

文章编号: 1001-3806(2011)05-0593-03

基于星点法的小视场镜头畸变测量研究

许维星^{1,2}, 乔卫东¹, 杨建峰¹, 葛伟¹, 薛彬¹, 马丽华³

(1. 中国科学院 西安光学精密机械研究所 光谱成像技术实验室, 西安 710119; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039; 3. 空军工程大学 电讯工程学院, 西安 710051)

摘要: 为了研究采用星点法的小视场镜头畸变测量, 选择星点像中心判读和星点选择两方面作为切入点。针对星点像中心判读, 在对比了传统的质心算法的基础上, 采用将最大类间方差算法与重心计算相结合的方法以提高星点定位的准确性。针对星点选择, 为保证星点定位的稳定性以及畸变计算的精准度, 用实验方法分析了星点大小的不同对于畸变测量中星点像定位稳定性的影响, 选择整个视场内同一水平线下不同位置的 y 坐标值均方差为 $1/71$ 像元的星点进行实验, 通过实验测得了实际镜头的绝对畸变和相对畸变。结果表明, 该方法测得的镜头畸变精度高, 可达到航天级应用要求。

关键词: 图像处理; 小视场; 畸变测量; 重心计算; 最大类间方差算法; 星点选择

中图分类号: O436 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2011.05.005

Study about distortion measurement of NFOV lens based on star point method

XU Wei-xing^{1,2}, QIAO Wei-dong¹, YANG Jian-feng¹, GE Wei¹, XUE Bin¹, MA Li-hua³

(1. Spectral Imaging Technique Laboratory, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China; 2. Graduate University, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China; 3. Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: In order to measure the distortion of the narrow field of view (NFOV) lens by means of star point method, both star point center orientation and star size, affecting the accuracy of the distortion measurement, were studied. First of all, in order to improve the star positioning accuracy, Otsu algorithm and the barycenter calculation were combined to calculate the location of star point. At the same time, the calculated results were compared with the traditional centroid algorithm. Then, the effect of the star size on the stability of the star point positioning was analyzed in the experiments. Finally, the absolute and relative distortion of the lens was measured for the star points whose mean square error of coordinates is $1/71$ pixel. The results show that the distortion of the NFOV lens can be measured with high precision and this method can meet space application.

Key words: image processing; narrow field of view; distortion measurement; gravity calculation; Otsu algorithm; star choice

引言

随着航空、航天技术的发展, 对星载 CCD 相机的测量精度要求越来越高, 特别是对于小视场镜头畸变的测量提出了更高的要求。鉴于大视场镜头畸变测量技术的发展已经趋于成熟^[1-5], 小视场镜头畸变的测量精度的提高成为当前研究的重点问题。常用的畸变测量方法主要有精密测长法^[6]和星点法^[7]。精密测长法是对标定过的标准网格板进行拍摄, 然后利用测量

显微镜或比长仪测量目标图案像, 通过比较计算得到的理想像求得畸变值。星点法是首先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, 再通过计算不同视场的像高来计算镜头畸变。考虑到在小视场情况下, 精密测长法所使用的标准模板的制作精度大大制约了畸变测量的精度, 此时星点法就显得更为有效。因此, 研究如何提高星点法测量的精准度对于小视场畸变测量具有重要意义。

作者首先对实验所构建的星点法畸变测量平台的总体结构和工作过程进行了说明, 并简要介绍了星点法测量畸变的计算, 然后重点描述了所采用的星点像中心判读方法, 此方法将目标分割算法与重心算法相结合以提高定位精度、减少运算量, 同时分析了实验中星点选择对判读稳定性的影响, 最后通过实际镜头畸变测量, 验证了该测量方法的有效性和合理性。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60808028)

作者简介: 许维星(1984-), 女, 硕士, 主要从事机载与星载光电信息处理方面的研究。

E-mail: xuweixing2008@126.com

收稿日期: 2010-11-17; 收到修改稿日期: 2011-01-06

1 畸变测量方法简介

畸变测量平台主要由以下几部分组成:高精度转台、单轴速率位置转台控制单元、双坐标自准值仪、平行光管、发光二极管(light emitting diode, LED)光源及星点板,如图1所示。首先将符合测试要求大小的星

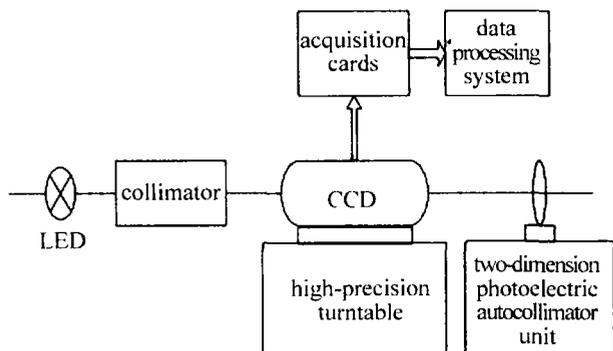


Fig. 1 Schematic diagram of measurement

点板安置在平行光管焦面上,使用LED光源照明平行光管焦面上的星点以模拟无穷远点目标。然后将镜头固定在高精度转台上,转台定位精度为 $1''$,调整被测镜头的位置,使整个光路处于 0° 视场,此时星点像即为基准像点。控制转台进行旋转,采集每个位置对应的星点图,转动间隔为 0.5° 。再使用精度为 $0.1''$ 的双坐标自准值仪记录转台的实际转动角度。最后在数据处理系统中计算不同视场的像高,进而得出所测量的镜头畸变。在使用星点法测量畸变的过程中,通过采集不同视场位置的星点像,然后比较实测像高与理论像高,差值即为绝对畸变。相对畸变为绝对畸变除以理论像高得到的百分比。实测像高是星点在不同视场位置的弥散圆中心坐标与基准像点中心坐标的差值。理论像高的计算公式如下:

$$l = f \times \tan \theta \quad (1)$$

式中, l 为理论像高, f 为理论焦距, θ 为相对于基准像点转动的角度。 f 可利用最小二乘法^[8]计算得到,计算中需要用到星点像弥散圆的中心坐标值。

2 星点像中心判读

在计算畸变的过程中,实测像高和理论像高的计算都与星点像弥散圆的中心坐标值有着密切关系。因此,畸变的测量精度会受到星点像弥散圆的中心坐标值的准确性的影响。

在判读中心坐标时,通常使用传统质心法或质心加权法^[9]。这两种方法在计算星点像中心时都是直接使用灰度值进行运算,受星点像弥散圆的灰度分布均匀性的影响较大。因此,笔者提出先使用最大类间方差算法对星点像进行目标分割,再通过重心计算得

出目标的中心坐标值,大大降低了灰度分布均匀性对判读精度的影响。

目标分割就是按照一定的阈值对图像进行处理,以区分图像中的目标和背景。对图像进行分割可以获得以下几个好处,首先对于目标以外的点可以直接去除,其次可以使目标上各点权重一致,防止由于目标图像弥散较大时灰度不均匀影响定位计算的精度,再次在分割的同时按照同一标准划分了目标物体的边界,最后分割还可以简化目标坐标的计算,减少运算量。目标分割公式如下所示:

$$f(i,j) = \begin{cases} 0, & (f(i,j) < t) \\ 1, & (f(i,j) \geq t) \end{cases} \quad (2)$$

式中, t 为使用最大类间方差法计算得到的自适应阈值, $f(i,j)$ 为被分割图像。

最大类间方差法的原理是按照图像的灰度特性将图像分成背景和背景两部分,背景和背景之间的类间方差越大,则构成图像的两部分的差别越大,部分目标错分为背景或部分背景错分为目标都会导致两部分的差别变小,因此,使类间方差达到最大的分割意味着此时的错分概率最小。基于以上原理,假设 t 为目标与背景的分割阈值,目标点数和背景点数所占的图像比例分别为 w_0 和 w_1 ,其平均灰度值分别为 u_0 和 u_1 ,则由下式可计算得到图像的总平均灰度值 u ,然后从最小灰度值到最大灰度值遍历 t :

$$u = w_0 \times u_0 + w_1 \times u_1 \quad (3)$$

当下式中的 g 值达到最大时,即可得到最佳阈值:

$$g = w_0 \times (u_0 - u)^2 + w_1 \times (u_1 - u)^2 \quad (4)$$

考虑到目标分割后,背景的像素值被置为0,可以使用重心来代替星点像弥散圆的中心,从而通过计算重心坐标来定位星点在图像中的位置,计算公式如下所示:

$$X_c = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i \quad (5)$$

$$Y_c = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Y_i \quad (6)$$

式中, X_c 和 Y_c 为2维重心坐标值, X_i 和 Y_i 为第 i 个像元的 (x, y) 坐标值, N 为目标像元个数。

在测量畸变过程中,同时进行了上述将目标分割和重心算法相结合的新方法和传统的质心算法的对比实验。由于大气抖动等实际实验环境的制约,同一位置在不同时刻采集到的星点的中心坐标会有微小差异,采用不同算法得到的中心坐标如果越统一,则此算法也就越适合本实验,采用此算法所得的畸变值越精确。实验中,在全视场同一水平线上的任意4个位置采集星点图像,每个位置采集10帧,

分别用两种算法计算星点中心的 x 坐标, 数据处理结果如表 1 所示。从表 1 中的结果可以看出, 比较传统的质心算法, 新算法处理的同一位置的 10 帧星

点中心坐标的标准差要小得多, 说明采用此算法比质心算法提高了中心判读的精准度, 从而提高了畸变测量的精准度。

Table 1 Comparison results of different algorithm

x -axis frames number	image position 1		image position 2		image position 3		image position 4	
	new algorithm	centroid algorithm						
1	677.4623	677.9182	727.2007	727.3956	776.943	776.2355	826.7051	826.5138
2	677.4701	677.4744	727.2209	727.3046	776.9306	776.6637	826.7097	826.4046
3	677.4623	677.5542	727.229	727.753	776.9463	776.626	826.6766	826.4661
4	677.4868	677.0858	727.2291	727.9006	776.953	776.413	826.6436	826.3279
5	677.4701	677.5622	727.26	727.4906	776.9377	776.5962	826.6569	826.445
6	677.4701	677.6136	727.2626	727.9783	776.9198	776.6306	826.6904	826.1446
7	677.4768	677.3357	727.2552	727.7351	776.9378	776.6377	826.6756	826.9583
8	677.4585	677.6059	727.2428	727.5408	776.9426	776.4301	826.6865	826.2995
9	677.4768	677.1389	727.2477	727.596	776.9399	776.6393	826.6675	826.1247
10	677.4683	677.363	727.2476	727.3731	776.9296	776.661	826.6889	826.5031
mean	677.4702	677.4652	727.2396	727.6068	776.938	776.5533	826.6801	826.4188
standard deviation	0.008354	0.245428	0.019476	0.228693	0.00943	0.144241	0.020514	0.234386

3 星点选择

为了验证星点大小对畸变测量稳定性的影响, 选择像面直径分别为 30 像元、70 像元和 150 像元的星点进行畸变测量实验。转台从基准像点处沿 x 轴分别向左向右间隔 0.5° 转动并采集一幅图像, 计算不同大小星点在各个不同视场位置的中心坐标, 由于转台沿水平方向转动, 各个不同位置的 y 坐标值应为固定值。考虑到大气抖动^[10]等客观因素的影响, 各个位置的 y 坐标会产生一定的浮动。

根据所测得的实验数据, 对 3 种不同星点大小情况下 y 坐标的误差进行计算, 结果如表 2 所示。30 像元星点的均方根误差虽然比较小, 但其误差浮动大, 最大误差达到 0.04, 即 1/25 像元。150 像元星点的误差浮动最小, 且其均方根误差为 0.014, 即 1/71 像元, 最大误差为 0.032, 即 1/31 像元, 稳定性最好, 因此在畸变实验时选择像面直径为 150 像元的星点, 以保证星点坐标判读的稳定性。

Table 2 Calculated results of y -coordinate errors

star point type	30-pixel	70-pixel	150-pixel
	star point	star point	star point
y -coordinate root mean square error	0.0139 pixel	0.0161 pixel	0.014 pixel
y -coordinate maximum error	0.04 pixel	0.046 pixel	0.032 pixel

4 畸变测量验证

调整好测量平台各部分装置后, 选择 150 像元大小的星点进行实际镜头畸变测量。首先按照所介绍的测量方法在整个视场内(半视场角为 7°)采集 29 帧星

点图像, 并且记录下相应各个位置的实际角度值。然后采用本文中所提出的实验数据处理方法, 得出星点像在图像中的位置坐标, 最后计算得出绝对和相对畸变的值, 半视场的畸变计算结果如表 3 所示。

Table 3 Calculated results of lens distortion

biew of field/ $^\circ$	image point/mm	absolute distortion/ μm	relative distortion/%	theoretic relative distortion/%
0.5	0.3533	-0.0826	-0.0234	0.0010
1.0	0.7056	0.1471	0.0210	0.0180
1.5	1.0592	0.2055	0.0194	0.0190
2.0	1.4124	0.3261	0.0231	0.0200
2.5	1.7653	0.3407	0.0193	0.0220
3.0	2.1193	0.4249	0.0201	0.0230
3.5	2.4733	0.6035	0.0244	0.0240
4.0	2.8268	0.7717	0.0273	0.0280
4.5	3.1818	0.9221	0.0290	0.0290
5.0	3.5370	1.1318	0.0321	0.0300
5.5	3.8927	1.4000	0.0360	0.0320
6.0	4.2488	1.4000	0.0330	0.0330
6.5	4.6052	2.1000	0.0456	0.0350
7.0	4.9637	1.8000	0.0363	0.0360

5 结论

实验结果表明, 在使用星点法进行小视场畸变测量时, 采用文中所述的星点像中心判读方法, 并且选择像面直径为 150 像元的星点进行实验, 所测得的小视场镜头的绝对畸变最佳可达到 $0.0826\mu\text{m}$, 其相对畸变最佳可达到 0.0193% , 从而证明了此方法在小视场范围内可以达到较高的精度, 符合星载 CCD 相机畸变 (下转第 643 页)

- [2] RICHARD L M, BRENT A M. Using MODIS Terra 250m imagery to map concentrations of total suspended matter in coastal waters [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 93(1/2): 259-266.
- [3] DMITR P, ROBERT S B, KOROSOV A, *et al.* Operational algorithm for the retrieval of water quality in the Great Lakes [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 97(3): 352-370.
- [4] SWARVANU D, RAMENSH P S B, MENAS K. Comparison of global chlorophyll concentrations using MODIS data [J]. *Advances in Space Research*, 2009, 43(7): 1090-1100.
- [5] HELMUT S, ROLAND D. Neural network for emulation of an inverse Model operational derivation of case II water properties from MERIS data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1999, 20(9): 1735-1746.
- [6] XIE G F, ZHAO B J, HAN Y Q. Chaotic weak signal detection in the long range laser rangefinders using neural network [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(5): 449-451 (in Chinese).
- [7] TANG J W, DING J, TIAN J W, *et al.* Neural network models for the retrieval of chlorophyll, total suspended matter, and gelbstoff concentrations of case-II waters in Yellow Sea and East China Sea [J]. *Journal of High Technology Letters*, 2005, 15(3): 83-88 (in Chinese).
- [8] YANG J K, CHEN C Q. An optimal algorithm for the retrieval of chlorophyll, suspended sediments and gelbstoff of case II waters in the Pearl River estuary [J]. *Marine Science Bulletin*, 2009, 11(1): 13-23.
- [9] HAN L, RUNDQUIST D C, LIU L L, *et al.* The spectral responses of algal chlorophyll in water with varying levels of suspended sediment [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1994, 15(18): 3707-3718.
- [10] DUBRAVKO R. Effect of suspended particulate-size distribution on the backscattering ratio in the remote sensing of seawater [J]. *Applied Optics*, 2002, 41(33): 7092-7101.
- [11] YANG J G. Practical course on artificial neural networks [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2001: 41-62 (in Chinese).
- [12] MA J J, QIAO Y L, YANG S Z, *et al.* Using MODIS image to retrieve aerosol optical characteristic over coast of China [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(8): 2039-2045 (in Chinese).
- [13] WANG J C, YANG S Z, MA J J, *et al.* Automatic cloud detection applied to MODIS image in the southeast of China [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2006, 31(3): 270-273 (in Chinese).
- [14] MA J J, TAO A, WANG J C, *et al.* Determination of case II water from coast zone using MODIS image [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007, 32(1): 78-80 (in Chinese).
- [15] WANG P X. Global monsoon in a geological perspective [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(5): 535-556 (in Chinese).
- [16] JIA G D, PENG P A. Temporal and spatial variations in signatures of sedimented organic matter in Lingding Bay (Pearl Estuary), southern China [J]. *Marine Chemistry*, 2003, 82: 47-54.

(上接第 595 页)

测量的精度要求。

参 考 文 献

- [1] XING M L, LIU J P, LIN J M, *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] WANG H, MIAO X H, HUI B. The distortion correct of short focus wide angle optical system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, 30(11): 1409-1412 (in Chinese).
- [3] ZHANG J, ZHU D Y, JIA X D. Camera lens distortion calibration with co-line points [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(2): 221-224 (in Chinese).
- [4] WANG H, ZHAO J K, WEN D Sh. A distortion measuring method and distortion correct of superwide view field optical system [J]. *Optical Technique*, 2003, 29(5): 599-603 (in Chinese).
- [5] MA T, SHEN Y B. Distortion detect of large field projection lithography lens [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(1): 46-49 (in Chinese).
- [6] GUO Y, YANG H, YANG Zh J, *et al.* Distortion measurement of lens in CCD camera system [J]. *Journal of Applied Optics*, 2008, 29(2): 279-282 (in Chinese).
- [7] ZHAO J K, ZHOU Y. High precision distortion measurement of NFOV long-focus lens [J]. *Journal of Applied Optics*, 2008, 29(3): 380-384 (in Chinese).
- [8] WU X, FAN T Q, LUO M R, *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).
- [9] WEI X G, ZHANG G J, JIANG J X. 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).
- [10] GUAN B Zh, CHEN H Q, YE J X, *et al.* Model of beacon used in the air-borne adaptive optical system [J]. *Laser Technology*, 2004, 28(6): 613-615 (in Chinese).