航空武器对地攻击弹丸终点测量的方法

赵思宏,陆亚兵,朱明军,万朝江,陈晓旭,谷 雨

(空军航空大学,吉林 长春 130022)

摘 要:为了解决航空武器对地攻击弹丸终点测量系统的测量精度问题,提出了运用交汇测量法测量目标的瞬间空间位置,并采用多目标动态检测算法完成了在图像序列中同时提取所有动态目标的功能。该算法针对图像中包含较复杂背景情况下,动态目标的提取和位置测量,从而加强了动态目标测量系统的精确性和快速性。经实验证明,系统可正确提取出现在视场中的激光点目标,在检验打击点测量的结果与真值的误差时,图像脱靶量的测量精度优于 1 pixel,图像脱靶量测量分辨率为 0.5 pixel。

关键词:弹丸终点测量; 交汇测量; 边缘特征匹配; 多目标动态检测

中图分类号:TJ410.6 **文献标志码**:A **文章编号**:1007-2276(2013)05-1338-07

Method of measurement of droppoint measurement system when airborne weapon attacks the ground

Zhao Sihong, Lu Yabing, Zhu Mingjun, Wan Chaojiang, Chen Xiaoxu, Gu Yu

(Aviation University of Air Force, Changchun 130022, China)

Abstract: To improve the accuracy of droppoint measurement system when airborneweapon attacks over the ground, this article presented utilizing the intersection measurement method to measure the instantaneous space position of target, and completed the function of pick up all dynamic target in image order by employing multiple target dynamic measurement method. The function was realized what dynamic target collection and position measurement in image which contained complex background, and could improve the accuracy and rapidity of dynamic target measurement system. Experiments testify that the system can pick up the laser target exactly. The measurement accuracy of misses of image is better than 1 pixel when detecting the result error of experiment and true-value. The distinguishability of misses of image is 0.5 pixel.

Key words: pill droppoint measurement; intersection measurement; edge feature matching; multiple dynamic target measurement

收稿日期:2012-09-02; **修订日期**:2012-10-10

基金项目:军队科研基金(JDKY200700360)

作者简介:赵思宏(1965-),副教授,硕士,主要从事航空装备的作战应用方面的研究。

0 引 言

航空武器实弹对地攻击的精确程度是衡量空中人员对地面目标攻击效果的重要内容之一，传统的实弹攻击以及人工测控存在时间长、测量准确性低、地面人员危险性大、空中人员在空中盲目进行二次攻击训练、提高空中人员攻击水平时间长等缺点。针对空中实弹攻击的缺陷，使用计算机模拟仿真训练提高对地攻击的效果。但是,在动态目标快速跟踪、提取和提高弹丸终点位置的立体测量精确性等方面还存在诸多问题。针对这些问题,利用 CCD 实时测量方法,在垂直于视场的平面内放置两台摄像机,通过光学测量原理和交汇测量原理获取目标的实际坐标位置，并运用基于图像序列帧间检测的多目标动态检测算法完成在该序列中同时提取所有动态目标的功能,从而实现弹丸目标的提取、跟踪和测量。

1 弹丸测量系统的理论方法

1.1 摄像机标定

从两点视察同一个景物称为双目立体视觉,获取在不同视点上的两幅图像，通过相片匹配与三角测量原理,计算同一景物在两幅图像上成像的偏差,进而获取景物的位置。摄影过程符合透视变化模型,拍摄到的 2D 图像是将一个 3D 目标向 2D 图像按比例缩小的投影。在一张图像上是不可能完全反映出该目标的全部深度信息,需通过把左、右两个不同视点所得到的一对 2D 图像进行组合,要求至少设置两台摄像机,提取它们各自所隐含的深度信息,唯一确定目标的空间坐标[1]。

为了跟踪掌握弹丸在空间运动的过程中，其运动路径或某时刻的运动位置，采用了两台摄像机[2]分别架设在实景缩微模型侧面两个垂直的方向,从这两个方向分别进行位置测量，并将所测的数据结果合成运算,交汇测量出目标的空间位置,其原理如图 1 所示。

图 1 中,设曲线 **S** 为弹丸飞行的空间轨迹曲线,**N** 为弹丸在某时刻的空间位置，要测量 **N** 点的空间坐标,需得到其在 **xyz** 坐标轴上的位置,即 $\mathbf{N_x}$、$\mathbf{N_y}$、$\mathbf{N_z}$。系统设置两台摄像机,摄像机 1 沿 **Y** 轴方向观察,可测量出 **N** 点在 **OXZ** 平面内的投影位置,进而由光学

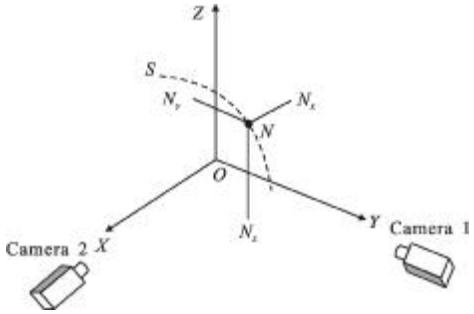

图 1 两摄像机空间交汇测量示意图

Fig.1 Sketch map of double vidicon intersection measurement

测量方法计算出 $\mathbf{N_xN_z}$,同理,摄像机 2 沿 **X** 轴观察,可测量出 **N** 点在 **OYZ** 平面内的投影位置,可计算出 $\mathbf{N_yN_z}$ 两个坐标量,将两个摄像机联合,进而实现对 **N** 点空间坐标的交汇测量[3-4]。

在采集图像过程中，摄像机所检测到的图像是三维的,而显示在屏幕上的图像为 2D,将 3D 世界坐标映射到 2D 屏幕坐标的过程称为投影,投影可分为透视投影和正射投影两种类型。该系统所涉及到的投影变换就是透视投影变换。由于导弹飞行过程中所看到的地形是基准图像通过透视投影变换后的结果。因此,在摄像机采集到基准地形模板图以后,需要先对基准地形模板图进行校正。

当摄像机相对于一个平面场景运动的时候,采集到的图像之间的对应关系可以由一个投影变换矩阵,表示为:

$$\begin{bmatrix}\alpha\\ \beta\\ \chi\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}n_0 & n_1 & n_2\\ n_3 & n_4 & n_5\\ n_6 & n_7 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x\\ y\\ 1\end{bmatrix} \tag{1}$$

即有,$\hat{x}=\dfrac{\alpha}{\beta}=\dfrac{n_0x+n_1y+n_2}{n_6x+n_7y+1}$;$\hat{y}=\dfrac{\beta}{x}=\dfrac{n_3x+n_4y+n_5}{n_6x+n_7y+1}$

式中:n_2 为 **x** 方向位移;n_5 为 **y** 方向位移;n_0、n_1、n_3、n_4 确定旋转、缩放、剪切量;n_6、n_7 确定梯形失真和线性调频的大小。在后期的景象匹配过程中可以对旋转、缩放和平移量进行计算，在基准图变换阶段主要确定梯形失真和错切变换的参数。

将变换矩阵区分开，可以看成是几种变换共同作用的结果。以下 4 个参数与平面场景的夹角和目标场景距离有关,可以根据几何关系事先确定:

$P=\begin{bmatrix}1 & 0 & p_x\\ 0 & 1 & p_y\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix}$表示平移变换,将图像内的每一点移动到$(x+p_x, y+p_y)$;

$$S=\begin{bmatrix} s_x & 0 & 0 \\ 0 & s_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$ 表示缩放变换,横纵坐标缩放倍数分别为 s_x 和 s_y。

$$C=\begin{bmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 \\ \sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$ 表示旋转变换,使图像围绕原点顺时针旋转 α 度。

上面三种为刚体变换, 对目标图像不会产生畸变。因此,通过模板匹配,形状匹配等方法进行测量。

$$TS=\begin{bmatrix} 1 & tsx & 0 \\ tsy & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$ 表示错切变换,与梯变系数 n_6、n_7 共同决定梯形失真现象和线性调频现象对图像的影响。若只考虑 3D 空间对 2D 空间的透视投影变换,两幅图像间的变换关系为:

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \chi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & tsx & 0 \\ tsy & 1 & 0 \\ n_6 & n_7 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \tag{2}$$

1.2 空间目标的交汇测量原理

确定运动目标在某个瞬间的空间位置(x,y,z),采用交汇测量法[5]进行测量。交汇测量法是由两台以上测量设备分别同步测出目标对各仪器站点的方位角和高低角, 在已知站间距离的情况下求出目标的空间位置。文中采用前向交汇法的正直测量法和交汇测量法。

正直测量法测量时, 两台设备的光轴相互平行并与二站点连线垂直,其原理图如图 2 所示。

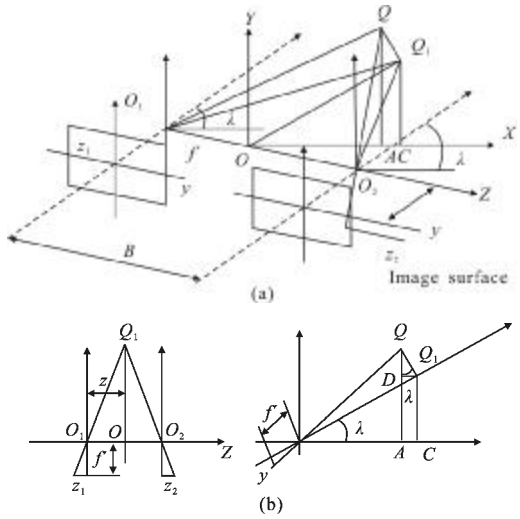

图 2 正直测量原理

Fig.2 Orthoqonal measurement method theory

图中 O 点为大地坐标系原点,目标 Q 在 OXYZ坐标系中的空间坐标为:$x=Bf'\times\cos\lambda/a-By_1\times\sin\lambda/a$;$y=Bf'\times\sin\lambda/a+By_1\times\cos\lambda/a$;$z=Bz_1/a$。

测量时两台摄像机的光轴在空间交汇从而使两个探测面重叠,形成一个交汇探测面,也就是靶面。当弹丸穿过该靶面时,同时在两台摄像机上成像,根据摄像机的空间关系与成像位置计算出目标的空间坐标。图中 O_1 和 O_2 为在 XOZ 平面的两个测点,O_1 和 O_2 为基线 L, 若基线 L 与 X 轴重合则目标 M 在空间的位置,如图 3 所示。

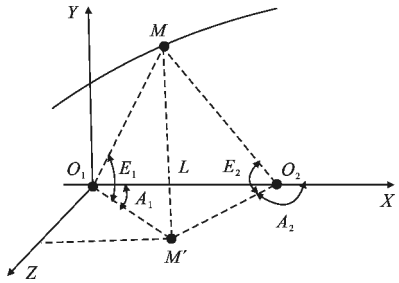

图 3 交汇测量法的原理

Fig.3 Intersection measurement method theory

两个测量站实时将普通电视系统测量的脱靶量、编码器的测角数据、焦距值输出至中心站,在采样时刻内根据公式计算出目标的空间位置, 记录数据并在显示器上实时显示弹道曲线。

某些特殊情况下, 可能无法利用以上所述的双摄像机交汇测量的方法,测量地面上某点的实际位置。但是, 如果能够确定与被测量点在同一水平面上的其他几个点的位置, 则此时可以采用单摄像机结合地面标定的办法来实现地面点的测量,其原理如图 4 所示,在平面 OXY 坐标系中,设已知坐标系中 O 点位置,以及 A 和 B 两点的坐标,可计算图中 P 点的坐标位置。

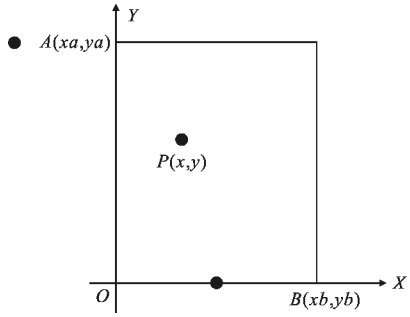

图 4 单摄像机地面测量原理

Fig.4 Single vidicon ground survey theory

图 4 中,假设摄像机光轴垂直于水平面照射,且其中不存在任何畸变和角度透视, 则利用摄像机图像, 即可得出 **P** 点与这 3 个已知点的任何一个的相互位置关系,其距离单位为像素。

2 计算方法

2.1 边缘特征匹配算法

由光照模型理论可以得出, 在两台摄像机相对位置较近的情况下, 从空间其他位置只能观察到物体表面的散射光, 其强度与观察方向和物体本身形状无关。同时,两台摄像机在观察空间任意点 **p** 时,其采集到的图像中对应点 $\mathbf{p}_1$ 和 $\mathbf{p}_2$ 的灰度应相等,其亮度也相同。在某领域中,定义灰度相关值 **C** 来表示灰度的相似性[6]时,要考虑到噪声的影响。其方法是将一台摄像机采集到的图像中某一点的灰度领域作摹本, 以相关函数作为两个搜索领域间的相似性测度,采集到的另一幅图像中,搜索具有或相似灰度值分布的对应点领域,实现边缘特征点的匹配[7]。

基于对各种算法优越性的考虑,系统利用 SSDA 算法进行匹配, SSDA 算法如下。

(1) 绝对误差值:

$$\mathbf{e}(i,j,x_k,y_k)=|s_y(x_k,y_k)-\bar{s}(i,j)-m(x_k,y_k)+\bar{m}| \qquad (3)$$

式中:假设模板图像为 **m**;陌生图像为 **s**,包含在 **S** 中的以坐标(i,j)为参考点且尺寸与 m 相同的子图像为 $\mathbf{S}_{ij}$。

(2) 取 **Th** 为不变阈值。在子图中随机选取像点,计算它同 **m** 中对应点的误差值, 然后把该差值相加,当累加 **p** 次误差超过 **Th** 停止累加,记下次数 **p**,该算法的检测曲面为:

$$I(i,j)=\{p|\min_{1\leqslant p\leqslant MN}[\sum_{k=1}^{p}e(i,j,x_k,y_k)\geqslant Th]\} \qquad (4)$$

(3) 把 I(i,j)值大的(i,j)点作为匹配点,在该点上需要累加很多次才能使总误差超过 **Th**。

该算法的特点是当模板图像和子图灰度相差很大且超过设定阈值时,会自动停止运算,减少运算量并提高匹配速度。

2.2 多目标动态检测算法

图像中目标的提取和跟踪采用全屏多目标动态检测方法。

在目标未进入视场前采集一帧或多帧图像作为背景图像, 然后将后续图像帧与该背景图像进行减影运算,目的是提取新图像中不同于背景的区域,这些区域就是进入视场的动态目标。图像帧间减影运算中,设 f(x,y)和 h(x,y)分别为参与图像减影运算的两帧图像,结果为:

$$g(x,y)=|f(x,y)-h(x,y)| \qquad (5)$$

在减影图像中, 提取不同于背景图像的目标影像位置,实现弹丸目标的提取和跟踪。

图 5 中,图(a)为采集的本底图像,不含任何动态目标,所有的图像均作为背景处理,图(b)为进入了目标后的实时图像, 与之前的本底图像大部分相同,唯一不同的是新进入的部分,对二者进行差分运算,得到图(c),由于两幅图大部分是相同的[8],因此在差分后的图像中, 注意到仅有进入目标的区域被标示出来,对该部分进行凸显后即可提取目标的位置。

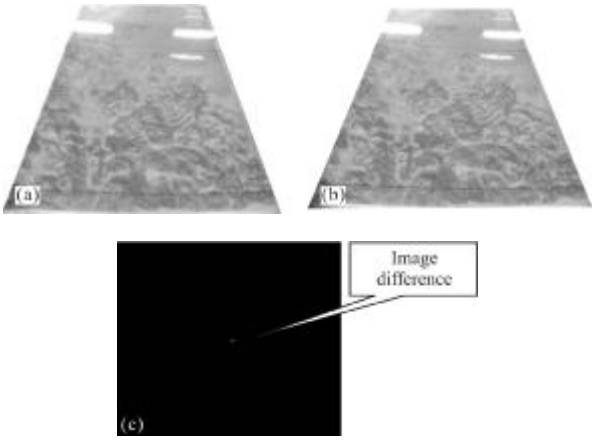

图 5 动态目标检测过程

Fig.5 Process of detecting dynamic target

2.3 图像阈值计算及弹丸目标重心(质心)提取

对于经过减影后的图像, 其特点是在整个图像视场中目标所占比例较小,其余大部分均为背景,且背景灰度比较集中, 利用这个特点进行图像自适应阈值的选取。设 $\mathbf{P}_1$ 和 $\mathbf{P}_2$ 分别为背景和目标出现的概率,μ_1 和 μ_2 分别为背景和目标像素出现的高斯密度均值,σ 为方差。则可得自适应阈值为:

$$T=\frac{\mu_1+\mu_2}{2}+\frac{\sigma^2}{\mu_1-\mu_2}\ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) \qquad (6)$$

通过该值对图像进行阈值处理, 并将图像中的各个连通区域提取出来, 分别计算区域中各位置的重心(质心)。

设某连通区域范围为 **M×N** 窗口,其灰度重心(质心)为:

$$y=\frac{\sum_{k=1}^{N} k \sum_{j=1}^{M} f(j,k)}{\sum_{k=1}^{N} \sum_{j=1}^{M} f(j,k)} \quad j=1,\cdots,M;k=1,\cdots,M \tag{7}$$

由于计算重心的过程是个统计平均过程，算出的跟踪点不是个别的最亮点位置，而是图像中各个像元灰度加权平均的位置,所以以重心为跟踪点,跟踪的随机误差小、抗干扰能力强、精度高、稳定性好。图 6 为提取目标重心的图像。

图 6 提取目标重心

Fig.6 Pick up barycenter of target

2.4 抑制背景变化对目标检测的影响

系统采用的动态目标检测算法，利用提前采集的背景图像进行动态目标的提取。视场中背景固有的一些干扰因素，在前面动态目标提取、预处理滤波、目标捕获和跟踪等算法中,考虑将其去除。如果实际执行任务时,持续时间比较长,加上阳光、大气和周围环境的变化，背景图像随之会发生变化。因此,系统在进行目标捕获和跟踪阶段中,识别出图像中无可疑目标出现时,将进行背景图像的更新。

3 终点测量系统的实现

在视场侧面的两个方向分别架设摄像系统,建立双目测量系统,两个系统结合,实现对弹丸终点的监视和测量。每个系统由可见光摄像机、电控云台、信号传输线路等组成。其中,可见光摄像机用于获取可见光图像送往计算机、电控云台控制摄像机的角度调整、弹丸飞行过程的随动以及整个视场的巡视。

两台测量摄像机分别从不同方向对同一目标进行图像采集,各自的视频信号送入计算机,计算机对图像进行目标提取和计算后，通过光学测量原理和交汇测量原理获取目标的实际坐标位置，即完成弹丸终点测量。

终点测量软件实现测量摄像机视频采集和显示、图像预处理(图像畸变校正和透视变换)、目标提取、目标位置计算等功能。

3.1 摄像机视频采集和显示

利用图像采集卡采集测量摄像机的视频信号,图像格式为 720×576,8 位灰度图像。该模块的流程如图 7 所示。

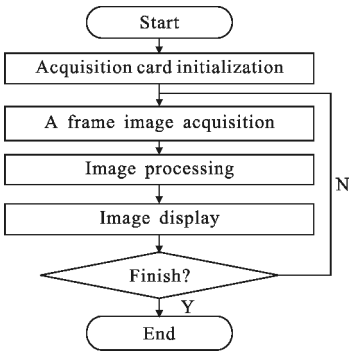

图 7 图像采集和显示模块流程

Fig.7 Flow of collection and display of image

3.2 图像预处理

由于测量系统采用的摄像机焦距较短，且距离被测量区域较近,因此,采集的测量图像形成一定程度的畸变,导致图像上的点发生变化,对于目标测量来说,是一个不可忽视的误差源,应进行预处理,消除畸变,保证图像的正确性。

测量系统在地面的上方监视被测量区域，光学视场光轴与地面呈一定的夹角，获取的图像针对观察者来说,具有透视效应,即近大远小,这种透视效应同样对目标位置测量具有误差影响，也是需要预先消除的。

3.3 目标提取和位置计算

软件利用图像处理技术，进行图像中目标出现与否的检测，这里的目标即为出现在监视区域内的激光光斑,该光斑即为模拟对地攻击的弹着点位置。

根据图像提取结果,利用光学测量原理,进行目标的实际位置计算。

4 实验与结果

4.1 对地攻击的提取能力

为了检验该测量系统对地攻击的提取能力,采

取如下方法进行验证:

(1) 对单一目标的提取能力(见表 1)

终点测量系统进行初始化配置后, 进入测量状态,利用航空武器模型系统进行目标模拟打击试验,检查测量系统对目标的提取能力。

(2) 对多目标的提取能力(见表 2)

以 (1) 为基础同时利用其他两个激光照射器照射目标区域,检查测量系统对多目标的提取能力。

表 1 单一目标提取

Tab.1 One-objective detection

Shining frequency/Hz	Shining time /s	Attack number	Reported number
0.5	4	2	2
1	4	4	4
5	4	20	21
10	4	40	43
15	4	60	60

表 2 多目标提取

Tab.2 Multi-objective detection

Laser spot number	Reported number
1	1
2	2
3	3

图 8 为采用两个测量摄像机进行目标提取的实验。

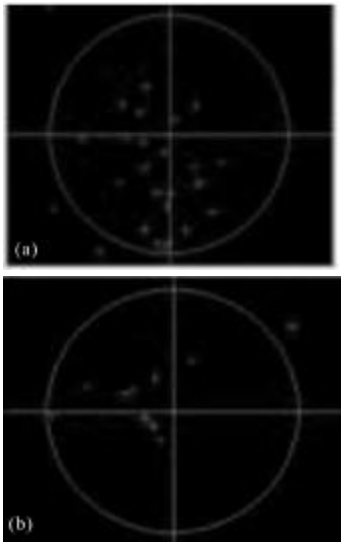

图 8 两台摄像机进行目标测量实验

Fig.8 Experiment picture of using two camera to measure target

4.2 对打击点测量的结果与真值的误差

由于目标真值无法准确获得, 因此实验对特定目标点进行多次激光频率照射,并进行自动测量,以其平均值为目标真值位置, 检查图像脱靶量的测量精度和测量分辨率。

在大地坐标中,设预期目标位置坐标为(x_0, y_0, z_0),通过图像处理交会计算的本次攻击实际位置坐标为(x_p, y_p, z_p)。

本次对地攻击绝对误差(距离):

$$E=\sqrt{(x_p-x_0)^2+(y_p-y_0)^2+(z_p-z_0)^2} \tag{8}$$

打击偏差角度,$\theta_{xy}=\arctan\left(\frac{y_p-y_0}{x_p-x_0}\right)$;$\theta_{yz}=\arctan\left(\frac{z_p-z_0}{y_p-y_0}\right)$;$\theta_{zx}=\mathrm{arctg}\left(\frac{x_p-x_0}{z_p-z_0}\right)$。

判断目标是否摧毁,设目标有效区域半径为 ES:

$$\begin{cases}\text{Yes} & E<E_s\\ \text{No} & \text{otherwise}\end{cases}。$$

4.3 误差统计和分析

设对预期位置(x_0, y_0, z_0)进行 n 次打击,得到绝对误差序列$(E_1、E_2、\cdots、E_n)$,则误差均值为$\bar{E}=\frac{\sum_{i=1}^{n}E_i}{n}$;方差为 $DE=\frac{\sum_{i=1}^{n}(E_i-\bar{E})^2}{n}$;均方差为 $\sigma_E=\sqrt{D(E)}$。

对同一目标以频率 5 Hz 和 10 Hz 连续打击 10 s,共产生 50 和 100 个数据样本,如表 3、4 所示,统计该组数据。

表 3 打击点测量精度实验(以 X 计算)

Tab.3 Result of hit points precision experiment (Calculate on X axis)

Simulant attack frequency/Hz	5	10
Time span of attack/s	10	10
Number of theoretical attack	50	100
Number of detection	50	100
Maximum value of data	273	273
Minimum value of data	272	272
Average value	272.52	272.65
Maximum error	0.52	0.65

表 4 打击点测量精度实验(以 Y 计算)

Tab.4 Result of hit points precision experiment (Calculate on Y axis)

Simulant attack frequency/Hz	5	10
Time span of attack/s	10	10
Number of theoretical attack	50	100
Number of detection	50	100
Maximum value of data	335	335
Minimum value of data	334	334
Average value	334.26	34.35
Maximum error	0.74	0.65

4.4 实验结果

测量系统可正确提取出现在视场中的激光点目标,且目标同时出现的数目在 3 个以内时,可实现多目标捕获。在检验打击点测量的结果与真值的误差时,图像脱靶量测量精度优于 1 pixel,图像脱靶量测量分辨率 0.5 pixel。

5 结 论

弹丸终点测量系统首先对摄像机模型进行标定, 进而运用空间目标交汇测量方法和多目标动态检测算法等手段, 完成弹丸终点的测量和攻击目标的提取、跟踪和测量。实验结果表明:测量系统可以较好的提取出现在视场中的激光点目标并实现多目标捕获,打击结果与真值误差精度优于 1 pixel,对出现在视场内的激光点目标进行捕获的能力可达到 97%以上。文中提出的测量分析方法提高了弹丸终点测量系统的测量精度,从而为“航空武器对地攻击实时自动报靶系统”提供了理论支持。

参考文献:

[1] Wang Suhua, Shen Xiangheng, Ye Lu. Calibration of contrast for adjustable contrast optical target equipment [J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(5): 949-956. (in Chinese)
王素华, 沈湘衡, 叶露. 可调对比度目标源装置中对比度的标定[J]. 光学 精密工程, 2012, 20(5): 949-956.

[2] Wang Bin, Wang Zongyang, Wang Jianli, et al. Phase-diverse speckle imaging with two cameras [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(6): 1384-1390. (in Chinese)
王斌, 汪宗洋, 王建立, 等. 双相机相位差异散斑成像技术[J]. 光学 精密工程, 2011, 19(6): 1384-1390.

[3] Duanmu Qiong, Yang Xueyou, Zhu Jigui, et al. 3D coordinate measurement system based on optoelectronic scanning [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 10(40): 2014-2019. (in Chinese)
端木琼, 杨学友, 邾继贵, 等. 基于光电扫描的三维坐标测量系统[J]. 红外与激光工程, 2011, 10(40): 2014-2019.

[4] Yang Linghui, Yang Xueyou, Lao Dabao, et al. Large-scale coordinates measurement method based on intersection of optical planes[J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 6(9): 1105-1109. (in Chinese)
杨凌辉, 杨学友, 劳达宝, 等. 采用光平面交汇的大尺寸坐标测量方法[J]. 红外与激光工程, 2010, 6(9): 1105-1109.

[5] Wang Xiangjun, Han Shuanglai. Bomb placement of fast coordinate measuring system calibration method and accuracy analysis [J]. Optics and Precision Engineering, 2005, 13(6): 686-690. (in Chinese)
王向军, 韩双来. 弹落点坐标测量系统的快速校准方法及精度分析[J]. 光学 精密工程, 2005, 13(6): 686-690.

[6] Peng Chen, Chen Qian, Qian Weixian. Miss distance error analysis and modification for infrared tracking and measuring system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 8(41): 2178-2184. (in Chinese)
彭晨, 陈钱, 钱惟贤. 红外跟踪测量系统的脱靶量误差分析与修正[J]. 红外与激光工程, 2012, 8(41): 2178-2184.

[7] Sun Zelin, Wang Zhao, Zhai Huanchun. Analysis and control of error on two theodolite intersection measurement for gun rotated accuracy of artillery [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(10): 2434-2441. (in Chinese)
孙泽林, 王昭, 翟唤春. 双经纬仪交会测量火炮调炮精度的误差分析与抑制 [J]. 光学 精密工程, 2011, 19(10): 2434-2441.

[8] Yang Zhen, Li Yunguang, He Lei. Measurement methods and precision analysis of optical collimation[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 40(2): 282-286. (in Chinese)
杨振, 李广云, 贺磊. 光学准直测量方法与精度分析[J]. 红外与激光工程, 2012, 40(2): 282-286.