

一种新的自动调焦方法——离轴探测法

范易伟 孔马理 王常瑛

陆 达 徐端颐

(清华大学 精密仪器系, 北京)

提 要

本文提出了一种新的自动调焦方法——离轴探测法, 此法没用任何附加元件, 结构简单、装调容易、线性度好、灵敏度高、调焦范围大、实用性强; 介绍了此法的原理、理论计算结果及实验结果; 给出了应用实例。

关键词: 调焦(自动调焦); 象限探测器; 离轴探测法。

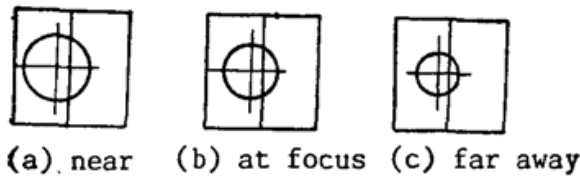
一、引 言

目前用于自动调焦的光学方法很多, 而像散法、刀口法、临界角棱镜法、傅科棱镜法、偏心光束法、振动法等, 这些方法都是大家所熟知的。它们都有一个共同的缺点, 就是要引入诸如像散元件、刀口、临界角棱镜等附加元件, 这就使光学系统变得很复杂, 而且由于这些元件的位置要求严格, 给装调带来很大困难。文献[3]介绍了一种 Wax-Wane 调焦法, 它使用了一个离轴放置的透镜, 反射光经它会聚到离轴放置的光电探测器上, 再经电路处理, 得到离焦信号。此法比较简单、线性度大、灵敏度高、元件数少、且对元件的位置精度要求低、容易调焦等优点, 但仍须使用一个附加元件——离轴放置的透镜。本文对此法做了进一步的改进, 提出了离轴探测法。

二、离轴探测法原理及理论计算结果

图1为离轴探测法的原理示意图。此法不引入任何附加元件, 只把两象限光电探测器偏离光轴放置, 利用在不同调焦状态下, 光斑大小变化引起两个象限输出之差的变化得到离焦信号。图1(a)、(b)、(c)分别为在不同离焦及正焦情况下, 光斑在探测器上的形状, 以 A 、 B 两象限之差($A-B$)作为离焦信号, 但由于在正焦时, A 和 B 的输出不相等, 因此不能直接用($A-B$)作为调焦信号, 而需加入一个增益系数 G , 使($GA-B$)在正焦时为零。这样, 当远离或靠近时, 光斑大小发生变化, ($GA-B$)就会有一正或负的信号输出, 这就是离焦误差信号用这个信号驱动物镜, 可实现自动调焦。

要计算离焦量与输出信号的关系, 首先必须建立数学模型。图2所示为拉直后的检测光路, 规定反射镜靠近物镜为正离焦、远离物镜为负离焦, 在不同离焦情况下, 探测器上的光斑大小发生变化, 如图2(a)、(b)、(c)所示。假设系统为理想光学系统, 由光线追迹, 可求出



(a) near (b) at focus (c) far away

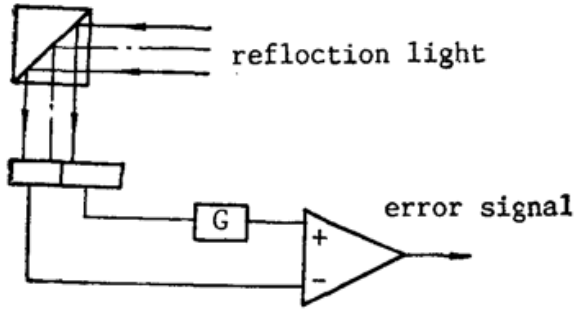


Fig. 1 Principle of OAD method

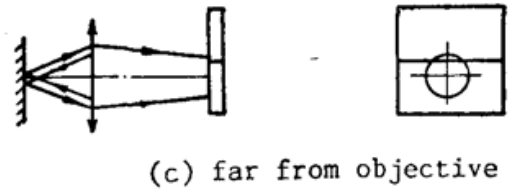
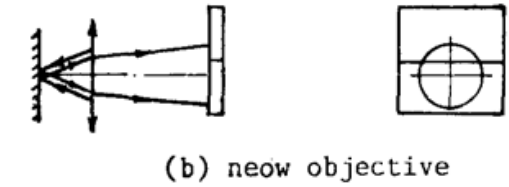
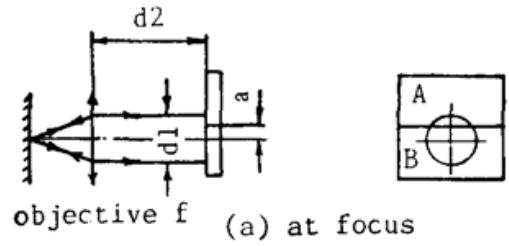


Fig. 2 Detection optical system

离焦量 ds 与光斑半径 R 的关系:

$$R = \frac{d_1}{2} + \frac{2(d_2 - f)}{f} \operatorname{tg} u \cdot ds \quad (1)$$

式中 f 为物镜焦距, d_1 为入射光直径, d_2 为物镜与探测器之间的距离, u 为反射光的孔径角。光斑大小 R 发生变化, 致使两个象限上的光强分布变化, 其输出之差产生误差信号 dI , 为使计算简化, 假设: (1) 两象限光电探测器各点响应均匀; (2) 光斑的光强分布均匀 (对非均匀分布的情况, 如高斯分布, 可用积分方法计算)。根据此假设 (参见图 3), 有:

$$dI = kI_0GS_1 - kI_0S_2 = kI_0(GS_1 - S_2) \quad (2)$$

式中 S_1 、 S_2 分别为光斑在 A、B 两象限中的面积, I_0 为总光强, G 为增益系数, k 为光电转换系数。G 的确定为: 当正焦时, $R = d_1/2$, 此时误差输出 $dI = 0$, 由 (2) 式得, $G = S_2/S_1|_{R=d_1/2}$

为克服光强变化对输出信号的影响, 以及为分析比较方便, 对 (2) 式进行规一化处理, 采用不同的规一化方法, 对输出信号的灵敏度及线性度影响很大, 在此给出两种规一化方法, 以作比较。

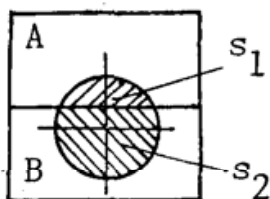


Fig. 3 Distribution of light spot

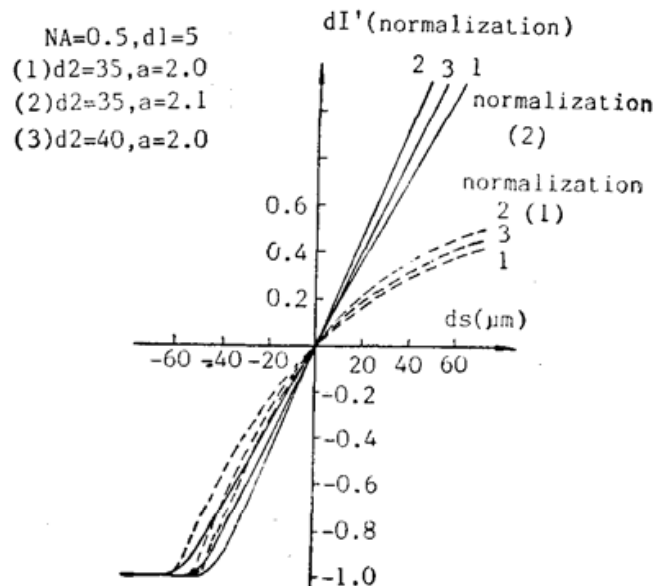


Fig. 4 Computer simulation results using formula (3) and (3') (dotted lines)

1. 两个象限加入增益系数后的输出之和规一化, 即:

$$dI'_1 = dI/I_0 k (GS_1 + S_2) = (GS_1 - S_2) / (GS_1 + S_2)。$$

2. 不加增益系数的输出之和规一化, 即:

$$dI'_2 = dI/I_0 k (S_1 + S_2) = (GS_1 - S_2) / (S_1 + S_2)。$$

求出 S_1, S_2 代入上两式并整理得:

$$dI'_1 = \frac{(G-1) \frac{\pi R^2}{2} - (G+1) \left(a\sqrt{R^2 - a^2} + R^2 \sin^{-1} \frac{a}{R} \right)}{(G+1) \frac{\pi R^2}{2} - (G-1) \left(a\sqrt{R^2 - a^2} + R^2 \sin^{-1} \frac{a}{R} \right)}。 \tag{3}$$

$$dI'_2 = \frac{(G-1) \frac{\pi R^2}{2} - (G+1) \left(a\sqrt{R^2 - a^2} + R^2 \sin^{-1} \frac{a}{R} \right)}{\pi R^2}。 \tag{3'}$$

把(1)式代入(3)、(3')两式, 就可得离焦量 ds 与输出信号 dI' 的关系。这一关系涉及及参数较多, 计算复杂, 但利用计算机模拟, 很容易求出各参数对输出信号的影响。图 4 中为两组不同规一化方法得出的计算结果。图中 $NA = \sin u$ 。

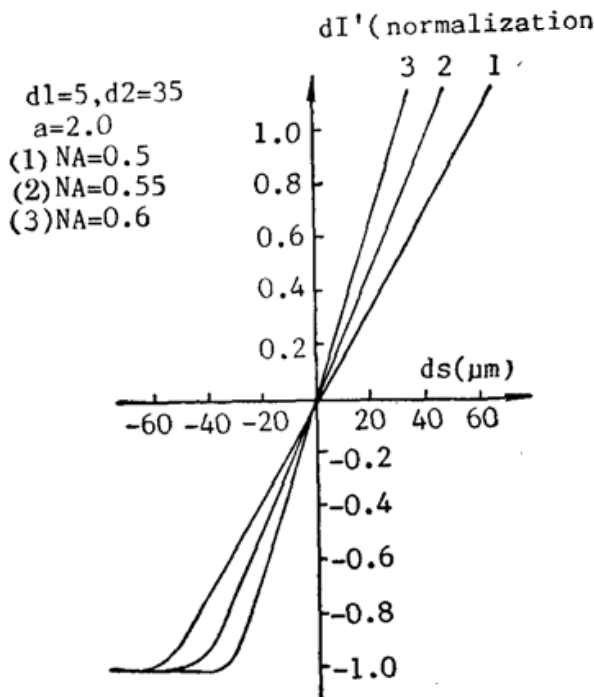


Fig. 5 Effect of NA on sensitivity

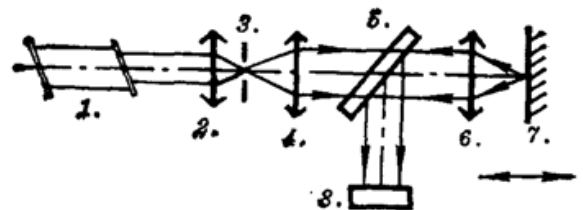


Fig. 6 Schematic diagram of still experiment system

- 1. He-Ne laser; 3. aperture; 2, 4. expander and collimator; 5. Half-mirror; 6. Objective;
- 7. mirror; 8. Quadrant detector.

从图中曲线可以看到, 当负离焦较大时, 输出的误差信号出现饱和, 这是因为负离焦时光斑变小, 当光斑小到一定程度, 由于探测器是离轴放置的, 光斑只落在 B 象限中, A 象限上没有光照射, 也就没有输出, 这样, 输出的离焦信号就不会变化而是一恒定值, 即饱和值。比较图 4 中两组曲线, 可以看出两种规一化方法的差异, 用第 2 种规一化方法, 误差信号的灵敏度及线性度得到很大改善。在正离焦时光斑变大, 只要探测器足够大, 用第 2 种规一化方法在很大范围内都可得到线性度很好的曲线。因此, 这种方法的检测范围就限制在达到饱和时对应的负离焦量和光斑达到探测器最大探测面积时对应的正离焦量之间。对照不同参数下的曲线可以看出, d_2 增加, 灵敏度增加, 但影响不显著, 而且为使系统结构紧凑, d_2 不宜

选得太大。另外,如果 d_2 太大,会使光斑在探测器上聚成一点后又扩大,容易出现伪焦点(即反射面不在焦面上而误差输出为零),给电路处理带来不便,同时检测范围也会减小。离轴量 a 增加,灵敏度也增加,且影响较大。另外,孔径角 u 增加(即物镜数值孔径 NA 增加),灵敏度也增加,如图 6 所示。因此,选择不同的结构参数,便可得到不同的灵敏度及线性度范围,从而得到满意的结果。

从上面分析计算的结果可以看出,这种方法灵敏度高、线性度极好且范围很大,这就扩大了它的应用范围,不仅可以用于自动调焦,还可以用于微位移传感器。另外,由于使用的元件数降到最少,位置精度要求低,使得装调极简便。在检测光路中只用了一个探测器,其离轴量的大小,决定了增益系数 G 。反过来,可以用调整增益系数 G 的方法来补偿探测器离轴位置误差产生的输出误差。

三、实验结果及应用实例

我们对这种方法进行了静态、动态实验。图 6 为静态实验系统示意图。以 He-Ne 激光器 1 为光源,经扩束准直镜 2、4 和光栏 3 组成的扩束准直系统后,光束直径达到 5mm 以上,再经半透半反镜 5 和物镜 6,到达平面反射镜 7,平面反射镜安装在微位移器上,由微位移器使之产生离焦量;反射光经物镜、半透半反镜到达离轴放置的光电探测器 8 上,光电探测器输出经电路处理就可得到离焦信号。图 7 为在不同离轴量(即不同的增益系数 G)下测得的静态输出曲线与理论计算曲线的比较。由于实验装置的限制, d_2 取得很大,致使线性度范围减小。从图中可见,实测曲线与理论计算曲线吻合得较好。

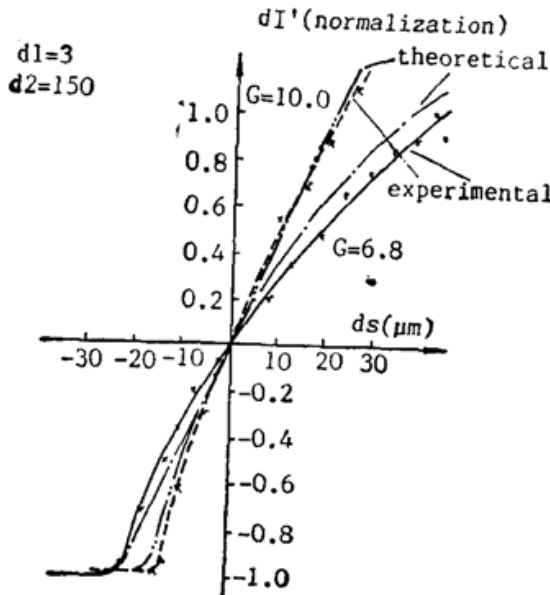


Fig. 7 Comparison between the experiment (X) and simulation results

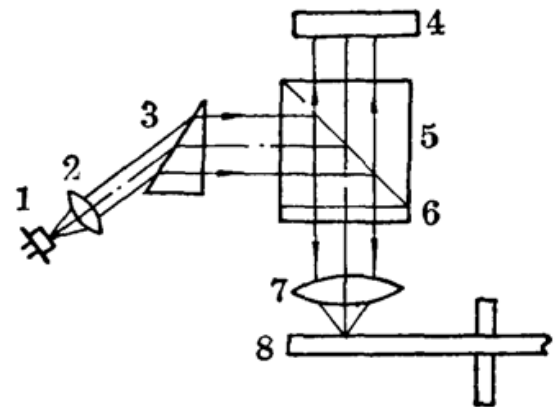


Fig. 8 Schematic diagram of dynamic experiment system

- 1. laser diode; 2. collimator;
- 3. shaping prism; 4. detector;
- 5. polarizing beam splitter; 6. quarter wave plate;
- 7. objective; 8. optic disk

从上面的曲线还可得出这样的结论,实验用激光为光源,其光强分布为高斯分布,理论计算是按均匀分布求出的,两者差异不明显,完全可以用前面的假设简化计算。

图 8 是把该法应用于光盘系统中的实验装置示意图,在这个实际应用中进行了动态实

验。光盘光学头在读写及记录信息时,要把激光会聚在光盘的记录介质表面上。光盘在旋转过程中,盘的上下起伏及翘曲会产生离焦,因此光学头的物镜必须能自动调焦,使光束总是会聚在记录介质表面上。由于物镜的数值孔径较大、焦深很小,调焦精度要求很高,一般小于 $0.5 \mu\text{m}$ 。实验用的是模拟盘,在玻璃表面镀上反射膜来模拟光盘,用电容传感器测得,在 70 mm 半径处的起伏为 $\pm 75 \mu\text{m}$ 。图 9 为离轴探测法输出的动态开环误差信号。图 10、11 为闭环误差信号。图 9 中可明显看出,输出信号已有饱和值,说明盘面的起伏已超出检测的线性范围。用电容微位移传感器对这一系统进行标定。得到的 (输出信号)/(离焦量) 为 $25 \text{ mV}/\mu\text{m}$ 。从图 11 中可看出闭环后的误差信号 $< \pm 10 \text{ mV}$, 由此可计算出调焦精度 df 为: $df < \pm 10 \text{ mV}/25 (\text{mV}/\mu\text{m}) = \pm 0.4 \mu\text{m}$ 。完全能够达到使用要求。

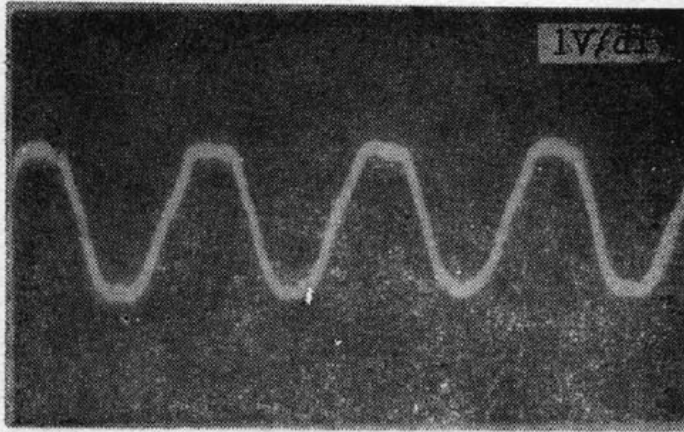


Fig. 9 Open-loop error signal

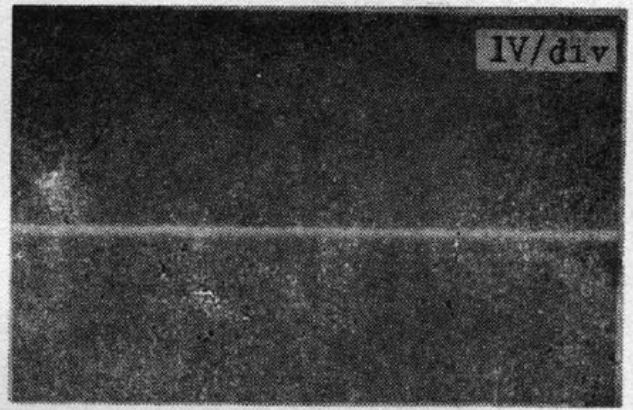


Fig. 10 Close-loop error signal

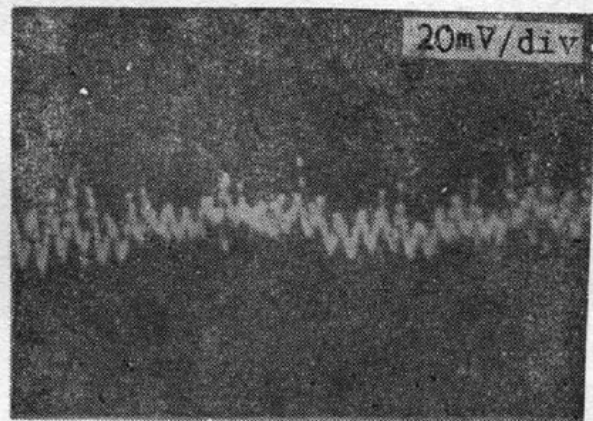


Fig. 11 Close-loop error signal

四、结 论

以上介绍了离轴探测法的原理,进行了理论分析,计算并给出了实验结果,可以看出离轴探测法是一种简单、可靠、易行的调焦法,它具有很好的线性度、灵敏度及较大的线性范围,所用的元件数量减到了最少,装调容易,成本低。它不仅可用于自动调焦,同时也可用于微位移传感器与其它方面。

参 考 文 献

- [1] 西川一;《光学技術エントラクト》, 1984, **22**, No. 2 (Feb), 19~26.
- [2] Donald K. Cohen, Wing Ho Gee *et al.*; *Appl. Optics*, 1984, **23**, No. 4 (Feb), 565~570.
- [3] S. Avai *et al.*; "Technical Digest of Topical Meeting on Optical Data Story", (Washington D. C., Oct. 15~17, 1986), 126~129.

Off-axis detect on approach—a new autofocusing method

FAN YIWEI, GONG MALI, WANG CHANGTING,

LU DA AND XU DUANYI

(Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing)

(Received 12 October 1988; revised 5 January 1990)

Abstract

A new autofocusing method called off-axis detection (OAD) method is developed. It used no ether elements except [a off-axis arranged quadrant detector . It has the advantages of simplicity, good reliablity, high sensitivity, better linearity and can be used in many fields, especially, in optical disk. The principle of the OAD method is described and the results of computer simulation and experiment are given.

Key words: focusing (autofocusing); quadrant detector; off-axis detection approach.