激光制导武器半实物仿真系统弹目视线建模与验证

甘 霖,李 慧,刘艳芳,赵宏鹏

(中国洛阳电子装备试验中心,河南 洛阳 471003)

摘 要:激光制导武器半实物仿真系统的弹目视线复现精度是评估半实物仿真精度的一项关键参数。在分析弹目视线运动的静态和动态误差来源的基础上,采用多体系统理论建立了具有明确物理意义的弹目视线运动模型。对正弦、指数和典型战情三种运动过程中的弹目视线角分别进行了仿真计算和实验测试,利用实测数据对仿真结果进行了对比验证。结果表明:弹目视线角仿真结果与实测结果误差小于 2.68′,误差均值小于 0.30′,两者具有较好的一致性,模型能够准确反映弹目视线角的变化规律。

关键词:多体系统; 弹目视线; 半实物仿真; 激光制导武器

中图分类号:TN977 **文献标志码**:A **DOI**:10.3788/IRLA201847.1106002

Modeling and verifying of line of sight of laser guided weapon in HWIL simulation system

Gan Lin, Li Hui, Liu Yanfang, Zhang Hongpeng

(Luoyang Electronic Equipment Test Center of China, Luoyang 471003, China)

Abstract: The precision of line of sight reproduction is a key factor of precision evaluation in Hardware-in-The-Loop (HWIL) simulation system for laser guided weapon. Base on the analysis on static and dynamic errors of line of sight in total, the movetion model with definite physics signification was set up by adopting multi-body system theories. After that, the model was verified by using the measure data of angle of sight in various motion including sine, exponent and typical scenario. The verification shows that the simulation results meet well with the measurement results as the error is less than 2.68′ and average error is less than 0.3′, and the model can describe the variation rules of angle of sight.

Key words: multi-body system; line of sight; HWIL simulation; laser guided weapon

收稿日期:2018-06-07; **修订日期**:2018-07-10

作者简介:甘霖(1985-),男,助理研究员,硕士,主要从事光电对抗仿真技术方面的研究。Email:ganlin317@163.com

0 引 言

当前半实物仿真技术的应用已经贯穿于制导武器研制的全过程并成为性能评估的重要手段。激光制导武器对抗半实物仿真系统[1]作为一个复杂的测试系统,存在着各种各样的误差因素,需要对系统仿真精度进行研究，才能保证半实物仿真结果的有效性和可信度。弹目视线作为半实物仿真系统的主要模拟参量之一，其复现精度是半实物仿真精度的关键影响因素。在仿真中,弹目视线模拟误差是实时变化的,它与弹目视线的运动情况密切相关,因此需要建立准确的模型来分析不同情况下的复现精度。通过建模能够有效分析各种仿真条件下误差因素对复现精度的影响程度，从而针对敏感因素采取相应措施降低弹目视线模拟误差,提高仿真精度。另外,在仿真前也能够事先分析预测不同仿真条件下弹目视线复现精度的变化规律，从而选择确定合适的初始参数配置,提高仿真的有效性。

国内学者对半实物仿真系统弹目视线已开展了诸多研究[2-6]。张金生提出了一套弹目视线精确标定措施,使视线角控制精度达到 0.5 mrad。苏建刚根据相似性原理建立了半实物仿真条件下弹目视线数学模型。臧永强提出了一种实验室视线角精度的评价标准,建模分析了视线角误差在漫反射屏上的分布规律。范世鹏实验标定了弹目几何误差参数并给出了误差校正算法。王斐分析了导引头视线运动仿真的误差产生机理,推导了视线运动仿真误差补偿算法。

由于弹目视线角度在实验条件下难以实时准确测量的原因，相关研究普遍缺少实测数据的支撑和对比验证。文中基于某激光制导武器对抗半实物仿真系统,对弹目视线模拟运动过程进行了分析,采用多体系统理论建立了具有明确物理意义的弹目视线运动模型，同时实验测试了弹目视线的实时指向角度,利用实测数据验证了模型的准确性。

1 视线运动子系统及误差源分析

视线运动模拟子系统是半实物仿真系统的重要组成部分，主要用于模拟指标目标或干扰目标相对激光导引头模拟器的视线运动。该系统利用五轴仿真转台设备的外两轴台来实现弹目视线运动的模拟,如图 1 所示。

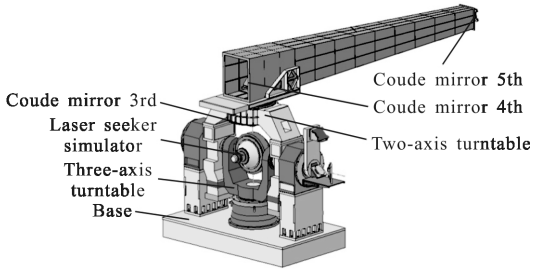

图 1 弹目视线仿真子系统示意图

Fig.1 Sketch map of line of sight simulation system

外两轴台框架上安装了库德光路，库德光路是一种能够将光束转折到随轴系旋转的导光光路,该光路由六块平面反射镜组成。其中导光镜相对于地面固定不动,用于将入射光折转到库德光路中。各库德镜与光轴成 45°角,第一、二、三面库德镜与内框框架固联,第四、五面库德镜与外框框架固联。当外两轴台做旋转运动时,库德光路随外两轴框架运动,保证第五面库德镜始终将激光信号反射到激光导引头入瞳处，从而模拟目标激光信号相对激光导引头的视线运动。

影响弹目视线运动的误差源有很多，主要包括光学装调误差、仿真转台轴系误差、控制系统误差和悬臂变形误差等，可将其划分为静态误差源和动态误差源两类,误差来源分析如图 2 所示。

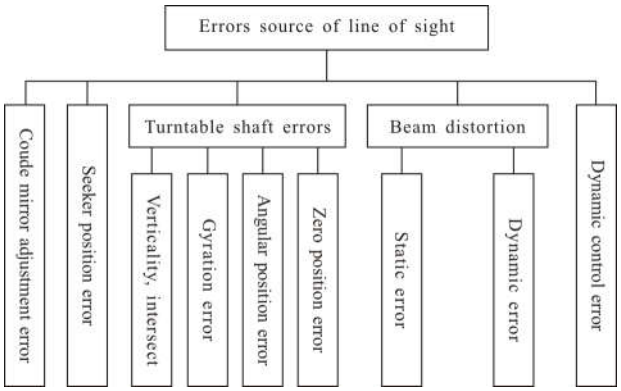

图 2 弹目视线运动模拟误差来源

Fig.2 Error factors of line of sight simulation

光学装调误差是指由库德光路中平面反射镜的装调误差产生的视线指向误差，误差来源于库德光路的装调方法和装调设备。导引头位置误差是由于安装误差导致导引头光学系统中心与仿真转台回转

中心不重合而造成的导引头视线角偏差。悬臂变形误差是指悬臂在重力作用或运动惯性力作用下产生形变，从而导致库德镜的法线发生变化进而产生的视线指向误差。

机械轴系误差包括五轴仿真转台各轴之间垂直度误差、相交度误差、轴系回转误差、零位误差、角位置误差等。其中，垂直度误差和相交度误差是由于加工、装配和调校等因素限制，导致仿真转台各轴系不完全满足正交条件和空间共点条件而产生的误差。角位置误差为在控制状态下，转台的角位置实测值与角位置给定值之差。零位误差指角位置传感器装配完成后，传感器的零位线与设计的机械框架轴线不一致而导致的误差。回转误差是因框架轴线除了具有回转自由度外，还具有轴向、径向和倾角运动自由度而产生的误差。分析误差时回转误差、角位置误差视为服从某种分布的随机误差项，其他轴系误差视为常值系统误差项。

控制系统误差是仿真转台由于频带限制以及随机噪声、摩擦力矩等非线性因素影响，存在着幅值衰减与相位滞后，导致跟随引导指令运动控制不精确而产生的误差。伺服控制系统模型框图如图 3 所示。图中，$G(s)$为被控对象的开环传递函数，$G_q(s)$为前馈补偿环节传递函数，$G_1(s)$、$G_2(s)$和 $G_3(s)$等为串联校正环节传递函数。得到控制系统的完整传递函数后，即可分析其运动规律和动态特性，并进行动态控制误差仿真分析。控制系统误差是影响弹目视线角动态指向的主要误差因素。

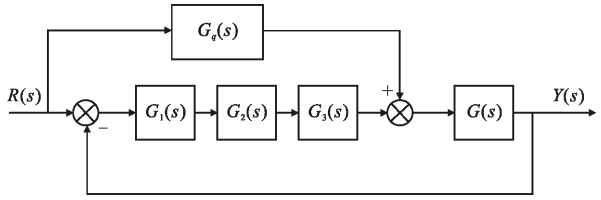

图 3 转台伺服控制系统模型框图

Fig.3 Block diagram of simulation turntable control system

2 弹目视线运动建模

2.1 多体系统描述

根据多体系统理论[7-8]，弹目视线运动模拟子系统可认为是由多个刚体或柔体通过某种方式连接而成的复杂机械系统。根据系统各体之间的运动连接关系，按照仿真转台基座、三轴台的方位框架、俯仰框架、滚转框架、激光导引头模拟器、外两轴台的俯仰框架、方位框架、第三~五面库德镜的顺序，分别编号定义为 0~9 体，可得到多体系统的拓扑结构，如图4 所示。

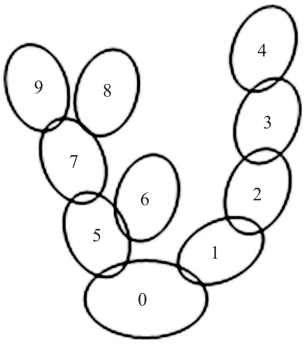

图 4 弹目视线运动拓扑结构图

Fig.4 Topology structure of line of sight movement

设置惯性坐标系原点O 为五轴仿真转台中心点，OX 轴与外框轴线垂直且水平指向悬臂前方为正向，OY 轴与外框轴线垂直，指向上为正，OZ 轴与 OX、OY 构成右手直角坐标系。在每个典型体上均建立体坐标系，每个典型体的运动可理解为体坐标系相对于其相邻体坐标系的平移和旋转，各体之间的运动关系用特征矩阵描述，其中相邻体之间固联时存在的误差为静态误差，相对运动时产生的误差为动态误差，则弹目视线运动的误差因素均可归纳为不同相邻体之间的静态误差或动态误差，由此可得出各相邻体之间相对运动时坐标转换的特征矩阵。以 L_{ij} 表示相邻体 i 体和 j 体的特征矩阵，则各相邻体之间的特征矩阵如表 1 所示。

表中，$\mathrm{Rot}(x,\cdot)$、$\mathrm{Rot}(y,\cdot)$、$\mathrm{Rot}(z,\cdot)$分别是绕 x、y、z 轴转动的旋转特征矩阵，$\mathrm{Mov}(\cdot)$是平移特征矩阵，Ψ、ϑ、γ、A、E 分别是三轴台外、中、内框架转角和两轴台外框、内框转角，$\Delta\alpha_{ij}$、$\Delta\beta_{ij}$、$\Delta\gamma_{ij}$ 为相应轴系的垂直度误差，i、j 为相邻体编号，δ_{ij} 为相应轴系的相交度误差，$\varepsilon(\cdot)$、$\delta(\cdot)$为相应轴系的回转误差，$\Delta\theta_{is}$、$\Delta\theta_{id}$ 分别是库德镜的静态变形误差和动态变形误差，Δx_{ij}、Δy_{ij}、Δz_{ij} 分别是库德镜的中心位置误差。l_1、l_2 分别是库德镜 3、库德镜 4 中心在 0 体坐标系下的 y 轴坐标，l_3 是库德镜 5 中心在 0 体坐标系下的 x 坐标。

表 1 相邻典型体之间特征矩阵列表

Tab.1 Characteristic matrix between adjacent typical bodies

Body	Characteristic matrix
L_{01}	$\mathrm{Rot}(x,\Delta\alpha_{01})\mathrm{Rot}(z,\Delta\gamma_{01})\mathrm{Mov}(\Delta x_{01},\Delta y_{01},\Delta z_{01})\mathrm{Rot}(y,\psi)$ $\mathrm{Rot}(x,\varepsilon_x(\psi))\mathrm{Rot}(y,\Delta\psi)\mathrm{Rot}(z,\varepsilon_x(\psi))\mathrm{Mov}(\delta_x(\psi),\delta_y(\psi),\delta_z(\psi))$
L_{12}	$\mathrm{Rot}(x,\Delta\alpha_{12})\mathrm{Mov}(\delta_{x01},0,0)\mathrm{Rot}(z,\vartheta)\mathrm{Rot}(x,\varepsilon_x(\vartheta))\mathrm{Rot}(y,\varepsilon_y(\vartheta))$ $\mathrm{Rot}(z,\Delta\vartheta)\mathrm{Mov}(\delta_x(\vartheta),\delta_y(\vartheta),\delta_z(\vartheta))$
L_{23}	$\mathrm{Rot}(y,\Delta\beta_{23})\mathrm{Mov}(0,\delta_{y23},\delta_{z23})\mathrm{Rot}(x,\gamma)\mathrm{Rot}(x,\Delta\gamma)\mathrm{Rot}(y,\varepsilon_y(\gamma))$ $\mathrm{Rot}(z,\varepsilon_z(\gamma))\mathrm{Mov}(\delta_x(\gamma),\delta_y(\gamma),\delta_z(\gamma))$
L_{34}	$\mathrm{Rot}(y,\Delta\beta_{34})\mathrm{Rot}(z,\Delta\gamma_{34})\mathrm{Mov}(\Delta x_{34},\Delta y_{34},\Delta z_{34})$
L_{05}	$\mathrm{Rot}(x,\Delta\alpha_{05})\mathrm{Rot}(z,\Delta\gamma_{05})\mathrm{Mov}(\Delta x_{05},\Delta y_{05},\Delta z_{05})\mathrm{Rot}(x,E)$ $\mathrm{Rot}(x,\varepsilon_x(E))\mathrm{Rot}(y,\varepsilon_y(E))\mathrm{Rot}(z,\varepsilon_z(E))\mathrm{Mov}(\delta_x(E),\delta_y(E),\delta_z(E))$
L_{59}	$\mathrm{Rot}(x,\Delta\alpha_{67})\mathrm{Mov}(\delta_{x67},0,0)\mathrm{Rot}(y,A)\mathrm{Rot}(x,\varepsilon_x(A))$ $\mathrm{Rot}(y,\Delta A)\mathrm{Rot}(z,\varepsilon_z(A))\mathrm{Mov}(\delta_x(A),\delta_y(A),\delta_z(A))$
L_{57}	$\mathrm{Mov}(0,l_1,0)\mathrm{Rot}(x,\Delta\theta_{3s})\mathrm{Mov}(\Delta x_{57},\Delta y_{57},\Delta z_{57})\mathrm{Rot}(x,\Delta\theta_{3d})$
L_{68}	$\mathrm{Mov}(0,l_2,0)\mathrm{Rot}(z,\Delta\theta_{4s})\mathrm{Mov}(\Delta x_{68},\Delta y_{68},\Delta z_{68})\mathrm{Rot}(x,\Delta\theta_{4d})$
L_{69}	$\mathrm{Mov}(l_3,0,0)\mathrm{Rot}(x,\Delta\theta_{5s})\mathrm{Mov}(\Delta x_{69},\Delta y_{69},\Delta z_{69})\mathrm{Rot}(x,\Delta\theta_{5d})$

2.2 视线运动模型

弹目视线运动建模的主要思路是，根据空间解析几何、镜面反射和镜面成像原理，将目标光束矢量和导引头中心位置矢量在各自坐标系中的表达式，统一到 0 体坐标系中，从而得到弹目视线矢量的表达式，详细推导过程可参考文献[9]。设弹目视线矢量为 p，则弹目视线角可表示为：

$$\begin{cases}\theta=\arctan(p_y/\sqrt{p_x^2+p_z^2})\\ \varphi=\arctan(p_z/p_x)\end{cases}\tag{1}$$

弹目视线模拟误差可表示为：

$$\begin{cases}\Delta\theta=\theta-\theta_0\\ \Delta\varphi=\varphi-\varphi_0\end{cases}\tag{2}$$

式中：θ_0、φ_0 分别是理想情况下的弹目视线角。

3 模型验证

3.1 模型仿真

弹目视线模型建立后，设置正弦运动、指数运动和某典型战场条件下 3 种弹目视线变化曲线仿真输入。其中正弦曲线函数表达式为 $y=18°\sin(5/3t)$；指数曲线函数表达式为 $y=\exp(5(t-3)/3)$；典型战情设置为：投弹高度 1 000 m，投弹速度 300 m/s，投弹距离 4 000 m，干扰目标距离目标 100 m。将标定后的位置参数和误差参数代入仿真模型，采用蒙特卡洛仿真方法对弹目视线进行数学仿真计算，其中系统位置参数项和系统误差项取固定值，随机误差项按照误差分布性质产生随机值，计算得到的仿真结果如图 5 所示。

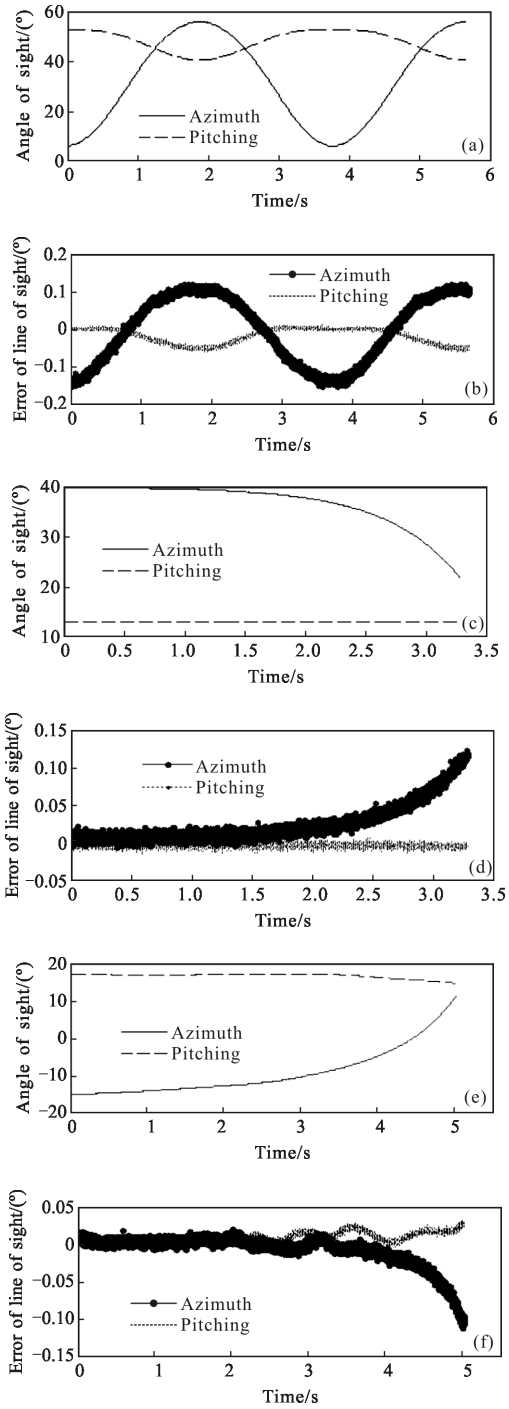

图 5 不同输入条件下弹目视线角仿真结果

Fig.5 Angle of sight simulation on different movement

从图中可看出，按正弦曲线运动时，视线模拟误差按照正弦曲线规律变化，在角加速度最大时达到

最大;按指数曲线运动时,视线模拟误差按照指数曲线规律变化,在末端时达到最大;按典型战情曲线运动时,视线模拟误差前期变化很小,末端随角加速度增加而急剧增大。由此可知弹目视线模拟误差受角加速度影响较大,这是由于角加速度增大时,由于仿真转台外两轴惯性较大,以及框架所受驱动力变大,导致控制系统误差和外两轴框架形变增大。

3.2 实测验证

为了验证弹目视线运动模型仿真结果的准确性,需要对半实物仿真系统的弹目视线角进行实验测试,通过实测数据和仿真结果进行对比确认。弹目视线角实时指向测试方案示意图如图 6 所示。仿真转台控制计算机下发控制数据到仿真转台设备,在发送控制数据结束的同时发送一个激光触发脉冲到精确延时器,精确延时器将激光触发脉冲延时后触发激光器以一定的频率发射激光,激光束经过光纤导入经纬仪准直目镜中,再通过经纬仪望远镜光轴发出十字丝形状光束,进入到库德光路镜组中,通过库德光路传输后照射到仿真转台中心处的 CCD 器件,由 CCD 相机记录脉冲激光触发时刻库德镜上激光光斑的实时位置图像,事后进行图像处理获得库德镜上激光光斑的实时位置。图中示波器用于监测激光触发脉冲和控制数据下发的时间延时,保证脉冲激光的时间同步。

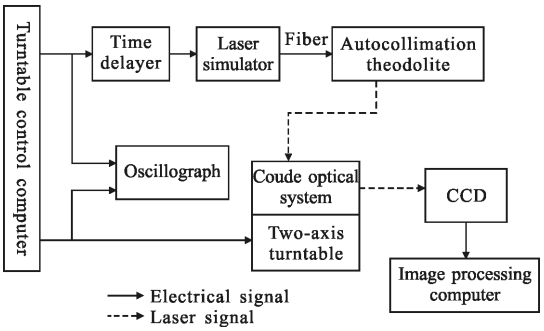

图 6 弹目视线角测试方案示意图

Fig.6 Method of angle of sight measurement

实测时输入条件参照模型弹目视线运动模型的仿真输入条件,最终得到正弦曲线、指数曲线和典型战情曲线条件下弹目视线角的实测结果与仿真结果对比,如图 7 所示。

从图中可看出,在正弦曲线、指数曲线和典型战情曲线 3 种输入条件下,弹目视线角仿真结果与实测结果的变化趋势是一致的。对仿真数据和实测数据进行统计后可知,正弦曲线运动情况下弹目视线角仿真结果和实测结果差值不超过 2.68′,误差均值为 0.30′;指数曲线运动情况下仿真结果和实测结果差值不超过 1.36′,误差均值为 0.14′;典型战情曲线运动情况下仿真结果和实测结果差值不超过 0.91′,误差均值为 0.18′。

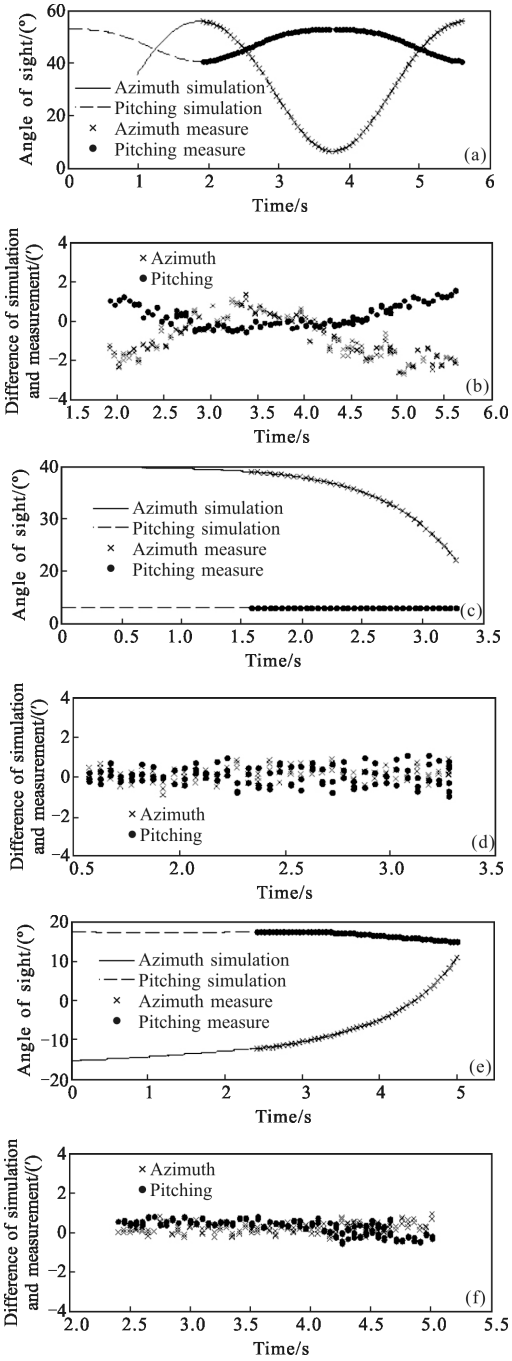

图 7 弹目视线角仿真结果与实测结果对比图

Fig.7 Verifying simulation result of line of sight by measurement

4 结束语

文中针对激光制导武器半实物仿真系统的弹目视线运动模拟过程,建立了弹目视线运动模型,并通过实测数据进行了验证，结果表明采用多体系统理论建立模型的方法是可行的，模型可用于分析各种运动条件下弹目视线变化规律，为系统仿真精度和仿真置信度评估提供支持。该建模方法也可应用于其他半实物仿真系统。

参考文献:

[1] Wang Yunping, Zhao Changming, Li Yan. Hardware- in-the-loop simulation system for laser-angle-deception jamming[J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2012, 41 (5): 1217-1222. (in Chinese)
王云萍, 赵长明, 李岩. 激光角度欺骗干扰半实物仿真试验系统[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(5): 1217-1222.

[2] Zhang Jinsheng, Wang Shicheng. Research on accurate control of angle of sight in laser guided weapon simulation system[J]. ***Electronics Optics & Contorl***, 2005, 12(4): 19-23. (in Chinese)
张金生, 王仕成. 激光制导武器仿真系统视线角精确控制研究[J]. 电光与控制, 2005, 12(4): 19-23

[3] Su Jiangang, Fu Mengyin, Huang Yanjun. Research on hardware-in-the-loop simulation technology for Line of sight of laser guided weapons [J]. ***Journal of System Simulation***, 2007, 19(8): 1717-1720. (in Chinese)
苏建刚, 付梦印, 黄艳俊. 激光制导武器弹目视线半实物仿真技术研究 [J]. 系统仿真学报, 2007, 19 (8): 1717-1720.

[4] Zhang Yongqiang, Liu Yuan, Wang Shicheng. Precise simulation for line of sight of laser-guided weapons [J]. ***Opto-Electronic Engineering***, 2012, 39(10): 6-14. (in Chinese)
臧永强, 刘源, 王仕成. 激光制导武器弹目视线仿真系统最优布局设计[J]. 光电工程, 2012, 39(10): 6-14.

[5] Fan Shipeng, Lin Defu, Wang Jinran. Error analysis and correction for hardware-in-the-loop simulation system of laser guidance weapon [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2013, 42(4): 904-908. (in Chinese)
范世鹏, 林德福, 王靳然. 激光制导武器半实物仿真的误差分析与校正[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(4): 904-908.

[6] Wang Fei, Liang Xiaogeng, Wang Yankui. Error analysis of Line-of-Sight simulating for TV seeker in Hardware-in- the-loop[J]. ***Computor Simulation***, 2013, 30(10): 116-119. (in Chinese)
王斐, 梁晓庚, 王彦奎. 电视制导半实物视线运动仿真误差分析[J]. 计算机仿真, 2013, 30(10): 116-119.

[7] Luo Anzhi, Sun Hui, Jia Hongguang. Parametric and non-parametric model kinematic calibration of photoelectric detecting system [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2016, 45(5): 0517005. (in Chinese)
罗安治, 孙辉, 贾宏光. 光电探测系统参数与非参数模型运动学标定[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(5): 0517005.

[8] Zhang Zhiyong, Zhou Xiaoyao. Analysis, modeling and correction of pointing errors for electro-optics detection systems [J]. ***Acta Aeronautica et Astronautica Sinica***, 2011, 32(11): 2042-2054. (in Chinese)
张智永, 周晓尧. 光电探测系统指向误差分析、建模与修正[J]. 航空学报, 2011, 32(11): 2042-2054.

[9] Li Hui. Simulation precision analysis of line of sight between bomb and target on hardware in the loop system for laser guided weapon countermeasure [J]. ***Laser & Optoelectronics Progress***, 2015, 52(1): 011202. (in Chinese)
李慧. 激光制导武器对抗半实物仿真弹干视线角模拟精度分析[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(1): 011202.