

零视距地物长波红外特征场景仿真研究

胡海鹤¹ 白廷柱¹ 郭长庚² 韩 强¹ 孙玉杰¹ 崔建平¹ 张罗莎¹

(¹ 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)
² 武汉理工大学计算机学院, 湖北 武汉 430070)

摘要 为仿真地物长波红外场景图像,根据地表温度随时间变化的规律,并结合气象状况、背景材质、热特性参量、热状态等参数,在对太阳辐射、大气长波辐射、大气温度和地表热传导等影响地表温度变化的因素进行分析的基础上,建立了基于热平衡理论和热传导过程的方程。解算出多种常见地表一日之中的温度变化情况,并将其应用于由相同景物可见光纹理图像反演出的相应红外纹理图像中。在考虑景物表面自身发射、反射的辐射计算模型的前提下,生成了具有相似红外纹理细节的地表红外场景。结果表明,该方法可生成接近真实感的红外场景,有效地模拟仿真地物的长波红外特征。

关键词 图像处理;红外场景仿真;红外纹理;热平衡方程;热特性

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.1011002

Long Wave Infrared Scene Simulation Research Based on Zero Stadia of Landmark

Hu Haihe¹ Bai Tingzhu¹ Guo Changgeng² Han Qiang¹ Sun Yujie¹
Cui Jianping¹ Zhang Luosha¹

(¹ Key Laboratory of Photoelectronic Technology and System, Ministry of Education of China, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)
² School of Computer Science and Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China)

Abstract In order to simulate landmark long wave infrared scene image, according to the variation law of earth surface temperature with time, combining the parameters, such as weather condition, background material, thermal feature parameters, thermal situation and so on, the factors which affect the variation process of earth surface temperature, such as sun radiation, sky long wave radiation, air temperature, earth surface heat conduction, are analyzed. The equation based on the thermal balance theory and heat conduction process is founded, then the temperature variation about some usual earth surfaces in a day is figured out, and the temperature is proposed to be simultaneously used in the corresponding infrared texture image derived from the same visual texture image. By considering the computation model including self radiation, reflected radiation of the scenery, the related earth surface infrared scene with infrared texture detail is created. The results indicate that the method can simulate infrared scene with reality and is valid to simulate landmark long wave infrared feature.

Key words image processing; infrared scene simulation; infrared texture; thermal balance equation; thermal feature

OCIS codes 100.2960; 100.6890; 350.4600

收稿日期: 2012-04-09; **收到修改稿日期**: 2012-05-14

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、光电检测和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)

1 引言

地面景物红外图像在遥感和军事研究等领域都具有极其广泛的应用,因而基于计算机图像生成技术的红外视景仿真具有广泛的需求。目前,自然地表红外仿真研究方法主要有两种:1)基于可见光反演的红外地表景物^[1,2]。这种方法只能基于所拍摄的可见光图像模拟特定场景,局限性较大;2)根据热力学原理建立物体表面的热平衡方程^[3-6],通过求解三维传热方程组得到物体表面较高精度的辐射分布。基于该模型的计算量非常大,需要输入大量的参数,操作过程繁琐。同时,因此类方法较难考虑景物细节的纹理特征,因而仿真的红外场景真实感不强,在一定程度上影响红外图像的视觉效果。

针对上述情况,本文依据第一辐射定律,提出将三维地表导热问题简化为一维导热处理,建立了地表热平衡方程求解一天中不同时刻的温度,结合各种地表的辐射发射率,求解出各种地物的辐射出射度及其相应的映射图像灰度,进而形成模拟仿真不同时刻红外图像的方法。本文方法可获得具有较好纹理细节的景物红外仿真图像,为红外视景仿真提供一种经济有效的手段。

2 热物理特征预测模型

各种地貌的热物理特征预测^[7]是指在已知影响地貌温度的主要因素(日变化特征)前提下,从热传导方程出发,通过求解热平衡方程分别求出特定条件下一日内各个时刻地面背景的均值温度,实现相关地貌的全天均值温度预测。

由热传导理论可知,当一个平板的长度和宽度相对于厚度为“无限大”时(即平板的高度和宽度是厚度的8~10倍时^[7])可以忽略其边缘对内部温度分布的影响,此时,三维的导热过程可简化为一维导热处理。宽广的地表满足上述条件,故可以忽略水平方向的热传导而仅考虑垂直方向,其温度随时间和空间变化的非稳态热传导方程为

$$\rho C_m \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_{mc} \nabla \cdot (\nabla T), \quad (1)$$

式中 T 为绝对温度, t 为时间, λ_{mc} 为介质导热系数, C_m 为介质热容量, ρ 为介质密度, ∇ 为拉普拉斯算子。

求解(1)式的上边界条件为上表面满足地表热平衡方程;下边界条件为进入地表达一定深度后,温度基本不变,热通量为零,即 $T|_{z=z_{MAX}} = T_{const}$, 且

$\frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=z_{MAX}} = 0$, 其中 $\frac{\partial T}{\partial z}$ 表示地表温度的变化梯度, Z 为地表深度。因此需要建立地表的热平衡方程。

2.1 地表热平衡方程

热量交换通常通过辐射、对流和传导三种形式进行。图1为地表与外界环境的热量交换示意图。如图1所示,地表与外界环境的热量交换主要有太阳短波辐射、大气长波辐射、低空大气和地表的对流换热、地表向地下的热传导、潜热作用以及地表自身向外界的辐射。工程情况下,地表基本上都可看作相邻单元之间没有热传递,地表能量的热平衡方程^[7]为

$$\alpha(x, y)E_{sun}(t) + \epsilon(x, y)E_{sky}(t) - \epsilon(x, y)\sigma T_g^4 - H_g(x, y) - L_{E_g}(x, y) = G_n(x, y), \quad (2)$$

式中 t 为一天中的时间, $\alpha(x, y)$ 为地表短波平均吸收率, $E_{sun}(t)$ 为太阳短波辐照度, $\epsilon(x, y)$ 为地表长波平均发射率, $E_{sky}(t)$ 为天空长波辐照度, σ 为斯蒂芬-玻耳兹曼常数, T_g 为地表温度, $H_g(x, y)$ 为地表与大气交换的显热通量, $L_{E_g}(x, y)$ 为由地表水分蒸发带来的潜热通量, $G_n(x, y)$ 为地表得到的热通量, x, y 为单元的位置坐标。

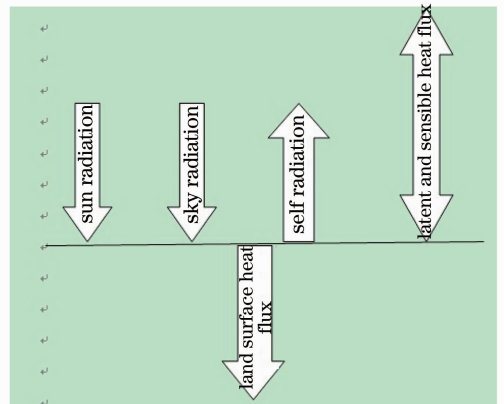


图1 地表与外界环境热量交换

Fig.1 Heat exchange between ground surface and environment

2.1.1 太阳短波辐照度

太阳辐射的影响主要在白天,其辐射通量随季节、时间、天气及地理条件的不同而不同,如图2所示,其中 ζ 为太阳入射角, n 为壁面法线。地表接收到的太阳辐射一般可分为太阳直射和太阳散射两部分,即

$$E_{sun} = E_{sund} + E_{suns}, \quad (3)$$

式中

$$E_{sund} = rP^m I_{sc} \sin h, \quad (4)$$

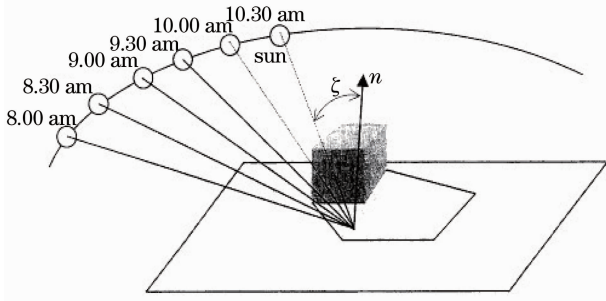


图2 太阳辐射通量随时间变化而不同

Fig. 2 Variation of sun radiation flux along with time

$$E_{\text{suns}} = \frac{1}{2} I_{\text{sc}} \sin h \frac{1-P}{1-1.4 \ln P} \cos^2 \frac{\beta}{2}, \quad (5)$$

式中 E_{sund} 为太阳直射; E_{suns} 为太阳散射; P 为大气透明度, 其综合反映了大气层厚度、消光系数等对太阳辐射的影响。对于大气透明度, 一般可按经验取常数, 非常好的晴天 $P = 0.85$, 较好的晴天 $P = 0.80$, 中等的晴天 $P = 0.65$, 较差的晴天 $P = 0.532$; m 为大气质量数; h 为太阳高度角; β 为任意倾斜面的倾斜角, 这里地表取为平地, 倾斜角为 0 ; I_{sc} 为太阳常数, r 为太阳常数的日地距离修正值, 太阳在近日点(2011年1月3日)对地球的辐照度约为 1399 W/m^2 , 在远日点(7月4日)的辐照度约为 1309 W/m^2 , 一般的工程计算中, 取太阳常数 $I_{\text{sc}} = 1353 \text{ W/m}^2$ 。因地球沿椭圆轨道绕太阳运动, 故在使用太阳常数时须经日地距离修正, 修正太阳常数的经验公式:

$$r = 1 + 0.034 \cos \left(360 \times \frac{f_{\text{day}}}{365} \right), \quad (6)$$

式中 f_{day} 是距离1月1日的天数。

考虑到云层遮挡的因素, 地表接收到的太阳辐射为

$$E_{\text{sun}} = (E_{\text{sund}} + E_{\text{suns}}) \times f_{\text{CCF}}, \quad (7)$$

式中 f_{CCF} 为云遮因子, 指没被云层占据的天空区域占整个天空区域的面积之比。对于晴朗的天空, $f_{\text{CCF}} = 1$; 对于阴雨天, $f_{\text{CCF}} = 0$; 而在大多数情况下, f_{CCF} 的值介于1和0之间。

2.1.2 大气长波辐射

在太阳光透过大气层到达地面的途中, 其中一部分被大气中的二氧化碳和水蒸汽所吸收, 使其内能升高。同时, 大气还吸收来自地面的反射辐射, 使大气本身具有一定的温度, 并向地面进行长波辐射。大气长波辐射与大气温度、相对湿度、天空云层等因素有关。

若无云, 天空在地面产生的照度 E_{sky0} (W/m^2) 为

$$E_{\text{sky0}} = (B_{\text{sky}} + C_{\text{sky}} \sqrt{e_a}) \sigma T_a^4, \quad (8)$$

式中 B_{sky} 和 C_{sky} 为经验常数, 会随地域和季节的不同而变化, 可取^[7] $B_{\text{sky}} = 0.61$, $C_{\text{sky}} = 0.05$, T_a 为地面大气温度(K), e_a 为近地面水汽压(hPa), 有

$$e_a = H_r \times 6.108 \times \exp \left[\frac{17.269(T_a - T_0)}{T_a - 35.86} \right], \quad (9)$$

式中 T_0 为绝对零度(K); H_r 为近地面空气相对湿度。

在有云的情况下, 应该考虑云的长波辐射对目标温度的影响。云的长波辐射与云的覆盖率、云层的厚度及温度有关, 通常由经验参数给出, 此时天空长波辐射度 E_{sky} (W/m^2) 为

$$E_{\text{sky}} = E_{\text{sky0}} (1 + f_{\text{CIR}} f_{\text{CC}}^2), \quad (10)$$

式中 f_{CC} 为云覆盖率, f_{CIR} 为与云的类型有关的系数。表1给出了天空辐射的云类型校正系数。

表1 天空辐射的云类型校正系数

Table 1 Cloud type emendation coefficient of sky radiation

Cloud type coefficient	CIR
Cirrus (CI)	0.04
Cirrostratus (CS)	0.08
Altostratus (AC)	0.17
Altostratus (SS)	0.20
Cumulostratus (SC)	0.22
Stratus (ST)	0.24
Fog (Fog)	0.25

2.1.3 地表自身的辐射

地表向外部空间辐射损失的热量与地表表面的性质和温度有关。对于 t 时刻温度为 T_g 的地表表面, 其向周围辐射的热辐射强度可由斯蒂芬-玻尔兹曼公式得到:

$$M_g = \epsilon(x, y) \sigma T_g^4. \quad (11)$$

2.1.4 对流换热通量

显热交换^[6]主要由地表和周围空气间的对流热交换引起, 受大气温度、地表温度、风速和海拔高度等因素的影响。在干燥多风区域, 它是产生地表和大气间热交换的主要机制。显热交换通量的理论计算已有多种模式, 其中, 空气动力学阻抗可以比较理想地对各种参量进行确定。空气动力学阻抗模式仿照电学中的欧姆定律, 其热流量与热量源之间的位势差成正比, 与阻挡它们的空气动力学阻力成反比。显热交换通量为

$$H_g = \rho_a C_p \frac{T_g - T_a}{r_a}, \quad (12)$$

式中 ρ_a 为近地面空气密度, C_p 为空气定压比热, r_a 为空气动力学抗力, 其倒数直接与风速成比例。

2.1.5 潜热交换通量

由于地表上方空气的流动,不可避免地存在空气中水分在地表凝结,地表及其内部的水分以蒸发的形式回到大气的现象,因此地表与周围空气存在着潜热交换。潜热通量受大气温度、地面温度、风速、大气相对湿度和海拔高度等因素的影响。地表和周围空气的潜热交换^[6,7]通量 L_{E_g} 可用下式计算:

$$L_{E_g} = \frac{\rho_a C_p}{\gamma} \cdot \frac{e_s(T_g) - e_a}{r_a}, \quad (13)$$

式中 γ 为干湿表常数(0.66 mbar/K)。 $e_s(T_g)$ 为地表温度为 T_g 时的饱和水汽压(mbar):

$$e_s(T_g) = 6.108 \exp\left[\frac{17.269(T_g - T_0)}{T_g - 35.86}\right]. \quad (14)$$

2.1.6 热传导通量

由于地表和内部具有一定的温差,因此地表的热量会向内部传导。地表的热传导主要与地表各层的温差、厚度和导热性有关。地表的热传导通量 G_h 的计算由下式给出:

$$G_h = \lambda_g \left. \frac{\partial T}{\partial Z} \right|_{z=0}, \quad (15)$$

式中 $\left. \frac{\partial T}{\partial Z} \right|_{z=0}$ 表示地表温度在表面的变化梯度, λ_g 为地表的导热系数。根据傅里叶定律,热流密度表示单位面积上的辐射热流量,单位为(W/m^2),即

$$q(z, t) = -\lambda_g \frac{\partial T(z, t)}{\partial Z}. \quad (16)$$

假定每种地表的构成材料都是同质的,则地表热传导通量可以简化为如下形式:

$$G_h = q(z, t) = -\lambda_g \frac{\partial T(z, t)}{\partial Z} = -\lambda_g \frac{T_g - T_c}{Z}, \quad (17)$$

式中 T_c 为地面下一定深度,按常温处理的温度。地表的深度 Z 是和地表类型有关系的,一般情况下取0.4~1.0 m。

2.2 光裸地表的热平衡方程

在热平衡方程(2)式中,对于干燥裸露地表,如水泥路面等,可以认为没有水分蒸发,因而不存在水相变化中的能量转换,可以认为不存在潜热通量 L_{E_g} 。此时,(2)式可以写为

$$\alpha(x, y)E_{\text{sun}}(t) + \epsilon(x, y)E_{\text{sky}}(t) - \epsilon(x, y)\sigma T_g^4 - H_g(x, y) = G_h(x, y). \quad (18)$$

3 地表的热红外特性计算结果与分析

3.1 热红外特性计算结果

根据前述的各种能量交换,可利用有限差分数值解法,计算得出地表各层在一天中的温度变化情况,计算出地表的红外辐射。计算中用到的各类地表的热力学参数,如密度、定压比热、导热系数、短波反射率、比辐射率等如表2所示,表中括号内数值为不同资料的给定值。

表2 各类地表参数

Table 2 Parameters of different earth surfaces

Matter	Density $\rho / (Kg/m^3)$	Specific heat at constant pressure $C_m / [J/(kg \cdot K)]$	Heat conductivity $\lambda_g / [W/(m \cdot K)]$	Shortwave reflectivity γ_g	Emissivity ϵ
Humidity soil	2500	2800	0.627(0.691)	0.20	0.94
Concrete	2200	837	1.279	0.25	0.90(0.92)
Asphalt	1800	921	0.756	0.25(0.27)	0.93(0.956)
Cement	1900	837	0.300	0.25(0.27)	0.90
Sand	1700	795	0.251	0.35	0.95
Plastic			0.400		0.85
Lawn				0.24	0.94
Grey brick			0.850		0.95
Dry soil					0.90

以北京某地为例。其地理坐标为:东经 $116^{\circ}23'17''$,北纬 $39^{\circ}54'27''$;时间为:2012年5月6日,即一年中的天数为126;天气:晴;气温: $17^{\circ}C \sim 30^{\circ}C$;相对湿度: $30\% \sim 70\%$;风力2级。分别对塑胶、混凝土、柏油马路、水泥地表、干土壤、草地六种地表的温度进行了模

拟计算。模拟计算结果如图3~6所示。

图6(a)为文献[8]给出的水泥地表实测温度和模拟温度的对比,图6(b)为水泥地一天温度变化^[8],图6(c)为模拟水泥地一天温度变化。

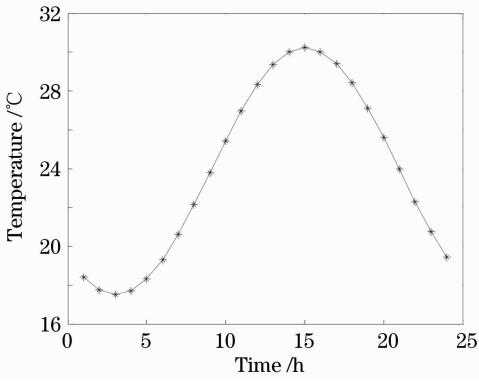


图3 一日气温变化曲线

Fig. 3 Air temperature change curve in a day

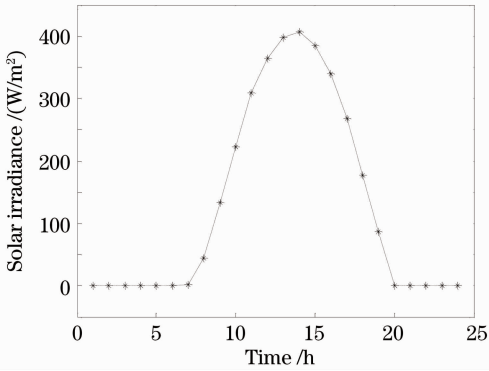


图4 一日太阳辐照度变化曲线

Fig. 4 Sun radiant illumination change curve in a day

3.2 温度变化分析

上述图3为根据5月6日当日的最高和最低气温模拟出的大气温度变化曲线,气温在下午2点左右达到最大值,在凌晨3~4点达到最低。上述图4为这一天太阳照射到地面的辐照度变化曲线,基本上也是在下午2点达到最大值,日出之前和日落之后太阳的辐射为0。大气辐照度和大气温度变化均符合实际情况。上述图5是根据该日的天气状况,

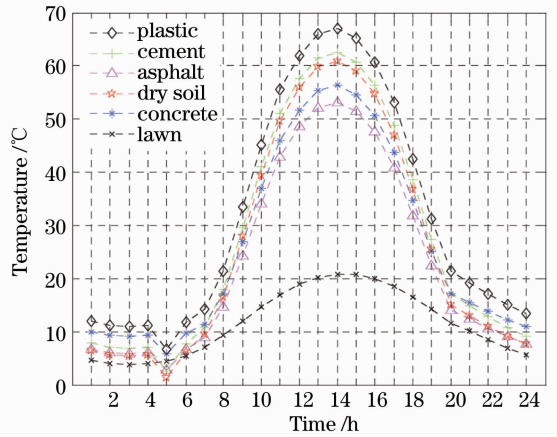


图5 各类地表温度变化曲线

Fig. 5 Different earth surfaces temperature change curves in a day

模拟计算出的六种常见地表:混凝土、水泥地、柏油路面、塑胶、干土壤、草地一日内的温度变化。可以看出,几种地表的温度变化趋势一致,并且符合实际测量到的地表温度变化趋势(参见文献[8])。几种地表的温度均在下午2点达到最高值。由于水泥、塑胶的导热系数小,比热容相对较大,所以温度较高,且变化剧烈。凌晨5点各类地表温度达到最低。上述图6(a)是文献[8]在合肥某地4月8日关于水泥地表的模拟与实测温度曲线对比,图6(b)是文献[8]提供的水泥路一天的温度变化情况,图6(c)是模拟计算的5月6日水泥路面温度变化曲线,对比可看出,两者由于测定的时间不一样,使水泥路达到的最高和最低温度不同,但可以明显看出,两者的变化趋势非常吻合,温度都在下午2点达到最大值,这也说明由文中的热特征预测模型计算的温度是合理的。

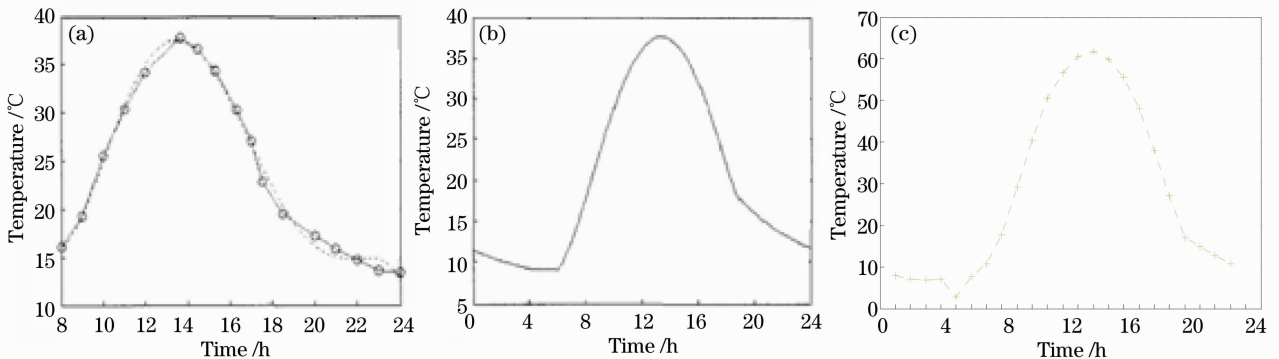


图6 水泥地表的模拟与实测对比曲线

Fig. 6 Cement surface temperature change curve between simulation and measurement

4 零视距地表红外图像仿真

4.1 地表红外辐射计算

零视距红外场景仿真是指计算出红外背景和目
标无大气衰减情况下的红外图像。在红外场景中,
红外成像系统探测场景中的物体辐射主要包含目标
自身的辐射、目标对周围环境辐射的反射以及大气
的红外辐射。这里模拟零视距的红外图像,故可忽
略大气的红外辐射计算,即地表的红外辐射主要由
其自身发射的红外辐射和反射的红外辐射两部分组
成。目标在 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 波段的地表辐射量为

$$E = E_{\text{self}} + E_{\text{reflect}}, \quad (19)$$

$$E_{\text{self}} = \epsilon \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} \frac{c_1}{\lambda^5 [\exp(c_2/\lambda T_g) - 1]} d\lambda, \quad (20)$$

$$E_{\text{reflect}} = \gamma_g \alpha_{\text{LW}}(x, y) E_{\text{sun}}(t), \quad (21)$$

式中 c_1 和 c_2 分别为第一和第二辐射常数; λ_1 、 λ_2 为仿
真波段(由于常温下的温度分布主要在 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 波
段,是地表等一般物体的主要辐射波段,所以模拟了
 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 波段); γ_g 为地表的反射率,可由表 2 查出。
有资料^[9]表明, $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 波段的辐射占太阳辐射的
比例约为 0.11% ,所以不同地物接收到的该波段范围
内的太阳辐射能量,可通过公式 $0.11\% \times E_{\text{sun}}(t)$ 计
算, $\alpha_{\text{LW}}(x, y)$ 为地表的长波平均吸收率。

4.2 辐射能量与红外仿真图像灰度的映射

红外成像系统输出的“图像”是根据能量等效原
理再现的,即图像上每一像素的灰度级与视场中景
物相应点的红外辐射能量相对应,从而可利用灰度
或颜色分布来表征地物的辐射强度分布。

在对整幅红外仿真图像的像素值进行灰度量
化前,需首先确定各类地表在一天中的最低温度和最高
温度,再结合各类地表的发射率,计算出各类地表在
一天中辐射量的最大值和最小值,取其中的最大辐射
量映射为仿真图像的最高灰度级 G_2 ,最小辐射量映
射为仿真图像的最小灰度级 G_1 。文中仿真的场景为
某大学体育场,体育场由塑胶跑道和草地两种地表物
质组成:5月6日测量的塑胶最高温度为 66°C ,最低
温度为 7°C ,发射率为 0.85 ;草地的最高温度为
 22°C ,最低为 6°C ,发射率为 0.94 ;对应的最大辐射
量 E_{max} 为 182 W/m^2 ,映射为红外仿真图像的最大灰
度级 G_2 ,最小的辐射量 E_{min} 为 72.5 W/m^2 ,映射为红
外仿真图像的最小灰度级 G_1 。辐射量与灰度级的对
应关系为

$$R = \frac{E_{\text{max}} - E_{\text{min}}}{G_2 - G_1}. \quad (22)$$

任意辐射量 E 所对应的灰度值为

$$G = \left[\frac{E - E_{\text{min}}}{R} + G_1 \right]. \quad (23)$$

4.3 红外纹理生成

仿真图像的红外纹理可以直接通过真实红外图
像得到,也可以通过可见光图像反演得到^[7]。目前,
基于可见光图像的红外地表场景仿真的研究^[7,10]有
很多,这种方法主要根据可见光图像中不同材质区
域来分割图像^[11,12],针对分割出的每个区域,结合
该区域的材质和温度等信息,计算出该区域的平均
辐射能量,再将其映射到相应的灰度等级,显示出
来。这种方法基于可见光图像,仿真出的场景是二
维的,不能从各个角度去观察,且场景中每个区域用
相同的灰度值显示,缺失了纹理细节,视觉效果不理
想。文献^[10]提出了一种利用可见光纹理反演红外
纹理的便捷方法,但在生成的红外纹理灰度等级控
制上有可能出现某些像素灰度值大于 255 或小于 0
的情况,即出现像素值饱和情况,从而损失部分细
节。为解决该问题,文中对生成图像的红外纹理灰
度进行了控制,即利用可见光灰度图像的像素灰度
差值确定红外图像的灰度范围,使所生成图像的
红外纹理灰度值全部处于 $0 \sim 255$ 范围内。

关于红外图像的纹理问题,有研究工作表明,不
同谱段的图像纹理在空间上具有相同的统计分布特
性^[7,10],即对同一材质而言,虽然其整体温度(均值)
随时间变化,但其表面局部均值的温差分布(各点温
度与平均温度的差值)可近似认为不随时间变化^[7]。
对此,这里进行了实验验证:对同一片树叶,分别采
集了长波($8 \sim 12 \mu\text{m}$)红外图像和可见光的图像
(图 7),视觉判断表明,两者纹理的空间分布确实具
有一定的相似性。因此可以在仿真精度要求不太高
的情况下采用可见光图像的纹理分布反演图像的
红外纹理分布。

同时,因灰体的反射率和发射率满足 $\gamma_g + \epsilon = 1$
的关系,故可由发射率确定反射率,无需在红外纹
理模型中再表征反射率^[7]。

基于可见光图像纹理反演图像红外纹理的具
体方法如下:

1) 计算可见光图像景物平均灰度 G_{average} ;

2) 根据平均灰度求出图像景物纹理之间的灰
度起伏差值:设 (i, j) 为可见光纹理图像中的任意
一点,灰度为 $g(i, j)$,令 $f(i, j) = g(i, j) - G_{\text{average}}$;
为了更接近实际红外图像纹理的分布关系,文中对

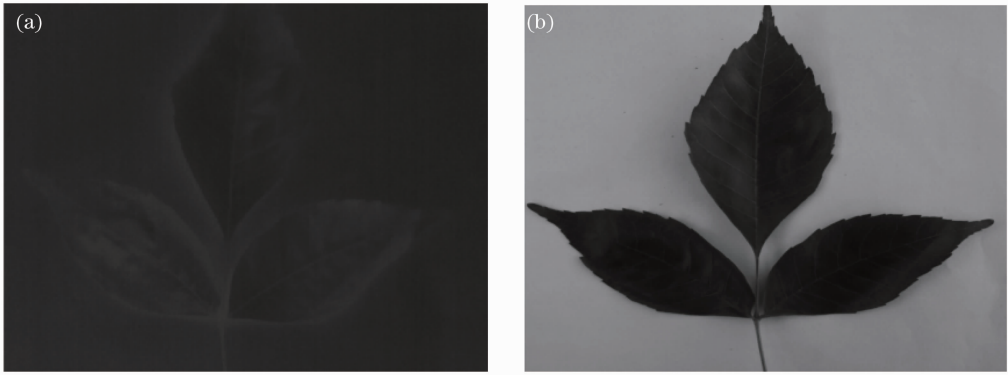


图7 树叶的红外和可见光纹理对比图。(a)红外图像；(b)可见光图像

Fig. 7 Contrast image between infrared and visible light. (a) Infrared image; (b) visible image

所表征的仿真图像纹理的灰度差别进行了压缩处理,即在所表征的红外图像中,使用 $f(i, j) = k \times f(i, j)$ 作为红外图像的纹理灰度 [$f(i, j)$ 为原可见光图像灰度差值分布函数, k 为调节因子(一般情况下处于 $0 \sim 1$ 之间),其取值根据需要表征的红外纹理细节要求确定,根据经验和具体情况,这里取 $k = 0.5$];

3) 为保证仿真红外图像灰度不因上述的调节出现灰度饱和,通过规定 $G_2 \leq 255 - k \times f(i, j)_{\max}$, $G_1 \geq 0 - k \times f(i, j)_{\min}$ 来确定 4.2 节中 $G_1 \sim G_2$ 的灰度范围。计算结果为: $G_1 = 55, G_2 = 207$;

4) 根据第 3 节计算的某一地表固定时刻的平均温度,结合各种地表的发射率,计算出各种地表的辐射出射度,根式(22)式将其映射到相应的灰度等级,并将该灰度等级作为此刻对应纹理图像的平均灰度级 G_T ,即据(23)式计算出:

$$G_T = \left(\frac{E - E_{\min}}{R} + G_1 \right); \quad (24)$$

5) 红外纹理生成:设 (i, j) 为红外纹理图像中的任意一点,其像素灰度值为

$$G(i, j) = G_T + k \times f(i, j), \quad (25)$$

式中 $G(i, j)$ 为红外纹理在点 (i, j) 的灰度值, $G(i, j) \in [0 \sim 255]$ 。

在上述步骤中,调节因子 k 确定了红外仿真图像的灰度映射区间 $G_1 \sim G_2$ 范围,如在仿真场景中不同地表之间红外辐射对比度较小时,可以降低 k

的值,使 $G_1 \sim G_2$ 区间变大,根据(22)式有

$$R = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{G_2 - G_1}, \quad (26)$$

则每级灰度代表的辐射能量变小,表示同样的能量差需要的灰度等级就变多,虽然场景中不同景物的辐射对比度较小,但由于降低了 k 值使每个灰度级代表的辐射能量也变小,即表示同样的能量差需要更多的灰度等级,从而增加了不同景物间的对比度,反之亦然。

4.4 零视距红外仿真图像生成

在通过 3DMax 软件生成的地表三维模型下,依据计算机图形学原理,采用 Visual C++ 和 OpenGL 技术进行了红外图像生成仿真。基于上述地表红外辐射计算结果仿真的 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 的红外热像如图 8 所示。仿真场景为某大学体育场上的塑胶跑道和草地,塑胶和草地在各个不同时刻的仿真图像如图 8(a)~(l)所示。具体参数如表 3 所示。

图 8(a)~(c)为可见光场景图以及模拟红外图像需要的可见光草地和塑胶的纹理图像,为降低场景建模复杂度,这里只对场景中塑胶跑道和草地地表进行了建模。第一列中的图 8(d)、(g)、(j)分别是时间为 5:00、10:00、14:00 的红外实拍图;第二列中的图 8(e)、(h)、(k)分别是相应时刻的采用红外纹理仿真的红外图像;第三列中的图 8(f)、(i)、(l)分别是相应时刻的无纹理细节的仿真红外灰度图像。

表 3 模拟各时刻的温度灰度对应关系

Table 3 Relation between temperature and gray at different times

Simulation time	Plastic average temperature / °C	Plastic average gray	Lawn average temperature / °C	Lawn average gray
5:00	7	55	6	63
10:00	40	130	15	83
14:00	66	207	22	100

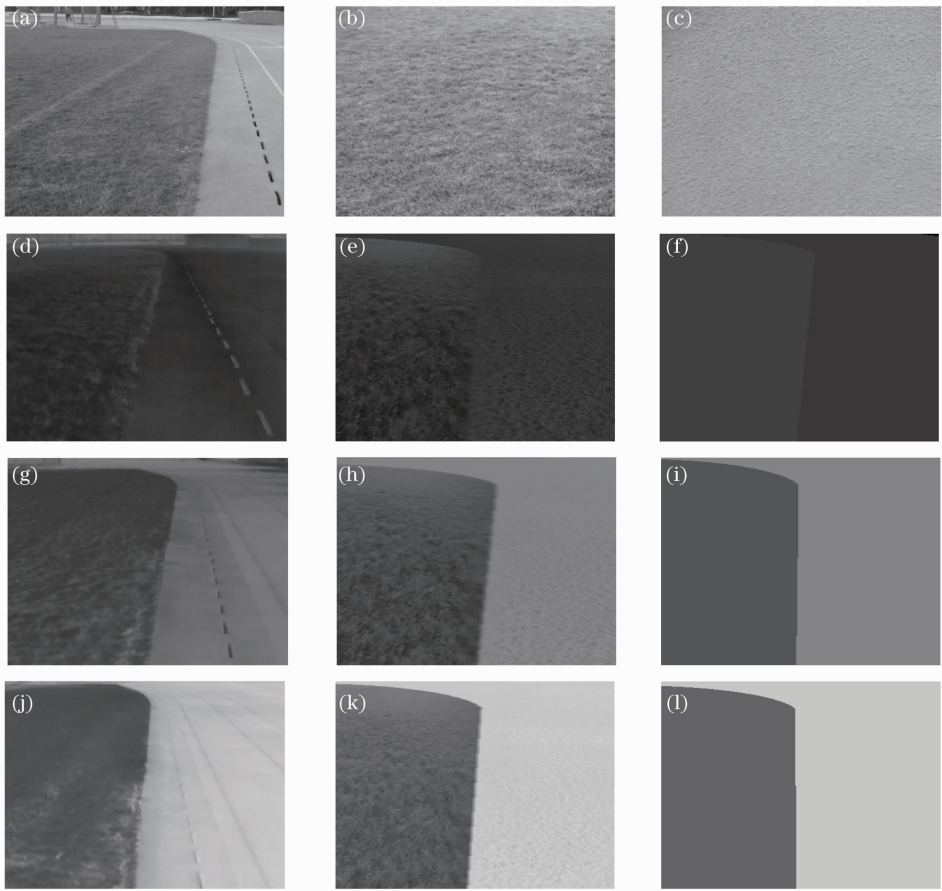


图 8 草地和塑胶跑道各时刻的红外实拍图、红外纹理图、灰度图

Fig. 8 Real infrared images, simulation images with texture and gray images about plastic and grass surface at different times

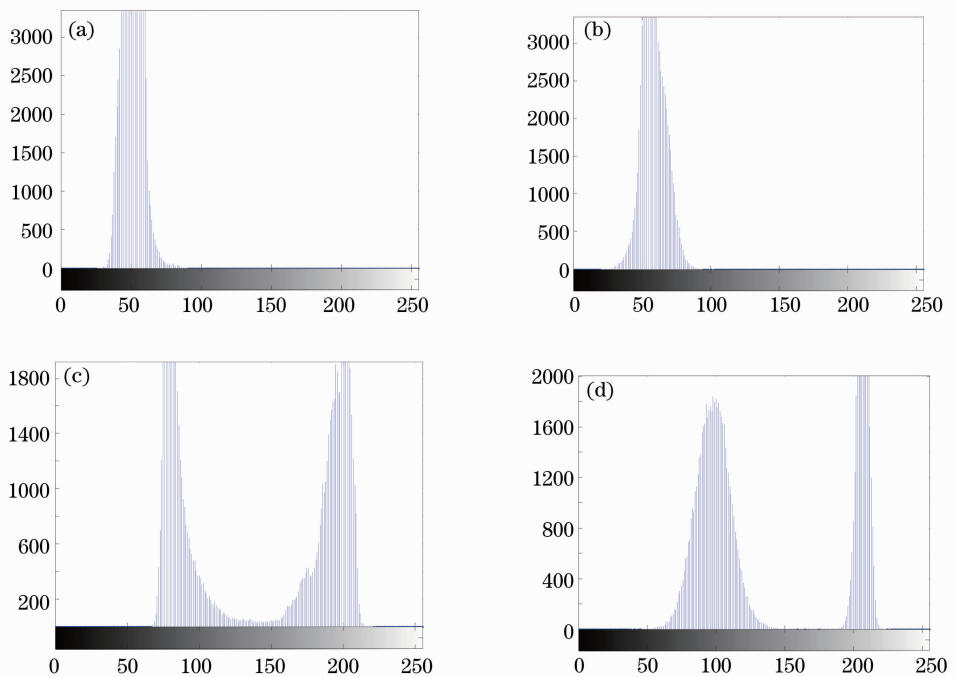


图 9 实拍红外图像和仿真图像的直方图对比。(a),(c)实拍图；(b),(d)仿真图

Fig. 9 Histograms about real infrared and simulation images. (a), (c) real infrared images; (b), (d) simulation images

为客观评价上述红外图像的仿真效果,对图 8(e)、(k)两图与实际红外图像图 8(d)、(j)进行了灰度直方图对比,结果如图 9 所示。图 9(a)、(b)为凌晨 5 点实拍图与仿真图的直方图对比,图 9(c)、(d)为中午 14 点实拍图与仿真图的直方图对比。可以看出,统计上两者基本相似,主峰位置近似一致,说明两者的灰度分布范围较一致,直方图形状近似一致,说明两图中各物体的区域纹理近似一致。上述比较结果说明,在图像细节表征精度要求不高的大规模场景仿真中,本文方法是可行的。

具有纹理细节的红外图像增加了场景图像的真实感,为快速、逼真的红外图像获取提供了一种方便有效的途径。

5 结 论

基于热力学第一定律建立了地表的热平衡方程,可以由之求解一天中不同时刻的温度和各类地表的红外辐射能量分布。提出了使相同景物的可见光纹理图像反演相应的红外纹理图像的具体方法,并将通过热平衡方程计算获得的一天中不同时刻的温度应用于仿真的红外纹理图像中,得到了一天中各个时刻的红外纹理图像。仿真结果表明,文中提出的方法可以得到地面背景真实感较强的红外热像图像。后续工作将在考虑到大气衰减^[13]、探测器对信号的响应^[14,15]和光电转换等因素影响的情况下,开展更为准确、实用的红外视景仿真研究。

参 考 文 献

- Zhangye Wang, Zhaoyi Jiang, Shiguang Liu. New model for realistic IR image rendering of city buildings [C]. *SPIE*, 2004, **5405**: 177~188
- Xu Hong, Wang Xiangjun, Liu Feng *et al.*. Infrared multispectral image simulation based on spectral images in visible bands[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, **38**(2): 200~204
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): 200~204
- Lulu Zheng, Siyuan Sun, Tianxu Zhang. A method for dynamic infrared image simulation under various natural conditions[C]. *SPIE*, 2009, **7494**: 74940B

- A. Mahmoodi, A. Navavi. Thermal modeling of desert backgrounds in the far-infrared spectral region [J]. *Optical Engineering*, 2000, **39**(9): 2545~2554
- F. G. Wolleweber. Weather impact on background temperatures as predicted by an IR-background model [C]. *SPIE*, 1990, **1311**: 119~128
- W. Kustas, M. Anderson. Advances in thermal infrared remote sensing for land surface modeling[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, **149**(12): 2071~2081
- Zhang Jianqi, Wang Xiaorui. Photoelectricity Imaging System Model and Performance Estimation theory [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2010. 97~148
张建奇,王晓蕊.光电成像系统建模及性能评估理论[M].西安:西安电子科技大学出版社,2010. 97~148
- Lu Yuan, Wu Dan. A study on infrared radiation of terrain by modeling[J]. *Infrared Technology*, 2008, **2**(30): 75~78
路远,吴丹.地表红外辐射建模研究[J].*红外技术*, 2008, **2**(30): 75~78
- Wu Guojun. Infrared Image Research of Scout Image Below[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2011
武国军.下视侦察影像的红外图像实现研究[D].北京:北京理工大学, 2011
- Shao Xiaopeng, Zhang Jianqi, Xu Jun. Study of modeling natural infrared textures [J]. *J. Xidian University (Natural Science Edition)*, 2003, **30**(5): 612~617
邵晓鹏,张建奇,徐军.一种自然红外纹理的生成方法[J].*西安电子科技大学学报(自然科学版)*, 2003, **30**(5): 612~617
- Zeng Wenjing, Wan Lei, Zhang Tiedong *et al.*. Fast detection of sea line based on the visible characteristics of marine images[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(1): 0111001
曾文静,万磊,张铁栋等.基于海面可见光图像的海界线快速检测[J].*光学学报*, 2012, **32**(1): 0111001
- Zhang Hui, Zhao Baojun, Tang Linbo *et al.*. Infrared object tracking based on adaptive multi-features integration[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **30**(5): 1291~1296
张辉,赵保军,唐林波等.基于自适应多特征整合的红外目标跟踪[J].*光学学报*, 2012, **30**(5): 1291~1296
- 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
- Hong Wenqing, Yang Nansheng, Wang Xiaodong *et al.*. Combined nonuniformity correction algorithm of infrared focal plane arrays[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(6): 0611005
洪闻青,杨南生,王晓东等.红外焦平面联合非均匀性校正算法[J].*光学学报*, 2011, **31**(6): 0611005
- 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

栏目编辑:李文洁