

文章编号:1007-2780(2017)01-0048-08

火力压制试验弹丸落点脱靶量测试方法研究

王永新^{1*}, 吕 游²

(1. 63936 部队, 北京 102202;

2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 本文针对传统地面炸点测试系统受地形及机动条件约束无法满足试验火力压制科目中落点脱靶量测量的问题, 提出研制一套在无人机上安装自动指向摄像系统的高空拍摄装置。利用地面设置的外定标完成摄像系统内部参数修正, 通过像面修正和目标位置提取, 实现弹丸地面落点的高精度测试坐标的获取。实验结果表明, 利用本文建立的系统, 相机的成像大小为 $727.9\text{ m} \times 352.7\text{ m}$, 成像精度能够满足弹丸散布范围纵向 100 m 及横向 300 m 的测试需求; 在探测器像元数为 $4\,096 \times 2\,048$ 的情况下, 相机的成像精度较高, 满足测试精度的试验要求。本文方法具有重要的理论意义及应用价值。

关键词: 像面修正; 落点坐标; 图像处理; 线面交会

中图分类号: TP391.4; V556.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/JYXS20173201.0048

Method of miss distance measurement for projectiles in the suppression

WANG Yong-xin^{1*}, LV You²

(1. 63936 Unit of PLA, Beijing 102202, China;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: Aiming to the problem of miss distance measurement in the suppression, which generates by the restriction of topographies and movements in the traditional burst points test system, a set of pointing system in air is established, and it is installed on an unmanned plane. By utilizing the external calibration, the internal parameters of the image pickup system are corrected. And then by correction of image plane and target position extraction, the ground points of the projectiles are obtained exactly. The experiment result shows that the imaging size of camera is $727.9\text{ m} \times 352.7\text{ m}$, which meets the test requirement within 100 m in horizontal and 300 m in vertical. In addition, the precision of camera is 0.1 m when the pixel number is $4\,096 \times 2\,048$, which meets the requirement that the test precision is less than 0.3 m . The proposed method has the theoretical value and the practical significance.

Key words: correction of imaging plane; position; image processing; wire surface intersection

收稿日期: 2016-07-11; 修订日期: 2016-09-13.

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 61102023)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61102023)

* 通信联系人, E-mail: 331799032@qq.com

1 引言

根据轻型高机动装备火力配置特点及潜在的试验需求,未来的装备试验必然会在山区、密林等复杂地形地貌环境下展开。由于特定的背景限定,试验不可能全部采用单发射击的方式进行。如果沿用传统常规武器光学设备落点测试方案,会面临以下两方面问题:一是由于弹丸散布范围小,目标之间相互阻挡或目标粘连情况严重,多目标分离是一个难题(如某型 60 mm 迫击炮火力压制试验);二是布站位置难以确定,例如,在山区或密林环境下,最少需要 3 台相机同时成像才能实现同一平面内多目标分离,在目标间存在遮挡情况时,必须要求有 4 台相机同时成像,同时必须保证弹丸爆炸点位置对 4 台相机同时可见,且相互交汇处理没有畸变区,如此苛刻的布站要求在实际试验中很难满足。因此,本文提出采用在无人机上安装带有自动指向调整系统的专用相机,利用地面设置的外定标完成摄像系统内部参数修正,通过像面修正和目标位置提取,进行地面落点脱靶量坐标数据快速测量方法^[1-3]。

2 火力压制试验弹丸落点脱靶量测试情况简介

班排火力压制试验通常采用 60 mm 或 82 mm 速射迫击炮进行定点火力压制。其特点为阵地机动性强、弹丸数量多、散布范围小、射击间隔短。其射程通常为 6 km 左右。弹丸散布范围纵向约 100 m,横向约 300 m。试验通常要求测量全部弹丸落点脱靶量数据且测试精度小于 0.3 m。如图 1 所示。

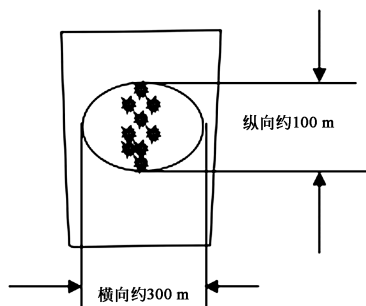


图1 60 mm 速射迫击炮火力压制试验弹丸终点弹道分布情况

Fig.1 Distribution of projectile in the experiment of 60 mm rapid fire mortar

目前传统的落点测量方法主要有两类,一类是以炸点经纬仪为代表的光测设备,通过事后交汇计算的方法得到弹丸落点坐标;另一类是采用传感器的方式对落点坐标进行测量,主要包括 GPS 坐标测量和声震波落点坐标测量系统^[4-5]。然而上述设备各有其优缺点。

2.1 炸点经纬仪落点坐标测量方案

炸点经纬仪对终点弹道测量过程中由于没有连续弹道特性,只凭借一个炸点无法确定各台经纬仪成像的炸点对应关系,即使在没有粘连的情况下,要想确定一个准确的炸点坐标必须要有 3 台经纬仪参与交汇计算,一旦有粘连现象,必须要保证 4 台设备同时录取有效数据,且设备必须分布在被测目标的 4 个不同方位^[6-7]。测试原理如图 2 所示。

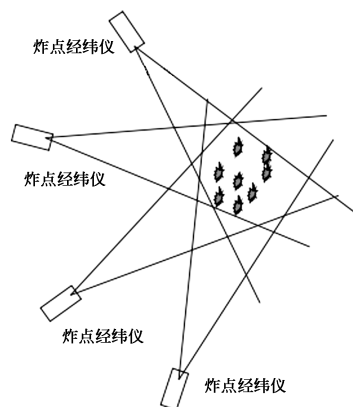


图2 炸点经纬仪弹丸落点坐标测试原理图

Fig.2 Diagram of coordinate test for the projectile point of the transit

即便采用多站测量,由于受到算法的局限,传统的方法也只能处理同帧画幅小于 10 个落点数,而通常火力压制射击弹丸数量为 32 发,原试验方法无法完成轻型高机动装备火力压制科目弹丸落点脱靶量坐标数据快速测量任务。

2.2 传感器落点坐标测量方法

采用传感器设备可以对弹丸落点坐标进行测量,通常采用高精度差分 GPS 进行。然而传统的 GPS 落点坐标测量方法无法确定弹序,且需要试后才能进行测量,无法满足试验对测试数据快速处理的要求。目前,国内也有采用布设传感器进行弹丸落点坐标测试的方式,但是实际使用过程中也暴露出许多问题。首先是设备机动性差,试验前需要提前布设传感器,试验过程中弹丸只能朝向预定落区进行射击,无法满足试验对抗过程

中落区位置不固定的情况;同时由于传感器采集原理制约,设备最大处理能力不超过每秒钟两发,对于火力压制试验中齐速射情况无法测量。

3 高空脱靶量坐标数据快速测量系统组成及测试方案简介

高空脱靶量坐标数据快速测量系统主要工作方式是利用八旋翼无人机作为承载平台,把光学测量设备悬挂在承载平台下方,在伺服电机的控制下相机指向弹丸预定落地空域。通过地面预先设置的数个标志点结合结算出相机的高度与指向,通过像面坐标畸变修正和参数结算,快速计算弹丸地面落点坐标。

3.1 设备组成及结构形式

整个测量系统主要组成有:一个承载平台(八旋翼无人机)、一个可三自由度转动的设备连接构件、一个可见光摄像机、机上实时记录系统、TD-LTE 传输系统、地面伺服控制系统和地面实时图像存储与处理系统。系统结构示意图如图 3 所示。

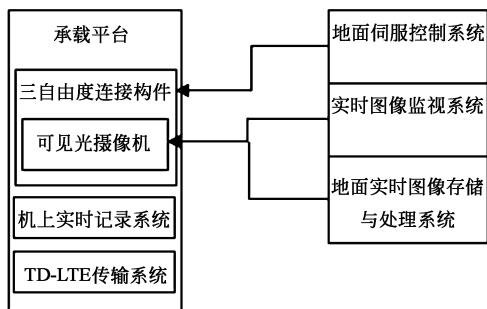


图 3 高空脱靶量坐标数据快速测量系统结构示意图

Fig.3 Structure diagram of high altitude miss-distance coordinate data measurement system

3.2 系统关键技术参数

系统关键参数如下:

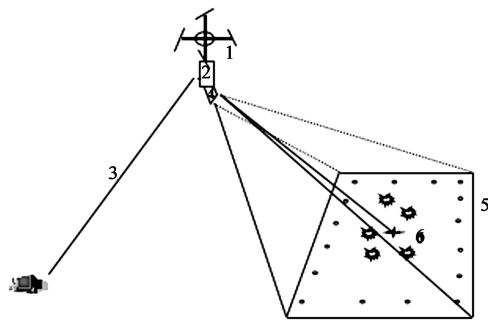
- (a) 无人机载重能力不小于 10 kg;
- (b) 吊舱方位旋转角度:方位无限;
- (c) 连接件俯仰范围: $\pm 90^\circ$;
- (d) 最大跟踪角速度: $15^\circ/\text{s}$;
- (e) 最大跟踪角加速度: $15^\circ/\text{s}^2$;
- (f) 视场角: $40^\circ \times 20^\circ$;
- (g) 像元数: $4\,096 \times 2\,048$;
- (h) 摄影频率:100 frame/s;
- (i) 多目标分辨能力: ≥ 50 发;

(j) 空间分辨能力: $\geq 3'$ 。

3.3 设备试验方案

该测量系统随着承载平台升空后,伺服系统可根据理论落点坐标引导、地面单杆或图像跟踪器控制下通过伺服系统调整吊舱上三自由度平台,使相机的指向对准理论落点的中心,相机把拍摄的图像通过 TD-LTE 数据链实时送到地面监视系统,地面监视人员根据图像情况调整相机指向,在延时控制系统的控制下,相机按照预定拍摄频率把图像实时存到内存内,并将拍摄的视频通过高速 4G 网络下载到地面实时图像存储与处理系统。

获得图像后,利用地面标志点坐标、相机焦距、大视场畸变修正模型可获得每一帧相机光学中心的坐标高度和设备指向,因此,通过相关算法及数学模型可以推算出弹丸地面炸点坐标。图 4 是高空脱靶量坐标数据快速测量系统试验布站方案。



- 1、承载平台(无人机) 2、可控三自由度连接构件
- 3、TD-LTE 无线传输系统 4、大视场高速相机
- 5、理论落点区特征标志点 6、相机指向中心点

图 4 高空脱靶量坐标数据快速测量系统布站示意图

Fig.4 Station distribution diagram of high altitude miss-distance coordinate data measurement system

4 数据处理方法

高空外定标测试方案中,数据处理方法非常重要,因为无人机不可能完全悬停在空中不动,也不像固定点的经纬仪那样可以提供坐标和编码器值,所有的计算数据都需要实时提取对应帧号的多个(最少 6 个)特征点像面坐标结算才能解算出弹丸炸点坐标位置。

4.1 像面畸变修正

由于摄像系统的视场角大 $40^\circ \times 20^\circ$ 图像畸变需要修正,图 5 是某型宽视场相机网格板成像情况示意图,函数 $F(X)$ 宽视场相机出所前标定函数,图(a)是网格板实物图,(b)是网格板实际成像图像,(c)网格板修正后图像。

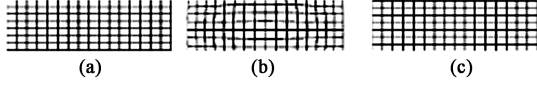


图 5 某型宽视场相机像面畸变修正效果图

Fig.5 Rendering of the correction effect image plane distortion for wide field camera

对于相机对地面的成像情况,首先要做像面畸变修正:

$$Y(x, y) = H(x, y) \cdot X(x, y), \quad (1)$$

其中: $H(x, y)$ 是畸变修正函数; $X(x, y)$ 是相机成像像面; $Y(x, y)$ 是复原后的图像。

4.2 空间位置及指向确定

高空脱靶量坐标数据快速测量系统以连接构件的形式安装于无人机下方,由于承载平台坐标不是固定值且无人机还会受到风力或承载平台运动等因素影响,相机的指向也会时刻在变化。只有在对应的每一帧图像中先确定相机高度和空间指向才可以得出地面炸点每一点的精确坐标。

高空脱靶量测量系统的空间位置和指向角是实时变化的,因此,在结算每一帧地面炸点坐标时,空间位置 (x_{wi}, y_{wi}, z_{wi}) 、空间指向角 (f_{wi}, g_{wi}) 、相面旋转角 (X_{xzi}) 也是一个变化量,通过地面多个标志点结算系统的位置和空间指向。设修正后特征点像面坐标为 $(\Delta x_{i1}, \Delta y_{i1}) \cdots (\Delta x_{in}, \Delta y_{in}) \cdots (\Delta x_{i20}, \Delta y_{i20})$, 地面标志点坐标分别是: $(x_1, y_1, z_1) \cdots (x_n, y_n, z_n) \cdots (x_{20}, y_{20}, z_{20})$ 就有下列关系成立:

首先要解算空间位置坐标和空间指向角^[8]:

$$\begin{cases} f_{wi} + (\Delta x_{i1} \cdot \sin(X_{xzi}) + \Delta y_{i1} \cdot \cos(X_{xzi})) \cdot xyjd = \left(\arctan \left(\frac{z_{i1} - z_{wi}}{x_{i1} - x_{wi}} \right) \right) \\ g_{wi} + (\Delta x_{i1} \cdot \cos(X_{xzi}) - \Delta y_{i1} \cdot \sin(X_{xzi})) \cdot xyjd = \left(\arctan \left(\frac{y_{i1} - y_{wi}}{\sqrt{(x_{i1} - x_{wi})^2 + (z_{i1} - z_{wi})^2}} \right) \right) \\ \vdots \\ f_{wi} + (\Delta x_{in} \cdot \sin(X_{xzi}) + \Delta y_{in} \cdot \cos(X_{xzi})) \cdot xyjd = \left(\arctan \left(\frac{z_{in} - z_{wi}}{x_{in} - x_{wi}} \right) \right) \\ g_{wi} + (\Delta x_{in} \cdot \cos(X_{xzi}) - \Delta y_{in} \cdot \sin(X_{xzi})) \cdot xyjd = \left(\arctan \left(\frac{y_{in} - y_{wi}}{\sqrt{(x_{in} - x_{wi})^2 + (z_{in} - z_{wi})^2}} \right) \right) \\ \vdots \\ f_{wi} + (\Delta x_{i+n} \cdot \sin(X_{xzi}) + \Delta y_{i+n} \cdot \cos(X_{xzi})) \cdot xyjd = \left(\arctan \left(\frac{z_{i20} - z_{wi}}{x_{i(n+1)} - x_{wi}} \right) \right) \\ g_{wi} + (\Delta x_{i+n} \cdot \cos(X_{xzi}) - \Delta y_{i+n} \cdot \sin(X_{xzi})) \cdot xyjd = \left(\arctan \left(\frac{y_{i20} - y_{wi}}{\sqrt{(x_{i20} - x_{wi})^2 + (z_{i20} - z_{wi})^2}} \right) \right) \end{cases}, \quad (2)$$

其中: $xyjd$ 代表单个像元对应的空间角度; Δy_{in} 代表标志点 n 在相机成像的第 i 帧 y 方向上对应的脱靶量; Δx_{in} 代表标志点 n 在相机成像的第 i 帧 x 方向上对应的脱靶量; (x_{wi}, y_{wi}, z_{wi}) 代表空间相机在第 i 帧对应的空间坐标; X_{xzi} 代表空间相机轴线在第 i 帧对应的旋转角; (f_{wi}, g_{wi}) 代表空间相机中心在第 i 帧对应的空间指向。

在式(2)中,有 6 个未知量,每一个标志点可以列出 2 个方程,因此,最少只要 3 个标志点就可以结算出上述 6 个未知参数。对于有 20 个标志

点的特定区域,最多可以结算出 C_{20}^3 组测试结果。为了提高数据整体结算精度,可以采用多组参数均值或最小二乘算法结算出相机的空间坐标和相机空间指向。

4.3 落点空间直线方程确定

通过上述最小二乘可以得出相机在第 i 帧的空间坐标 (x_{wi}, y_{wi}, z_{wi}) 和中心点指向 (f_{wi}, g_{wi}) , 利用像面畸变修正后的图像 $Y(x, y)$ 可以提取出弹丸地面落点像面坐标 $(x_{xz1}, y_{xz1}) \cdots (x_{xzj}, y_{xzj})$, 利用相机中心点像面坐标 $(x_{xmzx},$

y_{xmzx})、落点像面坐标 $(x_{xzi1}, y_{xzi1}) \cdots (x_{xzij}, y_{xzij})$ 和单个像元对应的空间角度系数 $xyjd$ 可以计算出每个炸点到相机的空间连线角度 $(f_{xzi1}, g_{xzi1}) \cdots (f_{xzij}, g_{xzij})$:

$$\begin{cases} f_{xzj} = f_{wi} + (\Delta x_{xzi} \cdot \sin(X_{xzi}) + \Delta y_{xzi} \cdot \cos(X_{xzi})) \cdot xyjd \\ g_{xzj} = g_{wi} + (\Delta x_{xzi} \cdot \cos(X_{xzi}) - \Delta y_{xzi} \cdot \sin(X_{xzi})) \cdot xyjd \end{cases} \quad (3)$$

这样对于每一个落点可以通过指向角和相机空间坐标确定一条空间直线方程。通过 (f_{xzij}, g_{xzij}) 可以确定空间直线的方向数 (p, q, r) :

$$\begin{cases} p = \cos(f_{xzj}) \\ q = \sin(f_{xzj}) \\ r = \sin(g_{xzj}) \end{cases} \quad (4)$$

通过结算出来的空间直线方向数和空间相机坐标可以确定相机在第 i 帧时地面落点 j 对应的空间直线方程 L_j :

$$\begin{cases} x_{ij} = x_{wi} + pt \\ y_{ij} = y_{wi} + rt \\ z_{ij} = z_{wi} + qt \end{cases} \quad (5)$$

其中 $(-\infty < t < +\infty)$ 。

4.4 弹丸落点坐标的确定

在实验前需要选择一个相对平坦的弹丸落点平面,我们定义这一基准平面为 M_0 ,但是并不一定是绝对平面,如图 4 所示,通过 3 个点 (M_1, M_2, M_3) 可以确定基准平面 M_0 的平面方程^[9]:

$$\begin{vmatrix} x & y & z & 1 \\ x_{01} & y_{01} & z_{01} & 1 \\ x_{02} & y_{02} & z_{02} & 1 \\ x_{03} & y_{03} & z_{03} & 1 \end{vmatrix} = 0, \quad (6)$$

利用空间直线 L_j 和弹丸落点基准平面 M_0 ,即式(5)和(6)方程可以解算出弹丸在基准平面上的落点坐标 (x_{0j}, y_{0j}, z_{0j}) ,利用空间两点直线距离算法,计算出 20 个标志点中不在同一条直线上的 3 个距离最近的点 (M_k, M_n, M_m) ,通过上述 3 个坐标点可以建立弹丸落点空间平面方程^[10]:

$$\begin{vmatrix} x & y & z & 1 \\ x_{mk} & y_{mk} & z_{mk} & 1 \\ x_{mn} & y_{mn} & z_{mn} & 1 \\ x_{mm} & y_{mm} & z_{mm} & 1 \end{vmatrix} = 0, \quad (7)$$

利用落点空间直线方程(4)和空间平面方程(7)可以分别解算出第 i 帧每一个落点的空间坐标 $(x_{i1}, y_{i1}, z_{i1}) \cdots (x_{ij}, y_{ij}, z_{ij})$ 。弹丸曝光持续

时间一般大于 50 ms,如果拍摄的相机采用 100 C/s 进行拍摄,每一发弹丸至少可以得到 5 个有效数据,为了提高测试精度和测试准确性可采用均值作为测试结果。

4.5 系统成像范围弹丸确定

为了分析本文研制系统的成像范围,取相机位于炸点正上方垂直向下拍摄这一特殊情况进行精度分析。不考虑镜头畸变和光轴机械误差的影响,建立如图 6 所示测量空间坐标系 $O_M\text{-}XYZ$,它是整个测量活动所在的物理空间,设 XO_MY 为被测目标所在平面,称系 $O_M\text{-}XY$ 为测量平面坐标系,相机光轴 OO' 始终与 Z 轴平行,调节相机成像点在 $O_M\text{-}XYZ$ 空间中的 Z 坐标值,可得到大小不同的视场,调节 O' 点的 X 坐标值或(和) Y 坐标值,可对测量平面不同区域成像。物面坐标系为 $O\text{-}xy$,用以确定成像视场在测量空间中的方位,与 XO_MY 面在同一平面,原点 O 为相机光轴与测量平面的交点。图像坐标系为 $O_1\text{-}uv$, u 轴表示图像特征点的横坐标,与物面坐标的 x 轴平行, v 轴表示图像特征点的纵坐标,与物面坐标的 y 轴平行,坐标单位可以以像素为单位(图像像素坐标系),也可以以浮点数为单位(图像数值坐标系)^[11-12]。

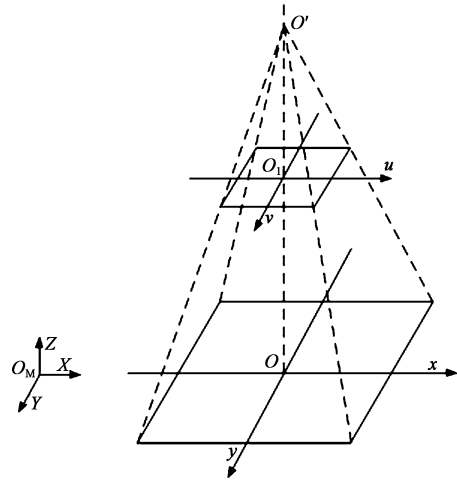


图 6 测量空间坐标系、地面坐标系与图像坐标系关系图
Fig.6 Relationship of measurement between the spatial coordinates, the ground coordinates and the image coordinates

根据相机参数可知,其视场角 $\alpha \times \beta$ 为 $40^\circ \times 20^\circ$;当作用距离为 1 km 时,根据三角函数公式,其成像大小为:

$$\begin{cases} \tan(\frac{\alpha}{2}) = \frac{\frac{b}{2}}{OO'} \\ \tan(\frac{\beta}{2}) = \frac{\frac{a}{2}}{OO'} \end{cases}, \quad (8)$$

其中, α, β 是视场角; OO' 是作用距离; a, b 是成像大小。

计算可得, 成像大小为 $727.9 \text{ m} \times 352.7 \text{ m}$ 。能够满足弹丸散布范围纵向 100 m , 横向 300 m 的测试需求。

5 应用与实验

5.1 实验方案

为检验本文设计测试方案的可行性, 选取在某山区进行实弹测试实验, 实验区域为山区密林地形。首先事前在目标区放置标志点, 为了确保标志点不影响参试单位正常运动, 采用在地面画标志线的方法代替传统的立标杆工作。实验中采用 4G 专网作为无线传输手段, 单个终端稳定传输带宽为 20 M , 传输频率为 400 MHz 。视频编解码器采用海康威视生产的高清视频解码器。

实验过程中按照图 4 示意图, 从空中侧面对实弹射击区域进行随动拍摄, 获取着靶毁伤图像信息。之后通过事后数据回看在地面炸点坐标测量系统软件中采用图上手动选点的方式确定像面坐标和物面坐标的对应关系。如图 7 所示。



图 7 地面炸点坐标测量系统数据处理界面

Fig.7 Data processing interface of the coordinate measuring system of the surface of the ground

5.2 精度分析

选取射击中某发测试数据进行实际精度分析。其中手动提取的标志点对应坐标如表 1 所示。

数据采用实验区局部坐标系。

表 1 像面和物面坐标对应关系表

Tab.1 Corresponding relationship between the image plane and the object plane coordinate

N	x/px	y/px	X/dm	Y/dm	Z/dm
1	-86.15	-68.99	36 589.41	25 273.32	2 100.52
2	-53.40	82.21	37 631.08	31 324.51	2 020.53
3	-14.78	-76.63	39 100.97	24 934.98	2 270.16
4	10.46	64.43	40 426.54	30 319.81	2 210.29

利用标志点信息通过空间坐标结算, 得到相机空间坐标后, 通过最小二乘法经过 5 次迭代得到被测炸点的地面坐标。迭代误差方程系数矩阵几常数项矩阵如表 2、3 所示。

表 2 误差方程式系数矩阵

Tab.2 Error equation coefficient matrix

-0.00031	0.00002	0.00017	-0.20246	-0.03074	-0.0799
-0.00002	-0.00031	0.00016	-0.05457	-0.19171	0.08357
-0.00023	0.00001	0.00008	-0.16494	0.03698	0.08188
-0.00002	-0.00023	-0.00013	0.01376	-0.19823	0.04807
-0.00032	0.00002	0.00001	-0.15482	0.00602	-0.08904
-0.000002	-0.000032	0.000018	-0.01645	-0.20434	0.005908
-0.000024	0.000002	-0.000003	-0.15474	0.002109	0.063176
-0.000002	-0.000023	-0.00001	-0.01965	-0.17841	-0.0191

表 3 误差方程式常数项矩阵

Tab.3 Error equation constant term matrix

序号	值	序号	值
1	-0.002603	5	-0.008872
2	0.010906	6	0.012413
3	-0.005353	7	-0.008638
4	0.00033	8	0.001254

取射击过程中五组弹丸实测数据通过计算得到炸点实测坐标与实测坐标结果如表 4 所示。

表 4 实测数据与真值对比结果

Tab.4 Comparison of measured data and true values

序号	测量值/m			真值/m		
	X	Y	Z	X	Y	Z
1	3678.9	2557.3	215.2	3680.27	2554.21	212.37
2	3862.1	2621.6	220.4	3859.29	2624.21	223.17
3	3971.6	2891.2	219.6	3973.81	2894.37	221.76
4	3825.2	2951.2	214.1	3827.57	2954.15	212.85
5	3781.6	2775.8	223.8	3783.94	2772.62	221.41

通过对实测数据进行处理,测量值均方差为 $X:2.22\text{ m}, Y:3.0\text{ m}, Z:2.28\text{ m}$, 测量误差为 2.3244 m 。

5.3 误差分析

通过实验验证,本文所设计算法精度约为 2 m 。通过实验过程分析,系统误差主要由以下两方面导致:无人机飞行控制稳定性和人工提取误差。

本文所选大疆 8 旋翼无人机,其飞行状态跟踪精度为 0.1° ,在 1 km 高空时,其成像误差为:

$$L = \frac{2\pi}{360} R \times \alpha, \quad (9)$$

其中: R 为平台高度, α 为跟踪精度, L 为成像误差。带入计算可得,相机受平台跟踪精度影响误差为 1.7 m 。

人工提取误差受提取方法和图像压缩变形两方面影响。实际使用过程中,通过光学设备人工提取的是弹丸火焰质心点坐标,而实际真值为弹丸炸坑坐标。经过与大型光电经纬仪对比验证,人工提取误差约为 0.4 m ,对于精度要求不高的测试科目,该误差并不能作为主要误差源。

综上,通过实验数据验证,本算法能够满足在精度要求不高、但对设备布设时效性要求较强的装备作战实验地面炸点测量任务。

6 结 论

本文研制了自动指向摄像系统的高空拍摄装置,推导了弹丸地面落点的高精度测试坐标的获取方法,利用该方法实现了复杂地形条件下对多弹丸目标地面炸点脱靶量的快速测量,解决了无法利用共面差进行多目标分离的难题,将传统测量方法中最多只能处理 10 个弹丸的处理能力提高到只要空间分辨率大于 $3'$ 即可。本文测试方法虽然达不到传统大型光电经纬仪的测试精度,但其具有无需提前布站、能够伴随测量和测试速度快,可准实时提供测试数据,有效提高数据处理速度,缩短了数据处理周期,满足高机动武器装备实验测试过程中对数据处理精度和时效性的要求。

参 考 文 献:

- [1] MIAO L, QI H, RAMANATH R, *et al.* Binary tree-based generic demosaicking algorithm for multispectral filter arrays[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, 15(11): 3550-3558.
- [2] AGGARWAL H K, MAJUMDAR A. Compressive sensing multi-spectral demosaicing from single sensor architecture[C]. *Signal and Information Processing (ChinaSIP)*, 2014 IEEE China Summit & International Conference on. IEEE, 2014: 334-338.
- [3] 孙永明,吴谨,刘劲.基于 CS 测量矩阵优化的图像融合[J]. *液晶与显示*, 2014, 29(3): 461-465.
SUN Y M, WU J, LIU J. Image fusion based on CS measurement matrix optimization [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2014, 29(3): 461-465. (in Chinese)
- [4] 柯洪昌,孙宏彬.图像序列的显著性目标区域检测方法[J]. *中国光学*, 2015, 8(5): 768-774
KE H C, SUN H B. A saliency target area detection method of image sequence[J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(5): 768-774. (in Chinese)
- [5] 刘丹华,李平,高大化,李欢,石光明.基于压缩感知的正六边形 CFA 模式彩色图像去马赛克方法[J]. *光电子·激光*, 2015, 26(2): 360-367.
LIU D H, LI P, Gao D H, *et al.* Color demosaicing method based on regular hexagon CFA pattern and compressive sensing [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2015, 26(2): 360-367. (in Chinese)
- [6] MONNO Y, KIKUCHI S, TANAKA M, *et al.* A practical one-shot multispectral imaging system using a single

- image sensor[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2015, 24(10): 3048-3059.
- [7] 严洁, 阮友田, 薛珮瑶. 主被动光学图像融合技术研究[J]. 中国光学, 2015, 8(3): 378-385
YAN J, RUAN Y T, XUE P Y. Active and passive optical image fusion technology[J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(3): 378-385. (in Chinese)
- [8] DONOHO D L. Compressed sensing[J]. *IEEE Transactions on information theory*, 2006, 52(4): 1289-1306.
- [9] 王宇庆, 王索建. 红外与可见光融合图像的质量评价[J]. 中国光学, 2014, 7(3): 396-401
WANG Y Q, WANG S J. Quality assessment method of IR and visible fusion image[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(3): 396-401. (in Chinese)
- [10] MOHIMANI H, BABAIE-ZADEH M, JUTTEN C. A fast approach for overcomplete sparse decomposition based on smoothed norm[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2009, 57(1): 289-301.
- [11] YASUMA F, MITSUNAGA T, ISO D, *et al.* Generalized assorted pixel camera: postcapture control of resolution, dynamic range, and spectrum[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2010, 19(9): 2241-2253.
- [12] 闫敬文, 刘蕾, 屈小波. 压缩感知及应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2015.
YAN J W, Liu L, Qu X B. *Compressive Sensing and Its Application* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015. (in Chinese)
- [13] 赵瑞珍, 林婉娟, 李浩, 胡绍海. 基于光滑 L_0 范数和修正牛顿法的压缩感知重建算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2012, 24(4): 478-484.
ZHAO R Z, LIN W J, LI H, *et al.* Reconstruction algorithm for compressive sensing based on smoothed 0 norm [J]. *Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics*, 2012, 24(4): 478-484. (in Chinese)

作者简介:王永新(1970—),男,河北乐亭人,高级工程师,2000年于南京理工大学获得硕士学位,主要从事装备管理方面的研究。E-mail: 331799032@qq.com