

文章编号:1002-2082(2008)02-0279-04

CCD 摄像系统镜头的畸变测量

郭羽, 杨红, 杨照金, 姜昌录, 于帅

(西安应用光学研究所 国防科工委光学计量一级站, 陕西 西安 710065)

摘要: 从畸变定义出发, 讨论了畸变数学模型, 介绍了精密测角法与比长法综合测量畸变的原理。通过放大率法标定出 CCD 探测器的像素距离当量, 通过质心法求出点目标的质心, 质心与原点的像素距离乘以像素距离当量得到精确长度。利用正切函数求出绝对畸变值, 用最小二乘法解多组数据超定方程, 求出拟和公式的系数。实际计算和数据处理结果表明: 畸变数学模型在中视场范围内拟合效果很好。

关键词: 畸变; 视场; 数学模型; 定位精度

中图分类号: TN06

文献标志码: A

Distortion measurement of lens in CCD camera system

GUO Yu, YANG Hong, YANG Zhao-jin, JIANG Chang-lu, YU Shuai

(State Key Laboratory of Optical Metrology, Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

Abstract: The mathematic model for distortion is discussed. The distortion measurement with a precision goniometer and a bench comparator is introduced. The pixel distance equivalent of the CCD detector was calculated by the magnification method. The centroid of point target was derived by the centroid method. The pixel distance between the centroid and the origin on the image plane was multiplied by the pixel distance equivalent to achieve accurate distance. The absolute distortion was acquired by tangent function. The equation was worked out to calculate the coefficient. The results of the calculation and data processing indicate that the fitting effect of the distortion mathematic model is satisfactory in medium field of view.

Key words: distortion; field of view; mathematic model; position accuracy

引言

具有短焦距大视场镜头的 CCD 摄像系统有很多用途, 如天网摄像、保密防盗、跟踪制导、违章驾驶拍摄等。这种用途的摄像机视场一般都很大, 所以拍摄到的图像会产生很大畸变, 虽然这种像差不影响成像清晰度, 但却影响成像的位置精度。如在星敏感器近紫外-可见光广角镜头中, 焦距 $f' = 9.5 \text{ mm}$, 视场 $2\omega = 70^\circ$, 全视场畸变小于 8%。在导引头光学耦合系统广角耦合物镜中, 焦距 $f' = 113.5 \text{ mm}$, $2\omega = 60^\circ$, 最大畸变小于 1%。由于畸变

造成图像的位置失真, 影响了定位精度, 所以此类系统的畸变校正至关重要。

1 畸变测量

1.1 光学系统畸变的定义

轴外点成像, 无论是宽光束还是细光束都有像差存在, 即使只有主光线通过光学系统, 由于球差的影响, 它仍不能与理想的近轴光一致, 因此主光线与高斯像面交点的高度不等于理想像高, 这种差别就是系统的畸变。

畸变在数值上通常以理想像高 y_0' 和主光线与理想像面相交的实际像高 y' 之差 $\delta y'$ 表示:

$$\delta y' = y' - y_0' = (f' - f_0') \tan \omega \quad (1)$$

式中: f' 和 f_0' 分别为不同视场的焦距和中心视场的焦距; ω 为视场角。

畸变一般分为桶形畸变和枕形畸变,如图1所示。

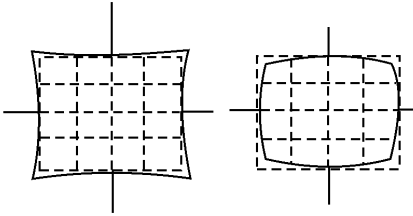


图1 畸变类型图

Fig.1 Different distortions

1.2 畸变数学模型

由像差理论可知,对于已知结构 (r, d, n) 的光学系统,当物距 l_1 和入瞳位置 l_{e1} 给定时,光学系统空间光线的像差仅取决于视场 (h_1) 和孔径 (η_1, ζ_1) 。像差展开为级数时,在视场和孔径为零的情况下,像差为零,故展开式中不应有常数项。畸变只与物高 h 有关,且随 h 改变符号而改变符号,故在其级数展开式中只能有几个奇次项。其级数展开式为

$$\delta y' = k_1 h^3 + k_2 h^5 + k_3 h^7 + \dots \quad (2)$$

式中:第一项为初级畸变;第二项为二级畸变;第三项为三级畸变;依次类推; k_1, k_2, k_3, \dots 分别为初级、二级、三级、...畸变系数。在一般大视场光学系统中,取到三级畸变时即可以满足精度要求,即

$$\delta y' = k_1 h^3 + k_2 h^5 + k_3 h^7 \quad (3)$$

在公式中,不一定必须用线视场作为自变量,也可以用角视场作为自变量。为了求出畸变公式,应事先将求出的一些点的畸变值代入公式的左边,再把该畸变值对应的视场角或线视场像高代入方程的右边,组成一个方程。对所有这些点联立方程,组成一个超越方程组,求解出畸变系数 k_1, k_2, k_3 ,再将 k_1, k_2, k_3 代回方程中,就得到完整的畸变拟合公式。以后使用时,要想计算哪一点的畸变值,只要知道该点的像高,代入方程就可以计算出相应的畸变值。把线视场转化为角视场,畸变公式变为

$$\delta y' = k_1 h^3 + k_2 h^5 + k_3 h^7 = k_1 \omega^3 + k_2 \omega^5 + k_3 \omega^7 \quad (4)$$

1.3 常用方法及其比较

1) 精密测长法

在物方放置一标定过的网格板,在像平面设置

一毛玻璃,后面直接用测量显微镜调焦,在毛玻璃上测量出各不同视场角位置上的目标线到中心的距离。或者在像平面位置上设置感光干板或胶片,将目标图案像拍摄下来后,在较精密的测量显微镜或比长仪上进行测量,与计算得到的理想像相比较,差值即为畸变值。对每一个视场进行测量,测算出各个视场的畸变值后,就得到该光学系统畸变值。

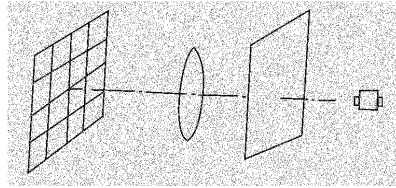
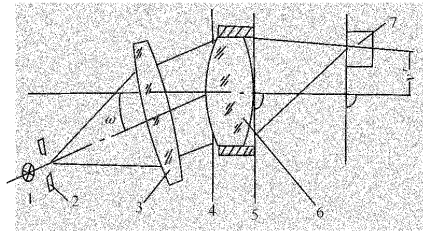


图2 精密测长法光路图

Fig.2 Beam path of precise length measurement method

2) 转角法

用非相干光对焦面上装有分划板的平行光管照明,平行光管或被测系统绕位于被测系统入瞳中心的垂直轴作相对转动,由光度盘测出不同的物方半视场角。将显微镜沿像平面移至相应位置瞄准像点,像高可由长度测量机构读出。



1. 照明系统;2. 分划板或狭缝;3. 平行光管物镜;4. 入瞳;5. 参考平面;6. 被测系统;7. 检测系统

图3 转角法测量光路图

Fig.3 Measurement method of rotational angle

精密测长法要求网格板的中心必须与被测物镜的光轴相重合,而且网格板必须与光轴相重合;转角法要求物镜的入射光瞳中心必须与精密转台的旋转主轴轴线重合。但是,由于加工和装调等的误差,上述要求不容易达到;同时网格板刻线的不对称也会降低测量精度。读数时,一般都是把显微镜调焦到实像面,因此受人为因素的影响比较大,亦即会影响测量精度。基于以上原因,提出了新的测量方法。

1.4 测量方法与装置

将被测系统放置在精密转台上,面阵 CCD 固

定在一测量平台上,使光敏面位于被测光学系统像面位置,在被测系统物方安置一带星孔板(或网格板)的平行光管或带滤光片的激光器作为目标。使整个光路处于 0° 视场,此时星点像即为基准像点。然后依次旋转精密转台,测量不同视场角下的绝对畸变值。

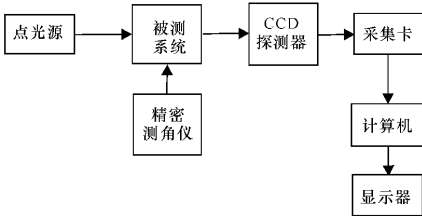


图 4 测量装置系统图

Fig. 4 Block diagram of measurement system

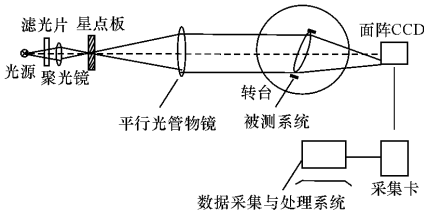


图 5 测量装置光路图

Fig. 5 Beam path of measurement system

设光点在 0° 视场的质心坐标为 (\bar{x}_0, \bar{y}_0) , 当测量轴外 ω_i 视场时, 光点的质心坐标为 (\bar{x}_i, \bar{y}_i) 。则

ω_i 视场的焦距为

$$f_{\omega_i}' = \frac{\lambda \cdot \sqrt{(\bar{x}_i - \bar{x}_0)^2 + (\bar{y}_i - \bar{y}_0)^2}}{\tan \omega_i} \quad (5)$$

任一视场的绝对畸变值用如下公式求得:

$$\delta y' = y' - y_0 = f_{\omega_i}' \cdot \tan \omega_i - f_0' \cdot \tan \omega_i = \lambda \cdot \sqrt{(\bar{x}_i - \bar{x}_0)^2 + (\bar{y}_i - \bar{y}_0)^2} - f_0' \cdot \tan \omega_i \quad (6)$$

式中 λ 为像素距离当量, 其物理意义为 CCD 探测器上每个像元可探测到的像面上的距离大小。采用放大率法标定, 使用焦距 550 mm 的平行光管, 分划距离为 20.0005 mm, 标定时使用的摄像镜头焦距为 12.5 mm。经计算 $\lambda = 8.491 \mu\text{m}/\text{个}$, 其物理意义为每个像元可探测到像面上的 8.491 μm 长度。

先测出一些视场角下的绝对畸变值, 代入 (4) 式, 通过最小二乘法求解超定方程, 获得系数 k_1, k_2, k_3 。得到镜头的畸变拟和公式后, 对于任意视场角, 只需代入畸变公式, 就可以知道该视场角下的畸变值了。

2 实验结果与分析

通过 CCD 后的图像数据可以看作为一个矩阵, 矩阵的每一个元素是图像的灰度值。通过 Matlab 语言编制源程序, 对获得的数据进行处理, 得到该镜头的畸变公式。

表 1 测试数据

Table 1 Test data

视场角/(°)	横坐标(第 n 个像素)	像素间距个数	理想像高/mm	实际像高/mm	绝对畸变/mm	相对畸变
0	383	0	0	0	0	0
4.171 27	461	78	0.656 382	0.662 298	0.005 916	0.901%
6.100 81	496	113	0.961 951	0.967 974	-0.006 023	-0.626%
9.001 29	548	165	1.425 668	1.401 015	-0.024 653	-1.729%
11.221 72	590	207	1.785 594	1.757 637	-0.027 957	-1.566%
15.175 61	662	279	2.441 132	2.368 989	-0.072 143	-2.955%
17.162 98	699	316	2.779 594	2.683 156	-0.096 438	-3.469%
19.152 72	735	352	3.125 807	2.988 832	-0.136 975	-4.382%
20.255 86	757	374	3.321 321	3.175 634	-0.145 687	-4.386%

由于该组畸变大都是负值, 所以应是桶形畸变。用该镜头拍摄到此种情况的图像如图 6 右图所示。

对于得到的畸变数据值, 视场分段拟合如下:

0°~10° 视场角

$$k_1 = 40, k_2 = -617.0, k_3 = 168.370$$

$$\delta y' = 40\omega^3 - 6170\omega^5 + 168370\omega^7$$

10°~20° 视场角

$$k_1 = -2.9871, k_2 = -22.9992,$$

$$k_3 = 161.3314$$

$$\delta y' = -2.9871\omega^3 - 22.9992\omega^5 + 161.3314\omega^7$$

如果建立的畸变数学模型和预先标定的相关参数足够准确的话,按此模型计算得到的畸变拟合公式就是正确的,否则就会有残余畸变。残余畸变的大小可以反映出畸变测量与校正的精度。在不同视场中抽取若干个验证点,测量出该点对应的视场角,通过(6)式计算出该点的绝对畸变值。再把该视场角代入拟合出来的畸变公式,得出理论畸变值。将2种方式得到的畸变值相比较,差值即为残余畸变。对得到的残余畸变做数据处理就可以得到该方法的精度了。

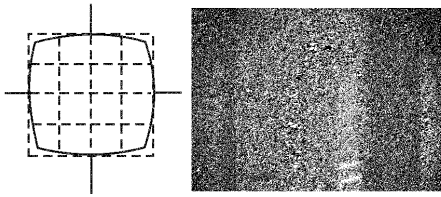


图6 带有畸变的实物图

Fig. 6 Picture with distortion

表2 0°~10°视场残余畸变

Table 2 Residual distortion in 0°~10° FOV

残余畸变平均值/ μm	残余畸变标准偏差/ μm
19.263	17.317

表3 10°~20°视场残余畸变

Table 3 Residual distortion in 10°~20° FOV

残余畸变标准不确定度/ μm	最大相对残余畸变不确定度/%	最大残余畸变/ μm
1.802	6.45	4.675

3 结论

以短焦距大视场 CCD 摄像系统光学镜头为例,讨论了畸变校正模型,介绍了精密测角法与比

长法综合测量畸变的原理。通过实例计算说明,此方法在中视场范围内可以达到较高的精度,但在小视场范围内的测量精度较差。由于一般光学系统的畸变是随着视场的增大而增大,在小视场范围内畸变值较小,在边缘视场附近畸变达到最大值,因此该方法具有一定的实用价值。

参考文献:

[1] 张全法,杜丽丽,申杰. 书籍扫描图像畸变参数自动计算方法的研究[J]. 应用光学, 2006,27(6):516-519.
ZHANG Quan-fa, DU Li-li, SHEN Jie. Auto determination of distortion parameters for correction of scanned book image [J]. Journal of Applied Optics, 2006,27(6):516-519. (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):1409-1411.
WANG Hu, MIAO Xing-hua, XI Bin. Correction for CCD system distortion, with short focal length and large view angle camera [J]. Acta Photonica Sinica, 2001, 30(11): 1409-1411. (in Chinese)

[3] 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)

[4] 余俊,林家明,杨建宇,等. CCD 摄像系统的畸变测量与校正技术研究[C]. 青岛: 第十一届全国光学测试学会交流会, 2006.
YU Jun, LIN Jia-ming, YANG Jian-yu, et al. Research on distortion calibration of CCD camera system [C]. Qingdao: 11th National Optical Measurement Conference, 2006. (in Chinese)