

文章编号: 0253-2239(2007)08-1440-3

# 基于新型靶的 CCD 摄像系统畸变测量与校正<sup>\*</sup>

余 俊 林家明 杨建宇 张旭升 沙定国

(北京理工大学信息科学技术学院, 北京 100081)

**摘要:** 深入研究了测试图案对测量畸变的影响。提出“一靶测试法”进行畸变测量与校正,拍摄了自行设计、制作的“综合点阵靶板”的畸变图像,图像处理得到其畸变点位置,并与理想点位置进行对应比较。建立多项式模型确定畸变点与理想点的位置校正关系,理想点位置由理想成像得到,并运用最小二乘拟合算法求得多项式系数,标定整个 CCD 摄像系统的畸变。“综合点阵靶板”采用灰色圆点黑色间带图案,方便了点按序标记排列,从而确定畸变点与理想点的一一对应。对 2.6 mm 焦距的广角 CCD 镜头摄像系统进行了畸变测量与校正,其重复测量,校正精度达到 0.3%。

**关键词:** 测量; CCD 摄像系统; 畸变校正; 多项式模型; 图像处理

中图分类号: TN248 文献标识码: A

## Distortion Measurement and Calibration Technology for CCD Camera System Based on New Target Board

Yu Jun Lin Jiaming Yang Jianyu Zhang Xusheng Sha Dingguo

(School of Information Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

**Abstract:** The influence of testing map on distortion measurement and calibration is extensively studied. A so called “one target distortion testing method” is presented for distortion measurement and calibration. The distorted image of the self-designed and fabricated “integrated spot array target board” is recorded. The position of distorted points is determined by image processing, and compared with the ideal points position. The position relation between distorted points and ideal points is established by polynomial model. The position of ideal points is obtained by ideal imaging. Then polynomial coefficients of the model are computed from the least squares method. While corresponding the distorted points to ideal points, the whole CCD camera system's distortion is calibrated. The integrated spot array target board consists of gray spots and black interval belts, and makes it convenient to mark the spots in sequence and correspond the distorted points to the ideal points. The distortion of wide-angle CCD camera system with focal length of 2.6 mm is repeatedly measured and calibrated, and the calibrating precision is within 0.3%.

**Key words:** optical measurement; CCD camera system; distortion calibration; polynomial model; image processing

### 1 引 言

畸变普遍存在于各类光学成像系统中,畸变测量对许多光电测试系统,如航天遥感、航空测绘、光电测试仪器的光电探测电荷耦合器件(CCD)摄像系统等都是有必要的,医用电子内窥镜和电视制导中的 CCD 摄像系统视场很大,畸变比普通成像系统严

重得多,畸变测量和校正显得尤为重要。

在上述应用的畸变修正过程中,单独物镜的畸变量是没有意义的,因此,这里所研究的畸变测量与传统意义上的畸变测量有所区别,不仅仅是测镜头的畸变,而是把镜头和 CCD 摄像机当作整个成像系统,结合计算机建模和数字图像处理方法,测量该成像系统的畸变量。这种摄像系统的畸变测量比一般

<sup>\*</sup> 国防科工委十一五基础研究项目资助课题。

作者简介: 余 俊(1981—),男,浙江衢州人,硕士研究生,主要从事 CCD 成像系统的畸变校正与图像处理方面的研究。  
E-mail: basdie@tom.com

导师简介: 林家明(1949—),男,辽宁人,教授,主要从事光电测试与计量技术,数字视频处理技术等方面的研究。  
E-mail: ljmm@bit.edu.cn

收稿日期: 2006-09-14; 收到修改稿日期: 2007-04-12

的畸变测量较为复杂。

本文在已有研究成果<sup>[1]</sup>的基础上,深入研究测试图案对测量畸变的影响,自行设计、制作了“综合点阵靶板”,有效解决了畸变靶板图错行错列的问题。并运用“一靶测试法”对 2.6 mm 焦距的广角 CCD 镜头摄像系统进行了畸变测量校正与分析,校正精度达到 0.3%。

## 2 畸变测量与校正的模型

在 CCD 摄像系统的成像像面上,建立畸变像点 $(\rho_d, \theta_d)$ 和理想像点 $(\rho_u, \theta_u)$ 的多项式关系。如(1)式所示,二者关系建立在极坐标下:

$$\begin{aligned} \rho_u &= a_1 \rho_d + a_2 \rho_d^2 + a_3 \rho_d^3 + a_4 \rho_d^4 + a_5 \rho_d^5 + \dots, \\ \theta_u &= b_1 \theta_d + b_2 \theta_d^2 + b_3 \theta_d^3 + b_4 \theta_d^4 + b_5 \theta_d^5 + \dots, \end{aligned} \quad (1)$$

式中畸变系数 $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, \dots, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, \dots$ 为所求未知数,通过畸变点与理想点的对应关系,运用最小二乘拟合算法<sup>[2]</sup>解方程即可求得。

在图 1 所示的坐标系中, $o_1 x_1 y_1$  表示的是摄像机坐标系, $O_2 X_2 Y_2$  和  $o_f x_f y_f$  是在成像像面上建立的两个坐标系,分别表示图像物理坐标系和图像像素坐标系<sup>[3]</sup>。根据理想成像关系,空间任意一点  $P(x, y, z)$  与理想像点  $P_u(X_u, Y_u)$  之间的关系可以由(2)式表示,式中  $f'$  表示镜头焦距。

$$X_u = f' \frac{x}{z}, \quad Y_u = f' \frac{y}{z}, \quad (2)$$

图像像素坐标 $(x_f, y_f)$ 和图像物理坐标 $(X, Y)$ 存在如下的关系:

$$x_f = s_x X + x_{f0}, \quad y_f = s_y Y + y_{f0}, \quad (3)$$

式中  $s_x, s_y$  表示图像平面上单位距离的像素数 (pixels/mm);  $(x_{f0}, y_{f0})$  为光轴与成像像面的交点  $O_2$  的图像像素坐标。

运用图像处理的方法求得 $(x_f, y_f)$ 后,即可由(3)式得到畸变点坐标:

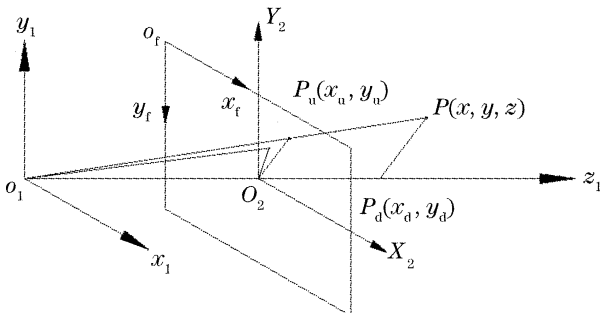


图 1 理想成像与畸变成像的坐标系

Fig. 1 Coordinates of ideal imaging and distorted imaging

$$X_d = (x_f - x_{f0})/s_x, \quad Y_d = (y_f - y_{f0})/s_y. \quad (4)$$

## 3 畸变点的图像处理方法

由靶板拍摄得到如图 2 所示的畸变图像,为得到多项式模型中的畸变点坐标,需由图像处理的方法提取出坐标 $(x_f, y_f)$ ,也即图 2 中灰色目标点的中心像素坐标。

图像处理主要可以分为三个步骤:1)提取灰色目标点;2)标记目标点并计算每个目标点的中心坐标<sup>[4]</sup>;3)畸变点与理想点对应标号。

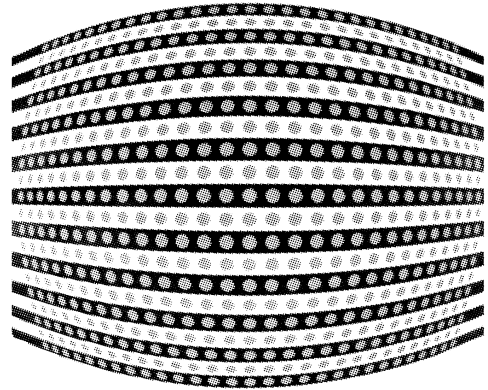


图 2 CCD 摄像系统拍摄的靶板畸变图像

Fig. 2 Distorted image of target board recorded by CCD imaging system

灰色目标点的提取采用阈值算法,并结合中值滤波去掉了黑色条带的边缘。目标点标记采用连通域算法<sup>[5]</sup>并运用图像反色质心法求得目标点的中心。根据靶板的设计特点解决畸变图像中目标点的“错行错列”问题,保证畸变点与理想点的标号对应一致,方法将在下一节中介绍。

## 4 综合点阵靶板<sup>[1]</sup>

综合点阵靶板如图 3 所示,它结合了行靶和点靶信息,其畸变图像更易于目标点的“错行错列”问

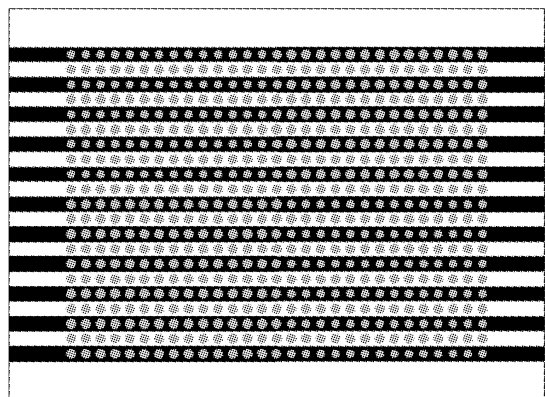


图 3 综合点阵靶板

Fig. 3 Integrated spot array target board

题的解决,具体方法如下:

1) 首先提取靶板畸变图像的黑白条带二值图像,如图 4 所示,逐列逐行扫描该图像,记下每条黑色条带和白色条带(带数记为  $i$ )的  $Y$  轴位置范围  $[Y_{\min}, Y_{\max}]$ ;

2) 提取灰色目标点,计算每个目标点的中心坐标  $(X, Y)$ ,逐行逐列扫描图像判断每个目标点的  $Y$  坐标属于 1) 中的带数  $i$ ,记特征点的行标记为  $i$ ;

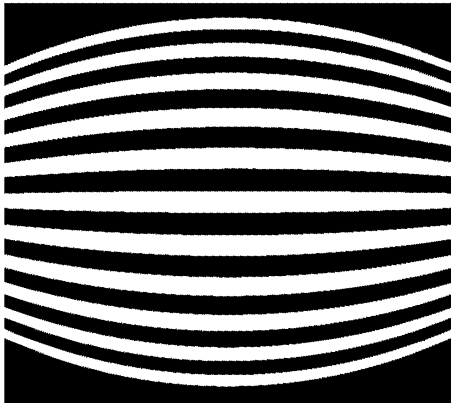


图 4 靶板畸变图像黑白二值条纹

Fig. 4 Black and white binary belts of the distorted image of target board

3) 在  $i$  条带中,判断目标点的  $X$  坐标大小,从小到大排序,从小到大赋值列标记  $j$ ;

4) 得到与理想点对应的畸变点行号  $i$  和列号  $j$ 。

## 5 实验分析

如果建立的多项式模型和预先标定的相关参量足够准确的话,按此模型计算得到的点位置就应该为理想位置,否则就会有残余畸变,所以残余畸变的数量可以反映出畸变测量与校正的精度。在直角坐标系中将残余畸变  $\delta'_r$  定义为式(5),相对残余畸变  $q'$  定义为(6)式:

$$\delta'_r = \sqrt{(x_u - x_c)^2 + (y_u - y_c)^2}, \quad (5)$$

$$q' = \frac{\delta'_r}{\sqrt{x_u^2 + y_u^2}} \times 100\%, \quad (6)$$

式中  $(x_u, y_u)$  是理想像点的图像物理坐标,  $(x_c, y_c)$  是经畸变校正后的像点的图像物理坐标。

实验所用 CCD 摄像机镜头最大视场角为  $120^\circ$ , 焦距  $f' = 2.6$  mm。根据多项式模型,通过对图 3 中 609 个目标点的标定,重复测量与校正,得到 10 组残余畸变和相对残余畸变统计数据如表 1 所示。

表 1 2.6 mm 镜头焦距残余畸变 10 组测量数据重复性表<sup>[2]</sup>

Table 1 Measuring repeatability of ten groups of lens residual distortion of 2.6 mm focal length

	Average residual distortion error / $\mu\text{m}$	Maximum residual distortion error / $\mu\text{m}$	Average relative residual distortion error	Maximum relative residual distortion error
Mean value	8.18	45.27	0.30%	1.24%
Standard deviation	0.361478	6.109201	0.000151	0.003403

由表 1 可看出畸变校正可以实现 0.3% 的精度,其中该摄像系统的原有最大相对畸变为 36.01%。

## 6 结 论

畸变的测量标定精度还包含以下误差因素:1) 光学中心的对准会有偏离,造成靶板畸变图像的倾斜从而引入误差;2) 由于“综合测试靶”采用计算机仿真的纸制靶,其每个目标点的中心定位存在误差;3) 靶板照明均匀性不好也会带来目标点灰度提取的误差;4) 软件中的模型计算也会不可避免地带来误差等等。这些误差综合地反映在测量的畸变量值中。但是从误差数据表 1 测量重复性分析中,相对残余畸变已经达到 0.3%,是一个综合的误差指标,上述每一项误差所占的误差量值相对是较小的,本文所校正的相对残余畸变在实际应用中已经达到畸变校正的指标。若要进一步提高畸变校正指标,则

需从以上误差因素进行分析和控制。

## 参 考 文 献

- 1 Jiaming Lin, Mailing Xing, Dingguo Sha *et al.*. Distortion measurement of CCD imaging system with short focal length and large-field objective[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2005, **43**(10): 1137~1144
- 2 Sha Dingguo. *Error Analyzing and Uncertainty Measurement Assess* [M]. Beijing: China Metrology Publishing House, 2003. 124~172 (in Chinese)  
沙定国. 误差分析与测量不确定度评定[M]. 北京: 中国计量出版社, 2003. 124~172
- 3 R. Y. Tsai. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV camera and lenses[J]. *IEEE Robotics and Automation*, 1987, **RA-3**(4): 323~344
- 4 Gazo Shori Kogaku. *Digital Image Process—the Base Part* [M]. Zhu Hong, Liao Xuecheng, Le Jing trans., Beijing: Science Press, 2002. 75~79 (in Chinese)  
谷口庆治. 数字图像处理——基础篇[M]. 朱虹, 廖学成, 乐静译, 北京: 科学出版社, 2002. 75~79
- 5 Zhang Yujin. *Image Segmentation* [M]. Beijing: Science Press, 2001. 67~77 (in Chinese)  
章毓晋. 图像分割[M]. 北京: 科学出版社, 2001. 75~79