

## 红外成像制导系统虚拟样机\*

何国经, 张建奇

(西安电子科技大学技术物理学院, 陕西 西安 710071)

**摘要:**建立了基于三维场景的红外成像制导系统虚拟样机。虚拟样机模型分为成像系统、信号处理、运动控制三个模块。在分析各模块实现的基础上,重点研究了虚拟样机与三维场景之间的运动关系及数据交换过程,并实现了数学建模。利用时间放大方法,探讨了解决仿真中实时性与逼真性之间矛盾的途径。最后,利用三维红外场景数据进行了导弹制导过程仿真试验,并给出系统作用距离与探测概率关系、弹道曲线等仿真结果。

**关键词:**三维红外场景; 红外成像制导; 虚拟样机; 仿真

**中图分类号:**TN216 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-2276-(2004)4-0338-05

## Virtual IR imaging guiding system model\*

HE Guo-jing, ZHANG Jian-qi

(Institute of Technology Physics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** Based on 3D IR scene, a virtual IR imaging guiding system model is established. The model consists of three modules, which are imaging system, signal processing and movement control. Analysis of the three modules is performed with emphasis on the movement relation and data exchange between the virtual system and 3D scene, and mathematic models are given. By use of time amplifying method, a way to resolve the conflict between the real-time requirement and simulation reality is discussed. At the end, simulation experiments are performed and the results show that this model is practical.

**Key words:** 3D IR scene; IR imaging guiding; Virtual model; Simulation

### 0 引言

研究红外成像制导系统模型,建立红外制导导弹的虚拟样机<sup>[1]</sup>,对于系统设计、系统性能评估以及红外成像制导系统的对抗技术研究具有十分重要的意义。对于红外成像制导系统的建模与仿真,前人做了

大量的工作。参考文献[2,3]概述了国内外红外成像制导仿真技术的发展状况,分析了红外成像仿真的工作原理、系统组成、设计要求等。A. Morin研究了红外成像制导导弹的建模与仿真技术,较详细地叙述了仿真系统的各个部分,如坐标系统、红外场景生成、寻的器模型等,并建立了仿真系统,为红外成像制导系统的算法研究、抗干扰研究等提供了有力的工具<sup>[4]</sup>。

收稿日期:2003-10-02; 修订日期:2004-01-26

\* 基金项目:国家自然科学基金资助项目(60277005)

作者简介:何国经(1978-),男,广西玉林人,硕士,主要从事红外成像系统仿真及性能评估方面的研究工作。

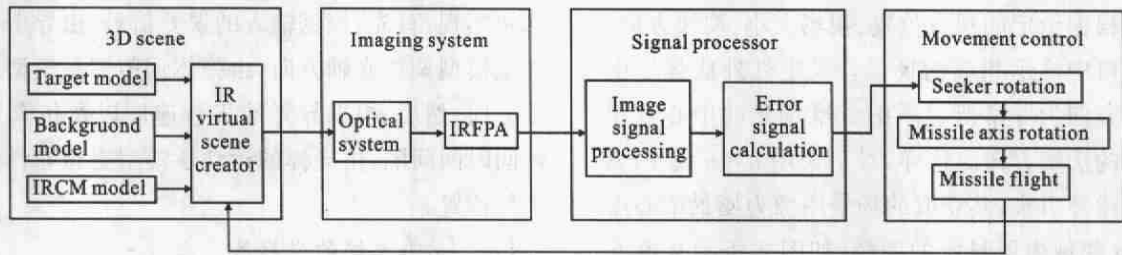


图1 仿真系统框图

Fig. 1 Block diagram of simulation system

然而,在现有的数字仿真研究中,通常采用已有的(由实拍或生成得来)序列图像作为数据源。例如,在 A. Morin 所建立的模型中,首先根据场景、目标、干扰物等的红外辐射模型生成二维红外场景图像、目标图像、干扰物图像,将其叠加作为数据源用于仿真。采用已有的序列图像作为数据源,不足之处在于弹道相当于已经给定,在此条件下,仿真试验不能预测,也不能反映实际情况下目标、导弹与场景之间可能出现的相对运动,这就为真实而准确地检测和评估制导系统的性能增加了难度。利用三维红外场景作为数据源是解决该问题的有效方法。以场景作为载体,将红外成像制导系统虚拟样机置于其中可以准确模拟导弹在场景中的运动。

建立了基于三维红外场景红外成像制导系统虚拟样机。模型包括成像系统、信号处理、运动控制三个模块。三维场景生成模块为仿真提供数据,成像系统模块模拟成像过程,运动控制根据信号处理结果,利用数据接口实现红外成像制导系统虚拟样机与场景模型之间的数据交互。仿真试验结果表明:基于三维红外场景的红外成像制导系统虚拟样机能较好地反映实际的制导过程。

## 1 仿真系统模块构成与模块实现

基于三维红外场景的红外成像制导系统虚拟样机仿真系统框图如图1所示。

三维场景模块生成的虚拟红外场景,为虚拟红外成像导引头提供了数据源;成像系统模块模拟红外成像系统的成像过程,即模拟光学系统、焦平面阵列(FPA)以及信号处理电路的工作;信号处理模块完成目标的检测、识别和跟踪,并根据目标方位,给出相应的误差信号;运动控制根据导弹的飞行参数,调整导弹的姿态,控制导弹在虚拟场景中飞行。

### 1.1 三维场景

三维场景是仿真系统中非常重要的一部分,在虚拟场景中,能真实地模拟导弹、目标以及场景的位置变化关系,与利用实拍或事先生成的序列图像作为数据源的仿真相比逼真度更高。

场景模型主要由三维目标模型和三维背景模型组成,根据实际研究的需要,还可以加入其他模型,如在光电对抗仿真中,可以加入诸如诱饵弹、烟幕弹模型等。在仿真系统中,利用三维建模工具建立场景中的三维舰船目标模型和三维海背景模型,同时给定各个模型的三维温度场分布,以此为数据源生成虚拟红外海面场景。虚拟红外海面场景总面积为  $60 \text{ km} \times 60 \text{ km}$ ,图2为添加了舰船目标的虚拟红外海面场景的一角。虚拟场景中的大气效应是用 Lowtrain7 软件计算的。



图2 添加了舰船目标的虚拟红外海面场景  
Fig. 2 Virtual IR sea scene with battleship

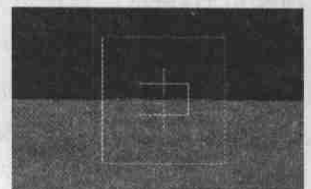


图3 屏幕窗口与制导系统视场  
Fig. 3 Screen and guiding system FOV

### 1.2 成像系统

成像系统模块以视点位置、视场大小以及视线方向为参数,从场景中获取相应的图像,为后续的信号处理模块提供数据,模拟了红外成像系统中光学系统、焦平面阵列以及信号处理电路的模块。成像系统模块由两个子模块构成:场景图像截取模块、系统效应模块。

场景图像截取模块模拟三维场景中相应部分在二维焦平面阵列上的投影成像。在仿真系统中,虚拟

场景系统根据给定的视点位置、视场大小、视线方向,在屏幕窗口中显示相应的场景。设定红外成像导引头的光轴方向为屏幕所显示的三维场景的中心点相对于屏幕的法线方向。这样,对于采用  $n \times n$  元 FPA 的红外成像导引头,其获取的场景图像为场景中心点周围  $n \times n$  邻域内所显示的图像,如图 3 所示灰色方框内的部分, $n$  取 256。

系统效应模块模拟成像系统的主要效应对所成图像的影响。红外成像系统的主要效应包括滤波效应和系统噪声。对于滤波效应,采用调制传递函数法予以模拟<sup>[5,6]</sup>。各模块的传递函数已在多篇文献中给出。红外成像系统的噪声利用三维噪声模型描述。根据三维噪声模型,固定图案  $\sigma_{VH}$  是凝视系统噪声的主要来源。对于大多数凝视系统的总噪声可以近似为<sup>[7]</sup>:

$$\sigma_s \approx \sqrt{\sigma_{TVH}^2 + \sigma_{VH}^2} = \sigma_{TVH} \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma_{VH}}{\sigma_{TVH}}\right)^2} \quad (1)$$

式中  $\sigma_s$  为系统总噪声; $\sigma_{TVH}$  为随机噪声; $\sigma_{VH}$  为固定图案噪声。在仿真模型中,噪声被认为是满足高斯分布的。

### 1.3 信号处理

信号处理模块需要从输入的场景图像中找到目标,并实施跟踪。该模块的信号处理算法可根据实际需要添加、修改。在该仿真系统中,采用自适应阈值算法调整阈值,分割目标;在进行目标合并后,以目标总亮度与占空比的乘积为判别准则,从候选目标中选出可信度最大的目标,用矩心跟踪方式予以跟踪。

自适应阈值算法由下式描述:

$$th = E(\max N) \quad (2)$$

式中  $\max N$  为图像中灰度梯度最大的  $N$  个点; $E(\cdot)$  为求均值。以图像中灰度梯度最大的  $N$  个点的均值为阈值从梯度图像中提取目标。通过调整参数  $N$ ,实现对阈值的控制。

### 1.4 导航系统

对于采用比例导引率进行目标攻击的导弹,弹轴与光轴一般不重合,导引头调整能力强,能快速地锁定目标并实施跟踪,此时光轴指向目标,弹体沿弹轴方向飞行。弹体以弹轴与光轴的夹角为误差信号,调整自身的方向,使弹轴朝光轴方向转动,以保证导弹沿正确的方向攻击目标。在仿真系统中,导引头、弹体的运动由导航系统予以模拟。导航系统的功能分

两步实现:首先,根据输入的误差信号,由导引头二维伺服模型调整光轴方向,由弹体伺服控制模型调制弹轴方向;然后,根据导弹的飞行速度以及仿真系统的帧间时间间隔,由导弹的运动学模型更新导弹在场景中的位置。

#### 1.4.1 仿真系统的坐标系

为计算导弹在场景中的运动,定义了三个坐标系,即绝对坐标系、弹体坐标系与导引头坐标系。坐标系间的关系如图 4 所示。 $xyz$  坐标系为绝对坐标系,用以唯一标定场景中一点的绝对坐标以及射线的俯仰角和方位角; $uvw$  坐标系为导引头坐标系, $v$  轴为光轴方向, $u$ 、 $w$  轴分别为 FPA 的行方向和列方向; $\alpha\beta\gamma$  坐标系为弹体坐标系, $\beta$  轴为弹轴方向,即导弹的飞行方向。为简化计算,认为导引头坐标系与弹体坐标系的原点重合,且当弹轴与光轴方向相同时,导引头坐标系与弹体坐标系重合。弹体坐标系与导引头坐标系随导弹的运动而变化,原点  $o'$  表示导弹的位置。

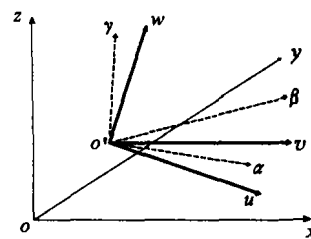


图 4 绝对坐标系、弹体坐标系与导引头坐标系关系示意图  
Fig. 4 Relationships among absolute coordinate system, body coordinate system and seeker coordinate system

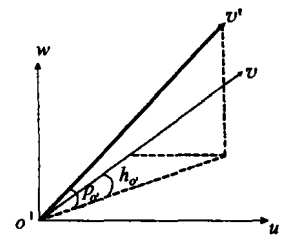


图 5 光轴调整示意图  
Fig. 5 Sketch of adjustment of LOS

#### 1.4.2 导引头二维伺服控制模型

在理想情况下,导引头的二维伺服机构产生的转动加速度与输入的误差信号成正比。由此可建立导引头二维伺服控制模型:在导引头坐标系下,在帧间间隔时间  $dt$  内,光轴方向由  $v$  轴方向转到  $\vec{o'v'}$  方向,如图 5 所示, $\vec{o'v'}$  的方位角  $h_v$  和俯仰角  $p_v$  为:

$$\begin{bmatrix} h_v \\ p_v \end{bmatrix} = \frac{1}{2} K_s dt^2 \begin{bmatrix} \epsilon_u \\ \epsilon_w \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中  $\epsilon_u$ 、 $\epsilon_w$  分别为信号处理系统给出的方位、俯仰方向的误差信号; $K_s$  为导引头转动角加速度与误差信号之间的比例系数。

在绝对坐标系下调整后的光轴方向为<sup>[8]</sup>:

$$\overrightarrow{\text{line\_of\_sight}} = \overrightarrow{o'v'} R_x R_z \quad (4)$$

$$\text{式中 } R_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(p_o) & -\sin(p_o) & 0 \\ 0 & \sin(p_o) & \cos(p_o) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$R_z = \begin{bmatrix} \cos(h_o) & -\sin(h_o) & 0 & 0 \\ \sin(h_o) & \cos(h_o) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

式中  $h_o, p_o$  分别为导引头坐标系的  $v$  轴在绝对坐标系中的方位角和俯仰角。

#### 1.4.3 弹体伺服控制模型

对于采用经典比例导引率的伺服系统,其产生的导弹转动加速度与光轴弹轴误差角成正比,因而在较短的时间内,弹轴的转动角度  $\Delta\theta$  为:

$$\Delta\theta = \frac{1}{2} K \epsilon_{om} \Delta t^2 \quad (5)$$

式中  $K$  为弹体转动角度与伺服机构产生的转动加速度之间的比例系数; $\epsilon_{om}$  为光轴弹轴误差角。当  $\Delta t$  取帧时  $dt$  时,弹轴的转动角度与光轴弹轴误差角成正比,定义弹体转动角度与光轴弹轴误差角间的比例系数  $K_m = K dt^2 / 2$ , 则有如下的推导与结论:

在绝对坐标系下,若  $t$  时刻,弹轴的方位角和俯仰角分别为  $h_{om}, p_{om}$ , 导引头的方位角和俯仰角分别为  $h_{os}, p_{os}$ , 则  $t+dt$  时刻,弹轴的俯仰角  $h$  和方位角  $p$  为:

$$\begin{bmatrix} h \\ p \end{bmatrix} = K_m \begin{bmatrix} h_{os} - h_{om} \\ p_{os} - p_{om} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} h_{om} \\ p_{om} \end{bmatrix} = K_m \begin{bmatrix} h_{os} \\ p_{os} \end{bmatrix} + (1 - K_m) \begin{bmatrix} h_{om} \\ p_{om} \end{bmatrix} \quad (6)$$

当  $K_m = 0$  时,弹体保持原方向不动;当  $K_m = 1$  时,弹体能跟上导引头的转动,只是时间滞后了一帧;当  $K_m$  在  $0 \sim 1$  之间取值时,弹体以不同的速度跟随导引头转动。由此可见,  $K_m$  的物理意义是弹体与导引头的转动调整能力之比,即弹体的转动调整能力为导引头的  $K_m$  倍,结合实际情况得知  $K_m \in (0, 1)$ 。

#### 1.4.4 导弹运动学模型

在探测系统的帧频较高的情况下,由于  $dt$  帧时很短,则可以近似认为从  $t$  到  $t+dt$ , 导弹沿弹轴方向

作匀速直线运动,于是导弹运动学模型为:

$$(x, y, z, 1) = V \left( \cos p \sinh, \cos p \cosh, \sin p, \frac{1}{V} \right) \times \begin{bmatrix} dt & 0 & 0 & 0 \\ 0 & dt & 0 & 0 \\ 0 & 0 & dt & 0 \\ x_t & y_t & z_t & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中  $V$  为导弹飞行速率; $h, p$  为  $t$  时刻弹轴在绝对坐标系中的方位角和俯仰角; $(x_t, y_t, z_t, 1)$  为  $t$  时刻弹轴在绝对坐标系中的坐标。

## 2 时间放大方法

在仿真过程中,需要处理的数据量非常大,特别是对成像系统效应的模拟,需要耗费很长的时间,因而无法实现实时仿真。为此,仿真系统中采用了“时间放大”方法,即每一帧的仿真时间比成像系统的帧间隔长  $n$  倍。这样,在虚拟样机采用实时帧频的情况下,仿真系统能有足够的时间完成数据处理。例如,对于帧频为 25 帧/s 的虚拟样机,允许计算机用  $n \times 0.04$  s 完成一帧的数据处理(包括图像截取、效应添加、参数计算、场景更新等),而在计算光轴、弹轴偏转以及导弹的位移时,仍以 0.04 s 作为时间间隔。场景根据 0.04 s 内光轴、弹轴以及导弹的运动结果进行更新。下一帧图像来源于经过了 0.04 s 变化的场景,计算机用下一个  $n \times 0.04$  s 完成该帧的数据处理。显然,用时间放大方法得到的仿真结果与实时仿真结果等效。

## 3 仿真结果

### 3.1 $K_s$ 的优化

对于用公式(6)作为光轴调整方程的系统,由分析可知满足下式的  $K_s$  值是最优的:

$$\frac{1}{2} K_s \epsilon^2 = \arctg \left( \epsilon_n \frac{2}{N} \text{tg} \frac{FOV}{2} \right) \quad (8)$$

式中  $\epsilon$  为信号处理系统输出的误差信号; $t$  为帧时; $\epsilon_n$  为图像上以像素为单位的目标偏差; $N$  和  $FOV$  分别为同一方向上探测阵列单元的个数和系统视场。对于采用  $256 \times 256$  元 FPA, 视场为  $4^\circ \times 4^\circ$  的系统, 当取  $\epsilon = \epsilon_n$  时, 可得  $K_s = 0.34$ 。图 6 为不同  $K_s$  值下光轴的运动过程仿真结果。从图中可以看出,  $K_s =$

0.34时,导引头最先进入稳定跟踪状态。

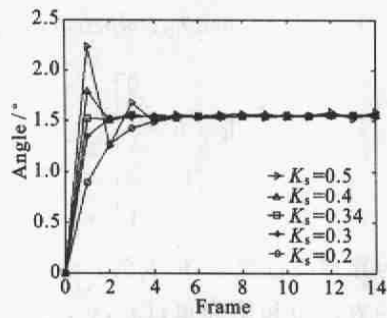


图 6 不同  $K_s$  下光轴运动图

Fig. 6 LOS adjustments under different  $K_s$ .

### 3.2 探测概率与作用距离

定义系统噪声均方差与目标辐射亮度的比值为信噪比,则由多次仿真试验统计得到在 90% 检测概率情况下,不同的作用距离要求的 SNR,如表 1 所示。在信噪比一定的情况下,不同距离的探测概率如表 2 所示。

表 1 不同作用距离要求的信噪比

Tab. 1 Required SNR for different ranges

Range /km	8	7	6	4	3
SNR	12.672	5.438	4.735	2.525	1.722

表 2 信噪比确定的情况下,系统在不同距离处的探测概率

Tab. 2 Detection probability of different range under fixed SNR

Range /km	7	8	9	10	11
SNR=10	1	0.809	0.667	0.381	0.286
SNR=5	0.667	0.476	0.429	0.286	0.190

### 3.3 攻击仿真

利用仿真系统,对红外成像导弹攻击舰船目标的过程进行了仿真。相关参数如下:

在绝对坐标系下(坐标轴的长度单位为 m),舰船目标位置为 (30100, 33000, 0),导弹初始位置为 (30000, 28000, 25),初始俯仰角和方位角均为 0,导弹轴向速度  $v=270$  m/s,导引系数  $K_s=0.34$ ,FPA 为  $256 \times 256$  元器件,时间间隔  $dt=0.04$  s。图 7 为从仿真得到的图像序列中取出连续的 4 帧。图像中心的框为瞄准框,小矩形框为目标锁定框。

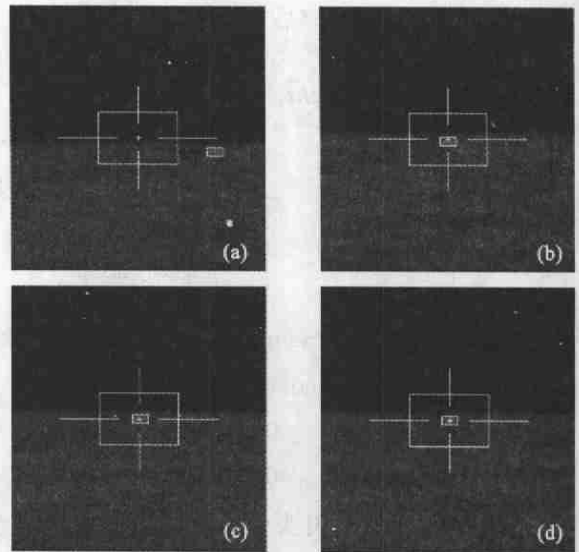


图 7 由仿真得到的 4 帧连续图像

Fig. 7 Four frames sequential images from simulation

## 4 结论

从红外成像制导系统的制导机理出发,分析了导弹攻击目标过程中,导弹与场景间的相对运动关系,以此为基础,建立了基于三维红外场景的红外成像制导系统虚拟样机。与采用已生成的图像序列作为数据源的仿真相比,三维场景的引入,大大提高了仿真的逼真度和可信度。仿真试验结果表明,该模型较好地模拟了红外成像制导导弹的制导过程,为后续红外成像制导系统性能评估研究提供了良好的仿真环境。

### 参考文献:

- [1] 钟任华. 飞航导弹红外导引头[M]. 北京:宇航出版社,1995.
- [2] 刘永昌. 红外成像制导仿真技术分析研究(一)[J]. 红外技术, 1996,18(1): 9-12.
- [3] 刘永昌. 红外成像制导仿真技术分析研究(二)[J]. 红外技术, 1996,18(2):29-31.
- [4] Morin A. Simulation of infrared imaging seeking missiles[A]. SPIE[C]. 2001, 4365. 46-57.
- [5] 张敬贤,李玉丹,金伟其. 微光与红外成像技术[M]. 北京:北京理工大学出版社,1995. 229-232.
- [6] 杨宜禾,岳敏,周维真. 红外系统(第二版)[M]. 北京:国防工业出版社,1995. 202-206.
- [7] 左月萍. 红外成像系统的典型效应模拟与系统性能评估[D]. 西安:西安电子科技大学,2002.
- [8] 孙家广,杨长贵. 计算机图形学(新版)[M]. 北京:清华大学出版社,1995. 341-348.