

文章编号: 1001 - 9014(2010)01 - 0057 - 06

用于场景仿真的红外成像模型及其有效性分析

李宏宁^{1,2}, 白廷柱¹, 曹峰梅¹, 马帅¹, 许凯达¹, 杨卫平², 冯洁²

(1. 北京理工大学 信息科学与技术学院 光电工程系光电成像技术实验室, 北京 100081;

2 云南师范大学 物理与电子信息学院, 云南 昆明 650092)

摘要:结合辐射传输定律,对计算机图形学中常用的光照模型进行了一系列改进,得到了简化的可用于场景仿真的红外成像计算模型.具体改进如下:1)增加了几何体表面的温度分布和材料参数;2)在模型中引入了自发辐射项和探测器特性参数.采用光线跟踪方法构建了以该模型为基础的红外场景成像模拟仿真系统,可生成任意观察视角的3D场景红外图像.对三个典型场景进行了红外成像计算,用中波红外探测器采集到的红外图像进行对比.主观比较可看出该计算模型生成的图像与实拍图像在基本特征上是相似的,验证了该模型的有效性.定量比较也说明模拟图像与实际图像在主要特征上相符,但绝对亮度上存在较大差异,分析了原因,并提出了改进方向.

关键词:红外成像模型;光照模型;成像仿真;光线跟踪;有效性分析

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A

INFRARED IMAGING MODEL FOR SCENE SIMULATION AND ITS VALIDATION

LI Hong-Ning^{1,2}, BAI Ting-Zhu¹, CAO Feng-Mei¹, MA Shuai¹,
XU Kai-Da¹, YANG Wei-Ping², FENG Jie²

(1. Laboratory for Optoelectronic Imaging Technology, College of Information Science and Technology,
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2 Department of Physics & Electronics, Yunnan Normal University, Kunming 650092, China)

Abstract: By using the radiance transfer law, the illumination model which was widely used in computer graphics was re-modeled into a simplified thermal infrared imaging model. The improvement of the model are as follows: 1) adding the surface temperature distribution and the material parameters to the geometric model, 2) introducing the self emission and the detector property into the illumination model. Based on this model, the ray tracing method was used to construct an infrared imaging system which could get the synthetic infrared images of 3D scenes from any angle of view. The infrared images were calculated for three typical 3D scenes. The calculated results were compared with the real infrared images obtained by a middle infrared band imaging camera. It shows that the infrared images obtained by thermal infrared imaging model are similar to those received by thermal infrared camera. Quantitative analysis shows that there exists difference in absolute brightness, and the reasons are analyzed.

Key words: infrared imaging model; illumination model; imaging simulation; ray tracing; validation

引言

红外成像系统在国防建设、工农业生产以及科学研究中有广泛的应用^[1].但是,红外信号的信噪比低,对红外图像的分析困难,对试验场地的要求非常高.近年来,计算机红外场景成像仿真技术以及各种半实物红外场景模拟方法得到了较快发展^[2,3],用来解决红外图像获取、分析以及场景复杂度控制

上存在的问题.

本文结合红外成像的基本原理,对计算机图形学中的基本光照模型进行改进:几何体增加温度和材料参数、物体红外辐射的计算以及探测器特性等,使其能应用于红外波段的成像模拟.采用光线跟踪的方法,构建了自己的红外场景成像模拟仿真系统,并对三种典型的场景进行了红外成像的计算仿真.

收稿日期: 2009 - 01 - 12, 修回日期: 2009 - 09 - 20

Received date: 2009 - 01 - 12, revised date: 2009 - 09 - 20

基金项目: 教育部长江学者和创新团队发展计划项目(RT0606); 国家自然科学基金(60768002)

作者简介: 李宏宁(1975-),男,四川岳池人,博士生,主要研究方向为微光和红外场景成像仿真技术及应用.

1 红外成像模型

1.1 红外成像的物理模型

物理上,对象表面的光照效果是由相应的物理定律决定的,精确的模型需要考虑场景中各种光源与物体表面间辐射能量的传递来计算光强度. Clark^[4,5]从红外辐射传播的物理原理上进行分析和描述,奠定了红外成像技术的理论基础.但这种描述在数值模拟和仿真计算中不是非常方便,为此 Owen^[6]在 Clark的基础上,提出了一种分解 Clark模型为更小粒度的子系统以及各子系统相互作用的方法,为系统、模块化地进行红外场景模拟提供了理论基础.

总的来说,红外场景成像仿真是对各个成像环节的模拟,包含了光线在场景中的传播以及被探测器响应产生输出信号的各个部分.在成像过程中,探测器用于成像的物体发出的热红外辐射通量由两部分组成:一部分是反射场景中的其它物体的辐射,另一部分是物体自身发出的红外辐射,可以用下式表示^[7]:

$$L(x, \theta, \varphi) = L_e(x, \theta, \varphi) + \int_{\Omega} f_r(x, \theta, \varphi, \theta', \varphi') L_i(x, \theta', \varphi') \cos d \, \Omega' \quad (1)$$

其中, $L(x, \theta, \varphi)$ 是从 x 点发出的朝向观察方向 (θ, φ) 的辐射; $L_e(x, \theta, \varphi)$ 是 x 点发出的朝向观察方向 (θ, φ) 的辐射出射; $L_i(x, \theta', \varphi')$ 是从方向 (θ', φ') 入射到 x 点的辐射; Ω 是 x 点所在表面的半球空间; $f_r(x, \theta, \varphi, \theta', \varphi')$ 是双向反射率分布函数 (BRDF), 用于描述 x 点的反射特性.

辐射出射度 L_e 及双向反射率 BRDF 与波长有关,入射到表面上的辐射通量一部分被物体所反射,一部分被吸收而转化为热能,还有一部分将穿透物体.由于红外场景中的材料一般都是对红外不透明的,因此可以假设透射为零,只考虑反射和吸收两种情况.

式 (1) 中的第一项 L_e 表示的是物体的自发辐射部分,任何温度大于绝对零度的物体都将向外辐射能量,将其看作是一个辐射源.理想情况下,该值可用普朗克黑体辐射定律计算;而对于非理想辐射体,一般采用灰体模型来近似.

1.2 基本光照模型

计算机图形学中的光照模型主要用于几何体表面某光照位置的颜色计算.为了减少光强度的计算量,大多数软件包采用简化的光照计算模型^[8].如

果存在有多个光源,则多光源的基本光照模型为:

$$L_{tot} = L_{glob} + \sum_{k=1}^n m_{amb} (L_{amb} + d(L_{diff}^k + L_{spec}^k)) \quad (2)$$

其中, L_{tot} 为被观察点的光照强度; L_{amb} 为环境分量; L_{diff} 为漫反射分量; L_{spec} 为镜面分量; c_{spot} 为光源光照因子,表示不同种类的光照效果; d 为衰减控制因子,用于控制光照的范围; L_{glob} 为全局光源, m_{amb} 为环境材质参数,这两项相乘用于模拟来自周围的恒定背光.

由上可以看出,该光照模型并不严格符合物理规律,计算所需要的各种参数也不完全有对应的物理意义.但是由于它运算量小,也能满足视觉上的精度的需要,因此在各种图形 API 中有着广泛的应用.

1.3 红外成像的仿真计算模型

与计算机图形学中的基本光照模型相比,可以看出红外成像模型的各个成像环节都是基于物理原理的,因此能准确地计算出场景的红外图像.理论上,红外成像模型存在的主要问题是应用上的困难,不便于与传统的计算机图形学采用的方法结合.相对于红外成像的物理模型,计算机图形学所采用的光照模型是一个更容易实现、计算量要小很多的模型.虽然该模型对物理成像规律做了很多的简化,但是也能得到可以接受的结果.通过比较两个模型可知,红外成像的热平衡方程 (1) 的积分项与基本光照模型 (2) 都是用于计算反射分量的作用,它们有非常多的相似的地方.基于这些相同点,本文对基本光照模型做了几项改进,使该模型能生成红外图像,同时也能保留基本光照模型实现简单,计算速度快的优势.

首先加入自发辐射分量

$$L_e = \epsilon L^{bb}(T_s) \quad (3)$$

为辐射出射系数,也称为比发射率,由材料本身性质决定,取值范围为 $0 \sim 1$; L^{bb} 为对应于探测器响应波段的黑体辐射公式的积分.对于特定的热成像仪,由于其光谱响应曲线是固定的,可以通过各种方法减少该积分计算.在 $T < 3000 \mu\text{mK}$, 可用维恩辐射定律代替普朗克公式进行积分,误差可控制在 1% 以内;还可用查表法计算给定波长范围的辐射^[11].本文采用多项式拟合的方法,可进一步减少计算量,具体为

$$L^{bb} = aT_s^4 + bT_s^3 + cT_s^2 + dT_s + e \quad (4)$$

其中, a, b, c, d, e 为多项式系数,由数值拟合决定, T_s 为物体表面温度,采用绝对温标,单位为 K. 本文把

最高次幂定为 4 次的主要原因是黑体的总辐射出射度与温度的 4 次方成正比^[1]. 多项式系数的计算方法为:用红外热像仪对不同温度的黑体进行图像采集得到对应的亮度值,然后代入式(4)中进行多项式拟合求出各个参数. 这样的处理带来的问题是使 L_n 项与具体的热像仪紧密结合,不同的热成像仪会得到不同的拟合系数.

其次,加入探测器噪声项. 红外辐射成像与可见光成像的一个不同的地方就在于红外辐射必须采用特殊的仪器,人眼对红外辐射是不能响应的. 不同种类的热像仪有不同的特性参数,这体现在辐射-亮度响应公式(4)中. 在此考虑探测器的另一个共同的特性,即探测器噪声. 噪声是探测器的固有特性,不同探测器的噪声产生原因和噪声的统计分布规律不同. 通常进行噪声模拟的方法是将其迭加到最终的输出图像上进行模拟,对于本文的模型,由于式(4)已经将探测器响应特性与目标辐射模型联系起来,因此不妨将噪声项也加入到成像模型中. 在模拟时,根据辐射传输的不同阶段进行相应的控制. 本文采用最广泛使用的高斯噪声进行模拟

$$L_n = n \cdot \text{Noise}() \quad (5)$$

其中, $\text{Noise}()$ 为平均值为 0, 噪声的方差为 1 的标准噪声发生函数, n 为控制噪声分布的参数. 计算时,可以强制设定 n 为零得到理想情况下的无噪声图像. 在模拟中,只有进入探测器的辐射才需要计算噪声,其它传输阶段均认为噪声为零. 具体在光线跟踪中,只有最终到达红外成像系统的光线才计算噪声项 L_n , 之前的任何反射、折射或透射,均不计算噪声.

通过以上两项改动,在基本光照模型中引入了自发辐射项和噪声项用于红外场景的成像仿真计算,得到最终的红外成像计算模型:

$$L_{tot} = L_n + L_e + \int_{\Omega} m_{amb} \otimes \left(\sum_{k=1}^n c_{spot} (L_{amb} + d(L_{diff}^k + L_{spec}^k)) \right) \quad (6)$$

对比式(6)和式(1)可以看出,式(1)的第二项实际上被分解为式(6)中的最后两项之和. 积分项中的反射被分解为三部分:环境光、漫射光以及反射高光. 这样的处理,将计算半球面内的所有光线减少到了计算三条主要光线,大大减少了计算的工作量,使得计算更可行,速度更快.

该成像模型将探测器噪声参数与响应参数混合到一个模型中,这样处理使计算容易实现,计算量小,进一步还可以与大气模型、反走样技术等结合,

以模拟更为复杂的场景的红外成像过程. 更好的模型应该能将两者分离,这也是文献[6]所提出的分解红外成像模型的主要目的. 但这种分离需要能计算独立于成像系统的辐射传输分布,这对于模拟来说难度比较大,而且对校验数据获取设备的要求比较高.

2 成像仿真结果和分析

在红外成像计算模型的基础上,本文构建了基本的红外成像仿真程序. 该程序中采用了光线跟踪方法^[9, 10]从成像系统的视场对整个场景中的物体进行逐像素扫描以获得强真实感的图像,实现三维场景中的物体在像面上成像的整个过程的仿真.

本文通过三维模型的制作软件构建了一些三维场景,通过成像模拟得到了相应的红外图像,并与用红外热像仪获得的图像进行了对比,进而对系统进行校准、对红外成像模型进行评价和进一步的分析. 下三例场景的复杂程度依次增加.

2.1 理想简单场景

场景一在桌面上放置三个温度不同的立方体,场景中并没有放置任何光源,立方体为理想黑体,各立方体表面的温度均匀. 桌面的温度设定为 30, 三个立方体的温度分别为 -10、50 和 100. 探测器噪声控制关闭. 这是一个用于校正的场景,其结构及参数完全都是理想的. 由于模拟的是理想情况,不可能制作模型来进行对比,只能通过已有的红外成像知识来分析成像是否与实际相符. 图 1 为场景的几何线框图以及渲染得到的红外图像.

从图 1(b)中可以看出,由于左边的立方体的温度比桌面的低,在图中呈现出亮背景上的暗目标;中间及右边的立方体的温度比桌面高,图像上呈现出暗背景上的亮目标. 不同温度所成像的亮度不同,这一点符合实际的红外热成像规律.

另外,在一个立方体内,由于所设定的是均匀温度分布,几何体表面设定为朗伯体,故各立方体内的

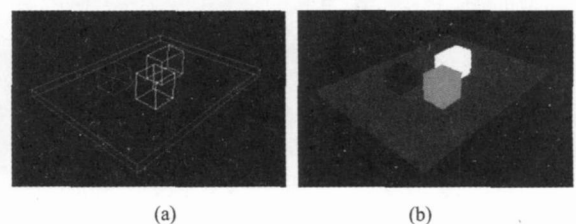


图 1 场景一的几何线框图和渲染结果

Fig 1 The wireframe and the rendered thermal infrared images of scene 1

亮度分布均匀,立方体亮度与表面法线方向无关,这符合朗伯体表面辐射出射各向同性的特征.根据以上两点,可定性地认为该模型反映了红外成像的基本规律.

2.2 真实简单模型

场景二在光滑油漆桌面上放置一个盛了热水的纸杯,用红外热像仪拍摄了真实场景的图像,结果如图 2(a)所示.图像上的白点为热像仪本身的盲元.所采用的红外热像仪为法国 CED IP 公司生产的 JADE 焦平面凝视型红外热像仪,其探测器类型为 HgCdTe 焦平面阵列,探测器像素为 320×240 ,光谱响应范围为 $3 \sim 5 \mu\text{m}$,采用斯特林循环制冷器.由于该图是在纸杯放到桌面上很短的时间内拍摄的,没有发现桌面的温度有明显改变,可认为桌面表面的温度分布均匀.桌面上可看到明显的纸杯倒影,说明桌面有明显的红外反射现象,桌面不能看作是理想的黑体.

本文用一个扁长方体来代替桌面,用一个稍微经过变形的圆柱体表示纸杯.根据当时的室内温度和热水的温度进行温度的估计和设定.设桌面的温度为均匀的 20°C ,将反射率设为 0.1 ,辐射出射度设为 0.9 .圆柱体为理想黑体,将下半部分的温度设置为 90°C ,而上半部分的温度设为 45°C ,中间设置了一小段温度过渡区,系统采用三角形重心坐标线性插值的方法计算温度分布过渡.场景中没有任何红外光源.图 2(b)为场景二的几何线框图,图 2(c)为场景的红外渲染图像.

对比图 2(a)与图 2(c),可以看出两图非常相似.从图 2(c)中纸杯亮度的逐渐变化可推测出纸杯

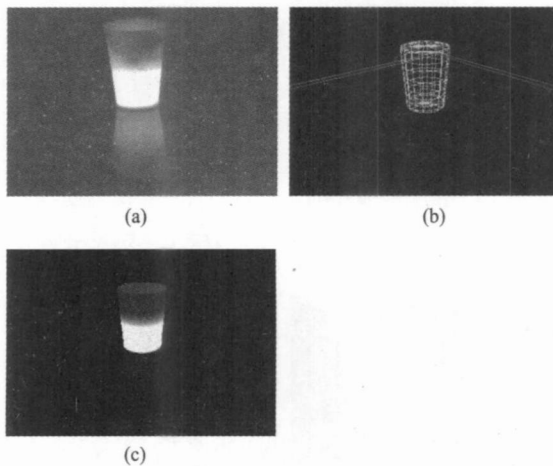


图 2 场景二的实采红外图像 (a),线框图 (b)及渲染图像 (c)
Fig 2 Real infrared image(a), wireframe(b) and rendered thermal infrared image(c) of scene 2

的温度的分布细节,但还不能分辨出纸杯表面的几何形状.同时也说明红外成像的细节主要由温度差决定.

该模拟可以看到红外波段仍然存在的反射现象.其与标准教材里通常以黑体作为计算模型时的结果不同,如果场景中物体都是漫反射体,而且没有强光源存在,则一般都会忽略反射影响.但从该场景看,由于反射,使桌面上出现了高亮度纸杯的倒影.正是由于倒影的存在,使均匀温度分布的桌面上出现了不同的亮度,也就是说图像中的亮度并不完全由表面的温度决定.也正是由于这些原因,使得红外测温的算法很难适用于所有情况.该场景展示了红外分析和算法研究的复杂性和所面临的困难,而红外成像仿真在这些研究过程中则可以起到重要的辅助分析作用.

为了能更加细致地分析图像之间的差异,本文分别计算了图 2(a)和图 2(c)的统计直方图,结果如图 3.从统计直方图上可以看出,忽略模拟图上的全黑背景所形成的峰外,两幅图都出现了 3 个明显的峰值区,而且各个峰的高度和变化趋势也基本一致,但是各主峰的位置有明显不同.这说明在绝对亮度上两图存在明显差异,模拟图像的对比度明显高于实采图像的对比度.

为了更细致地分析亮度的变化差异,本文还计算了两图的空间亮度变化趋势图.图中纸杯垂直中心线由上往下的坐标为 x 轴,亮度为 y 轴,得到图 4.从图 4 可以看出,两图的亮度变化趋势一致,亮度改变的位置也一致,但是亮度的大小却有较明显的差别.这说明模拟图与实际图像在绝对亮度上存在较大差异.

两种较细致的定量分析方法都说明在绝对亮度上系统仿真结果与实际测量结果有较明显的差异,两方面的因素导致了这个问题.一是由于成像仿真涉及到成像路径上的每一个环节,本文没有对系统进行全面的校准,这将是下一步需要展开的工作.二是红外热像仪的亮度范围是动态调整的,如果信号比较小,

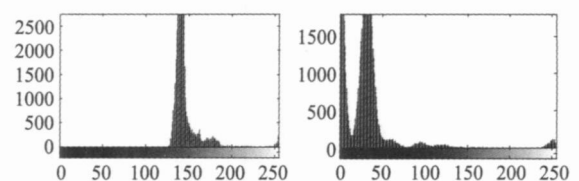


图 3 图 2(a)和图 2(c)的统计直方图
Fig 3 Histograms of Fig 2(a) and Fig 2(c)

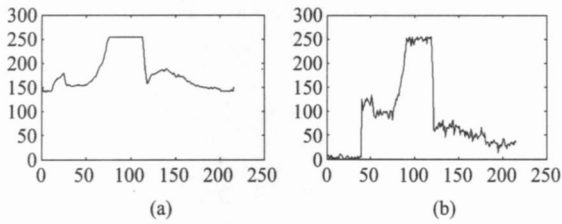


图 4 图 2(a)和图 2(c)中图像的空间亮度变化
Fig 4 Brightness profile of Fig 2(a) and Fig 2(c)

它就会自动提高增益或积分时间以获得比较强的信号,从而使图像的亮度成了一个相对的参数.

2.3 复杂场景

场景三是本文构造的一个比较复杂的场景,包含有房屋、草地以及树木等多种物体.不同的几何体由不同的材料组成.由于场景的规模较大,系统渲染的时间也会相应增加.图 5(a)是场景的几何线框图,图 5(b)和图 5(c)是从不同视角对整个场景进行观察的结果,图 5(d)为对场景的局部树木作细节观察的结果.通过主观评价,可以认为所得到的渲染结果具有一定的红外成像的特征,同时也说明本文所采用的红外成像模型可以满足红外视景仿真中人眼观察要求.

对同一场景,从任意视角进行观察都可以生成对应的红外图像,这对于开发和测试目标跟踪和搜索算法非常有用.在一个完全虚拟的环境下对算法进行测试,可以使算法研究和设备研制同步进行,缩短总的研发时间,节省外场试验的费用.而且由于虚拟成像与实际成像的物理规律一致,可以通过调整场景的各种参数(温度分布、材料属性和几何大小等)来考察算法的适应性.

三个场景的红外成像仿真结果表明,所采用的红外成像计算模型计算量小,可以得到符合红外成像规律的红外图像,主要问题是定量的精度有待提高.由于人眼对相对亮度的敏感程度要高于对绝对亮度的敏感程度,即如果得到的图像符合一般的红外图像对比特性,人眼一般不会在意绝对亮度.而且,式(6)是在式(2)的基础上改进而来,鉴于式(2)已经在各种图形 API 中广泛应用,可认为它能够比较好地反映大部分表面的反射特性,只需要考虑自发辐射的保真度就可以了.上述三例可以表明所采用的红外成像计算模型可以在人眼接受的程度上满足仿真要求.

3 结论

通过对广泛使用的计算机图形学基本光照模型

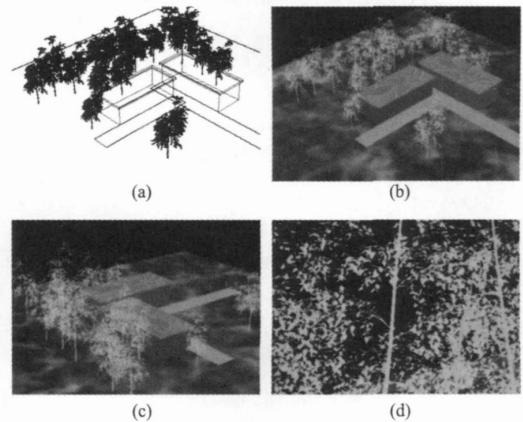


图 5 场景三的几何线框图以及从三个不同的视角进行观察的仿真红外图像

Fig 5 Wireframe of scene 3 and three synthetic infrared images from three different view angles

中的几何体参数、物体的红外辐射机制以及探测器特性等几个成像环节的改进,得到可以应用于红外成像模拟的计算模型.采用光线跟踪的方法,编制了红外成像仿真软件.

应用所构建的红外成像仿真系统,对三种典型场景(包括理想条件下的场景以及真实场景)进行了红外成像的仿真模拟计算,得到了红外模拟成像的图像.与用红外热像仪获取的真实红外图像进行对比,可见该计算模型能反映真实环境的红外特征以及成像规律,对复杂的场景也能做出相应的预测,可满足定性分析的需要.应用客观分析的方法(统计直方图和空间方向亮度变化趋势)定量地比较了模拟图像与实采图像之间的相似性及差异,针对两者不一致的地方,分析了产生误差的原因,提出了改进的方向.

REFERENCES

- [1] Bai Ting-zhu, Jin Wei-qi. *The Principle and Technology of Photoelectric Imaging* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press (白廷柱, 金伟其. 光电成像原理与技术. 北京: 北京理工大学出版社), 2006
- [2] YANG Gui-Jun, LIU Qin-Huo, HUANG Hua-Guo, et al. Methods for simulating infrared remote sensing images based on scene models[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (杨贵军, 柳钦火, 黄华国, 等. 基于场景模型的热红外遥感成像模拟方法. 红外与毫米波学报), 2007, 26(1): 1—7.
- [3] LI N Lian-Kui, XIE Kai, XU Hui, et al. Research on infrared imaging simulation of midcourse ballistic object target complex[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (林两魁, 谢恺, 徐晖, 等. 中段弹道目标群的红外成像仿真研究. 红外与毫米波学报), 2009, 28(3): 218—223
- [4] Clark Jones R. A new classification system for radiation detectors[J]. *Journal of the Optical of Society American*,

- 1949, **39** (5): 327—343.
- [5] Clark Jones R. Factors of merit for radiation detectors[J]. *Journal of the Optical of Society American*, 1949, **39** (5): 344—356
- [6] Owen M W. Imaging infrared fundamentals: an alternative perspective[C]. *Proceedings of SPIE on Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing III*, 1992
- [7] Sillion F X, Peuch C. *Radiosity and Global Illumination* [M]. San Francisco: Morgan Kaufman Publishers Inc, 1994.
- [8] Donald Heam, Pauline Baker m. *Computer Graphics with OpenGL Third Edition* [M]. America: Pearson Education Inc, 2004.
- [9] Henrik W J, Per C. High quality rendering using ray tracing and photon mapping[C]. *ACM SIGGRAPH 2007 courses*, Aug 2007.
- [10] Ingo W, Carsten B, Philipp S. Distributed Interactive Ray Tracing of Dynamic Scenes [C]. In *Proceedings of the IEEE Symposium on Parallel and Large-Data Visualization and Graphics*, 2003.

(上接 48页)

避免了采用简单统计回归方法推广性弱的缺点,解决了以往方法不能在影像光谱维上进行扩展的问题,以较小的计算代价获取了较精确的模拟影像,模拟方法可靠.本方法有效地解决了多光谱影像波段缺损的问题,并在一定程度上可解决较高空间分辨率遥感影像光谱维的不足,更重要的是为建立地物波谱与遥感像元波谱间的定量联系提出了新的思路.

本方法波段模拟的精度,主要依赖于以下因素.一是地物波谱样本的完整性:由于地物波谱存在时间效应与空间效应^[6],故地物波谱的先验知识越丰富,模拟精度越高.理想的情况是加入影像区实地采集的地物波谱数据作为支持向量机的学习样本.二是遥感影像的空间分辨率:由于混合像元普遍存在^[8],将遥感影像像元作为纯像元来进行计算降低了影像波段模拟的精度,因此认为遥感影像的空间分辨率越高,波段模拟精度越高.在此基础上考虑混合像元分解、成像系统影响等问题进行遥感影像波段高精度模拟是我们进一步的研究方向.

REFERENCES

- [1] CHEN Fang, NU Zheng, LIAO Chujiang. Analysis on simulation of remote sensing image and its application[J]. *Geo-information Science* (陈方, 牛铮, 廖楚江. 遥感图像模拟技术与应用分析. 地球信息科学), 2006, **8** (3): 114—118.
- [2] YE Ze tian, GU Xing fa. Simulation of remote sensing images based on M N I S data [J]. *Acta Geodaetica et Cartographic Sinica* (叶泽田, 顾行发. 利用 M N I S 数据进行遥感图像模拟的研究. 测绘学报), 2000, **29** (3): 235—239.
- [3] Verhoef W, Bach H. Simulation of hyperspectral and direction radiance images using coupled biophysical and atmospheric radiative transfer models[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, **87**: 23—41.
- [4] SU Lihong, LIXiao-wen, LANG Shun-lin, et al. Data frame and spectral simulation for remote sensing spectral data base [J]. *Geo-information Science* (苏理宏, 李小文, 梁顺林, 等. 典型地物波谱库的数据体系与波谱模拟. 地球信息科学), 2006, **4** (7): 7—14.
- [5] CHEN Fang, NU Zheng, QN Yu-chu, et al. Simulation of an image with a subsection of spectral band using an image with a wider spectral band[J]. *Opto-Electronic Engineering* (陈方, 牛铮, 覃驭楚, 等. 基于宽光谱光学遥感图像的细分光谱光学遥感图像的模拟. 光电工程), 2007, **34** (5): 89—96.
- [6] Zhao Yingshi. *Remote Sensing Application And Analysis: Principles and Methods* [M]. Beijing: Science Press (赵英时. 遥感应应用分析原理与方法. 北京: 科学出版社), 2003: 54—57.
- [7] LUO Jian-cheng, ZHOU Cheng-hu, LEUNG Yee, et al. Support vector machine for spatial feature extraction and classification of remotely sensed imagery[J]. *Journal of remote sensing* (骆剑承, 周成虎, 梁怡, 等. 支撑向量机及其遥感影像空间特征提取和分类的应用研究. 遥感学报), 2002, **2** (1): 50—55.
- [8] TAN Kun, Du Pei-Jun. Hyperspectral remote sensing image classification based on support vector machines[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (谭琨, 杜培军. 基于支撑向量机的高光谱遥感图像分类. 红外与毫米波学报), 2008, **27** (2): 123—128.
- [9] JWU Bo, ZHANG Liang-pei, LI Ping-xiang. Unmixing hyperspectral imagery based on support vector nonlinear approximating regression [J]. *Journal of remote sensing* (吴波, 张良培, 李平湘. 基于支撑向量回归的高光谱混合像元非线性分解. 遥感学报), 2008, **27** (2): 123—128.
- [10] Huang C, Davis L S. An assessment of support vector machines for land cover classification[J]. *International Journal of remote sensing*, 2002, **23**: 725—749.
- [11] Vapnik V N. An Overview of Statistical Learning Theory [J]. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 1999, **10** (5): 988—999.
- [12] GUO Lei, XIAO Huai-Tie, FU Qiang. SVM Model Optimal Multi-parameter selection method for imbalanced data target recognition [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (郭雷, 肖怀铁, 付强. 非均衡数据目标识别中 SVM 模型多参数优化选择方法. 红外与毫米波学报), 2009, **28** (2): 141—145.