

文章编号: 1003-501X(2008)06-0028-04

# 基于三次拟合方程畸变校正的光电测量系统

乔彦峰<sup>1</sup>, 高峰端<sup>1,2</sup>, 王志乾<sup>1</sup>, 赵雁<sup>1</sup>, 李建荣<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 在大视场光电测量系统中, 光学系统产生的畸变使目标在线阵 CCD 上的成像偏离了理论成像点, 导致系统产生测量误差。为了减小该误差, 提高系统的测量精度, 根据畸变产生机理, 设计了由 11 个等距目标点组成的畸变检测装置。根据检测得到的系统实际畸变变化情况, 需要拟合出系统测量时目标点在线阵 CCD 上成像位置的补偿方程。以检测装置测量拟合得到的三次补偿方程作为畸变校正的数学模型编写了测量校正程序, 对光电测量系统进行了实验检测。测量结果表明, 当目标物高为 200.115 mm 时, 按照拟合的补偿方程进行计算补偿, 可将畸变误差从校正前的 -2.08 mm 提高到校正后的 0.05 mm, 并使系统整体检测精度从 1.039% 提高到 0.025%。

**关键词:** 光电检测; 畸变; 数字校正; 三次拟合方程; CCD

中图分类号: TN247, V556

文献标志码: A

## Distortion Correction for the Photoelectricity Measuring System Based on the Cubic Fitting Equation

QIAO Yan-feng<sup>1</sup>, GAO Feng-duan<sup>1,2</sup>, WANG Zhi-qian<sup>1</sup>, ZHAO Yan<sup>1</sup>, LI Jian-rong<sup>1,2</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** In the 70° big visual field photoelectricity measuring system, distortion produced by optical system makes the image of object in linear CCD deviate from the theoretical point and lead to the system measuring error. In order to improve measuring precision for the goal point in the measuring system, a set of device made up of eleven equidistance goal points for detecting optical distortion is designed on the basis of distortion theory. According to the change condition of systematic distortion, the compensation equation need fitting to join point location imagined by object point on linear CCD in real time measure. By the cubic equation fitting based on the data detected in measurement system as math model, the compensation program is compiled to carry out distortion correction in experiment program. The experiment result in actual detection shows that the device can reduce error obviously from -2.08 mm to 0.05 mm according to the compensation equation when the height is 200.115 mm, and raise the whole systematic detection precision from 1.039% to 0.025%.

**Key words:** photoelectronic measurement; distortion; digital correction; cubic fitting equation; CCD

## 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。为了获取大视场的视频信息, 人们常常使用短焦距摄像机镜头。由于加工误差和装配误差的存在, 光学系统与理想的小孔透视模型有一定的差别, 从而使得物体点在摄像机图像平面上实际所成的像与理想成像之间存在不同程度的非线性光学

收稿日期: 2007-09-14; 收到修改稿日期: 2008-01-14

基金项目: 中国科学院知识创新工程领域前沿项目资助

作者简介: 乔彦峰(1962-), 男(汉族), 吉林长春人, 研究员, 博士生导师, 从事光电测量与控制方面的研究。E-mail: qiaoyf@ciomp.ac.cn

通信作者: 高峰端(1979-), 男(汉族), 河南南阳人, 博士生, 主要从事测量数据处理方面的研究。E-mail: gaofd205@163.com

畸变,人们通常把这种非线性变形称之为非线性畸变。为了提高测量系统测量精度,必须对光学检测系统中出现的成像畸变进行修正。其修正方法一般是在原模型关系中引入反映畸变影响的修正参数,然后基于控制点或其他方法求解修正系数来对图像进行校正。

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字校正方法两种<sup>[1]</sup>。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,近似条件下求得的畸变系数往往与实际相差很大<sup>[2-4]</sup>。本文根据大视场光学系统的畸变的变化情况,利用畸变的特性,提出了一种畸变校正的方法。该方法根据畸变检测装置的标定,进行三次方程拟合建立整个视场的校正数学模型,使用方便,校正精度高。在校正过程中需要确立畸变校正的数学模型,然后在程序中进行实时校正。

## 2 图像畸变校正

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有径向误差和切向误差组成<sup>[3]</sup>。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。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。

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,则图像畸变只包含有垂轴几何畸变。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<sup>[1]</sup>,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变化所致;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) 与接收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。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; $t$  为理想像高与物高的比值,即为畸变参数。则可以得到下式:

$$t = \frac{h \cdot f}{R \cdot h'} \quad (1)$$

本方法综合考虑各种影响因素及系统精度要求,将所计算得的畸变系数数据进行拟合,实时补偿由线阵 CCD 测得的像元的位置,写入测量处理程序,即可对所测畸变数据进行实时校正。

## 3 校正方法

### 3.1 畸变校正装置

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,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<sup>[6-8]</sup>。为此设计了一套专用畸变测量调试装置,如图 1 所示,在一方钢管上安装 11 个等间距目标点,使用两台经纬仪交汇测量出

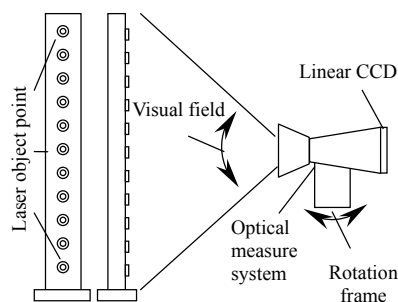


图 1 光学系统畸变测量装置

Fig.1 Device for detecting optical systematic distortion

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,保证工装处于与水平面垂直,然后用两台经纬仪组成的三坐标标定系统进行标校。由旋转机构带动光学系统对畸变检测装置上的目标点进行扫描测量,成像于光学系统后部的线阵 CCD 上。在系统安装过程中,旋转机构的旋转中心需要和测量光学系统的主点重合,以达到最佳的校正效果,否则校正中会带来测量误差。测量时可以逐个对视场中的目标点进行检测,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<sup>[8]</sup>。

### 3.2 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。校正前,先用两台经纬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,使光学系统的主点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主要有三个步骤:1) 基于物方过光心的直线成像到像面后仍为直线的原理,标定出光学系统的主点和测量装置的中心点(即测量装置的第六个目标点)在同一水平面内;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) 根据目标点成像的实测位置与理论位置确定校正图像的拟合方程。

### 3.3 畸变补偿数学模型

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,需要根据已有的畸变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。由于目标点在线阵 CCD 上的理论成像点位置数据和实测位置数据之间有一个比值,并且经过光学系统光轴中心的光线无畸变。由此我们可以根据测得的实际目标点成像位置和理论成像位置,拟合一条方程式来反映视场内所有点的畸变系数。由此我们对测试点和理论点建立了三次方程拟合的数学模型。畸变数字校正的三次拟合方程的数学模型如式(2)所示:

$$h = k_1 + k_2 h' + k_3 h'^2 + k_4 h'^3 \quad (2)$$

式中: $h$ 、 $h'$ 分别表示校正前后目标点在线阵 CCD 成像中心点距离线阵 CCD 中心点所占的像元数; $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$ 、 $k_4$ 均为几何畸变校正系数。

## 4 实验结果与分析

根据数字校正方程的数学模型,编写了三次拟合方程的校正程序,用一个焦距为 30.02 mm 的光电测量系统对各个拟合方程进行了实验。由于近轴小视场范围内的畸变很小,根据实际测试的物距和标高情况及理论畸变系数<sup>[7-8]</sup>,计算设定近轴理想的畸变系数为 1.000 4。这样根据光学系统的成像公式求得物平面距离光学系统中心的距离  $R$ ,即:

$$R = \frac{h \cdot f}{h' \cdot t} = \frac{h \cdot f}{n \cdot l \cdot t} \quad (3)$$

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。经计算,目标点距离该光电测量系统中心的距离  $R$  为 1 473.07 mm。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,也即可以求出物高经过光学系统后在线阵 CCD 上成像所占的理论像元数目。将所测物高成像所占的像元数目和物高经光学系统在线阵 CCD 上的理论成像所占的像元数目按照式(2)进行拟合,即得到该光学系统的畸变的三次校对方程。在无校正程序状态下对该光学系统畸变进行测试,并根据公式(3)计算理论像元数目如表 1 所示(表中像元数为经过软件细分后每个点距离线阵 CCD 中心所占像元的数目)。根据测得的物高及其应对应的像在线阵 CCD 上的位置距离 CCD 中心点所占的实测像元数和理论像元数,按照畸变补偿的数学模型拟合了三次补偿方程。拟合得到的补偿数学模型为

$$y = -0.150\ 8 + 0.999\ 25y' + 2.787\ 9 \times 10^{-6} y'^2 + 5.812\ 77 \times 10^{-9} y'^3 \quad (4)$$

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。

表 1 对应测量及理论的物高、像元数

Table 1 Parallelism value object height, pixel number of measurement and theory

No.	Object height /mm	Measurement pixel	Theory pixel
1	500.207	1 453.341	1 456.183
2	400.189	1 162.771	1 164.983
3	300.225	872.663 4	873.932 3
4	200.238	582.592 6	583.146 2
5	100.11	290.946 3	291.336 5
6	0	0	0
7	100.161	290.576 2	291.396 5
8	200.191	580.887 5	582.825 3
9	299.897	870.974 2	873.489 7
10	400.038	1 162.629	1 165.276
11	499.892	1 452.813	1 456

表 2 像元数拟合结果比较

Table 2 Fitting result comparison of pixel number

No.	Theory value	Measurement value	Correction value
1	1 456.183	1 453.341	1 456.179
2	1 164.983	1 162.771	1 164.963
3	873.932 3	872.663 4	873.968 2
4	583.146 2	582.592 6	583.094 1
5	291.336 5	290.946 3	291.366 5
6	0	0	-0.015 08
7	291.396 5	290.576 2	291.426 6
8	582.825 3	580.887 5	582.771 4
9	873.489 7	870.974 2	873.520 6
10	1 165.276	1 162.629	1 165.261
11	1 456	1 452.813	1 455.992
Mean square deviation /mm	—	2.072 63	0.03256

按照得到的拟合方程，对测试的理论点代入拟合方程进行计算，将拟合计算值与理论值比较，结果如表 2 所示。

由拟合方程误差比较还可看出，三次方程的拟合误差可以满足畸变补偿要求，相对于未补偿前 2.072 63 mm 的测量方差来说，用三次拟合补偿方程校正后得到了很大提高，校正值与理论值已非常接近，方差只有 0.032 mm。并对一物高为 200.115 mm 的目标进行了实验测量。目标经过该光电测量系统成像于系统后部的线阵 CCD 上，经过计算目标成像所占理论像元数目为 582.59，实际测得其所占像元数目为 577.5，按照拟合的补偿方程进行计算补偿，拟合后的其所占像元数目为 582.61，校正前的畸变误差为-2.08 mm，经过校正，畸变误差只有 0.05 mm，使系统整体检测精度从 1.039%提高到 0.025%。

5 小 结

在光电测量系统中，为了解决光学畸变带来的测量误差，设计了一套光电测量系统畸变校正装置。通过测量数据对光学系统的畸变进行标定校正，建立了整个视场畸变校正的通用方程。本文就主要对测量数据进行了三次方程拟合得到校正方程进行了探讨，并写入程序进行了实时测量实验。对于光学测量系统，测量视场主要还是在中心点附近，方程拟合的主要目的还是保证中心点附近的精度基础上补偿边缘点的较大误差。实验结果表明，三次拟合方程能精确的校正光学系统的畸变，有效地改善了光学系统整体实时测量的精度。但三次方程的次数略微过高，是否会给测量结果带来边缘大误差和误差传递累积，还有待进一步实验研究。

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 Chang-bo，HE Sa-xian. A New Digital Method for Geometric Distortion Correction of a Photoelectric Measuring System [J]. **Journal of Optoelectronics·Laser**，2003，14(9)：973-976.

[2] 张洪涛，段发阶，王学影，等. 基于网格靶快速高精度摄像机标定方法[J]. 光电工程，2006，33(11)：57-60.  
ZHANG Hong-tao，DUAN Fa-jie，WANG Xue-ying，et al. Vision model calibration based on grid target [J]. **Opto-Electronic Engineering**，2006，33(11)：57-60.

[3] 凌伟，王志乾，高峰端. 光电测量系统畸变的实时数字校正[J]. 光学 精密工程，2007，15(2)：277-282.  
LING Wei，WANG Zhi-qian，GAO Feng-duan. Real time digital correction for distortion in photoelectricity measuring system [J]. **Optics and Precision Engineering**，2007，15(2)：277-282.

[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，2006，14(5)：883-890.  
YE Dong，XU Qiao-yu，CHE Ren-sheng. Camera calibration technique for vision measurement system [J]. **Optics and Precision Engineerin**，2006，14(5)：883-890.

## 结束语

在现有的边缘检测算法中，Canny 算法是公认的标准算法，其功能强大。本文利用瞳孔左右的两个区域来划定眼睫毛遮挡区域，并将 Canny 算法引入到虹膜的检测中，提出五步法找到虹膜区域中的眼睫毛，通过正切值的比较画出一个扇形来表示虹膜外圆内的眼睫毛遮挡区域，除去眼睫毛遮挡区域与瞳孔，虹膜外圆余下的部分即为虹膜的有效区域。通过实验分析，使用本文采用的检测眼睫毛的算法，可以在最大限度内找到眼睫毛区域，进而找到虹膜的有效区域。为虹膜特征提取和匹配打下了坚实的基础。但是，本算法也有善待改进的地方，例如 Canny 算法中两个阈值的选取。下一步的工作就是设计一种自适应的检测虹膜中眼睫毛的方法。

## 参考文献：

- [1] Kong Wai-kin, Zhang David. Detecting Eyelash and Reflection for Accurate Iris Segmentation [J]. **International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence**, 2003, 17(6): 1025-1034.
- [2] Huang Junzhou, Wang Yunhong, Tan Tieniu, *et al.* A New Iris Segmentation Method for Recognition [C]// **Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition**. Cambridge, UK: IEEE-CS Press, 2004, 3: 554-557.
- [3] Yuan Xiaoyan, Shi Pengfei. An Iris Segmentation Procedure for Iris Recognition [C]// **Proceedings of Sinobiometrics 2004: Chinese conference on biometric recognition**. Guangzhou, China: Springer Berlin Press, 2004: 546-553.
- [4] He Wei, Yuan Weiqi. Detecting eyelash and reflection for accurate iris segmentation [C]// **Proceedings of the 2005 27th Annual International Conference of the Engineering in Medicine and Biology Society**. [S.l.]: IEEE, 2005, 7: 6536-6539.
- [5] 来毅, 路陈红, 卢朝阳. 用于虹膜识别的眼睑及眼睫毛遮挡检测[J]. 计算机辅助设计与图形学报, 2007, 19(3): 346-350.  
LAI Yi, LU Chen-hong, LU Chao-yang. Eyelid and Eyelash Occlusions Detection for Iris Recognition [J]. **Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics**, 2007, 19(3): 346-350.
- [6] 苑玮琦, 林忠华, 徐露. 一种基于人眼结构特征的新颖虹膜定位算法[J]. 光电工程, 2007, 34(1): 112-116.  
YUAN Wei-qi, LIN Zhong-hua, XU Lu. Novel iris location algorithm based on the structure of human eyes [J]. **Opto-Electronic Engineering**, 2007, 24(1): 112-116.
- [7] Canny J. A computational approach to edge detection [J]. **IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, 1986, 8: 679-714.

( 上接第 31 页 )

- [5] 张金利, 王元庆, 朱宏娜. 大视角成像系统的快速精确校正[J]. 光电子·激光, 2006, 17(2): 158-161.  
ZHANG Jin-li, WANG Yuan-qing, ZHU Hong-na. A Simple Method of Accurate Aberration in a Camera with Large Field Lens [J]. **Journal of Optoelectronics · Laser**, 2006, 17(2): 158-161.
- [6] 朱铮涛, 黎绍发. 镜头畸变及其校正技术[J]. 光学技术, 2005, 31(1): 136-138, 141.  
ZHU Zheng-tao, LI Shao-fa. Lens distortion and proofreading technology [J]. **Optical Technique**, 2005, 31(1): 136-138, 141.
- [7] 江洁, 张广军, 周富强, 等. 大视场广角物镜畸变的实时数字校正[J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(4): 174-177, 182.  
JIANG Jie, ZHANG Guang-jun, ZHOU Fu-qiang, *et al.* Distortion Correction of the Wide-Angle Objective Lens with Real-time Digital Technology [J]. **Chinese Journal of Scientific Instrument**, 2004, 25(4): 174-177, 182.
- [8] 杨必武. 非标定图像对最小化畸变几何校正方法研究[J]. 光电工程, 2007, 34(1): 80-84.  
YANG Bi-wu. Minimizing deformation geometric rectification of non-calibration stereovision [J]. **Opto-Electronic Engineering**, 2007, 34(1): 80-84.