

Journal of Image  
and Graphics

# 中国图象图形学报



ISSN1006-8961  
CN11-3758/TB

2013  
Vol.18 No.

1

中国科学院遥感应用研究所  
中国图象图形学学会主办  
北京应用物理与计算数学研究所

# 中国图象图形学报

Zhongguo Tuxiang Tuxing Xuebao

2013年1月 第18卷 第1期(总第201期)

## 目次

### 综述

- 正面人脸图像合成方法综述 ..... 赵林, 高新波, 田春娜(1)  
SAR 图像道路网提取方法综述 ..... 程江华, 高贵, 库锡树, 孙即祥(11)

### 图像处理和编码

- 头部缺失的 JPEG 文件碎片恢复 ..... 徐明, 黄立, 张海平, 徐建, 郑宁(24)  
安全高效的撤销指纹模板构造 ..... 喻建平, 张鹏, 王瑶, 杨懿竣(36)  
基于残差的图像超分辨率重建 ..... 陈华华, 姜宝林, 刘超, 陈伟强, 陆宇, 张嵩(42)  
旋转的 Wang Tiles 纹理合成算法 ..... 王继东, 庞明勇, 赵瑞斌(49)  
基于圆形约束快速水平集的原生质体细胞分割 ..... 王晓飞, 庞全(55)

### 图像分析和识别

- 采用压缩传感的鲁棒的视频指纹方案 ..... 孙锐, 李超, 蒋飞云(62)  
基于图像显著性的路面裂缝检测 ..... 徐威, 唐振民, 吕建勇(69)  
基于局部熵的主动轮廓模型 ..... 潘改, 高立群, 赵爽(78)  
基于算子的图像分解 ..... 李峰, 曾晓辉, 陈盛霞, 沈玉娟(86)

### 图像理解和计算机视觉

- 中值流辅助在线多示例目标跟踪 ..... 王德建, 张荣, 尹东, 张智瑞(93)  
四叉树直方图的特殊方向关系表达 ..... 张珂, 王小捷, 靳越(101)

### 计算机图形学

- 协同进化的近似规则纹理合成 ..... 王相海, 陶兢喆(107)  
反走样直线的灰度循环生成算法 ..... 牛连强, 张胜男, 钟玲(115)

### 地理信息技术

- 微博客蕴含交通信息的提取 ..... 张恒才, 陆锋, 陈洁(123)

- 
- “计算机视觉前沿论坛”专栏征文通知 ..... (130)

# Journal of Image and Graphics

(Monthly, Started in 1996)

Vol. 18 No. 1 January 2013

## Contents

### Review

- Review of frontal face image synthesis methods ..... Zhao Lin, Gao Xinbo, Tian Chunna(1)  
Review of road network extraction from SAR images ..... Cheng Jianguhua, Gao Gui, Ku Xishu, Sun Jixiang(11)

### Image Processing and Coding

- Rrecovery method for JPEG file fragments with missing headers  
..... Xu Ming, Huang Li, Zhang Haiping, Xu Jiang, Zheng Ning(24)  
Secure and efficient scheme to construct a cancelable fingerprint template  
..... Yu Jianping, Zhang Peng, Wang Yao, Yang Yijun(36)  
Image super-resolution reconstruction based on residual error  
..... Chen Huahua, Jiang Baolin, Liu Chao, Chen Weiqiang, Lu Yu, Zhang Song(42)  
Texture synthesis using rotational Wang Tiles ..... Wang Jidong, Pang Mingyong, Zhao Ruibin(49)  
Protoplasm somatic cells segmentation based on circle dependent fast level-set segmentation ..... Wang Xiaofei, Pang Quan(55)

### Image Analysis and Recognition

- Robust video fingerprinting via compressed sensing ..... Sun rui, Li Chao, Jiang Feiyun(62)  
Pavement crack detection based on image saliency ..... Xu Wei, Tang Zhenmin, Lv Jianyong(69)  
Active contour model driven by local entropy energy ..... Pan Gai, Gao Liqun, Zhao Shuang(78)  
Operator-based image decomposition ..... Li Feng, Zeng Xiaohui, Chen Shengxia, Shen Yujuan(86)

### Image Understanding and Computer Vision

- Median flow aided online multi-instance learning visual tracking ..... Wang Dejian, Zhang Rong, Yin Dong, Zhang Zhirui(93)  
Expression of special directional relation based on quadtree histogram ..... Zhang Ke, Wang Xiaojie, Jin Yue(101)

### Computer Graphics

- Fast near-regular texture synthesis based on the concept of co-evolution ..... Wang Xianghai, Tao Jingzhe(107)  
Integral algorithm for generating anti-aliased straight line controlled by gray iteration  
..... Niu Lianqiang, Zhang Shengnan, Zhong Ling(115)

### Geoinformatics

- Extracting traffic information from massive micro-blog messages ..... Zhang Hengcai, Lu Feng, Chen Jie(123)

中图分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2013)01-0107-08

论文引用格式: 王相海, 陶兢喆. 协同进化的近似规则纹理合成[J]. 中国图象图形学报, 2013, 18(1): 107-114.

## 协同进化的近似规则纹理合成

王相海<sup>1,2</sup>, 陶兢喆<sup>1</sup>

1. 辽宁师范大学计算机与信息技术学院, 大连 116029

2. 苏州大学江苏省计算机信息处理技术重点实验室, 苏州 215006

**摘要:** 纹理进化系统是一个面向近似规则纹理合成的算法, 系统的主要特点是在进化理论的基础上, 通过定义相关行为来优化纹理块在被拼接后无法改变而引发的累积误差问题。提出一种新的基于协同进化思想的纹理合成方案, 通过新定义的个体选取及排布方式, 可适用任意方向周期的纹理; 通过去除迁徙、预建立适应度表等操作, 很好地减轻了适应度计算开销的冗余度, 并且新的进化过程能够更好地实现并行化。实验结果表明所提方案不仅在通用性上有所增强, 在效率上也得到了显著提升。

**关键词:** 纹理合成; 近似规则纹理; 进化系统; 协同进化

### Fast near-regular texture synthesis based on the concept of co-evolution

Wang Xianghai<sup>1,2</sup>, Tao Jingzhe<sup>1</sup>

1. College of Computer and Information Technology, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China

2. Provincial Key Laboratory for Computer Information Processing Technology, Soochow University, Suzhou 215006, China

**Abstract:** Texture evolutionary system is a near-regular texture oriented synthesis algorithm. The main feature of the system is the definition of behaviors, which, based on the evolution theory, minimize the error accumulation problem caused by the inflexibility of synthesized blocks. In this paper, we present a new texture synthesis algorithm on the concept of co-evolution. With the new way of individual selection and arrangement, it can be applied to the near-regular textures in any period direction. The approach of removing the settling behavior and pre-computation reduces the compute redundancy. In addition, the new process of evolution can be better parallelized. Results show that the proposed algorithm does not only reinforce the versatility but also improve the efficiency greatly.

**Key words:** texture synthesis; near-regular texture; evolutionary system; co-evolution

## 0 引言

纹理合成是对纹理外貌规律进行模仿和生成的手段, 是计算机图形学、图像处理以及计算机视觉等领域的研究热点之一, 其含义是指以给定较小尺寸

的纹理作为样本, 生成与之在视觉上相似的大尺寸纹理的过程。近年来, 近似规则纹理(NRT)<sup>[1]</sup>, 即纹元在空间分布上基本满足规则纹理所固有的周期特性、而纹元间形状或颜色则不一定相同的纹理的合成技术受到关注<sup>[2-7]</sup>。该类纹理合成的难点在于需要保持纹元的周期分布性质。在针对 NRT 纹理

收稿日期: 2012-05-22; 修回日期: 2012-08-06

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(41271422); 辽宁省自然科学基金项目(20102123); 辽宁百千万人才工程(2008921036); 计算机软件新技术国家重点实验室开放基金项目(KFKT2011B11); 南京邮电大学图像处理与图像通信江苏省重点实验室开放基金项目(LBEK2010003); 智能计算与信息处理教育部重点实验室(湘潭大学)开放课题(2011CIP06)

**第一作者简介:** 王相海(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 1999年于吉林大学获理学博士学位, 主要研究方向为计算机图形学及多媒体信息处理。E-mail: xhwang@lnmu.edu.cn

的合成问题上,通常的处理方法有两类,一类是将纹理的规则和不规则部分进行分解,然后对两者分别进行合成,如文献[3-4],此类方法利用信号分析理论从全局角度来处理问题,所得结果较为平滑、自然,但对于结构特征不明显的纹理合成效果则不理想,且不易保持不规则部分的细节特征;另一类则更为常见,它是对纹理的周期进行分析并提取出纹元结构,随后以提取得到的纹元作为合成基本单位,展开基于块的纹理合成,如文献[2,6]等,此类方法通常得到的结果在视觉上一般要好于第一类方法,但具有块纹理合成方法所共同拥有的累积误差问题。文献[7]在合成方法上属于第二类,其针对累积误差问题,从生物进化的角度提出了一个纹理进化系统( TES)。传统的进化算法是以达尔文进化论中“适者生存”的思想为依据,通过模拟自然界生物进化过程的若干行为规律,设计出用于解决优化问题的系统方法<sup>[8]</sup>,如遗传算法中任意个体都是对目标问题的一种可行解,而 TES 则遵循由所有个体共同组成最后待合成的目标纹理原则。与大多数基于块的纹理合成方案不同,该方案在目标纹理上的每个纹理块位置并非固定不变,正是通过对纹理块位置的调整来优化块之间的匹配程度,进而从整体上减少累积误差,得到更好的合成结果。

本文新的基于协同进化思想的近似规则纹理合成方案,通过定义个体选取及排布原则,使其可适用于任意方向周期的纹理;通过去除迁徙操作、预建立适应度表等方式减少计算复杂度;同时本文新的进化过程能够更好地实现并行化处理。实验结果表明了本文方案的有效性。

## 1 TES 方案分析

### 1.1 TES 的基本思想

TES 方案把样本图像中的纹理块随机排列到目标纹理中,排列后的每一个纹理块称之为个体(individual),将某个体与其一阶邻域个体(东、西、南、北相邻)间重叠区域像素的匹配程度视为该个体在相应环境下的适应度(fitness)。如果某个体在一定环境下适应度高,则意味着相应纹理块间的匹配程度高;通过进一步定义个体的迁徙(settling)、对决(dueling)、死亡(death)和变异(mutation)行为来调整个体间的适应度。TES 方案把纹理合成过程转化为对整个进化系统平均适应度的最大化过程。

### 1.2 TES 的效率问题分析

TES 中个体的迁徙是系统实现优化的关键要素,但该操作本身的计算较为繁琐。为简单起见,考虑单次迭代下,不处于合成图边界位置的个体情况。受迁徙操作影响,每个个体要在其可视范围(位于周围二阶邻域的 8 格及自身,共计 9 个位置)内逐一寻找最佳栖息地。完成一个栖息地的搜索需要计算一次在该位置下的适应度值。如果产生对决或、和进行死亡判定(绝大多数情况下均会发生),还需再执行 1 到 2 次的适应度值计算。这样意味着一次迭代中每个个体在通常情况下需要进行 9 至 11 次的适应度值计算。而如果期间出现反复,即某个体在完成迁徙之后,又被其他个体驱逐,迫使其再次进行迁徙,该个体的计算量会增加一倍。

事实上,虽然通过上述分析得知每个个体在迭代过程中都需要多次计算适应度值,但其中有很大一部分计算都是重复的。在完成一次迭代时,任一个体位置的改变量通常不会超过一格。特别是系统接近稳定时,所有个体的位置基本不会发生变化。这样就使得连续两次迭代过程中栖息地的搜索因存在较多的位置重合而带来适应度计算的重复。如果提前将不同个体间的适应度值进行存储,在使用时直接查找,便可很大程度地减轻计算量。

此外,系统中个体迁徙以及死亡等行为还造成了环境变化的不确定性。每次迭代时,完成整个系统中所有个体的处理要在整体上沿特定顺序(扫描线顺序),而在局部上,相邻个体的处理顺序则不能完全确定,这使得该系统无法很好地利用并行处理机制进行求解。

### 1.3 个体与环境的协同进化假设问题分析

通过分析发现, TES 中个体与环境的关系有两个方面值得关注,一是在样本纹理中,每一个纹理块都能够与周围纹理块完美匹配,即个体的初始平均适应度值为零,这说明个体在某个环境中的表现是否优秀,除了该个体自身的因素外,也与环境有着很大的关联;二是环境与个体之间具有对偶关系,两个相邻个体互为彼此的环境,如果某个个体在当前环境下适应度值偏低,那么此时以该个体为环境的个体,其适应度值也应该偏低。

个体虽能主动适应环境,但环境只能因为个体位置的改变而被动的发生改变。将这里所说的“环境”和“个体”的概念进行抽象,将二者假设为两个

不同的种群(即个体的集合),每个种群都可以独立进化,并且若其中任何一个种群因进化改变了适应度,另一个种群的适应度都会受到影响。当上述假设成立时,环境能够主动进化以实现自我改善,从而提高其相应个体的适应度。

## 2 协同进化纹理合成方案

### 2.1 协同进化的含义

协同进化是密切相关的物种的互补进化<sup>[8]</sup>,反映了生物与生物、生物与环境间在进化过程中的某种依存关系。协同进化理论弥补了基于达尔文进化理论的传统遗传算法仅强调生存斗争而忽略生物其他方面联系,如由合作等行为的相互受益关系所带来的不足<sup>[9]</sup>,其主要类型可分为竞争型和协作型两种。本文算法所涉及思想来自于协作协同进化,即一个物种的胜利改善其他物种的生存强度,物种间的关系属于合作而非竞争。

### 2.2 环境与个体的协同进化

若将 TES 中的个体排列用矩阵表示,将个体下标和为奇数的位置集合记为  $P_{odd}$ , 偶数位置集合记为  $P_{even}$  (参见图 1 中的奇、偶数下标和), 由于每个个体与作为其四周环境的个体存在着空间位置上的对偶规律, 对于某个体的位置下标和  $p_I$  与作为其环境的任一个体位置下标和  $p_E$ , 有

$$\begin{cases} p_I \in P_{odd} \Leftrightarrow p_E \in P_{even} \\ p_I \in P_{even} \Leftrightarrow p_E \in P_{odd} \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $p_I = p_E \pm 1, P_{odd} \cap P_{even} = \emptyset$ 。

0	1	2	3	4
5	6	7	8	9
10	11	12	13	14
15	16	17	18	19

图 1 奇偶个体

Fig. 1 Odd and even individuals

将  $P_{odd}$  中的个体称为奇个体,  $P_{even}$  中的个体称为偶个体。由于奇个体(偶个体)的进化只需要保持偶个体(奇个体)的状态不变, 如果分别将奇、偶个体归入两个不同种群, 二者交替进化, 那么之前所假设的环境与个体之间的协同进化便能够成立, 而

由于两个种群在各自的进化过程当中相对独立, 因而也可以较好地利用并行化方法实现加速。

### 2.3 个体的选取及排布

纹理合成之前, 首先需要对其进行周期分析及提取平移对称向量  $t_1, t_2$ <sup>[10]</sup>, 并采用基于统治域(region of dominance)的方法<sup>[11]</sup>对平移对称向量提取。进一步将获得的由  $t_1, t_2$  向量所围成的平行四边形称之为一个纹元, 并将每一个纹元看作一个个体(样本), 规定个体的排布方向沿着  $t_1, t_2$  两个向量方向进行。

由于采用了非矩阵形状个体, 此时需要考虑个体位置的存储问题, 以便进行相应的离散化处理。采用 Bresenham 斜线绘制算法<sup>[12]</sup>判断并存储两条向量线段上像素点的偏移位置。当仅通过所得向量线段进行扫描输出时, 对于两条同时倾斜的线段, 坐标可能同时递增, 造成个体部分位置上的像素有遗漏(图 2(a) 中的黑点)。通过采用预建立二进掩膜矩阵的方式来确定个体所包含的像素点坐标, 二进掩膜矩阵的大小等于个体的最小包围盒, 此时掩膜的建立则相当于一个边界已知的多边形填充问题。不同于传统任意形状区域的填充算法, 采用如下过程实现快速填充: 1) 用 0 值初始化掩膜矩阵; 2) 利用之前得到的向量路径, 从向量起始点开始, 分别以  $t_1$  为“行”、 $t_2$  为“列”进行行优先扫描, 并用 1 值覆盖所包含的点; 3) 再次利用向量路径, 从向量起始点向右偏移 1 个单位坐标开始进行扫描并赋 1 值, 扫描的行和列元素个数均为向量路径长度减 1。

上述过程前两个步骤完成后, 即得到包含部分未填充点的填充区域, 最后一步则可实现对这些空缺点的填补。图 2 给出了掩膜示意图, 其中图 2(a) 为遗漏现象; 图 2(b) 为个体包围盒的完全填充情况, 该种情况下相邻个体可能会出现相互覆盖; 图 2(c)(d) 为所采用的掩膜示意及输出结果。

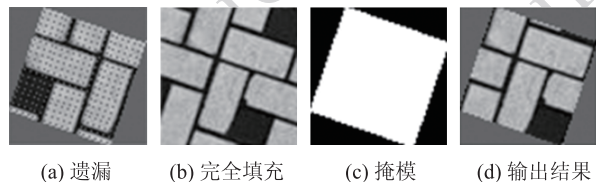


图 2 掩膜示意

Fig. 2 Mask

### 2.4 适应度表的建立

TES 方案中, 个体重叠区域是以自身边界向外

延伸指定高度得到的区域,此时相邻个体在公共边界处的适应度可能不相等,从而使存储和执行交替进化带来很大困难。

所用重叠区域位置在两个平移向量方向上各自相等,并且通常情况下始终是相邻个体在向量方向上排列顺序靠后者覆盖前者(参见图 3 右边的 B 和 A 样本,其中 A 处于 B 的右侧,故 A 覆盖 B),如此相邻个体间重叠区的计算内容固定,便于适应度表的建立。此外,为进一步提高样本的利用率并增加位于边缘样本的存活概率,若出现某一样本位于样图边缘,导致相应的重叠区坐标溢出的情况,则将根据坐标溢出的反方向对重叠区进行修正,以保证其处在样图坐标的有效区间内(参见图 3 中的 B 和 C 样本);如果两个样本的邻边分列样图两端而同时产生坐标溢出的现象(图 3 的 D、C 样本),则意味着可重叠面积达不到所需尺度,此时将记录一个很低的适应度值来惩罚该情况的出现。

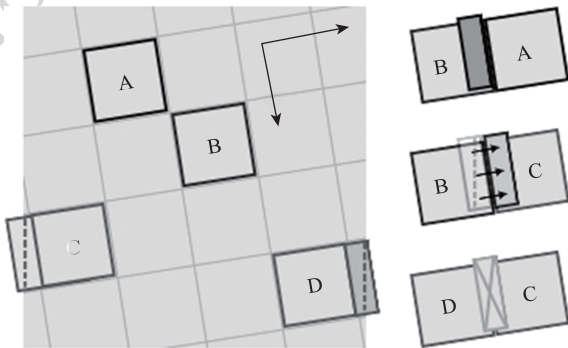


图 3 重叠区坐标修正示意

Fig. 3 Adjustment of coordinates in overlap region

选择重叠区域后对于任意的个体  $I_1$  和  $I_2$ ,其重叠区对应的适应度值定义为

$$f(I_1, I_2) = -\frac{d(I_1, I_2)}{\text{num}(\mathbf{O}_{I_1, I_2})} \quad (2)$$

式中,  $\text{num}(\mathbf{O}_{I_1, I_2})$  为  $I_1$  和  $I_2$  之间重叠区像素个数,  $d(I_1, I_2)$  是重叠区的误差度量,其计算公式为

$$d(I_1, I_2) = \sum_{i \in \mathbf{O}_{I_1, I_2}} (R_i^{I_1} - R_i^{I_2})^2 + (G_i^{I_1} - G_i^{I_2})^2 + (B_i^{I_1} - B_i^{I_2})^2 \quad (3)$$

式中,标记  $\mathbf{O}$  为个体相应的重叠区域,  $R, G, B$  为色彩三分量。式(3)去掉了传统平方和累积误差(SSD)中的开方计算,从而加大了对误差的惩罚,总体上能够更好地避免出现某一侧重叠区误差较大但

四周总误差和较小的情况。

设样本集合  $E_I$  中样本的数量为  $s$ 。根据组合情况(包括样本与其自身),任意两个样本间的相邻关系共有  $C_s^1 \times C_s^1 \times 4 = 4s^2$  种。由于两个样本在同方向上的相邻关系相互对等,因此相邻关系可减少为  $2s^2$  种。以矩形样本为例,分别建立两个维度为  $s$  的 2 维方阵,用于水平方向和垂直方向适应度值的存储,记为  $\mathbf{H}$  和  $\mathbf{V}$ ,其中  $\mathbf{H}_{I_1, I_2}$  反映的是个体  $I_1$  西邻于个体  $I_2$  的适应度值,  $\mathbf{V}_{I_1, I_2}$  反映的是个体  $I_1$  北邻于个体  $I_2$  的适应度值。东邻和南邻的情况因对称缘故可直接从表中获取。则可得到  $E, W, S, N$  个体分别作为东、西、南、北环境时个体  $I$  的适应度值为

$$F(I) = f(E, I) + f(I, W) + f(S, I) + f(I, N) = \mathbf{H}_{E, I} + \mathbf{H}_{I, W} + \mathbf{V}_{S, I} + \mathbf{V}_{I, N} \quad (4)$$

## 2.5 个体更新概率计算

将个体的死亡、变异等行为的触发统一称为更新。个体  $I$  的更新条件为

$$u(I) = \begin{cases} \frac{\omega}{1 + f_{\text{nor}}(I)} & f_{\min} \leq f(I) \leq \bar{f} \\ 0 & f(I) > \bar{f} \end{cases} \quad (5)$$

式中

$$f_{\text{nor}} = \frac{f(I) - f_{\min}}{\bar{f} - f_{\min}}$$

$$\omega = \frac{\text{iter}_{\max}}{\text{iter} + \text{iter}_{\max}}$$

$u(I)$  反映了个体  $I$  更新的概率,  $f(I)$  为个体  $I$  的适应度,  $f_{\min}$  为所有待更新个体中适应度的最小值。  $f_{\text{nor}}$  表示  $f(I)$  规范化后的值,其取值范围为  $[0, 1]$ 。  $\text{iter}$  和  $\text{iter}_{\max}$  分别为当前的迭代次数以及系统所限定的最大迭代数,其中  $\text{iter}$  的取值范围是  $[0, \text{iter}_{\max}]$ 。该式表示当  $I$  的适应度小于平均适应度  $\bar{f}$  时,其更新概率将受自身适应度及系统迭代次数的影响。

在确定了某个位置的个体需进行更新之后,要从  $E_I$  中选取一个合适的样本完成更新。与传统进化算法中的选择操作相一致,此部分可以采用多种不同策略来选取恰当的样本。将符合下列条件的样本  $I$  放入候选集  $C$  当中,并从  $C$  中随机挑选一个个体来完成更新

$$F(I) < C_{\text{Tol}} \times F_{\min} + (1 - C_{\text{Tol}}) \times F_{\max} \quad (6)$$

式中,  $F_{\min}$  和  $F_{\max}$  分别为当前位置最小和最大适应度值;  $C_{\text{Tol}}$  为候选集阈值,取值区间为  $[0, 1]$ 。通过  $C_{\text{Tol}}$  的选取可对候选集中个体的质量及多样性进行

权衡。图4为选取不同 $C_{\text{Tot}}$ 值的结果,其中第2排为局部放大示意。图4(a) $C_{\text{Tot}}$ 取0值,类似于误差最小化能较高的Graph Cut算法<sup>[13]</sup>所得的结果。通过观察可以看到重叠区边缘所在的任意两扇窗户间的墙线几乎没有断裂现象,但其丢失了部分样本。图4(b)则选取了较高的 $C_{\text{Tot}}$ 值,其重叠区边缘质量低于左图,但个体多样性程度保持较好。图4中所示结果均未对重叠区部分进行任何优化处理。



(a)  $C_{\text{Tot}}$ 为0情况 (b) 较高的 $C_{\text{Tot}}$ 值情况

图4 不同候选集阈值下的结果对比

Fig. 4 Results comparison under different candidate tolerance

## 2.6 迭代终止判断

系统的终止条件为

$$t(i) = \begin{cases} T_m - \frac{\max | \bar{f}^{i-j} - \bar{f}^{i-k} |}{(1/M) \left| \sum_{l=0}^{M-1} \bar{f}^{i-l} \right|} & j, k \in \{0, \dots, M-1\}, j \neq k \\ 0 & i = iter_{\max} \end{cases} \quad (7)$$

式中, $\bar{f}^i$ 为系统第 $i$ 次( $M < i < iter_{\max}$ )迭代下的平均适应度值; $T_m$ 为给定终止阈值(实验中选取为0.02); $M$ 表示参与计算的最近历史平均适应度值的个数(实验中取5); $iter_{\max}$ 的取值可以取固定值(实验中均取50),也可以同问题规模成正相关,当迭代次数小于 $iter_{\max}$ 时,若连续 $M$ 次最近迭代平均适应度值趋于平稳,变化最大幅度小于阈值,说明系统趋于稳定。

## 2.7 后处理

当系统符合迭代终止条件后,可能进行的后处理操作包括:

1)对个体进行变异操作。该操作在样图中沿个体自身位置以给定较小扰动半径 $r$ 为范围搜索适应度更高的位置,并以 $u(I)$ 操作判断所有个体执行的概率。值得说明的是,变异操作通常需要较多时间开销,并且在周期准确的情况下意义不大,在实际应用中该项后处理操作可有选择的进行。实验中没有执行该项操作,即 $r$ 为0。

2)对重叠区的优化处理。TES中使用了来对重叠区进行缝合的Image Quilting算法<sup>[14]</sup>,该算法的MEBC操作主要针对水平或垂直方向的矩形重叠区域,对于斜方向的平行四边形区域直接在其之上定义缝合路径比较困难,并且可能会在边角处出现菱形接缝问题<sup>[15]</sup>。因此使用羽化(feathering)操作<sup>[16]</sup>进行优化。当然也可考虑采用适应于任意形状重叠区域的Graph Cut算法,但其执行效率要低于羽化操作。

## 3 协同进化纹理合成算法的实现

### 3.1 算法框架

算法的基本框架分为初始化、迭代进化与终止判断和后处理3部分。

#### 1)初始化

(1)构建 $E_t$ ,对样本图像进行周期分析并从中提取出用于合成的样本;

(2)建立适应度表,计算所有样本之间的适应度值并存入适应度表;

(3)构建初始环境,随机初始化所有偶个体;

(4)填补空缺个体,以偶个体为环境,选取适应度最高的奇个体初始化相应位置。

#### 2)迭代进化与终止判断

(1)在迭代次数为奇数时更新奇个体,否则,更新偶个体;

(2)判断当前位置个体是否小于平均适应度,如是则选取新样本进行更新;

(3)所有位置更新后,更新平均适应度值;

(4)系统满足式(7)时,结束迭代,转向步骤3),否则转到步骤(1)。

3)进行后处理操作。

### 3.2 算法描述

算法首先需要完成目标纹理的初始化。将从样图中所选取的个体集合称为个体样本  $E_i, E_l$  中的元素相应的称为样本。不失一般性,将在目标纹理当中位于奇数行奇数列、偶数行偶数列的个体作为环境进行“环境”初始化。

环境初始化后,目标纹理中每一个空缺位置的周围都对应了由奇个体所组成的特定环境。再从  $E_l$  中分别选出适合于这些环境的个体进行空缺位置的填补,即以适应度值为约束,初始化所有的偶个体。在初始化过程中通过所有偶个体的适应度可以计算出当前系统的平均适应度。由于奇、偶个体重叠区域总量相等,所得适应度值总是相同(参见 2.4 节),故由偶个体计算得到的平均适应度等同于奇个体的平均适应度,反之亦然。

初始化后的系统将展开首轮迭代过程。此时以偶个体作为“环境”,奇个体作为“个体”,判断所有奇个体在各自环境下的适应度。如果某个个体的适应度小于平均适应度,说明该个体对整个系统的适应度起到了负面影响,需要考虑将其进行更新。当所有需要更新的奇个体都完成更新之后,更新系统平均适应度值,进入下一次迭代并交换“环境”与“个体”。此后的迭代过程中系统平均适应度都以上一次为起点,奇、偶个体各自的进化将使得系统的平均适应度能够连续变化,且总体趋势不断提高。系统不断按此模式迭代进化,直到满足终止条件。后处理操作参见 2.7 节。

图 5 给出了算法分过程的执行结果。

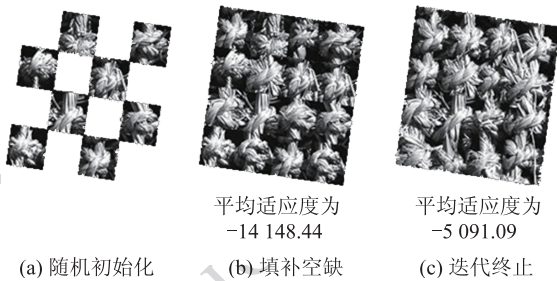


图 5 所提算法示意

Fig. 5 Demonstration of the proposed algorithm

## 4 实验与分析

### 4.1 个体形状与排布方向分析

表 1 列举了不同方案当中个体(纹理块)形状以及块排布方向的选取情况。

表 1 个体形状与排布方向选取方案对比

Table 1 Comparison of different shapes and arrange directions of individual

方案	纹理块/个体形状	排布方向
文献[2]	纹元最小包围盒-矩形	$(t_1 + t_2)/2, (t_1 + t_2)/2$
文献[7]	纹元最小包围盒-矩形	水平、垂直
本文	纹元-平行四边形	$t_1, t_2$

由于文献[2]的方案使用了两组存在相位偏移关系的纹理块,沿排布方向相间隔的纹理块可能在空间当中相邻甚至重合,按该方式进行个体选取以及排布,不符合本文方案个体之间保持相对独立的需要。文献[7]的方案能够保证这种独立性,但在处理纹元形状不为矩形的纹理时,进行随机选取并排布的相邻纹理块不能保证相位上的连续(参见图 6),如果沿该排布方向只有加入相位约束才能得到正确结果,意味着个体位置改变时其内容也要根据相位进行偏移,即不同位置上的个体可能存在很大差异,不便于适应度的预计算。本文采取的平行四边形纹元和排布方向可满足期望的结果。

### 4.2 计算时间比较

表 2 给出了本文算法与 TES 对 windows 纹理(参见图 4)在不同个体数量规模下的计算时间比较。其中本文算法所有参数参见 2.6 节说明, TES 中相关参数均按照该文献所提典型值进行设置。windows 纹理在两种算法下单个个体的尺寸均为 (25,42),达到稳定的平均迭代次数均为 10 次左右。由表可知本文算法能够得到很高的加速比,且随问题规模增大而增加。

表 2 算法时间对比

Table 2 Comparison of time consumption

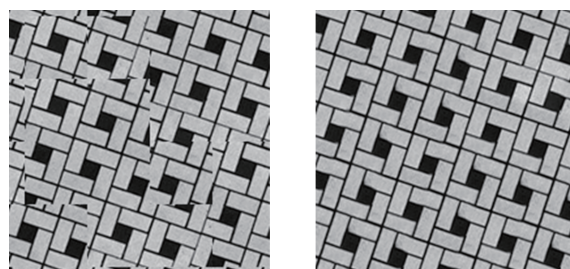
问题规模	本文算法时间 (迭代时间)/s	TES 时间/s	加速比
8 × 8	0.003 7(0.001 1)	0.232 8	62.919
12 × 12	0.004 5(0.002 4)	0.592 4	131.64
20 × 20	0.008 2(0.006 1)	1.917 8	233.88
32 × 32	0.017 1(0.014 8)	5.714 4	334.18

### 4.3 纹理合成结果

图 6 为 tile-floor 纹理的合成方案结果对比,其中图 6(a)(b)分别为 TES 以及本文算法的结果,

两个方案均没有进行变异操作。如 4.1 节所述,图 6(a)中相邻个体无法保证相位的连续,而本文算法基本可以保证合成后相位的连续性。需注意的是,虽然变异操作能够为合成结果提供一定的优化余地,但对于 TES 而言,无法通过此操作从根本上解决由个体排布方案所引起的相位不连续问题。

图 7 给出了其他纹理的合成结果,实验样图来自 PSU NRT 数据库<sup>[17]</sup>。



(a) TES方案 (b) 本文算法

图 6 不同算法的合成结果对比

Fig. 6 Comparison of synthesized results in different algorithms

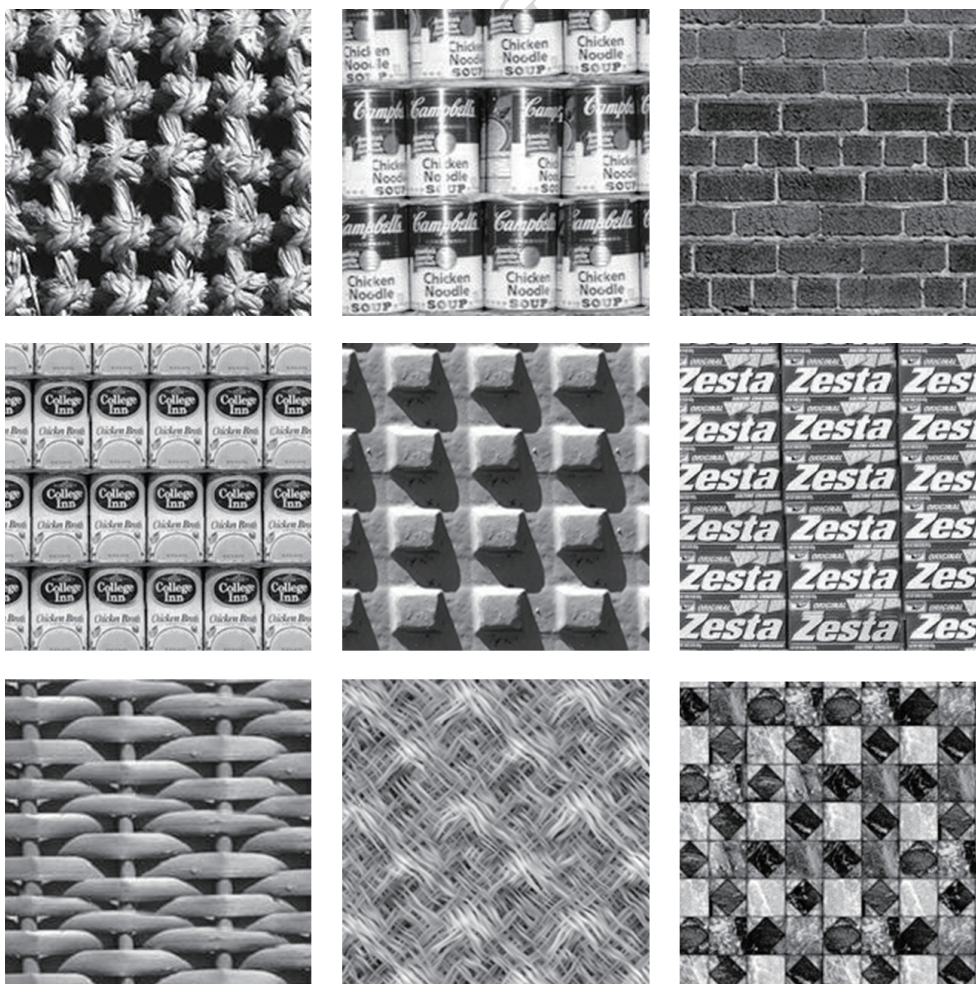


图 7 更多合成结果

Fig. 7 More synthesized results

### 5 结 论

在纹理进化理论上,通过分析其存在的有关问题及环境与个体之间的对偶关系,提出了一个面向近似规则纹理、基于协同进化思想的纹理合成算法。所提算法与 TES 算法相比,重新定义的个体

选取及排布方式能够适用于任意方向周期的纹理,具备了更好的通用性。通过去除迁徙操作、预建立适应度表等方式减轻了适应度计算开销的冗余度。新的进化方式也更适合于并行化的实现。实验结果验证了本文算法的有效性以及在效率方面所带来的显著提升。在周期提取正确的前提下,如何更好地通过修正方式而不是存在一定盲目性的变异操作来

处理因周期呈小数所带来的轻微匹配误差,是今后的一个重要研究方向。

### 参考文献 (References)

- [ 1 ] Liu Y, Lin W, Hays J. Near regular texture analysis and manipulation [ J ]. ACM Transactions on Graphics ( SIGGRAPH 2004 ), 2004, 23(3) : 368-376.
- [ 2 ] Liu Y, Tsin Y, Lin W. The promise and perils of near-regular texture [ J ]. International Journal of Computer Vision, 2005, 62(1-2) : 145-159.
- [ 3 ] Nicoll A, Meseth J, Muller G, et al. Fractional fourier texture masks: Guiding near-regular texture synthesis [ J ]. Computer Graphics Forum, 2005, 24(3) : 569-579.
- [ 4 ] Haindl M, Hatka M. Near-regular texture synthesis [ C ] // Computer Analysis of Images and Patterns, ser. Lecture Notes in Computer Science. Berlin, Germany: Springer, 2009, 5702: 1138-1145.
- [ 5 ] Gui Y, Ma L. Periodic pattern of texture analysis and synthesis based on texels distribution [ J ]. The Visual Computer, 2010, 26(6-8) : 951-964.
- [ 6 ] Recas D L, Hilsman A, Eisert P. Near-regular texture synthesis by random sampling and gap filling [ C ] // Proceedings of Vision, Modeling, and Visualization Workshop. Berlin, Germany: CRC Press, 2011, 10: 89-96.
- [ 7 ] Wu F, Zhang C S, He J R. An evolutionary system for near-regular texture synthesis [ J ]. Pattern Recogn, 2007, 40(8) : 2271-2282.
- [ 8 ] Engelbrecht A P. Computational Intelligence: an Introduction, [ M ]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2010. [ Engelbrecht A P. 计算智能导论 [ M ]. 第2版. 谭莹, 等译. 北京:清华大学出版社, 2010. ]
- [ 9 ] Gong D W, Sun X Y. Theory and Application of Co-evolutionary Genetic Algorithm [ M ]. Beijing: Science Press, 2009. [ 巩敦卫, 孙晓燕. 协同进化遗传算法理论及应用 [ M ]. 北京:科学出版社, 2009. ]
- [ 10 ] Schattschneider D. The plane symmetry groups: their recognition and notation [ J ]. American Mathematical Monthly, 1978, 85(6) : 439-450.
- [ 11 ] Liu Y, Collins R T, Tsin Y. A computational model for periodic pattern perception based on frieze and wallpaper groups [ J ]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2004, 26(3) : 354-371.
- [ 12 ] Hill F S, Kelley S M. Computer Graphics Using OpenGL [ M ]. 3rd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2009. [ Hill F S, Kelley S M. 计算机图形学 (OpenGL 版) [ M ]. 第3版. 胡事民, 等译. 北京:清华大学出版社, 2009. ]
- [ 13 ] Kwatra V, Schodl A, Essa I, et al. A Bobick. Graphcut textures: image and video synthesis using graph cuts [ C ] // Proceedings of Computer Graphics, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH. New York: ACM Press, 2003: 277-286.
- [ 14 ] Efron A A, Freeman W T. Image quilting for texture synthesis and transfer [ C ] // Proceedings of Computer Graphics Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH. New York: ACM Press, 2001: 341-346.
- [ 15 ] Cohen M F, Shade J, Hiller S, et al. Wang tiles for image and texture generation [ C ] // Proceedings of Computer Graphics Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH. New York: ACM Press, 2003: 287-294.
- [ 16 ] Liang L, Liu C, Xu Y, et al. Real-time texture synthesis using patch-based sampling [ J ]. ACM Transactions on Graphics, 2001, 20(3) : 127-150.
- [ 17 ] Liu Y X. PSU Near-regular texture database [ EB/OL ]. (2010-5-11) [ 2012-3-24 ]. <http://vivid.cse.psu.edu/texturedb/gallery/album13page=1>.