

文章编号 1004-924X(2017)增-0266-08

单线阵 CCD 立靶双目标同时着靶的信号处理

董 涛^{1*},倪晋平¹,曾祥伟²,开百胜²

- (1. 西安工业大学 陕西省光电测试与仪器技术重点实验室, 陕西 西安 710032;
2. 黑龙江北方工具有限公司, 黑龙江 牡丹江 157000)

摘要:在高射频武器和多管武器弹丸着靶坐标测量当中, 偶而会发生两发弹丸、破片等被测目标同时着靶的情况, 为了克服传统弹丸着靶坐标测量方法不能测量双目标同时着靶的问题, 设计了一种采用基于单台黑白线阵 CCD 相机配合一台一字线激光器, 以及投影板等部件组成的单线阵 CCD 立靶测量系统。本文对单线阵 CCD 立靶测量系统捕获的双目标信号进行理论分析和实际处理, 根据弹丸信号灰度值和所占 CCD 器件像元宽度值两种信号特征的不同, 对 3 种不同类型的双目标信号进行了识别。模拟实弹验证实验结果显示: 测量误差在靶面为 $0.5\text{ m} \times 1\text{ m}$ 时, x 坐标和 y 坐标测量误差标准差 σ_x 和 σ_y 分别为 2.0 mm 和 6.8 mm, 证明了所提双目标信号处理方法的可行性和整个系统的测量精度。

关键词:靶场测试; 弹丸; 着靶坐标; 立靶; 双目标; 信号处理; 测量精度

中图分类号: TN911.7; TJ012.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172513.0266

Signal processing for double objectives to impact simultaneously on single linear CCD vertical target

DONG Tao^{1*}, NI Jin-ping¹, ZENG Xiang-wei², KAI Bai-sheng²

- (1. Shaanxi Province Key Lab of Photoelectric Measurement and Instrument Technology, Xi'an Technological University, Xi'an 710032, China;
 2. Heilongjiang North Tool Co. Ltd., Mudanjiang 157000, China)
- * Corresponding author, E-mail: dong-tao80@126.com

Abstract: Currently several coordinate measurement methods for bullets to impact could not be used in the situation for two bullets to impact simultaneously, thus CCD vertical target measurement system of single linear array composed of components such as a CCD camera based on single black-and-white linear array, a double hyphen line laser and projection plank, etc was adopted to overcome the problem that measurement for double objectives to impact could not be achieved in traditional coordinate measurement method for bullets to impact. Theoretical analysis and actual handling were conducted on signal of double objectives captured by CCD vertical measurement system of single linear array and recognition was conducted on three different types of signals of double objectives according to two different signal feature including grey value of bullet signal and pixel width value of occupied CCD de-

收稿日期: 2017-06-29; 修订日期: 2017-07-13.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 61471289); 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(No. 2015JM5189); 陕西省教育厅重点实验室科研计划资助项目(No. 14JS035); 陕西高校省级重点实验室访问学者专项计划资助项目(No. 14JS036)

vice. Feasibility and measurement precision of the system were verified through the method to simulate live ammunition verification and feasibility of signal handling method of double objectives was proved; standard deviations and of measurement error of coordinate σ_x and coordinate σ_y are respectively 2.0 mm and 6.8 mm when target surface is $0.5 \text{ m} \times 1 \text{ m}$.

Key words: shooting range test; projectile; impacting coordinate; vertical target; dual-object; signal processing; measurement accuracy

1 引 言

在群破片武器、多管齐射武器和高射频转管武器的着靶坐标测量当中,有时会出现两发弹丸同时着靶的情况,而现有的各种弹丸着靶坐标测量设备,如声靶^[1-2]、半导体阵列光电立靶^[3-5]、多光幕交汇立靶^[6-9]和双线阵 CCD 交汇立靶^[10-11]等,均只能测试同一时间单个目标着靶的情况,无法用于两个及以上目标同时着靶情况下的坐标测量。如目前靶场常用的双线阵 CCD 交汇立靶,在有两个弹丸或破片等目标同时入射的情况下,每一台线阵 CCD 相机会同时捕获两个目标的影像,通过图象处理得到每一台相机捕获的两个目标影像的中心位置,进而通过两个中心位置和 CCD 相机镜头主点的位置便可在预定测量靶面内确定两条直线,两台 CCD 相机对应的 4 条直线在靶面内相交便可得到 4 个交点,其中,有两个为真实弹着点,两个为虚假弹着点,根据双线阵 CCD 立靶测量原理,无法判断出哪两个为真实的弹着点,因此导致测量失败。有研究者提出采用 4 台高速线阵 CCD 相机,组成 3 个测量靶面测量双目标同时着靶情况下的坐标^[12],其中第一台和第二台线阵相机的探测光幕面交汇形成与预定弹道垂直的测量靶面 1,第三台线阵相机的探测光幕面(测量靶面 2)与测量靶面 1 在垂直方向上存在一定的夹角,第四台线阵相机的探测光幕面(测量靶面 3)与测量靶面 1 在水平方向上存在一定的夹角,当两发弹丸同时着靶时,通过两发弹丸在 3 个测量靶面间的成像关系以及弹丸飞行速度约束,得到两发弹丸的着靶坐标。该方法由于采用较多的 CCD 相机,不但增加了系统成本,而且使得测量系统较为复杂。综上所述,在靶场测试当中遇到的两个动态目标同时着靶情况下的散布参数测试问题,是兵器参数测试行业公认的技术难题之一,至今

尚未得到很好的解决。本文提出一种用于测量双目标同时着靶坐标的单线阵 CCD 立靶测量方案,重点研究所提方案的双目标信号识别和处理方法,并通过模拟实弹实验对所提方法的可行性和坐标测量精度进行了验证。

2 双目标识别算法研究

可用于测量双目标同时着靶坐标的单线阵 CCD 立靶测量系统包括一台黑白高速线阵 CCD 相机、一个扇形一字线激光器、投影板以及相应的信号采集和处理装置^[13]。激光器位于 CCD 相机的一侧,安装 CCD 相机和激光器时,需要保证 CCD 相机的探测视场和扇形一字线激光器的发光光幕在空间重合,并且投影板覆盖 CCD 相机的探测视场,扇形激光器发出的光线投射在投影板上。

由系统测量原理可知,当有一个目标穿越探测靶面时,CCD 相机捕获的图像里面包含有两个目标影像,其中一个为目标自身的影像,另一个是目标通过激光光源在投影板上产生投影的影像,所以,当有两个目标穿越探测靶面时,CCD 相机捕获的图像里面则会包含 4 个影像,其中会有两个目标自身的影像和两个目标投影的影像,双目标同时着靶坐标测量的首要任务是对目标自身的影像和目标投影的影像进行区分,然后对两种影像进行正确配对,进一步通过图像处理的方法确定 4 个影像的中心像元位置,最终根据系统测量公式分别计算两个目标的着靶坐标。

当采用单激光器单线阵 CCD 立靶测量系统对弹丸等飞行目标的着靶坐标进行测量时,其着靶坐标计算示意图如图 1 所示。从理论上分析,在系统无外界光线干扰的情况下,当弹丸穿越探测光幕面时,通过一字线激光光源在投影板上产

生的投影对应位置处的光照度接近零,所以该投影在 CCD 探测器件上形成的影像 A' 处的灰度值也接近零,与投影的影像不同的是,弹丸自身的影像是弹丸遮挡投影板某一区域的光线,而在 CCD 器件上形成的影像,如图 1 所示,即弹丸 E 遮挡住了投影板 E'' 处的光线,而在 CCD 器件上形成影像 E' ,需要注意的是,弹丸 E 在遮挡 E'' 处光线进入镜头的同时,也将激光光源投射到弹丸上的部分光线反射并进入镜头,进而在 E' 处成像,由于有了弹丸反射光线的影响,弹丸自身成像点 E' 处的灰度值会大于投影的影像 A' 处的灰度值。在对 CCD 相机采集到的双目标图像进行处理时,便可通过弹丸自身和弹丸投影的影像位置对应的灰度值大小对两种影像进行区分。

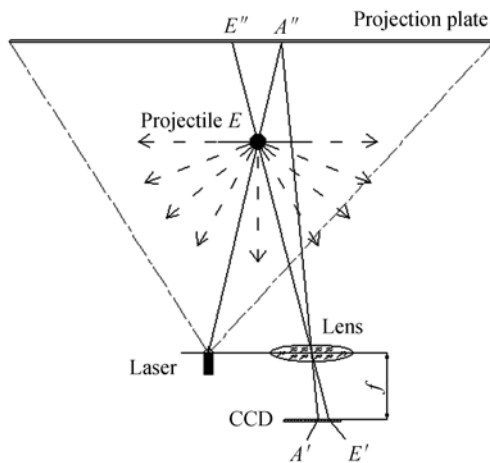


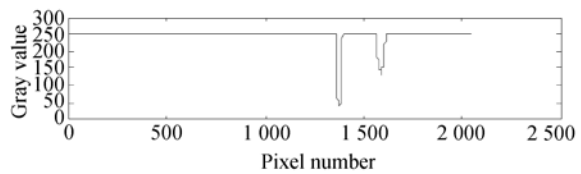
图 1 弹丸投影和成像示意图

Fig. 1 Schematic diagram of projectile projection and imaging

图 2(a)、(b)和(c)分别为单发模拟弹丸自身和弹丸投影的图像、图像对应灰度曲线以及经二值化处理后的图像,实际测量时,由于所用的激光器位于镜头的左侧,则弹丸在投影板上的投影位于镜头主点和弹着点连线所在直线的右侧,所以弹丸投影的影像将位于弹丸自身影像的左侧,如图 2(b)所示,CCD 探测器件越偏向左侧,其像元编号越小,越偏向右侧,其像元编号越大。从图像灰度曲线可以看出,左边弹丸投影影像信号的灰度值小于右边弹丸自身影像信号的灰度值,这与实际测量时状态一致。



(a)单目标图像
(a) Image of single-target



(b)单目标图像对应灰度曲线
(b) Image of grayscale curve corresponding to single objective



(c)经二值化处理后的图像
(c) Images after binarization

图 2 单发模拟弹丸自身和投影的图像及对应灰度曲线
Fig. 2 Single simulation projectile itself and its projection image and the corresponding gray curve

在能够对单个探测目标产生的两种影像进行区分的前提下,进一步研究对两个探测目标产生的影像信号进行识别和处理的方法,用两个圆柱形钢棒模拟两个弹丸等飞行目标同时着靶的情况,当两个目标同时着靶时,CCD 相机采集到的图像包含两个弹丸自身的影像和两个弹丸投影的影像,经过分析,4 个影像可以分为以下 3 种排布方式。

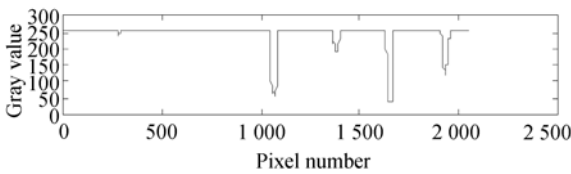
2.1 顺序型双目标影像处理方法研究

4 个弹丸影像排布的第一种类型为“顺序型”,其弹丸图像、图像对应灰度曲线、经二值化处理后的图像以及对应的弹丸着靶坐标示意图如图 3 所示。由于两个弹丸与镜头的距离基本一致,所以,两个弹丸自身和两个弹丸的投影通过镜头在 CCD 器件上的成像所占像元数量也基本一致,由此可以判断来从左至右第一个影像和第二个影像属于第一个弹丸的影像,第三个影像和第四个影像属于第二个弹丸的影像。所以,各影像在图像中的顺序从左至右依次为弹丸 1 投影影像、弹丸 1 自身影像、弹丸 2 投影影像和弹丸 2 自身影像。

另外,图像 3(a)最左侧有一条与弹丸信号无关的“竖线图像”,该“竖线图像”是由于投影板在对应位置表面有些粗糙,导致光线反射率有所下降而引起的,从该图的灰度曲线图 3(b)也可以看出,竖线图像对应位置处的灰度值与背景较为接近,不影响实际测量,图 4(a)和 5(a)同样存在该“竖线图像”。



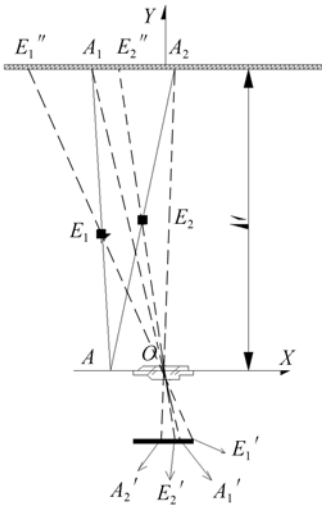
(a)顺序型双目标图像
(a)Images of order type dual-target



(b)顺序型双目标图像对应灰度曲线
(b)Images of gray curve corresponding to the order type dual-target



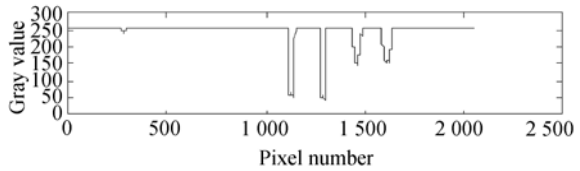
(c)顺序型双目标图像经二值化处理后的效果
(c) Order type dual-target image with binarization



(d)顺序型双目标图像对应弹丸着靶坐标示意图
(d) Diagram for order type dual-target image corresponding to projectile impacting coordinate



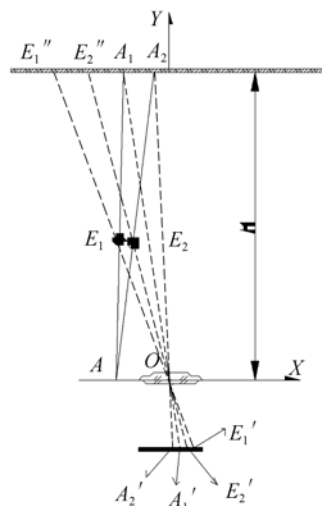
(a)交错型双目标图像
(a)Image of staggered type dual-target



(b)交错型双目标图像对应灰度曲线
(b)Images of gray curve corresponding to the staggered type dual-target



(c)交错型双目标图像经二值化处理后的效果
(c) Staggered type dual-target image with binarization



(d)交错型双目标图像对应弹丸着靶坐标示意图
(d) Diagram for staggered type dual-target image corresponding to projectile impacting coordinate

图 3 顺序型双目标图像及处理结果

Fig. 3 Image and processing results for order type dual-target

2.2 交错型双目标影像处理方法研究

4 个弹丸影像排布的第二种类型为“交错型”,其弹丸图像、图像对应灰度曲线、经二值化处理后的图像以及对应的弹丸着靶坐标示意图如图 4 所示。与第一种类型的图像相似,由于两个弹丸与镜头的距离基本一致,所以,两个弹丸自身和两个弹丸投影通过镜头在 CCD 器件上的成像所

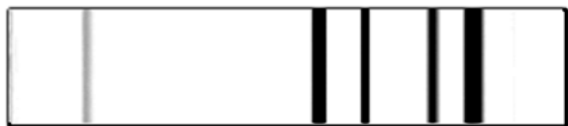
图 4 交错型双目标图像及处理结果

Fig. 4 Image and processing results for staggered type dual-target

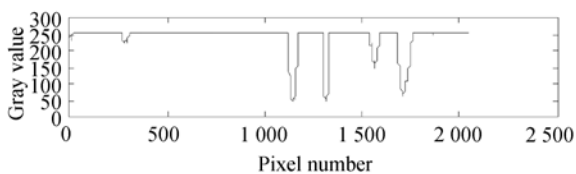
占像元数量也基本一致,由此可以判断从左至右第一个影像和第三个影像属于第一个弹丸的影像,第二个影像和第四个影像属于第二个弹丸的影像。所以,各影像在图像中的顺序从左至右依次为弹丸 1 投影影像、弹丸 2 投影影像、弹丸 1 自身影像和弹丸 2 自身影像。

2.3 包含型双目标影像处理方法研究

四个弹丸影像排布的第三种类型为“包含型”,其弹丸图像、图像对应灰度曲线、经二值化处理后的图像以及对应的弹丸着靶坐标示意图如图 5 所示。由于弹丸 1 距离镜头较近,所以弹丸 1 通过一字线激光器在投影板上产生的投影宽度较宽,弹丸 1 和弹丸 1 的投影通过镜头在 CCD 器件上成像所占像元数量较多,对应影像宽度较宽;弹丸 2 距离镜头较远,所以弹丸 2 通过一字线激光器在投影板上产生的投影宽度较窄,弹丸 2 通过镜头在 CCD 器件上成像所占像元数量较少,对应影像宽度较窄。根据 4 个影像灰度值和宽度值,便可以判断:从左至右第一个影像和第四个影像属于第一个弹丸的影像,第二个影像和第三个影像属于第二个弹丸的影像。所以,各影像在图中的顺序从左至右依次为弹丸 1 投影影像、弹丸 2 投影影像、弹丸 2 自身影像和弹丸 1 自身影像。



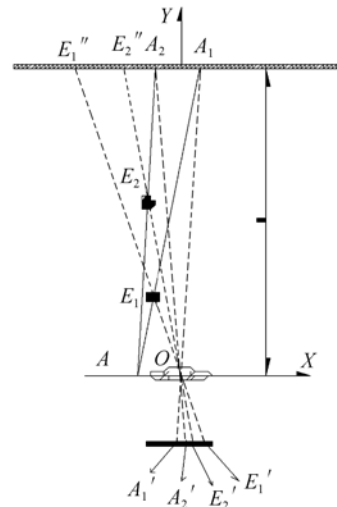
(a)包含型双目标图像
(a)Image of containing type dual-target



(b)包含型双目标图像对应灰度曲线
(b)Images of gray curve corresponding to the containing type dual-target



(c)包含型双目标图像经二值化处理后的效果
(c)Image containing type dual-target with binarization



(d)包含型双目标图像对应弹丸着靶坐标测量示意图
(d)Diagram for containing type dual-target image corresponding to projectile impacting coordinate

图 5 包含型双目标图像及处理结果

Fig. 5 Image and processing results for containing type dual-target

综上所述,对于双目标同时入射的情况下,可以采用单台高速黑白 CCD 相机配合单台一字线激光器的测量方案,与该方案对应的弹丸着靶坐标测量示意图分别如图 3(d)、图 4(d)和图 5(d)所示,当两发弹丸 E_1 和 E_2 同时穿越探测光幕面时,激光器通过弹丸 E_1 和 E_2 在投影板上留下投影 A_1 和 A_2 ,且弹丸自身 E_1 、 E_2 分别通过线阵 CCD 相机的光学镜头在线阵 CCD 器件上成像,通过图像处理的方法对弹丸的投影和弹丸自身在 CCD 器件上的影像加以区分,并对两种影像进行配对组合,投影 A_1 和 A_2 的成像点分别为 A_1' 和 A_2' ,弹丸自身 E_1 、 E_2 的成像点分别为 E_1' 和 E_2' 。直线 AA_1 和 $E_1'E_1''$ 的交点为弹丸 E_1 的弹着点,该点的坐标即为弹丸 E_1 的弹着点坐标;直线 AA_2 和 $E_2'E_2''$ 的交点为弹丸 E_2 的弹着点,该点的坐标即为弹丸 E_2 的弹着点坐标。

另外,在两发弹丸同时着靶的情况下,有时会以很小的概率出现互相遮挡的情况,即两发弹丸在投影板上产生的投影重合,如图 8 所示,或是两发弹丸在 CCD 器件上成像点重合,如图 9 所示。此时,便会形成只有一个弹丸投影的成像和两个弹丸自身的成像相对应,或是两个弹丸投影的成像和一个弹丸自身的成像相对应的情况,这两种情况下均直接将两种成像配对便可计算得到弹丸

着靶坐标,不用再进行其它判定和识别。

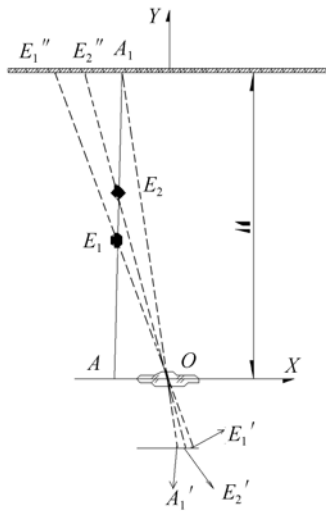


图 6 两发弹丸投影重合对应弹丸着靶坐标测量示意图
Fig. 6 Diagram for two projectile projections coincide

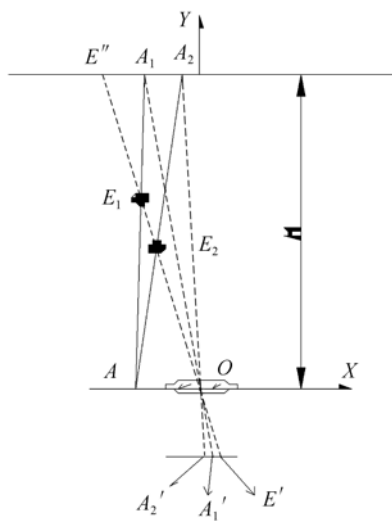


图 7 两发弹丸成像点重合对应弹丸着靶坐标测量示意图
Fig. 7 Diagram for two projectile imaging points coincide

3 实验与结果分析

为验证系统在双目标同时着靶状态下的坐标测量功能及测量精度,用两个带磁性的钢棒模拟两发弹丸,将两个钢棒同时吸附于表面粘贴有坐标纸的钢板上,如图 8 所示,系统整体实物照片如图 9 所示,CCD 立靶系统的探测光幕面和纸靶的测量靶面平行且距离较近,约为 10 mm,所以两

个模拟弹丸均可进入 CCD 相机的探测视场,通过黑白高速 CCD 相机同时采集两发模拟弹丸及其投影的影像,并对采集图像进行处理得到两个弹丸自身影像和两个弹丸投影影像的中心位置对应的像元编号,通过上节论述双目标信号识别和匹配方法,对每一个探测目标自身和目标投影信号进行识别和匹配。

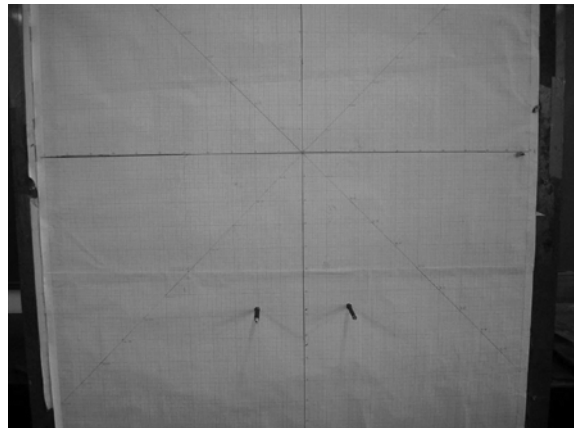


图 8 模拟双目标同时着靶装置
Fig. 8 Simultaneously impacting target device



图 9 单线阵 CCD 立靶系统实物照片
Fig. 9 Physical photos for single linear CCD camera for simulation of dual-target measurement system

采用基于系统坐标测量模型的系统参数综合标定方法^[14],在假设相机镜头的焦距、倾角、主点坐标、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,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 n_1 和 n_2 便可求得弹丸着靶坐标。对搭建的双目标测量系统进行标定,得到系统坐标测量公式为:

$$x = \frac{-1\,369.513\,306\,689\,986 + n_1 \times 1.334\,763\,938\,749 + n_2 \times 0.252\,048\,728\,088 + n_1 n_2 \times (-0.000\,224\,528\,077)}{1 - n_1 \times 0.007\,804\,306\,478 - n_2 \times (-0.007\,632\,570\,127) - n_1 n_2 \times 0.000\,000\,009\,83}, \quad (1)$$

$$y = \frac{1\,218.474\,375\,196\,491 + n_1 \times 10.294\,791\,814\,437 + n_2 \times (-10.424\,929\,008\,298) + n_1 n_2 \times (-0.000\,022\,009\,066)}{1 - n_1 \times 0.011\,692\,995\,955 - n_2 \times (-0.011\,261\,325\,781) - n_1 n_2 \times (-0.000\,000\,160\,948)}. \quad (2)$$

为验证系统参数标定得准确与否,将两个模拟弹丸同时放置在纸靶任意位置,通过对 CCD 相机捕获的双目标图像的处理,得到每一组两个模拟弹丸的投影在 CCD 器件上的影像中心对应像元,以及两个模拟弹丸自身在 CCD 器件上的影像中心对应像元,最终根据式(1)和(2)计算得到每一组两个模拟弹丸的位置坐标,测量 5 组共 10 发,实验数据如表 1 所示。

从表 1 中的实际测量结果可以看出,建立的单线阵 CCD 立靶双目标同时着靶系统测量功能正常,所述双目标信号处理方法有效,最终 x 坐标测量误差最大值为 1.8 mm,最小值为 -5.2 mm, y 坐标测量误差最大值为 16.7 mm,最小值为 -2.7 mm, x 坐标测量误差标准差 σ_x 和 y 坐标测量误差标准差 σ_y 分别为 2.0 mm 和 6.8 mm。

表 1 模拟双目标同时着靶坐标测量实验数据

Tab. 1 Experimental data on measuring simulation of dual targets impacting coordinate

组别	编号	影像中心像元		纸靶坐标/mm		CCD 立靶坐标/mm		测量误差/mm	
		n_1	n_2	x_0	y_0	x_1	y_1	Δx	Δy
1	1	263	486	-350	-350	-348.2	-334.5	1.8	15.5
	2	1 000	1 256	0	-450	-0.1	-440.2	-0.1	9.8
2	3	413	607	-300	-300	-299.7	-283.3	0.3	16.7
	4	1 004	1 138	0	-150	0.5	-147.9	0.5	2.1
3	5	537	712	-250	-250	-249.7	-244.3	0.3	5.7
	6	1 004	1 083	0	150	-0.4	147.3	-0.4	-2.7
4	7	843	969	-100	-100	-101.4	-101.9	-1.4	-1.9
	8	999	1 060	0	300	-5.2	301	-5.2	1
5	9	1 356	1 496	200	-200	199.4	-199.4	-0.6	0.6
	10	1 002	1 049	0	450	-3.1	454.2	-3.1	4.2

4 结 论

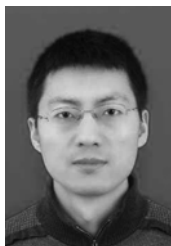
本文提出单台黑白 CCD 相机配合一台一字线激光光源测量双目标同时着靶坐标的方案,对基于单线阵 CCD 相机的双目标信号处理方法进行了研究。根据 CCD 相机捕获的双目标自身和

双目标投影两种影像在灰度值大小和影像所占像元数量两个方面的差异性,对两个目标产生的 4 个影像进行特征识别和归类,进而实现对两个被测目标信号的区分,最终达到双目标同时着靶坐标测量的目的,并通过模拟实弹的方法进行了坐标测量,验证了所提双目标同时着靶信号处理方法的可行性。

参考文献:

- [1] MCCARTHY B D, REGAN B J. Position measuring apparatus and method: USA 4885725[P]. 1989-12-05.
- [2] KNIGHT L C, PHILIPS R B, BOWYER W H, *et al.*. Projectile position detection apparatus [P]. USA:4350881,1982-09-21.
- [3] SMITH C L, LI D G. A forensic ballistics projectile location system [J]. *IEEE*, 1998, 98(5): 184-189.
- [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] 何凯平,徐达,李华. 大面积三角组合光幕弹幕武器密集度的高精度测试[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(6):1523-1529.
- HE K P, XU D, LI H. High precision measurement for barrage weapon dispersion based on large area triangle composite light-screens[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(6):1523-1529. (in Chinese)
- [6] LLUNA E, SANTIAGO V, DEFEZ B, *et al.*. Velocity vector (3D) measurement for spherical objects using an electro-optical device [J]. *Meas J Int Meas Confed*, 2011, 44(9):1723-1729.
- [7] SCHOFFLER M S, CHULUUNBAATAR O, HOUAMER S, *et al.*. Two-dimensional electron-momentum distributions for transfer ionization in fast proton-helium collisions [J]. *Physical Review A-Atomic, Molecular, and Optical Physics*, 2013, 88(4):42-45.
- [8] 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.
- [9] 于纪言,李永新,王晓鸣. 单列光源反射式光幕靶检测弹着点[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(6):1354-1360.
- YU J Y, LI Y X, WANG X M. Measurement of impact points using reflective light screen target of single column light source [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(6):1354-1360. (in Chinese)
- [10] 王苗,李华. CCD 立靶测量系统目标捕获性能研究[J]. *光子学报*, 2009, 38(6):1539-1542.
- WANG M, LI H. Capturing of CCD vertical target measurement system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(6):1539-1542. (in Chinese)
- [11] 张林,李永新,陈运生. TDI-CCD 光靶弹着点坐标测量误差分析[J]. *弹道学报*, 2008, 20(4):20-23.
- ZHANG L, LI Y X, CHEN Y SH. Analysis of coordinate measuring error based on TDI-CCD optical target [J]. *Journal of Ballistics*, 2008, 20(4):20-23. (in Chinese)
- [12] 武江鹏,宋萍,郝创博,等. 带弹序的弹幕武器立靶密集度测试[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(3): 600-608.
- WU J P, SONG P, HAO CH B, *et al.*. Measurement of vertical target dispersion with target-hitting sequence for barrage weapons[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(3):600-608. (in Chinese)
- [13] DONG T, HUA D X, LI Y, *et al.*. Measuring principle of vertical target density based on single linear array CCD camera[J]. *Optik*, 2014, 125: 176-178.
- [14] 董涛,华灯鑫,李言,等. 一种单线阵 CCD 立靶系统参数标定方法[J]. *西安理工大学学报*, 2015, 31(1):19-24.
- DONG T, HUA D X, LI Y, *et al.*. Calibration Method for Parameter of Ingle-Linear Array CCD Vertical Target System[J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2015, 31(1):19-24. (in Chinese)

作者简介:



董 涛(1980—),男,陕西西安人,博士,副教授,2003年、2006年分别于西安工业大学获得学士、硕士学位,2015年于西安理工大学获得博士学位,主要从事光学仪器结构设计和兵器靶场光电测试技术方面的研究。Email:dong-tao80@126.com