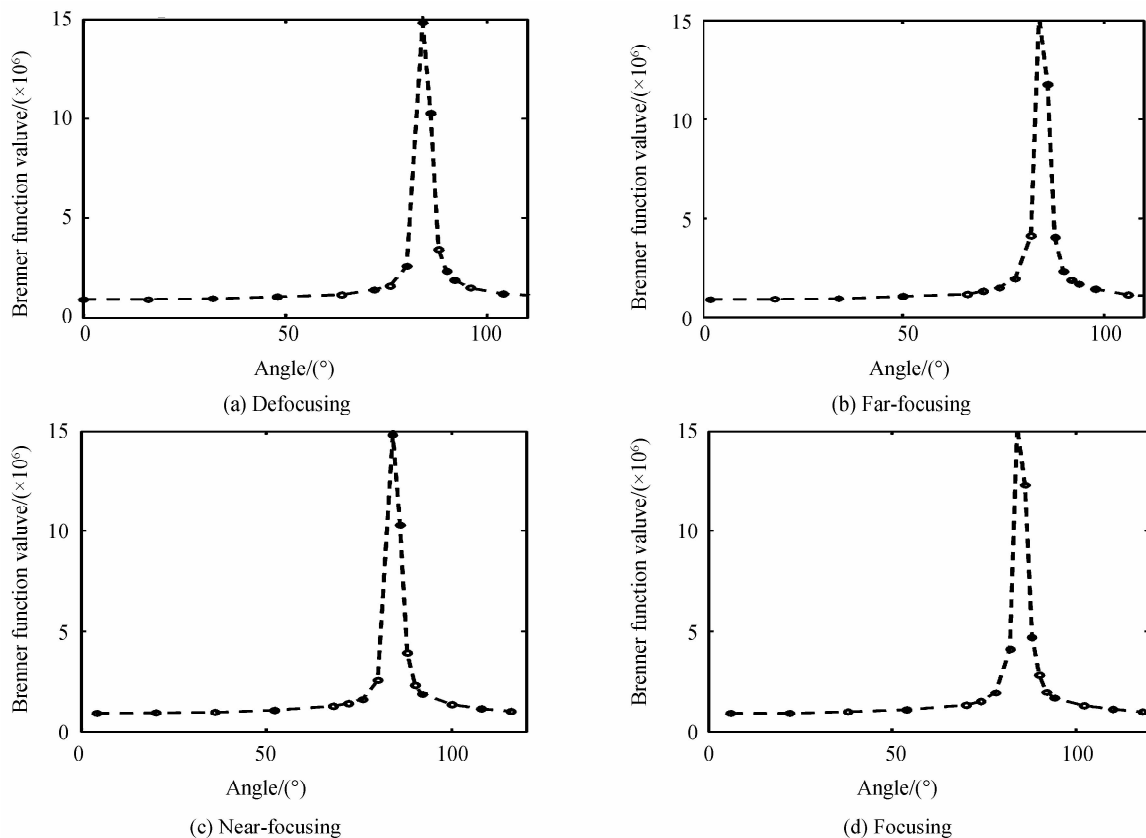


图11 调焦过程中 Brenner 评价函数值
Fig.11 Brenner value in the process of focusing

一化 Brenner 函数值、Nyquist 频率处的 MTF 值、它们的均值 (Average Value, AV) 和标准差 (Standard Deriation, SD),见表 1.

表 1 调焦结果

Table 1 The focusing results

List	1	2	3	4	AV	SD
Brenner	0.988 3	0.999 4	0.996 3	1.00	0.996 0	0.009 3
MTF _{Nyquist}	0.136 4	0.140 5	0.138 9	0.141 6	0.139 4	0.003 9

由表 1 可知,4 次调焦后的归一化 Brenner 值和 MTF 值与他们的均值相差小,即标准差很小,表明 4 次调焦结果很接近. 由实验的正焦图像可知,4 次实验结果已经取得满意效果,此时的归一化 Brenner 值和 MTF 值的标准差可进一步定量说明算法可在不同离焦程度下,实现有效地自动调焦,可重复性和稳定性较好. 自动调焦总的用时主要包括图像采集和处理时间、控制信号传输时间、电机运转时间和延时时间等. 其中,电机运转时间是影响系统调焦用时的主要因素,而为了防止信号间发生冲突,电机每运转一步需要有 0.2 s 延时;同时电机的调整步数与系统初始离焦状态有关,也会影响调焦用时. 调焦实验中,每组调焦电机的调整步数为 21 至 25,4 组实验的平均用时为 12 s,能够满足经纬仪自动调焦对于时间的要求.

3.3 环境变化时的搜索算法实验

由于 4 次实验的环境较为理想,Brenner 函数值曲线并未出现明显的局部峰值,没有影响三点爬山法的搜索判断. 为进一步验证算法的可靠性,实验方法与 3.2 节不变,调焦手轮的起始位置仍处于 0o 位置,只是系统调焦环境发生变化,在经纬仪利用本文提出的 MTF 辅助调焦算法进行自动调焦实验的初始阶段,人为对标杆仪进行变光强的补光照射. 使用 LX-1010B 型数字式照度计测量标杆仪周围光照强度,补光前后平均光强由 5500Lux 变为 10400Lux. 调焦结束后,进行实验数据点采样,得到调焦位置与 Brenner 评价函数值曲线如图 12.

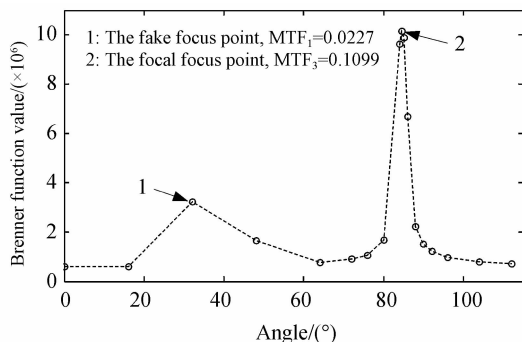


图 12 环境变化时的自动调焦搜索

Fig. 12 Auto-focusing searching algorithm with the varying environment

由图 12 可知,当图像处于较大离焦状态时,

Brenner 函数值较小,靠近正焦状态时,函数值迅速变化,对标杆仪短暂的补光操作后,即调焦外界光照条件发生改变时,Brenner 函数值存在相应的突然起伏,形成一个波峰,根据普通爬山算法或是三点爬山算法,调焦最终会停止在波峰点 1 点附近,但实际上这个位置不是正焦位置,会造成误调焦操作,形成一个局部虚假调焦峰值. 根据本文提出的辅助调焦判断算法,当出现波峰时,实时计算出此时的图像 MTF 值,并利用预存的图像参考 MTF 值进行比较判断. 通过事先的调试,得到参考 MTF 值为 0.1148,容错率 10%,可以判断 1 点的 MTF 值超出容错范围,认为是虚假调焦波峰,命令电机继续调焦直至调焦位置 2,停在 84.5°位置上,与前 4 次调焦结果保持一致;与前 4 次调焦实验相比较,由于调焦环境发生变化,发现调焦图像的 Brenner 函数值和 MTF 值也相应发生改变. 为了体现算法的有效性,调焦搜索过程中图像的参考 MTF 值在每次实验前进行人工调试. 为方便算法的实际应用,可采用理论与实验结果相结合的方法,得到环境影响的 MTF 模型,根据当时调焦环境,直接调用模型获得 MTF 的参考值.

通过实验分析,说明本算法在实际应用过程中具有较强的环境抗干扰能力,提高了经纬仪及其它光电设备在复杂环境下自动调焦的可靠性.

4 结论

基于 MTF 辅助正焦判断的自动调焦搜索算法,采用普通图像清晰度评价函数和图像 MTF 值相结合的双重评价标准方式,能有效地排除干扰,避免受调焦评价函数值局部波动的影响,提高了自动调焦的可靠性. 利用改进的刃边法能够更为精确、自动地求算图像的 MTF 值,更好地为调焦辅助评价提供参考. 改进的搜索算法为实现基于图像处理的经纬仪自动调焦系统提供了理论支撑,实验结果表明,改进算法在调焦准确度、调焦时间和调焦可靠性上较好地满足了经纬仪自动调焦要求,也为其他光电设备的自动调焦提供了很好的借鉴.

参考文献

- [1] MOSCARITOLLO M, JAMPEL H, KNEZEVICH F, *et al.* An image based auto-focusing algorithm for digital fundus photography[J]. *Medical Imaging*, 2009, **28** (11): 1703-1707.
- [2] FLOREA C, FLOREA L. A parametric non-linear algorithm for contrast based auto-focus[C]. *International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing*. 2011: 267-271.
- [3] 陈琛. 图像式三坐标测量仪大范围快速自动调焦策略的研究 [D]. 上海:上海交通大学,2009.
- [4] KEHTARNAVAZ N, OH H J. Development and real-time implementation of a rule-based auto-focus algorithm[J]. *Real-Time Imaging*, 2003, **9**: 197-203.

- [5] GAMADIA M, KEHTARNAVAZ N, KATIE R H. Low-light auto-focus enhancement for digital and cell-phone camera image pipelines [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronic*, 2007, **53**(2): 249-257.
- [6] HU Feng-ping, CHANG Yi-lin, MA Yan-zhuo, *et al.* Development of video automatic focus method [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(10): 1901-1906.
胡风萍, 常义林, 马彦卓, 等. 视频自动聚焦的实现研究[J]. 光子学报, 2010, **39**(10): 1901-1906.
- [7] LI Jun-shan, MA Ying, ZHAO Fang-zhou, *et al.* A novel arithmetic of image edge detection of Canny operator[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(1): 50-54.
李俊山, 马颖, 赵方舟, 等. 改进的 Canny 图像边缘检测算法[J]. 光子学报, 2011, **40**(1): 50-54.
- [8] LI Qi, Feng Hua-jun, XU Zhi-hai. Method of improving autofocus speed based on defocus estimation[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2005, **16**(7): 850-853.
李奇, 冯华君, 徐之海. 基于离焦估计的对焦速度的提高方法[J]. 光电子·激光, 2005, **16**(7): 850-853.
- [9] HAN Rui-yu, WANG Jin-jiang, NIE Kai, *et al.* Adaptive autofocus technique under different contrast [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **41**(2): 222-227.
韩瑞雨, 王晋疆, 聂凯, 等. 不同对比度下自适应的自动调焦新算法[J]. 光子学报, 2011, **41**(2): 222-227.
- [10] XIE Xiao-fu, ZHOU Jin, WU Qin-zhang. 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.
- [11] HU Tao, CHEN Shi-zhe, LIU Guo-dong, *et al.* Algorithm of rapid auto-focusing with a long-range [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2006, **17**(4): 474-467.
胡涛, 陈世哲, 刘国栋, 等. 大范围自动调焦快速搜索算法[J]. 光电子·激光, 2006, **17**(4): 474-467.
- [12] LIAO Jing-yu, GAO Xiao-dong, LIANG Wei. Dynamic MTF analysis and research for aerial camera[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **44**(5): 679-683.
廖靖宇, 高晓东, 梁伟. 航空相机动态调制传递函数分析与研究[J]. 光子学报, 2011, **44**(5): 679-683.
- [13] 李铁成. 基于倾斜刃边法的遥感图像调制传递函数计算及图像复原技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- [14] 卢振华. 推扫式遥感相机基于图像的实时自动调焦研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2012.
- [15] WANG Yi-feng, MAO Jing-xiang. A simple method for calculating Fermi function with MATLAB and numerical approximation[J]. *Infrared*, 2008, **29**(8): 34-36.
王忆锋, 毛京湘. 用 MATLAB 和数值逼近方法实现费米函数的简捷计算[J]. 红外, 2008, **29**(8): 34-36.
- [16] SHI Hong-wei, SHI Yao-wu, Yang Shuang. Evaluation and selection of estimating function for auto-focus system of optical microscope[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2013, **25**(2): 235-240.
史红伟, 石要武, 杨爽. 光学显微镜自动调焦指导函数的评价与选择[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2013, **25**(2): 235-240.
- [17] WANG Jian, CHEN Hong-bin, ZHOU Guo-zhong, *et al.* An improved Brenner algorithm for image definition criterion [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(7): 855-858.
王健, 陈洪斌, 周国忠, 等. 改进的 Brenner 图像清晰度评价算法[J]. 光子学报, 2012, **41**(7): 855-858.
- [18] 刘钧, 高明. 光学设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.