

水面舰船目标的实时红外成像仿真

王彦, 谢晓方

(海军航空工程学院二系, 山东烟台 264001)

摘要:基于 OSG 对海天背景下的舰船目标进行了红外成像仿真。根据红外物理和热传学知识,采用角系数法建立了舰船目标的红外物理模型,从而计算出舰船表面温度场和辐射场的分布。参考导弹的飞行模式,采用三阶非线性指数拟合算法得到了弹目距离与透过率的数学关系模型。最后采用着色器技术实现导弹飞向目标过程中,导引头视景中舰船灰度的实时渲染和变化效果。仿真实验表明,舰船的红外仿真效果较好,模拟导弹末端飞行过程时,舰船灰度变化趋势与实际情况一致,仿真结果可信。

关键词:水面舰船;红外辐射;温度分布;非线性指数拟合;着色器

中图分类号:TP391.4 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2015.08.022

Real-time IR imaging simulation of the surface warship

WANG Yan, XIE Xiao-fang

(Department of Ordnance Science and Technology, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: The IR imaging simulation of the warship in the background of sea and sky based on OSG is given in this paper. According to the theory of IR physics and heat transfer, the IR physical model of warship was built by angle factor method, and then the temperature field distribution and radiance field distribution of the ship surface were calculated. Refer to missile trajectory, the mathematical model of the distance between missile and target and the transmittance were obtained by the third order nonlinear exponential fitting algorithm. At last, real time rendering and the gradual change of ship surface grayscale in IR seeker view was done by the shader technology during the missile flies to the target. The simulation experiments show that the simulation effect is better. The change of ship surface grayscale is consistent with real situation when simulating terminal flying of the missile, and the result of simulation is credible.

Key words: surface warship; infrared radiance; temperature distribution; nonlinear exponential fitting; shader

1 引言

红外制导模式是当前反舰导弹的主要制导模式之一。利用计算机模拟生成舰船的红外图像是红外导引头视景仿真领域的重要研究课题。计算机仿真能够比较真实地模拟各种环境下的舰船红外图像,大大节省使用成本,在红外导引头设计评估、仿真训练等领域具有广泛的应用前景。

国外在舰船红外仿真领域的起步较早,并且技

术成熟。如美国的 ERIM(密执安环境研究所)已经将海洋背景和目标放在一起,研发了“船只和海洋表面图像模拟包”^[1]。MultiGen_Paradigm 公司开发的 Vaga Prime 软件的红外传感器模块可以逼真生成海面目标的红外效果,并已经广泛应用于大规模红外视景仿真中。

在参考国外一些研究成果的基础上,国内学者从初步建立了海面舰船的红外辐射场模型^[2-3]。但

这些研究成果仅仅从揭示舰船目标红外特性研究出发,没有考虑时间和系统资源消耗问题,也没有具体的应用背景,难以应用于视景仿真开发。国内关于舰船目标的红外实时仿真的研究成果更为少见。文献[4]中的红外辐射实时海面舰船红外热像仿真平台在国内比较具有代表性。另外,文献[5]提出了一种值得参考的红外目标的实时生成方法。

本文首先通过理论分析计算稳态条件下面元的温度场和红外辐射场,生成舰艇的红外辐射模型,然后在着色器中实现导引头视景中灰度的实时变化。导引头视景的生成使用 OSG3.0 引擎在 VS2010 中实现。

2 舰船目标的温度场计算

由于舰船的结构对红外辐射影响较大,因此首先对某新舰船建立了几何模型。由于舰艇面元之间存在着辐射和热量传递,为简化计算,在保证舰船模型尽量真实的前提下对舰船模型进行了一定程度的简化。对模型的表面进行了网格划分,并采用角系数法计算模型表面的温度分布^[6]。

海天背景下舰船的红外辐射主要包括面元的自身辐射和面元对环境辐射的反射。将舰艇表面作为灰体,则舰艇面元 i 的自身辐射表示为:

$$E_{self,i} = \varepsilon_i \sigma T_i^4 \quad (1)$$

其中, σ 为黑体辐射常数; ε_v 为舰船表面材料的发射率。面元环境辐射主要包括天空辐射、太阳辐射、海洋辐射。太阳辐照度 E_{sun} 和天空辐照度 E_{sky} 可由 MODTRAN4 计算^[7]。面元 i 的太阳辐照度和天空辐照度分别为:

$$E_{sun,i} = F_{i,sun} E_{sun} \quad (2)$$

$$E_{sky,i} = F_{i,sky} E_{sky} \quad (3)$$

其中, $F_{sun,i}$, $F_{sky,i}$ 分别为太阳与面元辐射的角系数和天空与面元的角系数。海洋辐射应包括海洋自身的辐射和反射太阳辐射两部分。海洋作为灰体,其自身辐射为:

$$E_{sea} = \varepsilon_{sea} \sigma T_{sea}^4 \quad (4)$$

海面对太阳的反射辐照度为:

$$E_{sea} = (1 - \varepsilon_{sea}) E_{sun} \quad (5)$$

所有海面反射求和后的总面元 j 的海面辐照度为 $E_{sea,i}$, 则面元 i 的海洋辐照度为:

$$E_{sea,i} = F_{i,j} E_{sun} \quad (6)$$

面元 i 还接收其他面元的辐射其他面元 k 的辐

射, 表示为 $\sum_k F_{k,i} J_k$, 这样, 面元 i 的环境入射辐射为:

$$G_i = E_{sun,i} + E_{sky,i} + E_{sea,i} + \sum_k F_{k,i} J_k \quad (7)$$

F_{ki} 为面元 k 对面元 i 的辐射角系数。不考虑船体隔热层的横向导热, 内热源贡献可表示为:

$$E_{in,i} = \frac{A_i (T_{in} - T_i)}{\frac{d_1}{k_1} + \frac{1}{h_1}} \quad (8)$$

其中, A_i 为面元 i 的面积; d_1 为隔热层厚度; k_1 隔热层的导热系数; h_1 为内舱的对流系数。

面元 i 外表面与空气存在对流热换为:

$$conv = A_i (h_2 + \beta_2 V) (T_i - T_{air}) \quad (9)$$

其中, h_2 和 β_2 为舱外空气的自然和强迫对流系数换热系数; V 为环境风速。

相邻面元之间也存在热量传递, 可以表示为

$$cond = \sum_{near} \frac{\alpha u_{near,i}}{L_{near,i}} (T_i - T_{near}) \quad (10)$$

其中, α 为材料的导热率; $u_{near,i}$ 为相邻面元的公共边长; $L_{near,i}$ 为相邻面元中心点间的距离。

假设面元处于热稳态状态, 则对面元 i 建立热平衡方程为:

$$E_{in,i} + G_i - E_{self,i} + conv + cond = 0 \quad (11)$$

对所有面元联立热平衡方程, 即可以求解所有面元的温度。在已知面元温度时, 使用如下公式计算面元的辐亮度。

$$L = \frac{\varepsilon}{\pi} \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} M_{\lambda} d\lambda \quad (12)$$

其中, M_{λ} 为黑体辐出度, 由普朗克定律求解:

$$M_{\lambda} = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{\exp(\frac{C_2}{\lambda T_i}) - 1} \quad (13)$$

其中, C_1 和 C_2 分别为第一和第二辐射系数。在视景仿真中, 舰艇目标的辐射最终必须量化为灰度级, 从而生成舰艇的红外图像。实际上, 红外图像仅仅表示的是不同温度物体的相对灰度, 采用灰度平均法计算面元灰度, 如公式(14)进行灰度映射。图像灰度范围设为 0 ~ 255。

$$G = \frac{R_G (L - L_{min})}{L_{max} - L_{min}} \quad (14)$$

其中, R_G 为图像的灰度范围; L_{max} 和 L_{min} 分别为接收的最大和最小辐射。这样, 就得到了舰艇的红外

模型。

由于温度场的计算量很大,难以做到实时处理。因此我们计算不同条件下(太阳角度、风速等)的舰艇温度场从而生成面元的红外纹理,并存储于数据库中。仿真时根据环境设置渲染舰艇面元纹理。在实际应用背景中,主要考虑 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 的中波段红外辐射。

3 大气透过率的计算

实际上,由于大气透过率的影响,目标辐射在空气中传输中会产生衰减,这使得导弹在飞向目标过程中,目标灰度在导引头视景中会随着弹目距离的减小逐渐增大。参考导弹的飞行模式,得到了弹目距离与透过率的关系,如图 1 所示。图 1 中的实线表示弹目距离与透过率的理论计算值,由 MOT-RAN4 软件计算并插值得到。

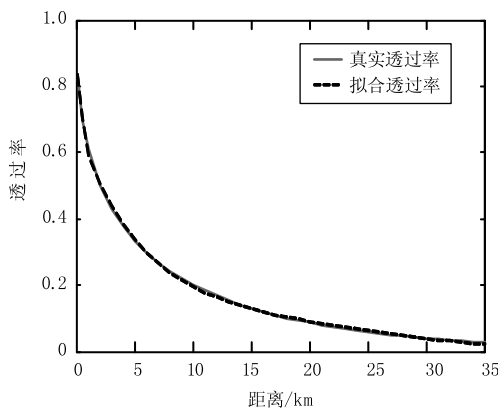


图 1 透过率与距离关系的拟合

Fig. 1 Fitting of the relationship of transmittance and range

采用了 3 阶非线性指数拟合算法对透过率与距离的关系曲线进行了拟合(如图 1 所示),得到数学模型如公式(15)所示:

$$\tau = \sum_{i=1}^M a_i e^{-b_i R} \quad (15)$$

其中, a_i 和 b_i 为拟合系数; R 为弹目距离; M 取 3。根据图 1,拟合结果与理论值的吻合较好,在 $0 \sim 35 \text{ km}$ 距离范围内的均方误差为 $1.132613161250 \times 10^{-5}$ 。这样,舰艇红外辐射到达探测器的最终辐亮度可表示为:

$$L_{\text{normal}} = \tau \times L \quad (16)$$

4 场景与目标的渲染

采用着色器技术在 OSG3.0 引擎下开发了舰船目标仿真软件,仿真环境为 vs2010。OSG 程序的结构和着色器的渲染流程如图 2 和图 3 所示。图 2 中

的海洋模块采用具有自主知识产权的中波段红外动态海洋模块,能够较好地实现中波段海洋的动态红外效果。

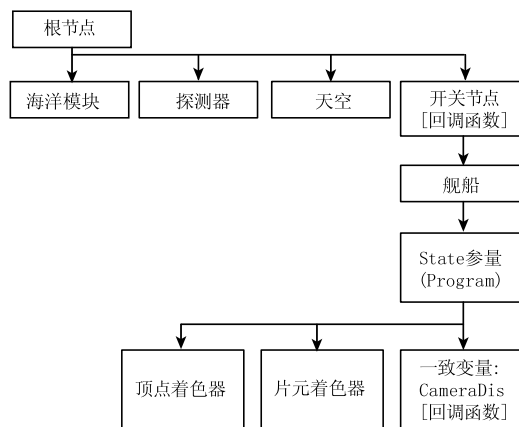


图 2 场景程序结构图

Fig. 2 The structure map the scene program

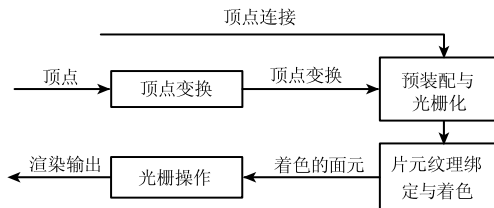


图 3 着色器渲染流程

Fig. 3 The Rendering pipeline of shader

鉴于舰船的仿真模型为 FLT 格式,在仿真时,结合 Openflight API,在仿真中实时获得面元的 ID 号及法线信息,从纹理数据库中查询对应 ID 面元的纹理列表并计算太阳光与面元夹角,再根据场景的环境条件动态加载纹理。

由于透过率是弹目距离 R 的函数,对探测器(Camera)位置的实时获取是关键。在主程序中设置两个全局变量 vec3 pos 和 float distance 并初始化,分别表示探测器的位置坐标和弹目距离。由于目标的坐标已知,在帧前更新函数 $\text{PreFrameUpdate}()$ 中计算更新 pos 和 distance 的值。

实际上,由于大气衰减的影响,只有在弹目间小于一定距离时,目标才能在视景中出现。开关节点(如图 2)用于控制目标在视景中的渲染时机。在其回调函数(callback)中,读取 distance 值。当 distance 值小于门限值时,显示模型。实际上,该门限值与大气透过率以及探测器的灵敏度有关。这里采用经验值,取值为 15 km 。

使用着色器技术实现探测器由远及近时,舰艇面元灰度的实时变化。建立了一个 uniform 变量

CareraDis 表示弹目距离,并将其传递给模型的片元着色器。CareraPos 的值取自 distance 变量,并在其回调函数(uniformCallback)中更新。在片元着色器中,根据公式(15)计算透过率。

虽然透过率与到达探测器的接收辐射存在线性关系,但其在着色器中不能直接用于面元的灰度控制。在面元着色器中使用控制参数 A 控制舰船的灰度渲染,其与透过率的关系表示为:

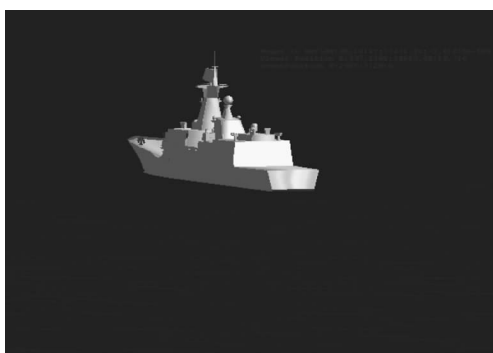
$$A \times G = \frac{R_G(\tau L - L_{\min})}{L_{\max} - L_{\min}} \quad (17)$$

式中, τ 为透过率, G 为零视距下的舰艇面元灰度。结合公式(13)、(14),得到了 A 与 τ 的转换关系为:

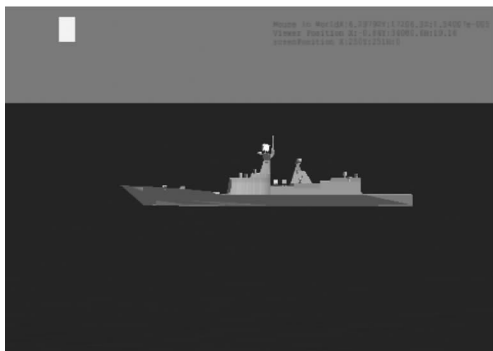
$$A = 1 + \frac{R_G L_{\min}(\tau - 1)}{G(L_{\max} - L_{\min})} \quad (18)$$

5 仿真效果与分析

根据理论计算结果,在一次仿真中,调整舰艇的姿态角,仿真效果如图4所示。图4中,太阳方位角为正南,天顶角为 40° 。 θ 为舰艇方向角,以正北方为基准,逆时针为正向。根据图4,在同一仿真中,调整舰艇姿态角,舰艇表面灰度能够随角度变化而变化,并且场景的渲染帧率在 $59.3 \sim 60.3$ 之间,能够满足实时性要求。



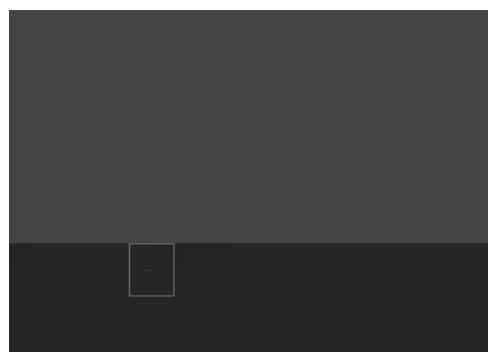
(a) $\theta=30^\circ$



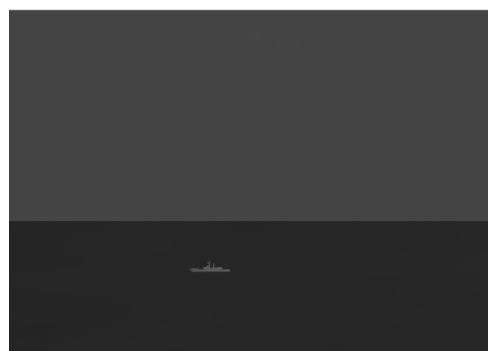
(b) $\theta=90^\circ$

图4 不同视角下的舰艇红外模型
Fig.4 Model of the ship in different views

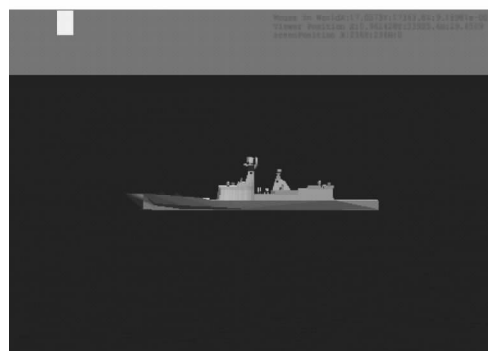
对导弹不同飞行阶段视景中舰船目标的红外成像效果进行了仿真,如图5所示。图5中 R 表示弹目距离, h 表示探测器的飞行高度。根据图5,舰艇整体灰度随弹目距离减小而增大,这与实际情况是相符的。



(a) $R=8001.31 \text{ m}$, $h=490 \text{ m}$



(b) $R=3085.02 \text{ m}$, $h=196 \text{ m}$



(c) $R=559.913 \text{ m}$, $h=14.12 \text{ m}$

图5 导弹不同飞行阶段的舰艇红外图像

Fig.5 The IR ship in different position of missile trajectory

采用图像分割算法提取仿真图像与真实图像的舰艇部分进行对比分析。表1给出了视距为1 km时,视景中仿真舰艇正侧面图像与真实舰艇图像的评价指标。图6给出了仿真舰艇灰度均值与真实舰艇红外图像灰度均值随距离变化的对比关系。

表1中采用绝对均方差与相关系数衡量仿真舰艇红外效果与真实图像的灰度分布的相似程度。根

据表 1 数据,仿真结果与实际情况基本吻合,可以反映真实舰艇红外分布情况。图 6 的仿真结果表明,仿真舰船灰度随距离的变化趋势与实际情况基本一致。

表 1 图像评价指标

Tab. 1 Index of image evaluation

评价指标	绝对均方差	相关系数
指标值	20.162116	0.6639

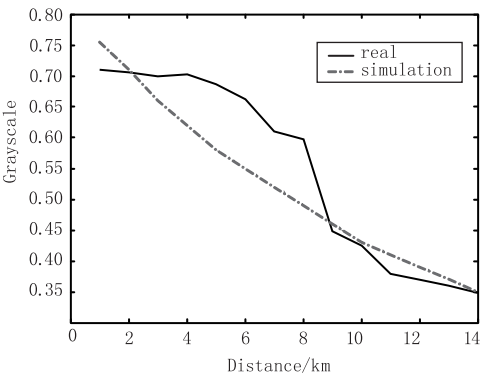


图 6 仿真舰船灰度与真实舰船灰度的对比

Fig. 6 Comparison of the grayscale

between the simulated ship and real ship

6 结 论

本文首先通过理论计算得到了舰艇目标的红外辐射模型,在 OSG 3.0 引擎下进行了基于导引头视景的舰船红外仿真,并编写了仿真验证程序。在导弹飞向目标的过程中,采用透过率的拟合模型控制舰艇面元的灰度,实现灰度的实时变化。实际上,针对不同类型的导弹,根据导弹的弹道不同,透过率曲线要做相应修正。下一步,将根据仿真图像与真实图像的灰度差异,进一步修正仿真模型的灰度值,使之更接近真实情况。本文研究成果已用于弹载红外导引头仿真训练模拟器的研制。

参考文献:

[1] XU Xiaogang, CHEN Bingfeng, ZHU Tao. Real-time IR simulation of naval battlefield environment[J]. Journal of System Simulation, 2006(18): 215-218. (in Chinese)

徐晓刚,陈炳峰,朱涛. 海战场环境实时红外视景仿真[J]. 系统仿真学报, 2006(18): 215-218.

[2] YANG Baocheng, SHEN Guotu, HONG Zhenqing, et al. The physical and mathematical model for theoretical simulation of thermal images of vessels[J]. Journal of East China Normal University: Natural Science, 2001, (2): 58-64. (in Chinese)

杨宝成,沈国土,洪镇青,等. 舰船热像理论模拟中的物理模型和数学模型[J]. 华东师范大学学报:自然科学版, 2001, (2): 58-64.

[3] ZHU Wenyong, GAO Jing, ZHOU Ganghui, et al. The simulation of infrared imaging of the ship[J]. J. Infrared Millim. Waves, 1998, 17(2): 129-133. (in Chinese)

朱文勇,高景,周刚慧,等. 舰船红外成像模拟[J]. 红外与毫米波学报, 1998, 17(2): 129-133.

[4] REN Haixia, REN Haigang, XU Gao. Real-time infrared simulator of marine ship[J]. IR and Laser Engineering, 2007(36): 202-206. (in Chinese)

任海霞,任海刚,徐杲. 实时海面舰船红外热像仿真平台[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(2): 202-206.

[5] WANG Xuewei, ZHANG Weiguo. Computer generation of dynamic infrared images of a plane[J]. IR and Laser Engineering, 1999(28): 21-24. (in Chinese)

王学伟,张卫国. 飞机目标动态红外图像的计算机生成[J]. 红外与激光工程, 1999(28): 21-24.

[6] LOU Shuli, DONG Yanzhi, ZHOU Xiaodong. IR image generation of warship based on OpenGL[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2007(27): 71-74. (in Chinese)

娄树理,董言治,周晓东. 基于 OpenGL 的舰船目标红外图像生成[J]. 弹箭与制导学报, 2007(27): 71-74.

[7] Berk A, Anders on G P, Acharya P K, et al. Modtran4, user's manual[J]. Air Force Research Laboratory, 1999.

[8] JIAO Yingqi, REN Guoquan, LI Dongwei. Overview of image quality evaluation methods for photoelectric system[J]. Laser & Infrared, 2014, 44(9): 966-970. (in Chinese)

矫英祺,任国全,李冬伟. 光点系统图像评价方法综述[J]. 激光与红外, 2014, 44(9): 966-970.