

# 基于匹配误差改进和迭代传输的纹理传输算法

谭永前<sup>1</sup>, 曾凡菊<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>凯里学院大数据工程学院, 贵州 凯里 556001;

<sup>2</sup>重庆大学光电工程学院, 重庆 400044

**摘要** 基于样本块的纹理传输原理,研究了纹理图像的边缘梯度信息、最小误差路径以及非线性亮度/色度型(YUV)颜色空间的亮度信息对纹理传输结果的影响。在误差度量时,将纹理图像本身的边缘梯度信息和重叠区域的最小误差路径同时作为纹理合成时的度量,并引入源纹理图像和目标图像在YUV颜色空间的亮度信息作为纹理传输的约束度量,能使找到的匹配块更适合纹理传输。同时,在纹理传输过程中采用迭代的方法,解决了大部分纹理通过一次传输后的传输效果不佳的问题。实验结果表明,改进后的纹理传输算法能取得较传统纹理传输算法更好的传输效果。

**关键词** 图像处理; 纹理传输; 边缘梯度; 亮度信息; 迭代传输

中图分类号 TP391.41

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.051005

## Texture Transfer Algorithm Based on Matching Error Improvement and Iterative Transfer

Tan Yongqian<sup>1</sup>, Zeng Fanju<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>School of Big Data Engineering, Kaili University, Kaili, Guizhou 556011, China;

<sup>2</sup>College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China

**Abstract** Based on texture transfer principle of sample blocks, the influences of edge gradient information of texture image, the minimum error path and luminance information in the nonlinearity luma/chroma (YUV) color space on texture transfer results are studied. We take edge gradient information of texture image and the minimum error path of overlapping region as the measure of the texture synthesis at the same time, and introduce luminance information of the source texture image and the target image in YUV color space as constraint measure of the texture transmission. The found matching block is more suitable for texture transfer. At the same time, we use iterative method in the process of texture transmission to solve the problem that the transmission effect is not good after the texture transmission for one time. Experimental results show that, compared with the traditional texture transfer algorithm, the improved texture transfer algorithm can achieve better transmission effect.

**Key words** image processing; texture transfer; edge gradient; luminance information; iterative transmission

**OCIS codes** 100.2960; 100.2980; 110.3000; 110.2970

## 1 引言

基于样本块的纹理传输算法是在纹理合成技术基础上发展起来的一种图形图像处理技术。纹理传输是指将一幅图像的艺术特征通过相应算法模型渲

染后传递到另外一幅图像上的过程,使得传输结果图中既具有目标图的轮廓信息和结构特点,又具有样本的纹理特征。当需要不同艺术风格的图像时,仅需更换不同的样本纹理和调整相关参数,便可使用纹理传输算法模拟出具有不同纹理风格的艺术图

收稿日期: 2017-10-25; 收到修改稿日期: 2017-11-13

基金项目: 贵州省教育厅青年科技人才成长项目[黔教合 KY 字(2017)335]、贵州省科技合作计划[黔科合 LH 字(2017)7161 号,黔科合 LH 字(2016)7318 号,黔科合 LH 字(2015)7744 号]、国家自然科学基金(11464023)

作者简介: 谭永前(1984—),男,硕士,讲师,主要从事图形图像处理和光电材料方面的研究。

E-mail: tanyongqian1@163.com

像。纹理传输能快速转换图像风格,广泛应用于图形图像艺术风格转换、图像风格迁移等计算机图形图像处理领域,是该领域的一个研究热点。目前,纹理传输算法模型采用的主流技术分为两种:一种是在纹理映射的基础上实现的纹理传输,另一种是在较好的纹理合成算法基础上实现的纹理传输。基于纹理映射方法的纹理传输算法往往需要经过繁琐的参数设置,且在传输过程中存在变形失真和运算速度慢等问题;而基于样本纹理合成方法的纹理传输算法以其运算速度快、传输效果好、时间复杂度低和纹理范围大等优点,成为近年来比较热门的研究课题。本文基于样本块的纹理传输原理,研究了纹理图像的边缘梯度信息、最小误差路径以及非线性亮度/色度型(YUV)颜色空间的亮度信息对纹理传输结果的影响。

## 2 纹理传输相关算法

2001年,Efros等<sup>[1]</sup>提出了Image quilting纹理合成算法,并在此基础上实现了纹理传输。随后Kwatra等<sup>[2]</sup>在Image quilting纹理传输基础上提出了Graph cut算法,后来出现在了文献[1-2]基础上改进的算法<sup>[3-10]</sup>。谭永前等<sup>[11]</sup>基于亮度重映射和梯度结构信息实现了纹理传输,取得了很好的效果。以上算法都在各自相应纹理合成算法基础上实现了纹理传输,其主要步骤如下:1)在样本空间按照某种匹配规则寻找满足条件的纹理块;2)利用拼接算法将在样本空间找到的纹理块进行拼接;3)在纹理合成基础上实现纹理传输。

### 2.1 相似块度量

Efros等<sup>[1]</sup>提出的Image quilting纹理传输算法主要通过源纹理块与已合成纹理块之间的颜色误差来判断两个纹理块的相似性。通过人为设置一个阈值,并将满足阈值条件的纹理块放到一个候选纹理块数组中。从候选纹理块数组中随机选取一块候选纹理块,将其与当前已合成块进行合成。若没有满足阈值条件的纹理块出现,则选择所有误差中最小的块为候选纹理块。纹理块相似度的误差计算公式为

$$d(N_1, N_2) = \lambda_1 \|B_1^{\text{ov}} - B_2^{\text{ov}}\| + \lambda_2 \|B_1 - B_2\|, \quad (1)$$

式中: $\|B_1^{\text{ov}} - B_2^{\text{ov}}\|$ 表示已合成块与候选块重叠区域的度量误差; $\|B_1 - B_2\|$ 表示已合成块与候选块整体的度量误差; $\lambda_1, \lambda_2$ 为权重约束控制系数, $\lambda_1 + \lambda_2 = 1$ ; $\|\cdot\|$ 表示范数,其计算值为对应像素点的欧氏距离 $L$ ,计算公式为

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

式中函数 $R(\cdot), G(\cdot), B(\cdot)$ 分别表示图像红、绿、蓝三基色的值, $\text{sqrt}(\cdot)$ 为平方根函数。 $d(N_1, N_2)$ 越小,则两纹理块的视觉误差越小,相似程度越高;反之,视觉误差越大,则相似程度越低。

### 2.2 块拼接算法

纹理块重叠区域的误差大小直接决定了两纹理块拼接的自然程度。设定 $B_1$ 为当前已合成块, $B_2$ 为当前候选纹理块[图1(a)],其重叠区域[图1(b)]分别为 $B_1^{\text{ov}}$ 和 $B_2^{\text{ov}}$ ,重叠区域的误差 $e = B_1^{\text{ov}} - B_2^{\text{ov}}$ 。重叠部分必然存在一个最小误差路径 $E_{i,j}$ ,计算公式为

$$E_{i,j} = \begin{cases} e_{i,j}, & i=1 \\ e_{i,j} + \min(E_{i-1,j-1}, E_{i-1,j}, E_{i-1,j+1}), & \text{else} \end{cases}, \quad (3)$$

式中: $e_{i,j}$ 为两纹理块重叠区域第 $i$ 行、第 $j$ 列的最小误差值; $E_{i,j}$ 为按照扫描线顺序且扫描开始于第1行第1列、结束于第 $i$ 行第 $j$ 列总的的最小误差路径<sup>[12]</sup>。计算完重叠区域的最小误差 $e_{i,j}$ 后,将所有最小误差值的点反向连接起来,从而得到了两纹理块的最小误差拼接路径,如图1(c)所示。

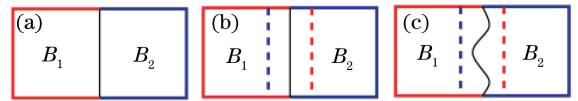


图1 (a)纹理块随机放置;(b)纹理块重叠;(c)最小误差拼接路径

Fig. 1 (a) Texture blocks placed randomly; (b) texture blocks overlap; (c) minimum error splicing path

通过对传统纹理传输算法的研究可以发现,无论是Image quilting纹理传输算法还是在此基础上改进的其他算法,在进行匹配块的度量时都是以纹理块的颜色误差为基础,对纹理块的相似性进行度量,对于一些非结构性纹理或者结构性不是太强的随机性纹理,这些算法能取得较为满意的传输结果。由于传统纹理传输算法忽略了图像块本身的结构特点和边缘信息等,对于结构性较强的纹理,传统算法无法取得理想的传输效果。这里对Image quilting传输算法的缺陷以及其他传统算法一次合成不能达到较好传输效果的问题进行了改进。

## 3 基于匹配误差改进和迭代传输的算法

结构性纹理图像块具有鲜明的结构特点和边缘信息,传统纹理传输算法在进行匹配块的度量时忽

略了纹理图像块本身的结构特点,导致在对结构性纹理块进行传输时无法得到满意的结果。同时,大部分纹理无法经过一次合成就能得到满意的传输效果。对匹配块的误差度量进行了改进,采用多次迭代逐步减小块尺寸的方式进行传输,取得了较理想的纹理传输效果。

### 3.1 引入边缘梯度进行误差度量

图像的梯度值能反映出图像边缘信息的变化情况,梯度值变化较大的地方,图像的边缘信息变化较明显<sup>[13-14]</sup>。在进行纹理块相似度匹配时,加入纹理图像块本身的边缘梯度信息,同时把重叠区域的总的误差度量拼接路径  $E_{i,j}$  也加入到误差度量中,则  $d(N_1, N_2)$  的计算公式转化为

$$d(N_1, N_2) = \lambda_1 \| B_1^{ov} - B_2^{ov} \| + \lambda_2 \| B_1 - B_2 \| + \lambda_3 M_{Grad} + \lambda_4 E_{i,j}, \quad (4)$$

式中  $M_{Grad}$  为梯度相似度<sup>[15]</sup>。采用 Sobel 算子计算纹理块对应像素的  $M_{Grad}$ :

$$M_{Grad} = G_A [P_A(x, y)] - G_B [P_B(x, y)], \quad (5)$$

式中:  $P_A(x, y)$ 、 $P_B(x, y)$  分别为已合成块任意点和待合成块任意点的像素值,  $G_A$ 、 $G_B$  分别为已合成块和待合成块的梯度,  $A$ 、 $B$  分别表示已合成块和待合成块。实验的参数设置可根据选择的实验样本、实验目标图像和实验效果在实验中不断调整,经过多次实验验证,当  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \geq \lambda_4$ ,  $\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 = 1$ , 且  $\lambda_1 + \lambda_2 \geq 0.7$  时能取得较好的传输结果,如图 2 所示。

### 3.2 迭代纹理传输

纹理传输与纹理合成不同,纹理传输涉及源纹理图像和目标图像,对于大部分源纹理图像而言,一次传输无法得到满意的传输效果,所以考虑在纹理传输过程中采用迭代的方法。改进后纹理传输的总约束度量为

$$d_{trans} = \alpha d(N_1, N_2) + (1 - \alpha)d_2, \quad (6)$$

其中

$$\alpha = 0.8 \times \frac{i-1}{N-1} + 0.1, \quad (7)$$

式中:  $d_2$  为纹理传输的约束度量,若采用在 YUV 颜色空间中图像的亮度误差  $d_2$  作为纹理传输的约束度量,则  $d_2 = (Y_1 - Y_2)^2$ ;  $Y_1$ 、 $Y_2$  分别表示已合成块和待合成块的亮度;  $N$  为实验中设置的迭代总次数,一般  $N = 3 \sim 5$ ;  $i$  为迭代次序。在迭代实验中,每次迭代实验完成后,纹理块的大小减小至上次迭代时块尺寸的  $1/3$ 。

## 4 传输算法流程

传输算法的基本步骤为:1) 选择相应的源纹理图像和目标图像;2) 利用(4)式作为纹理匹配块的度量公式进行纹理合成,合成一个大小与目标图像相同的临时纹理图像;3) 采用 Sobel 算子计算源纹理图像块的边缘梯度值;4) 在 YUV 颜色空间计算源纹理图像和目标图像的亮度误差;5) 设置纹理传输相关参数,例如纹理块的尺寸、重叠区域大小和迭代次数等;6) 按照(6)式的计算要求,在临时纹理图像中挑选一块纹理块,输出到目标图像的相应位置;7) 按照扫描线顺序执行图像纹理传输。

## 5 实验结果分析

相关实验均在个人计算机 [Intel (R) Core (TM) i5-3210 M CPU 2.5 GHz, 4.00 GB 内存] 上使用 Visual Studio 2010 编程平台实现。对比分析了  $N=4$  时  $\lambda_1 + \lambda_2$  的取值对传输结果的影响,结果如图 2 所示。对改进后的纹理传输算法效果与相关传输算法效果进行了对比,结果如图 3 所示。

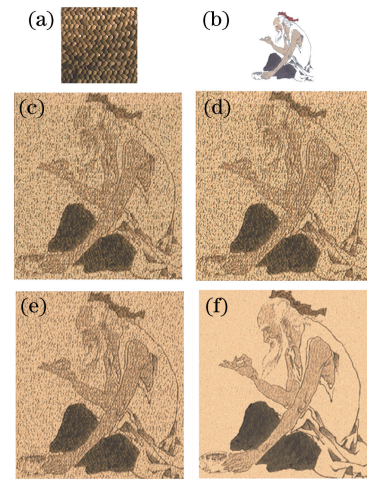


图 2  $N=4$ 、 $\lambda_1 + \lambda_2$  取不同值时的传输结果对比。(a)源纹理图像;(b)目标图像;(c)  $\lambda_1 + \lambda_2 = 0.5$ 、(d)  $\lambda_1 + \lambda_2 = 0.6$ 、

(e)  $\lambda_1 + \lambda_2 = 0.7$  和(f)  $\lambda_1 + \lambda_2 = 0.8$  时的传输结果

Fig. 2 Comparison of transmission results with different  $\lambda_1 + \lambda_2$  when  $N=4$ . (a) Source texture image; (b) target image; transmission results when (c)  $\lambda_1 + \lambda_2 = 0.5$ , (d)  $\lambda_1 + \lambda_2 = 0.6$ , (e)  $\lambda_1 + \lambda_2 = 0.7$ , and (f)  $\lambda_1 + \lambda_2 = 0.8$

从图 2 可以看出,当  $N$  相同时,匹配块误差度量式[(4)式]的等式右侧第 1、2 项对实验结果有很大影响,当  $\lambda_1 + \lambda_2$  的取值达到 0.7 和 0.8 时,传输结果图的轮廓比取值为 0.5 和 0.6 时的轮廓更清晰,取得了更好的视觉效果。实验中对 3 张目标图像进行了纹

理传输,图3对改进后的算法与传统传输算法 Image quilting 的传输效果进行了比较。图3(a)为源纹理图像,图3(b)为目标图像,图3(c)~(f)为改进后的传输算法迭代次数  $N$  取不同值时的结果。改进后的传输算法将图像本身的边缘梯度信息和纹理块重叠区域总的误差路径同时作为衡量纹理块相似程度的标准,并在传输时加入亮度信息作为约束度量,保证了找到的纹理块更适合用来合成和传输,使得传输结果更具有自然美感。从图3(c)可以看出,即便  $N=1$ ,改进传输算法的传输效果也比 Image quilting 算法

好。随着迭代次数  $N$  的增加,目标图像的轮廓线条越清晰,亮度也越明显,当  $N=4$  时,传输结果如图3(e)所示,源纹理图像的纹理特征与目标图像的融合更加清晰自然。图3(g)为 Image quilting 算法的传输效果,从图中可以看出,传统纹理传输算法仅从颜色误差考虑图像的相似程度,忽略了图像本身的结构特点,使得传输结果图中不能保持纹理结构的完整性,导致传输时虽然能保持源纹理图像的基本特征,但目标图像的边缘信息和轮廓线条模糊不清,源纹理图像与目标图像的融合不自然,亮度也差。

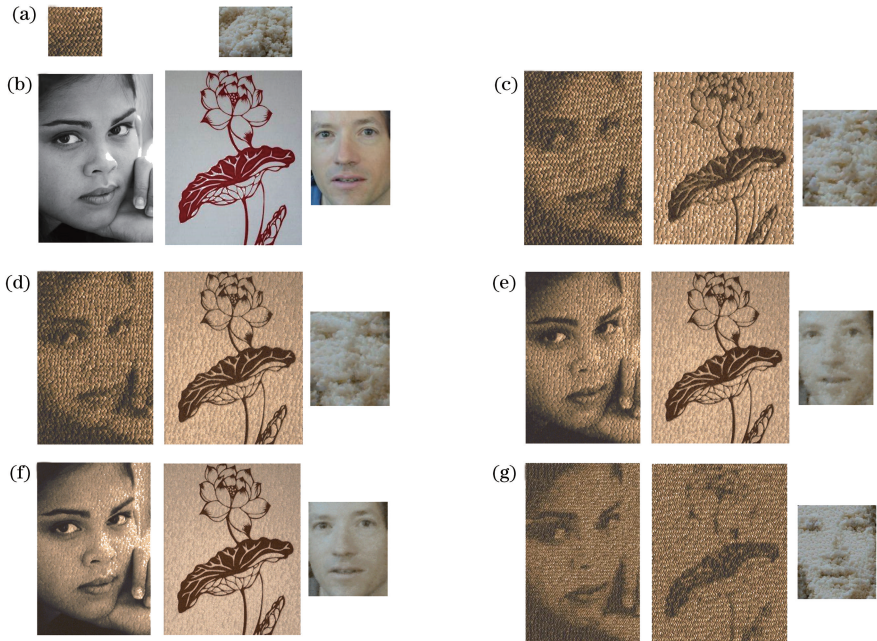


图3 改进算法与传统算法的传输效果比较。(a)源纹理图像;(b)目标图像;(c)  $N=1$  时改进算法的传输效果;(d)  $N=2$  时改进算法的传输效果;(e)  $N=3$  时改进算法的传输效果;(f)  $N=4$  时改进算法的传输效果;(g)文献[1]中算法的传输效果

Fig. 3 Comparison of transmission effects of improved algorithm and traditional algorithm. (a) Source texture image; (b) target image; (c) transmission effect of improved algorithm when  $N=1$ ; (d) transmission effect of improved algorithm when  $N=2$ ; (e) transmission effect of improved algorithm when  $N=3$ ; (f) transmission effect of improved algorithm when  $N=4$ ; (g) transmission effect of algorithm in Ref. [1]

表1中对目标图像所对应的源纹理图像在同一尺寸纹理块条件下的5次传输时间的平均值进行了统计。统计结果表明,对于改进后的传输算法, $N=1$ 时的传输时间与 Image quilting 算法的传输

时间相当,但传输效果比 Image quilting 算法好,如图3(c)、(g)所示;随着迭代次数  $N$  的增加,传输时间也随之增加,目标图像的整体轮廓和边缘信息也越来越清晰,整体效果更好。

表1 改进算法与传统算法的传输时间比较

Table 1 Comparison of transfer time of improved algorithm and traditional algorithm

| Texture block size /<br>(pixel×pixel) | $\lambda_1$ | $\lambda_2$ | $\lambda_3$ | $\lambda_4$ | Transfer time /min |       |       |       | Algorithm in<br>Ref. [1] |
|---------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------------|-------|-------|-------|--------------------------|
|                                       |             |             |             |             | Improved algorithm |       |       |       |                          |
|                                       |             |             |             |             | $N=1$              | $N=2$ | $N=3$ | $N=4$ |                          |
| 27×27                                 | 0.40        | 0.30        | 0.10        | 0.20        | 0.71               | 2.23  | 6.65  | 20.01 | 0.75                     |
| 36×36                                 | 0.35        | 0.35        | 0.15        | 0.15        | 0.55               | 1.95  | 5.80  | 17.51 | 0.65                     |
| 44×44                                 | 0.40        | 0.40        | 0.10        | 0.10        | 0.50               | 1.67  | 4.87  | 14.46 | 0.58                     |
| 50×50                                 | 0.40        | 0.35        | 0.15        | 0.10        | 0.48               | 1.26  | 3.67  | 12.87 | 0.43                     |

## 6 结 论

基于样本块的纹理传输原理,对图像的边缘梯度信息、纹理块重叠区域最小误差路径以及在YUV颜色空间图像的亮度信息对纹理传输效果的影响进行了研究。研究表明:1)在进行最佳匹配块的选择时,将图像的颜色误差、纹理块重叠区域最小误差路径以及图像的边缘梯度信息同时加入到相似性度量公式中,能取得比传统算法更好的传输效果;2)在进行纹理传输时,将源纹理图像和目标图像在YUV颜色空间的亮度误差作为传输的约束度量,提高了纹理传输的效果;3)在纹理传输过程中加入迭代实验,同样提高了纹理传输的效果。纹理传输过程中,其他传输约束度量值对传输效果的影响,以及在纹理合成和纹理传输中引入深度学习算法将是今后的研究方向。

### 参 考 文 献

- [1] Efros A A, Freeman W T. Image quilting for texture synthesis and transfer [C]. Proceeding of the 28<sup>th</sup> Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, 2001: 341-346.
- [2] Kwatra V, Schoedl A, Essa I, *et al.* Graphcut textures: image and video synthesis using graph cuts [C]. Proceedings of ACM Transactions on Graphics, 2003: 277-286.
- [3] Busto P P, Eisenacher C, Lefebvre S, *et al.* Instant texture synthesis by numbers[C]. Proceedings of the Vision, Modeling and Visualization Workshop, 2010: 81-85.
- [4] Cohen M F, Shade J, Hiller S, *et al.* Wang Tiles for image and texture generation[C]. Annual Symposium of the ACM SIGGRAPH, 2003: 287-294.
- [5] Tan Y Q, Zeng F J, Yue L, *et al.* An improved texture image synthesis algorithm [J]. Laser & 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.
- [6] Wang D H, Dong L, Du H M. A study on the algorithms for 2D texture mapping and its employment in hardware design[C]. Proceedings of the 2012 International Conference on Computer Application and System Modeling, 2012: 1271-1274.

- [7] Lukac M, Fiser J, Bazin J C, *et al.* Painting by feature: texture boundaries for example-based image creation [C]. Proceedings of ACM Transactions on Graphics, 2013, 32(4): 116.
- [8] Lee H S. A new image super resolution by texture transfer [C]. IEEE International Conference on Image Processing, 2014: 3915-3918.
- [9] Zhou R H. Texture synthesis algorithm and its application in the texture transmission [D]. Jinan: Shandong Normal University, 2015.  
周瑞华. 纹理合成算法及其在纹理传输中的应用研究 [D]. 济南: 山东师范大学, 2015.
- [10] Gatys L A, Ecker A S, Bethge M. Texture synthesis using convolutional neural networks [J]. Febs Letters, 2015, 70(1): 51-55.
- [11] Tan Y Q, Zeng F J. Texture transfer technique based on brightness remapping and gradient structure information [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(3): 031001.  
谭永前, 曾凡菊. 基于亮度重映射和梯度结构信息的纹理传输算法 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(3): 031001.
- [12] Wang Y, Liu H Z, Wu Z H. Edge-preserving smoothing for image decomposition via a hybrid approach [C]. SPIE, 2013, 9069: 90691N.
- [13] Du L L, Duan H C. An improvement to the Image quilting texture transfer algorithm [J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2015, 36(11): 2563-2567.  
杜黎黎, 段会川. Image quilting 纹理传输算法的改进研究 [J]. 小型微型计算机系统, 2015, 36(11): 2563-2567.
- [14] Wen H, Chen Z J. Improved algorithm for texture transfer by introducing edge information [J]. Computer Systems and Applications, 2013, 22(11): 143-147.  
文慧, 陈昭炯. 引入边缘信息的纹理传输改进算法 [J]. 计算机系统应用, 2013, 22(11): 143-147.
- [15] Tan Y Q, Zeng F J. Gradient-based Wang Tiles texture synthesis algorithm with adaptive block size [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(5): 051001.  
谭永前, 曾凡菊. 基于梯度的块尺寸自适应 Wang Tiles 纹理合成算法 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(5): 051001.