

大视场多 CCD 拼接相机标定方法研究

王军 冯伟 刘金国 何昕

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 长春 130022)

摘要 介绍了一种多 CCD 拼接弹道相机的标定方法和步骤,以及标定系统的原理及组成。对相机的光学畸变和大视场拼接物像几何投影关系进行了分析,建立了相机数学模型,并采用最小二乘多元回归分析方法,通过测量相机的内方位元素计算畸变系数,确定了最佳条件下相机数学模型中的各个参数。实验表明利用该方法标定出相机精度方位角测角误差小于 10', 高低角测角误差小于 15'。

关键词 弹道相机; 标校; 畸变; 数学模型

中图分类号 TN942 文献标识码 A

1 引言

本文介绍的系统是一种用特殊光学结构设计的弹道相机,整个光学系统是由单心球透镜和中继物镜构成的二次成像系统(如图 1 所示),入瞳由距第一个光学镜头表面 200mm 处的 9 个 30mm 的入瞳构成,而且像面是由 9 块面阵 CCD 在球面上拼接组成,将全视场景物分别成像在 9 块 CCD 上,构成宽视场弹道相机。CCD 拼接示意图如图 2 所示。该系统基于 9 面阵 CCD 拼接,引入径向畸变相机数学模型,采用 9 平行光管标定系统完成弹道相机标定的方法。

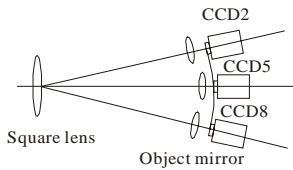


图 1 光学系统示意图
Fig.1 Schematic diagram of optical system



图 2 CCD 拼接示意图
Fig.2 Schematic diagram of CCD connection

利用该方法在对相机进行精密测量的基础上,采用最小二乘多元回归^[1, 2]计算得到相机的内方位元素和畸变参数,并对相机数学模型进行修正,从而达到高精度测量要求。

2 标定系统组成

该系统组成如图 3 所示。整个系统由 9 个平行光管、高精度分划板、LED 照明组件、控制接口、高精度平台、标定计算机、标定软件、稳定支架和调整机构组成。

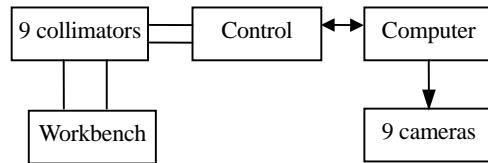


图 3 相机标校仪原理图
Fig.3 Schematic diagram of calibration instrument

9 个平行光管的出瞳与相机的 9 个入瞳重合。每个平行光管的分划板上用光刻的方法制作 25 个十字丝目标,使 25 个目标经过平行光管后成像在各自对应的 CCD 像面上,并充满每个子视场。为了保证每个十字丝照明的稳定性,及 9 个平行光管的机械稳定性不受热影响,采用高亮度发光二极管照明,每个十字丝的照明开关分别由计算机控制。对于十字丝目标,经纬仪可以得到高精度的标定的结果,做到测量基准的可靠传递。通过精确标定每

收稿日期 2004-08-10; 修改稿日期 2004-09-17

作者简介 王军(1979-),男,博士研究生。主要研究方向:光电设备测量,图像处理。E-mail: wjyh1@126.com

个平行光管的 25 个目标的角度后, 该标定设备就可以作为测量基准来标定弹道相机。

3 标定方法

标定时, 相机放置于地基环上, 标定系统和 T4 经纬仪放置在地基板上。地基环和地基板都安置在同一个稳定平台上, 以保证标定时的测量精度。首先, 调整弹道相机和标定系统成水平状态, 使标定系统的平行光管光轴与弹道相机的光轴相平行。然后, 调整标校系统的高度, 使标校系统平行光管的光轴与弹道相机的光轴重合。

用 T4 测量以中间平行光管中心十字丝为基准的各平行光管上十字丝的方位、高低角, 记录这些数据作为空间物点相对相机的高低角、方位角真值。

弹道相机对着标定系统打正、倒镜, 使中间平行光管中心十字丝的像面坐标在正、倒镜时重合, 确定相机的像面中心点。调整相机使中间平行光管中心十字丝成像在像面中心点上。保持相机和标定设备相对静止, 用相机测量各十字丝的像点坐标。这些坐标就是包含了畸变和测量误差的测量值。并重复测量多次记录数据。

经以上步骤, 得到相机像面上 9 块 CCD 各十字丝的角度真值和像点坐标的测量值, 作为相机标定的各种测量数据。

4 相机数学模型

由于该弹道相机光学系统将全视场景物分成 9 个相对独立的测量子视场, 共同组成一宽视场弹道测量设备。这样, 在建立相机的数学模型时, 应将 9 个 CCD 相机分别作为独立的成像单元, 建立各自的包含物像映射关系和光学畸变的单元相机数学模型, 即给出目标点在物空间坐标系和像空间坐标系之间的对应关系, 建立整个相机的数学模型。

如图 4 所示, 设 (X, Y, Z) 是三维世界坐标系中物点 P 的三维坐标, (x, y) 是同一点 P 在像空间坐标系中的坐标。将像空间坐标系定义为坐标原点取摄影中心 s , 坐标 z 轴为摄影方向的反方向与 os 重合, 通过点 s 作平行于像面上 x 轴和 y 轴的轴线作为像空间坐标系的 x 轴和 y 轴。物空间坐标系 X, Y 轴形成水平面, Z 轴垂直向上。其中, ω 为高低角, α 为方位角。

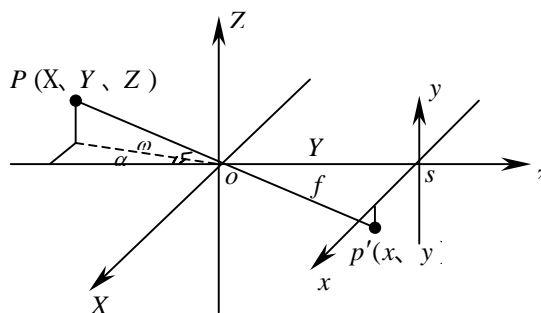


图4 物像投影坐标关系

Fig.4 Coordinates of object-image mapping

根据中心摄影原理^[2,4]推导出中心摄影构像方程为:

$$\begin{aligned} x - x_0 &= -f \frac{a_1 \lambda + b_1 \mu + c_1 \gamma}{a_3 \lambda + b_3 \mu + c_3 \gamma} \\ y - y_0 &= -f \frac{a_2 \lambda + b_2 \mu + c_2 \gamma}{a_3 \lambda + b_3 \mu + c_3 \gamma} \end{aligned} \quad (1)$$

x, y 是十字丝中心像点坐标测量值, $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3, c_1, c_2, c_3$ 是物空间坐标轴和像空间坐标轴间的夹角余弦, f 镜头焦距, x_0, y_0 为像主点坐标, r 为像点相对于像主点的径向距离:

$$r = [(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2]^{1/2} \quad (2)$$

λ, μ, γ 为目标视线方向余弦:

$$\begin{aligned} \lambda &= \sin \alpha \cos \omega \\ \mu &= \cos \alpha \cos \omega \\ \gamma &= \sin \omega \end{aligned} \quad (3)$$

f, x_0, y_0 称为相机内方位元素。

由于实际相机存在设计、装调引起的畸变, 因此在相机模型中必须考虑畸变模型。相机系统的镜头畸变主要有径向畸变和切向畸变两种^[5], 但在物像投影中, 切向畸变引起的误差很小, 一般只考虑径向畸变。相机整体模型如下:

$$x = x_0 - f \frac{a_1 \lambda + b_1 \mu + c_1 \gamma}{a_3 \lambda + b_3 \mu + c_3 \gamma} + k_1 x^2 + k_2 x r^2 + k_3 x r^4 \quad (4)$$

$$y = y_0 - f \frac{a_2 \lambda + b_2 \mu + c_2 \gamma}{a_3 \lambda + b_3 \mu + c_3 \gamma} + k_1 y^2 + k_2 y r^2 + k_3 y r^4$$

其中, k_1, k_2, k_3 为畸变系数。

经以上分析, 得到了成像空间的几何模型, 使物点和像点有了明确的对应关系, 相机标定就是要通过测量相机的内方位元素计算畸变系数, 修正相机数学模型。

5 标定数据解算

在摄影方程中,每个十字丝目标的位置由两个方程解算,25 个目标共有 50 个方程。T4 测量的十字丝的空间方位、高低角代入(3)式,解出目标视线方向余弦 λ, μ, γ 。相机和标定仪器对正后, $a_1、a_2、a_3, b_1、b_2、b_3, c_1、c_2、c_3$ 已知,则模型变为线性系统。把已知参数和得到的测量数

据代入(4)中,采用最小二乘多元回归解算出每块 CCD 各未知参数 $f、x_0、y_0、k_1、k_2、k_3$,完成整个相机的参数标定。由于采用相对测量,因此该装置不需要绝对精度,T4 经纬仪的测角精度为 1',考虑到环境因素带来的一些误差,标定精度可达到 2'~3'。标定参数结果见表 1。

表 1 相机标定结果
Table 1 Results for camera calibration

Unknown parameters	1 # CCD	2 # CCD	3 # CCD	4 # CCD	5 # CCD	6 # CCD	7 # CCD	8 # CCD	9 # CCD
f	62.8549	62.8005	62.957107	63.14825	63.06261	63.14026	62.93755	62.77063	62.96993
x_0	358.055939	360.011353	358.529572	359.136658	358.969666	359.949646	359.008728	359.444305	359.418579
y_0	144.981354	143.003784	145.500000	144.513168	143.456985	144.029007	145.495514	143.950394	144.433380
k_1	0.0013876	0.004910	0.001948	0.005192	0.000825	0.000610	0.000768	0.002841	0.001682
k_2	0.0003614	0.002103	0.003170	0.000780	0.000351	0.000145	0.002091	0.000695	0.000694
k_3	0.002596	0.000639	0.000482	0.000059	0.001301	0.001830	0.000497	0.007320	0.003619

最后根据测量值与真值得到相机的方位角测角误差 10',高低角测角误差 15'。由于任何一光电测量系统物方测角精度都取决于像平面的内方位元素的精度,即主距、主点及畸变,其误差对测量精度影响很大^[3~6]。通过相机标定和常规测量,精确修正数学模型和标定结果,保证相机在实际应用中得到较高的测量精度。

6 结束语

本文所讨论的宽视场高精度多 CCD 拼接弹道相机标定方法已在工程项目上得到应用。通过该方法获得弹道相机的测角精度满足系统总体提出的测量精度要求,为工程上多 CCD 拼接光学测量设备的精度标定提供了一种新方法。

参考文献

- [1] YI Da-fu, SHEN Yun-bao, LI You-fa. Computing Technology [M]. HangZhou: Zhejiang University publishing house, 1998
- [2] ZHOU Fu-qiang, YANG Xue-you. A high speed CCD camera calibration technique[J]. Optics and Precision Engineering, 2000, 8(1): 96~100.
- [3] LI Chao-hui, WANG Zhao-xun. Optical assembly of CCD focal plane for space camera[J]. Optics and Precision Engineering, 2000, 8(3): 213~216
- [4] WANG Zhi-zhuo. Photogrammetric Method [M]. Beijing: Publishing House of Mapping, 1979
- [5] Tsai R Y. A versatile camera calibration technique for high accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV camera and lenses[J]. IEEE Journal of Automation, 1987, 3(4): 323~334
- [6] LIU Gang, GAO Xiao-dong, CAO Xue-dong. A Comprehensive Calibration of the Real-Time Measurement Accuracy for a Photoelectrical Measuring System with Wide Field of View[J]. Opto-Electronic Engineering, 2001, 28(6): 10~13

A Calibration of Multi-CCD Ballistic Camera with Wide Field of View and High Precision

WANG Jun FENG Wei LIU Jin-guo HE Xin

(Changchun Institute of Optics Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130012, China)

Abstract To obtain wide field of view and high resolution ratio, the calibration method and procedure of ballistic camera with multi-CCD system are presented, and the principle and composition of calibration system are also introduced. An analysis for system distortion and the relation of object-image with wide filed of multi-CCD is carried out on the basis of the camera mathematical model. Under the optimum conditions, each of the parameters is settled in the mathematical model by means of least square poly-regress method. Experimental results show that the azimuth angle measurement error is less than 10' and the elevation angle measurement error is less than 15'.

Key words ballistic camera; calibration; distortion; mathematical model