

# 一种改进的纹理图像合成算法

谭永前 曾凡菊 岳莉 吴位巍

凯里学院物理与电子工程学院, 贵州 凯里 556011

**摘要** 基于块拼接的纹理图像合成原理,研究了螺旋状搜索路径搜索匹配纹理块以提高纹理图像合成速度。此外,还通过不断增加样本空间的纹理匹配块数量,来提高匹配的质量。通过在纹理块的采样空间、搜索方式、相似度方面展开研究,提出了一种新的纹理图像合成算法。根据输出图像产生的新纹理,把不断合成的输出图像也作为样本空间的一部分,通过不断增加样本空间纹理匹配块数量,来提高纹理块匹配的质量。在样本空间搜索纹理匹配块时,采用螺旋状的方式进行搜索,大大减少了搜索时间,使合成速度得到了很大提高。在判断两个匹配块相似度方面,同时把纹理块的颜色和梯度作为两个匹配块之间是否相似的重要参数。经过实验验证,与传统算法相比,本文算法在提高合成速度的同时也提高了合成质量。

**关键词** 图像处理; 合成质量; 螺旋搜索; 边缘检测

**中图分类号** TP391 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP53.121001

## An Improved Texture Image Synthesis Algorithm

Tan Yongqian Zeng Fanju Yue Li Wu Weiwei

*School of Physics and Electronic Engineering, Kaili University, Kaili, Guizhou 556011, China*

**Abstract** Based on the principle of block splice texture image synthesis, spiral searching path to search matching texture blocks for improving the texture image synthesis speed is studied. In addition, the matching quality is improved, by increasing the number of sample space texture matching blocks. A new texture synthesis algorithm is proposed through a study in sampling space, search methods and similarity of texture block. According to new texture generated by output image, synthesized output images are seen as part of the sample space to enhance the texture blocks probability of matching, by increasing the number of texture matching block in the sample space. The spiral searching manner is used to reduce the search time greatly and improve the synthetic speed. The gradient and color of texture block are taken as the similarity parameters between the two matching blocks, for identifying the similarity degree of two matching blocks. Compared with the traditional algorithms, the proposed algorithm can improve the synthetic speed and synthetic quality with the experimental verification.

**Key words** image processing; synthetic quality; spiral searching; edge detection

**OCIS codes** 100.2960; 110.3000; 110.2960; 110.2970

## 1 引言

基于样图的纹理合成(TSFS)是最近几年发展起来的一种新的纹理合成技术。具有代表性的基于像素点的纹理图像合成算法有 Wei 等<sup>[1]</sup>提出的树形矢量加速算法、Tong 等<sup>[2]</sup>提出的 k-Coherence 搜索算法、Ashikhmin<sup>[3]</sup>提出的自然纹理合成算法以及徐晓刚等<sup>[4]</sup>提出的多种子快速合成算法,这些算法一次只能合成一个像素点,合成速度慢,达不到实时合成的要求。基于纹理块拼接的样图纹理图像合成<sup>[5-7]</sup>,以纹理块为合成单位,一次能合成多个像素点,与基于像素点的纹理图像合成算法相比,合成速度和效果都有了很大的改善<sup>[8-10]</sup>。Efros 等<sup>[5]</sup>提出的 Image Quilting 算法采用最小误差路径实现各块之间的拼接,对各种类型的纹理都能取得较好的合成效果,但算法的纹理块都来自于面积较小的样本纹理,合成效果会带来少量的纹理错

**收稿日期:** 2016-07-15; **收到修改稿日期:** 2016-08-23; **网络出版日期:** 2016-12-06

**基金项目:** 贵州省科技合作计划项目(黔科合 LH 字[2015]7744 号)、国家自然科学基金(11464023)、凯里学院青年课题(Z1123)

**作者简介:** 谭永前(1984—),男,硕士,讲师,主要从事图像处理方面的研究。E-mail: tanyongqian1@163.com

位、重复及不连续等现象。鉴于此, Cohen 等<sup>[11]</sup>提出了基于 Wang tiles 的纹理合成,在一定程度上改善了 Efros 算法的不足。文献[6-9]对 Wang tiles 纹理合成算法进行了改进,取得了不错的效果,但由于 Wang tiles 算法采用 4 个菱形纹理块来制作 Wang tiles 集合,导致样本空间中样本图的边角部分信息完全没有得到利用,同时 4 个随机菱形的中间连接部分会出现明显的接缝,使合成结果受到一定的影响。在纹理图像块的搜索方式方面,王相海等<sup>[12]</sup>采用优化算法来搜索纹理块,在搜索纹理块的质量方面取得了一定的效果,但采用优化算法容易陷入局部最优解,导致搜索时间较长,不利于纹理的合成。

在总结了传统算法的成功和不足之处后,本文根据 Efros 算法<sup>[5]</sup>采用一定重叠区域来合成新块的原理,把新合成的块也视为输入样本,以此来增加样本空间;同时还考虑到结构性比较强的纹理图像合成,把反映图像结构信息的梯度值加入到纹理块的相似性度量中去。另外,为了提高合成速度和减少搜索时间,在搜索匹配块时,采用螺旋状搜索的方式进行。改进算法在保证纹理合成质量的同时也提高了纹理合成速度,对多种纹理都取得了较好的合成效果,特别是结构性纹理。

## 2 基于颜色和梯度的纹理合成

### 2.1 梯度结构信息的获取

针对结构性比较强的纹理图像,把纹理图像的梯度值加入到后续纹理块的匹配当中<sup>[13]</sup>,在计算梯度时采用对边缘定位比较准确的 Sobel 算子, Sobel 算子包含两组  $3 \times 3$  的矩阵,实际使用中常用如下两个模板检测图像边缘信息<sup>[14]</sup>,分别为检测水平边沿的横向模板  $S_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ ,以及检测垂直边沿的纵向模板

$$S_y = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}, \text{采用横向模板和纵向模板与纹理图像作平面卷积得 } G_x = S_x * P(x, y) =$$

$$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} * P(x, y), G_y = S_y * P(x, y) = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} * P(x, y), \text{就可得出纹理图像在横、纵两}$$

个方向上像素亮度差分的近似值。

纹理图像的每一个像素的梯度大小为

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}, \quad (1)$$

在实际的使用过程中,为了提高效率常使用不开平方的近似值,即:

$$|G| = |G_x| + |G_y|. \quad (2)$$

初始图像的像素  $P(x, y)$  分布如图 1 所示。

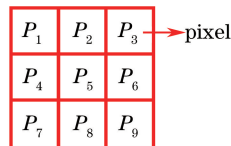


图 1 图像像素点分布

Fig. 1 Image pixel distribution

使用(2)式与图 1 进行平面卷积,其计算的结果为

$$|G| = |(P_1 + 2 \times P_2 + P_3) - (P_7 + 2 \times P_8 + P_9)| + |(P_3 + 2 \times P_6 + P_9) - (P_1 + 2 \times P_4 + P_7)|. \quad (3)$$

对图 1 的最后一行和最后一列进行梯度值计算时,为了防止溢出,采取用前一行和前一列的梯度值来代替最后一行和最后一列的梯度值。

### 2.2 加入颜色和梯度的度量方法

重叠区域的梯度为

$$M_{\text{Grad}} = G_A [P_A(x, y)] - G_B [P_B(x, y)], \quad (4)$$

式中  $G_A$ 、 $G_B$  分别表示  $A$ 、 $B$  块重叠区域用 Sobel 梯度算子计算后得到的梯度, 计算两块纹理块之间的相似程度为

$$C_{\text{cost}} = \alpha \times \|M_{\text{Color}}\| + \beta \times \|M_{\text{Grad}}\|, \quad (5)$$

式中  $M_{\text{Color}}$  表示两个形状相同的邻域  $(N_1, N_2)$  纹理块的颜色相似程度, 定义为  $d(N_1, N_2) = \sum_{p \in N_1, q \in N_2} \text{sqr}t\{ [R(p) - R(q)]^2 + [G(p) - G(q)]^2 + [B(p) - B(q)]^2 \}$ , 其中函数  $R(\cdot)$ 、 $G(\cdot)$ 、 $B(\cdot)$  表示三基色的像素值<sup>[15]</sup>。  $M_{\text{Grad}}$  表示梯度信息的相似性程度,  $C_{\text{cost}}$  值越小表示两块纹理图像块的相似程度越高, 反之亦然。  $\alpha$  和  $\beta$  为调试时对颜色和梯度结构相似性程度的控制权重<sup>[16]</sup>, 根据多次实验验证, 在  $\alpha = 0.7$ ,  $\beta = 0.3$  时, 合成结果较为满意, 纹理合成效果对比如图 2 所示。

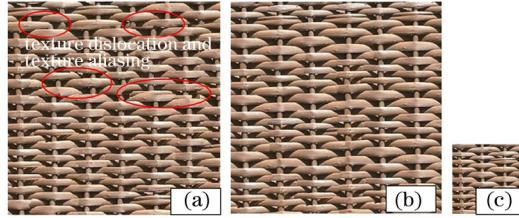


图 2 纹理合成效果对比图。(a)仅加入颜色相似程度;(b)加入颜色相似程度和梯度值;(c)输入样本

Fig. 2 Comparison chart of texture synthetic effect. (a) Joining color similarity; (b) joining color similarity and gradient value; (c) input sample

图 2(a)为未加入梯度值时的合成效果,图 2(b)为加入梯度值后的合成效果。由图 2(a)可以看出红色线框内发生了纹理走样或纹理错位。图 2(b)中没有出现图 2(a)中的纹理走样或纹理错位。实验证明加入纹理图像的梯度信息,可以得到更理想的合成效果,在对结构信息较强的纹理图像进行合成时,效果尤为明显。图 2(c)为输入样本图像,因具有较强的梯度而被认为具有较强的结构性。所以,在判断纹理块的相似性程度时,加入纹理图像的梯度信息有助于提高纹理图像的合成质量。

## 3 本文算法

### 3.1 增加样本空间

Image Quilting 算法<sup>[5]</sup>采用两个纹理块重叠并在重叠区域寻找一条最小误差路径(MEBC)的方法来缝合  $B_1$ 、 $B_2$ , 图 3(a)黑色线框内弯曲的细实线为最小误差路径,  $B_1$ 、 $B_2$  将沿着这条最小误差路径进行拼接, 拼接的效果如图 3(b)所示。在完成拼接后的纹理图像中, 由于  $B_1$ 、 $B_2$  两块的重叠和缝合, 产生了不同于  $B_1$ 、 $B_2$  新纹理块, 如图 3(b)黑色线框中所示, 黑色线框内是两个纹理图像块的重叠区域, 在这个重叠区域已经产生了新纹理块。基于此, 把不断输出的已合成图像块作为输入样本图像块的一部分, 按照扫描线顺序放到样本空间后面, 依次放入样本空间中以增加样本块的数量最终提高匹配质量。图 4(a)为样本空间, 红色线框为样本空间原有的纹理块, 蓝色填充块是从输出图像补充到样本空间的纹理块。图 4(b)为输出图像, 蓝色填充块为即将输入到样本空间的当前已合成纹理块。

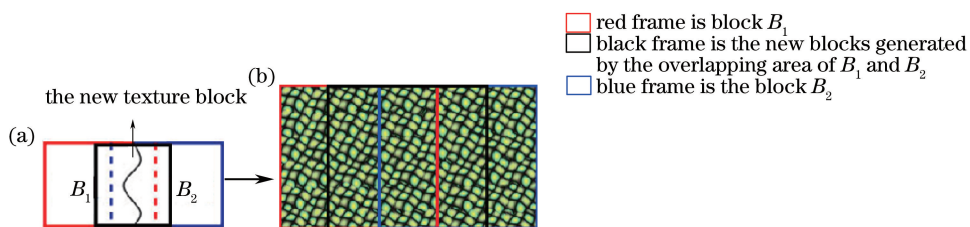


图 3 重叠产生的新纹理块

Fig. 3 New texture block generated by overlapping

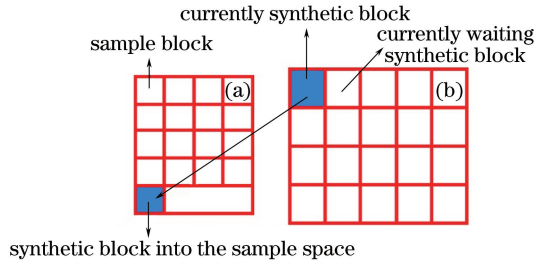


图4 输出图像输入到样本空间。(a)样本空间;(b)输出图像

Fig. 4 Output image entering the sample space. (a) Sample space; (b) output image

### 3.2 螺旋状搜索纹理方法

传统搜索纹理块都是按照扫描线的顺序进行搜索,尽管能保证对样本空间进行穷尽搜索,但搜索时间较长。所提出的螺旋状搜索纹理块法借鉴了螺旋状搜索像素点的思想<sup>[4]</sup>,根据纹理具有一定的连贯性以及统计的原理,当前待合成块位于已合成块周围的概率更大。所以,该算法在搜索纹理匹配块的同时,在前一块已合成纹理块的样本空间位置周围进行搜索,如图5所示。采用螺旋状搜索不仅节约了搜索时间,而且保证了纹理的连贯性。

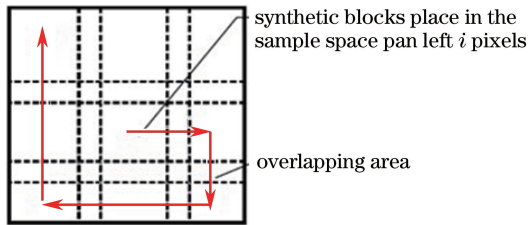


图5 螺旋状搜索

Fig. 5 Spiral Searching

当输出纹理块输入到样本空间后,为了避免在样本空间中搜索到重复的样本块,在搜索匹配纹理块时,确定已合成的纹理块在样本图像中的位置,以该位置向左平移  $i$  个像素点后为搜索起点 ( $i$  小于重叠区域行标),然后再沿螺旋状方向进行匹配纹理块的搜索,如图6所示。

螺旋状搜索起点按当前待合成纹理块在输出图像中位置的不同分为以下3种情况:

- 1) 当前待合成块位于图像最上方时,如图6中A块的位置,以A块的前一块在样图中的位置向左平移  $i$  个像素点后为起点按螺旋状搜索;
- 2) 当前待合成块位于图像最左边时,如图6中B块的位置,以B块所在行的前一行的第一块在样图中的位置向左平移  $i$  个像素点后为起点按螺旋状搜索;
- 3) 当前待合成块位于其他位置时,如图6中C块的位置,以C块的前一块在样图中的位置向左平移  $i$  个像素点后为起点按螺旋状搜索。

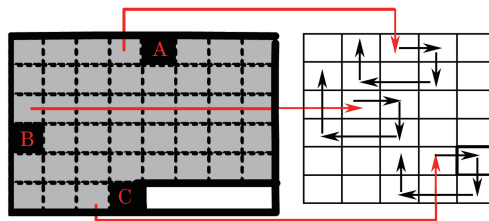


图6 螺旋状搜索起始点。(a)输出图像;(b)样本空间

Fig. 6 Starting point of spiral searching. (a) Output image; (b) sample space

$S$  表示候选块的集合,  $s_i$  表示第  $i$  个正方形纹理块。表示为

$$S = \{s_1, s_2, s_3, \dots, s_n\}。 \quad (6)$$

- 1) 当起点块处于样本空间的4个拐角处,样本空间如图7所示,如A块位置时, $S$ 为

$$S = \{s_1, s_2, s_3\}, \quad (7)$$

这时样本空间有 3 块可以选择。

2) 当起点处于样本空间的最上边、最下边、最左边、最右边时,如图 7 中的 B 块位置时,S 为

$$S = \{s_1, s_2, s_3, s_4, s_5\}, \quad (8)$$

这时样本空间有 5 块可以选择。

3) 当起始点处于样本空间的其他位置时,如图 7 的 C 块位置时,S 为

$$S = \{s_1, s_2, s_3, s_4, s_5, s_6, s_7, s_8\}, \quad (9)$$

此时样本空间有 8 块可以选择。

A	1		1	B	5			3	A
3	2		2	3	4			2	1
1	2		8	1	2			2	1
B	3		7	C	3			3	B
5	4		6	5	4			4	5
1	2		2	3	4			2	1
A	3		1	B	5			3	A

图 7 样本分布

Fig. 7 Sample distribution

同时,为了尽可能地搜索到最佳匹配块,获得最佳的合成效果,本文算法在样本空间搜索最佳的样本纹理匹配块时将使用以下两种方案:1) 向左平移  $i$  个像素点之后,按图 6 中的方式搜索,用(4)式计算误差,从集合  $S$  中选择误差值最小的块作为匹配块,利用最小误差路径<sup>[5]</sup>拼接到合成图像中;2) 当按图 6 中的方式搜索不到满足误差条件的最佳匹配块时,将采取按扫描线顺序的搜索方式在样本空间中进行搜索。

### 3.3 合成算法流程

算法合成基本步骤如下,其中  $B_1$  代表当前已合成块, $B_2$  代表当前待合成块。

- 1) 计算样本图中纹理块的梯度结构信息;
- 2) 设定纹理块的参数,如:宽、高、阈值、重叠区域像素、移位像素等;
- 3) 在样图空间中任取一块  $B_1$ ,放在输出图像中;
- 4) 确定  $B_2$  的位置(此时  $B_1 = B_2$ );
- 5) 确定  $B_2$  的前一块在样本空间的位置,向左平移  $i$  个像素点后,以此作为螺旋线搜索的起点;
- 6) 利用(4)式计算误差,从集合  $S$  中选择误差值最小的块用 MEBC 拼接到输出图像中;
- 7) 在搜索匹配块过程中按照上文要求的两种方案进行搜索;
- 8) 按照扫描线顺序继续执行 4)~7),直到获得要求尺寸的纹理输出图。

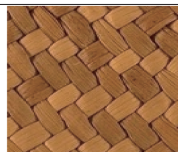
### 3.4 实验结果分析

实验均在 PC 机[Pentium(R) Dual-Core CPU 3.06 GHz, 2.00 GB 内存]上用 Matlab2013 软件编程实现,输入如表 1 中的样本纹理图像,合成效果对比如图 8 所示。

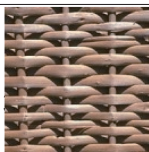
表 1 输入样本图

Table 1 Input sample image

Strawmat



Ropenet



Chains



图 8(a)为 Efros 等<sup>[5]</sup>提出的 Image Quilting 算法的合成效果,该算法采用颜色相似度衡量两纹理块相似程度,采取扫描线顺序的方式搜索纹理块。从该算法合成效果看出,合成结果中存在纹理走样和错位的情形,且合成时间较长。图 8(b)为文献[8]合成效果,该算法采用菱形纹理块制作 Wang tiles 集合,较文献[5]

取得了较为理想的合成效果,合成时间也相对减少,但仍然存在少量的纹理错位和走样情形。图 8(c)为改进后的算法合成效果,采用颜色相似度和梯度值相结合的度量方式,把输出图像作为样本空间的样本图像后,增加了样本图像的数量,同时也提高了候选块的质量,对结构性纹理取得较为理想的合成效果,同时采用螺旋线搜索的方式搜索纹理块,减少了搜索时间。

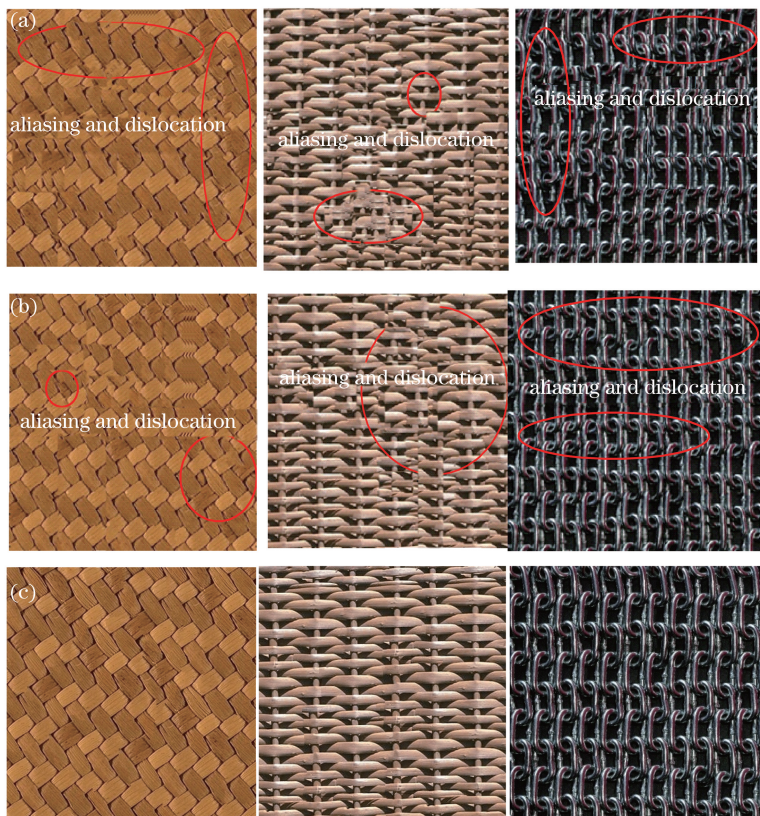


图 8 合成效果对比图。(a)文献[5]效果;(b)文献[8]效果;(c)改进算法的效果

Fig. 8 Synthetic effect comparison chart. (a) Ref. [5] synthetic effect; (b) Ref. [8] synthetic effect; (c) synthetic effect of improved algorithm

为减少误差和得到相对准确的数据,在不同算法对图 8(a)~(c)处理中,每种算法各进行了 5 次实验,并对表 1 中的输入样本图像求 5 次的平均。实验分别采用两种不同的样本尺寸对其合成结果进行统计分析: 1) 样本大小为  $128 \text{ pixel} \times 128 \text{ pixel}$  时,纹理块大小为  $64 \text{ pixel} \times 64 \text{ pixel}$ 、重叠区域为  $9 \text{ pixel}$ 、输出图像为  $330 \text{ pixel} \times 330 \text{ pixel}$ ; 2) 样本大小为  $64 \text{ pixel} \times 64 \text{ pixel}$  时,纹理块大小为  $36 \text{ pixel} \times 36 \text{ pixel}$ 、重叠区域为  $6 \text{ pixel}$ 、输出图像为  $220 \text{ pixel} \times 220 \text{ pixel}$ 。不同算法合成时间对比如表 2 所示。

表 2 改进后算法与传统算法合成时间比较

Table 2 Comparison of the synthetic time between the improved algorithm and the traditional algorithm

Sample size / (pixel×pixel)	Synthesis time /s		
	Ref. [5] algorithm	Ref. [8] algorithm	Improved algorithm
128×128	32.44	25.34	18.35
128×128	30.58	23.47	19.58
128×128	29.57	28.45	20.23
128×128	30.23	24.76	16.59
128×128	33.35	2.45	17.46
64×64	24.32	18.54	11.64
64×64	24.47	17.74	10.98
64×64	22.37	19.56	9.73

图像的梯度值表现为图像灰度值发生显著变化的地方,当图像中存在边缘时,在边缘地方有较大的梯度

值,相反,当图像中有比较平滑的部分时,灰度值变化较小,则相应的梯度也较小,所以图像梯度值的大小在很大程度上体现了图像的结构性。通过表 2 的实验数据对比可知,采用螺旋状搜索后,改进后的算法比传统算法更快,虽然把输出图像输入到样本空间占用了一定的时间,但相对传统算法,改进后的算法仍有较大的优势,合成时间较传统算法少,合成效率更高。

## 4 结 论

基于块拼接的纹理图像合成原理,研究了螺旋状搜索路径搜索匹配纹理块、纹理图像的梯度信息以及把输出图像作为样本空间的一部分对提高纹理图像的合成质量、合成时间的影响。实验结果表明:1) 由于梯度信息反映了结构性纹理的结构特点,在纹理块进行匹配块的相似性判断时,加入梯度信息,对改善纹理图像的合成质量起到了很好的作用;2) 有限的样本图空间制约了最佳候选纹理块的选取,把输出图像作为样本图空间的一部分,增加了样本空间的样本数量,提高了获取最佳候选块的概率,有助于改善合成质量;3) 采用螺旋线状搜索方式搜索纹理块,相当于直接在前一块已合成块的周围搜索匹配纹理块,节约了搜索时间,提高了纹理图像最终的合成时间。

## 参 考 文 献

- 1 Wei L Y, Levoy M. Texture synthesis over arbitrary manifold surfaces[C]. Proceedings of the 28th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. ACM, 2001: 355-360.
- 2 Tong X, Zhang J, Liu L, *et al.* Synthesis of bidirectional texture functions on arbitrary surfaces[C]. Proceedings of the 29th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, 2002: 665-672.
- 3 Ashikhmin M. Synthesizing natural texture[C]. ACM Symposium on Interactive 3D Graphics, NC, 2001: 217-226.
- 4 Xu Xiaogang, Yu Jinhui, Ma Lizhuang. Fast texture synthesis using multiple seeds as constraints[J]. Journal of Image and Graphics, 2002, 7(10): 994-999.  
徐晓刚, 于金辉, 马利庄. 多种子快速纹理合成[J]. 中国图象图形学报, 2002, 7(10): 994-999.
- 5 Efros A A, Freeman W T. Image quilting for texture synthesis and transfer [C]. Proceedings of the 28th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, 2001: 341-346.
- 6 Xue Feng, Cheng Cheng, Jiang Julang. Wang Tile-based improved texture synthesis [J]. Journal of Computer Applications, 2010, 30(8): 2098-2100.  
薛 峰, 成 诚, 江巨浪. 基于 Wang Tile 的改进纹理合成算法[J]. 计算机应用, 2010, 30(8): 2098-2100.
- 7 Liu Ji, Zhu Qingsheng, Zeng Lingqiu, *et al.* PSO based Wang Tiles texture synthesis[J]. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(30): 159-162.  
刘 骥, 朱庆生, 曾令秋, 等. 基于 PSO 的 Wang Tile 纹理合成[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(30): 159-162.
- 8 Wang Jidong, Pang Mingyong, Zhao Ruibin. Texture synthesis using rotational Wang Tiles [J]. Journal of Image and Graphics, 2013, 18(1): 49-54.  
王继东, 庞明勇, 赵瑞斌. 旋转的 Wang Tiles 纹理合成[J]. 中国图象图形学报, 2013, 18(1): 49-54.
- 9 Zu Y R, Duan H C. Texture synthesis using diagonal quilting Wang Tiles [C]. Proceedings of the 2013 Ninth International Conference on Computational Intelligence and Security, 2013: 836-840.
- 10 Zhang Weiwei, He Kai, Meng Chunzhi. Texture synthesis method by adaptive selecting size of patches[J]. Computer Engineering and Applications, 2012, 48(17): 170 -173.  
张伟伟, 何 凯, 孟春芝. 自适应选取样本块大小的纹理合成方法[J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(17): 170-173.
- 11 Cohen M F, Shade J, Hiller S, *et al.* Wang Tiles for image and texture generation[C]. ACM Transactions on Graphics, 2003, 22(3): 287-294.
- 12 Wang Xianghai, Tao Jingzhe, Song Chuanming. Task scheduling for regular patch-based texture synthesis in the parallel wavefront pattern[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2013, 25(2): 248-257.  
王相海, 陶兢喆, 宋传鸣. 并行波峰模式的规则块拼接纹理合成调度[J]. 计算机辅助设计图形学学报, 2013, 25(2): 248-257.
- 13 Hui Xiaowei, Chang Zhengying, Lin Sen, *et al.* Image edge extraction combined with predator-Prey-AACO algorithm [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(5): 051001.

- 惠晓威, 常正英, 林 森, 等. 结合 Predator-Prey-AACO 的图像边缘检测算法[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(5): 051001.
- 14 Liu Dali, Wang Yun, Qiu Lirong. Differential confocal microscopy for edge contour detection and location[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(10): 1008001.  
刘大礼, 王 允, 邱丽荣. 差动共焦显微边缘轮廓检测与定位方法[J]. 中国激光, 2014, 41(10): 1008001.
- 15 Zhang Chuang, Wang Tingting, Sun Dongjiao, *et al.* Image edge detection based on the Euclidean distance graph[J]. Journal of Image and Graphics, 2013, 18(2): 176-183.  
张 闯, 王婷婷, 孙冬娇, 等. 基于欧氏距离图的图像边缘检测[J]. 中国图象图形学报, 2013, 18(2): 176-183.
- 16 Zhang Lijuan, Yang Jinhua, Jiang Yutong. Research on target image matching algorithm for binocular CCD ranging[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(9): 091002.  
张丽娟, 杨进华, 姜雨彤. 基于双目 CCD 测距的目标图像匹配算法研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(9): 091002.