

自相似性匹配的纹理合成

朱瑞超 钱文华 普园媛 徐丹

(云南大学计算机科学与工程系 昆明 650504)

摘要 基于 Image Quilting 算法,基于块匹配的误差提出了一种基于自相似匹配的改进方法,其有效提高了缝合速度及合成质量,对不同纹理样本都能取得较好的合成效果。该算法首先根据样本图像大小动态确定匹配块的大小;之后通过自相似匹配的原理设置了缝合块的边界匹配误差,保留了缝合块的边界信息;在缝合过程中使用贪心算法选取相似性最高的块作为下一个待缝合的块,通过局部最优合成效果合成最终纹理图像。实验结果表明,改进后的算法减少了合成时间,消除了匹配块之间的不连续性,提高了合成质量。

关键词 纹理合成, Image Quilting 算法, 自相似匹配, 贪心算法

中图分类号 TP391 **文献标识码** A

Texture Synthesis Based on Self-similarity Matching

ZHU Rui-chao QIAN Wen-hua PU Yuan-yuan XU Dan

(School of Information Science and Engineering, Yunnan University, Kunming 650504, China)

Abstract Image Quilting algorithm is a classical algorithm of texture synthesis based on the sample, but the speed and suture effect still need to be improved. Based on the error of block matching, an improved method based on self-similar matching was proposed. The improved algorithm can effectively improve the stitching speed, enlarge the range of application and synthesis quality. The algorithm first determines the matching block size according to the sample size by dynamic pattern. Then on the principle of self-similar matching, it sets block boundary matching error and retains the suture block boundary information. In the process of stitching, the greedy algorithm is used to select the block with the highest degree of coincidence as the next block to be stitched. The experimental results show that the improved algorithm improves the time efficiency of the synthesis, enhances the stitching effect between the blocks, and improves the final synthesis effect.

Keywords Texture synthesis, Image Quilting algorithm, Self-similarity matching, Greedy algorithm

1 引言

纹理合成是当前计算机图形学、计算机视觉和图像处理等领域中为了解决纹理映射中存在的接缝走样等问题而提出的。目前纹理合成方法可分为两类:1)过程纹理合成(Procedural Texture Synthesis, PTS);2)基于样图的纹理合成(Texture Synthesis From Samples, TSFS)。基于样图的纹理合成技术是近几年迅速发展起来的一种新的纹理拼接技术,它基于给定的小区域纹理样本,按照表面的几何形状,拼合生成整个曲面的纹理,在视觉上是相似而连续的。TSFS 技术不仅可以弥补传统纹理映射方法的缺点,还避免了过程纹理合成调整参数的繁琐,受到研究人员的关注,成为计算机图形学、计算机视觉和图像处理领域的研究热点之一^[1]。

Image Quilting 算法是基于样图纹理合成的经典算法。Efros^[2]首次提出 Image Quilting 纹理合成算法,通过计算纹理合成中缝合块的累计误差和最小误差路径合成最终纹理图

像;Kwatra^[3]在 Image Quilting 算法的基础上,提出了基于 Graph Cut 的改进方法;Cohen 等^[4]提出一种使用拼接 Wang Tiles 的方法实时合成纹理,通过在样本纹理中复制新的不规则匹配形状来消除菱形接缝问题;孙劲光等通过分析给定的纹理样图,得到适当的纹理块长度,按照该长度从纹理样图中提取 4 个菱形纹理块,通过修改生成的 Tile 初始框架改进了 Wang Tiles 算法^[5];孟春芝等通过提取图像的相关纹理特征,提出一种样本块大小自适应选取方法,利用图像分解技术对图像进行预处理,利用图像灰度共生矩阵提取待修复图像的纹理特征,通过确定相关纹理特征与最优样本块大小的相互关系,实现了样本块大小的自动选取^[6];聂俊岚等^[7]分析了块纹理合成方法中纹理块尺寸对合成结果的影响,经过对大量不同类型纹理图像的采样,归纳并验证了纹理相关性特征值与纹理块尺寸之间的关系,得出纹理相关性特征值自适应调整纹理块尺寸的算法,然而改进后的算法并不适用于结构较复杂的纹理样本。

本文受国家自然科学基金(61662087, 61462093, 61163019),云南省应用基础研究计划(2014FA021, 2014FB113),云南省教育厅重点项目(2015Z012)资助。

朱瑞超(1996—),男,CCF 学生会员,主要研究方向为图像处理、非真实感绘制等;钱文华(1980—),男,博士,副教授,CCF 会员,主要研究方向为图像处理、非真实感绘制等;普园媛(1972—),女,博士,教授,CCF 会员,主要研究方向为非真实感绘制、图像情感分析等;徐丹(1968—),女,博士,教授,博士生导师,CCF 会员,主要研究方向为模式识别、虚拟现实等。

Image Quilting 算法在相似性匹配过程中采用颜色误差计算,可能导致纹元破裂等问题;在相似性匹配搜索过程中选取最相似缝合块,会导致边界过度缝合等问题,因此需要进一步提高合成速度与合成质量。本文通过动态计算缝合块大小、自相似匹配计算相似度并采用贪心算法提高边界重合度来对 Image Quilting 算法进行改进,以提高合成效率,进一步提升算法的合成效果。相比已有的纹理合成算法,本文的贡献在于:1)根据样本图像的大小确定缝合块的大小,使块的选取相对合理;2)通过基于自相似匹配的方法对样图的自相似性进行检测,并确定缝合的误差,提高合成的边界效果;3)使用贪心算法选取相邻区域相似度最高的块作为缝合块,提高缝合块之间的整体性。

通过上述改进,提升了缝合效果和结构性较强的纹理的合成效果,并减少了合成时间。

2 算法流程

Image Quilting 算法由于基于块匹配的思想,使得不同缝合块的大小影响最终的缝合时间。针对缝合速度仍可提高的问题,本文根据样本纹理动态设置缝合块大小,通过减少匹配块的数量来提高缝合速度。由于缝合的边界参数对缝合效果的影响较大,因此合理地设置该参数可以提高缝合的效果,本文根据图像的自相似性来确定边界误差。

根据上述算法思想,本文改进的算法流程如图 1 所示。



图 1 算法流程图

本文改进算法的步骤如下。

Step1 对目标纹理进行预处理。如果边界信息有冗余的图像,首先对边界进行裁剪,以减少无关元素对合成效果的干扰;然后采用自相似性匹配来计算自相似性,并通过自相似性进一步确定合成的边界误差,使其在缝合过程中较好地控制边界的缝合效果。

Step2 从纹理样本图像中随机选取一块填充到目标图像。

Step3 在匹配块的搜索过程中,计算纹理块之间的相似度,根据贪心策略算法的思想,每次选定与已合成纹理的块相似度最高的缝合块作为下一个缝合块进行缝合,以达到局部相似性最优的合成效果进而达到整体相似性最优的合成效果。

Step4 合成最终的纹理图像,输出合成结果。

基于上述算法流程,获得最终的合成结果。本文算法着重通过自相似匹配对算法进行改进,下文将对改进的算法在时间效率与合成效果上进行测试。

3 自相似性匹配纹理合成算法

Image Quilting 算法可分为纹元切分、缝合块选取、缝合块缝合 3 部分,本节通过匹配块选取、自相似匹配和纹理缝合 3 个部分对 Image Quilting 算法进行改进,并着重介绍自相似匹配的改进部分。

3.1 缝合块的选取

经典的 Image Quilting 算法随机选取一个固定大小的匹配块,但是随着样本图像纹理复杂度的增加和图像大小的变

化,如果纹理块的大小设置不合理将导致合成速度降低与合成效果较差的问题。因此,本文将根据样本图像的大小选取固定比例的长和宽作为缝合块的尺寸,如图 2 所示。

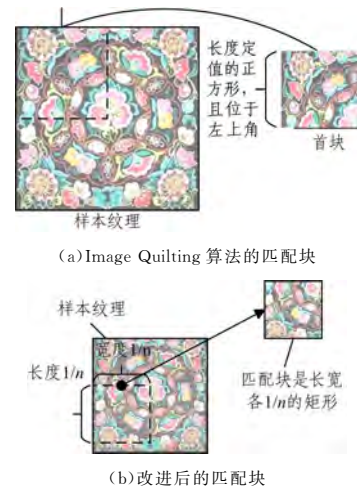


图 2 匹配块的选取

图 2 显示了匹配块的选取过程,经典的 Image Quilting 算法设定缝合块为固定长度的正方形,这将导致样本图像变化时需要手动调整缝合块的大小,手动调整将导致块的大小设置得不精确,当缝合块设置得较小时,缝合块的数量将增多,导致合成效率降低;此外,当匹配块远小于样本纹理时,合成的局部信息被放大,不利于对纹元的合成。而本文将缝合块的大小设置为样本图像的长度和宽度均为 $1/n$ 的矩形,比例因子 n 是缝合块占样本图像的比例, n 的选取取决于图像的大小以及纹元的大小,根据经验 n 一般取 2。根据样本图像的大小确定缝合块的大小,有效地减少了缝合块的数量,提高了合成速度。首个缝合块的位置采取随机生成的方法,但是当增大了匹配块的大小之后,可能会导致边界合成的效果较差,因此本文采用自相似匹配的方法来计算边界的误差,修复边界的合成效果。

Image Quilting 算法为边界设定了一个固定的阈值,计算两个块之间的方差,当方差介于某个阈值之间,则在符合阈值要求的待缝合块中随机选取缝合块,阈值的设定将在 3.2 节给出,边界阈值的选取决定了边界重合度的大小和下一缝合块的选取,图 3 给出了下一缝合块的缝合示意图^[8]。

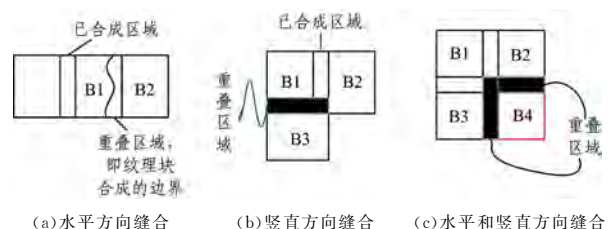


图 3 合成方法示意图

图 3(a)—图 3(c)分别为水平方向、竖直方向、水平加竖直方向的重叠区域示意图。

(1)水平方向。重叠区域为一个竖直水平矩形块。B1 为已合成区域,B2 为待缝合块,本文选取标准差计算匹配误差,B2 与 B1 之间的误差通过式(1)进行计算。

(2)竖直方向。重叠区域为一个横向水平矩形块。B1 和 B2 为已合成区域,B3 为待缝合块,B3 与 B1 之间的误差通过

式(1)进行计算,误差越小说明重叠区域越精确,选取误差阈值范围内最小的区域作为缝合的区域。

(3)均为水平与竖直两个方向的矩形块。B1,B2,B3 为已合成区域,B4 为待缝合块,将 B4 分别与 B3 和 B2 通过式(1)进行计算,分别选取与 B2 和 B3 的误差在阈值范围内的最小区域作为缝合的区域。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2} \quad (1)$$

其中, σ 为标准差, N 为像素点个数, x_i 为待缝合图像的第 i 个像素的像素值, y_i 为已缝合图像的第 i 个像素的像素值。

重叠区域的大小由 Image Quilting 算法设置的边界阈值决定,该阈值决定了重合区域的大小与缝合效果的好坏,Image Quilting 算法将该值设置为定值,该值设置不合理会导致图像边界的缝合效果不佳,本文使用自相似匹配的方法来重新设置该值。

3.2 自相似匹配

自相似性是指事物表示它和它本身的一部分完全或是几乎相似的属性^[9]。由于样本纹理具有自相似性,因此本文通过自相似性的原理对 Image Quilting 算法的边界阈值进行改进,以缝合尽可能多的相似部分。

纹理样本中存在自相似性,首先需要将图像分为多个小的区域^[10]。如图 2(b)所示,匹配块选取的大小为纵横像素个数的 $1/n$ (根据经验 n 一般取 2 或 3)。图像分割的块数不是固定的,根据经验通常分为 4~6 块,而根据算法流程,采用等分的方式计算误差值有利于找到误差最小的块。因此将样本纹理再进行一次二等分来细化样本图像之间的差别,即对图像进行水平和竖直两个方向的四等分的分割,图 4 为分割效果,针对自相似性求取均值,获得最终纹理块的自相似值。

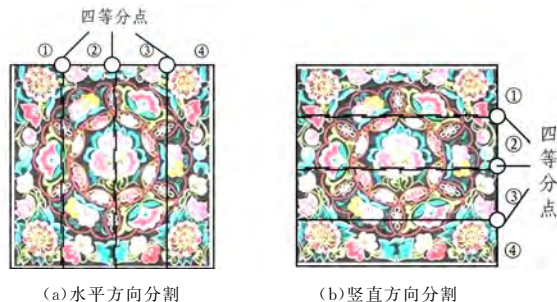


图 4 自相似分割

对纹理样本进行分块,分别在纵横方向将样本纹理切割后得到 4 个块,在块之间进行相似性的计算进而得出该纹理的自相似性,将自相似性的值作为缝合块的缝合阈值。相似性检测的方法如下。

设给定两图像块 X 和 Y ,大小为 $L \times L$,相似性 Z 通过式(2)进行计算^[11]。

$$Z = r_{xy} / e_x e_y \quad (2)$$

其中, r_{xy} 为两个图像之间像素差占整个图像的比例,通过式(3)计算。

$$r_{xy} = \frac{1}{L \times L} \sum_{i,j=0}^{L-1} (p_{x_{ij}} - \overline{p_x})(p_{y_{ij}} - \overline{p_y}) \quad (3)$$

其中, $\overline{p_x}$ 和 $\overline{p_y}$ 分别为块 X 和 Y 的灰度平均值。

e_x^2 为 X 块上的图像灰度值方差, e_y^2 为 Y 块上的图像灰度值方差,通过式(4)计算。

$$e_x^2 = \frac{1}{L \times L} \sum_{i,j=0}^{L-1} (p_{x_{ij}} - \overline{p_x})^2 \quad (4)$$

$$e_y^2 = \frac{1}{L \times L} \sum_{i,j=0}^{L-1} (p_{y_{ij}} - \overline{p_y})^2$$

$r_{xy} / e_x e_y$ 为 X 和 Y 的相似系数,容易得出 $0 < r_{xy} / e_x e_y < 1$ 。 Z 越大,两图像块的最小误差越小,二者越接近,则相似性越强。

针对四等分后的图像,根据式(2)~式(4)对样本图像的自相似性进行计算,可以获得两个自相似的上三角矩阵。通过相似矩阵获得相似度的均值,并将相似度的均值设置为缝合的匹配误差,选择误差值小于该相似度的块作为待选的缝合块。

Image Quilting 算法在设定好阈值之后在所有标准差小于该阈值的待匹配块中随机选取缝合块,但是由于随机性太强,对于结构性复杂的样本图像,拼接效果散乱,因此改进算法来选择下一个缝合块进行图像缝合以提高合成的效果。

3.3 图像缝合

纹理合成的过程就是在已合成的纹理块中逐块确定下一个样本纹理(如图 5 中的 B 区域)与已合成图像之间的最佳缝合路径,从而不断地拼入新纹理块,形成最终合成的图像^[12]。由于 Image Quilting 算法使用基于随机选取满足阈值的块对纹理进行缝合,对随机样本图像合成效果较好,但是对于结构性强、自相似性高的图像来说,随机缝合会打乱原图像的内部结构,如图 5 中 A 为已合成块,B 为待匹配块,A 和 B 的相似部分通过滑动窗口进行重叠,由于随机缝合导致较难确定滑动窗口的大小,从而造成 A 和 B 的相似部分不能重合以及缝合速度较慢的问题,破坏了原图像的内部纹理,因此可采用贪心算法来提高合成效果和合成速度,如图 5 所示。每次选取重合区域最大的块进行缝合,以缝合更多相似部分,避免相似部分无法完全缝合或者过度缝合。



图 5 缝合的重叠区域图

根据贪心算法的思想每次都选取相似度最高的块进行缝合,将已有的图案与待匹配的图案重合区域相似度高的部分进行缝合,如图 5 中 A 与 B 的重叠区域。该区域重叠的部分越多说明两个区域的相似性越高,将相似的部分更多地缝合在一起,以减少相似图案的重复率。

4 实验结果及分析

为了测试本文所提方法的可行性和有效性,基于本文算法,对不同输入图像进行处理,在设置四等分分块阈值为 0.1 的情况下,实现了图像的纹理合成。所有实验在 Windows 8 操作系统中进行,基于 1.9 GHz AMD CPU,8 GB 内存,采用 Matlab 2015b 编程实现,下面给出具体的实验结果。

4.1 改进算法的效果对比

本文方法对 Image Quilting 算法做了合成块大小的调整、贪心算法和自相似匹配算法的改进。输入纹理样本图像,使用经典的 Image Quilting 算法和本文改进的 Image Quilting 算法进行合成,合成的效果如图 6 所示。

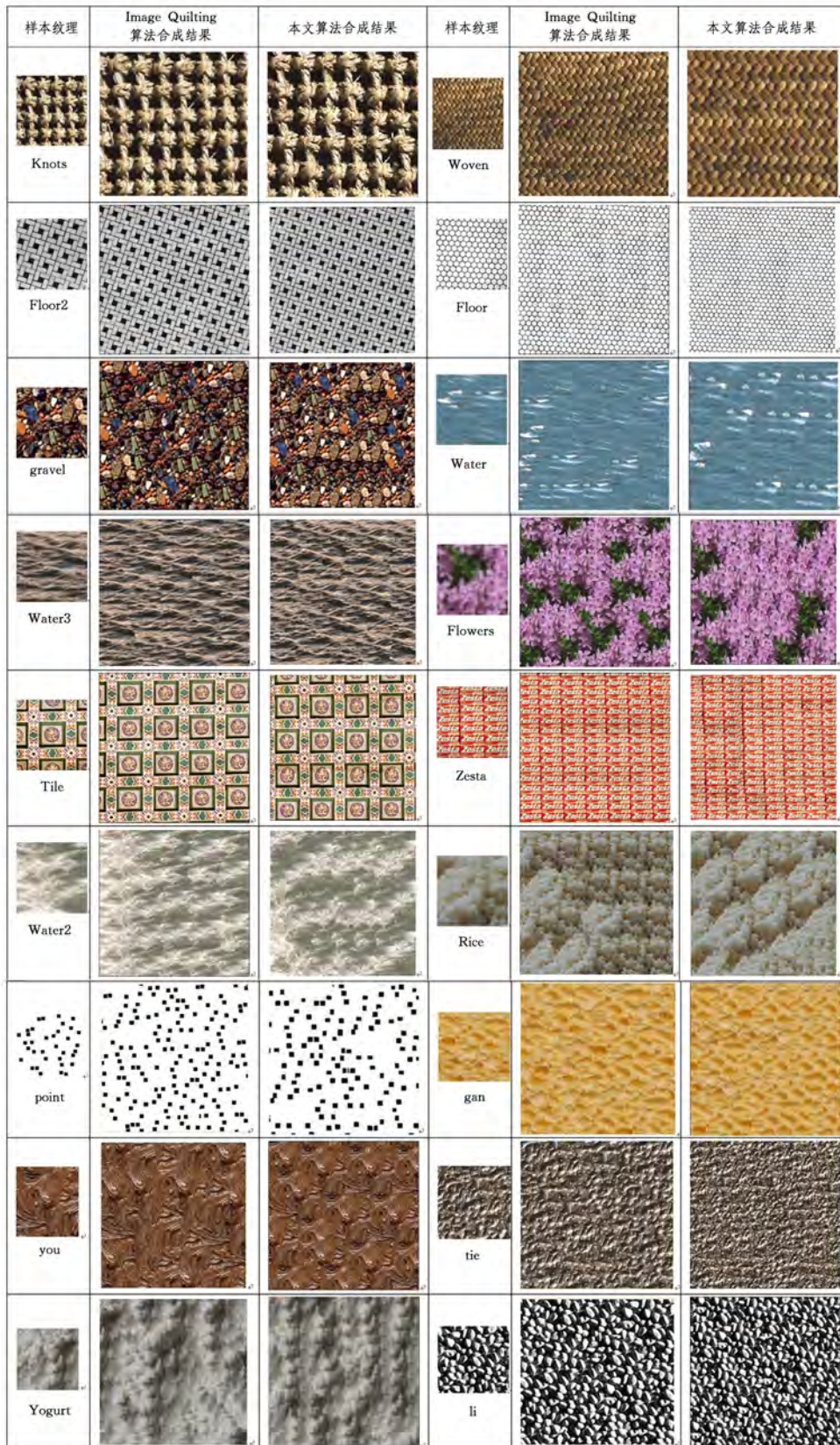


图 6 样本图像合成效果

根据合成效果可以看出,改进后的算法对随机纹理边界的缝合效果较好,无明显的边界分隔;对于结构纹理的整体,合成效果具有较强的整体性。

4.2 改进算法的时间对比

本文对 Image Quilting 算法进行了 3 个方面的改进。

(1) 匹配块的长宽选取为样本纹理的长宽的 $1/n$;

(2) 通过自相似匹配计算边界匹配误差,并将其作为缝合的参数;

(3) 使用贪心算法选择在误差范围内相似度最大的块作为下一个匹配块。

对样本纹理进行实验并使用 MATLAB 探查器功能计算出各纹理图案的合成时间,所得数据如表 1 所列。

表 1 算法的合成时间比较

纹理样本	样本大小	合成大小	本文方法/s	Image Quilting/s	加速/倍
Knots	192×192	438×438	75.830	80.535	1.06
Woven	76×76	376×376	40.030	45.202	1.12
Tile	192×192	425×425	59.651	67.812	1.13
Floor	128×128	638×638	86.801	89.538	1.03
Floor2	128×128	638×638	95.872	103.239	1.08
zesta	221×224	550×550	240.264	265.631	1.11
gravel	95×95	475×475	96.588	104.765	1.08
Water	80×80	400×336	44.108	45.584	1.03
Water2	80×80	400×336	40.807	47.565	1.17
Water3	80×80	400×336	75.381	86.523	1.15
Flowers	192×192	351×407	51.094	56.137	1.10
Rice	133×197	326×430	69.205	76.132	1.10
point	129×129	644×644	367.103	405.207	1.10
gan	50×50	210×250	10.654	12.301	1.15
You	64×64	319×319	22.120	24.204	1.09
Tie	192×192	957×957	969.726	1023.504	1.06
Yogurt	37×37	182×182	7.758	8.982	1.16
li	63×63	313×313	20.729	23.564	1.14

使用 MATLAB 探查器对合成的过程进行数据分析^[13], 表 1 列出了图像的合成大小以及合成时间的对比, 可以得出如下结论:

(1) 寻找匹配块为最耗时的操作, 样本的大小与消耗的时间成正比;

(2) 当样本纹理较大时, 未改进的 Image Quilting 由于纹理块选取得太小, 导致候选的匹配块数量较多, 因此匹配块的寻找次数增加, 导致运行时间增加;

(3) 经过多个样本的测试之后, 可计算出改进后的算法比原始的 Image Quilting 算法平均快约 1.097 倍。

结束语 本文提出了一种基于自相似匹配的纹理合成的改进算法, 并将改进后的 Image Quilting 算法应用于多种类型图案的纹理合成。基于输入的不同纹理样本, 该算法可获得结构性较强、边界缝合较好的合成结果图像, 提高了处理效率, 实现了更多图案的纹理合成效果。在今后的工作中, 将着重对合成的细节信息进行处理, 对纹元结构性分布、密度进行优化, 以进一步提高合成速度和合成质量。此外, 从矢量的角

度进行纹理合成, 将图像信息进行矢量化处理以及将该算法扩展到更多领域也是需要重点研究的方向。

参考文献

- [1] 杜常青, 钱文华. 二维纹理合成算法优化研究[J]. 计算机科学, 2013, 40(4): 314-316.
- [2] EFROS A A, FREEMAN W T. Image Quilting for Texture Synthesis and Transfer[C]// Proceedings of the 28th Annual Conference on Computer Graphic Sand Interactive Techniques. 2001: 341-346.
- [3] KWATRA V, SCHODL A, ESSA I. Graph-cut Textures: Image and Video Synthesis Using Graph Cuts[J]. Proceedings of the ACM Transactions on Graphics, 2003, 22(3): 277-286.
- [4] COHENMF, SHADEJ, HILLERS, et al. Wang tiles for image and texture generation [J]. ACM Transactions on Graphics, 2003, 22(3): 287-294.
- [5] 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.
- [6] 孟春芝, 何凯, 张伟伟. 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.
- [7] 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.
- [8] 岳晓菊, 康宝生, 闫丽君. 利用相关性原理纹理合成的改进算法[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(10): 190-192.
- [9] 潘璐璐, 延伟东, 郑红婵. 基于多尺度局部自相似性和邻域嵌入的超分辨率算法研究[J]. 西北工业大学学报, 2015(6): 1014-1019.
- [10] 胡修兵. 异源图像匹配自相似性测度的快速算法[J]. 科技创新与应用, 2017(6): 102.
- [11] 穆晓敏, 杨倩, 王植存. 图像的自相似性研究[J]. 郑州大学学报(理学版), 2005, 37(2): 67-69.
- [12] 林定, 陈崇成, 唐丽玉, 等. 基于 Image Quilting 算法的纹理合成[J]. 系统仿真学报, 2008(S1): 381-384.
- [13] 丛波. 基于 MATLAB 的数字图像处理技术及应用[J]. 中国科技信息, 2011(5): 85-86.
- [14] NOVOSEL J, WANG Z, JONG H D, et al. Locally-adaptive loosely-coupled level sets for retinal layer and fluid segmentation in subjects with central serous retinopathy[C]// IEEE, International Symposium on Biomedical Imaging. IEEE, 2016.
- [15] WANG T, JI Z, SUN Q, et al. Label propagation and higher-order constraint-based segmentation of fluid-associated regions in retinal SD-OCT images[J]. Information Sciences, 2016, 358(C): 92-111.
- [16] TOMASI C, MANDUCHI R. Bilateral filtering for gray and color images[C]// IEEE Computer Society, 1998: 839-846.
- [17] LI K, WU X, CHEN D Z, et al. Optimal surface segmentation in volumetric images—a graph-theoretic approach[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2006, 28(1): 119-134.
- [18] GARVIN M K, ABRÁMOFF M D, KARDON R, et al. Intraretinal layer segmentation of macular optical coherence tomography images using optimal 3-D graph search[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2008, 27(10): 1495-1505.
- [19] BOGUNOVIĆ H, SONKA M, KWON Y H, et al. Multi-surface and multi-field co-segmentation of 3-D retinal optical coherence tomography[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2014, 33(12): 2242-2253.
- [20] 樊鲁杰, 孙延奎, 张田, 等. 光学相干层析视网膜体数据的三维分割[J]. 中国图象图形学报, 2013, 18(3): 330-335.
- [21] BOYKOV Y, KOLMOGOROV V. An experimental comparison of min-cut/max-flow algorithms for energy minimization in vision[J]. Tissue Engineering, 2005, 11(12): 1631-1639.
- [22] 牛四杰, 陈强, 陆圣陶, 等. 应用多尺度三维图搜索的 SD-OCT 图像层分割方法[J]. 计算机科学, 2015, 42(9): 272-277.
- [23] 王茜, 彭中, 刘莉. 一种基于自适应阈值的图像分割算法[J]. 北京理工大学学报, 2003, 23(4): 521-524.
- [24] CARASS A, LANG A, SWINGLE E K, et al. Automatic segmentation of microcystic macular edema in OCT[J]. Biomedical Optics Express, 2015, 6(1): 155-169.

(上接第 192 页)