

引用格式:徐义桂,陈维义.双无人机平台的舰炮脱靶量实时检测模型[J].电光与控制,2020,27(4):87-93,97. XU Y G, CHEN W Y. A real-time model for naval gun miss distance detection of dual UAV platform[J]. Electronics Optics & Control, 2020, 27(4): 87-93, 97.

## 双无人机平台的舰炮脱靶量实时检测模型

徐义桂, 陈维义

(海军工程大学,武汉 430033)

**摘要:**为了解决舰炮对海上目标射击脱靶量实时检测难的问题,改进舰炮对海射击观测和射击校正手段,提高舰炮实战化水平,在航空摄影测量学和无人机目标定位技术的基础上,通过构建目标、炸点及像点在成像空间中的几何关系模型,并利用最小二乘法,推导出了基于双无人机机载光电平台的目标和炸点同时定位的模型。再结合舰船经纬度信息,经高斯平均引数反算公式计算得到炸点与目标之间的脱靶量。最后利用蒙特卡罗法对脱靶量检测模型进行仿真,分析其误差特性。

**关键词:**双无人机;舰炮;脱靶量;最小二乘法;蒙特卡罗法

**中图分类号:** V279; E924.91 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2020.04.017

## A Real-Time Model for Naval Gun Miss Distance Detection of Dual UAV Platform

XU Yigui, CHEN Weiyi

(Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** The purpose of this paper is to solve the problem that the naval gun can't detect the miss distance of the marine target in real time, to improve the methods of the naval gun's shooting observation and shooting correction for marine targets, and to enhance the ability of the naval gun in real combat. Firstly, based on aerial photogrammetry and the UAV's target positioning technology, the dual UAV model for simultaneous positioning of targets and burst points on the photovoltaic platform is deduced by constructing the model of the geometric relationship between the target, the burst point and the image point in the imaging space and by using the least squares method. Secondly, considering the latitude and longitude information of the naval ship, the miss distance between the burst point and the target is calculated by using the Gaussian average quotation inversion formula. Finally, the miss distance detection model is simulated by using Monte Carlo method and its error characteristics are analyzed.

**Key words:** dual UAVs; naval gun; miss distance; least squares method; Monte Carlo method

### 0 引言

舰炮脱靶量是指舰炮武器系统射击过程中炸点与目标之间的偏差量,包括距离偏差量和方位角偏差量,是完成后续舰炮校射任务的关键参数之一。在现代水面舰艇舰炮武器系统执行对海射击任务过程中,由于对炸点海水柱的观测通常仅依赖于本舰雷达等观测设备,又常出现炸点海水柱测不到、测不准等问题,因此导致脱靶量检测困难,无法进行后续的舰炮校射。当

前,随着无人机技术的不断发展,借助于其携带的高精度机载光电平台,可以对海上目标进行实时侦察,具备实时性强、分辨率高、造价低、使用便利等优点,可用来解决上述问题。

目前,国内的一些学者也曾提出一些舰炮脱靶量的检测方法。毛昭军等<sup>[1]</sup>提出了基于DEM的无人机炸点偏差测量方法;聂凯等<sup>[2]</sup>提出同帧画幅的脱靶量单目摄影测量与计算方法;张辉等<sup>[3]</sup>提出了双台光电经纬仪的脱靶量测量方法;但是这些方法对舰炮脱靶量的检测存在着测量精度差、实时性差、效率低等问题。正是基于此,本文在航空摄影测量学和无人机目标定位技术的基础上,提出了一种借助于两台机载光电平台(分别直接固联在两架无人机上),运用最小二

收稿日期:2019-04-08

修回日期:2019-04-26

作者简介:徐义桂(1994—),男,江西南昌人,硕士生,研究方向为武器系统运用与保障工程。

乘法,解算目标和炸点空间位置进而计算得到炸目偏差量的算法,并利用蒙特卡罗模拟法进行仿真,分析模型的误差特性。

### 1 舰炮脱靶量检测系统构成和作战模式

#### 1.1 系统构成

脱靶量检测系统包括两架无人机、两台机载光电平台,其中机载光电平台由高清摄像机、电视跟踪器、角度传感器、GPS 定位系统和航姿测量系统等设备组成。本文将 GPS 定位系统与航姿测量系统安装在机载光电平台的水平基准面上,如图 1 所示。在执行脱靶量检测任务时,直接将机载光电平台通过减震器固联在无人机基座上即可,这样可有效减少机载光电平台对无人机的依赖,省略了与无人机进行姿态数据通讯、时钟同步对接、安装标校等繁琐的步骤,大大提高机载光电平台便携性。

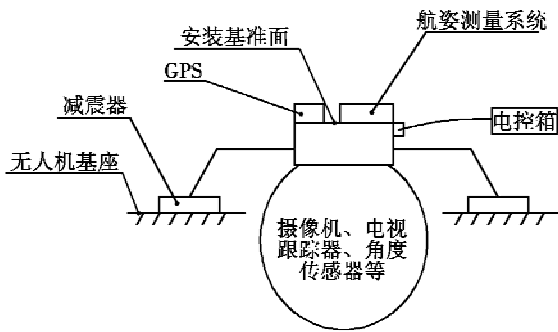


图 1 脱靶量检测系统构成

Fig.1 Composition of the miss distance detection system

#### 1.2 作战模式

两架携带着机载光电平台的无人机经舰艇编队释放后,前出至指定区域搜索,电视跟踪器将目标锁定在摄像机视场中心;通过融合摄像机转角数据、GPS 定位数据和航姿系统姿态数据后,经目标定位算法解算出目标的位置。而后通过一体化网络将目标位置信息回传至舰艇编队,舰艇编队通过决策优化、任务分配,指挥火力打击舰对目标进行火力打击。假若舰炮弹丸未命中目标,则在两台摄像机视场内炸点出现的瞬间,锁定该帧图像并输出像片信息;同时输出两台机载光电平台上的 GPS 定位数据、航姿系统测量数据以及摄像机转角数据,融合上述数据对炸点和目标同时进行定位;再结合火力打击舰的位置,计算出炸点相对于目标的距离偏差量和方位角偏差量。最后通过一体化网络将脱靶量数据传回至火力打击舰,作为舰炮进行校射的关键参数之一,如此循环直至目标毁伤,完成脱靶量检测任务后,两架无人机返航。作战模式如图 2 所示。

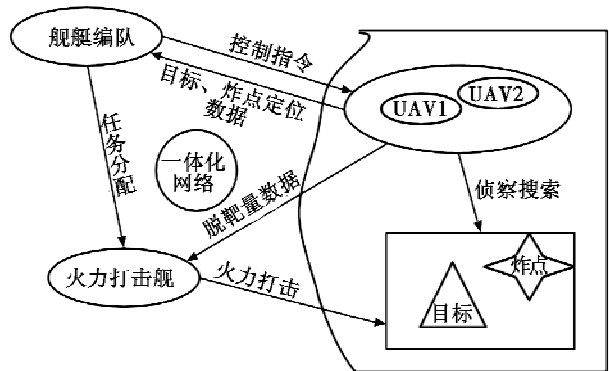


图 2 脱靶量检测系统作战模式

Fig.2 Combat mode of the miss distance detection system

### 2 脱靶量检测模型

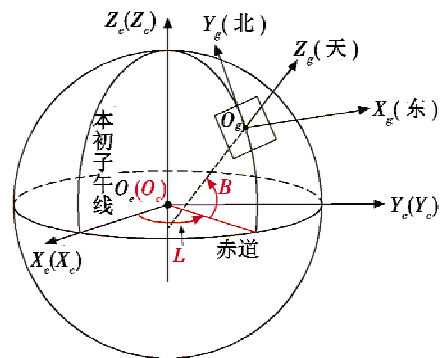
要借助无人机机载光电平台完成对舰炮脱靶量的实时检测任务,首要问题是解决无人机机载光电平台对目标和炸点的同时高精度定位问题,即经定位算法解算出目标和炸点经纬度位置后,利用高斯平均引数反算公式<sup>[4]</sup>分别求解炸点和目标距火力打击舰的距离和方位角,最后得到炸点与目标之间的距离偏差量和方位角偏差量。

#### 2.1 目标、炸点定位模型

各坐标系定义及其关系如图 3 所示<sup>[4-6]</sup>。各坐标系详细说明如下。

1) 大地坐标系  $C$ :采用 WGS-84 坐标系,以地球中心为原点  $O_c$ , $X_c$  轴从原点指向格林尼治子午圈与赤道的交点处, $Z_c$  轴与地球的纵轴重合并指向地球北极, $Y_c$  与  $X_cO_cZ_c$  面垂直,构成右手坐标系;在大地坐标系中任一点的坐标以纬度  $B$ 、经度  $L$  和高程  $H$  表示,如图 3(a)所示。

2) 大地直角坐标系  $E$ :与大地坐标系定义完全相同,但在大地直角坐标系中任一点的坐标以直角坐标表示,如图 3(a)所示。



(a) 大地坐标系

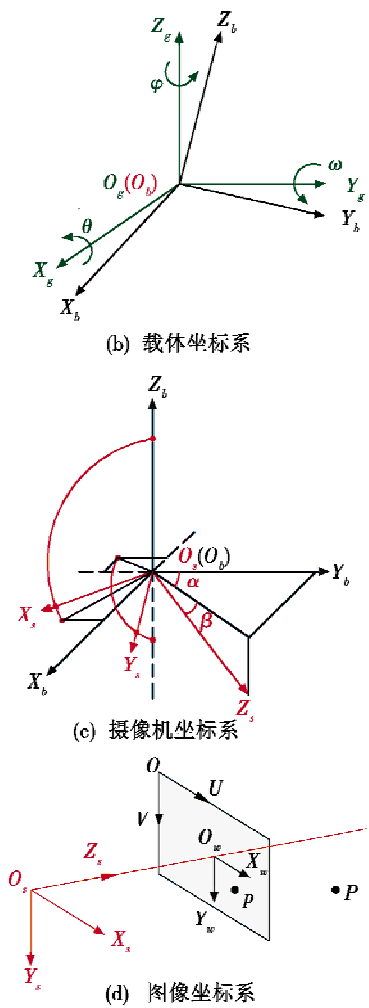


图3 各坐标系定义及其关系

Fig.3 Definition of 4 coordinate systems and their relationship

3) 载体地理坐标系  $G$ : 原点  $O_g$  是某一时刻 GPS 系统测量中心所处的位置,  $Y_g$  轴指向 GPS 所处当地水平面的正北方向,  $Z_g$  轴指向天顶,  $X_g$  轴垂直于  $X_g O_g Y_g$  面, 且三轴构成右手坐标系, 即为“东北天坐标系”, 如图 3(a) 所示。

4) 载体坐标系  $B$ : 载体坐标系原点  $O_b$  是某一时刻航姿测量系统的中心, 由于机载光电平台与无人机是直接固联在一起的, 所以定义  $Y_b$  轴与无人机机体的纵轴平行并指向机头方向,  $X_b$  轴与无人机机体的横轴平行指向右机翼方向,  $Z_b$  轴平行于无人机机体的竖轴指向上; 当载体坐标系相对载体地理坐标系的三轴姿态角为  $0^\circ$  时, 其三轴指向与载体地理坐标系三轴指向重合; 设偏航角 ( $\varphi$ )、横滚角 ( $\omega$ )、俯仰角 ( $\theta$ ) 分别为绕  $Z_b, Y_b, X_b$  轴旋转的转角, 如图 3(b) 所示。

5) 摄像机坐标系  $S$ : 原点  $O_s$  为摄像机的摄影中心,  $Z_s$  轴为摄像机光轴, 摄像机的  $X_s, Y_s$  轴的方向与图

像坐标系的  $X_u, Y_u$  轴方向一致; 当摄像机在初始位置时,  $Z_s$  轴指向载机机头,  $Y_s$  轴指向机体正下方,  $X_s$  轴指向载机右翼的方向, 三轴构成右手坐标系, 其中光轴旋转角为方位角  $\alpha$  和高低角  $\beta$ , 如图 3(c) 所示。

6) 图像坐标系  $W$ : 图像坐标系是以光轴与像平面的交点  $O_u$  (称为像主点) 为原点, 以实际物理尺度为单位 (一般为 mm) 的直角坐标系。其中,  $X_u, Y_u$  轴分别与像素坐标系的  $U, V$  轴方向一致, 如图 3(d) 所示。

7) 像素坐标系 ( $O-UV$ ): 以图像左上角  $O$  为原点, 并以像素为单位的直角坐标系。像素的横坐标  $U$  与纵坐标  $V$  分别是在其图像数组中所在列数与所在行数, 如图 3(d) 所示。

### 2.2 坐标转换过程<sup>[5,7-9]</sup>

1) 大地坐标系与大地直角坐标系间的坐标转换

$$\begin{cases} x_e = (N + H) \cos B \cos L \\ y_e = (N + H) \cos B \sin L \\ z_e = [N(1 - e^2) + H] \sin B \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} B = \arctan \frac{z_e + (e')^2 \cdot b \cdot \sin^3 U}{\sqrt{x_e^2 + y_e^2} - a \cdot e^2 \cdot \cos^3 U} \\ L = \arctan (y_e / x_e) \\ H = \frac{\sqrt{x_e^2 + y_e^2}}{\cos B} - N \end{cases} \quad (2)$$

式中: 纬度 ( $B$ )、经度 ( $L$ ) 和高度 ( $H$ ) 为目标或炸点在大地坐标系下坐标;  $t_e = (x_e \ y_e \ z_e)^T$  为目标或炸点在大地直角坐标系下的坐标;  $a, b$  为 WGS-84 椭球的长、短半轴;  $e, e'$  为 WGS-84 椭球的第一、二偏心率,  $N$  为 WGS-84 椭球卯酉圈曲率半径; 且  $U = \arctan(z_e a / (b \cdot \sqrt{x_e^2 + y_e^2}))$ 。

2) 大地直角坐标系到载体地理坐标系的坐标转换

$$t_g = \begin{pmatrix} x_g \\ y_g \\ z_g \end{pmatrix} = R_e^g \begin{pmatrix} x_e - x_0 \\ y_e - y_0 \\ z_e - z_0 \end{pmatrix} = R_e^g (t_e - t_0) \quad (3)$$

式中:  $t_g$  为目标或炸点在载体地理坐标系下的坐标;  $R_e^g$

$$\text{为转换矩阵, } R_e^g = \begin{pmatrix} -\sin L_0 & \cos L_0 & 0 \\ -\sin B_0 \cos L_0 & -\sin B_0 \sin L_0 \cos B_0 \\ \cos B_0 \cos L_0 & \cos B_0 \sin L_0 & \sin B_0 \end{pmatrix},$$

$B_0, L_0, H_0$  分别为某时刻无人机的纬度、经度、高度;  $t_0 = (x_0, y_0, z_0)^T$  为无人机在大地直角坐标系下的坐标值。

3) 载体地理坐标系到载体坐标系的坐标转换

$$t_b = (x_b \ y_b \ z_b)^T = R_g^b (x_g \ y_g \ z_g)^T = R_g^b \cdot t_g \quad (4)$$

式中:  $t_b$  为目标或炸点在载体坐标系下的坐标;  $R_g^b$  为

$$\text{转换矩阵, } \mathbf{R}_g^b = \begin{pmatrix} \cos \omega \cos \varphi & \cos \omega \sin \varphi & -\sin \omega \\ -\cos \theta \sin \varphi + \sin \theta \sin \omega \sin \varphi & \cos \theta \cos \varphi + \sin \theta \sin \omega \sin \varphi & \sin \theta \sin \omega \\ \sin \theta \sin \varphi + \cos \theta \sin \omega \sin \varphi & -\sin \theta \sin \varphi + \cos \theta \sin \omega \sin \varphi & \cos \theta \cos \omega \end{pmatrix}.$$

4) 载体坐标系到摄像机坐标系的坐标转换

$$\mathbf{t}_s = \begin{pmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{pmatrix} = \mathbf{R}_b^s \begin{pmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \end{pmatrix} = \mathbf{R}_b^s \cdot \mathbf{t}_b \quad (5)$$

式中:  $\mathbf{R}_b^s$  为转换矩阵,

$$\mathbf{R}_b^s = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha \sin \beta & \cos \alpha \sin \beta & -\cos \beta \\ \sin \alpha \cos \beta & \cos \alpha \cos \beta & \sin \beta \end{pmatrix}.$$

5) 摄像机坐标系与图像坐标系间的坐标关系

$$\begin{cases} x_{wp} = \frac{f}{z_{sp}} \\ x_{sp} = z_{sp} \\ y_{wp} = \frac{f}{z_{sp}} \\ y_{sp} = z_{sp} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $(x_{wp}, y_{wp})$  为像点  $p$  在图像坐标系下的坐标;  $(x_{sp}, y_{sp}, z_{sp})$  为物点  $P$  在摄像机坐标系下的坐标;  $f$  为摄像机的焦距。

6) 图像坐标系与像素坐标系间的转换为

$$\begin{cases} u - u_0 = x_{wp} / \Delta x \\ v - v_0 = y_{wp} / \Delta y \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $(u_0, v_0)$  为像主点在像素坐标系下的坐标;  $\Delta x, \Delta y$  为每个像素在  $X_w, Y_w$  轴方向上的物理尺寸。

7) 因此,根据式(3)~式(5)可得

$$\mathbf{t}_s = \mathbf{R}_b^s \cdot \mathbf{R}_g^b \cdot \mathbf{R}_e^s (\mathbf{t}_e - \mathbf{t}_0) \quad (8)$$

故若已知目标或炸点在摄像机坐标系下的坐标值  $\mathbf{t}_s$ , 经过式(8)的逆变换便可得到目标或炸点在大地直角坐标系下的坐标值  $\mathbf{t}_e$  为

$$\mathbf{t}_e = (\mathbf{R}_e^s)^{-1} \cdot (\mathbf{R}_g^b)^{-1} \cdot (\mathbf{R}_b^s)^{-1} \cdot \mathbf{t}_s + \mathbf{t}_0 \quad (9)$$

最后,再经过式(2)解算便可得到目标或炸点在大地坐标系下的经度、纬度和高度。

### 2.3 单台机载光电平台定位模型

由于两台机载光电平台各自对目标和炸点定位的过程是基本相同的,这里仅对其中一台机载光电平台对目标和炸点的定位模型进行推导。

图4为目标、炸点和像点的成像几何关系模型,  $T_1$  和  $T_2$  分别代表海平面和像平面。  $M$  点和  $P$  点分别代表在海平面  $T_1$  上的目标和炸点,它们的高程均为零。在平面  $T_2$  中,  $O_w - X_w - Y_w$  为像平面坐标系,  $m$  和  $p$  点分别是目标和炸点在像平面中的像点,由于目标始终锁定在摄像机视场中心,理论上目标的像点  $m$  与像平面中心  $O_w$  是重合的。

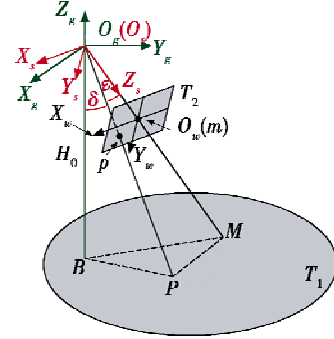


图4 目标、炸点和像点的成像几何关系模型

Fig. 4 Imaging geometric relationship model of target, burst point and image point

#### 2.3.1 目标点 $M$ 的定位

$\overline{O_s M}$  为摄像机镜头中心沿  $Z_s$  轴到目标点的距离, 由于舰炮对海上目标进行射击时,海面认定为水平面, 则  $\overline{O_s M} = \overline{O_s B} / \sin |\beta| = H_0 / \sin |\beta|$ , 其中,  $\overline{O_s B} = H_0$  为 GPS 测量的载体所在的高程。因此,目标在摄像机坐标系下坐标值为  $\mathbf{t}_{sM} = (0, 0, H_0 / \sin |\beta|)^T$ , 所以根据式(9)便可得目标在大地直角坐标系中的坐标  $\mathbf{t}_{eM}$  为

$$\mathbf{t}_{eM} = (\mathbf{R}_e^s)^{-1} \cdot (\mathbf{R}_g^b)^{-1} \cdot (\mathbf{R}_b^s)^{-1} \cdot \mathbf{t}_{sM} + \mathbf{t}_0 \quad (10)$$

#### 2.3.2 炸点 $P$ 的定位

设  $O_s P$  与  $O_s M$  的夹角为  $\epsilon$ , 则

$$\epsilon = \arccos \frac{f}{\sqrt{x_{wp}^2 + y_{wp}^2 + f^2}} \quad (11)$$

其中:  $(x_{wp}, y_{wp})$  和  $(x_{sp}, y_{sp}, f)$  分别为像点  $p$  在图像坐标系和摄像机坐标系中的坐标值;  $f$  为摄像机的焦距。

设  $O_s P$  与  $O_s B$  的夹角为  $\delta$ ;  $\mathbf{v}_s = (x_{wp}, y_{wp}, f)^T$  为摄像机坐标系中的向量;  $\mathbf{v}_g = (0 \ 0 \ -1)^T$  为载体地理坐标系中的向量。令  $\mathbf{v}_s$  在载体地理坐标系中表示为  $\mathbf{v}_{sg}$ , 有  $\mathbf{v}_{sg} = (\mathbf{R}_g^b)^{-1} \cdot (\mathbf{R}_b^s)^{-1} \cdot \mathbf{v}_s$ , 则

$$\delta = \arccos \frac{\mathbf{v}_{sg} \cdot \mathbf{v}_g}{\|\mathbf{v}_{sg}\| \cdot \|\mathbf{v}_g\|} \quad (12)$$

根据图4的几何关系可知

$$\frac{\overline{O_s P}}{\overline{O_s B}} = \frac{H_0}{\cos \delta} \quad (13)$$

则炸点  $P$  在摄像机坐标系中的  $Z_s$  轴坐标值为

$$z_{sp} = \overline{O_s P} \cdot \cos \epsilon = H_0 \cdot \cos \epsilon / \cos \delta \quad (14)$$

将式(11)代入式(14)可得

$$z_{sp} = \frac{H_0 \cdot f}{\cos \delta \cdot \sqrt{x_{wp}^2 + y_{wp}^2 + f^2}} \quad (15)$$

再将式(15)代入式(6)可得  $x_{sp}$  和  $y_{sp}$  为

$$\begin{cases} x_{sp} = \frac{x_{wp}}{f} \cdot z_{sp} = \frac{x_{wp} \cdot H_0}{\cos \delta \cdot \sqrt{x_{wp}^2 + y_{wp}^2 + f^2}} \\ y_{sp} = \frac{y_{wp}}{f} \cdot z_{sp} = \frac{y_{wp} \cdot H_0}{\cos \delta \cdot \sqrt{x_{wp}^2 + y_{wp}^2 + f^2}} \end{cases} \quad (16)$$

结合以上各式,即可计算出炸点在摄像机坐标系下的坐标值  $t_{sp} = (x_{sp} \ y_{sp} \ z_{sp})^T$ ,最后由式(9)转换可得炸点在大地直角坐标系中的坐标值  $t_{sp}$ 。

### 2.4 双台机载光电平台定位模型

在实际定位过程中,由于受摄像机镜头光学畸变及航姿测量系统、GPS 定位系统、角度传感器测量误差等因素的影响<sup>[9]</sup>,会使得摄像机对目标、炸点观测的实际摄像光线偏离其理想光线位置,产生细微的光线偏移,导致定位误差。特别是在对远距离目标观测时,这种偏差会更大。因此,本文在原单台机载光电平台对目标、炸点定位的基础上,使用双台机载光电平台,在不同位置同时对目标、炸点进行观测,并采用最小二乘法来解算目标、炸点的估计位置,以此来减少定位误差。图5是双台机载光电平台成像几何关系模型。

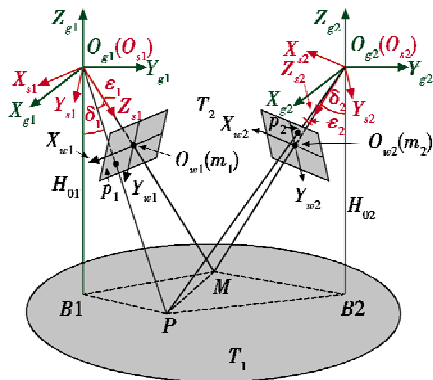


图5 双台机载光电平台成像几何关系模型  
Fig.5 Imaging geometric relationship model of dual airborne optoelectronic platforms

以双台机载光电平台对目标点  $M$  观测定位为进行分析。在大地直角坐标系下,两条观测直线理论上是空间相交关系,但是由于畸变及测量误差因素的存在,导致两条观测直线并不相交于一点,而是属于空间异面的关系,图6为目标点定位的摄像机观测直线偏差图,图中,  $M_1, M_2$  为两台摄像机对目标实际观测点,实线为实际观测直线(摄影中心到目标实际观测点的直线),  $M_0$  为目标估计点,虚线为理论观测线(即摄影中心到目标估计点的直线)<sup>[10-11]</sup>。

在实际对目标定位过程中,两台摄像机始终保持对目标的跟踪并将目标锁定在摄像机视场中心。为了方便表示,设两台机载光电平台各自所测得的参数

用下标  $i$  区分<sup>[12]</sup>,  $i=1,2$ 。在某一时刻,设 GPS 测得的无人机纬度、经度、高程分别为  $B_i, L_i, H_i$ ,无人机的偏航角、横滚角、俯仰角分别为  $\varphi_i, \omega_i, \theta_i$ ,摄像机的方位角、俯仰角分别为  $\alpha_i, \beta_i$ 。  $F_i$  为摄像机摄影中心到目标实际观测点的观测直线。由上文单台机载光电平台定位模型可解算得到大地直角坐标系下摄像机中心坐标为  $(x_i \ y_i \ z_i)^T$ ,目标实际观测点  $M_i$  的坐标为  $(x_{mi} \ y_{mi} \ z_{mi})^T$ 。目标估计点  $M_0$  到观测直线  $F_i$  的垂足  $C_i$  的坐标为  $(x_i^F \ y_i^F \ z_i^F)^T$ 。

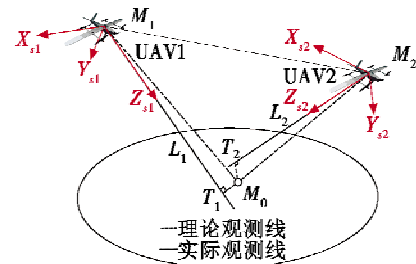


图6 目标点定位的摄像机观测直线偏差图  
Fig.6 Deviation map of camera observation line in target point positioning

由空间解析几何的知识可知,观测直线  $F_i$  的直线方程可表示为

$$\frac{x - x_i}{l_i} = \frac{y - y_i}{m_i} = \frac{z - z_i}{n_i} \quad (17)$$

式中:  $l_i = x_i - x_{mi}$ ;  $m_i = y_i - y_{mi}$ ;  $n_i = z_i - z_{mi}$ 。

最小二乘法的基本思想是<sup>[13]</sup>:在大地直角坐标系下,在两观测直线之间取一目标估计点  $M_0$ ,使得目标估计点  $M_0$  到两条实际观测线的距离和最小,则  $M_0$  为估算得到的目标点。

由空间解析几何知识,可知距离和的计算式为

$$D = \sqrt{\sum_{i=1}^2 [(x_{M_0} - x_i^F)^2 + (y_{M_0} - y_i^F)^2 + (z_{M_0} - z_i^F)^2]} \quad (18)$$

根据观测直线的方程式(17)可以求得垂足点  $C_i$  在大地直角坐标系下的坐标值,即

$$\begin{cases} x_i^F = x_i + \frac{l_i}{l_i^2 + m_i^2 + n_i^2} [l_i(x_{M_0} - x_i) + m_i(y_{M_0} - y_i) + n_i(z_{M_0} - z_i)] \\ y_i^F = y_i + \frac{m_i}{l_i^2 + m_i^2 + n_i^2} [l_i(x_{M_0} - x_i) + m_i(y_{M_0} - y_i) + n_i(z_{M_0} - z_i)] \\ z_i^F = z_i + \frac{n_i}{l_i^2 + m_i^2 + n_i^2} [l_i(x_{M_0} - x_i) + m_i(y_{M_0} - y_i) + n_i(z_{M_0} - z_i)] \end{cases} \quad (19)$$

并可根据最小二乘原理,将  $D$  分别对  $x_{M_0}, y_{M_0}, z_{M_0}$  求偏导数,且令其值为0,可得

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^2 \left[ \left(1 - \frac{l_i^2}{l_i^2 + m_i^2 + n_i^2}\right)(x_{M_0} - x_i) - \frac{l_i m_i}{l_i^2 + m_i^2 + n_i^2}(y_{M_0} - y_i) - \frac{l_i n_i}{l_i^2 + m_i^2 + n_i^2}(z_{M_0} - z_i) \right] = 0 \\ \sum_{i=1}^2 \left[ \left(-\frac{l_i m_i}{l_i^2 + m_i^2 + n_i^2}\right)(x_{M_0} - x_i) + \left(1 - \frac{m_i^2}{l_i^2 + m_i^2 + n_i^2}\right)(y_{M_0} - y_i) - \frac{m_i n_i}{l_i^2 + m_i^2 + n_i^2}(z_{M_0} - z_i) \right] = 0 \\ \sum_{i=1}^2 \left[ \left(-\frac{l_i n_i}{l_i^2 + m_i^2 + n_i^2}\right)(x_{M_0} - x_i) - \frac{m_i n_i}{l_i^2 + m_i^2 + n_i^2}(y_{M_0} - y_i) + \left(1 - \frac{n_i^2}{l_i^2 + m_i^2 + n_i^2}\right)(z_{M_0} - z_i) \right] = 0 \end{cases} \quad (20)$$

通过对式(20)的整理可得关于  $x_M, y_M, z_M$  的线性方程组  $\mathbf{AX} = \mathbf{B}$ ,  $\mathbf{A}$  为系数矩阵,  $\mathbf{B}$  为常数矩阵, 即

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^2 \left(1 - \frac{l_i^2}{l_i^2 + m_i^2 + n_i^2}\right) & -\sum_{i=1}^2 \frac{l_i m_i}{l_i^2 + m_i^2 + n_i^2} & -\sum_{i=1}^2 \frac{l_i n_i}{l_i^2 + m_i^2 + n_i^2} \\ -\sum_{i=1}^2 \frac{l_i m_i}{l_i^2 + m_i^2 + n_i^2} & \sum_{i=1}^2 \left(1 - \frac{m_i^2}{l_i^2 + m_i^2 + n_i^2}\right) & -\sum_{i=1}^2 \frac{m_i n_i}{l_i^2 + m_i^2 + n_i^2} \\ -\sum_{i=1}^2 \frac{l_i n_i}{l_i^2 + m_i^2 + n_i^2} & -\sum_{i=1}^2 \frac{m_i n_i}{l_i^2 + m_i^2 + n_i^2} & \sum_{i=1}^2 \left(1 - \frac{n_i^2}{l_i^2 + m_i^2 + n_i^2}\right) \end{pmatrix} \quad (21)$$

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^2 \left[ \left(1 - \frac{l_i^2}{l_i^2 + m_i^2 + n_i^2}\right)x_i - \frac{l_i m_i}{l_i^2 + m_i^2 + n_i^2}y_i - \frac{l_i n_i}{l_i^2 + m_i^2 + n_i^2}z_i \right] \\ \sum_{i=1}^2 \left[ -\frac{l_i m_i}{l_i^2 + m_i^2 + n_i^2}x_i + \left(1 - \frac{m_i^2}{l_i^2 + m_i^2 + n_i^2}\right)y_i - \frac{m_i n_i}{l_i^2 + m_i^2 + n_i^2}z_i \right] \\ \sum_{i=1}^2 \left[ -\frac{l_i n_i}{l_i^2 + m_i^2 + n_i^2}x_i - \frac{m_i n_i}{l_i^2 + m_i^2 + n_i^2}y_i + \left(1 - \frac{n_i^2}{l_i^2 + m_i^2 + n_i^2}\right)z_i \right] \end{pmatrix} \quad (22)$$

因为上述方程的系数矩阵  $\mathbf{A}$  为非奇异矩阵, 故线性方程组  $\mathbf{AX} = \mathbf{B}$  有唯一解, 即

$$\mathbf{X} = (x_{M_0} \ y_{M_0} \ z_{M_0})^T = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{B} \quad (23)$$

且系数矩阵  $\mathbf{A}$  和常数矩阵  $\mathbf{B}$  都是已知值, 因此, 根据上述几个算式可以求解出目标估计点  $M_0$  在大地直角坐标系下的坐标值。

同理可求得在大地直角坐标系下炸点估计点  $P_0 = (x_{P_0} \ y_{P_0} \ z_{P_0})^T$ 。最后通过坐标转换得到它们在大地坐标系下的坐标。

## 2.5 脱靶量的测量模型

根据上文所述可求得的目标估计点  $M_0$ 、炸点估计点  $P_0$  在大地坐标系下的坐标, 同时火力打击舰的  $(B_h \ L_h)^T$  可由自身的定位导航系统测得<sup>[14]</sup>。图7所示为脱靶量测量图,  $O_g - X_g Y_g Z_g$  和  $O - XYZ$  分别为载体地理坐标系和舰船地理坐标系,  $OXY$  为海平面。目标估计点、炸点估计点、火力打击舰在海平面上, 所以它们的高程均为零。由其三者的经纬度, 根据高斯平均引数反算公式<sup>[4]</sup>, 可计算出炸点估计点、目标估计点分别相对于火力打击舰的距离  $d$  和方位角  $\rho$ 。设目标估计点相对于与火力打击舰的距离为  $\overline{OM_0} = d_1$ 、方位角为  $\angle YOM_0 = \rho_1$ , 炸点估计点相对于火力打击舰的距离为  $\overline{OP_0} = d_2$ 、方位角为  $\angle YOP_0 = \rho_2$ , 炸目之间的距离偏差量  $\overline{P_0 M_0} = \Delta d$ , 方位角偏差量  $\angle P_0 O M_0 = \Delta \rho = \angle YOP_0 - \angle YOM_0$ 。则舰炮射击的距离偏差量  $\Delta d$ 、方位角偏差量  $\Delta \rho$  为

$$(\Delta d \ \Delta \rho)^T = (d_2 \ \rho_2)^T - (d_1 \ \rho_1)^T \quad (24)$$

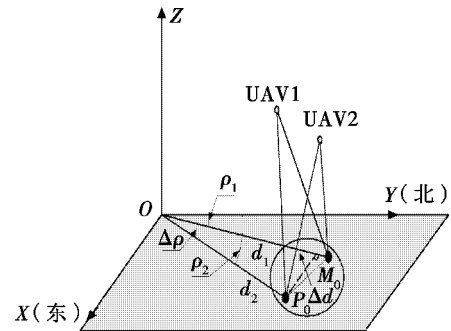


图7 脱靶量测量图

Fig.7 Miss-distance measurement chart

当  $\Delta d = 0 \text{ m}$ ,  $\Delta \rho = 0^\circ$  时, 舰炮准确命中目标; 当  $\Delta d \neq 0 \text{ m}$ ,  $\Delta \rho \neq 0^\circ$  时, 舰炮未命中目标, 根据距离偏差量和方位角偏差量的数值, 再结合舰炮武器系统射表, 校正射击诸元, 完成后续的舰炮校射任务。

## 3 脱靶量误差仿真实验与分析

### 3.1 蒙特卡罗法

蒙特卡罗法即随机模拟方法, 其基本思想是通过对随机变量的模拟, 对模拟结果进行统计学计算分析, 最终求得问题数值解的估计值, 它利用计算机产生的符合要求的随机数来代替现实难以获取的数据, 从而解决所研究的问题<sup>[15]</sup>。在实际利用机载光电对舰炮的脱靶量检测过程中, 涉及诸多物理测量参数, 这些物理参数在

实际测量过程中存在测量误差,如:角度传感器测量误差,航姿系统测量误差,GPS 测量误差,以及像片中的像点坐标测量误差等。由概率论知识可知,这些测量误差基本服从正态分布或近似服从正态分布,因此可假设参数测量误差  $\Delta x$  服从的分布为  $\Delta x \sim N(0, \sigma)$ 。

故可利用蒙特卡罗法建立误差传递模型为

$$\Delta Y = G(x_1 + \Delta x_1, \dots, x_n + \Delta x_n) - G(x_1, \dots, x_n) \quad (25)$$

式中:  $x_i$  为各参数的名义值;  $\Delta x_i$  为各参数的测量误差;  $G$  为相关模型计算过程。

### 3.2 仿真实验及结果分析

为了分析本文脱靶量检测模型的误差特性,选取某次舰炮实弹对海上静止目标射击训练中的一组无人机飞行数据作为蒙特卡罗法仿真的名义值,然后根据各传感器设备技术手册上提供的最大标定误差作为模拟过程中各测量误差的标准差值  $\sigma$ ,并设计了蒙特卡罗模拟仿真程序,具体步骤如下:

1) 在 Matlab 软件中输入各个测量参数的名义值,并解算无误差时脱靶量的结果;

2) 利用 `normrnd()` 函数产生服从正态分布的随机误差序列,且此随机误差序列长度为 2000,均值为 0,标准差为  $\sigma$ ;

3) 利用蒙特卡罗模拟法进行仿真,解算附加随机误差后的脱靶量结果;

4) 计算附加随机误差前后的脱靶量结果的误差值;

5) 对输出的脱靶量误差值进行统计与分析。

运用蒙特卡罗法仿真程序进行 2000 次解算得到 2000 组舰炮脱靶量误差数据,如图 8 所示。

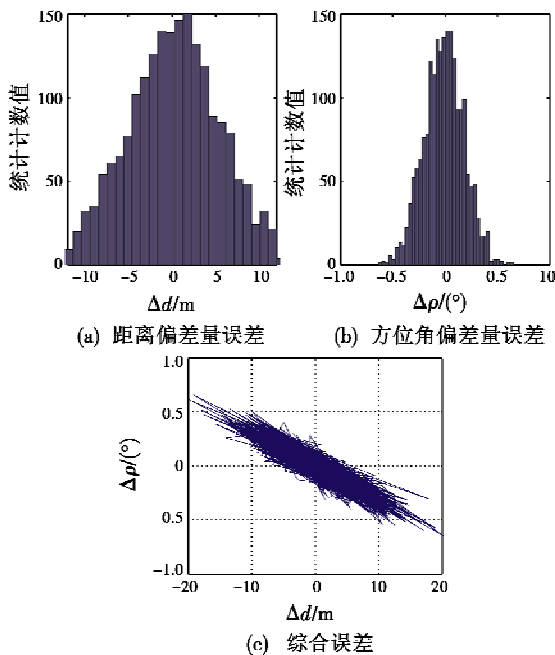


图 8 脱靶量误差仿真结果

Fig. 8 The simulation result of miss-distance error

从图 8 中可以看出,距离偏差量误差和方位角偏差量误差的分布均近似服从  $\mu = 0$  的正态分布。在测量参数存在测量误差的情况下,本模型可以完成对舰炮脱靶量的检测。表 1 所示为脱靶量模型检测精度。

表 1 脱靶量模型检测精度

Table 1 The accuracy of miss-distance detection

脱靶量误差	标准差
$\Delta d/m$	5.5357
$\Delta \rho/(\circ)$	0.1871

## 4 结论

为了解决舰炮对海上目标射击脱靶量实时检测难的问题,改进舰炮对海射击观测和射击校正手段,创新舰炮实弹射击考核保障手段。本文结合当前机载光电平台和无人机的作战特性,并在无人机目标定位技术和航空摄影测量学的基础上,提出了一种新的舰炮脱靶量检测作战模式并推导出了一种新的舰炮脱靶量检测方法,为舰炮后续校射提供依据,可有效提高舰实战化水平和作战效能。

## 参考文献

- [1] 毛昭军,汪德虎. 基于 DEM 的无人机炸点偏差测量模型[J]. 火力与指挥控制,2004,29(2):39-42.
- [2] 聂凯,魏超,曾科军. 同帧画面的脱靶量单目摄像测量与计算[J]. 现代防御技术,2018,46(2):88-92.
- [3] 张辉,阳平,毕立财. 基于双目视觉的脱靶量测量系统设计及其精度分析[J]. 计算机与数字工程,2016,44(12):2348-2352.
- [4] 孔祥元,郭际明,刘宗泉. 大地测量学基础[M]. 武汉:武汉大学出版社,2010.
- [5] 徐诚,黄大庆. 基于光电测量平台的多目标定位算法[J]. 中南大学学报:自然科学版,2015,46(1):157-163.
- [6] 邵慧. 无人机高精度目标定位技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2014.
- [7] 王成飞,吴鹏飞,石章松. 一种应用于对岸火力支援的无人机目标定位技术研究[J]. 舰船电子工程,2017,37(11):52-56,91.
- [8] 黄亮,刘忠,李剑辉,等. 空中机动平台光电载荷无源定位算法及坐标变换分析[J]. 海军工程大学学报,2009,21(6):36-40.
- [9] 林君建,苍桂华. 摄影测量学[M]. 北京:国防工业出版社,2006.
- [10] 左羽佳,白冠冰,刘晶红,等. 基于机载光电平台的双机交会定位方法[J]. 光子学报,2017,46(9):146-156.

对于实时性,很显然,常规 Kalman 滤波算法略优于自适应滤波算法,这是因为自适应滤波算法在每次滤波过程中都要估计系统噪声统计特性。对于鲁棒性和容错性,自适应滤波算法远优于常规 Kalman 滤波算法,尤其是在异常状态下的鲁棒性更为突出。综上分析,单个性能指标不能准确评估滤波算法品质。

2) 按 2.3 节的方法,确定最佳投影方向  $w^* = [0.6040 \ 0.4607 \ 0.5302 \ 0.3607]$ 。

3) 根据式(8),得到 2 种滤波算法在正常和异常状态下的综合评价值  $z = [1.5674 \ 1.1209 \ 1.9476 \ 1.8946]$ 。从评价可知,2 种算法在 2 种状态下的算法品质排序为  $3 > 4 > 1 > 2$ 。当选取滤波精度、实时性、鲁棒性和容错性作为性能指标时,自适应滤波算法的综合评价价值要高于常规 Kalman 滤波算法,该结论与理论分析是一致的,主要是因为自适应滤波算法是在常规 Kalman 滤波算法的基础上发展起来的,它具有更强的适应性与最优的滤波性能;同时,自适应滤波算法在正常和异常状态下评价价值分别为 1.9476 和 1.8946,相差很小,这也再次表明该算法具有良好的适应性。而常规 Kalman 滤波算法在正常状态下和异常状态下评价价值分别为 1.5674 和 1.1209,相差较大,这是因为常规 Kalman 滤波算法本身容错性、鲁棒性较差。

#### 4 结论

近年来,在常规 Kalman 滤波算法的基础上涌现出诸如扩展 Kalman 滤波、粒子滤波、无迹采样 Kalman 滤波和自适应滤波等组合导航滤波算法,而这些滤波算法本身都有各自的优点和适用条件,如何对这些算法的品质进行合理、准确的评估已成为一个新的研究方向。本文基于投影寻踪理论,综合考虑滤波精度、实时性、鲁棒性和容错性等性能指标对滤波算法品质的影

响,提出了多性能指标融合的滤波算法品质评估方法。通过对常规 Kalman 滤波算法和自适应滤波算法的评估实验分析可知,本文算法在理论上更具有可信度,滤波算法品质评估结果更加准确、客观、可信,因此可以作为滤波算法品质评估的定量依据。

#### 参考文献

- [1] XU J S, LU X C, WU H T, et al. Application of data fusion in multi-sensor integrated navigation system [C]//The 3rd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 2008:1123-1127.
- [2] 王旺,赵海军,姜暖. 导航信息处理中滤波算法稳定性评估方法[J]. 指挥控制与仿真,2018,40(1):62-66.
- [3] 唐鹏. 测速测角组合自主导航性能评估研究[D]. 成都:电子科技大学,2016.
- [4] 杨阳,刘建娟,刘楠,等. 组合导航滤波算法性能评估方法研究[J]. 信息通信,2017(9):32-33.
- [5] 张召友,郝燕玲,张鑫. Sigma 点 Kalman 滤波在惯性导航初始对准中的性能评估[J]. 中国惯性技术学报,2010,18(6):639-644.
- [6] 杨阳. 组合导航滤波算法设计及其性能评估方法研究[D]. 郑州:河南工业大学,2018.
- [7] 李元锋,李正生,王洋. 基于模糊综合评判的多指标匹配算法性能评估[J]. 光电工程,2010,37(8):92-97.
- [8] 秦永元,张洪钺,汪叔华. 卡尔曼滤波与组合导航原理[M]. 2 版. 西安:西北工业大学出版社,2012.
- [9] 赵欣,王跃钢,王仕成,等. 一种组合导航信息融合算法品质评估方法[J]. 中国惯性技术学报,2012,20(2):211-219.
- [10] 付强,赵小勇. 投影寻踪模型原理及其应用[M]. 北京:科学出版社,2006.
- [11] HOSSEINPOOR H R, SAMADZADEGAN F, DADRAS-JAVAN F. Precise target geolocation and tracking based on UAV video imagery [C]//The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2016:243-249.
- [12] 孙辉,李志强,张建华,等. 机载光电平台目标交会定位[J]. 中国光学,2015,8(6):988-996.
- [13] SHARMA R, YODER J, KWON H, et al. Vision based mobile target geo-localization and target discrimination using Bayes detection theory [C]//The 11th International Symposium of Distributed Autonomous Robotic Systems, 2014:59-71.
- [14] 戴耀,汪德虎,胡江. 无人机保障舰炮对岸射击校射诸元模型[J]. 火力与指挥控制,2008,33(5):42-44.
- [15] 康崇禄. 蒙特卡罗方法理论和应用[M]. 北京:科学出版社,2015.

(上接第 93 页)