

利用数字狭缝摄像技术估计弹丸速度和攻角*

赵竹新¹, 回丙伟¹, 文贡坚¹, 李德仁²

(1. 国防科技大学 ATR 重点实验室, 湖南长沙 410073;

2. 武汉大学 测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北武汉 430079)

摘要:针对目前靶场中胶片式狭缝摄影技术的缺点和数字化改进的难点,提出了基于线阵摄像机的数字狭缝摄像技术来估计弹丸速度和攻角。该方法首先利用单台标定的摄像机配合双像器获取弹丸的立体影像,提取有限个控制点,计算弹丸速度、姿态等的初始估计值。然后利用弹丸的模拟成像与实际成像的轮廓匹配构建最优化模型,对初始估计值进行优化,最后获得弹丸的速度和攻角。通过试验验证了该方法估计弹丸速度和攻角的精确性。

关键词:数字狭缝摄像;弹丸;速度;攻角

中图分类号 TN386.5 文献标志码: A 文章编号:1001-2486(2012)01-0144-06

Estimation of the projectile's speed and attack angle using the digital streak photographic technique

ZHAO Zhuxin¹, HUI Bingwei¹, WEN Gongjian¹, LI Deren²

(1. ATR Key Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: A novel method using digital streak photography technique based on line-scan camera is proposed in order to circle out the problem in the digital improvement of the traditional streak facility in test range. The projectile's stereo images were firstly collected by using a calibrated line-scan camera and a mirror, and then some special points were picked to compute the initial guess of the projectile's velocity and attitude. The initial guess was further refined by using an optimization model established on the matching measure of the simulated and the real images contours. The speed and the attack angle were ultimately obtained. The accuracy of the estimation was experimentally tested.

Key words: digital streak photography; projectile; speed; attack angle

弹丸速度、攻角的估计是靶场中炮射武器测试的重要方面。狭缝摄影技术由于其独特的弹道同步的摄影原理,可以通过鼓轮传送胶片提供运动补偿,获得高速弹丸清晰的影像,且能够分离速度和姿态方向的差异,因而普遍用来估计弹丸的速度、攻角等运动参数^[1-6]。弹道同步摄影要求两个条件:一是弹丸影像的速度与胶片运动的速度相同;二是弹丸的速度方向与狭缝垂直。事实上,由于事先无法得知弹丸真实的运动情况,因此严格的弹道同步摄影是无法保证的,也就是说,传统狭缝摄影技术是存在原理性缺陷的。另外,该技术设备昂贵笨重,操作复杂,人工参与多,也制约了其自动化水平的提高。

近些年来,随着传感器技术的发展,使用高速

线阵摄像机代替传统的胶片式狭缝摄像机估计弹丸的速度和攻角成为研究趋势^[7-11],与胶片式摄影技术相对,本文将采用线阵摄像机的摄像技术称为数字狭缝摄像技术。由于线阵摄像机扫描速度的限制,数字狭缝摄像远远不能达到弹道同步的要求,因此狭缝技术的数字化一直未获得根本性的突破。

针对这些问题,本文提出了一种基于线阵摄像机的数字狭缝技术估计弹丸速度和攻角的新方法。首先通过一种单摄像机配合双像器获得弹丸的立体影像,然后通过弹丸实测影像中提取有限个控制点,根据线阵摄像机的成像原理,计算弹丸速度、姿态等运动参数的初始估计值,并根据该初始估计值、摄像机参数和弹丸的 CAD 模型,利

* 收稿日期:2011-06-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60872153)

作者简介:赵竹新(1984—),男,山东烟台人,博士研究生,E-mail: zzw2000@gmail.com;

文贡坚(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail: wengongjian@sina.com

用弹丸实测影像和 CAD 模型的模拟影像中弹丸轮廓信息的差异,构建最优化模型,通过最优化模型求解,最终获得弹丸的速度和攻角参数。具体的流程图如图 1。

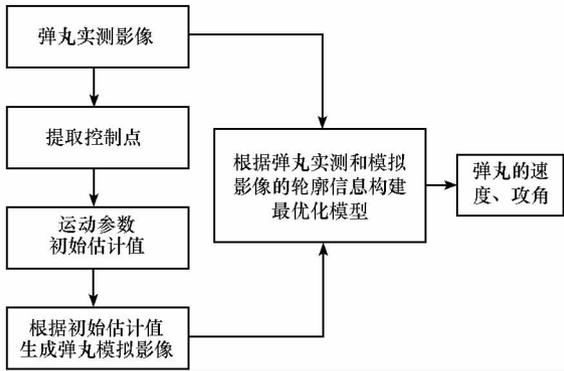


图 1 弹丸速度和攻角估计流程图

Fig. 1 The flow chart of the estimation of the speed and the attack angle

1 方法

1.1 测量系统

为了获得弹丸在三维空间中的运动参数,一般对弹丸采用立体交会的测量系统设计^[12]。本文中,在弹丸弹道的正下方,放置双像器,这样当弹丸经过线阵摄像机的拍摄区域时,可以同时被靶场中的摄像机(以下称前摄像机)和其在双像器中的像(以下称底摄像机)拍到。这样,就可以利用一台线阵摄像机,同时在两个方向上获得弹丸的立体影像。

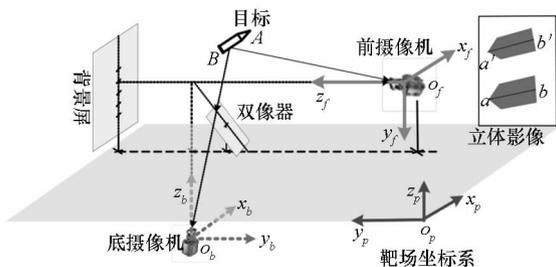


图 2 测量系统

Fig. 2 The measurement system

为了描述测量系统的空间关系,定义 3 个坐标系:靶场坐标系 $o_p - x_p, y_p, z_p$, 前摄像机像空间坐标系 $o_f - x_f, y_f, z_f$, 底摄像机像空间坐标系 $o_b - x_b, y_b, z_b$ 。靶场坐标系作为测量坐标系,弹丸的所有运动参数都是在靶场坐标系中定义的。前像空间坐标系与靶场坐标系之间空间关系的确定实际上是一个线阵摄像机标定的问题。经过摄像机标定,得到前摄像机的内、外方位元素,双像器在靶

场坐标系中的摆放位置和姿态也是确定的(一般使得摄像机的主光轴成 45° 入射,与 $o_p - x_p, y_p$ 平面成 45° 放置),底摄像机的内方位元素与前摄像机相同,外方位元素可以通过镜面对称关系得到。

相关文献已经对线阵摄像机的标定做了详细的描述^[13-15],本文不作为重点进行阐释。由于线阵摄像机的成像特点,只有落在前摄像机像空间坐标系的 $o_f - y_f, z_f$ 平面上的点,才能够被成像。假设 $P(X, Y, Z)$ 为靶场坐标系中落在 $o_f - y_f, z_f$ 平面上的任意一点,根据文献[9],前摄像机的构像方程可以表示为

$$\begin{cases} y - y_0 = -f \cdot \frac{a_2(X - X_s) + b_2(Y - Y_s) + c_2(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)} \\ \text{s. t. } a_1(X - X_s) + b_1(Y - Y_s) + c_1(Z - Z_s) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中, f 为摄像机焦距, y_0 为偏移量, X_s, Y_s, Z_s 为摄像机摄像中心位置, $a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2, a_3, b_3, c_3$ 为旋转矩阵的 9 个元素,它们共同构成了前摄像机的内、方位元素。 $a_1(X - X_s) + b_1(Y - Y_s) + c_1(Z - Z_s) = 0$ 即为 $o_f - y_f, z_f$ 平面在靶场坐标系中的平面方程。同理,通过镜面对称特性,也可以进一步得到底摄像机构像方程:

$$\begin{cases} y - y_0 = -f \cdot \frac{a'_2(X - X'_s) + b'_2(Y - Y'_s) + c'_2(Z - Z'_s)}{a'_3(X - X'_s) + b'_3(Y - Y'_s) + c'_3(Z - Z'_s)} \\ \text{s. t. } a'_1(X - X'_s) + b'_1(Y - Y'_s) + c'_1(Z - Z'_s) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

其中, X'_s, Y'_s, Z'_s 为摄像机摄像中心位置, $a'_1, b'_1, c'_1, a'_2, b'_2, c'_2, a'_3, b'_3, c'_3$ 为旋转矩阵的 9 个元素。 $a'_1(X - X'_s) + b'_1(Y - Y'_s) + c'_1(Z - Z'_s) = 0$ 为 $o_b - y_b, z_b$ 平面在靶场坐标系中的平面方程。

有了线阵摄像机的构像方程,就可以通过弹丸弹尖 A、弹尾 B 在立体影像中两对同名像点 a 和 a' 、 b 和 b' (如图 2),建立关系式,获取弹丸速度、姿态和位置的初始估计值。

1.2 初始估计值

假设弹丸的速度矢量 $V(V_x, V_y, V_z)$,把前摄像机拍摄到弹丸弹尖时刻作为初始时刻,假设此时弹尖的空间坐标 $A(X_a, Y_a, Z_a)$,弹丸的中轴线矢量 $L(L_x, L_y, L_z)$,则此时弹尾的空间坐标为 $B(X_b - L_x, Y_b - L_y, Z_b - L_z)$ 。弹丸的速度、姿态和位置参数就可以通过 $V_x, V_y, V_z, X_a, Y_a, Z_a, L_x, L_y, L_z$ 共 9 个参数来描述。下面通过弹丸弹尖、弹尾在立体影像中的成像关系,构建关于这 9 个参数的方程式。

假设前摄像机拍摄到弹丸弹尖的时刻为 0, 根据式(1), 有

$$\begin{cases} a_1(X_a - X_s) + b_1(Y_a - Y_s) + c_1(Z_a - Z_s) = 0 \\ y_a - y_0 = -f \cdot \frac{a_2(X_a - X_s) + b_2(Y_a - Y_s) + c_2(Z_a - Z_s)}{a_3(X_a - X_s) + b_3(Y_a - Y_s) + c_3(Z_a - Z_s)} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} a'_1(X_a + V_x t_1 - X'_s) + b'_1(Y_a + V_y t_1 - Y'_s) + c'_1(Z_a + V_z t_1 - Z'_s) = 0 \\ y'_a - y_0 = -f \cdot \frac{a'_2(X_a + V_x t_1 - X'_s) + b'_2(Y_a + V_y t_1 - Y'_s) + c'_2(Z_a + V_z t_1 - Z'_s)}{a'_3(X_a + V_x t_1 - X'_s) + b'_3(Y_a + V_y t_1 - Y'_s) + c'_3(Z_a + V_z t_1 - Z'_s)} \end{cases} \quad (4)$$

其中, y'_a 为此时弹尖成像点在 y_b 方向上的坐标。

假设前摄像机拍摄到弹丸弹尾的时刻为 t_2 。根据式(1), 有

$$\begin{cases} a_1(X_a - L_x + V_x t_2 - X_s) + b_1(Y_a - L_y + V_y t_2 - Y_s) + c_1(Z_a - L_z + V_z t_2 - Z_s) = 0 \\ y_b - y_0 = -f \cdot \frac{a_2(X_a - L_x + V_x t_2 - X_s) + b_2(Y_a - L_y + V_y t_2 - Y_s) + c_2(Z_a - L_z + V_z t_2 - Z_s)}{a_3(X_a - L_x + V_x t_2 - X_s) + b_3(Y_a - L_y + V_y t_2 - Y_s) + c_3(Z_a - L_z + V_z t_2 - Z_s)} \end{cases} \quad (5)$$

其中, y_b 为此时弹尾成像点在 y_f 方向上的坐标。

假设底摄像机拍摄到弹丸弹尾的时刻为 t_3 。根据式(2), 有

$$\begin{cases} a'_1(X_a - L_x + V_x t_3 - X'_s) + b'_1(Y_a - L_y + V_y t_3 - Y'_s) + c'_1(Z_a - L_z + V_z t_3 - Z'_s) = 0 \\ y'_b - y_0 = -f \cdot \frac{a'_2(X_a - L_x + V_x t_3 - X'_s) + b'_2(Y_a - L_y + V_y t_3 - Y'_s) + c'_2(Z_a - L_z + V_z t_3 - Z'_s)}{a'_3(X_a - L_x + V_x t_3 - X'_s) + b'_3(Y_a - L_y + V_y t_3 - Y'_s) + c'_3(Z_a - L_z + V_z t_3 - Z'_s)} \end{cases} \quad (6)$$

其中, y'_b 为此时弹尾成像点在 y_b 方向上的坐标。

通过弹尖、弹尾成像点在 $x_f(x_b)$ 方向上相对 a 点的像素点覆盖数, 结合摄像机的扫描速度, 可以得到 t_1, t_2, t_3 。这样, 通过弹尖、弹尾在立体影像上所形成的 4 个成像点, 共可以得到关于弹丸运动参数的 8 个方程。

另外, 弹丸的长度 L 是已知的, 且

$$L_x^2 + L_y^2 + L_z^2 = L^2 \quad (7)$$

综合方程(3) ~ (7)式, 共可以得到关于弹丸 9 个运动参数的 9 个方程。前 8 个方程是线性方程, 最后一个是非线性方程。其中, L_x, V_x 都为正数, 以此为约束条件可以得到唯一解。最后, 得到了弹丸速度、姿态和位置等参数的初始估计值。

1.3 最优化模型构建及求解

1.2 中的运动参数初始估计值是从获得的弹丸立体影像中提取的弹尖、弹尾 4 个控制点估计得到的, 其精度受到人工提取控制点的影响。为了充分利用弹丸立体影像信息, 本文进一步采用了基于弹丸 CAD 模型成像匹配的优化求解方法。主要思路是:

(1) 根据已知的弹丸外形数据, 在 3D MAX 软件中建立弹丸精确的 CAD 模型;

(2) 在 VC++ 6.0 中编写线阵摄像机成像仿真程序, 获得在设定初始位置、姿态、速度和摄像机参数(初始估计值)情况下, 弹丸 CAD 模型的模拟成像结果;

其中, y_a 为此时弹尖成像点在 y_f 方向上的坐标。

假设底摄像机拍摄到弹丸弹尖的时刻为 t_1 。根据式(2), 有

(3) 将模拟成像的边缘轮廓与实测图像中弹丸成像的边缘轮廓进行匹配, 并构建最优化模型, 将达到最优化匹配时的运动参数值作为弹丸运动参数的优化解。

具体的流程如图 3 所示。

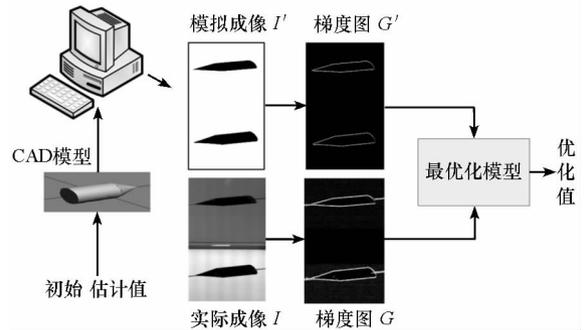


图 3 优化求解的流程图

Fig. 3 The flow chart of the optimization solution

1.3.1 最优化模型构建

在测量系统相同的情况下, 弹丸 CAD 模型的运动参数越接近弹丸实际的运动参数, 则 CAD 模型的模拟成像的边缘轮廓与弹丸实际成像的边缘轮廓就越匹配。弹丸运动参数的最优化模型就是基于此构建的。在本文中, 弹丸运动参数的估计问题转化成了基于模型的图像匹配问题。由于线阵图像由若干次拍摄到的扫描线组合而成, 且图像背景单一, 我们采用线阵图像的梯度图来描述

目标的边缘轮廓信息(如图3)。具体方法是:

(1) 获得弹丸实际成像和模拟成像的梯度图

假设 $(x_i, y_j), i = 1, \dots, N, j = 1, \dots, M$ 是弹丸实际成像 I 的 $N \times M$ 个像素点。由于线阵图像是由一维扫描线组成,因此其梯度图是通过在一维方向上取梯度模来获得的,假设其梯度图为 G ,则

$$G(x_i, y_j) = |I(x_i, y_{j+1}) - I(x_i, y_j)|, \\ i = 1, \dots, N, j = 1, \dots, M-1 \quad (8)$$

假设 $(x'_i, y'_j), i = 1, \dots, N, j = 1, \dots, M$ 是 CAD 模型模拟成像 I' 的 $N \times M$ 个像素点。同理,假设其梯度图为 G' ,则

$$G'(x'_i, y'_j) = |I'(x'_i, y'_{j+1}) - I'(x'_i, y'_j)|, \\ i = 1, \dots, N, j = 1, \dots, M-1 \quad (9)$$

(2) 最优化模型

根据获得的梯度图,可以建立表征模拟成像与实际成像匹配关系的能量函数:

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{M-1} [G'(x'_i, y'_j) - G(x_i, y_j)]^2 \quad (10)$$

根据能量函数构建最优化模型:

$$\min \varepsilon = \min \left\{ \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{M-1} [G'(x'_i, y'_j) - G(x_i, y_j)]^2 \right\} \quad (11)$$

最优化模型通过改变 CAD 模型的运动参数,来减小能量函数的值。当 CAD 模型的运动参数使得能量函数值最小时,此时的运动参数即为最优化模型的解,也是弹丸运动参数的最优估计。

1.3.2 最优化模型求解

上述最优化模型的求解是一个 9 维的非线性最优化问题。Powell 算法是解决此类非线性多维问题的优秀算法。具体求解过程是:

Step1 将 1.2 部分中利用控制点求得的运动参数初始估计值作为最优化模型的初始值,设为 $X^{(0)}$,设定收敛阈值 δ ,置 $k = 1$,给定 9 个线性无关的方向,一般采用单位方向向量: $d^{(1,1)}, d^{(1,2)}, \dots, d^{(1,n)}, n = 1, \dots, 9$;

Step2 置 $X^{(k,0)} = X^{(k-1)}$,从 $X^{(k,0)}$ 出发,依次沿 9 个方向向量对能量函数 ε 进行一维搜索,得到 $X^{(k,1)}, X^{(k,2)}, \dots, X^{(k,n)}$;

Step3 再沿着 $X^{(k,n)}$ 出发,沿着方向 $d^{(k,n+1)} = X^{(k,n)} - X^{(k,0)}$ 对能量函数 ε 进行一维搜索,得到 $X^{(k)}$ 。

Step4 若 $\|X^{(k)} - X^{(k-1)}\| < \delta$,则停止迭代,得到 $X^{(k)}$;否则,令 $d^{(k+1,j)} = d^{(k,j+1)}, j = 1, \dots, n$,置 $k = k + 1$,返回 Step2。

1.4 速度和攻角

获得了弹丸的速度矢量 $\mathbf{V}(V_x, V_y, V_z)$ 和中轴

线矢量 $\mathbf{L}(L_x, L_y, L_z)$,就可以得到弹丸的速度和攻角的大小。设速度为 v ,攻角为 φ ,则

$$v = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2} \quad (12)$$

$$\varphi = \arccos\left(\frac{L_x V_x + L_y V_y + L_z V_z}{Lv}\right) \quad (13)$$

2 实验与分析

由于在靶场测量中,无法获得弹丸的真实运动参数作为参考,给实验验证带来不便。对此,本文给出了两种实验验证的方法:一是采用计算机编程获得 CAD 弹丸模型的仿真数据;二是通过弹丸的缩比模型模拟弹丸的真实飞行获得的实测数据。

2.1 仿真数据实验

本文采用计算机仿真获得 CAD 弹丸模型的线阵成像数据进行实验。仿真数据的优点在于,仿真前设定的 CAD 弹丸模型的运动参数可以作为真值,与估计值进行比较以验证精度。仿照弹丸的实体外形尺寸在 3D MAX 中构建 CAD 模型,弹长为 1000mm,弹径为 150mm。摄像机焦距 50mm,像元尺寸 $10\mu\text{m}$,扫描速度 140kHz。设定不同的速度、攻角,得到 CAD 模型的仿真立体图像。提取弹尖、弹尾(弹尾上下边沿点的中点)控制点,计算弹丸运动参数的初始估计值,并利用构建的最优化模型进行优化求解,获得弹丸的速度、攻角参数。图 4(a)~(d)所示的是控制点提取和 CAD 模型在估计和设定的运动参数情况下成像的轮廓匹配。表 1 所示的是弹丸速度、攻角的估计值与设定值的比较。可以看出,本文提出的速度、攻角估计方法在采用仿真数据进行实验时,具有较高的精度。

2.2 实测数据实验

按照图 2 中的测量系统设计获取实测数据进行实验验证。将弹丸的缩比模型按照一定的姿态固定在水平导轨上,随着导轨的匀速运动,经过线阵摄像机,以此模拟弹丸的飞行。该设计的优点在于,水平导轨可以提供稳定准确的运动速度,攻角可以通过姿态和速度设定准确的量取,与估计结果进行比较,以验证估计的精度。线阵摄像机采用 BASLER spl2048-140km,扫描速度设为 100kHz,经过摄像机的标定,获得内、外参数,拍摄弹丸缩比模型的运动图像。同理,提取控制点,分别获取弹丸运动参数的初始估计值和优化值。图 4(e)~(h)所示的是控制点提取和在运动参数估计值情况下 CAD 模型成像与缩比模型实际

成像的轮廓匹配情况。表 2 所示的是弹丸速度、攻角的估计值与设定值的比较。可以看出,本文提出的方法在采用缩比模型实测数据进行实验时,具有较高的精度。需要说明的是,实验图像在

扫描方向上经过了 1/5000 ~ 1/8000 采样。由于水平导轨能达到的最高稳定速度仅为 10mm/s,采样之后的图像效果相当于摄像机以 100kHz 的频率拍摄 500 ~ 800m/s 的缩比模型。

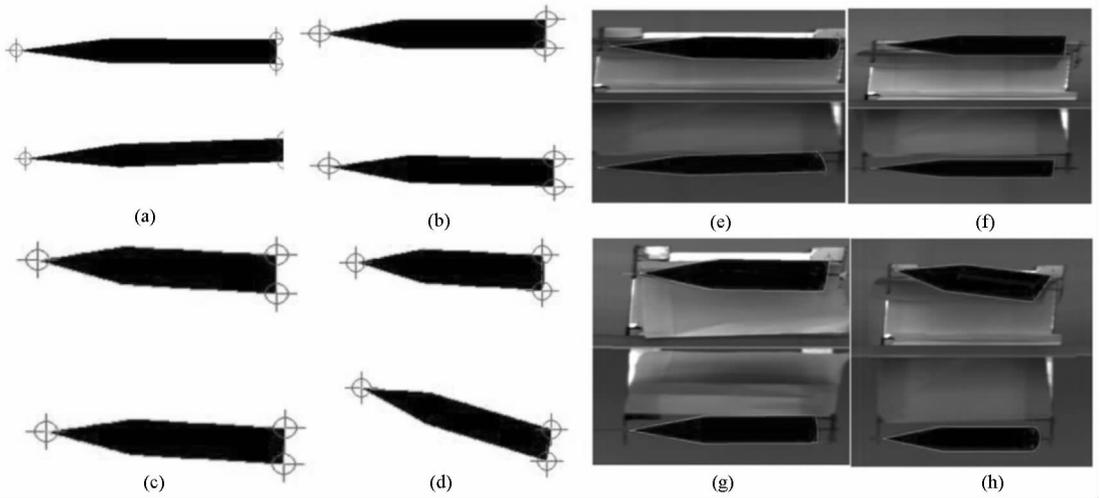


图 4 仿真数据的实验结果:(a) ~ (d); 实测数据的实验结果:(e) ~ (f)
Fig. 4 The results of the simulated data: (a) ~ (d); the results of the real data: (e) ~ (f).

表 1 仿真数据实验:设定值与估计结果的比较

Tab. 1 Tests on simulated data: the comparison of the preset parameters and the estimation results

序号	设定 v (m/s)	设定 φ ($^\circ$)	估计 v (m/s)	估计 φ ($^\circ$)	v 误差 (%)	φ 误差 ($^\circ$)
1	500.0	4.0	501.23	4.087	0.24	0.087
2	600.0	8.0	698.74	7.931	0.21	0.069
3	700.0	14.0	702.36	13.881	0.34	0.119
4	800.0	16.0	797.15	15.912	0.36	0.088

表 2 实测数据实验:设定值与估计结果的比较

Tab. 2 Tests on real data: the comparison of the preset parameters and the estimation results

序号	设定 v (m/s)	设定 φ ($^\circ$)	估计 v (m/s)	估计 φ ($^\circ$)	v 误差 (%)	φ 误差 ($^\circ$)
1	500.0	4.0	504.33	4.172	0.87	0.172
2	600.0	8.0	598.52	7.961	0.25	0.039
3	700.0	14.0	694.76	13.765	0.75	0.235
4	800.0	16.0	792.12	16.255	0.96	0.255

3 结 论

本文针对目前靶场中对于狭缝摄影测量数字化自动化改进的需求,提出了一种基于线阵摄像机的数字狭缝技术,精确估计弹丸的速度和攻角等参数。该方法主要有三方面的优势:一是从线阵摄像机的成像原理出发估计弹丸的速度和攻角,克服了线阵摄像机由于扫描速度不足,无法进

行弹道同步测量的难题;二是利用摄像机标定获得测量系统准确的空间关系,降低了靶场设置的难度,提高了测量系统的精度;三是采用基于 CAD 模型 的参数估计方法,将弹丸运动参数的估计问题转化成基于模型的成像轮廓匹配问题,避免了人工提取控制点带来的不确定性,提高了算法的精度和稳健性。

参考文献 (References)

- [1] 张三喜,薛以辉,卢宇. 狭缝摄影胶片图像运动参量测量和处理[J]. 光子学报,1999,28(12):1117-1121.
ZHANG Sanxi, XUE Yihui, LU Yu. The measuring and processing of streak camera's images motional parameters[J]. Acta Photonica Sinica, 1999, 28(12):1117-1121. (in Chinese)
- [2] Zhao Z, Hui B, Wen G, et al. A method for the motion parameters estimation in incomplete synchro-ballistic photography [C]// Proceedings of IEEE SOPO's 2011, Wuhan, NY: IEEE, 2011: 1-4.
- [3] Abrahams D M. Using synchro-ballistic cameras to determine the velocity and spin rate of high-velocity projectiles [R]. Sandia Report SAND84-8018, 1985.
- [4] Hughett P. Projectile velocity and spin rate by image processing of synchro-ballistic photography [C] //Proceedings of Ultrahigh and High-speed Photography, Videography, Photonics, and Velocimetry. San Diego, 1990:237-248.
- [5] Sidney F R. Applied photographic optics: lenses and optical systems for photography, film, video, electronic and digital imaging[M]. Focal Press, Waltham, United States, 2002: 507-510.
- [6] Fuller P. Some highlights in the history of high-speed photography and photonics as applied to ballistics [M]. Springer Berlin Heidelberg, Germany, 2005: 251-298.
- [7] Song W, et al. Software Design for Measurement of Bullet Attitude Based on Linear CCD [C]// Proceedings of the Eighth ICEMI'07, Xi'an, NY: IEEE, 2007: 521-524.
- [8] 李金珂,陈良益. 基于线阵 CCD 的弹道同步式狭缝摄影系统[J]. 激光与红外,2009,39(3):300-303.
LI Jingke, CHEN Liangyi. A slit photography system based on linear CCD[J]. Laser & Infrared, 2009, 39(3): 300-303. (in Chinese)
- [9] 高昕,王颖,黄惠明. 利用线阵 CCD 像机交汇测量弹丸攻角[J]. 光学技术,2002,28(4):376-379.
GAO Xin, WANG Ying, HUANG Huiming. Linear CCD array cameras intersect measurement for nutation angle[J]. Optical Technique, 2002, 28(4): 376-379. (in Chinese)
- [10] 艾莉莉,袁峰,丁振良. 应用线阵 CCD 的空间目标外姿态测量系统[J]. 光学精密工程,2008,16(1):161-165.
AI Lili, YUAN Feng, DING Zhenliang. An exterior attitude measurement system for spatial object based on linear CCD[J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(1): 161-165. (in Chinese)
- [11] Ai L L, YUAN F, DING Z L. Measurement of spatial object's exterior attitude based on linear CCD [J]. Chinese Optics Letters, 2008, 6(7): 505-509.
- [12] 郑继贵,李艳军,等. 单摄像机虚拟立体视觉测量技术研究[J]. 光学学报,2005,25(7):943-948.
ZHU Jigui, LI Yanjun, et al. Study on single camera simulating stereo vision measurement technology [J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(7): 943-948. (in Chinese)
- [13] Horaud R, Mohr R, Lorecki B. On single-scanline camera calibration [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1993, 9(1): 71-75.
- [14] Luna C A, Mazo M, et al. Calibration of line-scan cameras[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2010, 59(8): 2185-2190.
- [15] Li J, Yuan F, Li Z. A new method for calibrating multi-linear CCD in spatial objects exterior attitude measurement [J]. Journal of Information Hiding and Multimedia Signal Processing, 2011, 2(2): 185-191.