

# 基于图像的铅笔画绘制技术的研究现状与展望

潘 龙 纪庆革

(中山大学信息科学与技术学院 广州 510006)

**摘 要** 非真实感绘制(Non-Photorealistic Rendering, NPR)是计算机图形学领域的一个分支,旨在使用计算机来生成具有某种艺术效果的作品。目前,非真实感绘制技术已经能够成功地模拟油画、水彩画、卡通画、铅笔画等艺术风格,在许多领域得到很广泛的应用。铅笔素描是艺术造型的基础。作为一种最简单的艺术表现形式,铅笔画凭借其简洁流畅的特点深受广大艺术爱好者的喜爱。如今,基于图像的铅笔画绘制技术已经是 NPR 领域的一个重要组成部分,受到诸多研究人员的关注,但该技术仍处于成长阶段,算法的通用性还无法满足现实应用的需求。

**关键词** 非真实感绘制,基于图像的绘制技术,铅笔画

**中图分类号** TP391 **文献标识码** A

## Survey of Image-based Pencil Rendering Technique

PAN Long JI Qing-ge

(School of Information Science and Technology, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China)

**Abstract** Non-photorealistic rendering is a branch of computer graphics, which is committed to generate some art style works. Currently, non-photorealistic rendering technology (NPR) has been able to successfully simulate the oil paintings, watercolors, cartoons, pencil and some other styles, and has been widely used in many areas. Pencil sketch is the basis of art modeling. Since usually simple and smooth, pencil works are deeply loved by people. However, it is not easy for every person to master the skills of pencil drawing. Image-based pencil rendering technique is an important part of NPR, and is more and more concerned by researchers. But related technologies are still immature, and can't meet the needs of practical applications.

**Keywords** Non-photorealistic rendering, Image-based rendering, Pencil drawing

## 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。经过 40 余年的发展,经典的真实感图形学对现实世界的再现已经能够以假乱真,达到了像照片一样真实的效果。然而真实感图形学技术的绘制结果虽然精确真实,却流于刻板、冷酷,缺乏艺术作品的灵动和情感,忽略了人类在认知世界的过程中的主观抽象和高层次提炼的过程,表现得反而近乎于一种“灵魂的贫瘠”。因此,非真实感绘制(Non Photorealistic Rendering, NPR),作为真实感绘制的补充被带入图形学研究领域之中。非真实感图形学着重于表现事物的艺术特质,专注于图形个性化和艺术化的表达,使用非真实感绘制技术处理的图像往往带有含蓄、简洁、写意、概括等美学特征,生成的作品风格也相当灵活。非真实感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。

## 2 基于图像的铅笔画绘制技术的发展背景和意义

### 2.1 真实与非真实感绘制技术

非真实感绘制最早出现在 20 世纪 80 年代:1986 年 Strassmann, 1987 年 Sasada, 1990 年 Saito and Takahashi 和 Haeberli 等人,先后分别在 Siggraph 会议上发表了几篇有影响力的论文。1997 年, Siggraph 会议将非真实感绘制单独作为一个研究类别,此后非真实感绘制技术就进入了一个稳步发展的时期。Hertzmann 曾引用 Edvard Munch 和 Simpsons 的话,对非真实感绘制领域进行了如下的描述:“The camera cannot compete with painting, so long as it cannot be used in heaven or in hell”, “Very few cartoons are broadcast live—it’s a terrible strain On the animators wrists”。

1) 真实感绘制技术。从计算机图形学诞生至 20 世纪 80 年代初,技术开发人员和计算机动画艺术家们都以“真实”地再现现实场景为努力的目标。作为计算机图形学的一个重要部分,真实感绘制以精确、完美为宗旨,通常利用建立物理模型的方法,对现实世界中物体的形状、材质、光照、纹理等各方

本文受 NSFC-广东联合基金项目(U0735001)资助。

潘 龙(1988-),男,硕士生,主要研究方向为计算机图形学;纪庆革(1966-),男,博士,副教授,主要研究方向为计算机图形学、计算机视觉、虚拟现实、系统仿真, E-mail: issjqg@mail.sysu.edu.cn(通信作者)。

面因素进行模拟,来真实地再现现实场景中的事物。经过几十年的发展,真实感绘制技术已经相当成熟,在计算机辅助设计(CAD)、多媒体教学、虚拟现实系统、动画及影视特效制作、计算机游戏、科学计算可视化等许多方面得到了广泛的应用。然而现实世界的丰富多彩使这种精细、真实的模拟异常复杂,对模拟的结果是否达到了绝对真实的效果也并没有一套完善的衡量准则。相关的研究往往不是为了模拟本身,而是为了产生结果图像,这总给人一种重点偏移的感觉。而且从传达信息的效果来说,真实感模拟技术虽精确真实,却流于刻板、冷酷,缺乏灵活性与感情。

2)非真实感绘制技术。为了更好地传达思想和情感,人们需要对事物进行高度的视觉抽象与提炼,这也是非真实感绘制技术得以提出和发展的由来。非真实感绘制又叫做风格化绘制(Stylistic Rendering),从提出伊始,就倍受广大研究者的喜爱。非真实感绘制技术凭借人们的主观想象来风格化处理图形和图像,根据受众的心理有选择地改变细节的层次,以描绘和突出事物的特质。与手工艺术作品相似、把握受众观察事物的好奇心理、专注特定信息的传达、对图片语言进行假设、理解信息的传递机制,这些都是非真实感绘制技术努力的目标。非真实感绘制技术生成的作品也往往带有艺术性、灵活性、风格化、概括性等特点。

最先出现的非真实感绘制系统是二维交互式的,它是对人们传统绘图方法的一种模拟,这一类系统允许用户使用笔刷、铅笔、油漆桶、橡皮擦等二维的绘图工具在画布上绘制基于像素的图像。后来开发的绘图系统基本上可以归为两大类:一类是基于笔刷的二维绘制系统,另一类则是二维或2.5维的后期处理系统。与最早的系统比较而言,基于笔刷的二维绘图系统有了更加成熟的画布(Canvas)、笔刷(Brush)和笔划(Strokes)模型;二维或2.5维后期处理系统则是将原始图像、照片,或是附有特定信息的图片作为输入进行图像处理。人们耳熟能详的Photoshop、Flash、CorelDRAW等绘图工具的出现都得益于二维非真实感绘制技术的发展,它不仅造就了许多风格新奇的艺术形式和前所未有的艺术作品,也在很大程度上提高了传统绘画的绘制效率。三维计算机图形学技术为NPR操作三维数据提供了帮助,如今已经有不少研究者致力于三维数据的实时非真实感绘制算法。该技术主要应用在动画制作、三维游戏制作、生物医疗、虚拟场景漫游等方面,具有代表性的工具如Maya、3DMax、Zbrush等,艺术家们也已经创作出了《玩具总动员》、《冰河世纪》、《功夫熊猫》等一系列的三维动画电影。

## 2.2 笔画绘制技术

铅笔画包括铅笔素描、铅笔速写等,广义上的铅笔画又称为素描画,是一种用单色或少量彩色绘画材料描绘生活中所见或所感的绘画形式。铅笔画是一切图形艺术的基础。轮廓和线条是素描的一般称谓,不同的笔触营造出不同的线条及横切关系,包括节奏、主动与被动的周围环境、平面、体积、色调及质感等。

如今的铅笔画绘制技术已经成为非真实感绘制研究领域的一个重要组成部分。铅笔素描的绘制本质上是一个艺术创作的过程,实现计算机自动绘制铅笔画风格的图像,需要做的就是用计算机来模拟人类的思考、提炼和绘制,从而利用计算机来实现艺术创作。虽然NPR的研究并非用来代替艺术家,

但是它可以为一些没有经验的人士提供一种工具,或在某些场合提高艺术家的工作效率。经过多年的发展,目前已经有许多办法来实现铅笔画的自动绘制,许多学者、专家也在试图找到更好、更有效的方法来实现铅笔画风格作品的渲染。

## 3 基于图像的铅笔画绘制技术的研究现状

### 3.1 铅笔画绘制技术的分类

铅笔画绘制作为非真实感绘制技术的一个分支,受到众多研究人员的重视。目前主流的铅笔画绘制技术分为两大类。

第一类方法利用计算机图形技术对铅笔、纸张等绘画工具,及手工绘画的过程进行物理模拟来完成绘制。这种方法绘制的图像效果逼真、内容丰富,但绘制过程却需要复杂的建模,大部分都应用于人工交互的系统中,要求设置大量参数,或要求用户有一定的绘画功底。这一类的绘图工具有很多,Pencil Sketch就是一种早期的绘图系统<sup>[1]</sup>,它通过鼠标和一个虚拟桌面,让用户交互地输入一些类似铅笔硬度、下笔力度(压感)、铅笔条纹的方向等参数,来完成整个绘制过程。Sousa和Buchanan开发的系统<sup>[2]</sup>,在利用电子显微镜扫描真实的铅笔画的基础上,将铅笔画笔触定义为矢量线段、绘制路径和特征函数,对铅笔、纸张以及铅笔和纸张之间的相互作用进行模拟,当用户交互地选定参数后,系统将2D图像转换成一张铅笔画。在三维应用方面,有的工具可以通过指定参数把3D场景或模型直接渲染成铅笔画<sup>[4]</sup>,Markovic等人开发的系统能够借助立体照片自动生成铅笔画风格图像<sup>[9]</sup>,然而对3D场景的需求在一定时期内限制了这一类工具使用的方便性。如今,随着硬件技术的发展,数位板、3D扫描仪等设备已经相当成熟,结合诸如Adobe公司的Photoshop、Corel公司的CorelDRAW Graphics Suite等软件平台可以很方便地完成各类铅笔画风格的绘制。

第二类方法是利用数字图像处理技术对真实图像进行非真实感处理生成铅笔画,这一类方法适合于铅笔画的自动生成。X. Mao等人<sup>[5]</sup>通过研究计算机对素描笔触的模拟,利用线积分卷积(LIC)能提供流场的纹理方向的特点,将白噪声图像和向量场作为输入进行卷积运算,从而生成具有铅笔画风格的纹理图像。N. Li等人<sup>[6]</sup>在此基础上采用了基于特征区域的铅笔画绘制方式。文献<sup>[10]</sup>改进了已有的铅笔画生成算法,首先对图像进行区域分割,进而采用基于区域的噪声图和纹理方向生成算法,使绘制结果更类似手绘。文献<sup>[12]</sup>在对图像进行USM(Unsharp Mask)锐化处理后,利用颜色缩放来获取图像径向和边缘细节以生成更加明显的边缘。文献<sup>[13]</sup>通过分析真实铅笔纹理结构特征抽象出铅笔笔画的简单模型以生成用户需要的铅笔纹理。文献<sup>[14]</sup>将锐化后的结果图像代替白噪声图作为LIC的输入,使生成的纹理更接近手绘。桑桑等人<sup>[15]</sup>避开了常规铅笔画生成算法中图像分割的限制,提出一种基于纹理与边缘轮廓的铅笔画自动生成算法。程佳等人<sup>[16]</sup>利用结构矢量场控制LIC绘制过程,使得绘制效果的粗糙感和细腻感得到不同程度的体现。

### 3.2 常见的基于图像的铅笔画绘制技术的基本步骤

图1给出了基于2D图像的铅笔画绘制算法的框架,基本处理步骤为:(1)对输入图像进行预处理;(2)生成白噪声图像;(3)对原图像按纹理特征进行区域分割;(4)对白噪声图像

做卷积(不同的算法中卷积算子各有不同)或运动模糊操作;(5)提取图像的轮廓,生成铅笔画的轮廓线图;(6)对卷积所得纹理图像与轮廓线进行融合。具体介绍如下:

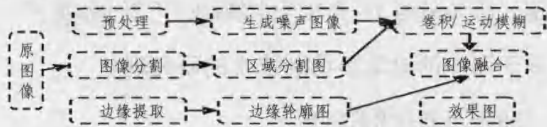


图1 基于2D图像的铅笔画绘制算法的框架

(1)图像预处理。铅笔画绘制过程中的图像预处理主要包括图像灰度化和图像增强处理两种。灰度化变换是将一张彩色图像转化为灰度图像的过程。灰度图像是生成白噪声图的第一步,而白噪声图则是进行LIC卷积处理生成铅笔画纹理的必要输入。对图像进行灰度变换是数字图像处理的基础应用,一般通过将彩色图像的 $R, G, B$ 3个颜色分量进行加权平均来完成。

在绘制铅笔画时,通常会用线条勾勒出物体的轮廓。为了更好地提取出图像的轮廓特征,需要对图像进行增强处理。进行图像增强的方法有很多,有的采用分层绘制的技术,首先对原图像进行分割,然后把分割后的每个区域作为一个层来单独执行后续步骤,最后将所有这些层叠加在一起,从而达到图像增强的目的。还有人通过高斯滤波对原始图像进行平滑滤波<sup>[12]</sup>,然后用原始图像减去平滑处理后的图像,对原始图像进行高通滤波,这种方法称为USM(Unsharp Mask)锐化。

为使生成的铅笔画更好地接近手绘的效果,文献<sup>[13, 14]</sup>提出了用颜色缩放处理的办法对图像进行加工。铅笔画作为素描画的一种,应保留一定的空白区域来激发欣赏者的联想。色彩缩放的基本原理是对图像的 $R, G, B$ 颜色分量分别乘以一个相同的比例值,缩放之后的像素值一般取原始图像中 $R, G, B$ 3个分量原始大小的1.5倍左右,根据实际情况也可以进行调整(这种处理只适合于那些背景较淡的图像)。

(2)白噪声图像的生成。铅笔画在绘制的过程中,铅笔画纹理中的墨迹是随机分布的。为了对此进行模拟,可以依据一定的概率随机地将原始图像中每个像素的灰度转化为0或255,这种方法最终生成的图像称为白噪声图。白噪声图决定了最终绘制出的铅笔画的灰度色调。然而0和255两个灰度等级的白噪声图将导致最终生成的铅笔画图像的色调单一,明暗对比不够明显。有的方法在此基础上,将原图像的不同灰度范围分开处理,借此生成明暗对比更突出、空间感更强的铅笔画。

文献<sup>[16]</sup>采用了基于HSV色彩模式的白噪声图像生成法。该方法根据亮度值控制噪声点的产生几率,能够更准确直观地表现出图像的明暗区域。

(3)图像分割。画家在铅笔画绘制过程中,在不同区域采用的铅笔条纹的方向、深浅也不相同,以此来表达物体的明暗、空间感、质感等。为了表现出这种效果,基于图像的铅笔画绘制技术需要对图像进行分割,然后对不同的区域分别提取铅笔纹理特征,再分别产生区域的向量场或铅笔笔刷模型。

对图像进行分割的算法有很多种,大体上可以分为:基于边缘检测的方法、区域生长法、与其它理论相结合的分割方法等。目前在铅笔画绘制技术中应用比较多的是基于图论的图像分割方法<sup>[8]</sup>。通过傅里叶功率谱法可以对图像纹理的方向

特征进行分析,如果图像的纹理有方向性,则当图像转化到频域的时候,在与纹理方向垂直的方向上应该有较高的能量。

(4)线积分卷积/运动模糊操作(LIC)。线积分卷积原本是将进行向量场可视化处理的经典方法<sup>[2]</sup>。将白噪声图和向量场作为输入,进行线积分卷积处理后的结果,可以很好地模拟出铅笔画纹理的效果,故而线积分卷积被广泛地应用到了铅笔画的绘制技术当中,成为了现如今生成铅笔画纹理的一般方法<sup>[7]</sup>。进行线积分卷积处理的一般步骤描述如下:基于像素沿向量场矢量正、反方向对称积分生成流线,流线上所有像素对应的输入噪声值按卷积核(convolution kernel)参与卷积,将结果作为输出纹理的像素值。铅笔画使用线条来表现纹理,使用明暗来表现立体空间的绘图艺术,线积分卷积处理的方法可以生成很理想的铅笔画纹理图(如图2—图4为线积分卷积处理的输入和输出效果图)。

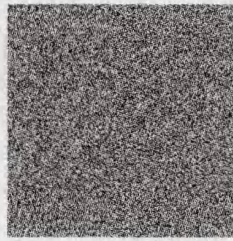


图2 输入噪声图像

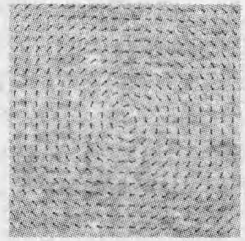


图3 输入向量场

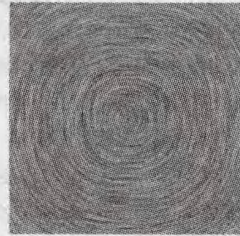


图4 卷积结果

(5)轮廓线提取。用线条勾勒物体的轮廓是一种最简单的绘图方式,它可以现实世界的场景或事物进行提炼和简化,勾边也是铅笔画绘图过程中的第一步。目前使用计算机提取图像轮廓特征的方法有很多种,借助于各种边缘检测算子来完成轮廓提取是最简单的一种做法,也是铅笔画绘制技术中的常用方法。



图5 原始图像



图6 霓虹处理结果

采用霓虹处理加反向变换的方法也可以提取出物体的轮廓<sup>[11]</sup>。其基本原理是:用当前像素与其右方和下方的像素分别进行梯度运算,然后将结果值作为当前像素的值。对于彩色图像而言,首先分别计算像素的红、绿、蓝分量与同行及同

列像素的梯度,即差的平方和的平方根,再将梯度值作为新像素的红、绿、蓝分量值。因为霓虹是对图片进行梯度处理,因而可以产生轮廓发光的效果来获取图像的线条特征(图6、图7所示即为采用该方法提取出的图5的轮廓)。

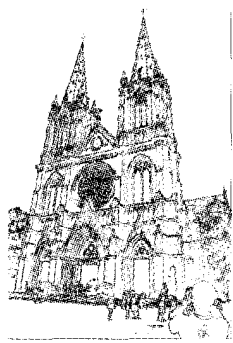


图7 反向+灰度变换后的轮廓

(6)图像融合。将以上步骤生成的铅笔画纹理图与轮廓线条进行合并叠加,就可以得到最终的铅笔画风格的图像。

### 3.3 现有铅笔画绘制技术的不足

现有的铅笔画绘制技术仍处在发展和成长的阶段,对技术的利用也远未达到成熟,绘制效果仍存在如下问题:

线条机械化,明暗对比不鲜明。霓虹处理的轮廓提取算法较之边缘检测算子有了改进,能够较合适地自动提取出铅笔画的轮廓,但这种做法与真实手绘的铅笔画还有很大的差别。手工绘制的铅笔画,其轮廓的粗细、色调深浅、线条之间的连接方式等,在不同作品风格中都不尽相同,这些是目前的算法所不能模拟的。而对于铅笔画的纹理,虽然对图像进行分割的做法允许以不同的线条方向绘制不同的区域,但分割结果往往会受到图像拍摄过程中光照、角度等因素的影响,这往往会造成绘制结果与真实的手绘风格存在差异。而且铅笔画并非都采用单一方向的线条进行描摹,一些自由笔触风格的作品是线积分卷积不能模拟的。

新的区域分割算法有待研究。区域分割是整个实现过程中最耗时的环节,如何提高分割效率是今后一个重要的研究内容。此外,让用户交互地控制分割结果也是一个可行的办法,可以借助它来避免分割过程中图像的阴影、角度等因素的影响,省略或合并一些不必要的区域,以取得更为理想的铅笔画绘制效果。

绘图风格单一。现有的铅笔画绘制技术多是研究和模拟铅笔单色素描风格的绘画,几乎没有对于卡通、抽象、简笔画、漫画等艺术风格的模拟,对于彩色风格铅笔画的模拟技术也很少。铅笔作为一种绘图工具,它的绘制风格可以有无限种可能性。所以,如何使用计算机来模拟其余风格的铅笔画作品将是日后值得研究的课题。

### 3.4 绘制目标及评判标准

在真实感绘制中,成功的度量标准是生成的图像与照片的接近程度。对非真实感绘制的衡量应该从更主观的应用和艺术角度来考虑。

(1)模拟智能。人工智能领域的研究目标是利用计算机模仿人的智能。可以将非真实感图形绘制理解为人工智能领域的一个课题,即仿效人类手工创作图形能力的一种尝试。由此,非真实感绘制就有了一个固有的度量成功与否的标准:计算机生成的图像能在多大程度上接近手工创作的图像。

(2)传达意图。大量的证据表明,绘画作品在许多情况下,在传达特定信息方面实际上比照片或真实感绘画作品更为有效,这得益于绘画作品对事物高度的主观抽象与提炼。这也解释了在摄影技艺和由计算机生成真实感作品的技术已经相当成熟的今天,这些非真实感绘画作品仍被使用的原因。此外,认知和教育心理学家们的许多研究成果也论证了这类手工创作图形较之于照片类图像的优势。由此给出了评判非真实感绘制的成功与否的又一标准:观察者能否快速、准确地获取图形预期传达的信息(评判中可使用的参数包括理解信息所需的时间、错误率等诸多方面)。

(3)澄清语言与形象元素之间的关系。得益于使用的方便性,自然语言成了世界上占主导地位的沟通方式,除了眼睛、嘴巴与耳朵,人们不需要使用其它的任何工具。与自然语言不同,形象元素则首先作用于人们的感官,能够更直观、具体地传递信息,或通过叙事非强制性地传递思想。由此可见,掌握用计算机生成图形的方法将非常有用,因为社会的大多数成员并未经过手工绘图的训练。由于其灵活性和大量与表达相关的可能的细微差别,非真实感绘制将在这里扮演重要角色。在这些情况下,一个测度非真实感绘制成功程度的标准是一致性。利用一致性,可以向使用者传递复杂的信息。

## 4 铅笔画绘制技术的发展和前景

现有的铅笔画绘制技术还处在发展阶段,虽然目前对它的应用不够成熟,应用领域也不够广泛,但对它的应用却有很大的发展潜力。具体表现在以下几个方面:

1)铅笔画绘制工具。基于图像的铅笔画绘制工具可以很好地应用于医疗、公益、广告等行业的宣传材料的设计制作,在提高其制作效率的同时,还能在很大程度上降低制作成本。借助互联网技术、移动平台技术的发展,铅笔画绘制工具还可以发挥娱乐、信息传递等作用。

2)铅笔画风格的动画制作。基于图像的铅笔画绘制技术可以用来逐帧地处理连续的图像,将真实录制或拍摄连续影像、或者是使用计算机制作的动画转化为铅笔画风格的动画。传统的铅笔画风格动画都是艺术家逐张手工绘制的,利用铅笔画绘制技术可以大大提高动画创作的效率。

3)铅笔画风格画的艺术创作。从某种角度来说,由计算机自动完成的铅笔画,其绘制的效果与真实手绘风格仍存在差异,这本质上也是一种艺术创新。通过对人机交互模块的完善,铅笔画绘制技术可以衍生为一个很好的艺术创作工具,帮助艺术家创作出一些其它工具无法模拟的艺术作品。

4)有助于非真实感绘制领域的研究。非真实感绘制技术中的各个领域是相通的。铅笔画绘制过程中要用到的诸如图像分割、轮廓提取、笔刷模型等技术,都可以很好地应用到其它风格的绘画当中。因此,作为非真实感图形学的一个分支,铅笔画绘制技术方面的研究,对整个非真实感绘制领域的发展也有重要的意义。

**结束语** 本文首先对真实与非真实感绘制技术进行了比较,分析了非真实感绘制技术的特点与优势,同时介绍了铅笔画绘制技术的研究背景与意义。而后对铅笔画绘制技术的研究现状进行了阐述,介绍了常见的铅笔画绘制技术的基本步骤,分析了现有铅笔画绘制技术的不足,并对非真实感绘制技

(下转第498页)

- ture Organization[C]//ACM International Conference on Multimedia Information Retrieval, Oct. 2008
- [12] Assad M, Carmichael D J, Cutting D, et al. AR phone: Accessible Augmented Reality in the Intelligent Environment[C]//Proceedings of OZCHI, 2003;232-237
- [13] Billingham M, Hakkarainen M, Woodward C. Augmented assembly using a mobile phone[C]//IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 2008), Cambridge, UK, Sep 2008;167-168
- [14] Wagner D, Schmal Stieg D. ARToolKit on the pocket PC platform[C]//IEEE International Augmented Reality Toolkit Workshop, Tokyo, Japan; IEEE, 2003
- [15] Wagner D, Langlotz T, Schmalstieg D. Robust and unobtrusive marker tracking on mobile phones[C]//IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality, 2008
- [16] Lowe D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. International Journal of computer Vision, 2004, 60(2)
- [17] Rosten E, Drummond T. Machine learning for high-speed corner detection[C]//European Conference on Computer Vision, 2006, 3951;430-443
- [18] Bay H, Tuytelaars T, Gool L V. SURF: Speeded up robust features[C]//ECCV, 2006
- [19] Chen W C, Xiong Y G, Gao J, et al. Efficient Extraction of Robust Image Features on Mobile Devices[C]//IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, 2007
- [20] Wagner D, Reitmayr G, Mulloni A, et al. Pose tracking from natural features on mobile phones[C]//IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, 2008
- [21] Özuysal M, Fua P, Lepetit V. Fast Keypoint Recognition in Ten Lines of Code[C]//Proceedings of Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2007
- [22] Moore A. Introduction to kd-trees [M]. Computer Laboratory University of Cambridge, 1991
- [23] Liu T, Moore A, Gray A, et al. An Investigation of Practical Approximate Nearest Neighbor Algorithm[C]//NIPS, 2004
- [24] Nister D, Stewenius H. Scalable Recognition with a Vocabulary Tree[C]//Computer Vision and Pattern Recognition, 2006 IEEE Computer Society Conference, 2006
- [25] Amit Y, Geman D. Shape quantization and recognition with randomized trees[J]. Neural Computation, 1997, 9(7);1545-1588
- [26] Bruns E, Brombach B, Zeidler T, et al. Enabling mobile phones to support large-scale museum guidance[J]. Multimedia, IEEE, 2007, 14(2);16-25
- [27] Henrysson A, Ollila M. UMAR: Ubiquitous Mobile Augmented Reality[C]//Proceedings of the 3rd international conference on Mobile and ubiquitous multimedia. ACM; College Park, Maryland, 2004
- [28] Möhring M, Lessig C, Bimber O. Video See-Through AR on Consumer Cell-phones [C]//3rd IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, Arlington, V, 2004

(上接第 477 页)

术的评判标准进行了说明。最后分析了铅笔画绘制技术的发展和应用前景。

### 参 考 文 献

- [1] Vermeulen A H, Tanner P P. PencilSketch--A Pencil-Based Paint System[C]//Proceedings of Graphics Interface'89, Toronto, Canadian Computer-Human Communications Society, 1989;138-143
- [2] Cabral B, Leedom L C. Imaging vector fields using line integral convolution[C]//Proceedings of the 20th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, Anaheim, CA, August 1993;263-270
- [3] Sousa M C, Buchanan J W. Observational model of blenders and erasers in computer-generated pencil rendering[C]//Proceedings of the 1999 conference on Graphics interface'99, Kingston, Ontario, Canada, September 1999;157-166
- [4] Sousa M C, Buchanan J W. Computer-generated graphite pencil renderings of 3D polygonal models[C]//EUROGRAPHICS'99 Conference Proceedings. London, England, 1999;195-207
- [5] Mao X, Nagasaka Y, Imamiya A. Automatic Generation of Pencil Drawing from 2D Images Using Line Integral Convolution [C]//Proceedings of the 7th International Conference on Computer Aided Design and Computer Graphics (CAD/GRAPHICS'01), 2001;240-248
- [6] Li Nan, Zhong Huang. A feature-based pencil drawing method [C]//Proceedings of the 1st international conference on Computer graphics and interactive techniques in Australasia and South East Asia, Melbourne, Australia, February 2003;135-143
- [7] Yamamoto S, Mao Xiao-yang, Imamiya A. Enhanced LIC Pencil Filter[C]//Proceedings of the International Conference on Computer Graphics, Imaging and Visualization, July 2004;251-256
- [8] Felzenszwalb P F, Huttenlocher D P. Efficient Graph-Based Image Segmentation[J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 59(2);167-181
- [9] Markovic D, Stavarakis E, Gelautz M. Parameterized Sketches from Stereo Images[C]//Proceedings of Image and video Communications and Processing (SPIE), San Jose, California, USA, 2005;783-792
- [10] 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
- [11] 李龙生, 周经野, 陈益强, 等. 一种改进的铅笔画的生成方法[J]. 中国图像图形学报, 2007, 12(8);1423-1429
- [12] Chen Zhen-yu, Zhou Jing-ye, Gao Xing-yu, et al. A Novel Method for Pencil Drawing Generation in Non-Photo-Realistic Rendering [C]//Proceedings of the 9th Pacific Rim Conference on Multimedia; Advances in Multimedia Information Processing, Tainan, Lecture Notes in Computer Science, Volume 5353/2008, December 2008;931-934
- [13] 谢党恩, 赵杨, 徐丹. 一种铅笔滤镜生成算法及其在 GPU 上的实现[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2008, 20(1);26-31
- [14] 孙丹丹, 康棣. 一种铅笔画仿真新方法[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(11);164-166
- [15] 桑桑, 郝鹏翼, 丁友东, 等. 基于纹理和轮廓的铅笔素描画生成方法[J]. 上海大学学报:自然科学版, 2010, 16(3);312-317
- [16] 程佳, 康棣. 铅笔画的自适应 LIC 绘制方法[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(16);198-203