激光制导武器半实物仿真的误差分析与校正

范世鹏[1],林德福[1],王靳然[2],王 伟[1]

(1. 北京理工大学 宇航学院,北京 100081; 2. 北京理工大学 设计学院,北京 100081)

摘 要:根据激光半主动制导武器的特点建立了该类武器制导与控制系统半实物仿真模型。通过分析误差对半实物仿真的影响,指出几何误差的影响较大,并建立了误差数学模型。通过数学仿真,在脱靶量的允许范围内给出了最大允许角误差。为消除误差,设计了导引头闭环跟踪半实物仿真实验。利用仿真结果建立了误差参数超定非线性方程组,并使用牛顿迭代法和加权最小二乘法的组合算法来解算。此项研究工作有效地提高了仿真精度,同时也提高了基于该类平台半实物仿真实验的置信度。

关键词:半实物仿真; 末制导武器; 激光半主动导引头; 误差分析与校正

中图分类号:TJ765.4 **文献标志码**:A **文章编号**:1007-2276(2013)04-0904-05

Error analysis and correction for hardware-in-the-loop simulation system of laser guidance weapon

Fan Shipeng[1], Lin Defu[1], Wang Jinran[2], Wang Wei[1]

(1. School of Aerospace Science, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
2. College of Art and Design, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: According to the characteristic of laser guided weapon, a hardware-in-the-loop simulation (HILS) model for guidance and control system was founded. Then, all kinds of errors impacting on simulation system, especially geometric error, were analyzed, and a guidance model with error was created. Through the mathematic simulation, the maximal angle error was given to limit miss distance within allowable range. In order to correct the geometric error, a model of HILS was developed for seeker to track a certain laser spot on curtain. Using the obtained results, nonlinear over determined equations of error parameters were established. With combination of Newton iteration method and weighted least square method, the error parameters were solved and geometric model was corrected accurately. The results indicate that this approach has achieved exceptional accuracy and reliability, which is significant for next phase of HILS.

Key words: hardware-in-the-loop simulation(HILS); terminal guided weapon; laser semi-active seeker; error analysis and correction

收稿日期:2012-08-11; **修订日期**:2012-09-13

基金项目:国家自然科学基金(61172182)

作者简介:范世鹏(1986-),男,博士生,主要从事飞行器制导与控制、半实物仿真方面的研究。Email:zttfanshipeng@sina.com

导师简介:林德福(1971-),男,副研究员,博士,主要从事飞行器总体设计方面的研究。Email:lindf@bit.edu.cn

0 引 言

半实物仿真将弹上部件引入仿真回路,节省成本,缩短研发周期,是一种有效的设计和评价手段[1]。但仿真系统存在各种误差因素,会降低仿真精度,影响仿真置信度。因此,误差研究对仿真技术具有重要意义。

近年来,越来越多的学者们致力于误差研究。张鸿喜[2]提出了导引头安装误差下误差修正方法;孟秀云[3]详细阐述了包括模拟器动态特性在内的仿真误差源;肖卫国[4-5]定量分析了量化误差、计算误差和模拟器误差等带来的误差;孟代奎[6]提出消除转台误差对旋转导弹影响的解决途径;毕业[7]分析了半实物仿真弹道偏离理论仿真的因素，指出视线角滞后是主要因素。

文中主要针对半实物仿真的室内布局，结合飞行试验外场环境建立误差模型，并通过一种半仿真实验，使用牛顿迭代和最小二乘组合算法解算误差参数对误差进行校正。

1 半实物仿真系统

为评价激光半主动弹药末端制导的飞行品质性能与命中精度,将导引头、角速率陀螺和弹上计算机等器件引入仿真回路,建立六自由度弹道数学模型[8-9]与几何关系模型，设计制导与控制系统的半实物仿真模型,其结构组成如图 1 所示。

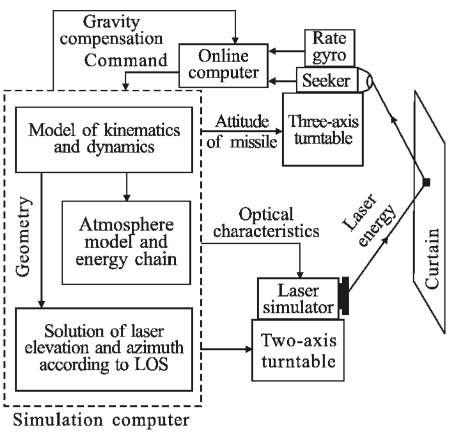

图 1 末制导段弹道半实物仿真框图

Fig.1 HILS model for terminal guided trajectory

激光模拟器将激光光斑投射在漫反射幕布,当视线误差角不为零时,导引头接收到光斑能量,产生光轴进动信号并生成制导指令传输给仿真机。由仿真机完成六自由度弹道实时解算，并将弹体姿态作为三轴转台的指令来模拟弹体俯仰和偏航角运动；由导弹与目标的相对关系，仿真机通过几何关系模型得到出两轴转台的角度指令，用以模拟真实弹目视线(Line of Sight, LOS)。

2 误差分析

仿真系统使用高动态性能的模拟器，动态误差即可忽略不计。但由于系统利用小尺寸空间来模拟真实作战环境,静态误差对仿真系统的影响较严重,因此,静态误差必须修正在允许范围内。

基于半实物仿真反射式光学仿真原理，静态误差源主要有导引头等制造误差与初始安装误差,模拟器回转中心位置误差,反射幕垂直度、平行度,以及导引头、反射幕与激光模拟器三者布局的几何误差等,如图 2 所示。以上误差因素的复杂性和多元化使误差分析与校正更为困难。

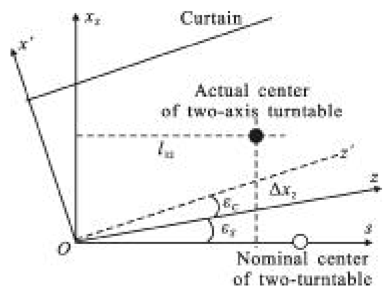

图 2 几何误差的俯视示意图

Fig.2 Diagram of geometric errors in top view

仿真中的几何误差与对应的真实弹道误差之间的关系如图 3 所示。当幕布上的激光位置误差尺寸为 e_x 时,由几何相似原理可得弹道真实误差尺寸 $e_x'=Ae_x$。初始时刻导弹末制导射程约为 2 km,l_{30} 约为

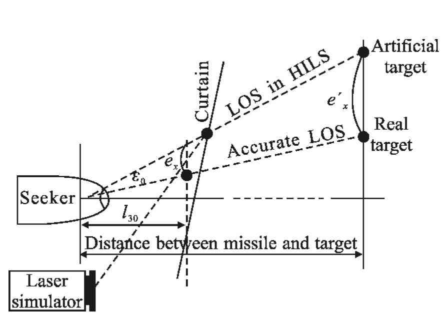

图 3 仿真误差示意图

Fig.3 Diagram of error in HILS

4~5 m，则误差放大系数 A≈500~400，A 值随弹目相对距离的减小而逐渐减小，即静态误差的影响随仿真时间的进行而减小。

由以上分析可知，任何静态几何误差都可转化为常值视线误差角和导引头初始误差角。为分析误差对弹道仿真带来的影响，在弹目视线坐标系下，考虑导引头动态过程，建立引入静态误差并包含自动驾驶仪弹体环节的制导回路数学模型，如图 4 所示。

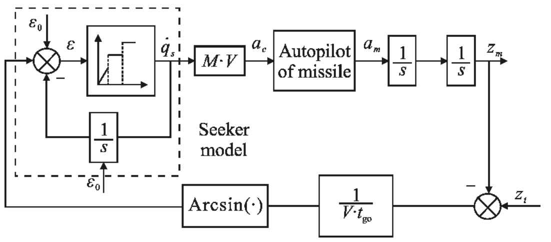

图 4 引入静态误差的制导模型

Fig.4 Model of guidance loop with static geometric error

在不同静态几何误差的条件下进行数学仿真，弹道误差如图 5 所示。

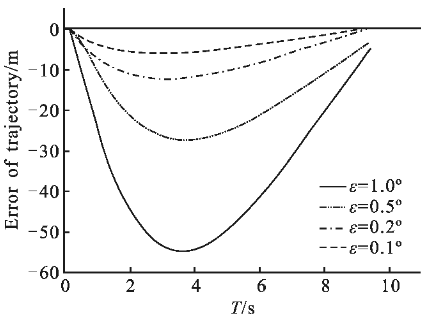

图 5 视线误差角引起的质点弹道误差结果

Fig.5 Errors of trajectory with different LOS angle errors

仿真结果表明，几何误差所引起的常值视线误差角对弹道仿真结果影响较大。当几何误差变大时会增大脱靶量。当落点在毁伤半径以外时认为半实物仿真失效。为使仿真具有较高的置信度并将脱靶量控制在 2.5 m 以内，误差角必须在 0.2°以下。

3 误差建模与校正

3.1 导引头闭环实验

动力陀螺式导引头在解锁后工作时间短，不便于重复实验，因此，导引头不解锁，搭载于三轴转台，以转台模拟其进动。目标模拟器搭载于两轴转台，并由该转台给定初始视线误差角。自动驾驶仪根据导引头的输出信号给出弹体系舵指令，由此解算光轴进动角速率。进动过程使误差角减小，当误差角减小为零时，光轴对准光斑，舵指令为零，转台停止进动。实验模型如图 6 所示。

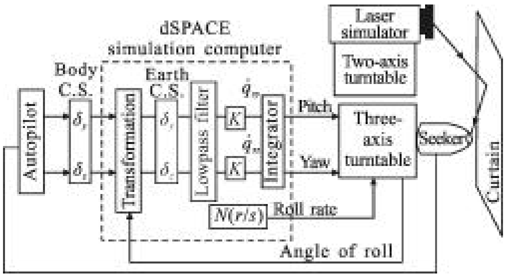

图 6 导引头跟踪光斑的仿真实验示意图

Fig.6 HILS diagram of seeker tracking laser spot

两轴转台给定误差角，进行以上模型的半实物仿真实验，三轴转台模拟导引头进动曲线如图 7 所示。

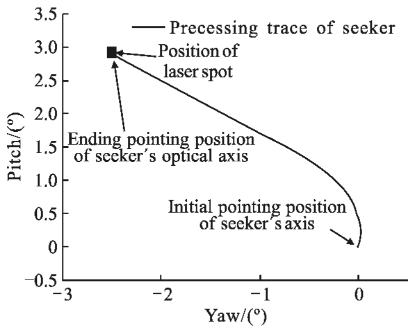

图 7 转台模拟导引头的进动曲线

Fig.7 Curve of stimulant seeker's procession

3.2 误差模型

为简化模型并便于误差校正，以导引头光心为坐标原点，以光轴为 Ox 轴，转台回转中心连线为 Oz 轴，建立惯性坐标系 Oxyz。系统的理论几何关系如图 8 所示。幕布为铅垂面，与 Oz 轴平行，转台回转中心与反射幕的距离为 l_{30}，两转台的距离为 l_{32}。

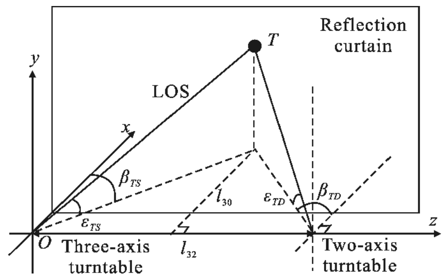

图 8 仿真系统布局的几何示意图

Fig.8 Geometric diagram of system layout

设在弹道的地面坐标系下真实目标坐标为(x_r, y_r, z_r)，则在惯性坐标 Oxyz 下为：

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\lambda & -\sin\lambda & 0 \\ \sin\lambda & \cos\lambda & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ z_r \end{bmatrix}$$

式中：λ 为常值角度。在坐标系 Oxyz 下，LOS 所在直线方程表达式为：

$$\frac{x}{x_r\cos\lambda - y_r\sin\lambda} = \frac{y}{x_r\cos\lambda + y_r\sin\lambda} = \frac{z}{z_r} \quad (1)$$

由 $x_M = l_{30}$，可计算出光斑坐标：$y_M = \dfrac{x_r\cos\lambda + y_r\sin\lambda}{x_r\cos\lambda - y_r\sin\lambda}$，$z_M = \dfrac{z_r \cdot l_{30}}{x_r\cos\lambda - y_r\sin\lambda}$。

由此可得两轴转台高低、方位指令：

$$\varepsilon_{TD} = \arctan\frac{y_M}{\sqrt{x_M^2 + (l_{32} - z_M)^2}} \quad \beta_{TD} = \arctan\frac{l_{32} - z_M}{x_M} \quad (2)$$

以上理论模型给半实物仿真带来的误差不可忽略，因此，在考虑几何误差的情况下对几何进行建模。

在坐标系 Oxyz 下，设激光模拟器回转中心坐标为(Δx_2, Δy_2, l_{32})，初始角误差为 $\Delta\beta$。设三轴转台到幕布距离为 l_{30}，幕布平面绕 Oy 轴转角为 η，如图 9 所示。则幕布所在平面的法向量为(1, 0, $\tan\eta$)，其空间方程为：

$$(x - l_{32}\cos\eta) - \tan\eta \cdot (z + l_{30}\sin\eta) = 0 \quad (3)$$

联立公式(1)、(3)得到幕布上的光斑坐标为：

$$x_M = \frac{(x_r\cos\lambda - y_r\sin\lambda) \cdot l_{30}(\cos\eta + \tan\eta \cdot \sin\eta)}{x_r\cos\lambda - y_r\sin\lambda - \tan\eta \cdot z_r}$$

$$y_M = \frac{(x_r\cos\lambda + y_r\sin\lambda) \cdot l_{30}(\cos\eta + \tan\eta \cdot \sin\eta)}{x_r\cos\lambda - y_r\sin\lambda - \tan\eta \cdot z_r}$$

$$z_M = \frac{z_r \cdot l_{30}(\cos\eta + \tan\eta \cdot \sin\eta)}{x_r\cos\lambda - y_r\sin\lambda - \tan\eta \cdot z_r} \quad (4)$$

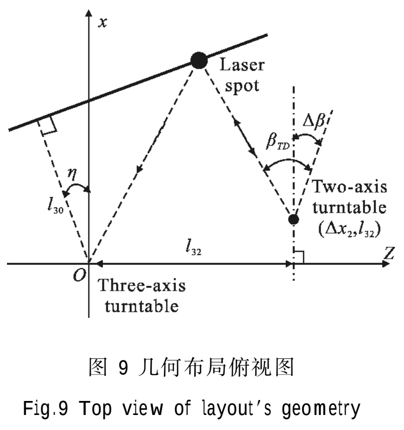

图 9 几何布局俯视图

Fig.9 Top view of layout's geometry

由公式(5)可得两轴转台的角度指令：

$$\varepsilon_{TD} = \arcsin\frac{y_M - \Delta y_2}{\sqrt{(x_M - \Delta x_2)^2 + (y_M - \Delta y_2)^2 + (z_M - l_{32})^2}}$$

$$\beta_{TD} = \arctan\frac{l_{32} - z_M}{x_M - \Delta x_2} - \Delta\beta \quad (5)$$

给定两轴转台指令(ε_{TD}, β_{TD})，由导引头闭环追踪实验获取三轴转台最终的角度位置(ε_{TS}, β_{TS})。该角度与光斑坐标之间的关系如公式(6)所示：

$$\varepsilon_{TS} = \arcsin\frac{y_M}{\sqrt{x_M^2 + y_M^2 + z_M^2}} \quad \beta_{TS} = \arctan\frac{z_M}{x_M} \quad (6)$$

3.3 校正算法

为标定公式(5)中的误差参数，选取 N(N>3)组两轴指令(ε_{TD}, β_{TD})对应于幕布上 N 个光斑位置，利用闭环实验最终得到对应三轴转台位置(ε_{TS}, β_{TS})。光斑分布如图 10 所示。

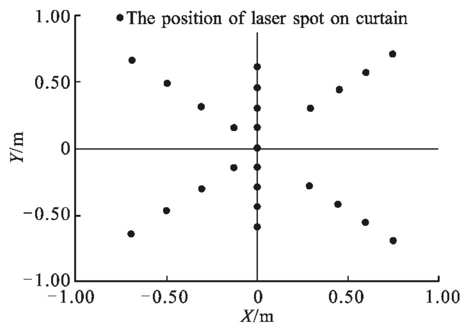

图 10 检测点在幕布上的位置示意图

Fig.10 Position of test points on the curtain

利用公式(3)、(6)得 N 个光斑位置(x_{Mi}, y_{Mi}, z_{Mi})($i=1,2,\cdots,N$)，代入公式(5)-2 建立 N 个非线性方程来解算误差参数 Δx、l_{32}、$\tan\Delta\beta$。设 $x_1=\Delta x_2$，$x_2=l_{32}$，$x_3=\tan\Delta\beta$，则可建立以下超定非线性方程组 $F(x_1, x_2, x_3)$：

$$\begin{cases} a_{11}\cdot x_1 + x_1x_3 + x_2 + a_{12}\cdot x_2x_3 + a_{13}x_3 - a_{14} = 0 \\ a_{21}\cdot x_1 + x_1x_3 + x_2 + a_{22}\cdot x_2x_3 + a_{23}x_3 - a_{24} = 0 \\ \quad\vdots \qquad \vdots \\ a_{i1}\cdot x_1 + x_1x_3 + x_2 + a_{i2}\cdot x_2x_3 + a_{i3}x_3 - a_{i4} = 0 \\ \quad\vdots \qquad \vdots \\ a_{N1}\cdot x_1 + x_1x_3 + x_2 + a_{N2}\cdot x_2x_3 + a_{N3}x_3 - a_{N4} = 0 \end{cases}$$

式中：系数 $a_{i1}=\tan\beta_{TDi}$，$a_{i2}=-\tan\beta_{TDi}$，$a_{i3}=z_{Mi}\tan\beta_{TDi}-x_{Mi}$，$a_{i4}=z_{Mi}\tan\beta_{TDi}+x_{Mi}$。

初步尺寸标定获取了未知量的粗略取值，可满足牛顿迭代法对初值的要求，因此选用收敛快、形式简单的牛顿迭代法求解：

$$F(x^{(k)}) + F'(x^{(k)}) \cdot \Delta x^{(k)} = 0 \quad (7)$$

其中，Jacobi 矩阵 $F'(x)$ 为：

$$F'(x)=\begin{cases} a_{11}+x_3 \quad 1+a_{12}x_3 \quad x_1+a_{13} \\ a_{21}+x_3 \quad 1+a_{22}x_3 \quad x_1+a_{23} \\ \vdots \qquad\qquad \vdots \qquad\qquad \vdots \\ a_{N1}+x_3 \quad 1+a_{N2}x_3 \quad x_1+a_{N3} \end{cases} \tag{8}$$

由超定方程组(7)计算修正向量 Δx,采用加权最小二乘法,选取权系数使初始光斑位置误差最小,即光斑 $i(i=1,2,\cdots,N)$到弹道初始时刻光斑位置的距离 r_i 越远,其对应权系数 ω_i 越小。取归一化权系数 ω_i 为:

$$\omega_i=\frac{L-r_i}{NL-\sum_{i=1}^{N} r_i} \tag{9}$$

式中:常数 $L>\max(r_i)(i=1,2,\cdots,N)$。则加权后超定方程组各矩阵表示如下:

$$F_G=[F(:,1)\cdot\omega_1 \quad L \quad F(:,i)\cdot\omega_i \quad L]^T$$

$$F_G'=[F(:,1)\cdot\omega_1 \quad L \quad F'(:,i)\cdot\omega_i \quad L]^T$$

利用公式(7)求解第 k 次迭代的修正向量 Δx,加权最小二乘解形式如公式(10)所示:

$$\Delta x=-(F_G'^{T}F_G')^{-1}\cdot F_G'^{T}F_G \tag{10}$$

从而非线性方程组第 k 次迭代结果为:

$$x^{(k+1)}=x^{(k)}+\Delta x^{(k)} \tag{11}$$

由公式(10)、(11)进行多次迭代,当误差满足要求时,即为公式(7)的最小二乘解,得到误差参数 Δx、l_{32} 和 $\Delta\beta$。将各光斑位置与以上参数代入式(5)-1,求得 Δy 的 N 个解,由公式(12)得误差参数的解:

$$\Delta y_2=\sum_{i=1}^{N}\Delta y_i\cdot\omega_i \tag{12}$$

使用上述算法计算出误差参数并代入几何模型, 求得在各光斑位置上两轴转台俯仰和偏航指令的角误差,结果如图 11 所示。可以看出,经文中提出的方法校正后, 俯仰和偏航的最大误差角被修正在 0.1°以内,可以满足仿真系统的精度要求。

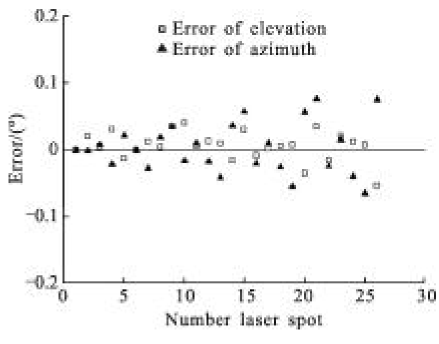

图 11 校正后各检测点处的误差

Fig.11 Errors at all test points after correction

4 结 论

基于所建立的数学模型分析了诸多仿真误差源, 并通过数学仿真指出几何误差对仿真系统的影响较大。

利用导引头闭环跟踪实验结果建立误差参数的超定非线性方程组, 使用牛顿迭代和加权最小二乘组合算法求解误差参数,对误差进行校正,此项研究工作使仿真精度和置信度均得以提高, 对后期开展半实物仿真具有十分重要的意义。

参考文献:

[1] Wang Jiang, Lin Wei, Wang Peng, et al. Analysis of laser energy chain in the hardware-in-the-loop simulation system of semi-active laser guidance [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(7): 1230-1233. (in Chinese)

[2] Zhang Hongxi. Analysis of influence induced by installation error of seeker in hardware-in-the-loop simulation [J]. Computer Emulation, 2010, 27(12): 31-34. (in Chinese)

[3] Meng Xiuyun, Liu Zaozhen, Wang Zhaomin, et al. Error analysis and modeling of a hardware-in-the-loop simulation system of laser-guided bombs [J]. Computer Emulation, 2002, 19(2): 7-9. (in Chinese)

[4] Xiao Weiguo, Hao Chong′en, Li Gaofeng. Research on error for a three-axis flight simulation turntable [J]. Journal of System Simulation, 2001, 13(5): 678-680. (in Chinese)

[5] Xiao Weiguo, Er Lianjie. Error analysis of radar guidance hardware-in-loop simulation [J]. Journal of System Simulation, 2007: 6. (in Chinese)

[6] Meng Daikui. Effect of turntable errors on the hardware-in-the-loop simulations of spinning missiles [J]. Aerospace Control, 1992, (3): 57-61. (in Chinese)

[7] Bi Ye. Error analysis of missile′s hardware-in-loop simulation system[D]. Xi′an Northwestern polytechnic University, 2006. (in Chinese)

[8] Garnell P. Guided Weapon Control Systems, Second Revision by Qi Zaikang [M]. Beijing: Institute of Technology, 2004: 88-95.

[9] Mou Yu, Lin Defu, Qi Zaikang, et al. Performance of proportional navigation law for terminal laser-guided projectile [J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(2): 250-255. (in Chinese)