

基于梯度的块尺寸自适应 Wang Tiles 纹理合成算法

谭永前, 曾凡菊

凯里学院物理与电子工程学院, 贵州 凯里 556011

摘要 基于 Wang Tiles 纹理合成算法原理, 研究纹理图像梯度结构信息、纹理块自适应尺寸以及 Tiles 集合制作方法对纹理合成质量及合成时间的影响。在判断两纹理块相似程度时, 将纹理块的颜色误差和梯度信息同时作为纹理块相似程度的度量标准, 其合成效果优于只考虑颜色误差的传统纹理合成算法。同时, 使用优化后的纹理块尺寸进行纹理合成, 能缩短纹理合成时间。另外, 采用改进后的 Tiles 集合能取得比传统方法更好的合成效果。实验证明, 与基于 Wang Tiles 的传统算法相比, 改进算法在取得较好合成质量的同时, 能提高纹理合成的速度。

关键词 图像处理; 纹理合成; Wang Tiles; 纹理块尺寸; 梯度结构信息

中图分类号 TP391.41 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP54.051001

Gradient-Based Wang Tiles Texture Synthesis Algorithm with Adaptive Block Size

Tan Yongqian, Zeng Fanju

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

Abstract Based on the Wang Tiles texture synthesis algorithm, the effects of texture gradient structure information, texture blocks with adaptive size, and Tile set generation method on the texture synthesis quality and time are studied. The color error and gradient information of the texture blocks are both used as the standard to measure the similarity of two blocks in the texture synthesis algorithm. It is better than the traditional texture synthesis algorithm, which only considers the color error to determine the similarity of two texture blocks. Meanwhile, using the optimized block size for texture synthesis, the texture synthesis time is reduced. In addition, using the improved Tile set to achieve texture synthesis, we can achieve better results than those of the traditional methods. Experimental results show that this algorithm can improve both the quality and the speed of texture synthesis, compared with the traditional Wang Tile-based algorithm.

Key words image processing; texture synthesis; Wang Tiles; size of texture block; gradient structure information

OCIS codes 100.2960; 110.2970; 110.3000

1 引言

基于样图的纹理合成技术是通过在有限的样本空间里选取一个小纹理样图来生成与原样本视觉效果保持一致的大面积纹理的过程, 即保持原纹理样本图像的连续性和相似性。基于 Wang Tiles 的纹理合成算法是近年来提出的块拼接算法的代表, 该算法因其合成速度快、质量高而受到众多研究者的关注。2003 年, Cohen 等^[1]首次提出了 Wang Tiles 纹理合成算法, 它与以往传统纹理合成算法的区别在于, 它把纹理合成分为 Tiles 纹理块制作和纹理块合成两个部分, 这为之后的纹理合成技术找到了一条新思路, 但 Wang Tiles 纹理合成算法在进行内部菱形拼接时存在接缝问题。此后, 有很多基于 Wang Tiles 的纹理合成算法被相继提出, 例如, 2005 年, Ng 等^[2]在 Wang Tiles 纹理合成算法的基础上提出了 ω -Tile 算法, 该算法为了避免在 ω -Tile 中心位置出现明显的接缝痕迹, 采用 Kwatra 等^[3]的 Graphcut 算法来寻找最佳拼接路径, 但计算繁

收稿日期: 2016-11-11; 收到修改稿日期: 2017-01-04

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, 主要从事图形图像处理方面的研究。E-mail: tanyongqian1@163.com

琐,耗时较多,不利于实时合成。2007年,Xue等^[4]提出了一种使用 s-Tile 实时合成纹理的算法,该算法合成效果较为理想,但对 s-Tile 的尺寸和数量等要求过于严格。2010年,刘骥等^[5]把智能优化算法引入到纹理块搜索过程中,提出了基于 PSO 的 Wang Tiles 纹理合成算法,该算法在解决 Tiles 中心处的接缝问题上具有较好的效果,但使用 PSO 算法容易出现局部最优解问题,最终使纹理合成过程耗时较多。2013年,王继东等^[6]提出了旋转的 Wang Tiles 纹理合成算法,该算法不再采用之前改进算法^[2-5]中的菱形纹理块来制作 Tiles,而是采用正方形纹理块来构造 Tiles,提高了样本纹理块的利用率,同时也避免了 Tiles 拐角不匹配的问题,提高了 Tiles 的中心接缝效果,进而提高了纹理的合成质量。Zu等^[7]为了进一步提高 Tiles 的质量,改进最佳拼接路径公式,提出了基于对角线拼接的纹理合成算法。

以上算法均以 Wang Tiles 算法为研究基础,通过各种改进提高 Tiles 的质量,最终改善合成结果,这类算法一般都能取得较为理想的纹理合成效果,但对于结构性信息较强的结构性纹理,合成结果却不理想,仍然有改进的空间。本文在总结分析了传统 Wang Tiles 算法的优点和不足后,通过对结构性纹理的特征、纹理块尺寸和纹理样图梯度结构信息对纹理合成质量和时间的影响进行研究,把纹理图像的梯度信息融合到纹理合成的过程中,通过改进纹理块搜索匹配公式和优化纹理块尺寸,提出基于梯度的块尺寸自适应 Wang Tiles 纹理合成算法(简称 GAW-Tiles 算法)。该算法能更大程度地保证了纹理图像纹元结构的完整性,提高了合成纹理的视觉效果,对结构性纹理能取得更高的合成质量,同时对纹理块尺寸进行优化,节约了合成时间。

2 Wang Tiles 纹理合成算法

2.1 算法基本原理

Wang^[8]首先提出了 Wang Tiles 的思想,其基本原理是:一个 Wang Tiles 由若干个大小相等的正方形块拼接组成,如图 1(a)所示,正方形的四边用颜色标明,将正方形块拼接成一个平面,如图 1(b)所示,要求任意相邻两个正方形相邻的两条边颜色相同。2003年,Cohen等^[1]基于 Wang Tiles 的算法并结合 Efros等^[9]的 Image Quilting 算法拼接原理,提出了 Wang Tiles 纹理合成算法。

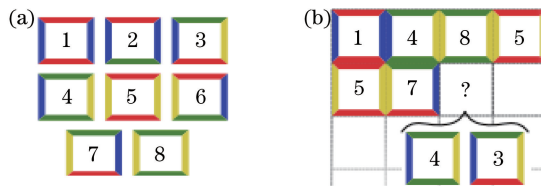


图 1 Wang Tiles 算法。(a) 8 个正方形块;(b) 拼接平面

Fig. 1 Wang Til algorithm. (a) Eight square blocks; (b) quilted plane

2.2 算法分析

基于 Wang Tiles 的纹理合成算法对大多数纹理图像取得了较好的合成效果,但对于结构信息较为丰富的结构性纹理取得的效果并不理想,主要有以下几个原因:

1) 图 2 所示为由 4 个菱形纹理块按照最小误差路径随机拼接实现的 Wang Tiles 效果图,4 条最小误差路径汇集于 Tile 的中心位置[图 2(b)],4 个菱形块的颜色不能完全匹配,导致由 Tiles 集合纹理块拼接的纹理图像有较明显的拼接痕迹,无法取得较好的视觉效果。

2) 纹理块的尺寸对纹理合成的质量至关重要,传统的 Wang Tiles 纹理合成算法无法很好地确定纹理块尺寸,只能依靠不断改变纹理块尺寸进行多次合成对比,才能确定最后的合成结果,消耗的合成时间长,不利于实时合成。

3) 传统纹理合成算法在进行纹理块拼接时使用文献[9]算法拼接,仅考虑了纹理图像的颜色误差特征,没有考虑纹理块自身纹元的结构信息特征,使得合成结果中存在纹理结构不连续的现象。

3 基于梯度的纹理合成算法

3.1 基于梯度的纹理合成

传统纹理合成算法通常都采用纹理图像的颜色误差来衡量纹理块的相似程度^[10],这种方式对随机性纹

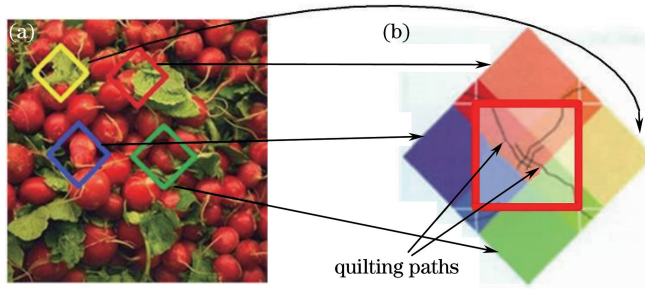


图 2 (a)原图像;(b)随机选取菱形块拼接 Wang Tiles 效果图

Fig. 2 (a) Original image; (b) Wang Tile obtained from diamond blocks that are randomly selected

理、半随机性纹理和结构性不强的纹理图像能取得较为理想的匹配效果,但对结构信息特征较为突出的纹理图像往往无法获得满意的匹配效果^[11]。本文把反映纹理图像结构信息特征的梯度值作为衡量纹理块相似程度的标准之一,构成基于梯度和颜色误差的度量公式。

1) 定义 G 为通过 Sobel 算子计算得到的横向及纵向近似梯度值,可表示为

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

式中 G_x 及 G_y 分别表示经横向及纵向边缘检测的梯度^[12-13],可表示为

$$\begin{cases} G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & +1 \\ -2 & 0 & +2 \\ -1 & 0 & +1 \end{bmatrix} * A \\ G_y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ +1 & +2 & +1 \end{bmatrix} * A \end{cases}, \quad (2)$$

式中 A 表示原始图像。定义 M_{grad} 表示梯度特征信息值的误差,可表示为

$$M_{grad} = G_A - G_B, \quad (3)$$

式中 G_A 表示当前已合成纹理块的梯度值, G_B 表示匹配块的梯度值。在实际的图像处理过程中,为了节省系统资源并提高效率,常常使用 $|G| = |G_x| + |G_y|$ 。 M_{grad} 值越小表示当前已合成纹理块梯度值与匹配块梯度值越接近,反之梯度值相差越大。

2) 定义 M_{color} 为两纹理块在相同邻域(N_1, N_2)的颜色误差,可表示为

$$M_{color} = \sum_{\substack{p \in N_1, q \in N_2 \\ p, q \\ \text{corresponding}}} \sqrt{[R(p) - R(q)]^2 + [G(p) - G(q)]^2 + [B(p) - B(q)]^2}, \quad (4)$$

式中函数 R, G, B 表示纹理图像块三基色的值, M_{color} 值越小,表示两纹理块的颜色误差越小,相似程度越高,反之,颜色误差越大,相似程度越低。

3) 定义 C 为判断阈值,可表示为

$$C = \alpha \times \|M_{color}\| + \beta \times \|M_{grad}\|. \quad (5)$$

用(5)式来构造基于梯度和颜色误差的度量公式, C 值越小表示两纹理块在颜色误差和梯度信息方面越接近,两纹理块的相似程度越高,反之相似程度越低。 α, β 为经验值,用以调节 C 中颜色误差和梯度信息所占的比例,根据多次实验验证,对于结构性纹理图像,当 α 取值为 0.6, β 取值为 0.4 时,能取得较好的合成效果。

图 3(a)为采用传统纹理合成算法(即只考虑颜色误差作为度量标准时)对样本空间搜索匹配块的合成结果,由红色线框中可以看出有纹理块错位、纹理块边界匹配不平滑等现象出现。图 3(b)为采用基于梯度和颜色误差的度量公式来搜索匹配纹理块的合成结果,从合成图中可以看出,没有出现明显的纹理块错位和纹理块边界匹配不平滑等现象。实验表明,采用基于梯度和颜色误差搜索得到的匹配块比采用传统纹理合成算法搜索得到的匹配块更优,更适合与当前已合成块进行拼接,达到更好的视觉效果。

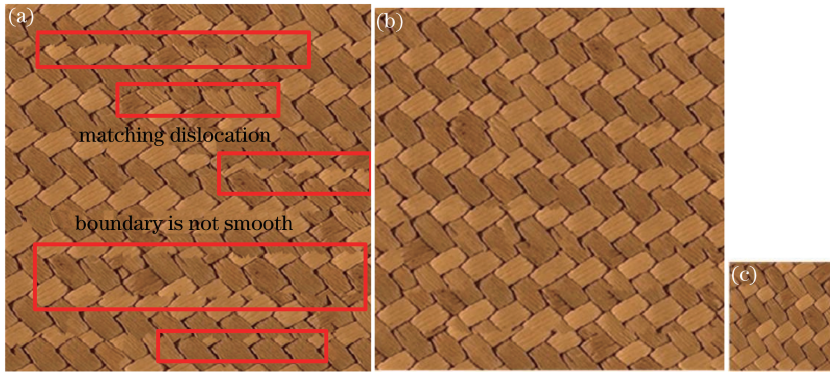


图3 合成效果对比。(a)基于颜色误差的合成结果;(b)基于梯度和颜色误差的合成结果;(c)输入样本图
Fig. 3 Synthesis effect comparison. (a) Synthesis result based on color errors; (b) synthesis result based on color errors and gradient; (c) input sample image

3.2 纹理块尺寸优化

在纹理合成过程中,纹理块尺寸的选择关系到纹理合成质量的好坏。纹理块尺寸越小,可选择的样本匹配块数量越多,合成的边界平滑程度越高,但会导致纹理图像的取样不完整,破坏了纹理图像原本的结构特性;反之,可以完整地保持原样本纹理的结构信息特性,但可选择的样本匹配块数量较少,合成时纹理块被重复选择的概率较大,同样影响合成纹理的质量和视觉效果。

因此,如何选择纹理块的尺寸大小是纹理合成的关键,在制作 Tiles 集合时,首先计算不同样本纹理图像的最优尺寸 K ,然后根据 K 的大小确定纹理合成时纹理块的尺寸大小,纹理块的所有边长均以像素为单位计算。

通过提取纹理图像的相关性特征值 F 来获取纹理图像的最优尺寸,纹理图像的相关性特征值 F 可表示为

$$F = \left[\sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L (i * j) P(i, j) - u_x u_y \right] / (\sigma_x \sigma_y), \quad (6)$$

式中 $P(i, j)$ 为灰度共生矩阵中的元素^[14-15], u_x 和 u_y 分别为 $P_x(i)$ 和 $P_y(j)$ 的均值^[16], σ_x 和 σ_y 分别为 $P_x(i)$ 和 $P_y(j)$ 的标准差^[17],可表示为

$$\begin{cases} P_x(i) = \sum_{j=1}^L P(i, j) \\ P_y(j) = \sum_{i=1}^L P(i, j) \end{cases} \quad (7)$$

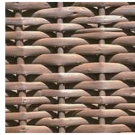



在获得纹理图像的相关性特征值 F 之后,对 50 幅纹理图像进行纹理合成,并对取得最佳合成效果时的尺寸进行统计,发现 90% 以上的纹理图像相关性特征值 F 与最优尺寸 K 之间存在线性函数关系,可表示为

$$K = 9 \exp(1/F). \quad (8)$$

因此,可通过(8)式计算最优尺寸值 K 。不同纹理图像的最优尺寸计算结果如表 1 所示。

表 1 结构性纹理最优尺寸统计结果

Table 1 Statistical results of optimized size for structural texture

	Texture sample			
Related parameter				
F	0.5098	0.5581	0.5271	0.7213
K	64	54	60	44

3.3 Wang Tiles 制作方法改进

采用正方形纹理块合成制作 Wang Tiles,如图 4(a)所示,这不仅符合传统 Wang Tiles 的定义,而且拼接之后还能保持 4 个纹理块具有较好的纹理结构,这种制作方法可以分为 Wang Tiles 框架的制作过程和

Tiles 集合的生成过程。

Wang Tiles 框架的制作过程如下：

- 1) 通过(6)式和(8)式计算相应结构性样本纹理图像的相关性特征值 F 和最优尺寸 K ；
- 2) 从样本空间中随机选取边长为 $K+1$ 的正方形纹理块,作为当前已合成块；
- 3) 根据(5)式在样本空间搜索第二块匹配纹理块,大小与第一块相同并采用 Image Quilting 方法拼接纹理块；
- 4) 重复第 3)步继续搜索拼接第 3、4 块纹理块,拼接结果如图 4(b)所示,图中的数字表示拼接纹理块的顺序；
- 5) 重复第 2)~4)步得到 Wang Tiles 框架集合。

Tiles 集合的生成过程如下：

- 1) 根据 K 值从 Wang Tiles 框架集合中选取一个 Wang Tiles 框架并从中心截取尺寸大小为 $K \times K$ 的正方形纹理块,如图 4(b)中心黑色线框所示；
- 2) 重复第 1)步,把尺寸大小为 $K \times K$ 的纹理块组成 Tiles 集合。

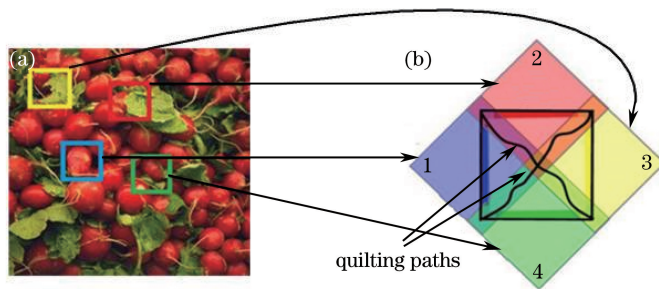


图 4 改进后的 Wang Tiles 效果图

Fig. 4 Effect chart of improved Wang Tiles

图 2(b)所示的是随机从样本空间中选择 4 块纹理块来进行拼接,导致 4 个纹理块之间的纹理结构不能很好地匹配,影响后续 Tiles 集合的制作质量,进而最终影响纹理合成效果。图 4(b)采用改进后的方法制作 Tiles 集合,不仅充分考虑了纹理块之间的颜色误差和梯度结构信息,还避免了采用菱形纹理块造成样本空间边角信息得不到利用的情况。采用改进后的 Tiles 制作方法在中心处没有出现不匹配现象,获得了较好的 Tiles 集合,为后续结构性纹理的合成奠定了良好的基础。

K 取不同值时对 Tiles 集合进行合成拼接,从合成效果可以看出,图 5(a)和 5(b)中出现边界不匹配、纹理结构保持不完整以及边界错位等问题,图 5(c)为采用优化尺寸进行的纹理合成效果,没有出现边界错位及边界不匹配等问题。

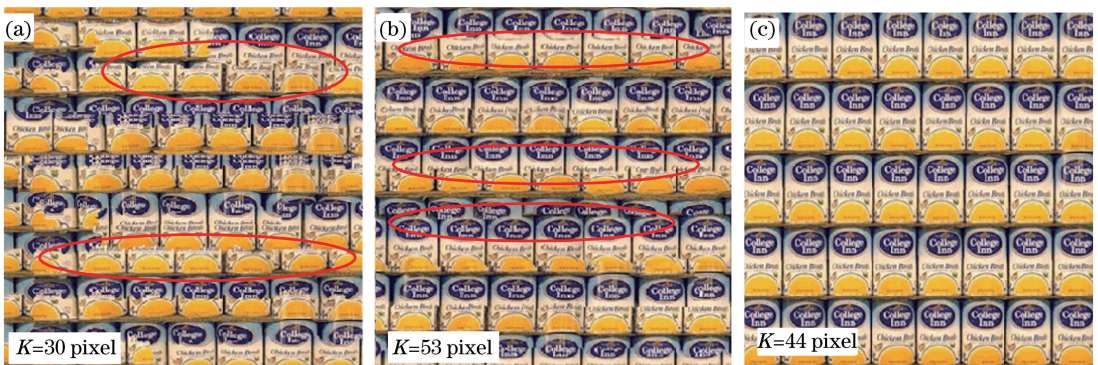


图 5 K 取不同值时的合成效果对比。(a)边界不匹配、纹理结构保持不完整；(b)边界错位；(c)优化结果

Fig. 5 Synthesis results with different K values. (a) Boundary mismatch and incomplete texture structural information; (b) boundary dislocation; (c) optimized result

3.4 优化后算法流程

算法基本步骤如下,其中 Block_1 表示当前已经合成的纹理块, Block_2 表示搜索到的匹配纹理块, K 表示经过优化计算后确定的纹理块最优尺寸。

- 1) 确定结构性纹理样图,使用(6)式确定样本纹理的相关性特征值 F ;
- 2) 采用(8)式确定该结构性纹理的最优尺寸 K ;
- 3) 构造 Wang Tiles 框架集合;
- 4) 从 Wang Tiles 框架集合中选取一个 Wang Tiles 框架截取大小为 $K \times K$ 的纹理块;
- 5) 重复 4)制作 Tiles 集合;
- 6) 设置重叠区域大小、阈值等参数;
- 7) 从 Tiles 集合中随机选取一纹理块 Block_1 放到输出图像中;
- 8) 从 Tiles 集合中选取第二个纹理块 Block_2 ,将其与 Block_1 按照最小误差路径(MEBC)进行拼接;
- 9) 重复 8)直到获得满足尺寸要求的纹理图像。

3.5 实验结果分析

实验在 PC 机(Pentium Dual-Core CPU 3.07 GHz 4.00 GB 内存)上使用 Visual Studio 2010 编程实现。为了验证本文算法的有效性,与 RW-Tiles 算法及 Wang Tiles 算法进行合成结果的比较,样图采用表 1 中的结构性纹理图像,合成效果对比如图 6 所示。

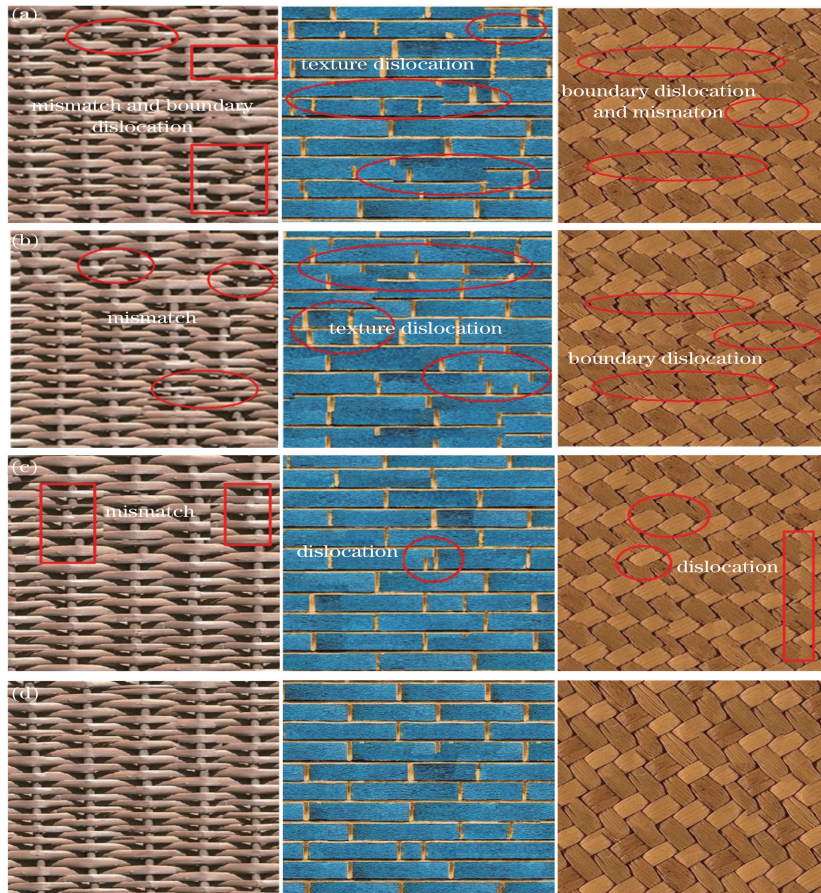


图 6 纹理合成效果对比。(a)文献[6]效果;(b)文献[18]效果;(c)文献[7]效果;(d)改进算法效果

Fig. 6 Comparison of texture synthesis effect. (a) Ref. [6] synthesis effect; (b) Ref. [18] synthesis effect; (c) Ref. [7] synthesis effect; (d) synthesis effect of improved algorithm

图 6(a)为采用 RW-Tiles 算法的合成效果^[6],由于该算法使用与 Image Quilting 算法相似的方法求取切割路径来拼接纹理块,在匹配纹理块时仅仅使用像素 RGB 的空间欧氏距离来判断纹理块的相似性,忽略了纹理固有的结构性信息特征,导致合成结果中有边界不匹配和错位的情形出现。图 6(b)为采用块尺寸自

适应的 Tiles 纹理算法的合成效果^[18],该算法对制作 Tiles 集合做了一定的改进,对随机性纹理能取得较好的合成效果,但对结构性纹理仍无法保持纹理结构的完整性,在合成过程中仍然存在纹理结构信息失配及纹理块最优尺寸难以确定等问题。图 6(c)为采用基于对角线缝合的 Wang Tiles 合成算法的合成效果^[7],该算法通过改进纹理块缝合路径,使用对角线来拼接纹理块,提高了 Tiles 集合的质量,使合成效果得到了提高,但对结构性纹理仍然存在结构信息失配的问题。图 6(d)为采用本文改进后的算法的合成结果,改进后的算法综合考虑了颜色误差与纹理结构信息对保持纹理结构特性的重要性,并对纹理块尺寸进行优化,与传统基于 Wang Tiles 的算法相比,取得了更为理想的合成效果。

表 2 为本文算法与传统 Tiles 相关算法合成时间的比较,每一种纹理块优化尺寸对应的合成时间均是 5 次合成时间的平均值。实验使用了表 1 中样图及其对应的优化尺寸,并对合成时间进行了统计分析。4 种优化尺寸的对应该参数如下:1) 纹理块优化尺寸 $K=64$ pixel 时,重叠区域为 9 pixel,输出图像为 $450 \text{ pixel} \times 450 \text{ pixel}$;2) 纹理块优化尺寸 $K=54$ pixel 时,重叠区域为 6 pixel,输出图像为 $360 \text{ pixel} \times 360 \text{ pixel}$;3) 纹理块优化尺寸 $K=60$ pixel 时,重叠区域为 8 pixel,输出图像为 $400 \text{ pixel} \times 400 \text{ pixel}$;4) 纹理块优化尺寸 $K=44$ pixel 时,重叠区域为 7 pixel,输出图像为 $330 \text{ pixel} \times 330 \text{ pixel}$ 。

表 2 合成时间比较

Table 2 Comparison of synthesis time

Texture block size / (pixel×pixel)	Synthesis time /s			
	Ref. [6] algorithm	Ref. [18] algorithm	Ref. [7] algorithm	Proposed algorithm
64×64	15.375	18.864	17.635	14.648
54×54	14.861	17.974	17.553	14.659
60×60	14.973	16.438	16.971	13.731
44×44	13.851	15.965	15.693	12.814

由表 2 可以看出,本文算法在使用优化后的纹理块尺寸进行纹理合成时,合成时间与文献[6]算法的合成时间相当,比文献[18]算法的合成时间减少了 20%,比文献[7]算法的合成时间减少了 15%,可见,本文算法相对于文献[7]和[18]算法,明显节约了合成时间。结合图 6 合成效果图的比较,本文算法与以往算法相比,在更短的合成时间内取得了更好的合成效果。经过实验验证,如果不计制作 Wang Tiles 的时间,利用本文算法输出一个大小为 $1280 \text{ pixel} \times 1280 \text{ pixel}$ 图像只需要 3 s,符合实时合成的需求。

4 结 论

基于 Wang Tiles 的纹理图像合成原理,研究了纹理图像梯度结构信息对提高纹理图像合成质量的影响以及纹理块尺寸自适应和 Tiles 集合的制作方法。实验结果表明:1) 在进行纹理匹配块的选择时,同时考虑纹理的颜色误差和梯度结构信息比仅仅考虑颜色误差能取得更好的合成效果,加入纹理图像的梯度值,对提高纹理图像的视觉效果起到了关键作用;2) 采用对样本纹理图像进行优化后的纹理块尺寸进行纹理合成,可以更快获得较好的纹理合成效果,避免重复合成不同纹理块尺寸带来的繁琐过程,节约纹理合成时间;3) 一个较好的 Tiles 集合对纹理图像合成的质量非常重要,采用本文改进后的 Tiles 制作方法能取得较传统方法更好的合成效果。本文在编程平台上实现了改进算法的纹理图像合成,采用嵌入式方式或在硬件上实现改进算法将是今后进一步提高纹理图像合成技术的一个重要研究方向。

参 考 文 献

- [1] Cohen M F, Shade J, Hiller S, *et al.* Wang Tiles for image and texture generation[C]. Annual Symposium of the ACM SIGGRAPH, San Diego, CA, USA, 2003: 287-294.
- [2] Ng T Y, Wen C, Tan T S, *et al.* Generating an ω -tile set for texture synthesis[C]. Proceedings of Computer Graphics International Conference, 2005: 177-184.
- [3] Kwatra V, Schoedl A, Essa I, *et al.* Graphcut textures: image and video synthesis using graph cuts[C]. Proceedings of ACM Transactions on Graphics, SIGGRAPH 2003, San Diego, CA, USA, 2003: 277-286.
- [4] Xue F, Zhang Y S, Jiang J L, *et al.* Real-time texture synthesis using s-tile set[J]. Journal of Computer Science and

- Technology, 2007, 22(4): 590-596.
- [5] 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 Tiles 纹理合成[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(30): 159-162.
- [6] 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 纹理合成算法[J]. 中国图象图形学报, 2013, 18(1): 49-54.
- [7] Zu Y R, Duan H C. Texture synthesis using diagonal quilting Wang Tiles[C]. Proceedings of the 2013 9th International Conference on Computational Intelligence and Security, 2013: 836-840.
- [8] Wang H. Proving theorems by pattern recognition-II[J]. Bell Labs Technical Journal, 1961, 40(1): 1- 41.
- [9] Efros A A, Freeman W T. Image quilting for texture synthesis and transfer[C]. Proceeding of the 28th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, New York, USA, 2001: 341-346.
- [10] Liu Dali, Wang Yun, Qiu Lirong, *et al.* 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, 等. 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.
- [11] Tan Yongqian, Zeng Fanju, Yue Li, *et al.* An improved texture image synthesis algorithm[J]. Laser and Optoelectronics Progress, 2016, 53(12): 121001.
谭永前, 曾凡菊, 岳 莉, 等. 一种改进的纹理图像合成算法[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(12): 121001.
- [12] Yu Linqian, Qin Yali, Zhang Xiaoshuai. Denoising of strong noisy image via gradient reweighted non-local averaging over learned dictionaries[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(11): 111002.
余临倩, 覃亚丽, 张晓帅. 基于字典学习的梯度重权非局部平均的强噪声图像去噪[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(11): 111002.
- [13] Chen Zhiming. Image texture detection based on multi-order ring structure quantum algorithms [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(11): 111101.
陈志明. 基于多阶环形结构量子算法的图像纹理检测研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(11): 111101.
- [14] Nie Junlan, Wang Yanfen. An algorithm for adaptively selecting the size of the candidate patches in patch based texture synthesis[J]. Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics, 2008, 20(10): 1353-1357.
聂俊岚, 王艳芬. 块纹理合成中纹理块尺寸自适应算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2008, 20(10): 1353-1357.
- [15] Haralick R M, Shanmugam K, Dinstein I. Textural features for image classification[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1973, SMC-3(6): 610-621.
- [16] Chen H H, Hu W G, Lai D J, *et al.* Nonemptiness problems of Wang Tiles with three colors [J]. Theoretical Computer Science, 2014, 547: 34-45.
- [17] Jeandel E, Rolin N. Fixed parameter undecidability for Wang Tile sets[C]. Proceedings 18th International Workshop on Cellular Automata and Discrete Complex Systems and 3rd International Symposium Journées Automates Cellulaires, 2012, EPTCS 90, 69-85.
- [18] Sun Jinguang, Liu shuangjiu. Algorithm of texture synthesis for adaptively selecting size of patches based on Tile[J]. Computer Engineering and Applications, 2016, 52(11): 164-168.
孙劲光, 刘双九. 块尺寸自适应的 Tile 纹理合成算法[J]. 计算机工程与应用, 2016, 52(11): 164-168.