

## 具有层次素描纹理的素描画绘制方法

李智慧, 范铁生\*, 唐春鸽, 刘磊

(辽宁大学 信息学院, 沈阳 110036)

(\* 通信作者电子邮箱 fit0@lnu.edu.cn)

**摘要:**针对现有的计算机非真实感绘制(NPR)技术关于素描画的绘制方法的实现效果与手绘风格存在一定差异的问题,设计了一种能够产生层次素描纹理的方法,并将其与多像素宽边缘线条融合,生成具有层次感素描纹理的素描画。首先对原始图像做去噪、增强等预处理,用微分算子提取多像素宽的轮廓线条;再通过膨胀和腐蚀处理并将结果相减生成多层双边轮廓线条,用运动模糊处理多层双边线条得到素描纹理;最后融合边缘和素描纹理,得到素描效果图像。通过对不同特点的图像进行实验,证明该方法得到的素描画的效果比较接近手绘风格。

**关键词:**非真实感绘制;线条提取;边缘提取;二值化;素描纹理;素描画

**中图分类号:** TP391.41 **文献标志码:** A

### Sketch drawing method with hierarchical sketch texture

LI Zhi-hui, FAN Tie-sheng\*, TANG Chun-ge, LIU Lei

(College of Information, Liaoning University, Shenyang Liaoning 110036, China)

**Abstract:** The existing technique of computer Non-Photorealistic Rendering (NPR) on sketch drawing always has some differences from hand-drawing. In order to solve the problem, a method was designed which can generate sketch levels, and integrate with multi-pixel-wide lines to generate sketches which has sketch texture with sense of hierarchy. First, pretreat the original image by denoising and enhancement, adopt differentiation to extract multi-pixel-wide contour lines, use dilation and erosion and subtract the result to generate multi-layer bilateral of contour lines, then take the processing of motion-blur to multi-layer bilateral of contour lines to generate sketch texture, and finally, integrate edge and sketch texture, thus completing images sketching. Through lots of experiments on images of different features, it is proved that the results of the method are more close to hand-drawing style.

**Key words:** Non-Photorealistic Rendering (NPR); line extraction; edge extraction; binarization; sketch texture; sketch

计算机图形学自20世纪60年代诞生以来,真实感绘制一直是贯穿其中的主旋律。真实感绘制技术综合利用数学、物理学、计算机科学和其他科学知识在计算机图形设备上生成像照片那样的真实感图形,在计算机中重现真实世界场景。随着真实感图形趋向于具有更强的真实感并提供更贴近现实世界的场景,研究者们意识到,有些时候,人们反而更需要由计算机来生成一些不同于照片的图形<sup>[1]</sup>。如在医学领域,人们有时会选择手绘插图而不是照片来做文字说明,因为手绘方式可以将微小的或被隐藏的重要部分更清晰地描绘出来。计算机非真实感绘制(Non-Photorealistic Rendering, NPR)由此产生<sup>[2]</sup>。

### 1 计算机非真实感概述

非真实感绘制最早出现在20世纪80年代的早期论文中,但当时这些论文所展示的技术仍被孤立对待。直到20世纪90年代中期,在SIGGRAPH, EUROGRAPHICS等国际会议上出现了大量与非真实感绘制相关的文献,这一领域的轮廓才逐渐显现出来<sup>[3]</sup>。非真实感绘制指的是利用计算机生成不具有照片般真实感,而具有手绘风格的图形的技术<sup>[4]</sup>。现有的计算机非真实感绘制技术根据输入不同,分为基于几何

的非真实感绘制技术和基于图像的非真实感绘制技术。基于图像的非真实感绘制技术按照对艺术作品模拟方式的不同又可以分为基于笔划的绘制和无笔划绘制两种<sup>[5]</sup>。素描是非真实感绘制的一个典型效果,生成素描效果的技术大致可以分为基于物体空间技术和基于图像空间技术<sup>[5]</sup>。

近年来已经提出了一些图像素描风格化算法。Winkenbach等<sup>[6]</sup>通过计算可控密度阴影来指导纹理的生成,使得在图像亮度较高的区域和有较多笔画交汇的区域阴影较少或者阴影消失,而在亮度较低的区域和笔画开始分叉的区域阴影较多或者重新生成阴影。Salisbury等<sup>[7]</sup>通过大量的人工交互来定义纹理方向和笔划方式,生成的钢笔素描画的纹理效果较好。Kang等<sup>[8]</sup>首先使用Canny边缘检测提取图像的轮廓图,然后在滑动窗口内手工调整局部Canny边缘检测参数,对轮廓进行修正,最后对轮廓进行风格化线条渲染,得到最终的线条画。Son等<sup>[9]</sup>计算图像各像素点属于边缘点的概率,然后对各级大概率像素点使用曲线拟合,并采用一定的线条风格对曲线轮廓进行渲染,得到最终的线条画。Kang等<sup>[10]</sup>首先对图像的边缘切线场进行双边滤波,然后根据边缘切线场构建动态高斯差分边缘检测窗口,生成线条画。但这些算法也存在一些问题。Winkenbach等<sup>[6]</sup>的算法只适用于一

收稿日期: 2012-04-01; 修回日期: 2012-05-29。

**作者简介:** 李智慧(1987-),女,内蒙古赤峰人,硕士研究生,主要研究方向:数字信号处理、数字图像处理; 范铁生(1955-),男,辽宁沈阳人,教授,主要研究方向:语音信号检测、声纹识别、数字图像处理; 唐春鸽(1986-),女,山东威海人,硕士研究生,主要研究方向:数字信号处理、数字图像处理; 刘磊(1986-),男,辽宁阜新,人,硕士研究生,CCF会员,主要研究方向:信号处理、声源定位、数字图像处理。

些能够用参数表示的曲面模拟,对纹理复杂的画面生成效果有限。Salisbury等<sup>[7]</sup>的算法生成的风格化图像效果与用户设置关系很大。Kang等<sup>[8]</sup>的算法生成的线条画效果较好,但是需要大量的人工操作,效率很低。由于曲线拟合的轮廓连续性较差,因此Son等<sup>[9]</sup>的算法不利于细节表达。Kang等<sup>[10]</sup>的算法生成的线条画能够将一些不连贯的区域连接起来,画面很连续,但也会增加一些不应存在的线条。总体来说,目前的图像素描风格化算法或者未遵循素描风格创作的艺术特点,或者需要大量人机交互,同时运算量较大<sup>[11]</sup>,或者效果不能接近手绘风格,无法快速地实现素描图像绘制。

## 2 基于图像的素描效果绘制方法

### 2.1 算法的设计思想

素描是一种表现光线和阴影的艺术手段,就艺术特征而言,其基本语言是形体与色调。素描形体指画面中形的不同空间状态,也就是轮廓;素描色调是指画面内不同形体区域外内的明暗变化。形体与色调构成了素描的造型,且两者同时存在。形成形体的重要因素——光线和阴影,与色彩、亮度是相对应的,因此在素描艺术创作过程中,对光线和阴影的表达与对色彩和亮度的表达有本质的联系<sup>[11]</sup>。本文根据以上素描画风格和特点,通过模拟手绘作画方式,生成更接近手绘特点的素描效果。算法特点体现在两方面:一个是线条轮廓的生成,线条轮廓的生成是素描画制作的重点,目前多数的线条提取方法是用微分算子提取单像素宽的线条,这样的线条不能体现笔划特点。本文用Robert微分算子提取图像多像素宽的边缘线条,使其更能体现图像的特征。另一个是素描纹理的生成,素描纹理是素描画的重要部分,文章模拟手工作画时的层次绘制方式,先由轮廓线条生成多层沿着轮廓线由内而外的双边线条,通过对多层双边线条分别进行两次不同方向的运动模糊来生成具有层次感的素描纹理,最后融合经过腐蚀细化的二值线条轮廓,得到了纹理清晰素描图像。实验证明,此方法生成的素描纹理更接近于手绘风格,线条轮廓更具有笔划特点。

1)对图像进行预处理。平滑滤波去除噪声和图像增强处理<sup>[12]</sup>。图像在生成和传输的过程中,可能会受到各种噪声的干扰,导致图像质量下降。对受到噪声污染的图像直接提取边缘,得到的效果可能不理想,因此对图像进行去噪处理,尽量弱化噪声,以提高图像质量<sup>[13]</sup>。平滑滤波处理后的图像,由于去掉了高频细节部分而显得比较模糊,边缘轮廓不明显,若直接用来提取边缘,得不到清晰的线条。因此,对滤波后的图像在进行图像增强处理,以便提取边缘轮廓。

2)用微分算子提取灰度线条图像。线条画主要是通过线条来表现事物的主要特征,它通过简化细节来突出重要部分。一般的边缘提取算法提取轮廓线条时,有些无关因素可能会被误认为是特征而保留下来(如光照),影响提取效果,同时,多数微分算子提取出的边缘是单像素宽的线条,而制作线条画时,需要多像素宽的线条来体现笔划效果。因此,需要找到一个能够根据图像的边缘特征和区域特征提取来提取边缘线条的微分算子。

3)线条图像二值化。用边缘检测算子提取的边缘是灰度的,不能很好地体现线条轮廓,所以将结果二值化,生成二值线条图像。

4)腐蚀和膨胀并将结果相减生成多层线条。素描画的特点是具有交叉的线条纹理,以用来表示图像色调,文章在线条画的基础上进一步生成多层素描纹理,再融合边缘线条,形成素描画。实验表明,用边缘线条直接生成的素描纹理,色调单一且层次感不强。本算法将线条图像进行多次腐蚀,用每次的腐蚀结果减去下一次的腐蚀结果,得到从外向里的多层线条。

5)运动模糊生成素描纹理。将上一步生成的多层双边轮廓线条再经过两次不同方向的运动模糊处理生成不同方向的素描线,融合两方向的素描线形成交叉的素描纹理。此方法生成的素描纹理具有层次感,能够体现素描的阴影色调的明暗变化,具有很好的手绘素描感,且实现方法简单,速度快。

6)融合边缘线条和素描纹理形成素描画。因各个要素的像素值的动态范围不同,直接叠加各个要素可能会产生不理想的结果:当边缘线条动态范围处于低像素值,素描纹理动态范围处于较高像素值时,叠加结果会使得线条不明显;反之,当边缘线条动态范围处于高像素值,素描纹理动态范围处于较低像素值时,叠加结果会使得素描纹理不明显。这样就需要先调节各个图像的动态范围,使其处于相同动态区间,再找到一个能够协调各个要素的参数,使融合后得到理想的素描画效果。

### 2.2 算法的实现

本文主要研究针对灰度图像的处理以及在此基础上生成灰度线条和素描画的方法,在结果中附带考虑了彩色素描效果的生成,彩色效果仅作为补充讨论。在对图像预处理之初,先提取彩色图像的RGB分量,再将彩色图像转换成灰度图像同时保留RGB分量,接下来对RGB分量和灰度图像进行同样的处理,最后生成灰度素描图像和合并RGB分量后的彩色素描图像。

#### 2.2.1 图像预处理

分离彩色图像的RGB分量同时合成灰度图像。原始彩色图像和灰度图像如图1所示。



(a) 分辨率为256×256的Lena图像 (b) Lena灰度图像  
图1 Lena原图像与灰度图像

灰度图像合成公式:

$$F_{gray} = 0.2989 \times R + 0.5870 \times G + 0.1140 \times B \quad (1)$$

其中: $R$ 为红色分量, $G$ 为绿色分量, $B$ 蓝色分量。

平滑滤波去噪。用高斯低通滤波法,消除噪声,提高图像质量。常用二维零均值离散高斯函数作为平滑滤波器<sup>[14]</sup>。

二维零均值离散高斯函数表达式:

$$g(i,j) = \exp\left(-\frac{(i^2 + j^2)}{2\sigma^2}\right) \quad (2)$$

其中: $i,j$ 表示原始图像的横纵坐标; $\sigma$ 为图像像素值方差; $g(i,j)$ 为变换后的函数图像。

图像增强的方法有很多,这里用直方图均衡化和锐化分别处理图像,直方图均衡化主要的用处是将大面积的近似的



灰度拉开距离,表现出来的就是一张图上的颜色分布相对均衡,使看上去更清楚。锐化处理用于增强图像细节、突出图像的轮廓边缘<sup>[15]</sup>。用改进的拉氏算子锐化的图像,能够提取出比较清晰的轮廓线条。

直方图均衡化操作函数:

$$g(i,j) = c \lg(1 + f(i,j)) \quad (3)$$

其中:  $f(i,j)$  为原始图像,  $g(i,j)$  变换后的图像(注:本文中所有的原始图像用  $f(i,j)$  表示,所有的变换后的图像用  $g(i,j)$  表示)。

改进的拉氏锐化算子的定义:

$$g(i,j) = \frac{1}{8}(f(i-1,j-1) + f(i,j-1) + f(i+1,j-1) + f(i-1,j) + f(i+1,j) + f(i-1,j+1) + f(i,j+1) + f(i+1,j+1)) - f(i,j) \quad (4)$$

### 2.2.2 用二阶 Robert 微分算子提取图像边缘特征线条

Roberts 边缘检测算子是一种利用局部差分算子寻找边缘的算子,它能够在计算边缘的同时考虑到图像的边缘特征和区域特征。Robert 算子对图像处理后,结果边缘不是很平滑,它通常会在图像边缘附近的区域内产生较宽的响应,生成符合笔划特点的多像素宽的线条。Roberts 边缘检测算子的边缘提取结果如图 2(a) 所示。

Roberts 边缘检测算子函数表达式:

$$g(i,j) = \left[ \left( \sqrt{f(i,j)} - \sqrt{f(i+1,j+1)} \right)^2 + \left( \sqrt{f(i+1,j)} - \sqrt{f(i,j+1)} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

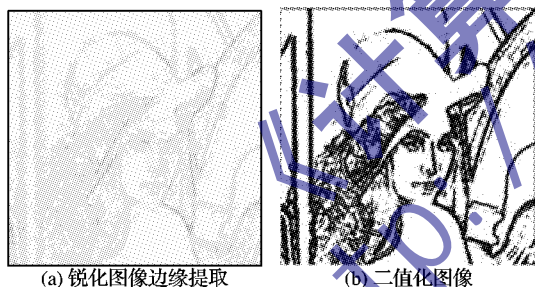


图2 锐化图像边缘提取与二值化图像

### 2.2.3 边缘线条二值化

对线条图像进行灰度统计,根据统计结果设定二值化阈值,实验中由于边缘线条已经接近所要求的轮廓,因此阈值的设定以保留绝大部分的线条为原则,这里用的值是 0.9,二值化线条图像如图 2(b) 所示。

二值化公式:

$$g(i,j) = \begin{cases} 0, & f(i,j) < a \times \max(f) \\ 255, & f(i,j) \geq a \times \max(f) \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $\max(f)$  为原始图像中最大像素值,  $a$  为阈值。

### 2.2.4 腐蚀和膨胀生成层次线条

对二值边缘图像先进行腐蚀处理,结果如图 3(a) 所示,目的是为了细化线条,进行膨胀处理后不会失真。再进行膨胀处理,共进行三次膨胀,每次的操作以上一次的结果为对象,然后用每一次膨胀操作后的图像减去操作前的图像得到由内而外的三层双边线条,图 3(b) 为第一层线条。

腐蚀处理公式:

$$g(i,j) = \min\{f(i+i',j+j') - b(i',j') \mid (i',j') \in D_b\} \quad (7)$$

其中  $D_b$  为  $b$  的定义域,下同。

膨胀处理公式:

$$g(i,j) = \min\{f(i+i',j+j') + b(i',j') \mid (i',j') \in D_b\} \quad (8)$$

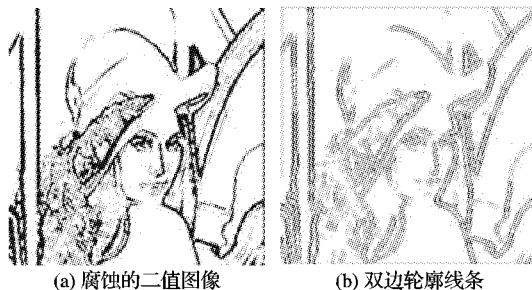


图3 腐蚀的二值图像和双边轮廓线条

### 2.2.5 运动模糊生成素描纹理

运动模糊的处理方法是用设定的系数来决定图像像素运动的角度和距离,然后将每个像素按照这个设定的参数进行像素移动,并保留移动痕迹。

用三层双边线条分别进行两次运动模糊,并融合所有结果,得到的素描纹理色调明显,且具有层次感,更接近手绘素描纹理,如图 4(a) 所示。图 4(b) 所示为直接对轮廓线条进行运动模糊生成的素描纹理,可以看出其色调较浅,不能很好地体现素描纹理。

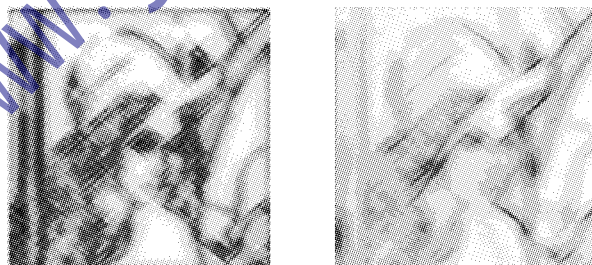


图4 运动模糊生成素描纹理

### 2.2.6 素描纹理与边缘线条融合生成素描画

用灰度值统计的方法得到图像灰度范围,然后截取能够集中表示图像特征的灰度区间,将其扩展到标准灰度区间内,最后将素描纹理和边缘线条加权相加,根据需要调节权值,即可得到素描画,如图 5 所示。图 5(a) 为纹理和边缘的权值分别为 0.5 和 0.3 的素描效果,图 5(b) 为用边缘线条直接进行运动模糊生成的素描效果,图 5(c) 为纹理和边缘的权值分别为 0.7 和 0.23 的素描效果。

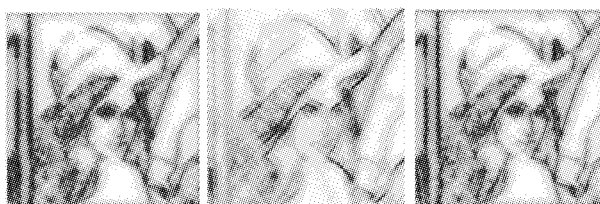


图5 素描画效果

## 3 实验效果及对比

上面的实验用的图像是分辨率为  $256 \times 256$  的图像,下面

用分辨率为  $512 \times 512$  的图像进行同样的处理,得到的实验结果如图6所示,可以看出实验效果差异较大,可见文章中的方法可以通过改变图像的分辨率来调节实验效果。

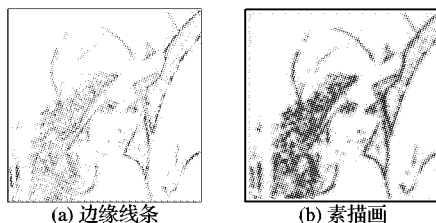


图6 分辨率为  $512 \times 512$  的Lena图像

下面是对RGB分量分别进行同样的处理,再进行彩色合成得到的结果,可以看出细节效果优于灰度图像,如图7。



图7 Lena图像素描和Photoshop素描效果

从图7可以看出,本文方法制作出的素描画更具有轮廓感,素描纹理更活泼,图像更接近手绘素描画风格。为了验证算法可行性,用大量不同风格的图像作为素材进行实验,如图8、图9所示,为进行效果比较,每组图片中最后一个图用PhotoShop制作的素描画。

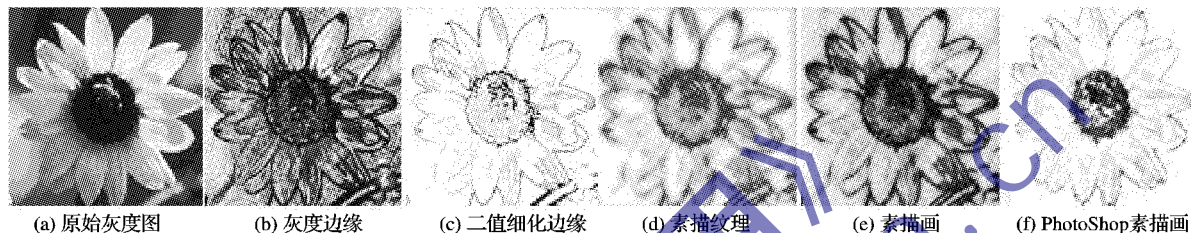


图8 向日葵图片素描效果

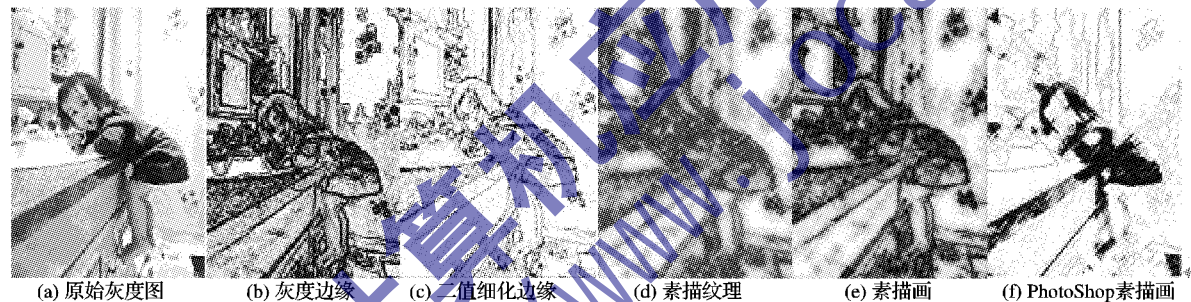


图9 人物图片素描效果

#### 4 结语

本文根据手绘素描画特点,借鉴已有的线条画和素描画生成方法,提出了具有层次素描纹理的素描画绘制方法,得到了与手绘风格接近的素描画图像。实验结果表明,本算法制作的双向交叉的密集线作为素描纹理,更逼近手绘素描风格;在多个双边轮廓线条的基础上生成的素描纹理色调较深并且能够体现出层次感,亦更接近手绘素描画的特点;算法对多数图片具有可行性。算法缺点是,算法对图像质量要求比较高,灰度范围接近的图像因难以提取灰度特征而导致不能提取出清晰的边缘,从而得不到理想的素描画。

#### 参考文献:

- [1] 桂斌. 非真实感绘制技术的研究[J]. 微计算机信息, 2008, 24(15): 269-270.
- [2] 钱晓燕. 艺术风格图像的非真实感绘制理论与方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2007: 1-4.
- [3] 王会芹. 基于图像的非真实感绘制技术的研究[D]. 上海: 东华大学, 2009: 1-8.
- [4] 王会芹. 基于图像空间的素描效果生成技术[J]. 计算机应用, 2008, 28(7): 1735-1737.
- [5] WANG HAI-TAO, ZHANG J J, LI S Z, *et al.* Shape and texture preserved non-photorealistic rendering [J]. Computer Animation and Virtual Worlds, 2004, 15(3/4): 453-461.
- [6] WINKENBACH G, SALESIN D H. Rendering parametric surfaces in pen and ink[C]// SIGGRAPH96: Proceedings of the 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York: ACM, 1996: 469-476.
- [7] SALISBURY M P, WONG M T, HUGHES J F, *et al.* Orientable textures for image-based pen-and-ink illustration [C]// SIGGRAPH97: Proceedings of the 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York: ACM, 1997: 401-406.
- [8] KANG H W, CHUI C K, CHAKRABORTY U K. A unified scheme for adaptive stroke-based rendering [J]. The Visual Computer, 2006, 22(9): 814-824.
- [9] SON M, HENRY K, LEE Y. Abstract line drawing from 2D images [C]// PG'07: Proceedings of the 15th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2007: 333-342.
- [10] KANG H, LEE S, CHUI C. Coherent line drawing[C]// Proceedings of the ACM Symposium on Non-Photorealistic Animation and Rendering. New York: ACM, 2007: 43-50.
- [11] 黄华, 程威. 实时图像素描风格化[J]. 计算机学报, 2009, 32(10): 2023-2027.
- [12] 郭晓永, 陈克林. 基于图像的铅笔画绘制技术[J]. 重庆工商大学学报: 自然科学版, 2009, 26(3): 237-240.
- [13] 李龙生, 周经野, 陈益强, 等. 一种改进的铅笔画的生成方法[J]. 中国图象图形学报, 2007, 12(8): 1423-1428.
- [14] 冯捷, 郑河荣. 基于灰度合成的图像素描效果生成算法[J]. 浙江工业大学学报, 2009, 37(3): 316-318.
- [15] 李龙生, 周经野, 陈益强, 等. 用USM锐化生成铅笔画的新方法[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2007, 37(2): 442-447.