

# 结合图像细节特征的全局优化纹理合成

肖春霞<sup>1),2)</sup> 黄志勇<sup>2)</sup> 聂勇伟<sup>2)</sup> 刘 梦<sup>2)</sup> 何发智<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>(武汉大学软件工程国家重点实验室 武汉 430072)

<sup>2)</sup>(武汉大学计算机学院 武汉 430072)

**摘 要** 提出了一种结合图像细节特征的全局优化纹理合成算法. 作者利用非线性分解方法获取纹理细节作为特征图, 将其作为纹理图像一个新的信息通道来引导纹理合成. 联合图像细节信息通道和颜色通道, 在图像上建立了一个全局的纹理合成能量方程, 采用最大期望值算法迭代优化求解出一个全局的能量最小值. 在全局优化算法中, 构建样本纹理和待合成纹理之间的各个信息通道直方图匹配算法, 进一步提高纹理合成的质量. 文中同时给出了结合细节特征的图像和视频纹理合成算法, 实验结果表明, 文中的方法较好地解决了纹理合成中合成的纹理图像结构不连续或特征结构容易断裂等问题.

**关键词** 纹理合成; 全局优化; 最大期望值算法; 双边滤波器; 图像修复

中图法分类号 TP391

DOI号: 10.3724/SP.J.1016.2009.01196

## Global Texture Optimization Incorporating with Image Detail

XIAO Chun-Xia<sup>1),2)</sup> HUANG Zhi-Yong<sup>2)</sup> NIE Yong-Wei<sup>2)</sup> LIU Meng<sup>2)</sup> HE Fa-Zhi<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>(State Key Laboratory of Software Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072)

<sup>2)</sup>(School of Computer, Wuhan University, Wuhan 430072)

**Abstract** This paper presents a new global texture synthesis method incorporating with image detail. The image detail extracted using the no-linear method is used as a new channel for guiding the texture synthesis. Integrating the image detail with the color channels, the authors build a global energy function on the image, and the function is optimized using Expectation Maximization. They further improve the texture quality by applying image detail and color histogram matching techniques. Both image and video synthesis methods are presented in this paper. Experiments on a wide variety of image and video synthesis examples demonstrate the advantages of the proposed method over existing techniques: keep the synthesized texture continuously, and the broken structure of the texture are avoided.

**Keywords** texture synthesis; global optimization; expectation maximization; bilateral filtering; image completion

## 1 引 言

基于样本的纹理合成技术依据给定的小块样本

纹理, 在二维平面、三维几何表面或三维实体上生成新的大块纹理图案. 它要求新生成的纹理在视觉上类似于样本纹理, 结构上连续平滑, 同时在细节上具备充分的变化, 不存在明显的重复感. 由于基于样本

收稿日期: 2008-08-12; 最终修改稿收到日期: 2009-01-04. 本课题得到国家自然科学基金(60803081)、浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室开放课题(A0808)、武汉大学软件工程国家重点实验室开放课题(SKLSE2008-07-08)、教育部高等学校博士点基金新教师项目(200804861038)、湖北省自然科学基金(2008CDB350)资助. 肖春霞, 男, 1976年生, 博士, 副教授, 主要研究方向为数字几何处理、图像视频处理、计算机动画. E-mail: cxxiao@whu.edu.cn. 黄志勇, 男, 1980年生, 博士研究生, 主要研究方向为图像视频处理、计算机图形学. 聂勇伟, 男, 1987年生, 主要研究方向为图像视频处理. 刘 梦, 男, 1987年生, 主要研究方向为图像视频处理. 何发智, 男, 1969年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为计算机辅助设计、计算机图形学等.

的纹理合成技术应用广泛,已成为计算机图形学、计算机视觉和图像处理的一个重要研究领域,大量的文献相继出现<sup>[1-4]</sup>.但是,到目前为止,还没有一种技术能够对所有类型的纹理都取得很好的效果,如何更快更有效地合成纹理以及发掘更多的应用仍然是一个亟待解决的具有挑战性的问题.

在现有的多种纹理合成算法中,Kwatra 等人<sup>[3]</sup>基于 MRF 模型,提出了全局优化求解的纹理合成算法,获得了很好的纹理合成效果.它把整个需要被合成的大块纹理作为一个整体,使用最大期望值算法(Expectation Maximization, EM)求解全局的纹理合成能量函数从而得到优化的纹理合成结果.这种方法能够有效减小区域生长算法中普遍存在的在生长过程中误差积累的问题,并且通过改造其能量函数,易于实现用户对合成效果的控制.这个基于优化的纹理合成方法最近被 Kopf 等人<sup>[4]</sup>推广到实体纹理合成.

但该算法的一个主要问题是在相邻块的边界处容易产生图像的不连续现象,在结构性很强的纹理中,即使采用优化算法来减少邻接块之间的误差也难以达到满意的合成效果,合成纹理的结构或特征容易发生断裂.尤其在视频纹理合成中,这种优化方法如果没有考虑到视频样本的结构信息,则运动特征容易出现不连续的现象将更明显.同时由于基于 EM 的能量优化是采用加权平均的方法,因此导致合成纹理图像模糊或纹理图案呈单调的重复也是一个重要的问题.此外,纹理优化采用的循环迭代也导致该算法的效率较低.

为解决以上问题,本文提出了一种结合图像细节特征的全局优化纹理合成算法.通过计算出体现了纹理图像内的结构特征的细节特征,在细节特征辅助下的纹理合成可以有效减少合成图像中纹理特征断裂的现象,从而有效提高合成质量.我们利用非线性分解方法获取纹理细节作为特征图,将其作为纹理图像一个新的信息通道.联合图像细节信号通道和颜色通道,我们在图像上建立了一个全局的纹理合成能量方程,并采用最大期望值算法迭代优化求解出一个全局的能量最小值.在全局优化算法中,受文献[4-5]中的算法启示,为了使合成纹理保持样本纹理的全局统计属性,我们构建样本纹理和待合成纹理之间的各个信号直方图匹配算法,通过直方图匹配和邻域匹配,进一步提高纹理合成的质量.本文同时给出了结合细节特征的图像和视频纹理合成

算法,通过以上算法,我们的方法较好地解决了纹理合成中纹理图像不连续、纹理结构或特征容易断裂等情况.

## 1.1 相关工作

纹理合成到现在为止已有很多方法,大致可以分为两大类:参数化方法<sup>[5]</sup>和非参数化方法<sup>[6]</sup>.参数化方法基于样本纹理为待合成纹理构造一个参数化模型,这种方法通常只能合成同质纹理和随机纹理,应用面不广.目前流行的非参数化方法纹理合成方法都是基于 MRF(Markov Random Field)模型的.该模型认为,纹理具有局部统计相似特征,局部区域的纹理特征由其邻域所决定,且跟其具体的位置无关,较参数化方法而言,非参数化方法能处理纹理的范围更广.而目前为止,基于 MRF 模型的纹理合成方法大致又可分为如下几种类型:基于像素的纹理合成<sup>[7-10]</sup>、基于块的纹理合成<sup>[11-12]</sup>、基于外观的纹理合成<sup>[13]</sup>以及基于优化的纹理合成<sup>[3-4]</sup>.基于像素的合成方法其合成效果往往在视觉上比较连续,但因为其计算方法局部性太强,因此其合成结果不容易保持纹理中的结构信息;而基于块的方法能较好地保持纹理的结构特征,但它却容易在块和块之间产生视觉上的裂缝.基于外观的纹理合成<sup>[13]</sup>则用包含非局部的信息例如特征、辐射传递等数据等替换与常用的基于邻域块逐点颜色匹配,但该算法仍然是基于像素的,由于缺少全局优化,因此仍然有基于像素纹理合成的一些缺点.而文献[3]基于 MRF 模型,提出了一个利用全局优化求解的纹理合成算法,它把整个需要被合成的大块纹理作为一个整体,使用最大期望值算法(EM)求解全局的纹理合成能量函数来得到优化的纹理合成结果,并且通过改造其能量函数,易于实现用户对合成效果的控制,获得了较好的效果.由于纹理优化方法<sup>[3]</sup>的合成速度较慢,Huang 等<sup>[14]</sup>提出一种可运行于图形处理单元(GPU)的并行纹理合成算法,对纹理优化进行了加速,能很好地提高合成速度,且不降低合成质量;Han 等<sup>[15]</sup>也提出了算法对纹理优化进行了加速,且将其推广到曲面的纹理合成.

基于样本的 2D 纹理合成方法现也已被推广到 3D 纹理合成,即通过输入 3D 的纹理样本合成 3D 的纹理<sup>[8,12,16]</sup>,3D 纹理其第三维为时间维.基于 2D 样本合成 3D 纹理的实体纹理合成算法最近也获得了较为广泛的研究<sup>[4,17]</sup>.此外,将 2D 纹理合成到任意拓扑曲面的曲面纹理合成方法也获得了广泛的研

究,见文献[18]及其中相关参考文献。

由于纹理的特征图提供了局部的纹理信息,因此通过特征图的引导能得到更好的纹理合成效果<sup>[13,19-20]</sup>,能减少相邻块的边界处容易产生图像的不连续、纹理结构或特征容易发生断裂等现象。Zhang 等<sup>[19]</sup>利用二值化 texton mask 作为颜色纹理合成的一个控制通道,但是 texton mask 需要人工抽取。Wu 等<sup>[20]</sup>注意到以往的纹理合成方法通常以纹理块之间的 RGB 颜色空间距离作为搜索纹理块的度量,此度量并不能很好地反映图像中人眼敏感的结构特征。为此作者在文中提出了基于 feature map 的纹理合成方法,对纹理样图提取出相应的 feature map,此 feature map 仍然为二值图(binary image),主要体现了纹理图像内的主要结构特征。在 feature map 辅助下的纹理合成可以减少合成图像中纹理特征断裂的现象,从而有效提高合成质量,但如果选择的块本身就不能很好地与相邻块匹配,则使用最好的优化算法来减少邻接块之间的误差也达不到满意的合成效果。与文献[20]相似,Lefebvre 等<sup>[13]</sup>也利用二值化的纹理特征掩码,并利用特征之间的有符号的距离来使得合成纹理中保持更好的纹理结构。与现有的方法不同,我们利用非线性分解方法获取纹理细节作为特征图,此特征图不是二值化的特征,更有利于纹理块的匹配和计算纹理全局统计属性。

## 2 基于 EM 算法的图像纹理合成

Kwatra 等<sup>[3]</sup>提出了一个全局优化求解的纹理合成算法,它应用 EM 算法迭代优化求解如下的纹理合成能量方程:

$$E_t(X, \{e_p\}) = \sum_{p \in X^+} \|x_p - e_p\|^2 \quad (1)$$

其中,  $E_t$  为全局纹理合成能量方程,  $X$  为待合成的输出纹理,  $x_p$  为  $X$  上  $p$  点的邻域,  $e_p$  为样本纹理中  $p$  点所对应的邻域,  $X^+$  为  $X$  的一个子集。

EM 算法迭代求解过程可分为两个步骤: E 步骤和 M 步骤。在 E 步骤中, 固定  $e_p$  不变, 根据能量最小要求优化  $X$ , 即设定样本纹理和输出纹理间的对应关系不变, 优化所输出的平面大纹理上的纹理值; 而 M 步骤则为固定  $X$  估计  $e_p$ , 即设定大纹理上的像素的纹理值不变, 重新寻找更优的对应关系。E 步骤和 M 步骤依次进行, 多次迭代得到优化的全局解。

为了减少冗余计算, 提高纹理合成的速度, 同时为保持纹理结构信息, 算法在纹理上分块进行。在 EM 纹理合成算法中,  $X^+$  只是  $X$  中的一个小子集, 选取以待合成图像  $X$  中的一个稀疏网格点为中心的邻域集合来计算方程(1)中的能量, 以这些稀疏的网格点为中心的相邻的邻域块间有部分重叠区域。重叠区域的纹理像素值在 E 步骤时被重新计算。

为了使优化过程更加鲁棒, 能量方程(1)中的平方项  $\|x_p - e_p\|^2$  可用  $\|x_p - e_p\|^r$  替换, 其中  $r < 2$ 。采用迭代重新加权最小平方算法可得

$$\|x_p - e_p\|^r = \|x_p - e_p\|^{r-2} \|x_p - e_p\|^2 = \omega_p \|x_p - e_p\|^2 \quad (2)$$

能量方程(1)改写为

$$E_t(X, \{e_p\}) = \sum_{p \in X^+} \sum_{u \in N_p} \omega_{p,u} (x_{p,u} - e_{p,u})^2 \quad (3)$$

其中,  $N_p$  为  $p$  的邻域,  $\omega_{p,u}$  就是式(2)中的  $\omega_p$ 。假定  $\omega_{p,u}$  在整个优化过程中固定不变, 将式(3)求倒数并让其等于零, 则得到了如下的公式:

$$p = \frac{\sum_{u \in N_p} \omega_{u,p} e_{u,p}}{\sum_{u \in N_p} \omega_{u,p}} \quad (4)$$

这里  $e_{u,p}$  表示邻域  $e_u$  中对应  $p$  的点, 即  $p$  点的像素值是来自不同的  $e_p$  中的像素值的加权平均。

## 3 结合细节特征的图像纹理合成

基于块的纹理合成方法的一个主要问题是在相邻块的边界处容易产生图像的不连续、纹理结构或特征容易发生断裂。在纹理合成中, 传统的块匹配的计算方法只考虑了合成纹理中块和样本纹理中块之间的颜色的差异; 对一些有显著结构特征的纹理, 在纹理特征映射的引导下纹理合成是一种非常有效的方法。由于纹理特征映射提供了非局部的特征信息, 结合纹理特征的纹理块的匹配能有效地提高纹理合成的效果。在本文中, 不同于以往使用的二值特征映射<sup>[13,19-20]</sup>的方法, 我们抽取样本纹理的细节层, 将细节层作为纹理块相似性匹配的一个新的通道, 同时, 利用细节层直方图匹配进一步提高了纹理合成的质量。

### 3.1 纹理细节抽取

在提供非局部信息的特征图的辅助下, 一些纹理可以被合成得更好, 因此为了处理具有强结构特征的纹理, 我们将特征图作为一个额外通道, 用于纹

理块的匹配计算. 为有效地抽取图像的特征图, 我们采用非线性分解算法抽取纹理图像的纹理细节作为特征图. 具体是采用能平滑图像并保持图像边缘的双边滤波器, 将输入图像分解为大尺度图像和细节图像, 而细节图像作为我们所需要的特征图.

双边滤波器最初由 Tomasi 等人<sup>[21]</sup>提出, 它是一种保持边缘特征的滤波器. 双边滤波的过程实际上是加权平均的过程: 图像上像素  $p$  的值受到它邻域里的每个点的影响: 空间上离点  $p$  越远的点对它的作用越小, 与点  $p$  的像素值相差越大的点对它的影响也越小. 对点  $p$  采用双边滤波其值为

$$J_p = \frac{1}{K_p} \sum_{q \in \Omega} I_q f(\|p - q\|) g(\|I_p - I_q\|) \quad (5)$$

其中,

$$K_p = \sum_{q \in \Omega} f(\|p - q\|) g(\|I_p - I_q\|).$$

$f$  和  $g$  分别是关于像素空间位置差别和颜色值差别的滤波函数. 算子  $f$  被称为空间滤波核,  $g$  被称为边界滤波核, 一般  $f$  是以  $p$  为中心的空间高斯函数,  $g$  是以  $p$  的像素值为中心的高斯函数.  $\Omega$  是  $p$  的邻域,  $q$  是  $\Omega$  中的一点.  $I_p$  和  $I_q$  分别是  $p$  和  $q$  的像素值.  $K_p$  为归一化因子, 为双边滤波算子  $f \cdot g$  的权和. 因为双边滤波算子  $f \cdot g$  会随着  $p$  与  $q$  的空间距

离的变大而变小, 同时随着  $p$  与  $q$  的像素值的差别的变大而变小, 因此对图像进行滤波的同时有效保持了图像边缘.

我们实际使用的是文献[22]中提出的一种使用两个卷积运算快速逼近双边滤波器的方法来替代非线性双边滤波器运算<sup>[21]</sup>. 我们首先将原图像(彩色图像)转化亮度图, 将亮度图经双边滤波器滤波后得到大尺度图像(large scale image); 然后用亮度图除以大尺度图即得到原图像的细节图. 在实际计算中, 我们也可用亮度图的  $\log$  域的值和大尺度图的  $\log$  域的值进行计算, 此时细节图由亮度图的  $\log$  域值减去大尺度图的  $\log$  域. 这样我们就可抽取出图像的细节图, 将其作为 EM 纹理合成中的一个附加通道来处理.

纹理细节的抽取具体算法如下: 设  $G_0$  为原图像,  $G_i$  为  $G_0$  的对应的亮度图. 我们采用双边滤波器过滤对  $G_i$  进行滤波, 得到大尺度图像为  $G_f$ . 通过灰度图  $G_i$  除以图  $G_f$  得到原图像  $G_0$  的细节图  $G_d$  (detail layer), 如图 1 所示, 该细节图不但保留了表示图像的结构信息, 且与二值的纹理特征不同, 其为分段光滑的图像细节信息.  $G_d$  作为纹理的本质特征, 我们将其作为一个新的通道, 用于纹理块的匹配.

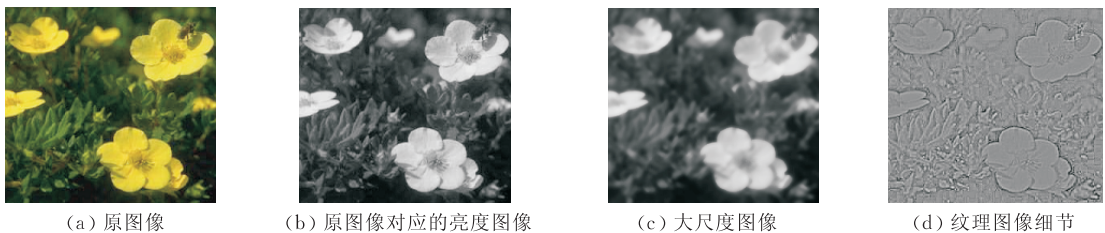


图 1 图像的细节抽取

### 3.2 结合纹理细节的纹理块匹配

获取纹理的细节层后, 每个像素的值由其颜色 ( $R, G, B$ ) 和细节 ( $D$ ) 共 4 个通道所构成 ( $R, G, B, \alpha D$ ), 其中  $\alpha$  为细节层的权重, 在本文的所有例子中, 我们将  $\alpha$  设定在 1~2 之间. 为了与  $R, G, B$  颜色通道匹配, 我们将细节 ( $D$ ) 的值缩放到  $[0, 255]$ . 基于像素的 4 维表示方法, 我们采用 L2 范数 (SSD) 计算出纹理块之间的相似性, 用于纹理的全局优化 (式(1)). 由于纹理特征映射提供了非局部的特征信息, 当提取纹理图像细节层后, 通过比较每一个像素的颜色值和特征值, 会更有效地加强对纹理图像中高频内容和强边缘的匹配, 更有效避免合成纹理的特征结构发生断裂和不连续现象.

Wu 和 Yu<sup>[20]</sup>注意到如果选择的块本身就不能很好地与相邻块匹配, 则使用最好的优化算法来减少邻接块之间的误差也达不到满意的合成效果. 以往的纹理合成方法通过以纹理块之间的  $RGB$  颜色空间距离作为搜索纹理块的度量, 此度量并不能很好地反映图像中人眼敏感的结构特征. 为此他们提出了基于特征图 (feature map) 的纹理合成方法, 对纹理样图提取出相应的二值的特征映射图 (binary feature map), 基于二值特征, 计算出纹理结构的相似性对纹理块进行匹配, 再对匹配的结果利用变形方法对特征进行调整校准, 合成连续的纹理特征, 然后对其它区域进行合成.

而我们抽取的纹理细节层, 不但保留了表示纹

理结构信息的图像边缘信息,而且得到图像细节信息是连续的.相对于纹理二值特征,此细节层更能体现纹理图像内在的结构特征,其便于纹理块之间的比较.我们将结合细节层纹理块匹配集成到优化函数中,在细节层辅助下,迭代地对纹理进行优化,可以有效减少合成图像中纹理特征断裂的现象,从而有效提高合成质量.此外,图像细节层与

二值特征比较,其最大优点是能对样本纹理和待合成纹理的细节作直方图匹配,更进一步提高纹理合成质量,同时加快收敛速度,我们将在 3.3 节中予以介绍.

如图 2 所示,结合纹理细节的纹理优化比直接颜色匹配优化获得了更好的结果,纹理图像的显著结构得以更好地保持.

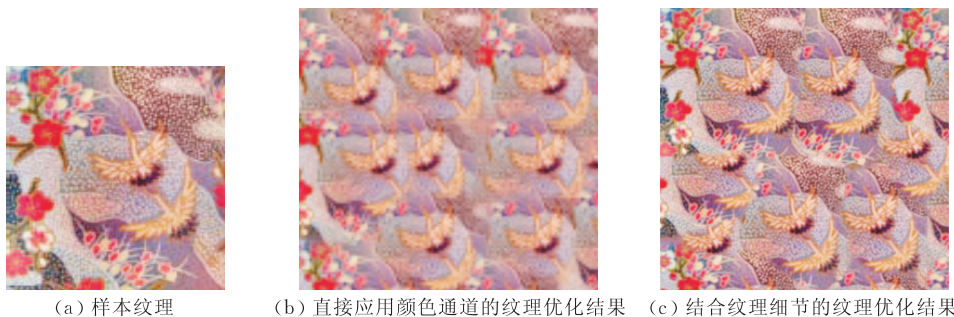


图 2 结合图像细节匹配的优化纹理合成

### 3.3 细节直方图匹配

上述的 EM 纹理合成方法,在优化过程即 E 步骤中,因为能量方程仅仅只是度量了局部邻域的相似性,而没有考虑到全局统计特性,容易收敛到一个局部最小化的结果.这就有可能导致纹理合成达到一个局部最优,使得纹理合成结果和样本在全局统计特性上难以保持一致;同时会使合成纹理出现特征模糊现象.受文献[4-5]中的算法启示,为了使合成纹理保持样本纹理的全局统计属性,我们构建样本纹理和待合成纹理之间的各个信号直方图匹配算法,通过直方图匹配和邻域匹配,进一步提高纹理合成的质量.在优化过程中,为样本纹理和合成图像或视频纹理的每个信号通道都创建并跟踪管理一个 16 格的直方图(样本的各个信号通道的直方图只需计算一次).当更新图像或视频上某个点时,检查每个参与到加权计算中去的样本像素点,当发现某个像素会使合成纹理和样本纹理的直方图的差别增大时,就减小该像素在加权算法中的权重,使合成的结果在全局统计信息上与样本纹理的全局统计信息保持一致,从而提高合成纹理的质量.

用  $H_{x,j}$ ,  $H_{e,j}$  表示合成纹理和样本纹理的第  $j$  个通道上的直方图,当只考虑纹理图像的 RGB 3 个通道时,  $j$  的最大取值为 3;当细节信息作为一个附加通道时,也应考虑细节信息的直方图,则此时  $j$  的最大取值为 4.  $H(b)$  表示直方图  $H$  中第  $b$  格的值.  $b_j(c)$  表示直方图  $H_{x,j}$  和  $H_{e,j}$  中包含像素值  $c$  的那

一格.这样,我们将式(4)中的权值改成

$$\omega'_{n,i} = \frac{\omega_{n,i}}{1 + \sum_{j=1}^{K=4} \beta_j \max[0, H_{x,j}(b_j(e_{n,i})) - H_{e,j}(b_j(e_{n,i}))]} \quad (6)$$

其中,  $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 1$ , 并且  $\beta_4$  是一个可调整的参数,在实验中,设置  $1 < \beta_4 < 2$  可以获得较好的合成结果.

式(6)可以按如下方式理解.当参与加权平均的某个样本像素  $e_{n,i}$  有很高的权重时,它会将点  $i$  拉向  $H_{x,j}$  中的第  $b_j(e_{n,i})$  格,使得合成纹理的直方图统计值拉向样本纹理的直方图统计值;这样有利于合成纹理在全局统计信息上与样本纹理保持一致.然而,当合成纹理的直方图在该格的值大于样本纹理在该格的值时,如果不采取相关措施,就会使前者值更大,因而使得两个直方图变得更加不同.所以我们采用式(6)对后一种情况进行了有效的控制,当  $H_{x,j}(b_j(e_{n,i})) > H_{e,j}(b_j(e_{n,i}))$  时,我们减小该像素点的权重.

直方图匹配使得合成纹理在全局统计特性上与样本图像相同,而邻域匹配保证了两者的局部相似性.直方图匹配和邻域匹配相结合使得纹理合成的收敛速度显著提高,同时由于结合了细节直方图,样本纹理上的特征在合成纹理上得以很好的保持.如图 3 所示,同时考虑了细节和颜色直方图的纹理合成结果显著地提高了纹理合成的质量.

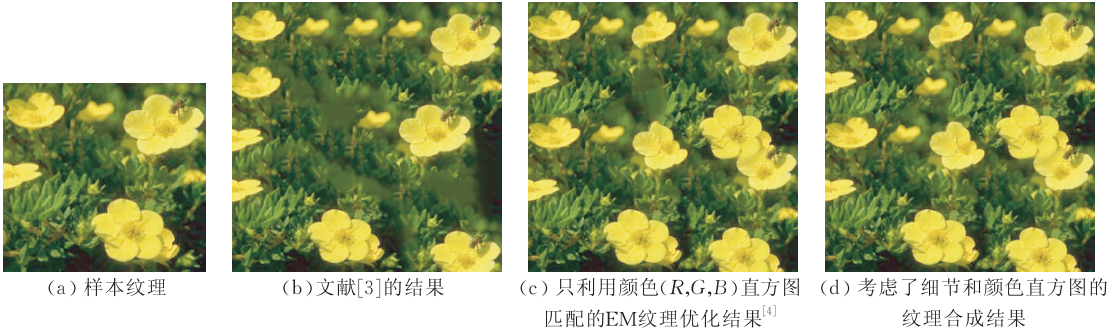


图 3

如果图像细节采用二值特征,由于二值特征的特点,其直方图难以表示纹理特征的全局统计特性.图像细节层与二值特征比较,由于其为连续的图像细节信息,因此其直方图更能有效表示纹理特征的全局统计特性.因此利用图像细节层,其最大优点是能对样本纹理和待合成纹理的细节作直方图匹配,提高纹理合成质量,同时加快收敛速度.

4 结合细节特征的视频纹理合成

我们将结合细节特征的图像纹理合成扩展到视频上.视频纹理合成与图像纹理合成方法的不同主要在于,图像纹理合成中的平面块邻域的匹配,变成了视频纹理合成中的时空立方块邻域的匹配.为保证视频合成结果视觉上的时空连续性,我们将整个视频看作一个三维的立方体,而不是对视频的每一帧进行单独的操作.

具体通过如下方式将基于全局优化的 EM 纹理合成从二维扩展到三维:将整个视频立方体看作一个整体,视频立方体里的一个像素点  $p$  的邻域  $x_p$  是以  $p$  为中心的宽度为  $\omega$  的立方体.和  $x_p$  距离最近的样本  $e_p$  是同等大小的时空立方体.视频立方体的某个邻域的能量则为邻域立方体  $x_p$  和  $e_p$  之间的距离,而视频立方体的能量就是所有邻域的能量之和,二维图像纹理合成方法(式(1))则被推广到了三维上.视频上的点  $p$  的像素值仍由式(4)计算,但  $N_p$  变成了以  $p$  为中心的立方体,  $\omega_{u,p}$  和  $e_{u,p}$  也需做相应的简单调整.

在视频纹理合成中,采用视频细节特征直方图匹配方法同样在一定程度上由于局部最优化,使得最终合成结果在视频局部出现模糊及视频特征断裂等问题.我们在视频纹理合成中采用与图像合成中类似的方法,将视频纹理细节匹配和视频纹理细节直方图匹配应用于视频纹理合成中,使最终合成视

频纹理与样本视频纹理的颜色、纹理细节直方图统计信息保持一致,从而提高视频纹理合成结果的质量.

在视频纹理合成中,我们将视频样本看作一个整体,统计出视频样本的一个有 24 格的细节和颜色的直方图信息.在 EM 迭代过程中,同样统计出合成的视频纹理的 24 格直方图信息,在每一次迭代中由直方图匹配更新这个合成视频的纹理直方图,使用直方图统计信息来调整 E 步中合成的结果,最终合成视频纹理与样本视频纹理的直方图统计信息保持一致.

由于采用 EM 方法每次迭代时,需要计算出合成视频纹理的细节,并计算出其直方图,由于视频数据量通常很大,因此,当引入视频细节信息作为特征图来辅助视频纹理合成时,视频细节信息的快速提取成为视频纹理合成中的待解决的关键问题之一.本文采用文献[23]中的双边网格技术思想,可以实时地实现视频细节信息的提取.

4.1 视频细节的快速抽取

作为图像细节提取工具的双边滤波器是一种非线性滤波器,其主要的缺点是执行速度慢.我们采用文献[23]中提出的双边网格方法来实现视频细节信息的快速提取.对于视频单帧,双边网格法用一个三维数组  $\Gamma(x, y, I(x, y))$  来描述二维图像的数据结构,其中  $(x, y)$  对应像素点在图像中的位置,  $I(x, y)$  对应像素点的亮度值.这样在图像中即使两个像素点相隔很近,但如果他们的亮度值相差很大的话,他们在网格上的欧氏距离就会很大(图 4).由于在网格上的平滑函数(如高斯平滑)在图像域上是分段光滑的,这样就起到了保存边界的作用.通过此三维数组,在网格上双边滤波器就转化为一个三维的卷积运算,可以直接用快速傅立叶变换加速.在实际应用中,我们感兴趣的大部分都是低频部分的信号,所以我们可以对图像进行粗糙的取样,而不丢失

精确性. 这样双边网格法就可以构造为  $F(\lceil x/S_s \rceil, \lceil y/S_s \rceil, \lceil I(x, y)/S_r \rceil)$ , 其中  $\lceil \cdot \rceil$  是取整符,  $S_s$  和  $S_r$  分别是空间域和亮度域的取样率. 通过取样使得网格里的元素远远小于图像像素点的个数, 大大降低了处理量, 进一步提高了速度. 另外, 双边网格法还适合用 GPU 加速, 从而可以达到实时处理. 通过使用双边网格方法, 并直接在 GPU 上进行运算, 我们可以实时提取出视频纹理的细节信息. 例如处理 2M 像素的视频, 普通双边滤波器算法需要 20min, 而采用双边网格只需 5s, 如采用 GPU 方法, 则只需要 76ms(文献[23]中个人主页中提供算法的原代码).

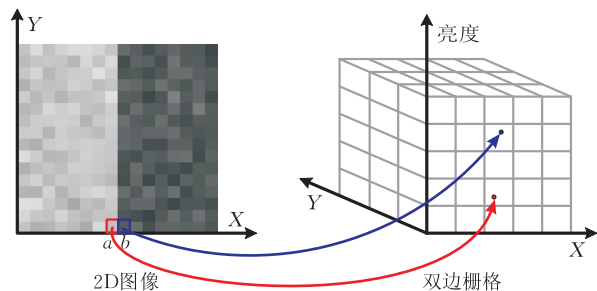


图 4 图像和视频的快速双边网格滤波

## 5 实验结果及分析

我们在 PC 机上, 基于 C++ 语言实现了本文算

法. 其程序运行环境是 Windows XP, 计算机配置为 IBN Intel(R) CPU (1.99GHz), 1.5GB 内存. 我们的算法所耗时间主要集中在 EM 优化迭代上.

为了使 EM 纹理合成需要的时间更短, 同时减少邻域存储量, 减少内存开支, 我们对样本的邻域向量进行 PCA 投影. 例如对于  $8 \times 8$  的邻域, 可以从 192 维降低到 10~30 维. 因此大大地减少了数据量, 从而减少了最近邻域搜索时间. 我们使用 ANN<sup>①</sup> 对样本中经过 PCA 投影的所有邻域建树, 来加快最近邻域搜索的速度. ANN 以  $\epsilon$  为参数, 返回不会比精确最近邻域距离大  $(1+\epsilon)$  倍的近似邻域. 在本文所有的例子中, 我们使用  $\epsilon=2$ .

使用本文中提出的结合图像细节特征的全局纹理优化算法可以有效地提高纹理合成的质量. 从图 3 中可以看出, 文献[3]中提出的 EM 纹理合成方法和文献[4]采用的颜色直方图全局统计信息的 EM 纹理合成方法, 由于没有考虑纹理细节和局部最小化的原因, 使得合成的结果出现局部模糊的情况. 而使用本文中提出的同时考虑了细节及颜色直方图的合成结果明显优于这两种方法. 同样在图 5 中, 由于叶子样本具有粗细不一的特征结构, 结合其特征细节的纹理优化较好地避免了纹理合成中纹理图像结构特征容易断裂等问题.

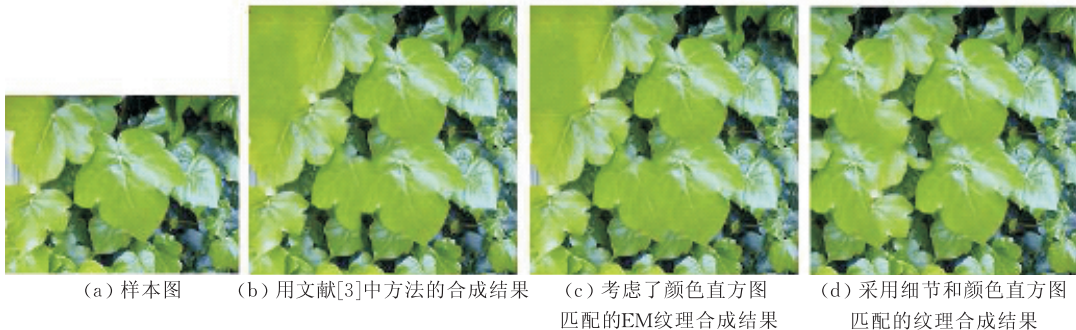


图 5

图像修复是计算机图形学、图像处理的一个研究热点. 纹理优化算法也可用于图像修复, 即将图像上现有的纹理作为样本, 将图像上破损的区域作为待合成区域, 采用纹理合成的思想合成出破损区域的纹理, 则达到了图像修复的目的. 在图像修复中使用本文中提出的考虑纹理细节和细节直方图匹配的方法可以有效改善图像修复结果的质量. 图 6 我们给出了基于优化方法的图像修复结果, 并与只采用颜色通道优化的结果进行了比较. 从图 6 中可以看出, 我们的方法避免了纹理模糊, 较好地修复出了图像的结构. 同时, 由于在破损区域的边界区域利用纹

理块的重叠, 采用能量方程(式(1))优化时保持了修复结果在边界上连续.

图 7 给出了利用视频纹理合成思想对视频进行修复的结果, 并与文献[24]提出的算法进行了比较. 文献[24]直接利用视频的颜色通道和视频运动信息, 采用 EM 迭代优化方法对视频进行修复. 本文中考虑纹理细节和细节直方图匹配方法得到的结果明显优于文献[24]中的方法. 从图中可以看出, 本文

① Mount D M, Arya S. ANN. Library for approximate nearest neighbor searching [ED/OL], 2006. <http://www.cs.umd.edu/~mount/ANN>

的方法得到的修复结果保持了较为完整的视频运动纹理结构,同时避免视频出现模糊等负面效果.

在图8中给出了纹理样本的二值特征图(图8(d))和分段光滑的细节特征图(图8(e)),其中图8(d)为经过边缘检测方法得到的二值特征图.从图9中,可以看出使用了细节特征图的合成结果(d)明显

优于未使用特征图的合成结果(a)和(b);同时也好于使用了二值特征图进行优化得到的结果(c),其主要原因是纹理细节层不但保留连续的纹理结构信息,而且较二值特征而言,基于分段光滑的纹理细节的直方图匹配更有意义,符合纹理图像结构特征的全局统计性.

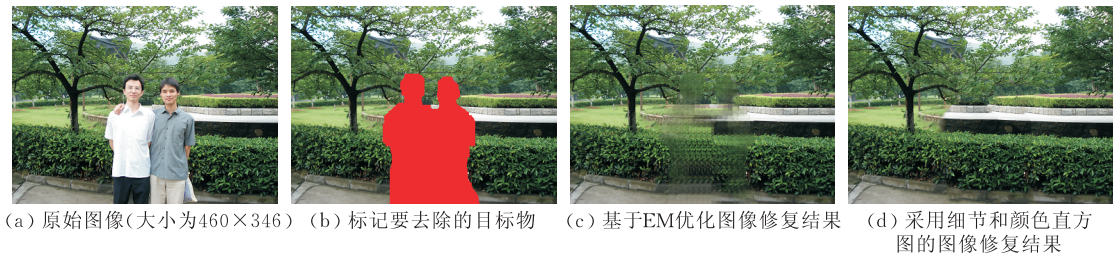


图6 图像中目标物的去除

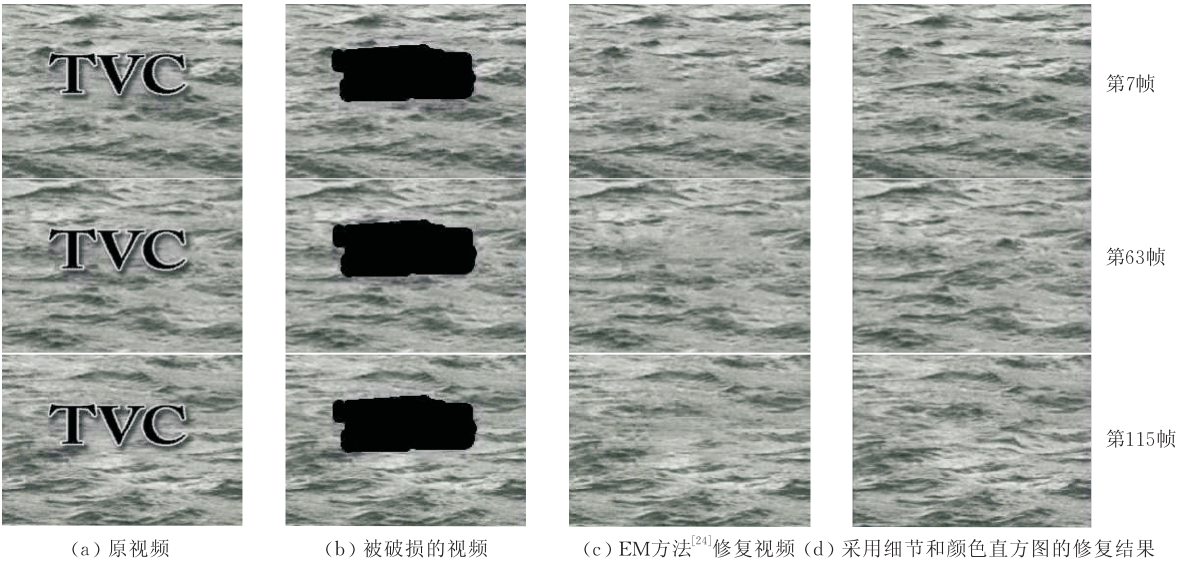


图7 结合图像细节的视频修复



图8

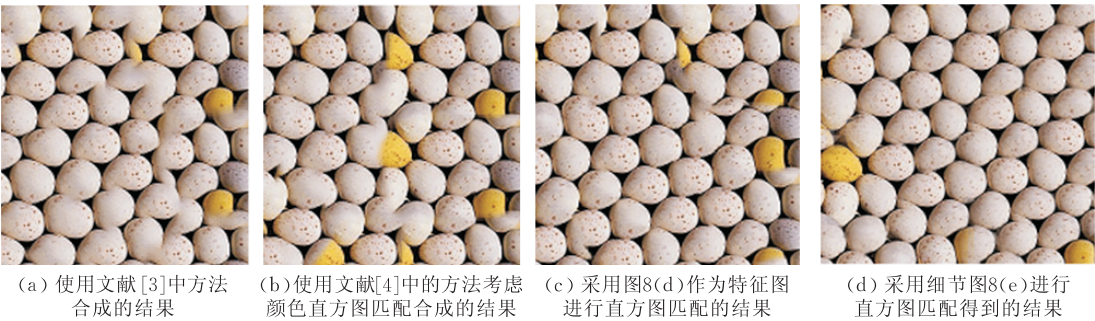


图9 以图8中原始图为样本的合成结果

我们的算法所耗时间集中在 EM 优化上,主要是在最近邻域搜索步骤上. 具体的计算时间与样本的大小、待合成纹理的大小、匹配邻域的大小、PCA 降维以及 ANN 最近邻域搜索中参数  $\epsilon$  的设置有关. 一般说来,将  $100 \times 100$  的样本纹理合成  $400 \times 400$  的纹理时,由于采用直方图匹配算法,加速了能量优化的速度,迭代通常为  $15 \sim 30$  次,所耗费时间为  $5 \sim 10$  min. 如果不采用直方图匹配算法,通常需要迭代  $40 \sim 50$  次才能获得较好的效果.

## 6 结论与展望

本文提出了一种结合图像细节特征的全局优化纹理合成算法. 利用双边滤波算子对图像进行分解获取其纹理细节作为特征图,将其作为纹理图像一个新的信息通道. 联合图像细节信号通道和颜色通道,我们建立了一个全局的纹理合成能量方程,有效地提高了纹理合成的质量. 进一步,我们通过构建样本纹理和待合成纹理之间的各个信号直方图匹配算法,使合成纹理保持样本纹理的全局统计属性,进一步提高纹理合成的质量. 本文同时给出了结合细节特征的图像和视频纹理合成算法. 实验结果表明,我们的方法较好地解决了纹理合成中结构不连续、纹理特征容易断裂等情况.

全局优化求解的纹理合成算法是一种有效的纹理合成算法,但由于 EM 迭代求解时速度较慢,主要耗时在最近邻域搜索方面,虽然现有的 ANN 算法速度较快,但仍然耗时,且建树需要消耗大量内存空间,构建一个更快更有效的邻域搜索算法提高纹理优化的效率是一个有意义的研究方向.

## 参 考 文 献

- [1] Tang Ying, Sun Han-Qiu, Zhang Hong-Xin, Lin Hai, Bao Hu-Jun. Texture synthesis with user-guided variance. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2004, 16(10): 1412-1418(in Chinese)  
(汤颖, 孙汉秋, 张宏鑫, 林海, 鲍虎军. 基于用户控制的纹理合成. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2004, 16(10): 1412-1418)
- [2] Wu Fu-Li. Research on color texture synthesis[Ph. D. dissertation]. Zhejiang University, Hangzhou, 2005(in Chinese)  
(吴福理. 颜色纹理合成技术研究[博士学位论文]. 浙江大学, 杭州, 2005)
- [3] Kwatra V, Essa Irfan A, Bobick Aaron F, Kwatra Nipun. Texture optimization for example-based synthesis. *ACM Transactions on Graphics*, 2005, 24(3): 795-802
- [4] Kopf J, Fu C W, Or D C, Deussen O, Lischinski D, Wong T T. Solid texture synthesis from 2D exemplars. *ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH 2007 issue)*, 2007, 26(3): 2-1-2-9
- [5] Heeger D J, Bergen J R. Pyramid-based texture analysis/synthesis//*Proceedings of the SIGGRAPH'95*. Los Angeles, CA, USA, 1995: 229-238
- [6] De Bonet J S. Multiresolution sampling procedure for analysis and synthesis of texture images//*Proceedings of the SIGGRAPH'97*. Los Angeles, CA, USA, 1997: 361-368
- [7] Ashikhmin M. Synthesizing natural textures//*Proceedings of the ACM Symposium on Interactive 3D Graphics*. Research Triangle Park, NC, USA, 2001: 217-226
- [8] Wei L, Levoy M. Fast texture synthesis using tree structured vector quantization//*Proceedings of the SIGGRAPH*. New Orleans, Louisiana, USA, 2000: 479-488
- [9] Zelinka S, Garland M. Towards real-time texture synthesis with the jump map//*Proceedings of the 13th Eurographics Workshop on Rendering Techniques*. Pisa, Italy, 2002: 99-104
- [10] Lefebvre S, Hoppe H. Parallel controllable texture synthesis//*Proceedings of the ACM SIGGRAPH*. Los Angeles, CA, USA, 2005: 777-786
- [11] Efros A A, Freeman W T. Image quilting for texture synthesis and transfer//*Proceedings of the SIGGRAPH*. Los Angeles, CA, USA, 2001: 341-346
- [12] Kwatra V, Schoedl A, Essa I, Turk G, Bobick A. Graphcut textures: Image and video synthesis using graph cuts//*Proceedings of the SIGGRAPH*. San Diego, CA, USA, 2003: 277-286
- [13] Lefebvre S, Hoppe H. Appearance-space texture synthesis. *ACM Transactions on Graphics (Proc. SIGGRAPH 2006)*, 2006, 25(3): 541-548
- [14] Huang Hao-Da, Tong Xin, Wang Wen-Cheng. Accelerated parallel texture optimization. *Journal of Computer Science and Technology*, 2007, 22(5): 761-769
- [15] Han Jian-Wei, Zhou Kun, Wei Li-Yi, Gong Min-Min, Bao Hu-Jun, Zhang Xin-Ming, Guo Bai-Ning. Fast example-based surface texture synthesis via discrete optimization. *Proceedings of Pacific Graphics, The Visual Computer*, 2006, 22(9): 918-925
- [16] Soatto S, Doretto G, Wu Y. Dynamic textures//*Proceedings of the International Conference on Computer Vision*, 2001 II. Vancouver, British Columbia, Canada, 2001: 439-446
- [17] Jagnow R, Dorsey J, Rushmeier H. Stereological techniques for solid textures. *ACM Transactions on Graphics (Proc. SIGGRAPH 2004)*, 2004, 23(3): 329-335
- [18] Xiao Chun-Xia, Zhao Yong, Zheng Wen-Ting, Peng Qun-Sheng. Texture synthesis for point-sampled geometry based on global optimization. *Chinese Journal of Computers*, 2006, 29(12): 2061-2070(in Chinese)

(肖春霞, 赵勇, 郑文庭, 彭群生. 三维离散点采样表面基于全局优化的纹理合成算法. 计算机学报, 2006, 29(12): 2061-2070)

- [19] Zhang J, Zhou K, Velho L, Guo B, Shum H. Synthesis of progressively-variant textures on arbitrary surfaces//Proceedings of the SIGGRAPH. San Diego, CA, USA, 2003: 295-302
- [20] Wu Q, Yu Y. Feature matching and deformation for texture synthesis. ACM Transactions on Graphics (Proc. SIGGRAPH 2004), 2004, 23(3): 364-367
- [21] Tomasi C, Manduchi R. Bilateral filtering for gray and color

images//Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision. Bombay, India, 1998: 839-846

- [22] Durand F, Dorsey J. Fast bilateral filtering for the display of high-dynamic-range images. ACM Transactions on Graphics (Proc. SIGGRAPH 2002), 2002, 21(3): 257-266
- [23] Chen J W, Paris S, Durand F. Real-time edge-aware image processing with the bilateral grid. ACM Transactions on Graphics (Proc. of SIGGRAPH Conference). 2007, 26: 103
- [24] Wexler Y, Shechtman E, Irani M. Space time completion of video. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2007, 29(3): 463-476



**XIAO Chun-Xia**, born in 1976, Ph. D., associate professor. His research interests include digital geometry processing, image and video editing, computer vision.

**HUANG Zhi-Yong**, born in 1980, Ph. D. candidate. His primary research interests fall in the field of computer graphics with an emphasis on image and video processing, computer

er vision.

**NIE Yong-Wei**, born in 1987, bachelor. His primary research interests fall in the field of computer graphics with an emphasis on image and video processing.

**LIU Meng**, born in 1987, bachelor. His primary research interests fall in the field of computer graphics with an emphasis on image and video processing.

**HE Fa-Zhi**, born in 1969, Ph. D., professor, Ph. D. supervisor. His research interests include CAD(Computer-Aided Design), CG(Computer Graphics).

## Background

This work is partly supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 60803081), State Key Lab of CAD&CG (No. A0808), State Key Laboratory of Software Engineering(SKLSE) (No. SKLSE2008-07-08), Ph. D. Programs Foundation of Ministry of Education of China (No. 200804861038), Natural Science Foundation of Hubei Province (No. 2008CDB350).

Texture synthesis is a useful technique in computer graphics, it synthesize a large scale texture based on a small sample while exhibiting the same stochastic features of the exemplar texture. A variety of methods have been developed to achieve this goal. Synthesis of novel photo-realistic imagery from limited example input is of wide importance in computer graphics. Many example based synthesis approaches rely on the presence of texture. Texture refers to the class of imagery that can be categorized as a portion of an infinite pattern consisting of stochastically repeating elements. This inherent repeatability present in textures is the key behind texture synthesis techniques. These techniques generate output textures that are larger in size than the input sample but perceptually similar to it.

The traditional approach in texture synthesis is to compare an image patch with that of an exemplar. For textures with strong large structures, feature maps can be particularly helpful. It has been shown that some textures can be synthesized better with the aid of feature maps, which provide non-

local feature information. In the authors' method, different from the binary feature maps used in existing methods, the high frequency detail of the texture and its spatial variation are used to improve the synthesis results. By extracting the image detail using the no-linear method, the image detail is used as a new channel for guiding the texture synthesis. Integrating the image detail with the color channels, the authors build a global energy function on the image, and the function is optimized using Expectation Maximization. They further improve the texture quality by applying image detail and color histogram matching techniques. Both image and video synthesis methods are presented in this paper. They have also extended these techniques to allow for image and video completion based on the constrained texture synthesis.

Compared with the latest texture synthesis method using optimization, the authors' method demonstrates the following advantages over existing techniques: keep the synthesized texture continuously, and the broken structure of the texture are avoided. The result of existing methods employ color histogram matching looks more quite similar to the exemplar, but these methods are not good at maintaining the continuity of structural features as well as the shapes of individual objects in the textures. It shows that if the color of the exemplar is similar, the histograms of the existing methods also do not work well, while the detail-aware patch similarity matching makes better results.