

一种粗细结合的快速图像自动调焦算法

林兆华 米 阳 葛 兵

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033)

摘要: 为保证光测设备获得清晰图像,提出一种粗调与精调相结合的自动快速调焦算法,该算法运用图像清晰度评价函数自动搜索到正焦面,使用改进的 Kirsch 边缘检测算子评价函数以大步长进行粗略调焦,使用小波变换为基础的评价函数实现小范围、小步距的精确调焦。该算法聚焦区域的选取采用非均匀采样函数,大大减少了数据处理的工作量和所需时间。最佳聚焦位置的搜索采用一种改进的爬山搜索算法与搜索策略,有效地提高了搜索效率,通过实验表明:该算法能够满足对图像的调焦要求,取得较好的使用效果。

关键词: 光测设备;图像处理;评价函数;自动调焦

中图分类号: TP202 TN16 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.80

Algorithm of rapid autofocus combining rough and fine adjustment

Lin Zhaohua Mi Yang Ge Bing

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: Auto-focusing technique is one of the key technologies to ensure the high quality image for the optical measurement system. An algorithm of rapid autofocus combining rough and fine adjustment is proposed. This method can automatically search the focal plane by evaluating the image definition. First, the image edge function based on the improved Kirsch operator with high performance is used to rough focusing. The evaluation function based on wavelet transform is used to fine focusing in narrow range later. Un-uniform sampling function is used as the method calculating the focusing window, which can reduce the work of the data processing and the calculating time. An improved mountain climbing searching algorithm and tactics of the optimum focus position, which can significantly accelerate the search speed. The experimental results indicate that this algorithm can meet the focusing requirements of the optical measurement system, which can obtain good practical value.

Keywords: the optical measurement system; image processing; evaluation function; auto focusing

1 引言

光测设备是现代靶场进行弹道测量的重要设备,目前设备实时跟踪以及事后分析及数据处理对图像的清晰度要求越来越高,不过现有的设备仍采用传统的自动调焦方式,该方式实现方法单一,调焦精度不高,很难满足对清晰度的要求^[1-2]。随着现代数字技术不断发展,图像处理理论不断发展完善,自动调焦算法也越来越多的采用图像处理理论,并取得了一些科研成果,但目前能够应用到实际工程中的还不多,尤其在长焦距、大调焦行程的光测设备中还没有得到应用,而且大多数研究的重点都在于针对静止图像的自动调焦技术,

很少对运动图像做深入研究。另外已有的图像调焦算法存在一定的问题:目前没有可以通用的理想调焦评价函数,且评价函数还不能完全克服系统噪声带来的影响;最佳聚焦搜索算法相对单一且容易受到局部极值点影响,调焦实时性还有待进一步提高。

针对基于图像处理的自动调焦技术存在的不足,提出一种粗细结合的快速图像自动调焦算法,该算法选择粗调大步长与精调小步长相结合的方式,为提高自动调焦实时性,调焦计算区域的选择采用非均匀采样函数,为保证调焦精度,最佳聚焦位置搜索采用一种改进的爬山搜索算法与搜索策略。通过实验表明:该算法能够实现对光测设备图像实时自动调焦,满足系统的调焦精度,能够满足光测

收稿日期:2015-07

设备对图像清晰度的要求,可以为其他基于图像处理的自动调焦技术提供一种参考。

2 图像清晰度评价

图像清晰度评价函数、调焦窗口的选择和最佳焦面的搜索算法是目前图像处理自动调焦技术的3个关键技术^[3-5]。

针对光测设备图像以及调焦机构特点,选择图像清晰度评价函数为粗调评价函数与精调评价函数相结合的方式,粗调评价函数能够以较大步距,较快速度控制调焦机构到达最佳物面附近,满足调焦实时性,精调评价函数能够以较小步距,精确控制调焦机构到达最佳物面,满足调焦的准确性。

粗调评价函数选用基于边缘检测算子评价函数,相对于其他边缘检测算子,Kirsch检测算子能够避免丢失边缘细节,能够检测图像8方向边缘^[5],图1为8个卷积核组成的Kirsch边缘算子,因此选用Kirsch边缘检测算子的评价函数会取得更好效果。

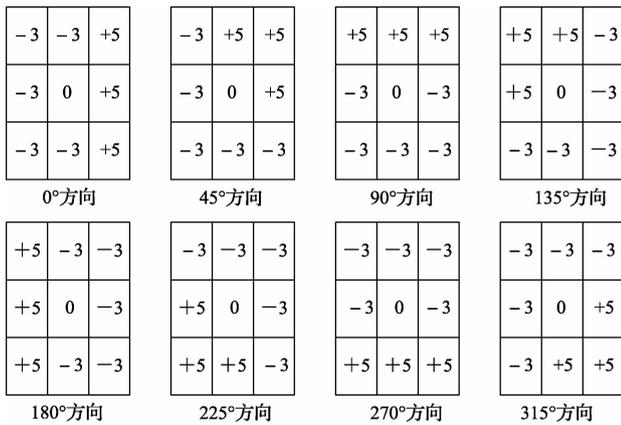


图1 Kirsch边缘算子

根据图1,每个像素点梯度值可以表示为:

$$G(x,y) = \sqrt{H_1^2 + H_2^2 + H_3^2 + H_4^2 + H_5^2 + H_6^2 + H_7^2 + H_8^2} \quad (1)$$

以上公式可采用绝对值近似梯度值,公式为:

$$G(x,y) = |H_1| + |H_2| + |H_3| + |H_4| + |H_5| + |H_6| + |H_7| + |H_8| \quad (2)$$

其中 $H_i (i = 1, 2, \dots, 8)$ 分别为每个灰度数值对图1所示的8个掩模进行卷积。具体采用公式如下:

$$\begin{aligned} H_1 &= F(x,y)_{s_1} & H_2 &= F(x,y)_{s_2} \\ H_3 &= F(x,y)_{s_3} & H_4 &= F(x,y)_{s_4} \\ H_5 &= F(x,y)_{s_5} & H_6 &= F(x,y)_{s_6} \\ H_7 &= F(x,y)_{s_7} & H_8 &= F(x,y)_{s_8} \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $F(x,y)$ 为图像灰度数值, $S_i (i = 1, 2, \dots, 8)$ 为具体的8方向模板。

对于基于边缘检测算子的清晰度评价函数,目前采用

边缘梯度能量和进行定义^[6],具体公式为:

$$E_{edge} = \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N |G(x,y)|^2 \quad (4)$$

该函数中带有平方运算,会增加数据计算量,为提高调焦过程的实时性,对以上公式进行改进,具体公式为:

$$E = \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N |G(x,y)| \quad (5)$$

由于图像存在噪声,图像背景过亮或者过暗,会导致清晰度评价函数存在多个极值,会严重影响调焦过程,易造成图像虚晃现象,因此要对评价函数加上一定阈值,阈值公式选用:

$$T_n = \sqrt{\frac{\eta}{M \times N} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} [F(x,y) - u_{mean}]^2} \quad (6)$$

式中: u_{mean} 为图像的平均灰度, T_n 图像灰度阈值,如存在 $G(x,y) > T_n$ 时要计算图像的清晰度评价函数。

基于小波变换评价函数调焦精度很高,常被用于分辨微小离焦量^[7-9],针对小波变换特点以及长焦距光测设备对图像的需求,精调评价函数选用以小波一层变换高频子带幅值和作为评价函数,其中小波变换采用MALLAT算法进行一层小波变换,该算法选用 $h(n), g(n)$ 小波分解滤波器对图像信号进行分解,具体分解4个频带系数公式为:

$$\begin{aligned} S_{i,j}^1 &= \sum_{k,m} h(k-2i)h(m-2j)I(k,m) \\ \alpha_{i,j}^1 &= \sum_{k,m} g(k-2i)h(m-2j)I(k,m) \\ \beta_{i,j}^1 &= \sum_{k,m} h(k-2i)g(m-2j)I(k,m) \\ \gamma_{i,j}^1 &= \sum_{k,m} g(k-2i)g(m-2j)I(k,m) \end{aligned} \quad (7)$$

式中: $S_{i,j}^1$ 为图像轮廓低频信息系数, $\alpha_{i,j}^1$ 为图像水平方向小波分解高频信息系数, $\beta_{i,j}^1$ 垂直方向小波分解高频信息系数, $\gamma_{i,j}^1$ 为图像对角线方向小波分解高频信息系数, $I(k,m)$ 为图像灰度值^[10]。根据以上信息,精调评价函数为:

$$F(I) = \sum_{i,j} [|\alpha_{i,j}^1| + |\beta_{i,j}^1| + |\gamma_{i,j}^1|] \quad (8)$$

由于小波变换计算量很大,如果进行小波多层分解,计算量会进一步增大,会严重影响自动调焦实时性,因此该调焦评价函数采用一层小波变换。

3 调焦窗口的选择

调焦窗口是指计算图像清晰度评价函数的图像区域^[11]。调焦窗口的选择对于自动调焦实时性以及调焦精确度非常关键。

本文提出了一种改进的非均匀调焦窗口选择方法:计算图像中心点,以其为基准,选择中心调焦窗口A,中心窗口大小为 $(X/4, Y/4)$,以 $X/8, Y/8$ 为单位向外依次选择调焦窗口B、C、D,其中 X, Y 为图像行与列像素数值,调焦窗口选择如图2所示。

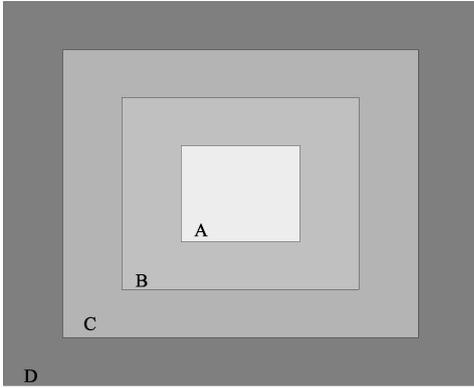


图2 非均匀调焦窗口的选择

为减少数据处理工作量,提高调焦实时性,针对不同的调焦窗口,图像灰度值采样率要采用不同的权重。对于中心窗口 A 保持原分辨率,外部窗口分辨率则成倍数减小,依次为 $X/2$ 、 $X/4$ 、 $X/8$ 。

采用该调焦窗口选择方法能够适应目标偏离视场中心的情况,减少数据计算量,减少背景图像(非聚焦区域)对调焦评价函数计算影响。

4 最佳聚焦搜索算法

最佳聚焦搜索算法中最为常见的为爬山搜索算法,但爬山搜索算法在工程实践中仍然存在许多问题,容易受到局部极值点影响,使自动调焦准确性和效率下降,甚至失败。

对传统的爬山搜索算法进行了如下改进:

1) 搜索过程采用大步长粗调与小步长细调结合方式,粗调过程中步长一般选用 1 倍光学景深,细调过程步长选用景深的 $1/3$;

2) 为避免图像噪声影响搜索算法,采用计算多帧图像与阈值判断相结合的爬山搜索算法,在搜索过程中要采集多帧图像进行调焦评价函数计算,如果评价函数值连续增加则继续向前搜索,如果连续下降且评价函数值的下降量超过相应的阈值,搜索过程进入精调阶段;

3) 精调阶段在最佳聚焦位置附近搜索,如果评价函数数值连续下降,爬山搜索算法结束。此时要选用曲线拟合的方法计算最佳聚焦位置,精确度更高,曲线拟合点选用精调阶段评价函数最大值点及左右附近点进行计算;

4) 搜索过程结束后,记录最佳焦面评价函数值 W_1 ,如视场内目标发生变化,需要重新进行搜索,重新搜索策略为:重新采集图像评价函数值 W_2 ,并计算判断阈值 $\eta = \frac{|W_2 - W_1|}{W_1}$,根据 η 值判断下一步搜索策略:如 $\eta > 1$ 重新搜索仍选用粗精结合的方式,如 $\eta < 0.1$ 则不需要重新搜索,如果介于两者之间,重新搜索直接选用精调焦搜索过程。

5 实验结果

由于粗精结合的调焦评价函数计算量较大,为提高调焦的实时性,将以上算法应用在以工控机为控制核心的调焦机构中,针对某型号光测设备光学镜头固定的目标(月亮)进行试验。具体聚焦试验结果如图 3 所示。图中第 1 次搜索调焦步距为 0.2 mm,以大步距很快缩小对焦范围,第 2 次搜索调焦步距为 0.1 mm,第 3 次搜索调焦步距分别为 0.05 mm,经过 3 次搜索过程,在 $450 \mu\text{m}$ 位置有聚焦评价函数的最大值点。对该极值点及左右邻近两点进行曲线拟合,求出极值点位置为 $420 \mu\text{m}$ 。实际焦面位置在 $430 \mu\text{m}$,满足该设备调焦精度要求。

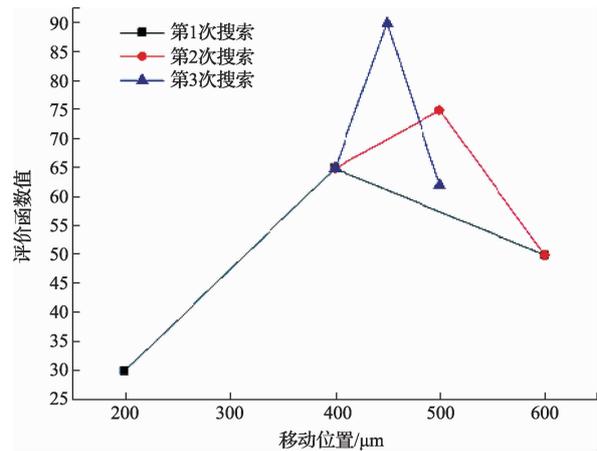


图3 聚焦试验搜索结果

针对不同距离的目标进行多次自动调焦实验,实际调焦位置和实验调焦位置数据如表 1 所示,实验结果为多个数据的均值,结果的读取采用光栅尺,通过实验可得调焦精度为 $\pm 0.02 \text{ mm}$,满足设备对调焦精度的要求。

表 1 实际调焦位置和实验调焦位置数据

目标距离/m	实际焦面/mm	实验结果/mm	调焦偏差/mm
400	8.000	8.014	+0.014
800	4.000	4.018	+0.018
1 200	2.660	2.655	-0.005
2 000	2.000	2.016	+0.016
2 500	1.530	1.521	-0.009
3 000	1.330	1.342	+0.012
4 000	1.000	1.019	+0.019
5 000	0.800	0.794	-0.006
6 000	0.667	0.684	+0.017
8 000	0.520	0.532	+0.012
10 000	0.432	0.420	-0.012
无穷远	0	0.020	+0.020

针对同一目标图像进行多次自动调焦实验,实际聚焦位置为光栅尺的 1 000 码值位置,实验前将调焦机构置于

不同的位置,在该位置进行多达20次的自动调焦实验,自动调焦实验结果在焦面附近次数或其他位置次数如表2所示,通过实验可以得到,相对于以前的调焦算法,采用的粗精结合的快速图像自动调焦算法调焦稳定性较高。

表2 稳定性实验数据

调焦机构 初始位置	实验次数/次	焦面附近/次	其他位置/次
12 000	20	19	1
7 503	20	19	1
2 125	20	20	0
63 735	20	20	0
51 008	20	19	1
32 705	20	18	2

另外针对动态目标(飞机)进行自动调焦实验,具体结果如图4所示,实验表明该算法能够实现对动态目标自动调焦,且图像清晰,满足使用要求。

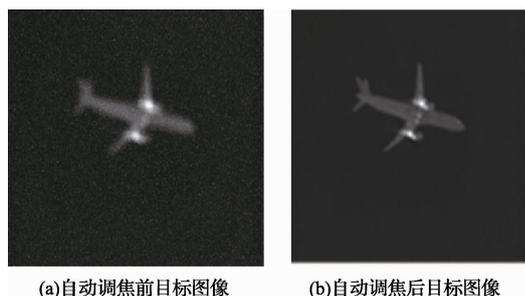


图4 某动态目标自动调焦实验结果图像

根据以上实验数据可以得到,该自动调焦算法调焦精度较高,调焦稳定性较高,满足设备对调焦的要求,实现了针对动态目标自动调焦功能。

6 结 论

提出一种粗精结合的快速图像自动调焦算法,调焦窗口选用一种改进的非均匀选择方法,减少了数据处理的工作量,采用一种改进的爬山搜索算法与搜索判断策略,通过实验表明:该算法能够实现对光测设备图像实时自动调

焦,能够满足光测设备实时跟踪以及事后数据处理和分析对图像清晰度的要求,可为其他基于图像处理的自动调焦技术提供一种参考。

参 考 文 献

- [1] 刘鑫,林兆华,杜壁秀. CAN总线分布式自动调焦控制系统设计[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(8): 44-48.
- [2] 梁敏华,吴志勇,陈涛. 采用最大灰度梯度法实现经纬仪自动调焦控制[J]. 光学精密工程, 2009, 17(12): 3016-3021.
- [3] 洪裕珍,任国强,孙健. 离焦模糊图像清晰度评价函数的分析与改进[J]. 光学精密工程, 2014, 22(12): 3401-3408.
- [4] 徐博泓,江和平. 一种粗精结合的图像式靶场测量系统自动调焦算法[J]. 中国激光, 2010, 47(3): 1-3.
- [5] 求是科技. Visual C++数字图像处理典型算法及实现[M]. 北京:人民邮电出版社, 2006.
- [6] 周贤,姜威. 基于边缘能量的自动聚焦算法[J]. 光学技术, 2006, 32(1): 36-40.
- [7] 姚凯. 基于小波清晰度计算的水下图像融合增强研究[J]. 电子测量技术, 2015, 38(2): 64-68.
- [8] 张肃,王文生,徐春云. 低对比度环境下运动目标光学相关检测技术[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(2): 319-325.
- [9] 蒋薇薇,鲁昌华,张玉钧. 基于提升小波改进阈值的光谱信号去噪研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(12): 1363-1368.
- [10] CASTLEMAN K R. 数字图像处理[M]. 北京:电子工业出版社, 2006.
- [11] 张乐,姜威. 数字图像一阶矩的自动聚焦区域选择算法[J]. 光学技术, 2008, 34(2): 153-165.

作 者 简 介

林兆华,博士,副研究员。主要研究方向为光电测控设备伺服控制系统、调光调焦控制系统。

E-mail: 171588402@qq.com