



JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS

主办：中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

2015
03
VOL.20

ISSN1006-8961
CN11-3758/TB

非真实感图像处理 P437





第20卷第3期（总第227期）

2015年3月16日

中国精品科技期刊
中国国际影响力优秀学术期刊
中国科技核心期刊

版权声明

凡向《中国图象图形学报》投稿，均视为同意在本刊网站及CNKI等全文数据库出版，所刊载论文已获得著作权人的授权。本刊所有图片均为非商业目的使用，所有内容，未经许可，不得转载或以其他方式使用。

Copyright

All rights reserved by Journal of Image and Graphics, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS. The content (including but not limited text, photo, etc) published in this journal is for non-commercial use.

主管单位 中国科学院

主办单位 中国科学院遥感与数字地球研究所

中国图象图形学学会

北京应用物理与计算数学研究所

主 编 李小文

编辑出版《中国图象图形学报》编辑出版委员会

邮政信箱 北京9718信箱

邮 编 100101

电子信箱 jig@radi.ac.cn

电 话 010-64807995

网 址 www.cjig.cn

广告经营许可证 京朝工商广字第0361号

总 发 行 北京报刊发行局

订 购 全国各地邮局

海外发行 中国国际图书贸易集团有限公司

（邮政信箱：北京399信箱 邮编：100048）

印刷装订 北京科信印刷有限公司

Journal of Image and Graphics

Title inscription: Song Jian

Monthly, Started in 1996

Superintended by Chinese Academy of Sciences

Sponsored by Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS

China Society of Image and Graphics

Institute of Applied Physics and Computational Mathematics

Editor-in-Chief LI Xiaowen

Editor, Publisher Editorial and Publishing Board of Journal of

Image and Graphics

P.O.Box 9718, Beijing, P.R.China

Zip code 100101

E-mail jig@radi.ac.cn

Telephone 010-64807995

Website www.cjig.cn

Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals

Domestic All Local Post Offices in China

Overseas China International Book Trading Corporation

(P.O.Box 399, Beijing 100048, P.R.China))

Printed by Beijing Kexin Printing Co., Ltd.

CN 11-3758/TB

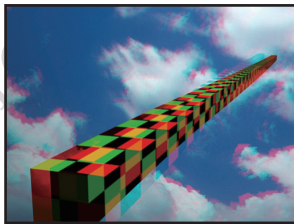
ISSN 1006-8961

CODEN ZTTXFZ

国外发行代号 M1406

国内邮发代号 82-831

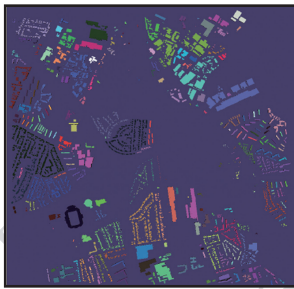
国内定价 50.00元



实时立体视觉系统中的深度映射(第0366页)



基于辐照度的运动模糊图像去模糊(第0395页)



面向智慧城市的3维城市在线可视化(第0445页)

综述

面向血管疾病诊断及预测分析的血流动力学模拟综述

徐梦佳, 杨金柱, 赵宏, 赵大哲 0297

图像处理和编码

多特征融合的车辆阴影消除

邱一川, 张亚英, 刘春梅 0311

图像分析和识别

基于局部时空特征方向加权的人体行为识别

李俊峰, 张飞燕 0320

对表情鲁棒的面部轮廓线3维人脸识别

常朋朋, 达飞鹏, 梅俊 0332

融合双层信息的显著性检测

姜霞霞, 李宗民, 匡振中, 刘玉杰 0340

面向动摄像机的高速运动目标检测

穆春迪, 谢剑斌, 闫玮, 刘通, 李沛秦 0349

匹配滤波在SAR目标单个散射部件检测中的应用

丁柏圆, 文贡坚, 钟金荣, 马聪慧 0357

图像理解和计算机视觉

实时立体视觉系统中的深度映射

李大锦, 白成杰 0366

遥感图像处理

GPU支持的SAR影像几何校正大规模并行处理

杨景辉, 程春泉, 张继贤, 黄国满 0374

基于正则化约束的遥感图像多尺度去模糊

谭海鹏, 曾炫杰, 牛四杰, 陈强, 孙权森 0386

第十届中国计算机图形学大会专栏

基于辐照度的运动模糊图像去模糊

方贤勇, 阚未然, 周健, 李黎, 郭延文 0395

对比度、颜色一致性和灰度像素保持的消色算法

王勋, 罗婷婷, 刘春晓, 彭浩宇 0408

结合因子图的多目的地地图布局优化

罗振珊, 张俊松, 范接鹏 0418

高阶连续的形状可调三角多项式曲线曲面

严兰兰, 韩旭里 0427

改进的自然图像铅笔画效果生成

黄志勇, 姚远, 张晶晶, 马凯, 任东 0437

面向智慧城市的3维城市在线可视化

潘斌, 郭小明, 陈明明, 陈为, 彭群生 0445

CONTENTS

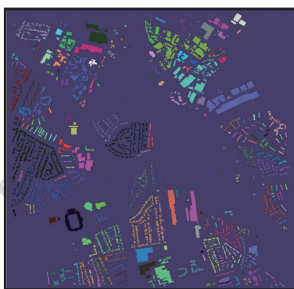
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Depth mapping in real-time stereoscopic systems (P0366)



Deblurring of motion blurred images based on the irradiance(P0395)



Online 3D city visualization for smarter cities(P0445)

Review

Survey of hemodynamics simulation for diagnosis and prediction in vascular disease

Xu Mengjia, Yang Jinzhu, Zhao Hong, Zhao Dazhe 0297

Image Processing and Coding

Vehicle shadow removal with multi-feature fusion

Qiu Yichuan, Zhang Yaying, Liu Chunmei 0311

Image Analysis and Recognition

Human behavior recognition based on directional weighting local space-time features

Li Junfeng, Zhang Feiyan 0320

Expression-robustness 3D face recognition based on facial profiles

Chang Pengpeng, Da Feipeng, Mei Jun 0332

Image saliency detection based on two-layer information fusion

Jiang Xiaxia, Li Zongmin, Kuang Zhenzhong, Liu Yujie 0340

Detecting high-speed moving targets in moving camera environments

Mu Chundi, Xie Jianbin, Yan Wei, Liu Tong, Li Peiqin 0349

The application of matched filter in detecting single scattering parts of SAR targets

Ding Boyuan, Wen Gongjian, Zhong Jinrong, Ma Conghui 0357

Image Understanding and Computer Vision

Depth mapping in real-time stereoscopic systems

Li Dajin, Bai Chengjie 0366

Remote Sensing Image Processing

GPU supported massively parallel processing for geometric correction of SAR imagery

Yang Jinghui, Cheng Chunquan, Zhang Jixian, Huang Guoman 0374

Remote sensing image multi-scale deblurring based on regularization constraint

Tan Haipeng, Zeng Xuanjie, Niu Sijie, Chen Qiang, Sun Quansen 0386

Column of Chinagraph'2014

Deblurring of motion blurred images based on the irradiance

Fang Xianying, Kan Weiran, Zhou Jian, Li Li, Guo Yanwen 0395

Decolorization with contrast, color consistency and grayscale pixel preservation

Wang Xun, Luo Tingting, Liu Chunxiao, Peng Haoyu 0408

Synthesizing multi-destinations map with factor graph

Luo Zhenshan, Zhang Junsong, Fan Jiepeng 0418

Higher-order continuous shape adjustable trigonometric polynomial curve and surface

Yan Lanlan, Han Xuli 0427

Improved algorithm for natural image pencil drawing production

Huang Zhiyong, Yao Yuan, Zhang Jingjing, Ma Kai, Ren Dong 0437

Online 3D city visualization for smarter cities

Pan Bin, Guo Xiaoming, Chen Mingming, Chen Wei, Peng Qunsheng 0445

中图法分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2015)03-0437-08

论文引用格式: Huang Z Y, Yao Y, Zhang J J, Ma K, Ren D. Improved algorithm for natural image pencil drawing production[J]. Journal of Image and Graphics, 2015, 20(3): 0437-0444. [黄志勇, 姚远, 张晶晶, 马凯, 任东. 改进的自然图像铅笔画效果生成[J]. 中国图象图形学报, 2015, 20(3): 0437-0444.][DOI:10.11834/jig.20150315]

改进的自然图像铅笔画效果生成

黄志勇, 姚远, 张晶晶, 马凯, 任东

三峡大学计算机与信息学院, 宜昌 448000

摘要: 目的 现有的自然图像素描画效果生成算法存在容易造成画面细节丢失, 笔画线条单一等问题。针对这些问题, 提出一种改进的自然图像素描画效果生成算法。方法 通过模拟艺术家创作素描画过程, 采用多层次多尺度方法提取图像中不同层次的细节信息, 并使用不同长度不同粗细的笔画来模拟艺术家在创作过程中不同力度的绘画效果, 分层绘制画面中不同细节层次, 然后融合各层次笔画效果形成最终的素描画笔画效果, 最后合并素描画笔画效果和素描画图像底纹。结果 通过本文算法, 可以得到与原输入自然图像内容一致, 色调与艺术家绘制的素描画效果相同, 笔画和底纹形式与实际素描画相似, 真实感较强的素描画效果输出图像。结论 大量实验结果表明, 本文算法可以生成高质量的自然图像素描画效果, 与现有成熟的铅笔画生成技术相笔, 该算法具有较强的可比性。

关键词: 铅笔画; 线条画; 非真实感渲染; 色调调整

Improved algorithm for natural image pencil drawing production

Huang Zhiyong, Yao Yuan, Zhang Jingjing, Ma Kai, Ren Dong

College of Computer and Information Technology, China Three Gorges University, Yichang 448000, China

Abstract: **Objective** Existing algorithms for natural image sketch production easily cause such problems as loss of image details and singleness of stroke line. To solve these problems, this study proposes an improved algorithm for natural image pencil drawing production. **Method** By simulating the artist creation process of sketch, we adopt a multi-level and multi-scale method to extract details from different image levels. Furthermore, we use strokes of different lengths and thicknesses to simulate the painting effect of different strengths in the process of artist creation, as well as to draw different levels image detail hierarchically. Then, the final sketch stroke effect is obtained by fusing all stroke effect levels. **Result** We finally merge the sketch stroke effects and image background to obtain the output image, which exhibits content that is consistent with that of the original input image, tonal effect that is the same as an artist's drawn sketch, as well as stroke and background form that are similar to those of the actual sketch. The output image has a strong sense of reality in terms of sketch effect. **Conclusion** A large number of experimental results indicate that the proposed method proposed can generate high-quality natural image pencil drawings. Moreover, the proposed method has strong comparability with the existing mature pencil drawing generation technique.

Key words: pencil drawing; line drawing; nonphotorealistic rendering; tone mapping

收稿日期: 2014-09-11; 修回日期: 2014-10-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(61272237); 湖北省教育厅自然科学基金项目(Q20131303)

第一作者简介: 黄志勇(1979—), 男, 讲师, 2011年于武汉大学获计算机应用技术专业博士学位, 主要研究方向为计算机视觉、计算机图形学、数字图像处理。E-mail: hzy@hzy.org.cn

通信作者: 马凯, E-mail: makai@ctgu.edu.cn

Supported by: National Natural Science Foundation of China (61272237)

0 引言

铅笔画效果是一种基本的图案语言,它与艺术家对自然世界的视觉感知存在着密切联系。现有铅笔画效果合成技术大致可分为基于2维图像的渲染方法和基于3维模型的渲染方法两类。近年来,多数研究是模仿艺术家的绘画风格和使用3D模型产生感性的艺术表达效果^[1-2]。随着数码相机的普及和网络共享平台的涌现,获取高品质图像比构建3维场景模型容易得多。因此,利用自然图像渲染铅笔画的需求出现了大幅增长。

艺术家绘制铅笔画的过程通常是一个复杂的工作流程,具有较多的操作细节。用计算机模拟这一操作过程时需要考虑以下3方面的问题:1)模拟艺术家使用草图描绘整体形状和主要轮廓、阴影等;2)模拟艺术家在不同区域通过绘制暗区和平行的笔划来描绘色调和底纹;3)模拟艺术家使用不同力度描绘画面不同层次与细节信息。近年来,研究者围绕模拟铅笔画绘制过程做出了大量研究工作,有的工作集中于探索线条绘制^[3-6],有的关注于阴影生成^[7-8],还有的研究工作以笔画线条绘制与阴影的结合^[5]作为工作重心。也有研究工作是从前两方面着手改进铅笔画效果^[9]。但很少有研究关注模拟艺术家使用不同力度笔画描绘画面中不同层次的细节信息。本文算法关注于第3个方面,从铅笔画画笔粗细与层次性方面改进提高铅笔画效果。

以3D模型为引导的铅笔画生成方法虽然可以使用3D模型的已知边界和几何信息准确地提取和操纵结构,快速生成场景物体的边界轮廓,但由于场景中还存在纹理、噪声、光照变化等元素,这使得依据3D模型生成铅笔画效果的过程仍然面临着较多的挑战。例如,现在存在的许多基于梯度和边缘模拟的笔画生成方法中,仍然存在或者含有伪噪声状结构的区域,边缘检测器在这种情况下往往会产生被错误或缺陷的段,使得生成的结果图像与艺术家绘制的铅笔画仍然有较大的差距。另外,在3维场景中,由于没有真实的表面或光照信息,全自动阴影生成变得困难,这也使得根据3维场景生成铅笔画变得更困难。而在根据3维场景生成铅笔画的过程中,使用密集平行线来添加特定方向阴影模式的方法,不同表面和深度层上生成了相同或相似阴影,

还将造成不自然的铅笔绘图效果。

由于在艺术感较强的素描画中除色调信息与阴影模式都至关重要外,画面中的细节与层次感同样重要。因此在本文提出的方法中,根据输入图像生成了不同层次的笔画信息与细节信息,并将这些信息合并到结果笔画图中,最后融合了笔画图与铅笔画背景,生成最终的铅笔画效果图。

本文算法中,首先为了模拟铅笔素描笔画轻重与画面层次性的本质特征,本文方法根据输入图像在不同尺度的边缘信息,产生一组尺度、笔画线条长度和宽度各不相同的输入图像的轮廓笔画图。其次为了使结果图像中保留各种尺度的轮廓与细节信息,将上一步产生的包含不同尺度细节信息的轮廓笔画图进行合并,得到铅笔画的结果笔画图。最后,在色调调整过程中应用全局优化指数模型,使得结果图像与艺术家所绘制的铅笔画效果色调一致。这种调整有利于渲染纹理密集的区域和物体轮廓。此过程产生的铅笔画效果结合了多尺度的笔画和色调的绘图,较好地表征和近似了艺术家创作铅笔画的过程^[10]。所有这些步骤,在根据单幅自然图像作为输入来生成一幅真实感较强的铅笔画的过程中,都发挥着重要作用。

本文算法可以直接应用灰度图直接生成素描画效果,也可以用于彩色图像的亮度通道,从而生成彩色的铅笔画效果图。在各种以自然图像作为输入的大量实验中,本文算法都可以得到较好的铅笔画效果图。与已有成熟的铅笔画效果生成技术相比,本文算法具有较强的可比性。

1 相关工作

本文的重点是研究一种素描画效果的生成算法,所以首先介绍一下传统素描画的定义,一般认为,由木炭、钢笔、铅笔等以线条、明暗关系、质感、色彩、结构和空间等来表现出物体称为素描,只用铅笔来表现的素描画则称为铅笔画素描。素描的主要表现形式是轮廓和线条。素描是一种正式的艺术创作,以单色线条来表现客观世界中的事物,也可表达思想、态度、情感、象征,甚至抽象形式。由于素描着重结构和形式,不像绘画那样重视总体和色彩,具有使用工具简单、表现力丰富的特点,因此广为流传,是一种受大众接受的艺术表现手法。那么利用计算

机生成具有素描效果的图像就具有很好的应用前景。

素描画渲染对事物进行了一定程度的抽象,在省略一些细节的同时加强了另一些重要的细节,因此它能更好地传达思想或体现设计者的设计意图。铅笔画能给人简洁明快自然流畅的感觉,然而,手工铅笔画绘制技术并不是所有人都能够轻易掌握的。因此,用计算机来模拟生成具有铅笔画艺术效果的图片动画的技术越来越受到人们的关注。这里简要地回顾以前的素描、阴影和线条画相关研究工作。

1.1 基于模型的素描

在文献[1]中,通过研究物理性质来模拟素描画。在给定的3维模型的每一个可视边缘上绘制轮廓线,然后把纹理映射到面上表示阴影。在文献[2]中检测到从3维表面轮廓,然后扰动它们来模拟艺术家的绘画。用有方向的笔画铅笔纹理来表现阴影,它依赖于灯光和3D模型的材质。对于线条,大多数的方法也是基于其在3D模型上的输入^[3-6],并描述了如何提取折痕和轮廓来描绘形状。在文献[11]中,给出了根据3D模型生成笔画线条方法的较为全面的研究工作。

为了表示形状和底纹,提出了铅笔明暗渲染。在文献[7]中,对不同的阴影方式进行了界定和分析。文献[8]实现了实时阴影。3D模型提供了详细的几何信息,可以在视觉上产生非常引人注目的结果。但是,在结构边缘和照度未知的情况下,无法将这些方法直接应用到基于图像的素描。

1.2 基于图像的素描

文献[1]提出了一种人物肖像素描画生成方法,并开发了一个可以模拟一类艺术风格,包括铅笔画的交互式系统。文献[12]提出了从输入图像中检测局部结构方向,并采用线性卷积积分产生的阴影效果的方法。文献[13]在不同的范围内将原图像划分为不同的强度层。基于区域的LIC方法有选择地参考了边缘、钝化屏蔽的图像和纹理的叠加。

对于直线提取,文献[14]提出了计算边缘切线流(ETF)和使用迭代方向的高斯差分滤波 DoG (difference of Gaussian) 方法。直线提取是基于特征尺度和线模糊似然函数估计的考虑。

文献[15]采用高斯尺度空间理论计算画面结构的层次信息和数学形态学的细化的方法,形成了像素的笔画路径。在渲染的时候控制细节程度,也可以产生图像的素描效果,但需要额外的训练图像

对。最后,用0范数(L_0)平滑滤波器来抑制噪声并提高主体结构。它适用于一些方法,包括素描线条产生等。

近年来,基于图像的素描画效果生成技术也基本成熟,但是这些方法主要关注画面整体的铅笔画艺术风格,忽略了画面中的细节信息。画面中的一些关键细节信息的丢失,将导致铅笔画效果图无法准确传达实际场景含义。

Lu 等人^[9]提出了一种组合铅笔画轮廓笔画与铅笔画背景底纹的方法生成自然图像的铅笔画效果。该方法模拟了艺术家创作铅笔画的过程生成笔画,它根据艺术家创作的铅笔画作品色调调整结果图像色调,然后合成笔画效果与具有艺术家作品色调的铅笔画底纹,最后合并轮廓笔画和铅笔画底纹得到高质量的铅笔画效果。但是该方法中未考虑艺术家采用轻重不同的笔画绘制场景的层次性信息,也未关注场景中的关键细节信息。这会造成生成的铅笔画结果图像中关键信息丢失的情况,如图1所示。并且这些情况在输入图像尺寸较小,画面质量不是很高的情况下会更加严重。

有了解决现有方法存在层次性细节丢失等问题,本文算法采用多尺度轮廓提取方法,提取输入图像在不同尺度中粗细与长度各不相同的轮廓信息和细节信息,并且巧妙地将不同尺度的轮廓与细节信息融合到了结果铅笔画图像中。

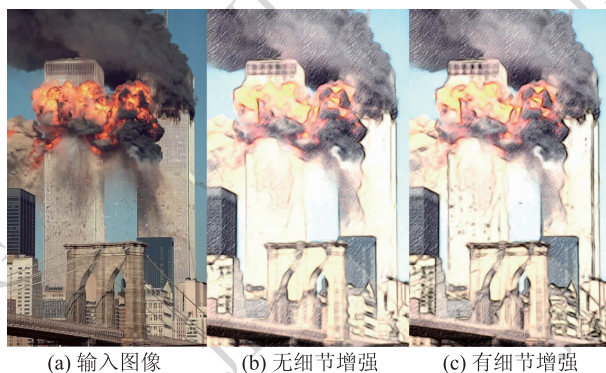


图1 铅笔画结果对比

Fig. 1 Comparison of pencil drawing results

2 自然图像的铅笔画效果生成过程

本文算法以 Lu 等人^[9]的算法框架为基础改进了笔画生成过程。使得最终生成的笔画图像即包含

不同层次的轮廓信息,还包含画面中的重要细节信息。在此,先对算法框架进行简要描述。自然图像的铅笔画效果生成算法,包括两个主要步骤,即铅笔画笔画生成步骤和背景色调生成步骤。在铅笔画笔画生成步骤中,根据输入图像的颜色梯度图生成笔画线条图;在背景色调生成步骤中,调整输入图像的色调与艺术家所创作的作品色调相近,并用色调图约束生成铅笔画的背景纹理图;最后合并笔画线条图和背景纹理图得到铅笔画结果图像。具体流程如图2所示。具体而言,铅笔线条或笔画意在表达场景的一般结构,而背景色调绘图则侧重于形状、阴影。在铅笔画效果生成过程中底纹色调的渲染比笔画线条的生成同样重要,底纹色调决定了铅笔画的全局视觉感知。

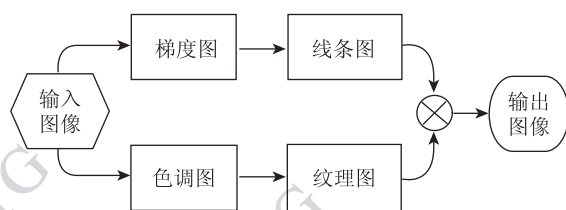


图2 铅笔画生成流程图

Fig. 2 Flowchart of pencil drawing production

2.1 铅笔线条的产生

笔画线条是铅笔画的重要部分,艺术家们用不同宽度,形状扭曲,或不同亮度的线条勾勒场景的基本结构^[16-17]。从艺术家们的素描作品中可以发现:艺术家很少绘制很长并且没有任何断裂的单笔曲线,艺术家绘制的笔画线条通常在弯曲处用多条较短的直线交叉勾勒。因此,在铅笔绘图时两条线的交界处就有可能交叉,造成快速的手部移动的交叉。对于模拟铅笔绘制的笔画,这些都是重要特征。图3(a)所示就是艺术家创建的铅笔素描。在特写图3(b)中,具有交叉效果被破坏了的笔画存在于交界处。

基于这一事实,为了得到弯曲笔画效果,应采取一组不太冗长直线笔画来近似粗略的线。生成铅笔线条的过程如下:把输入的彩色图转化成灰度图,再由灰度图得到梯度图,对梯度图进行8个方向的滤波,取出8个滤波方向的最大值,对8个滤波方向的最大值再次滤波得到平滑的效果,最后把8个方向的结果加起来即得到铅笔线条的效果。

2.1.1 笔画方向滤波器

对铅笔画中笔画方向进行简单的分类,分为8个类,使用8个不同方向的滤波器来提取画面中不

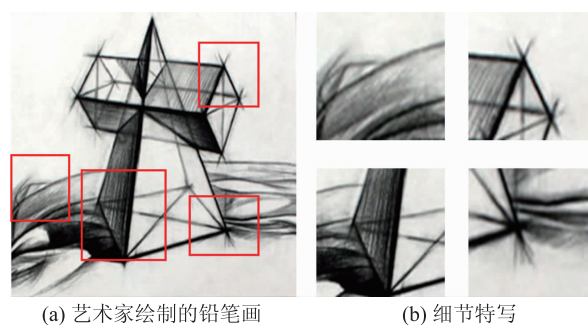


图3 艺术家绘制的笔画细节

Fig. 3 Details of pencil drawing produced by artists

同方向的笔画。

$$M_i = N_i * M \quad (1)$$

式中, N_i 是在第*i*个方向的滤波核。 N_i 的长度在Lu等人的算法中设置成了图像边长的1/30,颜色梯度沿方向*i*形成滤波器响应图 M_i 。

2.1.2 笔画的生成

8个笔画方向滤波器滤波得到8幅特定方向笔画所组成的笔画图组。在合并8幅特定方向的笔画图组时,选择在所有方向上响应最大的方向作为结果笔画方向,并将其值置为1,其他方向置为0,可以表示为

$$A_i(p) = \begin{cases} M(p) & \arg \max_i \{M_i(p)\} = 1 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

式中, p 表示像素位置, A_i 是方向*i*的结果笔画图。然后还需对各层结果笔画图再次用各方向滤波器平滑,消除上述运算中引入的噪声。最后合并作为最终结果笔画图

$$B' = \sum_{i=1}^8 (N_i \otimes A_i) \quad (3)$$

上述合并得到的结果笔画是在黑色画幅上的白色线条笔画。通过对白色线条笔画 B' 逐像素值取反得到在白色背景画幅上的黑色笔画图 B 。并将它们规范化到 $[0,1]$,得到用于组合成铅笔画图像的笔画图。

2.2 铅笔画色调与底纹

艺术家们使用密集的笔画,来强调作品中的阴影区域和黑暗的物体。除了逼真的笔画线条外,还需要与艺术作品相似的色调和真实感较强的铅笔画底纹才能渲染出较好的铅笔画效果。

2.2.1 色调的生成

自然图像的灰度图与艺术家的素描作品,在色

调上仍然相差较大,如图4所示。为了使得生成的铅笔画结果图像与艺术家的素描作品在感知上更加接近,生成的铅笔画图像应与艺术家的素描画色调相似。本文算法中,采用直方图匹配的方法,使得输入图像的色调与艺术家的素描作品的色调相似。

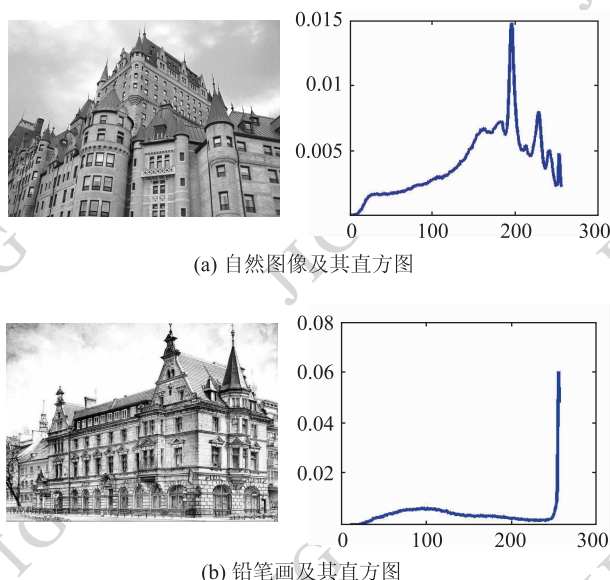


图4 自然图像与艺术家的铅笔画的统计直方图比较
Fig. 4 Comparison of histograms of natural image and pencil drawing produced by artists

2.2.2 背景纹理的生成

采用截取的艺术家绘制的铅笔画的小块局部纹理如图5(a),拼接成与输入图像尺寸相同的背景纹理。由小块局部纹理简单排列得到图像背景纹理会造成背景纹理中存在明显的连接线如图5(b),为了消除拼接线,采取简单的线性融合方法得到如图5(c)所示的拼接结果。在图5(c)中虽然存在人眼可见的模糊拼接缝,但在下一步色调纹理融合后,这种模糊的拼接缝很难被人眼所察觉。本文方法中所有结果图像都是采用如图5(c)的背景纹理拼接结果生成。

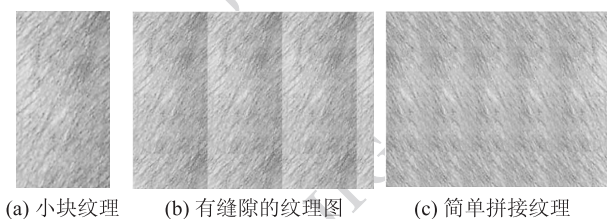


图5 背景纹理生成
Fig. 5 Background texture producing

2.2.3 色调背景融合

根据艺术家作品的色调,将输入图像的灰度图采用直方图匹配的方法转换成与艺术家作品色调相似的图像 Q 。下一步需要做的是即要保持背景图的色调,又要使背景图具有铅笔画的背景纹理。

艺术家在绘制背景纹理时利用相似的笔画模式反复重绘来实现背景图中明暗的差别。为了达到这种效果,使用笔画的乘法来模拟这一过程,这会导致一个指数的组合 $F(x)^{\tau(x)} \approx Q(x)$ (或在数域中 $\tau(x) \ln F(x) \approx \ln Q(x)$),用相应的纹理图 F 的 τ 次方去近似局部的色调 Q 。大的 τ 会使图像变暗。本文中,还要求 τ 保持局部平滑。因此,优化求解

$$\tau^* = \arg \min \|\tau \ln F - \ln Q\|_2^2 + \lambda \|\nabla \tau\|_2^2 \quad (4)$$

式中, λ 是在本文实验中取值为0.2的权重。式(4)可以转化为一个标准的线性方程,使用共轭梯度法求解。最后的铅笔纹理图 D 是通过指数运算计算 $D = F^{\tau^*}$ 得到。

2.3 铅笔画效果图的生成

前面已经求得铅笔画的笔画图 B 和背景纹理图 D ,最终铅笔画结果 R 由笔画图与背景纹理图合并得到,即

$$R = B * D \quad (5)$$

使用笔画图 B 和背景图 D 逐像素相乘得到结果图像 R 。上述过程得到的结果图像为一幅灰度铅笔画。用灰度铅笔画替代输入的彩色图像YUV颜色空间中的Y通道,并重新映射YUV颜色模型至RGB空间之后,即可得到彩色铅笔画效果。

3 多尺度铅笔笔画生成算法

直接使用第2节算法流程时,一方面没有考虑图像在不同尺度的细节信息,另一方面也没有考虑艺术家在创作素描画时,通常会使用不同力度,粗细长短各不相同的线条创作铅笔画。所以只使用第2节中的过程生成铅笔画会造成画面部分层次信息与细节信息丢失等情况,如图1所示。

为了解决这一问题,提取输入图像不同尺度的边缘轮廓信息并将不同层次的轮廓信息合并至结果笔画图中。本文算法中采用不同的高斯核来得到不同尺度的图像

$$S_i = G(i) \otimes S \quad (6)$$

式中, $G(i)$ 为尺度 i 的高斯核函数, S 为输入图像的

灰度图。

但是不同尺度的笔画线条不能都直接来自于不同尺度的图像,因为不同尺度空间图像的轮廓会存在部分重叠,这会导致不同结果图像中铅笔笔画过粗过重。因此本文方法提取细节图像的笔画轮廓来表示其他尺度上的笔画信息。在第1个尺度上使用 S_1 作为生成笔画图 B_1 的输入图像 I_1 ,生成笔画图的过程与2.1节的过程相同。生成其他尺度的笔画图时,采用相邻尺度两个输入图之差作为输入图像,生成当前尺度的笔画图

$$I_i = \begin{cases} S_i & i = 1 \\ S_{i+1} - S_i & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

根据输入图 I_i 计算不同尺度的铅笔画轮廓细节 B_i ,最后合并细节得到最终考虑了尺度及细节信

息的笔画轮廓图

$$B = \sum w_i B_i \quad (8)$$

式中, w_i 为笔画轮廓图各尺度的相对权重,本文实现中 $w_1 = 1.0$,其他权重值取小于1.0的值。另外生成每一个尺度的笔画轮廓图时,不同尺度的笔画轮廓图应该具有不同的笔画长度与笔画粗细。尺度索引 i 越大,越应该选取较小的笔画长度与较细的笔画。利用此方法获得的不同尺度轮廓笔画图如图6所示。从图6中可以看出,尺度为1的轮廓笔画图中包含了主要的笔画效果,尺度为2及3的笔画图中主要包含的是图像中的一些重要细节信息。合并的结果轮廓笔画图既包含图像的轮廓信息,还包含一些重要细节信息的轮廓。

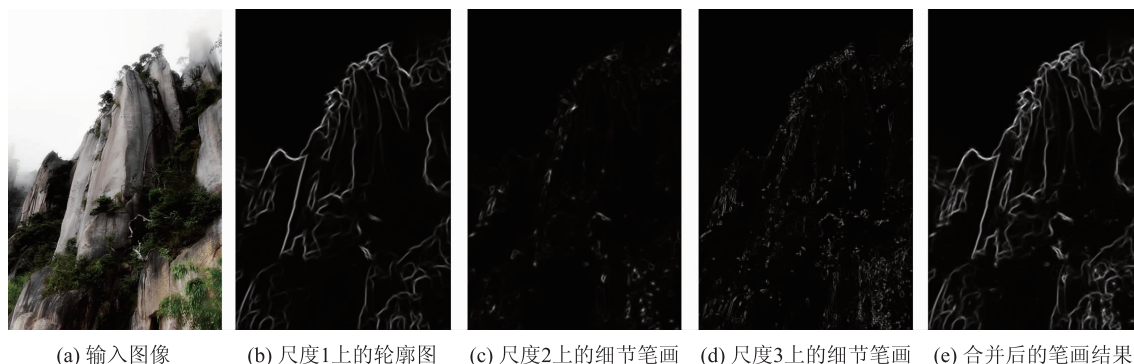


图6 不同尺度的笔画效果,及其合并的效果图

Fig. 6 Sketches in different scales and merged result

4 结果与讨论

在一台处理器为 Intel® Xeon® E5-2403,主频1.8 GHz,内存为8 GB的计算机上,用Matlab编程实现了本方算法。利用本文提出的算法,在各类自然图像上进行了测试,处理结果表明,本文算法在各类图像上都可以得到较好的铅笔画效果。

与Lu等人^[9]方法得到的结果相比,本文方法结果中会保留更多的图像细节信息,如图7所示。从图7中可以看出,由于本文方法可以保存更多的细节笔画,所以花瓣上的细节线条清晰可见,但这些细节笔画在Lu等人方法生成的结果中却丢失了。从图1和图7的实验对比中发现,在图像分辨率较小,图像质量较差时,Lu等人方法忽略了图像细节笔画的情况更加严重,而本文方法却仍然可以得到

相对较好的结果。



图7 本文方法与Lu等人^[9]方法生成结果比较
Fig. 7 Comparison of results of our methods and Cewu Lu's algorithm

本文方法实现中,对于不同尺度采用了不同尺寸的方向滤波器以获得不同尺度的铅笔笔画轮廓图。本文方法的结果图片生成中,尺度1使用的滤波器边长15,尺度2使用的滤波器的边长为11,尺度3所使用的滤波器的边长为7。在3种尺度中,滤波器中方向线的宽度分别为3、2、1。合并各尺度的笔画轮廓图时所使用的相对权重值 w_i 分别为

1.0、0.8 和 0.5。

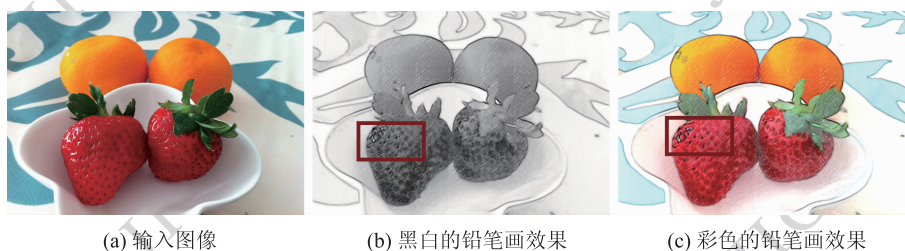
如图8所示,将本文方法应用于名胜古迹、城市街景、自然风光、人物特写等各种场景的图像铅笔画效果的生成中,都得到了较好的结果。

如图9所示,本文方法应用于少量图片时,由于细节信息过度叠加,会导致过结果图像中出现过重的笔画效果,引入视觉瑕疵。



图8 本文方法在建筑物、城市街景、风景名胜、人物肖像、自然风光各类图像上应用的部分结果

Fig. 8 More results produced with our method on buildings, city streets, portraits and natural scenery photos



(a) 输入图像

(b) 黑白的铅笔画效果

(c) 彩色的铅笔画效果

图9 本文方法的失败例子

Fig. 9 A failed example of our method

5 结 论

针对现有自然图像素描画效果生成算法存在容易造成画面细节丢失,笔画线条单一等问题。本文提出了一种考虑了多尺度铅笔画轮廓的自然图像素描画效果生成算法,通过模拟艺术家创作素描画过程,采用多层次多尺度方法提取图像中不同层次的细节信息,并使用不同长度不同粗细的笔画来模拟艺术家在创作过程中不同力度的绘画效果,分层绘制画面中不同细节层次,然后融合各层次笔画效果形成最终的素描画笔画效果,最后合并素描画笔画效果和素描画图像底纹,得到与原输入自然图像内容一致,色调与艺术家绘制的素描画效果相同,笔画和底纹形式与实际素描画相似,真实感较强的素描画效果输出图像。

通过大量实验与对比,表明本文方法可以在各类场景图像中都可以生成高质量的铅笔画效果。与现有成熟的铅笔画算法相比,也具有较强的可比性。

参考文献 (References)

- [1] Sousa M C, Buchanan J W. Computer-generated graphite pencil rendering of 3d polygonal models [J]. Computer Graph Forum, 1999, 18(3): 195-208. [DOI: 10.1111/1467-8659.00340]
- [2] Lee H, Kwon S, Lee S. Real-time pencil rendering [C]// The 4th International Symposium on Non-Photorealistic Animation and Rendering. New York, USA: ACM, 2006: 37-45. [DOI: 10.1145/1124728.1124735]
- [3] Decarlo D, Finkelstein A, Rusiniewicz S, et al. Suggestive contours for conveying shape [J]. ACM Transactions on Graphics, 2003, 22(3): 848-855. [DOI: 10.1145/1201775.882354]
- [4] Judd T, Durand F, Adelson E H. Apparent ridges for line drawing [J]. ACM Transactions on Graphics, 2007, 26(3): #19. [DOI: 10.1145/1276377.1276401]
- [5] Lee Y, Markosian L, Lee S, et al. Line drawings via abstracted shading [J]. ACM Transactions on Graphics, 2007, 26(3): #18. [DOI: 10.1145/1276377.1276400]
- [6] Grabli S, Turquin E, Durand F, et al. Programmable rendering of line drawing from 3d scenes [J]. ACM Transactions on Graphics, 2010, 29(2): #18. [DOI: 10.1145/1731047.1731056]
- [7] Hertzmann A, Zorin D. Illustrating smooth surfaces [C]// Proceedings of the 27th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York, USA: ACM, 2000: 517-526. [DOI: 10.1145/344779.345074]
- [8] Praun E, Hoppe H, Webb M, et al. Real-time hatching [C]// Proceedings of the 28th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York, USA: ACM, 2001: 581-586. [DOI: 10.1145/383259.383328]
- [9] Lu C W, Li X, Jia J Y. Combining sketch and tone for pencil drawing production [C]// Proceedings of the Symposium on Non-Photorealistic Animation and Rendering. Aire-la-Ville, Switzerland: Eurographics Association, 2012: 65-73.
- [10] Wang T C. Pencil sketching [M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2002.
- [11] Rusinkie W S, Decarlo D, Finkelstein A. Line drawings from 3d models [C] // Proceedings of SIGGRAPH '08. New York, USA: ACM, 2005. [DOI: 10.1145/1401132.1401188]
- [12] Mao X, Nagasaka Y, Imamiya A. Automatic generation of pencil drawing from 2d images using line integral convolution [C] // Proceedings of the International Conference on Computer Aided Design and Computer Graphics. Beijing, China: International Academic Publishers, 2001: 240-248.
- [13] Yamamoto S, Mao X, Imamiya A. Enhanced line pencil filter [C]// Proceedings of the International Conference on Computer Graphics, Imaging and Visualization. Washington DC, USA: IEEE Computer Society, 2004: 251-256. [DOI: 10.1109/CGIV.2004.21]
- [14] Kang H, Lee S, Chui C K. Coherent line drawing [C]// The 5th International Symposium on Non-Photorealistic Animation and Rendering. New York, USA: ACM, 2007: 43-50. [DOI: 10.1145/1274871.1274878]
- [15] Orzan A, Bousseau A, Barla P, et al. Structure-preserving manipulation of photographs [C]// The 5th International Symposium on Non-Photorealistic Animation and Rendering. San Diego, United States: ACM, 2007: 103-110. [DOI: 10.1145/1274871.1274888]
- [16] Hsu S, Lee I. Drawing and animation using skeletal strokes [C]// Proceedings of the 21st Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York, USA: ACM, 1994: 109-118. [DOI: 10.1145/192161.192186]
- [17] Curtis C J. Loose and sketchy animation [C]// Proceedings of SIGGRAPH '98 Electronic Art and Animation Catalog. New York, USA: ACM, 1998: # 145. [DOI: 10.1145/281388.281913]