

中国图形学进展(2012)

——第十七届全国计算机辅助设计
与图形学学术会议(CAD/CG' 2012)
暨第九届全国智能CAD与数字娱乐学术会议
(CIDE' 2012)论文集

鲍虎军 李兆敏 李华 庄越挺 段友祥 冯结青 吴飞 李宗民 刘玉杰 主编



清华大学出版社

中国图形学进展(2012)

——第十七届全国计算机辅助设计
与图形学学术会议(CAD/CG' 2012)
暨第九届全国智能CAD与数字娱乐学术会议
(CIDE' 2012)论文集

鲍虎军 李兆敏 李华 庄越挺 段友祥 冯结青 吴飞 李宗民 刘玉杰 主编

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书是第十七届全国计算机辅助设计与图形学学术会议 (CAD/CG'2012) 暨第九届全国智能 CAD 与数字娱乐学术会议 (CIDE'2012) 论文集, 共收录了 146 篇论文, 分为图形学、CAD/CAM/CAE、几何造型与处理、EDA 及 VLSI 设计与测试和其他专题, 内容涵盖了计算机辅助设计与图形学领域的诸多前沿领域。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签, 无标签者不得销售。

版权所有, 侵权必究。侵权举报电话: 010-62782989 13701121933

图书在版编目 (CIP) 数据

中国图形学进展 (2012): 第十七届全国计算机辅助设计与图形学学术会议 (CAD/CG'2012) 暨第九届全国智能 CAD 与数字娱乐学术会议 (CIDE'2012) 论文集 / 鲍虎军等主编. —北京: 清华大学出版社, 2012.7
ISBN 978-7-302-29331-6

I. ①中… II. ①鲍… III. ①计算机图形学—文集 IV. ①TP391.41-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 146803 号

责任编辑: 焦 虹

封面设计: 常雪影

责任校对: 白 蕾

责任印制: 宋 林

出版发行: 清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址: 北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编: 100084

社 总 机: 010-62770175 邮 购: 010-62786544

投稿与读者服务: 010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈: 010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 刷 者: 清华大学印刷厂

装 订 者: 北京市密云县京文制本装订厂

经 销: 全国新华书店

开 本: 210mm×297mm 印 张: 39.25 字 数: 1440 千字

版 次: 2012 年 7 月第 1 版 印 次: 2012 年 7 月第 1 次印刷

印 数: 1~620

定 价: 186.00 元

产品编号: 048786-01

大会组织机构

大会指导委员会：（按拼音排序）

董士海 刘慎权 林宗楷 潘云鹤 彭群生 齐东旭 曲庆彪 石教英 孙家广 唐荣锡 唐泽圣 汪嘉业 王仁宏 王守觉 吴恩华

大会主席：

山红红 鲍虎军

大会副主席：

李兆敏 戴国忠

CAD/CG' 2012 程序委员会主席：

李 华 庄越挺 段友祥

CAD/CG' 2012 程序委员会副主席：

边计年 胡事民 刘晓平 李晓维 孟祥旭 孙林夫 汪国平 查红彬

CAD/CG' 2012 程序委员会委员：

鲍虎军	陈 为	葛 红	黄正东	李实英	刘晓平	潘振宽	孙汉秋	田 凌	王习仁	夏时洪	杨海成	张丽艳
边计年	陈小安	宫云战	黄智勇	李思昆	刘新国	潘志庚	孙济洲	童 欣	王相海	向世明	姚志强	张树生
蔡利栋	陈正鸣	顾 宁	纪庆革	李晓维	刘学慧	彭进业	孙家广	屠长河	王延江	肖春霞	叶修梓	张田文
蔡懿慈	程利新	郭 平	贾富仓	李新友	刘衍聪	彭群生	孙林夫	万华根	王毅刚	肖立伊	殷国富	张严辞
操晓春	崔 丽	郭 阳	贾云得	李振波	刘永进	彭新光	孙守迁	汪国平	王兆其	徐 丹	雍俊海	赵瑞莲
查红彬	戴国忠	郭延文	金小刚	李自力	刘勇奎	齐东旭	孙 伟	汪国昭	吴 威	徐国良	于金辉	郑复华
车翔玖	邓建松	韩俊刚	孔令富	李宗民	刘玉杰	钱小平	孙卫东	汪嘉业	吴百锋	徐 琳	于俊清	郑永果
陈宝权	刁麓弘	韩银和	雷 毅	林 泮	吕 涛	秦 洪	孙晓鹏	王长波	吴恩华	徐 宁	喻文健	周秉锋
陈发来	范秀敏	何 涛	李冬果	林守勋	骆祖莹	全春来	孙延奎	王国瑾	吴福朝	徐晓刚	袁铭辉	周明全
陈火炎	方家骐	何发智	李桂清	刘 弘	马华东	石教英	孙正兴	王美珍	吴 强	徐迎庆	袁晓如	周 强
陈家新	封举富	洪 军	李 华	刘继红	马利庄	宋俊德	谭建荣	王平安	吴为民	许华虎	曾 璇	祝永新
陈立潮	冯结青	胡事民	李华伟	刘利刚	马维银	宋瑞霞	唐卫清	王庆生	吴毅红	薛德意	战晓苏	庄越挺
陈立平	高曙明	胡占义	李锦涛	刘丽艳	孟祥旭	宋顺林	滕东兴	王文成	伍铁如	薛建儒	张彩明	邹北骥
陈 睿	高小山	黄樟钦	李 茹	刘乃琦	潘 翔	宋慰祖	田 捷	王文平	席 平	杨承磊	张贵仓	邹建成

CIDE' 2012 程序委员会主席：

庄越挺

CIDE' 2012 程序委员会副主席：

孟祥旭 马利庄 周激流

CIDE' 2012 程序委员会委员：

陈德人	耿卫东	黄心渊	李 青	潘志庚	孙守迁	王文成	吴 飞	谢 琦	于金辉	张 强	周激流
陈 禾	郭宗仁	孔繁胜	廖祥忠	庞云阶	孙晓鹏	王阳生	吴 悦	杨承磊	于俊清	张 芹	庄越挺
邓建明	何华灿	李翠华	马利庄	桑胜举	孙 宇	王兆其	吴中海	杨德运	袁贞明	赵杰煜	邹北骥
董 军	胡事民	李际军	毛启容	沈华清	孙正兴	魏世泽	夏时洪	杨四亦	詹永照	赵乃良	曾 亮
费广正	黄铁军	李 宁	孟祥旭	沈一帆	屠长河	魏迎梅	谢俊元	殷国富	张建明	赵燕伟	

组织委员会主席：

李宗民 吴 飞

组织委员会委员：

曹伟国 陈国军 宫法明 李 昕 李 坤 马竞峰 宋会英 孙 岩 王风华 王少荣 王 琳 张学辉 郑秋梅

组织委员会秘书长：

刘玉杰

前 言

由中国石油大学（华东）承办的第十七届全国计算机辅助设计与图形学学术会议（CAD/CG'2012）暨第九届全国智能 CAD 与数字娱乐学术会议（CIDE'2012）于 2012 年 7 月 19—21 日在山东青岛联合举行。大会期间，将同时举行第三届中法虚拟现实研讨会。

会议以计算机辅助设计与图形学为主题，以展示交流我国在计算机辅助设计与图形学领域的技术与发展为目的，讨论工业应用中需要解决的关键问题和难点问题，开展各种形式的学术交流和讨论。会议共分为图形学，可视化、图像与视觉处理，CAD/CAM/CAE，EDA 及 VLSI 设计与测试，几何造型与处理，计算机动画等专题，内容涵盖了计算机辅助设计与图形学领域的诸多前沿领域。本次会议反映了国内计算机辅助设计与图形学的最新研究成果，促进了学术界和工业界的密切结合。

会议邀请了国内外著名的专家学者就计算机辅助设计与图形学的最新动态和热点问题做特邀报告，他们是香港大学王文平教授、美国 University of North Carolina at Charlotte 范建平教授、法国 University Rennes2 Franck Multon 教授、香港科技大学屈华民教授、中国科学院深圳先进技术研究院陈宝权研究员、清华大学徐迎庆教授和浙江大学刘振宇教授。同时还邀请了北京大学袁晓如教授、浙江大学陈为教授、浙江大学吴飞教授、微软亚洲研究院童欣研究员、天津大学韩亚洪博士为青年教师和研究生开办了研讨班。

本次会议共收到投稿论文 316 篇，内容涉及计算机图形学、计算机辅助设计、计算机辅助几何设计、几何造型与处理、图像与视频处理、虚拟现实、计算机仿真与可视化、电子设计自动化、图像图形应用等方面；其中既有理论研究，也有应用技术研究。经专家评审，程序委员会会议决定，总共录用 146 篇论文，全文收录到由清华大学出版社出版的会议论文集中。会议已将优秀论文推荐到国内相关的重要期刊，包括《计算机辅助设计与图形学学报》、《中国科学》、《计算机学报》、《软件学报》、《中国图像图形学报》、《计算机集成制造系统》、《工程图学学报》、《计算机工程》、《计算机科学》和《系统仿真学报》。

本次大会特别设立了学生优秀论文奖，旨在奖励在学术研究上取得优秀成果的青年学生，表彰他们在学术研究上做出的贡献。随着我国计算机技术的发展和应用的普及，技术的需求日益突显。本次大会通过奖励优秀青年学者，以提升我国学术会议的学术水平，鼓励青年学者积极投身于计算机技术的发展及学术研究。

感谢向本次会议投稿的各位作者。没有他们的大力支持，本论文集的出版是不可能的。感谢大会程序委员会全体委员和参与审稿的各位专家的辛勤劳动。感谢会议组织者为本次会议的成功召开而做的长时间的准备和筹划。

本次会议的承办单位中国石油大学（华东）计算机与通信工程学院对会议做了精心的组织和周密的安排，保证了会议的顺利召开，再次表示衷心的感谢！

第十七届计算机辅助设计与图形学学术会议暨第九届全国智能 CAD 与数字娱乐学术会议

大会主席：山红红 鲍虎军

程序委员会主席：李 华 庄越挺 段友祥

目 录

图形学专题

图像抽象化的实时增强型绘制	王山东 李晓生 刘学慧 吴恩华	(2)
石纹纸染艺术图案仿真新技术	刘世光 陈 迪	(6)
一种混合的软影绘制算法	刘 浏 周 炜 李 华	(9)
基于往返时间距离的点云模型一致分割	马 腾 龙 翔 吴壮志	(14)
基于显微 CT 扫描的三维织物仿真	关防利 潘荣江	(19)
基于 OpenCL 的实时 KD-Tree 与动态场景光线跟踪	卢贺齐 鲍 鹏 冯结青	(23)
从单张图像获取三维场景材质风格	赵福恺 刘新国	(27)
基于三次 B 样条逆向细分的自由曲线的多分辨率表示	高 敏 郑红婵	(31)
书法汉字图像的动态笔画书写过程建模	张悠苗 张俊松 周昌乐	(36)
基于层状纹理方法的真实感草地动态实时模拟	郭 雪 杨 刚	(40)
基于 V-矩的图像分类算法	宋瑞霞 孙红磊 王小春 李成华 王也娜	(44)
基于有效像素索引的图像合成方法	刘华海 王 攀 李思昆 蔡 勋 王文珂 曾 亮	(47)
一种基于密度函数的自动传输函数设计方法	张 斌 周志光 林 海	(51)
求解图像分割模型的快速梯度投影算法	江成顺 崔 颖	(55)
用单幅图像生成书法碑刻及牌匾效果	张 婷 章立亮 于金辉	(60)
基于 GPGPU 大规模并行计算的一种高效 3D 热分析算法	赵国兴 杨 旭 骆祖莹	(64)
沙尘暴场景的参数化建模与实时绘制	宫立山 王章野 施肖菁 彭群生	(68)
保持特征的点云变形算法	赵 勇 彭群生	(72)
基于 LED 柱面屏的全景三维显示系统的数据生成方法	戴特长 郑文庭 夏新星	(75)
基于多尺度哈尔小波变换的三维人脸识别方法	王朝阳 达飞鹏	(79)
基于形状直径函数的三维网格模型零水印方案	杜 顺 詹永照 王新宇	(83)
一种基于 HKS 的图像形状检索方法	李宗民 匡振中	(86)
基于三角形自适应细分的有效光照烘焙方法	李 杨 周 果 李淳芑 邱显杰 王兆其	(90)
基于点云的三维物体重现	胡甘乐 陈 言 李胜男 林 晓 马利庄	(101)
镜像等距不变量的构造及其应用	胡 平 李海洋 曹伟国 李 华	(104)
云南重彩画人脸肖像生成算法	卢丽稳 普园媛 刘玉清 钱文华 徐 丹	(109)
云南绝版套刻版画的数字模拟合成技术初步研究*	李 倩 解婉誉 李玉润 普园媛 徐 丹	(114)
基于原始的点云模型的光线跟踪	蔡 鹏 尹宝才 孔德慧	(118)
新概念全方位飞行视景显示模拟系统	赖 超 乔思航 姚 敏 程志全	(122)
基于空间分布的全局光子图重建	蔡 鹏 孔德慧 尹宝才	(126)
一种新的菱形搜索算法	孙秀娟 杨德运 侯迎坤	(131)
针对建筑物图像的线条画生成算法	柳有权 吴宗胜 王山东 薛 茹 吴恩华	(135)
基于点云的球面三维逆向建模	李胜男 林 晓 陈 言 马利庄	(138)
基于自动确定特征点数的镜头分割方法	李国和 刘佃兴 臧金晓 吴卫江	(142)
小波变换结合模糊聚类在示温漆彩色图像分割中的应用	孙超男 易 芹 崔 丽	(146)
基于关系模式的三维模型存储和检索研究	王吉华 刘 弘	(149)
基于 RBF 神经网络集成的 3D 模型分类和检索方法	陈俊英 王羨慧 方亚萍	(155)
基于最大相似类别和位置熵的三维模型融合检索方法	陈俊英 孟月波 王羨慧 刘四妹	(159)
一种融合区域笔划和梯度笔划的油画生成方法	叶 鹏 王长波 朱巧明 张 康 刘玉华	(163)

可视化、图像与视频处理

基于 ICP 与 K 均值聚类的流线提取方法研究	鲁大营 朱登明 王兆其	(168)
基于 Zernike 矩的骨刻文形状分析	高新燕 潘荣江 高孝洋	(174)

深水铺管起重船作业视景仿真研究	迟 迎 韩端锋 袁利毫 黄晓雪 (177)
自然光照条件下的静态场景图像分解	林丽丽 钟 凡 张 锐 邢冠宇 彭群生 秦学英 (182)
一种考虑结构特征的自适应光线投射算法	罗月童 谭文敏 韩 娟 陈进生 (186)
基于约束模版的三维发型快速生成	韩 翼 李 康 耿国华 刘伦椿 (191)
平行流形空间光线投射高度场可视化算法	罗健欣 胡谷雨 倪桂强 (195)
LIC 中矢量场生成方法的研究及对绝版套刻版画数字模拟的探索	解婉誉 李 倩 李玉润 徐 丹 (199)
基于拷贝检测的足球视频去重	邬前虎 何云峰 于俊清 (203)
一种高效的光学相干层析视网膜体数据分割方法	樊鲁杰 孙延奎 田小林 (207)
基于运动控制的相机轨迹跟踪方法研究	陈明伟 朱登明 邱显杰 王兆其 (211)
基于复球面放射树的海量影像资源可视组织与交互技术	滕东兴 闫奎名 樊银亭 马翠霞 戴国忠 王宏安 (216)
基于语义的用户关注度计算	陈蕾英 陈佳舟 潘 斌 彭群生 (220)
基于深度的差值累积体绘制算法	吴福理 王井俊 胡同森 (224)
基于大位移视图的自动可信图像修补技术	刘春晓 金剑秋 彭群生 (228)
自适应多预积分表体绘制算法	郑 迟 吴福理 梁荣华 (232)
基于克里金算法的图像修复技术	蔡占川 姚菲菲 唐泽圣 (236)
一种新的流线放置方法	王少荣 吴 迪 汪国平 (240)
一种基于规则树的多步攻击场景可视化工具	胡 亮 赵剑明 解男男 努尔布力 (244)
基于体数据分类的错切变形算法	林森乔 车翔玖 郭晓新 (248)
隐式曲面上的 Mumford-Shah 模型	端金鸣 潘振宽 何啸川 魏伟波 刘存良 (252)
基于 K-D 树快速精确排序的四面体可视化	李 昕 吴福理 童琪杰 陈伟锋 华 炜 陈 为 (256)
水墨山水画勾线的自动绘制方法	李大锦 (260)
面向乱针绣模拟的图像分解方法	杨克微 孙正兴 周 杰 李 毅 胡宗正 (264)
基于语谱图的语音端点检测	宫朝辉 刁麓弘 章 森 (268)
粗粒度可重构体系结构下的存储感知循环映射	杨子煜 王大伟 赵 鹏 李思昆 (272)
中文图书封面文本定位及中文图书检索	刘玉杰 李 峰 林 茂 (276)
基于人眼视觉特性的单眼盲点效果模拟	廖继渊 王章野 邹少芳 彭群生 (280)
基于改进 Retinex 算法的光照条件变化下人脸识别	姚旭东 (284)
基于非局部变换的图像增强	侯迎坤 屈小波 杨德运 桑胜举 (289)
IHLS 空间的灰度化非线性三向映射	朱 薇 刘利刚 (293)
边缘保持的自适应 Catmull-ROM 图像放大	陈利平 (297)
基于非线性梯度插值的高清体绘制	徐 冰 吴福理 梁荣华 马祥音 (302)
颜色特征信息量的感兴趣区域提取	刘 晴 邹北骥 陈再良 高 旭 傅红普 (306)
基于自适应双高斯混合模型的肤色分割	方晶晶 姜 宇 李振波 (309)
数据驱动的流程优化可视分析技术	杨 雷 王玲玲 董延昊 (313)
基于多特征联合建模的视频对象分割技术研究	李宗民 公绪超 (317)
基于颜色和轮廓平稳小波变换纹理分析的彩色图像检索	陈小海 黄晓玲 (321)
基于 GPU 的快速图像细化	朱佩佩 赵国兴 唐 亮 骆祖莹 (325)
基于显著性边缘与能量优化的图像抽象化算法	王 勋 李红 刘春晓 严彩萍 (329)

CAD/CAM/CAE 专题

三维装配几何约束闭环系统的递归分解方法	黄学良 李 娜 陈立平 (334)
一种基于 Delaunay 细分的旋转对称模型最优对称单元的构造方法	曹伟娟 李 明 高曙明 (338)
基于样本学习的多孔结构设计方法	程 敏 姚 远 (343)
一种基于草图注释的视频浏览技术	詹 启 马翠霞 倪美娟 张艳秋 王宏安 戴国忠 (347)
融合制造语义的三维 CAD 模型检索方法	黄 瑞 张树生 白晓亮 张开兴 张曦卯 (351)
面向工程更改的矩阵 BOM 构造方法研究	杜 辉 (355)
面向参数化系统验证的自动抽象方法	张 龙 屈婉霞 郭 阳 (359)
基于四维主观评价模型的交互式衍生设计	崔 嘉 唐明晰 陆宏菊 (363)
可制造性驱动的三维 CAD 模型相交制造特征识别方法	黄 瑞 张树生 白晓亮 (367)
基于通用平台的船体生产信息数据抽取	曲文新 韩端锋 姚竞争 (371)
数字化机电产品设计中可重用区域提取技术研究	白 静 (374)

深水作业浮标系泊系统研究与设计	王小波	韩端锋	马山	(378)
螺杆泵运动副数字化设计与仿真模式的研究	赵海晖	綦耀光	刘冰	李进 许晨 (383)
M-Design: 基于 SysML 的多域复杂机电产品系统建模平台	刘玉生	蒋浴芹	曹悦	(387)

计算机动画

基于稀疏表达的运动数据压缩	齐天	肖俊	庄越挺	(394)
一种高粘性流体和颗粒流统一模拟方法	常元章	黄晨	孙汉秋	吴恩华 (398)
基于场的人群运动仿真	赵欣欣	张勇	孔德慧	尹宝才 (401)
基于 DTW 方法及 B 样条插值的运动序列长度归一化	刘晓平	夏新宇	陆劲挺	(405)
基于关键状态的虚拟人组合任务分层规划方法	宗丹	李淳芃	夏时洪	王兆其 (409)
基于光线的全局优化多视图三维重建方法	陈坤		刘新国	(417)
基于遗传算法和微粒群算法的群体动画造型平台	王爱霖	刘弘	张鹏	(421)
基于人工蜂群算法的疏散运动仿真	张鹏	刘弘	王爱霖	(425)

几何造型与处理专题

有理 Bézier 曲线的自交点	朱春钢	杨莉	赵轩艺	夏宝玉 (430)
基于局部重建的点云特征点提取	王小超	刘秀平	李宝军	张绍光 (434)
基于多边形 Voronoi 图的点可见性算法	赵海森	杨承磊	吕琳	王筱婷 杨义军 孟祥旭 (438)
三次 B 样条曲线的重合判断算法	王文珂		李思昆	(442)
一种自由曲面特征的参数化表示方法	朱英	何坤金	陈正鸣	(446)
无序 B 样条曲线的曲面拟合算法	王文珂		李思昆	(452)
基于 Franklin 函数的数字曲线的多边形逼近	陈伟		齐东旭	(456)
特征点自动标定的颅面复原及其评估方法	梁荣华	叶钱炜	缪永伟	马祥音 古辉 (460)
一种以特征线为中心的曲面特征表示方法	何坤金		冯贵波	陈正鸣 (463)
可重建圆锥样条曲线的三参数三点细分法	赵欢喜		邹北骥	韩旭里 (467)
一种基于图等周划分的网格分割算法	寿如阳	吴子朝	刘新国	(471)
大规模点云选择及精简	范然		金小刚	(476)
平面点集 Voronoi 图的细分算法	寿华好	袁子薇	缪永伟	王丽萍 (480)
NURBS 曲线的收敛性分析	石茂			(483)
三向四次箱样条曲面与 Bézier 曲面的光滑拼接	王东		杨联强	(486)
基于模板的等几何分析三维计算域生成方法	许华强	徐岗	胡维华	汪国昭 (490)
Lupas q-模拟 Bernstein 算子在 CAGD 中的应用	楚瑛	韩力文	李丁	刘凤 (494)
基于开花的任意次非均匀 B 样条细分算法	杨玉婷		韩力文	(498)

EDA 及 VLSI 设计与测试专题

基于回型边框的二次规划布局算法	吴鑫	周强	钱旭	王似飞	张春阳	胡俊英	李丛	(504)
齐次坐标变换和视窗变换的硬件设计与验证	温河木	韩俊刚	王丹	吴成茂		杨世旺		(508)
基于任务精确预测的实时功耗温度管理	闫佳琪					骆祖莹	赵国兴	(513)
2D 图形加速引擎的设计与验证	苏安	韩俊刚	李晶	肖灵芝		王丹		(517)
圆柱形硅通孔的二维解析电容模型	张青青			喻文健		骆祖莹		(522)
基于库查找的差分线网匹配检测算法	汤启明	喻文健	许静宇	孙海洋				(527)
线长驱动的合法化算法	高文超	周强	钱旭	蔡懿慈				(532)

其他专题

一种基于多模型融合的手势跟踪方法	林燕	冯志全	朱德良	尚爱丽	盖伟	(538)
基于恢复函数和误差扩散的灰度图像分存方案	欧鍛灏	吴小天	孙伟	刘娟		(542)
基于形变模型匹配的三维人脸识别	蔡亮			达飞鹏		(546)
基于改进豪斯道夫距离的手指静脉特征匹配	金怀国	孙冬梅	李志超	王明慧		(550)
一种基于动机理论的人群行为模型研究	黄鹏			刘箴		(554)
一种面向交易过程的虚拟人情绪建模研究	刘杰	刘箴	黄鹏			(558)

具有空间一致性的集成式混合现实三维用户创造工具	史鸿志	丁杨子	罗国明	陈伟惠	万华根 (562)		
一种手写汉字毛笔书法效果美化方法	吕晓晨	于东	荀恩东 (566)				
高强度超声聚焦治疗中一种基于特定病人的全自动子宫肌瘤的分割方法	倪波	何发智	周媛媛	蔡贤涛	孙俊	陈晓	张德军 (570)
泡沫棒自动投注装置结构建模及有限元分析	赵军友	张振国	万法伟	邹俊艳	刘祥猛	王秀会 (575)	
防串扰 TSV 自动布局	侯立刚	李春桥	白澍	汪金辉	刁麓弘	刘伟平 (579)	
带弧长约束的五次 PH 曲线插值	李彩云	王仁宏	朱春钢 (583)				
散乱点海流数据场可视化	马家稳	王文珂	曾亮	李思昆 (586)			
基于空间框架的图书拍摄图像检索	李宗民	唐志辉 (590)					
基于数字样机的复杂产品设计协同平台研究	杨云斌	何良莉	陈刚	韦力凡 (593)			
多源混合变形传递研究	彭博	张辉鑫	郝志伟	王健	马锐	伍铁如 (597)	
基于自动定位分割的图书识别框架	刘玉杰	李伟 (602)					
基于特征的自适应有限元网格编辑	冼楚华	高曙明	熊赞晖	李桂清 (606)			
一种摄像机网络环境下摄像机选择方法	李骞	孙正兴	李毅	陈松乐 (609)			
大提花纹织物实时三维仿真	潘荣江	关防利	夏本亮 (613)				

图形学专题

图像抽象化的实时增强型绘制*

王山东^{1,2,3+}, 李晓生^{1,3}, 刘学慧¹, 吴恩华^{1,2,3}

¹ (中国科学院软件研究所计算机科学国家重点实验室 北京 100190)

² (澳门大学科技学院电脑与资讯科学系 澳门)

³ (中国科学院研究生院 北京 100190)

摘要: 借鉴基于特征流的两向异性滤波框架, 本文提出了一种增强对比度的图像抽象化绘制算法。针对输入图像, 首先构造一个光滑连续的边缘切向流场, 然后基于该流场对图像进行两向异性的增强处理, 最后使用改进的 Kuwahara 滤波算法或其他特征保持的平滑滤波算法对图像进行实时处理。实验结果表明, 本文算法可显著改善已有抽象化方法的绘制质量, 抽象化图像的边界特征明显增强, 画质更清晰, 层次感更分明。

关键词: 图像抽象化; 边缘切向流; 双边滤波; Kuwahara 滤波

中图法分类号: TP391 文献标识码: A

Real-time Enhancing Image Abstraction

Wang Shandong^{1,2,3+}, Li Xiaosheng^{1,3}, Liu Xuehui¹, Wu Enhua^{1,2,3}

¹(State Key Laboratory of Computer Science, Institute of Software Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190)

²(Department of Computer and Information Science, Faculty of Science and Technology, University of Macau, Macau)

³(Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190)

+ Corresponding author: Phone: 15801562085, E-mail: sdwang10@gmail.com

Abstract: Based on the flow-based anisotropic filtering framework, this paper presents a method for abstracting images with high color contrast. A smooth edge tangent flow field is firstly constructed, and then use the flow field to guide the process of enhancing local contrast, and at last an improved Kuwahara filter or other features-preserving filters are performed to achieve the abstraction result. Experimental results show that the proposed algorithm outperforms the existing methods in terms of feature preservation and visual appreciation.

Key words: image abstraction; edge tangent flow; bilateral filter; Kuwahara filter

* Supported by a National Fundamental Research Grant of Science and Technology(973 Project: 2009CB320802) and a research grant from the University of Macau.

作者简介: 王山东 (1985-), 男, 河南省夏邑县人, 博士研究生, 主要研究领域为计算机图形学, 非真实绘制; 李晓生 (1986-), 男, 博士研究生, 主要研究领域为计算机图形学; 刘学慧 (1968-), 女, 博士, 副研究员, 主要研究领域为计算机图形学; 吴恩华 (1947-), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要研究领域为计算机图形学。

1 引言

图像抽象化是最常见的一种非真实感绘制技术, 它将真实的图像或视频序列转化为一种结构化、简单化的形式, 其中最能体现图像特征的视觉信息被保留甚至强调, 而其他无关紧要的细节被去除或减弱。由于抽象化图像主要强调艺术表现力, 同时也可以提高图像的可理解性、促进视觉沟通, 因而抽象化绘制有着广泛的应用前景。

现有的图像抽象化系统通常采用图像分割算法或边缘保持的平滑滤波技术, 例如均值漂移[1]或双边滤波[2]算法等。这些算法能够有效平滑低对比度区域的高频特征(噪声), 并且保持高对比度区域的低频特征(显著边缘), 但是由于使用的是统一的滤波阈值, 常常造成对于某些低对比度区域的低频特征过度抽象, 而对于某些高对比度区域的高频特征如稠密纹理部分却又不能很好地抽象简化等问题。为了生成均匀一致的抽象化效果, Kyprianidis 等[3]提出了一种基于特征流的两向异性 Kuwahara 滤波算法, 即滤波核窗口的形状、方向以及尺寸等由图像的局部结构特征决定。与其他的滤波方法相比, 该方法不仅能有效处理被噪声污染的图像, 还能保持和增强图像特征的方向性, 整体抽象化效果更接近于艺术家的绘画风格。尽管该算法能够自动生成高质量的抽象化效果, 但经过 Kuwahara 滤波

后的图像在显著特征区仍然造成了不同程度的模糊, 进而导致抽象化图像的明暗对比度降低, 画质昏暗模糊, 层次感不分明; 另外, 由于需要逐一计算滤波核窗口内的各分区的平均值和方差, 算法效率受到很大影响, 很难实时处理大分辨率输入图像。

本文提出了一种增强对比度的图像抽象化绘制算法, 能够获得较好的抽象化效果。与现有抽象化算法[4][5][6]直接对输入图像做滤波处理不同, 我们首先对输入图像进行基于特征流的两向异性增强处理, 然后使用 Kuwahara 滤波或其他平滑滤波算法对增强后的图像进行处理。在绘制效果方面, 我们的图像增强算法结合了沿边缘切向流方向的自适应平滑和沿梯度方向的对比度增强操作, 因此所得结果的形状特征及其方向感明显增强; 在绘制效率方面, 我们对基于特征流的 Kuwahara 滤波进行了改进, 设计出一种基于 GPU 实现的近似可分离两遍绘制算法, 因此可以达到实时绘制效率。

2 算法介绍

图 1 为本文算法的基本流程。输入为单幅图像或视频的帧序列, 输出为其对应的抽象化结果。首先利用结构张量平滑技术快速计算图像的局部方向场, 即边缘切向流场 (edge tangent flow); 然后基于该方向场对图像进行两向异性增强处理; 最后对增强后的图像进行平滑滤波处理得到抽象化图像。

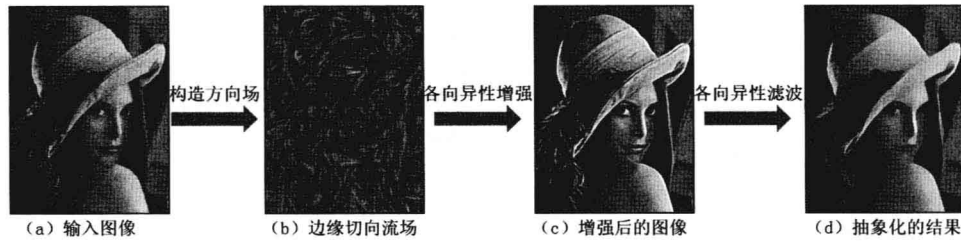


图 1 抽象化增强算法的基本流程

2.1 计算边缘切向流场

为了生成光滑连贯、方向特征增强的抽象化效果, 本文采用文献[7]提出的基于结构张量平滑技术快速生成边缘切向流场的方法: 首先采用 Sobel 算子计算每像素的 2×2 矩阵(结构张量), 然后用高斯函数对该矩阵的各分量进行卷积得到平滑后的矩阵。该矩阵存在两正交单位特征向量, 分别记为 μ 和 ν , 其中 μ 指向图像颜色的最大对比度方向, 即平滑后的梯度向量; 相应地, ν 指向图像颜色的最小对比度方向, 即所求边缘切向流场的构成向量。图 1 (b) 显示了高斯平滑后的方向场利用线性卷积分技术[8]可视化的效果。 μ , ν 对应的特征值分别记为 λ_1 , λ_2 , 这两个值可以作为图像局部几何结构的描述因子: 在平滑区域, $\lambda_1 \approx \lambda_2 \approx 0$; 在边缘区域, $\lambda_1 \gg \lambda_2 \approx 0$; 在角型区域, $\lambda_1 \gg \lambda_2 \gg 0$ 。局部各向异性衡量因子被定义: $A = (\lambda_1 - \lambda_2) / (\lambda_1 + \lambda_2)$, 其取值范围 0 至 1, $A = 0$ 表示各向同性, 无明显方向特征; 而 $A = 1$ 表示各向异性, 有强烈方向特征。

2.2 基于特征流的图像增强

为了生成对比度强烈的抽象化图像, 同时保证对噪声处理的鲁棒性, 我们首先沿边缘切向流方向对图像进行自适应的平滑滤波, 然后沿梯度方向对平滑结果进行对比度增强处理。本

文实验中, 我们借鉴[9]的方法实现边缘切向流方向的自适应平滑。该算法在执行时类似于经典的 LIC 算法[8], 不同的是, 在对流线上的采样点按照高斯核函数进行积分时, 高斯核函数的标准方差由图像的局部几何结构决定: $\sigma_s = 0.25\sigma_0(1 + A)^2$ 。图 2 (b) 为沿切向流方向的自适应平滑后的结果, 流线型毛发的方向特征明显增强, 边界特征也保持较好。

为了满足噪声处理和抽象化的需求, 本文提出一种新的基于高斯差分掩模的图像增强方法: 首先沿梯度方向进行一维高斯差分滤波, 然后将滤波结果乘以某个系数叠加到平滑图像上以实现梯度方向上对比度增强的目的, 用公式可以表示为:

$$H(x) = F(x) + c(G(\sigma) - \tau G(k \cdot \sigma))$$

其中 $H(x)$, $F(x)$ 分别为增强前和增强后的图像; $G(\sigma) - \tau G(k \cdot \sigma)$ 为可扩展的高斯差分滤波结果[10], $\Omega(x)$ 表示沿 x 像素的正负梯度方向的邻域像素采样集合, 参数 τ 改变两高斯核的相对权重关系, 因而决定锐化的敏感程度, 本文取 $\tau = 0.99$; c 控制锐化的轻重程度, 本文取 $c = 2$; 设置 $k = 1.6$ 以便使 $G(\sigma) - \tau G(k \cdot \sigma)$ 近似高斯调和拉普拉斯算子。图 2 (c) 为沿梯度方向使用高斯差分掩模方法得到的增强效果, 可以看出, 图像的整体明暗对比度明显增强, 层次感更强烈。



图 2 图像增强及其抽象化结果

2.3 各向异性滤波

对上节得到的增强图像应用已有的抽象化方法，都可得到相应的抽象化增强效果，本节以下部分主要介绍针对文献[3]提出的改进加速算法。

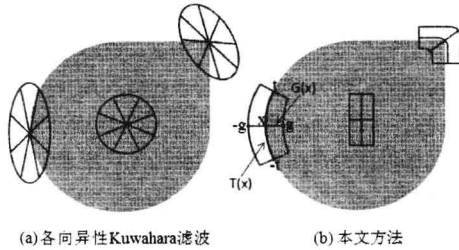


图 1 Kuwahara 滤波核窗口形状的比较

传统的 Kuwahar 滤波器首先将滤波核窗口分为相同的 N 个扇区，分别计算各扇区内像素的平均值和方差，然后由方差作为其对应平均值的权重系数进行加权平均得到最后的滤波结果。与标准的 Kuwahara 滤波器采用统一的圆形滤波核窗口不同，基于特征流的各向异性 Kuwahara 滤波器的窗口形状由图像的局部结构特征决定，在均匀平坦的区域窗口形状是圆形，在非均匀突变的边缘区域窗口形状则是椭圆形，其长轴的方向平行于局部切方向，如图 2 (a) 所示。这种椭圆形的滤波核窗口在显著边缘区域并没有很完美的顺从于边缘切向流，因而在特征保持方面仍有改进的空间。

我们将 Kuwahara 滤波核窗口从椭圆形改变为一个弯曲的近似矩形，其形状由边缘切向流方向 $T(x)$ 和梯度方向 $G(x)$ 铺展而成，如图 2 (b) 所示，整个窗口分为四个分区，各分区的平均值及方差：

$$m_i(x) = \frac{1}{k_i} \sum_{y \in \Omega_i} H(y) \omega_i(x, y)$$

$s_i^2(x) = \frac{1}{k_i} \sum_{y \in \Omega_i} (H(y) - m_i)^2 \omega_i(x, y) = \frac{1}{k_i} \sum_{y \in \Omega_i} H(y)^2 \omega_i(x, y) - m_i^2$ 这里 $m_i(x)$, $s_i^2(x)$ 分别表示 RGB 三分量的平均值和方差，即三维向量， Ω_i 为第 i 个分区的像素集合，分区内像素权重系数

$$\omega_i(x, y) = e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{|k-y|}{\sigma_r} \right)^2} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{|H(x)-H(y)|}{\sigma_r} \right)^2}, \text{ 归一化变量 } k_i = \sum_{y \in \Omega_i} \omega_i(x, y), \text{ 最后滤波器的输出被定义为:}$$

$$O(x) = \frac{\sum_{i=1}^4 \alpha_i m_i}{\sum_{i=1}^4 \alpha_i}; \quad \alpha_i = \frac{1}{1 + (255 \cdot (s_{i,r}^2 + s_{i,g}^2 + s_{i,b}^2))^{q/2}}$$

其中 α_i 为第 i 分区的权重系数，与该分区的 RGB 三通道的方差和有关，参数 q 控制抽象化程度，本文实验中默认取值 $q=8$ 。

注意到上述方法的算法复杂度是 $O(n \times u \times v \times 2)$ ，这里 n 是图像的像素数量， u 是梯度方向上的采样点数量， v 是梯度方向上的采样点数量，2 表示邻域内每个像素要使用两次，分别用来计算平均值和方差。为了提高算法执行效率，我们借鉴双边滤波分离滤波核的实现方法，通过两遍绘制可以快速计算出各分区的平均值和方差，算法复杂度也降为 $O(n \times v \times 2)$ 。在第一遍绘制中，针对每个像素（以当前像素 x 为例，如图 3 (b) 所示），沿梯度正方向 $x \rightarrow g$ 计算出该区域内的平均值 m_R 、方差 s_R^2 及权重系数 ω_R ，共计七个分量。同理，沿梯度负方向 $x \rightarrow -g$ 也计算出七个分量。至此，每个像素计算出 14 个变量，本文使用 OpenGL 的多渲染目标 (multiple render targets, MRT) 技术将这 14 个变量绘制到四张纹理中。在第二遍绘制中，以第一遍绘制结果作为输入，沿切线流正方向 $x \rightarrow t$ 进行累积，得到左上分区的 $\{m_1, s_1^2, \omega_1\}$ 和右上分区的 $\{m_2, s_2^2, \omega_2\}$ ；同理，沿切线流负方向 $x \rightarrow -t$ 累积得到左下分区的 $\{m_3, s_3^2, \omega_3\}$ 和右下分区的 $\{m_4, s_4^2, \omega_4\}$ 。然后计算各分区平均值和方差： $M_i = m_i / \omega_i$, $S_i = |s_i / \omega_i - M_i * M_i|$ 。最后输出结果为：

$$O(x) = \frac{\sum_{i=1}^4 \alpha_i M_i}{\sum_{i=1}^4 \alpha_i}; \quad \alpha_i = \frac{1}{1 + (255 \cdot (S_{i,r}^2 + S_{i,g}^2 + S_{i,b}^2))^{q/2}}$$

图 2 (d) 是增强的抽象化结果，图像边界形状特征更突出，颜色对比度比较鲜明，总体视觉效果较好。

3 实验结果及分析

本文算法实现的硬件实验环境是一台处理器为 2.66GHZ 的 Intel 酷睿 2 四核 Q9400，内存为 4GB DDR3，显卡为 NVIDIA GeForce GTX 285 的 PC。程序编译环境为 Windows7 系统下的 Visual Studio.NET2008。为了实现算法的快速并行计算，本文使用基于 GPU 执行的绘制算法，利用 OpenGL 的帧缓存对象 (frame buffer object, FBO) 技术将输入图像绘制到纹理中，然后利用 Cg 着色语言的像素着色器函数实现算法的并行处理。对于

分辨率为 512×512 的输入图像, 文献[4]的算法执行效率是 12fps, 本文采用近似可分离的加速算法, 效率可达 45fps. 对于

1024×768 的图像, 本文算法也能达到 15fps. 因此, 从算法执行效率的角度, 本文方法已经能够满足实时抽象化的应用需求。

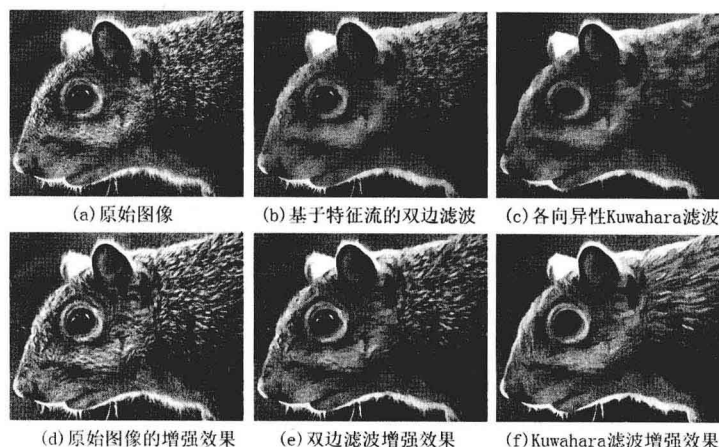


图4 本文算法与已有方法的效果比较

为了说明本文算法在对比度增强和特征保持方面的优势, 图4给出了相关比较。基于特征流的双边滤波算法^[6]不能有效地简化高对比度区域的高频细节, 如(b)图中松鼠的皮毛, 另外该算法还会过度模糊一些低对比度区域的低频显著特征, 如松鼠的耳朵, 嘴巴等部分, 因而抽象化的整体视觉效果不是很匀称。与文献[6]将双边滤波直接应用于原始图像不同, 本文首先利用边缘切向流场计算出原始图像的增强图像(3(d)), 然后再对增强后的图像进行基于特征流的双边滤波处理。由于增强后的图像在一定程度上优化了高频和低频特征, 因而本文基于特征流的双边滤波增强算法能够生成对比度鲜明, 高度一致的抽象化效果, 如(e)图。图(c)是基于特征流的各向异性Kuwahara滤波算法^[3]的绘制结果, 与图(b)相比, 图(c)的整体抽象化程度虽然一致, 但由于边缘特征处存在一定程度的模糊, 因而颜色对比度降低, 整体视觉效果略显昏暗。本文改进的Kuwahara滤波算法不仅计算时间更短, 所生成的抽象化图像的形状特征也更清晰, 更接近于艺术家的手绘风格, 如(f)图。

4 结语

针对已有的基于边缘切向流的图像抽象化工作, 本章介绍了一种改进的增强绘制算法, 在运算效率和绘制效果方面都有明显的改善。与已有抽象化系统不同的是, 我们引入了各向异性增强处理步骤: 沿边缘切向流的自适应平滑操作去除了噪声, 强化了方向特征; 作用于梯度方向的基于高斯差分的反锐化掩模算法增强了明暗对比度, 优化了形状特征。使用基于流场的双边滤波算法作用于本文生成的各向异性增强图像上, 可显著改善整体抽象化程度, 抽象化效果更匀称; 基于切向流的各向异性Kuwahara滤波改进算法, 可显著增强图像的方向特征, 艺术化风格更浓重。算法实现上, 我们使用基于GPU并行运算的快速绘制技术, 可以达到实时绘制效率。

参考文献:

- [1] Tomasi C, Manduchi R. Bilateral filtering for gray and color images. In Proceedings of the Sixth International Conference on Computer Vision (ICCV), 1998, 839-846
- [2] Comaniciu D, Meer P. Mean shift: a robust approach toward feature space analysis. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24(5): 603-619.
- [3] Kyprianidis J E, Kang H, Döllner J. Image and video abstraction by anisotropic kuwahara filtering. Computer Graphics Forum, 2009, 28(7): 1955-1963.
- [4] DeCarlo D, Santella A. Stylization and abstraction of photographs. ACM Trans. Graph, 2002, 21(3): 769-776.
- [5] Winnemöller H, Olsen S C, Gooch B. 2006. Real-time video abstraction. ACM Trans. Graph, 2006 25(3): 1221-1226.
- [6] Kang H, Lee S, Chui C K. Flow-Based Image Abstraction. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2009, 15(1): 62-76.
- [7] Kyprianidis J, Döllner J. Image Abstraction by structure adaptive filtering. In Proc. EG UK Theory and Practice of Computer Graphics, 2008: 51-58.
- [8] Cabral B, Leedom L C. Imaging vector fields using line integral convolution. In Proceedings of the 20th annual conference on Computer graphics and interactive techniques (SIGGRAPH). 1993: 263-270.
- [9] Kyprianidis J, Kang H. Image and Video Abstraction by Coherence-Enhancing Filtering. Computer Graphics Forum, 2011, 30(2): 593-602.
- [10] Winnemöller H. XDoG: Advanced Image Stylization with extended difference-of-Gaussians. Proceedings of the ACM Symposium on Non-Photorealistic Animation and Rendering, 2011: 147-156.

石纹纸染艺术图案仿真新技术*

刘世光¹⁺, 陈迪¹

¹ (天津大学计算机科学与技术学院, 天津 300072)

摘要: 石纹纸染计算机仿真技术可以帮助设计者创作独特、新奇、具有艺术效果的石纹纸染艺术作品, 对于这种古老艺术形式的保护、记录与传承具有十分重要的意义。但是, 这方面的研究还不多见。本文基于流体力学和向量图表达技术, 并结合曲线的数学公式变换性质, 提出一种新的石纹纸染艺术图案生成方法。该方法快速、稳定, 能够生成清晰的图形轮廓。首先, 采用半拉格朗日方法求解流体方程, 模拟二维不可压缩流体的速度。考虑到向量图具有不受分辨率影响的特性, 选择跟踪流体边界结点的运动趋势, 生成流体的轮廓。再采用模板缓存的方法填充流体轮廓, 并以 SVG 格式输出绘制结果。考虑到多种流体混合时的交互作用, 推广上述方法用于仿真多种颜料混合作用产生的石纹纸染图案。

关键词: 石纹纸染; 流体力学; 矢量图; 颜料混合

中图法分类号: TP391 文献标识码: A

A new method for the simulation of paper marbling

LIU Shi-Guang¹⁺, CHEN Di¹

¹(School of Computer Science and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

+ Corresponding author: E-mail: lsg@tju.edu.cn

Abstract: The simulation of paper marbling through computers can help designers create unique, novel, artistic paper marbling image patterns, which is important for the protection, record and inheritance of this kind of ancient art. However, related techniques have not been researched intensively. In this paper, a new paper marbling method based on the techniques of fluid dynamics vector graphics. The method is fast and stable, through which we can achieve clear silhouettes of the pattern boundaries. First, we use the semi-Lagrange method to solve the fluid equation and get the velocities of two-dimensional incompressible fluid field. Considering vector graphics has the advantage that can not be affected by the resolution, we track the movement of the fluid boundary to generate the outline of the marbling image. Then, we render the outline by the stencil method, and export the shape as the Scalable Vector Graphics (SVG) image. Moreover, the above method is extended for simulation of paper marbling generated with multiple dyes, which can generate more colorful marbling patterns.

Key words: Paper Marbling; Vector Graphics; Fluid Dynamics; Dye Mixing

* Supported by the Natural Science Foundation of China under Grant No. 61170118 and 60803047 (国家自然科学基金项目); the Open Project Program of the State Key Lab of CAD&CG, Zhejiang University under Grant No. A1210. (国家重点实验室开放基金项目).

作者简介: 刘世光 (1980—), 男, 博士, 副教授, 主要研究领域为计算机图形学, 计算机动画, 可视化仿真等; 陈迪 (1989—), 女, 硕士研究生, 主要研究领域为计算机图形学, 流体模拟等。

1 引言

石纹纸染 (Paper marbling) 是一种古老的阿拉伯国家最早发明的纸艺形式。它是一种在水表面设计图形的方法。这种纸艺技术主要是在水或粘稠液体表面操作流动的颜料来形成各种样式, 如可以产生光滑的类似石纹等形式的精美图案, 并将图案转移到纸张或织物的表面。近年来, 人们用这些石纹纸张来装饰书籍、图片背景、贴图。

由于传统的石纹纸染技术要求在操作的整个过程中不能有一丝差错, 一旦有所失误, 不但要重新开始, 而且会浪费大量的颜料。通过计算机实现纸艺技术可以帮助设计者更好的进行作品创作, 对于这种古老艺术形式的保护、记录与传承具有十分重要的意义。

本文基于流体力学和向量图表达技术, 并结合曲线的数学公式变换性质, 提出一种新的石纹纸染艺术图案生成方法。该方法快速、稳定, 可以生成多种多样石纹纸染艺术图案。

1.1 相关工作

迄今为止, 石纹纸染技术的模拟方法主要有基于物理的二维流体模型的方法和基于坐标变换数学函数的方法。文献[2]运用流体动力学原理来模拟流体运动实现了绘制类似石纹的杂乱无章的图形的功能。但这种方法在绘制开始前需要初始化所有的运动路径, 难以做到实时绘制。文献[3, 8]提出了一种基于图形硬件的石纹纸染绘制技术。该方法生成的图形边界较为模糊。文献[4, 5]均提出了可以生成清晰图案边界的石纹纸染仿真方法。前者通过在欧拉网格上使用 B 样条曲线插值来生成清晰边界; 而后者采用向量图的方式来绘制流体, 根据局部边界的弯曲度和速度的湍流度来控制边界。然而, 这两种方法难以产生具有规则特征的石纹纸染纹理效果。文献[6]扩展了文献[4]中的方法, 通过结合 CIP (the Constrained Interpolation Profile) 插值方法和 MacCormack 方法来求解速度场和流体密度场的方程, 从而获得清晰的流体边界。文献[7]通过数学表示方法, 即通过一些图形的坐标变换函数来绘制一些具有特定特征的图形。该方法可以生成规则的石纹纸染图案, 但是难以反映颜料的流动特性。

综上所述, 基于物理的方法可以生成逼真的石纹纸染艺术图案, 采用网格密度场绘制多种颜料时, 随着网格精度的提高其计算量十分庞大; 基于图形的坐标变换数学函数的方法可以生成多种多样具有规则形状和模式的艺术图案, 却不能较好地反映颜料的流动特性。

针对上述问题, 本文基于物理的二维流体模型的方法, 结合向量图表达技术可以生成高分辨率、具有清晰边界方法的优点, 提出了一种快速、稳定的可以生成清晰图形轮廓的石纹纸染仿真技术。该方法可以处理多种颜料的混合, 并能根据需要生成具有规则特征风格的艺术图案。

2 石纹纸染仿真算法

2.1 速度场的构建

在模拟石纹纸染颜料流动的过程中, 需要描述任意给定时刻流体的状态。其中, 最重要的是流体的速度场构建, 因为它不仅决定了流体本身的移动规则, 同时也影响着周围相邻流体

的运动。

Navier-Stokes 方程组可以较好地描述流体内部速度和压力的变化及其关系, 采用它计算颜料的运动, 如下所示:

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -(u \cdot \nabla)u - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 u + f \quad (2)$$

其中, u 是流体速度, ρ 表示流体密度, p 是压强, f 和 ν 分别是外力和粘性系数。本文采用 Stam [1]提出的稳定而快速的半拉格朗日方法求解上述方程组。

2.2 流体边界追踪及优化

矢量图是采用数学方法描述的图, 任意放大或缩小图形时都不会影响其清晰度。考虑到矢量图的上述特性, 本文采用矢量图方法表示流体边界, 进而对边界所包围的区域进行填充。

在石纹纸染制作中, 颜料以接近圆形的形状滴到液体表面。我们选取初始实心圆区域边界上的一些离散点作为该流体的初始的边界结点。当添加外力后, 再跟踪颜料边界随速度场变化的运动情况。

本文采用双线性插值方法计算边界结点 i 的速度 $u(p_i)$ (公式 (3))。然后, 由速度场的变化得到边界结点 i 在下一时刻的新位置 p_{i+1} (公式 (4))。

$$u(p_i) = t_2(s_2 * u_{i,j} + s_1 * u_{i,j+1}) + t_1(s_2 * u_{i+1,j} + s_1 * u_{i+1,j+1}) \quad (3)$$

$$p_{i+1} = p_i + u(p_i) \cdot \Delta t \quad (4)$$

其中, $u_{i,j}$ 为结点 i 所在速度场网格 (i, j) 中心的速度, s_1 、 s_2 、 t_1 和 t_2 分别结点 i 的位置与速度场网格 (i, j) 、 $(i, j+1)$ 、 $(i+1, j)$ 和 $(i+1, j+1)$ 的距离。

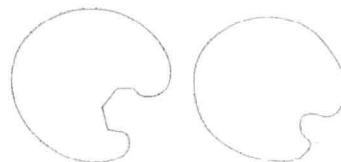


图1 颜料的轮廓边界

但是, 仅跟踪初始化的边界结点不能很好的描述流体轮廓, 如图 1 左图其边界比较粗糙。我们通过确保两相邻结点间的距离在 d 与 $d/2$ 之间^[5]的原则来控制边界结点的增减, 从而生成平滑逼真的流体边界, 如图 1 右图较好的保持了边界的平滑性。其中, d 表示控制结点距离阈值。边界结点 i 处的距离阈值 d_i 的计算公式为:

$$d_i = d_{\max} c_i^{\text{curvature}} \quad (5)$$

其中, d_{\max} 表示流体边界相邻结点间的最大距离。 $c_i^{\text{curvature}}$ 为结点 i 处的曲率。

2.3 边界绘制与图形输出

本文基于 OpenGL 采用模板缓存的模板测试方法填充流体轮廓, 得到实心的流体图案。基于矢量图任意放大或缩小时都不会影响图的清晰度的特性, 根据 SVG 开放标准, 采用 SVG 格式输出图形。该方法可以较好的避免失真和走样现象, 从而保持图形轮廓清晰的特征。

3 单一颜料到多种颜料的扩展

为了得到内容丰富的石纹纸染图案, 我们将上述方法扩展

到多种颜料的模拟。对于多种颜料的模拟，需要考虑不同颜料的粘性特征使其运动符合颜料的扩散规律。

观察到不同颜料流体的固有属性，本文对每种颜料添加粘性系数。由于人们的视觉对到轮廓边界附近不同流体间相互作用所产生的影响较为敏感，可以通过对流体轮廓的初始边界结点添加向外部周围扩散的速度 v 实现新流体的添加，速度 v 的取值受流体的固有粘性系数值 $visc$ 的影响，即：

$$v(i) = (1 - visc) \times V \quad (6)$$

其中， v 表示流体边界结点 i 在速度网格上的速度， V 表示粘性系数值 $visc$ 为 0 时的速度。

4 结果与讨论

基于以上方法，本文在配置为内存 1GB, NVIDIA 8600 显卡配置的 PC 机上生成了不同的石纹纸染仿真图案。

图 2 给出了采用本文方法生成的单一颜料和多种颜料混合产生的石纹纸染图案的仿真结果。从图中可以看出，其整体呈现漩涡状的效果，这与传统的石纹纸染技术所创作的图案类似，它表现了一种具有非规则特定规律的纹理效果。

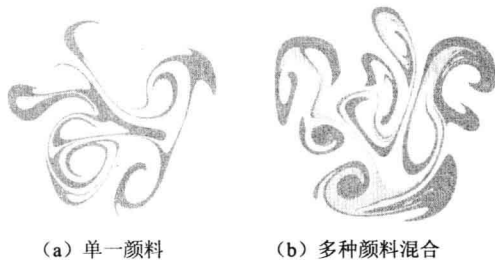


图 2 石纹纸染图案仿真结果

文献[5]采用矢量图形来生成颜料的运动边界，可以生成清晰的图案轮廓。由于它采用四阶龙格-库塔方法求解流体运动，这种方法的计算速度较慢。图 3 (a) (b) 分别表示在在本文实验软硬件配置和环境下采用文献[5]和本文方法绘制的石纹纸染艺术图案。从图中对比可以看出，两幅图案的边界效果相近，均可以产生较为逼真的颜料运动扩散效果。但是，如图 3 (c) 所示，本文方法的绘制速率快于文献[5]。

5 总结与展望

本文基于流体力学和向量图表达技术，提出一种快速、稳定的可以生成清晰图形轮廓的石纹纸染仿真技术。

在石纹纸染图案中，细致的边界轮廓表达对图案质量十分重要。在未来的工作中，将研究更加精确的流体边界结点跟踪方法，从而生成更加生动、细腻的石纹纸染艺术图案。

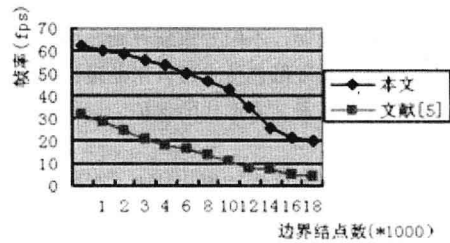
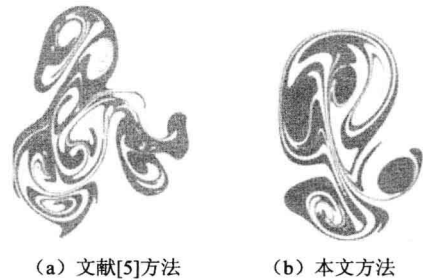


图 9 实验结果及比较

参考文献:

- [1] Stam J. Real-time fluid dynamics for games. In: Proceedings of the Game Developer Conference. San Jose, USA: 2003. 324-330.
- [2] Mao X, Suzuki T, Imamiya A. Atelier M: a physically based interactive system for creating traditional marbling textures. In: Proceedings of the 1st international conference on Computer graphics and interactive techniques in Australasia and South East Asia, New York, USA: 2003. 79-86.
- [3] Jin X, Chen S, Mao X. Computer-generated marbling textures: a GPU-based design system. IEEE computer graphics and applications, 2007, 27(2): 78-84.
- [4] Acar R, Boulanger P. Digital marbling: a multiscale fluid model. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2006, 12: 600-614.
- [5] Ando R, Tsuruno R. Vector fluid: a vector graphics depiction of surface flow. In: Proceedings of the 8th International Symposium on Non-Photorealistic Animation and Rendering. New York, USA: 2010. 129-135.
- [6] Xu J, Mao X, Jin X. Nondissipative marbling. IEEE Computer Graphics and Applications. 2008, 28(2): 35-43.
- [7] Lu S, Jaffer A, Jin X, Zhao H, Mao X. Mathematical marbling. IEEE Computer Graphics and Applications, 2011, 99: 1-10.

附中文参考文献:

- [8] 陈韶椿. 基于 GPU 的实时大理石纹理仿真. 硕士学位论文, 浙江大学, 2006.