

# 一种图像油画风格化绘制的新算法<sup>\*</sup>

卢少平<sup>1+</sup>, 张松海<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(清华大学 计算机科学与技术系, 北京 100084)

**摘 要:** 本文提出了一种油画风格化绘制的新算法, 将真实图像转换为油画风格。首先根据油画绘制特点, 结合了改进的双边滤波与数学形态学操作来建立金字塔结构的多层参考图像序列。其次提出基于视觉重要性图的笔划布置算法, 使用人脸、视觉焦点检测等方法来检测重要性区域, 并根据这些区域信息进行画笔绘制的起点、方向计算精度改进和对图像纹理边界做加强约束, 达到了油画内容主次分明的效果。实验结果表明本文的油画风格化改进算法能够达到较好的视觉效果。

**关键词:** 非真实感绘制; 双边滤波; 形态学操作; 重要性区域; 图像矢量场

## 1 介绍

近年来基于计算机算法实现的油画、水彩画、圆点画等非真实感绘制 (Non Photorealistic Rendering, NPR) 的技术发展非常迅猛, 其实际应用也越来越受人关注。通常的非真实感绘制方法的研究大致分为两类, 一类是使用物理方法实现对绘画原材料的模拟[1]; 另一类则是从最终效果出发, 参考真实画家的创作过程, 模拟笔划形状, 通过优化算法或者贪婪算法来逐层实现绘制, 从而实现油画的生成[2][3][4]。

在基于笔划的油画风格化绘制过程中, 需要解决的问题有以下几点: 首先是如何建立与绘画过程更加一致的**参考图像层**。油画的一大重要特色是描绘景象的层次感, 在每个层次上面, 画家是用基本相同的颜色和笔调来进行绘制。因此需要根据输入图像, 通过一定的方法建立各个层次模型, 这些模型应该需要由粗到细地逐步表现图像的细节分量。其次是**建立有效的油画笔划模型**。在现实的绘制过程中, 画家在画布上用笔的着墨来描述场景, 并由此阐述其所要表达的视觉和心理等信息。对于计算机上的绘制, 笔划的大小、起始点、绘制方向等都需要根据一定的模型来产生, 其中笔划的布置对于绘制的视觉准确性具有非常大的影响, 因此笔划布置策略至关重要。同时, 艺术作品具有主次分明的特点, 传统的油画风格化绘制算法仅是根据图像信息对图像做统一的像素级处理, 因此往往不能很好地表达出强烈的局部内容信息与表现主题。

本文在基于笔划的油画风格化绘制框架下对其中的关键步骤进行了改进。本文的主要贡献有如下几点: (1) 首先以金字塔式的双边滤波与数学形态学(Mathematical Morphology)操作获取各参考图像层, 从而根据图像的纹理

---

<sup>\*</sup> Supported by the Natural Science Foundation under Grant No. U0735001 (可视媒体智能处理理论和传输方法); the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education under Grant No. 20060003057 (基于结构分析的视频处理)

信息以各层相关的笔划进行绘制；(2) 引入视觉重要性图，提出**基于视觉重要性图的笔划布置算法**，将图像的人脸、焦点等重要性区域的重要性分布进行笔划起点、方向改进油画效果，使油画具备明确的表现对象。

本文的安排如下：第2节讲述传统的基于笔划的油画风格化绘制领域的相关工作；在第3节具体描述改进的金字塔参考模型、重要性区域的更高精度笔划起点与方向计算、边界加强约束等油画绘制算法细节；在第4节给出了实验结果及其讨论；最后是总结与展望部分。

## 2 相关工作

基于笔划的油画风格化绘制经典算法由 Hertzmann 首先提出[4]，主要思想是从静态输入图建立高斯金字塔的多层参考图像，然后在各层中使用 Sobel 等滤波函数得到图像的梯度信息，由此建立画笔的起点和走向，再由粗到细逐步实现对画布的绘制。参考图像序列采用高斯滤波的核函数来处理得到与原始图像大小一致的参考图层序列。对于笔划起点，首先建立与笔划半径对应的网格，然后在每个网格内，统计该区域中相对的参考图像与当前画布的像素误差总和，若其值大于用户给定的一个阈值，则定义该网格区域内需要建立一个笔划起点，笔划起点的中心是该网格区域内像素值误差最大的像素点。笔划方向则主要依据笔划起点上的梯度信息来判断。Hertzmann 的方法构建分层图像序列的方法简单采用高斯滤波，并未从画家观察的图像分解角度进行深入研究；并且笔画布置过程也未考虑作品内容的主次关系。

此后，为改善油画表面真实度，在上述工作的基础上发展出了基于光照模型的油画绘制[6]。该工作的主要思想是先从图像中计算得到高度场信息，然后再采用 Phong 等光照模型，将这些因素计算到笔划绘制算法中，从而能够绘制出高光区域和阴影区域，在视觉上产生一定的光照视觉效果。同时对于笔划模型，也引入边缘透明度等因素，试图将笔划绘制效果更趋近于画家的手工笔划绘制风格。

针对传统油画风格化绘制算法对于笔划

方向的简单计算，James 等人[7]提出了基于较强边缘上采用径向基函数(Radial Basis Function, RBF)来训练并插值图像其他区域的纹理走向。该方法适合于计算走向一致的大块纹理，但对于纹理走向复杂且内容丰富的画面则有一定的缺陷。

此外在论文[5]中提出了一种基于学习的风格化绘制算法。该算法根据已有的一对输入图像和风格化绘制效果图像，建立相关的风格转换模型，然后采取优化的方法将另外一幅输入图像进行风格化绘制。该方法需要预先去寻找作为学习的原图和风格化图片。在[13]提出的算法中，首先从油画作品中提取出一定的笔划模型，然后将待绘制图像进行分割，并将笔划模型指派给相应的分割区域，再使用纹理合成的方法来生成最终图像。

在论文[12]中，针对[4]中传统笔划方向绘制不精细等问题，作者提出了另外一种改进思路：首先使用人工交互的方式确定需要重点绘制的区域，然后在此基础上建立能量函数，采用松弛迭代的方式对周围逐步演变为较粗糙的绘制风格。该方法在计算速度上有一定缺陷，同时需要事先手动指定重要性区域中心。

本文的基本思路是在传统的基于笔划的油画绘制算法的基础上做改进。相比于传统高斯金字塔模型所产生全局统一的模糊效果不同的是，本文试图利用充分考虑纹理上各向异性的双边滤波与易于产生局部统一的颜色信息块的数学形态学操作来建立金字塔参考图像序列的处理。本文的算法还将根据人类视觉敏感区域在上述油画风格化绘制方法上对笔划边界做加强约束，同时对起笔检测的阈值、笔划方向在最精细层的计算上做了进一步的处理。

## 3 油画风格化绘制算法

如下图所示，本文提出的油画风格化绘制算法在以下方面做了改进：(1) 在金字塔参考图像序列上，采用充分考虑图像空间纹理和颜色细节信息的双边滤波处理，并用形态学操作将大块图像信息进行整合，以适应相应的大小笔划绘制；(2) 在图像重要性区域基于重要性

分布来改进对笔划起点、方向的计算,同时使用纹理边界进行笔划约束。

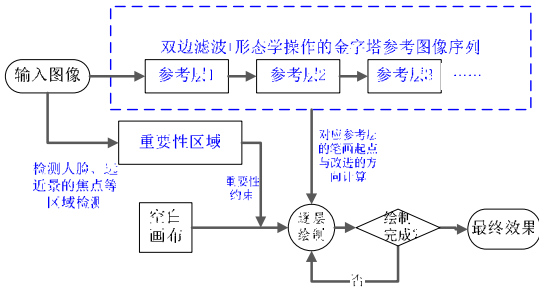


图1 油画风格化绘制算法的流程

### 3.1 双边滤波与形态学操作生成的金字塔参考序列

金字塔参考序列的建立准则,既要使层次不致太过于杂碎从而突出油画效果,同时还需要保持图像的内容信息以保证准确性。由于高斯滤波器采用的是全局统一的核函数,因此产生的滤波效果呈现总体模糊性,对于纹理边界信息和预期分层次的高频信息在金字塔上不能产生很好的区分度。此外高斯滤波还要通过拒绝偶数的行与列来下采样图像,再根据双线性插值的方法进行上采样,从而得到与原始图像大小一致的参考图层。上述上下采样也容易形成图像的信息丢失。



图2 原始输入图像

双边滤波算法处理的效果,则完全可以保持图像的主要纹理和边界信息,同时能够自适应地平滑掉块内的细小信息[9]。

假设 $\hat{x}$ 为某待处理像素点,  $x$  为其临近像素集合 $\Omega$ 中的像素点,  $p(x)$ 是该点的像素值。

则双边滤波器的核函数定义如下:

$$B(\hat{x}, \sigma_d, \sigma_r) = \frac{\sum_{x \in \Omega} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\|\hat{x} - x\|}{\sigma_d} \right)^2} \cdot \omega(x, \hat{x}) \cdot p(x)}{\sum_{x \in \Omega} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\|\hat{x} - x\|}{\sigma_d} \right)^2} \cdot \omega(x, \hat{x})} \quad (1)$$

在上述公式中,分母部分为加权系数的归一化(normalization)操作,而加权系数则定义如下:

$$\omega(x, \hat{x}, \sigma_r) = e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\|p(\hat{x}) - p(x)\|}{\sigma_r} \right)^2} \quad (2)$$

这里的 $\sigma_r$ 和 $\sigma_d$ 分别为表征颜色分量的强度因子空

间因子。事实上,在当 $\sigma_r \rightarrow \infty$ 时 $\omega(x, \hat{x}, \sigma_r) \rightarrow 1$ ,

此时该滤波器完全退化为高斯滤波器。

为便于产生图像大范围的视觉统一颜色块,从而更好的产生笔划的流畅处理,本文采用数学形态学上的先闭后开操作来对双边滤波后的图像做处理。对于图像丰富细节信息块的整合,本文采用数学形态学的处理方法。形态学中腐蚀是能够消除边界点,使边界向内部收缩,因此可以消除小且无意义的像素区域。而膨胀是将与像素块接触的所有突兀点或者高频点合并到该物体中,使整块边界向外部扩张,因此可以达到填补像素块空洞整合的目的。二者结合起来,开运算(先腐蚀后膨胀)用来消除小杂块、在细长点处分离像素块、平滑较大块的边界,而闭运算(先膨胀后腐蚀)则能填充颜色块内的细小空洞、连接邻近块和平滑其边界,同时这两种操作的结合都并不会明显改变颜色块的空间特征。

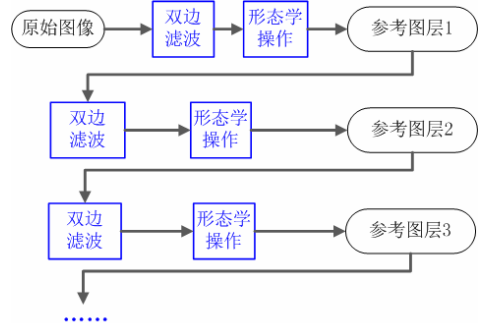


图3 双边滤波与形态学操作的多层参考图像生成过程

上图显示了基于双边滤波与形态学操作



算法的多参考图像生成过程。首先在对图像进行双边滤波过程中，公式(1)(2)中的 $\alpha_r$ 和 $\alpha_d$ 取值分别随参考图层序号的递增而变大（即逐步抛弃纹理细节部分），然后对滤波后的图像实行先闭后开的形态学操作，从而形成每一层的参考图层。



图 4 油画风格化绘制部分中间结果图。(a)为传统高斯模糊的参考图片，(b)本文算法得到的参考图片；(c)和(d)分别为较粗糙参考图层的绘制结果。

3.2 图像重要性区域的约束

从人的视觉感觉上来说，图像信息中往往存在一些敏感性区域，例如人的脸部、近景摄影构景图中的黄金分割点处等。当油画效果产生后，如果在这些区域风格化绘制比较粗糙，则会极大的损害观赏效果。因此，需要根据这些重要性区域做一定的边界约束。具体的做法是根据图像的重要性分布来决定各个区域的边界提取强度，再由提取出来的边界来约束笔划。

(1) 人脸区域

首先使用人脸检测技术搜索到脸部的圆形区域。作为计算机视觉中的一个热门课题，人脸检测研究算法目前已经发展的非常完善。本文采用[11]中提出的人脸检测技术来进行脸部检测。一般而言，人对眼睛及其周边部位特别敏感，而眼睛通常在该圆区域的上半部分。此外对该圆型区域做增强的同时，需要考虑与其周边粗糙程度的渐近效果。根据上述分析，采用具体的检测方法是：对检测到的人脸部圆形区域的上半部分的重要性区域参数 $\alpha_1$ ，圆形区域的下半部分 $\alpha_2$ 。在圆的周边，离圆心 2 倍半径范围内的像素点，相应的 $\alpha$ 值逐渐下降到 0。

(2) 远近景焦点

通常远景构景图中，视觉焦点一般在图像中心偏下的位置。因此在这个区域做类似于上述方法的重要性检测。近景通常在图像上半部分的左右两个黄金分割点处，近景焦点检测方法同上。

由上述方法得到了重要性区域后，需要对图像进行边界提取。图像的边界提取算法有很多种，包括本文之前提到的 Sobel 算法和 Canny 算法等。本文采用[9]所提出的边界提取算法。该算法基于双边滤波做预处理，然后根据高斯差分(Difference-of-Gaussian, DoG)操作来得到较为平滑和准确的边界。为保证边界的提取细节程度与区域重要性参数 $\alpha$ 成正比，定义如下：

$$D(\hat{x}, \sigma_e, \alpha, \tau, \varphi) = \begin{cases} 1, & \text{if } ((S(\hat{x}, \sigma_e) - \alpha \cdot \tau \cdot S(\hat{x}, 1.3 \cdot \sigma_e))) > 0 \\ 1 + \tanh(\varphi \cdot (S(\hat{x}, \sigma_e) - \alpha \cdot \tau \cdot S(\hat{x}, 1.3 \cdot \sigma_e))), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

其中高斯模糊函数为：

$$S(\hat{x}, \sigma_e) = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sigma_e^2} \cdot \int f(x) \cdot e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{x-\hat{x}}{\sigma_e} \right)^2} dx \quad (4)$$

在上述公式中， $\alpha$ 是图像重要性区域分布因子， $\sigma_e$ 为空间尺度， $\tau$ 是边界检测敏感因子，

$\varphi$  是边界亮度因子。

由上述做法得到图像边界后，对于边界约束的操作，具体做法是笔划绘制过程中，当某一笔划的笔划中心在已由 DoG 得到的边界上发生跨越时，跨越部分不能进行绘制，且强制该笔划提前结束。



(a) (b)

图 5 在参考图上根据重要性分布采用 DoG 所得到的边界信息。

对于上述重要区域，在传统的多层绘制时，最精细绘制层上还要再调整判断笔划起笔的阈值(调小该阈值，从而增加笔划数量以改进细节绘制程度)，笔划半径也要变小，以产生更精确的绘制效果。此外为进一步提高方向精度计算，本文还通过梯度由边界正切矢量场计算规范图像的矢量场[8]，再由线性积分卷积[10]的算法来指导最终的笔划方向。矢量场计算能够充分考虑图像边界强度、纹理走向等因素，在计算矢量场时既考虑周围主边界信息，又兼顾邻域梯度属性，同时尽量保持同方向中像素点的矢量场方向一致性。通过上述方法最终获取该点的方向信息并作为油画笔划方向的指导。

## 4 实验结果

在实验过程中，采用普通的真彩 32 色 JPEG 压缩图片作为输入(原始输入分别是图 3a 和 b)，通过使用传统基于笔划的油画绘制算法和改进算法生成的软件进行风格化绘制来比较改进算法在绘制效果上的提升。

在图 4 中，(a)和(b)分别为传统高斯模糊、

改进的双边滤波和数学形态学操作生成金字塔参考序列中的某一相同层的参考图片，(c)和(d)分别是在较粗糙层的绘制中间结果。从结果中可以看出，相比于传统算法，改进算法能够将大图像块产生趋于一致的模糊效果，这种模糊基本满足视觉感知上的分类；同时图像上大致的纹理在整体模糊的情况下能够比较清晰的保留下来。上述两个方面的改进，得益于引入双边滤波在参考图层上的处理。同时大像素块内的次级感知纹理细节能够有效的去除，而某些较为敏感的小像素块(如手臂上的绿色区域)都能完整的保留下来，这样的处理结果与数学形态学操作的理论分析相一致。图 5 的实验是在参考图上根据重要性分布使用 DoG 方法得到的用以改进笔画起点和方向的边界信息。图 6 的(a)和(c)是传统绘制算法的结果，(b)和(d)则本文算法的最终结果。从对比结果上来看，后者的绘制在边界上的笔划更加流畅自然，同时由于最精细层的改进，在脸部也更加细腻逼真，在人脸等重要区域上的细节更加准确。由此可以看出改进的笔划方向处理能够得到更加接近纹理走向，这既得益于整体笔划方向的改进，促使周边区域笔划能够较好地跟随主边界，同时也因为参考图像生成算法的改进和重要性区域上在对笔划边界绘制上的约束所带来的视觉效果改进。

## 5 总结

本文采取双边滤波与数学形态学操作来建立金字塔参考图像序列，实验结果表明新的参考序列具有更易于笔划绘制的纹理走向和清晰的边界。同时本文算法根据人类视觉敏感区域在上述油画风格化绘制的最精细层上做了根据敏感系数来进行笔划起点阈值调整、方向精度改进和边界加强约束。实验结果表明本文的算法生成的油画内容主次分明，具有更加突出的油画效果。

在以后的工作中，在保证算法运行速度的前提下，我们将在以下方面做进一步研究和改进：(1)继续研究油画的创作方式、原材料以及色彩运用等艺术表现手法，并重点研究各种画笔的使用技巧；(2)研究采用基于光流计算

等方法生成视频的油画风格。



图6 图像油画风格化绘制结果。(a)(c)传统笔划算法的绘制结果, (b)(d)是本文算法得到的绘制结果。

## 参考文献

- [1] Cassidy J.Curtis, Sean E.Anderson, Joshua E.Seims, Kurt W. Fleischer, David H.Salesin. Computer-Generated Watercolor. SIGGRAPH 97 Conference Proceedings, pp. 421-430. August 1997.
- [2] Harold Cohen. The Further Exploits of Aaron, Painter. Stanford Humanities Review. Vol.4,No.2.pp.141-158.1995.
- [3] Ken Perlin and Luiz Velho. Live Paint: Painting with Procedural Multiscale Textures, SIGGRAPH 95 Conference Proceedings, pp. 153-160. 1995.
- [4] Hertzmann. Painterly rendering with curved brush strokes of multiple sizes. Computer Graphics(Proceedings of SIGGRAPH 98), 32: 453-460, 1998.
- [5] Hertzmann, C. E. Jacobs, N. Oliver, B. Curless, and D. H. Salesin. Image analogy. In ACM

Transaction on Graphics, pages 327-340, 2001.

- [6] Hertzmann. Fast Paint Texture[C]. Proceedings of the 2nd International Symposium on Non-Photorealistic Animation and Rendering. Annecy, France, 2002 ACM Press. 2002:91-96, 161.
- [7] James Hays, Irfan Essa. Image and Video Based Painterly Animation. 3rd International Symposium on Non-Photorealistic Animation and Rendering (NPAR'04), pp. 113--120, Annecy, France, June 07-09, 2004.
- [8] H. Kang, S. Lee, C. Chui. Coherent Line Drawing. Proc. ACM Symposium on Non-photorealistic Animation and Rendering, pp. 43-50, San Diego, CA, 2007.
- [9] Holger Winnem Oller, Sven C.Olsen, Bruce Gooch. Real-time Video Abstraction. Proceedings of ACM SIGGRAPH 2006.
- [10] Brian Cabral and Leith (Casey) Leedom. Imaging Vector Fields Using Line Integral Convolution. Proceedings of ACM SIGGRAPH 93, Aug 2-6, Anaheim, California, pp. 263-270, 1993.
- [11] P. Viola and M. Jones. Rapid object detection using a boosted cascade of simple features. Proc. of CVPR, vol.1, pp.511-518, 2001.
- [12] Hertzmann. Paint By Relaxation. Computer Graphics International 2001 (CGI'01), 2001.
- [13] Wang, W. Wang, H.P. Yang, and J.G. Sun, Efficient example-based painting and synthesis of 2D directional texture. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, vol.10, no. 3, pp. 266-277, 2004.

## A new painterly rendering algorithm for image stylization

Shaoping Lu<sup>1+</sup>, Songhai Zhang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(Department of computer science and technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** In this paper, a new painterly rendering algorithm is proposed which attends to achieve painterly stylization for a real image. Firstly according

to the characteristic of painterly rendering, we combine with an improved bilateral filter and mathematical morphological operation to construct a pyramid sequence with multi-scale reference images. Then a visual saliency based stroke computing algorithm is introduced. In this method, face and visual focus detections are first employed to get the salient regions. Based on this salient information, we improve the accuracy of stroke's control point and direction computing. Meanwhile, the image texture edge is stricter constrained to achieve the effect that the rendering should pay different attention to the image contents. Experimental results demonstrate that the improved painterly rendering algorithm produces satisfactory visual results.

**Key words:** Non Photorealistic Rendering; Bilateral filter; Morphological operation; Salient region; image vector field

**作者简介：**卢少平 (1981—),男,江西宜丰人,博士研究生,主要研究领域为视频处理; 张松海(1978—),男,博士,讲师,主要研究领域为视频处理.