

文章编号 2095-1531(2015)01-0130-09

## 动态像面法测量水面落点位置及误差分析

贺秀娟<sup>1,2</sup>, 乔彦峰<sup>1\*</sup>, 王成龙<sup>1</sup>

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

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**为了测量弹丸水面落点的位置,建立了基于 CCD 相机动态像面的测量模型。该模型通过 CCD 相机辅助采集相关点位的图像信息,对水面落点的位置函数以及误差进行了研究。首先,利用空间几何获得靶船上三定点相对于测量船的方位、俯仰信息。接着,结合  $t$  时刻观测图像上定点的像面坐标,运用底片常数模型建立像面坐标和角度信息两套参量之间的关系函数,从而得到目标落点的方位、俯仰信息,再利用异面交合法计算出目标落点位置。最后,分析了目标落点位置的误差来源(质心误差,位置误差)、误差以及各误差源与位置坐标之间的关系。实验结果表明:在测量船位置精度达到 0.05 m,图像质心定位精度达到 0.5 pixel 时,在最小交会误差的情况下,目标落点的位置测量误差分别为 2.8, 4.9, 4.3 m。

**关键词:**水面落点位置;像面坐标;关系函数;测量误差

**中图分类号:** TJ06; TH745 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/CO.20150801.0130

## Measurement of the location of projectile burst on water surface by dynamic image method and its error analysis

HE Xiu-juan<sup>1,2</sup>, QIAO Yan-feng<sup>1\*</sup>, WANG Cheng-long<sup>1</sup>

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*

*Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

*\* Corresponding author, E-mail: qiaoyf@ciomp.ac.cn*

**Abstract:** In order to measure the value of projectile points on the water surface accurately, a model of dynamic images measurement based on CCD camera is established. The function of the value of the surface point and its measuring error are analyzed by using the collected images information of the relative points taken by CCD camera secondarily. First, with the knowledge of spatial geometry, the azimuth and the elevation angles of three designated points on the target ship relative to the measuring ship are obtained. Then, combined with image coordinates of the specified points at  $t$  point, the relationship function of two sets of parameters between the image plane coordinate and angle information is presented by taking the constant model, so the azimuth and the elevation angles information of the projectile point is obtained. The function of three-dimensional projectile burst coordinates is presented by non-coplanar intersection method. Finally, the coordinate's errors from the evaluation of the pinpoint of the image and the location measurement accuracy are discussed and the rela-

收稿日期:2014-10-19;修订日期:2014-12-20

基金项目:吉林省自然科学基金资助项目(No. 201115124)

relationship is investigated. Experimental results indicate that the three-dimensional projectile burst coordinate's measuring error are 2.8, 4.9, 4.3 m, respectively, in the condition of the minimum intersection error, when the position accuracy is up to 0.05 m and the image pinpoint accuracy to be able to 0.5 pixel.

**Key words:** location of projectile points; image coordinates; relationship function; measuring error

## 1 引 言

弹丸落点,即相对于被击目标的炸点位置,是弹丸破片毁伤效能分析和弹丸改进研制以及打击点方位时速设置的重要分析依据。随着军事演习乃至军事活动范围增大,弹丸水面落点的测量越来越成为保证水面打击准确度的前提。对弹丸着靶坐标测量一般可利用光学和声学测量的方法进行。传统的光幕靶测量和声靶测量等都有各自的缺陷,例如高速摄像法采用多个高速摄像机交汇的方法进行测量,其成本比较高,声靶结构大,对水面特定目标环境测试不仅存在着布置困难,而且水面环境的不稳定造成误差大,最终仅获得火炮方向的两维坐标<sup>[1]</sup>。对于船载经纬仪交会测量,由于风浪、潮汐等洋流不规则的影响,使船舶平台的姿态和形体发生变化,船体的位置也不如陆基测量站稳定并且对设备自身精度指标的要求较高,其测量过程在动态环境下进行,设备自身的位置、姿态在不断地变化,布置成本昂贵并且精度不高<sup>[2-3]</sup>,虽然有很多文献提出了对测量结果进行误差修正,但是在实际工程中的实现度并不是很理想。弹丸落点在水面的特殊情况造成无法直接定位测量。为解决水面弹着点测量困难的问题,孙朝江等学者提出了双 CCD 交汇测量的方法,利用两个线阵 CCD 探测器实现对舰炮武器水面落点的测量,实现技术难度较小,方法简单,但是存在需要解决 CCD 固定的问题,同时还要防止水浪的侵袭等<sup>[4]</sup>。类似的火箭助飞鱼雷海上落点是由矢量水听器的被动测量系统完成的,主要是利用布设的携带有矢量水听器的浮标,完成入水击水声的方位估计,但预设浮标布阵会出现海上走锚、通信不畅、性能下降,导致测量的可靠性和精度严重下降<sup>[5]</sup>。

本文采用结合每时刻相机采集的靶标船上任意三定点以及目标的图像,提取  $t$  时刻定点像面

坐标和由空间坐标关系算出的对应点的姿态信息间的关系传递函数,推算出目标落点图像坐标到方位、俯仰角的映射关系,得出目标落点相对于两测量船的姿态信息,最终利用异面交会算法估算出水面落点的空间三维坐标。方法的关键是通过定点质心来确定其图像坐标,并建立两套参系统的关系传递函数,最后通过合理选择(对交会结果影响最小)测量船布站方案确定落点的空间坐标。实验数据显示,本文提出的方法能够在大地误差、质心误差存在以及交会误差最小的情况下,使目标水面落点位置的确定达到较为理想的精度。

该方法选取地心坐标系为标准坐标系,结合 CCD 动态采集的图像信息建立的关系函数模型,不但有效地避免了水面落点特殊环境存在的抖动误差和由于地球模型的理想化造成的地球模型误差和坐标转换误差以及 CCD 相机本身的视场畸变,而且从另一个角度提出了弹丸落点的坐标测量,为以后使用更先进,在特殊环境下的落点测量方法,得到更高精度的位置信息提供了新思路。

## 2 测量原理

### 2.1 动态像面原理

图 1 为水面整体测量示意图。它由打击点、靶标和两测量船(测量船上有连续变焦镜头的 CCD 相机)等组成。利用卫星导航系统 GPS 测得船上任意三定点  $A$ 、 $B$ 、 $C$  和两测量船  $Q$ 、 $Q'$  的大地坐标(大地测量中以参考椭球面为基准面建立起来的坐标系,地面点的位置用大地纬度、大地经度、大地高度表示),分别对应  $(B_i, L_i, H_i)$ ,  $i = 0, 1, 2$ 、 $(B, L, H)$  和  $(B', L', H')$ , 利用大地坐标和地心直角坐标系之间的换算关系<sup>[6-7]</sup>, 算出在地心直角坐标系下  $A$ 、 $B$ 、 $C$  三点的坐标  $(x_i, y_i, z_i)$ ,  $i = 0, 1, 2$  及  $Q$ 、 $Q'$  的坐标  $(x_q, y_q, z_q)$ 、 $(x'_q, y'_q, z'_q)$ 。关系式为:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (N + H) \cos B \cos L \\ (N + H) \cos B \sin L \\ [N(1 - e^2) + H] \sin B \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中:  $N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}} = PK_p$  为卯酉圈的曲率半径,

$e = \sqrt{\frac{a^2 - b^2}{a^2}}$  为子午椭圆的第一偏心率,  $a, b$  分

别为椭球体的长短半径。

在地心坐标系下, 利用空间几何求出任意定点  $A, B, C$  分别对于测量船  $Q, Q'$  的俯仰、方位角度信息  $A_i, E_i$ 。对于测量船  $Q$ :

$$\begin{cases} A_i = \arctan \frac{z_i - z_q}{x_i - x_q} \\ E_i = \arctan \frac{y_i - y_q}{\sqrt{(z_i - z_q)^2 + (x_i - x_q)^2}} \end{cases}, \quad (2)$$

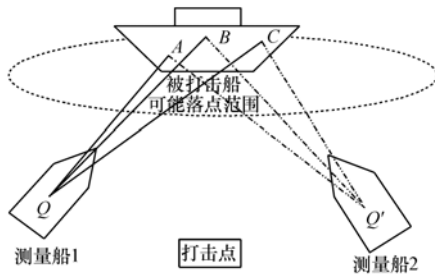


图 1 水面整体测量示意图

Fig. 1 Schematic diagram of overall measuring system of water surface

式中,  $i = 0, 1, 2$ 。同理对于测量船  $Q'$  有方位和俯仰角  $A'_i$  和  $E'_i$ 。

本文利用 CCD 相机建立靶船上定点角度信息和对应点在 CCD 图像上的坐标间的关系函数, 这样可以有效修正相机镜头畸变等造成的误差<sup>[8]</sup>。用于拍摄定点和落点的 CCD 相机阵面由整齐排列、大小相同的像元组成, 构成了二维靶面直角坐标系。定点和目标落点成像在相邻的几个乃至几十个像元上, 其像面坐标可由像点质心确定, 以像元为单位。

由于 CCD 测量都是从片子的一个角为起点直接读数, 为了计算方便, 假设一个近似光心坐标为  $(512, 512)$  (若选取  $1024 \times 1024$  像元数的片子), 从而所有的像面坐标值都是直接读数减去光心位置的数值。由于 CCD 相机观测视场很小,

视场畸变和像差的影响甚微, 为了把像面坐标  $(X, Y)$  和角度坐标  $(A, E)$  联系起来, 本文只考虑两坐标系的原点和坐标轴指向, 以及两坐标轴的比例尺的不同, 可以用简单的线性关系底片常数模型建立变换关系。图 2 为角度坐标和图像坐标的几何关系。

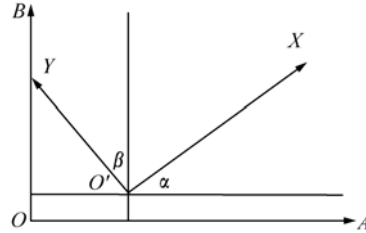


图 2 角度坐标和图像坐标的几何关系

Fig. 2 Geometrical relationship between angular coordinates and image coordinates

由图 2 可知, 角度坐标  $O-AE$  的  $A$  轴与  $E$  轴分别和图像坐标  $O'-XY$  的  $X$  轴和  $Y$  轴夹角为  $\alpha, \beta$ 。由于  $X$  轴可能不垂直于  $Y$  轴导致可能  $\alpha$  不等于  $\beta$ 。现假设在图像坐标系中  $X, Y$  轴的比例尺分别为  $R_x, R_y$ , 且  $O'$  在角度坐标系下的坐标为  $(a, d)$ , 并且某一定点的图像坐标为  $(X, Y)$ , 那么对应的角度坐标为:

$$\begin{cases} A = a + XR_x \cos \alpha - YR_y \sin \beta \\ E = d + XR_x \sin \alpha + YR_y \cos \beta \end{cases}. \quad (3)$$

设  $R_x \cos \alpha = b, -R_y \sin \beta = c, R_x \sin \alpha = e, R_y \cos \beta = f$ , 则有:

$$\begin{cases} A = a + bX + cY \\ E = d + eX + fY \end{cases}. \quad (4)$$

若假定图像坐标中  $X$  轴经修正后严格地垂直于  $Y$  轴 ( $\alpha = \beta$ ) 两坐标的比例尺相同  $R_x = R_y$ , 则上式可以化简为:

$$\begin{cases} A = a + bX + cY \\ E = d - cX + bY \end{cases}, \quad (5)$$

此时,  $R_x \cos \alpha = R_y \cos \beta = b, R_y \sin \beta = R_x \sin \alpha = -c$ 。

这就是两套参系统的关系传递函数, 也就是由定点  $(X_i, Y_i, A_i, E_i) i = 0, 1, 2$  解算底片常数  $a, b, c, d$  的过程。对于测量船  $Q$  把  $A, B$  两定点分别对应的  $(X_0, Y_0, A_0, E_0)$  和  $(X_1, Y_1, A_1, E_1)$  代入上式, 求得  $a, b, c, d$  的值。进而根据目标落点  $M$  的图像坐标  $(X_m, Y_m)$  可以求得对于测量船  $Q$  的方

位、俯仰角度信息(A, E), 同理求出测量船 Q' 处 M 落点的(A', E')。

### 2.2 异面交会算法分析

在用两传感器进行交会测量的过程中由于传感器本身的结构差异、成像原理、时间同步和目标差异, 加上外部工作环境的作用, 两测量船上的传感器观测同一目标时两光轴并不会相交, 而是两条空间异面直线<sup>[9]</sup>。利用异面交会算法(用两测量船与目标落点异面光轴的中垂线段估计落点位置), 标算出 M 的空间坐标信息。两测量船相应于目标落点的光轴的方向向量分别为:  $\mathbf{v}_q = (m_q, n_q, p_q) = (\cos E \cos A, \sin E, \cos E \sin A)$  和  $\mathbf{V}'_q = (m'_q, n'_q, p'_q) = (\cos E' \cos A', \sin E', \cos E' \sin A')$ 。公垂线的方向向量  $\mathbf{v} = (A, B, C) = \mathbf{v}_q \times \mathbf{V}'_q$ 。假设公垂线段与两光轴分别相交于  $M_1, M_2$  两点。Q, Q' 测量船的光轴直线方程表示如下:

$$\begin{cases} \frac{x - x_q}{\cos E \cos A} = \frac{y - y_q}{\sin E} = \frac{z - z_q}{\cos E \sin A} = t_q \\ \frac{x - x'_q}{\cos E' \cos A'} = \frac{y - y'_q}{\sin E'} = \frac{z - z'_q}{\cos E' \sin A'} = t'_q \end{cases} \quad (6)$$

根据空间几何关系可以得出  $M_1$  和  $M_2$  两点的空间坐标  $M_1(x_q + m_q t_q, y_q + n_q t_q, z_q + p_q t_q)$  和  $M_2(x'_q + m'_q t'_q, y'_q + n'_q t'_q, z'_q + p'_q t'_q)$ 。

那么 M 点的坐标表示为:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_q + m_q t_q & x'_q + m'_q t'_q \\ y_q + n_q t_q & y'_q + n'_q t'_q \\ z_q + p_q t_q & z'_q + p'_q t'_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

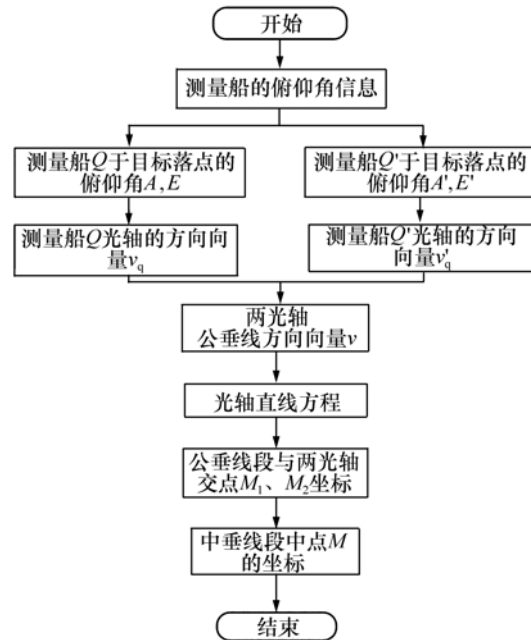
式中:

$$t_q = \frac{\begin{vmatrix} A & x'_q - x_q & m'_q \\ B & y'_q - y_q & n'_q \\ C & z'_q - z_q & p'_q \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} A & m_q & m'_q \\ B & n_q & n'_q \\ C & p_q & p'_q \end{vmatrix}}$$

$$t'_q = \frac{\begin{vmatrix} A & m_q & x'_q - x_q \\ B & n_q & y'_q - y_q \\ C & p_q & z'_q - z_q \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} A & m_q & m'_q \\ B & n_q & n'_q \\ C & p_q & p'_q \end{vmatrix}}$$

$m_q, n_q, p_q$  分别为测量船 Q 对于目标落点的光轴方向向量分量;  $m'_q, n'_q, p'_q$  为测量船 Q' 对于目标落点的光轴方向向量分量; A, B, C 为公垂线的方向向量分量。

其算法流程表示如下:



根据中国科学院长春光机所吴能伟和陈涛等人对异面交会误差精度的分析, 交会角度的大小直接影响目标定位精度。交会角在  $60^\circ \sim 90^\circ$  时, 定位误差逐渐减小, 在  $90^\circ$  到达最小, 随着交会角度的增大 ( $90^\circ \sim 120^\circ$ ) 而增大。所以实际工程中交会角选取  $90^\circ$  最为理想<sup>[10-12]</sup>。

## 3 误差分析

### 3.1 误差来源分析

由测量方案可知, 主要误差来源是 GPS 定位误差, CCD 图像质心精度造成的底片常数模型误差, 异面交会误差。GPS 是目前定位精度最高的导航系统, 可提供动态目标的高精度位置、速度和时间信息, 其定位精度可以达到 0.05 m。底片常数模型只是反应两套坐标系间坐标原点、坐标轴方向和尺度的转换关系, 为了减少底片常数, 减少定标点, 使“四常数模型”可以采用, 由于 CCD 像元线尺寸仅是近似值, x 方向和 y 方向的尺寸不可能做到严格相等, 需对“四常数模型”要求的

量度坐标  $x$  轴与  $y$  轴严格垂直和比例尺进行修正<sup>[13-14]</sup>。

质心坐标对底片常数的解算精度产生影响, 定点图像位置精度受 CCD 单个像元的空间角分辨率影响, 因为 CCD 像元尺寸不能做得很小(其一般为  $10\ \mu\text{m}$  左右, 小的  $4\sim 6\ \mu\text{m}$ ) 限制了测量精度, 从而影响定位精度。对于视场覆盖为  $L$ , 距目标点为  $R$ , 有效像元数为  $N\times N$  的相机, 其空间分辨率  $\xi$  为(每个像元对应的视场角的大小):

$$\xi = \frac{\Phi}{N}, \quad (8)$$

式中:  $N$  为 CCD 芯片单边的有效像元数目,  $\Phi = 2\arctan(\frac{L/2}{R})$  为视场观测角度。由工程经验和质心确定算法(典型的高斯曲面拟合细分定位算法)可得, 质心偏差可达 0.5 个像素, 即  $0.5\xi$ 。

目标落点的位置误差是由交会测量中的交会

$$\begin{cases} \sigma_x = \left[ \left(\frac{\partial x}{\partial A}\right)^2 \sigma_A^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial A'}\right)^2 \sigma_{A'}^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial E}\right)^2 \sigma_E^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial E'}\right)^2 \sigma_{E'}^2 + P\sigma_{\text{GPA}}^2 \right]^{1/2} \\ \sigma_y = \left[ \left(\frac{\partial y}{\partial A}\right)^2 \sigma_A^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial A'}\right)^2 \sigma_{A'}^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial E}\right)^2 \sigma_E^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial E'}\right)^2 \sigma_{E'}^2 + Q\sigma_{\text{GPA}}^2 \right]^{1/2}, \\ \sigma_z = \left[ \left(\frac{\partial z}{\partial A}\right)^2 \sigma_A^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial A'}\right)^2 \sigma_{A'}^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial E}\right)^2 \sigma_E^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial E'}\right)^2 \sigma_{E'}^2 + R\sigma_{\text{GPA}}^2 \right]^{1/2} \end{cases}, \quad (9)$$

式中:

$$\begin{cases} P = \left(\frac{\partial x}{\partial x_q}\right)^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial x'_q}\right)^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial y_q}\right)^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial y'_q}\right)^2 \left(\frac{\partial x}{\partial z_q}\right)^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial z'_q}\right)^2 \\ Q = \left(\frac{\partial y}{\partial x_q}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x'_q}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial y_q}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial y'_q}\right)^2 \left(\frac{\partial y}{\partial z_q}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial z'_q}\right)^2 \\ R = \left(\frac{\partial z}{\partial x_q}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial x'_q}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y_q}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y'_q}\right)^2 \left(\frac{\partial z}{\partial z_q}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial z'_q}\right)^2 \end{cases}$$

通过连续变焦镜头改变 CCD 相机的空间分辨率, 根据底片常数模型解算目标落点的角度的过程中可以得出角度误差, 公式表示如下:

$$\sigma_A^2 = \left[ \sum_{i=0}^1 \left(\frac{\partial A}{\partial X_i}\right)^2 + \sum_{i=0}^1 \left(\frac{\partial A}{\partial Y_i}\right)^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial X}\right)^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial Y}\right)^2 \right] \sigma_{\text{center}}^2 + \left[ \left(\frac{\partial A}{\partial A_0}\right)^2 a_0 + \left(\frac{\partial A}{\partial A_1}\right)^2 a_1 + \left(\frac{\partial A}{\partial E_0}\right)^2 b_0 + \left(\frac{\partial A}{\partial E_1}\right)^2 b_1 \right] \sigma_{\text{GPS}}^2, \quad (10)$$

$$\sigma_E^2 = \left[ \sum_{i=0}^1 \left(\frac{\partial E}{\partial X_i}\right)^2 + \sum_{i=0}^1 \left(\frac{\partial E}{\partial Y_i}\right)^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial X}\right)^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial Y}\right)^2 \right] \sigma_{\text{center}}^2 + \left[ \left(\frac{\partial E}{\partial A_0}\right)^2 a_0 + \left(\frac{\partial E}{\partial A_1}\right)^2 a_1 + \left(\frac{\partial E}{\partial E_0}\right)^2 b_0 + \left(\frac{\partial E}{\partial E_1}\right)^2 b_1 \right] \sigma_{\text{GPS}}^2, \quad (11)$$

式中:

角和落点相应于两传感器的角度信息决定。落点角度误差主要有质心精度和 GPS 精度共同决定。根据误差合成理论, 下面给出具体的误差分析过程。

### 3.2 误差分析

在利用异面直线交会时, 必须选择合适的工作基点, 尽量使交会图形满足两观测角相等且交会角在  $90^\circ$  附近。从交会测量的坐标式(6)可知, 落点的 3 个坐标分量分别是  $x_q, y_q, z_q, x'_q, y'_q, z'_q, A, A', E, E'$  的函数。目标落点相对于两测量船的方位角和俯仰角误差  $\sigma_A, \sigma_{A'}, \sigma_E, \sigma_{E'}$  可以由图像坐标的质心误差也就是底片常数模型误差分析得出, GPS 引进的测量船和定点的位置误差为  $\sigma_{\text{GPS}}$ 。考虑到测量误差一般服从高斯分布, 根据误差传递理论得出每个元素对落点空间位置标准差的影响,  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  分别为:

$$\begin{cases} a_i = \left(\frac{\partial A_i}{\partial x_i}\right)^2 + \left(\frac{\partial A_i}{\partial z_i}\right)^2 + \left(\frac{\partial A_i}{\partial x_q}\right)^2 + \left(\frac{\partial A_i}{\partial z_q}\right)^2 \\ b_i = \left(\frac{\partial E_i}{\partial x_i}\right)^2 + \left(\frac{\partial E_i}{\partial y_i}\right)^2 + \left(\frac{\partial E_i}{\partial z_i}\right)^2 + \left(\frac{\partial E_i}{\partial x_q}\right)^2 + \left(\frac{\partial E_i}{\partial y_q}\right)^2 + \left(\frac{\partial E_i}{\partial z_q}\right)^2 \end{cases}$$

$i=0,1$ 。同理可得  $\sigma_{A'}^2, \sigma_{E'}^2$ 。

由式(9),(10)可以看出  $A, E, A', E'$  的标准差主要由定点和目标点图像坐标的质心误差和随定点空间角度信息引入的位置误差线性决定。最终传递到目标位置误差中,落点位置误差与各误差源也是线性相关的。

## 4 实验与结果

### 4.1 实验数据处理

本文进行了实际观测和标定实验。实验中采用相位差分 GPS 测量点位位置。 $Q$  和  $Q'$  测量船使用的相机型号是滨松 ORCA-flash 4.0,相机的图像分辨率为  $2\ 048 \times 2\ 048$ ,像素尺寸为  $6.5\ \mu\text{m} \times 6.5\ \mu\text{m}$ ,平均量子效率为 70%,其空间分辨率随着对应的视场观测角度变化。观测前,需将至于两测量船上的相机探头大致指向靶标船,使靶标船尽可能的位于 CCD 中心,调整 CCD 使视场内定点和目标点的轨迹尽可能的与 CCD 靶面边平行。实验过程中弹丸速度过快,对于图像方法拾取弹丸较困难,因此采用测量弹丸溅起水柱的方法替代弹丸落点。表 1 为经式(1)变换后地心坐标系下点位的坐标。

表 1 靶标船上定点以及测量船的地心坐标

Tab.1 Geocentric coordinates of points and measuring ships

No.	$x/\text{m}$	$y/\text{m}$	$z/\text{m}$
A	-2 481 438.920	4 172 027.248	4 123 447.395
B	-2 481 451.865	4 172 019.178	4 123 447.768
C	-2 481 464.340	4 172 011.337	4 123 448.191
Q	-2 479 586.645	4 176 130.661	4 120 427.098
Q'	-2 485 831.796	4 172 054.275	4 120 791.172

经连续拍摄得到一组实际 CCD 图像,得到一组连续的现场图像,图 3 为  $t$  时刻的一幅图像。人工识别出  $t$  时刻的图像,得到其中定点和目标点的像元位置坐标信息,参见表 2。



图 3 测量船  $Q$  拍摄的  $t$  时刻实际图像

Fig.3 Image of the projectile point obtained from measuring ship  $Q(t$  time)

表 2 定点和目标点的像元位置坐标

Tab.2 Image coordinates of specified points and projectile point

No.	测量船 $Q$		测量船 $Q'$	
	横坐标 $X/\text{pixel}$	纵坐标 $Y/\text{pixel}$	横坐标 $X'/\text{pixel}$	纵坐标 $Y'/\text{pixel}$
A	-25.4	3	-23.9	0
B	2	3	1.5	0
C	28.3	3	26.3	0
M	-10.8	3	83.1	0

由计算结果可知  $Q$  测量船的底片常数  $a, b, c, d$  分别为 121.7、1.6、0 和 -49.2。同理  $Q'$  测量船的底片常数分别为 31.2、0.7、0.8 和 -0.4。根据底片常数模型可以反推出目标落点分别相对于两测量船的方位、俯仰角。由式(4)~(6)计算水面落点的位置,式(8)~(10)计算目标落点的位置误差。表 3 给出了水面落点位置坐标值和标准差(交会角为  $90^\circ$  的情况下)。

表 3 靶水面落点坐标和相应方向上的误差

Tab.3 Result of value of the projectile point and its error

	真值/m	误差/m
$x$	-2 481 459.4	2.8
$y$	4 171 993.0	4.9
$z$	4 123 469.6	4.3

## 4.2 误差权重分析

针对底片模型的角度误差考察了质心误差和位置定位误差所占的权重。根据工程实际设备指

标,分析了方位角和高低角方差与相机空间分辨率平方项、GPS精度平方项之间的关系(如图4)。

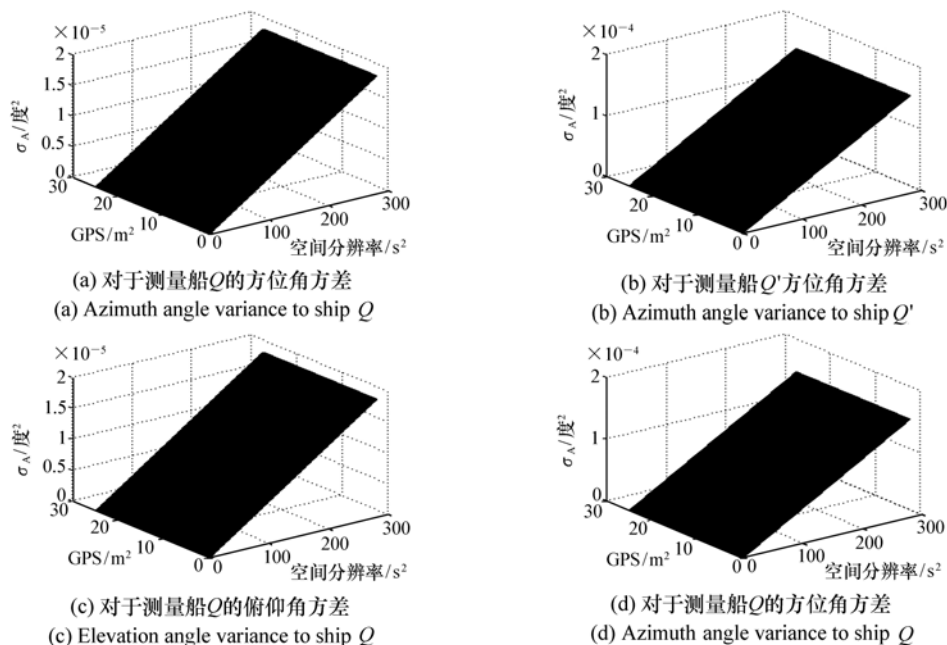


图4 方位、俯仰角方差与误差源的关系图

Fig.4 Relationship between angle variance and error sources

由图4可以看出,在用底片常数模型求解角度的过程中,误差源对方位角和俯仰角误差的影响是一致的。目标点的方位角和俯仰角的方差与相机的空间分辨率的平方和GPS的精度平方成线性关系。因此可以根据具体工程需要和成本要求选择相应的测量设备。

## 5 结论

本文根据水面落点的特殊前提以及高速运动目标,提出了依据动态像面测量坐标的方法,并介绍了动态像面以及异面交会算法的原理。然后对

研究过程中误差的主要来源进行分析,并分析了落点误差与各个误差因素的关系。本文采用地心坐标系有效避免了地球模型的模型误差和坐标系转换的转换误差;底片常数模型避免了相机镜头本身的畸变误差和测量船的姿态误差;异面交会方法克服了前方交会由于作用距离产生的误差。

在地心坐标系下运用底片常数模型方法进行的目标落点角度信息的估计,在交会角为 $90^\circ$ 的情况下,位置误差X方向上最高能达到2.8 m。实验结果表明,在保证交会误差最小的情况下,本文的方法实现了水面特殊条件下较为理想的落点位置测量。

## 参考文献:

- [1] 李翰山,雷志勇.多幕光学法测量弹丸炸点坐标及误差分析[J].光学学报,2012,32(2):1-7.  
LI H SH, LEI ZH Y. Measurement of projectile burst coordinates by using multi-screen optical method and its error analysis[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(2): 1-7. (in Chinese)
- [2] 盛磊,吴志勇,刘旨春,等.船载经纬仪数据处理[J].光学精密工程,2013,21(9):2421-2429.  
SHENG L, WU ZH Y, LIU ZH CH, et al.. Data processing for shipboard theodolite[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(9): 2421-2429. (in Chinese)

- [3] 马庆坤,乔彦峰,王晓明,等. 基于光学测量手段实时动态测量船体水平姿态[J]. 中国光学,2012,5(2):189-193.  
MA Q K, QIAO Y F, WANG X M, *et al.*. Real-time measurement of dynamic horizontal attitudes of ships based on optical method[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(2): 189-193. (in Chinese)
- [4] 孙朝江,刘少伟,郑文荣. 舰炮武器海上落点测量方法研究[J]. 研究与开发,2012,31(2):76-78.  
SUN C J, LIU SH W, ZHENG W R. Study on the method of falling point in sea measurement for shipborne gunnery weapon [J]. *Research and Development*, 2012, 31(2): 76-78. (in Chinese)
- [5] 张玉涛,薛飞,李鹏. 火箭助飞鱼雷海上落点测控系统测量误差分析[J]. 鱼雷技术,2012,20(5):392-395.  
ZHANG Y T, XUE F, LI P. Error analysis of measuring water entry point for rocket-assisted torpedo[J]. *Torpedo Technology*, 2012, 32(2): 1-7. (in Chinese)
- [6] 赵学颜,李迎春. 靶场光学测量[M]. 北京:装备指挥技术学院,2001.  
ZHAO X Y, LI Y CH. *Optical M Measurement in Shooting Range*[M]. Beijing: Institute of Command and technology, 2001. (in Chinese)
- [7] 李零印,王一凡,王骥. 靶场光学测量中的变焦距光学系统[J]. 中国光学,2011,4(3):240-246.  
LI L Y, WANG Y F, WANG J. Varifocal optical system to optical measurement of shooting range[J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(3): 240-246. (in Chinese)
- [8] 李春艳,李怀锋,孙才红. 高精度星敏传感器天文标定方法及观测分析[J]. 光学精密工程,2006,14(4):558-563.  
LI C Y, LI H F, SUN C H. Astronomical calibration method and observation analysis for high-accuracy star sensor[J]. *pt. Precision Eng.*, 2006, 14(4): 558-563. (in Chinese)
- [9] 吴能伟,陈涛. 异面交会法在光电经纬仪中的应用[J]. 仪器仪表学报,2006,27(S2):1233-1235.  
WU N W, CHEN T. Application of non-coplanar intersection method to photoelectric theodolite[J]. *Chinese J. Scientific Instrument*, 2006, 27(S2): 1233-1235. (in Chinese)
- [10] 刘旨春,郭立红,关文翠. 经纬仪交会精度的定量预测[J]. 光学精密工程,2008,16(10):1821-1830.  
LIU ZH CH, GUO L H, GUAN W C. Quantitative forecasting of intersection precision for theodolite[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(10): 1821-1830. (in Chinese)
- [11] 孙辉. 机载光电平台目标定位与误差分析[J]. 中国光学,2013,6(6):912-918.  
SUN H. Target localization and error analysis of airborne electro-optical platform[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(6): 912-918. (in Chinese)
- [12] 高策,乔彦峰. 光电经纬仪测量误差的实时修正[J]. 光学精密工程,2007,15(6):846-851.  
GAO C, QIAO Y F. Real-time error-correction method for photoelectrical theodolite[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(6): 846-851. (in Chinese)
- [13] 范良艳. 基于不同取向的 CCD 图像准确求解底片常数模型[D]. 广东:暨南大学,2010.  
FAN L Y. Accurate determination of plate model based on CCD images with different orientations[D]. Guangdong: Jinan University, 2010. (in Chinese)
- [14] 赵卉青. 用底片常数法归算恒星三角视差的改进[J]. 天文学报,1987,28(2):190-196.  
ZHAO H Q. An Improvement of the plate constant method for determining stellar trigonometric parallaxes[J]. *Acta Astronomica Sinica*, 1987, 28(2): 190-196. (in Chinese)

#### 作者简介:



贺秀娟(1989—),女,重庆人,硕士研究生,2008年于吉林大学获得学士学位,主要从事计算机应用及光电测控技术的研究。E-mail:hxj\_cyndi@hotmail.com



王成龙(1981—),男,辽宁沈阳人,硕士,助理研究员,2005年于中国科学技术大学获得学士学位,2011年于中国科学院大学获得硕士学位,主要从事靶场光测设备研制以及计算机和经纬仪光电总体的研究。E-mail:wangcl522@gmail.com





乔彦峰(1962—),男,研究员,博士生导师,1985年于南京工学院获得学士学位,主要从事光电测控技术及相关领域的研究。E-mail:qiaoyf@ciomp.ac.cn

## 《发光学报》

—EI 核心期刊(物理学类;无线电电子学、电信技术类)

《发光学报》是中国物理学会发光分会与中国科学院长春光学精密机械与物理研究所共同主办的中国物理学会发光分会的学术会刊。该刊是以发光学、凝聚态物质中的激发过程为专业方向的综合性学术刊物。

《发光学报》于1980年创刊,曾于1992年,1996年,2000年和2004年连续四次被《中文核心期刊要目总览》评为“物理学类核心期刊”,并于2000年同时被评为“无线电电子学、电信技术类核心期刊”。2000年获中国科学院优秀期刊二等奖。现已被《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》和“万方数据资源系统”等列为源期刊。英国《科学文摘》(SA)自1999年;美国《化学文摘》(CA)和俄罗斯《文摘杂志》(AJ)自2000年;美国《剑桥科学文摘社网站》自2002年;日本《科技文献速报》(CBST, JICST)自2003年已定期收录检索该刊论文;2008年被荷兰“Elsevier Bibliographic Databases”确定为源期刊;2010年被美国“EI”确定为源期刊。2001年在国家科技部组织的“中国期刊方阵”的评定中,《发光学报》被评为“双效期刊”。2002年获中国科学院2001~2002年度科学出版基金“择重”资助。2004年被选入《中国知识资源总库·中国科技精品库》。本刊内容丰富、信息量大,主要反映本学科专业领域的科研和技术成就,及时报道国内外的学术动态,开展学术讨论和交流,为提高我国该学科的学术水平服务。

《发光学报》自2011年改为月刊,A4开本,144页,国内外公开发行。国内定价:40元,全年480元,全国各地邮局均可订阅。《发光学报》欢迎广大作者、读者广为利用,踊跃投稿。

地 址:长春市东南湖大路3888号

《发光学报》编辑部

邮 编:130033

电 话:(0431)86176862, 84613407

E-mail: fgxbt@126.com

国内统一刊号: CN 22-1116/04

国际标准刊号: ISSN 1000-7032

国内邮发代号: 12-312

国外发行代号: 4863BM

http://www.fgxb.org