

## 建筑物图像的线条画生成算法\*

柳有权<sup>1,2,3+</sup>, 吴宗胜<sup>1</sup>, 王山东<sup>3</sup>, 薛茹<sup>1,4</sup>, 吴恩华<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>(长安大学信息工程学院, 陕西 西安 710064)

<sup>2</sup>(澳门大学科技学院, 澳门)

<sup>3</sup>(计算机科学国家重点实验室(中国科学院 软件研究所), 北京 100190)

<sup>4</sup>(西藏民族学院, 陕西 咸阳 712082)

### Line Drawing Technique for Building Images

LIU You-Quan<sup>1,2,3+</sup>, WU Zong-Sheng<sup>1</sup>, WANG Shan-Dong<sup>3</sup>, XUE Ru<sup>1,4</sup>, WU En-Hua<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>(School of Information Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

<sup>2</sup>(Faculty of Science and Technology, University of Macau, Macao, China)

<sup>3</sup>(State Key Laboratory of Computer Science (Institute of Software, The Chinese Academy of Sciences), Beijing 100190, China)

<sup>4</sup>(Tibet University for Nationalities, Xianyang 712082, China)

+ Corresponding author: E-mail: youquan@chd.edu.cn, http://imlab.chd.edu.cn

Liu YQ, Wu ZS, Wang SD, Xue R, Wu EH. Line drawing technique for building images. *Journal of Software*, 2012, 23(Suppl. (2)): 34-41 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/12022.htm>

**Abstract:** This paper presents an automatic line-drawing method designed for building images. The fast line segment detector with a false detection control and detects the outline and the door, or window edge features detected, which are used in the construction of edge tangent flow. Based on the modified ETF, the Difference-of-Gaussians is used to render the final line drawing styles. This scheme gives clear line features for building images without much noise, which is also simple and easy to implement. The test results verify the effectiveness of the presented algorithm.

**Key words:** non-photorealistic rendering; building; line drawing; ETF; FDoG

**摘要:** 提出了一种专门针对建筑物图像的线条风格化自动生成算法,该方法首先利用快速的带有误判控制的图像线段检测算法得到建筑物的外轮廓和门窗的线条特征,通过该特征增强边切向流中直线的权重,然后在此基础上利用基于流的高斯差分得到建筑物的线条画,充分展现了建筑物的线条轮廓,该方法简单、可靠,而且容易实现,实验结果充分证明了该方法的有效性。

**关键词:** 非真实绘制;建筑物;线条画;边切向流;基于流的高斯差

建筑物无处不在,高楼大厦、亭台楼阁随处可见,建筑成了现代城市一道靓丽的风景,我们经常为建筑物俊秀的线条所吸引。作为观察者来讲,建筑物线条分明,轮廓清晰,其艺术形式由其外在轮廓所展现,另一方面,建筑

\* 基金项目: 国家自然科学基金(60973066, 60833007); 国家重点基础研究发展计划(973)(2009CB320802); 中国科学院软件研究所计算机科学国家重点实验室资助项目(SYSKF1004)

收稿时间: 2012-05-30; 定稿时间: 2012-09-29

设计师在设计过程中也常使用线条画来表现其设计思想.线条增强了建筑物的整体表现力,使建筑物的整体表现更加丰富和完美.目前,有关建筑物的线条画基本上是手工描绘的,从建筑物数字图像中自动抽取出来的线条画还比较少.本文针对建筑物图像的特点,提出了一种新的建筑物线条画的自动生成算法,从而生成专门针对建筑物场景的线条风格画.

目前,非真实所涉及的艺术形式多种多样,本文只针对线条画风格进行展开.很多基于图像的 NPR 技术只是模拟某种艺术形式,如 Salisbury 等人<sup>[1]</sup>在 1996 年开发了一个交互式钢笔画插图系统,他们使用 Canny 边缘<sup>[2]</sup>检测算法生成轮廓笔画和修剪内部笔画.Curtis 等人<sup>[3]</sup>提出了一个完整的水彩画建模系统,将流体动力学应用于不同层中,模拟了不同画刷相互叠加在一起时的颜色混合效果,这种方法产生的水彩画接近于现实的水彩画.黄华等人<sup>[4]</sup>针对油画绘制中特有的颜色空间,提出了一种重点考虑颜色特征学习的绘画渲染方法,以学习给定模板的颜色风格,从而使输出结果更具艺术化颜色特点,更具油画特点.Litwinowicz 等人<sup>[5]</sup>通过梯度场调整笔刷的方向,使用边缘检测器修剪画笔笔画和保护特征线,可以将视频处理为印象派风格.DeCarlo 等人<sup>[6]</sup>使用 Canny 边缘检测器<sup>[2]</sup>和 Mean-Shift 滤波器<sup>[7]</sup>来获得卡通风格的图像抽象.Fischer 等人<sup>[8]</sup>应用 Canny 边缘检测算法结合双边滤波获得风格化增强的图像.Gooch 等人<sup>[9]</sup>把图像分割成特征,然后利用特征的中轴指导笔刷的布置.Hays 等人<sup>[10]</sup>在总结了以往各种油画绘制方法优点的基础上,提出了一种绘制框架,该框架重点改善了笔画方向的计算,该方法除了采用分层绘制和曲线笔画外,一个重要贡献在于笔画方向场的计算.Wang 等人<sup>[11]</sup>设计了一个可把任意视频渲染成为具有高度抽象特性并在时间上具有连贯性的多风格卡通动画自动生成软件,通过改进 Mean-Shift 图像分割算法,自动地将视频数据划分到连续的时空中.Lee 等人<sup>[12]</sup>认为,传统的基于梯度法向的方向场计算方式擅长描述物体的形状,而不能很好地表达物体的运动规则,因此提出了一种风格学习技术,该技术强化了目标图像本身的方向场特征,通过在传统快速纹理迁移技术的基础上添加一个额外的能量项,用于衡量目标图像梯度的影响,并通过一个方向因子来描述目标图像的梯度方向,以在表现模板图像纹理风格的同时,能够较好地保持目标图像本身的方向场.

Kang 等人<sup>[13]</sup>通过对色彩进行扩散自动得到抽象的艺术效果.基于输入图像的形状或颜色,自动产生矢量场,根据矢量场提升输入图像的色彩信息,将色彩、边缘等图像特征进行抽象风格化处理.Son 等人<sup>[14]</sup>使用 Canny 边缘检测算法来生成基于区域和轮廓的各式各样的艺术风格图像.随后,Winnemöller 等人<sup>[15]</sup>基于各向异性的高斯差分(difference-of-Gaussians,简称 DoG)对图像进行滤波,然后通过颜色量化实现了对彩色图像和视频进行抽象化处理.Gooch 等人<sup>[16]</sup>通过与 Canny 边缘检测方法进行比较,证明了 DoG 边缘模型对艺术插图更为有效,因为它能捕捉到较好的兴趣点结构,并且能产生一系列粗细不一的风格化边缘.Orzan 等人<sup>[17]</sup>在 Canny 边缘检测和梯度重构方法的基础上提出了多尺度图像抽象化的方法.然而,由于 DoG 边缘检测模型具有各向同性的滤波核本质,导致边缘集合的像素不能清晰地展现线条的方向性.并且,使用阈值的边缘图可能会出现一些孤立的、分散的边缘部分,导致输出较为凌乱.特别是在一些存在图像噪声或者弱对比度的区域,这种现象更为突出.虽然可以考虑调整阈值来提高边缘的连贯性,但由于增加了噪声使结果并没有得到改善.Kang 等人提出的基于流的各向异性滤波框架<sup>[18,19]</sup>很好地解决了这个问题,通过构建边切向流(edge tangent flow,简称 ETF)得到 DoG 的积分域,这种基于流的 DoG(flow-based difference-of-Gaussians,简称 FDoG)滤波器很好地保护了图像里的方向性结构特征,使得生成的线条空间一致性得到保障.在此基础上,Kim 等人通过这种特征流线提取距离场偏移线条,进行布点,从而得到优化的点画<sup>[20]</sup>.Winnemöller 等人进一步对 DoG 算法进行了拓展,提出 XDoG 算法,可以得到多种风格的艺术效果<sup>[21]</sup>.

针对建筑物的抽象画,南亮亮等人<sup>[22]</sup>从矢量图出发,利用格式塔表现了不同抽象层次的建筑物画,出发点与本文方法有很大不同,本文直接从图像出发来获得建筑物的线条画抽象.Loya 等人<sup>[23]</sup>直接从建筑物正面图像来获得主要颜色,然后采用傅里叶级数提取周期性特征,对其进行抽象得到简单颜色表达,但其所表现的并非线条画风格.

建筑物图像通常是人们从建筑物外面拍摄的外观图,即看到的主要是建筑物的外墙截面和轮廓线条,因此,本文基于这样一个假设,即建筑物的重要视觉特征基本上都由直线段组成(直线、折线都包含直线段),所以本文

研究集中在建筑物图像的外观线条画效果的生成上.本文拓展了 Kang 等人的基于流的图像抽象化算法<sup>[18,19]</sup>,通过在特征流场构造过程中增加直线检测算子大大改善了该类方法在建筑物线条画方面的表现力,通过利用直线检测的结果来调整 ETF 和 FDoG 方法,使得建筑物的轮廓和门窗等线条特征得以加强,凸显了建筑物的整体外观效果.

## 1 针对建筑物图像的线条画生成算法

建筑物图像中存在较多的直线段,所以在构造新的特征流场之前首先要从图像中检测出直线,然后在原来图像构造 ETF 的基础上增加直线的梯度强度权值函数来增强线条效果.图 1 给出了本文方法的整个流程,图 2 给出本文实验所采用的原始图像.相对于 Kang 等人的工作<sup>[18,19]</sup>,我们在如下几个方面做出改进(如图 1 中深色方块所示),首先增加了线条检测部分,这一部分我们采用 LSD 算法(见第 1.1 节),该算法相对于 Canny 算子或者 Hough 变换<sup>[24]</sup>方法来说,有着良好的线条抽取能力.然后,通过检测出的直线段对原始灰度图进行调和,利用 ETF 和 FDoG 方法,得到抽象线条图.为了去除噪声,进一步采用中值滤波手段对结果进行处理以得到最终效果.

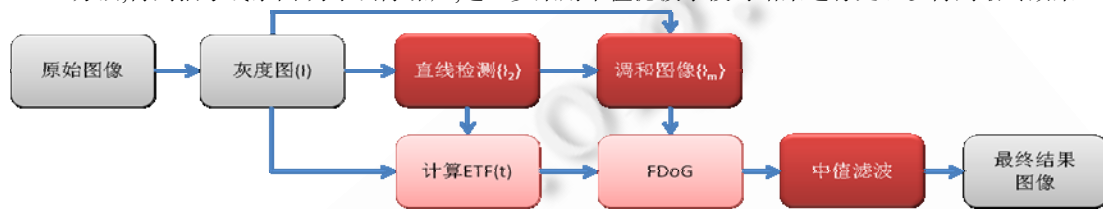


Fig.1 Whole procedure of the present algorithm

图 1 本文算法的整个流程



Fig.2 The original images used in this paper

图 2 本文实验所采用的原始图像

### 1.1 直线检测

由于建筑物线条画基本上由直线段和少量弧线构成,所以在本文中采用直线检测的方法在原图像上找出一些较长且较连续的直线,并对其在线条画中对应的位置进行加强.

直线检测是在边缘检测的基础上将离散的边缘点直线化并对直线的参数进行估计的过程,它是图像处理的重要内容之一,是计算机视觉领域中的经典问题<sup>[25]</sup>.目前,在直线检测算法中,Hough 变换<sup>[24]</sup>作为经典算法被许多研究者运用或改进其算法来检测图像中的线段.其标准方法是应用 Canny 算子对灰度图进行边缘轮廓提取,随后应用 Hough 变换算法提取直线段.它通过对图像的处理得到图像空间的边缘数据点集合,然后提取图像边缘上的所有直线,再根据线段的间隙、长度阈值,将直线分割成线段.Hough 变换的最大优点是对被检测图像的噪声具有很好的鲁棒性和容错性,但是检测速度慢,而最严重的缺点是对图像中具有高边缘密度的纹理区域进行检测时会产生许多错误的结果.由于该算法忽略了边缘点的方向,导致提取的有些线段很凌乱、没有方向.因此很多人对 Hough 变换提出了改进,如 Burns 等人<sup>[26]</sup>提出了一种线性时间线段检测方法,他们的算法不从边缘点开始,而仅使用梯度方向同时忽略梯度幅值,在线段抽取上取得了重大突破.Kahn 等人<sup>[27]</sup>的算法能够很好地检测出小范围的线段,但仍然存在阈值问题,如会把物体的纹理检测为线段.Matas 等人<sup>[28]</sup>提出的概率 Hough 变换通过任意边缘点的选择缩短了计算时间,并使用图像的梯度信息和错误检测控制提高算法性能,比原 Hough 变换明显改善了效果,但会漏掉很多短线段.另外,由于该方法的检测参数是每次对边界点分析后得到的检测错误的概率,因此导致该方法适应性差.Grompone 等人<sup>[29]</sup>提出了一种新的线性时间的线段检测方法,他们

将 Burns 等人的线段检测方法和线段的确认标准结合起来,得出一种快速的带有误判控制的线段检测算法(a fast line segment detector with a false detection control,简称 LSD).LSD 集合了其他算法的优点并克服了其他算法的不足,它无需参数就可以工作,并能给出精确的结果,计算效率也很高.

图 3 给出了由 Hough 变换方法和 LSD 方法得到的线条的比较,可以看出,Hough 变换方法把树叶都检测为线段,整体上检测出很多多余的错误线段;而 LSD 算法生成的线条更为准确,没有 Hough 变换中那么多杂乱、细小的短线.图 4 给出了图 2 由 LSD 算法得到的线条,很明显,这些线条能够反映出建筑物最主要的外轮廓特征,非常清晰,没有太多杂乱的信息.鉴于此,本文采用 LSD 算法帮助提取建筑物的线条特征,并以此来增强线条画效果.

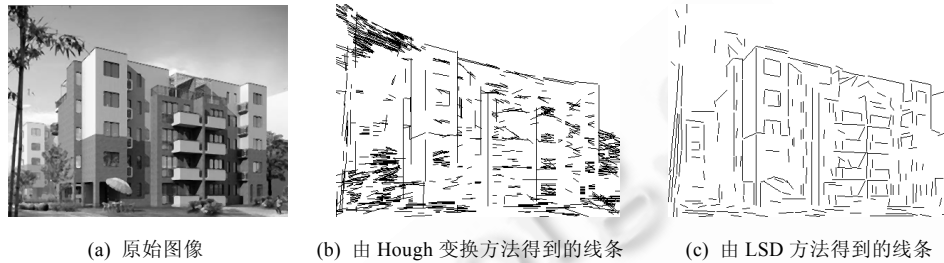


Fig.3  
图 3



Fig.4 Lines detected with LSD from the corresponding images in Fig.2

图 4 图 2 通过 LSD 检测到的线条

## 1.2 边缘正切流构造

在 Kang 等人提出的边缘正切流方法的基础上,本文通过增加直线梯度强度权值函数 $\omega_l$ 来改进 ETF 以强化突出建筑物的轮廓线条特征,如公式(1)所示:

$$t^{new}(x) = \frac{1}{k} \sum_{y \in \Omega(x)} t^{cur}(y) \omega_s(x, y) \omega_m(x, y) \omega_d(x, y) \omega_l(x, y) \quad (1)$$

式中的直线梯度强度权值函数为

$$\omega_l(x, y) = \frac{1}{2} (1.0 + \tan h(\eta \cdot (\psi_l(y) - \psi_l(x)))) \quad (2)$$

$\psi$ 是直线检测结果灰度图像 $I_2$ 的梯度强度,计算方法与原图像获取的梯度强度一样,使用 Sobel 算子计算 $I_2$ 的初始梯度场和梯度强度值.该权值函数 $\omega_l(x, y)$ 的值由 $\psi_l(y) - \psi_l(x)$ 来决定,满足单调递增,即当一个邻域像素 $y$ 相比中心像素 $x$ 的梯度强度较高时,则该权值函数值较大.因此,该函数能够保持显著的直线边缘方向特征.

## 1.3 FDoG生成线条画

在上一节构造的新边缘切向流场的基础上,使用各向异性高斯差分滤波抽取平滑的具有增强效果线条图.这里,对 Kang 等人采用的 FDoG 方法进行修改以进一步强化建筑物的特点,即把原输入的灰度图像 $I$ 替换成它与检测得到的图像 $I_2$ 相乘后所得合并图像 $I_m$ .这样,沿 $I_s$ 的积分式可以写成:

$$F'(s) = \int_{-T}^T G_{\sigma_c}(\|t-s\|) - \tau G_{\sigma_s}(\|t-s\|) I_m(I_s(t)) dt \quad (3)$$

$$I_m(x, y) = I(x, y) \cdot I_2(x, y) / 255.0 \quad (4)$$

$I_m$  为原始灰度图像  $I$  和直线段灰度图像  $I_2$  的合并图像。 $G_\sigma$  是一个方差为  $\sigma$  的一维高斯函数。

这样, FDoG 的整个定义变为

$$H'(x) = \int_{-S}^S \int_{-T}^T (G_{\sigma_m}(\|s-x\|)(G_{\sigma_c}(\|t-s\|) - \tau G_{\sigma_s}(\|t-s\|))I_m(I_s(t)))dtds \quad (5)$$

$$D'(x, \varphi_e) = \begin{cases} 1, & H'(x) \geq 0 \\ 1 + \tanh(\varphi_e H'(x)), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

由于公式(5)输出的是灰度渐变的线条画图像,为了增强图像的整体清晰度,在结果输出中增加一个灰度阈值,以控制输出的灰度范围,从而可以将十分模糊的线条或噪点过滤掉。最终输出定义如下:

$$D''(x, \varphi_e) = \begin{cases} 255, & D'(x) > \lambda (0 < \lambda \leq 1) \\ 255 \times D'(x) / \lambda, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

$\lambda$  为灰度阈值,控制输出的灰度范围为(0,1)。

#### 1.4 中值滤波消除输出图像的噪声

在由上述方法生成的线条画图像中仍会包含多种噪声,为了让得到的最终结果图整洁、干净,有必要除去这些噪声。采用适合的滤波方法能够有效地消除噪声,本文采用简单的中值滤波。中值滤波是把局部区域中灰度的中央值作为输出灰度值,即用一个奇数点的滑动窗口,将窗口中心点的值用窗口内各点的中值代替。对于二维图像,就是从输入图像中相继抽出奇数点的滑动窗口中的数据,并把奇数窗口中的灰度值顺序排列为一个一维序列  $f_1, f_2, \dots, f_n$ , 再将这  $n$  个点值按其数值大小顺序,取其序号为中心点那个灰度值作为滤波输出。用公式表示为

$$y_{ij} = \text{Median}_A \{f_{ij}\} \quad (8)$$

其中,  $A$  为窗口;  $f_{ij}$  为二维图像的灰度值;  $y_{ij}$  为输出图像灰度值。

中值滤波的窗口形状和尺寸对滤波效果影响较大,为了保持图像中有效的细线状边缘,本文采用  $3 \times 3$  方形窗口。另外,由于中值滤波是非线性滤波,与其他方法相比,可防止边缘模糊。

## 2 实验与讨论

经过多次实验,我们取得了较好的成果。图 5 比较了采用 Hough 变换提取直线和采用 LSD 方法提取线条的效果差异,这两种通过直线检测增强后所产生的效果都比没有直线增强的效果要好,但是很明显,经过 LSD 方法增强线条之后的效果更清晰,建筑物本身的特征更为突出,这一点充分说明了直线检测对于建筑物这类图像的线条画生成的重要性。



Fig.5  
图 5

为了更好地说明直线检测对建筑物线条画所起的作用,图 6 对比了有无 LSD 方法的线条画,同时,通过两幅图的绝对差,可以看到 LSD 的增强效果非常明显,图 6(c)中的白色部分即表示增强效果,尤其是在建筑物的整体轮廓和门窗部位,LSD 检测出的直线(如图 4 所示)强化了最终通过基于流的高斯差分的线条提取方法,使得得到的线条更加清晰、突出。



Fig.6  
图 6

通过上面图像的对比可以看出,使用 LSD 检测出原图像的直线段图像,结合修改后的边缘切向流场 ETF 和 FDoG,可以抽取出具有明显增强线条效果的线条图.更进一步地,应用该方法对同一幅图像使用不同的参数能够得到不同效果的线条画图像,如图 7 所示.其中,图 7(a)中,  $\sigma_c=0.6, \sigma_m=6, \varphi_e=0.3, \tau=0.998, \lambda=0.8$ ;图 7(b)中,  $\sigma_c=0.6, \sigma_m=3, \varphi_e=0.9, \tau=0.998, \lambda=0.8$ ;图 7(c)中,  $\sigma_c=0.6, \sigma_m=3, \varphi_e=0.9, \tau=0.986, \lambda=0.8$ ;图 7(d)中,  $\sigma_c=0.9, \sigma_m=3, \varphi_e=0.9, \tau=0.998, \lambda=0.3$ .



Fig.7 Line drawing images with different parameters  
图 7 使用不同参数得到的线条画

通过对由以上不同参数得出的结果进行对比可以看出,不同的参数取值会影响结果图像的显示效果.如  $\sigma_c$  会影响线条的粗细程度,  $\sigma_m$  影响到线条的连贯性,  $\varphi_e$  影响到线条的尖锐程度,  $\tau$  控制边缘检测的敏感程度,  $\lambda$  影响到输出的灰度值范围. 在实际的线条图生成过程中,可以适当选择合适的参数,以获得想要的效果.图 8 给出了一些著名建筑物的线条画自动处理的效果图,这些结果中均采用了本文的 LSD 线条增强技术,可以看到整个建筑物轮廓清晰,富有线画风格,若欲查看清晰大图,可以访问 <http://imlab.chd.edu.cn/npr/>.

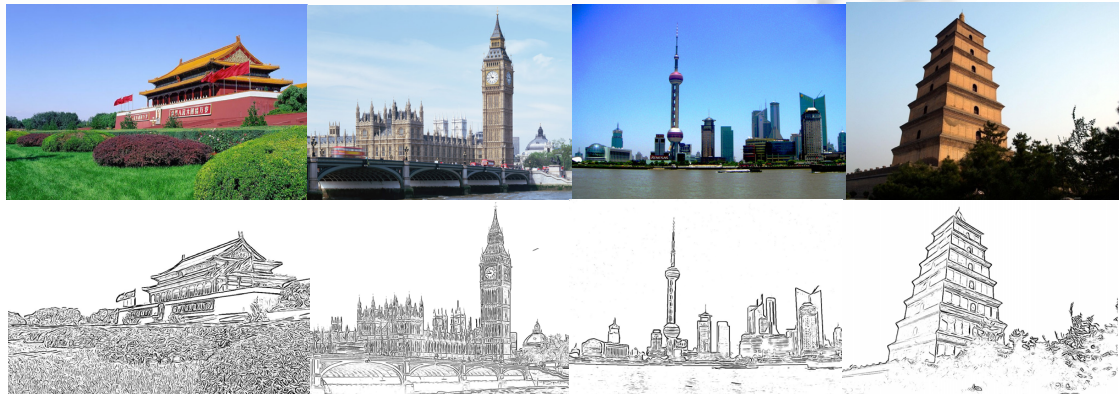


Fig.8 Final results from some famous buildings(Tian An Men-Big Ben-Oriental Pearl-Greater Wild Goose Pagoda)  
图 8 部分著名建筑物的效果图(依次为天安门-伦敦大本钟-东方明珠-大雁塔)

### 3 结论与展望

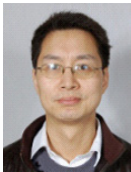
本文基于 Kang 等人提出的基于流的高斯差分方法,在构造边切向流 ETF 时利用快速的带有误判控制的图像线段检测 LSD 算法,加强了直线在方向信息上的权重,从而充分利用了 LSD 准确定位边缘信息的优点,增强了切向流 ETF 中直线方向的权重,使得在利用基于流的高斯差分 FDoG 方法生成线条画风格时,得到的线条更为清晰、准确.利用该方法大大增强了针对建筑物图像的线条表现力,充分凸显了建筑物的风格特征.本文所提方法实现简单、可靠.

**致谢** 本文实验所采用图片全部来自互联网,在此一并表示感谢.

#### References:

- [1] Salisbury M, Anderson C, Iseinski D, Salesin DH. Scale-Dependent reproduction of pen-and-ink illustrations. In: Proc. of the 23rd Annual Conf. on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York: ACM Press, 1996. 461–468. [doi: 10.1145/237170.237286]
- [2] Canny J. A computational approach to edge detection. IEEE Trans. on Pattern Anal. Mach. Intell., 1986,8(6):679–698.
- [3] Curtis CJ, Anderson SE, Seims JE, Fleischer KW, Salesin DH. Computer-Generated watercolor. In: Proc. of the ACM SIGGRAPH. New York: ACM Press, 1997. 421–429. [doi: 10.1145/258734.258896]
- [4] Huang H, Zang Y, Li CF. Example-Based painting guided by color features. The Visual Computer, 2010,26(6-8):933. [doi: 10.1007/s00371-010-0498-y]
- [5] Litwinowicz P. Processing images and video for an impressionist effect. In: Proc. of the ACM SIGGRAPH. New York: ACM Press, 1997. 407–414. [doi: 10.1145/258734.258893]
- [6] DeCarlo D, Santella A. Stylization and abstraction of photographs. In: Proc. of the ACM SIGGRAPH. New York: ACM Press, 2002. 769–776. [doi: 10.1145/566654.566650]
- [7] Comanicu D, Meer P. Mean shift: A robust approach toward feature space analysis. IEEE Trans. on Pattern Anal. Machine Intell., 2002,24(5):603–619.
- [8] Fischer J, Bartz D, Strasser W. Stylized augmented reality for improved immersion. In: Proc. of the IEEE Virtual Reality. Washington: IEEE Computer Society, 2005. 195–202.
- [9] Gooch B, Coombe G, Shirley P. Artistic vision: Painterly rendering using computer vision techniques. In: Proc. of the Non-Photorealistic Animation and Rendering. New York: ACM Press, 2002. 83–90. [doi: 10.1145/508530.508545]
- [10] Hays J, Essa I. Image and video based painterly animation. In: Proc. of the Non-Photorealistic Animation and Rendering. New York: ACM Press, 2004. 113–120. [doi: 10.1145/987657.987676]
- [11] Wang J, Xu YQ, Shum HY, Cohen MF. Video tooning. ACM Trans. on Graphics, 2004,23(3):574–583. [doi: 10.1145/1015706.1015763]
- [12] Lee J. Diffusion rendering of black ink paintings using new paper and ink models. Computer & Graphics, 2001,25(2):295–308. [doi: 10.1016/S0097-8493(00)00132-1]
- [13] Kang H, Lee S. Shape-Simplifying image abstraction. Computer Graphics Forum, 2008,27(7). [doi: 10.1111/j.1467-8659.2008.01322.x]
- [14] Son M, Kang H, Lee Y, Lee S. Abstract line drawings from 2D images. In: Proc. of the IEEE Pacific Conf. on Computer Graphics and Applications. Washington: IEEE Computer Society, 2007. 333–342.
- [15] Winnemöller H, Olsen S, Gooch B. Real-Time video abstraction. ACM Trans. on Graphics, 2006,25(3):1221–1226. [doi: 10.1145/1141911.1142018]
- [16] Gooch B, Reinhard E, Gooch A. Human facial illustrations: Creation and psychophysical evaluation. ACM Trans. on Graphics, 2004,23(1):27–44. [doi: 10.1145/966131.966133]
- [17] Orzan A, Bousseau A, Barla P, Thollot J. Structure-Preserving manipulation of photographs. In: Proc. of the Non-Photorealistic Animation and Rendering. New York: ACM Press, 2007. 103–110. [doi: 10.1145/1274871.1274888]

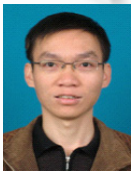
- [18] Kang H, Lee S, Chui CK. Coherent line drawing. In: Proc. of the Non-Photorealistic Animation and Rendering. New York: ACM Press, 2007. 43–50. [doi: 10.1145/1274871.1274878]
- [19] Kang H, Lee S, Chui CK. Flow-Based image abstraction. IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics, 2009,15(1):62–76.
- [20] Kim D, Son M, Lee Y, Kang H, Lee S. Feature-Guided image stippling. Computer Graphics Forum, 2008,27(4):1209–1216. [doi: 10.1111/j.1467-8659.2008.01259.x]
- [21] Winnemöller H. XDoG: Advanced image stylization with eXtended difference-of-Gaussians. In: Proc. of the Symp. on Non-Photorealistic Animation and Rendering. New York: ACM Press, 2011. 147–156. [doi: 10.1145/2024676.2024700]
- [22] Nan LL, Sharf A, Xie K, Wong TT, Deussen O, Cohen D, Chen BQ. Conjoining gestalt rules for abstraction of architectural drawings. ACM Trans. on Graphics, 2011,30(6):Article No.185. [doi: 10.1145/2070781.2024219]
- [23] Loya A, Adabala N, Das A, Mishra P. A practical approach to image-guided building facade abstraction. In: Proc. of the Computer Graphics Int'l. 2008. <http://research.microsoft.com/en-us/groups/vgv/imageguidedfacadeabstraction.pdf>
- [24] Hough PVC. A method and means for recognizing complex patterns. USA Patent, 3069654, 1962-12-18.
- [25] Marr D, Hildreth E. Theory of edge detection. Proc. R. Soc. Lond. B. Biol. Sci., 1980,207(1167):187–217. [doi: 10.1098/rspb.1980.0020]
- [26] Burns JB, Hanson AR, Riseman EM. Extracting straight lines. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986, 8(4):425–455.
- [27] Kahn P, Kitchen L, Riseman EM. A fast line finder for vision-guided robot navigation. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1990,12(11):1098–1102.
- [28] Matas J, Galambos C, Kittler J. Robust detection of lines using the progressive probabilistic hough transform. Computer Vision and Image Understanding, 2000,78(1):119–137.
- [29] Grompone G, Jakubowicz J, Morel J, Randall G. LSD: A fast line segment detector with a false detection control. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2010,32(4):722–732.



柳有权(1976—),男,湖北秭归人,博士,副教授,CCF 会员,主要研究领域为计算机图形学,虚拟现实。



薛茹(1974—),女,博士生,主要研究领域为计算机图形学。



吴宗胜(1974—),男,硕士生,主要研究领域为计算机图形学。



吴恩华(1947—),男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为计算机图形学,虚拟现实。



王山东(1985—),男,博士生,主要研究领域为计算机图形学。