

文章编号 1004-924X(2013)08-2023-08

投影微分法实现多光谱成像仪的自动对焦控制

张艳超^{1,2*}, 孙 强¹, 赵 建¹, 李也凡¹, 韩希珍¹, 白 晶¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院大学, 北京 100039)

摘要: 基于投影微分算法提出了一种应用于多光谱成像仪的自动对焦方法, 该方法结合图像处理单元和多个波段的探测器调焦辅助机构来同时实现多个波段的独立自动对焦。首先, 根据观测需要对自动对焦窗口进行手动选取, 或结合投影微分与目标边缘的对应关系进行对焦窗口的自动选择; 然后, 将参与自动对焦计算的图像的对焦窗口内的数据做 x 与 y 方向投影, 对这两个方向投影数组的微分 1 范数均值求均方根, 并将其作为该帧图像的清晰度评价价值; 最后, 结合经典的爬山搜索算法, 完成系统的自动对焦过程。实验结果显示, 同等条件下投影微分算法与经典的 Brenner、能量梯度及 Roberts 梯度和算法具有同样好的评价效果, 能够准确地实现系统的自动对焦, 而其算法时间分别仅为这 3 种算法的 0.67、0.33 和 0.33 倍。这些结果表明, 投影微分算法具有良好的单峰性与无偏性、较高的灵敏度及很好的实时性, 能够满足系统的高精度自动对焦要求。

关键词: 多光谱成像仪; 自动调焦; 对焦深度法; 清晰度评价函数; 投影微分

中图分类号: TP751; TP391.41 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132108.2023

Auto-focusing adjustment of multi-spectral imager by differential projection method

ZHANG Yan-chao^{1,2*}, SUN Qiang¹, ZHAO Jian¹, LI Ye-fan¹, HAN Xi-zhen¹, BAI Jing¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)*

* *Corresponding author, E-mail: zhangyanchaomn@126.com*

Abstract: An auto-focusing method used for the multi-spectral imagers was proposed based on differential projection. The method uses an image processing unit and auxiliary focusing equipment of sensors to implement the auto-focusing processes for different spectral bands separately and simultaneously. Firstly, the focusing window was delimited manually according to the observation needs or was searched automatically on the basis of the corresponding relations of differential projection and target edges. Then, the focusing window data of the image to be focused and calculated were projected in x -direction and y -direction, the 1st norm of the two projection arrays' first order differential values was derived and the mean of the two sets of 1st norm data was computed. Furthermore, the RMS of the two means was taken as the definition evaluation value of this image. Finally, combined with the clas-

收稿日期: 2013-01-13; 修订日期: 2013-03-20.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 60977001); 吉林省科技引导计划 (No. 20090557)

sic mountain climb-searching method, the auto-focusing process was finished. Experimental results indicate that the auto-focusing method based on differential projection can be realized accurately, and it has the same effect with the classic Brenner, energy gradient and Roberts gradient algorithm, approximately. However, the running time of differential projection is only 0.67 times of Brenner, 0.33 times of Energy gradient, and 0.33 times of Roberts gradient. With the advantages of its strong single peak features, good unbiased characteristics, high sensitivity and excellent real-time, the method can meet the requirements of high-precision auto-focusing very well.

Key words: multi-spectral imager; auto-focusing; depth from focusing; definition evaluation function; differential projection method

1 引言

多光谱成像仪主要应用于大范围远距离情况下对目标进行多波段光谱成像观测、识别跟踪与特性分析等,其观测范围一般从几十米到几千米。清晰成像是信息提取的重要前提,为了使处于不同位置、不同运动状态的目标迅速清晰成像,必须实现光学系统实时、快速的自动对焦。目前,应用在多光谱成像仪的自动调焦方法主要有测距法和图像法。测距法主要是利用激光测距仪等测距装置,对检测目标的距离(即物距)进行测定,结合几何光学牛顿公式,对光学参数进行相应调整,进而实现系统的快速对焦。该方法简单快速,但需要另外增设测距装置等辅助机构,增加了系统的复杂度及结构成本。此外,这种非接触式测距往往会由于外界环境干扰(如雨水、大雾)等因素造成严重的距离误差,导致自动对焦失败^[1]。图像法主要是通过对采集得到的不同离焦状态的图像的灰度梯度、频谱特性等处理分析,提取出准确地对焦位置信息,通过光学参数调整实现系统的自动对焦^[2]。图像法结构简单、受外界环境影响小,且可以灵活地对视场内任意感兴趣的目标实行自动对焦,已经成为自动对焦领域的主流方法,基于图像法的不同算法也渐渐成为研究热点^[3-11]。基于图像法的自动对焦法又可以分为离焦深度法和对焦深度法两大类^[12]。离焦深度法通过对 2~3 幅不同离焦程度的图像进行弥散斑半径值提取,从而反推出系统的清晰成像位置。该方法所需图像数量少,但单帧运算量往往较大,部分算法还对目标形状特性有特定要求,而且运算精度相对于对焦深度法低。因此,离焦深度法较适合于系统运算能力较强,对焦精度要求不高的大范围快速粗

调焦场合。对焦深度法通常是对同一场景下不同离焦程度的连续十几幅图像按照特定的清晰度评价函数进行一系列搜索比较,最后将清晰度评价函数的极值处视为最佳对焦位置,常用的清晰度评价函数有灰度梯度函数和频谱函数。对焦深度法虽然需要参与计算的图像较多,但算法简单快速、对焦精度高,同时不影响其他算法的并行运行,因此,对焦深度法比较适合于对焦精度要求较高的小范围精确对焦。目前经典的对焦算法有 Brenner 函数法、能量梯度、Robbert 函数法、傅里叶变换法及离散余弦变换(DCT)等。近年来很多学者也提出了许多新的对焦算法,如文献[4]、文献[5]、文献[6]及文献[9]等所述的自动对焦新方法,这些方法大多是以当前的经典算法为基础,进行算法改进或多种算法结合,以进一步提高算法性能,但同时也提高了算法的运算量。文献[8]则是将小波变换应用到了自动对焦算法中,虽然具有较强的抗噪性,但是运算量无疑要比基于经典的灰度梯度算法(如 Brenner、能量梯度)大很多。

结合多光谱成像仪的工作特点,本文提出了将基于灰度梯度投影微分的对焦深度法用于成像仪的精确对焦。该方法相对于当前经典的对焦深度法,在保证同等对焦精度的前提下具有更快的运算速度,有利于系统性能的进一步提高。

2 基于投影微分的自动对焦算法

2.1 投影微分算法原理

对于多光谱成像仪的光学系统,为了保证各波段的视场一致性,各波段光束是由同一光路采集,经分光棱镜分光后入射到各自的探测器中的。因此,对于某一特定检测目标,是通过分别调整各波段探测器靶面位置来实现对焦的。由能量守恒

定理可知,探测器靶面处于不同位置,接收到的目标入射能量恒定,只是不同离焦状态下,探测器接收到的目标光强不同,进而体现出目标整体及边缘处灰度投影微分均值的差异性。下面分别以理想情况下,灰度均匀的矩形及三角形目标为例,对该算法进行详细阐述。

假设给定一个暗背景情况下亮度均匀的矩形目标,使同一探测器靶面处于两个不同位置(记为位置 1 和位置 2)进行图像采集,进而得到离焦状态不同的两幅图像:图像 1 和图像 2。两幅图像的大小均为 $m \times n$,在其中心区域矩形目标所成的矩形像大小分别为 $a_1 \times b_1$ 和 $a_2 \times b_2$ 。假设图像 1 所处位置比图像 2 更接近于对焦位置,根据几何相似性定理,有 $a_1 < a_2$ 且 $b_1 < b_2$ 。

假定目标背景为 0,入射光总能量为 I ,由能量守恒定理可知,位置 1 处的目标光强度 E_1 为:

$$E_1 = \frac{I}{a_1 b_1} \quad (1)$$

则图像 1 的整幅图像的灰度 $g_1(x, y)$ 表达式为:

$$g_1(x, y) = \begin{cases} kE_1(x, y), & x_1 \leq x \leq x_1 + a_1 \ \& \ y_1 \leq y \leq y_1 + b_1 \\ 0, & \text{else} \end{cases} = \begin{cases} kE_1, & x_1 \leq x \leq x_1 + a_1 \ \& \ y_1 \leq y \leq y_1 + b_1 \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (2)$$

其在 x 方向上的投影表达式 $h_1(x)$ 为:

$$h_1(x) = \sum_{y=0}^m g(x, y) = \sum_{y=y_1}^{y_1+b_1} g(x, y) = \begin{cases} \sum_{y=y_1}^{y_1+b_1} kE_1, & x_1 \leq x \leq x_1 + a_1 \\ 0, & \text{else} \end{cases} = \begin{cases} kb_1 E_1, & x_1 \leq x \leq x_1 + a_1 \\ 0, & \text{else} \end{cases} = \begin{cases} k \frac{I}{a_1}, & x_1 \leq x \leq x_1 + a_1 \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (3)$$

对 $h_1(x)$ 在 x 方向求一阶微分的 1 范数得:

$$|h_1(x)'| = k \frac{I}{a_1} [\delta(x - x_1) + \delta(x - (x_1 + a_1))] \quad (4)$$

将式(4)取均值得到式(5):

$$P_{Avgx1} = E\{|h_1(x)'\}| = k \frac{2I}{a_1 n} \quad (5)$$

由式(5)可知,图像 1 越接近准焦位置, a_1 越

小, P_{Avgx1} 越大。整个计算过程如图 1 所示。

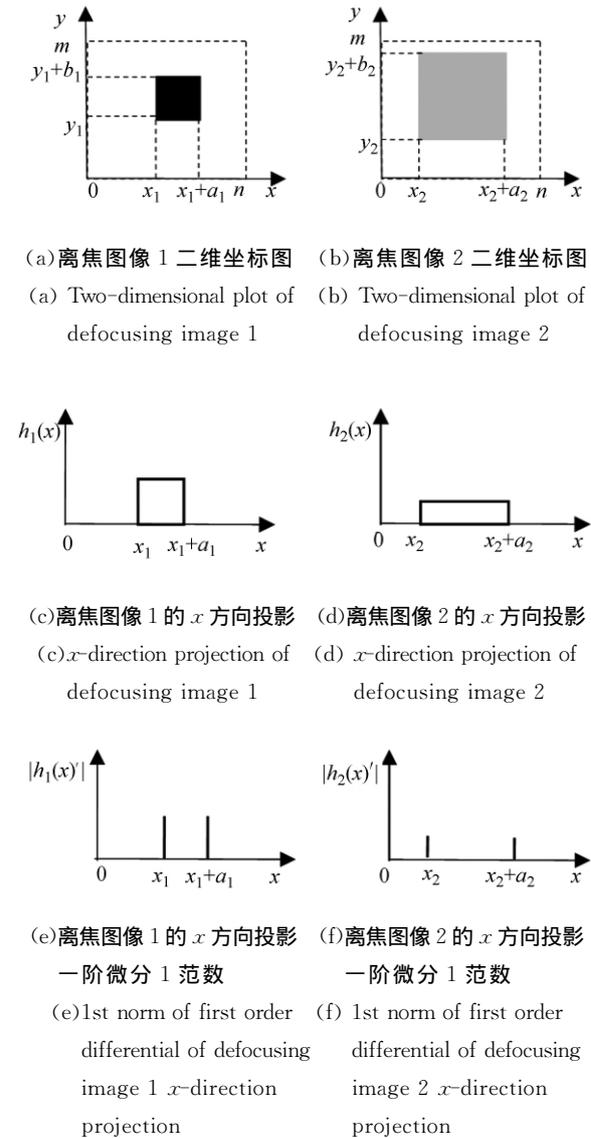


图 1 矩形目标 x 方向投影微分计算过程

Fig. 1 Calculating procedure of rectangular target's x -direction differential projection

由图 1 可知 $|h_1(x)'|$ 实际为目标边缘在 x 方向投影的 1 范数,其大小反应了目标边缘处阶跃的幅度。因此, P_{Avgx1} 表示的是目标边缘在 x 方向投影的平均幅度,且对焦程度越高,边缘阶跃幅度越大, P_{Avgx1} 值也就越大。

为了更全面地体现图像边缘变化的整体信息,还应求出其在 y 方向的投影微分 1 范数均值 P_{Avgy1} 。根据上述推导,同理可得:

$$P_{Avgy1} = E\{|h_1(y)'\}| = k \frac{2I}{b_1 m} \quad (6)$$

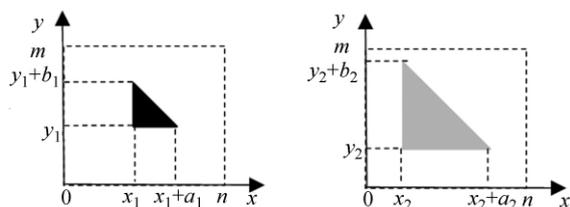
为了整体衡量图像边缘信息,可用 $P_{\text{Avg}x1}$ 与 $P_{\text{Avg}y1}$ 均方根 $P_{\text{Avg}1}$ 表示:

$$P_{\text{Avg}1} = \sqrt{P_{\text{Avg}x1}^2 + P_{\text{Avg}y1}^2} = 2kI \sqrt{\left(\frac{1}{a_1 n}\right)^2 + \left(\frac{1}{b_1 m}\right)^2}, \quad (7)$$

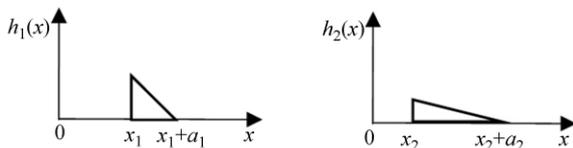
同理,对于图像 2,有如下表达式:

$$P_{\text{Avg}2} = \sqrt{P_{\text{Avg}x2}^2 + P_{\text{Avg}y2}^2} = 2kI \sqrt{\left(\frac{1}{a_2 n}\right)^2 + \left(\frac{1}{b_2 m}\right)^2}. \quad (8)$$

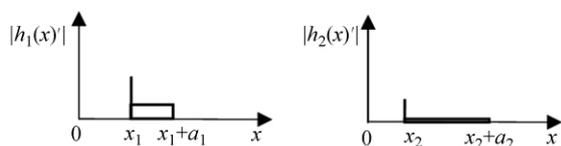
因为 $a_1 < a_2$ 且 $b_1 < b_2$, 所以 $P_{\text{Avg}1} > P_{\text{Avg}2}$ 。



(a) 离焦图像 1 二维坐标图 (b) 离焦图像 2 二维坐标图
(a) Two-dimensional plot of defocusing image 1 (b) Two-dimensional plot of defocusing image 2



(c) 离焦图像 1 的 x 方向投影 (d) 离焦图像 2 的 x 方向投影
(c) x -direction projection of defocusing image 1 (d) x -direction projection of defocusing image 2



(e) 离焦图像 1 的 x 方向投影一阶微分 1 范数 (f) 离焦图像 2 的 x 方向投影一阶微分 1 范数
(e) 1st norm of first order differential of defocusing image 1 x -direction projection (f) 1st norm of first order differential of defocusing image 2 x -direction projection

图 2 三角形目标 x 方向投影微分计算过程

Fig. 2 Calculating procedure of triangle target's x -direction differential projection

同理,对于暗背景下理想三角形目标的情况同样成立,其计算过程示意图如图 2 所示,计算得到的 $P_{\text{Avg}1}$ 与 $P_{\text{Avg}2}$ 表达式分别如式(9)和(10)所示。

$$P_{\text{Avg}1} = \sqrt{P_{\text{Avg}x1}^2 + P_{\text{Avg}y1}^2} = 4kI \sqrt{\left(\frac{1}{a_1 n}\right)^2 + \left(\frac{1}{b_1 m}\right)^2}, \quad (9)$$

$$P_{\text{Avg}2} = \sqrt{P_{\text{Avg}x2}^2 + P_{\text{Avg}y2}^2} = 4kI \sqrt{\left(\frac{1}{a_2 n}\right)^2 + \left(\frac{1}{b_2 m}\right)^2}, \quad (10)$$

因为 $a_1 < a_2$ 且 $b_1 < b_2$, 所以仍有 $P_{\text{Avg}1} > P_{\text{Avg}2}$ 。

同样,对于圆形目标的情况也有 $P_{\text{Avg}1} > P_{\text{Avg}2}$ 。

理想情况下,对于 $m \times n$ 大小的图像,任何目标都可以看成是以上基本图像的线性组合。因此,一般情况下,总有较接近准焦位置处的投影微分均方值 P_{Avg} 大于较远离准焦位置处的 P_{Avg} ,而且在准焦位置处 P_{Avg} 具有最大值。因此可以以此值作为自动对焦的清晰度值,该值的计算函数作为自动对焦的清晰度评价函数。

2.2 对焦窗口的选取与设定

自动对焦效果的优劣,除了清晰度评价函数的合理选择外,对焦窗口的合理选取也是一个关键因素。对于数字对焦,对焦算法运算量和参与运算的像素数成正比。对焦窗口选取越大,运算量越大,而且可能会导致目标背景参与运算,影响目标的对焦准确性。对焦窗口过小,可能会失去目标的感兴趣区域部分信息,影响对焦效果。本系统采用手动与自动选择对焦窗口相结合的方法。

当目标比较偏离视场中心区域,或对视场内某个特定区域比较感兴趣时,可以选择手动点击的方式进行目标位置和尺寸的选取。

当目标比较靠近视场中心位置时,根据 2.1 节阐述的边缘投影关系(如图 3 所示),使 $M \times N$ 大小的图像中心处的 $\frac{M}{2} \times \frac{N}{2}$ 区域作为对焦窗口的待选区域,分别在该区域的 x, y 方向寻找投影微分模的最大值 $\max|h(x)'|, \max|h(y)'|$, 然后分别以 $\max|h(x)'|, \max|h(y)'|$ 为中心的 $\frac{M}{4} \times \frac{N}{4}$ 区域作为对焦窗口。

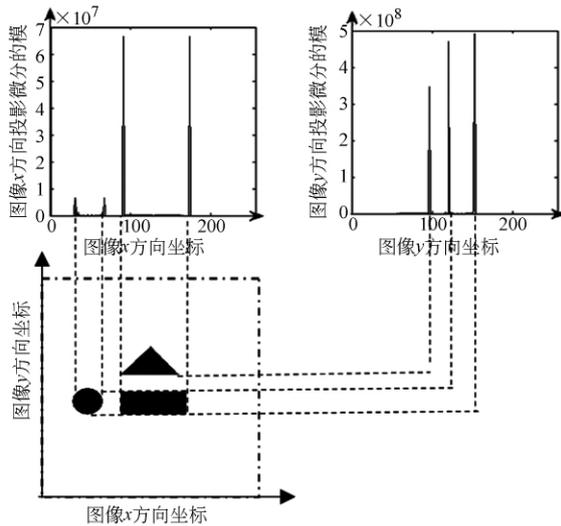


图 3 图像边缘与投影微分对应关系图

Fig. 3 Corresponding relations of target edges and differential projection

3 自动对焦算法实现

结合上述分析,基于投影微分法的自动对焦实现过程如下:

(1)对焦窗口的确定:在进行自动对焦前,首先根据观测需要,进行手动对焦窗口的选取或结合当前帧图像进行自动对焦窗口位置的计算。

(2)目标图像清晰度值计算:

(a)分别计算对焦窗口内图像在 x 和 y 方向的投影 $h(x)$ 和 $h(y)$;

(b)分别求取其一阶微分的 1 范数 $|h(x)'|$ 和 $|h(y)'|$;

(c)分别计算 $|h(x)'|$ 和 $|h(y)'|$ 的均值 P_{Avgx} 与 P_{Avgy} ;

(d)计算 P_{Avgx} 与 P_{Avgy} 的均方根 P_{Avg} ,即为该帧的清晰度评价。

(3)利用爬山搜索算法^[13],根据步骤(2)计算得到的当前探测器靶面位置处的图像清晰度评价,依次调整探测器靶面位置,重复步骤(2),直至寻找到靶面的准焦位置。

(4)自动对焦过程结束。

4 对焦试验与结果

理想的清晰度评价函数,应该具备良好的单峰性、无偏性、高灵敏度及良好的实时性^[14]。为

了验证基于投影微分法的清晰度评价函数特性,首先组装了一套自动调焦系统。整个系统硬件部分由主控计算机、MVC1450DAM-GE15 相机、探测器可移动的 光学镜筒、调焦辅助结构等组成。通过串口命令控制,对该算法的相关特性进行分析评价。然后,再将算法移植到本课题组自行研制的多光谱成像系统(本系统具有红、绿、蓝及近红外 4 个波段,且各波段可同时进行对焦与成像)中,对最终对焦效果进行测试。

4.1 单峰性、无偏性及灵敏度

目标选定后,通过主控计算机串口控制可见光调焦电机依次等间距扫描探测器靶面位置,相应得到靶面位置连续的 25 帧图像。为了便于比较,以当前较流行的 Brenner、能量梯度及 Roberts 梯度和等经典的清晰度评价函数^[14]以及与本文用途相似的文献^[5]中所提出的用于自动对焦的最大灰度梯度清晰度评价函数为参考,连同本文的投影微分评价函数,对每幅图像依次进行清晰度值计算,形成相应的清晰度评价曲线。将每种算法下的清晰度评价曲线归一化处理,绘制成二维曲线,如图 4 所示。

从图 4 可以看出,投影微分算法与其他经典算法相比,同样具有良好的单峰性和灵敏度。虽然在接近准焦位置处灵敏度略低于以上 3 种经典算法,但是投影微分算法清晰度曲线在准焦位置两侧呈现出较好的单调一致性,且在调焦电机控制的最小步长范围内能够准确区分准焦位置与邻近点的清晰度值的差异,同时其最大值与其他 3 个经典算法的最大值对应的位置相同,对应的图

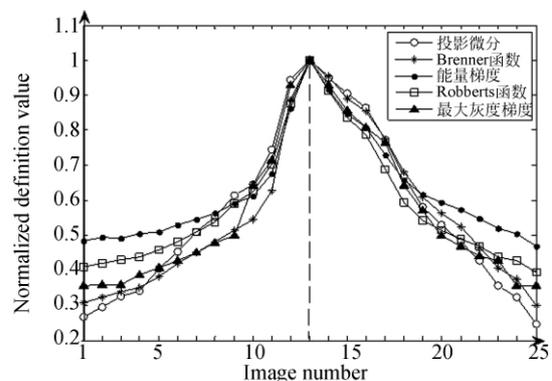


图 4 不同算法清晰度评价函数曲线图

Fig. 4 Normalized definition evaluation Curves of different algorithms

像均为该组图像中的最清晰图像。

因此,投影微分算法具有较好的单峰性、无偏性和较高的灵敏度,具备作为清晰度评价函数的基本特性。

4.2 实时性

算法简单,运算量小,可以大大降低系统的图像处理负担,提高系统的整体性能。投影微分算法与经典的清晰度评价函数相比,在相同评价效果的情况下具有更小的运算量。表 1 和表 2 分别为投影微分算法及以上 4 种算法(为防止数据溢出,前 3 种算法中平方和均改为绝对值和)的运算量估计和实际算法运行时间表。

其中,对于运算量估计,假定参与运算的图像大小为 $m \times n$ 。对于实际算法运行时间,则是在相同硬件环境下, m 和 n 取值均为 256 大小的情况下,以投影微分算法运行时间为基准,其他算法时间与其相除得到的相对运行时间值。

表 1 算法运算量估计

Tab. 1 Estimation of algorithm computation

算法名称	加/减法	乘/绝对值函数		其他运算
		除法	abs	
投影微分均值	$2mn+2(m+n)-3$	0	$m+n-2$	乘方 2 开方 1
Brenner	$2m(n-2)$	0	$m(n-2)$	无
能量梯度	$4(m-1)(n-1)$	0	$2(m-1)(n-1)$	无
Roberts 梯度和	$4(m-1)(n-1)$	0	$2(m-1)(n-1)$	无
最大灰度梯度	$\geq 3mn+8(m-2)(n-2)$	3	$mn+8(m-2)(n-2)$	Max 函数

表 2 相对运行时间

Tab. 2 Relative running time

算法名称	相对运行时间
投影微分均值	1.0
Brenner	1.5
能量梯度	3.0
Roberts 梯度和	2.9
最大灰度梯度	14.5

从表 2 可以看出,其运行时间基本与表 1 运算量估算值趋势基本吻合。此外,由表 2 可以看出,投影微分算法运行时间仅为 Brenner 算法的 0.67 倍,能量梯度的 0.33 倍,Roberts 梯度和算

法的 0.33 倍,最大灰度梯度法的 0.07 倍。因此,具有更小的运算量和更好的实时性。

4.3 运行效果

将投影微分算法移植到多光谱成像仪中,结合对焦窗口选取方法和爬山搜索算法,成功地实现了系统的准确对焦。对焦与离焦状态效果对比如图 5 所示。



(a) 离焦图像

(a) Defocusing image



(b) 对焦图像

(b) Focusing image

图 5 对焦前后效果图

Fig. 5 Renderings of defocusing and focusing

5 结 论

本文结合多光谱成像仪的成像特点和多种自动对焦方法的算法特性提出了一种基于投影微分算法作为自动调焦算法的清晰度评价函数,根据投影微分算法的边缘投影特性提出了对焦窗口的选择方法,结合经典的爬山搜索算法,最终实现了系统的准确对焦。实验表明:以投影微分算法作为清晰度评价函数,具备良好的单峰性、无偏性和较高的灵敏度;在同等条件下,投影算法运算时间仅为 Brenner 算法的 0.67 倍,能量梯度与 Ro-

berts 梯度和算法的 0.33 倍,具有更好的实时性,使整个系统的性能得到了进一步提高。此外,由于投影微分算法采用先积分再微分的方法,因此该算法还具有一定的抗噪能力;同时,运算过程中

没有阈值选取过程,进一步提高了算法的灵活性和适应性。该算法可作为小范围精确调焦算法与基于离焦深度法的大范围粗调焦结合使用,可进一步提高自动调焦性能。

参考文献:

- [1] 周毅刚,王勇. 基于倒谱分析的脉冲激光测距抗云烟干扰算法[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(9): 1677-1681.
ZHOU Y G, WANG Y. Anti-interference algorithm of clouds and smog for pulse laser range measurement based on cepstrum analysis[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(9): 1677-1681. (in Chinese)
- [2] 王欣,安志勇,杨瑞宁. 基于图像清晰度评价函数的 CCD 摄像机自动调焦技术研究[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2008, 31(1): 11-14.
WANG X, AN ZH Y, YANG R N. The research of CCD camera auto-focusing technology based on image definition criterion[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2008, 31(1): 11-14. (in Chinese)
- [3] 圣钱生,张桂英,吴有俊,等. 基于 DaVinci 的自动对焦算法研究及实现[J]. 通信技术, 2012, 1(45): 56-58.
SHENG Q SH, ZHANG G Y, WU Y J, et al.. Research on auto focus algorithm and realization based on davinci platform [J]. *Communications Technology*, 2012, 1(45): 56-58. (in Chinese)
- [4] 杨金峰,赵辉,刘伟文. 基于区域离散性的自动调焦算法[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(11): 2286-2289.
YANG J F, ZHAO H, LIU W W. Auto-focus algorithm based on dispersion of areas[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(11): 2286-2289.
- [5] 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.
LIANG M H, WU ZH Y, CHEN T. Auto-focusing adjustment of theodolites by largest the gradient method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(12): 3016-3021. (in Chinese)
- [6] 吴小翠,郭斯羽,易国. 基于边界梯度的自动调焦评价函数[J]. 计算机系统应用, 2010, 19(3): 45-48.
WU X C, GUO S Y, YI G. Evaluation function for automatic focusing based on boundary gradients [J]. *Computer Systems & Applications*, 2010, 19(3): 45-48. (in Chinese)
- [7] 罗钧,孙力,闵志胜. 变焦跟踪曲线在对焦应用中的应用[J]. 光学精密工程, 2011, 19(10): 2326-2332.
LUO J, SUN L, MIN ZH SH. Application of zoom tracking curves in focusing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(10): 2326-2332. (in Chinese)
- [8] 王昕. 含噪声图像的多聚焦融合算法[J]. 光学精密工程, 2011, 19(12): 2977-2984.
WANG X. Multi-focus fusion algorithm for noisy images [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(12): 2977-2984. (in Chinese)
- [9] 范媛媛,沈湘衡,桑英军. 基于对比度敏感度的无参考图像清晰度评价[J]. 光学精密工程, 2011, 19(10): 2485-2493.
FAN Y Y, SHEN X H, SANG Y J. No reference image sharpness assessment based on contrast sensitivity [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(10): 2485-2493. (in Chinese)
- [10] 陈立国,王明月,杨治亮,等. 显微视觉快速自动调焦方法及实验[J]. 光学精密工程, 2010, 18(6): 1361-1366.
CHEN L G, WANG M Y, YANG ZH L, et al.. Fast autofocus method for microscopic computer vision [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(6): 1361-1366. (in Chinese)
- [11] 冯精武,喻擎苍,芦宁,等. 调焦系统中数字图像清晰度评价函数的研究[J]. 机电工程, 2011, 28(3): 354-368.
FENG J W, YU Q C, LU N, et al.. Definition evaluation function of digital image in auto-focusing system [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2011, 28(3): 354-368. (in Chinese)
- [12] 黄艳,徐巧玉,叶东,等. 基于微分图像自相关的自动对焦法[J]. 光学学报, 2010, 30(12): 3435-3440.
HUANG Y, XU Q Y, YE D, et al.. Auto-focus method based on autocorrelation of derivative image [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(12): 3435-3440. (in Chinese)
- [13] 宫光勇,何文忠,高旭辉. 红外系统中自动调焦爬

山搜索算法的优化设计[J]. 红外与激光, 2007, 37(11):1213-1215.

GONG G Y, HE W Z, GAO X H. Optimized mountain climb-searching of auto-focusing in infrared imaging system [J]. *Laser & Infrared*, 2007, 37(11):1213-1215. (in Chinese)

[14] 金雪, 马卫红. 图像调焦过程的清晰度评价函数研究[J]. 光学仪器, 2012, 34(1):59-64.

JIN X, MA W H. Study on image definition evaluation function in auto-focusing process [J]. *Optical Instruments*, 2012, 34(1): 59-64. (in Chinese)

作者简介:



张艳超(1985—),女,吉林长春人,博士研究生,助理研究员,2007年、2009年于天津大学分别获得学士、硕士学位,主要从事数字图像处理及调焦控制方面的研究。E-mail: zhangyanchaomn@126.com



李也凡(1958—),男,吉林长春人,副研究员,1982年于东北师范大学获得学士学位,1998年于长春理工大学获得硕士学位,主要从事光电子和声光学方面的研究工作。E-mail: liyefan@yahoo.com

导师简介:



孙 强(1971—),男,博士,研究员,博士生导师,2003年于南开大学获得博士学位,2006年于长春光机所博士后出站,主要从事现代红外光学仪器方面的研究。E-mail: sunq@ciomp.an.cn



韩希珍(1984—),女,山东德州人,硕士,研究实习员,2007年于哈尔滨工业大学获得学士学位,2011年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,主要研究方向为数字图像处理。E-mail: xizhen_han@163.com



赵 建(1967—),女,吉林长春人,硕士,硕士生导师,副研究员,1991年于吉林工业大学获学士学位,2002年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位。主要从事数字图像处理,目标识别与跟踪,视频编解码等方面的研究。E-mail: zhaojian6789@126.com



白 晶(1977—),女,吉林长春人,硕士,中级工程师,2001年于吉林工学院获得学士学位,2012年于吉林大学获得硕士学位,主要从事计算机软件设计相关工作。E-mail: 271851672@qq.com

(版权所有 未经许可 不得转载)