OpenGL 在红外辐射计算中的应用

方 宁 张晓林 高 嘉 齐正云

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191)

摘 要: 提出一种将 OpenGL 应用在目标红外辐射特性计算中,从而实现目标红外辐射特性可视化计算的方法. 由于 OpenGL 可用于构造三维模型,进行三维图形交互软件的开发;因而将其引入红外辐射特性计算中可解决复杂目标计算问题,而且图形硬件的消隐能力避免了遮挡计算并使计算以所见即所得的方式实现可视化. 针对目标红外辐射特性中的自身辐射和目标对太阳光的反射部分,分别运用光照模型中发射光和漫反射的特性,以像素的颜色获取温度参数和法矢从而实现可视化计算. 用一个简单标准体模型进行验证,计算结果表明了该方法的有效性和可行性.

关 键 词: 红外辐射; 可视化; 图形计算

中图分类号: V 474.2; O 434.3

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2009)12-1473-04

Infrared radiant computation by OpenGL

Fang Ning Zhang Xiaolin Gao Jia Qi Zhengyun

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: A method of computing the infrared radiant intensity of complex target using OpenGL which achieved the visual infrared radiation calculation was presented. For OpenGL is able to be applied to construct the three-dimensional modal of objects and do three dimensional interaction, the evaluation of complex target's infrared radiant intensity is available. Utilizing the hidden capability of graphics hardware, the computation of shelter was avoided and the radiant intensity then was obtained by WYSWYG(what you see what you get). Different visual light models were applied to get the self-radiation and the reflection of sun energy of target. The parameters of emission and diffuse reflection in light model determined the color of each pixel in computer screen and then the temperature and the normal of each pixel were obtained. So the computation was implemented visually. A simple model was applied to verify this method's validity and feasibility.

Key words: infrared radiation; visualization; graphic computation

在电磁领域中,微波和红外辐射[1-4]是其中两大研究方向,由于频段的不同,物理性质的差异,计算方法也有所差异,但有些方法是可以互相借鉴并加以利用的. 在计算高频区目标雷达散射截面(RCS,Radar Cross Section)的众多方法中,图形电磁计算(GRECO,Graphic Electromagnetic Computation)[5-6]是其中一种快速、高效的可视化方法,被广泛应用于各种仿真计算. GRECO 充分利用 OpenGL[7] 的特点,通过光照模式将目标显示在屏幕上,获取各种计算参数从而得到目标的 RCS. 对红外辐射特性计算而言,也可以借助 OpenGL 的消隐和光照的优势,实现目标红外特性的可视化计算,本文重点介绍如何通过 OpenGL 实现红外特性计算.

1 红外辐射

对于空间目标而言,目标红外辐射主要分为 2 个部分:自身辐射和对背景的反射,其中背景部

收稿日期: 2008-12-02

作者简介: 方 宁(1979—),女,辽宁鞍山人,博士后,fangn31@163.com.

分包括太阳、地面、大气等.本文以对太阳辐射的反射为例,计算自身辐射和对太阳的反射2部分.

1.1 自身辐射

对于物体表面上的第 i 个面元,依据普朗克定律和朗伯余弦定律,该面元在 $\hat{\boldsymbol{d}}$ 方向上的光谱辐射强度为

$$\Delta I_t^i(\lambda)=\frac{\varepsilon_\lambda C_1}{\lambda^5(\mathrm{e}^{C_2/\lambda T^i}-1)}\frac{\Delta s^i\cos(\hat{\boldsymbol{n}}\cdot\hat{\boldsymbol{d}})}{\pi} \quad (1)$$

式中,ε_λ 为物体单色发射率;λ 为波长;Δs^i 为第 i 个面元面积大小;T^i 为第 i 个面元温度;C_1,C_2 分别为第一辐射常数和第二辐射常数 $C_1=3.743\times10^8\ \mathrm{W\cdot m^{-2}\cdot\mu m^4}$,$C_2=1.4387\times10^4\ \mu\mathrm{m\cdot K}$.

1.2 对太阳的反射

太阳视为黑体,并设其等效温度 T_s 为6 000 K,由普朗克黑体辐射定律并考虑到距离的影响,到达目标处的太阳光谱辐射度为

$$I_s(\lambda)=\frac{C_1}{\lambda^5(\mathrm{e}^{C_2/\lambda T_s}-1)}\cdot\left(\frac{r_s}{r_0}\right)^2 \quad (2)$$

其中,r_s 为太阳半径,$r_s\approx7\times10^5$ km;r_0 为地球与太阳的平均距离,$r_0\approx1.5\times10^8$ km,由于地球与太阳之间的距离非常远,日地之间的距离可认为一常数.

假设目标表面对太阳光的反射是漫反射,则目标上第 i 个面元对太阳辐射的反射强度为

$$\Delta I_s^i(\lambda)=\frac{3}{2\pi}I_s(\lambda)\cos(\hat{\boldsymbol{n}}^i,\hat{\boldsymbol{s}})\cos(\hat{\boldsymbol{n}}^i,\hat{\boldsymbol{d}})\times\Delta s^i\times\eta_s^i\times K^i \quad (3)$$

式中,$\hat{\boldsymbol{n}}^i$ 为第 i 个面元法向;$\hat{\boldsymbol{s}}$ 为太阳光的入射方向;η_s^i 为第 i 个面元的反射系数;K^i 为第 i 个面元的遮挡系数;η_s^i 和 K^i 分别满足以下关系:

$$\eta_s^i=\begin{cases}0.1\sim0.2 & \cos(\hat{\boldsymbol{n}}^i,\hat{\boldsymbol{s}})>0\\ 0 & \cos(\hat{\boldsymbol{n}}^i,\hat{\boldsymbol{s}})\leqslant0\end{cases} \quad (4)$$

$$K^i=\begin{cases}1 & \cos(\hat{\boldsymbol{n}}^i,\hat{\boldsymbol{d}})\geqslant0\\ 0 & \cos(\hat{\boldsymbol{n}}^i,\hat{\boldsymbol{d}})<0\end{cases} \quad (5)$$

1.3 总辐射

在辐射表面 S 和 $\lambda_1\sim\lambda_2$ 波段上积分,目标在 $\hat{\boldsymbol{d}}$ 方向上的辐射强度为

$$I=\int_S\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}\Delta I_t^i(\lambda)+\Delta I_s^i(\lambda)\mathrm{d}\lambda\mathrm{d}s \quad (6)$$

2 基于OpenGL的计算

OpenGL软件系统主要是通过为每个像素赋予一定的颜色值表现事物,颜色分量则由光照模型计算得到.红外辐射计算涉及到的面元法矢、温度分布等参数,可将其转换成颜色值或通过颜色值表示部分计算,则可实现红外辐射强度的可视化计算.计算目标的自身辐射、对太阳辐射的反射需通过不同的光照设置来实现可视化计算,下面分别予以介绍.

2.1 光照模型

OpenGL的光可来自多个光源,每个光源可以单独控制开关,光源的属性也可通过设置颜色、位置、方向等改变.光线由4个成分构成:发射、泛光、漫反射、反射.每种成分也有相应的属性值从而实现特定光线.而场景中的物体对光的反射强弱由材料属性决定.当设置光源、物体的属性后,顶点的颜色为

$$\text{顶点颜色}=\text{发射光}+\text{全景泛光}+\sum\text{各光源(泛光}+\text{漫反射}+\text{镜面反射)} \quad (7)$$

将红外计算中的各个部分分别对应至各种光源、光线,即可实现可视化计算.

2.2 自身辐射

根据自身辐射计算公式的特点,自身辐射可用发射光部分模拟.在OpenGL光照系统里,自身发光部分来自物体本身,不受其他光源影响,发光大小由设置的颜色分量决定.当已知目标表面的温度分布后,将每个面元的温度用红、绿、蓝3个颜色分量表示,则目标的发射光颜色表示如下:

$$L_d=\rho_d\qquad d=R,G,B \quad (8)$$

ρ_d 表示 d 分量的大小,取值区间在[0~1].根据目标几何外形建立温度模型,并将投影变换取为正交投影方式,则式(1)中的投影面积将直接由像素所代表的实际面积大小表示.再从缓存区中获取每个像素的颜色分量,将颜色分量(R,G,B)转换成温度值,带入式(1)即可获得此像素的辐射强度.

2.3 对太阳的反射

在漫反射中,经常采用Phone光照模型为每个屏幕上的像素计算光照值.此时像素 R,G,B 颜色的亮度为

$$L_d=L_s\alpha_L\rho_d\hat{\boldsymbol{n}}\cdot\hat{\boldsymbol{r}}_i\qquad d=R,G,B \quad (9)$$

其中,L_d 是每种颜色的漫反射亮度;L_s 是光源的强度;α_L 是光传播在媒质中的衰减;ρ_d 是每种颜色的漫反射系数;$\hat{\boldsymbol{n}}$ 是像素所处表面的法矢;$\hat{\boldsymbol{r}}_i$ 是指向光源的方向矢量.如图1所示.

由于物体表面对太阳辐射的反射属于漫反射,OpenGL光照系统中的漫反射部分可用来模拟此现象.将太阳光设置成一平行光源,其照射强

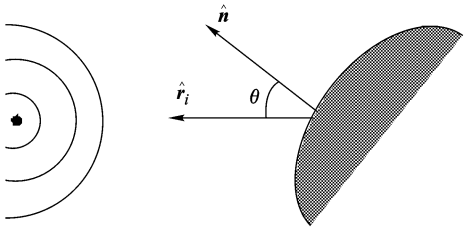


图 1　Phong 光照模型的漫反射几何关系

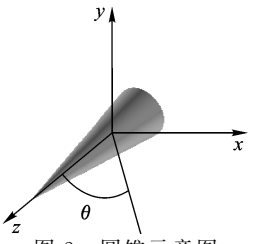


图 2　圆锥示意图

度设为 1,并位于太阳光照射的方向上,将 L_s,α_L 和 ρ_d 均设为 1,则有

$$L_d = \hat{\boldsymbol{n}} \cdot \hat{\boldsymbol{r}}_i \tag{10}$$

根据式(3),$\hat{\boldsymbol{d}}$ 为观察方向即垂直于屏幕方向 $\hat{z}$,因此 $\cos(\hat{\boldsymbol{n}},\hat{\boldsymbol{d}})\Delta s$ 表示目标表面在观察方向上的投影面积即每个像素代表的面积. 令 $\hat{\boldsymbol{r}}_i = \hat{\boldsymbol{s}}$,则 $\cos(\hat{\boldsymbol{n}},\hat{\boldsymbol{s}})$ 对应着 $\hat{\boldsymbol{n}} \cdot \hat{\boldsymbol{r}}_i$. 对式(3)中的反射系数 η_s 而言,$\eta_s = 0$ 表示目标上太阳光未被照射到的地方,$\eta_s > 0$ 表示太阳光可照射到的部分,此关系亦可用 $\hat{\boldsymbol{n}} \cdot \hat{\boldsymbol{r}}_i$ 表示. 当 $\hat{\boldsymbol{n}} \cdot \hat{\boldsymbol{r}}_i > 0$ 表示 $\eta_s > 0$,相反,$\hat{\boldsymbol{n}} \cdot \hat{\boldsymbol{r}}_i = 0$ 代表 $\eta_s = 0$;对遮挡系数 K_s 来说,由于消隐的作用,观察方向上看不见的表面不会在屏幕上出现,即屏幕上可见部分对应 $K = 1$. 利用上述设置,式(3)中的部分计算将由硬件设备完成,提高了计算速度.

2.4　总 辐 射

目标图像在屏幕上显示后,目标表面从三角面元细化为像素,则目标总的辐射强度从积分式(6)转化为

$$I = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \sum_{\text{pixels}} (\Delta I_t^i(\lambda) + \Delta I_s^i(\lambda))\,\mathrm{d}\lambda \tag{11}$$

3　仿真计算

图 2 所示为利用 AutoCAD 软件构建一拟导弹弹头的圆锥型目标,纵向长 0.7 m,底部直径为 0.2 m. 设圆锥表面温度 450 K,发射率为 0.45. 当温度为 450 K 时,根据普朗克定律和维恩位移定律,黑体的光谱辐射度分布如图 3 所示,波长为 $\lambda_{max} = 6.44\ \mu$m 对应最大辐射度. 由于大气传输的典型窗口在 1～3 μm,3～5 μm 和 8～14 μm 3 个波段上,因此 λ_{max} 附近的辐射能量无法通过大气. 计算目标在 8～14 μm 上不同观察角度下的光谱辐射强度,见图 4. 从图中可知,随着转角的增加,光谱辐射强度也随之增加,这是由于圆锥在转动的过程中在观察方向上的投影面积逐渐增大.

众所周知,太阳温度高达 6 000 K,其辐射能量主要集中在短波段,在较长波段内所占比例很

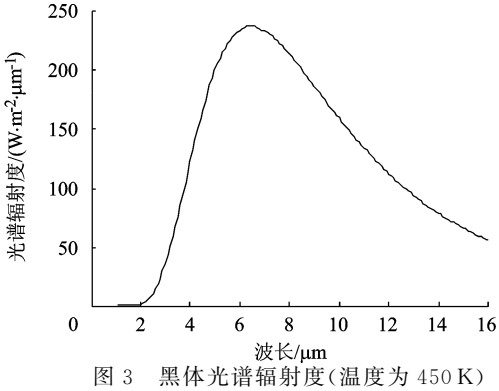


图 3　黑体光谱辐射度(温度为 450 K)

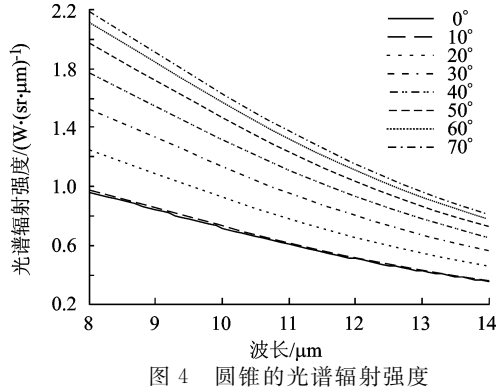


图 4　圆锥的光谱辐射强度

小,因而目标对太阳辐射的强度应主要体现在1～3 μm 波段. 设太阳、目标的相对位置如图 5 所示时,太阳始终位于 $+x$ 轴无穷远处,目标绕 y 轴旋转,则目标在 $+z$ 轴方向上的总射强度如图 6 所示. 从图中可知,目标在 80°～110°之间辐射较强,形成对称模式,这是由在观察方向上目标未被太阳照射到的面积和照射到的面积未能对观察方向产生贡献的部分共同作用的结果. 进一步,对 90°,110°,120°和 130° 4 个姿态下计算光谱辐射强度,如图 7 所示. 波长越短,光谱辐射强度越强,与太阳辐射能量集中在短波段相一致.

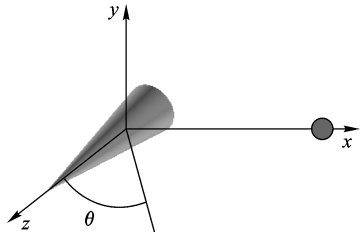


图 5　太阳与目标位置示意图

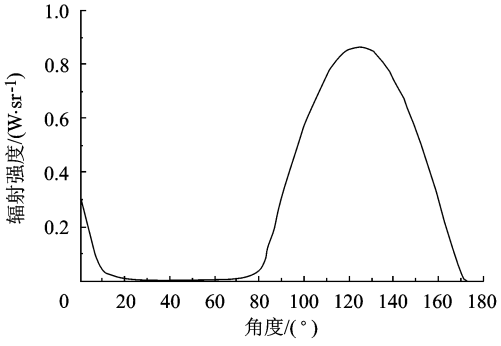


图 6 目标对太阳辐射的反射辐射强度

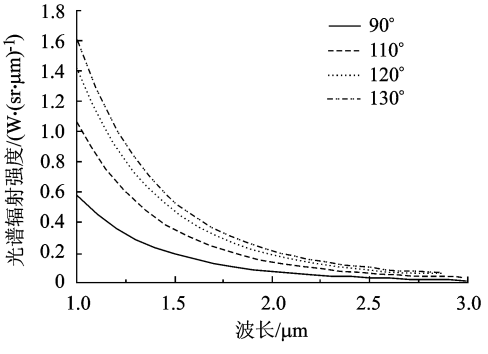


图 7 目标光谱辐射强度

4 结束语

本文给出 OpenGL 在目标红外辐射特性计算中的应用方法，实现了红外辐射特性的可视化计算方法. 通过适当设置光源、物体的属性值，在 OpenGL 光照系统中，成功实现了可视化的红外辐射强度计算. 计算结果表明了该方法的可行性和有效性. 该方法为实时获得目标红外图像提供了基础.

参考文献（References）

[1] Pieter A Jacobs. 地面目标和北京的热红外特性[M]. 吴文健，胡碧茹，满亚辉，译. 北京：国防工业出版社，2004：6－12
Pieter A Jacobs. Thermal infrared characterization of ground targets and backgrounds[M]. Translated by Wu Wenjian, Hu Biru, Man Yahui. Beijing: National Defense Industry Press, 2004: 6－12 (in Chinese)

[2] 宣益民，韩玉阁. 地面目标与背景的红外特性[M]. 北京：国防工业出版社，2004：20－32
Xuan Yimin, Han Yuge. Infrared characterizations of ground targets and backgrounds[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004:20－32 (in Chinese)

[3] Zhang Ying, Yu Hong, Zhang Jintao. Infrared target radiation calculation and simulation scene generation[C]// System Simulation and Scientific Computing, 2008, ICSC 2008, Asia Simulation Conference-7th International Conference on. Beijing: Chinese Association for System Simulation, 2008: 1459－1463

[4] Chen F M, Jin X Y, Liu Y J, et al. Engineering algorithm of the atmospheric attenuation in the infrared wireless communication[C]// Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2007, WiCom 2007, International Conference on. Shanghai: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 2007: 984－987

[5] Rius J M, Ferrando M, Jofre L. High-frequency RCS of complex radar targets in real-time[J]. Antennas and Propagation, IEEE Transactions on, 1993, 41(9): 1308－1319

[6] Rius J M, Ferrando M, Jofre L. GRECO: graphical electromagnetic computing for RCS prediction in real time[J]. Antennas and Propagation Magazine, IEEE, 1993, 35(2): 7－17

[7] 贾志刚. 精通 OpenGL[M]. 北京：电子工业出版社，1998
Jia Zhigang. Mastering OpenGL[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1998(in Chinese)

（编 辑：娄 嘉）