

软件学报 *Software* *Journal of*



主办



中国科学院软件研究所



中国计算机学会

出版



科学出版社



中国科学院科学出版
基金资助出版



中国科协精品科技期刊工程
项目资助期刊



中国精品科技期刊



中国计算机学会会刊

软件学报

(Ruanjian Xuebao)

第 24 卷第 8 期

2013 年 8 月

目次

系统软件与软件工程

- 回归测试中的测试用例优先排序技术述评 陈翔 陈继红 鞠小林 顾庆 (1695)
- 一种支持 Java 应用中计算按需远程执行的方法
..... 张颖 黄昱 刘偲哲 梅宏 李影 杨顺祥 (1713)
- 运行时软件体系结构的建模与维护
..... 宋晖 黄昱 武义涵 Franck CHAUVEL 孙艳春 邵维忠 梅宏 (1731)
- 静态程序切片的 GPU 通用计算功耗预测模型 王海峰 陈庆奎 (1746)
- 面向高性能业务应用的基于剖视信息的系统能耗优化 易会战 罗兆成 (1761)
- 基于依赖分析的 SPMD 程序隐式同步检测及处理算法 岳峰 庞建民 赵荣彩 (1775)

数据库技术

- 支持大数据管理的 NoSQL 系统研究综述 申德荣 于戈 王习特 聂铁铮 寇月 (1786)
- 带通配符和 One-Off 条件的序列模式挖掘 吴信东 谢飞 黄咏明 胡学钢 高隽 (1804)
- 轨迹数据库中热门区域的发现 刘奎恩 肖俊超 丁治明 李明树 (1816)
- MapReduce 框架下基于 R-树的 k -近邻连接算法 刘义 景宁 陈莹 熊伟 (1836)
- 基于聚类的快速数据流匿名方法 郭昆 张岐山 (1852)
- 融合奇异性和扩散过程的协同过滤模型
..... 杨兴耀 于炯 吐尔根·依布拉音 廖彬 钱育蓉 (1868)

计算机图形学与计算机辅助设计

- 优化光源设置的自适应增强绘制 王光伟 王文成 华淼 韩红雷 (1885)
- 基于旋转模式的移动设备佩戴位置识别方法 时岳 喻纯 史元春 (1898)
- 基于 Haar 特性的 LBP 纹理特征 周书仁 殷建平 (1909)
- 基于区域增长与局部自适应 C-V 模型的脑血管分割
..... 解立志 周明全 田沅 武仲科 王醒策 (1927)

操作系统

- 云计算虚拟资源的熵优化和动态加权评估模型 左利云 曹志波 董守斌 (1937)
- ICN 中的一种协作缓存机制 刘外喜 余顺争 蔡君 高鹰 (1947)
- 一种收益敏感的虚拟资源按需提供方法 吴恒 张文博 张建华 魏峻 黄涛 (1963)

《软件学报》投稿指南 (封三)

期刊基本参数: CN11-2560/TP*1990*m*16*288*zh+en*P*¥70*2013*19*2013-08

Contents

SYSTEM SOFTWARE AND SOFTWARE ENGINEERING

- 1695 Survey of Test Case Prioritization Techniques for Regression Testing
CHEN Xiang, CHEN Ji-Hong, JU Xiao-Lin, GU Qing
- 1713 Approach to Supporting On-Demand Remote Execution of the Computations in a Java Application
ZHANG Ying, HUANG Gang, LIU Xuan-Zhe, MEI Hong, LI Ying, YANG Shun-Xiang
- 1731 Modeling and Maintaining Runtime Software Architectures
SONG Hui, HUANG Gang, WU Yi-Han, Franck CHAUVEL, SUN Yan-Chun, SHAO Wei-Zhong, MEI Hong
- 1746 Power Consumption Prediction Model of General-Purpose Computing GPU with Static Program Slicing
WANG Hai-Feng, CHEN Qing-Kui
- 1761 Profile-Guided Optimization of System Energy Consumption for High-Performance Operational Applications
YI Hui-Zhan, LUO Zhao-Cheng
- 1775 Detecting and Treatment Algorithm of Implicit Synchronization Based on Dependence Analysis in SPMD Program
YUE Feng, PANG Jian-Min, ZHAO Rong-Cai

DATABASE TECHNOLOGY

- 1786 Survey on NoSQL for Management of Big Data
SHEN De-Rong, YU Ge, WANG Xi-Te, NIE Tie-Zheng, KOU Yue
- 1804 Mining Sequential Patterns with Wildcards and the One-Off Condition
WU Xin-Dong, XIE Fei, HUANG Yong-Ming, HU Xue-Gang, GAO Jun
- 1816 Discovery of Hot Region in Trajectory Databases
LIU Kui-En, XIAO Jun-Chao, DING Zhi-Ming, LI Ming-Shu
- 1836 Algorithm for Processing k -Nearest Join Based on R-Tree in MapReduce
LIU Yi, JING Ning, CHEN Luo, XIONG Wei
- 1852 Fast Clustering-Based Anonymization Algorithm for Data Streams
GUO Kun, ZHANG Qi-Shan
- 1868 Collaborative Filtering Model Fusing Singularity and Diffusion Process
YANG Xing-Yao, YU Jiong, Turgun IBRAHIM, LIAO Bin, QIAN Yu-Rong

COMPUTER GRAPHICS AND COMPUTER AIDED DESIGN

- 1885 Optimizing Lighting Design for Adaptive Enhancement Rendering
WANG Guang-Wei, WANG Wen-Cheng, HUA Miao, HAN Hong-Lei
- 1898 On-Body Position Recognition Method for Mobile Devices Using Rotation Patterns
SHI Yue, YU Chun, SHI Yuan-Chun
- 1909 LBP Texture Feature Based on Haar Characteristics
ZHOU Shu-Ren, YIN Jian-Ping
- 1927 Cerebrovascular Segmentation Based on Region Growing and Local Adaptive C-V Model
XIE Li-Zhi, ZHOU Ming-Quan, TIAN Yun, WU Zhong-Ke, WANG Xing-Ce

OPERATING SYSTEM

- 1937 Virtual Resource Evaluation Model Based on Entropy Optimized and Dynamic Weighted in Cloud Computing
ZUO Li-Yun, CAO Zhi-Bo, DONG Shou-Bin
- 1947 Scheme for Cooperative Caching in ICN
LIU Wai-Xi, YU Shun-Zheng, CAI Jun, GAO Ying
- 1963 Benefit-Aware On-Demand Provisioning Approach for Virtual Resources
WU Heng, ZHANG Wen-Bo, ZHANG Jian-Hua, WEI Jun, HUANG Tao

《软件学报》投稿指南

《软件学报》是一本刊登计算机软件各领域原创性研究成果的期刊,所刊登的论文均经过严格的同行专家评议。《软件学报》主要面向全球华人计算机软件学者,致力于创办与世界计算机科学和软件技术发展同步的以中文为主的“中文国际软件学术期刊”,为全球华人同行提供学术交流平台。《软件学报》创刊于 1990 年,由中国科学院软件研究所和中国计算机学会联合主办,已被 EI Compendex, INSPEC, Abstracts Magazine, Mathematical Review, Zentralblatt MATH 等国际数据库收录。

《软件学报》注重刊登反映计算机科学和计算机软件新理论、新方法和新技术以及学科发展趋势的文章,主要涉及理论计算机科学、算法设计与分析、系统软件与软件工程、模式识别与人工智能、数据库技术、计算机网络、信息安全、计算机图形学与计算机辅助设计、多媒体技术及其他相关的内容。

投稿要求

1. 来稿必须是原创性论文,要求结构完整、论点明确、论据可靠、论证合理、层次分明、可读性强。
2. 本刊长期征集长文,长文的长度至少在 15 页以上,侧重于鼓励科学工作者在结合国家需求、把握世界科学前沿的基础上,在重要研究领域或新学科生长点上开展深入、系统的创新性研究工作;鼓励有重大创新、有新观点和见解、可推动或丰富该领域的研究与发展。有关长文的详细要求,请登陆我刊网站了解。
3. 投稿应具有合法性,即不存在抄袭、剽窃、侵权等不良行为。如发现上述不良行为,本刊将据实通知作者所在单位的最高领导层,并不再接受第一作者的投稿。作者文责自负,本刊不承担连带责任。
4. 来稿应未在任何正式出版物上刊载过,且不允许一稿多投。本刊不接受任何语种的翻译稿。

写作要求

1. 稿件请用 Word 编辑排版,排版格式可参考本刊网站上提供的写作模板和近期《软件学报》。
2. 作者应将自己的研究工作有所启发、帮助和教益的国内外文献列出,以示对同行工作的尊重和补充。参考文献应查新、查全并在文中明确标引,且与国内外同类工作进行详细讨论和比较。

投稿方法

1. 请通过《软件学报》网站<http://www.jos.org.cn>“在线投稿”一栏进行投稿。
2. 投稿分配编号之后,系统将不提供稿件更新功能,请作者务必谨慎投稿,做到清稿定稿。

作者须知

1. 为联系顺畅,请在“在线投稿”时详细提供联系人的联系方式(包括通讯地址、邮编、E-mail 地址和联系电话等),审稿期间联系方式如有变化,请及时通知编辑部。
2. 我刊网站上提供了“稿件处理流程”,作者可以通过该流程图了解稿件的处理程序和相关规定。同时还列举了作者在投稿过程中经常遇到的一些问题,建议作者在投稿之前仔细阅读。
3. 为保障作者权益,本刊将采取必要措施以加速审稿流程。稿件一般在 6 个月内给出审稿结果,并尽可能提前给出评审意见。若审稿时间超过 6 个月,作者在通知编辑部并得到确认回复之后可自行处理投稿。
4. 通过初审的投稿作者需提交投稿声明,并请遵守投稿声明中的有关规定。不拟刊登稿件,将有评审意见提供给作者。
5. 作者在投稿时请注明是否为 CCF 会员,若是会员,请注明会员号。凡第一作者为 CCF 会员者,文章在发表时将享受 85 折版面费优惠(会员身份状态以发表时的状态为准)。
6. 从 2009 年我刊对录用待发表文章实行提前在线出版,在线出版是我刊正式出版的形式之一,详细说明请见我刊网站通知。稿件在线出版之后,仍将安排在印刷版出版。印刷版出版之后,将一次性给付稿酬(印刷版、光盘版和网络版稿酬),并赠送样刊。目录页和印刷版文章的原版可从我刊网站下载并打印。

联系电话: 010-62562563 E-mail: jos@iscas.ac.cn 网址: <http://www.jos.org.cn>
通讯地址: 100190 北京 8718 信箱 中国科学院软件研究所 《软件学报》编辑部

《软件学报》大数据理论、方法和技术专刊

征 文 通 知

云计算、物联网、社交网络等新兴服务促使人类社会的数据种类和规模正以前所未有的速度增长,大数据时代正式到来。数据从简单的处理对象开始转变为一种基础性资源,如何更好的管理和利用大数据已经成为普遍关注的话题。大数据的规模效应给数据存储、管理以及数据分析带来了极大的挑战。大数据已经成为国内外学术界、业界和应用行业普遍关注的热点研究问题,在国内外掀起了一个空前的研究热潮。专刊选题为“大数据理论、方法和技术”,将突出目前大数据研究中的热点技术,如大数据科学基础理论、大数据存储与管理、大数据分析等等。

本专刊将收录国内外大数据研究领域中具有创新性和突破性的高水平研究成果,深入探讨其理论、方法与技术。专刊将于 2014 年第 4 期出版,读者群体包括数据库、数据挖掘、机器学习、体系结构、统计学等多领域的研究人员和工程人员等。

专刊题目:大数据理论、方法和技术

特约编辑:孟小峰(中国人民大学)、高宏(哈尔滨工业大学)

欲获知更多信息,请登陆期刊网站: <http://www.jos.org.cn>

软 件 学 报

Ruanjian Xuebao

(月刊, 1990 年创刊)

第 24 卷 第 8 期 2013 年 8 月

Journal of Software

(monthly)

(Started in 1990)

Vol.24 No.8 August 2013

编 辑 《软件学报》编辑部
(北京 8718 信箱 邮编 100190)
电话: 010-62562563
E-mail: jos@iscas.ac.cn
<http://www.jos.org.cn>

主 编 李明树

主办单位 中国科学院软件研究所 中国计算机学会

主管单位 中国科学院

出 版 **科 学 出 版 社**
(北京东黄城根北街 16 号 邮编 100717)

印 刷 北京北林印刷厂

总发行处 北京报刊发行局

订 购 处 全国各地邮局

国外总发行 中国国际图书贸易总公司
(北京 399 信箱 邮编 100044)

Edited by Editorial Board of Journal of Software
(P.O.Box 8718, Beijing 100190, P.R.China)
E-mail: jos@iscas.ac.cn
<http://www.jos.org.cn>

Editor-in-Chief: LI Ming-Shu

Sponsored by Institute of Software, The Chinese Academy of Sciences (ISCAS) and China Computer Federation

Published by Science Press (16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China)

Printed by Beijing Bei Lin Printing House

Generally Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals

Domestically Distributed by All Local Post Offices in China

Overseas Distributed by China International Book Trading Corporation (P.O.Box 399, Beijing 100044, China)

ISSN 1000-9825

CN 11-2560/TP

国内邮发代号: 82-367

国外发行代号: M4628

©2013 ISCAS (版权所有)

定价: 70.00 元

公 开 发 行

优化光源设置的自适应增强绘制^{*}

王光伟^{1,2}, 王文成¹, 华 淼^{1,2}, 韩红雷^{1,2,3}

¹(计算机科学国家重点实验室(中国科学院 软件研究所), 北京 10090)

²(中国科学院大学, 北京 100049)

³(中国传媒大学 动画学院 游戏设计系, 北京 100024)

通讯作者: 王文成, E-mail: whn@ios.ac.cn, http://lcs.ios.ac.cn/~whn/

摘 要: 增强绘制能够更好地凸显模型的内容, 便于人们的观察和理解. 已有工作主要通过法向调整或依据曲率进行色彩变化, 以加强明暗对比从而突出模型特征. 但这样会扭曲特征的表达, 或者由于细小特征的增强处理导致显示噪音, 因而影响观察效果. 提出了一种光源优化设计的增强绘制方法, 不改变模型的任何几何特征, 并结合模型的层次化组织, 以便根据观察的需求自适应地凸显相应的特征, 且消除细小特征的绘制噪音, 由此能够清晰而准确地显示模型特征, 提高观察效率.

关键词: 光源设计; 层次化组织; 增强绘制; 噪音预防; 科学图解

中图法分类号: TP391 **文献标识码:** A

中文引用格式: 王光伟, 王文成, 华淼, 韩红雷. 优化光源设置的自适应增强绘制. 软件学报, 2013, 24(8): 1885–1897. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4348.htm>

英文引用格式: Wang GW, Wang WC, Hua M, Han HL. Optimizing lighting design for adaptive enhancement rendering. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2013, 24(8): 1885–1897 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/4348.htm>

Optimizing Lighting Design for Adaptive Enhancement Rendering

WANG Guang-Wei^{1,2}, WANG Wen-Cheng¹, HUA Miao^{1,2}, HAN Hong-Lei^{1,2,3}

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

²(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

³(Game Design Department, Animation School, Communication University of China, Beijing 100024, China)

Corresponding author: WANG Wen-Cheng, E-mail: whn@ios.ac.cn, http://lcs.ios.ac.cn/~whn/

Abstract: Enhancement rendering highlights geometric features of models for the viewer to understand them easily. In regards to this, existing methods usually enhance contrast on the features by modifying surface normal or adjusting colors according to curvatures. However, such a treatment may distort the appearances of the features, or lead noises in the rendered images, and therefore, impedes the viewer's understanding of the model. This paper presents a method by optimizing the lighting design for enhancement rendering. It avoids adjusting any geometry information of the model, and can adaptively highlight features by the observation requirements with a hierarchical construction of the model, which also efficiently eliminates the rendering noises from detailed features. Therefore, the rendered images can clearly and exactly highlight features for efficient model understanding.

Key words: lighting design; hierarchical management; enhancement rendering; noise avoidance; scientific illustration

增强绘制是当前计算机图形学方向的一项重要研究内容. 它通过突出表达模型的重要特征来提高人们观察理解的效率. 这方面的工作, 初期主要以非真实感绘制为主, 特别是线绘制技术^[1]. 虽然非真实感绘制能简洁地

* 基金项目: 国家社会科学基金(12AZD118); 国家自然科学基金(60773026, 60833007); 中国科学院知识创新工程领域前沿项目

收稿时间: 2012-07-27; 修改时间: 2012-09-29; 定稿时间: 2012-11-06

表达模型的主要特征,但它简化了材质以及亮度信息的处理,难以有效表达许多重要但尺度较小的特征,不利于关于模型的全面观察了解.近年来,关于真实感绘制的增强处理得到了大家的关注,因为这可以较全面地对模型进行观察.

真实感绘制的增强处理,主要是通过增强特征所在位置的明暗对比度来凸显特征.比如,通过法向调节^[2,3]或对光照计算的规则进行调整^[4-6],可以提高特征的被感知性.但这些方法改变了模型的几何特性,可能会扭曲特征的表达,不利于观察理解.有些方法直接对模型表面的光照量进行调节^[7-10],但这种方式只是进行隐式的增强,难以控制增强效果.而有些方法通过光源设置的调整^[11,12],利用高光或阴影来凸显模型的几何特征,并能较为真实地反映模型的特征.但这些方法在光源设计时要考虑视点的信息,每当观察视点改变时,优化过程要重新进行计算,影响了绘制速度.另外,这些增强绘制的方法大多是基于局部特征进行计算的,在处理复杂模型时,对过小尺度的特征进行增强可能会产生绘制噪音,由此降低绘制质量,不利于观察理解.为此,有些方法进行了针对性的处理,比如,Exaggerated Shading 算法^[13]对法向进行多尺度的平整,以便进行自适应的增强处理.但其对法向进行平整,改变了模型的几何信息,会影响用户对模型的认识.Light warping 算法^[5]和 Radiance Scaling 算法^[6]根据曲率进行增强,并为了自适应地处理,使用视点相关的曲率进行计算,以将过小尺度的特征聚合起来,得到一些大尺度的特征表达.但它们对不同尺度的特征进行相同程度的增强处理,难以突出主要特征的表达,不利于对特征尺度的了解.

本文提出一种新的真实感绘制增强方法,通过光源的优化设计,用阴影来突出表达特征,并使用一种模型的多分辨率层次组织方法,以对各种尺度的特征进行自适应的增强;并且剔除过细特征的绘制噪音,以提高绘制质量.我们的方法主要是利用漫反射量进行增强处理,而漫反射量与视点无关,因此,我们的光源设计可以方便地进行预处理,由此提高模型观察时的绘制效率.

本文第 1 节对相关工作进行简要介绍和讨论.第 2 节介绍模型的层次化组织.第 3 节介绍增强绘制方式.第 4 节给出实验及讨论.最后,第 5 节对算法进行总结.

1 相关工作

近期的增强绘制技术主要是基于真实感绘制的.根据增强绘制的处理方式,它们可以分为 4 类:基于法向调节的、基于光照计算规则调整的、直接调节光照量的和调整光源的.此外,还有一些方法探讨了多尺度特征的适应性增强绘制,我们在下面对它们分别进行讨论.

• 基于法向调节的方法

Cignoni 等人^[2]提出通过修改法向场来扩大高频区域、提高几何不连续性,以突出特征.Miao 等人^[3]提出根据特征的显著性来更改模型表面法向的朝向,以增强视觉显著性程度较强的区域,进行自适应的增强.这种调节方式改变了模型特征的几何属性,会扭曲特征的表达,影响用户对模型的认知.

• 基于光照计算规则调整的方法

Kindlmann 等人提出了基于平均曲率的渲染算法^[4],可以得到类似铅笔画的增强绘制结果.Light Warping 算法^[5]通过拉伸或压缩模型中曲率较大部分的入射光线,改变其亮度,以达到增强特征的效果.Radiance Scaling 算法^[6]在绘制时引入一个亮度缩放公式,根据模型的材质与曲率对亮度进行缩放,以此达到增强特征表达的效果.由于这种调整方式改变了光照计算的规则,会影响人们关于模型的观察理解.

• 直接调节光照量的方法

3D unsharp masking 算法^[7]首次将图像处理中的 unsharp masking 技术应用在 3D 模型上,直接对模型表面亮度进行调节,以提高明暗对比度进行增强绘制.之后,有一系列的后续工作对其参数选择问题进行了研究.比如,Zhang 等人提出了基于感知的形状增强绘制^[8],通过实验确定增强程度,使用户可以高效地认识模型.还有一些算法^[9,10]从另一个角度出发,即在不产生走样的前提下,使用最强的程度进行增强绘制.由于这种方式直接对亮度进行处理,是进行隐式的增强,其增强效果难以控制.

- 调整光源的方法

Lee 等人提出了一种基于光源设计的增强绘制算法^[11],根据模型的曲率、深度以及视点的位置来设计环境光源,尽量使模型表面亮度的变化能够反映其曲率的变化,以突出模型的特征.但该方法使用高光来突出模型的特征,当视点改变时,需要重新对光源进行设计,严重影响了绘制速度.Wang 等人提出了一种基于光源设计的增强绘制算法^[12],使用基于全局以及细节的视觉感知程度函数,通过该函数的最大化处理来进行光源设计,从而达到增强绘制的效果.同样地,这一算法在设计光源时要考虑视点的影响,每当视点改变时,就要重新进行光源设计,难以进行实时的增强绘制.

- 自适应增强绘制方法

Exaggerated Shading 算法^[13]将光源调整和法向调节相结合,利用阴影来进行增强绘制.为了达到多尺度的增强效果,该算法除了为每个顶点指定一个光源以提高其主曲率方向两侧的明暗对比外,还对法向进行多尺度的平整,以得到多尺度的增强结果.但法向的多尺度的平整改变了模型的几何信息,会影响用户对模型的认识.Light warping 算法^[5]和 Radiance Scaling 算法^[6]根据曲率进行增强,并使用视点相关的曲率计算,以对不同尺度的特征进行相同程度的增强绘制,难以突出主要特征的表达,不利于观察认识.

与已有的这些方法相比,本文算法同样通过光源设计的优化,以阴影来进行增强绘制.但我们不改变模型的几何性质,并根据模型的多分辨率表示,选用合适的特征进行增强处理.由此可以较为忠实地反映模型的几何特征,并消除过细特征的绘制噪声,提高绘制质量.该算法主要使用漫反射量进行增强绘制,而漫反射量的计算与视点无关,因此我们可以对光源设置进行预处理,在观察时很好地提高绘制速度,实时地对模型进行增强绘制.

2 层次化组织

模型上的特征有尺度之分,且小尺度的特征一般覆加在大尺度特征上.为了有效地了解模型,这些不同尺度的特征应该得到自适应的增强绘制,以便于了解它们相关的尺度.由于绘制区域的大小是与特征尺度相关的,因此,过细特征的绘制区域会很小,由此变成绘制噪声,使得较大尺度特征的表达不清晰,不利于观察了解.因此,我们需要对模型进行多分辨率的层次化组织,以便根据绘制需求避免处理过细尺度的特征,提高模型特征表达的清晰性.

我们知道,一种尺度的特征一般可由相应尺度的平面片进行拟合表达.因此,我们根据平坦性对模型进行自底向上的多尺度的特征探测和多分辨率的模型构建.具体来说,我们根据面片的法向进行聚类计算,相邻且法向相近的面片将聚集成一个模型块,以表达相应尺度的特征;并且,较小尺度的模型块逐步地迭代生成更大尺度的模型块,以形成模型的多尺度表达.

为便于根据法向信息对模型块进行聚类计算,我们为每个模型块生成一个代表法向.根据文献[14]的讨论,每个面片的特征能够通过以它为中心的两圈面片的法向综合情况进行表达.于是,我们为每个模型块生成其代表法向的计算如下:

- 1) 对同尺度的各个模型块,求其初始代表法向 sn_i ,即该模型块中所有面片的法向平均值;
- 2) 对一个模型块,找到以它为中心的两圈同尺度的模型块,将这些模型块的初始代表法向进行加权平均,就为该模型块的代表法向 pn .其计算公式是:

$$pn_k = \sum_{i \in U_k} \frac{f_i}{\sum_{j \in U_k} f_j} sn_i \quad (1)$$

其中, k 为当前模型块, U_k 为当前模型块以及其周围两圈模型块所组成的集合, f 为一个模型块所含的面片个数, $f_i / \sum_{j \in U_k} f_j$ 为模型块 i 的权值.

如图 1 所示,在计算中间黑色模型块的代表法向时,需要考察它周围两圈同尺度的模型块,即以细条纹和粗条纹填充的模型块.

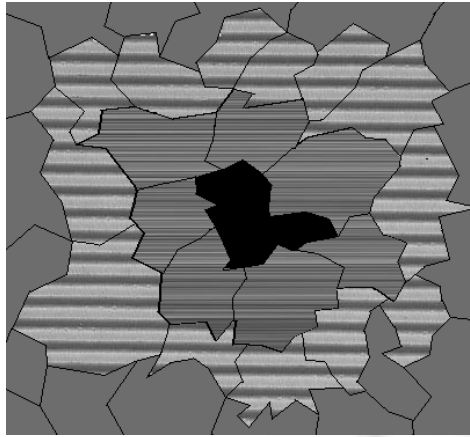


Fig.1 Representative normal of a patch

图 1 模型块的代表法向

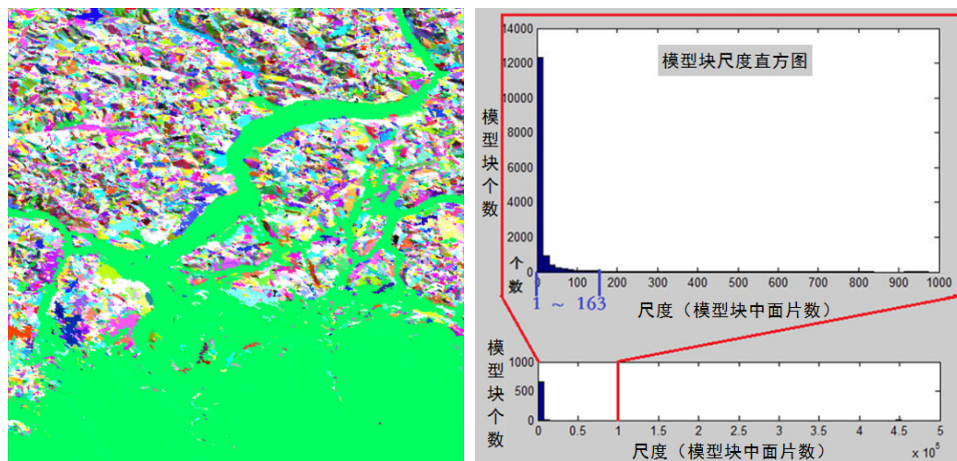
在本文的实现过程中,根据面片形成最基本的模型块时,我们随机地采样一些面片作为种子,再逐步地考察种子周围的面片进行扩展.在此,要求所加入的面片的法向与相关种子面片的法向夹角不大于一定的夹角阈值.如果各个种子不能再扩展了,而模型中还有面片,则生成新的种子进行进一步的扩展,直到所有面片被聚类成了最基本的模型块.最基本的模型块主要反映模型的细节特征,因此它们要尽可能地平整.但在进行这种聚类计算时,如果夹角阈值太小,则所生成的模型块会很小,不利于观察.经过大量的实验分析,选择夹角阈值为 10° 一般能得到较好的结果,因此本文的实验中都选择 10° 夹角阈值.在对模型块进行聚类时,是根据它们的代表法向用相似的方式进行聚类处理,只是在聚类时使用较大的夹角阈值,这是因为模型块所对应的特征通常具有较大的差异.经过实验分析,本文一般选取 15° 作为其夹角阈值对模型块进行聚类计算,其结果都比较好.

在对模型进行多尺度的层次化组织时,我们希望该组织中的层次可与特征的尺度进行较好的对应,以便于根据观察距离选择合适尺度的特征进行加强绘制.为此,在最基本的模型块生成后,我们对一个层次的模型块进行尺度度量,找到该层次模型块的主导尺度(即这些尺度下的特征占了很大的比例),然后根据主导尺度的特征进行进一步的聚类计算,形成上一层次更大尺度的模型块.在这个聚类过程中,有 3 种情况要做特别的处理,介绍如下:

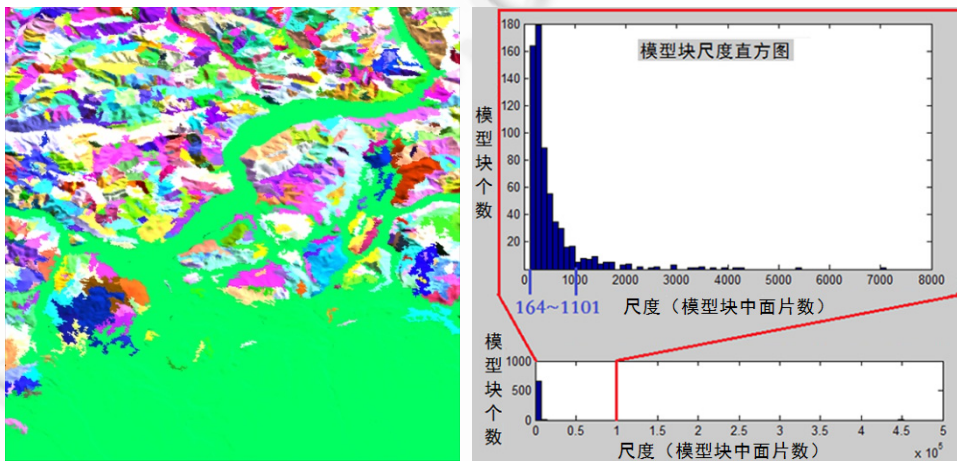
- 1) 对于尺度大于该层次主导尺度的模型块,将它作为一个单独的聚类,因为它当属于更大尺度的特征.
- 2) 对于尺度小于该层次主导尺度的模型块,则当属于主导尺度的模型块聚类完成后,寻找与其代表法向最相近的聚类,并加入到该类中.
- 3) 当主导尺度的模型块聚类完成后,有一些类的尺度可能依然位于该层次的主导尺度范围内.我们将这样的类取消,并将该类中的模型块根据法向和邻接关系加入到其他类中.

模型块的尺度度量以模型块所含的面片个数进行,这是因为用以拟合一个模型的面片一般具有类似的大小.于是,对于一个层次的模型块,我们先统计各个模型块各自有多少面片,然后统计有某个数目的面片的模型块个数.如果包含某个数目的面片的模型块很多,则可认为这样的模型块是该层次的主导尺度的模型块.具体来说,我们形成关于含某个数目的面片的模型块的统计直方图,然后找到统计曲线最高点,并从该点开始沿着统计曲线向左右两边搜索,直至形成一个区间,使得该区间的尺度对应的模型块总数占该层模型块数目的大部分,则将该区间对应的尺度当作该层次的主导尺度.具体来说,在实验中我们发现,统计直方图中模型块的分布较为集中,过大以及过小的模型块通常不超过 10%.所以,本文工作实现时,当一个区间的尺度对应的模型块总数接近该层次模型块数目的 90% 时,即将该区间对应的尺度当作该层次的主导尺度.如图 2 所示(左图为各层模型块分布图,右图为对其尺度进行分析的统计直方图),第 1 层次的主导尺度的模型块含有 1~163 个面片,第 2 层次的主导

尺度的模型块含有 164~1 101 个面片.



(a) 第 1 层分块情况及模型块尺度直方图



(b) 第 2 层分块情况及模型块尺度直方图

Fig.2 Detecting the dominate scales respectively in the hierarchical layers

图 2 各层次模型块的主导尺度的探测计算

3 增强绘制

本文算法在进行增强绘制时只使用漫反射光照而不使用镜面反射、折射、高光等光照效果.这是因为漫反射主要与模型表面法向相关,能够较好地反映模型的几何特征;而镜面反射、折射、高光等光照效果会遮掩或扭曲几何特征的视觉表达,不利于用户对模型几何特征的观察了解.在光源方面,我们采用增强光源和视点光源相结合的绘制方式.增强光源用于在模型中制造阴影以突出其特征.为了对不同尺度的细节进行增强,我们为模型的层次化组织结构中的每一个非叶子节点对应的模型块设计一个增强光源.由于增强光源会使一部分可见面片一直处于阴影之中,不利于对模型进行全面观察,我们增加视点光源进行绘制,即有一个光源是位于观察视点的.在增强绘制时,我们根据观察距离选择合适尺度的特征进行加强,并根据这些特征关联的模型块对应的增强光源以及视点光源分别进行绘制,然后进行加权的合并,以得到最终的增强绘制结果.下面,我们对光源设计和绘制图像的合并计算分别进行讨论.

3.1 增强光源的设计

本文的增强光源设计受 Exaggerated Shading 算法^[13]的启发,即用入射角较大的平行光光源来制造阴影以突出特征.具体来说,算法为各个非底层模型块设计一个光源,以增强其子模型块对应特征的显示.其原因是,对于任意一个非底层模型块,其各个子模型块处于大致同一平面上,并且相邻子模型块的法向存在一定的差异,所以算法对其设计一个入射角较大的平行光光源,可使一部分子模型块处于阴影之中,从而提高子模型块之间的明暗对比,突出子模型块对应的特征.另外,在我们的模型层次化组织中,多分辨率的层次与模型块的尺度进行了很好的对应,因此,一个模型块的子模型块具有相近的尺度,不会产生较大块的阴影从而遮挡过多的特征.

本文设计增强光源时主要遵循两个原则:

- (1) 光源有较大的入射角以制造阴影;
- (2) 相邻模型块之间以及父模型块和子模型块之间有着相似的光源方向,以防止方向差异较大的阴影妨碍特征的增强显示.

根据以上原则,本文使用球面坐标系进行光源设计.如图3所示(模型块的法向即为球面坐标的 z 轴),我们以模型块的中心为坐标系原点,使用模型块的代表法向作为球面坐标系的 z 轴正方向,而 x 轴、 y 轴的选择不影响光源设计结果.从图3中可以看出,光源方向在球面坐标系中的天顶角即此光源的入射角.根据原则(1),我们将这一角度设为某个固定值(此角度可调,我们在实验中一般使用 75° ,得到的结果都比较好).根据原则(2),在计算光源的方位角时,我们先根据大的模型块的代表法向,找到与其垂直的一个方向作为对应该模型块及其子模型块的大致光源方向,然后计算该大致光源方向在正处理模型块的局部球面坐标系中的方位角,即正处理模型块对应增强光源的方位角.

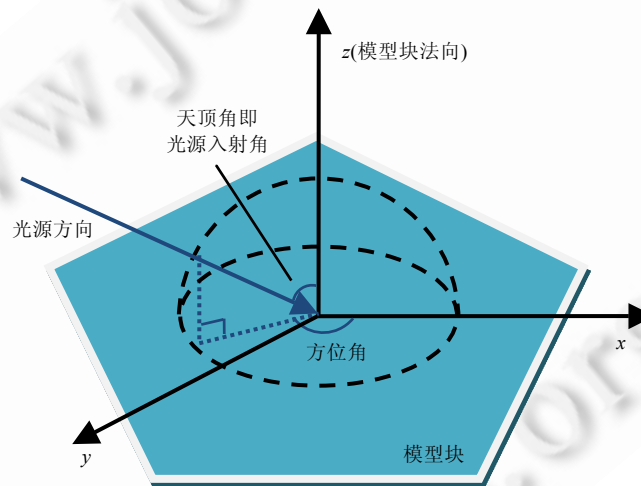


Fig.3 Spherical coordinates of a patch

图3 模型块对应的球面坐标

为了保证模型中相邻部分对应的增强光源的方位相差不大,以避免不同趋向的阴影妨碍特征的突出显示,我们以如下的方式来确定各模型块的大致光源方向:首先,我们根据模型的包围球生成上下左右前后6个大致光源方向,这些方向都是与球面相关位置处的法向垂直的(一般而言,包围球某处位置的法向与它最近的模型部分的主体法向是比较接近的);然后,对于一个模型块,将其以包围球的中心进行中心投影,映射到球面上,根据其在球面上的投影位置找到附近的3个先确定的大致光源方向,进行线性插值,以得到该模型块的大致光源方向.不失一般性,我们以一个二维的例子进行说明.如图4所示,我们先确定包围圆的上下左右4个大致光源方向, D_a, D_b, D_c, D_d ,然后根据模包围球的中心 O 对模型块 AB 的中心点 P 进行中心投影,最后根据其投影 P' ,使用附近的先确定的方向光源 D_b 和 D_c 进行线性差插值得到其大致光源方向 D_p .

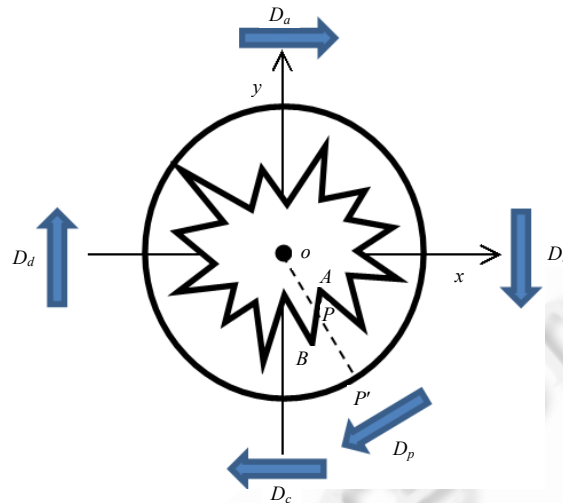


Fig.4 The steps for determining the main light direction for a patch

图4 模型块的大致光源方向确定步骤

3.2 加权绘制

为使绘制的图像便于用户对模型进行观察,我们根据视点 to 模型的距离选择合适尺度的特征进行加强绘制;对于过小或过大尺度的特征,则省略关于它们的绘制.于是,我们对模型的各个部分只选用合适尺度的特征进行绘制.在选择合适的特征尺度时,如果一个尺度的特征在屏幕上的投影面积不大于一个像素,则认为它过小;如果它的投影面积大于图像显示窗口,则认为它过大;对于其他情况,则认为这样尺度的特征是值得增强绘制的.

对于合适尺度的一个模型块,我们只根据它对应的增强光源对其进行光照计算,而不使用其他模型块对应的增强光源.当然,视点光源在所有模型块的光照计算时都是要使用的.

对于模型的某个部分而言,可能它相关的多个尺度的特征都是适合绘制的.由于它们对应模型的同一部分,因此需要对它们的绘制结果进行合并.在合并它们的结果时,其权值大小是与它们在屏幕上的投影相关的.这是因为用户对一个尺度特征的观察兴趣,会在某个投影面积大小时达到最大,而投影面积较小或较大时,相应的观察兴趣会逐渐地减弱.为使这种权值变化比较平滑,以使相应特征的视觉感知变化不太剧烈从而有利于观察,我们使用二次函数设计了权值计算公式(2),如图5所示.其中,横轴为特征对应的模型块在屏幕上的投影面积,纵轴为特征对应的增强权值, S_c 为图像窗口的面积; b 为公式中的对称轴相应的投影面积,即具有最大观察兴趣时的投影面积(本文是假设投影面积为图像窗口面积一半时具有最大观察兴趣,而这可根据实践情况进行调整).

$$w = \begin{cases} 0, & s < 1 \\ 1 - a(s - b)^2, & 1 < s < S_c, \quad a = \frac{4}{1 - S_c^2}, \quad b = \frac{S_c + 1}{2} \\ 0, & s > S_c \end{cases} \quad (2)$$

其中, s 为该特征对应的模型块在屏幕上的投影面积, S_c 为图像显示窗口的面积.

相对于增强光源计算权值时,由于各个层次的主导尺度模型块具有类似的大小,所以我们可为同一层次的模型块计算一个共享的权值,以节省计算开销.由于各个模型块的朝向不同,会导致它们的投影面积有较大的差异,因此,我们将同一层次的主导尺度的可见模型块的投影面积取平均值,以计算其权值.

对于视点光源而言,它将参与各个可见面片上的光照计算.因此,对于各个面片上关于视点光源的光照计算结果的合成权值,我们将计算一个统一的共享值,以节省计算.在用公式(2)计算该值时,我们使用所有可见面片的平均投影面积.

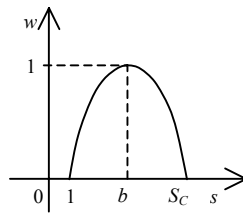


Fig.5 Curve for the weight function

图 5 权值公式的函数曲线图

由于本文使用漫反射光源对模型进行增强绘制,所以增强绘制结果与视点无关.为此,本文将增强绘制结果放在预计算中进行以提高绘制速度.具体来说,在各层次模型块的增强绘制结果中,本文为相关的每个面片计算一个亮度并存储,这一亮度即为其 3 个顶点在相应增强结果中的亮度的平均值.如图 6 所示,图中圆点部分表示面片 3 个顶点的亮度,本文计算其平均值作为面片的亮度; w_i 表示各层增强结果以及视点光源绘制结果的权值;在绘制时,根据所选择尺度的相应增强绘制结果与使用视点光源的绘制结果进行加权合并.比如,图 6 中我们使用第 2 层、第 3 层尺度的特征进行处理,而不包括顶层的增强绘制结果.由于本文在预计算时仅以面片为单位存储了增强绘制结果,因而会导致视点较近时结果图像中增强部分较为粗糙,但由于此时增强部分的权值较小,主要以视点光源的绘制结果为主,而这一结果是在绘制时进行计算的,所以能够保证最终结果图像比较细腻.存储预计算的数据需要一定的内存开销,为了减少这一开销,本文在对模型进行层次化组织时,在每一层尽可能地包含更多尺度的模型块,由此减少层次数.本文实验中,对所有模型均使用 3 个层次,而绘制结果都不错.

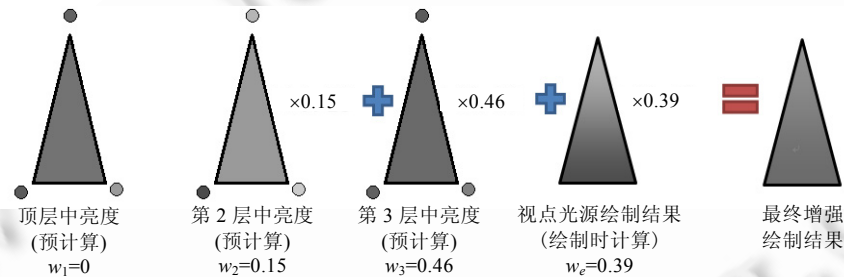


Fig.6 Combination computation for enhancement rendering

图 6 增强绘制的合并计算

3.3 平滑模型块的处理

本文算法使用大致平整的模型块组织各尺度的特征,这样会将一些平滑但弯曲较大的区域分开,导致增强结果中出现明显的边界.如图 7 所示,图 7(a)为模型某一层的分块结果,方框中一些较平滑的部分被分割开;图 7(b)为这一层的增强绘制的结果,从方框中的部分可以看出,在模型块相邻处具有明显的色彩差异.针对这一问题,本文首先寻找模型中的平滑区域,然后使用多个光源调整平滑区域的亮度以消除边界.平滑区域即模型上一系列相连通的面片,区域中任意两个相邻面片之间的法向差异较小.得到平滑区域后,在对某一模型块进行增强绘制时,首先使用其对应的光源进行绘制,然后寻找与其在同一层并且处于其所在平滑区域内的所有模型块,使用这些模型块对应的光源重新绘制非阴影部分.这样既保留了模型块中的阴影以保证增强效果,又消除了由于亮度差异而出现的过大色彩差异.模型中的平滑区域如图 7(c)所示,使用以上方式的绘制结果如图 7(d)所示.比较图 7(b)和图 7(d)中的方框部分可以看出,改进后的算法消除了平滑区域中模型块之间的过大色彩差异;而对比图 7(b)和图 7(d)中椭圆之中的部分表明,改进后的算法很好地保留了模型块上的阴影.平滑区域的探测较为简单,即随机选择面片建立聚类,然后考察周围的面片进行扩展.在此,要求所加入的面片和聚类中某一面片相

邻,并且两者的法向夹角小于一个较小的夹角阈值.如果各个聚类不能再扩展了,而模型中还有面片,则生成新的聚类进行进一步的扩展,直到所有面片都属于某一平滑区域.一般而言,夹角阈值过小,不利于平滑区域的探测;夹角阈值过大,又会使许多原本需要增强的特征被淡化.鉴于平滑区域探测的目的和建立基本模型块的目的较为相似,都是为了将法向相近的面片聚类到一起,得到不包含明显特征的区域,所以本文沿用建立基本模型块时的夹角阈值,即 10° .

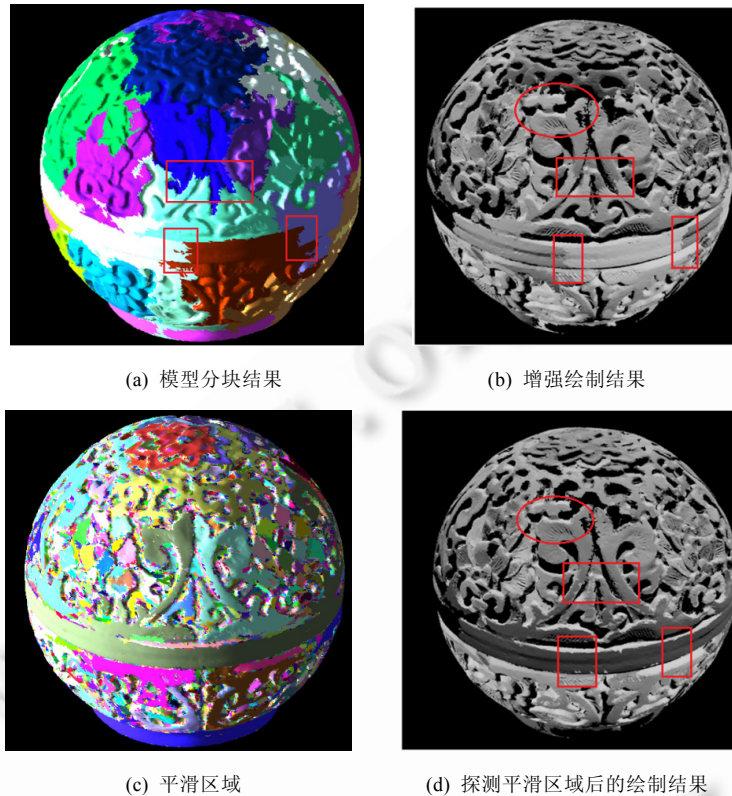


Fig.7 Strategy for enhancement rendering of smooth regions

图 7 对平滑区域的处理

4 实验与讨论

本文所有实验均在一台联想 M8300t 微机上进行,该机装有一个 8 核 3.40GHz Intel Core i7-2600CPU,4G 内存.本文使用地图模型(161k 面片)和球浮雕模型(140k 面片)进行测试.当视点由近及远时,普通绘制结果(使用视点光源进行绘制)和本文算法的增强绘制结果如图 8 所示.图中方框部分为模型上的同一片区域,用以表示算法的自适应性.在地图模型中,当视点较近时,方框中存在着大量零散的阴影,突出了其中的凹凸变化,即小尺度特征;当视点逐渐拉远时,方框中出现了大块的阴影,并且逐渐加深,在逐渐加强对山脊这一较大尺度的特征的增强程度的同时,也遮盖住了山脊上的凹凸,对小尺度细节的增强程度逐渐减弱.在球浮雕模型中,当视点较近时,方框中两排细小的凹陷可以观察得很清楚,而横向较大凹陷的上侧有着较淡的阴影;当视点居中时,两排细小凹陷的亮度和周围区域的亮度很相近,而横向凹陷上侧的阴影加重,下侧则较亮,有效地突出了这一中尺度特征;当视点较远时,两排细小的凹陷已经无法观察,横向凹陷的上侧和下侧都处于较淡的阴影当中,增强不是很明显,但整个模型一半处于阴影之中,突出了模型的整体特征.表明当视点由近及远时,算法对小尺度特征的增强程度逐渐减弱,对中尺度特征的增强程度先增后减;并且在视点较远时,能够突出模型的整体特征.

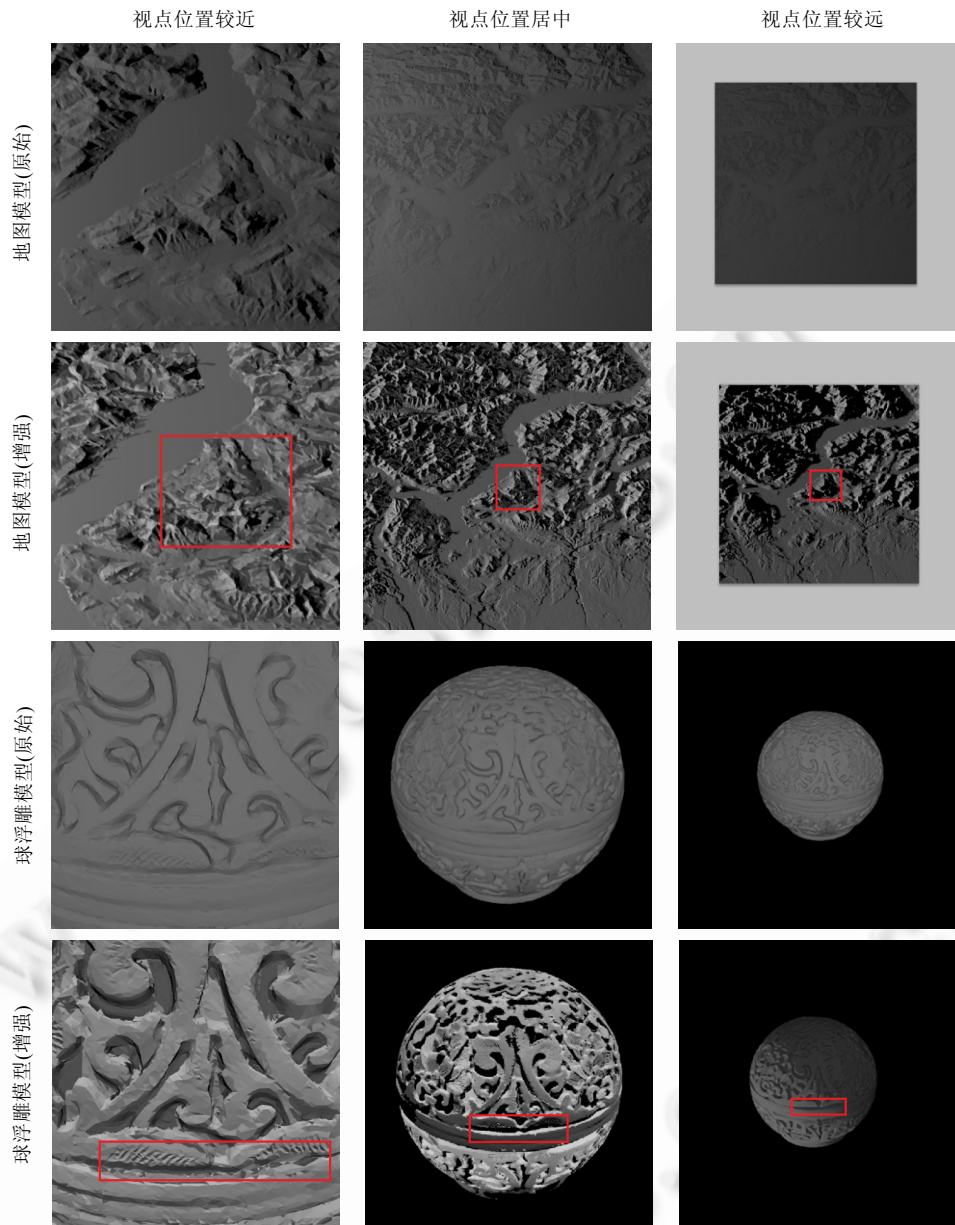


Fig.8 Results of enhancement rendering the terrain model and the relief sphere model

图8 对地图模型和球浮雕模型的增强绘制结果

本文使用地图模型和 Exaggerated Shading 算法^[13]以及 Radiance Scaling 算法^[6]进行对比实验.这两种算法都能进行自适应增强绘制,其中,Exaggerated Shading 算法需要使用多个尺度对法向进行平整以对较大尺度的特征进行增强.我们在实验中使用 10 个尺度(原文在实验中使用 8~13 个尺度).同时,该算法在绘制时需要多个参数进行手工调节,如对比度、增强细节的尺度等,无法进行自动化的处理.

4.1 增强效果的比较

3 种算法的增强绘制结果如图 9 所示.

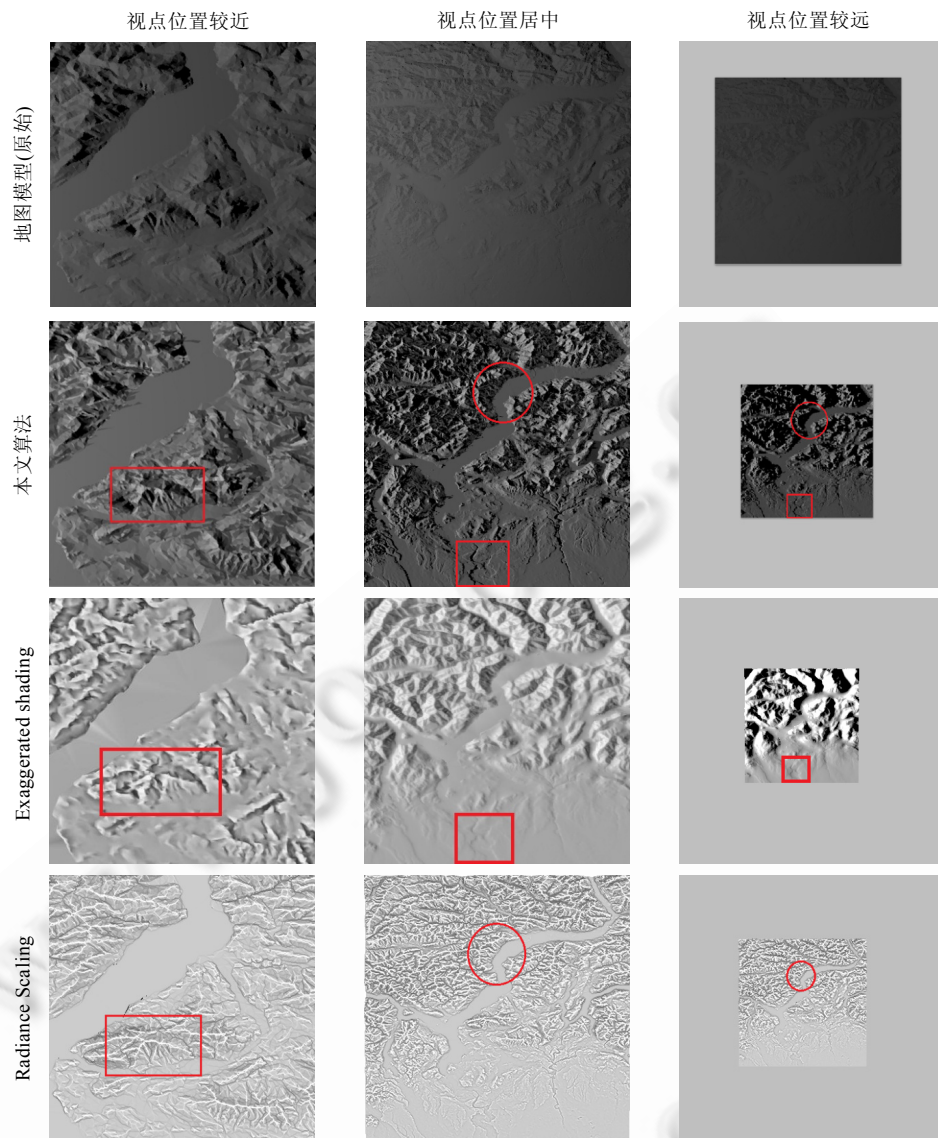


Fig.9 Comparison between our method and the other two methods with Exaggerated Shading or Radiance Scaling

图9 本文算法和 Exaggerated Shading 算法以及 Radiance Scaling 算法的增强绘制结果比较

观察视点较近时各种算法的结果图像,从方框中的部分可以看出:本文的结果清晰地表现出了模型上的特征,并且一些尖锐的特征也被真实地表现出来;而 Exaggerated Shading 算法的增强结果中,一些小的特征被平整掉了,并且一些尖锐的特征也显得较为平滑;Radiance Scaling 算法在曲率大的地方用较亮或较暗的线条来进行增强,遮盖住了尖锐的特征,不利于正确地认识模型.这表明,本文方法可以很好地增强特征表达.

当视点居中以及较远时,本文与 Exaggerated Shading 算法制造的阴影较为相似,都能达到自适应的增强效果.但观察方框中的部分可以看出,Exaggerated Shading 算法对区域中较浅的细节增强效果较差,这是因为该算法对法向进行平整,将较浅的特征平整掉了.而本文算法没有对法向进行任何处理,可以对其进行有效的增强.比较本文算法与 Radiance Scaling 算法绘制结果圆圈中的部分可以看出:在本文算法的增强结果中,山脊一面存在阴影且随着视点的拉远而加深,由此能够有效地突出山脊这一较大尺度特征;而 Radiance Scaling 算法使用较

亮的线条突出这一特征,当视点较远时线条有所加宽,但由于算法对不同尺度的特征进行相同程度的增强,这一区域中存在大量的线条,导致无法有效地突出山脊这一大尺度特征.因此,本文方法能够更好地进行自适应的增强绘制处理.

4.2 绘制效率的比较

3 种方法的绘制速度以及预计算的时间和空间开销见表 1.

Table 1 Rendering efficiency for the three methods in comparison

表 1 3 种算法绘制效率的对比

		本文算法	Exaggerated Shading 算法	Radiance Scaling 算法
地图	预计算时间开销(s)	2.5	6.2	—
	预计算空间开销(MB)	0.46	5.85	—
	绘制速度(fps)	163.9	78.6	161.2
球浮雕	预计算时间开销(s)	7.7	10.4	—
	预计算空间开销(MB)	0.40	5.06	—
	绘制速度(fps)	181.8	106.8	180.2

首先与 Exaggerated Shading 算法相比较,本文算法和 Exaggerated Shading 算法都是分层进行处理,但是本文算法的预计算时间开销与空间开销都较小,并且绘制速度也要快于 Exaggerated Shading 算法.这是因为本文算法在组织模型特征时能够使用较少的层次组织结构,如图 10 所示.图 10(a)为本文算法在视点较远时的增强结果,图 10(b)、图 10(c)为 Exaggerated Shading 算法仅对模型中大尺度的特征进行增强的结果.比较图中方框中的部分可以看出:Exaggerated Shading 算法至少需要对法向进行 10 个尺度的平整才能对方框中较大尺度的特征进行增强(一般要进行 8~13 个尺度的平整才有较好的结果^[13]);而本文算法使用 3 个层次组织模型上的特征就能有效地对方框中较大尺度的特征进行增强.与 Radiance Scaling 算法相比,本文算法绘制速度稍快一些,这是因为本文算法将光源优化设计以及增强绘制都放在预计算中进行,可节省 Radiance Scaling 算法中在屏幕空间计算视点相关的模型曲率的开销.当然,在屏幕空间计算视点相关的模型曲率的开销,在整个绘制时间中所占比率不高(我们的实验中大约占 2%),因此加速效果不是很明显.

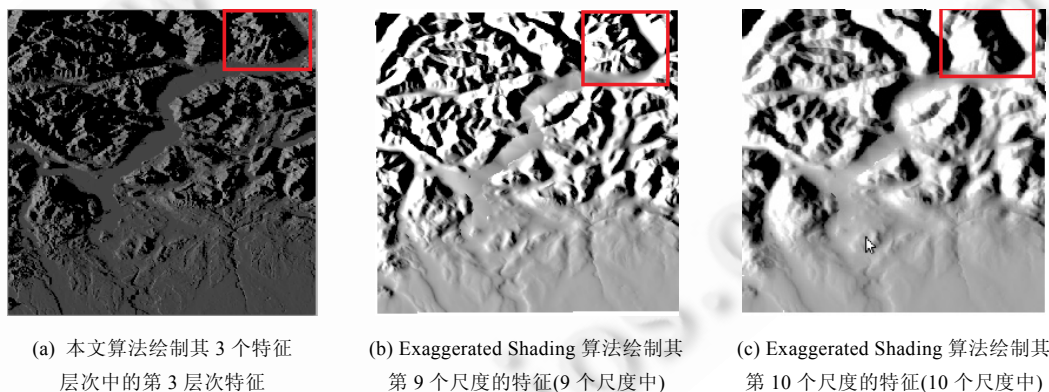


Fig.10 Results of enhancement rendering large-scale features using our method and the method with exaggerated shading

图 10 本文算法和 Exaggerated Shading 算法对大尺度特征的增强结果

Exaggerated Shading 算法至少需要对法向进行 10 个尺度的平整才能增强方框中较大尺度的特征,而本文算法仅需要进行 3 个尺度的处理.

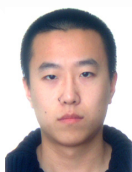
5 总 结

本文提出了一种基于光源优化设计的自适应增强绘制算法.通过模型的多分辨率的层次化组织,该方法可

根据观察需求自适应地选择合适尺度的特征进行增强绘制,以减少过小或过大特征对绘制结果的干扰.同时,该方法的增强绘制不对模型的几何信息进行改变,可以更真实地反映模型的特征.实验结果表明,与已有方法相比,该方法的增强结果更加真实、清晰,并且具有较小的空间开销和较快的绘制速度,可以实时地处理中等规模的模型.总之,该方法能够更好地提高用户观察模型的效率.

References:

- [1] Saito T, Takahashi T. Comprehensible rendering of 3-d shapes. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, 1990,24(4):197–206. [doi: 10.1145/97879.97901]
- [2] Cignoni P, Scopigno R, Tarini M. A simple normal enhancement technique for interactive non-photorealistic renderings. *Computer & Graphics*, 2005,29(1):125–133. [doi: 10.1016/j.cag.2004.11.012]
- [3] Miao Y, Feng J, Pajarola R. Visual saliency guided normal enhancement technique for 3d shape depiction. *Computer & Graphics*, 2011,35(3):706–712. [doi: 10.1016/j.cag.2011.03.017]
- [4] Kindlmann G, Whitaker R, Tasdizen T, Möller T. Curvature-Based transfer functions for direct volume rendering: Methods and applications. In: Greg T, Jarke JW, Robert M, eds. *Proc. of the IEEE Visualization 2003*. Seattle: IEEE Press, 2003. 513–520. [doi: 10.1109/VISUAL.2003.1250414]
- [5] Vergne R, Pacanowski R, Barla P, Granier X, Schlick C. Light warping for enhanced surface depiction. *ACM Trans. on Graphics*, 2009,28(3):Article 25. [doi: 10.1145/1531326.1531331]
- [6] Vergne R, Pacanowski R, Barla P, Granier X, Schlick C. Improving shape depiction under arbitrary rendering. *IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics*, 2011,17(8):1071–1081. [doi: 10.1109/TVCG.2010.252]
- [7] Ritschel T, Smith K, Ihrke M, Grosch T, Myszkowski K, Seidel H. 3D unsharp masking for scene coherent enhancement. *ACM Trans. on Graphics*, 2008,27(3):Article 90. [doi: 10.1145/1399504.1360689]
- [8] Zhang X, Chen W, Fang J, Wang R, Peng Q. Perceptually-Motivated shape exaggeration. *The Visual Computer*, 2010,26(6): 985–995. [doi: 10.1007/s00371-010-0431-4]
- [9] Ihrke M, Ritschel T, Smith K, Grosch T, Myszkowski K, Seidel H. A perceptual evaluation of 3d unsharp masking. In: Rogowitz BE, Pappas TN, eds. *Proc. of the Human Vision and Electronic Imaging XIV*. San Jose: Society of Photo-optical Instrumentation Engineers, 2010. [doi: 10.1117/12.809026]
- [10] Trentacoste M, Mantiuk R, Heidrich W, Dufrot F. Unsharp masking, countershading and halos: Enhancements or artifacts? *Computer Graphics Forum*, 2012,31(2):555–564. [doi: 10.1111/j.1467-8659.2012.03056.x]
- [11] Lee CH, Hao X, Varshney A. Geometry dependent lighting. *IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics*, 2006,12(0): 197–207. [doi: 10.1109/TVCG.2006.30]
- [12] Wang L, Kaufman AE. Lighting system for visual perception enhancement in volume rendering. *IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics*, 2012,91(1):67–80. [doi: 10.1109/TVCG.2012.91]
- [13] Rusinkiewicz S, Burns M, Decarlo D. Exaggerated shading for depicting shape and detail. *ACM Trans. on Graphics*, 2006,25(3): 1199–1205. [doi: 10.1145/1179352.1142015]
- [14] Lee CH, Varshney A, Jacobs D. Mesh saliency. *ACM Trans. on Graphics*, 2005,24(3):659–666. [doi: 10.1145/1073204. 1073244]



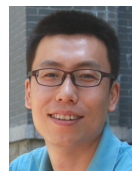
王光伟(1987—),男,辽宁朝阳人,博士生,主要研究领域为实时真实感绘制,非真实感绘制.
E-mail: wanggw@ios.ac.cn



王文成(1967—),男,博士,研究员,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,可视化计算.
E-mail: whn@ios.ac.cn



华淼(1987—),男,博士生,主要研究领域为图像处理,真实感绘制..
E-mail: huam@ios.ac.cn



韩红雷(1980—),男,博士生,讲师,主要研究领域为计算机图形学,计算机动画.
E-mail: hanhonglei@sina.com