

文章编号 1004-924X(2009)12-3016-06

采用最大灰度梯度法实现经纬仪自动调焦控制

梁敏华^{1,2}, 吴志勇¹, 陈 涛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 研究生院, 北京 100039)

摘要:提出了一种基于最大灰度梯度的经纬仪自动对焦方法,以 CMOS 相机为图像传感器,用计算机进行数据处理并控制驱动电路调整相机镜头的位置来实现自动调焦。首先,选择包含主体成像目标的最小区域作为对焦选择区域,不仅有效地节省了系统处理图像的时间,而且极大地减小了复杂背景对精确调焦的干扰,提高了调焦准确率;其次,求出边缘上任意可能梯度方向的梯度,比较后得到每个边缘点的最大梯度;最后,采用最大灰度梯度作为系统的自动聚焦判据。实验结果表明,系统的调焦分辨率为 0.01~0.02 mm,能够满足经纬仪第一像面焦深的调焦要求。该调焦算法具有单峰性强、无偏性好、灵敏度高、稳定性好以及可实时性操作等特点。

关键词:光电经纬仪;自动聚焦;评价函数;灰度梯度;对焦窗口

中图分类号:V556.5 **文献标识码:**A

Auto-focusing adjustment of theodolites by largest the gradient method

LIANG Min-hua^{1,2}, WU Zhi-yong¹, CHEN Tao¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China*; 2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 10039, China*)

Abstract: An auto-focusing method used for the accurate auto-focusing of theodolites is proposed based on the largest gray gradient method. By making use the CMOS as an image sensor, and a computer for data processing, the system can adjust the camera's lens position to realize auto focusing by controlling a driving circuit. Firstly, the least focusing range including a principal object is controlled by the window selection, which not only reduces the load for data processing, but also reduces the influence of complex background on the accurate focusing and enhances the precision of auto-focusing. Then the edge gradients in all possible directions are calculated, and all of the possible edge gradients are compared to choose the largest gradient as the criterion of auto-focusing system. The experimental result demonstrates that the system can be characterized by its good unbiased characteristics, strong single peak features, high sensitivity and good stability, and the measuring precision of the system meets the requirements of the first focus-depth of the theodolite, for it has the focusing resolutions of 0.01-0.02 m.

收稿日期:2008-11-13;修订日期:2008-12-23.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2006AA703104)

Key words: opto-electronic theodolite; auto-focusing; evaluation function; gray gradient; focus windows

1 引言

光电经纬仪需要在不同的环境下跟踪测量导弹、靶机等移动目标的参数,目标和相机之间的距离常常发生较大的变化。为了获得清晰的图像,必须实时调整相机(成像镜组)的位置或者改变光学系统的焦距使目标成像在靶面上。目前经纬仪采用的自动调焦方法主要有两种。一种是利用激光测距仪或者雷达测定目标距离,采用温度传感器测量经纬仪的环境温度,通过牛顿公式计算出相机的准焦位置,驱动步进电机改变像距或者焦距进行自动调焦;另一种是利用像偏移法自动调焦,调整一对放置在光路中的准直镜,移动其中一块的位置来改变空间光程,比较两路信号的强弱求得自动对焦的位置。近年来,随着数字技术的飞速发展,数字自动调焦技术作为计算机视觉、成像系统和各种精密仪器中的关键技术之一,在自动化、高精度、高稳定性等方面都取得了很大进展,其应用范围也在不断扩大。目前,许多学者在图像法自动调焦领域做了大量的研究工作^[1-8]。该方法在摄像机、照相机、显微镜等精密仪器行业已经被广泛利用,但由于经纬仪的测量目标特性比较复杂、目标在视场中的位置不固定,该方法在经纬仪中的应用尚未实现。针对现有自动调焦技术仍存在的不足,特别是在如何选择调焦评价函数和调焦评价区域方面还有诸多问题有待解决,本文基于经纬仪工作环境和传感器多样性的特点研究了数字成像自动调焦算法,提出了包含成像主体目标的窗口选择法以及基于最大灰度梯度的聚焦评价函数。

2 调焦区域设计

选择图像中哪些区域作为对焦考虑范围是对焦成败的一个重要问题^[2],关系到自动调焦的准确性、稳定性以及实时性。进行对焦区域选择主要有 3 个原因:(1)调焦评价函数的运算量基本上与图像像素数量成正比,也就是说分辨率越高的图像在进行调焦评价时需要的时间越多,为了提

高调焦速度,满足调焦实时性的要求,必须减少参加运算的图像像素的数量;(2)如果对整幅图像运用调焦评价函数,图像中背景或者视场中的其它物体会对评价结果产生负面影响,特别是图像中存在不同距离的目标时,很容易因为多聚焦导致图像中的成像主目标不能准确对焦;(3)窗口大小的选取至关重要,如果窗口过大,有可能会造成窗口内感兴趣的物体所占的区域远远小于其周围背景所占的区域,这样可能会对周围背景进行聚焦,而感兴趣的物体却可能处于离焦状态。如果窗口过小,则可能会丢失部分感兴趣目标的区域而无法准确调焦。传统的调焦区域选择法主要有:选取整幅图像的中心区域作为自动调焦对象的中央选择法、选取整幅图像中有代表性的多个区域的多区域选择法和通过操作者主观选取调焦区域的人机交互法等。

这些方法虽然可以节省大量的计算时间,减小图像中背景以及其它成像目标的部分干扰,在一些领域具有实用价值,但由于在这些方法中调焦区域固定不变,因此其通用性受到了限制。在大型光电测量系统中,被测对象在视场中的位置是不确定的,因此在经纬仪上采用传统窗口选择方法很难完成自动调焦功能。本文采用以包含成像主体目标的最小窗口为调焦区域,有效地解决了调焦速度和调焦精度之间的矛盾。

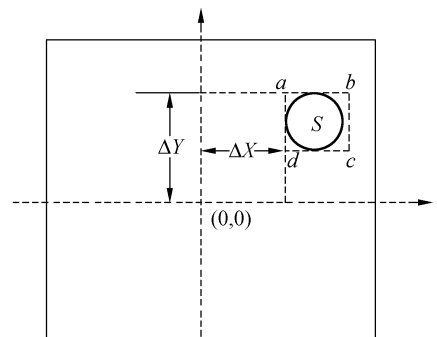


图 1 经纬仪图像窗口

Fig. 1 Image window of theodolite

对图 1 所示的经纬仪成像视场,通过全视场搜索,能够得到视场内所有的目标,当视场内存在多目标时,应以靠近视场中心的目标或人机交互

选择的主体目标。假设视场中有一不规则形状的主体目标 S , 把包含目标 S 的最小矩形区域 $abcd$ 定为调焦区域, a 点在图像中的位置为 (W_x, W_y) , 其脱靶量为 ΔX 和 ΔY , 此时编码器的值为 A, E , 通过得到两帧 a 点的位置后, 就可以依据式(1)、(2)推断出第三帧时 a 点的大致位置:

$$W_x(i+1) = W_{x_i} + \left(\frac{\Delta x_i - \Delta x_{i-1}}{A_i - A_{i-1}} \right) \times \lambda, \quad (1)$$

$$W_y(i+1) = W_{y_i} + \left(\frac{\Delta y_i - \Delta y_{i-1}}{E_i - E_{i-1}} \right) \times \lambda, \quad (2)$$

式中 (W_{x_i}, W_{y_i}) 为第 i 帧时 a 点在图像中的位置, Δx_i 和 Δy_i 分别为第 i 帧时 a 点的方位和高低脱靶量, A_i 和 E_i 分别为第 i 帧时的编码器值, λ 为位置调整系数, 一般取 $0.1 \sim 1.0$, 这里, λ 设置为 0.25 。当 $A_i - A_{i-1}$ 为 0 时, $W_x(i+1) = W_{x_i}$, 当 $E_i - E_{i-1}$ 为 0 时, $W_y(i+1) = W_{y_i}$ 。

因此只要能够取得连续两帧的目标位置, 依据式(1)和式(2)就可以得到下一帧的调焦区域, 最大程度地减小了调焦的搜索区域。为了验证不同调焦区域对调焦效果的影响, 对图2所示的序



(a) 对焦图像

(a) Focusing image



(b) 离焦图像

(b) Defocusing image

图 2 经纬仪 CMOUS 相机图像

Fig. 2 Images obtained by CMOUS camera in theodolite

列图像分别采用中央选择法, 多区域选择法以及本文设计的主体目标区域选择法, 采用最大灰度梯度评价函数进行自动调焦, 得到如图 3 所示的规一化调焦评价函数曲线图。

从图 3 中可以看出, 相对其它两个调焦区域, 本文提出的调焦区域不但在聚焦点附近保持了很高的灵敏度, 而且单调性较好, 没有出现局部极值, 这对提高调焦精度以及调焦的实时性都十分有利。

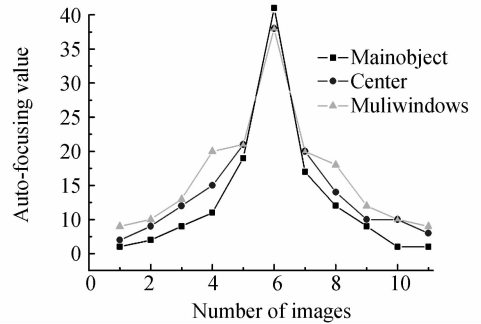


图 3 不同对焦窗口下的调焦函数值

Fig. 3 Auto-focusing values of different windows

3 基于最大灰度梯度的自动调焦算法

3.1 最大灰度梯度算法

在序列图像中, 图像的离焦量越小, 图像边缘越锋利, 就具有更大的图像梯度值。基于梯度变化的自动聚焦评价函数很多, 经常被使用的有 Tenengrad 函数、能量梯度函数、Brenner 函数、平方梯度函数、绝对梯度函数、Roberts 梯度函数、Sobel 梯度函数、绝对方差函数、梯度向量模方函数、Laplacian 函数、Variance 函数、灰度变化率和函数^[5]等。经过研究发现, 这些基于梯度的调焦评价函数在实际应用中存在一些缺陷。首先, 这些函数仅仅计算了图像的某些固定方向的梯度, 而实际的梯度方向可能是水平方向、垂直方向、正 45° 方向、负 45° 方向中的一种, 并且在不同的边缘点上梯度方向也不尽相同。其次, 在图像中存在各种噪声点, 梯度评价函数很容易受到其影响。本文提出的基于最大灰度梯度的自动评价函数不仅采用最大梯度作为评价函数的计算对象, 而且充分考虑到八相邻像素的相关性, 有效地解决了上述问题。

对于图像中的一个像素 $F(x, y)$, 将其周围的八相邻像素考虑进来, 各像素的具体位置关系如图 4 所示。

$$\begin{bmatrix} f(x-1, y-1) & f(x-1, y) & f(x-1, y+1) \\ f(x, y-1) & f(x, y) & f(x, y+1) \\ f(x+1, y-1) & f(x+1, y) & f(x+1, y+1) \end{bmatrix}$$

图 4 8 相邻像素位置

Fig. 4 8-neighborhood pixel position

对于每个具有八相邻像素的点可以根据式 (3)~(10) 求出 8 个梯度值, 分别代表其与周围像素的梯度, 并根据式 (11) 求出该像素的最大灰度梯度。

$$T_1 = |f_{(x-1, y-1)} - f_{(x, y)}|, \quad (3)$$

$$T_2 = |f_{(x-1, y)} - f_{(x, y)}|, \quad (4)$$

$$T_3 = |f_{(x-1, y+1)} - f_{(x, y)}|, \quad (5)$$

$$T_4 = |f_{(x, y-1)} - f_{(x, y)}|, \quad (6)$$

$$T_5 = |f_{(x, y+1)} - f_{(x, y)}|, \quad (7)$$

$$T_6 = |f_{(x+1, y-1)} - f_{(x, y)}|, \quad (8)$$

$$T_7 = |f_{(x+1, y)} - f_{(x, y)}|, \quad (9)$$

$$T_8 = |f_{(x+1, y+1)} - f_{(x, y)}|, \quad (10)$$

$$\max(T) = \max(T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6, T_7, T_8), \quad (11)$$

3.2 限制条件的使用

不仅目标和背景相邻的像素能够产生灰度梯度, 而且背景像素之间以及目标图像之间也有可能产生灰度梯度, 如果把它们之间的灰度梯度也计算在内的话, 调焦评价函数很容易受到背景和特性影响, 因此本文设计了一个灰度梯度阈值, 只有超过这个阈值的灰度梯度才被采用。

首先按照式 (12), 利用灰度平均法求出图像的平均灰度 μ 的值。

$$\mu = \frac{1}{M \times N} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{M-1} f(x, y), \quad (12)$$

式中, M 、 N 分别为图像的行数和列数。按照式 (13) 求出灰度梯度阈值 T 。

$$T = \frac{\lambda}{M \times N} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{M-1} |f(x, y) - \mu|, \quad (13)$$

式中 λ 为梯度阈值系数, 一般取值为 $0.4 \sim 0.8$, λ 取值过大会去除真实目标梯度, λ 取值过小则不能去除背景梯度以及目标梯度, 本文 λ 取值为 0.55 。

当图像中存在噪声点的时候, 很容易在此噪声点的位置取得最大梯度。按照图像边缘分割原理可以认为如果一个像素是图像边缘, 那么它的八相邻像素至少还有两个边缘像素, 因此如果某个像素的八相邻像素只有一个或者没有像素能取得最大灰度, 那么这个像素点的最大梯度不予采用。

3.3 图像最大灰度梯度计算

统计满足条件的最大灰度梯度以及取得最大灰度梯度的像素个数, 根据式 (14) 求得图像的最大灰度梯度平均值作为调焦评价依据。

$$\bar{T} = \frac{\sum_{n=1}^N T_n}{N}. \quad (14)$$

其中, \bar{T} 为图像的最大灰度梯度平均值, N 为图像中取得最大灰度梯度的像素个数。

4 调焦试验及结果

为了评估本文提出的调焦函数性能, 组装了一套自动调焦系统。整个系统硬件部分由控制计算机、MS55K 相机、变焦镜头、数据通讯卡、电机驱动卡、步进电机等几部分组成。

在自动调焦系统中, 首先由控制计算机通过千兆网卡从相机中采集序列图像放置到内存中, 分别用本文提出的灰度梯度函数和 tenengrad、roberts、梯度平方函数、绝对梯度函数等调焦评价函数进行处理, 图 5 为不同调焦函数的规一化数据。

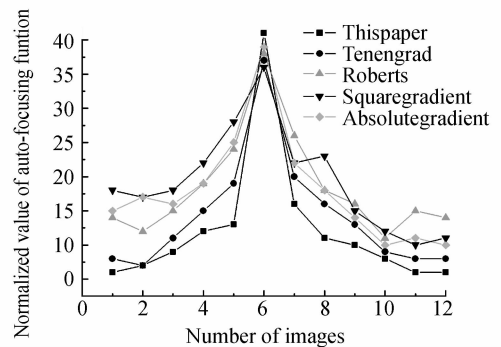


图 5 系列图像调焦评价函数值

Fig. 5 Auto-focusing funtion values of series images

采用最大灰度梯度函数对同一目标进行了 50 次的自动调焦实验, 整个调焦可移动范围为

11.8 mm,实际的准焦位置在 7.82 mm 附近,表 1 为实际得到的准焦位置。

表 1 自动调焦稳定性实验数据

Tab.1 Experiment data of auto-focus stability

电机位置(mm)	重复次数
7.79	2
7.80	1
7.81	2
7.82	41
7.83	3
7.85	1

从图 5、表 1 和实验过程可以看出本文提出的自动调焦评价函数和其它梯度函数相比具有无偏性好、单峰性强、灵敏度高、稳定性较好以及计算量小的特点。

参考文献:

- [1] 王青,宋恩民,许向阳,等.基于加权邻域相关性的显微镜自动聚焦函数[J].光学精密工程,2008,16(1):166-171.
WANG Q, SONG EN M, XU X Y, *et al.*. Auto-focusing function for microscope image based on weighted neighborhood correlation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(1):166-171. (in Chinese)
- [2] 李奇,徐之海,冯华君,等.数字成像系统自动对焦区域设计[J].光子学报,2002,31(1):63-66.
LI Q, XU ZH H, FENG H J, *et al.*. Auto-focus area design of digital imaging system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002,31(1):63-66. (in Chinese)
- [3] 冯华君,毛帮福,李奇,等.一种用于数字成像的自动对焦系统[J].光电工程,2004,31(10):69-72.
FENG H J, MAO B F, LI Q, *et al.*. An auto-focusing system used for digital imaging[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, 31 (10): 69-72. (in Chinese)
- [4] 朱铮涛,黎韶发,陈华平.基于图像熵的自动聚焦函数研究[J].光学精密工程,2004,12(5):537-542.
ZHU ZH T, LI SH F, CHEN H P. Research on auto-focused function based on the image entropy [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004,12(5):537-542. (in Chinese)

5 结 论

本文针对光电经纬仪测量目标特性复杂的特点提出了一种以图像的最大灰度梯度作为焦距评价函数的自动调焦方法,针对目标位置在视场中不固定的特点采用了以包含主体目标的最小矩形区域为调焦区域的区域选择方法,不同条件下的实验表明:本文算法能够做到 25 Hz 实时调焦,系统的对焦精度在 0.01~0.02 mm,调焦准确率为 96%,该自动调焦系统完全能够满足光电经纬仪实时跟踪以及事后数据处理和分析对图像清晰度的要求。下一步的工作主要是采用 DSP 处理器替代计算机完成自动调焦系统的数据处理以及控制功能。

- [5] 赵辉,鲍歌堂,陶卫.图像测量中自动调焦函数的实验研究与分析[J].光学精密工程,2004,12(5):531-536.
ZHAO H, BAO G T, TAO W. Experimental research and analysis of automatic focusing function for imaging measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004,12(5):531-536. (in Chinese)
- [6] 高赞,姜威,朱孔凤.基于最大梯度和阈值的自动聚焦算法[J].电子测量与仪器学报,2007,21(5):49-54.
GAO Z, JIANG W, ZHU K F. Auto-focusing algorithm based on most gradient and threshold [J]. *Journal of Electronic Measurement AND Instrument*, 2007,21(5):49-54. (in Chinese)
- [7] 刘力双,孙双花,吕乃光.特征边缘跟踪的调焦评价方法[J].光电工程,2008,35(7):59-63.
LIU L SH, SUN SH H, LV N G. Focusing evaluation method based on edge tracking [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, 35 (7): 59-63. (in Chinese)
- [8] ZHU K F, WEI J, GAO Z, *et al.*. Using non-niform sampling to make automatic focusing result correct[C]. *IEEE international Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications Proceedings*, 2005:1264-266.

作者简介:



梁敏华(1972—),男,河南永城人,助理,博士研究生,1995年于吉林大学获得学士学位,2003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,主要从事光电跟踪精密测量技术的研究。E-mail: lmhhlmh@sina.com

导师简介:



陈涛(1965—),男,内蒙赤峰人,研究员,博士生导师,主要从事光学仪器总体设计、精密测量技术以及跟踪控制系统的研究。E-mail: cdw2000@fm365.com

通讯作者:



吴志勇(1965—),男,内蒙通辽人,研究员,1989年于长春理工大学获得学士学位,主要从事光电测控设备电总体设计、数据通讯及光纤通讯技术的研究。E-mail: wzy0607@yahoo.com.cn

● 下期预告

Offner 补偿器的结构与装调

陈旭^{1,2},刘伟奇¹,康玉思¹,冯睿¹,魏仲伦¹,柳华¹,苗二龙¹

- (1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室,吉林 长春 130033;
2. 中国科学院 研究生院,北京 100039)

90 nm 节点光刻投影镜头中使用的非球面都存在高次项,而且对理想球面的偏离量较大。为了实现对此类非球面较高精度的检测,基于像差补偿理论设计了一种三片式结构的 Offner 补偿器。通过采用等量轴向球差补偿非球面各阶系数的方法,主动引入一定量的轴向球差,补偿光线在非球面法线方向的偏离量。结果表明:初级像差和高级像差很好的平衡,使剩余像差很小;MTF 远远超过衍射极限;系统工作波长为 632.8 nm, F 数 1.64,均方波差 $RMS < \lambda/1250$;系统轴向像差 $< 0.47 \mu\text{m}$,满足基本干涉成像条件。各方面指标均满足高精度检测的补偿器的设计要求。最后根据现有的检测装置的精度对所设计的结果进行了公差分析,给出了较宽松的公差容限。公差分配后,系统综合残余波像差 $< 0.00727\lambda$,满足系统装调精度要求。