多幕光学法测量弹丸炸点坐标及误差分析

李翰山 雷志勇

(西安工业大学电子信息工程学院,陕西西安 710032)

摘要 针对飞行弹丸对空中目标近炸炸点位置测量,提出了多幕光学法测量技术。根据试验特点,分析了多光幕 交汇测量弹丸炸点位置存在的问题,研究了采用侧向相机辅助多光幕交汇测量技术。通过相机采集到的炸点图 像,建立相机、模拟目标和多光幕交汇光幕阵列空间几何计算模型。利用弹丸的飞行轨迹和弹丸炸点图像平面坐 标,研究了弹丸炸点侧向空间坐标的计算方法和多光幕交汇测量系统二维坐标修正原理,给出了弹丸炸点坐标计 算函数。利用微分法从交汇光幕夹角、光幕幕厚、测时和测距等方面分析测量误差。经计算分析,模拟目标中心高 度小于 50 m时,炸点三维坐标的误差小于 40 mm。

关键词 测量;多幕光学法;弹丸;近炸引信;炸点;多光幕交汇系统;相机

中图分类号 TJ012.3 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201232.0212003

Measurement of Projectile Burst Coordinates by Using Multi-Screen Optical Method and Its Error Analysis

Li Hanshan Lei Zhiyong

(School of Electronic Information Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 710032, China)

Abstract The multi-screen optical method is put forward to solve the problem of three-direction coordinate measurement when the flying projectile gets close to object and explodes in the high altitude. According to experiment characteristic, the demerits of multi-screen across target are pointed out and the technology of using lateral layout area camera to assistant multi-screen across target is studied. The mathematics geometry model on camera, simulating object and multi-screen across target is set up based on projectile burst image acquired by lateral camera. The lateral coordinates calculation method and the modified principle of two-dimensional coordinates of multi-screen across target are studied and analyzed by using projectile flying contrail and its plane coordinates of burst image. The function of three-dimensional projectile burst coordinates is given. The differential method is applied to analyze their coordinate's errors, which come from the angle of intersection screen, the thick of screen, the measurement time, ranging and so on. Coordinate errors will be less than 40 mm when the height of simulating object is less than 50 m by theoretical analysis and calculation.

Key words measurement; multi-screen optical method; projectile; proximity fuze; burst location; multi-screen across target ; camera

OCIS codes 040.1490; 040.1880; 120.1880

1 引 言

无线电近炸引信相对被击目标的炸点位置是弹 丸破片毁伤效能分析和引信改进研制的重要分析依 据。对于近炸引信炸点位置测量,特别是二维脱靶 量测量,很多文献都提出了相应的测试方法,如多高 速摄像法、声靶^[1,2]和光幕法^[3~5]等。高速摄像法采 用多个高速摄像机交汇原理,成本比较高,声靶结构 大,对高空定目标环境测试,存在着布置困难,且仅 获得火炮方向的两维坐标;光幕法可以获得低伸弹 道弹丸作用某一立靶平面位置的两维坐标,对于高 空大靶面的弹丸炸点位置测量,其存在测量点不是 真实的炸点位置。然而,当前的四光幕交汇法^[6~8]

作者简介:李翰山(1978—),男,博士,副教授,主要从事靶场光电测试技术、检测技术及自动化装置等方面的研究。 E-mail: lihanshan269@163.com

收稿日期: 2011-07-26; 收到修改稿日期: 2011-09-07

基金项目:国家自然科学基金(61107079)和陕西省教育厅专项项目(2010JK605)资助课题。

和六光幕交汇法^[9~11] 虽仅获得平面立靶坐标,但是 结构简单,探测灵敏度高,作用视场大,使用方便,仍 为靶场弹丸坐标测试的主要工具。为了使它的应用 更加多功能化,也能满足引信炸点三维坐标测量,需 要在测试方法上进一步的改善。本文建立在多光幕 交汇测量系统的基础上,研究了多光幕交汇与相机 相结合的多目光学测量法,实现高空大靶面弹丸炸 点空间三维坐标测量。

2 问题的提出

四光幕交汇法是采用 4 个探测靶探测光幕在空 间形成交汇测量光幕区,如图1和图2所示,弹丸在 光幕区间的飞行路径近似为直线,按照交汇几何结 构和弹丸穿越光幕间的时间值,计算出飞行弹丸穿 越光幕的二维坐标。图 1 和图 2 中的光幕 G_1, G_2 , G_3 , G_4 为四光幕在空间两个方向分解坐标计算图, 通常对弹丸炸点测量均是以模拟目标头部中心为坐 标原点,从火炮发射方向正视模拟目标的坐标平面 为 xoy, ox 和 oy 分别为左右偏差坐标轴和高低偏差 坐标轴。光幕 G1 和 G4 为平行且垂直于弹道,两者间 的靶距为 S,光幕 G₂ 与水平中心弹道线交汇位置为 靶距的一半,光幕 G_1, G_2, G_3 分别成夹角 α_1 和 β_1, H 为模拟目标高度。假设飞行弹丸垂直穿越4个光幕, 以光幕 G_1 为计时装置的启动信号,光幕 G_2 , G_3 , G_4 为停止计时信号,获得的计时值分别为 t1,t2,t3,则 弹丸飞行路径与倾斜光幕交汇点 a1 和 b1 坐标,有

$$x_1 = \left(\frac{S}{t_3}t_1 - S/2\right) \cot \alpha_1, \qquad (1)$$

$$y_1 = \frac{S}{t_3} t_2 \cot \beta_1 - H.$$
 (2)





从(1)和(2)式可知,四光幕交汇测量到的仅是 弹丸爆炸前作用在光幕交汇点上坐标,不是在同一 平面上的二维坐标,也不是实际弹丸炸点坐标,特别 是弹丸不垂直穿越光幕时,获得的坐标参数误差较



图 2 多光幕的侧向观测坐标 y 分解图 Fig. 2 Decomposed map of laterally observing coordinates v of four screens

大。为了进一步修正四光幕交汇测量的不足,在它 们的测量几何模型上,增加两个倾斜光幕,见图1和 图2中的 G_5 和 G_6 , a_1 , a_2 , b_1 , b_2 为弹丸与倾斜光幕交 汇点。根据交汇坐标点求解弹丸的飞行偏向角及在 光幕 G_4 之后且与该光幕平行的任一已知距离平面 立靶坐标。令弹丸在高低方向的偏角为 θ ,在左右方 向的偏角为 γ ,光幕 G_5 和 G_6 对应的停止时间为 t_4 和 t_5 ,则 θ 和 γ 为

$$\theta = \cot\left(\frac{t_5 \cot \beta_2 - t_2 \cot \beta_1}{t_5 - t_2}\right),$$
(3)
$$\gamma = \cot\left[\frac{(t_3/2 - t_4) \cot \alpha_2 - (t_3/2 - t_1) \cot \alpha_1}{t_1 - t_4}\right].$$
(4)

根据所求出的 θ 和 γ ,可以求解出弹丸作用到平面 xoy的坐标 x_2 和 y_2 ,有

$$x_{2} = \left[\left(\frac{S}{t_{2}} - \frac{t_{1}}{t_{3}} S \right) \cos \gamma \right] (\cot \alpha_{1} + \tan \gamma) + \left(\frac{S}{2} + L \right) \tan \gamma,$$

$$y_{2} = \frac{S}{t_{3}} t_{2} \cos \theta (\cot \beta_{1} - \tan \theta) +$$
(5)

$$(S+L)\tan\theta - H.$$
 (6)

从增加两个倾斜光幕构造测量模型可知,它可 以对四光幕模型的坐标进行平面点坐标修正,但由 于弹丸炸点散布不是平面分布,而是随着与目标距 离不同,炸点的位置呈立体空间分布,使得这两种模 型仅是获得火炮方向的二维坐标,此外,在工业生产 中对其它目标位置的测量,许多文献提出了立体视 觉坐标测量方法^[12~14]或相位标靶的光学坐标测量 方法^[15],这些方法对空中弹丸对目标近炸炸点位置 的测量也存在一定的局限性,如布置复杂,要提高其 测量精度,需要分辨率高的高速摄像机,成本高。基 于多光幕系统的结构简单、视场大和探测距离远等 优点,提出对该测试方法进一步改进。根据弹丸炸 点分布特点,在模拟目标两侧辅助增加一台或两台 相机,构造多目光学原理的测量系统,实现弹丸炸点 三维坐标的测量。

3 相机辅助测量弹丸炸点三维坐标方法

3.1 辅助测量模型建立

建立在多光幕系统模型,在模拟目标两侧分别 布置一台相机或两台相机作为侧视方向辅助设备, 利用多光幕系统中的垂直光幕输出信号作用相机的 同步触发信号,如图3所示,当飞行弹丸接近模拟目 标的某一范围区域爆炸,相机将捕获该发弹丸炸点 图像,按空间的几何关系计算出弹丸炸点三维坐标。





以相机1为坐标辅助修正计算,在测试时,相机 光轴与目标正交,L₁为模拟目标的投影点与相机中 心的距离。根据相机与目标的空间关系,可以将其分 解为空间两个方向的计算模型,图4为相机侧向观 测弹丸炸点的立体空间位置图。假设A₁为弹丸实际 炸点位置,oO₁为相机光轴且正交于模拟目标头部, 被击目标长度为*l*。在相机捕获的弹丸炸点图像经 处理后,模拟目标总长水平方向所占像素个数为 *M*,则每个像元尺寸代表的实际长度为*l*/*M*,弹丸炸 点在图像上与模拟目标头部像素位置坐标差分别为 *D_z*和*D_y*,则图像中的炸点坐标(*z*₃,*y*₃)为

$$z_3 = D_z l/M, \tag{7}$$

$$y_3 = D_y l / M. \tag{8}$$

图 4(a)和(b)分别为炸点的立体空间图和弹丸飞行路 径在炸点 A_1 处分解投影到面 xoy 示意图。由成像关 系可知,面 oO_1A_5 与面 $A_1A_2'A_3A_4$ 垂直, $z_3 = A_5A_7 =$ $oA_6, y_3 = A_6A_7 = oA_5$,而真正炸点在 oz 方向的距离 为 A_1A_2' ,即 z 坐标。如果弹丸不爆炸,那么其飞行到 面 oO_1A_5 上的坐标点为 $A_2(x_2, y_2)$,但是飞行弹丸 在飞行过程中存在偏角 θ 和 γ ,故将 A_1A_2 分解, A_2' 在 平面 xoy 的坐标为($x_2 - z\tan \gamma, y_2 - z\tan \theta$)。为了



图 4 侧向相机炸点空间几何结构

Fig. 4 Burst space geometrical structure on lateral camera 推算出 z 坐标,需要结合多光幕交汇系统获得的弹 丸在 xoy 平面坐标。图 5 为火炮方向观测炸点坐标平 面图,有 $y_2 + z \tan \theta = oA_5 / \cos \delta = y_3 / \cos \delta, \delta$ 为相机 光轴与水平面的夹角;在 ΔoO_1P_5 中, $oA_5 \perp oO_1$, $A_2A_3 \perp oO_1, O_1$ 坐标为 $(-L_1, -H)$,设相机的 oy 方向 坐标值为 y_c ,那么侧向方向获得的坐标 (z, y_c) ,有 z =

$$\frac{\sqrt{\left[-H-\left(y_2-z\tan\theta\right)\right]^2+\left[-L_1-\left(x_2-z\tan\gamma\right)\right]^2}}{\sqrt{y_3^2+H^2+L_1^2}}z_3,$$

(9)

 $y_{c} = y_{3}/\cos \delta - z \tan \theta, \tag{10}$ $\dot{x}_{(0)} = \pi z + \cos z \sin \theta + z \sin$

按(9)式,可求出 oz 方向的第三维坐标 z 数值, z 正 负取值按坐标系方向定义。



图 5 正视目标炸点坐标平面图 Fig. 5 Plane map of burst coordinates on envisaging object

3.2 多光幕交汇系统二维坐标修正计算

多光幕交汇测量的坐标仅是某一预定区域平面 点坐标,对于弹丸炸点的位置而言,其炸点散布大, 且不是唯一平面点坐标,如图 6 所示,如果弹丸在模 拟目标前方爆炸,那么炸点实际位置坐标与理论弹 丸飞行到平面 *xoy* 的坐标存在 Δx 和 Δy 的偏移量。 由(9) 式求解出的在 *z* 坐标以及多光幕交汇系统中 求解出的弹丸的飞行偏向角度 θ 和 γ ,可对多光幕测





量的坐标进行修正,则有

$$x = x_2 - \Delta x = \left[\left(\frac{S}{t_2} - \frac{t_1}{t_3} S \right) \cos \gamma \right] \times \\ (\cot \alpha_1 + \tan \gamma) + \left(\frac{S}{2} + L - z \right) \tan \gamma, (11)$$

$$y = y_2 - \Delta y = \frac{S}{t_3} t_2 \cos \theta (\cot \beta_1 - \tan \theta) + (S + L - z) \tan \theta - H$$
(12)

通过上述分析与推算,按照(9)~(12)式,可求出 弹丸真正炸点坐标(x,y,z)。对于(10)式和(12)式, 如果不考虑误差因素的影响,它们计算出的结果是一 致的。考虑到弹丸未爆炸情况,采用相机参数计算将 无法解算出弹丸位置,因此,可选择(9)、(11)和(12) 式作为计算结果表示式,保证了弹丸未爆炸时还可获 得其平面 xoy 着靶二维坐标。

4 误差分析与试验

4.1 误差分析

从(9),(11)和(12)式可知,坐标误差影响有靶 距S、穿越光幕时间 $t_1 \sim t_5$ 、光幕角度 α_1 和 β_1 等,为 了简化分析,忽略炸点到面 xoy 距离段的飞行偏向 差以及模拟目标高度 H 和相机与模拟目标投影点 距离 L_1 的影响,采用微分法对(9),(11)和(12)式进 行分析,有

$$\begin{aligned} |dx| &= \left| \left[\left(\frac{1}{t_2} - \frac{t_1}{t_3} \right) \cos \gamma (\cot \alpha_1 + \tan \gamma) + \frac{1}{2} \tan \gamma \right] ds \right| + \left| \frac{s}{t_2^2} (\cot \alpha_1 + \tan \gamma) \cos \gamma dt_2 \right| + \\ \left| \frac{s}{t_3} \cos \gamma (\cot \alpha_1 + \tan \gamma) dt_1 \right| + \left| \frac{t_1}{t_3^2} \sin r (\cot \alpha_1 + \tan r) dt_3 \right| + \\ \left| \left[\left(\frac{s}{t_2} - \frac{t_1}{t_3} s \right) \frac{1}{\cos \gamma} + \left(\frac{s}{2} + L \right) \sec^2 \gamma \right] d\gamma \right| + \left| \left(\frac{s}{t_2} - \frac{t_1}{t_3} s \right) \cos \gamma \csc^2 \alpha_1 d\alpha_1 \right|, \end{aligned}$$
(13)
$$|dy| &= \left| \left[\frac{t_2}{t_3} \cos \theta (\cot \beta_1 - \tan \theta) t\tan \theta \right] ds \right| + \left| \frac{s}{t_3^2} t_2 \cos \theta (\cot \beta_1 - \tan \theta) dt_3 \right| + \\ \left| \frac{s}{t_3} \cos \theta (\cot \beta_1 - \tan \theta) dt_2 \right| + \left| \frac{s}{t_3} t_2 \cos \theta \cos \theta \sec^2 \beta_1 d\beta_1 \right| + \left| \frac{t_2}{t_3} s \frac{1}{\cos \gamma} + (S + L) \sec^2 \theta d\theta \right|, \end{aligned}$$
(14)
$$|dz| &= \left| \frac{\sqrt{(-H - y_2)^2 + (-L_1 - x_2)^2}}{\sqrt{y_3^2 + H^2 + L_1^2}} dz_3 \right| + \left| \frac{z_3}{\sqrt{y_3^2 + H^2 + L_1^2}} \frac{y_2}{\sqrt{(-H - y_2)^2 + (-L_1 - x_2)^2}} dy_2 \right| + \\ \left| \frac{z_3}{\sqrt{y_3^2 + H^2 + L_1^2}} \frac{x_2}{\sqrt{(-H - y_2)^2 + (-L_1 - x_2)^2}} dx_2 \right| + \left| \frac{\sqrt{(-H - y_2)^2 + (-L_1 - x_2)^2}}{(y_3^2 + H^2 + L_1^2)^{\frac{3}{2}}} y_3 dy_3 \right|. \end{aligned}$$
(15)

按照(13)~(15)式,影响其测量精度因素很多, 如计时误差,测速光幕不平行误差,光幕重复性误 差,相机的倾斜角度误差,图像处理的像素误差等。

计时误差主要来源于计时的时标精度、各探测 靶的探测灵敏度不一致、光幕幕厚以及外界干扰等 引起的误差。从时间基准来看,时标精度越高,由其 引起的误差就越小,若采用 20 MHz 的晶振为计时 的时标,时基误差为±50 ns^[16]。假设多光幕交汇系 统的探测靶触发基准为垂直靶光幕幕厚的一半,镜 头选用 f=100 mm,狭缝大小为 0.3 mm,作用高度 为40 m,飞行弹速为 1000 m/s,那么光幕厚度不一 致产生的最大计时误差小于 100 ns。

若两平行光幕存在 $\phi 夹角$,根据几何关系可知 飞行弹丸实际距离并非 S,而是增加了 ΔS 位移量, $\Delta S = H \tan \phi$,高度越高 ΔS 越大。为使光幕 G_1 和 G_4 尽可能平行,可设计光学校准系统减少光幕不平行 带来的误差。一般可使 ϕ 小于 0.005°,在 50 m 高的 距离误差小于 4.4 mm。 相机的倾角误差包含相机光轴与水平面的夹角 和相机光轴与模拟目标的正交汇角误差。相机光轴 与水平面的夹角可利用高精度角度编码器配合设 计,可使倾斜角度误差小于 0.01°; 对相机光轴与模 拟目标的正交汇角,可以增大相机与模拟目标投影 点的距离,尽可能使目标水平长度边长与相机光轴 垂直,如果相机与模拟目标投影点距离为 200 m,目 标长度 4.3 m,每个像素代表的长度尺寸为 22.6 mm,则在图像处理中,每个像素引起的角度误 差为 0.006°。

综合上述分析,如果 $dt_1 = dt_2 = dt_3 = 0.5 \mu s$, $d\alpha_1 = d\beta_1 = 0.0002 \text{ rad}$, ds = 0.5 mm, $d\theta = d\gamma = 0.001 \text{ rad}$, $\alpha_1 = \beta_1 = 30^\circ$,弹丸理论速度 1000 m/s,靶 距 S 为 10 m,模拟目标高度 50 m;自变量 θ 和 γ 在 $[-5^\circ, 5^\circ]$ 范围内变化,图像处理坐标的像素误差在 1 pixel 范围内。经过微分公式估算, |dx|最大误差 为 34.2 mm, |dy|最大误差为 32.8 mm, |dz|最大 误差值 28.6 mm。

4.2 实 验

在某次实验中,现场条件为相机距离被击目标 垂足距离为180 m,多光幕系统的靶距为11.8 m, 光幕 G₄ 与模拟目标投影点距离36.7 m,模拟目标 长度和悬挂高度分别为4.7 m和27.6 m。图7为 相机获取的某一发弹丸炸点与模拟目标合成图像, 图8为它的图像处理结果。图像中的模拟目标头部 坐标为B(534,213),目标尾部坐标为C(151,214) 和炸点初始引炸位置最前沿坐标A(556,609)数值, 则目标长度方向像素总数396。按照(7)式和(8)式 计算,炸点在该平面图像的两个坐标为(0.27 m, -4.91 m),根据该计算结果,按(9),(11)和(12)式 可计算出该发弹丸炸点的空间相对三维坐标。



图 7 某次试验获取的弹丸炸点图像 Fig. 7 Projectile burst image in a certain experiment



图 8 图像处理后的炸点图像

Fig. 8 Processed image of projectile burst

表1为某次试验中获得的测量数据,其中(x, y,z)为多目光学法所处理的测量数据, (x_d,y_d) 为 多光幕系统(未修正)的处理数据,(y,z)为单台 高速摄影机与侧向相机同一位置获得的两维坐标。 从表1可以看出,未修正的多光幕测试系统所获得 的数据与修正后的数据有一定的偏差,这个偏差与 炸点侧向方向的位置有关。当弹丸在模拟目标前方 爆炸时,高低方向的数值小干未修正的多光幕测试 系统所获得的数据,另一方面,当弹丸在模拟目标后 方爆炸时,高低方向的数值大于未修正的多光幕测 试系统所获得的数据;而对于左右方向的偏差也存 在同样的结果,说明弹丸的飞行路径在作用光幕区 时,其飞行路径并非垂直光幕,而是具有一定的夹 角,当夹角越大两者测量同一发弹丸炸点位置偏差 就越大。对于高速摄影机获得的数据,由于它没有 经过修正,测量结果与多目光学法也存在一定的误 差,主要体现在飞行弹丸的左右偏影响其立体光学 成像的偏差修正。高速摄影与多目光学法两者的数 据对比,在y方向的平均误差为0.016 m,标准方差 差值为 0.098 m, 在 z 方向的平均误差为 0.118 m, 标准方差差值为 0.021 m。未修正多光幕法与多目 光学法两者的数据对比,在 x 方向的平均误差为 0.128 m,标准方差差值为 0.017 m,在 y 方向的平 均误差为 0.166 m,标准方差差值为 0.177 m。从 多光幕法的计算模型可知,它所获得的是平面 xov 上的坐标,按照(5)式和(6)式进行微分误差分析,它 的平面坐标误差与(13)式和(14)式相近,但是对于 弹丸炸点分布来说,炸点坐标并非平面坐标,致使它 的误差更大。假设弹丸理论脱靶量为±5 m,弹丸 最大飞行偏向角为 5°,则多光幕法测量炸点两维坐 标误差最大将达到 0.437 m;同理,对于高速摄影由 于物镜光轴与水平面存在一定的夹角,按本实验条 件,它的二维坐标误差也将达到 0.75 m。

表 1 试验数据 Table 1 Data of experiment

No.	x / m	y/m	z /m	$x_{ m d}/ m m$	$y_{\rm d}/{ m m}$	$y_{\rm g}/{ m m}$	$z_{ m g}/ m m$
1	-2.062	-4.087	1.337	-2.245	-3.872	-4.08	1.23
2	-2.631	-4.764	0.984	-2.703	-4.591	-4.66	1.08
3	-3.043	-4.081	2.375	-3.226	-3.721	-3.97	2.27
4	-2.325	-4.637	-1.928	-2.467	-4.925	-4.48	-1.72
5	-1.918	-4.178	1.883	-2.083	-3.932	-4.02	1.90
6	-1.614	-3.967	3.252	-1.846	-3.628	-3.88	3.18
7	-2.315	-4.452	-0.815	-2.234	-4.336	-4.25	-0.74

通过表1数据分析,可以看出多目光学法的数 据更能体现出真正的弹丸炸点位置,该方法不仅实 现了弹丸炸点正视方向的二维坐标测量,同时还可 以获得弹丸炸点位置的侧向第三维坐标。

5 结 论

本文针对多光幕交汇法测量弹丸炸点位置存在 的问题展开研究,多光幕交汇系统的测试原理仅是 获得某一平面的立靶坐标,而弹丸炸点并非平面点, 它是以模拟目标为中心的立体空间分布,使得多光 幕交汇系统所获得的数据存在偏差。本文提出侧向 相机辅助测量措施,构造空间测量的立体模型,计算 出弹丸炸点的真实位置坐标。与其他方法相比,它 实现高空大靶面立靶坐标测量和获得弹丸炸点的真 实三维坐标;该测量系统布置简单,成本低,采用普 通相机也可以实现坐标测量,为引信的研制与试验 节省经费,间接地提高了经济效益。但对于引信的 研究初始阶段,难免出现弹丸炸早或晚炸或不炸的 情况,对于弹丸不在测量区域视场内的炸点,也存在 漏侧问题,基于本测试理论方法为后续研究大视场 的多目光学测试系统提供技术保障,使其更好地为 引信研制与发展服务。

参考文献

- Zhang Feimeng, Ma Chunmao. Accuracy analysis for the measuring system of target deviation for projectiles shooting an acoustic target[J]. Acta Armamentarii, 2000, 21(1): 23~27 张飞猛,马春茂. 对空射击声学靶脱靶量测试系统的精度分析 [J]. 兵工学报, 2000, 21(1): 23~27
- 2 Wu Songlin, Lin Xiaodong, Song Bo. The oblique shot induced time-lag error and its correction in acoustic target [J]. J. Detection & Control, 2008, **30**(5): 73~77 吴松林,林晓东,宋 波. 斜入射时声靶的时延偏差及修正方法

[J]. 探测与控制学报, 2008, 30(5): 73~77

3 Li Hanshan, Gao Hongyao, Jiang Ming. A study on improving the performance of photo-electricity detecting of sky-screen[J]. J. Ballistics, 2007, 19(1): 33~36

李翰山,高洪尧,江 铭. 天幕靶光电探测性能改善研究[J]. 弹 道学报,2007,19(1):33~36

4 Li Qiushun. Research on miss distance in optical measurement

processing [J]. Acta Photonica Sinica, 1999, **28**(3): 255~259 李秋顺. 光学测量处理脱靶量研究[J]. 光子学报, 1999, **28**(3): 255~259

5 Zeng Guangyu, Ma Ying. Studies on measuring system of erecting target [J]. J. Projectile, Rockets, Missiles and Guidance, 2004, **25**(1): 345~346

曾光宇,马 瑛. 立靶精度测量系统研究[J]. 弹箭与制导学报, 2004, 25(1): 345~346

- 6 Li Hanshan, Lei Zhiyong, Wang Zemin. Analyze two type skyscreens across screen fire measuring system[J]. J. Ballistics, 2010, 22(1): 29~32 李翰山, 雷志勇, 王泽民. 两种天幕靶光幕交汇测量系统分析
- 学報山, 笛志男, 土洋氏, 四种大希蛇尤希父礼测重系统分析
 [J]. 弹道学报, 2010, 22(1): 29~32
]
- 7 Gao Hongyao, Jiang Ming. Principle and apply of scoring screen accuracy measure system[J]. J. Xi'an Institute of Technology, 1995, 15(3): 242~245
 高洪尧,江 铭. 交汇光幕靶精度测量原理及应用[J]. 西安エ 业学院学报, 1995, 15(3): 242~245
- 8 Song Yugui, Ni Jinping, Wang Tieling *et al.*. Principle of six screens target measuring system for bullet location and its error analysis[J]. J. Xi'an Technological University, 2007, 27(1): 19~25

宋玉贵,倪晋平,王铁岭等.多光幕交汇法测量目标飞行坐标的 原理与精度分析[J]. 西安工业大学学报,2007,27(1):19~25

倪晋平,田 会. 斜入射弹丸着靶位置立靶测试原理[J]. 光学 技术, 2006, **32**(4): 493~495

- 10 Feng Bin, Ni Jinping, Yang Lei. Principle of measuring impacting position of vertical target of site light screens [J]. J. Ballistics, 2008, 20(1): 59~61
 冯 斌,倪晋平,杨 雷. 六光幕结构立靶坐标测量原理[J]. 弹 道学报, 2008, 20(1): 59~61
- 11 Ni Jinping, Yang Lei, Tian Hui. Measurement principle for two kinds of six-light-screen array composed by a large area light screen[J]. Opto-Electronic Engineering, 2008, **35**(2): 6~13 倪晋平,杨 雷,田 会. 基于大靶面光幕靶的两类六光幕阵列 测量原理[J]. 光电工程, 2008, **35**(2): 6~13
- 12 Xu Qiaoyu, Che Rensheng. Study of stereo vision coordinate measurement system based on optical probe[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(11): 2181~2186 徐巧玉,车仁生. 基于光学测棒的立体视觉坐标测量系统的研究 [J]. 光学学报, 2008, 28(11): 2181~2186
- 13 Sun Junhua, Liu Zhen, Zhang Guangjun. Camera calibration based on flexible 3D target [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(12): 3433~3440
 孙军华,刘 震,张广军等. 基于柔性立体靶标的摄像机标定 [J]. 光学学报, 2009, 29(12): 3433~3440
- 14 Gao Gui, Yang Xichen, Zhang Haiming. Study of binocular vision system calibration in laser remanufacturing robot [J].

Chinese J. Lasers, 2010, **37**(7): 1868~1872 高 書 私法陈 张海田 激光再制造机界人双日

高 贵,杨洗陈,张海明.激光再制造机器人双目视觉系统标定 研究[J]. 中国激光,2010,**37**(7):1868~1872

15 Mao Xianfu, Su Xianyu, Liu Yuankun et al. Analysis on optical coordinate measurement based on phase target[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(9): 2452~2457

毛先富,苏显渝,刘元坤等.基于相位标靶的光学坐标测量方法

[J]. 光学学报, 2009, 29(9): 2452~2457

16 Li Hanshan, Lei Zhiyong, Wang Zemin *et al.*. Principle and analysis of high altitude projectile location measurement using multi-screen target method[J]. *Chinese J. Scientific Instrument*, 2009, **30**(3): 621~624 李翰山, 雷志勇, 王泽民等. 多光幕法测量高空弹丸炸点坐标原

字钢山, 亩芯男, 工件氏 守. 多元希达侧重向至理九床点至你原 理与分析[J]. 仪器仪表学报, 2009, **30**(3): 621~624

栏目编辑:何卓铭