

Journal of Image
and Graphics

中国图象图形学报



ISSN1006-8961
CN11-3758/TB

2012 9
Vol.17 No.

中国科学院遥感应用研究所
中国图象图形学学会主办
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

Zhongguo Tuxiang Tuxing Xuebao

2012年9月 第17卷 第9期(总第197期)

目次

图像处理和编码

- 自适应阈值 HMRF 模型超分辨率重建 朱虹, 刘薇, 姚杰, 欧阳光振, 刘小乾(1049)
- 亮度补偿变换矩阵的颜色恒常性算法 袁兴生, 王正志(1055)
- 小波变换和稀疏冗余表示的混合图像去噪 李慧斌, 刘峰(1061)
- 基于运动信息自适应的快速运动估计算法 李子印, 杨齐(1069)
- 融合纹理特征的两阶段聚类分割算法 王改华, 李德华(1075)
- 利用纹理和边缘特征的 Criminisi 改进算法 任澍, 唐向宏, 康佳伦(1085)

图像分析和识别

- 激光焊接对接拼缝测量的微景深方法 王平江, 黄雅婷, 齐江飞, 彭芳瑜, 李斌, 唐小琦(1092)
- 基于码本模型和多特征的早期烟雾检测 姜明新, 王洪玉, 蔡兴洋(1102)
- 结合局部特征和全局信息的自适应活动轮廓模型 朱晓舒, 孙权森, 夏德深(1109)
- 高斯颜色模型在瓷片图像分类中的应用 郑霞, 胡浩基, 周明全, 樊亚春(1115)
- 区域生长的轮对图像分割 史倩, 吴开华(1122)
- 图像搜索结果的滑动窗口多标记传播聚类 谷瑞军, 陈圣磊, 陈耿, 汪加才(1128)

图像理解和计算机视觉

- 中介相似性量度的图像匹配 周宁宁, 吕文杰(1135)
- 自适应字典学习的多聚焦图像融合 严春满, 郭宝龙, 易盟(1144)
- 摄像机几何约束及人体定位 陶霖密, 于亚鹏, 邸慧军, 孙洛(1150)

虚拟现实与增强现实

针对层次式累进网格模型的动态评估与调整 王丹华, 卢威, 潘金贵(1158)

医学图像处理

结合形状与纹理特征的椎间盘退化辅助诊断..... 郝世杰, 蒋建国, 郭艳蓉, 詹曙, 李鸿(1168)

改进的核磁共振图像分割与偏移场恢复耦合模型

..... 王顺风, 冀晓娜, 张建伟, 陈允杰, 方林, 詹天明(1175)

遥感图像处理

光学遥感图像低可观测区域舰船检测 周伟, 关键, 何友(1181)

非下采样 Contourlet 变换与脉冲耦合神经网络相结合的 SAR 与多光谱图像融合

..... 金星, 李晖晖, 时丕丽(1188)

“计算机视觉前沿论坛”专栏征文通知 (1196)

中国图象图形学报

刊名题字: 宋 健

月刊(1996年创刊)

第17卷 第9期

2012年9月16日出版

主管单位 中国科学院

主 办 中国科学院遥感应用研究所

中国图象图形学学会

北京应用物理与计算数学研究所

主 编 李小文

编辑出版 《中国图象图形学报》编辑出版委员会

北京9718信箱 邮编 100101

电子信箱:jig@irsa.ac.cn

电话:010-64807995 010-82614429

网 址:www.cjig.cn

印刷装订 北京北林印刷厂

广告经营许可证 京朝工商广字第0346号

总 发 行 北京报刊发行局

订 购 全国各地邮局

国外发行 中国国际图书贸易总公司

(中国国际书店)

(北京399信箱 邮编 100044)

Superintended by Chinese Academy of Sciences

Sponsored by Institute of Remote Sensing Application,

CAS China Society of Image and Graphics

Institute of Applied Physics and Computational

Mathematics

Chief editor LI Xiaowen

Editor, Publisher Editorial and Publishing Board

of Journal of Image and Graphics

(P. O. Box 9718, Beijing 100101, China)

E-mail:jig@irsa.ac.cn

Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers

and Journals

Domestic All Local Post Offices in China

Foreign China International Book Trading Corporation

(P. O. Box 399, Beijing 100044, China)

Printed by Beijing Beilin Printing House

ISSN 1006-8961 CN11-3758/TB CODE ZTTXFZ 国内邮发代号: 82-831 国外发行代号: M1406 国内定价: 45.00元

Journal of Image and Graphics

(Monthly, Started in 1996)

Vol. 17 No. 9 September 2012

Contents

Image Processing and Coding

- Adaptive threshold HMRF model for super-resolution reconstruction
..... Zhu Hong, Liu Wei, Yao Jie, Ouyang Guangzhen, Liu Xiaoqian(1049)
- Color constancy algorithms with luminance-compensation transform matrix Yuan Xingsheng, Wang Zhengzhi(1055)
- Hybrid image denosing method based on wavelet transform as well as on a sparse and redundant representations model
..... Li Huibin, Liu Feng(1061)
- Fast motion estimation algorithm based on motion information adaptation Li Ziyin, Yang Qi(1069)
- Texture feature fusion-based two-stage clustering segmentation algorithm Wang Gaihua, Li Dehua(1075)
- Improved Criminisi algorithm with the texture and edge features Ren Shu, Tang Xianghong, Kang Jialun(1085)

Image Analysis and Recognition

- Seam measurement based on micro depth of field lens for laser welding
..... Wang Pingjiang, Huang Yating, Qi Jiangfei, Peng Fangyu, Li Bin, Tang Xiaoqi(1092)
- Early smoke detection based on codebook model and multiple features Jiang Mingxin, Wang Hongyu, Cai Xingyang(1102)
- Adaptive active contour model integrating global and local image fitting energy Zhu Xiaoshu, Sun Quansen, Xia Deshen(1109)
- Porcelain shard images classification based on Gaussian color model Zheng Xia, Hu Haoji, Zhou Mingquan, Fan Yachun(1115)
- Image segmentation for wheel set measurement based on region growing Shi Qian, Wu Kaihua(1122)
- Sliding window multi-label propagation clustering for searched images
..... Gu Ruijun, Chen Shenglei, Chen Geng, Wang Jiakai(1128)

Image Understanding and Computer Vision

- Image matching based on the medium similarity measure Zhou Ningning, Lv Wenjie(1135)
- Multi-focus image fusion using adaptive dictionary learning method Yan Chunman, Guo Baolong, Yi Meng(1144)
- Geometric constraints of locating cameras and people Tao Linmi, Yu Yapeng, Di Huijun, Sun Luo(1150)

Virtual Reality and Augmented Reality

- Dynamic evaluation and modification methods against aggressive mesh hierarchy models
..... Wang Danhua, Lu Wei, Pan Jingui(1158)

Medical Image Processing

- Computer aided diagnosis on intervertebral disc degeneration with shape and texture features
..... Hao Shijie, Jiang Jianguo, Guo Yanrong, Zhan Shu, Li Hong(1168)
- Improved coupled model for MR images segmentation and bias restoration
..... Wang Shunfeng, Ji Xiaona, Zhang Jianwei, Chen Yunjie, Fang Lin, Zhan Tianming(1175)

Remote Sensing Image Processing

- Ship detection from low observable regions in optical remote sensing imagery Zhou Wei, Guan Jian, He You(1181)
- SAR and multispectral image fusion algorithm based on pulse coupled neural networks and non-subsampled Contourlet transform
..... Jin Xing, Li Huihui, Shi Pili(1188)

中图法分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2012)09-1158-10

论文引用格式: 王丹华, 卢威, 潘金贵. 针对层次式累进网格模型的动态评估与调整[J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(9): 1158-1167.

针对层次式累进网格模型的动态评估与调整

王丹华, 卢威, 潘金贵

南京大学计算机科学与技术系, 南京 210093

摘要: 针对层次式累进网格模型提出一种动态评估与动态调整的方法, 为交互式变形构建最合理的数据信息。分别从细节层次和规范程度两个角度对网格模型进行评估, 其中细节层次不仅包括由模型位置决定的全局细节层次, 还包括由视锥原则、曲面法向量、屏幕空间几何误差和变形参与度确定的局部细节层次; 规范程度衡量分为流形和定向性确定的拓扑结构规范, 以及由几何元素确定的几何属性规范。依据评估结果, 动态调整模块使用一系列调整操作, 对模型的拓扑结构和几何属性进行修正。实验结果证明该方法能够保证良好的渲染效果, 很好地保持合理的模型拓扑结构, 而且在保证视觉效果和变形需求的情况下具有实时性与自适应性。

关键词: 累进网格; 动态评估; 动态调整; 拉普拉斯平滑

Dynamic evaluation and modification methods against aggressive mesh hierarchy models

Wang Danhua, Lu Wei, Pan Jingui

Department of Computer Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China

Abstract: For progressive mesh models, a method of dynamic evaluation and dynamic modification is proposed to design a reasonable model structure for deformations. The evaluation specifies the levels of detail and mesh regularity and the modification changes of the topological and geometric mesh structure. The global levels of detail for all nodes of the active vertex tree are decided by the view frustum, the surface normal, the screen-space geometric error, and the deformation contribution. Topological regularity is evaluated by geometric properties. A series of modifying operations are used to correct the topological and the geometric mesh structure, where topological modifications include a global pre-construction of a mesh model and real-time adjustments on the local mesh connectivity and geometric modifications using Laplacian smoothing to change the vertex position and to eliminate deformation distortion. Guided by the evaluation results, proper modification is selected for a specified submesh, which guarantees the real-time efficiency and adaptivity. This proposed approach has been applied on progressive mesh models to prove the performance.

Key words: progressive meshes; dynamic evaluation; dynamic modification; Laplacian smoothing

0 引言

交互式变形技术为高级的3维交互技术, 通过

改变3维模型曲面得到多样化的物体模型。随着变形技术研究的深入和在计算机图形系统中的广泛应用, 传统的交互式变形算法已不能满足实际需求, 包括如何提高实时交互性, 如何拟合最优的变形结果,

收稿日期: 2011-06-09; 修回日期: 2011-09-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60473113); 国家自然科学基金重点资助项目(60533080); 南京大学计算机软件新技术国家重点实验室开放课题(KFKT2009A13)

第一作者简介: 王丹华(1982—), 女, 南京大学计算机科学与技术应用技术专业在读博士研究生, 主要研究方向为分布式虚拟环境 and 安全性分析技术。E-mail: wangdanhua6004@163.com

如何进行实时自相交检测和冲突监测,如何动态评估视觉质量等。为了支持实时交互操作,研究学者通常从两个角度对变形技术进行改进:优化变形过程和优化可变形模型。为了对现有的交互式变形技术进行改进,针对层次式累进网格模型提出在实时处理阶段对模型进行动态评估与动态调整的方法,从而为实时交互式动态变形操作构建最合理的数据信息,最终达到优化变形交互效果且提高实时效率的目的。此方法可推广至任何树型结构描述的3维场景模型。

1 相关工作

评价交互式变形方法的一个重要标准是模型特征属性保持,因为模型的某些特征属性是影响变形效果的直接因素,因此变形方法必须考虑在变形过程当中保持这些特征属性不变或者限制这些特征属性在合理变化范围内。在具体实现中,通常采用变形约束来实现这个目的,变形约束的分类方式有很多种,从空间维度出发,变形约束分为点约束、线约束、面约束、体积约束。

点约束作为零维的变形约束,通常是用户定义的控制顶点的坐标值。最基本的点约束是位置约束,用以支持移动控制顶点来改变模型形状。它可以作用在参数曲面上,保持连续性^[1],或是成为梯度域求解系统中的边界条件^[2-3]。另外一种典型的点约束是投影约束,它与位置约束的区别在于它定义的是控制顶点在2维屏幕上的理想位置^[4],更能体现用户的实际操作。

线约束是1维的变形约束,最常用在勾画式或骨骼驱动的变形系统中,可以是用户绘制的变形前后的控制曲线形状,也可以是在创建模型时不可缺少的关键曲线^[5-6],限制曲面形状的变化幅度和变形效果。基于骨骼模型驱动的变形方法通常把曲线看作是骨骼模型中的骨架^[4-7]。

面约束是2维的变形约束,保持模型中面片的相关属性不变。面约束最初应用在2维环境中,控制由曲线包围的区域面积恒定^[8],后来被推广到参数曲面变形中,限制可变形区域的面积在用户定义的范围之内变化,已被应用在模拟建筑设计中^[9]。

体积约束是3维的变形约束,它作为最重要的变形约束之一。对于应用在参数曲面上的自由变形方法,Rappoport等实现了3变量张量积实体的体积

不变^[10],Hirota等则利用多分辨率格结构^[11],把可变形模型限制在格内,消除变形引起的体积畸变。Aubert和Bechmann则提出了变形几何模型编辑器^[12],能够保持空间变形过程中的体积属性不出现畸变。Botsch等使用多分辨率模型方法创建体积单元^[13],但是它只适用于刚性模型且需要额外的优化操作。文献[14]把曲面拉普拉斯算子扩展成为体积拉普拉斯算子,使用最小二乘法最小化体积误差。对于多分辨率编辑方法,Sauvage等使用三线性参数逐层细化低分辨率模型的体积属性^[15],并实现了一种体积保持的变形机制。Zhao等人则构建了一种刚性约束^[16],避免大幅度变形造成的体积畸变。该方法把可变形区域分割成刚性的立方体,从而约束了整体体积的变化。文献[17]创建了体积参数与曲面曲率之间的对应关系,使用隐式方法处理体积属性,并通过改变曲率控制体积变化。

从变形求解方法的角度,变形约束可分为线性约束和非线性约束。

线性约束能够直接应用在线性的最小二乘能量方程中,使用线性梯度域变形求解算子拟合最优的变形结果。显然,点约束是线性约束,可作为拉普拉斯方程或者泊松方程的边界条件^[2],使得特征求解函数不仅描述了网格的几何特征,并且可以直接得到最优特征值,实现光滑的变形效果。Zhou等人线性化了体积约束^[14],将其加入到拉普拉斯方程中,得到保持体积属性的变形结果。Masuda等人利用线性约束对曲面的特殊属性进行处理^[18],例如洞的边界和尖锐的曲线,把用户定义的约束加入到最小二乘变形求解系统中,保持这些属性的刚性特征。此方法被进一步扩展到非流形模型和离散模型中,通过加入线性接近约束保持非流形性和离散性^[19]。

非线性约束不能直接使用梯度域方法进行求解,因为它们会破坏最小二乘法能量函数的线性特征。文献[20]使用刚性约束限制顶点在全局坐标中的相对位置。Huang等人把刚性约束集成到线性求解系统中^[4],保证用户绘制的虚拟骨骼的长度和曲率不变。Shi等人提出了更为严格的刚性约束条件^[7],它把骨骼扩展成为3维的四面体骨骼,保持四面体的每条边长不变。体积约束则是典型的硬性约束,可以分为全局体积约束和局部体积约束:前者针对整个模型进行体积控制;后者则保证局部的体积变化最小,同时保持曲面的几何细节。

2 算法描述

动态评估与动态调整方法实施的前提是已为 3 维场景创建了合理的动态场景结构,作为实时变形和渲染的数据基础,3 维场景是一个 3 维应用的实质性内容,而场景物品的组织是整个系统数据结构的核心。综合考虑渲染效率和变形效果等因素,采用一种树状结构来组织场景中的物品。本文提出的动态评估与调整的方法适用于任何树型结构的虚拟场景模型,只要其满足以下要求:

1) 清晰地描述虚拟场景和其中的 3 维对象,提供一个紧凑的通用的存储结构来存放场景中的所有对象和具体模型的相关信息;

2) 描述全局场景的树状结构能够表示 3 维对象之间的关联关系,例如相互依存或相互作用等。

以层次式累进网格模型为例对动态评估与动态调整方法展开详细描述,即用树型结构描述虚拟环境中 3 维对象之间的关系,并针对复杂的 3 维对象构建由活动顶点树表示的层次式累进网格结构。其构建过程为:首先根据模型的拓扑结构,采用基于 QEM(二次测度误差)的面聚类算法构建层次化网格模型^[21],模型的拓扑结构由对偶图表示:每个节点代表一个三角形面片,节点之间的边表示三角形相邻。聚类过程使用边折叠操作实现,边折叠代价的计算沿用传统的 QEM 思想,采用 3 个误差衡量标准:平面性、方向偏差度和形状规则度,基于这 3 个误差衡量标准计算最终对偶边折叠代价,利用层次式聚类算法创建一棵二叉树。层次式累进网格结构^[22]基于网格模型二叉树,自底向上为每个节点构建一个累进网格,为了保证聚类之间无缝连接,聚类的边界边和边界点相关的边不被折叠,当逐层为内部节点创建累进网格时,执行合并操作以避免重新计算所有折叠边的代价:为新增的折叠边计算折叠代价,其他不受影响的折叠边直接并入父节点的折叠边代价序列中,至此得到层次式累进网格结构。最后以此数据结构为基础,从中选取若干个子网格组成完整模型,并根据环境参数(如视点位置、视场和视锥等)、用户感兴趣区域以及冲突检测范围等相关条件,为每个子网格设定不同的分辨率,构成多细节层次模型。该模型的构建过程自顶向下遍历层次式累进网格结构,根据相关条件和当前节点的几

何信息计算节点在实时变形中的权重:若权重值大于设定阈值,表示当前节点覆盖的网格区域具有高细节层次,则继续遍历其子树;否则说明对应区域可被简化。权重值用于确定子网格的细节层次,最终得到一组具有不同细节层次的子网格模型。高细节层次子网格集中在树的底层,低细节层次子网格位于树的顶端。

2.1 动态模型评估

模型评估方法以动态虚拟场景的层次结构为基础,对虚拟场景中的对象进行评估,以确定其分辨率及实时应用其上的调整操作。需要评估的对象都是复杂的 3 维模型,是虚拟场景中的主体组成部分。对于那些结构简单的模型,只需直接渲染即可。

评估方法包括两个衡量机制:细节层次衡量和规范程度衡量。为了保证评估方法的通用性,需要充分考虑虚拟环境因素和模型特征属性。同时,需要定义一个简洁合理的评估结果,以指导具体的调整操作及调整的具体实施。

2.1.1 细节层次衡量

细节层次衡量是为一个复杂的 3 维模型确定分辨率。由于需要的模型必须同时满足视觉效果和实时变形要求,不同模型的分辨率显然各不一样;同时,模型不同区域的分辨率也可能出现差异。因此,细节层次衡量必须从全局和局部两个层面,确定一个模型的细节层次。全局衡量是对整个模型确定一个全局的细节层次,局部衡量则是为一个模型的各个区域定义不同的细节层次。局部的细节层次衡量包括 3 个方法:视锥剪裁、模型表面法向量和屏幕空间几何误差。

为了规范化定义,用 λ_c 表示全局细节层次评估方案得到的结果即简化模型的三角形数,这个结果将作为对应的网格模型重构操作的输入。在近平面上的模型不需要简化,位于远平面上的模型则实施在合理范围内最大程度的简化;位于虚拟场景中的模型则根据其近平面的距离和整个视锥的深度(即远近平面直接的距离)的比例 γ_r 来确定简化程度。当 γ_r 为 1 时,模型的三角形数等于原始值 t ;当 γ_r 为 0 时,模型的三角形数为最小值 δ ;在其他情况下,模型的三角形数为 $\delta + \gamma_r \cdot (t - \delta)$ 。

当模型的全局细节层次确定之后,以此为基础,使用局部性衡量方法调整一个模型不同区域具体的细节层次。局部的视觉重要性主要由视锥和模型之

间的关系决定,因此,定义一个基于视锥、模型表面法向量和屏幕空间几何误差的细化标准。细节层次评估方案得到3个与视点信息相关的衡量结果,分别是视锥有效因子 γ_v 、轮廓影响因子 γ_s 和屏幕几何误差值 γ_g 。

视锥原则主要判断的是模型顶点的影响区域(即在动态累进网格结构中以当前节点为根节点子树)是否在视锥范围内,它返回的是一个视锥影响力 α 。假设原始网格模型为 $M = (V, E, F)$, V 是顶点集合, E 是边集合, F 是三角形面片集合。在执行视锥原则时,必须为每个顶点 $v \in V$ 计算一个以 v 为中心、半径为 r_v 的包围球,该球体覆盖了 v 的影响区域。如果包围球完全位于视锥外部,则说明该顶点没有视觉效果影响力;否则,则根据受影响区域中相关顶点在视锥中的数量的比例来计算视觉影响力。

计算包围球半径 r_v 的具体步骤如下:首先为模型中的顶点 $v \in V$ (即顶点树中的叶节点)计算包围球 S_v ,包含了 v 的邻域;然后序遍历顶点树,即倒序遍历TOM结构记录的 $vsplit$ 序列,为每个父节点 v_s 创建一个最小包围球 S_{v_s} 包围其两个子节点的包围球 S_{v_l} 和 S_{v_r} 。但是 S_{v_s} 的中心不一定是 v ,为了使其规范化,计算一个以 v 为中心的包围球包围 S_{v_s} 并重新计算半径值 r_v 。最后,得到一个半径为 r_v 并以 $v = (v_x, v_y, v_z)$ 为球心的包围球。它位于视锥棱台内,当且仅当

$$a_i v_x + b_i v_y + c_i v_z + d_i < -r_v, i = 1, \dots, 4 \quad (1)$$

式中, $a_i v_x + b_i v_y + c_i v_z + d_i = 0$ 表示棱台每个面的参数方程,显然 $a_i v_x + b_i v_y + c_i v_z + d_i$ 就是球心到视锥面的有符号欧氏距离。最终,根据视锥原则,为顶点树中每个节点得到一个视觉有效因子

$$\gamma_v = \begin{cases} 1 & \text{若满足式(1)} \\ \frac{|N(InVF(\hat{V}))|}{|N(\hat{V})|} & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

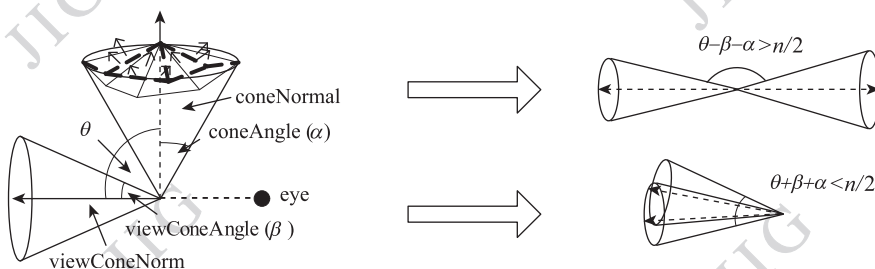


图1 轮廓保持的量化判断原则

Fig. 1 Quantitative judgment principle of profile keeping

式中, $InVF(\hat{V})$ 得到 v 的影响区域 \hat{V} 中在视锥范围内的顶点, $|N(\hat{V})|$ 表示影响区域中的顶点数。

为加快判断过程和提高针对性,提出轮廓保持原则。它以面的方向性原则为基础,更适用于实时的动态评估过程。轮廓测试方法为顶点树中的每个节点增加两个属性: coneNormal 和 coneAngle,前者是顶点的法向量锥体,后者是锥体的半角值,这两个属性代表当前节点的朝向和可视范围。为判断其与视点方向的关系,构建一个视野锥体,以视点为出发点,包围顶点影响区域的所有法向量。视野锥体也包括两个属性: viewConeNormal 和 viewConeAngle,前者表示这个锥体的中轴方法,后者表示锥体的半角值。

为轮廓影响力给出一个量化的值,便于确定局部区域的细节层次。如图1所示,其中 α 是 coneAngle, β 是 viewConeAngle, θ 为视线方向和顶点影响区域的锥体法向量之间的角度。如果 $\theta - \alpha - \beta > \frac{\pi}{2}$,说明顶点的影响区域完全面对视点;如果 $\theta + \alpha + \beta < \frac{\pi}{2}$,说明它完全背对视点;在其他情况下,它对模型轮廓具有部分影响力,可以用 $-\cos\theta$ 进行衡量。基于此规则,定义一个轮廓影响力因子

$$\gamma_s = \begin{cases} 0 & \theta + \alpha + \beta < \frac{\pi}{2} \\ 1 & \theta - \alpha - \beta > \frac{\pi}{2} \\ -\cos\theta & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

屏幕空间几何误差原则用以调整模型的简化(或精化)程度和效果,保证简化模型与原始模型在屏幕空间中的投影差值低于阈值 τ 。在判断简化模型的顶点是否应该分裂,计算顶点当前的 one-ring 邻域 N_v^s (即与之相关的三角形)与其原始 one-ring 邻域 N_v 之间的偏差值,这个差值可以用两者之间的

Hausdorff 距离 $H(N_v^s, N_v)$ 表示。一个最小标量值 r 可用来衡量两个领域之间的相似度,表示 N_v^s 中任意顶点到 N_v 中任意点的距离不超过 r ,反之亦然。用数学方式表示为 $N_v^s \subset N_v \oplus B(r)$ 且 $N_v \subset N_v^s \oplus B(r)$,其中 $B(r)$ 是一个用于做相交判断的半径为 r 的球体, \oplus 表示 Minkowski 加法。

如果 $H(N_v^s, N_v) = r$,则说明屏幕空间几何误差在 $B(r)$ 的包围范围内。如果 N_v^s 和 N_v 形状轮廓相似且表面平坦,则 $B(r)$ 可用一个空间阈值范围表示: $D_z(\delta) = \{h\hat{z}: -\delta \leq h \leq \delta\}$, δ 是最小标量值, \hat{z} 表示投影方向是 Z 轴正方向。

除了视点和视野信息外,用户关注也是影响细节层次的重要因素。由于本文关注被定义为预定义的可变形区域和变形约束等变形相关信息,也就是变形参与度 λ_d^i 。自顶向下前序遍历活动顶点树,为每个节点计算两个可变形权重 d_1 和 d_2 。如果当前节点对应的顶点属于变形句柄,则 $d_1 = 1$,否则 $d_1 = 0$ 。定义属于任意变形约束的顶点为被约束顶点,则 d_2 定义为

$$d_2 = \frac{|C_i|}{|C|} \quad (4)$$

式中, $|C|$ 表示整个模型上被约束顶点的个数, $|C_i|$ 表示节点 i 的影响区域内被约束顶点的个数。每个节点的变形参与度为 $\lambda_d^i = d_1 d_2$ 。

视觉影响力和变形参与度结合起来就是每个节点的局部细节层次权重,为活动顶点树中的每个节点计算一个局部化的细节层次权重

$$\lambda_L^i = \begin{cases} 1 & \gamma_g > 0.82 \text{ 或 } \lambda_d^i > 0.5 \\ \max(\gamma_v \cdot \gamma_s, \lambda_d^i) & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

式中,通过实验得出 γ_g 的阈值为 0.82,当 γ_g 大于这个值时,说明屏幕空间的几何误差太大,必须对对应区域进行精化; λ_d^i 的阈值为 0.5,当大于该阈值时,说明对应区域的变形参与度较高,需要详细的细节信息。在其他情况下,则在视觉影响力和变形参与度中选择较大的值作为局部细节层次的权重。

活动顶点树中的每个节点都具有一个局部细节层次权重 λ_L^i ,如果当前节点的 λ_L^i 为 0,那么以该节点为根节点的子树将被删除,加快实时效率。得到新的活动顶点树之后,判断所有叶节点的权值与给定的阈值 τ_L 之间的关系,如果大于 τ_L ,则说明该节点应当实施顶点分离,进行局部细化,否则说明该节

点应当实施顶点合并,进行局部简化。根据实验得出当阈值 τ_L 为 0.75 时,能保证视觉效果与实时效率之间的平衡折中。

2.1.2 规范程度衡量

网格模型的规范程度广义上包括两个方面:一是与原始模型的相似度,二是模型畸变的程度。前者主要用以衡量简化模型是否能够反映原始模型的一些特征属性,后者则衡量变形操作是否造成不合理的形状突变。本文规范程度衡量主要针对实时变形模型,衡量其结构是否能够满足变形需要。

三角形网格模型的规范程度衡量分为两个执行模块:模型拓扑结构规范衡量和模型几何属性规范衡量。

拓扑结构规范的衡量主要考虑的是网格模型的定向性和流形。若在边折叠操作后形成了非流形边,则标记该边折叠操作不合理;若边折叠操作使得相邻三角形的公共边具有两个相同的方向,也就造成了不定向性;若奇点对应的相关三角形数等于邻接顶点数的一半,这样的边折叠也是不合理的,定义这样的拓扑结构为奇点边界三角形。规范程度衡量须找到上述不规范属性。

几何属性规范主要是由几何元素的规则度决定的,分别针对三角形面片、边和顶点定义不规则性。对于三角形面片来说,定义不规则三角形为退化三角形,也称 skinny 三角形。退化三角形分为 3 类:若包含一个小于 ε 的顶角,则为 Cap;若包含一个大于 $\pi - \varepsilon$ 的顶角,则为 Needle;如果同时包含一个小于 ε 的顶角和一个大于 $\pi - \varepsilon$,则既是 Cap 又是 Needle,其中 ε 的默认值为 $\arcsin(10^{-5})$ 。网格模型的几何信息通常由实数表示,并涉及相关的算术操作。在具体实现时,实数使用有限精度表示进行拟合,但也引入了误差。该误差值很可能导致模型相关处理方法产生拓扑不一致,甚至执行失败。而这些问题大多数都是由退化三角形或近似退化三角形造成的。几何意义上的不规则边即为锐边,指二面角趋近于 π 的边。当拖拉曲面时,很容易造成曲面不正常的突出,而这些突出特征正是由锐边造成的。不规则顶点归类为奇点、焦点和凸点(图 2)。奇点是指连接多个联通区域的点,焦点是多条边界边相交的点,凸点则是具有高曲率的顶点。在规范程度的衡量过程中,必须精确定位不规则属性在模型上的位置。

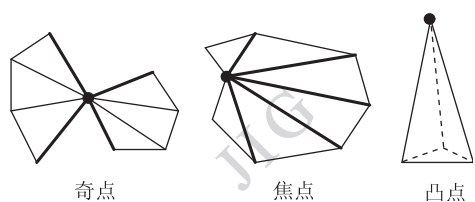


图2 不规则顶点

Fig. 2 Irregular vertexes

将规范程度衡量得到的结果分为两大类:警告(Warning)和标记(Marking),记录为Warning的不规则网格模型元素不允许任何相关操作,即在整个变形过程中必须被保持;记录为Marking的不规则网格模型元素被标记为具体的不规则类型,需要进行调整以恢复规范性。

2.2 动态模型调整

实时调整操作从全局和局部两个方面对模型调整:全局性的调整用以确定模型整体的细节层次;局部性的调整改变模型局部区域上的拓扑结构或几何属性。通过这两类操作,能够实时灵活地调整模型的结构信息。

2.2.1 全局网格模型重构

网格模型重构操作是典型的全局性调整操作,根据模型对应的层次式累进网格结构和评估过程确定的细节层次,重新构建合理的简化模型。由于本文采用TOM(全序网格)结构记录累进网格信息即边折叠序列,网格的重构过程也是以此为基础的。

在TOM框架中,只用两个序列——ECL(边折叠序列)和TRL(三角形删除序列),便可以快速地重建出任意分辨率的网格模型。TOM重建网格模型算法的输入为三角形个数 k ,然后通过 k 求出顶点的个数 m ,这个 m 就作为顶点的替换阈值。通过这种方法可以重建出拥有 m 个顶点数的简化模型 M^s :遍历TRL的前 m 个单元,这些单元中的每个三角形 t ,假设其3个顶点为 v_a 、 v_b 和 v_c 。以 v_a 为例,如果 v_a 作为起点在ECL的单元下标不小于 m ,那么令 v_a 被替换为该单元的终点域,如果新的 v_a 在ECL的单元下标还是不小于 m ,那么重复这个操作,直到找到一个符合条件的 v_a 为止。对于 v_b 和 v_c 执行同样的操作。最后以这3个新的顶点绘制一个三角形。

2.2.2 局部拓扑结构调整

局部拓扑结构调整是对模型很小一块区域中边的连接关系进行调整,其中基本操作包括边折叠、点分裂和边交换,可以修正模型的连接关系并且支持

实时性。在进行网格模型局部重构时,与全局重构一样,也是使用边折叠和点分裂这对互逆操作实现的。局部重构不需要从原始模型开始创建一个整体简化的模型,而是以当前简化模型为基础进行调整。在得到一个简化模型的同时,也得到一个活动三角形序列和一棵活动顶点树。在执行局部重构时,主要针对这两个动态结构进行调整。

局部网格模型重构时,按广度遍历自下而上遍历局部活动顶点树,执行半边折叠和点分裂操作,在遍历顶点树过程中,同时更新活动三角形序列。在进行重构的同时,也对顶点替换链进行修正:若执行边折叠,则延长替换链;若执行点分裂,则缩短替换链。在执行任意的边折叠或点分裂操作时,若需处理的一组顶点合并操作在顶点树中并不存在或间接存在,称为“不合法”顶点合并操作,针对这种情况需要进一步讨论。以一个“不合法”的半边折叠操作 $v_x \rightarrow v_y$ 为例,为了将这个折叠操作合理地加入到活动顶点树中,必须对树型结构进行调整,关键在于必须先将会合并到 v_x 的折叠操作都执行完毕后,再将其与 v_y 进行折叠,可以最小化对顶点树和活动顶点树结构的影响。

这些局部拓扑结构调整操作会改变根据初始累进网格结构创建的原始顶点树结构,但是静态的TOM结构并不会受到这些操作的影响。这是因为这些操作都是针对特定帧实施的且是独立存在的,只能反映当前的最优结构。所有局部操作都不会影响由TOM结构记录的静态边折叠序列信息。

2.2.3 局部几何属性调整

调整局部几何属性即修正网格模型元素的几何属性,如三角形的形状、边的长度或顶点的位置。总之,需要调整的是模型上顶点的坐标值。使用调整几何属性是为了实现规范的网格模型进行变形和渲染,采用拉普拉斯平滑操作。

拉普拉斯平滑就是低通过滤,在传统的信号处理算法中,如果目标信号结果不存在非常高频的内容,那么使用简单的低通过滤即可消除噪声。因此可以通过构建拉普拉斯算子的多项式和来调整滤波器的频率。高阶多项式能够促使较尖锐的信号得到衰减,并使过滤器更加精确地区分信号和噪声。此外,将信号投影到由拉普拉斯算子构成的特征向量基等同于傅里叶变换,因此可以使用频谱分析和再合成来实现平滑算法。但是这种方法的时间复杂度比线性方法高很多。通常计算一个矩阵的所有特征

向量的时间复杂度为 $O(n^3)$, 如果应用在稀疏矩阵上, 那么时间复杂度则降低为 $O(n)$ 。如果邻接特征向量排列紧密, 即使使用非常高效的方法也很难解决数值不稳定性。

在实时调整模块中, 使用基本的伞状算子实现网格模型的几何属性修正, 这是因为它是线性的且具有很高的执行效率, 能够满足实时性。通过简单的位置平移, 就能修正突出的顶点, 从而得到规整的网格模型。

3 关键技术描述

本文为每一种评估结果都找到对应的解决方案, 表 1 给出明确的对应关系。规范程度衡量定位的 3-division 拓扑结构和奇点边界三角形结构都记录为 Warning, 不能对其实施拓扑结构调整的操作。奇点和焦点则记录为 Warning, 不实施任何拓扑结构的调整操作。

表 1 评估结果与调整操作之间的对应关系

Table 1 Corresponding relationship between evaluation results and modification operations

动态模型评估		动态模型调整	
	评估操作	评估结果	
细节层次评估	全局细节层次	λ_c	网络模型全局重构
	局部细节层次	λ'_L	网络模型局部重构
	拓扑结构规范	Warning	不实施任何拓扑结构调整操作
规范程度评估	Caps	Marking	边交换
	Needles	Marking	边折叠
	锐边	Warning/Marking	Rollback/拉普拉斯平滑
	几何属性规范		
	奇点	Warning	不实施任何拓扑结构调整操作
	焦点	Warning	不实施任何拓扑结构调整操作
	突点	Marking	拉普拉斯平滑

另一方面, 有些不规则元素被标记为 Marking, 必须对其实施规范化调整。然而对于不同性质的不规范几何元素, 执行顺序和应用的调整操作也各不相同, 因此必须具体化其不规范性和对应的操作。不规则三角形标记为 Cap 和 Needle 两类, 对于既是 Cap 又是 Needle 的三角形统一记为 Cap。首先对 Cap 进行边交换并判断新得到的三角形是否是 Needle, 如果是则标记为 Needle; 然后再对 Needle 执行独立的边折叠。突点也记录为 Marking, 对其实施平滑操作。

还有一些不规则元素, 由于其出现的起因不同进行区别对待。对于锐边, 有些是在折叠过程中形成的, 记录为 Warning, 并执行 rollback 操作, 即撤销之前执行的边折叠; 有些则是在变形过程中形成, 记录为 Marking, 并首先执行边交换操作, 再判断两个顶点是否为突点, 若是则执行平滑操作。

4 实验结果与应用分析

为证明本文评估机制的正确性, 首先对细节层

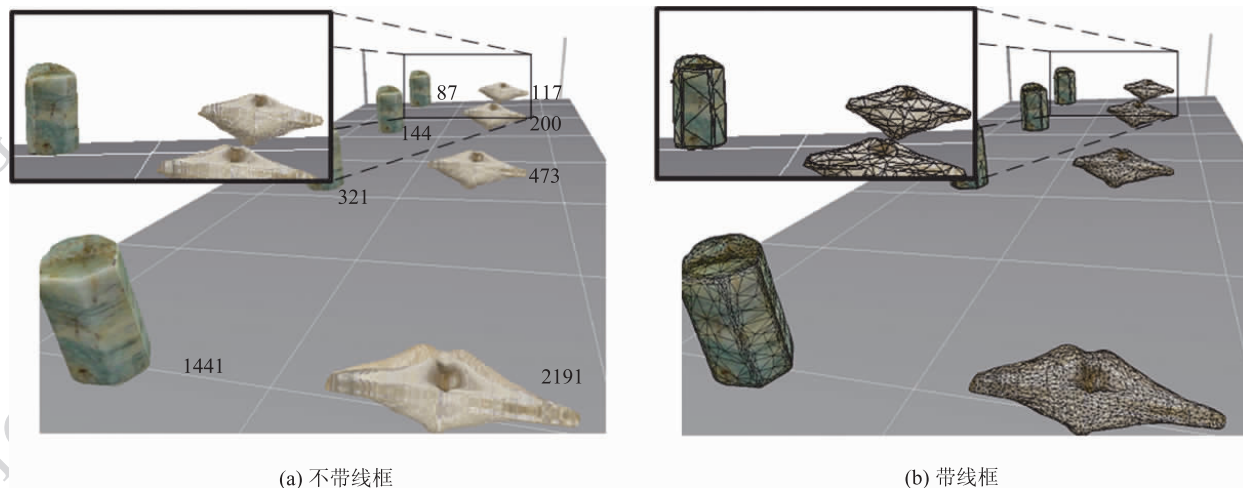
次的衡量进行测试。全局的细节层次主要由视点信息决定, 图 3 所示了 XVM Viewer 系统中多细节层次 (LoD)^[23] 场景渲染的例子。图中共有 8 个模型, 分为两组, 左边的是绿柱石模型, 右边的是鳍德克弓石燕模型。这些模型离观察者有远有近, 各占据了屏幕上一定的面积。在这个例子中, 认为位于仅近平面上的模型具有完整的细节信息。各模型所获得的顶点数在图 3(a) 中标出。如对于“绿柱石”模型, 最远的一个获得 87 个顶点, 网络模型重建模块按照 87 个顶点的分辨率来渲染该模型; 而最近一个获得 1 441 个顶点, 按照 1 441 个顶点的分辨率来渲染。为了突出模型的多分辨率效果, 在图 3(b) 中给各模型加上了线框。由图 3(b) 可以看出, 离观察者近的、占据屏幕面积大的模型网格更加密集, 分辨率更高。而在图 3(a) 不带线框的模型中却难以觉察出这种差别, 这正是 LoD 技术所期望的结果。

明确定义的局部细节层次如图 4 所示。图 4 中显示的马模型根据视场参数的变化, 实时形成不同的聚类组合, 分别用颜色进度条和网格线框标识细

节层次的权重和分辨率。此处的聚类指当前活动顶点树中叶节点所覆盖的影像区域。

马模型原始三角形数为 96 966,顶点数为 48 485。由图 4 可见,本文评估机制能够保证良好的渲染效果。若当前环境需要高细节层次模型,得到的聚类数量较多,反之则较少。这说明只有

在需要详细细节信息时,才会深度向下搜索顶点树,否则只需由靠近根节点的节点组成低细节层次聚类即可。当简化到 762 个三角形时,只需要根节点就能直接表示这样的简化模型。在实现时,需注意保持各区域边界,从而保证无缝连接得到完整模型。



(a) 不带线框

(b) 带线框

图 3 XVM Viewer 中显示的 LoD 渲染示例
Fig. 3 LoD rendering example in XVM Viewer



(a) 视场参数为10.601 7;三角形数为8 632

(b) 视场参数为22.426 1;三角形数为6 553

(c) 视场参数为37.116 9;三角形数为4 060

(d) 视场参数为78.908 2;三角形数为762

图 4 马模型在不同视场中形成的多细节层次模型
Fig. 4 Horse LoD models in different view fields

颜色进度条显示,模型朝向视点的部分明显具有较高的权重值。如果加入用户定义的可变形区域,则会影响到局部细节层次的权重。例如,在图 4(a)~(c)中,均认为马模型的右前腿是可变形区域。但是在图 4(b)(c)中的权重比图 4(a)中的权重高,这是因为,虽然其在图 4(b)(c)的视觉影响力降低了,但由于变形参与度高于视觉影响力,从而成为决定细节层次的主导因素。因此,这个区域还是能够保持很高的权重,甚至提升了权重。

如果加入了变形信息的定义,则变形参与度也

将参与决定模型的细节层次。如图 4 展示了加入用户感兴趣区域即可变形区域的变形马模型。由网格线框模型可以看出,用户关注度高的区域具有很高的分辨率,而其他区域被大幅度简化。这样既保证了视觉效果又提高了实时性能。

在评估规范程度时,主要是定位不规则的几何属性和拓扑结构,图 4 证明本文方法能够很好地保持模型合理的拓扑结构。之后进行调整时都会判断是否造成了不合理的拓扑结构,图 5 显示的变形结果证实了这点。

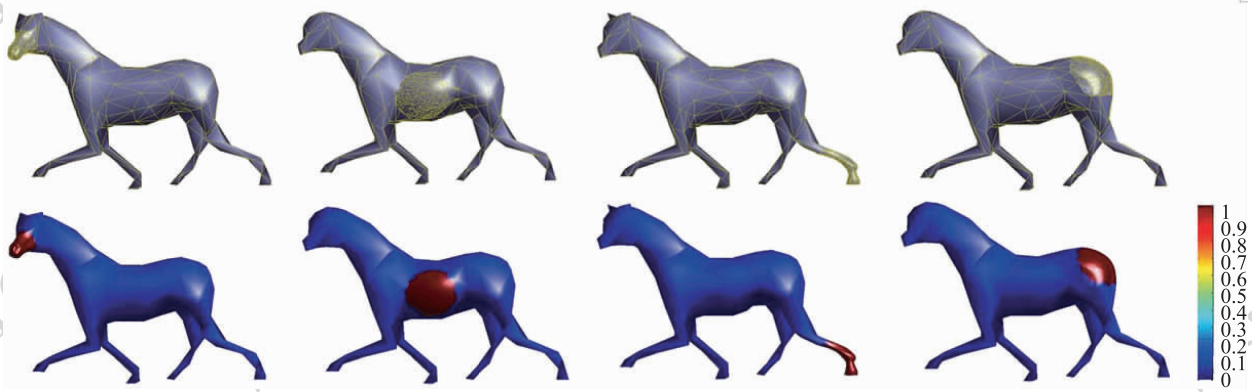


图 5 定义了各种不同可变形区域的马模型简化结果

Fig. 5 Simplified horse models by defining different deformation area

为了证明评估过程和调整过程都具有实时效率,表 2 说明了这两个过程所耗费的时间。由表中的数据可知,由于动态评估和动态调整都是应用在局部的可变形区域上,更是集中在变形句柄和变形约束相关的区域上,且使用的调整操作都比较简单,因此实时性得到了很好地保证。此外,与视点相关的动态评估只有在视点或可变形区域出现很大的变化时才执行,否则将重用前一帧的数据,这也提高了实时效率。

表 2 动态评估与调整的运行时间

Table 2 Runtime of dynamic evaluation and modification

模型	可变形区域 顶点数/个	动态评估 运行时间/ms	动态调整 运行时间/ms
马	1 192	4	8
狢狢	8 727	18	27
龙	10 375	23	34

5 结 论

本文针对树型结构 3 维场景模型提出一种动态

评估与动态调整的方法,为交互式变形构建最合理的数据信息。包括两个模块:一是动态模型评估,对虚拟场景的复杂模型结构进行准确衡量;二是动态模型调整,改变各个模型的结构信息。

该方法具有以下特点:

- 1) 动态评估模块和动态调整模块是相互独立的,不同评估结果匹配具体的调整操作;
- 2) 评估使用的衡量标准和得到的评估结果具有通用性,针对不同的虚拟环境都是有效的;
- 3) 评估结果能够确定模型合理的细节层次和准确定位模型的不规范属性;
- 4) 调整操作支持各种网络模型结构的改变,具有灵活性和实时性。

实验证明,该方法具有自适应性,且在保证视觉效果和变形需求情况下在一定程度上提高了实时效率。

本文方法主要针对曲面结构而非空间结构,在实际应用中可能会出现一些畸变现象。在下一步工作中,将考虑该方法在空间结构的推广应用,针对特殊的畸变现象提出相应的处理措施。目前相关的研究工作正在进行中。

参考文献(References)

- [1] Welch W, Witkin A. Variational surface modeling [C]//Proceedings of the 19th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York, USA: ACM Press, 1992:157-166.
- [2] Sorkine O, Cohen-Or D, Lipman Y, et al. Laplacian surface editing [C]//Proceedings of the 6th Symposium Processing. New York, USA: ACM Press, 2004: 179-188.
- [3] Shi L, Yu Y, Bell N, et al. A fast multigrid algorithm for mesh deformation [C]//Proceedings of the 33rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York, USA: ACM Press, 2006: 1108-1117.
- [4] Huang J, Shi X, Liu X, et al. Subspace gradient domain mesh deformation [C]//Proceedings of the 33rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York, USA: ACM Press, 2006: 1126-1134.
- [5] Celniker G, Welch W. Linear constraints for deformable non-uniform B-spline surfaces [C]//Proceedings of the Symposium on Interactive 3D Graphics. New York, USA: ACM Press, 1992: 165-170.
- [6] Pernet J P, Guillet S, Leon J C, et al. A shape deformation tool to model character lines in the early design phases [C]//Proceedings of the 4th Shape Modeling International Conference. Washington DC, USA: IEEE Computer Society, 2002:165.
- [7] Shi X, Zhou K, Tong Y, et al. Mesh puppetry: cascading optimization of mesh deformation with inverse kinematics[J]. ACM Transactions on Graphics, 2007, 26(3):81.
- [8] Hahmann S. Area preserving deformation of multiresolution curves [J]. Computer-Aided Geometric Design, 2005, 22(4): 349-367.
- [9] Xu Y, Joneja A, Tang K. Surface deformation under area constraints [J]. Computer-Aided Design and Applications, 2009, 6(5): 711-719.
- [10] Rappoport A, Sheffer A. Volume-preserving free-form solids [C]//Proceedings of the 3rd ACM Symposium on Solid Modeling. Washington DC, USA: IEEE Computer Society, 1995: 361-370.
- [11] Hirota G, Maheshwari R, Lin M. Fast volume-preserving free form deformation using multi-level optimization [C]//Proceedings of the 5th ACM Symposium on Solid modeling and Applications. New York, USA: ACM Press, 1999: 234-245.
- [12] Aubert F, Bechmann D. Volume-preserving space deformation [J]. Computer & Graphics, 1997,21(5): 625-639.
- [13] Botsch M, Pauly M, Gross M, et al. PriMo: Coupled prisms for intuitive surface modeling [C]//Proceedings of the 4th Eurographics Symposium on Geometry Processing. Switzerland: Eurographics Association, 2006: 11-20.
- [14] Zhou K, Huang J, Snyder J, et al. Large mesh deformation using the volumetric graph laplacian [C]// Proceedings of the 32nd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York, USA: ACM Press, 2005: 496-503.
- [15] Sauvage B, Hahmann S, Bonneau GP. Volume preservation of multiresolution meshes[J]. Computer Graphics, 2007, 26(3): 275-283.
- [16] Zhao Y, Liu X G, Peng Q S, et al. Rigidity constraints for large mesh deformation[J]. Journal of Computer Science and Technology, 2009, 24(1): 47-55.
- [17] Lipman Y, Sorkine O, Levin D, et al. Linear rotation-invariant coordinates for meshes [J]. ACM Transactions on Graphics, 2005, 24(3):479-487.
- [18] Masuda H, Yoshioka Y, Furukawa Y. Preserving form features in interactive mesh deformation [J]. Computer Aided Design, 2007, 39(5):361-368.
- [19] Masuda H, Ogawa K. Application of interactive deformation to assembled mesh models for CAE analysis [C]//Proceedings of the ASME International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference. Las Vegas, USA: ASME Press, 2007:469-477.
- [20] Masuda H, Yoshioka Y, Furukawa Y. Interactive mesh deformation using equality-constrained least squares[J]. Computers and Graphics, 2006, 30(6): 936-946.
- [21] Garland M, Willmott A, Heckbert P. Hierarchical face clustering on polygonal surfaces [C]//Proceedings of the 15th Symposium on Interactive 3D Graphics. New York, USA: ACM Press, 2001: 49-58.
- [22] Garland M, Heckbert P. Surface simplification using quadric error metric [C]//Proceedings of the 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York, USA: ACM Press, 1997:209-216.
- [23] Luebke D, Reddy M, Cohen J, et al. Level of Detail for 3D Graphics[M]. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 2002:431-467.