

一种粗细结合的图像式靶场测量系统自动调焦算法

徐博泓 江和平

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 为解决传统靶场光测成像设备人工调焦效率低,受人为因素影响大,难以保证得到全程清晰目标图像的问题,提出了一种粗调与精调相结合的快速搜索调焦算法。该算法借助对图像清晰度评价来自动搜索到正焦面。使用计算速度较快的 Brenner 函数以大步长进行粗略调焦,然后使用对清晰度变化较敏感的 Tenengrad 函数实现小范围,小步距的精确调焦。使用 Mean Shift 跟踪算法,实验中搭建了硬件系统平台。通过对同一待测目标在相同位置的多次调焦实验,结果表明,该自动调焦算法具有较好的稳定性,能够满足实际靶场测量准确度与实时性的要求。

关键词 光学测量;图像处理;自动调焦;运动目标;评价函数

中图分类号 O439

OCIS 120.0120 100.0100

文献标识码 A

An Auto-Focus Algorithm Based on Fine and Rough Adjustment for Visual Optical Measurement Imaging System of Shooting Range

Xu Bohong Jiang Heping

(College of Opto-Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract In order to solve the problem of poor precision in observed target, measured by manual focusing in traditional shooting range optical measurement imaging device with low efficiency and indeterminacy, an algorithm of rapid auto-focusing combining roughly focusing and fine focusing is proposed. This method can automatically search the focal plane by evaluating the image definition. First, the Brenner function with high performance is used to roughly focusing. Tenengrad function with high sensitivity to the change of image definition is used to fine focusing in narrow range later. An algorithm for tracking based on mean shift is applied and hardware platform is set up in experiment. By the focusing experiments repeatedly to the same measuring target in the same place, the results of field test indicate that this method with high stability can satisfy the accuracy and velocity in actual measurement.

Key words optical measurement; image processing; auto-focusing; moving object; evaluation function

1 引言

在靶场测量等的光测图像系统中,获取清晰的图像是进行高精度测量的必要条件。传统靶场光测成像设备的调焦主要依靠人眼观察进行手动调焦,或根据目标距离信息进行自动或半自动调焦。而靶场试验中的待测目标(如飞行中的导弹、无人机等)的运动速度一般都较快,运动距离也较长。此时,成像设备的调焦系统并不能保证得到全程清晰的目标图像^[1]。根据这些相对模糊的图像进行测量、分析得到的结果,其精度和可靠性不可避免会受到影响。因此如何在目标运动速度较快,运动距离较长的情况下得到全程清晰的图像,成为一个需要迫切解决的问题。

本文提出的图像式靶场光测成像系统自动调焦算法就是在以 Mean Shift 跟踪算法准确跟踪运动目标

收稿日期: 2010-05-28; 收到修改稿日期: 2010-07-08

作者简介: 徐博泓(1986—),男,硕士研究生,主要从事精密光测处理技术方面的研究。E-mail: nudtxbh@163.com

导师简介: 于起峰(1958—),男,教授,博士生导师,主要从事基于图像的精密测量与运动测量、光测实验力学与摄像测量学等方面的研究。E-mail: yuqifeng@vip.sina.com

的前提下,选取合适的清晰度评价函数并采取粗调与精调相结合的快速搜索调焦算法,搭建了系统实验平台,其目标为开发出针对运动目标的图像式靶场光测成像系统自动调焦算法,使之对运动速度快、形状复杂的靶场目标能够进行准确调焦。

2 图像式自动调焦系统工作原理

图像式自动调焦系统原理^[2]如下:在自动调焦中,CCD相机不断地采集目标图像,经图像采集卡传送至计算机中,计算机对采集到的每一幅图像进行清晰度判断,如果达到最清晰就停止调焦,否则输出控制信号,通过解码控制器转化为电信号,驱动电机和传动装置,按一定的算法调整镜头,改变像距,使目标成像于最佳像面位置。

2.1 系统硬件结构设计

实验硬件系统由电动镜头、高分辨率工业摄像机、图像采集卡、解码控制器以及工控机等构成,考虑到系统能够对运动距离较远的目标进行自动调焦,且调焦过程中摄像机视场大小基本不变,电动镜头使用的是FUJINON公司的C22×17A-M41三可调电动变焦镜头,电动镜头的焦距变化范围为17~374 mm。相机为POINT GREY公司的GRAS-50S5M/C摄像机,相机分辨率最大为2448 pixel×2048 pixel,满分辨率帧率为15 frame/s。工控机型号为高性能低功耗的NICE3100P2型,其CPU为Intel PM1.8 GHz,工作温度、接口等均满足系统的需求。实验系统硬件连接图如图1所示。

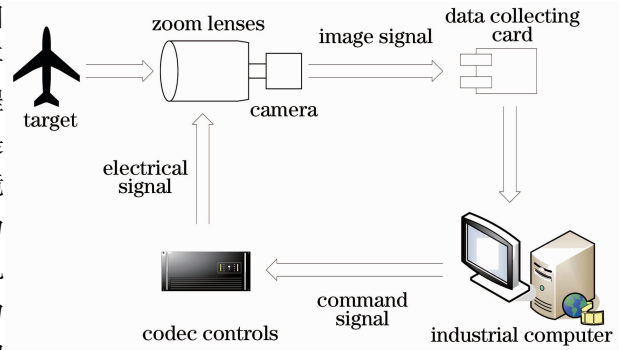


图1 系统硬件连接图

Fig.1 Coupling of the system hardware

2.2 软件功能设计

图像式自动调焦软件的实现依赖于两个核心算法:图像清晰度评价函数和自动调焦搜索算法。前者对CCD相机采集到的图像进行清晰度评价,其评价价值反映了图像的清晰程度,评价价值越大,说明图像高频分量越多,也就越清晰,是进行自动调焦的数值依据。后者根据清晰度函数评价价值,向解码器发出控制信号,驱动步进电机带动镜头前后运动,在最短时间内找到最佳聚焦平面。

3 图像清晰度评价函数的选择

在靶场测量的光测图像系统中,其焦距大多为固定式或人工调节式,而待测的运动目标(如飞行中的导弹,无人机等)运动速度较快,在光测图像系统的视场中,运动目标由远及近或由近及远运动,其成像大小必定发生较快的变化,由此导致评价区域内图像也会发生变化,因此,能否选择合适的图像清晰度评价函数是运动目标成像清晰与否的关键因素。

目前国内外提出的图像清晰度评价函数大致可以归结为灰度梯度函数、信息学函数、统计学函数和频域函数几类^[3],这里选择了灰度梯度类清晰度评价函数中使用较多的几种清晰度函数进行实验。

Brenner 函数:

$$F(k) = \sum_x \sum_y [g(x+k, y) - g(x, y)]^2, \quad (1)$$

基于 Sobel 梯度的 Tenengrad 函数:

$$F = \sum_x \sum_y [S(x, y)]^2, \quad (2)$$

式中 $S(x, y) = \sqrt{G_x^2(x, y) + G_y^2(x, y)}$, $S(x, y) > T$. Roberts 梯度和函数:

$$F(k) = \sum_x \sum_y \{ |g(x, y) - g(x+k, y+k)| + |g(x+k, y) - g(x, y+k)| \}, \quad (3)$$

梯度向量(Gradient vector)模方函数:

$$F(k) = \sum_x \sum_y \{ [g(x+k, y) - g(x, y)]^2 + [g(x, y+k) - g(x, y)]^2 \}^{1/2}, \quad (4)$$

绝对方差 (Sheer covariance) 函数:

$$F = \sum_x \sum_y \{ |g(x, y) - g(x, y+1)| + |g(x, y) - g(x+1, y)| \}, \quad (5)$$

式中 $|g(x, y) - g(x, y+1)| > T$, $|g(x, y) - g(x+1, y)| > T$ 。

为了尽量减少背景光对目标成像的干扰,使用由红外发光二极管(LED)密排焊接的十字型合作标志作为实验拍摄目标,如图2所示。摄像机距离目标100 m,由远及近拍摄6幅图像,如图3所示,理论上,在焦距不变的情况下,目标由远及近,图像必定会经历一个由模糊到清晰再到模糊的过程。分别使用以上评价函数对图像进行评价,给出处理结果的归一化曲线和处理时间分别如图4和表1所示。图4中横坐标为采集的图像序列号,纵坐标为归一化函数值。通过对最终实验结果进行对比分析,选择了合适的评价函数。

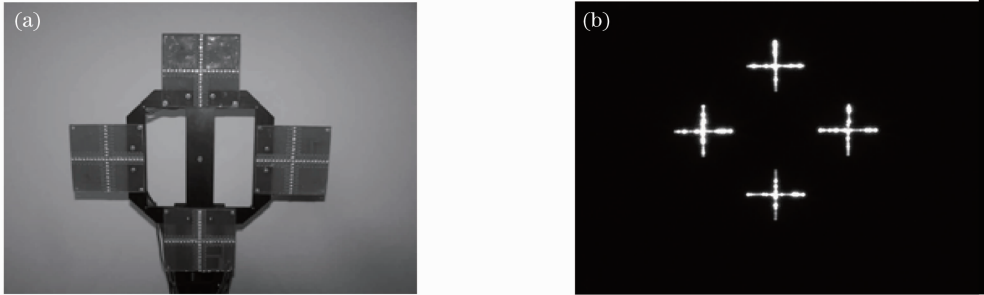


图2 (a)十字丝红外合作标志及其(b)发光效果

Fig. 2 (a) Infrared cooperative cross marker and (b) its luminous effect

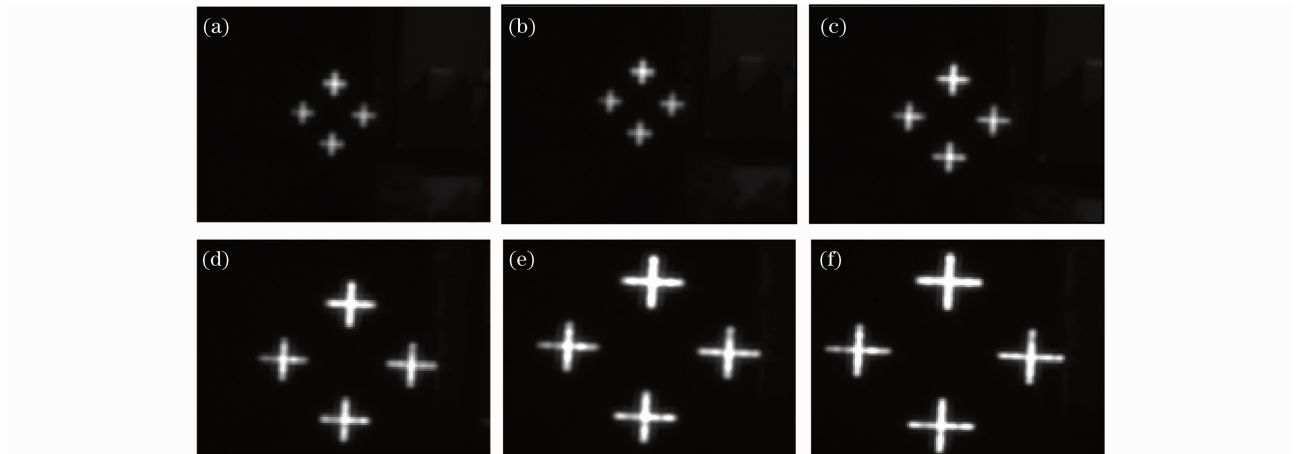


图3 由远及近红外合作标志图像

Fig. 3 Images of the infrared cooperative marker from far to near

表1 各评价函数平均耗时

Table 1 Average consuming time of evaluation function

Evaluation function	Consuming time /ms
Brenner	18
Tenengrad	31
Roberts	33
Gradient vector	40
Sheer covariance	35

由图4中的曲线对比分析如下:

1)单峰性。上述清晰度评价函数中,Brenner 函数,Tenengrad 函数具有平滑的形状,且只有一个极值点,符合要求,可以用于自动调焦。而 Sheer covariance 函数的曲线平滑性相对较差,出现剧烈波动,存在多个极值点,容易产生误调。而 Roberts 梯度和函数,Gradient vector 模方函数则不能正确反映图像清晰度变

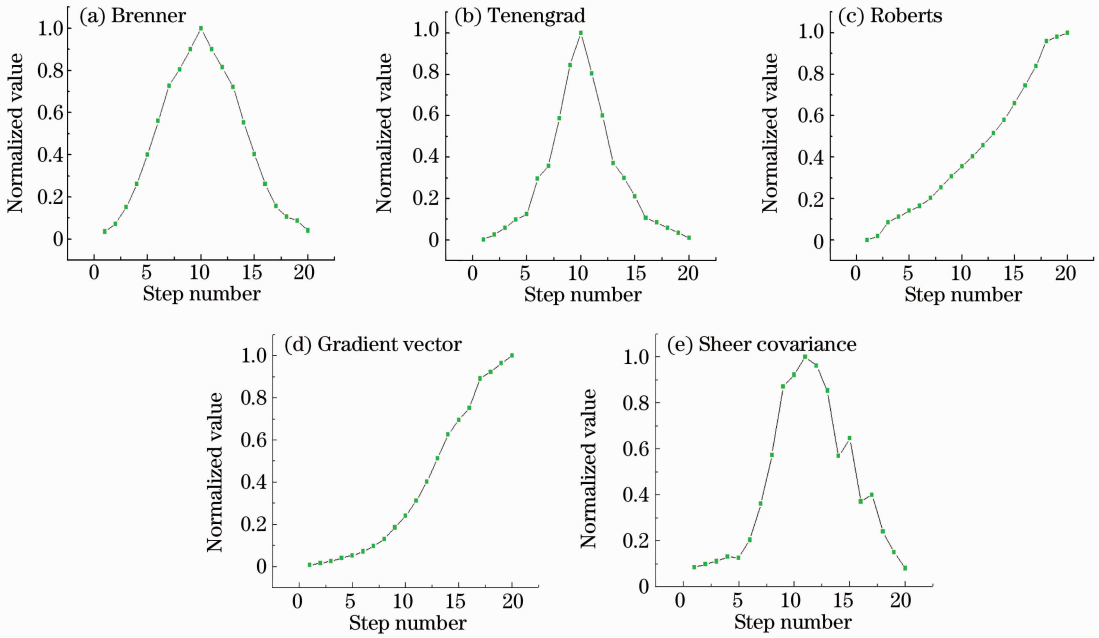


图4 归一化评价函数分布图

Fig. 4 Distribution of normalized evaluation functions

化。究其原因,由 Roberts 梯度和函数和 Gradient vector 模方函数(3),(4)式可知,其实质是以某一点为中心的连续梯度的近似,图像由远及近,而 K 为固定值,不能随图像大小变化而改变,因此在图像逐渐变大时产生误评,失去评价意义。

2)一致性。Brenner 函数的峰值点图像帧数为第 10 帧, Tenengrad 函数的峰值点图像帧数为第 10 帧,虽然 Sheer covariance 函数的曲线平滑性相对较差,出现剧烈波动,但其峰值图像帧数为第 11 帧,调焦函数的焦点位置较为一致。

3)灵敏度。Tenengrad 函数峰顶宽度响度较窄,灵敏度高,但调焦范围较小,因此适合于小范围精确调焦。Brenner 函数的灵敏度居中,又有一定的调焦范围,是较理想的自动调焦评价函数。

4)时效性。评价区域大小为 $800 \text{ pixel} \times 800 \text{ pixel}$,表 1 给出了各评价函数对红外合作标志图像序列的评价处理平均耗时情况。从表中可以看出, Brenner 函数用时最少。

通过针对由远及近拍摄的一组红外合作标志的实验,分别从评价函数的单峰性,一致性,灵敏度以及时效性 4 个方面综合对比分析后,可以看出 Brenner 函数和 Tenengrad 函数在所对比的几种灰度梯度类图像清晰度评价函数中性能是较优的,所以本文采用 Brenner 函数和 Tenengrad 函数作为图像清晰度评价函数。

4 调焦搜索控制策略

在图像式自动调焦系统中,自动调焦的过程就是求取图像清晰度函数最大值的过程,广泛采用的是爬山搜索法^[4]来寻找正焦面,其原理如图 5 所示。图 5 中, x 轴表示聚焦镜位置, y 轴表示调焦判断函数值。箭头表示步进电机带动聚焦镜头前进的方向, 1 和 2 表示调焦判断函数值出现减小的地方, 3 表示镜头最终停止于最佳调焦点。

在实际应用中,调焦评价函数的曲线可能出现较大波动,具有多个极值点,当电机遇到一个局部极值时就会错误地认为已经找到准焦点而改变镜头的运动方向或者停止继续对焦,从而无法找到准确的对焦点。并且由于爬山法其步长的限制,当电动镜头移动到正焦面位置附

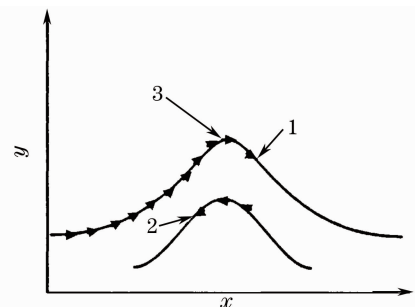


图5 传统爬山搜索法示意图

Fig. 5 Schematic of traditional mountain climbing servo

近时,会在正焦面左右来回震荡,无法精确定位于正焦面,此时成像清晰度不仅没有提高,反而会浪费大量调焦时间,影响调焦速度。

针对上述问题,提出了很多改进方法,如基于模糊控制的调焦搜索算法^[5]、基于边缘点计数的调焦搜索算法;采用斐波纳契法调焦评价函数的最大值、自适应步长法^[6]等,在一定程度上改善了调焦速度和精度,但经实验表明都存在通用性较差的缺点。

通过上述调焦评价函数的分析,本文提出一种新的大范围自动调焦快速搜索算法。即先用 Brenner 评价函数以较大步长快速搜索到正焦面附近,实现大范围粗调焦。再改用 Tenengrad 函数以小步长搜索到正焦面^[7],实现小范围精调焦。粗调函数以大步长搜索,不仅速度快,而且由于采用大步长,3 幅图像相互比较的方法,在一定程度上可以大大减少噪声的影响,减少局部误判的情况出现。细调函数在正焦面附近灵敏度较高,因此这种方法具有效率高、抗干扰性强的特点。

粗调焦的初始步距的选取太大或太小都会影响最终调焦的精度与效率,一半约为景深的三分之一,测量系统每运动一个步长就采集一幅图像,在同一方向上连续采集 3 幅图像,用粗调函数 Brenner 函数进行评价。设得到 3 个位置的清晰度值为: K_0, K_1, K_2 。如果, $K_0 < K_1 < K_2$, 说明正在靠近正焦面,继续往前采集;如果 $K_0 > K_1 > K_2$, 说明调焦方向相反,应朝反方向调焦,且每次反向调整时精调步长缩减为原先的 70%;如果出现 $K_1 < K_0, K_1 < K_2$, 则说明遇到局部噪声干扰,继续往前采集进行判断;当出现 $K_1 > K_0, K_1 < K_2$ 的情况时,说明已经经过了正焦面,此时采用小步距回调,进入精调阶段,使用 Tenengrad 函数进行精调,精调步长初始值约为此时粗调步长的 20%,重复上述过程,且每次反向调整时精调步长缩减为原先的 70%,一直到出现 $K_1 > K_0, K_1 > K_2$ 时为止。调焦流程如图 6 所示。

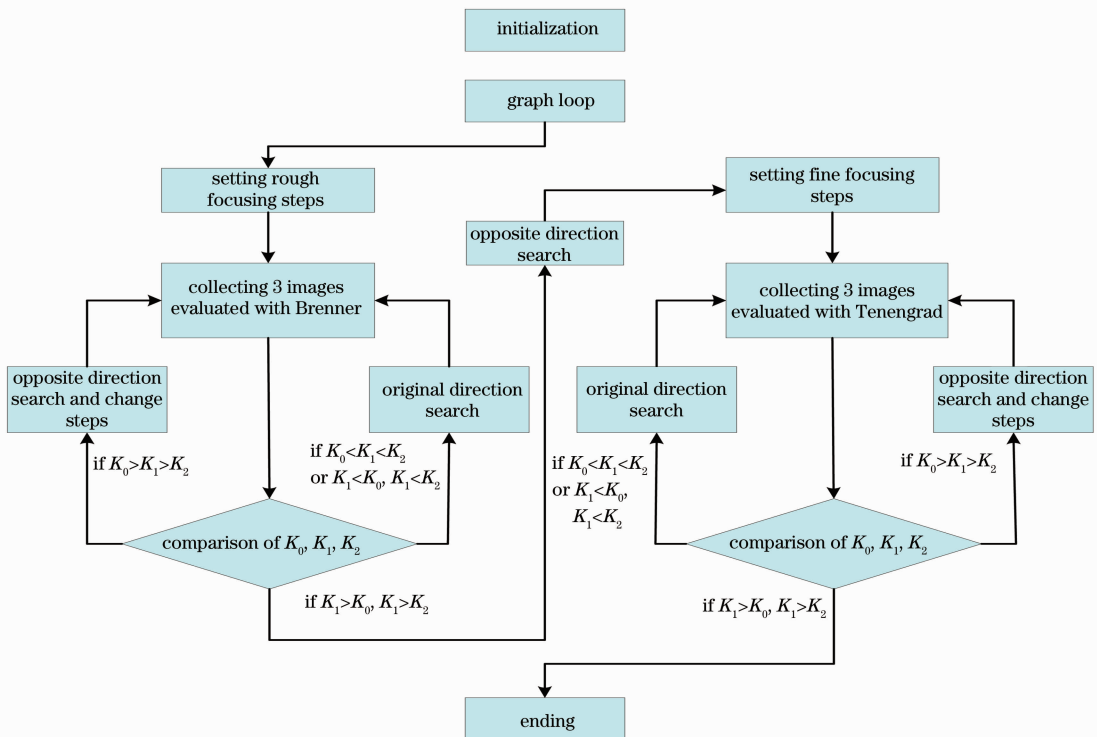


图 6 调焦流程图

Fig. 6 Flow chart of auto focusing

5 可行性分析

实际靶场光测实验中,测量设备距离待测目标较远,一般为 2~3 km,根据景深定义,目标在景深范围内成像基本保持清晰。应用几何光学原理,最近成像清晰点的物距 l_B 、最远成像清晰点的物距 l_C 和景深 H 的表达式分别为

$$l_B = \frac{fdl}{df + ls - fs}, \quad (6)$$

$$l_C = \frac{fdl}{df - ls + fs}, \quad (7)$$

$$H = l_C - l_B = \frac{2fdls(l-f)}{d^2f^2 - (l-f)^2s^2}, \quad (8)$$

$$d = f/F, \quad (9)$$

式中 f 为镜头焦距, d 为通光孔直径, l 为物距, s 为胶片上的容许分散圈直径, F 为拍摄时的光圈值。根据实验镜头参数, 参照上述公式可得出在实际靶场光测中调焦设备景深为 150 m。此调焦方法图像清晰度评价时间大约为 40 ms, 调焦搜索时间约为 400 ms, 因此完成一次调焦搜索所需时间大约为 450 ms。即对于运动速度在 330 m/s 以下的待测目标可实现实时调焦。通常靶场光测待测目标运动速度为 200~300 m/s, 因此本文的调焦方法可满足实际靶场光测要求。

6 调焦实验结果分析

待测目标为模型飞机, 为减少背景干扰以及逼近真实, 将模型飞机置于背景为天空图案的遮挡板前方, 并将实验目标固定于推车上, 人工推动小车使模型飞机快速移动来模拟靶场光测中由远及近的目标, 如图 7 所示。

Mean Shift 跟踪算法可靠性^[8]实验条件: 室外, 天气晴朗, 能见度较好, 气温 22 °C 左右, 北风 3~4 级, 时间为上午 10 时左右; 作为跟踪目标的模型飞机距离镜头约 100 m。实验过程: 摄像机保持相对静止, 人工推动小车, 以 3 m/s 的速度横向自右向左快速移动, 使用 Mean Shift 算法^[9]跟踪目标, 为方便观测跟踪效果, 将跟踪目标区域用绿色矩形框标出, 相机连续拍摄 150 帧图像, 跟踪情况如图 8 所示。由图 8 可以看出, 距离镜头 100 m 横向推动小车快速运动时, 算法可准确跟踪飞机模型, 取得较好的跟踪效果。

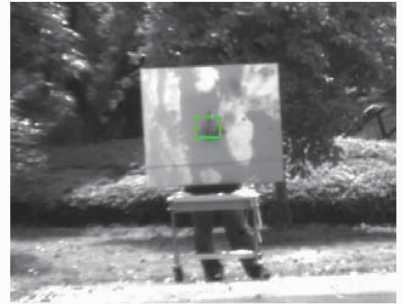


图 7 实验待测目标

Fig. 7 Measuring target



图 8 Mean Shift 跟踪算法图像

Fig. 8 Images of Mean Shift tracking algorithm

自动调焦验证实验条件: 室外, 天气晴朗, 能见度较好, 气温 22 °C 左右, 北风 3~4 级, 时间为上午 11 时左右; 作为跟踪目标的模型飞机距离镜头约 200 m。实验过程: 摄像机保持相对静止, 人工推动小车, 使待测目标由远及近以 4 m/s 的速度沿光轴方向快速运动。粗调焦步长设为 100 mm, 精调焦步长设为 10 mm, 评

价区域大小为 $100 \text{ pixel} \times 100 \text{ pixel}$, 为达到对比效果, 对于相同目标, 在相同位置, 分别采集跟踪调焦和跟踪不调焦两组图像, 如图 9, 10 所示, 可以清楚看出, 两者对比效果明显。

为进一步验证调焦算法的精度及可靠性, 分别于 200, 150, 100 和 50 m 位置重复采集 4 组调焦图像, 并用 Brenner 函数进行评价得到归一化的函数评价, 并计算其均值与标准差, 结果如表 2 所示。由表 2 可知, 4 组数据中标准差最大为 0.0092, 最小为 0.0052, 且包括了光照等外界环境变化所引起的误差, 证明此算法的可重复性和稳定性较好。

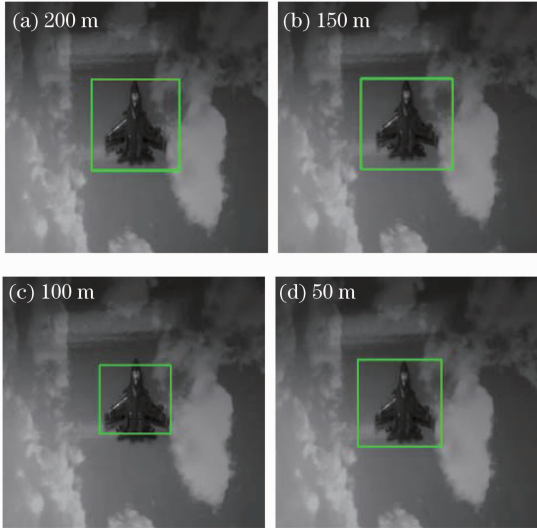


图 9 跟踪调焦图像

Fig. 9 Tracking images with focusing

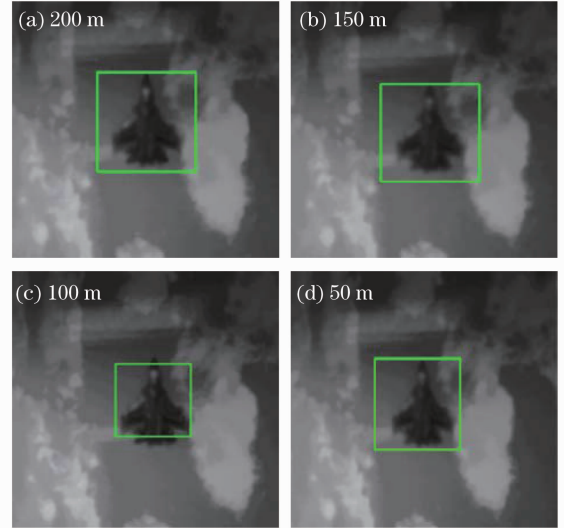


图 10 跟踪不调焦图像

Fig. 10 Tracking images without focusing

表 2 不同图像的调焦结果

Table 2 Focusing results of various images

Position /m	Number of measurement				Average value	Standard deviation
	1	2	3	4		
200	0.9832	1.000	0.9842	0.9854	0.9882	0.0079
150	0.9801	0.9923	1.0000	0.9878	0.9905	0.0083
100	1.0000	0.9812	0.9801	0.9854	0.9866	0.0092
50	0.9873	1.0000	0.9221	0.9945	0.9934	0.0052

7 结 论

针对靶场光测中运动目标的特点, 通过实验选择了有效的评价函数并提出了粗调与精调相结合的快速搜索调焦算法, 搭建了实验平台。从采集到的目标图像来看, 在目标由远及近快速运动过程中, 都能获得清晰的图像, 与背景图案有较高的对比度, 且与不调焦时所得图像对比明显。说明此自动调焦算法实时性及稳定性较好, 能够满足实际靶场光测精度及速度的要求。

参 考 文 献

- 1 Yu Qifeng, Shang Yang. Videometrics: Principles and Researches[M]. Beijing: Science Press, 2009. 195~222
于起峰, 尚 洋. 摄像测量原理与应用研究[M]. 北京: 科学出版社, 2009. 195~222
- 2 Bao Getang. Research on Fast Auto Focusing Technology in Vision Inspection System[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2005. 3~10
鲍歌堂. 视觉检测系统中快速自动调焦技术的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2005. 3~10
- 3 Subbarao M., Tyan Jenn-Kwei. Selection the optimal focus measure for autofocusing and depth-from-focus[J]. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1998, **20**(8): 864~870
- 4 Xing Changyin. Video Auto Dimming and Focusing Based on The Image Information [D]. Changchun: Changchun

- University of Science and Technology, 2007. 35~40
- 行长印. 基于图像信息的自动视频调光调焦[D]. 长春: 长春理工大学, 2007. 35~40
- 5 Qu Yufu. Study of Visual Aiming Gauge Head[D]. Haerbin: Haerbin Institute of Technology, 2001. 33~36
- 屈玉福. 视觉瞄准侧头的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2001. 33~36
- 6 He Jie, Zhen Zhouong, Liang Hongzhi. Modified fast climbing search auto-focus algorithm with adaptive step size searching technique for digital camera[J]. *IEEE Trans. on Consumer Electronics*, 2003, **49**(2): 257~262
- 7 Yang Zaihua, Li Yuhe, Li Qingxiang *et al.*. Visual feedback autofocusing method combining fine and rough adjustment[J]. *Computer Engineering and Design*, 2005, **26**(9): 2271~2273
- 8 Comaniciu D., Ramesh V., Meet P. Kernel-based object tracking[J]. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2003, **25**(5): 564~575
- 9 Y. Cheng. Mean shift, mode seeking, and clustering[J]. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Maching Intelligence*, 1995, **7**(8): 790~799