

doi:10.3788/gzxb20134211.1329

# 用于三发弹丸同时着靶的密集度测量方法

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, 西安 710048)

(2 西安工业大学 光电工程学院, 西安 710032)

**摘要:**针对三发弹丸同时着靶时密集度难以测量的难题,提出一种高速单彩色线阵 CCD 相机的坐标测量方案.以红、蓝、绿三种颜色扇形一字线激光器作为光源,当飞行弹丸穿越 CCD 相机与光源共面的光幕时,弹丸在投影板上留下投影,用 CCD 相机采集投影板上的弹丸投影影像和弹丸自身影像.运用图象处理和坐标计算法识别并计算得到投影点的坐标,按照直线相交的原理求解得到弹丸穿越光幕的坐标.实验分析和仿真表明,该方法能够测量三发弹丸同时着靶的密集度,对研制一类高射频武器和多管武器的弹丸着靶坐标测量系统具有指导意义.

**关键词:**CCD 相机; 弹丸; 着靶坐标; 密集度; 立靶

中图分类号: TJ012.3

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)11-1329-5

## Method for Measuring Dispersion of Three Projectiles Impacting Simultaneously

DONG Tao<sup>1,2</sup>, HUA Deng-xin<sup>1</sup>, LI Yan<sup>1</sup>, NI Jin-ping<sup>2</sup>

(1 School 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:** As for the difficulty of measuring the dispersion of three projectiles impacting simultaneously, a method for measuring coordinate by using a single color linear array CCD camera was presented. A high-speed color linear array CCD camera was used, with red, blue and green sector-like line laser modules as the light source. When passing through the sharing screen of the CCD camera and the light source, the projectiles left projections on the projection board. Meanwhile, the camera captured the images of the projections and projectiles. Then the projection coordinates was identified and calculated by image processing and coordinate computation. By the principle of linear intersection, the impacting coordinates was obtained. The measuring principle and derivation of the measurement formula were described, and the measurement errors were analyzed and simulated. The proposed method, which proves to be effective in measuring the dispersion of three projectiles impacting simultaneously, provides guidance for the development of measuring system for the impacting coordinate of high RF weapons and multi-barrel weapons.

**Key words:** CCD camera; Projectile; Impacting coordinate; Dispersion; Vertical target

## 0 引言

在枪、炮、弹的研制和生产中,弹丸和破片的飞

行速度和着靶密集度是需要经常测试的关键参量<sup>[1-2]</sup>,而武器系统射击密集度的测量一般是通过先对弹丸着靶坐标的测量进而通过相应公式计算而来

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 60972005)和西安工业大学“兵器光电测试技术及仪器”科研创新团队建设计划项目资助

第一作者: 董涛(1980—),男,讲师,博士研究生,主要研究方向为靶场光电测试技术. Email: dongtao80@126.com

导师: 华灯鑫(1964—),男,教授,博士,主要研究方向为激光雷达大气遥感探测技术和光电检测技术. Email: xaauthdx@163.com

收稿日期: 2013-06-21; 录用日期: 2013-09-04

的.对于单发和低射频连发武器,其密集度参量不难测量.而多管齐射武器和单管高射频武器,在射击状态下往往存在两发甚至三发弹丸同时着靶的情况.现有的自动化测量设备和方法,如声学原理的方法<sup>[3]</sup>,多光幕交汇测量法<sup>[4-5]</sup>,半导体器件阵列测量法<sup>[6-8]</sup>,以及双 CCD 交汇测量法<sup>[9-10]</sup>,均对两发和三发弹丸同时着靶的情况测量失效.针对两发弹丸同时着靶的情况,有研究者提出采用七个探测光幕阵列的方法对双管武器的弹丸着靶坐标进行测量<sup>[11]</sup>;该装置和算法复杂,实际工程难以实现.还有研究者提出采用基于六光幕的测量原理<sup>[12]</sup>,将每一个光幕细分成多个小光幕,实现对两发弹丸同时着靶情况下坐标的测量;该方法光幕组成复杂,当两发弹丸同时着靶且着靶位置处于同一个光幕区间时,系统同样无法区分,最终导致无法测量.

本文针对两发或者三发弹丸同时着靶情况下的着靶坐标测量难题,提出采用单台彩色线阵 CCD 相机和三种波长激光光源配合的测量方法,较上述方法原理简单、实现成本低.建立了测量模型,给出了

弹丸着靶坐标测量公式推导,并对坐标测量误差进行了分析和仿真.三发以上弹丸同时着靶的概率较小,所以本文仅限于研究三发弹丸同时着靶的情况.

## 1 测量原理

### 1.1 测量系统组成

图 1 为系统组成及测量原理.系统主要由主探测器 and 信号采集处理两部分组成.信号采集处理部分主要包括弹丸图像信号采集仪、无线或有线通信装置、主控计算机三部分.主探测器部分包括一台高速彩色线阵 CCD 相机、三个扇形一字线半导体激光器、投影板以及相应的支撑结构.其中,三台激光器颜色分别为红光、蓝光和绿光,中心波长分别为 650、405 和 532 nm.三台激光器分别安装在 CCD 相机的两侧,激光器的发光点与 CCD 相机光学镜头主点高度一致,且发光点与镜头主光轴在水平方向上的距离分别为  $X_A$ 、 $X_B$  和  $X_C$ ,CCD 相机的探测视场和三台激光器的光幕在空间重合,投影板位于支撑架的上方,三台激光器发出的光线均投射在投影板上.

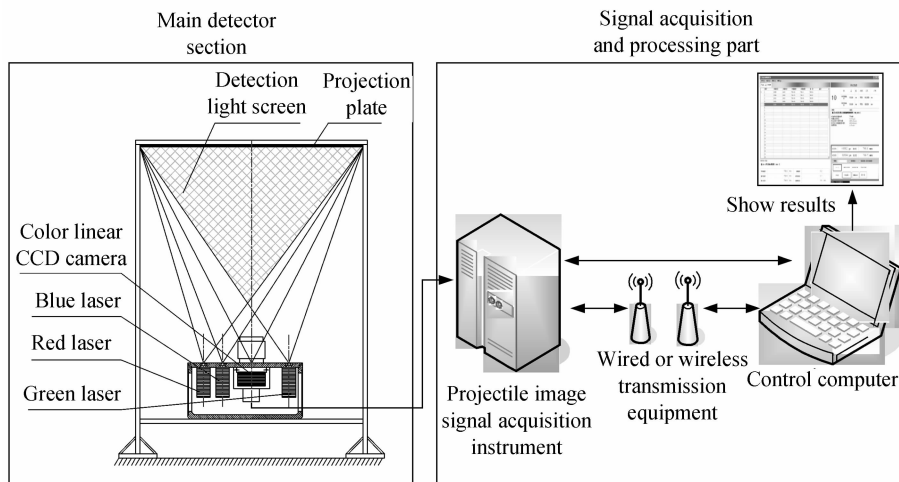


图 1 系统组成及测量原理

Fig. 1 The composition and principle diagram of system

### 1.2 多目标识别算法

图 2 为测量系统弹丸着靶坐标计算示意.当三发弹丸同时穿越探测光幕面时,红光激光器通过三个弹丸  $E_1$ 、 $E_2$  和  $E_3$  在投影板上留下投影  $A_1$ 、 $A_2$  和  $A_3$ ;同理,三发弹丸对应蓝光激光器的投影为  $B_1$ 、 $B_2$  和  $B_3$ ;绿光的为  $C_1$ 、 $C_2$  和  $C_3$ .彩色线阵 CCD 相机捕获弹丸穿越光幕面时在投影板上留下的 9 个投影的图像和弹丸自身  $E_1$ 、 $E_2$ 、 $E_3$  的图像,即弹丸在投影板上的投影和弹丸自身分别通过 CCD 相机的光学镜头在彩色线阵 CCD 器件上成像.采用图像处理的方法,便可得到三种图像:红光图像、蓝光图像和绿光图像.由于投影  $A_1$ 、 $A_2$  和  $A_3$  为三发弹丸遮

挡住红光激光器的投影,所以投影  $A_1$ 、 $A_2$  和  $A_3$  的图像只会在红光图像中出现;同理,投影  $B_1$ 、 $B_2$  和  $B_3$  的图像只会在蓝光图像中出现;投影  $C_1$ 、 $C_2$  和  $C_3$  的图像只会在绿光图像中出现.弹丸  $E_1$ 、 $E_2$  和  $E_3$  挡住了投影板上  $E'_1$ 、 $E'_2$  和  $E'_3$  三点反射进入镜头的光线而形成弹丸自身的图像  $E''_1$ 、 $E''_2$  和  $E''_3$ ,由于  $E'_1$ 、 $E'_2$  和  $E'_3$  三点反射的光线包含红光、蓝光和绿光三种不同波段的光线,所以弹丸  $E_1$ 、 $E_2$  和  $E_3$  的图像  $E''_1$ 、 $E''_2$  和  $E''_3$  会在红光、蓝光和绿光图像中同时出现.通过以上方法便可对获得图像进行识别,进而可以确定 9 个投影和  $E'_1$ 、 $E'_2$  和  $E'_3$  在投影板上的位置.

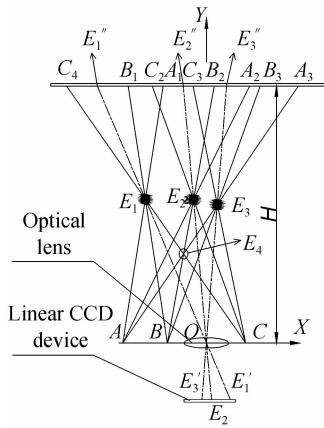


图2 三发弹丸同时着靶时的弹丸投影示意

Fig. 2 Projectile projection Schematic diagram of three bullet incidence simultaneously

分别连接点  $A$  和  $A_1, A_2, A_3$ , 点  $B$  和  $B_1, B_2, B_3$ , 点  $C$  和  $C_1, C_2, C_3$  形成九条直线  $AA_1, AA_2, AA_3, BB_1, BB_2, BB_3, CC_1, CC_2, CC_3$ , 九条直线相互形成的所有交点中, 每一个交点最多只有三条直线经过, 同时只有三条直线经过的交点才有可能为弹着点, 将这些有三条直线经过的交点  $E_1, E_2, E_3$  和  $E_4$  以及其他交点称为“疑似弹着点”, 这些“疑似弹着点”中, 只有三个为真实的弹着点. 再分别连接点  $O$  和  $E_1', E_2'$ , 点  $O$  和  $E_2', E_3'$ , 并分别延长至点  $E_1', E_2'$  和  $E_3'$ , 便可形成直线  $E_1'E_1', E_2'E_2'$  和  $E_3'E_3'$ , 在之前九条直线  $AA_1, AA_2, AA_3, BB_1, BB_2, BB_3, CC_1, CC_2$  和  $CC_3$  相交形成的“疑似弹着点”中, 直线  $E_1'E_1', E_2'E_2'$  和  $E_3'E_3'$  必然经过其中的三个“疑似弹着点”, 这三个“疑似弹着点” $E_1, E_2$  和  $E_3$  便为真实的弹着点, 对应坐标即为弹丸  $E_1, E_2$  和  $E_3$  的弹着点坐标, 其余“疑似弹着点”如  $E_4$  为虚假的弹着点.

### 1.3 测量公式

如图2所示, 以相机光学镜头主点  $O$  为原点建立坐标系  $XOY$ , 投影板和光学镜头的主点  $O$  的距离为  $H$ , 三台激光器发光点  $A, B$  和  $C$  在坐标系中的坐标为  $(X_A, 0), (X_B, 0)$  和  $(X_C, 0)$ , 该值为已知值. 通过图像处理的方法, 可以确定投影  $A_1, A_2, A_3, B_1, B_2, B_3, C_1, C_2$  和  $C_3$ , 以及弹丸  $E_1, E_2$  和  $E_3$  在 CCD 器件上的成像点  $A_1', A_2', A_3', B_1', B_2', B_3', C_1', C_2', C_3', E_1', E_2'$  和  $E_3'$  的位置坐标  $(X_{A_1'}, -f), (X_{A_2'}, -f), (X_{A_3'}, -f), (X_{B_1'}, -f), (X_{B_2'}, -f), (X_{B_3'}, -f), (X_{C_1'}, -f), (X_{C_2'}, -f), (X_{C_3'}, -f), (X_{E_1'}, -f), (X_{E_2'}, -f)$  和  $(X_{E_3'}, -f)$ , 进一步根据成像点的位置、光学镜头焦距  $f$  和光学镜头主点到投影板的距离  $H$  便可以确定各投影  $A_1, A_2, A_3, B_1, B_2, B_3, C_1, C_2$  和  $C_3$ , 以及  $E_1', E_2'$  和  $E_3'$  在投影板上的位置坐标  $(X_{A_1}, H), (X_{A_2}, H), (X_{A_3}, H), (X_{B_1}, H), (X_{B_2}, H), (X_{B_3}, H), (X_{C_1}, H), (X_{C_2}, H), (X_{C_3},$

$H), (X_{E_1'}, H), (X_{E_2'}, H)$  和  $(X_{E_3'}, H)$ , 进而可以求得直线  $AA_1, AA_2, AA_3, BB_1, BB_2, BB_3, CC_1, CC_2, CC_3$  的方程如式(1)~(9).

$$\frac{y}{H} = \frac{x - X_A}{X_{A_1} - X_A} \quad (1)$$

$$\frac{y}{H} = \frac{x - X_A}{X_{A_2} - X_A} \quad (2)$$

$$\frac{y}{H} = \frac{x - X_A}{X_{A_3} - X_A} \quad (3)$$

$$\frac{y}{H} = \frac{x - X_B}{X_{B_1} - X_B} \quad (4)$$

$$\frac{y}{H} = \frac{x - X_B}{X_{B_2} - X_B} \quad (5)$$

$$\frac{y}{H} = \frac{x - X_B}{X_{B_3} - X_B} \quad (6)$$

$$\frac{y}{H} = \frac{x - X_C}{X_{C_1} - X_C} \quad (7)$$

$$\frac{y}{H} = \frac{x - X_C}{X_{C_2} - X_C} \quad (8)$$

$$\frac{y}{H} = \frac{x - X_C}{X_{C_3} - X_C} \quad (9)$$

联立式(1)和(4)求解便可得到直线  $AA_1$  和直线  $BB_1$  的交点的坐标, 该坐标值即为弹着点  $E_1$  的坐标值, 求解结果为

$$x_1 = \frac{X_B X_{A_1} - X_A X_{B_1}}{X_{A_1} - X_A - X_{B_1} + X_B} \quad (10)$$

$$y_1 = \frac{X_B - X_A}{X_{A_1} - X_A - X_{B_1} + X_B} H \quad (11)$$

式中  $X_{A_1} = -X_{A_1}' \frac{H}{f}$ ;  $X_{B_1} = -X_{B_1}' \frac{H}{f}$ , 将其带入公式(10)和(11)得

$$x_1 = \frac{X_{B_1}' X_A - X_{A_1}' X_B}{X_{B_1}' - X_{A_1}' + (X_B - X_A) \frac{f}{H}} \quad (12)$$

$$y_1 = \frac{(X_B - X_A) H f}{(X_{B_1}' - X_{A_1}') H + (X_B - X_A) f} \quad (13)$$

同理, 联立式(2)和(5)求解便可得到直线  $AA_2$  和直线  $BB_2$  的交点的坐标, 该坐标值即为弹着点  $E_2$  的坐标值, 最终求解结果为

$$x_2 = \frac{X_{B_2}' X_A - X_{A_2}' X_B}{X_{B_2}' - X_{A_2}' + (X_B - X_A) \frac{f}{H}} \quad (14)$$

$$y_2 = \frac{(X_B - X_A) H f}{(X_{B_2}' - X_{A_2}') H + (X_B - X_A) f} \quad (15)$$

采用同样的方法, 联立式(3)和(6)求解便可得到直线  $AA_3$  和直线  $BB_3$  的交点的坐标, 该坐标值即为弹着点  $E_3$  的坐标值, 最终求解结果为

$$x_3 = \frac{X_{B_3}' X_A - X_{A_3}' X_B}{X_{B_3}' - X_{A_3}' + (X_B - X_A) \frac{f}{H}} \quad (16)$$

$$y_3 = \frac{(X_B - X_A)Hf}{(X_{B'_3} - X_{A'_3})H + (X_B - X_A)f} \quad (17)$$

## 2 坐标测量误差分析及仿真

### 2.1 误差分析

从式(12)可以看出坐标  $x_1$  是自变量  $X_A, X_{A'_1}, X_B, X_{B'_1}, H$  和  $f$  的函数,因此分别对这些自变量求导,得到误差传递系数,即

$$\frac{\partial x_1}{\partial X_A} = \frac{(X_{B'_1} - X_{A'_1})(X_{B'_1} + X_B \frac{f}{H})}{[X_{B'_1} - X_{A'_1} + (X_B - X_A) \frac{f}{H}]^2} \quad (18)$$

$$\frac{\partial x_1}{\partial X_{A'_1}} = \frac{(X_A - X_B)(X_{B'_1} + X_B \frac{f}{H})}{[X_{B'_1} - X_{A'_1} + (X_B - X_A) \frac{f}{H}]^2} \quad (19)$$

$$\frac{\partial x_1}{\partial X_B} = \frac{(X_{A'_1} - X_{B'_1})(X_{A'_1} + X_A \frac{f}{H})}{[X_{B'_1} - X_{A'_1} + (X_B - X_A) \frac{f}{H}]^2} \quad (20)$$

$$\frac{\partial x_1}{\partial X_{B'_1}} = \frac{(X_B - X_A)(X_{A'_1} + X_A \frac{f}{H})}{[X_{B'_1} - X_{A'_1} + (X_B - X_A) \frac{f}{H}]^2} \quad (21)$$

$$\frac{\partial x_1}{\partial H} = \frac{(X_{B'_1} X_A - X_{A'_1} X_B)(X_B - X_A)f}{[X_{B'_1} - X_{A'_1} + (X_B - X_A) \frac{f}{H}]^2 H^2} \quad (22)$$

$$\frac{\partial x_1}{\partial f} = \frac{-(X_{B'_1} X_A - X_{A'_1} X_B)(X_B - X_A)}{[X_{B'_1} - X_{A'_1} + (X_B - X_A) \frac{f}{H}]^2 H} \quad (23)$$

从式(13)可以看出坐标  $y_1$  是自变量  $X_A, X_{A'_1}, X_B, X_{B'_1}, H$  和  $f$  的函数,因此分别对这些自变量求导,得到误差传递系数,即

$$\frac{\partial y_1}{\partial X_A} = \frac{-H^2 f (X_{B'_1} - X_{A'_1})}{[(X_{B'_1} - X_{A'_1})H + (X_B - X_A)f]^2} \quad (24)$$

$$\frac{\partial y_1}{\partial X_{A'_1}} = \frac{H^2 f (X_B - X_A)}{[(X_{B'_1} - X_{A'_1})H + (X_B - X_A)f]^2} \quad (25)$$

$$\frac{\partial y_1}{\partial X_B} = \frac{H^2 f (X_{B'_1} - X_{A'_1})}{[(X_{B'_1} - X_{A'_1})H + (X_B - X_A)f]^2} \quad (26)$$

$$\frac{\partial y_1}{\partial X_{B'_1}} = \frac{-H^2 f (X_B - X_A)}{[(X_{B'_1} - X_{A'_1})H + (X_B - X_A)f]^2} \quad (27)$$

$$\frac{\partial y_1}{\partial H} = \frac{f^2 (X_B - X_A)^2}{[(X_{B'_1} - X_{A'_1})H + (X_B - X_A)f]^2} \quad (28)$$

$$\frac{\partial y_1}{\partial f} = \frac{H^2 (X_B - X_A)(X_{B'_1} - X_{A'_1})}{[(X_{B'_1} - X_{A'_1})H + (X_B - X_A)f]^2} \quad (29)$$

根据误差传递理论,可得坐标  $x_1$  的测量误差标准差  $\sigma_{x_1}$  为

$$\sigma_{x_1}^2 = \left( \left| \frac{\partial x_1}{\partial X_A} \right| \right)^2 (\Delta X_A)^2 + \left( \left| \frac{\partial x_1}{\partial X_{A'_1}} \right| \right)^2 (\Delta X_{A'_1})^2 + \left( \left| \frac{\partial x_1}{\partial X_B} \right| \right)^2 (\Delta X_B)^2 + \left( \left| \frac{\partial x_1}{\partial X_{B'_1}} \right| \right)^2 (\Delta X_{B'_1})^2 +$$

$$\left( \left| \frac{\partial x_1}{\partial H} \right| \right)^2 (\Delta H)^2 + \left( \left| \frac{\partial x_1}{\partial f} \right| \right)^2 (\Delta f)^2 \quad (30)$$

坐标  $y_1$  的测量误差标准差  $\sigma_{y_1}$  为

$$\sigma_{y_1}^2 = \left( \left| \frac{\partial y_1}{\partial X_A} \right| \right)^2 (\Delta X_A)^2 + \left( \left| \frac{\partial y_1}{\partial X_{A'_1}} \right| \right)^2 (\Delta X_{A'_1})^2 + \left( \left| \frac{\partial y_1}{\partial X_B} \right| \right)^2 (\Delta X_B)^2 + \left( \left| \frac{\partial y_1}{\partial X_{B'_1}} \right| \right)^2 (\Delta X_{B'_1})^2 + \left( \left| \frac{\partial y_1}{\partial H} \right| \right)^2 (\Delta H)^2 + \left( \left| \frac{\partial y_1}{\partial f} \right| \right)^2 (\Delta f)^2 \quad (31)$$

### 2.2 误差仿真

根据坐标  $x_1$  和坐标  $y_1$  的误差公式进行仿真,仿真条件:

1) 坐标  $x_1$  从  $-0.5 \sim +0.5$  m 变化,坐标  $y_1$  从  $1 \sim 2$  m 变化;

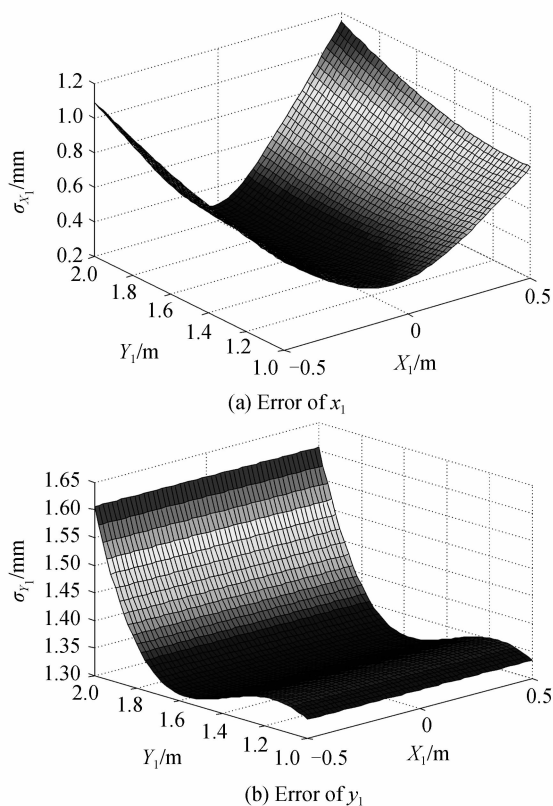
2)  $X_A = -0.6$  m,  $X_B = -0.3$  m,  $H = 2$  m,  $f = 50$  mm,  $X_{A'_1}$  和  $X_{B'_1}$  随弹着点坐标  $x_1$  和  $y_1$  的变化而变化,其中

$$X_{A'_1} = \frac{-[(x_1 - X_A)H + X_A]f}{H} \quad (32)$$

$$X_{B'_1} = \frac{-[(x_1 - X_B)H + X_B]f}{H} \quad (33)$$

3)  $\Delta X_A, \Delta X_B$  和  $\Delta H$  均取 1 mm,  $\Delta X_{A'_1}$  和  $\Delta X_{B'_1}$  取 0.01 mm,  $\Delta f$  取 0.1 mm. 其中  $\Delta X_A, \Delta X_B$  为激光器发光点位置误差,  $\Delta H$  为投影板和镜头主点的距离误差,这三个参量均可以通过高精度激光测距仪测量,其误差不难满足小于 1 mm 的要求;  $\Delta X_{A'_1}$  和  $\Delta X_{B'_1}$  为弹丸在 CCD 器件上的投影中心位置计算误差,投影中心位置的选取一般是根据投影的两个边缘位置而确定的,图像边缘位置处理误差一般为半个像元,考虑到一般光学系统存在衍射现象,取 CCD 焦平面上像点坐标的计算误差为 1 个像元尺寸,所选 CCD 器件像元尺寸为 10  $\mu$ m,即 0.01 mm;  $\Delta f$  为镜头焦距误差,通过光学方法对镜头焦距进行测量准确度可达 0.1%<sup>[13]</sup>,由于所选镜头焦距为 50 mm,所以焦距误差为 0.05 mm,仿真时留有一定的余量,焦距误差  $\Delta f$  按照 0.1 mm 计算.

图 3 为坐标  $x_1$  和  $y_1$  误差分布.从图中可以看出:坐标  $x_1$  从  $-0.5 \sim +0.5$  m 变化,坐标  $y_1$  从  $1 \sim 2$  m 变化时,坐标  $x_1$  的误差与  $x_1$  值和  $y_1$  值的变化有关,  $x_1$  绝对值越大,其误差越大,  $y_1$  值越大,误差越大,坐标  $y_1$  误差的变化与  $x_1$  值的变化无关,随着  $y_1$  值的增大而增大,  $x_1$  误差标准差小于 1.2 mm,  $y_1$  误差标准差小于 1.65 mm.

图3 坐标  $x_1$  和  $y_1$  的误差分布Fig. 3 Error distribution of coordinate  $x_1$  and  $y_1$ 

用同样的方法对坐标  $x_2$ 、 $y_2$ 、 $x_3$ 、 $y_3$  的测量公式进行误差分析和仿真,其误差仿真结果与坐标  $x_1$  和  $y_1$  的误差分布规律和大小相同。

### 3 结论

本文所提基于单线阵 CCD 相机的三发弹丸同时着靶坐标测量方案,只采用一台彩色线阵 CCD 相机,配合三个不同波长的半导体扇形一字线激光器和激光器投影板,便可以完成三发弹丸同时着靶情况下的坐标测量,该方案解决了三发弹丸同时着靶情况下坐标测量的难题。经误差仿真表明,测量靶面为  $1 \times 1 \text{ m}^2$  时,坐标  $x$  的测量误差标准差小于 1.2 mm,坐标  $y$  的测量误差标准差小于 2.2 mm,同时该方案也可以用于单发弹丸着靶和两发弹丸同时着靶的情况,具有测量原理简单,系统成本低,易于工程化的特点。

#### 参考文献

[1] PENG Qi-xian, LI Ze-ren, WANG De-tian, *et al.* Time-divided laser interference velocimetry [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(2): 190-194.

彭其先,李泽仁,王德田,等. 时分复用激光干涉测速技术研究[J]. *光子学报*, 2012, **41**(2): 190-194.

[2] GE Shuang-quan, XIAO Yong-hao, ZHAO Shi-cao. Three-dimensional reconstruction of shield structure's particle field under debris' hypervelocity impact[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(8): 909-913.

葛双全,肖永浩,赵士操. 碎片超高速撞击防护结构粒子场三维重构[J]. *光子学报*, 2012, **41**(8): 909-913.

[3] MCCARTHY B D, REGAN B J. Position measuring apparatus and method; USA, 4885725[P]. Dec. 5, 1989.

[4] CHANG C C, CHANG H C, TANG L C, *et al.* Hybrid-integrated prism array optoelectronic targeting system[J]. *Optical Laser Technology*, 2005, **37**(8): 591-596.

[5] DAVIS L R, BROWN T E. Photocell array sensor for projectile position detection; USA, 6617563 B1[P]. Sep. 9, 2003.

[6] 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.

[7] GOODWIN M W, MELSHEIMER T T. Target scoring and display system and method; USA, 4763903[P]. Aug. 16, 1988.

[8] DOWNING D L. Moving object monitoring system; USA, 5988645[P]. Nov. 23, 1999.

[9] LIU Wen, XIONG Ren-sheng, ZHANG Yun-qi, *et al.* Research on acquirement rate of CCD vertical target coordinate measurement System[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(2): 413-416.

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.

[10] LI Hua, LEI Lei, CHANG He-min, *et al.* Research on Capture Rate of the  $4 \times 4 \text{ m}^2$  CCD Measurement System[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(6): 1238-1241.

李华,雷蕾,常何民,等. CCD立靶对暗弱高速飞行弹丸的捕获研究[J]. *光子学报*, 2008, **37**(6): 1238-1241.

[11] NI Jin-ping, LU Hong-wei, TIAN Hui. Research on a method of measuring the impact location dispersion of double barrel cannon based on the seven-light-screen array[J]. *Acta Armamentarii*, 2013, **34**(4): 398-405.

倪晋平,卢红伟,田会. 七光幕阵列测试双管武器立靶密集度方法研究[J]. *兵工学报*, 2013, **34**(4): 398-405.

[12] TIAN Hui, JIAO Ming-xing, NI Jin-ping, *et al.* Divided screen array measurement method of projectile-curtain parameter for multibarrel volleyed weapons[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, **42**(2): 507-512.

田会,焦明星,倪晋平,等. 多管齐射武器弹幕参量的细分光幕阵列测试方法[J]. *红外与激光工程*, 2013, **42**(2): 507-512.

[13] ZHAO Yu-liang, LI Kai-duan. Auto-measuring system of aerial camera lens applying linear CCD [J]. *Optical Technique*, 2008, **28**(2): 163-164.

赵育良,李开端. 利用线阵 CCD 自动测量航空相机镜头的焦距[J]. *光学技术*, 2008, **28**(2): 163-164.