

文章编号: 1002-2082(2008)03-0380-05

小视场长焦距镜头畸变高精度测量研究

赵建科, 周艳

(中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119)

摘要: 利用由精密测角仪、显微摄像测量系统、微型双光栅平面干涉仪、平行光管以及星点组成畸变测量系统, 对小视场长焦距的镜头进行畸变测量。在计算镜头畸变中, 利用中心视场区域内畸变设计无穷小, 采用三次多项式拟和的方法, 计算镜头理论焦距; 在边视场采用像高次方和视场角正弦高次方加权平均的方法对测量偏差角进行修正, 得到各视场的相对和绝对畸变。通过实际测量和计算验证, 镜头全视场畸变测量精度可达到0.02%。

关键词: 小视场; 畸变测量; 质心法; 精度分析

中图分类号: TB851

文献标志码: A

High precision distortion measurement of NFOV long-focus lens

ZHAO Jian-ke, ZHOU Yan

(Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, CAS, Xi'an 710119, China)

Abstract: A distortion measurement system, which is composed of high-precision goniometer, microscope measurement system, mini double-grating interferometer, collimator and star point, is used to measure the distortion of the NFOV long-focus lens precisely. Using third order polynomial fitting in center area of FOV, the theory focal length also can be computed. The measured deviation angle was corrected with the weighted mean of the high order of image height and the sine of the view angle at the edge field to acquire the relative and absolute distortion of each FOV. The results of the actual measurement and calculation show that the measurement accuracy of full FOV distortion can reach 0.02%.

Key words: narrow field of view; distortion measurement; centroid method; precision analysis

引言

近年来人们对于短焦距、大视场镜头畸变测量方法的研究已非常成熟^[1-4]。随着航天、航空用相机对测量高精度的需求日益迫切, 对小视场、长焦距镜头的畸变研究有了更高的要求; 对于畸变的测量精度亦提出了更高的要求。以前测量畸变常用的方法是精密测角法^[5-6], 即在镜头像面安装标准网格板, 将镜头固定在精密转台回转中心, 镜头物方用望远镜观察网格板经镜头所成的像, 用转台测量每

个像高对应的角度, 反向计算出不同视场的实际像高, 从而得到镜头畸变。此方法主要是以像面理论像高为基准进行测量, 其主要误差有网格板的装夹偏心误差、刻线误差、人眼瞄准误差、网格板离焦误差及转台测量角度误差等。同时该方法主要靠人眼来瞄准, 仅适用于可见光测量。本文提出采用星点法在镜头像面的不同视场直接测量星点像的弥散圆中心坐标, 通过计算不同视场的像高来计算镜头畸变。该方法也适用于近红外光学镜头的畸变测量。

收稿日期: 2007-11-21; 修回日期: 2008-01-31

作者简介: 赵建科(1975—), 男, 陕西眉县人, 副研究员, 主要从事光学仪器的检测技术研究工作。E-mail: zjk@opt.ac.cn

1 畸变测量方法介绍

利用带有摄像显微镜的 CCD 探测器、精密导轨、高精度测长仪和高精度数显转台组成 CCD 测量系统。以精密测角仪转动角度为标准,用 CCD 测量系统系统地测量不同视场实际像高,计算镜头不同视场畸变。此测量方法的主要误差包括精密测角仪的测角误差、显微摄像系统放大率的标定误差、图像判读误差及微型双光栅平面干涉仪的长度测量误差,其中显微摄像系统放大率的标定误差和图像判读误差是相关的。

图 1 所示,首先将满足测试要求的星点放在平行光管焦面上,用激光光源照明平行光管焦面上的星点,形成无穷远点目标。通过专用夹具将镜头固定在测角仪上,调整被测镜头的位置,使其入瞳穿过测角仪回转中心,调整 CCD 测量系统的接收面使其位于被测镜头的像面。由于 CCD 测量系统视场有限,为了满足轴外视场测量的需要,将 CCD 测量系统放置在精密移动导轨上。转动测角仪得到标准角度,并移动导轨在镜头的相应视场采集图像,同时记录高精度测长仪的数字信息和显微镜的图像信息及测角仪对应的角度信息。通过软件判读星点像的能量中心位置,结合测长仪的长度信息计算镜头实际像高,并根据畸变公式计算镜头不同视场的畸变。

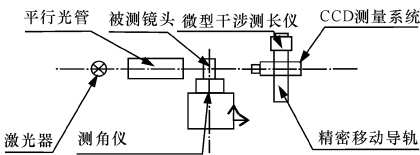


图 1 畸变测试示意图

Fig. 1 Scheme of distortion measurement

2 畸变计算方法

在设计小视场长焦距测量镜头时,为了使全视场的畸变达到最小,因此使中心视场(0.3ω)畸变趋于无穷小。如果采用常规的不同视场角加权计算理论焦距,由于视场角较小,存在测量误差,将会导致中心视场测量数据偏大,与设计值产生矛盾;如果采用全视场畸变和为零或最小二乘法^[7]计算理论焦距,就会损失中心视场拉平边缘视场,导致测量的畸变与实际设计畸变不符,在中心视场产生错误的的数据。因此本文在计算理论焦距时,依据设计

要求镜头视场中心要求区域畸变无穷小,我们采用多项式拟和的方法计算镜头理论焦距 f_i ,消除了镜头装夹及 CCD 中心位置测点偏心和小区域不同测量点的误差对理论焦距的影响。

测量时在镜头视场中心区域选定视场左右对称的视场角,测角仪转动的角度为 ω_i 和 ω'_i ($\omega_i \leq 0.3\omega$, $i \geq 6$, ω 为视场),摄像测量显微镜读取星点通过镜头成像的点目标中心坐标为 (x_i, y_i) 和 (x'_i, y'_i) ,同时记录测长仪移动的距离 l_i 。

2.1 对应各视场的焦距

计算公式如下:

$$f_i = \frac{(x_i, y_i) \times s \pm l_i}{\tan \omega_i} \quad (1)$$

$$f'_i = \frac{(x'_i, y'_i) \times s \pm l'_i}{\tan \omega'_i}$$

式中: s 为显微测量系统 CCD 像元尺寸; i 为测量的不同视场。

用三次多项式拟和后理论焦距为

$$f = a_1 * f_{\omega_3}^3 + a_2 * f_{\omega_2}^2 + a_3 * f_{\omega_1}^1 + a_4 + a_5 * f_{\omega_1}^1 + a_6 * f_{\omega_2}^2 + a_7 * f_{\omega_3}^3 \quad (2)$$

式中: f_{ω_i} 为不同视场计算的焦距值; a_i 为不同视场的加权系数。

2.2 实际测量像高引起的偏心误差计算

偏心角公式:

$$\tan \theta_i = \frac{f}{h_{ix}} - \frac{f}{h_{iy}} \quad (3)$$

式中: $(h_{ix}, h_{iy}) = (x_i, y_i) \times s \pm l_i$ 。

由于测量镜头视场较小,直接用(3)式计算得到的偏心角对畸变进行修正,会产生较大的误差^[8]。针对不同视场角采用不同的加权因子进行偏心角修正,就会减小因偏心角计算不当而带来的计算误差。对于测量角视场较小而线视场较大的长焦距镜头畸变,采用视场角加权因子或像高加权因子对偏心角进行修正,总计算的偏心角如下:

$$\tan (\theta_x, \theta_y) = \frac{\sum_{i=1}^n \tan \theta_i \times \sin \omega_i^4}{\sum_{i=1}^n \sin \omega_i^4} \quad (4)$$

$$\tan (\theta_x, \theta_y) = \frac{\sum_{i=1}^n \tan \theta_i \times h_i^4}{\sum_{i=1}^n h_i^4} \quad (5)$$

式中: n 为测量的点数; θ_x, θ_y 表示不同方向的偏心角。

2.3 测量引起的偏心量

偏心量计算如下:

$$(x_0, y_0) = f \times \tan(\theta_x, \theta_y) \quad (6)$$

2.4 偏心量修正后的畸变

畸变结果如下:

$$\delta_{jxl} = h_{jxl} + x_0 - f \times \tan(\omega_{jx} + \theta_x) \quad (7)$$

$$\delta_{jxr} = h_{jxr} + x_0 - f \times \tan(\omega_{jx} - \theta_x) \quad (8)$$

$$\delta_{jyl} = h_{jyl} + y_0 - f \times \tan(\omega_{jy} + \theta_y) \quad (9)$$

$$\delta_{jyr} = h_{jyr} + x_0 - f \times \tan(\omega_{jy} - \theta_y) \quad (10)$$

3 图像判读

由于面阵探测器所获得的图像已不是原始的和连续的目标像点的映射,而是一个离散近似。因此对目标图像的处理要从数字化图像出发,采用质心法或加权质心法计算目标中心(目标大小一般为 3×3 个像元为最佳)。

3.1 质心法

若目标像点分布在一个矩形窗口内,窗口左上角像元坐标为 (p_1, q_1) , 右下角像元坐标为 (p_2, q_2) , 则它的质心位置计算式如下:

$$x = \frac{\sum_{i=p_1}^{p_2} \sum_{j=q_1}^{q_2} if(i, j)}{\sum_{i=p_1}^{p_2} \sum_{j=q_1}^{q_2} f(i, j)}; \quad y = \frac{\sum_{i=p_1}^{p_2} \sum_{j=q_1}^{q_2} jf(i, j)}{\sum_{i=p_1}^{p_2} \sum_{j=q_1}^{q_2} f(i, j)} \quad (11)$$

式中: (x, y) 为目标像点质心坐标估计值; $f(x, y)$ 为 (i, j) 处像元的灰度值。

由于目标像点近似呈高斯分布,采用质心法估

计图像点灰度值时,过多依赖于峰值两侧的弱信号,而未充分利用更高信噪比的图像中心信息,而造成质心法抗干扰噪声能力减弱。因此应根据图像中目标像点所处的位置选用适当的阈值和像点图像窗口大小,使用前须将目标图像内各像素的灰度值减去其所处图像局部区域的背景灰度值后进行计算。

3.2 加权质心法

计算公式如下:

$$x = \frac{\sum_{i=p_1}^{p_2} \sum_{j=q_1}^{q_2} if^2(i, j)}{\sum_{i=p_1}^{p_2} \sum_{j=q_1}^{q_2} f^2(i, j)}; \quad y = \frac{\sum_{i=p_1}^{p_2} \sum_{j=q_1}^{q_2} jf^2(i, j)}{\sum_{i=p_1}^{p_2} \sum_{j=q_1}^{q_2} f^2(i, j)} \quad (12)$$

由(12)式可知: (i, j) 处像元的灰度值权值 $f(x, y)$ 的绝对值比质心法增加了 $|f(i, j)|$ 倍,这说明加权质心法比质心法更多地利用了高信噪比的目标图像中心信息,增强了算法的抗干扰能力。

4 误差分析

由畸变公式可以得出,测量误差主要来源于实际像高的测量误差和理论焦距的测量误差。实际像高 h_i 是由精密导轨的位移 l_{i1} 和星点像在 CCD 像面的位移 l_{i2} 合成而得到,因此(1)式可转换为

$$f'_i = \frac{l_{i1} + l_{i2}}{\tan \omega_i} \quad (13)$$

于是可得到焦距的测量均方误差 $\sigma(f')$:

$$\sigma(f'_i) = \pm f'_i \times \sqrt{\left(\frac{1}{l_{i1}}\right)^2 \cdot \sigma^2(l_{i1}) + \left(\frac{1}{l_{i2}}\right)^2 \sigma^2(l_{i2}) + \left(\frac{2}{\sin 2\omega_i}\right)^2 \sigma^2(\omega)} \quad (14)$$

选用焦距为 2 000 mm 的平行光管,焦面置于直径为 0.02 mm 的星点板(经过焦距 180 mm 光学系统后星点像大小为 $1.8 \mu\text{m}$)上, CCD 像元尺寸是 $6.0 \mu\text{m}$, 在 100 倍光学放大倍率下,像点可被放大为 $180 \mu\text{m}$ 。同时 1 个像元的分辨率可提高为 $6.0/100 = 0.06 \mu\text{m}$, 此放大的星点可占 30 个像元,同时像点的能量减弱并弥散开。为了提高判读精度,采用质心加权的算法选定特定区域星点弥散的域值,并对 CCD 像元进行 1/10 细分,且判读误差符合正态分布,根据星点能量分布判读其最大误差:

$$\sigma_{lx} = \sqrt{3} \times 0.006 = 0.01 \mu\text{m}$$

显微摄像系统不同视场的放大率(即显微摄像

系统畸变)的标定采用微型干涉测长仪和星点来进行,星点移动的量通过干涉仪测量,同时显微摄像系统拍摄星点图象并判读星点移动的距离。计算显微摄像系统不同视场的放大率,其误差主要由图像判读误差影响。由于所采用的摄像镜头在 100 倍放大倍率时,物方线视场为 $0.43 \text{ mm} \times 0.28 \text{ mm}$, 各视场产生的畸变可以忽略不计。因此判读误差对测量的总影响为

$$\sigma_{l_2} = \sqrt{2} \times \sigma_{lx} = \sqrt{2} \times 0.01 = 0.015 \mu\text{m}$$

精密导轨的位移 l_{i1} 的测量通过微型双光束平面镜干涉仪同导轨组合来实现。将干涉仪的移动镜固联在精密导轨一端,固定在导轨另一端的为激光

发生器,通过光缆与传感器测头进行耦合,干涉仪将移动镜的运动转换为—对光学干涉信号,再传到信号处理/电源供给单元进行处理,计算出相应的位移,微型双光束平面镜干涉仪的长度测量误差 $\sigma_{l_i} = 10 \text{ nm}$,测角仪的测角误差 $\sigma(\omega) = 0.5''$ 。

由以上分析可以看出,判读误差和微型干涉仪测长误差相当,则有关系式:

$$\frac{\sigma(f')}{f} = \pm \sqrt{2\left(\frac{1}{l_i}\right)^2 \cdot \sigma^2(l_i) + \left(\frac{2}{\sin 2\omega_i}\right)^2 \sigma^2(\omega)} \quad (15)$$

5 实验验证

用焦距为 180 mm, $2\omega = 14^\circ$, 线视场为 45 mm 的摄影镜头,设计要求全视场相对畸变小于 0.02%。用误差公式(15)分析中心各视场像高对应的焦距测量误差,如表 1 所示,镜头各视场理论设计畸变、实际测量畸变如表 2 和表 3 所示。

表 1 镜头中心视场焦距误差分析

Table 1 Focal length errors in central FOV of lens obtained by analysis

视场角/(°)	像高/mm	$\frac{\delta f_i}{f_i}/(\%)$
0	0	0
-0.6	1.88	0.020
-0.8	2.50	0.017
-1.0	3.14	0.002
0.6	1.89	0.025
0.8	2.52	0.021
1.0	3.12	0.019

用三次多项式拟和后的理论焦距误差

$$\frac{\delta f}{f} = 0.018\%$$

表 2 左侧视场镜头畸变计算结果

Table 2 Calculated results of lens distortion in left-side FOV

左半视场实际测量像高/mm	理论设计相对畸变/(%)	实测相对畸变(偏心角不修正)/(%)	实测相对畸变(偏心角像高加权修正)/(%)	实测相对畸变(偏心角角度加权修正)/(%)
22.208 9	0.020	0.016	0.018	0.019
20.608 2	0.019	0.016	0.018	0.019
19.01	0.018	0.013	0.014	0.015
17.415 6	0.016	0.013	0.015	0.015
15.823 5	0.014	0.011	0.013	0.013
14.235 2	0.012	0.019	0.02	0.02
12.646 4	0.010	0.006	0.007	0.008
11.060 6	0.008	0.00	0.001	0.002
9.477 5	0.006	0.002	0.003	0.003
6.315	0.003	0.002	0.003	0.003
3.157 4	0.000 9	0.031	0.031	0.031

表 3 右半视场镜头畸变计算结果

Table 3 Calculated results of lens distortion in right-side FOV

右半视场实际测量像高/mm	设计相对畸变/(%)	实测相对畸变(偏心角不修正)/(%)	实测相对畸变(偏心角像高加权修正)/(%)	实测相对畸变(偏心角角度加权修正)/(%)
22.206 1	0.020	0.023	0.021	0.020
20.606 5	0.019	0.026	0.024	0.023
19.007 9	0.018	0.018	0.017	0.016
17.413 4	0.016	0.016	0.014	0.013
15.822 2	0.014	0.017	0.016	0.015
14.232 1	0.012	0.010	0.009	0.008
12.644 7	0.010	0.004	0.003	0.002
11.059 7	0.008	0.002	0.001	0.001
9.476 9	0.006	0.004	0.004	0.003
6.314 2	0.003	-0.005	-0.006	-0.006
3.155 5	0.000 9	-0.028	-0.028	-0.002 8

6 结论

在小视场长焦距镜头畸变计算中,理论焦距的计算方法和中心区域测量点的选取十分重要,如果对测量点的选择不恰当或计算的模型选择不正确将不会得出高精度并与设计值吻合的畸变值。另一方面,由于实际测量的中心和理论光轴不重合,对小视场长焦距镜头畸变的影响也是非常大的。因此,偏心角的修正采用角度正弦高次方加权平均和像高高次方加权平均的方法计算并进行修正,可以使畸变计算误差与理论设计值接近并且使左右视场相互对称。此方法测量的主要瓶颈在于精密测角仪的精度,计算理论焦距方法的关键在于镜头视场中心区域的选择和测量点的合理选取。

参考文献:

- [1] 行麦玲,刘贱平,林家明,等.大视场短焦距镜头 CCD 摄像系统的畸变校正[J].光学技术,2003,29(3):377-379.
XING Mai-ling, LIU Jian-ping, LIN Jia-ming, et al. Distortion measurement of CCD camera with a large-field, short focal length lens[J]. Optical Technique, 2003, 29(3):377-379. (in Chinese)
- [2] 王虎,苗兴华,惠彬.短焦距大视场光学系统的畸变校正[J].光子学报,2001,30(11):1409-1412.
WANG Hu, MIAO Xing-hua, HUI Bin. The distortion correct of short focus wide-angle optical system[J]. Acta Photonica Sinical, 2001, 30(11): 1409-1412. (in Chinese)

- [3] 王虎,赵建科,汶德胜.一种超宽视场光学系统的畸变测量方法及畸变校正[J].光学技术,2003,29(5):599-603.
WANG Hu, ZHAO Jian-ke, WEN De-sheng. A distortion measuring method and distortion correct of superwide-view field optical system [J]. Optical Technique,2003, 29(5):599-603. (in Chinese)
- [4] 马韬,沈亦兵.大视场投影光刻物镜的畸变特性检测[J].光子学报,2005,34(1):46-49.
MA Tao, SHEN Yi-bing. Distortion detect of large field projection lithography lens[J]. Acta Photonica Sinica,2005, 34(1):46-49. (in Chinese)
- [5] 浦昭邦,陶卫,张琢.角度测量的光学方法[J].光学技术,2002,28(2):168-171.
PU Zhao-bang, TAO Wei, ZHANG Zhuo. Angle measurement with optical methods [J]. Optical Technique,2002,28(2):168-171. (in Chinese)
- [6] 陶卫,浦昭邦,孙运斌.角度测量技术的发展[J].激光杂志,2002,23(2):5-7.
TAO Wei, PU Zhao-bang, SUN Yun-bin. The development of angle measurement technique [J]. Laser Journal,2002,23(2):5-7. (in Chinese)
- [7] 吴旭,范天泉,罗名容,等.超广角光学镜头畸变的约束最小二乘优化[J].光电工程,2004,31(1):26-28.
WU Xu, FAN Tian-quan, LUO Ming-rong, et al. Constraint least square optimization for distortion of an ultra-wide-angle optical lens[J]. Opto-Electronic Engineering, 2004,31(1):26-28. (in Chinese)
- [8] 魏新国,张广军,江洁星.敏感器中星图图像的星体细分定位方法研究[J].北京航空航天大学学报,2003,29(9):812-815.
WEI Xin-guo, ZHANG Guang-jun, JIANG Jie. Subdivided locating method of star image for star sensor [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2003,29(9):812-815. (in Chinese)