

文章编号: 1006-4710(2015)01-0019-06

# 一种单线阵 CCD 立靶系统参数标定方法

董涛<sup>1,2</sup>, 华灯鑫<sup>1</sup>, 李言<sup>1</sup>, 倪晋平<sup>2</sup>

(1. 西安理工大学 机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048;

2. 西安工业大学 光电工程学院, 陕西 西安 710032)

**摘要:** 为提高单线阵 CCD 立靶的测量精度, 提出一种基于测量模型的系统参数反演和标定方法。在假设相机镜头的焦距、倾角和主点坐标以及激光器发光点坐标等系统参数已知的情况下, 建立相机捕获弹丸影像的中心像元位置、各系统参数以及弹丸着靶坐标之间的函数关系, 通过实测的弹丸影像的中心像元位置和弹丸坐标值反求出与系统各参数相关的矩阵模型, 而不需要求出具体的系统参数值。在实际测量中, 只需根据所求得的矩阵模型和每次测得的目标影像的中心像元位置便可求得弹丸着靶坐标。根据系统测量原理, 建立了系统的数学模型和参数标定模型, 采用所提反演方法对系统参数进行了标定实验。模拟实弹实验的结果表明, 本文方法的坐标测量精度明显优于传统方法。

**关键词:** 着靶坐标; CCD 相机; 立靶; 参数标定

**中图分类号:** TJ012.3      **文献标志码:** A

## Calibration method for parameter of single-linear array CCD vertical target system

DONG Tao<sup>1,2</sup>, HUA Dengxin<sup>1</sup>, LI Yan<sup>1</sup>, NI Jinping<sup>2</sup>

(1. Faculty of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. School of Opto-Electronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710032, China)

**Abstract:** In order to improve the accuracy of measurement of single-linear array CCD vertical target system, a reversion and calibration method based on the parameter of systematic measurement model is proposed in this paper. Suppose that the focus, the camera tilt angle, the principal point coordinate of the lens and the coordinate of the laser luminous point are given. The functional relationships among central pixel position of the projectile image captured by the camera are established, the system parameters and the projectile coordinates, and then a matrix model of system parameters, rather than specific system parameters can be achieved on the basis of actually measured coordinates of projectile and central pixel position of projectile image. In the condition of practical measurement, the projectile coordinate can be obtained by means of the matrix model and measured central pixel positions of objective image. The systemic mathematical model and calibration model have been established on the basis of system measurement principle and then simulation test is done with the method proposed in this paper. The accuracy of measurement for the calibration method proposed in this paper is obviously superior to that of the traditional method.

**Key words:** projectile coordinate; CCD camera; vertical target; parameter calibration

目前常用的自动化弹丸着靶坐标测量方法有声学原理的方法<sup>[1]</sup>、多光幕交汇测量法<sup>[2-3]</sup>、半导体器件阵列测量法<sup>[4-6]</sup>、双 CCD 交汇测量法<sup>[7-8]</sup>。相对于

其他测量方法, 双 CCD 交汇测量法具有测量精度高、测量参数多等优点, 被广泛应用于弹丸、破片等动态目标的着靶坐标、攻角等弹道参数的测量当中。

**收稿日期:** 2014-09-16

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(60972005)。

**作者简介:** 董涛, 男, 博士生, 研究方向为靶场光电测试技术。E-mail: dongtao80@126.com。

**通讯作者:** 华灯鑫, 男, 教授, 博导, 博士, 研究方向为激光雷达大气遥测技术和光电检测技术。

E-mail: xauthdx@163.com。

相对于双 CCD 交汇立靶测量系统,单线阵 CCD 立靶测量系统只需要一台高速 CCD 相机<sup>[9-10]</sup>,所以它具有测量原理简单、系统成本低、容易实现工程化的优点,最重要的是单线阵 CCD 立靶可以用于双目标甚至三个目标同时着靶情况下的坐标测量<sup>[11]</sup>,这是包括双 CCD 交汇立靶在内的现有其它多种立靶测量系统无法比拟的优势。而在单线阵 CCD 立靶的研制当中,为提高系统测量精度,必须对系统参数中与测量结果相关的各参数进行测量。而多个参数的测量,将增大测量误差,且很多参数,如镜头主点坐标、镜头焦距、激光器发光点坐标等采用常规方法均无法直接精确测量,采用常规方法单独对系统各个参数进行测量,然后带入坐标计算公式,坐标测量误差较大。为提高单线阵 CCD 立靶测量精度,就须对

系统各参数进行精确测量。本文以典型的单线阵 CCD 相机配合两个半导体一字线激光光源组成的系统为基本测量单元,以系统测量原理为基础,推导出测试系统输入变量与输出变量的数学模型关系,进而反求出系统各参数对应的矩阵模型,最终实现对测试系统参数的精确反演和标定。

### 1 系统数学模型推导

如图 1 所示,该图为单线阵 CCD 双激光器立靶测量系统弹丸着靶坐标计算示意图<sup>[9]</sup>,设弹丸从  $P(X,Y)$  点穿过,弹丸通过激光器 1 和激光器 2 在投影板上留下的投影点分别为  $S_7$  和  $S_8$ ,投影点  $S_7$  和  $S_8$  通过镜头在 CCD 器件上所成影像的中心点为  $S_6$  和  $S_5$ 。

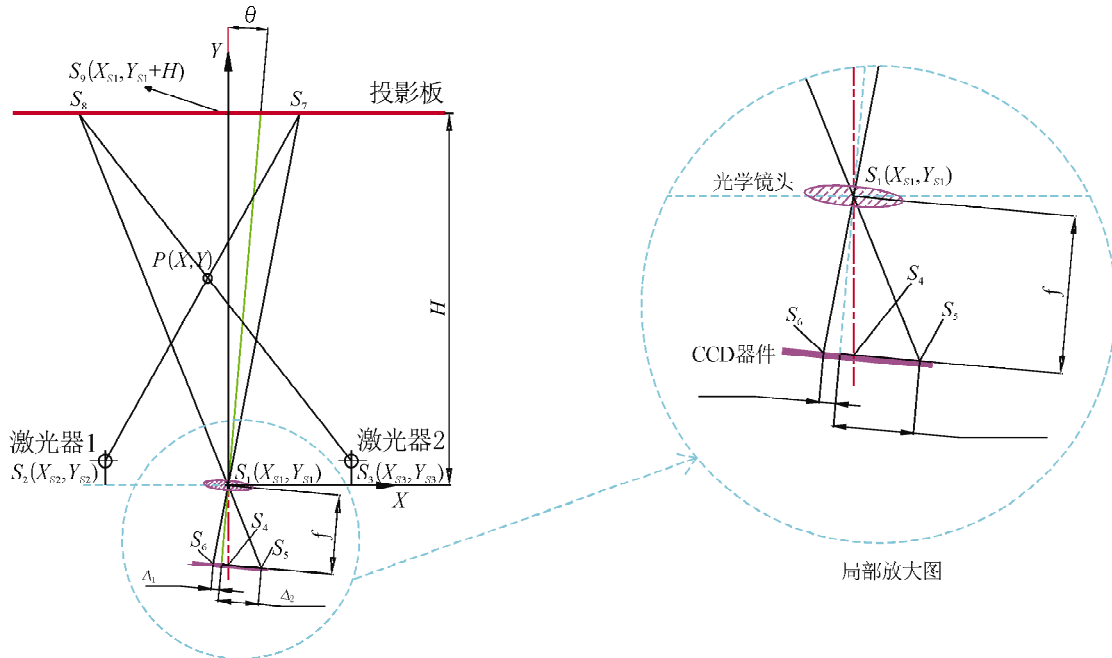


图 1 系统弹丸着靶坐标计算示意图

Fig. 1 Measuring principle diagram for impacting coordinate

在求解系统数学模型之前,假设以下几个参数为已知量:探测镜头主点  $S_1$  坐标  $(X_{S_1}, Y_{S_1})$ ;第一个激光器的发光点  $S_2$  坐标  $(X_{S_2}, Y_{S_2})$ ;第二个激光器发光点  $S_3$  坐标  $(X_{S_3}, Y_{S_3})$ ;设投影板距离光学镜头主点在垂直方向上的距离为  $H$ ,镜头焦距为  $f$ ,镜头主光轴和垂直方向的夹角为  $\theta$ 。则通过以上假设参数便可求出:投影板和通过镜头主点  $S_1$  的竖线的交点  $S_9$  的坐标  $(X_{S_9}, Y_{S_9} + H)$ ; CCD 器件与通过镜头主点  $S_1$  的竖线的交点  $S_4$  的坐标  $(X_{S_4}, Y_{S_4} - f/\cos\theta)$ 。由图中几何关系可以计算得到点  $S_6$  和点  $S_5$  的坐标分别为:

$$S_6: (X_{S_1} + (\Delta_1 - f \tan\theta_1) \cos\theta_1,$$

$$Y_{S_1} - f \cos\theta_1 - \Delta_1 \sin\theta_1)$$

$$S_5: (X_{S_1} + (\Delta_2 - f \tan\theta_1) \cos\theta_1,$$

$$Y_{S_1} - f \cos\theta_1 - \Delta_2 \sin\theta_1)$$

由上文可知,直线  $S_6S_1$  的方程为:

$$\frac{Y - Y_{S_1}}{-f \cos\theta_1 - \Delta_1 \sin\theta_1} = \frac{X - X_{S_1}}{(\Delta_1 - f \tan\theta_1) \cos\theta_1} \quad (1)$$

直线  $S_5S_1$  的方程为:

$$\frac{Y - Y_{S_1}}{-f \cos\theta_1 - \Delta_2 \sin\theta_1} = \frac{X - X_{S_1}}{(\Delta_2 - f \tan\theta_1) \cos\theta_1} \quad (2)$$

直线  $S_8S_7$  的方程为:

$$Y = Y_{S_1} + H \quad (3)$$

联立方程(1)和(3)求出直线  $S_6S_1$  和  $S_8S_7$  的交点  $S_7$  的坐标  $(X_{S_7}, Y_{S_7})$ ,求解结果为:

$$X_{S_7} = X = [X_{S_1}(-f\cos\theta_1 - \Delta_1\sin\theta_1) + H(\Delta_1 - f\tan\theta_1)\cos\theta_1] / (-f\cos\theta_1 - \Delta_1\sin\theta_1)$$

$$Y_{S_7} = Y_{S_5} = Y_{S_1} + H$$

联立方程(2)和(3)求出直线  $S_5S_1$  和  $S_8S_7$  的交点  $S_8$  的坐标  $(X_{S_8}, Y_{S_8})$ , 求解结果为:

$$X_{S_8} = X = [X_{S_1}(-f\cos\theta_1 - \Delta_2\sin\theta_1) + H(\Delta_2 - f\tan\theta_1)\cos\theta_1] / (-f\cos\theta_1 - \Delta_2\sin\theta_1)$$

$$Y_{S_8} = Y_{S_3} = Y_{S_1} + H$$

所以直线  $S_2S_7$  的方程为:

$$\frac{Y - Y_{S_2}}{Y_{S_7} - Y_{S_2}} = \frac{X - X_{S_2}}{X_{S_7} - X_{S_2}}$$

带入  $X_{S_7}$  和  $Y_{S_7}$ , 得:

$$\frac{Y - Y_{S_2}}{Y_{S_1} + H - Y_{S_2}} = \frac{X - X_{S_2}}{\frac{A}{-f\cos\theta_1 - \Delta_1\sin\theta_1} - X_{S_2}} \quad (4)$$

式中:

$$A = X_{S_1}(-f\cos\theta_1 - \Delta_1\sin\theta_1) + H(\Delta_1 - f\tan\theta_1)\cos\theta_1$$

所以直线  $S_3S_8$  的方程为:

$$\frac{Y - Y_{S_3}}{Y_{S_8} - Y_{S_3}} = \frac{X - X_{S_3}}{X_{S_8} - X_{S_3}}$$

带入  $X_{S_8}$  和  $Y_{S_8}$  得:

$$\frac{Y - Y_{S_3}}{Y_{S_1} + H - Y_{S_3}} = \frac{X - X_{S_3}}{\frac{B}{-f\cos\theta_1 - \Delta_2\sin\theta_1} - X_{S_3}} \quad (5)$$

式中:

$$B = X_{S_1}(-f\cos\theta_1 - \Delta_2\sin\theta_1) + H(\Delta_2 - f\tan\theta_1)\cos\theta_1$$

直线  $S_2S_7$  和直线  $S_3S_8$  的交点  $P$  即为弹着点, 其坐标即为弹着点坐标。联立方程(4)和方程(5)求解  $P$  点的坐标  $(X, Y)$  满足式(6)和(7):

$$b_1 + b_2\Delta_1 + b_3\Delta_2 + b_4\Delta_1\Delta_2 + b_5\Delta_1X + b_6\Delta_2X + b_7\Delta_1\Delta_2X = X \quad (6)$$

$$b_8 + b_9\Delta_1 + b_{10}\Delta_2 + b_{11}\Delta_1\Delta_2 + b_{12}\Delta_1Y + b_{13}\Delta_2Y + b_{14}\Delta_1\Delta_2Y = Y \quad (7)$$

其中,  $b_1, b_2, \dots, b_{14}$  为与系统参数  $S_1(X_{S_1}, Y_{S_1}), S_2(X_{S_2}, Y_{S_2}), S_3(X_{S_3}, Y_{S_3}), H, f, \theta$  相关的未知常量。

设镜头光轴所对应的中心像元为  $N$ , 投影点  $S_5$  和  $S_8$  对应的中心像元分别为  $n_1$  和  $n_2$ , 设 CCD 器件两个像元的距离为  $10 \mu\text{m}$ , 即  $0.01 \text{ mm}$ , 则有:

$$\Delta_1 = (n_1 - N) \times 0.01$$

$$\Delta_2 = (n_2 - N) \times 0.01$$

将  $\Delta_1$  和  $\Delta_2$  带入式(6)和(7), 并化简得:

$$B_1 + B_2n_1 + B_3n_2 + B_4n_1n_2 + B_5n_1X + B_6n_2X + B_7n_1n_2X = X \quad (8)$$

$$B_8 + B_9n_1 + B_{10}n_2 + B_{11}n_1n_2 + B_{12}n_1Y + B_{13}n_2Y + B_{14}n_1n_2Y = Y \quad (9)$$

其中,  $B_1, B_2, \dots, B_{14}$  为与系统参数  $S_1(X_{S_1}, Y_{S_1}), S_2(X_{S_2}, Y_{S_2}), S_3(X_{S_3}, Y_{S_3}), H, f, \theta, N$  相关的未知常量。

## 2 反演模型的建立及实现

### 2.1 反演模型的建立

设:

$$\mathbf{B} = (B_1 \ B_2 \ B_3 \ B_4 \ B_5 \ B_6 \ B_7 \ B_8 \ B_9 \ B_{10} \ B_{11} \ B_{12} \ B_{13} \ B_{14})^T$$

由式(8)和(9)可得:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \mathbf{J} \end{pmatrix} \times \mathbf{B} = \begin{pmatrix} \mathbf{X} \\ \mathbf{Y} \end{pmatrix} \quad (10)$$

式中:

$$\mathbf{I} = (1 \ n_1 \ n_2 \ n_1n_2 \ n_1X \ n_2X \ n_1n_2X)$$

$$\mathbf{O} = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)$$

$$\mathbf{J} = (1 \ n_1 \ n_2 \ n_1n_2 \ n_1Y \ n_2Y \ n_1n_2Y)$$

其中  $\mathbf{B}$  为未知常量构成的向量, 总共有 14 个未知量, 因此最少需要测试 7 个点的坐标  $(X_1, Y_1), (X_2, Y_2), \dots, (X_7, Y_7)$  及对应的投影点中心像元  $(n_{11}, n_{12}), (n_{21}, n_{22}), \dots, (n_{71}, n_{72})$ , 带入方程(10), 然后联立求解, 便可得到向量  $\mathbf{B}$ 。

取:

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} \mathbf{P}_1 & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \mathbf{Q}_1 \\ \vdots & \vdots \\ \mathbf{P}_7 & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \mathbf{Q}_7 \end{pmatrix}$$

式中:

$$\mathbf{P}_1 = (1 \ n_{11} \ n_{12} \ n_{11}n_{12} \ n_{11}X \ n_{12}X \ n_{11}n_{12}X)$$

$$\mathbf{Q}_1 = (1 \ n_{11} \ n_{12} \ n_{11}n_{12} \ n_{11}Y \ n_{12}Y \ n_{11}n_{12}Y)$$

$$\mathbf{P}_7 = (1 \ n_{71} \ n_{72} \ n_{71}n_{72} \ n_{71}X \ n_{72}X \ n_{71}n_{72}X)$$

$$\mathbf{Q}_7 = (1 \ n_{71} \ n_{72} \ n_{71}n_{72} \ n_{71}Y \ n_{72}Y \ n_{71}n_{72}Y)$$

设:

$$\mathbf{W} = (X_1 \ Y_1 \ X_2 \ Y_2 \ X_3 \ Y_3 \ X_4 \ Y_4 \ X_5 \ Y_5 \ X_6 \ Y_6 \ X_7 \ Y_7)^T$$

由式(10)可得:

$$\mathbf{H} \times \mathbf{B} = \mathbf{W}$$

求解得:

$$\mathbf{B} = \mathbf{H}^{-1}\mathbf{W}$$

由于系统的各参数不随着时间的变化而变化, 所以一旦系统装调完毕, 对应系统光机结构和镜头参数的矩阵  $\mathbf{B}$  将不会发生改变。

在已知  $B_1, B_2, \dots, B_{14}$  的情况下, 将其带入式 (8) 和 (9), 便可得到弹丸着靶坐标计算公式为:

$$X = \frac{B_1 + n_1 B_2 + n_2 B_3 + n_1 n_2 B_4}{1 - n_1 B_5 - n_2 B_6 - n_1 n_2 B_7} \quad (11)$$

$$Y = \frac{B_8 + n_1 B_9 + n_2 B_{10} + n_1 n_2 B_{11}}{1 - n_1 B_{12} - n_2 B_{13} - n_1 n_2 B_{14}} \quad (12)$$

### 2.2 反演过程的实现

在系统有效探测视场内, 将一个标杆在已知的多个坐标位置垂直于测量靶面分 7 次放置, 用相机采集每次放置标杆时标杆在系统投影板上形成的两个投影的图像并处理, 得到两个图像在 CCD 器件上的中心位置对应的像元。

将标杆的坐标值及图像中心位置像元带入公式  $H \times B = W$  中的  $H$  和  $W$ , 求解得到矩阵  $B$  对应的  $B_1, B_2, \dots, B_{14}$ , 即得到了系统在测量时输入量(中心像元编号)与输出量(坐标  $X, Y$ )之间的对应数学关系, 这样便使得系统在装调时无须对每一个参数进行精确测量。

由于系统属于“定常量”测量系统, 只要系统各参数在测量中保持不变, 则输入量与输出量之间的关系将保持不变, 所以在每次测量中, 只要知道图像在 CCD 器件上的中心位置对应像元  $n_1$  和  $n_2$ , 以及与系统参数对应的矩阵  $B$ , 便可以求出对应弹着点  $P$  的坐标  $(X, Y)$ 。

系统测量模型示意图如图 2 所示。

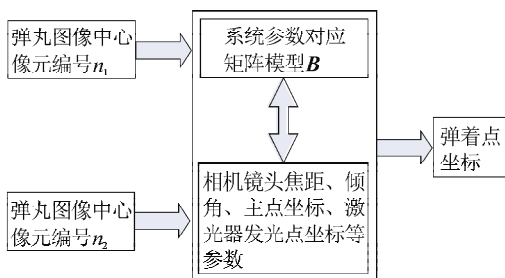


图 2 系统测量模型示意图  
Fig. 2 Model diagram for measuring system

### 3 坐标测量误差分析

由文献 [11] 可知, 理想情况下, 基于单线阵 CCD 相机和双激光器组成的测量系统, 其弹丸着靶坐标测量公式为:

$$X = \frac{X_B X_A - X_A X_B}{X_B - X_A + (X_B - X_A) \frac{f}{H}} \quad (13)$$

$$Y = \frac{(X_B - X_A) H f}{(X_B - X_A) H + (X_B - X_A) f} \quad (14)$$

假设 CCD 相机镜头主点为系统坐标原点, 且激

光器发光点与镜头主点在同一高度, 则式 (13) 和 (14) 中的  $X_A$  和  $X_B$  分别为左激光器和右激光器的水平方向坐标,  $X_{A'}$  和  $X_{B'}$  分别为两个弹丸投影影像的水平坐标,  $H$  为投影板和光学镜头的主点  $S_1$  的竖直距离,  $f$  为 CCD 相机镜头焦距。

根据误差传递理论, 可得  $X$  和  $Y$  坐标测量误差的方差  $\sigma_x^2$  和  $\sigma_y^2$  分别为:

$$\sigma_x^2 = \left( \left| \frac{\partial x_1}{\partial X_A} \right| \right)^2 \cdot (\Delta X_A)^2 + \left( \left| \frac{\partial x_1}{\partial X_{A'}} \right| \right)^2 \cdot (\Delta X_{A'})^2 + \left( \left| \frac{\partial x_1}{\partial X_B} \right| \right)^2 \cdot (\Delta X_B)^2 + \left( \left| \frac{\partial x_1}{\partial X_{B'}} \right| \right)^2 \cdot (\Delta X_{B'})^2 + \left( \left| \frac{\partial x_1}{\partial H} \right| \right)^2 \cdot (\Delta H)^2 + \left( \left| \frac{\partial x_1}{\partial f} \right| \right)^2 \cdot (\Delta f)^2 \quad (15)$$

$$\sigma_y^2 = \left( \left| \frac{\partial y_1}{\partial X_A} \right| \right)^2 \cdot (\Delta X_A)^2 + \left( \left| \frac{\partial y_1}{\partial X_{A'}} \right| \right)^2 \cdot (\Delta X_{A'})^2 + \left( \left| \frac{\partial y_1}{\partial X_B} \right| \right)^2 \cdot (\Delta X_B)^2 + \left( \left| \frac{\partial y_1}{\partial X_{B'}} \right| \right)^2 \cdot (\Delta X_{B'})^2 + \left( \left| \frac{\partial y_1}{\partial H} \right| \right)^2 \cdot (\Delta H)^2 + \left( \left| \frac{\partial y_1}{\partial f} \right| \right)^2 \cdot (\Delta f)^2 \quad (16)$$

实验中, 取  $X_A = -0.3 \text{ m}$ ,  $X_B = -0.3 \text{ m}$ ,  $H = 2.5 \text{ m}$ ,  $f = 14 \text{ mm}$ 。设  $X_A$  和  $X_B$  标定误差  $\Delta X_A$  和  $\Delta X_B$  均取  $1 \text{ mm}$ ,  $\Delta X_{A'}$  和  $\Delta X_{B'}$  均取  $0.01 \text{ mm}$ ,  $\Delta H$  取  $1 \text{ mm}$ ,  $\Delta f$  取  $0.1 \text{ mm}$ 。

用 Matlab 对  $X$  和  $Y$  坐标测量误差标准差进行仿真, 图 3 和图 4 分别为坐标  $X$  和  $Y$  误差标准差分布图。从图中可以看出: 当  $X$  绝对值小于  $0.5 \text{ m}$  时,  $Y$  值大于  $1 \text{ m}$  小于  $2 \text{ m}$  时,  $X$  误差标准差小于  $3.5 \text{ mm}$ ;  $Y$  误差标准差小于  $7.5 \text{ mm}$ 。

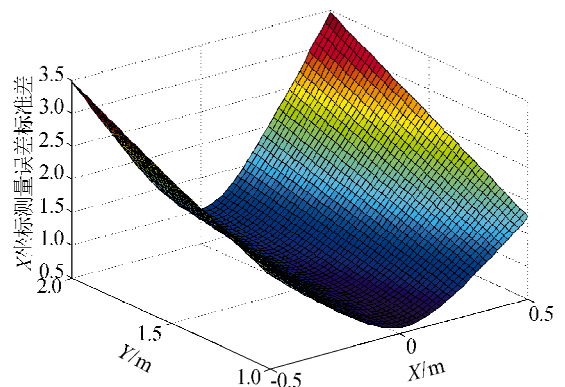


图 3  $X$  坐标测量误差标准差分布  
Fig. 3 The standard deviation distribution of X Coordinate measuring error

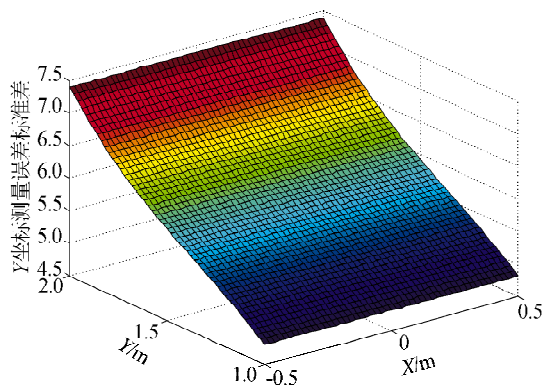


图 4 Y 坐标测量误差标准差分布  
Fig. 4 The standard deviation distribution of Y Coordinate measuring error

### 4 实验与结果分析

实验用标定靶板为 1 m×1 m 的钢板,采用带磁性钢棒垂直吸附于钢板上模拟弹丸穿越测量靶面,将坐标纸粘贴于靶板上,并用激光水准仪将坐标纸标定水平,规定坐标纸的中间某一位置为系统原点,其坐标为(0,0),将钢棒分布放置于预定测量靶面的 7 个位置,并读出对应 7 个位置在坐标纸上的坐标  $(X_1, Y_1), (X_2, Y_2), \dots, (X_7, Y_7)$ ,同时采集每一个位置对应的图像,并通过图像处理得到与 7 个位置对应的 CCD 器件上的投影点的中心像元编号  $(n_{11}, n_{12}), (n_{21}, n_{22}), \dots, (n_{71}, n_{72})$ 。实验数据如表 1 所示。

将表 1 中的原始实验数据带入式(10),并用 Matlab 计算得:

$$B =$$

$$\begin{pmatrix} -1330.009152497636 & 0.676452666283 \\ 0.67095926687 & -0.000023016853 \\ 0.004508111681 & -0.004422834334 \\ -0.000000008573 & 1772.554675594925 \\ 9.679906995945 & -9.423340108063 \\ -0.000093679885 & 0.009058485147 \\ -0.010326156298 & 0.000000759078 \end{pmatrix}^T \quad (17)$$

表 1 模拟弹丸坐标及对应的投影点中心像元编号  
Tab. 1 Simulation projectile coordinates and the corresponding projection center pixel

序号	投影点 1 中心像元编号 $n_1$	投影点 2 中心像元编号 $n_2$	X 坐标	Y 坐标
1	695	835	-200	200
2	517	807	-200	-200
3	1 172	1 317	200	200
4	824	1 185	0	-300
5	211	404	-500	0
6	1 183	1 387	200	0
7	1 598	1 801	500	0

为验证系统参数反演的计算准确与否,在已知与系统各个结构参数相对应的矩阵  $B$  的情况下,将钢棒任意放置在靶面某些位置,通过对 CCD 相机捕获图像的处理得到钢棒在 CCD 器件上的投影点的中心像元位置,最终根据式(11)和(12)计算得到每一个钢棒的位置坐标,即模拟弹着点的位置坐标。同时采用传统方法对系统各参数进行测量,并求得模拟弹着点的位置坐标,通过实验数据对两种系统参数测量和标定方法进行比对,实验数据如表 2 所示。

表 2 纸靶和 CCD 立靶坐标测量对比  
Tab. 2 Compared experimental data on paper targets and CCD targets

编号	纸靶坐标		影像中心像元		常规参数标定方法测量结果				本文参数反演标定方法测量结果			
	$X_0$	$Y_0$	$n_1$	$n_2$	$X_1$	$Y_1$	$\Delta X_1$	$\Delta Y_1$	$X_2$	$Y_2$	$\Delta X_2$	$\Delta Y_2$
1	300	-300	1 395	1 744	305.6	-287.6	5.6	12.4	297.6	-306.3	-2.4	-6.3
2	100	100	1 051	1 221	105.8	102.8	5.8	2.8	102.0	102.8	2.0	2.8
3	250	250	1 229	1 362	255.4	236.4	5.4	-13.6	251.5	254.7	1.5	4.7
4	-200	100	661	829	-200.3	105.4	-0.3	5.4	-200.6	97.5	-0.6	-2.5
5	-400	0	344	541	-405.0	14.4	-5.0	14.4	-400.6	-3.9	-0.6	-3.9
6	-300	0	482	681	-303.2	10.2	-3.2	10.2	-301.1	-2.9	-1.1	-2.9
7	-100	0	759	961	-101.4	4.7	-1.4	4.7	-102.8	-1.3	-2.8	-1.3
8	100	0	1 047	1 252	106.7	-0.6	6.7	-0.6	102.9	-3.9	2.9	-3.9
9	300	0	1 322	1 528	304.6	-0.5	4.6	-0.5	299.1	-5.7	-0.9	-5.7
10	400	0	1 460	1 663	406.1	9.0	6.1	9.0	399.9	2.2	-0.1	2.2
误差最大值							6.7	14.4			2.9	4.7
误差最小值							-5.0	-13.6			-2.8	-6.3
标准差 $\sigma_x$ 和 $\sigma_y$							4.4	8.1			1.8	3.7

从表2数据可以看出,采用传统参数测量方法计算结果,一组10个模拟弹丸的 $X$ 和 $Y$ 坐标测量误差标准差 $\sigma_X$ 和 $\sigma_Y$ 分别为4.4和8.1,而采用本文所提系统参数标定方法 $X$ 和 $Y$ 坐标测量误差标准差 $\sigma_X$ 和 $\sigma_Y$ 分别减小为1.8和3.7。

传统的系统参数测量方法对应的测量误差与第3节理论分析和仿真结果基本一致,说明传统方法对应系统参数的测量精度与理论分析时各系统参数所取的精度基本一致,而本文所提系统参数标定方法实验测量结果明显要由于传统方法,由此证明所提系统参数标定方法对系统参数的标定精度要优于传统方法。

## 5 结 论

本文提出的基于测量模型的单线阵 CCD 立靶系统参数反演和模拟实弹标定方法,在建立了系统数学模型的基础上,由系统输入变量和系统输出变量反求得到一个矩阵模型,该矩阵模型与系统需要反演和标定的镜头焦距、主点坐标、光源发光点坐标等各参数相对应。

在实际测量中,则通过输入变量(影像中心位置)和求得的与系统各参数相关的矩阵模型求解得到所需的输出变量,即弹丸着靶坐标。

本文所提反演和标定方法使得单线阵 CCD 立靶测量系统在装配和调试时,无需进行费时、费力的人工测量,大大减少了人为因素引起的测量误差。

通过实际对搭建的单线阵 CCD 立靶测量系统进行标定和坐标测量,并与传统的系统参数标定方法进行对比,表明本文所提系统参数标定方法对系统测量精度的提高较为明显。

### 参考文献:

[1] McCarthy B D, Regan B J. Position measuring apparatus and method; USA, 4885725[P]. 1989-12-05.  
 [2] Chang C C, Chang H C, Tang L C, et al. Hybrid-integrated prism array optoelectronic targeting system[J].

Optical Laser Technology, 2005, 37: 591-596.

- [3] Davis L R, Brown T E. Photocell array sensor for projectile position detection; USA, 6617563 B1[P]. 2003-09-09.  
 [4] Lu S T, Chou C, Lee M C, et al. Electro-optics target system for position and speed measurement[J]. IEE Proceedings-A, 1993, 140(4): 252-256.  
 [5] Goodwin M W, Melsheimer T T. Target scoring and display system and method; USA, 4763903[P]. 1988-08-16.  
 [6] Downing D L. Moving object monitoring system; USA, 5988645[P]. 1999-11-23.  
 [7] 马卫红,倪晋平,董涛,等.高精度 CCD 室内立靶测试系统设计[J].光学技术, 2012, 38(2): 180-184.  
 Ma Weihong, Ni Jinping, Dong Tao, et al. Design of high precision CCD vertical target coordinate measurement system used indoor [J]. Optical Technique, 2012, 38(2): 180-184.  
 [8] 刘文,熊仁生,张蕴琦,等. CCD 立靶坐标测量系统捕获率研究[J].光子学报, 2008, 37(2): 413-416.  
 Liu Wen, Xiong Rensheng, Zhang Yunqi, et al. Research on acquirement rate of CCD vertical target coordinate measurement system[J]. Acta Photonica Sinica, 2008, 37(2): 413-416.  
 [9] 董涛,倪晋平,马时亮,等.单线阵相机弹丸着靶坐标测量装置与测试方法:中国, ZL 201010237302. 2 [P]. 2012-03-21.  
 [10] Dong Tao, Hua Dengxin, Li Yan, et al. Measuring principle of vertical target density based on single linear array CCD camera[J]. Optik, 2014, 125: 176-178.  
 [11] 董涛,华灯鑫,李言,等.一种双目标同时着靶坐标测量方法[J].兵工学报, 2013, 34(10): 1273-1278.  
 Dong Tao, Hua Dengxin, Li Yan, et al. Method for measuring target coordinates of two projectiles impacting simultaneously[J]. Acta Armamentarii, 2013, 34(10): 1273-1278.

(责任编辑 王卫勋)