

# 基于卷积阈值算法的铅笔画绘制研究

张韧志 周原

黄淮学院信息工程学院, 河南 驻马店 463000

**摘要** 为了提高绘制铅笔画的真实感,采用卷积阈值算法。绘制铅笔画局部流线,采用线积分卷积函数来产生图像纹理,将像素沿矢量正、反方向对称积分得到流线,将流线上所有像素对应的输入噪声值按卷积核参与卷积,结果作为输出纹理的灰度值。接着选择两个不同的灰度阈值将不同灰度范围内的情况分开处理,并给出了算法流程。实验仿真结果显示,卷积阈值算法生成铅笔画边缘清晰,画面细腻,具有铅笔纹理结构特征,处理时间为2.2 s,满足生成结果中对执行时间少、接近手绘等要求。

**关键词** 图像处理;卷积;阈值;纹理;铅笔画

**中图分类号** TP393 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP52.011002

## Research and Painting of Pencil Sketching Based on Convolution Threshold

Zhang Renzhi Zhou Yuan

College of Information Engineering, Huang Huai University, Zhu Madian, Henan 463000, China

**Abstract** In order to improve reality of pencil sketching, convolution threshold algorithm is established. Streamline of pencil is generated. Image texture is generated with function of line integral convolution, streamline is integrated by pixel along the vector and negative direction obtained, input noise of all pixel of streamline as kernel are convoluted, output texture pixel value is obtained. Different ranges of gray are processed by two different thresholds of gray, and process is described. The experiment shows this algorithm made edge of pencil sketching clearly and delicately, and has pencil texture, processing time is 2.2 s, it takes less time and is more like hand-painted.

**Key words** image processing; convolution; threshold; texture; pencil sketching

**OCIS codes** 110.4155; 110.3080; 120.1880

## 1 引言

对现实世界的仿真模拟一直是经典的图形学领域的研究目标<sup>[1]</sup>,经过40余年的发展,经典的真实感图形学对现实世界通过手工创作铅笔画是一项复杂的艺术劳动,同时手工铅笔画绘制技术并不是所有人都能够轻易掌握的<sup>[2]</sup>,因此用计算机来模拟生成具有铅笔画艺术效果的技术越来越受到人们的关注。自20世纪80年代以来,真实感图形学成为图形学的一个非常重要的研究领域,基于真实图像高效地模拟出具有素描艺术特征的图像,具有重要的应用价值<sup>[3]</sup>。

国内外许多研究人员撰写了大量的论文,国际会议开始设立专题专门讨论真实感图形学,国内研究为:李龙生等<sup>[4]</sup>分别采用卷积锐化和霓虹处理生成铅笔画的轮廓特征,但是出现铅笔画后期图像分割的不足;孙硕等<sup>[5]</sup>则避开图像分割的不足,采用基于卷积区域的铅笔画算法,利用结构矢量场控制卷积绘制过程,但是算法复杂;孙丹丹等<sup>[6]</sup>提出应用运动模糊方法代替传统的线积分卷积方法来模拟铅笔画的纹理,速度上有了较大的提高,但其生成的最终铅笔画图像中只有一个纹理方向,不满足铅笔画的真实绘制。国外研究为:

收稿日期: 2014-06-16; 收到修改稿日期: 2014-08-03; 网络出版日期: 2014-12-11

基金项目: 河南省科技攻关重点项目(122102210404)、河南省科技攻关项目成果(9412012Y1574)

作者简介: 张韧志(1980—),男,硕士,讲师,主要从事网络管理,软件工程开发等方面的研究。

E-mail: hhzhouyuan@qq.com

1993年,Cabral等<sup>[7]</sup>首次提出了线积分卷积方法,该方法是将原图像的白噪声图与矢量场进行线积分卷积操作,最终生成的效果图具有铅笔笔画的纹理方向,但是最大的缺点是耗时比较长;Mao等<sup>[8]</sup>通过研究计算机对素描笔触的模拟,利用线积分卷积能提供流场纹理方向的特点,从而生成具有铅笔画风格的纹理图像,该方向就被当作该处笔划的方向,否则就给一个随机的笔划方向,但是该方法没有考虑到图像的局部结构特征和细节分布情况;Yamamoto等<sup>[9]</sup>在Mao的基础上将原始图像根据亮度分层,为每个层生成不同的纹理,生成速度得到了很大的提升,但是生成方法仍然属于线积分卷积方法;Li等<sup>[10]</sup>在此基础上采用了基于特征区域的铅笔画绘制方式,得出的绘制结果更接近人类手工绘制的结果<sup>[7,11-12]</sup>,但图像轮廓特征的忽略,导致铅笔画保留的细节信息过于冗余。

本文采用卷积阈值算法对图像绘制铅笔画,首先绘制铅笔画局部流线;然后采用线积分卷积函数来产生图像纹理,将像素沿矢量正、反方向对称积分得到流线,将流线上所有像素对应的输入噪声值按卷积核参与卷积,结果作为输出纹理的灰度值;接着选择两个不同的灰度阈值将不同灰度范围内的情况分开处理;最后给出了算法流程。实验仿真结果显示,生成铅笔画边缘清晰,画面细腻,具有铅笔纹理结构特征,更接近手绘,耗时最少。

## 2 基于卷积阈值算法的铅笔画绘制过程

### 2.1 铅笔画局部流线绘制

在铅笔画绘制过程中,局部流线的生成对输出纹理所描绘的矢量场局部特性的精度和准确性有着决定性作用。局部流线绘制公式为

$$\begin{cases} P_0 = (x + 0.4, y + 0.6) \\ P_u = P_{u-1} + \frac{V(\lfloor P_{u-1} \rfloor)}{\|V(\lfloor P_{u-1} \rfloor)\|} \Delta S_{u-1}, \end{cases} \quad (1)$$

式中  $V(\lfloor P_{u-1} \rfloor)$  为输入矢量点  $\lfloor P_{u-1} \rfloor$  处矢量,  $\lfloor * \rfloor$  表示取整,  $P_0$  是种子点坐标,在图像像素的中心  $(x, y)$ ,  $\Delta S_{u-1}$  是沿着平行于流线  $i$  中的矢量方向。

### 2.2 基于区域笔划方向绘制

通过铅笔画中线条的方向性可以表达物体的形状、纹理等信息。设  $V_{i,j} = (j = 0, 1, 2, \dots)$  是第  $i$  个区域第  $j$  个像素的傅里叶功率谱法计算的方向向量场,  $m_j$  为第  $j$  个区域的像素个数,对每个区域计算该区域方向向量场的平均值,同时计算其协方差。

$$V_i = \frac{\sum_{j=0}^{m_i} V_{i,j}}{m_i}, D_i = \sum_{j=0}^{m_i} (V_{i,j} - V_i)^2, \quad (2)$$

那么最终每个像素的方向场向量为

$$F_{V_{i,j}} = \begin{cases} V_{i,j}, & \frac{D_i}{m_i} > \kappa \\ V_{i,j}, & \text{else} \end{cases}, \quad (3)$$

式中阈值  $\kappa$  取 0.7,如果某区域方向变化不大,需要对  $V_i$  进行一次随机的微小变化后再作为该像素给的方向像素,这样就更能反映铅笔画的艺术风格。

令  $l$  和  $l'$  分别为笔划方向流线的正向、反向的线积分卷积函数步数,  $F(\lfloor P_i \rfloor)$  为与输入坐标点  $P_i$  处对应的输入纹理的灰度值,则

$$F(x, y) = \frac{\sum_{i=0}^l F(\lfloor P_i \rfloor) h_i + \sum_{i=0}^{l'} F(\lfloor P_i' \rfloor) h_i'}{\sum_{i=0}^l h_i + \sum_{i=0}^{l'} h_i'}. \quad (4)$$

在输出图像中每一个像素是一个小区域中像素的加权平均,其中权值由一个函数定义,这个函数称为

卷积核,  $\sum_{i=0}^l h_i + \sum_{i=0}^l h'_i$  表示卷积核的线积分累加, 用以对输出结果做归一化处理,  $h_i$  为对卷积核  $k(\omega)$  积分的结果:

$$h_i = \int_{s_i}^{s_i + \Delta s_i} k(\omega) d\omega, \quad (5)$$

式中  $s_0 = 0$ ,  $s_i = s_{i-1} + \Delta s_{i-1}$ ,  $\Delta s_i$  为计算流线时第  $i$  步的长度,  $s_i$  为第  $i$  步后流线的长度, 其中  $k(\omega) = \frac{1}{2L+1}$ , 式中  $L$  为积分流线半长。将流线上所有像素所对应的噪声值参与卷积, 结果作为输出纹理的灰度值。

### 2.3 基于灰度阈值的铅笔画色调控制

为了模拟铅笔纹理的墨粒随机分布的特性, 引入了具有随机特性的白噪声图像, 对纹理每个像素的灰度随机生成 0 或 255 的灰度值, 不同灰度范围内的情况分开处理, 从而使生成的铅笔画明暗对比更突出, 空间感更强, 更类似于手工绘制的效果。其过程为

$$I_{\text{noise}} = \begin{cases} I_{\text{noise1}} = \begin{cases} I_{\min 1}, & P > T_1 \\ I_{\max}, & \text{otherwise} \end{cases}, & I_{\text{input}} \leq L_1 \\ I_{\text{noise2}} = \begin{cases} I_{\min 2}, & P > T_2 \\ I_{\max}, & \text{otherwise} \end{cases}, & L_1 \leq I_{\text{input}} \leq L_2, \\ I_{\text{noise3}} = \begin{cases} I_{\min 3}, & P > T_3 \\ I_{\max}, & \text{otherwise} \end{cases}, & I_{\text{input}} \geq L_2 \end{cases}, \quad (6)$$

$$\begin{cases} T_1 = h_1 \left( 1 - \frac{I_{\text{input}}}{255} \right) \\ T_2 = h_2 \left( 1 - \frac{I_{\text{input}}}{255} \right) \\ T_3 = h_3 \left( 1 - \frac{I_{\text{input}}}{255} \right) \end{cases}, \quad (7)$$

式中  $I_{\max}$  为输出像素的最大灰度值, 一般取 255,  $I_{\min 1}$ 、 $I_{\min 2}$ 、 $I_{\min 3}$  为输出像素的最小灰度值, 可以不为 0,  $P \in [0, 1]$  是一个随机产生的浮点数,  $L_1$ 、 $L_2$  为两个不同的灰度阈值, 选取  $L_1 = 25$ ,  $L_2 = 80$ ,  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $h_3$  是 3 个经验值, 取值范围  $[0, 1]$ , 取  $h_1 = 0.9$ ,  $h_2 = 0.7$ ,  $h_3 = 0.7$ 。

为了使得混色后的输出图像  $O(x, y)$  在灰度色变化时候, 具有相当的平滑度, 则

$$O(x, y) = 1 - \alpha_1 \{ 1 - (I(x, y) + \alpha_2 [S(x, y)]) \}, \quad (8)$$

式中参数  $\alpha_2$  用于调整输入图像的明暗程度, 参数  $\alpha_1$  用于调整混色后的灰度平滑度,  $I(x, y)$  为卷积纹理图,  $S(x, y)$  为输入灰度信息。输出的铅笔画图像更接近手绘效果, 这样保证了噪声点的密集程度依赖于输入图像上对应像素的灰度值, 同时又尽可能地保留输入图像的信息, 对颜色失真现象的产生起到了较好地抑制作用, 使得最后生成的铅笔画中的明暗对比更突出, 空间层次感更强。

算法流程为:

- 1) 输入图像基图锐化;
- 2) 将锐化图沿着流线进行卷积生成铅笔画纹理;
- 3) 通过  $L_1$ 、 $L_2$  灰度阈值对铅笔画色调控制, 满足视觉要求则进行步骤 4), 否则更换  $L_1$ 、 $L_2$  灰度阈值;
- 4) 输出铅笔画。

## 3 实验仿真

### 3.1 视觉对比效果

实验仿真采取 3 组不同的测试图像, 每组包括彩色和灰度图像两种, 如图 1 所示, a(1), a(2) 为第一组的彩色和灰度图像, b(1), b(2) 为第二组的彩色和灰度图像, c(1), c(2) 为第三组的彩色和灰度图像, 程序使用 Matlab 编写, 其仿真结果如图 2 所示。



图1 测试图像

Fig.1 Test images

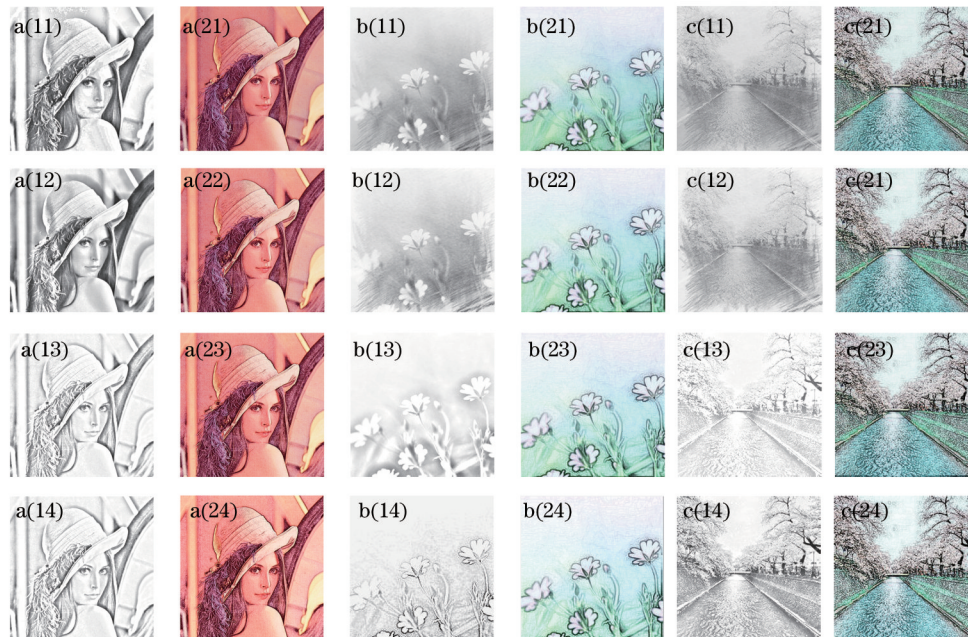


图2 不同算法生成的铅笔画

Fig.2 Pencil sketching drawing with different algorithms

图2中a(11),a(21),b(11),b(21),c(11),c(21)为线积分卷积生成的铅笔画,a(12),a(22),b(12),b(22),c(12),c(22)为分层卷积生成的铅笔画,a(13),a(23),b(13),b(23),c(13),c(23)为区域卷积生成的铅笔画,a(14),a(24),b(14),b(24),c(14),c(24)为本文卷积阈值算法生成的铅笔画,从仿真生成的铅笔画可以看出,其他算法素描效果边缘生硬、噪声多、画面不细腻、受施加运算方向限制,第一组人物头发的纹理阴影明显增多,第二组花朵叶片边缘不模糊,第三组树叶未遵循素描风格。卷积阈值算法素描处理后边缘清晰,画面细腻,具有铅笔纹理结构特征,得到铅笔颜色线条,从而能够使图片的铅笔画效果更加逼真,更接近手绘。这是因为噪声点的密集程度依赖于输入图像上对应像素的灰度值,同时又尽可能地保留输入图像的信息,对颜色失真现象的产生起到了较好地抑制作用,使得最后生成的铅笔画中的明暗对比更突出,空间层次感更强。

### 3.2 定性评价指标

采用的定性评价指标有平滑度( $S$ )、一致性( $C$ )、熵( $E$ )。平滑度为区域中亮度的相对平滑度量, $S=0$ 表示常亮度区域, $S=1$ 表示灰度级有较大偏移的区域;一致性为度量一致性,所有灰度值相等时,该度量值最大,一致性越低,表示纹理的效果越明显;熵为随机性度量。测试图像a(1)、a(2)、b(1)、b(2)、c(1)、c(2)的定量评价指标分析如表1~3所示,其中No.1为第一组a(1)、a(2),No.2为第二组b(1)、b(2),No.3为第三组c(1)、c(2)。

表1 NO.1定性评价指标

Table 1 Quantitative evaluation index of NO.1

Algorithm	Color			Gray		
	$S$	$C$	$E$	$S$	$C$	$E$
Line integral convolution	0.0437	0.0048	5.6493	0.0428	0.0158	5.3304
Hierarchical convolution	0.0226	0.0019	6.0548	0.0249	0.0139	5.8419
Region convolution	0.0409	0.0011	5.8581	0.0286	0.0141	5.4191
Convolution threshold	0.0164	0.3340	7.5043	0.2694	0.0108	7.1341

表2 NO.2定性评价指标

Table 2 Quantitative evaluation index of NO.2

Algorithm	Color			Gray		
	<i>S</i>	<i>C</i>	<i>E</i>	<i>S</i>	<i>C</i>	<i>E</i>
Line integral convolution	0.0164	0.0547	5.7944	0.0216	0.0747	5.1409
Hierarchical convolution	0.0144	0.0981	5.5757	0.0169	0.0306	5.8490
Region convolution	0.0294	0.0504	6.1789	0.0461	0.0776	6.0374
Convolution threshold	0.0101	0.0108	7.1190	0.0022	0.0176	7.9547

表3 NO.3定性评价指标

Table 3 Quantitative evaluation index of NO.3

Algorithm	Color			Gray		
	<i>S</i>	<i>C</i>	<i>E</i>	<i>S</i>	<i>C</i>	<i>E</i>
Line integral convolution	0.0253	0.0636	5.5355	0.1286	0.0716	5.6306
Hierarchical convolution	0.0285	0.0661	5.3629	0.1512	0.0166	5.2953
Region convolution	0.0336	0.0746	6.5312	0.1805	0.1697	5.3035
Convolution threshold	0.0182	0.0406	7.3595	0.0556	0.0149	7.5395

从定量评价指标分析中可以看出卷积阈值算法的平滑度较小,一致性值较低,其纹理清晰性较强,熵值较高,铅笔画纹理信息丰富。

### 3.3 处理时间分析

在相同的硬件和软件配置条件下,对3组图片进行不同算法耗时分析,其结果如表4所示。

表4 不同算法耗时(单位:秒)

Table 4 Time of different algorithms (unit: s)

Algorithm	NO.1		NO.2		NO.3	
	Color	Gray	Color	Gray	Color	Gray
Line integral convolution	6.8391	6.3423	8.8331	8.3453	5.7336	5.7053
Hierarchical convolution	6.4210	6.0192	8.4510	8.0135	5.7560	5.0635
Region convolution	6.1232	5.9893	8.1535	7.3833	5.6535	5.3733
Convolution threshold	2.2543	2.0821	2.1603	2.0851	2.7573	2.0756

对彩色图和灰度图的铅笔画生成耗时中,所有算法的彩色图比灰度图的铅笔画生成耗时多,这是因为彩色图需要进行彩色空间的变换,首先将彩色空间由红绿蓝(RGB)空间转化到Lab空间,最后又将彩色空间由Lab色彩空间转换到RGB颜色空间进行显示,整体上卷积阈值算法耗时最少,最多为3.4543s。

## 4 结 论

采用线积分卷积函数来产生图像纹理,将像素沿矢量正、反方向对称积分得到流线,将流线上所有像素对应的输入噪声值按卷积核参与卷积,结果作为输出纹理的灰度值;接着选择两个不同的灰度阈值将不同灰度范围内的情况分开处理;实验仿真结果显示,卷积阈值算法生成铅笔画边缘清晰,画面细腻,具有铅笔纹理结构特征,更接近手绘,耗时最少,为真实感图形学铅笔画绘制提供了一种新思路。

### 参 考 文 献

- 1 H Yang, Y Kwon, K Min. A stylized approach for pencil drawing from photographs [J]. Eurographics Symposium on Rendering 2012, Paris, France, 2012, 31(4): 1471-1480.
- 2 Tong Qiang, Zhang Songhai. Pencil sketch painting with virtual point light source on image plane [J]. Chinese Journal of Computers, 2010, 33(5): 919-926.  
佟 强, 张松海. 利用平面虚拟点光源的素描图像绘制[J]. 计算机学报, 2010, 33(5): 919-926.
- 3 Xiao Yunsong. Research on NPR Pencil Drawing Generation Technology [D]. Xi'an: Northwest Normal University, 2013.  
肖云松. NPR铅笔画生成技术研究[D]. 西安: 西北师范大学, 2013.
- 4 Li Longsheng, Zhou Jingye, Chen Yiqiang, *et al.*. A improved generation method of pencil sketching [J]. Journal of

- Image and Graphics, 2007, 12(8): 1423-1429.  
李龙生, 周经野, 陈益强, 等. 一种改进的铅笔画生成方法[J]. 中国图象图形学报, 2007, 12(8): 1423-1429.
- 5 Sun Shuo, Huang Dongwei. Efficient region-based pencil drawing [J]. Computer Engineering and Applications, 2007, 43(14): 34-37.  
孙 硕, 黄东卫. 一种有效的基于区域的铅笔画方法[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(14): 34-37.
- 6 Sun Dandan, Tang Li. New method for generation of pencil sketching [J]. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(11): 164-166.  
孙丹丹, 唐 隽. 一种铅笔画仿真新方法[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(11): 164-166.
- 7 B Cabral, C Leedom. Imaging vector field using line integral convolution [C]. Proceedings of SIGGRAPH 20th Annual International Conference on computer Graphics and Interactive Techniques, California, USA, 1993. 263-270.
- 8 X Mao, Y Nagassaka, A Imamiya. Automatic generation of pencil drawing from 2D images using line integral convolution [C]. CAD/Graphics 2001, Florida, USA, 2001(1-2): 240-248.
- 9 S Yamamoto, X Mao, A Imamiya. Enhanced LIC pencil filter [C]. Proceedings of International Conference on Computer Graphics Imaging and Visualization, Florida, USA, 2004. 251-256.
- 10 N Li, Z Huang. A feature-based pencil drawing method [C]. 1st International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, Australasia and South East Asia, 2003. 135-143.
- 11 Zhang Peng, Wang Liang. Application of improved bresenham anti-aliasing algorithm based on embedded image system [J]. Electronic Design Engineering, 2011, 19(4): 17-119.  
张 鹏, 王 良. 嵌入式图像系统的改进 Bresenham 反走样算法的应用[J]. 电子设计工程, 2011, 19(4): 17-119.
- 12 Zhan Fangfang, Hu Wei, Yuan Guodong. Improvement of 2D LIC algorithm for vector field visualization [J]. Computer Science, 2013, 40(9): 257-261.  
詹芳芳, 胡 伟, 袁国栋. 二维 LIC 矢量场可视化算法的研究及改进[J]. 计算机科学, 2013, 40(9): 257-261.

栏目编辑: 张浩佳