

文章编号 1004-924X(2007)02-0277-06

光电测量系统畸变的实时数字校正

凌 伟¹, 王志乾², 高峰端^{2,3}

- (1. 海军驻长春地区航空军代表室, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
3. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:根据视场角为 70° 的大视场光电测量系统中光学系统产生畸变的机理及径向变化的特点, 设计了由 11 个等距激光目标点组成的畸变检测装置。对于不同的光学测量系统, 按照畸变检测的三个步骤对光学系统的畸变进行检测, 根据测量得到的系统畸变变化情况, 拟合出实时测量时目标点在线阵 CCD 上成像位置的补偿方程, 编写出成像位置数据采集及实时处理的补偿程序, 提高了测量系统实时测量的精度。在对焦距为 29.98 cm 的光学系统进行实际校正测试中, 结果表明, 当目标物距为 1 651.59 mm、物高为 400.007 mm 时, 按照拟合的二次补偿方程进行计算补偿, 可将畸变误差从校正前的 -0.0264 mm 提高到校正后的 -0.0029 mm, 并使系统整体检测精度从 0.36% 提高到 0.04%。

关键词:光电测量; 畸变; 检测装置; 数字校正

中图分类号: TP301.6; V556 **文献标识码:** A

Real time digital correction for distortion in photoelectronical measuring system

LING Wei¹, WANG Zhi-qian², GAO Feng-duan^{2,3}

- (1. *Aviation Commissary of Navy in Changchun, Changchun 130033, China;*
- 2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
- 3. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)*

Abstract: In the photoelectronical measuring system with a big field of view of 70° , distortion caused by optical system leads to the image of object in linear CCD deviation from the theoretical point, which results in system measuring errors. In the practical project measuring system, in order to improve measurement precision of the point of laser goal in the system, a set of installation for optical detection systematic distortion is designed. This installation on the basis of distortion mechanism and radical character has eleven equidistance points of laser goal. For different optical measurement systems, when distortion is detected in according to three steps, the compensation equation for goal in linear CCD in real-time measurement is fitted. Then the program on data collection and real-time manipulation of imaging position will be compiled to improve the precision of measurement system on real-time

收稿日期: 2006-08-12; 修订日期: 2006-12-20.

基金项目: 中国科学院二期创新基金资助项目

nicity measurement. The experiment results show that the installation can reduce error obviously from -0.0264 mm to -0.0029 mm in according to the compensation equation when the distance is 1651.59 mm and the height is 400.007 mm, and raise the whole systematic detection precision from 0.36% to 0.04%.

Key words: photoelectronic measurement; aberration; detection device; digital correction

1 引言

随着光学技术和 CCD 技术的发展,各种高精度光学检测设备应运而生。而光学检测系统中出现的成像畸变是影响测量系统测量精度的主要因素之一。畸变与视场角成几何级数关系,光学畸变将影响 CCD 成像,改变目标的理论成像位置,使计算基准有较大的误差,对测量精度有很大的影响。在光电测量系统的几何畸变校正方法中,常用的主要有实验法和基于图像的数学校正方法两种^[1-4]。实验法就是借助实验仪器,测出不同视场处的畸变量对畸变进行修正;基于图像畸变校正方法可以归纳为两种:一种是综合标定法,即将图像的非线性畸变的求解和测量装置的内、外参数的求解混合在一起,不仅需要控制点的物方坐标,而且求解过程复杂,很难获得满意的精度,并且检测设备的位置改变后畸变参数需重新求解;另一种是垂轴法,即让光学系统光轴垂直于网格标定板,认为实际图像是标定板缩放加几何畸变形成,从而确定畸变系数,但实际操作中很难严格达到光轴垂直于标定板的条件,近似条件下求得的与测量设备方位元素相关的畸变系数往往与实际相差很大^[2-3]。通常使用最多的方法即采用标准校正板的方法测量光学系统的畸变,这样对于光学系统没有安装固定好的系统来说是方便的,而对于光学系统及其 CCD 安装固定好的系统来说,可操作性就很差,CCD 的位置与校正板的位置很难确保一致性,从而给畸变校正带来较大误差^[2]。

本文根据工程测量的实际情况,提出了一种新的畸变校正方法,并根据该方法设计了一套畸变校正装置,可以对光学系统的畸变进行检测标定,根据畸变测试对系统进行数字校正研究,从而提高测量设备实时检测的精度。

2 图像畸变理论及数学模型

2.1 图像畸变的产生及其数学模型

光学系统成像过程中,主光线产生的像差是影响短焦距大视场光学系统检测精度的主要因素。不同视场的主光线通过光学系统后与高斯像面的交点高度不等于理想像高,其差别就是系统的畸变。畸变仅是视场的函数,不同视场的实际垂轴放大倍率不同,畸变也不同。一般认为镜头畸变主要由径向误差和切向误差组成^[3]。径向误差主要是由镜头中各组透镜的表面曲率存在的误差引起的,其数学模型为:

$$\left. \begin{aligned} \Delta x_r &= (X - X_0)(t_1 \rho^2 + t_2 \rho^4 + t_3 \rho^6 + \dots) \\ \Delta y_r &= (Y - Y_0)(t_1 \rho^2 + t_2 \rho^4 + t_3 \rho^6 + \dots) \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

其中 Δx_r 、 Δy_r 分别为 x 向和 y 向产生的畸变; t_1 、 t_2 、 $t_3 \dots$ 为径向畸变系数; X_0 、 Y_0 为成像面中心坐标; X 、 Y 为成像点的坐标; ρ 为成像点到像面中心点的半径。

切向误差通常认为是由于镜头透镜组的光学中心不共线引起的,其数学模型为:

$$\left. \begin{aligned} \Delta x_t &= p_1(\rho^2 + 2(X - X_0)^2) + 2p_2(X - X_0)(Y - Y_0) \\ \Delta y_t &= p_2(\rho^2 + 2(Y - Y_0)^2) + 2p_1(X - X_0)(Y - Y_0) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

其中 p_1 、 p_2 为切向误差系数。

总误差可以表示为:

$$\left. \begin{aligned} \Delta X &= \Delta x_r + \Delta x_t \\ \Delta Y &= \Delta y_r + \Delta y_t \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

2.2 校正原理

光学检测系统在 CCD 上的成像过程,实际上就是将空间三维场景变为二维平面图像的过程。根据畸变的产生原理,在图像传递函数中可以消除系统的线性畸变,则图像畸变只包含垂轴几何畸变。由像差理论可知,对于已知结构的光学系统,当物距和入瞳位置给定时,光学系统的几何畸变像差主要取决于视场。导致垂轴几何畸变的因

素很多^[1],其中影响较大的有3类:(1)成像系统镜头的径向畸变,主要由透镜的径向曲率弯曲所致;(2)偏心畸变,主要由成像系统各部分不同轴引起,包括径向畸变和切向畸变;(3)与接受器及处理电路有关的畸变,这里主要考虑由于采样方向不同以及像平面与系统光轴不垂直导致的畸变。通常认为,在短焦距光学系统的垂轴畸变中,径向畸变起主要作用,切向畸变相对影响较小,因此主要是校正径向误差。在工程处理中,把径向误差表达式的高次项略去,并只考虑径向误差的影响,光学系统测量误差的表达式为:

$$\left. \begin{aligned} \Delta X &= \Delta x_r = t_1 (X - X_0) \rho^2 \\ \Delta Y &= \Delta y_r = t_1 (Y - Y_0) \rho^2 \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

由于图像的畸变校正是在数字图像的基础上进行,故要把模拟图像坐标转换成数字图像坐标。对于由线阵 CCD 采集到的目标点的图像,可以通过重心法确定图像中心点位置。以 f 表示光学系统的标定焦距; h 表示物高; h' 表示目标在线阵 CCD 上的实际成像高度; R 为目标距离光学系统中心的距离,即物距; t 为理想像距与物距的比值,即为畸变参数。则可以得到下式:

$$t = \frac{h \times f}{R \times h'}, \quad (5)$$

本方法综合考虑各种影响因素及系统精度要求,将所测得的数据进行拟合,实时补偿由线阵 CCD 测得的像元的位置,则几何畸变校正模型可表达为:

$$h = k_1 + k_2 h' + k_3 h'^2, \quad (6)$$

式中, h 、 h' 分别表示校正前后目标点在线阵 CCD 上成像距离线阵 CCD 中心点所占的像元数; k_1 、 k_2 、 k_3 为几何畸变校正系数。

3 畸变测量装置

由于测量设备的测量范围大,必须采用大视场、短焦距的像方远摄光学系统。根据实际情况,设计测量设备的实际有效视场角范围为 $2\omega = 70^\circ$,为了减小光学畸变对系统测量精度的影响,先通过畸变测量装置对光学系统进行精确标校,标校后在算法中进行畸变补偿,根据在线阵 CCD 上的成像位置恢复目标的准确位置^[5-6],为此设计了一套专用畸变测量调试装置。如图 1 所示,在一根钢管上等间距安装 11 个激光器,使用两台

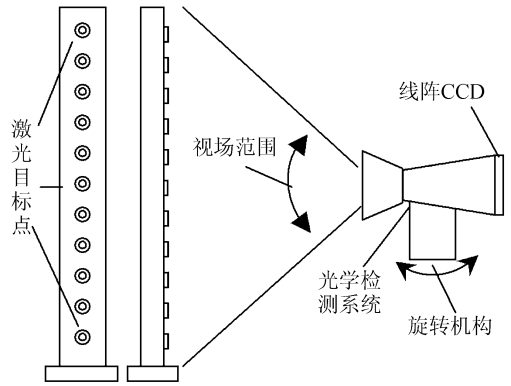


图 1 光学系统畸变测量装置

Fig. 1 Installation for detecting optical systematic distortion

经纬仪交汇测量出其实际间距,误差不大于 0.1 mm。该装置的工装除了按照设计要求进行加工外,在进行畸变校正测试前先进行调平,保证工装与水平面垂直,然后用两台莱卡组成的三坐标标定系统进行标校。根据系统中所采用线阵 CCD 的分辨率及其像元细分情况,在标校过程中,通过微调的方法保证关于中心点(即第六点)对称的每组点到中心点的距离误差不超过 0.1 mm,这样保证了每组对称点在畸变校正时经过光学系统后产生的误差对测量结果产生的影响小于经过细分后的单个像元的高度。由旋转机构带动光学系统对畸变检测装置上的激光目标点进行扫描测量,成像于光学系统后部的线阵 CCD 上。控制激光目标点的电源,可以逐个对目标点进行检测,也可以任取几个目标点同时进行检测,根据检测时目标在线阵 CCD 上成像的实际位置和理论位置比较进行畸变校正^[7]。

4 测试与校正过程

本方法用图 1 所示的畸变检测装置进行畸变检测。在校正之前,用两台全站仪组成的三坐标测量系统标定出畸变检测装置的中心点位置,使光学系统的几何中心和畸变检测装置的中心点在同一水平面上。畸变检测及校正过程为:(1)基于物方过光心的直线变换到像面后仍为直线的原理,标定出光学系统的中心点和测量装置的中心点(即测量装置的第六个目标点)一致;(2)基于近轴缩放图像上畸变系数 t_0 ,定出实际物距,并确定

相对中心目标点的每组对称目标的畸变系数 t_1 、 t_2 、 t_3 、 t_4 ；(3)根据目标点的成像的实测位置与理论位置确定校正图像的拟合方程。

4.1 中心点坐标的确定

通过畸变检测装置测量目标点在线阵 CCD 上所形成的图像,就可以确定畸变对称中心的坐标 (x_0, y_0) 。由于几何畸变的非线性,物面目标点的直线通过成像系统后通常变为曲线,只有通过对称中心的直线不发生畸变。为了准确的找准中心点,采用两台光电经纬仪对畸变装置和光学系统进行测量标定,确保光学系统的中心点和畸变测量装置的中心(即测量装置的第六个目标点)处在同一个水平线上。测量标定前,分别对测量装置和光学系统调平。然后用两台光电经纬仪建立的坐标系对畸变测量装置和光学系统进行测量调整,使系统的中心点坐标保持一致。

4.2 计算畸变系数

通过旋转机构转动光学检测系统,将扫描的目标点通过线阵 CCD 采集到计算处理系统,根据无畸变理想缩放图像上控制点坐标与畸变图像上控制点坐标存在的映射关系,确定近轴小角度畸变的理想畸变系数,求出光学测量系统中心距离测量目标点所在平面的距离,即所谓物距。根据所求得的物距,标定出其他各个目标点的畸变校正系数。求解过程主要有以下几步:

(1)根据光学系统小角度近轴的理想畸变系数,确定出距离中心点最近的上下两点(即第五个点与第七个点)的畸变系数为 1.000 4,根据测量得到的像高及所对应标定的物高,由公式(5)计算出目标点平面与光学系统中心的距离 R 。

(2)根据测量的目标点的位置坐标,计算出物高相对应的实际成像高度,与由第(1)步标定出的物距计算出来的理论像高进行比较,根据公式(5)计算出该对称位置的畸变系数 t_1 、 t_2 、 t_3 和 t_4 。

(3)根据求得的畸变系数,取相差四个点的坐标为物高,代入公式(5),反向验证物距与初次得到的物距是否一致。如果误差较大需进一步测量标定。

4.3 确定校正后成像点的计算公式

由于该检测系统的视场大,得到的畸变校正系数并不能补偿校正全部视场^[8],需要根据已有的校正系数和测量到的数据进行函数拟合,找到能够补偿校正全部视场畸变的模型曲线函数。由

于由线阵 CCD 给出的数据为目标点的像元位置,为了减少计算过程带来的误差,在数据处理之前就对像元位置进行了补偿校正。即根据测得的目标点坐标相对于中心点所占的像元数及理论物高成像所占的像元数,按照公式(6)对点坐标进行二次拟合,就可以得到物高成像的二次拟合函数公式。多次检测试验结果表明,该方法能较好地对图像畸变进行校正,大大提高了检测系统的测量精度。

5 实验测试及数据分析

为了检测本方法的校正效果,做了大量试验。(对本方法进行检测验证)试验选用焦距为 29.76 mm 的光学系统进行畸变校正。畸变检测测量的目标点在线阵 CCD 上成像的像元位置如表 1。其中为了消除系统误差及粗大误差带来的影响,提高测量的准确性,先对检测装置的激光目标从上而下测量,然后对目标再由下而上进行再次测量,最后求取每个目标中心点的平均值进行计算。这样根据每个目标点的成像位置,就可以计算出任意两个目标点之间形成的物对应所生成的像的高度。在计算中,采用相对中心点位置对称的目标点间的距离作为像高进行计算,这样相对于中心位置保证了畸变校正的一致性。对于物高,在实验前用两台型号为 TDA5005 的莱卡组成的三坐标测量系统进行精确测量。

表 1 目标畸变检测结果

Tab. 1 Measurement results of point distortion

序号	顺次测量	逆次测量	平均值
(1)	4 832.28	4 832.33	4 832.3
(2)	4 582.28	4 582.2	4 582.2
(3)	4 329.4	4 329.43	4 329.4
(4)	4 075.12	4 075.12	4 075.1
(5)	3 817.72	3 817.64	3 817.7
(6)	3 560.23	3 560.28	3 560.3
(7)	3 302.6	3 302.63	3 302.6
(8)	3 046.1	3 046.19	3 046.1
(9)	2 791.78	2 791.79	2 791.8
(10)	2 538.83	2 538.78	2 538.8
(11)	2 288.96	2 288.92	2 288.9

由于近轴小视场范围内的畸变很小,根据实际测试情况和理论畸变系数,设定近轴理想的畸

变系数为 1.000 4。这样根据公式(5)求得物平面距离光学系统中心的距离 R ：

$$R = \frac{h \times f}{h' \times t} = \frac{h \times f}{n \times t \times t} = \frac{200.185 \times 29.76}{515.1 \times 0.007 \times 1.0004} = 1\ 651.59$$

其中 h 为标定的物高, f 为光学系统的焦距, h' 为物高在线阵 CCD 上成像的像高, t 为光学畸变校正系数, n 为像高在线阵 CCD 上所占的像元数目, l 为该线阵 CCD 的像元尺寸。这样以该 R 作为标定物距, 按照上面的计算公式就可以计算出其他点的畸变校正系数。表 2 即为标定的物高和测得对应应在 CCD 上所占的像元数目, 并计算得到畸变系数。

表 2 对应物高、像元数及畸变系数

Tab. 2 Parallelism values of object height, pixel numbers and distortion coefficient

序号	物高	像数	畸变系数
(5)(7)	200.185	515.1	1.000 4
(4)(8)	400.364	1 029	1.001 5
(3)(9)	600.24	1 537.6	1.004 8
(2)(10)	800.2	2 043.4	1.008
(1)(11)	1 000.38	2 543.4	1.012 5

为了验证畸变校正系数的误差大小, 对计算得到的畸变系数代入公式反向验证求 R 。验证时取每隔四点的目标点作为物高代入进行验证, 如取第(1)(5)个激光点之间的距离作为物高, 计算如下：

$$R = \frac{h \times f}{h' \times t} = \frac{h \times f}{n \times t \times t} = \frac{400.207 \times 29.76 / 0.007}{1\ 272 \times 1.0125 - 257.4 \times 1.004} = 1\ 651.26$$

依次得到的各组物距 R 为(2)(6)1 651.75、(3)(7)1 651.81、(5)(9)1 651.56、(6)(10)1 651.56、(7)(11)1 651.81。可见由畸变系数求得的物距 R 的误差是很小的, 在近轴由理论畸变系数求得的 R 可以作为标定的物距进行计算。

为了能够对视场内任意点进行畸变补偿, 根据公式(6)对测量的点进行了二次曲线拟合, 得到图像畸变补偿后的理想像元点的位置公式：

$y = -0.599\ 35 + 0.992\ 31y' + 1.530\ 26 \times 10^{-5}y'^2$
其中 y' 、 y 分别表示校正前后目标点在线阵 CCD 上与线阵 CCD 中心点之间的像元数。

根据得到的拟和方程, 就可以编写畸变实时补偿的校正程序。在实际测量校正过程中, 光学系统经旋转机构带动匀速转动对目标点进行一次扫描, 由线阵 CCD 采集到的数据读入编写的实时补偿程序中对目标点进行实时补偿^[9], 这样经过一次扫描结束后就可以由程序即时输出得到目标点的精确位置测量值。对同一标定目标按照校正前和校正拟合公式进行了测试, 测量结果如表 3 所示。由测量结果可以看出, 通过畸变校正, 可使实际测量精度从 0.36% 提高到 0.04%, 说明该校正方法在实际工程测量中能精确地测量出光学系统的畸变, 对提高光学系统的整体测量精度是切实可行的。

表 3 测量结果

Tab. 3 Measurement results

	测量值	标定值	畸变误差	测量误差
校正前	398.54	400.007	-0.026 4	0.36%
校正后	399.85	400.007	-0.002 9	0.04%

6 结 论

针对大视场光学测量系统的畸变问题, 根据工程测量实际情况, 设计了校正畸变的求解方案及畸变测量装置, 建立了相关的数学模型, 最后通过实验对该畸变校正误差检测装置进行验证评价。实验测量结果表明该畸变校正装置结构简单可行, 可以精确地测量出光学系统的畸变, 通过曲线拟合公式进行算法补偿后, 有效地改善了光学系统整体实时测量的精度, 提高了实际应用的可操作性, 避免了通常所用畸变校正方法中校正板位置与成像位置误差所引起的校正误差。在测试过程中曾经发现当分别对中心点上的测试点与中心点以下的测试点进行拟合时, 拟合方程并不完全一致, 拟和系数还是有很小的差别等问题, 这些问题及对测试精度的影响还有待进一步探索研究。

参考文献:

- [1] 宋长波,贺赛先. 光电测量系统和畸变数字校正的一种新方法[J]. 光电子·激光,2003,14(9):973-976.
SONG CH B, HE S X. A new digital method for geometric distortion correction of a photoelectronic measuring system[J]. *J. Optoelectron. Laser*, 2003,14(9):973-976. (in Chinese)
- [2] 史泽林,康娇,孙锐. 基于 BP 神经网络的大视场成像畸变校正方法[J]. 光学精密工程,2005,6(3):348-353.
SHI Z L, KANG J, SUN R. NP NN-based method for lens distortion correction of large-field imaging[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005,6(3):348-353. (in Chinese)
- [3] 曾峦. 短焦距摄像机镜头的畸变校正方法[J]. 装备指挥技术学院学报,2002,4(2):53-55.
ZENG L. A remedy method of aberration in the lens of short focus[J]. *J. Inst. Command Technol. Equip.*, 2002,4(2):53-55. (in Chinese)
- [4] 叶东,徐巧玉,车仁生. 视觉测量系统的相机校准[J]. 光学精密工程,2006,10(5):883-890.
YE D, XU Q Y, CHE R SH. Camera calibration technique for vision measurement system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,10(5):883-890. (in Chinese)
- [5] 王莲莲,王健. 高精度测量光学成像系统畸变的一种新方法—数字相关法[J]. 苏州大学学报(自然科学版), 2001,17(1):69-73.
WANG L L, WANG J. A new method of measuring distortion in optical image system accuracy—digital image interrelated method[J]. *J. Suzhou Univ. (Natural Science)*, 2001,1(17):69-73. (in Chinese)
- [6] 马登极,朱善安. 线阵 CCD 在高精度测径系统中的应用[J]. 计算机测量与控制,2006,14(2):175-176, 185.
MA D J, ZHU SH A. Application of linear CCD in high precision diameter measuring system[J]. *Comp. Meas. Contr.*, 2006,14(2):175-176. (in Chinese)
- [7] 张金利. 大视角成像系统的快速校正[J]. 光电子·激光. 2006,17(2):158-161.
ZHANG J L. A simple method of accurate aberration in a camera with large field lens[J]. *J. Optoelectron. Laser*, 2006,17(2):158-161. (in Chinese)
- [8] 朱铮铮,黎绍发. 镜头畸变及校正技术[J]. 光学技术, 2005,31(1):136-138.
ZHU ZH T, LI SH F. Lens distortion and proofreading technology[J]. *Opt. Tech.*, 2005,31(1):136-138. (in Chinese)
- [9] 陈华,叶东,车仁生,等. 基于精确控制点的立体像机校准技术[J]. 光学精密工程,2006,14(5):903-909.
CHEN H, YE D, CHE R SH, *et al.*. Stereo camera calibration based on accurate control points[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(5):903-909. (in Chinese)

作者简介:凌伟(1956—),男,黑龙江依兰人,硕士,高级工程师,主要从事精密机械和光电测控应用技术研究;

王志乾(1969—),男,吉林长春人,副研究员,主要从事数字信号处理技术在光电测量系统中的应用研究;

高峰端(1979—),男,河南南阳人,博士生,主要从事光电测量控制方面的研究。E-mail:gaofd205@163.com