

运用流体模拟的油画生成方法*

赵 杨, 徐 丹[†]

(云南大学 计算机科学与工程系, 云南 昆明 650091)

Oil Style Image Generation via Fluid Simulation

ZHAO Yang, XU Dan[†]

(Department of Computer Science and Engineering, Yunnan University, Kunming 650091, China)

+ Corresponding author: Phn: +86-871-5737873, Fax: +86-871-5737873, E-mail: danxu@ynu.edu.cn, <http://www.ynu.edu.cn>

Zhao Y, Xu D. Oil style image generation via fluid simulation. *Journal of Software*, 2006,17(7):1571-1579.
<http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/1571.htm>

Abstract: Unlike photorealistic rendering striven by traditional 3D computer graphics, NPR emphasizes artistic expression, subjective mood imbuing, and downplaying unimportant information. The paper presents a new automatic method for generating oil paintings via fluid simulation technology. A paintly rendering is built up in a series of layers, drawn with large, long and curved brush strokes, and aligned to normal of fluid reference image gradients. In this method, an improved reflectance model with multiple light sources is proposed, which can represent the variability of lighting conditions on artistic painting. Additionally, a technique for simulating the hierarchical physical appearance of oil paintings under lighting is designed. The painting is rendered by bump-mapping the painting's colors with the image's intensity map. Finally, color transfer technique is adopted to make the color characteristic of the generated image consistent with that of some specified artistic source images. Experimental results show that the proposed method can be used efficiently to create oil paintings similar to some Van Gogh's style from a photograph.

Key words: non-photorealistic rendering; fluid simulation; lighting model; color transfer; Van Gogh's style oil paintings

摘 要: 与真实感绘制技术关注于传统的 3D 图形学不同,非真实感绘制技术更加强调艺术表现力、主观意识与情绪的传递以及强化重要信息、忽略非关键信息等方面.提出了一种自动的、基于流体模拟的方法来生成具有凡高后期风格的油画图像.提出以流体线条参考图颜色梯度的法线方向作为画笔方向,对原图进行多层绘制;同时,提出一种改进的多光源局部光照模型,以有效地反映不同光照条件下艺术图像的不同表征力.另外,设计了一种在光照条件下模拟画笔物理特征的方法,该方法通过 bump-mapping 增强绘制图像的涂料层叠感.为了使生成的绘制图像具有凡高油画的色彩风格,采用了一种颜色转换方法,将特定的艺术原画色彩特征转换到绘制图像上.实验结果表明,对于给定的输入图像,该算法能够有效地生成具有凡高后期艺术风格的油画.

关键词: 非真实感绘制;流体模拟;光照模型;颜色转换;凡高风格油画

* Supported by the Natural Science Foundation of Yunnan Province under Grant No.2000YP20 (云南省自然科学基金); the Province and University Science and Technology Cooperation Projects of Yunnan Province and Zhejiang University under Grant No.2001JAALA02 A022 (云南省省院省校科技合作项目)

Received 2004-08-04; Accepted 2005-07-11

中图法分类号: TP391 文献标识码: A

1990年, Haelberi发表了著名的、开创性的论文——Paint By Numbers: Abstract Image Representations, 标志着计算机图形学非真实感绘制领域的正式诞生. 计算机图形学领域的学者们正致力于开发自动的、具有非真实感意象的、充满艺术表现力的绘制技术和方法^[1]. 非真实感绘制技术不仅可以使每个人都能够方便、快捷地创作出充满艺术韵味和富于艺术想象力的图像, 同时还可以广泛地应用于媒体行业, 使其能够创作出具有艺术表征力的视频, 例如具有油画、水彩画或者国画风格的视频. 本文提出了一种自动的、基于图像绘制的方法来生成具有凡高风格的油画图像.

本文的灵感来自于两篇著名的论文, 即文献[2,3]. Litwinowicz, Hertzmann 在各自的论文里分别指出: 通过对原始图像内具有相似特征的区域使用流畅平滑的画笔进行绘制, 能够生成具有油画特征的艺术图像. 两种方法的局限性在于: 都以原图的颜色梯度方向作为画笔方向, 因此难以绘制出具有狂野的漩涡感^[4]的艺术图像. 这类艺术图像在凡高的绝大多数油画作品中表现得尤为突出^[4]. 在 Litwinowicz, Hertzmann 绘制算法^[2,3]思想的基础上, 本文提出了一种新的绘制算法. 该算法集中于模拟后印象派大师——凡高的某些后期油画作品的风格, 具有如下特点: (1) 综合运用基于物理模型的流体模拟技术、图像纹理合成技术和非真实感绘制技术对图像进行处理; (2) 利用流体线条参考图颜色梯度的法线方向作为画笔方向对原图进行绘制; (3) 应用改进了的多光源局部光照模型及油画涂料层叠感生成技术来增强绘制图像的涂料层叠感; (4) 采用颜色转换方法, 从而使绘制结果与凡高原画的色彩感觉相一致, 可以最大限度地使处理结果逼近凡高原画的艺术风格.

1 相关工作

非真实感绘制领域的早期研究成果当属 Haelberi 提出的基于笔刷模型的绘制方法^[5]. Haelberi's 提出的绘制方法, 允许用户通过创建一系列已被着色的笔刷对原图进行绘制, 从而产生具有艺术风格的图像. 与其他系统的不同之处在于: Haelberi 并不试图设计一个能够精确模拟油画的绘制系统, 他的主要目标是开发出能够使用户快速、有效地生成各种艺术风格的图像绘制系统. Litwinowicz 在 Haelberi 方法的基础上作了进一步扩展. 他开发出一套系统, 通过分析视频特征, 由计算机自动生成具有印象派风格的视频片段. 该系统允许用户自由地选择笔刷大小和笔刷模型, 然后让计算机自动地对视频片段进行处理. 另外, 在该系统中, 用户既可以沿图像的轮廓方向用画笔进行绘制, 也可以预先设定一个全局的绘制方向, 然后再用画笔进行绘制^[2].

Hertzmann 设计出一种方法, 能够使用不同大小和不同形状的笔刷对静态图像进行多层绘制^[3], 并且把该方法扩展到了对视频的处理上^[6]. 同时, 该方法还能够解决对视频处理时的帧间连贯性问题. Hertzmann 最近提出了一种通用的绘制技术^[7]. 该技术通过对样本图像(filtered and unfiltered images)的转换方式进行学习, 然后再把这样的转换方式应用到新的输入图像中, 从而使新的输入图像具有与原画风格相近的特征. 但我们在实验中发现, 对于凡高作品中具有明显流体线条感和漩涡感的油画, 该方法很难模拟出近似的艺术效果. 这也是促使我们开发新的绘制技术的原因之一.

Sven C. Olsen 则以流体模拟为工具, 由计算机生成具有流体线条感的视频动画, 并开发出了一个视频动画渲染软件^[8], 他把物理方法和计算机视频处理技术结合起来, 是一次新的尝试.

2 凡高风格油画生成算法

本节将详细介绍所提出方法的实现细节, 算法流程如图 1 所示. 算法首先对流体进行模拟, 从而得到较为真实的流体线条作为流体参考图像; 其次, 利用流体参考图像所提供的梯度方向信息作为画笔方向, 对原始输入图像进行多层绘制; 再次, 利用经过改进的多光源局部光照模型以及油画涂料层叠感生成技术, 对绘制图像进行渲染; 最后, 使用颜色转换方法对绘制图像进行渲染, 使其具有更加明显和突出的凡高油画的风格.

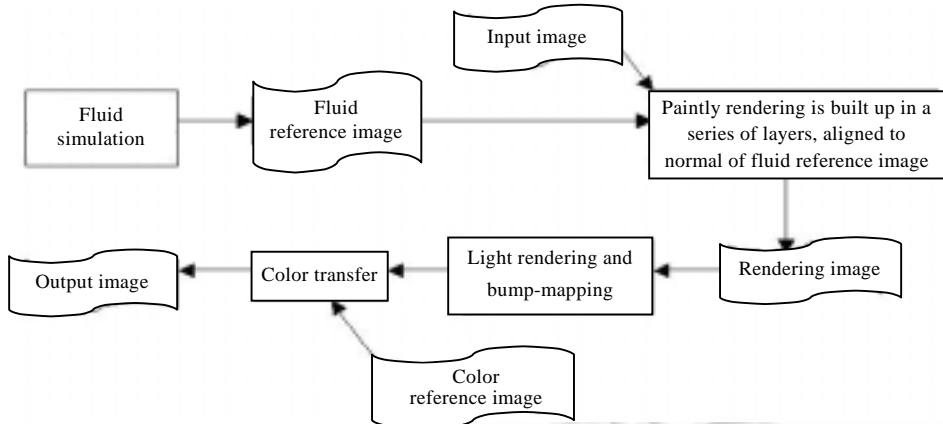


Fig.1 Algorithm frame

图 1 算法框架

2.1 流体模拟

凡高后期油画作品的一个最大特点在于:无论其自画像还是其风景画都表现出了强烈的、狂乱的漩涡感、流体感和奔腾的压力,这在东方美术中很难找到相等的例子^[4].为了达到类似的艺术效果,本文设计了如下两种方法对流体线条进行合成与模拟.

2.1.1 流体线条提取及流体参考图合成方法

Step 1. 用 Gaussian 滤波对原图进行模糊处理,消除凡高油画原图中的噪音.

Step 2. 用 Laplacian 算子探测 Gaussian 模糊后的图像边界,以获得凡高油画原图中的流体线条和漩涡(如图 2 所示).



Fig.2

图 2

Step 3. 选择边界图中某个最具代表性的流体、漩涡区域作为图像合成的参考区域,利用该区域生成并输入与原图等大的流体线条参考图.为了获得流体线条参考图,本文采用 Alexei A. Efros 的图像纹理合成算法^[9],首先从参考区域内随机地选择一定数量、大小的纹理区域进行合成;其次,对合成过程中重叠的图像纹理区域,通过动态规划的方法找到重叠区域内的一条最佳缝合线;最后,使用 alpha 混合沿图像的最佳缝合线对图像重叠区域进行缝合.以上处理可使选定的流体、漩涡区域自然、紧密地缝合起来而不会有雕琢之感.纹理合成的结果如图 3 所示.

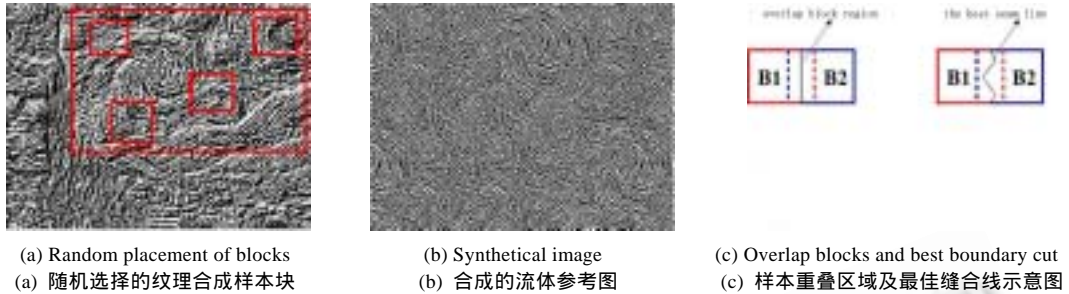


Fig.3
图 3

2.1.2 基于物理方法的流体线条生成方法

上述方法能够最大限度地保留凡高原画中流体、漩涡的用笔方式,并且合成速度较快.但是,合成的流体参考图仍然显得较为呆板、单调.因此,本文采用 semi-Lagrangian 方法对流体进行模拟^[10].该方法通过牺牲物理上的精确性来换取模拟时的快速性和以较大步长时间进行模拟时的稳定性.但是,该方法的一个固有缺陷就是其制造出的流体漩涡会以较快的速度消失殆尽.为此,本文对该算法作了一定的改进.使用文献[11]中提出的漩涡状态约束方法可以增强流体漩涡,同时延长其生存时间.漩涡状态约束力定义为如下形式:

$$f_{conf} = \varepsilon h(N \times w), N = \frac{\eta}{|\eta|}, \eta = \nabla |w|, w = \nabla u, \varepsilon > 0 \quad (1)$$

式中, w 表示流体漩涡, u 表示流体的速度向量.另外,在整个流体模拟过程中,只对流体速度向量的法线方向感兴趣,并据此生成流体参考图.关于非粘性流体力学的基本知识和概念,请参考文献[12].图 4 是根据上述方法获得的流体参考图.从图 4 可以看出,用该方法生成的流体线条更自然,流体线条的变化方式也更丰富.

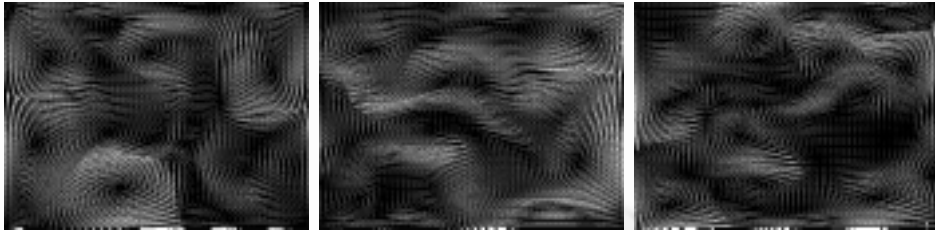


Fig.4 Using semi-Lagrangian method to simulate the fluid and its fluid reference images

图 4 使用 semi-Lagrangian 方法模拟流体运动获得的流体参考图

2.1.3 流体区域与用户自定义区域

在凡高的油画作品中,虽然油画笔触类似于流体线条,但其并没有将整幅油画作统一的流体风格化处理,而是根据画面物体的不同,分别给出不同的流体线条方向(如图 2(a)所示).为了达到类似的效果,本文采用了必要的人机交互技术,用户可以根据画面语义对图像的不同区域进行划分,再根据区域特点给出相应的笔刷方向.用户可以指定两种不同类型的区域:流体区域与用户自定义区域.流体区域采用第 2.1.1 节和第 2.1.2 节所述的方法合成流体线条,作为该区域内的流体线条参考图.用户自定义区域首先由 Sobel 算子探测该区域内物体的边界,保留该区域内的物体轮廓信息,其余部分则由用户指定相应的笔刷方向(如图 5 所示,其中,图 5(b)中的黑色为流体区域,白色为用户自定义区域).通过指定流体区域与用户自定义区域,全面、灵活地考虑了图像中不同区域所包含的不同语义信息,从而获得更好的绘制效果.

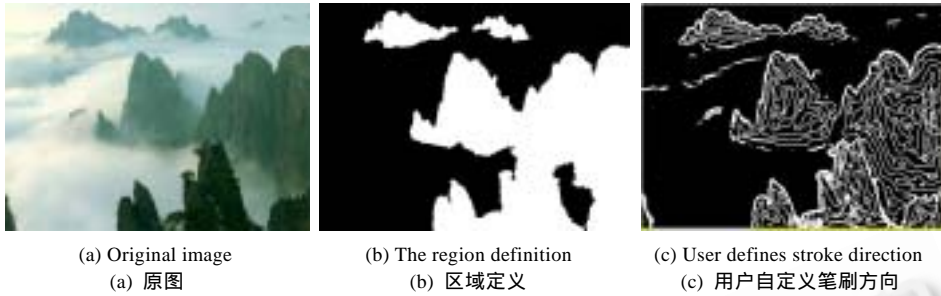


Fig.5

图 5

2.2 基于流体参考图的油画绘制及渲染算法

通过以上预处理过程,算法获得了流体线条参考图.在对新输入图像进行绘制时,基于 Hertzmann^[3]对静态图像多层绘制的算法思想,本文提出了一种新的油画绘制算法.下面将详细阐述算法的具体实现细节.

2.2.1 随机扰动

在 Hertzmann^[3]的算法中,当采用大笔刷对图像进行多层绘制时,会产生绘制的粗糙感.这与绘制算法所选取的画笔落点数目多少及画笔落点领域内颜色变化情况有密切关系.为了追求油画绘制的细腻感,本文设计了一种随机扰动的方法,以增加画笔落点的数目并增强画笔落点领域内颜色的变化程度.

设 $P_{in}(x,y)$ 为输入图坐标 (x,y) 处的像素值, $P_{out}(x,y)$ 为输出图坐标 (x,y) 处的像素值, $offset$ 为偏移参数.定义 $Random(parameters)$ 为一个函数,其作用是生成 $(0,parameters)$ 范围内的一个随机数. $offX, offY$ 为用 $Random(parameters)$ 函数生成的偏移坐标量.随机扰动的过程形式化为

$$P_{out}(x,y) = P_{in}(x + offX, y + offY) \quad (2)$$

其中, $offX = Random(offset) - \frac{offset}{2}$, $offY = Random(offset) - \frac{offset}{2}$, $offX \geq 0$, $offY \geq 0$.

2.2.2 基于流体参考图梯度法线方向的多层绘制

本文在对图像进行多层绘制时,采用了类似于 Litwinowicz^[2], Hertzmann^[3]的技术.不同之处在于,本文使用流体参考图颜色梯度的法线方向作为画笔方向对原图进行多层绘制.下面简要介绍 Hertzmann^[3]的算法思想.

Step 1. 对输入图像用高斯滤波模糊后获得参考图像,计算参考图像与输入图像在每个像素上的颜色空间距离.

Step 2. 逐一扫描图像中的每个像素,对于坐标 (x,y) 处的像素,求其领域内的平均颜色空间距离,若该值大于给定阈值,则以该领域内具有最大颜色空间距离的坐标点作为画笔落点,并将其加入画笔落点链表中.

Step 3. 从画笔落点链表中随机地取出落笔点,在画布上沿原图颜色梯度的法线方向进行绘制,直到该链表为空.

Step 4. 根据用户设定的画笔大小,由大到小,重复步骤 1~步骤 3,在画布上进行多层绘制,得到最终绘制图像.

在本文的绘制过程中,设 $f(x,y)$ 为流体模拟方法生成的流体线条参考图(二值图像); (x,y) 分别为该图像的行列坐标; $\partial_x f(x,y), \partial_y f(x,y)$ 为其方向导数; $g_x f(x,y), g_y f(x,y)$ 为该图的颜色梯度单位向量的两个分量,则有:

$$g_x f(x,y) = \frac{\partial_x f(x,y)}{\sqrt{\partial_x f(x,y)^2 + \partial_y f(x,y)^2}}, g_y f(x,y) = \frac{\partial_y f(x,y)}{\sqrt{\partial_x f(x,y)^2 + \partial_y f(x,y)^2}} \quad (3)$$

定义 $d_x f(x,y), d_y f(x,y)$ 分别为图像梯度法线向量的两个分量,则显然有:

$$d_x f(x,y) = -g_y f(x,y), d_y f(x,y) = g_x f(x,y) \quad (4)$$

在上述 Hertzmann^[3]算法的基础上,以式(3)、式(4)获得的流体线条参考图颜色梯度的法线方向作为画笔方

向,对经过随机扰动的图像进行绘制,即可获得具有流体感、漩涡感的绘制图像。

2.2.3 多光源局部光照模型

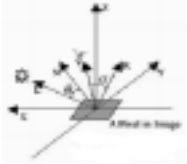


Fig.6 Lighting model

图 6 图像光照模型

Litwinowicz^[2],Hertzmann^[3]在算法中没有考虑画家的油画作品在不同的光照环境下会给观察者以不同的视觉感受.为了解决这个问题,综合 Lambert 漫反射光照模型和 Phone 关于镜面反射光的经验模型,本文提出了一种基于图像的多光源照射下的 Phone 局部光照模型(如图 6 所示).类似的光照模型在 Da Young Ju 等人的论文里有所涉及^[13].本文将该光照模型应用到图像的涂料层叠感生成方面.

定义任一幅图像的光照渲染模型为

$$I(x, y) = I_{diffuse}(x, y) + I_{specular}(x, y) \quad (5)$$

其中, x, y 分别表示图像在点 (x, y) 处的行、列坐标.

根据 Lambert 漫反射光照模型有:

$$I_{diffuse}(x, y) = I_a k_a + k_d I_l (N \cdot L) = I_a k_a + k_d I_l \cos \theta \quad (6)$$

其中, I_a 为入射的泛光光强, k_a 为物体表面对泛光的反射系数, k_d 为漫反射系数, I_l 为入射光强, θ 为入射光和物体表面法线方向的夹角, N 和 L 分别为物体表面单位法向量和入射光线的单位法向量.

根据 Phone 镜面反射光的经验模型有:

$$I_{specular}(x, y) = k_s I_l (V \cdot R)^n \quad (n \text{ 为镜面高光指数}) \quad (7)$$

其中, k_s 为物体表面对泛光的镜面反射系数, V 和 R 分别为视线方向和镜面反射方向的单位向量.

对于镜面反射,有 $R=2N(N \cdot L)-L$,则

$$I_{specular}(x, y) = k_s I_l (2(N \cdot L)(N \cdot V) - V \cdot L)^n \quad (8)$$

假设 $N \approx V$,则式(8)变化为

$$I_{specular}(x, y) = k_s I_l (N \cdot L)^n = k_s I_l \cos^n \theta \quad (9)$$

把式(6)、式(9)代入式(5),得到如下简化的光照模型:

$$I(x, y) = I_a k_a + k_d I_l \cos(\theta) + k_s I_l \cos^n(\theta) \quad (10)$$

多光源局部光照模型可以进一步表示为

$$I(x, y) = I_a k_a + \sum_{i=1}^M I_{i_i} (k_d \cos(\theta_i) + k_s \cos^n(\theta_i)) \quad (11)$$

2.2.4 油画涂料层叠感生成

为了模拟画笔在不同光照下的物理特性,Hertzmann 又提出了一种快速纹理绘制的方法^[14].在实验中,本文设计了另外一种快速、简单的油画涂料层叠感生成方法.相关技术在文献[15,16]中都有所涉及.本文的方法与他们的不同,实际上,类似于 Bump Mapping^[17]技术.

令一幅图像表示为一个三维参数曲面的形式:

$$I(u, v) = [u, v, intensity(u, v)] \quad (12)$$

其中 u, v 分别表示图像 $I(u, v)$ 在点 (u, v) 处的行、列坐标, $intensity(u, v)$ 表示图像在点 (u, v) 处的亮度值.

该参数曲面在点 (u, v) 处的法线向量可以表示为

$$N(u, v) = F_u \times F_v \quad (13)$$

其中, F_u, F_v 分别表示图像在 u, v 方向的偏导数,根据文献[18]有:

$$N(u, v) = [-F_u, -F_v, 1] \quad (14)$$

其中, $F_u = \frac{\partial intensity(u, v)}{\partial u}$, $F_v = \frac{\partial intensity(u, v)}{\partial v}$, F_u, F_v 的值可由Sobel算子求得.

由式(14),令 $N(u, v)_x = -F_u$, $N(u, v)_y = -F_v$, $N(u, v)_z = k \times 255$.其中 $0 \leq k \leq 1$,则对于给定的入射光向量 L ,可求得 $N(u, v) \cdot L = \cos \theta'$,且要求 $\cos \theta' \geq 0$,则第 2.2.3 节中的式(11)可以进一步表示为如下形式:

$$I(x, y) = I_a k_a + \sum_{i=1}^M I_{li} (k_a \times \max(0, \cos \theta'_i) + k_s \times \max(0, \cos^n \theta'_i)) \quad (15)$$

利用式(15)对处理图像进行光照渲染和油画涂料层叠感生成,以此反映出图像在不同光照下的视觉效果.

2.2.5 色彩转换

经过以上步骤后,算法已经获得了具有凡高油画漩涡感、流体感的处理图像.但是,处理图像从色彩感觉上仍与凡高作品有较大差别.为此,本文采用了类似于 Hertzmann^[7] Luminance remapping 的方法,不同的是要对亮度和彩色通道分别进行处理.为了降低各通道之间的相关性,需在 $l\alpha\beta$ 颜色空间中进行如下操作:通过一个简单的线性映射,使得输入图像各通道与参考原图各对应通道上的亮度或色彩分布相一致.

令 $I_{channel}(P)$, $channel = l, \alpha, \beta$ 为图像在任意像素 p 上各通道的取值,则可将输入图像重新映射为

$$I_{channel}(p) \leftarrow \frac{\partial_{channel} B}{\partial_{channel} A} (I_{channel}(p) - \mu_{channel} A) + \mu_{channel} B \quad (16)$$

其中, $\mu_{channel} A$, $\mu_{channel} B$ 分别代表 A, B 图像各通道上的均值, $\partial_{channel} A$, $\partial_{channel} B$ 分别代表 A, B 图像各通道上的方差. B 为颜色参考图, A 为输入的绘制图像,均已事先转换到 $l\alpha\beta$ 颜色空间.关于 RGB 空间与 $l\alpha\beta$ 空间的相互转换请参考文献[19].

3 实验结果

实验中的输入原图可从网址:<http://www.mrl.nyu.edu/projects/npr/painterly> 获得.其中,图 7 中的图 7(e)素材取自凡高的名画:Road with Cypress and Star, Vincent Van Gogh, Saint-Rémy: 12-15 May 1890;图 8 中的图 8(e)素材取自凡高的名画:Seascape at Saintes-Maries, Vincent Van Gogh, Arles: June 1886,均可从网址:<http://www.vangogh.com.cn/>处获得.

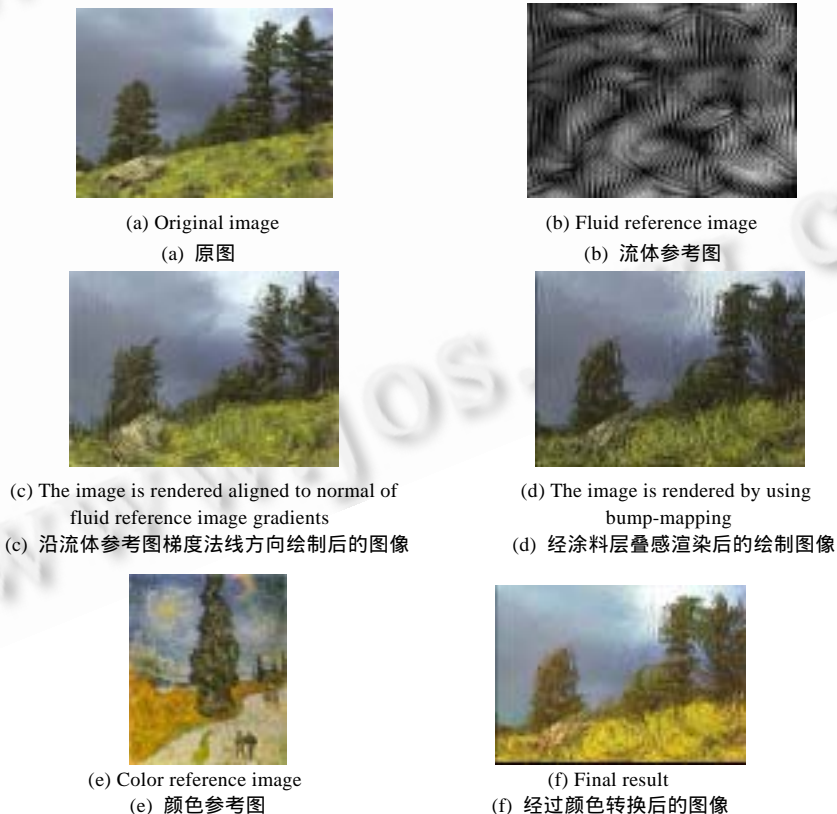


Fig.7
图 7



Fig.8
图 8

4 总 结

本文提出了一种新的非真实感绘制算法,该算法通过计算机自动生成具有凡高油画风格的艺术图像.该算法主要具备如下 3 个特点:(1) 综合运用基于物理模型的流体模拟技术、图像纹理合成技术和非真实感绘制技术对图像进行处理;(2) 利用流体线条参考图颜色梯度的法线方向作为画笔方向对原图进行绘制;(3) 提供两种互补的流体线条模拟合成方法,创造了良好的用户交互环境.同时,该算法解决了 3 个主要问题:(1) 应用改进了的多光源局部光照模型对绘制图像进行光照渲染;(2) 设计了一种快速、简单的涂料层叠感生成方法,从而能有效增强绘制图像的涂料层叠感;(3) 利用颜色转换方法使绘制图像的色彩感觉趋近于凡高原图.在未来的工作中,我们将把该算法扩展到对视频动画的处理方面,开发出一种能够对视频动画进行快速艺术风格渲染的软件,同时设计出一套通用的艺术图像自动模拟生成技术.另外,为了进一步提高算法的自动化和智能化,我们将逐步展开对画面物体区域进行自动语义划分的相关研究工作.

References:

- [1] Lansdown J, Schofield S. Expressive rendering: A review of Non-Photorealistic techniques. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 1995,15(3):29–37.
- [2] Litwinowicz P. Processing images and video for an impressionist effect. In: *Proc. of the SIGGRAPH'97*. New York: ACM Press, 1997. 407–414. <http://www.cs.toronto.edu/~arnold/320/Readings/PAINTER.PDF>
- [3] Hertzmann A. Painterly rendering with curved brush strokes of multiple sizes. In: *Proc. of the SIGGRAPH'98*. New York: ACM Press, 1998. 453–460. <http://mrl.nyu.edu/publications/painterly98/hertzmann-siggraph98.pdf>
- [4] Zhou SF. *Biography of Van Gogh with Picture Album*. Ji'nan: Shandong Pictorial Press, 2002 (in Chinese).
- [5] Haeberli P. Paint by numbers: Abstract image representations. *Computer Graphics*, 1990,24(4):207–214.
- [6] Hertzmann A, Perlin K. Painterly rendering for video and interaction. In: *NPAR 2000: 1st Int'l Symp. on Non-Photorealistic Animation and Rendering*. ACM SIGGRAPH/Euro Graphics, 2000. 7–12. <http://mrl.nyu.edu/publications/painterly-video/hertzmann-perlin-npar2000.pdf>
- [7] Hertzmann A, Jacobs CE, Oliver N, Curless B, Salesin DH. Image analogies. In: Fiume E, ed. *Proc. of the SIGGRAPH 2001*. New York: ACM Press, 2001. 327–340.
- [8] Olsen SC, Maxwell BA. Fluid simulation as a tool for painterly animation. 2004. <http://www.cs.northwestern.edu/~sco590/>
- [9] Efros AA, Freeman WT. Image quilting for texture synthesis and transfer. In: *Proc. of the SIGGRAPH 2001*. New York: ACM Press, 2001. 341–346. <http://graphics.cs.cmu.edu/people/efros/research/quilting/quilting.pdf>
- [10] Stam J. Stable fluids. In: Rockwood A, ed. *Proc. of the SIGGRAPH'99*. New York: ACM Press, 1999. 121–128.
- [11] Fedkiw R, Stam J, Jensen HW. Visual simulation of smoke. In: Fiume E, ed. *Proc. of the SIGGRAPH 2001*. New York: ACM Press, 2001. 15–22
- [12] Dong ZN, Zhang ZX. *Incompressible Fluid Mechanics*. Beijing: Tsinghua University Press, 2003 (in Chinese).
- [13] Ju DY. *Image-Based illumination for electronic display of artistic paintings [MS. Thesis]*. Department of Media Technology, Sogang University, 2002.
- [14] Hertzmann A. Fast paint texture. In: *NPAR 2002: 2nd Int'l Symp. on Non-Photorealistic Animation and Rendering*. 2002. 91–96. http://www.dgp.toronto.edu/papers/ahertzmann_NPAR2002.pdf
- [15] Liu W, Tong X, Xu Y, Shum H. Artistic image generation by deviation mapping. *Int'l Journal of Image and Graphics*, 2001,1(4): 565–574.
- [16] Liu ZC, Zhang ZY, Shan Y. Image-Based surface detail transfer. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2004,24(3):30–35.
- [17] Blinn JF. Simulation of wrinkled surfaces. In: *Proc. of the SIGGRAPH'78*. New York: ACM Press, 1978. 286–292.
- [18] Doggett M, Kugler A, Strasser W. Displacement mapping using scan conversion hardware architectures. *Computer Graphics Forum*, 2000,20(1):13–26.
- [19] Reinhard E, Ashikhmin M, Gooch B, Shirley P. Color transfer between images. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2001, 21(5):34–41.

附中文参考文献:

- [4] 周时奋. *凡高画传*. 济南: 山东书画出版社, 2002.
- [12] 董曾南, 章梓雄. *非粘性流体力学*. 北京: 清华大学出版社, 2003.



赵杨(1980 -),男,云南昆明人(白族),硕士生,主要研究领域为非真实感绘制,计算机动画,虚拟现实与多媒体.



徐丹(1968 -),女,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为基于图像的建模与绘制,计算机视觉,图像分析,虚拟现实与多媒体.