

图像矩心内插法在空间相机实时检焦中的应用

李朝辉, 武克用

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 空间光学研究部, 吉林 长春 130021)

摘要:自动检调焦技术是保证空间相机拍摄出高质量图象的重要技术手段, 本文提出了一种自准直法精密检焦系统, 该方法利用五棱镜代替大平面反射镜, 用 CCD 作为光电转换器件, 用半导体激光器做光源, 结构紧凑, 稳定可靠。采用矩心法求取光斑在 CCD 上的移动量, 从而计算出离焦量, 在测量中通过合理选取阈值和数据平滑技术, 提高了检测精度, 实验结果表明该方法能够达 $5\mu\text{m}$ 以内的检焦分辨率。

关键词:重心法; 空间相机; 五棱镜; 检焦

中图分类号: V445.8 **文献标识码:** A

1 引言

对空间相机实时进行检调焦, 目前可采用的方法主要有: 程序控制法、图像处理法和光电自准法。程序控制法就是在实验室模拟空间的工作环境, 在实验基础上找出离焦量与温度、压力等参数之间的关系, 从而编制出控制程序。当相机实际拍照时, 根据传感器实测的温度、压力等参数, 利用编制好的程序来调整相机焦面的位置。这种方法简单易行, 但只能考虑到有限种因素对焦面位置的影响, 有可能与实际情况有一定偏离, 不太保险; 图像处理方法只适用于实时传输型相机; 光电自准法利用镜头前的平面反射镜自准, 在像面上放置目标物和光电接收器接收自准像, 当像面处于最佳像面时, 接收器输出最大。这种方法由于整个口径自准成像, 准确地反映了实际光学系统对无穷远目标的成像位置, 其缺点是需要有一个质量很好的平面反射镜, 其孔径大于光学系统的轴上点通光口径, 并且要求能准确地转向自准位置。这种方案增加了相机的重量和技术上的难度。在没有大平面反射镜的情况下, 本文提出了一种新的自准直光路, 用两块五棱镜代替大平面反射镜, 将像面发出的狭缝目标经五棱镜反射后成像到其共扼位置上, 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。该系统结构紧凑, 调整方便, 有利于微机处理, 可实现实时、高精度、自动进行检调

焦。这种方法的难处在于系统的相对孔径小, 能量弱, 信噪比降低, 必须选用合适的信号处理方法来提高测量精度。矩心法在 CCD 测量系统中是最广泛的一种方法, 本文将应用到空间相机的实时检焦系统中, 取得了满意的结果。

2 检焦光学原理

相机主光学系统由成像物镜等效, 检焦组件安放在相机焦面处。如图 1 所示, 位于焦面处的目标狭缝 3 用光源 6 照明, 通过成像物镜 2 后变为准直光, 利用五棱镜的直角反射特性, 两块五棱镜 1 将目标狭缝反射后, 又一次经过成像物镜成像于焦面处, 在狭缝像的后面设置两个分离透镜 4, 将狭缝像再分别成像到 CCD 接收器上。当相机离焦时, 成像在 CCD 上的两狭缝像之间的距离发生变化, 根据变化的方向和大小, 就可计算出离焦的方向和大小。

设成像物镜的相对孔径为 $D/f = 1/F$, 目标离焦 Δ 时, 狭缝像经分离透镜成在 CCD 上的二个像分别产生了一个 $\delta/2$ 的偏移, 设分离透镜成像倍率为 M , 则有:

$$\delta = - \Delta MD / f \quad (1)$$

$$\Delta = - \delta F / M \quad (2)$$

其中负号的物理意义表示测出的狭缝像的偏离方向与离焦方向相反。

在任何一个离焦位置均精确求出 δ , 进而可利用 (2) 式求出离焦量 Δ , 并给出反馈信息。由 (1)、(2) 两式, 表明了对离焦量的检测能力。若 $F = 5.6$, CCD 器件的像素间隔为 $7\mu\text{m}$, 分离透镜在 2 倍的成像条件下工作, 则能分辨的最小离焦量为: $\Delta = 7\mu\text{m} \times 5.6/2 = 19.6\mu\text{m}$ 。这个分辨能力对精密检调焦来说是不够的, 必须采用数字细分技术来提高检焦精度。另外, 提高分离透镜的放大倍率 M , 也可以提高检焦精度。

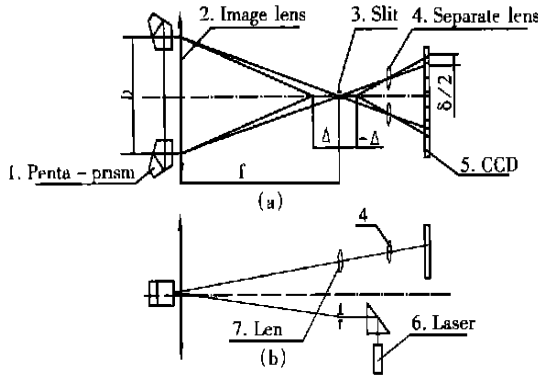


Fig. 1 Schematic diagram for camera autofocusing system (a) Front view (b) Vertical view

3 数据处理方法

如前节所述, 离焦量的检测是根据测得 CCD 两接收信号间相互偏离量 δ 来得到的, 为精密测得 δ , 找出光信号上的某一位置稳定点是关键。寻找光斑的质心作为信号的代表点具有稳定性好, 重复精度高等优点。因为质心法是对信号求面积的矩, 然后再在区域内作面积平均, 对数百个点进行加权平均, 可显著平滑每个点对整个信号的影响, 有利于消除系统误差, 减小随机误差, 提高测量值的稳定性和重复精度。

设 CCD 输出信号值为 g_i , x_i 为第 i 个像素对应的空间坐标, 积分区域取与阈值 $g_t = k(g_{\text{max}} - g_{\text{min}}) + g_{\text{min}}$ 相对应点之 x_1, x_2 间的区域, k 的取值应使积分区域包括完整的信号。如图 2 所示, 其中第 x_i 区域的面矩为 $g_i(x_{i+1} - x_i)x_i$, 面积为 $g_i(x_{i+1} - x_i)$, 整个信号的重心 x_c 为:

$$x_c = \frac{g_i(x_{i+1} - x_i)x_i}{g_i(x_{i+1} - x_i)} = \frac{g_i \cdot x_i}{g_i} \quad (3)$$

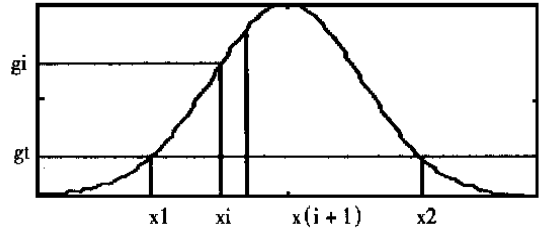


Fig. 2 Centroid sensing method

设 g_i 由信号与噪声两部分组成, 即 $g_i = s_i + n_i$, 代入公式 (3) 可得:

$$x_c = \frac{\sum_i x_i s_i + \sum_i x_i n_i}{\sum_i s_i + \sum_i n_i} = \frac{SNR}{1 + SNR} x_s + \frac{1}{1 + SNR} x_n$$

其中 $SNR = \frac{s_i}{n_i}$; $x_s = \frac{\sum_i x_i s_i}{\sum_i s_i}$; $x_n = \frac{\sum_i x_i n_i}{\sum_i n_i}$; x_s

是信号光斑的实际质心位置, x_n 是噪声引起的质心位置, 探测到的质心位置是 x_s 与 x_n 的加权, 权重与 SNR 有关, 显然 SNR 越大, 质心探测偏差就越小。采取阈值方法, 其目的就是减小噪声质心位置 x_n 的权重, 提高信噪比。一般取 $k = 0.1$, 这时 x_c 的值与在整个信号积分时相差不大。当 $k > 0.1$ 时, x_c 的不稳定性和标准偏差 δ 显著增加^[1]。

由于实际应用时会引进多种噪声, 如光源的不均匀性与波动性, 成像系统的像差, CCD 器件的不均匀性及衍射效应等因素的影响, 都会使信号出现不稳定的尖峰。为滤除高频噪声, 采用了中值滤波法对 A/D 转换信号进行平滑处理。设滤波所选窗宽 $W = 7$, 则滤波窗内 $g_{i-3}, g_{i-2}, g_{i-1}, g_i, g_{i+1}, g_{i+2}, g_{i+3}$ 等 7 个信号值按大小排序后的中值为滤波输出值。

矩心法的测量精度与光斑尺寸及成像质量有很大关系, 成像质量越好, 信号越规则, 测量精度越高。当离焦、衍射效应等因素使成像质量下降时, 测量精度降低。下面给出不同像宽对质心探测精度的影响, 见图 3。

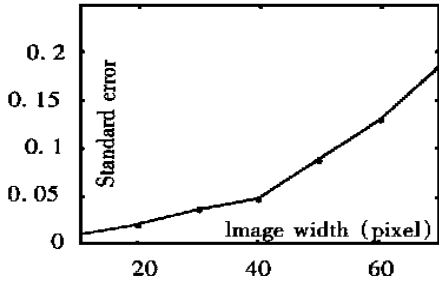


Fig. 3 Effect of image width on measuring error

从图 3 可以看出,在能量一定的情况下,图像光斑尺寸越大,矩心法的测量误差越大。这主要是因为光斑太宽,能量分散,而被分散的能量容易被噪声淹没,造成计算质心时有效信息的减少。如果分散的能量超出了窗口的范围,还会对窗口内质心坐标的计算造成干扰。但图像尺寸也不能小于一个像素。在光斑大小一定的情况下,窗口越大,质心探测精度越高。应用矩心法关键的问题是如何设计高质量的图像和采取怎样的措施来提高信噪比。

在上述检焦系统中,由于五棱镜摆放在相机的通光孔径以内,为了减少遮拦,五棱镜的孔径应尽量小,这样从焦面狭缝处发出的光只有一部分被五棱镜反射回来,能量利用率比较低,所以狭缝不能做得很窄,其宽度应根据信噪比要求和狭缝像所占的像元数来综合进行考虑。狭缝太窄增加了照明难度,狭缝太宽导致光斑信号展宽,能量分散。在多次实验的基础上,综合考虑信噪比和像宽的要求,确定狭缝宽度为 $d = 0.1\text{mm}$,经过五棱镜、成像系统和 2 倍接收系统后狭缝像宽变为

$$d = \left(d + \frac{\lambda}{D}\right)M = 0.4\text{mm}$$

其中, D 为五棱镜的通光孔径, λ 为光源波长, M 为接收系统的放大率。如果 CCD 像元大小为 $7 \times 7\mu\text{m}$, 则成在 CCD 上的狭缝像约占 60 个 CCD 像元。合理选取阈值 g_i 后,不但可以减少计算量,(相当于减小了光斑宽度),而且还能够滤除背景噪声的影响,提高信噪比。

4 实验结果及分析

实验装置的原理样机组合焦距为 2700mm , 相对孔径为 1:5.6, 检焦系统由半导体激光器、分光棱镜、狭缝、五棱镜、分离透镜、调焦用测微平台等组成。两块五棱镜摆放在 1:6.4 的孔径上,五

棱镜的通光孔径为 $20 \times 10\text{mm}$ 的长方孔,接收系统用的两块分离透镜的焦距为 19.6mm , 相对孔径为 1:8.3, CCD 器件采用 TCD106C (5000 像素), 像元大小为 $7 \times 7\mu\text{m}$, CCD 工作时的驱动频率为 500kHz , 信号通过 8 位 A/D 转换送入微机进行计算处理,其采样频率为 1MHz 。因此采样到的每两个点对应着一个 CCD 像元,即 CCD 的每个像元被连续采样两次。当狭缝像沿 CCD 光敏元方向移动 δ 时,计算出移动前后两个位置处的质心 x_{c1} 和 x_{c2} , 则有:

$$\delta = x_{c2} - x_{c1} = \frac{7}{2} \cdot \left[\frac{g_i N_1}{g_i} - \frac{g_j N_2}{g_j} \right]$$

$$= 3.5 \cdot (N_{c2} - N_{c1}) (\mu\text{m}) \quad (4)$$

其中 N_1, N_2 为采样序次, N_{c1}, N_{c2} 为由采样序次表示的光斑重心。从上式中可以看出,提高采样频率可增强对信号的响应性,从而提高测量准确度,但再提高采样频率对测量精度的提高效果并不明显,而且还受到数据采集、存储及计算工作量的限制。

首先在实验室内用其他仪器精确测定相机的焦面位置,此时 CCD 上两狭缝像之间的距离设为相对坐标原点,然后转动测微平台的读数鼓轮每次离焦 $5\mu\text{m}$, 利用公式 (3) 求取光斑质心,从而求得偏移量 δ 。为了利用公式 (2) 计算出离焦量 Δ , 还需要精确测定五棱镜的摆放孔径 D 和接收系统的放大倍率 M , 经测量得 $D/M = 3.6$ 。在每一离焦位置进行 7 次测量,实验数据见表 1, 其中 δ 和 Δ 为 7 次测量的平均值。

Table 1 Experiment data

defocusing $\Delta_0 (\mu\text{m})$	displacement $\delta (\mu\text{m})$	calculation $\Delta =$ $-F\delta M (\mu\text{m})$	error $ \Delta - \Delta_0 $ (μm)	standard error $\sigma (\mu\text{m})$
15	3.75	13.5	1.5	0.38
10	2.97	10.7	0.7	0.35
5	1.56	5.6	0.6	0.28
0	0	0	0	0.25
-5	-1.47	-5.3	0.3	0.27
-10	-2.33	-8.4	1.6	0.32
-15	-3.86	-13.9	1.1	0.35

从表 1 中数据可以看出,测量值的分散程度在 $0.25\mu\text{m} \sim 0.38\mu\text{m}$ 之间,且几组数据间的相互偏差小于 $0.15\mu\text{m}$, 说明该检焦系统精密度高,重复性好,但与参考测量值存在 $2.4\mu\text{m}$ 的系统误差。这一系统误差主要来源于以下几个方面:

- 1) 焦面标定本身的不确定度。实验中采用 0.2 测角仪和标准五棱镜组成的光学系统测量相机

焦距, 离焦量不大时近似有: $\frac{\Delta}{f} = 2 \cdot \beta \cdot F$, 其中 β 为出射光线的角度, $F = D/f$, 对于 $f = 2700\text{mm}$, $F = 5.6$ 的物镜, $\Delta = 0.2 \times 5.6 \times 2700 = 0.015\text{mm}$ 。对长焦距相机来说, 这样的测量精度不能满足要求, 为此, 将离散的灰度值拟合成准连续的灰度分布, 应用插值技术, 该项标定误差做到了小于 $1/5$ 像元。

2) 相对孔径与接收系统放大倍率 M 的测量误差所引起的计算误差。

3) 光路调整及光学零件加工误差带来的测量误差, 由于实验条件的限制, 调整时, 只能取 CCD 输出最大时作为理想位置, 这不能保证是理论像面位置, 但其主光线位置关系不会发生变化, 因而对结果影响不大。五棱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) 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。

从表 1 中可以看出, 当离焦 $5\mu\text{m}$ 时, 本方法已能清楚地分辨出焦面的变化, 若相机焦距 $f = 2700\text{mm}$, 则其焦深为 $\pm 30\mu\text{m}$, 所以 $5\mu\text{m}$ 的检测分辨力是可以满足要求的。

测量的重复性对检焦系统非常关键, 该项误差主要来源于以下几方面:

1) 光源波动带来的影响。由于半导体激光器的输出光强随温度、电压的变化而变化, 并且在光斑截面内的光强分布不均匀以及 CCD 响应不一致、电路噪声等原因, 导致从 CCD 出来的电信号脉冲幅值大小不一, 形成多个不稳定的尖峰, 这样 CCD 采得的与某一幅值对应的点每次采样不是同一点, 产生 CCD 信号采集误差。而重心法对将近 100 个点加权平均, 可显著降低每个点对整

个信号的敏感程度, 提高测量值的稳定性和重复精度。从这一点可以看出重心法的优点。

2) 温度变化带来的误差。温度变化导致 CCD 像元大小和形状发生变化, 引起测量误差。在结构设计上应选用线胀系数与 CCD 器件相匹配的材料, 减小变形。温度变化还会使调整好的光路偏离最佳状态, 使光斑能量分布发生变化, 引起重心法的测量误差。

3) 振动产生的误差。振动对位置测量的影响是很复杂的, 根据幅值、相位及频率的不同, 它产生的误差是随机的。如果在积分期间五棱镜位置或相机焦距发生变化, 将产生像模糊, 而 CCD 像元输出的是平均值, 并不能反映出实际的位置变化。振动还会使整个系统的稳定性降低。所以检焦系统应用到空间相机时, 还需要合理的结构设计。

4) 空气扰动的影响, 由于折射率发生变化, 使狭缝像在 CCD 光敏面上摆动, 这项误差在实际工况下很小。

5 结 论

理论分析和在原理样机上的实验结果表明, 五棱镜自准法自动检焦系统具有以下优点: 1) 避免了使用大平面反射镜的装调环节与机构, 减轻了相机重量和技术上的难度; 2) 把对相机焦距的测量转化为 CCD 上两光斑中心之间距离的测量, 有利于对信号的后续处理; 3) 合理选取阈值和采用平滑滤波技术对信号预处理, 采用重心法测量离焦量具有重复精度高、稳定性好等优点, 可以达到 $5\mu\text{m}$ 以内的检焦分辨能力; 4) 可与调焦系统构成闭环, 实时进行检调焦; 5) 结构紧凑, 便于安装与应用。

参考文献:

- [1] 李静, 李为民, 等. 重心法在光电信号处理中的应用[J]. 光学技术, 1999(3): 57-59.
- [2] Jennison P, Gregoris L G. A self imaging technique for focussing an IR telescope[J]. Proc. SPIE, 1990, 1309: 245-256.
- [3] Alexander Brian F, Ng Kim Chew. Elimination of systematic error in subpixel accuracy centroid estimation[J]. OPTICAL ENGINEERING, 1991, 30(9): 1321-1331.
- [4] 刘有恒. 信号检测与估计[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1989.
- [5] 李清军, 谭谦. 一种新型视频视焦方法研究[J]. 光学 精密工程, 1998, 6(3): 105-109.

Application of centroid sensing method in real-time autofocusing system used in space camera

LI Zhao-hui, WU Ke-yong

(*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130021, China*)

Abstract: Auto-focusing technique is an important method for ensuring high quality image of space camera. In order to refocus in-flight for space camera, a precise auto-focusing system with auto-collimatic method is introduced, in which two pentagonal prisms are substituted for a large mirror, a low power laser is used as the light source and CCD as photoelectric converting device. This system has compact structure and reliable properties. The resolution of the whole measuring system has been improved by the use of signal processing techniques in centroid sensing method such as choosing threshold and data smoothing, the experiments show that the measuring resolution is less than $5\mu\text{m}$.

Key words: centroid sensing method; space camera; pentagonal prism; autofocusing

作者简介: 李朝辉(1969-), 男, 吉林省双辽市人。1994年毕业于长春光学精密机械学院光电工程系光学仪器专业并获取硕士学位, 现为中科院长春光机所博士生, 主要从事空间光学传感器的研制工作。