

# 基于 Blinn-Phong 模型的红外辐照模型及其红外场景仿真

胡海鹤 白廷柱 韩 强 郑海晶

(北京理工大学光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081)

**摘要** 为仿真场景景物红外特征和红外高光现象,根据红外成像基本原理改进了计算机图形学中的可见光光照模型,提出了基于 Blinn-Phong 模型的红外辐照模型,在可见光 Blinn-Phong 反射模型中引入自发辐射项并考虑场景中各种辐射源与对象表面间辐射能量的传递,使对象表面辐照效果符合相应规律。在仿真实现方面,提出基于几何特征的反射区域辐射能量计算方法,根据景物几何特征确定反射区域,由入射点处的自发辐射和材料在长波波段的漫反射率、镜面反射率以及反射点处的法向量、探测器位置、朝向等信息计算反射点相对探测器的总辐射能量,实现红外高光效果模拟。分析验证了所提出的红外辐照模型和高光效果模拟方法的有效性。

**关键词** 机器视觉;红外辐照模型;红外场景仿真;几何特征;辐射能量

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0611003

## Infrared Illumination Model and Infrared Scene Simulation Based on Blinn-Phong Model

Hu Haihe Bao Tingzhu Han Qiang Zheng Haijing

(Key Laboratory of Photoelectronic Technology and System, Ministry of Education of China,  
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract** In order to simulate infrared feature of the scene and infrared high light phenomenon, the visual illumination model in computer graphics is improved according to the principle of infrared imaging, the visual Blinn-Phong model is improved and remodeled into an infrared illumination model by introducing self radiation, considering the energy transfer between radiation sources and the object surface in the scene, and making the imaging effect of the object surface conform with corresponding law. In the aspect of realizing simulation, a new radiation energy computing method of the reflection area is proposed to simulate infrared high light effect based on the geometry features of the target. The reflection area is determined according to the target geometry, then infrared high light effect of the target is simulated by computing total energy which is calculated by the information of self-radiance of the incidence point, diffuse reflection rate and specular reflection rate of the material, and normal vector of the reflection point, the position and orientation of the detector and so on. It shows the validation of infrared illumination model and the simulation method of high light effect.

**Key words** machine vision; infrared illumination model; infrared scene simulation; geometry feature; radiation energy

**OCIS codes** 100.2960; 100.6890; 350.4600

## 1 引 言

在红外场景仿真中,为描述红外波段下的辐照

模型, Jones<sup>[1,2]</sup>对红外辐射传播的物理原理进行分析和描述,奠定了红外成像过程的理论基础,但这种

**收稿日期**: 2013-01-29; **收到修改稿日期**: 2013-03-04

**基金项目**: 国家部委预研项目(110010202)资助课题。

**作者简介**: 胡海鹤(1981—),女,博士研究生,主要从事微光与红外场景仿真技术及应用和计算机图形学等方面的研究。

E-mail: huhaihe2006@163.com

**导师简介**: 白廷柱(1955—),男,博士,教授,主要从事光电成像、光电检测、图像信息处理技术等方面的研究。

E-mail: tzhbai@bit.edu.cn. (中国光学学会会员号: 1000073)

描述在数值模拟和仿真计算中并不方便。Williams<sup>[3]</sup>在 Jones 的基础上,提出了一种将 Clark 模型分解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工具。在国内,王章野等<sup>[4]</sup>提出了基于量子光学的红外成像辐照模型,该模型基于可见光 Phong 光照模型,速度较快,但高光部分的模拟不够真实;李宏宁等<sup>[5]</sup>在计算机图形学中最常用的光照模型基础上引入了自发辐射和探测器噪声的处理,并采用光线跟踪算法加以实现,该模型对场景模拟具有较高的逼真度,但耗时较长,无法进行实时模拟仿真。

本文针对上述情况提出一种基于可见光 Blinn-Phong 反射模型的红外辐照模型,模型充分考虑场景中各种辐射源与物体表面间辐射能量的传递关系,使物体表面的光照效果符合相应规律,并以此来计算物体的辐照强度。在用该模型实现对景物红外高光的模拟中,为提高计算速度,提出一种基于几何特征的反射区域辐射能量计算方法来确定反射点的位置和该点辐射的出射度,即在计算光滑材质上反射点的辐射能量时,根据该反射点所对应的入射点的辐射能量和材料在长波段的反射率以及该反射点处的法向量等信息计算该反射点到达探测器的辐射能量。结果表明,以此方法构建的红外场景成像模拟仿真系统,可快速、逼真地生成任意观察角度的三维场景红外图像。

## 2 红外辐照模型

### 2.1 Blinn-Phong 模型

大部分情况下,可见光光照模型<sup>[6]</sup>只考虑材料的反射现象,计算机图形学中的 Phong 模型、Blinn-Phong 模型、Cook-Torrance 模型等都是在全局可见光光照模型<sup>[7]</sup>基础上的简化。Blinn-Phong 模型是 Phong 模型的修正模型,渲染时比 Phong 高光更加柔和、平滑,此外其计算速度更快。单一光源下, Blinn-Phong 模型的数学表达式为

$$I = I_{\text{ambdiff}} + I_{\text{ldiff}} + I_{\text{spec}} = k_a I_a + k_d I_1 \cos \theta + k_s I_1 (\mathbf{N} \cdot \mathbf{H})^{n_s}, \quad (1)$$

$$\mathbf{H} = \frac{\mathbf{L} + \mathbf{V}}{2}, \quad (2)$$

式中  $I$  是反射体发光强度,  $I_{\text{ambdiff}}$  是漫反射体与环境光交互反射的光强,  $I_{\text{ldiff}}$  是漫反射体与方向光交互反射的光强,  $I_{\text{spec}}$  是镜面反射体与方向光交互反射的光强,  $k_a, k_d, k_s$  ( $0 < k_d < 1$ ) 分别为反射体对环境光、漫反射光、镜面反射的反射系数,  $I_a$  表示环境光强度(简称光强),  $I_1$  是点光源强度,  $\theta$  是入射光方向与顶点法线的夹角 ( $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ ),  $n_s$  是高光指数,  $\mathbf{N}$  是入射点处的单位法向量,  $\mathbf{H}$  是光入射方向  $\mathbf{L}$  和视线方向  $\mathbf{V}$  的中间向量,通常也称之为半角向量。

### 2.2 基于 Blinn-Phong 的红外成像仿真模型

凡是电磁波,其发射、传播和接收都与量子辐射有关,因此在考虑红外成像时,除了考虑环境泛光(如天空的红外长波辐射等)、漫反射和镜面高光反射外,还必须考虑物体本身的量子辐射<sup>[4,8]</sup>。因此在红外场景仿真中,到达探测器的辐射可近似为三种辐射作用之和:

$$L_s = L_e + L_r + L_u, \quad (3)$$

式中  $L_e$  为景物的自发辐射项,与景物自身的发射率和温度相关<sup>[9,10]</sup>,  $L_r$  为目标直接反射周围景物的红外辐射,  $L_u$  为目标探测器路径上大气的上行程辐射。模拟零视距长波红外场景,暂不考虑大气程辐射,目标的自发辐射和反射周围景物的辐射将会在最终的成像中起主导作用。

该辐射传输方程中的反射项  $L_r$  和(1)式的可见光光照模型相似,其代表的意义也是一致的,只不过它们属于不同的波段。因此可将可见光光照模型引入到红外光照模型的计算中。采用可见光 Blinn-Phong 模型作为材料反射现象的计算模型,加上目标本身的自发辐射,在单一红外光源下,忽略大气、探测器的影响,可较准确地模拟红外波段的成像。用于场景红外仿真的辐照模型可表示为

$$L_s = L_e + L_r = L_e + I_{\text{ambdiff}} + I_{\text{ldiff}} + I_{\text{spec}} = \epsilon \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} \frac{c_1}{\lambda^5 \left[ \exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]} d\lambda + k_a I_a + k_d I_1 \cos \theta + k_s I_1 (\mathbf{N} \cdot \mathbf{H})^{n_s}. \quad (4)$$

式中  $\epsilon$  是反射体的发射率,  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  分别是场景仿真波段的上下限波长,  $\lambda$  是特定波长参数,  $T$  是反射体的温度,  $c_1$  和  $c_2$  分别是第一和第二辐射常数。在多光源情况下(4)式可表达为

$$L_s = L_e + L_r = L_e + I_{\text{ambdiff}} + \sum_{k=1}^n (I_{\text{ldiff}} + I_{\text{spec}}) = \epsilon \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} \frac{c_1}{\lambda^5 \left[ \exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]} d\lambda + k_a I_a + \sum_{k=1}^n [k_d I_i^k \cos \theta + k_s I_i^k (\mathbf{N} \cdot \mathbf{H})^{n_s}]. \quad (5)$$

对比(5)式和(3)式可以看出,(3)式的第二项实际上被分解为(5)式中的最后三项。即(3)式中的反射被分解为三部分:环境光、漫射光以及镜面高光。该红外光照模型能模拟通常情况下的景物红外辐射现象,也能模拟红外高光条件下的镜面反射效果,且该模型使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,该光照模型同时适用于可见光和红外波段。

### 3 基于几何特征的反射区域辐射能量计算

特定物体的辐射能量主要由物体的自发辐射量决定,但在相对光滑材料上,其他景物会对该物体造成较大的影响,会出现和可见光相似的镜面反射现象。以往许多红外成像仿真模型,只考虑物体的红外量子辐射和环境红外辐射(相当于泛光)及漫反射,没有考虑红外的镜面高光反射,这种模型可以较好地表现粗糙表面上的光照现象,如石灰粉刷的墙壁和纸张等,但在用于由反射率较高的材料制成的物体时,则会显得呆板,表现不出倒影等高光效果,主要原因是该模型没有考虑这些材料表面的高光效应。王章野等<sup>[4]</sup>以量子光学中的普朗克热辐射定律为基础,提出了基于量子光学的红外成像辐照模型,绘制出大规模复杂城市场景等红外图像,但对光滑材料的反射现象模拟不足。李宏宁等<sup>[5]</sup>提出了用射线追踪算法实现红外辐照模型,对光滑材料的高光效果模拟较好,但速度较慢,无法进行实时仿真。针对上述情况,提出一种基于几何特征的反射区域辐射能量计算方法,如图1所示。

图1中V是红外探测器的中心点,也称为视点,P是某一光滑平面,可以确定其平面方程,设该平面为 $y = 1.546$ , $A(x_1, y_1, z_1)$ 是位于平面P上方某景物上的一点, $A'[x_1, y + (y - y_1), z_1]$ 是A关于平面P的对称点,由此可以确定 $l_{AA'}$ 的直线方程,该方程与平面P的交点记为O,将视点V与点O的连线作为视线方向,则过点A'且与 $l_{OV}$ 视线方向平行的直线与平面 $y = 1.546$ 的交点A''即为A关于视点在平

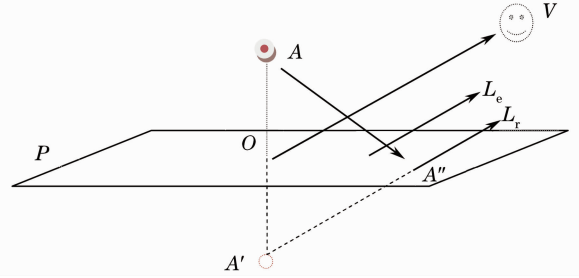


图1 红外高光光路

Fig. 1 Infrared high light path

面P上形成的反射点,可见反射点A''的位置与探测器的位置V相关。在视线方向上, $L_e$ 是反射点A''的自发辐射, $L_r$ 是各种景物的入射光在A''处反射的辐射,包括在A''处镜面反射的辐射和其他点在A''处漫反射的辐射。

为计算反射区域上每个反射点处的红外辐射能量,算法步骤如下:

- 1) 根据目标的几何特征,求出其关于某光滑平面的对称图形,以图1为例,景物上某点A关于光滑平面P的对称点为A';
- 2) 根据红外探测器位置、朝向及景物位置确定视线方向,主要考虑在视线方向上进入探测器的红外辐射。结合可见光面消隐算法,判断对称图形中每个面的法向量与视线向量的点积,如果结果为正,则该面相对于视点是可见的,否则不可见,将其消隐,并记录可见面的集合;
- 3) 根据视线方向,以及步骤2)中对称图形的可见面中每个顶点坐标,确定过每个顶点的直线方程,结合光滑平面P的平面方程,求出过每个顶点的直线方程与光滑平面P的交点,记为反射点,图中点A的反射点为A'',目标上所有点在光滑平面P上的反射点集合,形成目标的反射区域;
- 4) 根据基于Blinn-Phong模型的红外辐照模型,对反射区域中的每个反射点进行遍历,求出每个反射点的自发辐射、其他热源对该点辐射的漫反射和镜面反射、环境光在该点反射的辐射,根据(5)式,将这几种辐射相加,求出反射点A''相对探测器的红外辐射;

5) 根据场景中所有景物的辐射量,进行灰度映射,并绘制、显示整个红外场景。

## 4 成像仿真结果及分析

在红外成像辐照模型以及基于几何特征的反射区域辐射能量计算方法的基础上,通过 3DMax 软件构建了一些三维场景,在酷睿 2G 双核处理器上,依据计算机图形学原理,采用 MFC 和 OpenGL 技术构建了基本的红外成像仿真程序,并将建立的光电成像系统调制传递函数作用于零视距下红外仿真图像的频谱图像上<sup>[11,12]</sup>,通过逆傅里叶变换之后,得到经过光电成像系统后的模拟红外图像,并与通过红外热像仪获得的实拍图像进行了对比和评价分析。

### 4.1 高光反射模拟

为了与实拍图像做效果对比,构建了场景一,如图 2 和图 3 所示。在光滑油漆桌面、瓷砖面、黑色尼龙垫上分别放置一个盛了热水的纸杯,用一个下方经过挤压的圆柱体模拟纸杯,可将其视为理想黑体,

由于实拍图像在室内进行,室内无其他明显热源,室温为 20 ℃,油漆桌面、瓷砖面、黑色尼龙垫温度均约为 20 ℃,因此仿真实验没有考虑外界环境条件对该实验的影响,使用上述测量温度进行模拟。将圆柱体下半部分的温度设置为 90 ℃,而上半部分的温度设为 50 ℃,中间设置了一段温度过渡区,系统绘制时采用 GL\_SMOOTH 方式,实现温度过渡区域的平滑效果。场景中无其他红外光源,用红外热像仪拍摄其真实场景的图像与仿真图像作对比。所采用的红外热像仪为德国 Infratec 的 VarioCAM 红外长波热像仪,其探测器类型为非制冷微量热型大面阵焦平面探测器,探测器像素为 384 pixel×288 pixel,光谱响应范围为 8~12 μm。实拍图像是纸杯放置各种材料的桌面上较短时间内拍摄的,桌面温度无明显改变,可认为桌面表面的温度分布均匀。光滑油漆桌面和瓷砖面上可看到明显的纸杯倒影,说明光滑油漆桌面和瓷砖面有明显的红外反射现象,不能看作是理想的黑体。

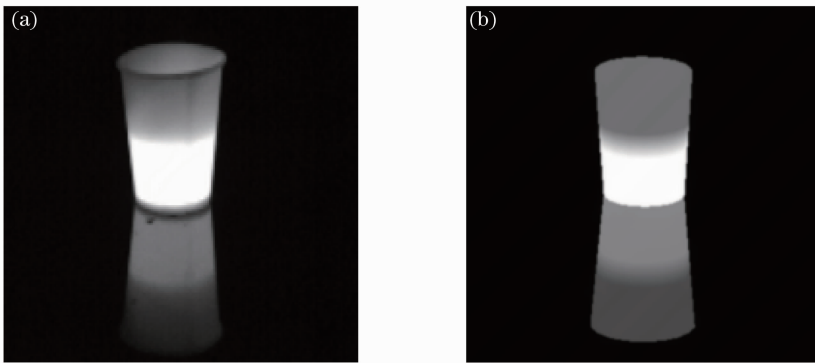


图 2 光滑油漆桌面上热水杯红外图像对比。(a)实拍图像;(b)仿真图像

Fig. 2 Comparison between real infrared image and rendered thermal infrared image on the paint desk. (a) Real infrared image; (b) simulation image

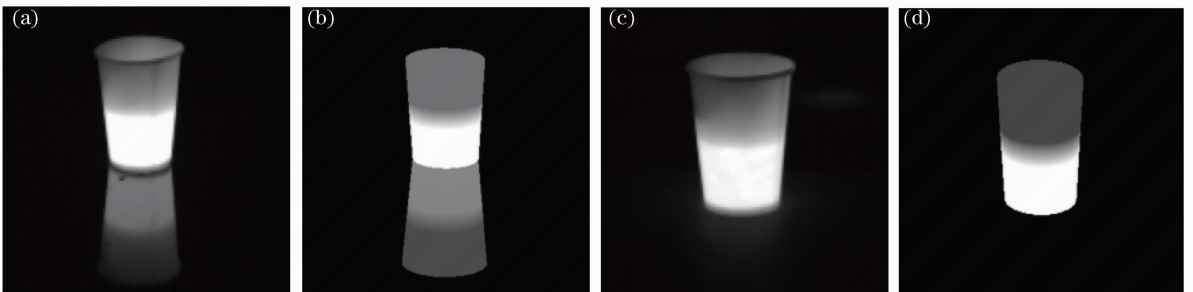


图 3 瓷砖面上景物的(a)实拍图像和(b)仿真图像;尼龙垫上的(c)实拍图像和(d)仿真图像

Fig. 3 (a) Real infrared image and (b) simulation image on the ceramic tile; (c) real infrared image and (d) simulation image on the nylon

由图 2 和图 3 可知,仿真效果和实拍图像在主观上非常相似。在不同的材料上,实拍图像显示的反射强度也不同,图 3 中的瓷砖反射能力最强,图 2 中的油漆桌面次之,黑色尼龙垫相当于黑体,全部吸收热水杯辐射的热量,没有明显倒影,仿真中将黑色尼龙垫视为理想黑体,反射率为 1.0,仿真图像中无倒影。模拟图像较为真实地反映了这几种现象。此外,本文方法计算速度较快,在分辨率为 1280 pixel×800 pixel 的图像窗口上,渲染一帧该场景用时为 0.015 s。为能更细致地分析实拍图像和仿真图像的差异,对图 2 的实拍图像和模拟图像进行了直方

图灰度统计对比。如图 4 所示,从统计直方图上可以看出,两幅图都在灰度为 0、250 处出现了明显的主峰,主峰位置较为接近,在两主峰的中间都出现 3 个次主峰,实拍和仿真图像具有一定的相似性。但仿真图像的灰度分布较为单一,且分布不够连续,这主要是由于在建模时没有将实际纸杯的杯口等细节进行建模,且实际纸杯中的整个水温分布是渐变的,而本文为简化计算,将水杯中的温度简单分为上、下半部分和过渡区 3 种温度进行模拟,仿真图像的直方图分布与实际测量结果有较明显的差异,这也是下一步需要展开的工作。

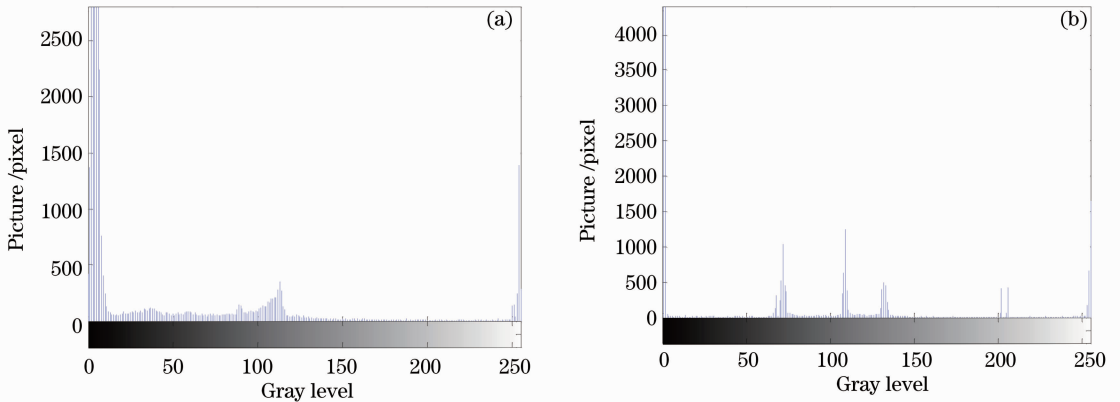


图 4 图 2 两分图的统计直方图对比。(a)图 2(a); (b)图 2(b)

Fig. 4 Histogram contrast of Fig. 2. (a) Fig. 2(a); (b) Fig. 2(b)

计算图 2(a)和图 2(b)的灰度差异,可得图 5。从图中可以看出,模拟图像与实拍图像的差异最大的地方出现在圆柱体的边缘处及中间区域,这说明两者的观察角度没有完全匹配,且在实际实验时纸杯中倒入开水的量控制不够精确,导致图 5 纸杯中中间位置出现了差异。其余部分的灰度差异均较小,灰度误差没有超过 9%。进一步可计算出两图的均方差 (MSE) 为 30.488,峰值信噪比 (PSNR) 为 61.2837 dB,一般在评价模拟图像与实采图像时<sup>[5]</sup>,PSNR 的取值在 20 dB 以上就可以认为两者相似度较高。因此,可以认为模拟图像与实拍图像的相似程度是较高的。

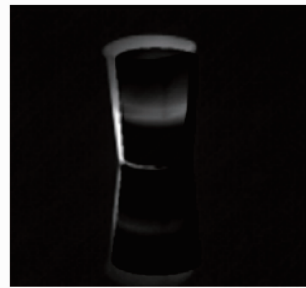


图 5 光滑油漆面上场景成像误差分布图  
Fig. 5 Image error distribution of Fig. 2(a) and Fig. 2(b) on the paint desk

用 3Dmax 对场景中各种景物进行建模,根据实验时的室内温度和热水的温度进行温度的估计和设定,所用材料的各项参数如表 1 所示。

表 1 场景所用材料参数表

Table 1 Material parameters in the scene

Material	Temperature / °C	Specular reflection rate	Diffuse reflection rate	Ambient light reflection rate	Emissivity	Specular index
Paint desk	20	0.2	0.05	0.05	0.7	6
Ceramic	20	0.4	0.05	0.05	0.5	3
Black nylon	20	0	0	0	1.0	0
Paper cup	50~90	0	0	0	1.0	0

## 4.2 复杂场景模拟

利用红外辐照模型模拟了场景二。场景二模拟北京某地,其地理坐标为:东经  $116^{\circ}23'17''$ , 北纬  $39^{\circ}54'27''$ ;时间为:2012年7月20日15:00;天气:晴;气温: $28^{\circ}\text{C}$ ;相对湿度:41%,风力2级。场景中所

用到的各种景物温度数据均为于2012年7月20日实测的数据,场景包含房屋、草地、树木、足球场、塑胶跑道等景物,不同的景物由不同材料组成,如图6所示。

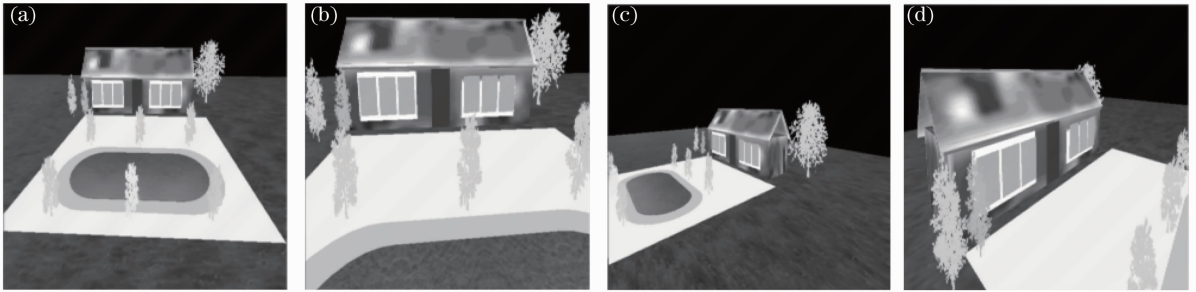


图6 四个不同的视角进行观察的仿真红外图像。(a)远景图像;(b)近景图像;(c)不同视角图像;(d)局部细节图像

Fig. 6 Four synthetic infrared images in different view angles. (a) Distant view image; (b) near by view image; (c) different angles of view image; (d) part detail image

图6(a)是场景的远景图像,图6(b)和图6(c)是探测器从不同角度对整个场景进行观察的结果,图6(d)是场景中某局部细节的近距离观察效果。在渲染时,等温度的区域其辐射亮度也相同,这导致了景物细节不容易分辨的问题,但轮廓比较清晰,通过主观评价,可以认为该模拟图像具有红外成像的基本特性。为增加红外图像仿真的真实感,采用纹理技术模拟了草地地面的温度变化<sup>[13]</sup>。场景二的总三角面片数目为227516个,在分辨率为1280 pixel $\times$ 800 pixel的图像窗口上,采用本文方法的平均渲染速度达20 frame/s,基本可满足对场景细节要求不高的实时仿真需求。且对于同一场景,从任意视角进行观察都可以实时生成对应的红外图像,对目标场景的红外跟踪和搜索仿真具有重要意义。

上述两个场景的红外成像仿真结果表明,该红外成像仿真计算模型计算量小、可以快速模拟红外景物的高光辐射等特征,可以在人眼接受的程度上满足仿真要求,但需在图像的真实感方面进一步加强<sup>[14,15]</sup>。

## 5 结 论

根据计算机图形学可见光光照模型及红外辐射机理,在可见光光照模型的基础上引入景物的自发辐射,提出符合红外辐射原理的基于Blinn-Phong光照模型的红外成像仿真模型。同时,在模拟红外高光特征时,根据景物的几何位置、坐标、探测器位置等信息,提出了基于景物几何特征的红外高光计算方法。应用该红外成像辐照模型及仿真方法对两

种典型场景进行了仿真模拟成像,与用红外热像仪获取的真实红外图像进行对比表明,该仿真结果能较为真实地反映景物的红外特征以及成像规律,对复杂的场景也能做出相应的模拟,可满足定性分析的需要。

## 参 考 文 献

- 1 R. C. Jones. A new classification system for radiation detectors [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1949, **39**(5): 327~341
- 2 R. C. Jones. Factors of merit for radiation detectors [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1949, **39**(5): 344~356
- 3 O. M. Williams. Imaging infrared fundamentals: an alternative perspective [C]. *SPIE*, 1992, **1689**: 32~46
- 4 Wang Zhangye, Jiang Zhaoyi, Bao Hujun. A quantity optics based illumination model for infrared image synthesis [J]. *Chinese J. Computer*, 2002, **25**(9): 897~903  
王章野,江照意,鲍虎军.基于量子光学的红外成像光照模型[J]. *计算机学报*, 2002, **25**(9): 897~903
- 5 Li Hongning, Bai Tingzhu, Cao Fengmei *et al.*. Infrared imaging model for scene simulation and its validation [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2010, **29**(1): 57~61  
李宏宁,白廷柱,曹峰梅等.用于场景仿真的红外成像模型及其有效性分析[J]. *红外与毫米波学报*, 2010, **29**(1): 57~61
- 6 F. E. Nicodemus. Directional reflectance and emissivity of an opaque surface [J]. *Appl. Opt.*, 1965, **4**(7): 767~773
- 7 J. T. Kajiya. The rendering equation [J]. *ACM Siggraph Computer Graphics*, 1986, **20**(4): 143~150
- 8 Lu Yanqing, Wang Zhangye, Dong Yanbing. Study on infrared characteristics of city buildings with season changes and the 1R images [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2002, **21**(5): 377~381  
陆艳青,王章野,董雁冰.城市建筑物红外特性四季变化及其成像研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2002, **21**(5): 377~381
- 9 Yang Guijun, Liu Qinhuo, Huang Huaguo *et al.*. Methods for simulating infrared remote sensing images based on scene models [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2007, **26**(1): 1~7  
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[J]. *红外与毫米波学报*, 2007, **26**(1): 1~7
- 10 Zhao Limin. Thermal Infrared Radiance Modeling of Land

- Surface Background and Imaging Simulation [D]. Nanjing: Nanjing Univeristy, 2011. 5
- 赵利民. 地表热红外辐射背景场建模与成像模拟研究[D]. 南京: 南京大学, 2011. 5
- 11 Nie Pin, Tian Haiying, Dong Bin *et al.*. Research of modulation transfer function measurement of CCD camera with rectangle target [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(12): 1204002
- 聂品, 田海英, 董斌等. 矩形靶标测试 CCD 相机调制传递函数的研究[J]. *光学学报*, 2012, **32**(12): 1204002
- 12 Xu Zhonghua, Fang Jiaxiong. Modulation transfer function measurement of near infrared linear focal plane arrays [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(12): 1204001
- 许中华, 方家熊. 近红外线列探测器传递函数测试系统[J]. *光学学报*, 2012, **32**(12): 1204001
- 13 Zhu Jigui, Zou Jian, Lin Jiarui *et al.*. Error-compensation algorithm with high-accuracy for photographic image processing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(9): 0912004
- 郝继贵, 邹剑, 林嘉睿等. 摄影测量图像处理的高精度误差补偿法[J]. *光学学报*, 2012, **32**(9): 0912004
- 14 Bai Junqi, Chen Qian, Wang Xianya. An improved high resolution reconstruction algorithm for staring infrared image [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 86~90
- 白俊奇, 陈钱, 王娴雅. 一种改进的凝视红外图像高分辨率重建算法[J]. *光学学报*, 2010, **30**(1): 86~90
- 15 Yuan Hongwu, Mei Haiping, Huang Yinbo *et al.*. Research on atmospheric refraction correction algorithm and model for satellite laser range-finding [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(4): 0401004
- 袁宏武, 梅海平, 黄印博等. 星载激光测距大气校正算法与模型研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(4): 0401004

栏目编辑: 李文喆