

非真实感绘制技术研究进展

王相海^{1,2} 秦晓彬¹ 辛玲¹

(辽宁师范大学计算机与信息技术学院 大连 116029)¹

(南京大学计算机软件新技术国家重点实验室 南京 210093)²

摘要 作为与真实感图形学相对应的图形学分支,非真实感绘制技术近年来受到人们的关注并已成为计算机图形学的研究热点之一,其研究成果已在计算机动画产业、计算机艺术和科学资料插图绘制等领域得到了广泛的应用。对非真实感绘制的相关技术进行了综述,首先介绍了非真实感绘制的发展过程,然后以不同艺术效果的模拟为线索对非真实感绘制技术进行了分类,并对各类技术的特点、发展状况和主要算法进行了分析和讨论,同时对非真实感绘制中所使用的特殊技术进行了分类讨论。最后对非真实感绘制技术的未来发展进行了展望。

关键词 非真实感,绘画,艺术风格,图像,纹理

中图分类号 TP391 **文献标识码** A

Advances in Non-photorealistic Rendering

WANG Xiang-hai^{1,2} QIN Xiao-bin¹ XIN Ling¹

(College of Computer and Information Technology, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China)¹

(State Key Laboratory for Novel Software Technology, Nanjing University, Nanjing 210093, China)²

Abstract As a graphics branch corresponding to photorealistic graphics, in recent years, the non-photorealistic became a research hot in computer graphics, which has got more and more attention. The research productions have been applied to computer animations, computer art, science information iconograph rendering and etc. This paper summarized the non-photorealistic rendering technology. Firstly, the paper introduced development of non-photorealistic rendering, then used simulation of the effect of different art as a clue, classified the non-photorealistic rendering technology, and there were some analysis and discussion on the characteristic, development and leading arithmetic of each technology, meanwhile, we expected the future development of NPR.

Keywords Non-photorealistic rendering, Painting, Rendering style, Image, Texture

1 引言

非真实感绘制(non-photorealistic rendering,简称 NPR)的目标是能在形式上指定一种可展现绘画作品的方式,并随之编写生成非真实感绘画作品的计算机程序^[1]。该种绘画机制从 20 世纪 90 年代开始受到关注并成为计算机图形学的一个研究热点^[2,3],其中 Lansdown 等 1995 年首次一般性地总结了非真实感绘制中的问题^[4],Eurographics'99 和 SIG-GRAPH'98 均为非真实感绘制这一主题设置了专题。非真实感绘制不同于传统的真实感绘制方法,它通常被用来表现那些不具有真实感性质的绘制形式,主要针对某种艺术风格对对象进行绘制,并且利用艺术效果对场景信息进行视觉抽象,放弃不必要的细节,集中描绘相关特征,简化物体的形状,突出场景中观察者所需要的部分,能够更好地表达所显示物体的信息。

非真实感绘制技术作为与真实感图形学相对应的图形学

分支,可以实现铅笔画、水彩画、油画、水墨画等许多艺术效果的图像,并且借助于交互手段可以更加贴切地模拟各种不同的绘画风格。目前,非真实感绘制的研究成果已在计算机动画产业、计算机艺术和科学资料插图绘制、医学数据可视化、动植物体的三维显示等领域得到了广泛的应用,相信随着计算机软硬件技术的快速发展,这一技术必将具有广阔的发展空间和非常好的应用前景。

本文对非真实感绘制技术进行了综述,首先简要介绍了 NPR 的发展史,然后以不同艺术效果的模拟为线索,分别对油画、水彩画、铅笔画、毛笔画和水墨画、钢笔画等 NPR 技术的发展状况、主要算法和所存在的问题进行了分析和讨论,同时对 NPR 中一些特殊效果作品的模拟技术进行了介绍;最后对非真实感绘制技术的未来发展进行了展望。

2 非真实感绘制的发展历史

人类很早以来就重视以图形的方式认知和了解事物,早

到稿日期:2009-09-30 返修日期:2009-12-18 本文受辽宁省自然科学基金项目(20072156),辽宁省教育厅科学技术研究项目(20060486),辽宁“百万人才工程”培养经费,南京邮电学院图像处理与图像通信江苏省重点实验室开放基金(ZK207008)资助。

王相海 男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究方向为计算机图形学及多媒体信息处理,E-mail: xhwang@lnnu.edu.cn;秦晓彬 男,硕士生,主要研究方向为计算机图形学;辛玲 女,硕士生,主要研究方向为非真实感绘制技术及图像处理。

期的图画都是人为的绘制,自从计算机图形学诞生以后,人们便开始考虑使用计算机绘制图形来自动或半自动地达到各种效果,最早出现的模拟画面是利用完全模拟现实影像的真实感图像图形技术。可是,真实感图像在很多时候并不能满足人们的视觉要求,甚至某些真实的物体用真实感技术得到的效果并不好,比如,在实际应用的工程制图中,建筑工程师希望要重点突出、简洁明了的徒手绘图,而此时用计算机产生的真实感图像就显得非常呆板、陈旧;同样在医学上,也习惯于使用手绘插图而不是照片来做文字的说明,因为医学上的微小的被隐藏的重要部分用真实感图像不能更清晰地表现出来,这样可能会造成无法估量的后果;还有,电子产品的使用说明图、机械设备的维修指南图也都需要简单明了的手绘插图而不是真实感图像。此外,人类有着很多艺术表现形式的作品,如铅笔画、油画,以及特定领域中的医学图像等,这些特殊风格的作品靠真实感技术是实现不了的。因此人们逐渐开始考虑能否用另一种绘制方式来实现画面效果,于是非真实感绘制诞生了。非真实感图形绘制的发展历史并非不很长久,从单纯处理图像到利用绘元绘制,从利用图像技术到利用图形技术,从二维到三维,从仅靠软件实现到现在开始利用硬件 GPU,从不可交互到可交互,均在不断发展中。图 1 给出了一个非真实感绘制技术的发展历史图^[5,6]。

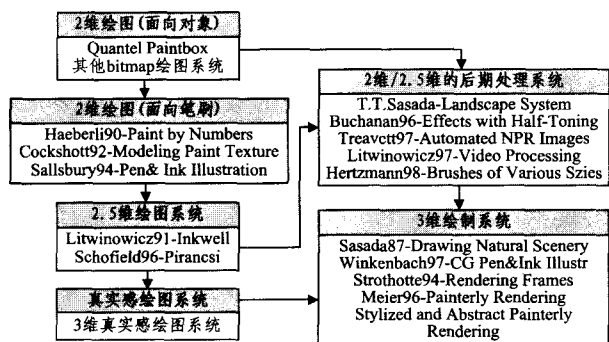


图 1 NPR 的发展历史

从图 1 可以看出,在发展初期非真实感绘制技术大多在 2D 平面上依靠用户交互式地实现,并主要集中在简单的划线技术上,如 Vermeulen 和 Tanner 实现的铅笔画草图系统^[7]。上世纪 90 年代初,产生了一系列交互式的绘画系统,如 Haeberli 开发了一个交互式 2D 绘制系统^[8],该系统由用户输入一幅原始图像,再通过用户交互式的操作来改变绘笔的轨迹、颜色和形状以达到一定效果;Litwinowicz 开发的 Inkwell 墨水池系统,包括一系列对在定时曲线下的浓密间隔控制点进行数值滤波的有效工具。此后,某些非真实感绘制技术从 2D 过渡到 2D/2.5D,它在后期处理时通过利用某些附加信息来进行图像处理。如 Sasada 的 Landscape 系统就是使用了 2.5D 的方法表示树叶和植物来覆盖整个场景,通过将 2D 的树叶和植物进行移位、缩放或者旋转到视点处等操作,然后用不同的深度值绘制来表现出森林等风景。随着非真实感绘制的发展,NRP 的研究重点转移到 3D 图形方面,它要求人们可以变换视点从不同角度来获得非真实感图形。3D NRP 绘制由 2D/2.5D 非真实感绘制和 3D 真实感绘制发展而来,比如近期,Ming-Te Chi 和 Tong-Yee Lee 在 2006 年实现的 Stylized and Abstract Painterly Rendering 系统^[9]中提出了一种新颖的交互式 3D 程式化、抽象化的美术绘制框架,在这个框架

中,输入的模型首先用 3D 点集来表示,这些点集被用来构建一个多解限制域层。从叶节点到根节点,各种范围的区域在画纸上被表示成不同尺寸的笔画。限制域层使用多重区域分割来展开。这个分割将由相似特征规则的区域汇集为一个有意义的域层,这些特征包括颜色、位置和曲率。

3 不同艺术效果图形的 NPR 技术发展

非真实感绘制主要是生成具有某种特定艺术效果的画面,对不同种类的艺术画面,其绘制技术也存在着一定的差异。下面以不同种类的艺术效果画面的模拟为线索,对其 NPR 技术的发展进行分析和讨论。

3.1 油画的模拟

油画是一种最善于再现周围世界一切丰富视觉印象的艺术作品,它发挥了色彩的广阔境界,形成了色彩上的感情效果,利用具体的光线色彩物质感等让不同大小和颜色的色块层层堆叠,描绘不同的目标,从而表现特定的主题,再现生活的真实。

早期的非真实感油画绘制技术中比较具有代表性的当属 Haelberli 提出的基于笔刷模型的油画绘制方法^[8],该方法利用画笔绘制思想建立了画笔模型,然后通过使用一系列画笔来模拟传统的油画绘画过程。开发的油画绘制系统采用一幅真实感图像或者一幅三维场景作为参考图像,允许使用者通过点击鼠标来确定笔画的位置、颜色、形状、大小和方向,其中笔画的样式包括曲线、点彩画和多边形等,笔画的大小可由鼠标的移动速度或者键盘来决定,而笔画的方向由用户或图像的梯度来决定。此外,该绘制系统还提供了经常被画家所使用的图像增强技术,即通过对颜色饱和度的调整来控制油画画面的明暗色调。尽管该系统允许用户可以从已存在的圆形、矩形、线形和离散点等笔触中选择笔画,但是这些笔触都具有相同的大小和形状,因此该系统所生成的油画画面与手绘作品相比显得有些呆板。

Litwinowicz 等在 Haelberli 方法的基础上进行了扩展,通过对视频特征的分析以及追踪像素的运动来自动生成具有印象派油画风格的视频片断^[10],实现了由视频片段自动生成油画风格的美术动画效果,所涉及到的几项关键技术包括:笔触的绘制、裁剪和定位,帧到帧笔触位移的确定和添加、删除等技术。其中笔触被设定为平滑线条或给定的纹理,并且通过一定的随机操作来扰动笔触的长度、颜色和方位,以加强手绘作品的感觉,同时使用光流域来促使笔触从一帧到一帧沿着像素运动的方向进行绘制。此外,通过确定原始图像的边界来对不适当的笔触进行裁减,使被绘制的客体具有更好的细节和轮廓;而在从一帧移动到另一帧的过程中,考虑到笔触可能会变得过于稀疏或稠密而不能很好地覆盖整幅画面,方法中还设计了一个添加和删除笔触的算法。

针对文献^[8]算法中的不足,Aaron Hertzmann 提出了使用不同大小和不同形状的笔画对静态图像进行多层绘制的油画模拟算法^[11],该算法以静态图像作为输入,依据原图像的颜色,应用不同的笔触来进行分层绘制,即首先绘制较粗的笔触,然后在适当的地方通过绘制细一级别的笔触来覆盖粗的笔触,进而模拟手绘效果。该算法因其快速、有效而成为基于笔画绘制(SBR)算法中最为经典的算法。进一步,Hertzmann 和 Perlin 把该方法扩展到了对视频的处理上,解决了基

于视频的油画动画效果的帧间连贯性问题^[12]。此外, Hertzmann 在文献^[13]中提出了一种基于样本图像的艺术风格学习及转换方法, 把纹理合成技术推广到更一般的情况。该方法在类比的初始阶段设置参数, 决定目标图像需要学习什么样的特性, 然后利用学习的结果合成需要的纹理, 从而使新的输入图像具有与原画风格相近的特征。类比的内容可以是像素的学习, 也可以是纹理样本中 RGB 值的学习, 或者是亮度的学习等。该方法效果及通用性虽好, 但对一副输入图像进行 NPR 处理仍需要数小时的时间。

然而, 以上各种技术对于具有流体线条感和漩涡感的油画, 很难模拟出近似的艺术效果。为此, 文献^[14]在前面算法的基础上提出了一种自动的、基于流体模拟的方法来生成具有梵高后期风格的油画图像。对于输入的 2D 图像, 该方法对流体线条进行提取, 并通过在原图进行模糊和噪声处理得到流体参考图, 然后以源图像和流体参考图为依据, 以流体线条参考图颜色梯度的法线方向作为画笔方向, 对原图进行多层绘制, 同时采用一种多光源局部光照模型来有效地反映不同光照条件下艺术图像的不同表现力。此外, 还设计了一种在光照条件下模拟画笔物理特征的方法, 通过 Bump-mapping 增强模拟油画的涂料层叠感; 最后通过颜色转换将特定的艺术原画色彩特征转换到绘制图像上, 生成具有梵高后期风格的油画作品。该方法改进了传统光照模型对绘制图像的渲染, 同时设计了一种快速简单的涂料层叠方法使模拟效果更加逼真, 此外颜色转换方法也使绘制图像的色彩更加趋近于原图。

3.2 水彩画的模拟

水彩画的绘制是非真实感绘制领域的一个重要分支。由于在水彩画绘制以及颜料和水的扩散、变干等过程中通常会伴随着一些自然的相互作用, 比如, 会导致柔和、透明、发光等多方面的复杂随机变化, 因此, 水彩画的模拟也是一项较为复杂的过程。

最早提出水彩画模拟方法的是 1991 年 Small 的细胞自动机 (Cellular Automata) 理论^[15], 用来模拟颜料与水的交互作用, 获得了较为逼真的水彩画模拟效果。Curtis 在 Small 工作的基础上提出了一个经典的水彩画建模系统^[16], 该系统通过使用三层模型, 即浅水层模型、颜料沉积层模型和毛细作用层模型来模拟流体的流动和颜料的扩散。系统既可以交互, 也可以自动地进行水彩风格画的绘制, 同时它也提供了一种典型的非真实感 3D 渲染模型。系统包括两个主要的模型: 一是原料模型, 它包括 4 个部分, 分别为: 绘画纸、固体颜料 (即画笔)、粘合剂和活性剂, 其中的粘合剂能够使颜料附着在绘画纸上; 活性剂能够使颜料被纸张纤维所吸收, 这 4 个部分均由用户根据所需要的效果交互式地予以控制; 二是水彩画特殊效果模型, 该模型是建立在真实水彩画创作过程中可能出现的各种特殊艺术效果的模拟基础上, 对于水彩画的最终绘画效果有着重要的作用。比较典型的水彩画绘制模式包括以下两种: 一种是湿润的画笔在干燥的画纸上绘画 (wet-on-dry), 另一种是湿润的画笔在湿润的画纸上绘画 (wet-in-wet), 通过采用不同的绘制技术, 可以得到如下一些特定的绘画效果: ①干笔效果。绘画时笔刷几乎是干的, 笔刷以适当的角度落到画纸上, 会扩大纸张的粗糙区域, 提笔时则会留下不规则的间隙和参差不齐的边界 (参见图 2a)。②边界暗化效

果。使用湿笔在干燥的画纸上绘画时, 纸张的胶料和表面张力不会使笔画扩散, 然而, 在颜色逐渐干燥的过程中, 颜料会从着色区域向着色边界处转移, 这样就会造成一个暗色的边界效果。该效果是水彩画艺术家和绘画厂商们都十分关注的一个水彩画绘制模式 (参见图 2b)。③颜料反转效果。在绘画时, 若一个区域内有一个潮湿的水洼, 则在逐渐干燥的过程中颜料会出现不均衡分布, 湿润部分的水会驱使着颜料向它流动的方向扩散, 导致一个复杂的分枝效果, 并且扩散边界处的颜料会沉积过多, 颜色变得非常暗 (参见图 2c)。④颜料颗粒分离效果。颜料颗粒在画纸的最高处或者最低处会产生一种粒状纹理。颜料颗粒随着颜料的干而不同, 当画纸非常湿的时候颗粒会与画纸结得比较坚固。当浓的颜料比浅的颜料先稳定的时候颜色就会出现分裂 (参见图 2d)。⑤颜料扩散效果。使用湿润的画笔在湿润的画纸上绘画时, 湿润的画纸允许笔画自由扩散, 从而形成一种柔软的带有羽毛的形状, 并且伴随着水流动的方向还会出现一些精致的条纹 (参见图 2e)。

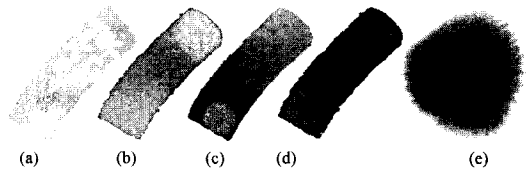


图 2 水彩画特殊效果模型

上述水彩画的绘制过程, 一般可以取得接近于真正水彩画的效果, 但它通常以较大的计算量为代价。Van Laerhoven 等在文献^[17]中提出了交互式模拟水彩画的绘制过程, 该过程也由 3 层模型组成, 通过由用户提供的一系列笔刷, 交互式地模拟水彩画。此外, Lum 和 Ma 提出了一种基于纹理的水彩画方法^[18], 该方法通过基于绘制管线的光线跟踪方法, 利用线性卷积积分创建可编程纹理来模拟水彩画的效果。利用该方法可以绘制出 3D 场景的水彩画效果, 但很难实现实时绘制; Burgess 在文献^[19]中给出了一个相似的绘制系统, 不同的是系统通过使用 Wyvill 噪声来产生笔刷。Lei 和 Chang 提出了基于简单的空间过滤来模拟水彩画效果的绘制系统^[20], 例如通过使用 Sobel 滤波器产生边缘暗化化的效果。该系统主要包括颜色带的指定和水彩着色两阶段, 其中颜色带的指定通过用户为场景中的每个物体指定一个颜色带, 来模拟颜料流动和颜料反转等效果; 在水彩着色阶段用来模拟边缘暗化化效果、颜料颗粒分离效果、纸张纹理效果和进一步的颜料流动效果等。

近年来, 新出现了一种基于图像处理的水彩画绘制算法^[21], 算法利用图像的分割、滤波与合成等技术, 结合湿润画笔在湿润画纸和干燥画纸上的绘画技术, 通过合成多个半透明的水彩层来模拟水彩画效果, 取得了很好的效果。该方法不同于物理的模拟方法, 具有绘制简单的特点, 但该方法很难模拟实际水彩画由于颜料的扩散所产生的自然纹理效果。

基于模型的绘制方法在非真实感绘制中具有重要的地位, 绘画者可以根据自己的需要定义具有各种性质的绘元模型, 采用以绘元为单位的绘制模式避免了对点、线等繁冗的计算和操作, 从而大大提高了绘制效率; 此外, 就绘元模型的定义以及绘制方法的选择而言, 也可以很大程度上体现绘画者的创作风格, 模拟一些特殊的艺术效果。采用该种绘制模式

的重点和难点是如何针对所模拟的图画进行绘元模型的建立与控制,它会直接影响绘画的效果与效率。

3.3 铅笔画的模拟

目前非真实感铅笔画的模拟技术主要包括基于图像空间和3D观察空间两种类型。基于图像空间的铅笔画模拟技术通过对二维图像进行相应的特殊图像处理,获得具有铅笔画效果的绘画作品。Nan Li和Zhong Huang在文献中提出了一种基于真实铅笔画创作思想的二维图像铅笔画绘制方法^[22]。由于作家在进行绘画时通常会将整个场景分成若干区域进行考虑,该方法首先采用基于颜色的图像分割方法,将每个区域作为一个特征区域提取其边界,并通过图像矩函数和纹理分析来获得特征几何属性,在此基础上将源图像生成白噪声图像,利用获得的特征几何属性来生成向量域,最后通过使用线性卷积方法获得最后的渲染效果。在上述过程中,对于改变客体的形状和纹理来说,笔画的方向是非常重要的,笔画方向的控制是通过特征域属性来实现的,如果纹理表现为一种方向特征,那么笔画的定位应该与源图像的纹理方向相匹配。李龙生等人也提出了一种基于图像的铅笔画生成算法^[23],该算法首先通过对输入的2D图像进行“霓虹”处理和反相处理来获得铅笔画的轮廓线,然后通过颜色缩放处理(即对图像的颜色分量进行等比例缩放)、白噪声图像获取、图像分割、局部纹理方向的确定和线性卷积处理等过程来获取铅笔画的纹理,从而突出了铅笔画表达的重点区域。该方法在模拟更加丰富的明暗色调方面仍有待于进一步提高。此外,他们也提出了一种分层的铅笔画生成方法,即一种根据真实2D图像自动生成相应的非真实感铅笔画的新方法。首先将彩色图像进行Unsharp Mask(USM)锐化处理,再进行色彩缩放运算,得到具有一定半径的图像的边缘细节。然后,为了更好地产生铅笔画的光线效果及其局部走势纹理,采用线积分卷积(LIC)的方法生成类似的效果,并且用适当的图像分割方法来获取有意义的区域进行LIC处理。最后,把前面得到的边缘细节和LIC处理的结果分为两层进行叠底和透明处理就能得到较好的铅笔画效果,该方法具有较快的计算速度^[24]。

对于基于3D观察空间的模拟技术,Sousa M. C.和Buchanan J. W通过对铅笔画过程的真实模拟,提出了一种基于模型3D的铅笔画绘制方法^[25]。该方法对绘画过程的模拟分为4个步骤:绘画材料的模拟、绘画色调与纹理的模拟、基本绘画方法的模拟和绘画步骤控制的实现,其中对绘画材料的模拟通过一种铅笔画纸模型来实现,该模型包括4个主要部分:第一,对铅笔的硬度进行分类,即将铅笔的硬度分为19个级别;第二,定义铅笔点触,即一个多边形和点触表面的压力分布率,用以局部地度量铅笔被使用的压力;第三,定义画纸纹理,根据Curtis在文献^[16]中提出的具有高度 $h(0 \leq h \leq 1)$ 的纸面模型,在其内部定义纹理;第四,铅笔与纸张的交互,铅笔芯材料通过摩擦被遗留在画纸上,遗留的数量取决于铅笔尖的形状、使用铅笔时的压力和铅笔的硬度;在绘画色调与纹理的模拟方面,将铅笔和画纸模型进行交互来实现不同的色调。此外,将笔画定义为不同的笔势走向和组合成形态各异的交叉方式及擦除操作,通过笔画实现各种纹理的绘制。然后在已经建立好的3D模型上,利用铅笔画引擎来操作铅笔画的基本绘制方式,并在模型的基础上生成阴影及明

暗效果。该系统从结构上可以分为低层(画纸的模拟)、中层(纹理、笔势、轮廓线及高光和阴影的绘制)和高层(色调整合)3种模式,通过以上步骤来分层仿真艺术家的绘制过程,每个过程通过配置铅笔参数和绘制方法予以实现。

此外,Saeko Takagi等人充分利用被绘制的三维客体到屏幕可视的空间距离偏移量及客体上的完整封闭曲线,提出了一种基于体绘制的彩色铅笔画(CPD)系统^[26],该系统包括3个子模型,即三维形体的空间特性模型、纸张模拟模型和颜料在纸张上的分配、再分配模型,其中纸张模拟模型考虑了纸张的纹理特性和材料,以及纸张的厚度,笔画绘制之后颜色的晕染和表现深度都要依赖于纸张的物理特性;颜料分配模型则根据现实中彩色笔画绘制的特点定义颜色的渲染效果,其中颜料分配系统可以按照目光所触及的物体表面的空间距离差来分配颜料,同时利用一种3D线状卷积可以在纸张上达到色彩扩散和色彩消隐效果,色彩的扩散模型同时考虑了颜料在纸张模型上扩展的广度和深度。对于色彩的消隐效果,使用的是创立柔和风格色彩。该系统能够描绘出铅笔画的柔和、粗糙和薄雾的效果,并且考虑了被绘制的三维客体的空间特性,能够很好地表现三维客体在平面图上的立体效果。

3.4 毛笔字和水墨画的模拟

1986年,Strassmann最早提出了一种一维毛笔模型^[27],该模型将画笔在绘制过程中所涉及的对象归结为4个要素,即笔刷(Brush)、笔画(Stroke)、蘸墨(Dip)和纸张(Paper),并建立一个模型库,通过对库中不同要素的选择使所绘制的笔画呈现出各种类型的纹理。这个模块化的系统可以实现各种随机的墨水模型和颜色改变。文献^[28]提出了一个多维的扩散模型,实现了墨水在纸张上的扩散,该模型可以出色地实现与真实图片几乎相同的墨水强度分布。文献^[29]提出了一种基于水和墨水特征的简单行为模型—2D点格自动计算模型,该模型可以模拟出水墨画效果的3D树木。Jintae Lee则给出了一种新的墨水扩散和纸张模型^[30],通过定义一种新型柔软的笔触来模拟真实的毛笔,并使其在受外力作用时产生形变,同时提供了两种笔触绘制轨迹:一是对毛笔内每一根笔毛在纸面上都定义一个简单的运动轨迹,二是定义了每一笔画的边界和笔画周围的平滑区域,用户可以根据需要对二者进行选择,以实现不同的墨水扩散效果。此外,作者又在纸张模型上定义了无规则分布纤维和有规则网状纤维以模拟真实的纸张纹理,这样能够更逼真地模拟毛笔在真实纸张上晕染的效果,而且通过定义这种网状纤维的纸张模型,墨水的扩散轨迹更加有迹可循,便于用户进行控制。Der-Lor Way实现的系统可以很好地模拟中国水墨画中的岩石纹理^[31],该系统首先勾勒出山体的大体轮廓,并用不同密度的网格来覆盖山体,再通过毛笔和纸面的距离和角度来控制笔刷在纸面上的形状,利用墨水量缩减、墨水浸透、笔毛材质、干燥笔画、润湿效果、不同笔画之间的墨水混合这些详细参数来模拟毛笔的绘制效果。考虑到中式山水画固有的特点,作者还增加了纤细笔毛的绘制模式,按照定义好的特有的岩石纹理线条,可以画出效果很好的水墨画风格的岩石效果。

近年来,我国学者对毛笔字和水墨画非真实感绘制进行了积极的研究,取得了很好的研究结果。徐颂华等人提出了一种基于虚拟毛笔模型的2D书画绘制交互式系统^[32],模拟了毛笔在书写、绘画过程中自身的变形以及在这一过程中毛

笔内部墨水的扩散,很好地模拟了多灰度、飞白、渗透等艺术效果。该系统通过定义“基元”(参见图3,一个基元代表一束毛笔)的控制参数,即顶部控制圆、中部控制椭圆、中轴控制曲线和尖端控制直线等来实现模型的建立。在系统的初始状态,基元的中轴曲线、中部控制椭圆和尖端控制直线分别退化为一圆、圆和点,随着绘画过程的继续,对上面的控制参数进行相应的调整来反映基元的形变;同时,随着笔头形变的加剧,当笔头的形变累积到超过某一阈值时,一个基元会分裂成若干个子基元,用此来模拟笔头出现的分叉现象。对基元分裂现象的模拟主要受笔毛的硬度和数目、当前湿润度、运动速度、纸张的平滑度和基元的历史累积形变程度等因素的综合影响。图4是部分笔头分裂的几何模型。

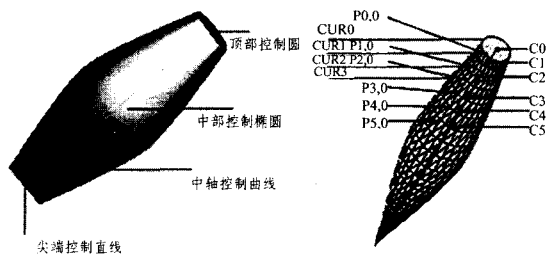


图3 基元的主要造型特征及线框结构

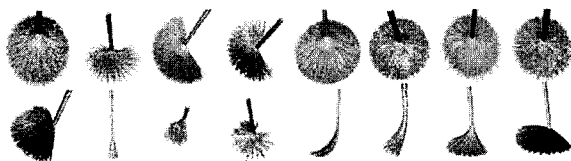


图4 具有分裂笔头的虚拟毛笔的几何模型

张海江等人分析了中国水墨画各组成要素的材料特性及相互作用关系,总结出水墨画的笔法、墨法特征^[33];齐亚峰和石永鑫等模拟了水墨画的基本扩散效果^[34,35],并提出应用粒子系统模拟水墨画的动态扩散过程;张海江针对水墨在宣纸上扩散后会出现较明显的具有自相似特性的轮廓线这一特点,提出应用分形模拟不规则扩散轮廓^[36];李丹在文献^[37]中建立了2D画笔模型,通过对毛笔行为的仿真模拟,能够实时、交互地生成水墨画的中锋、侧锋以及焦、浓、重、淡、清的墨色效果;白海飞等人提出纹理映射法来仿真“干笔飞白”效果^[38]。此外,文献^[39,40]分别提出了基于“L形邻域匹配搜索算法”的图像类比及纹理合成技术,实现了对山水画的模拟。

3.5 钢笔画的模拟

传统的钢笔画起源于欧洲的中世纪,它利用钢笔作为绘画工具,通过点、线及其组合将场景的纹理、色调等完全融入作品里,具有工具简单、表现力强等特点。钢笔画的插图被广泛应用于教科书、技术手册以及许多其他形式的印刷体中。通过计算机模拟钢笔画是上世纪90年代的事情,华盛顿大学的一个研究组在94年最早对钢笔画的模拟进行了研究,从传统的钢笔画插图中总结出钢笔画绘制的原理,给出了用电脑生成钢笔画的总体构想,并讨论了以2D灰度图像为出发点交互绘制钢笔画插图的方法,同时对单笔画的表现、编辑和绘制等问题进行了研究。

Winkenbach 和 Salesin 从三维空间的角度出发,设计了

一个钢笔画绘制系统^[41],首次引入了“笔画纹理”概念,强调通过笔画的“组合”来表现所绘制的色调和纹理,而不是特别关注单个笔画在绘制中的作用,这也是钢笔画不同于其他艺术形式的一个鲜明特点。笔画纹理就是一个可用来表示色调和纹理的笔画的集合,其中笔画是通过沿着一条直线路径移动笔尖形成的,并通过波浪函数对路径进行扰动,以及利用压力函数来改变施加在笔尖上的压力,给每个笔画增加个性特征。此外,系统还将一系列关联了优先级的笔画定义为笔画纹理的优先级,在绘制中优先绘制具有高优先级的笔画,并根据绘制色调的深浅等需求逐级添加不同优先级的笔画,从而满足了由于绘制图片大小的变化以及不同分辨率显示或输出设备对绘制的不同需求。进一步,在文献^[42]中作者扩展了文献^[41]中系统的输入模型,即除了接受平面多边形模型外,还可以接受由参数确定的任意形状曲面模型,并可同时对绘制的纹理和色调进行控制,通过要绘制的笔画之间的间距,来确定笔画的粗细和长度,实现了对绘制色调的控制,解决了当笔画间距离靠近时所产生的绘制图像变暗的绘制问题。此外,Salisbury 等人在文献^[43]中提出一种基于图像笔画纹理的2D钢笔画插图系统,系统除了强调联合笔画对绘制色调和纹理的作用外,还支持笔画所能达到的更高层次的纹理、色调和形状等的积累效果。进一步,作者又提出一种基于“可定向纹理”的钢笔画绘制系统^[44],系统提供了一个钢笔纹理样本集,绘制过程中用户可根据灰度图像各区域的情况确定笔画纹理类型和方向场,系统从纹理样本集中选择纹理进行绘制。

在非真实感绘制过程中,不同的绘制风格通常取决于笔画的类型,比如,油画是以颜料画刷痕迹为基本绘制单位,铅笔画则是以线条作为基本绘制形式等,而钢笔画则强调由多个笔画的组合来描述和表达绘画的色调和纹理,这种多属性笔画的组合绘制模式,为其它艺术效果的非真实感绘制同样具有很好的借鉴作用。

3.6 其他艺术形式的模拟

除了前面介绍的模拟油画、水彩画、铅笔画和钢笔画等非真实感绘制技术外,人们也在尝试着研究模拟其它艺术形式作品的非真实绘制技术,特别是国内的一些学者在这方面进行了很好的尝试,比如于金辉等在文献^[45]中提出了一个三维计算机水粉笔笔刷模型,该模型通过采用确定性分量和随机性分量联合控制各局部参量的方法,成功地模拟出冬天松树林前空地上雪人的水粉画效果;蒋凌琳、彭冬梅等对中国剪纸技术的非真实感生成技术也进行了很好的研究^[46,47]。但总体而言,这方面的研究还不是很多,很多技术还有待进一步发展。

4 非真实感绘制中的特殊绘制模型

非真实感绘制是以追求艺术的表现力为目的的,因此除了传统的图形学技术以及图像处理技术可以用于该领域外,为了实现和模拟一些特殊的艺术效果,满足实际绘制速度和复杂度的要求,一些相关的其它工具和方法也被用于其中。下面就一些常用的特殊绘制模型进行讨论。

4.1 流体绘制模拟

对于模拟包含像风、云、雨、漩涡等具体流体特征客体的场景,单纯使用传统的方法很难达到满意的效果,此时,基于物理的一些方法通常被采用,比如文献[14]通过定义基于物理的流体线条作为画笔,以输入的原图作为参考,采用特殊的光照模型进行多层绘制,从而很好地模拟了具有梵高艺术风格的油画;文献[48]为了模拟流体艺术风格的波动感,提出了一种基于图像的具有流体风格的油画自适应绘制方法,该方法对源图像亮度分量的切矢量场进行增强、平滑处理以获得连续、平滑的结构矢量场,进一步利用该矢量场来控制整个 LIC 绘制过程中画笔的走向;同时为了模拟流体的随意性,对源图像增加了一定的随机扰动来产生纹理参考图像,使得绘制方向不是一味地按照结构矢量场进行,能够使整个画面的颜色呈现出跳跃、变化的效果;此外,在整个绘制过程中,根据图像的局部特征可自适应地产生 LIC 积分的步长和步数,使绘制效果的粗糙感和细腻感得到不同程度的体现,从而可模拟出色彩丰富的油画绘制效果。

4.2 智能绘制模型

智能绘制模型主要是仿效人或其它生物的行为来提炼绘制方法,比较著名的“蚁群”算法^[49]是一种采用基于分布均匀度的非真实感智能绘制方法,其中蚁群被定义为具有信息素、印迹、有限生命周期等属性和记忆、单步行走、绘制印迹、跳跃、死亡等行为方式的智能体,通过不断更新信息素来指导蚂蚁选择最优的绘制路径,并调整单步行走、绘制印迹、跳跃等行为方式,使所有“蚂蚁”在路径上留下印痕进而获得非真实感绘制效果。文献[50]提出了一种非真实感绘制的多智能方法,首先通过分析画家的创作特点,把绘制过程分解为多个阶段,然后引入多绘制智能体,把每个阶段分配给一类绘制智能体来完成,各类绘制智能体作为独立的行为者,能够通过自身的感知能力获取环境局部激励信息,自适应地规划行为,完成各自的绘制任务。文献[51]仿照人在绘制油画时对场景中整体明暗色调的把握,提出了一种以小平面片作为“提取器”的明暗色调提取方法,该方法假设场景中客体表面均匀地覆盖了一层大小相同的正方形“小平面”,通过计算这些小平面被遮挡的明暗信息和近似的镜面反射信息等来确定小平面所在位置的色调信息,在绘制过程中利用这些色调信息在相应位置上绘制相应的“笔触”,从而保证了所生成油画场景整体色调的合理性。该方法对于其它非真实感绘画形式场景中明暗色调的获取同样据有借鉴作用。

4.3 多分辨率绘制模型

基于多分辨率绘制是指根据实际需要,通过参数的不同选择来控制绘制的抽象程度,进而控制绘制的复杂度。文献[11,52]采用金字塔结构组织多幅不同分辨率的参考图像,其中第 $k+1$ 层图像的像素 $I_{k+1}(i,j)$ 由第 k 层的 4 个相连像素的算术平均值得到,然后定义具有长度、颜色和形状等参数的画笔,其中画笔颜色由画笔起点对应的参考图像中的颜色决定;画笔的骨架点(是指画笔按照 8 个不同的方向形成的轨迹)决定了画笔的形状和方向,而后按照分辨率由低到高的顺序逐层绘制,每层绘制需要一个与当前参考图像大小一致的画布,因此绘制过程中需要逐层转换画布,使之与当前参考图像分辨率一致,算法中把当前画布的一个颜色值对应为下层

画布中 4 个像素的颜色值来实现画布的转换。该模型具有绘制复杂度可控、实现方便灵活的特点。

4.4 硬件 GPU(Graphics Processing Unit)绘制模型

可编程图形硬件强大的并行处理能力以及可灵活定制的渲染流水线为非真实感渲染实时算法的研究和实现提供了新的途径。近几年基于 GPU 非真实感渲染的研究成为一个热点问题。Praun 等构建出一组具有钢笔画效果的二维 TAM (Tonal Art Map)^[53],它利用 GPU 计算 3D 模型上某点的光照值,以此选取 TAM 中的相应纹理并进行混合以生成 3D 钢笔画效果。文献[54]用 GPU 实现了 3D 动画角色水墨效果的实时绘制系统,系统充分利用了 GPU 的高绘制速率以及灵活的可编程流水线,将绘制划分为若干个过程进行,最后再将这些结果进行混合而得到具有水墨效果的角色形象。文献[55]利用 GPU 实现了实时水墨画效果的绘制系统,系统中提供了不同的物体渲染模块,用户可以根据自己的需要选择相关的模块进行实时绘制,交互式地采用位移、旋转以及镜头推拉等即可获得 3D 场景水墨画效果的画面。此外,系统也允许用户定义相继路径,按照设定的路径实时绘制和输出动画视频序列。

4.5 笔画绘制模型

基于笔触或圆点等离散元素来自动生成非真实感图形的方法通常被称为基于笔画的绘制方法(SBR)^[56]。笔画绘制模型主要用于生成油画、钢笔画、瓦片马赛克、点画法、张量域可视化、锯齿图像马赛克等非真实感艺术效果。基于 SBR 模型的算法通常采用优化策略和贪婪策略来实现。在进行 SBR 绘制之前,先要通过参数控制确定笔画的位置和外观,然后可在一个画板上将其进行组合,画板参数包括颜色或纹理的画布以及设置好的笔画排列表,创建图像的过程就是在画板上按顺序绘制笔画的过程。

基于笔画绘制模型的绘制方法的研究起步较晚,目前大部分 SBR 算法还仅能处理相对简单的艺术风格作品,如简单的印象派绘制等,作为一个重要的研究方向,基于 SBR 模型的绘制技术还有很多问题有待进一步研究,比如在交互式应用中如何提高算法的计算速度等。

4.6 LS(the Lit Sphere)模型

Peter-Pike 等人在文献[57]中提出了一种 LS 模型,该模型可从 2D 图像中提取阴影光照模型,进一步将阴影投射到复杂的 3D 几何体上,可获得具有阴影艺术效果的非真实感绘制作品。该模型的提出是基于下面的思想^[58]:当一个画家绘制一个客体时,为了获得合理的阴影效果,通常首先在一个圆球上对阴影进行判断和测试,然后以该“阴影球”为参考,对绘制的三维客体进行阴影处理。图 5 给出了画家以铅笔画绘制人体时参考阴影球确定人体阴影效果的情况^[58]。基于该思想,LS 模型假设一幅 2D 图像中的客体表面是由局部球状面片组成的,这些球面片拥有基本正确的向量分布,利用球面片的向量分布,将具有阴影效果的面片投射到 Lit Sphere 上,获得近似的模拟阴影效果的光照模型。LS 模型能够很容易地结合到已有的着色器中,使场景中客体表面的光亮度 and 材质的绘制更加合理、快捷。

目前,该模型能用于静态场景的绘制中,对于像动画等动

态的多帧场景的绘制,还有很多问题有待进一步研究。



图5 画家绘制人头铅笔画阴影时参考的“阴影球”

结束语 目前,对 NPR 技术的研究已经取得了很大的进步,其应用领域涉及到插图绘制、科学数据可视化和医疗图像绘制等。但总体而言,该项技术的研究还处于起步阶段,还有很多问题有待进一步研究,我们认为,未来非真实感绘制技术将在以下几方面得到很好的发展:

(1)非真实感绘制是对人类各种艺术作品的一种模拟,同时也是由人眼对其进行主观判断。如何获取人类对绘制场景的主观感觉信息将直接影响到最后绘制的效果,同时它也是一个难点问题,这样将人工智能领域积累的一些成果应用于非真实感绘制技术中无疑是一项十分有意义的工作。

(2)传统的手工绘制的动画风格多样,如迪斯尼风格、水墨风格以及剪纸风格的动画等。但是这些类型的动画大多是在二维平面上制作,无法生成具有准确透视关系的三维物体。在三维场景中制作 NPR 风格的动画作品,是动画产业的一个重要发展方向,这样对基于动态的多帧场景的非真实感绘制技术的研究将成为未来一个重要的研究领域。

(3)可编程的图形硬件技术为未来 NPR 的发展提供了速度上的保障,这为开发非真实感的三维游戏提供了可能。与传统的三维游戏相比,非真实感风格的游戏更加符合人们的审美情趣,更能延拓人们的想象空间,相信未来会有更好的发展。

(4)非真实感绘制的一个重要特点是能够强调客体的主要视觉特征,而忽略一些不重要的局部细节表现,这一特性对于非真实感虚拟环境^[60]的生成及其漫游具有重要意义,研究如何实现这种非真实感的“多分辨率”绘制模式也将是未来一个令人关注的研究领域。

参 考 文 献

- [1] Strothotte T, Schlechtweg S. Non-photorealistic computer graphics modeling, rendering, and animation[M]. Elsevier Science (USA), 2002
- [2] 苏延辉, 韦欢, 费广正, 等. 非真实感绘制技术研究[J]. 中国传媒大学学报:自然科学版, 2006, 13(2): 15-21
- [3] 辛玲. 模拟绘画的非真实感绘制方法研究[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2008
- [4] Lansdown J, Schofield S. Expressive rendering: a review of non-photorealistic techniques[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 1995, 15(3): 29-37
- [5] Berman D F, Bartell J T, Salesin D H. Multiresolution Painting and Compositing [A]// Proceedings of the 21st annual conference on computer graphics and interactive techniques[C]. New York: ACM Press, July 1994: 85-90
- [6] Teece D. 3D painting for non-photorealistic rendering [C]// SIGGRAPH 98 Conference Abstracts and Applications. New York: ACM Press, 1998: 248-253
- [7] Vermeulen A H, Tanner P P. Pencil Sketch-A Pencil-Based Paint System[C]// Proceedings of Graphics interface '89. San Francisco, Morgan Kaufmann, 1989: 138-143
- [8] Haeberli P E. Paint by numbers: Abstract image representations [C] // SIGGRAPH90 Conference Proceeding. ACM SIGGRAPH, Addison Wesley, 1990: 207-214
- [9] Chi Ming-Te, Lee Tong-Yee. Stylized and abstract painterly rendering system using a multiscale segmented sphere hierarchy [J]. Visualization and Computer Graphics, 2006: 61-72
- [10] Litwinowicz P. Processing images and video for an impressionist effect[C] // Proc. of the SIGGRAPH '97. New York: ACM Press, 1997: 407-414
- [11] Aaron H. Painterly rendering with curved brush strokes of multiple sizes[C]//SIGGRAPH 98 Conference Proceedings. Orlando, Florida: ACM-SIGGRAPH, 1998: 453-460
- [12] Hertzmann A, Perlin K. Painterly Rendering for Video and Interaction[C]// NPAR 2000: First International Symposium on Non-Photorealistic Animation and Rendering. Annecy, France, 2000: 7-12, 121
- [13] Hertzmann A, Jacobs C E, Oliver N, et al. Image analogies[C]// Proc. of the SIGGRAPH. 2001: 327-340
- [14] 赵杨, 徐丹. 运用流体模拟的油画生成方法[J]. 软件学报, 2006, 17(7): 1571-1579
- [15] Small D. Simulating watercolor by modeling diffusion, pigment, and paper fibers[C]// Proceedings of SPIE Conference on Image Handling and Reproduction Systems Integration. 1991, 1460: 140-146
- [16] Curtis D, Anderson S E, Seims J E, et al. Computer-Generated Watercolor[C]// Proc. SIGGRAPH '97. 1997: 421-430
- [17] van Laerhoven T, Liesenborgs J, van Reeth F. Real-time watercolor painting on a distributed paper model[C]// Proc. Computer Graphics International. Crete, Greece, 2004: 640-643
- [18] Lum E B, Ma K L. Non-photorealistic rendering using watercolor inspired textures and illumination [C] // Proc. Pacific Graphics. Tokyo, Japan, 2001: 322-330
- [19] Burgess J, Wyvill G, King S A. A system for real-time watercolor rendering[C]// Proc. Computer Graphics International. New York, US, 2005: 234-240
- [20] Lei S I E, Chang C F. Real-time rendering of watercolor effects for virtual environments [C] // Proc. IEEE Pacific-Rim Conference on Multimedia. Tokyo, Japan, 2004: 474-481
- [21] Luft T, Deussen O. Real-time watercolor for animation [J]. Proc. J Comput Sci & Tech, 2006, 21(2): 159-165
- [22] Li Nan, Huang Zhong. A feature-based pencil drawing method [C]// Computer Graphics and Interactive Techniques. Australasia and South East Asia, 2003: 135-143
- [23] 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): 112-118
- [24] 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
- [25] Sousa M C, Buchanan J W. Computer-Generated Graphite Pencil Rendering of 3D Polygonal Models[J]. Computer Graphics Forum, 1999, 18(3): 195-208
- [26] Takagi S, Fujishiro I, Nakajima M. Volumetric modeling of colored pencil drawing [C] // Pacific Graphics '99 Conference Proceedings. 1999: 250-258, 329
- [27] Strassmann S. Hairy brush [C] // Proc. of SIGGRAPH '86. Dal-

- las, USA, 1986; 225-232
- [28] Kunii T L, Nosovskij G V, Hayashi T. A diffusion model for computer animation of diffuse ink painting[C]//Proc. of Computer Animation '95. Geneva, Switzerland, 1995; 98-102
- [29] Zhang Q, Sato Y, Takahashi J, et al. Simple cellular automation-based simulation of ink behavior and its application to Suiboku-ga-like 3D rendering of trees[J]. *Journal of Visualization and Computer Animation*, 1999, 10(1): 27-37
- [30] Lee J. Diffusion rendering of black ink paintings using new paper and ink models[J]. *Computers and Graphics*, 2001, 25(2): 295-308
- [31] Way D L, Shih Z C. The synthesis of rock textures in Chinese landscape painting [C] // Proceedings of Eurographics '2001. Manchester, 2001; 123-131
- [32] 徐颂华, 徐从富, 刘智满, 等. 面向电子书画创作的虚拟毛笔模型[J]. *中国科学[E]*, 2004, 34(12): 1359-1374
- [33] 张海江, 王秀锦, 等. 应用分形仿真水墨扩散轮廓[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2004, 16(4): 554-558
- [34] 齐亚峰, 孙济洲, 商毅. 中国水墨画的基本艺术特征及其计算机仿真实现[J]. *中国图象图形学报*, 2003, 8(5): 562-566
- [35] 石永鑫, 孙济洲, 张海江, 等. 基于粒子系统的中国水墨画仿真算法[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2003, 15(6): 667-672
- [36] 张海江, 王秀锦, 等. 应用分形仿真水墨扩散轮廓[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2004, 16(4): 554-558
- [37] 李丹, 孙美君, 孙济洲. 水墨画仿真中画笔的行为实现[J]. *中国图象图形学报*, 2004, 9(02): 184-189
- [38] 白海飞, 齐亚峰, 孙济洲. 基于纹理映射的非真实感“干笔飞白”效果的仿真生成[J]. *天津大学学报*, 2003, 38(1): 74-79
- [39] Wang Xiujin, Sun Jizhou. Simulating For Chinese Painting Based on Image Analogies[C]//Proceedings of the SPIE. 2004, 5444: 157-161
- [40] 孙美君, 李丹, 孙济洲. 基于纹理合成的中国山水画系统仿真[J]. *系统仿真学报*, 2004, 16(10): 2317-2320
- [41] Winkenbach G, Salesin D H. Computer-generated pen-and-ink illustration[C]//Proc. of SIGGRAPH '94. 1994; 91-100
- [42] Winkenbach G, Salesin D H. Rendering parametric surfaces in pen-and-ink [C] // SIGGRAPH '96 Conference Proceedings, 1996; 469-476
- [43] Salisbury M P, Anderson S E, Barzel R, et al. Interactive pen-and-ink illustration [C] // ACM SIGGRAPH '94 Conference Proceedings, 1994; 101-108
- [44] Salisbury M, Wong M T, Hughes J F, et al. Orientable textures for image-based pen-and-ink illustration [C] // Proceedings of ACM SIGGRAPH 97. Los Angeles, New York, 1997; 401-406
- [45] 于金辉, 徐晓刚, 彭群生. 一个三维计算机水粉笔刷模型[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2000, 12(9): 664-667
- [46] 张显全, 于金辉, 蒋凌琳, 等. 计算机辅助生成剪纸形象[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2005, 17(6): 1378-1382
- [47] 彭冬梅. 面向剪纸艺术的非物质文化遗产数字化保护技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008
- [48] 钱小燕, 肖亮, 吴慧中. 一种流体艺术风格的自适应 LIC 绘制方法[J]. *计算机研究与发展*, 2007, 44(9): 1588-1594
- [49] 钱小燕, 肖亮, 吴慧中. 一种基于分布均匀度的非真实感蚁群绘制方法[J]. *中国图象图形学学报*, 2006, 11(12): 1792-1798
- [50] 钱小燕, 肖亮, 吴慧中. 一种非真实感绘制的多智能体仿真方法[J]. *系统仿真学报*, 2006, 18(10): 2836-2839
- [51] 辛玲, 王相海. 非真实感油画绘制的色调获取方法研究[J]. *计算机科学*, 2008, 35(12): 216-219
- [52] 钱小燕, 肖亮, 吴慧中. 基于多分辨率的非真实感绘制[J]. *南京理工大学学报*, 2006, 30(3): 348-351
- [53] Praun E, Hoppe H, Webb M, et al. Real-time hatching [C] // Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series. ACM SIGGRAPH, Los Angeles, California, 2001; 581-586
- [54] 方建文, 于金辉, 姚琨, 等. 利用 GPU 对 3D 角色模型绘制水墨效果[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2007, 19(4): 9-12
- [55] 陈为, 张海嵩, 于金辉. 基于图形硬件加速的国画场景绘制[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2005, 17(11): 47-52
- [56] Hertzmann A. Survey of Stroke-Based Rendering [J]. *IEEE Computer Graphics & Applications, Special Issue on Non-Photorealistic Rendering*, 2003, 23(4): 70-81
- [57] Sloan P P, Martin W, Gooch A, et al. The lit sphere: A model for capturing NPR shading from art [C] // Graphics Interface. 2001; 143-150
- [58] Jacobs T S. Light for the Artist [M]. Watson Guptill Publications, 1988
- [59] Laning E. The Act of Drawing [M]. McGraw-Hill, New York, 1971
- [60] Klein A W, Li W, MKazhdanete M. Non Photorealistic virtual environments [C] // Proceedings of the 27th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. 2002; 527-534
- (上接第 19 页)
- [82] Su Yu-Shen, Huang Chin-Yu. Neural-network-based approaches for software reliability estimation using dynamic weighted combinational models[J]. *Journal of Systems and Software*, 2007, 80(4): 606-615
- [83] Cai K Y, Cai L, Wang W D. On the neural network approach in software reliability modeling[J]. *Journal of Systems and Software*, 2001, 58(1): 47-62
- [84] Aljadhali S H, Sheta A, Rine D. Prediction of software reliability: A comparison between regression and neural network non-parametric models[C]//Proc. ACM/IEEE Int. Conf. Computer Systems and Applications. Beirut, Lebanon, 2001; 470-473
- [85] Aljadhali S H, Sheta A, Rine D. Predicting accumulated faults in software testing process using radial basis function network models[C]//Proc. ISCA 17th Int. Conf. Computers and Their Applications. San Francisco, 2002; 26-29
- [86] Ho S L, Xie M, Goh T N. A study of the connectionist models for software reliability prediction[J]. *Computers and Mathematics with Applications*, 2003, 46(7): 1037-1045
- [87] Sitte R. Comparison of software-reliability-growth predictions; Neural networks vs parametric-recalibration[J]. *IEEE Trans. Reliability*, 1999, 48(3): 285-291
- [88] Tian L, Noore A. Software reliability prediction using recurrent neural network with Bayesian regularization[J]. *Int. J. Neural Systems*, 2004, 14(3): 165-174
- [89] Tian L, Noore A. Evolutionary neural network modeling for software cumulative failure time prediction[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2005, 87(1): 45-51
- [90] Vapnik V. The Nature of Statistical Learning Theory [M]. New York: Springer Verlag, 1995
- [91] Tian L, Noore A. Dynamic Software Reliability Prediction: An Approach Based on Support Vector Machines[J]. *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering*, 2005, 12(4): 309-321
- [92] Yang B, Li X. A Study on Software Reliability Prediction Based on Support Vector Machines [C] // IEEE Internal Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, 2007; 1176-1180