

# 基于单目视觉的制导炮弹位姿参数测量方法<sup>\*</sup>

肖明杰, 陈 栋, 李 俊, 宁全利, 邵显涛

(解放军炮兵学院信息化弹药研发中心, 合肥 230031)

**摘 要:**为了给制导炮弹末端弹道的精确控制提供有效依据, 根据弹丸飞行弹道特性, 借鉴计算机单目视觉技术和摄影测量方法, 提出了一种基于四元数的炮弹位姿参数测量的新方法。该方法通过分析摄像机采集的目标区图像序列, 利用 4 个已知空间坐标的非共面控制点, 建立过渡坐标系, 分两步来计算炮弹的空间位置和姿态参数。仿真结果表明, 测量误差随着相对距离减小而收敛。提出的新方法可以精确测量炮弹的位姿参数, 作为构建弹道控制模型的基础。

**关键词:**制导炮弹; 单目视觉; 四元数; 相对位置; 相对姿态

**中图分类号:** TJ012.3    **文献标志码:** A

## A Measuring Method for Position and Attitude Parameters of Certain Guided Projectile Based on Monocular Vision Model

XIAO Mingjie, CHEN Dong, LI Jun, NING Quanli, SHAO Xiantao

(Informational Ammunition Research and Developing Center, Artillery Academy of PLA, Hefei 230031, China)

**Abstract:** In order to support the precise terminal trajectory control of a certain guided projectile effectively, a new measuring method for position and attitude parameters was presented. The method is based on the flight trajectory characteristics, the computer monocular vision, computational photogrammetric and quaternion. The method was proposed by analyzing the target area image sequence collected by projectile-borne camera and four non-coplanar reference points whose space coordinates had been known were used. The spatial position and attitude parameter computation of projectiles was divided into two steps via transitional reference frame. The solution was validated by mathematical simulation results which show that the relative measuring error is constringing when the relative distance from projectile to target area is reducing. The new method presented in this paper can be used for measuring the position and attitude parameters of projectiles accurately, laying the foundation for trajectory control modeling.

**Keywords:** guided projectile; monocular vision; quaternion; relative position; relative attitude

### 0 引言

利用计算机视觉技术及摄影成像原理, 测量目标的相对位姿具有非常重要的意义。该方法在空中目标飞行器的位姿测量中得到了很好的应用<sup>[1-2]</sup>。文献<sup>[2]</sup>首次将摄影测量学引入制导炮弹末端弹道参数的测量研究中, 提出在炮弹所摄取的目标区图像上采用至少 6 个以上的地面控制点坐标解算摄像机位姿参数。由于摄像机和炮弹弹体固联, 得到了摄像机的位姿参数也就得到了炮弹的空中位姿参数。但在弹道末端视场所能捕捉到的范围逐渐减小, 而且弹道逐渐向下弯曲, 图像中所能同时捕捉到的控制点数目得

不到保证。因此文中在保证测量精度的同时减少控制点数目, 提出了一种基于四元数求解制导炮弹位姿参数的新方法。该算法避免了位姿参数确定的多值问题<sup>[3-4]</sup>, 可实现位姿参数的有效测量。

### 1 坐标系的建立

#### 1.1 常用坐标系的建立

文中选用小孔成像作为摄像机成像模型。定义坐标系如图 1 所示。

1) 地面坐标系  $O_F X_F Y_F Z_F$ 。作为确定弹丸飞行的空间位置和姿态等弹道参数的基准。 $O_F$  位于炮弹的发射点,  $O_F X_F$  轴为射击平面与水平面

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2008-10-23

作者简介: 肖明杰(1983-), 男, 湖北武汉人, 硕士研究生, 研究方向: 信息化弹药研究与应用。

的交线,指向射击方向为正; $O_F Y_F$  轴在射击平面内垂直于  $O_F X_F$  轴,指向上方为正; $O_F Z_F$  轴由右手坐标系确定。为叙述方便,简记为 F 系。

2) 图像坐标系。 $(U, V)$  表示以像素为单位的图像坐标系坐标<sup>[1]</sup>,每一像素的坐标分别是该像素在图像中所有像素点所组成数组的列数与行数; $(X, Y)$  为以 mm 为单位的图像坐标系坐标, $O$  为光轴与像平面的交点, $O_c O$  为焦距  $f$ 。

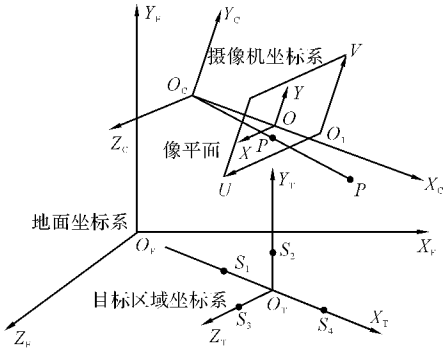


图 1 弹载摄像机小孔成像模型

3) 摄像机坐标系  $O_c X_c Y_c Z_c$ 。 $O_c$  为摄像机光心即投影中心, $O_c X_c$  轴与弹轴重合,垂直于像平面,取投影方向为正; $O_c Y_c$  轴在包含弹轴的铅垂面内且垂直于弹轴,指向上方为正; $O_c Z_c$  轴方向按右手坐标系确定。 $O_c Z_c$  轴与  $O_c Y_c$  轴分别与  $O_1 U$  轴与  $O_1 V$  轴平行。将该系简记为 C 系。

### 1.2 过渡坐标系的建立

按照文献[2] 布设方法在目标区域事先布置若干个已知其精确空间坐标的控制点。选取视场中心附近的 4 个地面控制点建立该过渡坐标系记为  $O_T X_T Y_T Z_T$ 。将其简记为 T 系。为研究方便,在这些控制点中,要求至少有 3 点高程相等,以确定一个平面  $S_1 S_2 S_3 // O_F X_F Z_F, S_3 O_T \perp S_1 S_2$

交点记为坐标原点  $O_T$ ,而且  $S_4 O_T \perp S_1 S_2 S_3$ 。如图 1 所示。

假设控制点  $S_i (i = 1, 2, 3, 4)$  在 F 系中的坐标分别为  $S_{Fi} = [X_{Fi} \ Y_{Fi} \ Z_{Fi}]^T (i = 1, 2, 3, 4)$ ,在 T 系中坐标分别为  $S_{T1} = [a \ 0 \ 0]^T, S_{T2} = [b \ 0 \ 0]^T, S_{T3} = [0 \ 0 \ c]^T, S_{T4} = [0 \ d \ 0]^T$ 。则由平面几何关系可确定上述 4 点坐标:

$$a = -S_{F1} O_T = -S_{F1} S_{F3} \cdot \cos \angle S_{F3} S_{F1} S_{F2} \quad (1)$$

$$b = O_T S_{F2} = S_{F1} S_{F2} - S_{F1} O_T = S_{F1} S_{F2} + a \quad (2)$$

$$c = O_T S_{F3} = \sqrt{S_{F1} S_{F3}^2 - S_{F1} O_T^2} = \sqrt{S_{F1} S_{F3}^2 - a^2} \quad (3)$$

$$d = O_T S_{F4} = Y_{F4} - Y_{F1} = Y_{F4} - Y_{F2} = Y_{F4} - Y_{F3} \quad (4)$$

$S_{F1} S_{F2}, S_{F1} S_{F3}$  和  $S_{F2} S_{F3}$  由空间两点距离公式易求得,  $\cos \angle S_{F3} S_{F1} S_{F2}$  由余弦公式确定。

## 2 基于四元数法的位姿参数摄影测量原理

### 2.1 四元数的相关知识

设  $O X_b Y_b Z_b$  为载体坐标系 b,  $O X_n Y_n Z_n$  为参考坐标系 n,则由 b 系到 n 系的坐标变换矩阵  $C_b^n$  就是载体的姿态矩阵。运载体的空间姿态可看作依次绕航向轴、俯仰轴、横滚轴作基本旋转的复合结果<sup>[5]</sup>。如图 2 所示。

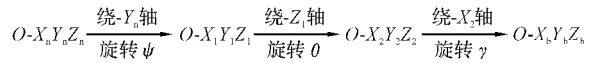


图 2 坐标系旋转顺序图

则用 3 个欧拉角和四元数  $Q$  确定的姿态矩阵分别为:

$$C_b^n = \begin{bmatrix} \cos \phi \cos \theta & -\sin \gamma \sin \phi - \cos \gamma \cos \phi \sin \theta & -\cos \gamma \sin \phi + \sin \gamma \cos \phi \sin \theta \\ \sin \theta & \cos \gamma \cos \theta & -\sin \gamma \cos \theta \\ \sin \phi \cos \theta & \sin \gamma \cos \phi - \cos \gamma \sin \phi \sin \theta & \cos \gamma \cos \phi + \sin \gamma \sin \phi \sin \theta \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$C_b^n = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1 q_2 - q_0 q_3) & 2(q_1 q_3 + q_0 q_2) \\ 2(q_1 q_2 + q_0 q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2 q_3 - q_0 q_1) \\ 2(q_1 q_3 - q_0 q_2) & 2(q_2 q_3 + q_0 q_1) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

由式(5)、式(6) 对比可以发现  $T_{21} = \sin \theta, T_{23}/T_{22} = -\tan \gamma, T_{31}/T_{11} = \tan \phi$ 。可解出:

$$\begin{cases} \phi_{\pm} = \arctan(T_{31}/T_{11}) = \arctan(2(q_1 q_3 - q_0 q_2)/(q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2)) \\ \gamma_{\pm} = \arctan(-T_{23}/T_{22}) = \arctan(-2(q_2 q_3 - q_0 q_1)/(q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2)) \\ \theta = \arcsin(T_{21}) = \arcsin(2(q_1 q_2 + q_0 q_3)) \end{cases} \quad (7)$$

### 2.2 位姿参数的摄影测量模型

第一步,先求 T 系与 C 系的位姿关系,确定

C 系即制导炮弹在 T 系中的位姿参数。这一步是关键。由刚体运动理论可认为  $S_{Ti}$  到  $S_{Ci}$  是由坐标

系之间的旋转和平移变换得到的。即：

$$S_{C_i} = M S_{T_i} + T \quad (8)$$

其中： $T = [T_x \quad T_y \quad T_z]^T$  为正交平移向量，表示  $O_T$  在 C 系中的位置坐标， $M$  为由四元数表示的 T 系到 C 系的正交旋转矩阵。利用计算机单目视觉，由四元数法可以求出  $M$  和  $T$ 。

由式(8)有  $M^T \cdot M \cdot S_{T_i} = M^T(S_{C_i} - T)$ 。显然， $S_{T_i}$  所在的 T 系相当于 n 系， $S_{C_i}$  所在的 C 系相当于 b 系，可知  $M = C_n^b$ 。由单位正交矩阵性质有  $C_n^b = (C_n^b)^{-1} = (C_n^b)^T$ ，故  $M^T M = I$ 。且  $O_C$  在 C 系中坐标有  $S_C = [0 \quad 0 \quad 0]^T$ ，则由上式可得  $O_C$  在 T 系中的坐标为  $T_1 = -M^T \cdot T$ 。

以上即得到了弹丸在 T 系中的位姿参数  $T_1$  和  $M^T$ 。

第二步，确定 C 系与 F 系位姿关系，得到制导炮弹在 F 系中的位置姿态参数。在求出了制导炮弹相对于 T 系的位置姿态后，需要结合 T 系与 F 系的转换关系，将其换算为相对于 F 系的位置姿态，这就是最终所要求的制导炮弹的空间位置和姿态。则：

$$S_{F_i} = M_2 \cdot S_{T_i} + T_2 \quad (9)$$

$T_2$  为  $O_T$  在 F 系中的坐标， $M_2$  为 T 系相对于 F 系的姿态矩阵。将控制点坐标代入上式，结合  $M_2$  的表达式，由得到的方程组容易求解出  $T_2$  和  $M_2$ 。

结合式(8)、式(9)有：

$$\begin{aligned} S_{F_i} &= M_2 \cdot S_{T_i} + T_2 = \\ &M_2 \cdot (M^T \cdot S_{C_i} + T_1) + T_2 = \\ &(M_2 \cdot M^T) \cdot S_{C_i} + M_2 \cdot (-M^T \cdot T) + T_2 = \\ &(M_2 \cdot M^T) \cdot S_{C_i} + (-M_2 \cdot M^T \cdot T + T_2) \end{aligned} \quad (10)$$

假设 C 系到 F 系的位置姿态关系式为：

$$S_{iF} = M_3 \cdot S_{iC} + T_3 \quad (11)$$

与上式对比可知：

$$M_3 = M_2 \cdot M^T \quad (12)$$

$$T_3 = -M_2 \cdot M^T \cdot T + T_2 \quad (13)$$

此时，F 系相当于 n 系，C 系相当于 b 系，可知  $M_2 = C_n^b$ 。从而由式(7)、式(12) 可得最终要求的 C 系即制导炮弹相对于 F 系的姿态角以及在 F 系中的位置坐标。

### 2.3 确定弹丸位姿参数的四元数法

下面就利用四元数来推导上述模型中的第

一步。由小孔成像线性模型可知，控制点与其像点的变换方程<sup>[3]</sup>：

$$T_x X_i = f Z_{iC}, \quad T_x Y_i = f Y_{iC} \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (14)$$

若单个像素点在图像平面 X 轴与 Y 轴方向上的物理尺寸为 dX、dY，则图像中任意一个像素点有如下关系：

$$\begin{cases} U = \frac{X}{dX} + U_0 \\ V = \frac{Y}{dY} + V_0 \end{cases} \quad (15)$$

$$M_1 = \begin{bmatrix} f/dX & 0 & U_0 \\ 0 & f/dY & V_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$M_1$  为摄像机内参数矩阵<sup>[1]</sup>。事先由摄像机标定得到。

将控制点坐标代入式(8)，并结合式(6)、式(14)、式(15) 得到该坐标值表达式，得到关于四元数  $q_0、q_1、q_2、q_3$  的方程组：

$$\begin{cases} q_1 q_3 + q_0 q_2 = \frac{U_2 - U_1}{2b - 2a} \cdot \frac{dX}{f} \cdot T_x = K_1 T_x \\ q_1 q_2 - q_0 q_3 = \frac{V_2 - V_1}{2b - 2a} \cdot \frac{dY}{f} \cdot T_x = K_2 T_x \\ q_0 q_1 + q_2 q_3 = \frac{b(V_3 - V_1) - a(V_3 - V_2)}{2c(b - a)} \cdot \frac{dY}{f} \cdot T_x = K_3 T_x \\ q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 = \frac{b(U_3 - U_1) - a(U_3 - U_2)}{2c(b - a)} \cdot \frac{dX}{f} \cdot T_x = K_4 T_x \\ q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 = \frac{b(V_4 - V_1) - a(V_4 - V_2)}{d(b - a)} \cdot \frac{dY}{f} \cdot T_x = K_5 T_x \\ q_2 q_3 - q_0 q_1 = \frac{b(U_4 - U_1) - a(U_4 - U_2)}{d(b - a)} \cdot \frac{dX}{f} \cdot T_x = K_6 T_x \\ q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 = 1 \end{cases} \quad (17)$$

经过运算可得：

$$T_y = T_x \cdot \frac{b(V_1 - V_0) - a(V_2 - V_0)}{b - a} \cdot \frac{dY}{f} \quad (18)$$

$$T_z = T_x \cdot \frac{b(U_1 - U_0) - a(U_2 - U_0)}{b - a} \cdot \frac{dX}{f} \quad (19)$$

由式(17) 经过一定数学变换,得到关于  $T_x$  的二次方程:

$$(K_4^2 + 4K_1^2 + 4K_2^2 + 4K_3^2 + 4K_6^2 + K_5^2)T_x^2 = 2 \quad (20)$$

由图 1 空间几何关系可知,控制点及坐标原点  $O_T$  均位于  $O_C X_C$  轴正半轴区域,故取  $T_x$  的正实根。则:

$$T_x = \sqrt{\frac{2}{K_4^2 + 4K_1^2 + 4K_2^2 + 4K_3^2 + 4K_6^2 + K_5^2}} \quad (21)$$

$$q_0 = \sqrt{\frac{1}{4}(K_4 + K_5)T_x + \frac{1}{2}\sqrt{[\frac{1}{4}(K_4 + K_5)^2 + (K_3 - K_6)]T_x^2}}$$

$$q_1 = \frac{K_3 - K_6}{2q_0}T_x, q_2 = \frac{q_0 K_1 + q_1 K_2}{q_0^2 + q_1^2}T_x, q_3 = \frac{q_1 K_1 - q_0 K_2}{q_0^2 + q_1^2}T_x \quad (24)$$

综上所述,所求的位置姿态参数是关于摄像机内部参数  $f/dX, f/dY, (U_0, V_0)$  和控制点像素坐标  $(U_i, V_i) (i = 1, 2, 3, 4)$  以及坐标  $a, b, c, d$  的解析表达式。由式(16) 通过摄像机标定可确定摄像机内部参数,由图像处理可得到各控制点的像素坐标,由式(1) ~ 式(4) 可得  $a, b, c$  和  $d$  的值。因此由式(18)、式(19)、式(21)、式(24) 可计算得到  $M$  和  $T$ 。从而得到弹丸在  $T$  系中的位姿参数  $T_1$  和  $M^T$ 。

### 3 仿真分析

文中不考虑弹丸滚转,以消除旋转后的图像作为研究对象。因实验条件有限,对算法第一步进行数字仿真,以验证文中四元数算法的有效性。

假定图像尺寸为  $768 \times 576$ ,摄像机的内部参数矩阵  $M_1$  事先已经过标定,  $(U_0, V_0) = (768/2, 576/2), f/dX = 800, f/dY = 600$ 。为简化运算,假设控制点坐标为:  $S_{T1} = [-5 \ 0 \ 0]^T, S_{T2} = [5 \ 0 \ 0]^T, S_{T3} = [0 \ 0 \ 5]^T, S_{T4} = [0 \ 5 \ 0]^T$ 。假定姿态角  $[\psi \ \theta \ \gamma]^T = [0 \ 23^\circ \ 0]^T$ 。图 3 给出了平移分量分别为  $T = [200 \ -1 \ 1 \ 10 \ 0]^T$  和  $T = [2000 \ -10 \ 10 \ 10 \ 0]^T$  的近距离和远距离时位置姿态参数随  $T_x$  的仿真变化曲线。

从图 3 中可以看出:随着相对距离由远及近

结合等式  $4(q_0^2 + q_1^2)^2 = [2(q_0^2 - q_1^2)]^2 + 4(2q_0q_1)^2$ , 即有:

$$q_0^2 + q_1^2 = \sqrt{[\frac{1}{4}(K_4 + K_5)^2 + (K_3 - K_6)]T_x^2} \quad (22)$$

与式(17) 第 4、5 项运算可得:

$$q_0^2 = \frac{1}{4}(K_4 + K_5)T_x + \frac{1}{2}\sqrt{[\frac{1}{4}(K_4 + K_5)^2 + (K_3 - K_6)]T_x^2} \quad (23)$$

由于四元数及其相反数表示相同的旋转,因此可选择  $q_0$  符号为正。并且求得  $q_0, q_1$  后,式(17) 中第 1、2 项可看作未知量的线性方程组,则有:

变化时,弹丸逐渐接近地面,姿态角和平移分量误差逐渐减小,呈收敛的趋势。近距离时,姿态角的最大绝对误差不到  $0.2^\circ$ ,平移分量最大绝对误差不到  $0.6m$ ,最大相对误差均不到  $1\%$ ;与近距离时对比可知,曲线变化规律极为相似,远距离位姿参数的测量精度,比  $200m$  左右时的近距离的精度降低约一个数量级。原因主要是弹丸飞行过程中俯仰角的存在,使得式(17) 中控制点在  $C$  系中的坐标用相对距离  $T_x$  近似,导致位姿参数测量误差逐渐增大。

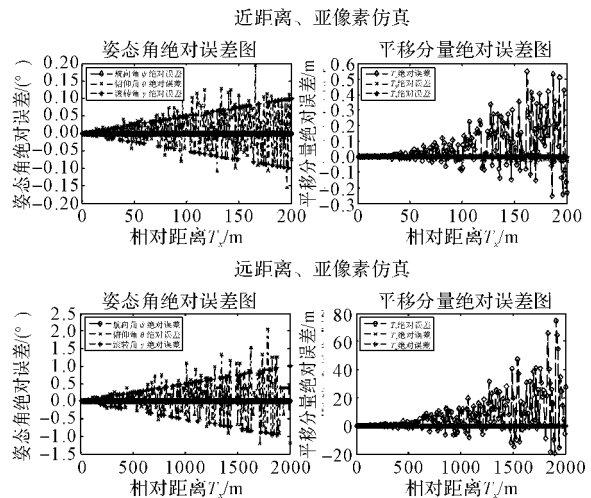


图 3 近距离和远距离时位姿参数测量误差亚像素仿真

### 4 结论

针对在弹道末端摄像机视场所能同时捕捉到的控制点数量得不到保证这一情况,文中仅利用目标区域 4 个非共面控制点,提出了一种测量制导炮弹位姿参数的四元数法。该方法以炮弹抗过载技术为支撑<sup>[6-7]</sup>,只有这样摄像机才能稳定采集目标区图像。通过仿真可知,运用该算法测量炮弹的位姿参数可以取得较好的效果,特别是在近距离时测量相对误差均不到 1%,以满足精度要求。为抑制位姿参数测量误差的发散,可以通过修正摄像机成像模型提高精度。

#### 参考文献:

[1] 李清安. 空中目标姿态测量技术及其仿真实验研究[D]. 中国科学院研究生院, 2006.  
 [2] 钱立志, 陶声祥, 张江辉. 制导炮弹末端弹道空中姿

态遥测方法研究[J]. 弹箭与制导学报, 2007, 27(1): 138-140.

[3] R Mukundan, K R Ramakrishnan. A quaternion solution to the pose determination problem for rendezvous and docking simulations[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 1995, 39(1/2): 143-153.  
 [4] 张世杰, 曹喜滨, 陈雪芹. 航天器相对位姿参数光学测量解析算法[J]. 航空学报, 2005, 26(2): 214-218.  
 [5] 刘希珠, 雷田玉. 陀螺力学基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 1987.  
 [6] 李世永, 钱立志, 王志刚. 弹载侦察系统抗过载技术研究[J]. 弹道学报, 2005, 17(3): 31-35.  
 [7] 钱立志. 弹载任务设备抗高过载方法研究[J]. 兵工学报, 2007, 28(8): 1017-1020.

(上接第 256 页)

后面的两发与其相比径向都有较大的振动,且在 X、Y 方向上,弹丸在离开轨道的瞬间振动加速度都会突然增大,而在 Z 方向上,弹丸离开轨道后加速度则逐渐衰减。

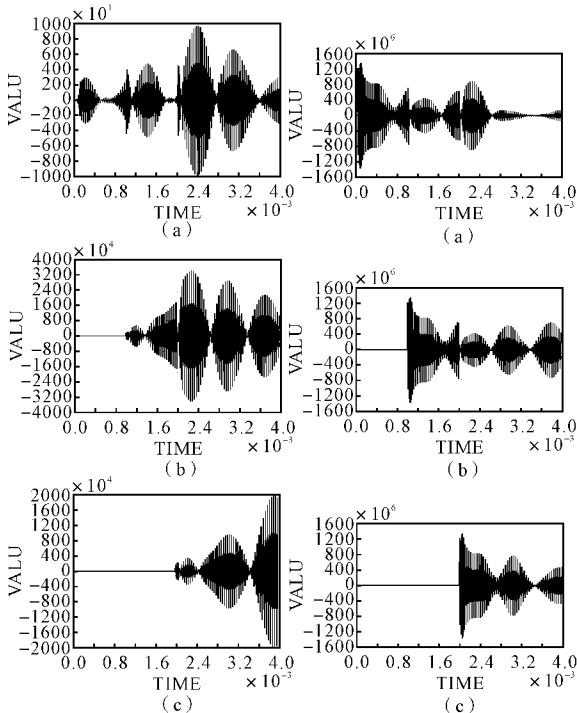


图 7 Y 方向加速度  
振动曲线图

图 8 Z 方向加速度  
振动曲线图

### 3 结论

1) 多轨道炮发射的 3 发弹中,最先发射的弹丸受炮身振动影响最小,而后面的两发与其相比都受炮身振动的较大影响;

2) 弹丸离开轨道瞬间,振动加速度在 X、Y 方向上都会突然增大,而在 Z 方向上,弹丸离开轨道后振动加速度则逐渐衰减;

3) 正在发射时的弹丸对其它轨道中的待发弹丸的振动有所影响,但是相对于其它待发弹丸本身发射时弹、炮引起的振动幅度,这种影响可忽略不计。即多轨道炮发射时弹丸的相互影响是次要的。

#### 参考文献:

[1] 杨增辉. 不是导弹,胜似导弹——美国海军电磁轨道炮正式上马[J]. 兵工科技, 2007(10): 43-45.  
 [2] 荣光, 黄德武, 易文俊. 小口径杆式脱壳穿甲弹膛内发射振动分析[J]. 弹箭与制导学报, 2004, 24(3): 135-138.  
 [3] 易兴利, 黄德武. 大长径比火箭弹在瞬态冲击下的振动响应[J]. 弹箭与制导学报, 2003, 23(3): 39-42.