

基于联合双边滤波的纹理合成上采样算法

肖春霞^{1),2),3)} 聂勇伟¹⁾ 黄先锋⁴⁾ 赵 勇²⁾ 彭群生²⁾

¹⁾(武汉大学计算机学院 武汉 430072)

²⁾(浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室 杭州 310027)

³⁾(武汉大学软件工程国家重点实验室 武汉 430072)

⁴⁾(武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室 武汉 430072)

摘 要 提出了一个新的纹理合成的上行采样算法,即利用现有的高分辨率的样本纹理作为先验引导条件,对合成的低分辨率的纹理进行插值,获取更好的高分辨率纹理合成结果.该算法的主要思想是基于联合双边滤波器进行纹理合成上采样,对低分辨率合成纹理应用空间滤波,而将一相似的边界滤波联合地应用在高分辨率的样本纹理上.该算法克服了传统的以光滑性为先验引导条件的上采样方法会导致图像特征模糊的缺点,使获得的上采样纹理图像保持纹理特征,同时视觉上光滑.文中给出了图像和视频纹理合成结果的上行采样算法.实验结果表明,文中的方法减小了优化纹理合成过程所需的时间和空间,获取了更好的图像和视频合成纹理上采样效果.

关键词 纹理合成;全局优化;双边滤波器;图像上采样

中图法分类号 TP391 **DOI号**: 10.3724/SP.J.1016.2009.00241

Upsampling Synthesized Texture Using Joint Bilateral Filter

XIAO Chun-Xia^{1),2),3)} NIE Yong-Wei¹⁾ HUANG Xian-Feng⁴⁾ ZHAO Yong²⁾ PENG Qun-Sheng²⁾

¹⁾(School of Computer, Wuhan University, Wuhan 430072)

²⁾(State Key Laboratory of CAD&CG, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

³⁾(State Key Laboratory of Software Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072)

⁴⁾(State Key Laboratory of Liesmars, Wuhan University, Wuhan 430072)

Abstract This paper presents a novel technique for upsampling synthesized texture using bilateral filter. The basic idea is based on the observation: If the available high resolution exemplar texture is used as a prior to upsample the low resolution texture, a better high resolution result that preserving the salient structures can be obtained. A joint bilateral is used to perform the upsampling, that is, a spatial filter is applied to the low resolution synthesized texture, while a similar range filter is jointly applied on the full resolution exemplar texture. The proposed method makes computational and memory costs low to receive a high resolution image/video texture. The experimental results show that the method can keep the salient structures as well as producing smooth upsampled texture results.

Keywords texture synthesis; global optimization; bilateral filter; image upsampling

收稿日期:2008-07-29;最终修改稿收到日期:2008-12-01. 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)和湖北省自然科学基金(2008CDB350)资助. 肖春霞,1976年生,博士,讲师,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. 聂勇伟,1987年生,本科生,主要研究方向为图像视频处理. 黄先锋,1978年生,讲师,主要研究方向为虚拟现实、计算机图形学. 赵 勇,1982年生,博士研究生,主要研究方向为数字几何处理. 彭群生,1947年生,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为真实感图形、虚拟现实、科学计算可视化等.

1 引 言

纹理合成技术由于其广泛的实用前景,现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,各种算法层出不穷^[1-3].但无论是基于像素的纹理合成^[4-7]、基于块的纹理合成^[8-9],还是基于优化的纹理合成方法^[10],合成纹理的视觉效果和算法的效率是需要解决的两个关键问题.在合成大尺度的纹理和高分辨率的纹理,尤其在合成大的视频纹理时,即使采用最快的纹理合成算法,通常也需要很大的计算量和内存空间,其过高的时间复杂度和空间复杂度会让人望而却步.因此为获取一个更高分辨率的纹理合成结果,一个自然的想法是对现有的较低分辨率的合成纹理做上采样.

在现有的多种纹理合成算法中,Kwatra 等人^[10]基于 MRF 模型,提出了利用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)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.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被 Kopf 等人^[3]推广到实体纹理合成.但该算法由于采用了迭代优化获取能量最小化,在合成大尺寸、高分辨率图像、视频纹理时,算法的效率非常低,本文采用新的算法对合成的纹理结果上采样,获得了高分辨率大尺度的结果.

上行采样是一个基础的图像处理操作,一般都是对低分辨率图像用一个插值模板进行卷积,然后在高分辨率图像上进行重采样.现有的上行采样通常为线性插值,以光滑性为先验引导条件,用这类方法进行图像上采样,会使图像边界变得模糊.比如高斯向上采样,通常使整个图像变得模糊,视觉效果较差.因此,一个好的图像视频上采样方法应避免采样的结果边缘特征模糊,同时有较少的计算复杂度.

本文提出了一个新的纹理合成的上行采样算法,即利用现有的高分辨率的样本纹理作为先验引导条件,对合成的低分辨率、小尺度的纹理进行插值,获取更好的高分辨率纹理合成结果.该算法的主要思想是基于联合双边滤波器进行纹理合成上采样,对低分辨率合成纹理应用空间滤波,而将一相似的边界滤波联合地应用在高分辨率的样本纹理上.

该算法克服了传统的以光滑性为先验引导条件的上采样方法会导致图像特征模糊的缺点.本文给出了图像和视频纹理合成结果的上行采样算法.实验结果表明,我们的方法减小了优化纹理合成过程所需的时间和空间,而且获取了更好的图像和视频合成纹理上采样的效果.

1.1 相关工作

目前比较流行的基于样图的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.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^[4-7]、基于块的纹理合成^[8-9]、基于外观的纹理合成^[11]以及基于优化的纹理合成^[3,10].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.有一些研究者给出了同时基于像素和基于块的混合式区域生长纹理合成算法^[12],根据误差自适应地选择纹理块的大小,在重叠区域则进行逐像素的重新合成.与常用的基于邻域块逐点颜色匹配的纹理合成方法不同,基于外观的纹理合成^[11]采用包含非局部的信息例如特征、辐射传递等数据,但该算法仍然是基于像素的,由于领域的局部性和缺少全局优化,仍然有基于像素纹理合成的一些缺点.而文献^[10]基于 MRF 模型,提出了一个不用区域生长而是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.它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累积的问题,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.

图像上采样是图像处理、图形学中的一个最基本的问题之一,现已有大量的方法.每种方法都有各自的不同的算法,不同的先验假设,利用不同的额外信息.基于数据不变的经典的算法,例如最近邻域插值算法、Gaussian 插值算法、双线性插值算法、双三次插值算法、Hamming 算法以及 Lanczos 插值算法等,已广泛地应用到商业软件中.这些算法的核的构造通常基于图像数据为空间光滑或限带等假设.但实际上绝大部分图像通常含有尖锐的边缘,或者丰

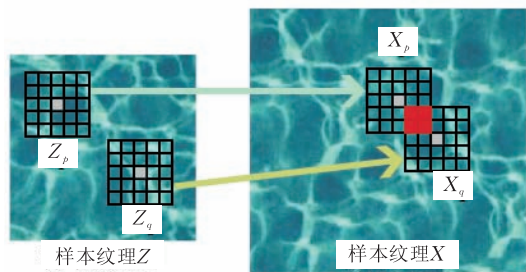
富的纹理,因此这些采样算法会使采样图像出现尖锐边缘变模糊、小尺度的纹理特征丢失等问题.关于这些算法的综述及缺点可见文献[13].文献[14]利用两个不同分辨率图像基于统计的边缘依赖性,提出了一个新的图像采样算法,通过在低分辨率图像上提高边缘参数来上采样图像中亮度差.但正如该文所指出的,该算法需要求解一个线性系统,计算量大,同时在重建尖锐边缘的同时会使得一些纹理和细节丢失.与此同时,文献[15]提出了一个基于联合双边滤波器图像采样算法,为图像上采样提供了一种新的思路.

双边滤波器是一个非线性的滤波器算子,该算子通过对图像的像素集同时使用空间滤波和边界滤波,在对图像进行光滑的同时能保持图像的边缘特征^[16].双边滤波器现已被广泛地用在图像和 3D 几何模型去噪^[17-18]、色调映射^[19]、视频增强^[20]等领域,关于双边滤波器更多的应用可见文献[21].将双边滤波器中边界滤波用在不同的图像上或图像信号上得到的联合双边滤波器最近也在图像处理中得到

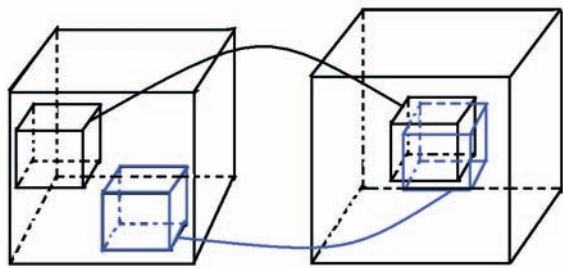
了很好的应用.联合双边滤波器最早出现在文献[22-23]中,其原理是给定同一场景的两幅图像:闪光灯拍摄的图片 and 未利用闪光灯拍摄的图片,结合一副图像中的高频部分与另一副图像中的低频部分,将双边滤波器中的边界滤波模板用在高频图像上作为引导图像,获得了很好的图像增强效果.文献[15]提出的联合双边滤波器图像采样算法,除了低分辨率的图像信息外,还利用原始高分辨率图像作为引导信息,对其低分辨率解进行上采样插值,较好地解决了线性差值方法所带来的特征模糊问题,并将采样算法用于色调映射等图像处理.

2 EM 纹理优化算法

基于优化的纹理合成算法最初被文献[10]提出,用在 2D 图像纹理合成上,该算法可以扩展到视频纹理合成.为简单起见,我们先给出 2D 图像纹理合成的主要思想,在第 4 节中,我们将二维的基于全局优化求解的纹理合成方法扩展到了三维上.



(a) 图像纹理合成



(b) 视频纹理合成

图 1 基于 EM 优化图像和视频纹理合成

合成纹理用 X 表示,样本纹理用 Z 表示. X 中以点 p 为中心的邻域称作 x_p ,而 Z 中与 x_p 最相似的(欧拉距离最小)邻域被称作 z_p .这样 X 的某个邻域的能量就是 x_p 和 z_p 之间的欧拉距离,合成纹理 X 的能量则为 X 中所有邻域的能量之和,如下所示:

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

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^+ 为 X 的一个子集.

文献[10]采用最大期望值算法优化能量函数(式(1))来获得纹理合成结果.纹理 X 的能量 E_t 在两个过程的反复迭代中不断减小,直到达到收敛状态,从而获得纹理合成的结果.一个过程是优化过程,即 E 步骤,在该步骤中根据 X 中邻域的最佳匹配邻域 $\{z_p\}$ 来更新 X 的每个像素值.另一个过程是查找过程,即 M 步骤,该过程为 X 的每个邻域找到

最佳匹配.

为了使优化过程更加鲁棒,采用迭代重新加权最小平方算法可得

$$\begin{aligned} \|x_p - z_p\|^r &= \|x_p - z_p\|^{r-2} \|x_p - z_p\|^2 \\ &= \omega_p \|x_p - z_p\|^2 \end{aligned} \quad (2)$$

能量方程(1)改写为

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

其中, N_p 为 p 的邻域, $\omega_{p,u}$ 就是式(2)中的 ω_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:

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

这里 $z_{u,p}$ 表示邻域 z_u 中对应 p 的点.也就是说 p 点

的像素值是来自不同的 z_p 中的像素值的加权平均.

3 联合双边滤波纹理上采样

联合双边滤波器最早出现在文献[22-23]中,为了获得更好的图像增强效果,通过使用联合双边滤波器,作者将一副图像中的高频部分与另一副图像中的低频部分结合起来.文献[15]将联合双边滤波器的思想运用到了色调映射等图像处理中,通过高分辨图像的引导信息显著提高了向上插值的效果.文献[15]认为有些图像处理技术,如色调映射等,由于原图像 \tilde{I} 可能会非常大,直接对 \tilde{I} 进行操作需要很多的空间和时间,因此,可以对 \tilde{I} 进行下采样,得到低分辨率图像 S ,一旦对 S 处理完毕,就可以在 \tilde{I} 信息的引导下,将 S 上采样为 \tilde{S} (\tilde{S} 与 \tilde{I} 的分辨率相同).他们在低分辨率图像 S 上应用空间滤波,在高分辨率图像 \tilde{I} 上进行边界滤波算子:

$$\tilde{S}_p = \frac{1}{K_p} \sum_{p_q \in \Omega} S_{p_q} f(\|p_{\downarrow} - q_{\downarrow}\|) g(\|\tilde{I}_p - \tilde{I}_q\|) \quad (5)$$

其中, p 和 q 分别是 \tilde{I} 中的像素坐标, p_{\downarrow} 和 q_{\downarrow} 为其在低分辨率图像 S 上对应的像素坐标, p_{\downarrow} 可能为小数,而 q_{\downarrow} 是 p_{\downarrow} 周围的整数坐标.实验效果表明,他们的方法很好地解决了高斯等向上插值方法引起的图像模糊和晕圈等缺点.

3.1 联合滤波器纹理图像上采样

基于优化的纹理合成算法是一种有效的算法,但由于采用最大期望值算法优化全局的纹理合成能量函数,在合成大尺寸、高分辨率图像,尤其是高分辨率视频纹理时,算法的效率非常低,甚至会出现现有的 PC 机计算能力根本无法处理的情况.因此,一个思路是采用一个有效的采样算法,对现有合成的纹理进行上采样,获取高分辨率大尺度的结果.受联合双边滤波器启发,我们借助样本纹理的信息来提高上采样的效果.

由图 2 所示,设 E' 为样本纹理, X' 为采用 EM 优化方法且基于样本纹理 E' 合成的纹理图像.现在将 E' 作为引导纹理,利用联合双边滤波器,对 X' 进行上采样,来获得一个更大尺寸、高分辨率的纹理图

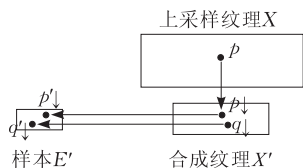


图 2 利用联合滤波器对合成纹理进行上采样的示意图

像 X .

我们的方法与现有基于联合双边滤波器方法处理的图像不同^[15,22-23].这些算法中,上采样图像 \tilde{S} 与原始高分辨率图像 \tilde{I} 的尺寸大小、分辨率完全相同,而我们对合成纹理上采样获得的图像与样本的大小通常很不一致;同时,由于基于优化纹理合成本身的复杂性,合成纹理 X' 中的每个像素是样本 E' 中的一些像素的加权平均,这更导致了联合双边滤波器上采样的难度.

设 p 为上采样图像 X 中一像素,其在 X' 中对应点为 p_{\downarrow} , q_{\downarrow} 是与 p_{\downarrow} 相邻的整数像素点.注意,这里 p_{\downarrow} 的坐标可以为小数,而 p_{\downarrow} 为整数邻域点.设 p'_{\downarrow} 和 q'_{\downarrow} 代表在优化合成时,样本 E' 中对 p_{\downarrow} 和 q_{\downarrow} 起到影响的点,为了利用原高分辨率样本对 X' 进行上采样, X 中的点 p 的初步值可以通过如下联合双边滤波器公式计算:

$$H_p = \frac{1}{k_p} \sum_{q_{\downarrow} \in \Omega} X'_{q_{\downarrow}} f(\|p_{\downarrow} - q_{\downarrow}\|) g(\|I_{p'_{\downarrow}} - I_{q'_{\downarrow}}\|) \quad (6)$$

其中,

$$K_p = \sum_{q_{\downarrow} \in \Omega} f(\|p_{\downarrow} - q_{\downarrow}\|) g(\|I_{p'_{\downarrow}} - I_{q'_{\downarrow}}\|).$$

但由 EM 的优化过程可知, p_{\downarrow} 和 q_{\downarrow} 的值是来自样本 E' 中不同邻域的像素值的加权平均,即 p_{\downarrow} 和 q_{\downarrow} 在样本 E' 有多个 p'_{\downarrow} 和 q'_{\downarrow} 与之对应,则由式(4)有

$$I_{p_{\downarrow}} = \frac{\sum_{u \in N_{p_{\downarrow}}} \omega_{u,p_{\downarrow}} z_{u,p_{\downarrow}}}{\sum_{u \in N_{p_{\downarrow}}} \omega_{u,p_{\downarrow}}} = \frac{\sum_{u \in N_{p_{\downarrow}}} \omega_{u,p_{\downarrow}} I_{u,p'_{\downarrow}}}{\sum_{u \in N_{p_{\downarrow}}} \omega_{u,p_{\downarrow}}} \quad (7)$$

$$I_{q_{\downarrow}} = \frac{\sum_{u \in N_{q_{\downarrow}}} \omega_{u,q_{\downarrow}} z_{u,q_{\downarrow}}}{\sum_{u \in N_{q_{\downarrow}}} \omega_{u,q_{\downarrow}}} = \frac{\sum_{u \in N_{q_{\downarrow}}} \omega_{u,q_{\downarrow}} I_{u,q'_{\downarrow}}}{\sum_{u \in N_{q_{\downarrow}}} \omega_{u,q_{\downarrow}}} \quad (8)$$

其中, $I_{p_{\downarrow}}$ 和 $I_{q_{\downarrow}}$ 表示 p_{\downarrow} 和 q_{\downarrow} 的像素值, $I_{q'_{\downarrow}}$ 和 $I_{p'_{\downarrow}}$ 表示 p'_{\downarrow} 和 q'_{\downarrow} 的像素值.

所以在式(6)中, $I_{p'_{\downarrow}}$ 和 $I_{q'_{\downarrow}}$ 需要进行更巧妙的处理,为处理此非线性问题,我们分两步有效计算出最终的 H_p .首先固定 p_{\downarrow} , $I_{p'_{\downarrow}}$ 为其在 E' 对应的像素 p'_{\downarrow} 的值,并用式(8)对 q_{\downarrow} 进行加权平均,从而得到

$$E'_{q_{\downarrow}} = \frac{\sum_{u \in N_{q_{\downarrow}}} \omega_{u,q_{\downarrow}} I_{u,q'_{\downarrow}}}{\sum_{u \in N_{q_{\downarrow}}} \omega_{u,q_{\downarrow}}} \quad (9)$$

将式(9)代入到式(6)中,得到

$$H_{p_i} = \frac{1}{k_p} \sum_{q_{\downarrow} \in \Omega} X'_{q_{\downarrow}} f(\|p_{\downarrow} - q_{\downarrow}\|) \cdot g \left(\left\| I_{p'_{\downarrow}} - \frac{\sum_{u \in N_{q_{\downarrow}}} \omega_{u, q_{\downarrow}} I_{u, q'_{\downarrow}}}{\sum_{u \in N_{q_{\downarrow}}} \omega_{u, q_{\downarrow}}} \right\| \right) \quad (10)$$

其次, 由于 p_{\downarrow} 亦是来自样本中不同邻域的像素值的加权平均, 为得到 p 最终的颜色值, 我们利用式(8)对 H_{p_i} 进行加权平均, 得到了 X 中点 p 的最终值:

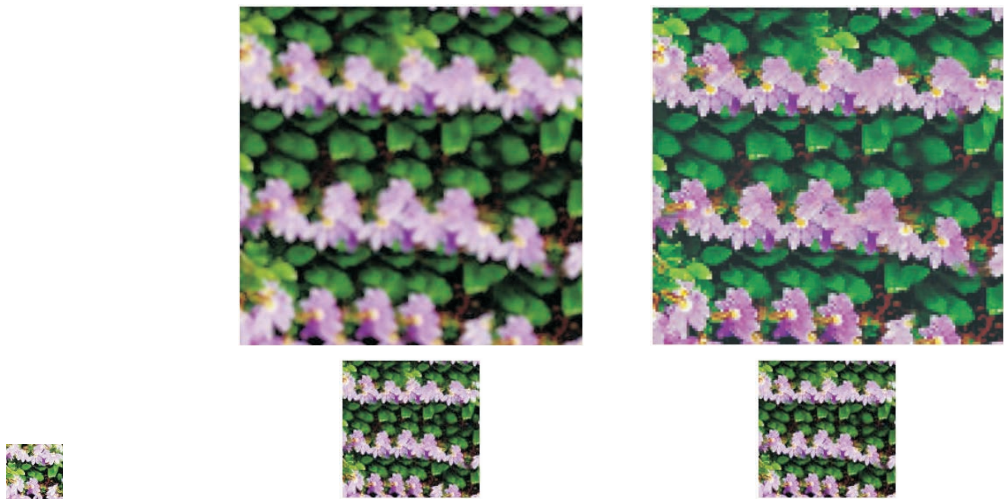
$$I_p = \frac{\sum_{u \in N_{p_{\downarrow}}} \omega_{u, p_{\downarrow}} H_{p_i}}{\sum_{u \in N_{p_{\downarrow}}} \omega_{u, p_{\downarrow}}} \quad (11)$$

式(11)可以理解为, 先在内层对 q_{\downarrow} 进行一次加权平均, 然后进行联合双边滤波上采样, 再在外层对 p_{\downarrow} 进行一次加权平均. 实验结果证明, 通过这两步,

能有效地求解非线性问题(式(6)), 使得最终的合成结果 X 与样本 E 相似, 同时获得高分辨率、边缘特征不模糊的上采样结果.

注意到在式(5)中, q_{\downarrow} 的坐标必须是整数, 而 p_{\downarrow} 的坐标可以为分数, 为了计算的方便, 如果 p_{\downarrow} 为分数点, 则联合双边滤波器(式(6))的边界滤波算子的 p_{\downarrow} 取最靠近它的一个像素, 即对 p_{\downarrow} 取整, 然后计算出其对应应在 E' 的像素, 而空间滤波算子的 p_{\downarrow} 值不变. 此外, 式(7), (8)中使用的权值 ω 由于在做纹理合成中已被计算, 因此可保存该值用于上采样, 避免在做联合滤波插值时对权值 ω 进行重复计算.

如图3所述, 联合双边滤波器可以借助 E' 的额外信息, 将低分辨率、小尺寸的纹理图像 X' 上采样为目标图像 X , 与现常用的高斯上采样比较, 我们的结果更好地保持了图像的边缘特征, 同时视觉上结果连续.



(a) 基本样本(64×64)(合成的128×128的纹理如(b),(c)的下图)

(b) 使用高斯采样方法将纹理上采样为一个纹理图像(512×512)

(c) 使用联合双边滤波将同一纹理上采样为一个纹理图像(512×512)

图 3

3.2 分层次联合滤波器图像上采样

有些情况下, 样本纹理的尺度很大, 或者分辨率很高, 尤其对于高分辨率视频纹理样本, 会导致优化纹理合成效率非常低. 更严重的是, 对大样本、高分辨率的样本纹理建树用于最小邻域搜索时, 通常需要很大的内存空间, 甚至会出现现有的 PC 机的内存根本不能满足建树内存的需要. 为解决这种问题, 我们采用分层次上采样方法, 即先对样本纹理进行下采样, 得到低分辨率样本纹理, 基于此样本纹理, 合成低分辨率纹理, 最后在高分辨率样本纹理的引导下, 对低分辨率纹理上采样. 该方法同样可用到分层次的纹理合成方法上: 先在低分辨率上迭代到收

敛, 然后将结果插值到高分辨率上作为初始值继续迭代.

如图4所示, 设 E' 为样本 E 低分辨率样本(下采样的方法很多, 我们采用高斯下采样), 用 EM 纹理合成方法基于样本 E' 合成低分辨率纹理图像 X' , 与 3.1 节不同, 我们希望在原始 E 的引导下, 将 X' 向上插值为 X . 设 p 为 X 中一像素, 其在 X' 中对应点为 p_{\downarrow} , 设 q_{\downarrow} 是 p_{\downarrow} 相邻的整数像素点. 同样, 这里 p_{\downarrow} 的坐标可以为小数, 而 q_{\downarrow} 必须是整数坐标. 设 p'_{\downarrow} 和 q'_{\downarrow} 代表在优化合成时, 样本 E' 中对 p_{\downarrow} 和 q_{\downarrow} 起影响的点, 同时, 设 p'_{\downarrow} 和 q'_{\downarrow} 对应着样本 E 中的点 p''_{\downarrow} 和 q''_{\downarrow} . 为简单起见, X 中的点 p 的初步值可以通

过如下联合双边滤波器公式计算:

$$H_p = \frac{1}{k_p} \sum_{q_{\downarrow} \in \Omega} X'_{q_{\downarrow}} f(\|p_{\downarrow} - q_{\downarrow}\|) g(\|I_{p'_{\downarrow}} - I_{q'_{\downarrow}}\|) \quad (12)$$

其中,

$$K_p = \sum_{q_{\downarrow} \in \Omega} f(\|p_{\downarrow} - q_{\downarrow}\|) g(\|I_{p'_{\downarrow}} - I_{q'_{\downarrow}}\|).$$

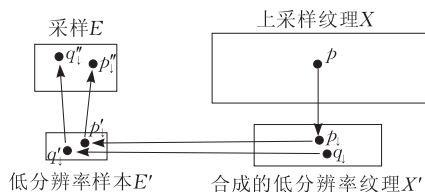


图 4 利用联合滤波器图像上采样的纹理合成示意图

由于 p_{\downarrow} 和 q_{\downarrow} 是在 EM 纹理合成中加权平均得到,也就是说 p_{\downarrow} 和 q_{\downarrow} 在样本 E' 有多个 p'_{\downarrow} 和 q'_{\downarrow} 与之对应(式(7),(8)),因此,相应地在样本 E 有多个对应点 p''_{\downarrow} 和 q''_{\downarrow} ,所以与 3.1 节类似,在式(12)中, $I_{p'_{\downarrow}}$ 和 $I_{q'_{\downarrow}}$ 需要进行特殊处理,同样,为解决此非线性问题,我们分两步有效计算出最终的 H_p .

注意到 p_{\downarrow} 可能为 X' 中的分数点(非整数像素),对应地在 E' 上的 p'_{\downarrow} 同样也可能为非整数像素,

因此不能直接使用式(7)中的权值 ω . 幸运的是,如果样本纹理按整数倍下采样,合成低分辨率纹理按相同倍数上采样,分数点 p'_{\downarrow} 对应地在 E 的点 p''_{\downarrow} 为一整数像素. 设 X_u 为在优化过程中的包含 p_{\downarrow} 的一个邻域, Z_u 为 X_u (包含 p'_{\downarrow}) 在 E' 的最近邻域,设其相似权值为 ω , \tilde{Z}_u 为在 E 内包含整数点 p''_{\downarrow} 且对应 Z_u 的邻域. 因此在计算式(11)时获取 I_p , 可以直接使用权值 ω .

如果样本纹理下采样倍数与合成低分辨率纹理上采样倍数不一致,如果 p_{\downarrow} 为分数点,则与 3.2 节中算法相似,对联合双边滤波器(式(12))的边界滤波算子的 p_{\downarrow} 取整,然后计算出其对应地在 E' 的像素,而空间滤波算子的 p_{\downarrow} 值不变.

如图 5 所述,基于联合双边滤波器分层次上采样算法,通过低分辨率样本 E' 借助原始样本 E 的额外信息,将低分辨率的纹理图像 X' 上采样为目标图像 X ,与高斯上采样比较,我们的结果更好地保持了图像的边缘特征,同时视觉上结果连续. 但与直接对原始样本合成的图像上采样不同,双边滤波器分层次上采样获取结果其特征尺度与原样本相同,而不是将其放大.

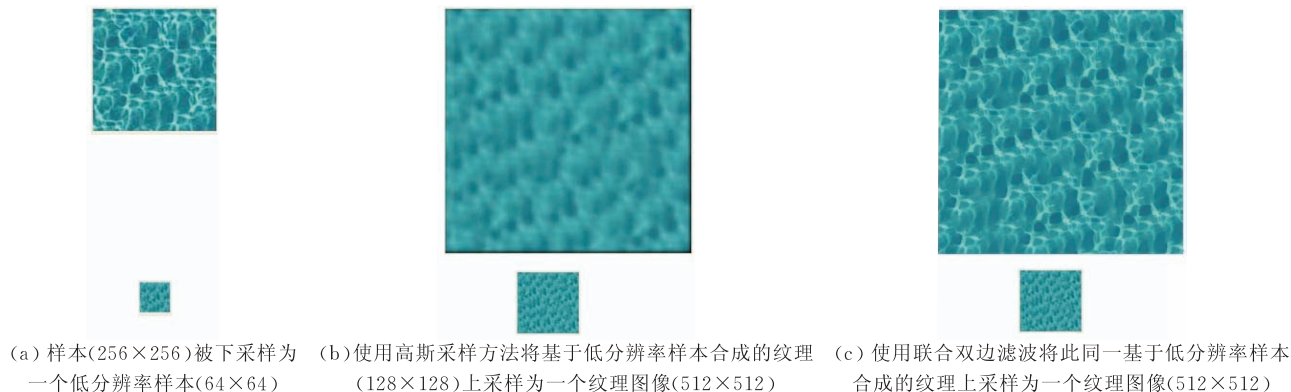


图 5

4 联合双边滤波器视频上采样

我们将基于全局优化的纹理合成方法扩展到视频上. 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是一个三维的立方体(如图 1(b)所示),而不是对视频的每一帧进行单独的操作. 通过这种方法,图像上的联合双边滤波器可以很容易地扩展到视频上去. 由于在视频 EM 纹理合成中,我们将视频看作一个整体,同样,在将合成的视频向上采样时,也必须将整个视频看作成一个整体.

具体可通过如下方式将基于全局优化的 EM 纹理合成从二维上扩展到了三维上: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 ω 的立方体. 和 x_p 距离最近的 z_p 是同等大小的时空立方体. 现在视频立方体的某个邻域的能量是邻域立方体 x_p 和 z_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. 这样我们就很自然地将二维上的纹理合成方法推广到了三维上. 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 $z_{u,p}$ 也需做相应的简单调整. 显然,由于邻域

从二维平面变成了三维立方体,各种加速算法建立树所需要的时间、存储树所需要的空间以及在树中查找最近邻域所需的时间也相应增加。

基于联合双边滤波器的视频纹理插值和基于联合双边滤波器的图像纹理插值总体上差不多,但还是有细微的差别. 我们的最终目标是将样本视频纹理 S 合成为视频 X , 为了提高速度, 我们先将 S 下采样得到 S' (我们选用高斯下采样), 然后将 S' 用视频 EM 纹理合成方法合成得到视频 X' , 最后在 S 的帮助下, 采用基于联合双边滤波器的上行采样方法从 X' 采样得到 X . 我们可按顺序依次计算出 X 中的点的值, 当所有的点的值都被计算后, 我们就获得了视频上行采样的结果. 设现在扫描到了点 p , p 在 X' 中对应的点是 p_{\downarrow} , q_{\downarrow} 是 p_{\downarrow} 的正方体邻域中的点. 这里 p_{\downarrow} 的坐标可以为小数, 而 q_{\downarrow} 必须是整数坐标. 就像在 EM 视频纹理合成中所说的那样, p_{\downarrow} 和 q_{\downarrow} 的值是来自样本中不同邻域的相应的像素值的加权平均. 同样, 我们用 p'_{\downarrow} 和 q'_{\downarrow} 代表 S' 中对 p_{\downarrow} 和 q_{\downarrow} 有影响的点, 同时 p'_{\downarrow} 和 q'_{\downarrow} 分别对应着 S 中的点 p''_{\downarrow} 和 q''_{\downarrow} . 这样, 我们就可以用式(11)计算出 X 中的所有值.

需要注意的是, 联合双边滤波器上采样的效果的好坏也依赖于 EM 纹理合成低分辨率纹理的好坏. 为了使 EM 纹理合成的效果更好, 我们使用文献[3]中提出的直方图匹配方法. 该方法给样本和合成结果分别建立一个直方图, 并按规律刷新合成结果的直方图使其不断地向样本直方图发展, 从而在全局统计特性上控制合成过程使其不收敛到局部最小值. 纹理优化中, EM 迭代优化占整个纹理过程的绝大部分时间, 同时, 联合双边滤波器上采样也需要消耗一些时间, 为了加速上采样, 我们可采用文献[17, 22]中提供的算法, 加速双边滤波器的计算. 当最近样本纹理相似度相差太大时使得纹理像素优化(式(2))中出现不鲁棒情况(图像纹理合成出现较少, 在视频纹理合成时出现较多), 从而也会导致产生模糊结果的问题, 为解决此问题, 我们使用文献[24]中提出的聚类方法. 将像素看作高维空间中的点, 我们用均值漂移算法(Mean-Shift algorithm)对像素值进行聚类^[25]. 然后在纹理合成中我们只对属于主分支聚类(dominant cluster)的像素进行加权平均. 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 8×8 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. 同时我们使用 ANN^① 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 以数 ϵ 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 $\epsilon=2$.

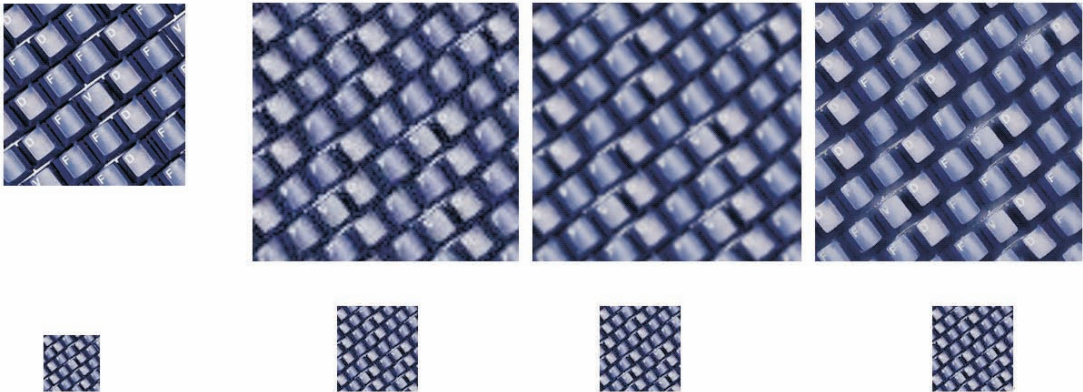
5 实验结果

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. 在 EM 纹理合成算法中, 我们只在待合成纹理 X 中选取一个小子集 X^+ , 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, 这些邻域之间部分区域重叠. 这样能减少纹理优化中的计算量, 在本文的例子中, X^+ 中像素的间距为邻域边长的四分之一.

我们的算法所耗时间主要集中在 EM 的优化迭代上. 对于图片纹理合成, 从 256×256 的样本纹理合成 512×512 的纹理, 往往需要几个小时, 但是采用我们提出的先下采样再对合成结果上采样的方法, 只需要几分钟到十几分钟的时间. 对于视频纹理合成, 直接采用优化方法从 $128 \times 128 \times 20$ 的样本合成 $256 \times 256 \times 20$ 的纹理需要十几个小时的时间, 甚至几十个小时的时间, 而且对样本建立 ANN 树时需要极大的内存量, 在普通的 PC 机上(如内存 1GB 以内), 由于其内存不足, 难以建树. 而用我们提出的方法, 只需要用几个小时就可以做完, 同时需要的内存也大大减少了, 且与现在通用的上采样算法如高斯采样方法比较, 我们的上采样算法显著地保持了原图像、视频的纹理特征, 且视觉效果连续.

图 6 和图 7 显示了基于联合双边滤波器的在合成纹理图像的上采样结果及与常用上采样算法的比较. 图 6 和图 7 中(a)上图为 256×256 的样本图像. 下图是用高斯下采样得到的 64×64 的低分辨率样本图像, 并由它合成了 128×128 低分辨率纹理((b), (c), (d)下行的图像). (d)上面的图像由我们提出的方法对低分辨率纹理上采样得到. 同时, 我们也对低分辨率纹理利用双线性插值方法进行上采样((b)上面), 利用高斯方法进行上采样((c)上面). 通过比较发现, 我们的方法更好地避免了图像上采样出现的特征模糊现象, 在视觉上更加连续.

① Mount D M, Arya S. ANN: A library for approximate nearest neighbor searching. 2006



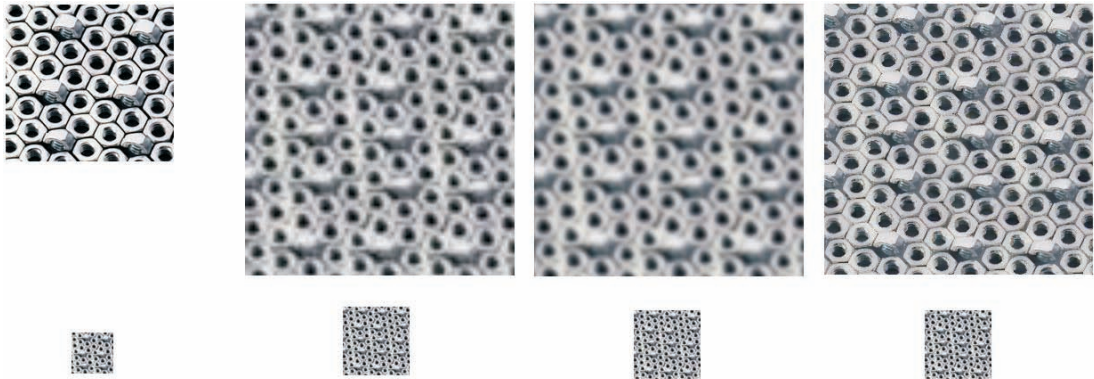
(a) 样本(256×256)被下采样为一个低分辨率样本(64×64),基于此低分辨率样本合成的低分辨率纹理(128×128) ((b),(c),(d)的下图)

(b) 使用双三次线性插值方法将低分辨率纹理上采样(512×512)的结果

(c) 使用高斯采样方法将低分辨率纹理上采样(512×512)的结果

(d) 使用联合双边滤波将低分辨率纹理上采样(512×512)的结果

图 6 分层次联合滤波器图像上采样结果 1



(a) 样本(256×256)被下采样为一个低分辨率样本(64×64),基于此低分辨率样本合成的低分辨率纹理(128×128) ((b),(c),(d)的下图)

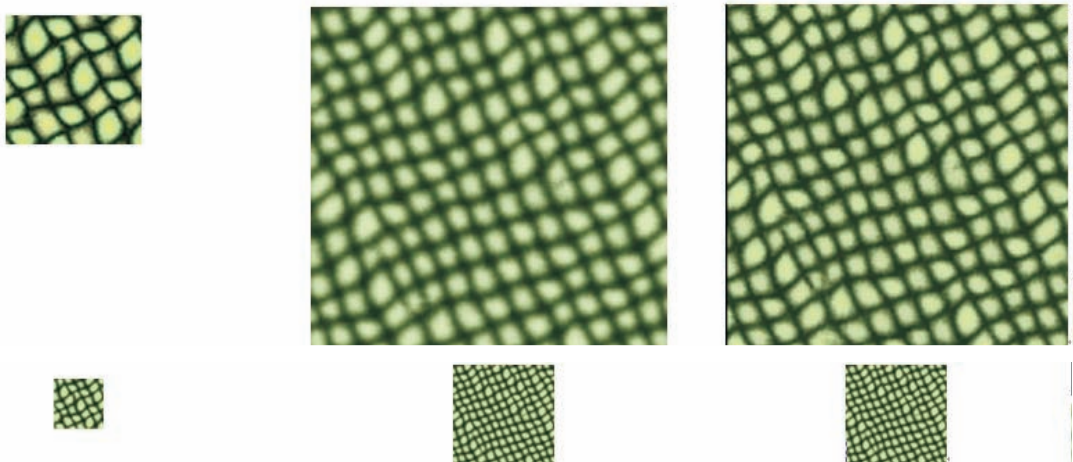
(b) 使用双三次线性插值方法将低分辨率纹理上采样(512×512)的结果

(c) 使用高斯采样方法将低分辨率纹理上采样(512×512)的结果

(d) 使用联合双边滤波将低分辨率纹理上采样(512×512)的结果

图 7 分层次联合滤波器图像上采样结果 2

图 8 和图 9 给出了联合双边滤波器的视频纹理上采样结果及与常用视频上采样算法的比较. 我们将视频看作是一个三维的立方体, 先基于低分辨率样本纹理合成低分辨率视频纹理, 然后在原高分辨



(a) 视频样本(128×128×20)被下采样为一个低分辨率样本(64×64×20)

(b) 使用高斯采样方法将基于低分辨率样本合成的纹理(128×128×20)上采样为一个视频纹理(512×512×20)

(c) 使用联合双边滤波将此同一基于低分辨率样本合成的纹理上采样为一个视频纹理(512×512×20)

图 8 分层次联合滤波器视频上采样 1

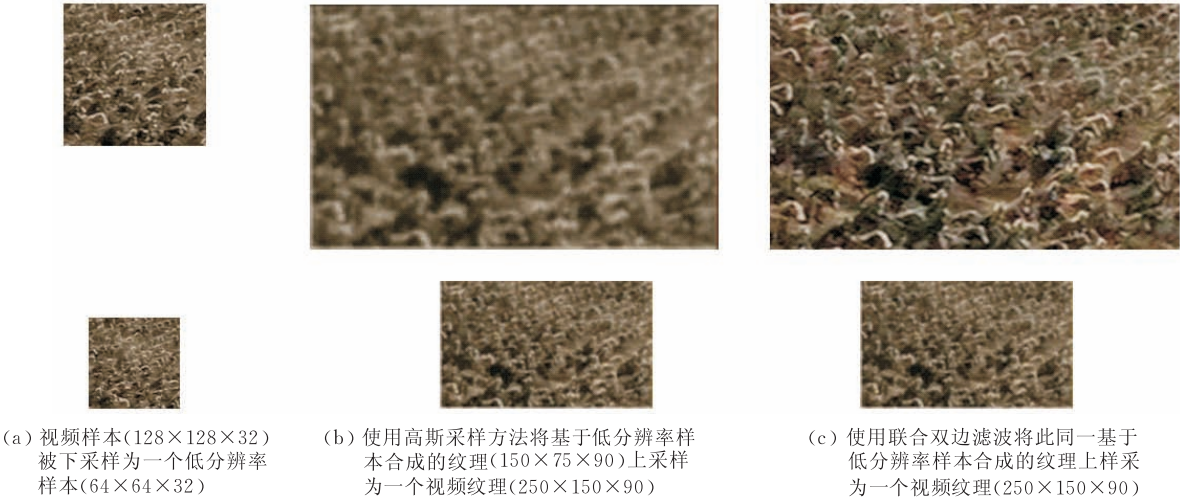


图 9 分层次联合滤波器视频上采样 2

样本纹理引导下对其进行上采样,与高斯上采样等算法相比,双边滤波上采样视频较好地避免了特征模糊现象,同时由于在时空体上进行视频优化,帧与帧之间保持连续.同时,我们也看到,与直接对基于高分辨率样本纹理合成的纹理上采样不同,采用分层次上采样的纹理结果,其特征尺度与原样本相同(图 5~图 9),而不是将其放大(图 3).

6 结论和未来工作

本文提出了一个新的纹理合成的上行采样算法,即利用现有的高分辨率的样本纹理作为先验引导条件,对合成的低分辨率的纹理进行插值,获取更好的高分辨率纹理合成结果.该算法的主要思想是提出一种基于联合双边滤波器的纹理合成上采样方法,对低分辨率合成纹理应用空间滤波,而将一相似的边界滤波联合地应用在高分辨率的样本纹理上.该算法克服了传统的以光滑性为先验引导条件的上采样方法会导致图像特征模糊的缺点.本文给出了图像和视频纹理合成结果的上行采样算法.实验结果表明,与传统的上采样算法相比,我们的方法减小了优化纹理合成过程所需的时间和空间,而且获取了更好的图像和视频合成纹理上采样的效果.

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 迭代求解时会出现局部最小化的情况,会导致合成的纹理出现模糊现象,因此将来的一个研究方向是消除局部最小化问题.此外,全局优化迭代求解是该算法最耗时的部分,主要是在最近邻域搜索方面,虽然 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,一个更快

更有效的邻域搜索算法也是一个有意义的研究方向.本文主要是对基于优化方法的纹理合成算法^[10]利用联合双边滤波上采样,将来,我们将研究联合双边滤波对其他纹理合成算法所获得的低分辨率纹理进行上采样.

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] 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

[4] Wei L, Levoy M. Fast texture synthesis using tree structured vector quantization//Proceedings of the SIGGRAPH. New Orleans, Louisiana, USA, 2000: 479-488

[5] Ashikhmin M. Synthesizing natural textures//Proceedings of the ACM Symposium on Interactive 3D Graphics. North Carolina, 2001: 217-226

[6] 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

- [7] Lefebvre S, Hoppe H. Parallel controllable texture synthesis//Proceedings of the SIGGRAPH. Los Angeles, California, USA, 2005: 777-786
- [8] Efros A A, Freeman W T. Image quilting for texture synthesis and transfer//Proceedings of the SIGGRAPH. Los Angeles, California, USA, 2001: 341-346
- [9] 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, California, USA, 2003: 277-286
- [10] 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
- [11] Lefebvre S, Hoppe H. Appearance-space texture synthesis. ACM Transactions on Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 2006), 2006, 25(3): 541-548
- [12] Nealen A, Alexa M. Hybrid texture synthesis//Proceedings of the 14th Eurographics Workshop on Rendering. Leuven, Belgium, 2003: 97-105
- [13] Thvenaz P, Blu T, Unser M. Image interpolation and resampling//Bankman I ed. Handbook of Medical Imaging, Processing and Analysis. San Diego, CA, USA: Academic Press, 2000: 393-420
- [14] Raanan Fattal. Upsampling via imposed edges statistics. ACM Transactions on Graphics (Proceedings of SIGGRAPH), 2007, 26(3)
- [15] Kopf J, Cohen M, Lischinski D, Uyttendaele M. Joint bilateral upsampling. ACM Transactions on Graphics (Proceedings of SIGGRAPH), 2007, 26(3)
- [16] 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
- [17] Weiss B. Fast median and bilateral filtering. ACM Transactions on Graphics, 2006, 25(3): 519-526
- [18] Fleishman S, Drori I, Cohen-Or D. Bilateral mesh denoising. ACM Transactions on Graphics, 2003, 22(3): 950-953
- [19] Durand F, Dorsey J. Fast bilateral filtering for the display of high dynamic range images. ACM Transactions on Graphics, 2002, 21(3): 257-266
- [20] Bennett E P, Mcmillan L. Video enhancement using per-pixel virtual exposures. ACM Transactions on Graphics, 2005, 24(3): 845-852
- [21] Durand F, Sylvain Paris, Pierre Kornprobst, Jack Tumblin. A gentle introduction to bilateral filtering and its applications//Proceedings of the SIGGRAPH 2007. San Diego, California, USA, 2007
- [22] Petschnigg G, Agrawala M, Hoppe H, Szeliski R, Cohen M, Toyama K. Digital photography with flash and no-flash image pairs. ACM Transactions on Graphics, 2004, 23(3): 664-672
- [23] Eisemann E, Durand F. Flash photography enhancement via intrinsic relighting. ACM Transactions on Graphics, 2004, 23(3): 673-678
- [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
- [25] Comaniciu D, Meer P. Mean shift. A robust approach toward feature space analysis. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24(5): 603-619
- [26] Mount D M, Arya S. ANN: A library for approximate nearest neighbor searching. 2006



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

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

Background

This work was 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

HUANG Xian-Feng, born in 1987, Ph. D., assistant professor. His research interests include LIDAR data, pattern recognition and GIS.

ZHAO Yong, born in 1982, Ph. D. candidate. His research interests include digital geometry processing, image and video editing.

PENG Qun-Sheng, born in 1947, Ph. D., professor. His research interests include virtual reality, realistic image synthesis, infrared image synthesis, computer animation, and scientific visualization.

(No. 200804861038), Natural Science Foundation of Hubei Province (No. 2008CDB350).

Texture synthesis is a useful technique in computer graphics, it synthesizes a large scale texture based on a small sample while exhibiting the same stochastic features of the ex-

emplar 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.

To produce a large scale or high resolution texture is usually time-consuming, especially for video synthesis, the complexity and memory requirement sometimes make the task impossible, in this case, to upsample the low resolution synthesized texture is a feasible way. Image upsampling or enhancement is one of the most elementary image operations and is useful in many graphics applications. The commonly used upsampling techniques are trilinear interpolation or Gaussian interpolation. While these traditional methods generally assume smoothness prior for the interpolation, may suffer from blurred images. Inspired by the joint (cross) bilateral methods, We present a novel technique for upsampling synthesized

texture using bilateral filter. The basic idea is based on the observation: if the available high resolution exemplar texture is used as a prior to upsample the low resolution texture, a better high resolution result that preserving the salient structures can be obtained. We use a joint bilateral to perform the upsampling, that is, a spatial filter is applied to the low resolution synthesized texture, while a similar range filter is jointly applied on the full resolution exemplar texture. The proposed method makes computational and memory costs low to receive a high resolution image\video texture.

Our JBU method can also be easily extended to upsample the video texture synthesized using optimization. We consider the video as a 3D video volume, in video texture synthesis, for each pixel in the synthesizing texture, we found a corresponding pixel in the low resolution texture, and its neighboring points, and then we can use the bilateral upsampling techniques easily. We also use the fast version of bilateral filter to improve the performance.

Compared with traditional upsampling methods, our method can keep the salient structures as well as producing smooth upsampled texture results, while the computational and memory costs are also low.