

文章编号: 1003-501X(2007)12-0017-04

# 一种用于经纬仪的实时检焦系统

梁翠萍<sup>1,2,3</sup>, 张 涛<sup>1,2,3</sup>, 高 岩<sup>2,3</sup>, 乔彦峰<sup>2</sup>

(1. 天津工业大学 机电学院, 天津 300160;

2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 为了使经纬仪进行实时自动检调焦, 提出了一种双分离透镜法检焦系统, 该方法利用目标自身的反射光, 经双分离透镜将通过镜头后的光路分割成两束, 通过检测目标在 CCD 上成像光斑位置的偏移量进行调焦, 对具有一定亮度的目标能理想的自动对焦, 自身不需发射系统, 耗能少, 结构紧凑; 利用相关法进行数据处理和拟合, 提高了检焦系统的分辨率。实验结果表明, 此方法的检焦分辨率在 0.1~0.15mm 范围之内, 检焦精度基本满足经纬仪第一像面焦深范围之内的要求, 并具有调整方便以及实时性等优点。

**关键词:** 自动检焦; 双分离透镜; 相关法

中图分类号: TH74

文献标志码: A

## Real time auto-focusing system used in the theodolite

LIANG Cui-ping<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Tao<sup>1,2,3</sup>, GAO Yan<sup>2,3</sup>, QIAO Yan-feng<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical and Electric Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300160, China;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, the Chinese Academy of Science, Changchun 130033,

China; 3. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** In order to realize the auto-examining focus in real time for the theodolite, an auto-focusing system with the reflected light of the objective itself is introduced, in which the light is split into two beams by two symmetrical lenses. And the auto-focusing ability is achieved by detecting the relative offset of the image spot on the CCD. This system has lower consumption and compact structure, in which the objective with definite brightness can be auto-focused ideally. With the signal processing techniques such as correlative analysis and data fitting, the resolution of the whole measuring system is improved. The experiment result demonstrates that the measuring precision ranging from 0.1mm to 0.15mm meets with the focus-depth requirements of the theodolite; and the method has the advantage of adjusting easily and higher automation.

**Key words:** auto-examining focus; two symmetrical lens apart; correlation arithmetic

## 引 言

现在诸多经纬仪是由雷达或激光测距机送来的距离信息电压来控制调焦机构自动调焦的。为了使经纬仪能够自动检焦, 本文利用分离镜片将通过望远物镜的光线分裂成两束并进行调焦, 采用 CCD 作为光电转换器件, 经驱动电路、A/D 转换后, 输入微机进行信号处理, 求出离焦大小和方向。该装置结构紧凑, 调整方便, 有利于微机处理, 可实现高精度自动检焦的要求。

## 1 检焦光学原理

经纬仪的自动调焦系统<sup>[1]</sup>, 采用放在望远光路中的准直镜进行自动调焦: 当目标在无穷远时, 准直镜做调焦元件是将其前焦点置于望远系统的第一焦面上。而当目标是在有限距离时, 目标像面就离开第一焦

收稿日期: 2007-01-26; 收到修改稿日期: 2007-06-03

作者简介: 梁翠萍(1967-), 女(汉族), 山西平遥人, 讲师, 主要从事光电测控技术研究。E-mail: lcplrp@126.com

面, 只要将准直物镜沿轴线移动, 使其前焦点离开第一焦面而落在目标像面上, 此时目标光线经过准直物镜变成平行光, 然后经过变倍物镜成像于第二像面, 准直镜前焦点离开目标像面的距离, 反映在第二像面上就是离焦量。由此可见, 准直物镜移动只要前焦点落在目标像面上, 后面为平行光对后面的光路无影响。

通过准直镜头的光束经平面反射镜反射后进入自动检焦系统<sup>[2]</sup>。为方便起见, 我们不考虑平面反射镜。通过准直镜头的光束经双分离透镜<sup>[3]</sup>后被分成两个部分, 在 CCD 传感器上成像。当调焦准确时, 经过分离镜片生成的两束光线投影在 CCD 上的距离是一定的, 作为焦点检测的基准。我们用  $AB$  来表示作为 CCD 上两光斑的位置的基准。当调焦不准时, 有两种可能性。一种是准直镜前焦点在目标像面之前。此时受光的 CCD 上两光斑的位置之间的距离短于  $AB$ ; 另一种情况是准直镜前焦点在目标像面之后, 此时受光的 CCD 上两光斑的位置之间的距离长于  $AB$ , 根据受光的 CCD 上光斑的位置之间的距离, 就能鉴别出焦点是否准确。只要测出这个偏移量, 就能检测出焦点的偏离状态。根据 CCD 上两光斑的位置的距离与  $AB$  的差值, 经过转换电路和模拟/数字转换电路, 再送入系统的 CPU 中央处理单元, CPU 按照设定的程序, 可计算出准直镜前焦点离开第一像面的距离, 以及散焦方向。

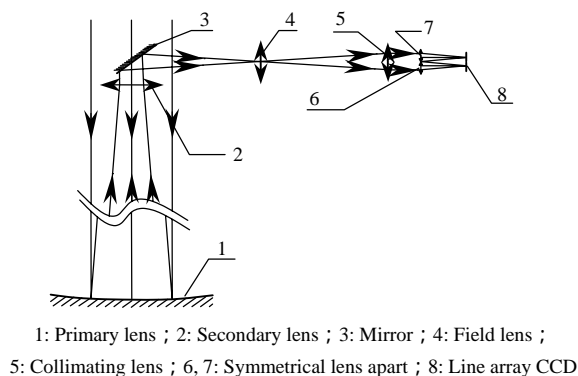


图 1 经纬仪中相位法检焦系统

Fig.1 Schematic diagram of auto-focus system using the phase method in the theodolite

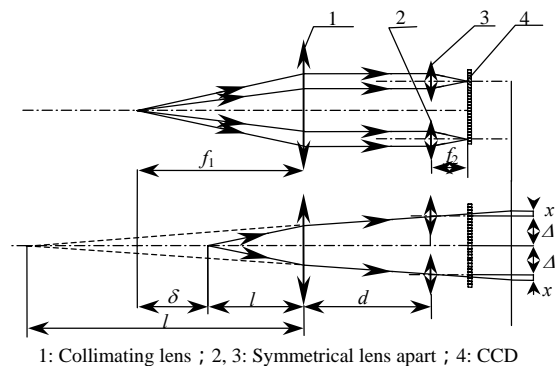


图 2 光斑移动量与准直物镜前焦点离开经纬仪第一像面距离的关系

Fig.2 Relationship between spot offset distance  $x$  and off-focus depth  $\delta$

设望远物镜的相对孔径  $D_0/f_0 = 1/F$ , 如图 2 所示, 当准直镜前焦点离焦  $\delta$  时, 经公式推导得物体成像光斑偏移距离  $x$  与准直物镜前焦点离开经纬仪第一像面距离  $\delta$  的关系<sup>[4]</sup>:

$$\delta = f'_1 - (xd - Af'_2)f_1/(xf'_1 + Af'_2 - xd) \quad (1)$$

上式表明了对离焦量的检出能力。对于  $F$  为 10 的经纬仪, 其半焦深是 0.14mm, 显然, 像素级分辨能力对精密调焦来说是不够的, 必须采用亚像素定位技术来提高检焦精度(一般常用的亚像素算法的精度为 0.1 ~ 0.5 个像素, 有些算法在理想情况下可以达到 0.01 个像素左右的精度)。上述可知, 只要满足检焦系统的景深<sup>[5-7]</sup>在望远物镜(经纬仪第一像面)的焦深范围之内要求, 检焦系统能与所有经纬仪配合进行自动检焦, 从而达到对焦标准。

## 2 数据处理方法

如前节所述, 离焦量的检出是靠测得 CCD 接收的两信号间的相互偏离量  $\delta$  来得到的。当没有合焦时, 第二次成像的像平面是肯定不会落在 CCD 阵列上的, 这时检焦系统检测到的是成像物体形成的焦外。但是这并不影响检焦系统的工作, 因为两组对应的 CCD 阵列上的成像永远是对称形状, 无论是清晰成像还是模糊的焦外, 因此 CCD 的密度只要达到能检测出两者相关位置的程度就可以了。

对于不规则形状的目标, 随着镜头的不同, 光斑也有所变化, 光的亮度分布曲线的形状是不确定的。波形的顶峰反映了最多的光线聚焦在这个位置, 但不一定在光斑中心。由于对焦时在 CCD 上的图像是千变万化的, 有可能出现多个峰值或峰值顶是平的等等情况。同时由于检焦系统的目的是测量两个图像而不是单个图像, 所以重心法和峰值理论, 是行不通的, 须采用两个对称的成像信号相关<sup>[8]</sup>处理解决这一问题。

本文以一维情况为例, 设两能量信号为  $x(t)$ 、 $y(t)$ , 将其离散化为长度为  $N$  的实离散信号  $x(n)$ 、 $y(n)$ ,

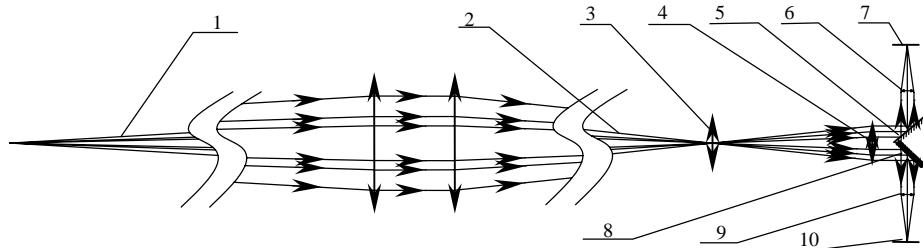
其相关函数定义为相减绝对值式：

$$r_{x,y}(k) = \sum_{n=2}^n |x(n) - y(n+k)|, k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm m \quad (2)$$

式中  $m$  为最大延迟数，其物理意义是取序列  $x(n)$  与右移  $k$  个单位后的序列  $y(n)$  相对应项的幅值相比较，如差值愈小则波形愈相似。因为两信号是从同一个目标发出经不同光路到达 CCD 接收器的，其分布是相似的，在搜寻  $r_{x,y}$  最小值的过程中，即可求出两信号的相互偏移量  $\delta$ 。由于 CCD 记录的是离散灰度值，相关计算时每次信号的偏移只能以整像素为单位，而实际光斑沿 CCD 的移动不一定恰好为整像素，因此获得的测量分辨率是以整像素为单位的值。为了提高测量精度，我们根据离散的相关值拟合出连续分布的相关曲线，然后在以整像素搜索时得到的位置前后各一个像素内按 1/10 像素的间隔重新搜索极小值，从而达到亚像素的定位精度。

### 3 实验结果及误差分析

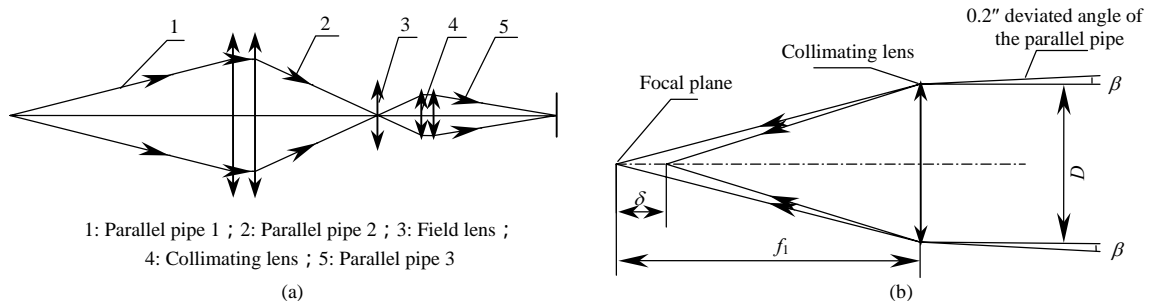
为了利用实验室现有条件，若选用满足光斑距离的线阵 CCD，则一条光路即可满足条件。由于面阵 CCD 的接受范围有限，我们利用两条光路来实现。实验主要采用的设备有：带有星点孔的平行光管 1 (焦距 990mm) 代替无穷远处的物体；利用平行光管 2 (焦距 550mm，孔径为 50mm) 来代替经纬仪的望远物镜进行仿真实验；准直物镜焦距 200mm，口径 25.4mm；双分离透镜焦距 70mm，口径 12mm；用测微平移台来控制准直物镜的离焦，总长 30mm，最小刻度 0.01mm；实验采用面阵 CCD 作为接受系统，所采用的 2 个面阵 CCD 为美国 UNIC 公司生产的 UM-201(CCIR)，像为黑白，像元尺寸为  $8.6\mu\text{m} \times 8.3\mu\text{m}$ ，靶面尺寸为  $1/2''$ ，具有外同步触发接口，可接收行、场同步信号，成像质量好，能够满足测量精度要求。CCD 摄像机的镜头采用的是日本 COMPUTAR 生产的 M5018-MP，焦距是 50mm，相对孔径是 1:1.8，视场为  $8.8\text{mm} \times 6.6\text{mm}$ ；采集卡、电脑。上述所有设备都置于同一个具有独立地基的固定平台上。原理如图 3 所示。



1, 2: Parallel pipe1 ; 3: Field lens ; 4: Collimating lens ; 5, 8: Mirror 1 ; 6, 9: Symmetrical lens apart 1, 2 ; 7, 10: CCD1, 2

图 3 实验原理图

Fig.3 Principle diagram of the experiment



1: Parallel pipe 1 ; 2: Parallel pipe 2 ; 3: Field lens ;  
4: Collimating lens ; 5: Parallel pipe 3

图 4 焦面标定示意图

Fig.4 Schematic diagram of calibrating focal plane

#### 3.1 焦面的标定

上述检焦方案需要预先精确标定出经纬仪处于理想焦面时 CCD 两信号之间的距离。从焦面上一目标发出的光线，当合焦时，经准直镜后变成一束平行光，在准直镜后用  $0.2''$  平行光管进行焦面的标定。设准直物镜焦距为  $f_1$ ，口径为  $D_1$ ，当离焦时，经准直镜后为会聚或发散光，当离焦量  $\delta$  不大时， $2\beta = (\delta \cdot D_1) / (f_1 \cdot f_1)$ ，

$\delta=0.0016$ , 这种方法确定的焦面精度仍不能完全满足要求, 采取高精度的平行光管进行标定, 其焦面精度可以进一步提高。在使用过程中情况允许时, 还可以采取多次测量取平均值, 这样就要求经纬仪上的实时检焦系统具有较高的重复精度, 原理如图 4 所示。

### 3.2 实验结果及误差分析

由于物体与经纬仪间距离变化时, 经物镜成像在第一像面, 在准直物镜的前焦距范围之内, 所以我们在一个方向移动检焦系统, 检测离焦量(准直物镜前焦点离开经纬仪第一像面的距离): 焦面标定后, 在标定原点处记下平移台鼓轮读数, 然后转动鼓轮每次离焦 5mm, 利用上述公式对两信号作相关, 相关值最小处对应位置为偏移量  $x_0$ 。然后根据公式计算出离焦量  $\delta$ , 每一位置测量 7 次, 实验数据见表 1。

表 1 实验数据(单位: mm)  
Table 1 The auto-focus experiment data by centrobaric arithmetic

Position of the moving platform (the actual off-focus depth $\delta_0$ )	Average distance between two spot spots	Standard deviation	Off-focus depth by calculating	Absolute error of the off-focus depth
0	1.2272	0.0009	0	0
5	1.3159	0.001	5.0051	0.005
10	1.4069	0.0014	10.0115	0.0115
15	1.5001	0.0010	15.0091	0.009
20	1.5961	0.0003	20.025	0.025
25	1.6943	0.0006	25.0217	0.0217
30	1.7953	0.0005	30.026	0.026

测量值的标准偏差较小, 分散程度在  $0.3\sim 1.4\mu\text{m}$  之间, 说明检焦系统精密度较高, 重复性较好。

通过实验知, 在整个离焦量检测过程中, 测得每离开焦 0.15mm, 两光斑间距的最小变化量为 0.002mm, 该检焦装置能够分辨出来, 每次离焦 0.1mm, 所测得的两光斑间距的变化量很小, 不容易分辨, 检焦系统对的测量容易受干扰出现混淆, 但每离焦 0.15mm 还是能够清晰分辨的。由此可见, 本装置的检焦分辨力在 0.1~0.15mm 之间, 与焦深相比, 还需要进一步提高分辨能力。

上述测量误差的主要来源有:

1) 光强分布变化也是一个重要的误差源头。影响光强分布变化的因素主要有: 光学系统的非对称性象差, 例如慧差象散畸变等改变了信号的亮度中心, 另外温度的变化、冲击振动会使机械结构产生变形, 使目标与透镜之间的相对位置以及 CCD 像面的位置发生微小的变化, 都会导致光斑能量分布的改变, 给光斑定位带来不确定性, 所以要求结构具有良好的稳定性。

2) 处理程序的算法误差, 信号采集、预处理、相关运算等过程构成了整个处理程序, 程序用 C 语言编写, 对全体信号进行相关运算处理, 带有一定的统计性质。经用理想信号模拟实验表明, 该项误差在 1/10 像元以内。

3) 光路调整及光学零件加工误差带来的测量误差, 两个 CCD 的安装对测量精度的影响, 由于物光分布不均匀, 当光斑沿 CCD 移动时, 物光的不同部位成像在光敏面上, 表现为两信号波形的幅值和形状不一致, 于是给测量结果带来了误差。通过仔细装调可使此项误差减至最小: 观察示波器上的信号波形, 调整 CCD 座使两信号波形一致, 并且两光斑沿 CCD 移动时无明显变化。双分离透镜等光学零件的加工误差属于系统误差, 由于光路是对称的, 该项误差对两个光斑信号的影响是相同的, 可通过信号处理予以消除。

4) 平移台测微鼓轮运行和刻度之间存在一定误差, 用高精度测微计标定可修正这一误差。

## 4 结 论

原理样机的实验表明双分离透镜相关自动检焦方法可行: 1) 目前, 面阵 CCD 像元最小间距  $4\mu\text{m}$ , 线阵  $5\sim 7\mu\text{m}$ 。取准直透镜的焦距为 200mm, 分离透镜的焦距为 70mm, CCD 像素间隔为  $5\mu\text{m}$ , 在亚像素算法的精度为 0.1~0.5 个像素时,  $\delta=0.02\sim 0.14\text{mm}$ , 所以选取合适的透镜参数和 CCD 像元间距和提高亚像素算法的定位精度, 可达到经纬仪第一像面 1/3 焦深的检焦精度; 2) 检焦与调焦系统可构成闭环, 实时进行检调焦。

(下转第 65 页)

- LIU Hui-qiang, CHEN Wen-jing, SU Xian-yu, et al. Fast Fourier transform profilometry based on two-frequency grating projecting [J]. **Opto-Electronic Engineering**, 2004, **31**(10): 39-42.
- [2] SU Xian-yu, CHEN Wen-jing. Reliability-guided phase unwrapping algorithm: a review [J]. **Optics and Lasers Engineering**, 2004, **42**: 245-261.
- [3] SU Xian-yu, CHEN Wen-jing. Fourier transform profilometry: a review [J]. **Optics and Lasers Engineering**, 2001, **35**: 263-284.
- [4] 曲 芳, 钟金钢. 数字相移技术用于不连续复杂物体的三维面形测量[J]. 光学技术, 2004, **30**(4): 478-480.  
QU Fang, ZHONG Jin-gang. Digital phase-shifting technique application to surface profiling of discontinuous objects [J]. **Optical Technique**, 2004, **30**(4): 478-480.
- [5] Apolinar Munoz-Rodriguez J, Anand Asundi, Ramon Rodriguez-Vera. Shape detection of moving objects based on a neural network of a light line [J]. **Opt. Commun**, 2003, **221**: 73-86.
- [6] Dinesh Ganotra, Joby Joseph, Kehar Singh. Profilometry for the measurement of three-dimensional object shape using radial function, and multi-layer perceptron neural networks [J]. **Opt Commun**, 2002, **209**: 291-301.
- [7] Cuevas F J, Servin M, Vera R R. Depth object recovery using radial basis function [J]. **Opt Commun**, 1999, **163**: 270-277.
- [8] Dinesh Ganotra, Joby Joseph, Kehar Singh. Object reconstruction in multiplayer neural network based profilometry using grating structure comprising two regions with different spatial periods [J]. **Optics and Lasers Engineering**, 2004, **42**: 179-192.
- [9] Cuevas F J, Servin M, Stavroudis O N, et al. Multilayer neural network applied to phase and depth recovery from fringe patterns [J]. **Opt Commun**, 2000, **181**: 239-259.
- [10] 李焦成. 神经网络系统理论[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1996: 5-36.  
LI Jiao-cheng. **The Theory of the Neural Networks** [M]. Xi'an: Xidian University Press, 1996: 5-36.

~~~~~  
( 上接第 20 页 )

#### 参考文献：

- [1] 徐维安. 电影经纬仪自动调焦的结构设计[J]. 光学 精密工程, 1996, **14**(3): 52-57.  
XU Wei-an. The mechanical design of the autofocusing system in the theodolite [J]. **Optics and Precision Engineering**, 1996, **14**(3): 52-57.
- [2] 李朝辉, 匡海鹏, 韩昌元, 等. 空间相机相关法实时检焦技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2002, **23**(2): 166-169.  
LI Zhao-hui, KUANG Hai-peng, HAN Chang-yuan, et al. Study of real-time autofocusing technique using correlation method for space camera [J]. **China Journal of Science Instrument**, 2002, **23**(2): 166-169.
- [3] 铃木谦二. 单反照相机的自动调焦技术[J]. 江西光学仪器, 2001(2): 45-49.  
Suzuki Kenichi. The autofocus technology of the Single Lens Reflex [J]. **Optical Instrument in Jiangxi**, 2001(2): 45-49.
- [4] 薛实福, 李庆祥. 精密仪器设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 1991: 2.  
XUE Shi-fu, LI Qing-xiang. **Fine instrument design** [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1991: 2.
- [5] Xiong Yalin, Shafer Steven A. Depth from focusing and defocusing [A]. **Proc. of IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition** [C]. New York: IEEE, 1993: 68-73.
- [6] 王清英. 景深公式的推导[J]. 南阳师范学院学报(自然科学版), 2003, **12**(3): 24-26.  
WANG Qing-ying. The deduction of the depth of field formula [J]. **Journal of Nanyang Normal University (Natural Science Edition)**, 2003, **12**(3): 24-26.
- [7] Liang Cui-ping, Qiao Yan-feng. The auto-focusing precision analysis of the phase method in the theodolite [A]. **Proc. of ISTM/2005 6th international symposium on test and measurement** [C]. Dalian: [s.l.], 2005: 4487-4490.
- [8] Cox J Allen. Evaluation of peak location algorithms with subpixel accuracy for mosaic focal plane [J]. **SPIE**, 1981, **292**: 288-299.