

红外多光谱图像仿真方法研究

李 波^{1,2,3,4,5}, 赵怀慈^{1,3,4}, 花海洋^{1,3,4}

- (1. 中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中国科学院光电信息处理重点实验室, 辽宁 沈阳 110016;
4. 辽宁省图像理解与视觉计算重点实验室, 辽宁 沈阳 110016;
5. 沈阳工程学院 信息学院, 辽宁 沈阳 110016)

摘 要: 针对光电武器研制过程中多光谱图像获取困难的问题, 提出了一种通过三维立体场景生成红外多光谱仿真图像的方法。该方法能够生成三维场景任意角度的红外仿真图像, 并形成特定波长范围的数据立方体。在 3-5 μm 范围内对特定目标进行了仿真实验, 以 0.005 μm 为步长生成了包含 401 张红外图像的数据立方体。为体现反射光的方向特性, 推导了一种基于 Phong 模型的 BRDF 模型, 并应用于对方向性较强的太阳直接辐射的反射在红外波段的计算, 并在 3-5 μm 范围生成了具有方向特性的红外仿真图像立方体。一系列实验数据表明, 该仿真方法可快速生成红外多光谱图像数据立方体, 而 BRDF 模型能够真实地反映反射的方向特性, 提高了仿真图像的逼真度。

关键词: 多光谱仿真; 数据立方体; Phong 模型; BRDF

中图分类号: TP391.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)06-1972-05

Infrared multispectral image simulation method

Li Bo^{1,2,3,4,5}, Zhao Huaici^{1,3,4}, Hua Haiyang^{1,3,4}

- (1. Shenyang Institute of automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Key Laboratory of Optical-Electronics Information Processing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;
4. Key Laboratory of Image Understanding and Computer Vision, Shenyang 110016, China;
5. College of Information, College of Information Shenyang Institute of Engineering, Shenyang 110016, China)

Abstract: In order to solve the acquisition problem of the multispectral images in the process of the research on Optical-Electronic weapons, a method of generating infrared multispectral simulation images by 3D scene was presented. The infrared image at any observation angle of the scene and a data cube of specific waveband could be generated by the method. Some experiments were done in waveband 3-5 μm to generate a data cube involving 401 infrared simulation images in the wavelength step 0.005 μm . A BRDF calculation model based on the Phong model was derived and used in the calculation of the reflection intensity of solar direct radiation which had strong directionality, and a data cube in waveband 3-5 μm involving infrared images with directionality was generated when the BRDF calculation mode

收稿日期: 2013-10-05; 修订日期: 2013-11-03

基金项目: 国防 973 科研课题; 辽宁省教育厅科研项目(L2011238)

作者简介: 李波(1980-), 男, 博士生, 主要从事虚拟仿真、高性能计算及其可视化方面的研究。Email: leebo@sia.cn

导师简介: 赵怀慈(1974-), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事虚拟现实方面的研究。Email: hc Zhao@sia.cn

was applied. The experiments results show that the simulation method presented in this paper could generate infrared multispectral images data cube rapidly, and the BRDF calculation model could reflect the directionality of the reflected light, which improves the fidelity of the simulation images.

Key words: multispectral simulation; data cube; Phong model; BRDF

0 引 言

多光谱成像技术是新一代光电探测技术,其采集的图像具有“图谱合一”的特点,不仅含有场景的二维信息,而且包含场景随波长分布的光谱辐射信息,并能够形成如图 1 所示的数据立方体,具有极强的抗干扰性,能够大幅度提高目标探测能力,可广泛应用于军事和民用领域^[1]。

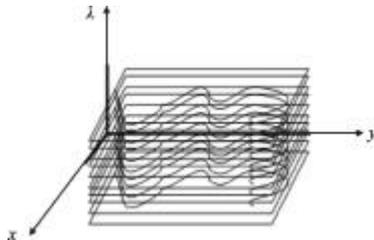


图 1 数据立方体
Fig.1 Data cube

由于基于目标背景光谱特性的相关设备的研究需要大量的多光谱图像进行验证和实验,因此如何通过仿真手段产生逼真的多光谱图像,成为一个亟需解决的问题。国内有众多学者进行着这一领域的研究,但多集中于由二维图像通过仿真方法生成多光谱图像的研究,比如许洪等提出了由可见光 RGB 图像生成 8~12 μm 波段红外多光谱图像的方法^[2],陈珊提出了由可见光图像生成对应的红外波段的 24 h 图像序列的方法^[3]。这些研究都具有相当的价值,但是在研究过程中对各种条件进行了大量的简化,丢失了众多信息;此外受限于二维图像的局限性,这些方法可生成的红外图像数据有限,不可能提供场景全方位的仿真图像。

针对以上问题,文中提出了基于三维场景的红外多光谱图像生成方法,可获取特定波长或者特定波段范围内的红外图像。该方法不仅可以最大程度保留场景的相关信息,而且可以生成多角度、全方位的多光谱仿真图像,满足对场景中的目标物任意角度的图像获取要求。此外,为了提高仿真图像的逼真

度,突出反射辐射的方向性,文中推导了一种基于 Phong 模型的 BRDF 计算模型,并应用于目标对太阳直接辐射的反射计算,提高了仿真图像的逼真度。

1 红外多光谱图像的仿真方法

总体而言,影响目标的红外图像的热辐射因素主要涉及目标的自身辐射、太阳辐射、地面辐射和大气辐射等几个方面。建立目标的热辐射模型如图 2 所示,图中的实线表示目标自身的热辐射,虚线表示目标对某种入射辐射的反射。不考虑热辐射在目标到传感器之间的大气损耗,仅对目标的热辐射状况进行研究,则传感器测得的目标的最终辐射强度(单位为 W/m²/sr/μm) L_{obj} 为:

$$L_{\text{obj}} = L_{\text{self}} + L_{\text{rsun}} + L_{\text{rsky}} + L_{\text{rground}} \quad (1)$$

式中: L_{self} 为目标自身热辐射; L_{rsun} 为目标对太阳辐射的反射; L_{rsky} 为目标对大气辐射的反射; L_{rground} 为目标对地面辐射的反射。

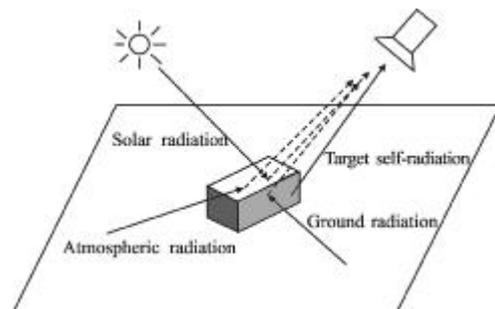


图 2 目标辐射情况示意图

Fig.2 Target radiation diagram

1.1 目标自身热辐射的计算

目标在某个波段范围内($\lambda_i \sim \lambda_j$)的辐射亮度情况为该波段内所有波长光线的辐射强度的积分:

$$L_{\text{self}}(\lambda_i \sim \lambda_j) = \int_{\lambda_i}^{\lambda_j} L(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

对黑体而言,根据普朗克定律,黑体的光谱辐射出射度(单位为 W/m²/μm)是温度和波长的函数,即:

$$M_b(\lambda, T) = 2\pi hc^2 / \lambda^5 \left(e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right) \quad (3)$$

其对应的光谱辐射亮度为:

$$L_b(\lambda, T) = M_b(\lambda, T) / \pi = 2hc^2 / \lambda^5 \left(e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right)^{-1} \quad (4)$$

式中: h 为普朗克常数; k 为玻耳兹曼常数; c 为光速; T 为热力学温度, 单位为 K。

非黑体的光谱辐射亮度与材质有关, 为:

$$L(\lambda) = L_b(\lambda, T) \cdot \varepsilon(\lambda) \quad (5)$$

式中: $\varepsilon(\lambda)$ 为材质的热辐射发射率。

将公式(3)~(5)代入公式(2)可得目标在某个波段范围内的自身辐射强度为:

$$L_{\text{self}}(\lambda_i \sim \lambda_j) = \int_{\lambda_i}^{\lambda_j} \varepsilon(\lambda) \cdot 2hc^2 / \lambda^5 \left(e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right)^{-1} d\lambda \quad (6)$$

1.2 目标对环境辐射的反射

太阳辐射、地面辐射和大气辐射可统称为环境辐射。由于影响环境辐射的因素太多, 不可能全部考虑周全, 因此环境辐射借助于 Modtran 和 Cart^[4] 等专业软件进行辅助计算。

1.3 仿真实验

选用七月份沈阳地区的某电厂的某个冷却塔作为研究对象, 建立三维模型如图 3 所示, 并在 3~5 μm 范围内对其辐射特性进行仿真。考虑到冷却塔本身由相对比较粗糙的水泥组成, 因此, 将冷却塔近似为朗伯体, 其自身热辐射具有方向无关性。设定大气能见度为 23 km, 太阳天顶角为 30°, 地面为普通陆地, 温度为 17 °C, 冷却塔表面温度为 25 °C, 不考虑从冷却塔表面到传感器之间的大气衰减效应和传感器自身干扰效应, 仅考虑冷却塔表面的辐射特性, 以 $\Delta\lambda = 0.005 \mu\text{m}$ 计算 3~5 μm 范围内的仿真图像数据立方体, 共获得 401 张图像。选取 $\lambda = 3$ 、 $\lambda = 4$ 和 $\lambda = 5$ 三个波长的仿真图像效果如图 4 所示。

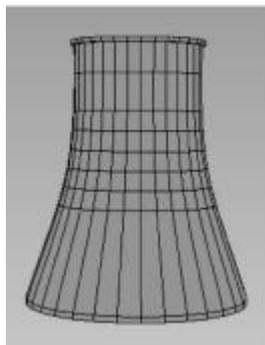


图 3 冷却塔三维模型

Fig.3 3D model of cooling tower

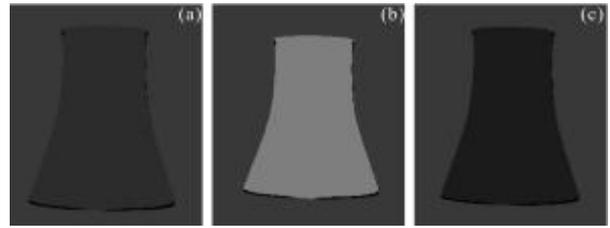


图 4 $\lambda = 3, 4, 5$ 时的仿真图像

Fig.4 Simulation images of $\lambda = 3, 4, 5$

1.4 仿真结果分析

图 7 所示仿真图像能够体现出在特定条件下不同波长的辐射亮度差异。但是无法反映观察角度引起的亮度差异。在夜间目标的辐射亮度主要取决于方向特性不明显的自身辐射和背景辐射时, 这种仿真效果是可以接受的; 当在白天存在太阳直接辐射时, 仿真结果体现不出太阳辐射的方向性。

2 基于 Phong 模型的 BRDF 模型

2.1 BRDF 获取方法

双向反射分布函数(BRDF)是关于入射角、反射角和波长的函数, 能够体现出入射光在不同反射方向的特性。在此处使用 BRDF 对目标对太阳直接辐射的反射进行计算, 以体现目标对太阳直接辐射的反射的方向特性。

根据定义, BRDF 为反射表面在某反射方向的散射亮度与入射到该表面的辐照度之比, 即

$$\text{BRDF} = \frac{L_r}{M_i} \quad (7)$$

式中: M_i 为沿入射方向的单位面积内入射能量的总量。 L_r 为反射方向的辐射亮度。由于获取比较精确的 BRDF 值比较困难, 因此, 其获取工作一直是研究的热点。目前, 关于 BRDF 的获取有多种方法, 例如直接测量法^[5], 公式推导法^[6]等。文中在 Phong 模型的基础上推导出了 BRDF 的计算模型, 并应用于红外仿真计算领域。

根据 Phong 模型, 计算机将反射光照划分为环境光照、漫反射光照和镜面反射光照三种类型, 如图 5 所示。其中漫反射向各个方向的反射强度均相同; 镜面反射具有明显的方向性, 其反射强度在镜面反射方向最强, 并随观测方向与镜面反射方向夹角的增大而减小。眼中看到的图像的亮度与人眼所处的位置与镜面反射方向的夹角有关。

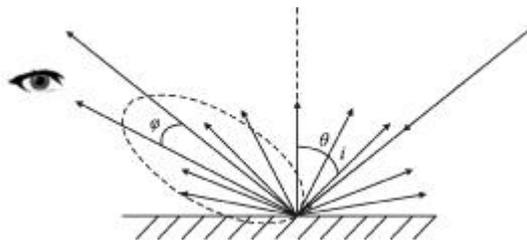


图 5 太阳直接辐射反射情况示意图

Fig.5 Reflection diagram of solar direct radiation

对于太阳直接辐射而言, 无需考虑环境光照因素, 因此

$$L_r(\lambda) = L_{diff}(\lambda) + L_{spec}(\lambda) \quad (8)$$

式中: $L_r(\lambda)$ 为波长为 λ 的太阳辐射反射光照亮度, $L_{diff}(\lambda)$ 为漫反射光照亮度, $L_{spec}(\lambda)$ 为镜面反射光照亮度, $L_{amb}(\lambda)$ 为环境光照反射亮度。

$$L_{diff}(\lambda) = \frac{M_{diff}(\lambda)}{\pi} = \frac{M_i(\lambda) \cdot k_{diff}(\lambda)}{\pi} \quad (9)$$

式中: $k_{diff}(\lambda)$ 为反光材料对波长为 λ 的光线的漫反射系数; M_{diff} 为太阳辐射散射出射度; M_i 为入射出射度。

$$L_{spec}(\lambda) = \frac{M_{spec}(\lambda)}{\pi} = \frac{M_i(\lambda) \cdot k_{spec}(\lambda) \cdot \cos \varphi^n}{\pi} \quad (10)$$

式中: $k_{spec}(\lambda)$ 为反光材料对波长为 λ 的光线的镜面反射系数; M_{spec} 为太阳辐射镜面反射出射度; φ 为镜面反射方向与传感器方向的夹角; n 为反光材料的 shiness 参数, 与镜面反射的高亮区有关, θ_i 为入射光线与平面法线的夹角。

将公式(8)~(10)代入公式(7)可得关于 BRDF 的函数 $F(\lambda)$ 为:

$$F(\lambda) = \frac{L_r(\lambda)}{M_i(\lambda)} = \frac{k_{diff}(\lambda)}{\pi} + \frac{k_{spec}(\lambda) \cdot \cos \varphi^n}{\pi \cdot \cos \theta_i} \quad (11)$$

公式(11)中所有相关参数均可测量, 由此可直接计算不同波长对应的 BRDF 值。由公式(11)可得在 BRDF 模型下, 目标表面对特定波长的太阳直接辐射的反射亮度为:

$$L_r(\lambda) = F(\lambda) \cdot M_i(\lambda) = \left(\frac{k_{diff}(\lambda)}{\pi} + \frac{k_{spec}(\lambda) \cdot \cos \varphi^n}{\pi \cdot \cos \theta_i} \right) \cdot M_i(\lambda) \quad (12)$$

太阳直接辐射 $M_i(\lambda)$ 可由 Cart 或者 Modtran 计算获得, 由此可直接计算不同方向下的太阳直接辐射反射亮度。

2.2 仿真实验及结果分析

仿真对象冷却塔是一个横切面为双曲线形状的物体, 其表面存在曲率。对于以平行光方式入射的太阳光, 表面上的每个点的入射角度 θ_i 和镜面反射方

向均不同, 其被传感器收集的反射光与镜面反射方向的夹角 φ 也各不相同, 如图 6 所示。要真实模拟曲面上每个点的反射情况, 需要针对每个点的法线和入射方向分别进行计算。对于三维场景而言, 这无疑是非常巨大的运算量, 传统的串行计算方式难以完成。但幸运的是, 借助于 GLSL^[7], 可以方便地获取显示到屏幕上的像素点的面法线和空间位置等信息, 进而进行精确地光线折射计算。GLSL 可仅对显示到屏幕的像素进行计算, 并将渲染相关的计算直接在 GPU 上进行, 大幅度缩减了运算量, 提高了并行性。

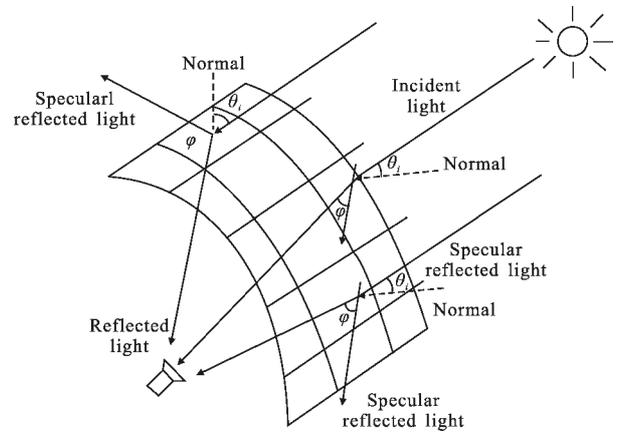
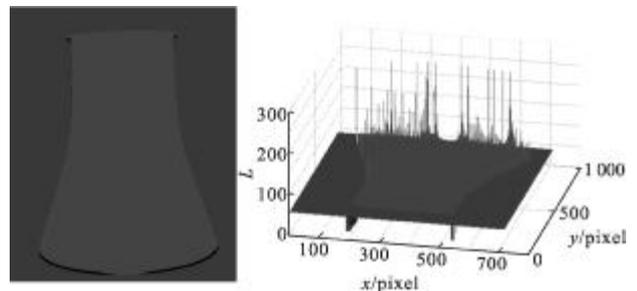


图 6 曲面反射示意图

Fig.6 Reflection diagram of curved surface

加入 BRDF 模型后, 仿真图像在之前的效果之上出现了明显的相对亮区, 并且亮区会随着视角的变化而变化。图 7(a) 为某时刻的仿真图像, 其在目标边缘出现明显的亮区, 图 7(b) 为该仿真图像的亮度投影, 可清楚地看到亮区的影响。



(a) 仿真图像

(b) 仿真图像亮度投影

(a) Simulation image

(b) Brightness projection

图 7 某波段仿真结果

Fig.7 Simulation result in some wavelength

为体现 BRDF 模型的效果, 在仿真过程中去除

冷却塔自身辐射和环境辐射, 仅将冷却塔对太阳光的反射情况单独进行仿真, 并将仿真图像锐化以增强效果。以目标对波长为 $3.625 \mu\text{m}$ 的太阳光线的反射为例, 相机从上向下移动得到的仿真图像如图 8 所示。由仿真图像可见, 基于 Phong 模型的 BRDF 模型使仿真图像跟随相机移动产生了相应的亮度变化, 这种变化符合物理学反射规律。



图 8 相机自上而下移动的 BRDF 效果

Fig.8 BRDF effects while camera moving from top to bottom

3 结 论

文中提出的红外图像仿真方法可以在三维模型的基础上, 生成任意观测角度、任意光谱范围、任意步长的多光谱红外图像立方体。图像立方体中的每个单元数据都对应该场景在某个波段的辐射情况。图像立方体内任意波段的数据可随意组合使用, 大幅度提高了红外仿真图像数据的精度和重用性。推导的基于 Phong 模型的 BRDF 计算模型可用于计算任意材质在任意角度的 BRDF 值, 计算快速准确, 可实时生成计算数据。将其应用于红外多光谱仿真图像的生成过程中, 真实反映了目标对太阳直接辐射的反射随着观测角度的变化情况, 提高了仿真图像的逼真度。

参考文献:

- [1] Xu Hong, Wang Xiangjun. Applications of multispectral/hyperspectral imaging technologies in military [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(1): 13-17. (in Chinese)
许洪, 王向军. 多光谱、超光谱成像技术在军事上的应用 [J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(1): 13-17.
- [2] Xu Hong, Wang Xiangjun, Liu Feng, et al. Infrared multispectral image simulation based on spectral image in visible bands [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(2): 201-204. (in Chinese)
许洪, 王向军, 刘峰, 等. 基于可见光光谱图像的红外多光谱图像仿真生成 [J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(2): 201-204.
- [3] Chen Shan, Sun Jiyin. IR scene simulation based on visual image [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(1): 23-30. (in Chinese)
陈珊, 孙继银. 基于可见光图像的红外场景仿真 [J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(1): 23-30.
- [4] Dai Congming, Wei Heli, Chen Xiuhong. Validation of atmospheric scattering radiance calculated by combined atmospheric radiance transfer (CART) code [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(6): 1576-1581. (in Chinese)
戴聪明, 魏合理, 陈秀红. 通用大气辐射传输软件(CART)大气散射辐射计算精度验证 [J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(6): 1576-1581.
- [5] Xie Ming, Huang Yong, Wang Xiaochun, et al. Experimental analysis of the bidirectional reflectance distribution function (BRDF) of exterior finishing surface for typical building [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2011, 43(3): 49-53. (in Chinese)
谢鸣, 黄勇, 王晓春, 等. 建筑材料表面红外双向反射分布函数实验分析 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2011, 43(3): 49-53.
- [6] Huang Chaochao, Wu Xiaodi, Yang Hua. BRDF calculation of satellite's material based on modified anisotropic Gaussian model [J]. *Laser and Infrared*, 2013, 38(1): 23-30. (in Chinese)
黄超超, 吴晓迪, 杨华. 基于各向异性 Gaussian 改进模型的卫星材料 BRDF 计算 [J]. *激光与红外*, 2013, 38(1): 23-30.
- [7] Rost Randi J, Licea-Kane Bill, Ginsburg Dan, et al. *OpenGL Shading Language* [M]. 3rd ed. US: Addison-Wesley, 2010.