

基于 GLC 模型的红外纹理合成方法研究*

邵晓鹏 张建奇

(西安电子科技大学技术物理学院, 陕西, 西安, 710071)

摘要 根据自然红外纹理在空间的统计分布特性, 利用随机场模型可以有效地合成红外纹理. 由于物体表面的温度场分布具有马尔可夫性, 可以利用 GLC (Generalized Long-Correlation) 随机场模型模拟自然地物表面的红外辐射温度场分布情况, 并利用普朗克黑体辐射定律计算地表的辐射度场分布, 通过辐射度场进行显示定标和量化, 可以有效生成不同的红外纹理. 模拟结果表明: GLC 模型可以有效模拟 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 和 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 波段的红外纹理.

关键词 GLC 模型, 红外纹理, 温度场, 纹理参数.

THE STUDY ON INFRARED TEXTURE SIMULATION BASED ON GLC MODEL *

SHAO Xiao-Peng ZHANG Jian -Qi

(School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract The random field models can be available in synthesizing the natural texture according to the statistical distribution of intensity of texture in space. With Markov property of the temperature fields distribution on the surface of objects, the Generalized Long-Correlation (GLC) random fields model is applied to simulate the distribution of temperature fields on the surface of natural terrains. And the radiation fields of terrain can be easily calculated by Planck's radiation law. The infrared textures can be produced after digitalization of radiation fields by given display ruler and quality of radiation. The simulation results show that the GLC model can generate the infrared texture in bands of $3 \sim 5 \mu\text{m}$ and $8 \sim 12 \mu\text{m}$ effectively.

Key words GLC model, infrared texture, temperature fields, texture parameters.

引言

纹理可以理解为具有特征尺寸及反射或辐射性质的各种大面积目标灰度的空间分布^[1-2]. 可见光纹理可以认为目标对可见光的反射特性引起图像在空间上的灰度起伏, 而红外纹理则可以认为目标的辐射特性引起图像在空间上的灰度起伏变化. 由于纹理灰度在空间上统计分布特性可以用一定的随机过程方法进行描述, 故可以采用纹理模型进行纹理的合成^[2]. 纹理合成方法研究由来已久, 并出现了各种不同的纹理模型, 经典的纹理模型有: 马尔可夫 (Markov) 随机场模型^[3]、吉布斯 (Gibbs) 模型、马赛克 (Mosaic) 模型、自回归 (AR) 模型、自回归移动平均 (ARMA) 模型和分形 (Fractal) 模型等^[2]. 这些模型中最著名的是马尔可夫随机场模型, 不但可以生成各种不同的纹理, 而且由该模型可发展出其他纹

理模型. GLC 模型^[4]是在马尔可夫随机场模型的基础上, 通过引入长相关系数, 使得纹理的合成更加方便, 更优于马尔可夫随机场模型^[4].

传统的纹理合成方法大都集中于可见光纹理的模拟, 而对于红外纹理的合成方法研究则很少涉及^[5-7]. 这些模型或者只利用简单的温度迭代求出温度场的分布^[5], 不能真正体现物体表面的红外辐射特性; 或者借助于已知的纹理图像进行图像变换^[6], 或建立了基于物理的地表红外辐射模型, 并借助于大量的军事测试数据, 利用 ARMA 纹理模型进行红外纹理的合成^[7]. 本文首先利用 GLC 模型生成物体表面上的温度场分布, 然后利用普朗克黑体辐射定律获得物体表面的辐射度场分布, 进而对辐射度场进行图像显示的定标和量化, 得到物体表面的红外纹理, 并进一步分析纹理参数对红外纹理合成的影响.

* 国家自然科学基金 (批准号 60277005) 资助项目
稿件收到日期 2002 - 10 - 21, 修改稿收到日期 2003 - 04 - 10

* The project supported by the National Nature Science Foundation of China (No. 60277005)
Received 2002 - 10 - 21, revised 2003 - 04 - 10

1 定义

设 $s = (i, j)$ 为 $M \times M$ 的二维网格中的位置, 其中 $i, j \in J = \{0, 1, \dots, M - 1\}$, 于是整个网格空间可以定义为 $\Omega = \{s(i, j) : i, j \in J\}$. 设图像位于网格点 s 的观测值为 $y(s)$, $y(s)$ 的均值为 0, 因而随机场模型被定义为 0 均值图像.

因为随机场中每一个点的观测值与邻点的观测值是相关的, 所以引入邻点集合量 $N = \{r = (k, l) : k, l \in \pm J\}$, 同时对每个邻点赋一个与位置有关的相关系数 θ_r . 通常对纹理模型要求比较少的系数, 根据领域点数可将模型区分为一阶模型、二阶模型…… n 阶模型等, 如图 1 所示, x 为观测点, 周围为其邻点集合值.

随机场模型中的边界条件必须满足随机场为一平稳过程, 如何处理该边界条件? 在处理过程中, 可以假设网格是环状的, 即上边界与下边界相邻, 左边界与右边界相邻^[8].

由于模型的分析 and 模拟是在频域中完成的, 还需要引入频域系数 $\omega_r = 2\pi(mk + nl)/M$, 其中 $t = (m, n)$, $r = (k, l)$.

		-1,3	0,3	1,3			
		-2,2	-1,2	0,2	1,2	2,2	
-3,-1	-2,-1	-1,-1	0,-1	1,-1	2,-1	3,-1	
-3,0	-2,0	-1,0	x	1,0	2,0	3,0	
-3,1	-2,1	-1,1	0,1	1,1	2,1	3,1	
		-2,2	-1,2	0,2	1,2	2,2	
		-1,3	0,3	1,3			

图 1 4 阶模型的邻点集合
Fig. 1 Neighbor set for models in 4th order

2 马尔可夫随机场模型

马尔可夫随机场模型假设图像中的每一像素点可以表示为其邻点的线性组合与一随机噪声取样的和值, 其方程为

$$y(s) = \sum_{r \in N} \theta_r y(s \oplus r) + e(s), \quad s \in \Omega \quad (1)$$

其中, N 为邻点集合, θ_r 为在 N 中的邻点系数, \oplus 为直和运算符, $\{e(s)\}$ 为满足下列相关结构的噪声序列:

$$E\{e(s)e(s \oplus r)\} = \begin{cases} \rho & r = (0,0) \\ -\theta_r \rho & r \in N \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

此模型存在、稳定的充分条件为

$$\lambda(t) = 1 - 2 \sum_{N_h} \theta_r \cos \omega_r > 0, \quad \forall t \in \Omega \quad (3)$$

其中, N_h 为对称半邻点集合, 即 $r \in N \Rightarrow -r \in N$, 且 $\theta_{-r} = \theta_r$.

$$r = \theta_{-r}$$

马尔可夫随机场模型也可以写成与白噪声序列 $\{w(s)\}$ 有关的形式, 在频域表示为

$$Y(t) = \frac{\sqrt{\rho}W(t)}{\sqrt{\lambda(t)}} \quad t \in \Omega \quad (4)$$

其中 $Y(t)$ 为 $y(s)$ 的快速离散傅立叶变换(DFT)变换形式, $W(t)$ 为 $w(s)$ 的 DFT 变换形式, ρ 为噪声方差.

3 GLC 模型及其计算机生成方法

GLC 模型在频域中定义为

$$Y(t) = \frac{\sqrt{\rho}W(t)}{\lambda(t)^d} \quad t \in \Omega \quad (5)$$

其中, d 为相关系数, 当 $d = 1/2$ 时, GLC 模型即变为马尔可夫随机场模型. 当邻域系统参数相同时, 选取不同的相关系数 d , 可以获得起伏不同的纹理^[4].

利用上述定义的 GLC 模型, 即可在频域内获得 GLC 随机场的一个采样, 采样的步骤为: 1) 定义 $M \times M$ 的图像网格, 并初始化为白噪声序列 $\{w(s)\}$; 2) 将网格中的白噪声序列进行 DFT 得到 $W(t)$; 3) 代入半邻点集合 N_h 和邻域系数 θ_r , 计算 $\{\lambda(t)\}$ 序列; 4) 代入式(5), 计算 $Y(t)$; 5) 对 $Y(t)$ 进行快速离散傅立叶逆变换(IDFT)得到 $y(s)$, 获得 GLC 随机场的一个采样样本.

经过以上步骤, 通过输入不同的参数, 可以得到不同的 GLC 随机场样本数据. 由于初始化的种子不同, 每次由相同的参数模拟得到的采样数据不尽相同, 但其在空间上的统计分布特性却是一致的.

4 物体表面温度场的模拟

物体表面温度场的分布可以认为是一个二维马尔可夫随机过程^[5], 而 GLC 模型在马尔可夫随机场模型的基础上引入了长相关系数, 随机场中邻点间的关系得到进一步约束, 丰富了随机场的模拟种类. 在温度场中相邻点之间也存在一个相关度, 该相关度恰好可以用 GLC 模型中的长相关系数进行描述, 因而可以更方便、有效地模拟出物体表面的温度场分布情况.

上述方法模拟的仅仅是一个纯粹的随机场数据, 并没有与温度场相互关联. 为将随机场数据转换为温度场数据, 特引入以下理论: 对于一个均值为 μ 、标准方差为 σ 的正态分布样本 X , 满足下面的式子^[10]:

$$P(|X - \mu| > 3\sigma) = 0.0027 \quad (6)$$

进一步, 当区间取 $[\mu - 3.5\sigma, \mu + 3.5\sigma]$ 时, 几乎所有的采样点都落在此区间中.

假设温度场的均值为 \bar{T} , 标准方差为 σ_T , 则由 GLC 随机场转换到温度场分布的过程步骤如下:

(1) 将 GLC 随机场样本序列 $\{y(s)\}$ 进行归一化处理, 并将处理后的样本序列记为 $\{N(s)\}$; (2) 对新样本序列 $\{N(s)\}$ 中的每一点, 按式(7)做线性处理获得均值为 \bar{T} 、标准方差为 σ_T 的温度场分布.

$$T(s) = \bar{T} + 7\sigma_T N(s) - 3.5\sigma_T, \quad s \in \Omega \quad (7)$$

设温度场中的数据全部落在区间 $[\bar{T} - 3.5\sigma_T, \bar{T} + 3.5\sigma_T]$ 中, 由于 $\{N(s)\}$ 已归一化, 所以式(7)经简单推导即可获得. 根据上述线性变换, 可以很方便地将 GLC 随机场样本转换为温度场的分布样本.

5 将温度场转换为辐出度场

利用普朗克黑体辐射定律^[1], 如式(8)所示, 可以计算出一定辐射温度下的光谱辐出度, 并可进一步计算出辐射能量场.

$$M(\lambda, T) = c_1 \left[\lambda^5 \left\{ \exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right\} \right]^{-1}, \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}) \quad (8)$$

其中, $c_1 = 3.7418 \times 10^8 (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^4)$, $c_2 = 1.4388 \times 10^4 (\mu\text{m} \cdot \text{K})$, λ 为波长 (μm), T 为辐射温度 (K).

对于给定波段范围 $[\lambda_1, \lambda_2]$, 由式(9)计算出物体表面的辐出度:

$$M_{\lambda_1 \sim \lambda_2} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M(\lambda, T) d\lambda$$

对温度场中的每一点做上述计算, 即可得到该波段下物体表面辐出度场的分布.

6 红外纹理的合成

由辐出度场到红外纹理的转换实际上是一个图像显示定标和量化的过程, 即给定图像的显示灰度

级 *GrayLevel* 后, 根据式(10)的线性变换方法, 计算出第 $i (i \in \Omega)$ 点的显示灰度 $gray_i$:

$$gray_i = \left[\frac{M_i - M_{\min}}{M_{\max} - M_{\min}} \cdot GrayLevel \right]. \quad (10)$$

其中, $[\cdot]$ 为取整运算, M_i 为第 i 点的辐出度值, M_{\max} 和 M_{\min} 分别为辐射场中的最大和最小辐出度值.

图2为利用 GLC 模型生成红外纹理, 由于选取的纹理邻域参数不同, 产生的纹理具有不同灰度空间分布特征.

7 纹理参数分析

纹理的空间形态主要由邻域参数和相关系数 d 决定, 具体可以参考文献[4]. 下面主要分析温度场参数对红外纹理的影响.

平均温度对红外纹理的影响效果如图3所示, 图3中(a)、(b)和(c)选取的温度方差相同, $\sigma_T = 2$, 而平均温度分别为 300K、310K 和 330K, 成像波段为 $3 \sim 5 \mu\text{m}$, 显示定标的最大辐出度和最小辐出度分别为 $M_{\max} = 20 (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1})$ 和 $M_{\min} = 0 (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1})$. 可以看出, 当温度方差和其他参数既定时, 平均温度越高, 红外纹理的亮度就越高.

当平均温度一定时, 温度方差对红外纹理模拟的影响如图4所示. 图4中(a)、(b)和(c)的平均温度相同, 同为 $\bar{T} = 320\text{K}$, 而温度方差分别为 1.0、2.5 和 5.0, 其他参数同图3. 可以看出: 当平均温度和其他参数既定时, 温度方差越大, 红外纹理的起伏就越明显.

下面讨论成像波段对红外纹理的影响. 由于红外纹理的生成过程中, 对辐射能量场采用了数字离散化处理, 显示定标的最大和最小辐出度分别对应生成纹理的最大和最小灰度级, 而成像波段只影响辐射场强度的相对变化, 所以当成像波段不同时, 只

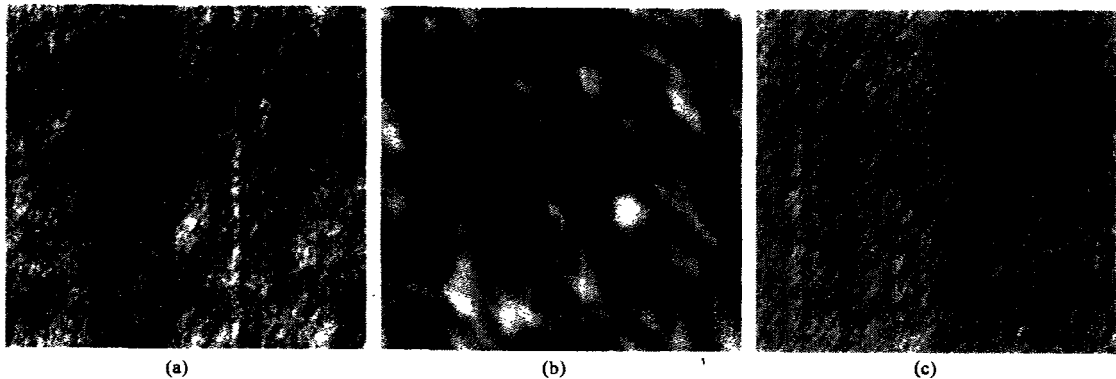


图2 红外纹理举例
Fig.2 Examples of infrared texture

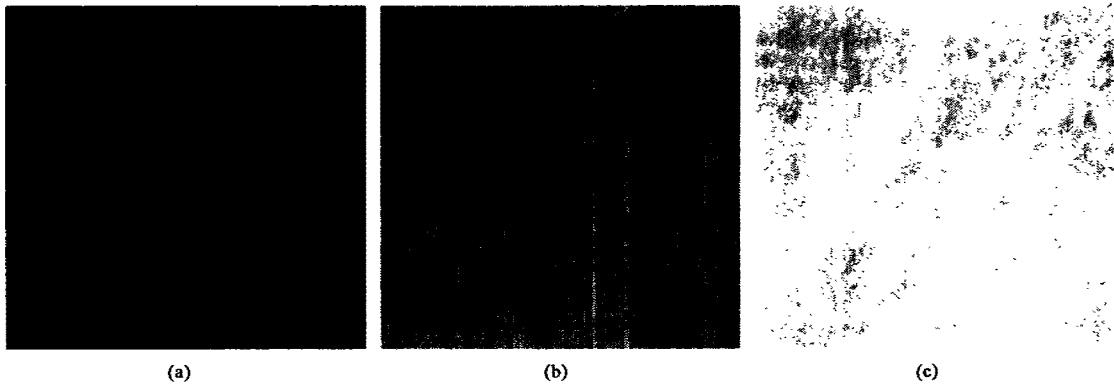


图3 平均温度对红外纹理的影响

Fig. 3 Effect on infrared textures for average temperature

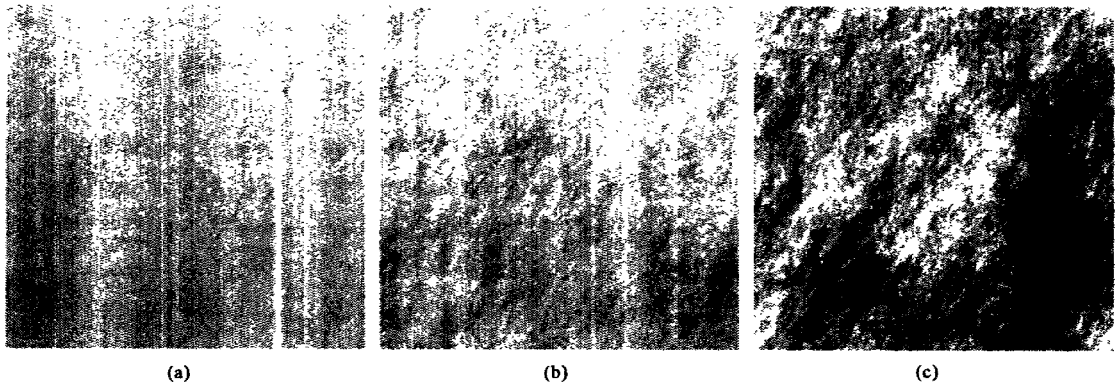
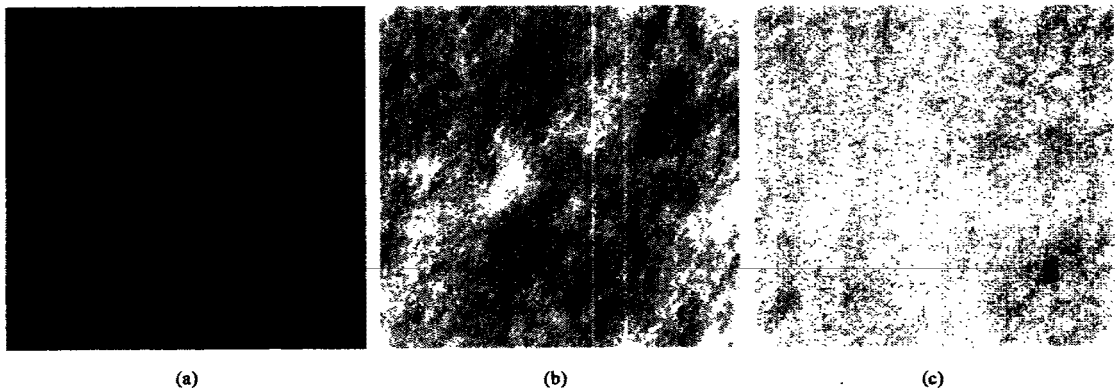


图4 温度方差对红外纹理的影响

Fig. 4 Effect on infrared texture for standard variation of temperature

图5 8~14 μm 波段下模拟的红外纹理Fig. 5 Infrared textures simulated in bands 8~14 μm

需选取合适的显示定标量值即可. 图5为8~14 μm 波段下生成的红外纹理, 显示定标的最大辐出度和最小辐出度分别为 $M_{\max} = 280 \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 和 $M_{\min} = 120 \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$. 图5(a)中 $\bar{T} = 300 \text{K}$, $\sigma_T = 2.0$; 图5(b)中 $\bar{T} = 320 \text{K}$, $\sigma_T = 4.0$; 图5(c)中 $\bar{T} =$

330K, $\sigma_T = 1.0$. 图5中的其他参数同图3和图4.

8 结语

利用 GLC 随机场模型可以快速得到温度场的采样样本, 并应用普朗克黑体辐射定律进行红外辐

出度场计算,经显示定标和图像数字化后,即可方便获得红外 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 和 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 波段下的纹理. 根据合成纹理的类型,选取不同的纹理参数,可以得到多样化的纹理数据. 这些纹理数据可以广泛应用于红外场景的仿真工作中,以弥补红外仿真数据的匮乏. 当纹理数据应用于红外场景仿真时,需要根据实际情况合理选取显示定标数据,以使场景仿真更具真实性. 另外,当在同一场景仿真时,红外纹理的模拟必须选取相同的成像波段和显示定标量值,否则不能保证仿真场景的合理性和真实性.

REFERENCES

- [1] Rosenfeld A. *Digital Picture Analysis*. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 1976
- [2] Fu K S, Young T Y. *Handbook of pattern recognition and image processing*. New York: Academic Press, 1986
- [3] Cross G R, Jain A K. Markov random field texture models. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1983, **5**(1): 25—39
- [4] Jesse Bennett, Alireza Khotanzad. Modeling textured images using generalized long correlation models. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1998, **20**(12): 1365—1370
- [5] Ben-Yosef N, Rahat B. Simulation of IR images of natural backgrounds. *Applied Optics*, 1983, **22**(1): 36—42
- [6] Cadzow J A, Wikes D M. Simulation of infrared backgrounds using two-dimensional models. *SPIE*, 1991, **1486**: 352—363
- [7] Weiss R A, Sabol B M. Physics-based infrared terrain radiance texture model. *Technical Report EL-95-5*. Vicksburg: Army Engineer Waterways Experiment Station. MS. NTIS NO. AD A293 507
- [8] Kashyap R L. Random field models on torus lattices for finite images. In: *Proc. Int'l conf. Pattern Recognition*. Miami, Fla., 1980: 1103—1105
- [9] Shao X P, Zhang J Q. Simulation of 3D infrared scenes using random fields model. *SPIE*, 2001, **4553**: 378—383
- [10] Sachs L. *Applied Statistics, A Handbook of Techniques*. New-York: Springer-Verlag (2nd ed.), 1984
- [11] Jacobs P A. *Thermal Infrared Characterization of Ground Targets and Background*. Bellingham, WA: SPIE Optical Engineering Press, 1996