

大视场电视经纬仪摄像系统的标定研究

周泗忠, 杨晓许, 郭治理

(中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

摘 要:利用电视经纬仪的跟踪测量功能,以平行光管作为目标,实现了对摄像系统重要参量的精密测量.结合高准确度轴角编码器,可以对焦距进行标定.通过方位和俯仰方向的角位移,利用镜头畸变的轴对称性,可以确定光轴的位置.对整个视场进行抽样采点,得到一个畸变的网格场,通过拟合得到畸变系数,可以进行高准确度畸变修正.

关键词:光学工程;电视经纬仪;摄像系统标定;畸变修正

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2007)07-1369-4

0 引言

在电视经纬仪精密跟踪测量中,采用电视摄像技术和精密跟踪平台结合,由轴角编码器读出视轴的方位角和俯仰角,图像判读给出目标的脱靶量,实现对目标的高准确度跟踪测量^[1-2].当目标距离近时,往往需要采用短焦距、大视场的镜头.镜头的焦距、畸变修正系数等参量的准确度,对系统的测量准确度有着至关重要的影响.不少文献中提出了各种摄像系统标定方法^[3-5],有的是实验条件和成本太高,工程中无法满足;更多的是准确度不能满足要求.工程上一般对镜头单独进行标定,得到镜头的焦距、畸变修正系数等参量.这样做的工作量很大,而且测量得到的畸变系数不够准确.当镜头和 CCD 配合时,由于 CCD 带来的各项误差,直接使用这些参量,会一定程度上影响测量准确度.

本文根据电视经纬仪本身具有的方位和俯仰方向高准确度角度测量能力的特点,将镜头和 CCD 作为摄像系统,直接对摄像系统的各项参量进行标定,包括:图像中心、有效焦距、畸变校正系数.该方法已成功应用于工程实践,实现了较高的测量准确度,保证了用户使用的需要.

1 镜头焦距

在接近中心的视场中,畸变误差一般可以忽略,这时可把摄像系统看作没有误差的线性成像系统.以平行光管作为目标,转过一个角度之后,目标像点位置差和焦距有关.使像点在图像中位于中心或者附近,保持俯仰不变,在方位方向上转过适当小的角度 α ,判读得到转动前后像点的位置差 L ,则焦距为

$$f=L \cdot k/2 \cdot \tan(\alpha/2) \quad (1)$$

式中, k 为像素和长度的转换系数.

2 图像中心确定方法

光学系统主光轴在 CCD 感光面的投影点,就是图像中心所在的位置^[6].可以利用镜头畸变的对称性,对摄像系统的图像中心位置进行确定^[7].

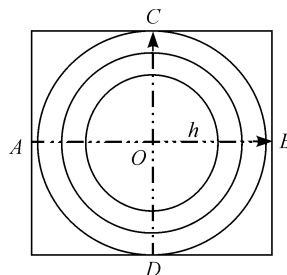


图 1 径向畸变分布

Fig. 1 Distribution of radial distortion

畸变一般分为径向畸变和切向畸变.径向畸变可以在光学设计中加以校正,切向畸变主要由光学材料的不均匀、局部应力和装配调试中偏心造成.由于径向畸变是镜头畸变的主要组成部分,当对镜头畸变修正要求不是很高时,可以只考虑径向畸变,而忽略切向畸变^[8].镜头的径向畸变量与镜头视场角大小有关,表现在以图像中心为同心圆上畸变大小相等,如图 1.在像面上来看,某点的畸变大小只和它与中心点的距离有关,即满足下式

$$\Delta h = mh^2 + nh^4 + kh^6 \quad (2)$$

式中, $h = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}$, (x, y) 为像面上某点坐标, (x_0, y_0) 是畸变中心.当摄像机处于水平状态时,如图 1 中在某个同心圆上的四个点 A、B、C、D 相对中心 O 的距离相等,畸变量相等,测量系统对应的夹角也相等.本文正是利用畸变这种对称性,分别在方位和俯仰方向转动摄像系统,比较 OA、OB、OC、OD 四段距离,当它们相等时,就找到了畸变中心 O.理论上讲,畸变中心和主光轴的像面投影点是一致的,所以就以畸变中心点作为图像

中心,也就是主光轴的投影点.

具体的操作过程是:平行光管水平放置在摄像系统前方的平台上,经纬仪带动摄像机在方位和俯仰方向转动,由轴角编码器精确读出转过的角度大小.

1)调节 CCD 摄像机和平行光管的相对位置,尽量使目标成像在摄像机像面的几何中心位置,记下此时方位和俯仰 A_0 、 E_0 ;此时打开摄像机进行拍摄,标定出目标在像面的像素坐标 (X_0, Y_0) ;

2)控制摄像机在方位方向、俯仰方向沿顺时针和逆时针方向转动各角,得到 A、B、C、D 四个点.同样利用判读软件得到它们的图像坐标;

3)分别比较距离 OA 和 OC、OB 和 OD,如果它们都相等(一定范围内),则认为 O 点即是畸变中心;如果距离相差较大,说明 O 点还不是图像中心,此时调整摄像机的初始位置,然后重复步骤1)~3).

实践表明,这种方法找的中心重复性较好,一般小于 2 个像素.但这种方法也存在一些不足,主要表现在:

1)没有考虑主光轴和感光面的不垂直度等误差,所以会和真实值有一定偏差.不过,这种偏差是有限的,不会对电视经纬仪测量的准确度有太大影响.

2)每次操作都要拍摄、判读 5 幅图像,而且可能要经过许多次重复,才能找到中心,整个过程不够简便、耗时较多.实践中,可以先确定 X 方向的大致中心,然后确定 Y 方向的中心,最后再找到畸变中心 O.

3)判读对结果有一定的影响.在远离图像中心位置时,由于像差,图像质量会有所下降,从而对目标点位置的判读带来影响.

3 畸变修正

由于短焦距镜头视场大,存在较大的畸变误差,对测量准确度有较大的影响,必须加以校正,才能保证测角准确度.畸变修正的思路是首先测出整个视场中不同位置的畸变大小,根据畸变模型拟合修正系数,工作时根据目标在图像中的位置,确定畸变修正量进行修正.

3.1 畸变大小测量

利用高准确度的编码器作为标准,测量在像面上不同位置的畸变量大小.选择水平放置的平行光管作为目标,分别在方位、俯仰方向移动一个角度,对目标进行拍摄.根据编码器的读数,计算出目标的像点的理论位置,和实际像点的位置相比较,就得到了该点的畸变量大小.改变方位和俯仰,使目标像点覆盖整个视场,得到几百个采样点.其中第 i 个测量

点的畸变大小 $(\Delta x_i, \Delta y_i)$ 为

$$\begin{cases} \Delta x_i = x_i - x_0 - f \cdot \tan(A_i - A_0) / k \cos(E_i - E_0) \\ \Delta y_i = y_i - y_0 - f \cdot \tan(E_i - E_0) / k \end{cases} \quad (3)$$

式中, f 为镜头焦距, (x_0, y_0) 为图像中心, (x_i, y_i) 为第 i 个测量点的像点位置, (A_0, E_0) 为目标像点在图像中心时对应的方位和俯仰角度, (A_i, E_i) 为第 i 个测量点对应的方位和俯仰角度, k 为像素长度转换系数.

3.2 畸变模型及畸变系数

3.2.1 轴对称畸变模型

轴对称畸变模型中,认为径向畸变在畸变误差中起主导作用,可以只考虑修正径向畸变,这时的畸变模型如式(2).为了和测量的畸变量相联系,将式(2)中的径向畸变 Δh 向 X、Y 两个方向分解,可以得到 x 、 y 方向的畸变大小

$$\begin{cases} \Delta x = \Delta h \cdot (x - x_0) / h \\ \Delta y = \Delta h \cdot (y - y_0) / h \end{cases} \quad (4)$$

可以把式(2)写成矩阵形式

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h & h^3 & h^5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m \\ n \\ k \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} \right) \quad (5)$$

3.2.2 综合误差模型^[9]

摄像系统中只考虑径向畸变,在误差模型上显得有些粗糙.同时综合考虑镜头的各种轴对称像差、非轴对称像差和摄像机感光面误差,从成像角度出发,可以建立如下三次多项式形式摄像系统畸变模型

$$\begin{cases} \Delta x = a_0 + a_1 x + a_2 y + a_3 x^2 + a_4 xy + a_5 y^2 + a_6 x^3 + a_7 x^2 y + a_8 xy^2 + a_9 y^3 \\ \Delta y = b_0 + b_1 x + b_2 y + b_3 x^2 + b_4 xy + b_5 y^2 + b_6 x^3 + b_7 x^2 y + b_8 xy^2 + b_9 y^3 \end{cases} \quad (6)$$

其中, $a_0 \sim a_9$ 、 $b_0 \sim b_9$ 为畸变系数.同样,我们将式(6)可以记为矩阵形式.

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_0 & \cdots & a_9 \\ b_0 & \cdots & b_9 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & x & y & x^2 & xy & y^2 & x^3 & x^2 y & xy^2 & y^3 \end{bmatrix}^T \quad (7)$$

3.2.3 求畸变系数

利用已经得到的全视场内的采样点位置 (x_i, y_i) 及其畸变大小 $(\Delta x_i, \Delta y_i)$, 分别代入径向畸变模型和综合误差模型,解超定方程,可得畸变系数.设有 N 个采样点,则两种模型求解系数的超定方程分别为式(8)和式(9).

$$\begin{bmatrix} m \\ n \\ k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1^2 & h_1^4 & h_1^6 & \vdots & \vdots & \vdots \\ h_N^2 & h_N^4 & h_N^6 & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \Delta h_1 \\ \cdots \\ \Delta h_N \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} a_0 & b_0 \\ \vdots & \vdots \\ a_9 & b_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & x_1^2 & s_1 y_1 & y_1^2 & x_1^3 & x_1^2 y_1 & x_1 y_1^2 & y_1^3 & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_N & y_N & x_N^2 & s_N y_N & y_N^2 & x_N^3 & x_N^2 y_N & x_N y_N^2 & y_N^3 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \Delta x_1 & \Delta y_1 \\ \vdots & \vdots \\ \Delta x_N & \Delta y_N \end{bmatrix} \quad (9)$$

3.3 畸变修正

将目标点在图像中的坐标和畸变修正系数代入上面公式,得到 X、Y 方向的修正量.将修正量大小和原始坐标代入下式,进行修正.

$$\begin{cases} x_{\text{修正后}} = x - \Delta x \\ y_{\text{修正后}} = y - \Delta y \end{cases} \quad (10)$$

4 应用实例

某电视经纬仪采用分辨率 1024×1024 的 CCD 摄像机,镜头标称焦距 35 mm,对角线视场 25°,编码器测角准确度 3".

畸变修正时采用的坐标系为图像坐标系,X 为水平方向,向右为正,Y 为垂直方向,向下为正,坐标原点为(1,1),最大坐标为(1024,1024),如图 2.这里坐标用像素值表示.

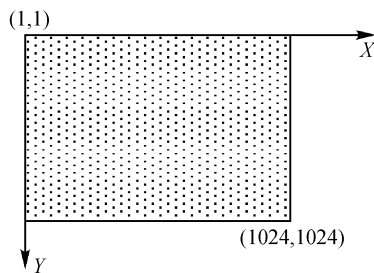


图 2 图像坐标系
Fig. 2 Image coordinate

使用本文方法确定图像中心位置(527.7,512.5),基本接近图像的几何中心(512,512).确定实际焦距为 $f=35.16$ mm,而检测部门使用传统的测量方法得到的焦距为:35.07 mm,结果相差 0.09 mm,可以认为是测量误差引起的差别.

操作过程为:

1)利用水平放置平行光管作为目标,从图像中心位置开始,在方位和俯仰方向每隔 1.0°拍摄网格场,角度移动的误差小于 3".图 3(a)是图像中各采样点的位置.

2)利用每个采样点方位和俯仰角度(A,E),计算出每个点在图像中的理想位置,如图 3(b)所示.图中 * 表示实际位置,o 表示该采样点对应的理想位置.

3)用采样点的实际位置和理想位置比较,就得到了该点的 X 和 Y 方向的畸变大小 Δ_x 、 Δ_y .

4)将采样点的位置坐标 (x_i, y_i) 和畸变大小 $(\Delta_{xi}, \Delta_{yi})$ 代入轴对称畸变模型和综合误差模型,求得畸变修正系数.

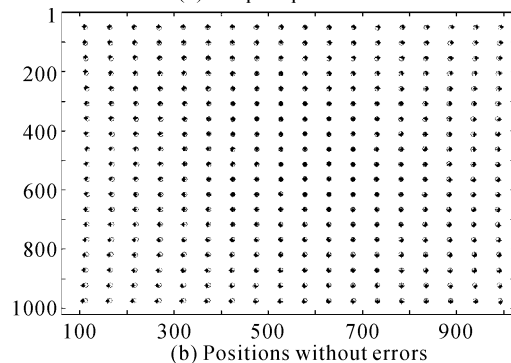
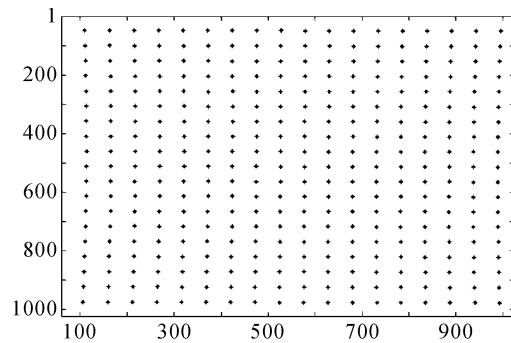


图 3 实际采样点及其理想位置
Fig. 3 Positions of sampled point and their ideal positions without errors

轴对称畸变模型系数:

$$(m, n, k) = (1.35e-4, -9.02e-9, 2.47e-13);$$

综合误差模型系数:

$$(a_0, a_1, \dots, a_9) = (-1.88, 0.01, -0.01, 1.32e-7, 2.80e-6, 2.40e-6, 2.09e-11, -9.68e-11, -1.37e-9, -1.22e-9)$$

$$(b_0, b_1, \dots, b_9) = (-5.6, 0, 0.01, -2.34e-7, -3.59e-7, 1.34e-6, -2.12e-10, 1.58e-9, -7.30e-10, -9.34e-10).$$

5) 进行畸变修正.

利用上面得到的畸变系数和采样点的位置坐标,对采样点进行畸变修正.修正后的误差统计结果见表 1.

表 1 两种畸变模型修正结果比较(单位: ")

	最大误差		均方根误差	
	X 方向	Y 方向	X 方向	Y 方向
未修正	359.7	380.4	160.7	168.4
轴对称模型	157.0	130.2	56.5	56.6
综合误差模型	36.3	35.0	10.6	10.2

从表中可以看出:畸变修正后,误差明显减小;综合考虑镜头的各种误差和感光面误差的误差模型明显好于只考虑径向畸变的模型.

5 结论

电视经纬仪中的摄像系统,可以使用平行光管作为目标,直接对焦距、图像中心、畸变修正系数重要参量进行精密测量.这种方法需要较高的判读准确度,在工作中可以根据目标特点,选用不同的半自动或自动判读方法得到目标位置.实践表明,对这些参量的测量可以达到亚像素的准确度,在工程中非常实用.本方法可操作性强,准确度高,已成功运用于某型电视经纬仪.

参考文献

- [1] MA Cai-wen, LI Yan, CHAI Rao-jun, *et al.* Design & realization of complex multi-target image processing software system by TV theodolite [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(8):994-998.
马彩文,李艳,柴绕军,等.电视经纬仪复杂多目标图像处理软件系统的设计与实现[J],光子学报,2004,**33**(8):994-998.
- [2] CHE Shuang-liang, ZHANG Yao-ming. Theory and practice of optical-electronic theodolite calibration method with star in range [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004,**33**(10):1255-1260.
车双良,张耀明.光电经纬仪外场星校方法的理论与实践[J].光子学报,2004,**33**(10):1255-1260.
- [3] ZHANG Da-pu, LI Yu-shan, LIU Yang. Camera calibration based on image series [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(9):1415-1419.
张大朴,李玉山,刘洋.一种利用图像序列进行摄像机标定的方法[J].光子学报,2005,**34**(9):1415-1419.
- [4] MENG Xiao-qiao, HU Zhang-yi. Recent Progress in Camera Self-calibrating [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2003, **29**(1):110-124.
孟晓桥,胡占义.摄像机自标定方法的研究与进展[J].自动化学报,2003,**29**(1):110-124.
- [5] QUAN Tie-han, YU Qi-feng. High-accuracy Calibration and correction of camera system [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2000, **26**(6):748-755.
权铁汉,于起峰.摄影测量系统的高准确度标定与修正[J].自动化学报,2000,**26**(6):748-755.
- [6] REG G. WILLSON, STEVEN A. S. What is the center of the image [J]. *J Opt Soc Am A*, 1994, **11**(11):2946-2955.
- [7] WANG Feng, ZHOU Ren-kui, Yang Xiao-xu, *et al.* Apocations of two types of calibration method to ccd cameras image center measurement [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(2):294-298.
王锋,周仁魁,杨晓许,等. CCD摄像机图像中心两种标定方法的应用研究[J].光子学报,2006,**35**(2):294-298.
- [8] TSAI R Y. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off the shelf TV cameras and lenses [J]. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 1987, RA-**3**(4):323-344.
- [9] YU Qi-feng, LU HongVwei, Liu Xiao-lin. Precision measure and movement measure based on image [M]. Beijing: Science Press, 2002:122-125.
于起峰,陆宏伟,刘肖琳.基于图像的精密测量与运动测量[M].北京科学出版社,2002:122-125.

Calibration of Camera System of TV Theodolite

ZHOU Si-zhong, YANG Xiao-xu, GUO Zhi-li

(Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068, China)

Received date: 2006-09-30

Abstract: The important parameters of camera system of TV theodolite have gotten with itself azimuth and pitching angle measure function. Camera focus can be measured through changing a little angle with constant target. Image center was gotten through comparing distances of target points in image because of symmetry of lens distortion. Through moving azimuth and pitching angle a distortion net of whole image was built. Then distortion model was set up with different models.

Keywords: Optical engineering; TV theodolite; Camera system calibration; Distortion correction



ZHOU Si-zhong was born in 1953. He received his B. S. degree from Beijing Institute of Technology in 1977. Now he is working as a professor in Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences. His research interets focus on precision optical instrument designing.