

# 智能弹药成像引信对地面车辆定位的算法研究

何小坤, 谌德荣, 宫久路, 李蒙

(北京理工大学 机电学院, 北京 100081)

**摘要:** 针对智能弹药对地面车辆的非合作定位问题, 提出一种利用目标非合作固有几何特征的成像引信定位算法。建立了快速交会条件下的空间成像模型, 结合地面车辆的特点提出了车辆轴线的概念; 构建过轴线等特征直线和光心的平面, 证明平面相交直线与目标轴线的平行关系, 得到目标坐标系 3 个轴向的方向向量; 以待定系数法描述车辆中轴面, 通过建立点面距离关系推导实现了弹目相对位置的解算。分析弹目相对姿态对定位精度的影响, 并通过仿真实验验证了误差规律。实验结果表明: 智能弹药距地高度小于 100 m 时, 定位相对误差小于 5%, 算法可有效地实现高精度定位。

**关键词:** 兵器科学与技术; 成像引信; 相对位置; 非合作特征; 方向向量; 定位精度

**中图分类号:** TJ43<sup>\*1</sup>      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-1093(2014)10-1549-07

**DOI:** 10.3969/j.issn.1000-1093.2014.10.005

## Research on the Position Algorithm for Smart Munition Imaging Fuze

HE Xiao-kun, CHEN De-rong, GONG Jiu-lu, LI-Meng

(School of Mechatronical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** To measure the relative position between smart munition and vehicle, a location algorithm for imaging fuze based on target geometrical characteristics which are non-cooperative and inherent is proposed. A space imaging model under the fast rendezvous is established to solve the problem, and then the axes of vehicle are defined according to the characteristics of vehicle. The plane consisting of optical center and feature lines across the axes is set up, the parallel relationship among axes and intersecting lines is proved, and the direction vectors of three target-coordinate axes are deduced. Based on the direction vectors of target-coordinate axes and the method of undetermined coefficients, a medial plane which includes vehicle's axes is described by expression. According to the distance constraints from 3D point to plane, the relative position between smart munition and vehicle is resolved by strict derivation. The effect of relative pose on solving error is analyzed, and the error rules are proved by experiments. The experimental results indicate that the relative error of location is less than 5% when the height of smart munition is less than 100 m, and the location algorithm could solve the relative position with high precision.

**Key words:** ordnance science and technology; imaging fuze; relative position; non-cooperative feature;

收稿日期: 2013-12-18

基金项目: “十二五”国防基础科研项目(B2220132013)

作者简介: 何小坤(1989—), 男, 硕士研究生。E-mail: henrybit2007@163.com;

谌德荣(1966—), 女, 教授, 博士生导师。E-mail: cdrmy@263.com

direction vector; positioning accuracy

## 0 引言

确定目标相对智能弹药的位置信息是现代引信工作的重要内容,是智能弹药精确起爆的基本条件<sup>[1]</sup>。成像引信通过获取目标图像,根据图像信息获取弹目相对位置,不仅能实现实时定位,为起爆控制提供可靠辅助信息,而且具有尖锐的方向性和良好的抗电磁干扰能力<sup>[2]</sup>。

为适应智能弹药小型化的发展,成像引信采用单目视觉测量方式,根据单帧图像完成测量,以保证定位的实时性。基于单帧图像实现相对位置测量的典型方法有点对应法<sup>[3-4]</sup>和基于几何约束的方法<sup>[5-7]</sup>等。点对应法通过联立数个目标点与成像像点之间的坐标对应关系反求成像系统与目标之间的相对位置,在此基础上发展出了利用 2D/3D 线段对应法、2D 椭圆/3D 圆对应法和以上方法的组合等<sup>[3]</sup>。点对应法依赖于高复杂度的运算,且大量合作特征之间的完全匹配是该方法的一大难题<sup>[4]</sup>。几何约束法基于视场范围内某些几何特征之间的约束关系(如共面性、平行性、已知的直线夹角等)来确定相对位置。于勇等<sup>[5]</sup>提出了一种利用特征直线的成像尺寸和角度关系解算远距离下弹目相对位置的算法,该算法不依赖于相对姿态的求解,但只能计算弹目相对距离,无法解算其他两个方向的相对位置量。Wilezkowiak 等<sup>[6]</sup>提出了利用平行六面体中的顶点距离和棱线夹角关系等完成相对位置和姿态的解算方法,算法精度较高,但解算复杂,且应用范围有限。Sasa 等<sup>[7]</sup>提出了一种无人机位姿参数解算方法,通过计算像素主点与跑道、海岸线等特征的相对距离和旋转等几何关系得到无人机的空间位置,实用性好,但精度不高。

针对智能弹药对地面车辆的定位问题,本文提出了一种利用目标非合作几何特征成像关系的成像引信定位算法。根据目标特点提出车辆轴线的概念,充分利用成像空间中轴线等直线特征之间的平行共面性以及空间点面距离等几何约束,通过严格的推导实现了弹目相对位置解算。本文提出的长短轴线特征具有简单的解析式,匹配容易且存在于绝大部分的地面车辆之中,应用范围广。同时,该算法不依赖于相对姿态的求解,且只需利用单帧图像就

能完成弹目相对位置的解算,保证了弹目快速交会条件下算法的可靠性和实用性。

## 1 空间成像模型和相对位置

在图 1 所建立的中心透视投影模型中,地面车辆的主体部分近似成长方体,并用矩形  $Q_1Q_2Q_3Q_4$  表示平行于地面的长方体中轴面。该矩形有两条对称轴,指向车体前后方向的对称轴为长轴  $L_{01}$ ,另一条为短轴  $L_{02}$ ,长短轴的交点为形心  $G$ 。虽然长短轴是非合作的非可视几何特征,但通过提取图像中车辆轮廓,可得到长短轴的方向、位置和长度信息。

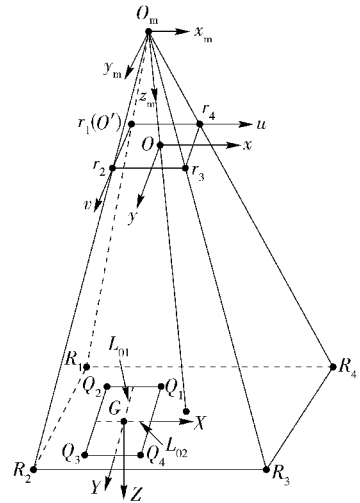


图 1 空间成像示意图

Fig. 1 Space imaging

图 1 中,假设摄像机与弹体固连,建立如下坐标系:像素坐标系  $O'uv$ ,取图像左上角点  $O'$  为原点, $u$  轴沿图像水平方向向右, $v$  轴沿图像竖直方向向下;图像坐标系  $Oxy$ ,以像素主点  $O$  为原点, $x$ 、 $y$  轴分别与  $u$ 、 $v$  轴平行;测量坐标系  $O_m x_m y_m z_m$ ,以光心  $O_m$  为原点, $x_m$ 、 $y_m$  轴分别平行于  $x$ 、 $y$  轴,光轴  $z_m$  垂直于成像平面,且过像素主点  $O$ ;目标坐标系  $GXYZ$ ,以形心为原点的右手坐标系, $Y$  轴沿长轴指向目标前方, $Z$  轴垂直中轴面向下。

相对位置  $T$  是目标相对于智能弹药的位置,记

$$T = (T_{x_m}, T_{y_m}, T_{z_m}), \quad (1)$$

式中: $T_{x_m}$ 、 $T_{y_m}$ 、 $T_{z_m}$  分别为  $T$  在测量坐标系 3 个坐标轴上的投影,也是形心在测量坐标系中的坐标。

## 2 定位算法设计

### 2.1 图像中的目标轴线

图 2 给出了中轴面  $GXY$  和图像平面中的边缘直线和轴线。  $Q_1 Q_2 Q_3 Q_4$  的像为  $q_1 q_2 q_3 q_4$ 。  $P_2 P_4$  和  $P_3 P_1$  分别为长轴  $L_{01}$  和短轴  $L_{02}$ ，  $Q_4 Q_1$ 、  $Q_1 Q_2$ 、  $Q_2 Q_3$  和  $Q_3 Q_4$  分别为车辆边缘直线  $L_1$ 、  $L_2$ 、  $L_3$  和  $L_4$ ， 它们在图像平面的像分别为  $l_{01}$  ( $p_2 p_4$ )、  $l_{02}$  ( $p_3 p_1$ )、  $l_1$  ( $q_4 q_1$ )、  $l_2$  ( $q_1 q_2$ )、  $l_3$  ( $q_2 q_3$ ) 和  $l_4$  ( $q_3 q_4$ )。 通过边缘提取和最小二乘拟合得到  $l_i$  在图像坐标系中的方程为

$$l_i: a_i x + b_i y + c_i = 0, \quad i = 1, 2, 3, 4. \quad (2)$$

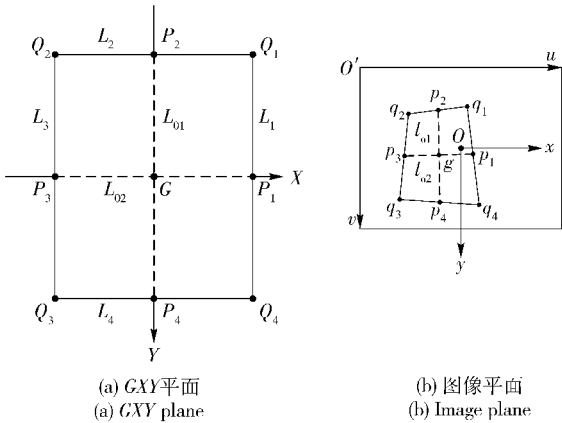


图 2 GXY 平面和图像平面

Fig. 2 GXY plane and image plane

摄像机焦距较长且弹体距地高度较大时, 可用两条长(短)边的中心线估计长(短)轴,  $l_{0j}$  在图像坐标系中的方程<sup>[8]</sup>为

$$l_{0j}: \begin{cases} a_{0j}x + b_{0j}y + c_{0j} = 0, \\ a_{0j} = a_j + a_{j+2}, \\ b_{0j} = b_j + b_{j+2}, \\ c_{0j} = c_j + c_{j+2}, \quad j = 1, 2. \end{cases} \quad (3)$$

### 2.2 目标坐标系 3 个轴的单位方向向量

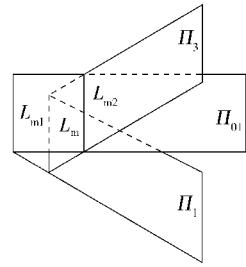
摄像机焦距为  $f$ ,  $l_i$  和  $l_{0j}$  分别与光心  $O_m$  构成平面  $\Pi_i$  和  $\Pi_{0j}$ , 它们在测量坐标系的方程为

$$\Pi_i: \begin{cases} A_i x_m + B_i y_m + C_i z_m = 0, \\ A_i = a_i, B_i = b_i, C_i = c_i/f; \end{cases} \quad (4)$$

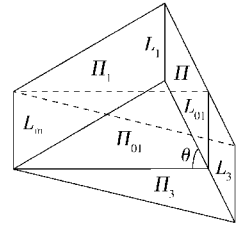
$$\Pi_{0j}: \begin{cases} A_{0j} x_m + B_{0j} y_m + C_{0j} z_m = 0, \\ A_{0j} = a_{0j}, B_{0j} = b_{0j}, C_{0j} = c_{0j}/f. \end{cases} \quad (5)$$

$\Pi_1$ 、 $\Pi_3$  和  $\Pi_{01}$  的相交关系如图 3(a) 所示。  $\Pi_1$  和  $\Pi_3$  的交线为  $L_m$ ,  $\Pi_{01}$  和  $\Pi_1$ 、 $\Pi_3$  的交线分别为  $L_{m1}$ 、

$L_{m2}$ 。 根据空间向量关系,  $L_m$ 、 $L_{m1}$  和  $L_{m2}$  这 3 条直线的方向向量平行。 又由于  $L_m$ 、 $L_{m1}$  和  $L_{m2}$  都过光心, 从而这 3 条直线重合。



(a)  $\Pi_1$ 、 $\Pi_3$  和  $\Pi_{01}$  在光心处的相交  
(a) Overlapping relations of  $\Pi_1$ ,  $\Pi_3$  and  $\Pi_{01}$  at optic center



(b)  $\Pi_1$ 、 $\Pi_3$  和  $\Pi_{01}$  与目标平面的相交  
(b) Overlapping relations of  $\Pi_1$ ,  $\Pi_3$ ,  $\Pi_{01}$  and target plane

图 3 平面相交示意图

Fig. 3 Intersection of planes

中轴面用图 3(b) 中的  $\Pi$  表示,  $\Pi_{01}$ 、 $\Pi_1$  和  $\Pi_3$  这 3 个平面与  $\Pi$  平面的交线是长轴  $L_{01}$  和边线  $L_1$ 、 $L_3$ 。 空间中, 过两条平行直线存在两个相交平面, 交线与这两条直线平行。 从而,  $L_{01} \parallel L_1 \parallel L_3 \parallel L_m$ ,  $L_{01}$  在测量坐标系中的方向向量为

$$\mathbf{n}_{01} = (r_1, s_1, t_1) = \left( \begin{vmatrix} B_1 & C_1 \\ B_3 & C_3 \end{vmatrix}, \begin{vmatrix} C_1 & A_1 \\ C_3 & A_3 \end{vmatrix}, \begin{vmatrix} A_1 & B_1 \\ A_3 & B_3 \end{vmatrix} \right). \quad (6)$$

同理, 目标短轴在测量坐标系中的方向向量为

$$\mathbf{n}_{02} = (r_2, s_2, t_2) = \left( \begin{vmatrix} B_2 & C_2 \\ B_4 & C_4 \end{vmatrix}, \begin{vmatrix} C_2 & A_2 \\ C_4 & A_4 \end{vmatrix}, \begin{vmatrix} A_2 & B_2 \\ A_4 & B_4 \end{vmatrix} \right). \quad (7)$$

设图 2 中像点  $p_i$  的图像坐标为  $(x_i, y_i)$ 。 为保证目标长短轴方向和图像中目标长短轴方向的一致, 需满足(8)式。 若不满足, 同时改变  $(r_1, s_1, t_1)$  或  $(r_2, s_2, t_2)$  中 3 个元素的正负使(8)式成立。

$$\begin{cases} \text{sgn}(s_1) = \text{sgn}(y_4 - y_2), \\ \text{sgn}(r_2) = \text{sgn}(x_1 - x_3). \end{cases} \quad (8)$$

(6) 式和(7)式表示方向向量分别是  $Y$  轴和  $X$  轴在测量坐标系中的正向方向向量, 二者的叉积即

为  $Z$  轴在测量坐标系中的正向方向向量,也是车辆中轴面的法向量。长轴、短轴和中轴面法向量在测量坐标系中的单位方向向量为

$$\begin{cases} \mathbf{n}_x = (r_{x1}, r_{x2}, r_{x3}) = \frac{1}{\sqrt{r_2^2 + s_2^2 + t_2^2}}(r_2, s_2, t_2), \\ \mathbf{n}_y = (r_{y1}, r_{y2}, r_{y3}) = \frac{1}{\sqrt{r_1^2 + s_1^2 + t_1^2}}(r_1, s_1, t_1), \\ \mathbf{n}_z = \mathbf{n}_x \times \mathbf{n}_y = (r_{z1}, r_{z2}, r_{z3}). \end{cases} \quad (9)$$

### 2.3 弹目相对位置

目标形心在目标坐标系中的坐标为  $(0, 0, 0)$ , 根据坐标系变换关系及中心投影成像模型<sup>[9]</sup>, 形心像点坐标为  $(x_g, y_g)$ , 满足

$$\begin{cases} x_g = f \frac{T_{x_m}}{T_{z_m}}, \\ y_g = f \frac{T_{y_m}}{T_{z_m}}, \end{cases} \quad (10)$$

式中:

$$(x_g, y_g) = \left( -\frac{b_{01}c_{02} - b_{02}c_{01}}{b_{01}a_{02} - b_{02}a_{01}}, -\frac{a_{01}c_{02} - a_{02}c_{01}}{a_{01}b_{02} - a_{02}b_{01}} \right).$$

由(9)式, 设中轴面在测量坐标系中的方程为

$$\Pi: r_{z1}x_m + r_{z2}y_m + r_{z3}z_m - K = 0.$$

目标形心在中轴面上, 则

$$r_{z1}T_{x_m} + r_{z2}T_{y_m} + r_{z3}T_{z_m} - K = 0. \quad (11)$$

记  $\kappa = r_{z3}x_g + r_{z2}y_g + r_{z3}f$ , 联立(10)式、(11)式, 有

$$T_{z_m} = \frac{K}{\kappa}f. \quad (12)$$

从而, 相对位置的求解问题转化为常数  $K$  的求解。

图 3(b) 中,  $\Pi_{01}$  和  $\Pi$  夹角  $\theta$  的正弦值为

$$\sin \theta = \sqrt{1 - \left( \frac{A_{01}r_{z1} + B_{01}r_{z2} + C_{01}r_{z3}}{\sqrt{A_{01}^2 + B_{01}^2 + C_{01}^2}} \right)^2}. \quad (13)$$

$L_1$  是  $\Pi_1$  与  $\Pi$  的交线, 不平行于  $z_m$  轴, 即  $r_{x1}$  和  $r_{x2}$  不同时为 0.  $r_{x1} \neq 0$  时,  $L_1$  与平面  $O_m y_m z_m$  有交点  $S_1$ ;  $r_{x2} \neq 0$  时,  $L_1$  与平面  $O_m x_m z_m$  有交点  $S_2$ . 这两个交点在测量坐标系中的坐标分别为

$$\begin{cases} S_1 \left( 0, \frac{KC_1}{r_{z3}B_1 - r_{z2}C_1}, \frac{KB_1}{r_{z2}C_1 - r_{z3}B_1} \right), \\ S_2 \left( \frac{KC_1}{r_{z3}A_1 - r_{z1}C_1}, 0, \frac{KA_1}{r_{z1}C_1 - r_{z3}A_1} \right). \end{cases} \quad (14)$$

它们到平面  $\Pi_{01}$  的距离  $d_1$  和  $d_2$  分别为

$$\begin{cases} d_1 = \left| \frac{B_{01}C_1 - B_1C_{01}}{\sqrt{A_{01}^2 + B_{01}^2 + C_{01}^2}} \frac{K}{r_{z3}B_1 - r_{z2}C_1} \right|, \\ d_2 = \left| \frac{A_{01}C_1 - A_1C_{01}}{\sqrt{A_{01}^2 + B_{01}^2 + C_{01}^2}} \frac{K}{r_{z3}A_1 - r_{z1}C_1} \right|. \end{cases} \quad (15)$$

设车宽为  $W$ ,  $L_1$  与  $L_{01}$  的距离为  $W/2$ , 则

$$\frac{W}{2} = \frac{d_1}{\sin \theta} = \frac{d_2}{\sin \theta}. \quad (16)$$

考虑  $T_z > 0$  的情况下, 若  $r_{x1}r_{x2} \neq 0$ ,  $d_1$  与  $d_2$  一般不会完全相等, 由(16)式的等式可得到常数  $K$  的两个解  $K_{11}$  和  $K_{12}$ , 记

$$K_1 = \operatorname{sgn}(\kappa) \sqrt{(K_{11}^2 + K_{12}^2)}/2; \quad (17)$$

若  $r_{x1}r_{x2} = 0$ , 由(16)式只能得到一个解  $K_{11}$ , 记

$$K_1 = K_{11}. \quad (18)$$

同理, 根据直线  $L_2$  与平面  $\Pi_{02}$  的距离关系可得到  $K$  的解  $K_2$ . 用  $K_1$  和  $K_2$  的值表示  $K$  有

$$K = \operatorname{sgn}(\kappa) \sqrt{(K_1^2 + K_2^2)}/2, \quad (19)$$

得到了  $K$ , 即可由(10)式和(12)式求得相对位置。

定位算法不依赖于相对姿态的解算, 保证了定位的独立性和可靠性。但相对姿态广泛存在于智能弹药与地面车辆快速弹目交会的过程中, 对目标成像的影响不可忽略, 对相对位置解算精度的影响具有一定的规律。

### 3 定位精度与相对姿态的关系

定位算法中, 用车体成像四边形近似中轴面成像的误差主要表现为车辆前后左右 4 个面的成像造成的成像误差。该误差的主要来源是弹目相对姿态。以目标坐标系相对测量坐标系的旋转角  $R = (\alpha, \beta, \gamma)$  表示相对姿态关系, 其中:  $\alpha$  是长轴  $P_2P_4$  与平面  $O_m x_m y_m$  的夹角;  $\beta$  是短轴  $P_3P_1$  与平面  $O_m x_m y_m$  的夹角;  $\gamma$  是短轴在平面  $O_m x_m y_m$  的投影与  $x_m$  轴的夹角。各旋转角正方向如图 4 所示, 图 4 已将测量坐标系平移使得其原点与目标形心重合。

$\gamma$  取值范围为  $-180^\circ \sim 180^\circ$ ,  $\alpha$  和  $\beta$  的取值与弹道倾角有关。弹道倾角  $\theta_1$  是弹轴和地面的夹角, 为获得最大作战效能, 该角取  $90^\circ \pm 20^\circ$ , 且满足<sup>[2]</sup>

$$\theta_1 = \frac{\pi}{2} \pm \arccos(\cos \alpha \cos \beta). \quad (20)$$

$|\alpha|$  和  $|\beta|$  增加时, 边缘提取误差增大, (2) 式所示特征误差增大, 使得各个中间变量的误差同向增

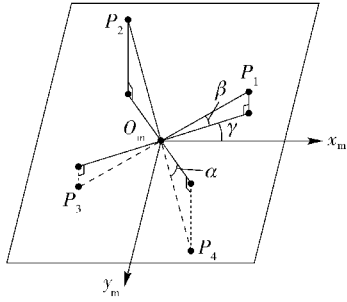


图 4 坐标系之间的相对旋转角

Fig. 4 Relative rotation angle between coordinate systems

大,从而  $\Delta T_{z_m}$  增大。 $\gamma$  只改变  $\alpha$  和  $\beta$  共同作用下目标成像与理论成像的偏差在图像  $x$ 、 $y$  轴上的投影,对(19)式影响很小,可忽略  $\gamma$  对  $T_{z_m}$  精度的影响。

先不考虑  $\gamma$  的影响, $\alpha$  和  $\beta$  不为  $0^\circ$  时,用车体成像四边形近似中轴面成像存在一定的误差。 $\alpha$  不影响成像宽度, $\beta$  不影响成像长度。一般地,由于车辆左右曲面与地平面的夹角更接近  $90^\circ$ , $\alpha$  对成像长度的影响小于  $\beta$  对成像宽度的影响,从而目标形心像点相对理论像点的偏差在图像中的目标长短轴上的投影  $E_1$  和  $E_2$  满足  $E_1 > E_2$ 。

考虑  $\gamma$  的影响,根据平面坐标系旋转关系,形心像点相对理论像点的图像坐标误差为

$$\begin{cases} \Delta x_g = E_2 \cos \gamma + E_1 \sin \gamma, \\ \Delta y_g = E_1 \cos \gamma - E_2 \sin \gamma. \end{cases} \quad (21)$$

由(10)式, $\Delta T_{x_m}$  和  $\Delta T_{y_m}$  的误差可表示为

$$\begin{cases} \Delta T_{x_m} = \frac{1}{f}(x_g \Delta T_{z_m} + T_{z_m} \Delta x_g), \\ \Delta T_{y_m} = \frac{1}{f}(y_g \Delta T_{z_m} + T_{z_m} \Delta y_g). \end{cases} \quad (22)$$

(21)式和(22)式表明: $\Delta T_{x_m}$  和  $\Delta T_{y_m}$  受 3 个旋转角的共同影响;形心像点坐标误差随着  $\gamma$  的变化而变化,但形心像点与理论像点的距离不变; $\gamma$  相同时, $\Delta T_{x_m}$  和  $\Delta T_{y_m}$  随着  $|\alpha|$  和  $|\beta|$  的增大而逐渐增大。

特别地, $\gamma = 0^\circ$  且  $T = (0 \text{ m}, 0 \text{ m}, T_{z_m})$  时有

$$\Delta y_g = y_g > x_g = \Delta x_g. \quad (23)$$

(22)式可改为

$$\begin{cases} \Delta T_{x_m} = \frac{T_{z_m} + \Delta T_{z_m}}{f} \Delta x_g, \\ \Delta T_{y_m} = \frac{T_{z_m} + \Delta T_{z_m}}{f} \Delta y_g. \end{cases} \quad (24)$$

此时, $\Delta y_g$  和  $\Delta x_g$  分别随着  $|\alpha|$  和  $|\beta|$  增加而增大,从

而  $\Delta T_{y_m}$  和  $\Delta T_{x_m}$  分别随着  $|\alpha|$  和  $|\beta|$  增加而增大。结合(23)式, $\alpha = \beta \neq 0^\circ$  时, $\Delta T_{y_m} < \Delta T_{x_m}$ 。

## 4 仿真分析

在 CPU 为 Core i5 3.1 GHz 的 PC 机上进行仿真实验,通过对由 3ds-Max 生成目标在不同位置、姿态下图像在 MATLAB R2010a 下的仿真来验证算法的有效性,并验证定位解算的误差规律。以尺寸为  $6.9 \text{ m} \times 3.6 \text{ m} \times 3.3 \text{ m}$  的 M60 坦克为例,采用  $f = 102.083 \text{ mm}$  的 135 相机,在  $T_{z_m}$  为  $50 \sim 100 \text{ m}$  情况下获取目标图像(车体成像完整),然后通过如下步骤解算  $T$ :

- 1) 全局阈值处理得到二值图像,利用 Canny 边缘检测法从二值图像中提取目标轮廓。
- 2) 利用霍夫变换检测并链接两条长边。
- 3) 分离长边像素点,以目标主体成像近似中轴面成像,并用最小外接四边形拟合之。
- 4) 利用中轴线法<sup>[8]</sup>获取轴线方程,确定轴线起始点,计算形心图像坐标。
- 5) 将轴线方程和形心坐标代入(2)式~(9)式计算目标坐标系三轴方向向量,然后代入(13)式~(19)式得到常数  $K$ ,最后由(10)式和(12)式解算  $T$ 。

### 4.1 定位误差规律验证

取  $\gamma = 0^\circ$  且  $T = (0 \text{ m}, 0 \text{ m}, 50 \text{ m})$ ,考虑图像的对称性和(20)式, $\alpha$  和  $\beta$  均取  $0^\circ \sim 20^\circ$ ,每隔  $5^\circ$  获取一幅图像。相对位置解算误差  $\Delta T$  如图 5 所示。

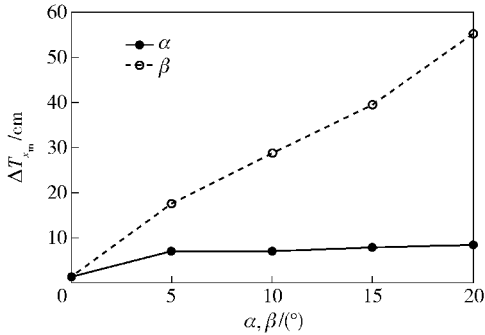
图 5 表明,实验结果与误差规律一致,即: $|\alpha|$  ( $|\beta|$ ) 增加, $\Delta T_{y_m}$  ( $\Delta T_{x_m}$ ) 增大,且  $\Delta T_{y_m} < \Delta T_{x_m}$ ;  $\Delta T_{z_m}$  随着  $|\alpha|$  和  $|\beta|$  的增加而逐渐增大, $\beta$  对  $\Delta T_{z_m}$  的影响更显著。

本文对其他 5 种类型车辆图像也进行了仿真,仿真结果与图 5 类似,进一步验证了相对姿态对定位精度的影响,并表明算法具有较好的稳定性。由于篇幅所限,在此不再赘述。

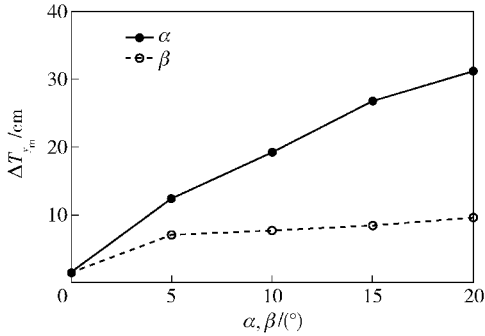
### 4.2 最大定位误差分析

最大误差是算法优劣的衡量标准之一,分析最大定位误差是验证定位算法精度和有效性的关键。

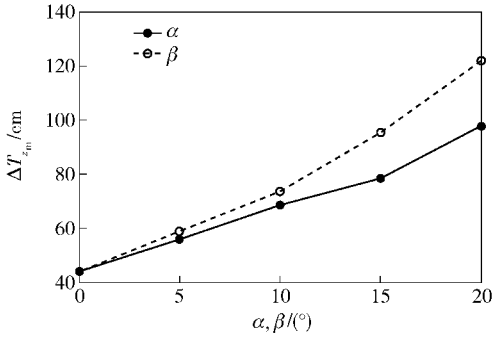
误差规律表明: $R$  固定时, $T_{z_m}$  增加,目标成像减小,直线提取误差增大; $|T_{x_m}|$  和  $|T_{y_m}|$  越大,目标成像距离主点越远,车体高度对目标成像的影响越显



(a)  $\alpha$ 和 $\beta$ 对 $\Delta T_{x_m}$ 解算误差的影响  
(a) Effect of  $\alpha$  and  $\beta$  on  $\Delta T_{x_m}$



(b)  $\alpha$ 和 $\beta$ 对 $\Delta T_{y_m}$ 解算误差的影响  
(b) Effect of  $\alpha$  and  $\beta$  on  $\Delta T_{y_m}$



(c)  $\alpha$ 和 $\beta$ 对 $\Delta T_{z_m}$ 解算误差的影响  
(c) Effect of  $\alpha$  and  $\beta$  on  $\Delta T_{z_m}$

图 5  $\alpha$ 和 $\beta$ 对相对位置解算误差  $\Delta T$  的影响

Fig. 5 Effect of  $\alpha$  and  $\beta$  on  $\Delta T$

著,  $\Delta T$  越大。定位误差最大时, 满足:  $T_{z_m} = 100 \text{ m}$  且  $T_{x_m}$  和  $T_{y_m}$  使得目标成像与像面角点相接。考虑到弹目成像空间的对称性, 目标成像与像面角点相接的情况如图 6 所示。图 6 中, M60 坦克的左下角点(炮筒图示方向为正前方)成像点与图像平面的右上角点相接, 弹目相对位置为  $(15.65 \text{ m}, -9.73 \text{ m}, 100 \text{ m})$ 。为确定最大定位误差, 需进一步确定目标坐标系和测量坐标系之间的相对旋转角, 因为旋转角的变化将影响坦克履带的成像大小, 从而使得目标成像尺寸和形状发生改变, 以致定位精度变化。

如图 6 所示, 目标成像与像面角点相接时, 像面

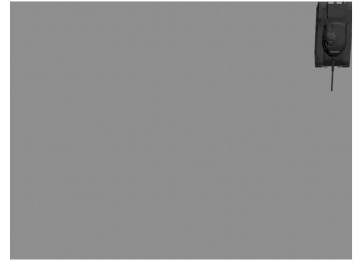


图 6 目标成像与像面角点相接

Fig. 6 Target image and image corner

角点附近空间有限,  $\gamma$  不影响目标成像的形状和大小, 不妨取为  $0^\circ$ 。  $\alpha$  和  $\beta$  对目标成像的影响仍转化为前后左右 4 个面成像对目标成像形状和大小的影响,  $|\alpha|$  或  $|\beta|$  取非零值时, 成像尺寸均大于理论尺寸, 需考虑二者对相对位置解算的影响。

考虑图像对称性并结合 (20) 式,  $T_{z_m} = 100 \text{ m}$  时,  $\beta$  在  $0^\circ \sim 20^\circ$  的取值范围内每隔  $5^\circ$  取值, 由 (20) 式计算弹道倾角为  $20^\circ$  时对应的  $\alpha$  (取正值), 然后将 M60 坦克移动至右下角, 使得 M60 坦克左上角点成像与图像平面右下角点  $r_3$  相接且成像完整。从而, 可得到  $T_{x_m}$ 、 $T_{y_m}$  和  $R$  的取值如表 1 所示, 每组位姿对应的相对位置解算误差如表 2 所示。

表 1  $T_{z_m} = 100 \text{ m}$  时的其他 5 个变量

Tab. 1 Other five variables for  $T_{z_m} = 100 \text{ m}$

变量	位姿 1	位姿 2	位姿 3	位姿 4	位姿 5
$\alpha / (^\circ)$	0	13.38	17.41	19.39	20.00
$\beta / (^\circ)$	20	15	10	5	0
$\gamma / (^\circ)$	0	0	0	0	0
$T_x / \text{m}$	15.95	15.68	15.66	15.65	15.64
$T_y / \text{m}$	9.70	9.72	9.73	9.73	9.73

表 2 表 1 中 5 组位姿下的相对位置解算误差

Tab. 2  $\Delta T$  of relative positions in five groups of pose in Tab. 1

	m				
误差	位姿 1	位姿 2	位姿 3	位姿 4	位姿 5
$\Delta T_{x_m}$	0.949	0.867	0.825	0.789	0.738
$\Delta T_{y_m}$	0.456	0.409	0.412	0.435	0.417
$\Delta T_{z_m}$	4.709	4.621	4.584	4.437	4.360

相对位置是最重要的弹目交会参数之一, 可用于确定目标位置和最佳起爆点。由表 2 可见, 定位相对误差小于 5%, 可实现高精度定位, 满足为智能

弹药提供辅助决策信息的需要。

## 5 结论

针对智能弹药成像引信对地面车辆的非合作定位需求,提出了一种高精度的适用范围广的成像引信定位算法。该算法充分利用了地面车辆固有的非合作长短轴线与成像空间中多条直线和多个平面的几何关系,利用单帧图像得到目标相对智能弹药的位置,可用于智能弹药与绝大部分地面车辆之间的定位。仿真分析表明:定位相对误差小于5%。算法能有效地实现成像引信高精度定位,可作为工程应用的参考。

本文设计的定位算法中,边缘和轴线等特征直线的提取误差对定位精度的影响不可忽略,实现高精度的特征直线提取是下一步研究的工作重心。

### 参考文献 (References)

- [1] Robbins F. Fuzes for Air Force unguided and precision guided weapons, ADA393861 [R]. FL,US: Air Armament Center, Eglin AFB, 2001.
- [2] 崔占忠,宋世和,徐立新. 近炸引信原理[M]. 第3版. 北京:北京理工大学出版社,2005.  
CUI Zhan-zhong, SONG Shi-he, XU Li-xin. Principle of proximity fuze [M]. 3rd ed. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2005. (in Chinese)
- [3] 于起峰,陆宏伟,刘肖琳. 基于图像的精密测量与运动测量[M]. 北京:科学出版社,2002.  
YU Qi-feng, LU Hong-wei, LIU Xiao-lin. Precision measurement and motion measurement based on image [M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese)
- [4] Grishin V A. Precision estimation of camera position measurement based on docking marker observation [J]. Maik Nauka-Interperiodica Publishing, 2010, 20(3):341-348.
- [5] 于勇,郭雷. 基于特征直线的目标被动定位方法[J]. 光电工程,2009,36(1):41-46.  
YU Yong, GUO Lei. Passive location method based on characteristic lines [J]. Opto-Electronic Engineering, 2009, 36(1):41-46. (in Chinese)
- [6] Wilezkowiak M, Boyer E, Sturm P. 3D modeling using geometric constraints: a parallelepiped based approach [C]//7th European Conference on Computer Vision 2002, Part IV. Copenhagen, Denmark: ECCV, 2002: 221-237.
- [7] Sasa S, Gomi H, Ninomiya T, et al. Position and attitude estimation using image processing of runway [C]//38th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, NV: AIAA, 2000: 10-13.
- [8] 于起峰,孙祥一,陈国军. 用光测图像确定空间目标俯仰角和偏航角的中轴线法[J]. 国防科技大学学报,2000,22(2):15-19.  
YU Qi-feng, SUN Xiang-yi, CHEN Guo-jun. A new method of measure the pitching and yaw of the axes symmetry object through the optical image [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2000, 22(2):15-19. (in Chinese)
- [9] 张广军. 视觉测量[M]. 北京:科学出版社,2008.  
ZHANG Guang-jun. Vision measurement [M]. Beijing: Science Press, 2008. (in Chinese)