



JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS

主办: 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

2013
12
VOL.18

ISSN1006-8961
CN11-3758/TB



图像分割 P1610



第18卷第12期（总第212期）

2013年12月16日

中国精品科技期刊
中国国际影响力优秀学术期刊
中国科技核心期刊

版权声明

凡向《中国图象图形学报》投稿，均视为同意在本刊网站及CNKI等全文数据库出版，所刊载论文已获得著作权人的授权。本刊所有图片均为非商业目的使用，所有内容，未经许可，不得转载或以其他方式使用。

Copyright

2013 all rights reserved by Journal of Image and Graphics, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS. The content (including but not limited text, photo, etc) published in this journal is for non-commercial use.

主管单位 中国科学院

主办单位 中国科学院遥感与数字地球研究所
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

邮政信箱 北京9718信箱

邮 编 100101

电子信箱 jig@irsa.ac.cn

电 话 010-64807995

网 址 www.cjig.cn

广告经营许可证 京朝工商广字第0361号

总 发 行 北京报刊发行局

订 购 全国各地邮局

海外发行 中国国际图书贸易集团有限公司
(邮政信箱：北京399信箱 邮编：100048)

印刷装订 北京科信印刷有限公司

Journal of Image and Graphics

Title inscription: Song Jian

Monthly, Started in 1996

Superintended by Chinese Academy of Sciences

Sponsored by Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS
China Society of Image and Graphics

Institute of Applied Physics and Computational Mathematics

Editor-in-Chief LI Xiaowen

Editor, Publisher Editorial and Publishing Board of Journal of
Image and Graphics

P.O.Box 9718, Beijing, P.R.China

Zip code 100101

E-mail jig@irsa.ac.cn

Telephone 010-64807995

Website www.cjig.cn

Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals

Domestic All Local Post Offices in China

Overseas China International Book Trading Corporation
(P.O.Box 399, Beijing 100048, P.R.China))

Printed by Beijing Kexin Printing Co., Ltd.

CN 11-3758/TB

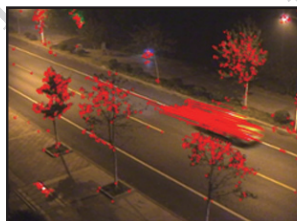
ISSN 1006-8961

CODEN ZTTXFZ

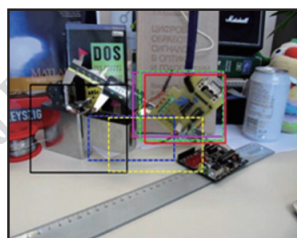
国外发行代号 M1406

国内邮发代号 82-831

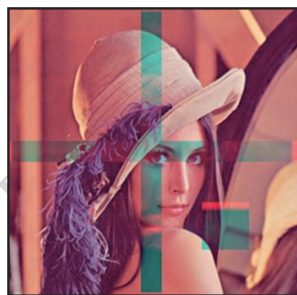
国内定价 50.00元



稀疏光流快速计算的动态目标
检测与跟踪(第1593页)



字典学习联合粒子滤波鲁棒跟踪
(第1628页)



结合SURF特征的多功能彩色
图像水印算法(第1694页)

图像处理和编码

小波子带最优方向性选择和压缩感知的图像编解码

王相海, 程露露, 周夏, 宋传鸣

1551

基于位平面和HVS的信息隐藏算法

张海涛, 姚雪, 陈虹宇, 张晔

1559

混沌密钥调制DFRFT旋转因子的视频加密

金建国, 王乐, 魏明军, 苏晶晶

1567

图像分析和识别

PCA-NLM的纺织品缺陷检测

杨学志, 左海琴, 陈远, 吴克伟, 谢昭

1574

基于主动表观模型姿态矫正和局部加权匹配人脸识别

赵恒, 俞鹏

1582

指纹拓扑模式构建及其在识别中的应用

仲伟波, 吕园, 李敏敏

1587

稀疏光流快速计算的动态目标检测与跟踪

陈添丁, 胡鉴, 吴涤

1593

边缘与灰度检测相结合的场景图像文本定位

何立强, 刘浩, 陈永

1601

Mean Shift图像分割算法的并行化

李宏益, 吴素萍

1610

混合高斯模型的自适应前景提取

李百惠, 杨庚

1620

字典学习联合粒子滤波鲁棒跟踪

查绎, 曹铁勇, 黄辉, 潘竟峰, 尤峻

1628

图像理解和计算机视觉

仿生复眼式全景探测及跟踪策略

罗超, 赵美蓉, 王东, 曹克雄

1637

医学图像处理

利用感兴趣区域从脑部MRI中提取脑组织

江少锋, 万红平, 陈震, 杨素华

1644

“第十届全国智能CAD与数字娱乐会议”专栏

基于Hermite插值的网格拼接和融合

缪永伟, 林海斌, 寿华好

1651

计算机生成中国传统祥云动画

方建文, 彭初, 于金辉

1660

森林动态演替现象的可视化模拟

单梁, 杨刚, 黄心渊

1666

多特征证据理论融合的视觉词典构建

沈项军, 高海迪, 曾兰玲, 毛启容, 詹永照

1676

轨迹和多标签超图配对融合的视频复杂事件检测

柯佳, 詹永照, 陈潇君, 汪满容

1684

结合SURF特征的多功能彩色图像水印算法

朱光, 师文, 朱学芳, 郝世博

1694

采用邻域直方图匹配的矢量纹理图案合成

徐婵婵, 杨刚

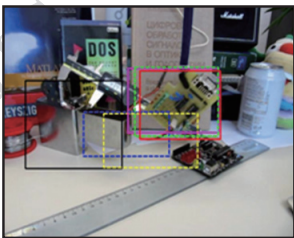
1703

CONTENTS

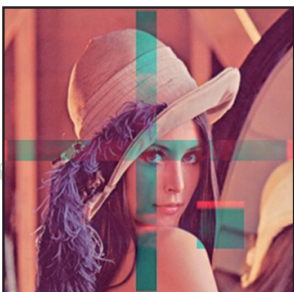
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Dynamic target detection and tracking based on fast computation using sparse optical flow (P1593)



Object tracking based on learning a dictionary joint practical filter(P1628)



Multi-purpose watermark algorithm of color images based on SURF(P1694)

Image Processing and Coding

Image codec research on the optimum directional selection of wavelet sub-band and compressed sensing

Wang Xianghai, Cheng Lulu, Zhou Xia, Song Chuanming 1551

Research of information hiding algorithm based on bit-plane and HVS

Zhang Haitao, Yao Xue, Chen Hongyu, Zhang Ye 1559

Video encryption based on chaotic key modulating DFRFT rotation factor

Jin Jianguo, Wang Le, Wei Mingjun, Su Jingjing 1567

Image Analysis and Recognition

Fabric defect detection based on PCA-NLM

Yang Xuezhi, Zuo Haiqin, Chen Yuan, Wu Kewei, Xie Zhao 1574

AAM-based alignment and local weighted matching method for face recognition

Zhao Heng, Yu Peng 1582

Fingerprint topological pattern construction and its application in recognition

Zhong Weibo, Lyu Yuan, Li Minmin 1587

Dynamic target detection and tracking based on fast computation using sparse optical flow

Chen Tianding, Hu Jian, Wu Di 1593

Text extraction from scene image based on edge and gray-scale detection collaboration

He Liqiang, Liu Hao, Chen Yong 1601

Parallelization of Mean Shift image segmentation algorithm

Li Hongyi, Wu Suping 1610

Adaptive foreground detection approach of Gaussian mixture model

Li Baihui, Yang Geng 1620

Object tracking based on learning a dictionary joint practical filter

Zha Yi, Cao Tiejong, Huang Hui, Pan Jingfeng, You Jun 1628

Image Understanding and Computer Vision

Bionic compound eye panoramic detection and tracking strategy

Luo Chao, Zhao Meirong, Wang Dong, Cao Kexiong 1637

Medical Image Processing

Automatic brain extraction from cerebral MRI volume using region of interest

Jiang Shaofeng, Wan Hongping, Chen Zhen, Yang Suhua 1644

Issum of CIDE' 2013

Mesh stitching and fusion based on Hermite interpolation scheme

Miao Yongwei, Lin Haibin, Shou Huahao 1651

Computer generation of cloud animation with a Chinese traditional style

Fang Jianwen, Peng Ren, Yu Jinhui 1660

Simulation of the dynamic evolution of spatial distribution of trees in the forest

Shan Liang, Yang Gang, Huang Xinyuan 1666

Visual dictionary construction method based on Dempster-Shafer evidence theory

Shen Xiangjun, Gao Haidi, Zeng Lanling, Mao Qirong, Zhan Yongzhao 1676

The video complex event detection method of matching integration between trajectory and multi-label hypergraphs

Ke Jia, Zhan Yongzhao, Chen Xiaojun, Wang Manrong 1684

Multi-purpose watermark algorithm of color images based on SURF

Zhu Guang, Shi Wen, Zhu Xuefang, Hao Shibao 1694

Vector texture pattern synthesis based on neighborhood histogram matching

Xu Chanchan, Yang Gang 1703

中图法分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2013)12-1651-09

论文引用格式: 缪永伟, 林海斌, 寿华好. 基于 Hermite 插值的网格拼接和融合[J]. 中国图象图形学报, 2013, 18(12): 1651-1659. [DOI: 10.11834/jig.20131214]

基于 Hermite 插值的网格拼接和融合

缪永伟¹, 林海斌¹, 寿华好²

1. 浙江工业大学计算机科学与技术学院, 杭州 310023; 2. 浙江工业大学理学院, 杭州 310023

摘要: 网格模型的拼接和融合是3维形状编辑和造型中的一个重要方面。基于 Hermite 插值技术, 提出一种适用于具有一般边界点空间分布的三角网格模型之间无缝光滑拼接和融合方法。首先查找网格模型待拼接区域的边缘点集, 并利用二次 B 样条曲线插值边缘点集分别得到边缘曲线; 然后对边缘曲线进行 Hermite 插值得到拼接区域连续曲面; 最后对拼接曲面分别进行三角网格化和 Laplacian 光顺平滑处理以实现网格模型的光滑拼接和融合。由于利用 B 样条曲线插值待拼接模型边界, 本文方法适用于具有各种不同边界情形的网格模型拼接和融合, 它不仅仅可以处理平面边界曲线情形也可以处理空间边界曲线情形。结合 Hermite 曲面插值拼接过渡区域, 使得产生的拼接网格能光滑地街接待拼接模型。实验结果表明, 本文方法能够有效地实现三角网格模型的光滑拼接、模型修复和模型融合。

关键词: 网格拼接; 网格修复; 网格融合; Hermite 插值; B 样条插值

Mesh stitching and fusion based on Hermite interpolation scheme

Miao Yongwei¹, Lin Haibin¹, Shou Huahao²

1. College of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China

2. College of Science, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China

Abstract: Mesh stitching and fusion is a fundamental operation in a lot of 3D shape editing and modeling applications. For example, it always need to assemble different mechanical apparatuses together in the area of computer-aided industrial design, creating new toys from some existing ones in the area of digital entertainment and reassembling fractured archeological artifacts in the area of cultural relic protection, etc. In general, to blend two under-stitching meshes or fuse several interested sub-parts together, it is widely recognized that the transition surface connecting them should possess the following properties. The transition surface should smoothly combine the underlying meshes in a seamless natural manner for different joining boundaries, whilst the local geometric details should also be preserved as soon as possible in the vicinity of the stitching boundaries. Based on the Hermite interpolation scheme, a new approach of mesh seamless stitching and fusion is presented in this paper, which can be adapted for blending two meshes with the arbitrary distributed boundary point sets. First, their boundary point sets of two under-joining meshes are automatically selected to form the blending region. The two joining boundary curves can thus be interpolated by two quadratic B-spline curves separately. Then, the transition surface can be constructed by Hermite functional blending scheme under the geometric position and the tangential direction limitations of two boundary curves. Finally, the transition region can be created by triangulating its discretely sampled vertices and applying Laplacian smoothing to form the resultant blending mesh. Compared with the traditional mesh fusion methods, owing to interpolating the two boundary curves of two under-fusion meshes by using B-spine curves, our mesh stitching and fusion

收稿日期: 2013-04-08; 修回日期: 2013-06-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(61272309); 浙江省自然科学基金项目(Y1090335)

第一作者简介: 缪永伟(1971—), 男, 教授, 2007 年于浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室获计算机图形学专业博士学位, 主要研究方向为计算机图形学、虚拟现实、数字几何处理、计算机视觉等。E-mail: ywmiao@zjut.edu.cn

scheme can be applied to blend the underlying meshes with different types of boundary curves, that is, it is not only adaptable for the meshes with planar boundary curves but also for the meshes with spatial boundary curves. Meanwhile, due to constructing the transition region by Hermite interpolation scheme that can satisfy the position and the tangential continuity constraints of the stitching boundary curves, the generated transition surface can smoothly blend the underlying meshes and reconstruct the local geometric details in the vicinity of the joining boundaries. Moreover, different from representing the blending surface by an implicit function, our explicit Hermite interpolation scheme is both simple and efficient. The experimental results illustrate the effectiveness and the robustness of our proposed mesh blending approach in many applications, such as the mesh stitching and mesh repair operation for artifact scanned models, the dental crown restoration in the practical dentistry CAD application, and the extended mesh fusion application for combining several parts of different scanned models into a single object. Here, as an extension of mesh stitching and mesh repair, the mesh fusion operation can also be efficiently conducted by Hermite interpolation between every two boundaries of several shapes, which can provide the users in the digital entertainment area or the engineers in the industrial design area a convenient modeling tool to easily create various desired interesting complex 3D shapes.

Key words: mesh stitching; mesh repair; mesh fusion; Hermite interpolation; B-spline interpolation

0 引言

在通过3维扫描仪获取网格模型的过程中,由于扫描仪自身的误差和模型表面过于复杂,往往会导致扫描后建模得到的网格模型并不完整,其主要表现为模型出现断裂、模型表面出现空洞、模型表面产生噪音等现象^[1],相应地需要采取模型拼接、补洞和去噪等操作对网格模型进行修补和复原。本文研究网格模型的无缝光滑拼接和融合问题。作为3维形状编辑和造型的一个重要方面,网格模型拼接和融合的主要难点在于:1)要求生成的过渡网格曲面与原始网格之间实现无缝光滑相接;2)过渡网格曲面应该能够保留原始模型的局部特征。一般地,用户希望在进行模型拼接和修复等应用时原始模型的结构和形状尽可能少地发生改变。

基于伯恩斯坦多项式,Bedi^[2]提出了一种函数混合方法生成拼接曲面来混合各分支截面,但其局限性在于待拼接截面都必须以代数曲面形式给出。Barequet等人^[3]、Cong等人^[4]利用平面等值线进行曲面重构,但其曲面重构的方法并不能保证拼接曲面与边缘之间的平滑相接。Kanai等人^[5]提出了一种基于网格形变的融合方法,他们首先利用文献^[6]方法在边缘处寻找对应点,并根据这些对应点对网格进行刚性变换和缩放以调整边缘对应点,最后通过插值对应点生成平滑过渡网格。Singh和Parent^[7]则采用3维体素和隐式曲面表示方法生成拼接网格,但该方法对于拼接区域的边缘有比较高的要求。

网格拼接在一定程度上也可以说是一种网格修复操作,并且可以应用到网格融合中。针对离散采样点数据,Car等人^[8]提出的径向基函数方法能够隐式重建光滑模型以补全不完整模型的残缺部分。但针对特定的网格拼接和修复问题,如果将待修补模型上的所有点都作为训练点参与计算会消耗大量的计算时间,故往往选择待修复区域边缘点集及其1-邻域和2-邻域作为训练点集,然而基于这样选取训练点集的径向基函数方法^[8]可能导致重建修复区域时由于约束条件不足而不能产生满意结果。杜佶等人^[9]利用径向基函数建立孔洞曲面的隐式方程,并把新增加的三角面片顶点映射到曲面上,从而实现三角网格曲面的孔洞修补。Ju^[10]提出了一种基于体表示的网格修复方法,其中的网格模型也是采取隐式表示方法。利用多尺度小波轮廓描述符,周术诚等人^[11]提出了一种多尺度下轮廓曲线特征提取及基于多尺度分析的3维物体碎片拼接方法。不同于一般网格模型隐式表示,Biermann等人^[12]提出了一组基于多分辨率细分曲面表示的曲面编辑和剪贴操作,把传统的剪切和粘贴操作引入到3维数字几何处理中。Fu等人^[13]提出了一种拓扑无关的网格编辑方法,该方法能够进一步实现具有任意拓扑结构的网格模型编辑和剪贴操作。然而,他们的方法需要利用全局参数化方法把网格模型待操作区域映射到2维参数空间上,并在参数空间中完成网格编辑和融合操作,再将编辑和融合结果投影回3维模型上。Adams等人^[14]和Pauly等人^[15]提出了点采样模型的布尔操作,将此算法用于断裂点模型的拼接,找一个形状与缺损区域近似的模型与待修

复模型进行布尔运算,但这样较难保证拼接区域与原始模型之间的无缝光滑拼接。Jin 等人^[16]提出了基于径向基函数拟合模型边界的网格融合算法,他们先用平行平面截取需要融合的部分,并在平面上利用径向基函数求得待拼接模型边界的隐式表示,再利用 Hermite 插值求得过渡曲面。径向基函数能很好地拟合任意形状的平面曲线,并能解决拓扑不兼容的网格模型拼接问题。然而,若对已经截取好的两个模型进行拼接,该方法要求拼接边界顶点位于同一个平面内,否则需要重新进行平面截取。Lin 等人^[17]利用径向基函数直接拟合过渡区域的隐式曲面,再借助移动立方体方法将隐式曲面转化为离散网格。该方法克服了边界拓扑不兼容的问题,同时生成的过渡曲面能很好地衔接原始模型,但径向基函数拟合计算比较耗时。

基于 Hermite 插值技术,提出了一种三角网格模型的无缝光滑拼接和融合方法,该方法对网格模型待拼接边界具有很好的适用性。算法首先对待拼接或融合的网格模型边界进行 B 样条曲线插值,然后对拼接区域进行 Hermite 曲面插值,最后对拼接曲面进行三角网格化和光顺处理。由于利用 B 样条曲线插值待拼接模型边界,从而使其能够适用于具有各种边界情形的网格模型拼接和融合应用,它不仅仅可以处理平面边界曲线情形也可以处理空间边界曲线情形。结合 Hermite 曲面插值,使得该方法产生的拼接网格能够光滑地衔接待拼接网格边界并保留原始模型的局部特征。实验结果表明,该方法能够有效地实现三角网格模型的光滑拼接、模型修复和模型融合。

1 B 样条曲线插值和 Hermite 插值

1.1 B 样条曲线插值

一般地,给定 $m+n+1$ 个平面或空间点 $P_i (i=0,1,2,\dots,m+n)$,则将这些顶点作为控制顶点可以确定 1 条光滑 B 样条曲线^[18]。该曲线方程可以表示为

$$S_n(t) = \sum_{k=0}^{m+n} P_k M_n((m+n)t - k) \quad (1)$$

$$t \in [0,1]$$

式中,基函数

$$M_n(x) = \frac{1}{n!} \sum_{j=0}^i (-1)^j C_{n+1}^j \left(x - j + \frac{n+1}{2}\right)^n$$

n 为 B 样条曲线的次数,顶点 P_k 称为控制顶点。

由于二次 B 样条已经能够达到了一阶光滑,所以在模型的光滑拼接中拼接边缘的插值 B 样条曲线中次数 n 取值为 2。一般来说,构造的 B 样条曲线并不一定是封闭曲线,若需要构造封闭曲线,则只需要使得最后一个控制顶点的坐标与第 1 个相同 $P_{m+1} = P_0$,同时多取 1 个控制顶点 $P_{m+2} = P_1$ 即可,如图 1 所示。

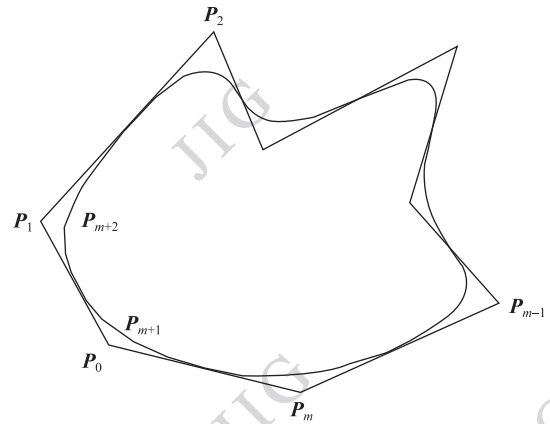


图 1 封闭二次 B 样条曲线

Fig. 1 Closed quadratic B-spline curve

本文方法中首先需要根据待拼接网格模型边缘提取的 1 组顶点 $Q_i (i=0,1,2,\dots,m, m>2)$ 构造一条插值这些顶点的二次 B 样条曲线。这时就需要由这些顶点提供的信息来反求二次 B 样条曲线的控制顶点 $P_0, P_1, P_2, \dots, P_m$ 。关履泰等人在文献^[18]中提供了求解插值 B 样条曲线控制顶点的计算方法,该问题只需求解线性方程组

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & & & \\ & 1 & 1 & 0 & & \\ & & 1 & 1 & 0 & \\ & & & \ddots & \ddots & \ddots \\ & & & & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_0 \\ P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_{m-1} \\ P_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2Q_0 \\ 2Q_1 \\ 2Q_2 \\ \vdots \\ 2Q_{m-1} \\ 2Q_m \end{bmatrix} \quad (2)$$

这样可以生成封闭二次 B 样条曲线的控制顶点。

1.2 Hermite 插值

给定空间中 1 个有序点集及其切线方向向量,可以利用三阶 Hermite 函数插值经过该点序列并且满足切线方向约束的光滑曲线^[19],其插值过程如下:对于每对相邻顶点 P_i 和 P_{i+1} ,若其切向量分别为 T_i 和 T_{i+1} ,那么第 i 段曲线可以表示为

$$C_i(t) = P_i F_1(t) + P_{i+1} F_2(t) + T_i F_3(t) + T_{i+1} F_4(t) \quad (3)$$

式中, $F_1(t)$ 、 $F_2(t)$ 、 $F_3(t)$ 、 $F_4(t)$ 为三阶 Hermite 基函数

$$\begin{aligned} F_1(t) &= (t-1)^2(1+2t) \\ F_2(t) &= t^2(3-2t) \\ F_3(t) &= t(t-1)^2 \\ F_4(t) &= t^2(t-1) \end{aligned} \quad (4)$$

可知 $C_i(0) = P_i$, $C_i(1) = P_{i+1}$, $C'_i(0) = T_i$, $C'_i(1) = T_{i+1}$, 故曲线 $C_i(t)$ 插值点 P_i 和 P_{i+1} , 并且插值曲线在点 P_i 和 P_{i+1} 处的切线方向恰好是点 P_i 和 P_{i+1} 所提供的切向量 T_i 和 T_{i+1} , 切向量 T_i 和 T_{i+1} 亦称为点 P_i 和 P_{i+1} 处的切向约束。该 Hermite 插值曲线是一阶连续的。

上述 Hermite 插值方法同样也可以推广到插值两条空间曲线^[20]。根据 2 条一阶连续的曲线参数方程 $C_1(u)$ 和 $C_2(u)$, 利用两条曲线的切向向量域 $T_1(u)$ 和 $T_2(u)$, 式(3)就可以改写成

$$S(u, v) = C_1(u)F_1(v) + C_2(u)F_2(v) + T_1(u)F_3(v) + T_2(u)F_4(v) \quad (5)$$

式中, $S(u, v)$ 是插值曲线 $C_1(u)$ 和 $C_2(u)$ 的光滑 Hermite 插值曲面。

2 网格拼接和融合方法

2.1 方法流程

为了实现网格模型的无缝光滑拼接和融合, 首先对待拼接或融合的网格模型边界进行 B 样条曲线插值, 然后对待拼接区域进行 Hermite 插值得到过渡曲面, 最后对过渡曲面进行三角网格化和光顺后处理。图 2 给出了本文方法的流程, 其中图 2 (a) 为待拼接的缺损网格模型, 图 2 (b) 为待拼接区域的局部放大, 图 2 (c) 为找到待拼接区域的两条边界点集 VS_1 和 VS_2 并确定边界沿近似切向偏移后的偏移点集, 图 2 (d) 为对 4 组点集分别用二次 B 样条曲线插值得到 4 条参数曲线, 图 2 (e) 为利用 Hermite 插值计算得到的拼接曲面并对曲面进行顶点采样和三角网格化, 图 2 (f) 为对拼接网格进行光顺处理并进行高光渲染, 图 2 (g) 为未破损原始模型的高光渲染结果。该方法主要包括以下几个步骤:

1) 找到三角网格模型上缺损区域的 2 组对应边界点集, 分别利用式(2)确定插值每一边界点集

的二次 B 样条曲线控制顶点, 从而相应构造出两条边界 B 样条曲线 $C_1(u)$ 和 $C_2(u)$ 。

2) 确定边界曲线 $C_1(u)$ 和 $C_2(u)$ 的切向向量域 $T_1(u)$ 、 $T_2(u)$, 利用式(5)计算过渡曲面 $S(u, v)$; 并对过渡曲面 $S(u, v)$ 进行顶点采样, 并将离散采样点三角化得到拼接曲面的网格表示。

3) 对拼接网格采用 Laplacian 光顺平滑处理以得到平滑过渡的拼接网格。

2.2 边缘曲线 B 样条插值

对于流形网格模型, 网格边界顶点一般具有以下特性: 1) 边界顶点的度与其邻接三角形个数不相等; 2) 边界顶点的 1-邻域内必定存在其他边界点^[1]。根据这些特性可以很容易找到网格模型的边界顶点。采用文献[21]的方法提取 2 组待拼接网格的边界点集 (VS_1 和 VS_2), 这样可以保证提取出的边界是有序并且封闭的 (图 2 (c))。利用式(2)分别确定插值边界点集 VS_1 和 VS_2 的 2 条 B 样条曲线控制顶点, 从而相应得到 2 条边界曲线的参数方程 $C_1(u)$ 和 $C_2(u)$ (图 2 (d))。需要指出的是, 实验中对于某些边界顶点过于密集的网络模型, 可以舍弃一些与相邻边界点距离非常小 (比如小于网格平均边长的 0.2 倍) 的边界点, 这样可以提高插值的稳定性同时提高算法效率。网格边界的 B 样条插值可以看成是边界的曲线参数化, 由于我们并不要求插值得到的曲线与实际网格边界形状完全一致, 故舍弃一些与相邻边界点距离非常小的边界点对最终结果影响不大。

2.3 拼接曲面 Hermite 插值

利用 B 样条插值边界点集, 现已经得到了 2 条边界曲线 $C_1(u)$ 和 $C_2(u)$, 然而利用式(5)确定模型的拼接曲面时还需要确定边界曲线 $C_1(u)$ 和 $C_2(u)$ 的切向向量域 $T_1(u)$ 和 $T_2(u)$ 。算法通过沿边界顶点切方向偏移边界顶点的方法近似求得向量域 $T_1(u)$ 和 $T_2(u)$, 如图 3 所示。以边界点集 VS_1 为例, 假设取 VS_1 中的 1 个顶点 P_0 及其邻接边界顶点 P_1 (若 P_0 的邻接边界顶点不参与边界曲线插值则被舍弃), n_0 是顶点 P_0 处的法向向量。为了方便说明, 假设 $S(0, 0) = P_0$, $C_1(0) = P_0$ 。则令

$$P'_0 = P_0 + \Delta h(n_0 \times P_0 P_1) \quad (6)$$

实验中, Δh 通常取网格模型的平均边长。近似地认为 $P_0 P_1$ 就是 $C_1(u)$ 在 $C_1(0) = P_0$ 处的切向, 并近似地认为 $P_0 P'_0$ 是 $S(0, v)$ 在 P_0 处的切向, 即认为 $P_0 P'_0$ 是切向向量域 $T_1(u)$ 在顶点 P_0 处的值。

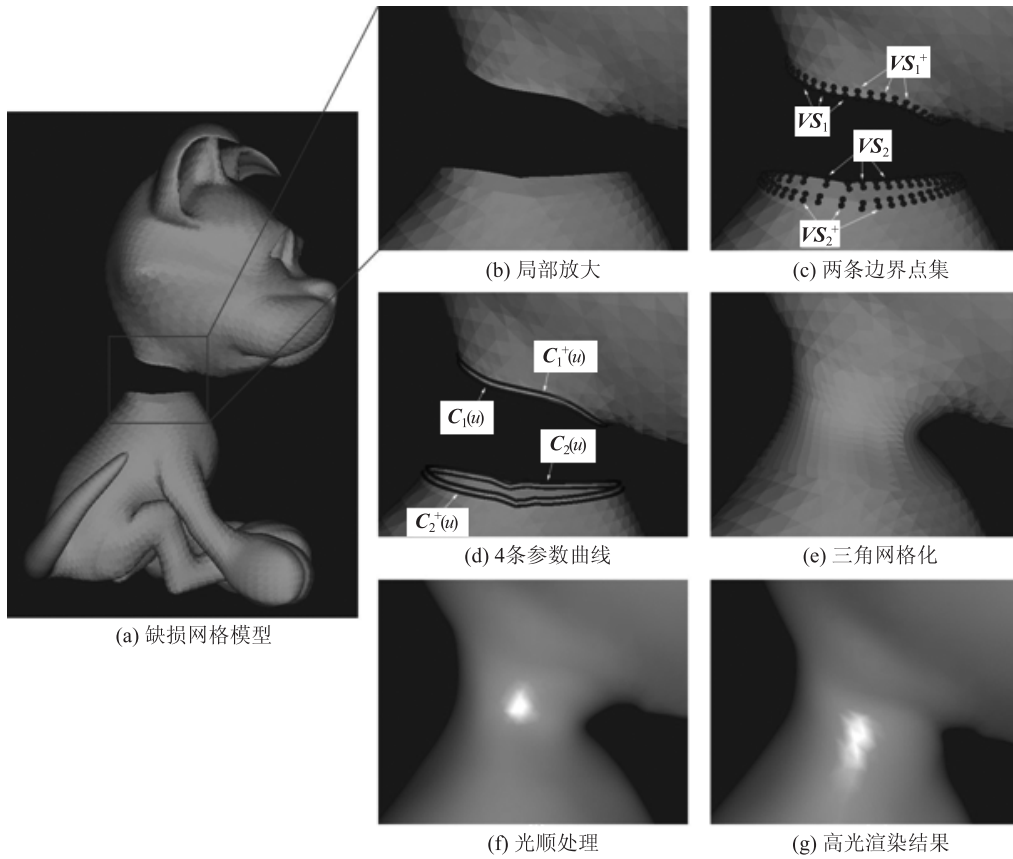


图2 网格拼接和融合方法流程

Fig. 2 Pipeline of our mesh stitching and fusion method

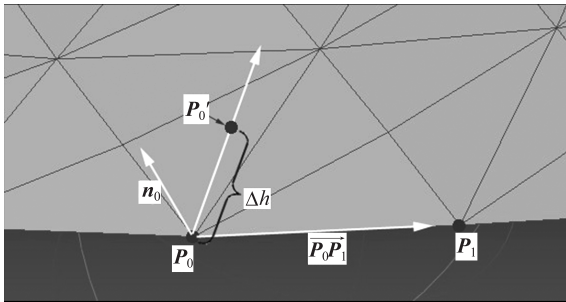


图3 边界顶点切向量计算

Fig. 3 Computation of the tangent direction of edge vertex

利用式(6)对边界点集 VS_1 中的每一个点进行计算可得到偏移点集 VS_1^+ , 同理对 VS_2 进行处理可得到偏移点集 VS_2^+ (图2(c))。利用式(2)分别确定插值偏移点集 VS_1^+ 和 VS_2^+ 的2条B样条曲线控制顶点, 从而相应得到2条偏移曲线的参数方程 $C_1^+(u)$ 和 $C_2^+(u)$ (图2(d))。从而通过边界曲线和相应偏移曲线的差分来获取边界曲线的近似切向约束

$$T_1(u) = \frac{C_1(u) - C_1^+(u)}{\Delta h}$$

$$T_2(u) = \frac{C_2^+(u) - C_2(u)}{\Delta h} \quad (7)$$

在利用式(5)的 Hermite 插值方法可以求得过渡曲面 $S(u, v)$ 。

然而, 我们的目标是要生成三角网格表示的拼接模型, 故需要将过渡曲面 $S(u, v)$ 三角网格化。实际上, 每当参数 v 固定 ($v = v_0$) 时 $S(u, v_0)$ 是一条光滑曲线; 此曲线上让参数 u 从0开始每次递增 Δu 直至1, 这样可以获取曲线 $S(u, v_0)$ 上一系列的离散采样点。现让参数 v 从0开始每次递增 Δv 直至1, 相应地可以得到过渡曲面 $S(u, v)$ 上的许多离散采样点。实验中设边界点集 VS_1 到边界点集 VS_2 距离最短的1对点的距离为 d , 网格模型平均边长为 l , 原始模型两条边界的顶点数量分别为 n_1 和 n_2 , 则取 $\Delta u = \frac{2}{n_1 + n_2}$, $\Delta v = \frac{1}{\lceil d/l \rceil}$ (其中 $\lceil \cdot \rceil$ 表示上取整函数)。因此过渡曲面 $S(u, v)$ 的离散三角网格化可以用伪代码描述如下:

输入: $S(u, v)$, 连续的参数过渡曲面。

输出: M , 过渡曲面离散三角网格表示。

算法过程如下:

1) 利用待拼接网格的边界点集 VS_1 和 VS_2 确定参数 u 和 v 的增量 Δu 和 Δv 。

2) 根据参数 u 和 v 的增量 Δu 和 Δv , 令参数 v 从 0 开始每次递增 Δv 直至 1; 同时对于每一参数 v , 令参数 u 从 0 开始每次递增 Δu 直至 1, 在参数曲面上得到一系列离散采样点, 将这些离散采样点添加入网格 M 。

3) 对于每一相邻采样曲线上的相邻离散采样点 $P_0 = S(u, v)$, $P_1 = S(u + \Delta u, v)$, $P_2 = S(u, v + \Delta v)$ 和 $P_3 = S(u + \Delta u, v + \Delta v)$ 进行如下处理:

如果采样点 P_0 和 P_3 的距离不超过采样点 P_1 和 P_2 的距离, 则将边 P_0P_2 、 P_2P_3 、 P_0P_1 、 P_1P_3 和 P_0P_3 添加入网格 M , 同时将三角面片 $\triangle P_0P_3P_2$ 和三角面片 $\triangle P_0P_3P_1$ 添加入网格 M ; 否则, 将边 P_0P_2 、 P_2P_3 、 P_0P_1 、 P_1P_3 和 P_1P_2 添加入网格 M , 同时将三角面片 $\triangle P_1P_2P_0$ 和三角面片 $\triangle P_1P_2P_3$ 添加入网格 M 。

需要指出的是, 这里 $S(u, 0) = C_1(u)$, $S(u, 1) = C_2(u)$ 即当 $v=0$ 和 $v=1$ 时可以直接利用原始网格边界顶点而无需对边界曲线 $C_1(u)$ 和 $C_2(u)$ 进行采样。

2.4 拼接区域光顺平滑处理

在网格拼接时, 利用式(7)所计算的切向量约束在边缘不平整区域会产生误差, 从而往往导致离散网格化后在某些区域产生尖锐的棱角, 此时需要对拼接区域进行光顺处理以得到平滑的拼接网格。采用 Laplacian 平滑算法^[22]对拼接区域进行平滑处理, 即对于拼接网格的每一个顶点计算其新坐标

$$P_{\text{new}} = \frac{P_{\text{old}} + \sum_{i \in N_1} P_i}{|N_1| + 1}$$

式中, P_{old} 为平滑前顶点坐标, P_{new} 为平滑后顶点坐标, P_i 为顶点 P_{old} 的 1-邻域顶点 (指所有与顶点 P_{old} 直接有边相邻的顶点), $|N_1|$ 为 1-邻域顶点数目。由实验得知, 该平滑操作进行 1~2 次就能消除上述的尖锐棱角。

3 实验结果

网格模型拼接和融合方法已经在 Microsoft Visual Studio 2005 平台上, 采用 C++ 语言编程并结合

OSG3.0.1 渲染引擎得到了实现。

网格模型的拼接在很大程度上可以认为是一种模型修复的操作, 它可以将一个断裂的破损模型修复成一个完整的模型。图 4、图 5 和图 6 展示了利用本文方法对 3 个不同模型的修复拼接效果。在图 4 中, 对原始 Girl 模型的环绕耳朵一圈的缺损区域 (图 4 (b)) 进行了修复拼接, 图 4 (c) 给出了利用本文方法进行修复拼接的结果。与原始模型相比较可以看出, 本文方法能较好地保持头发部分的细节特征。同时, 为了验证该方法适用于具有一般边界点空间分布的网格模型之间的拼接和融合, 分别对具有复杂形状拼接边界的 Bumpy Torus 模型 (图 5 (a)) 和 Chinese Lion 模型 (图 6 (b)) 进行了修复拼接。从 Bumpy Torus 模型的修复效果 (图 5 (b)) 可以看出, 经过修复的过渡区域能很好地保持原始模型的细节特征, 并与原始模型剩余部分实现平滑相接 (图 5 (c))。从 Chinese Lion 模型 (图 6 (b)) 的修复效果 (图 6 (c)) 可以看出, 生成的过渡曲面能够较好地保持原始 Chinese Lion 模型卷曲毛发的细节特征。

图 7 给出了本文网格拼接方法在口腔临床 CAD 牙冠生成上的应用。一般地, 牙齿间隙面可以通过对受损牙齿的扫描获得, 牙冠外层可以由特定方法 (如受损牙齿模型颈缘线以上部分向外等距) 生成, 则牙冠可以由间隙面 (图 7 (a) 中的 B) 和牙冠外层 (图 7 (a) 中的 A) 通过一定的方法拼接而成。实验结果表明利用本文方法进行拼接能够得到较好的平滑相接效果 (图 7 (c)), 可以应用于口腔临床 CAD 应用中。

另外, 网格模型的融合是与网格模型的拼接紧密相关的一种操作。网格模型融合是将来源于多个模型的不同部分融合在一起从而构造出更加复杂或更有趣的新模型。在工业设计和动画制作中, 许多复杂模型往往需要通过对一些简单模型进行变形、融合等编辑方法来生成。本文方法也可以用于多个网格模型的融合。图 8 展示了运用本文方法将 Twirl 模型的尖顶部分、Simpson 模型的上半身、Tannystropheus 模型的颈部以上部分、Women 模型的右小腿、Girl 模型的蝴蝶结、Octopus 模型与 Horse 模型的身体融合成一个复杂模型的结果。从实验结果可以看出, 各部分模型能够光滑地拼接在一起, 拼接处过渡比较自然。

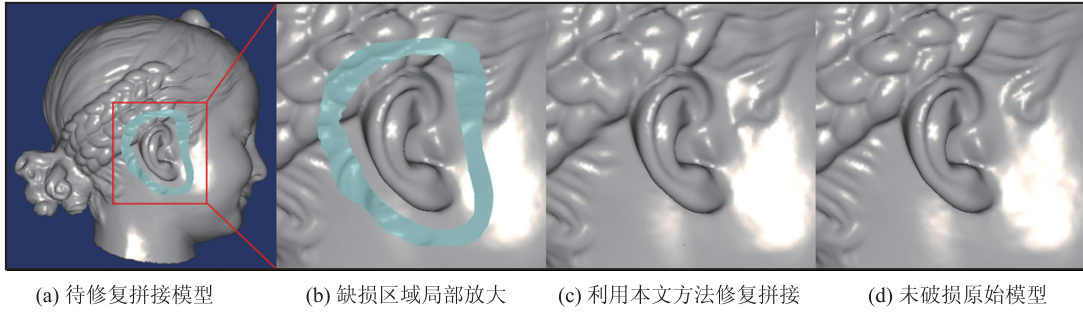


图 4 Girl 模型修复拼接

Fig. 4 Mesh repair and stitching result of Girl model

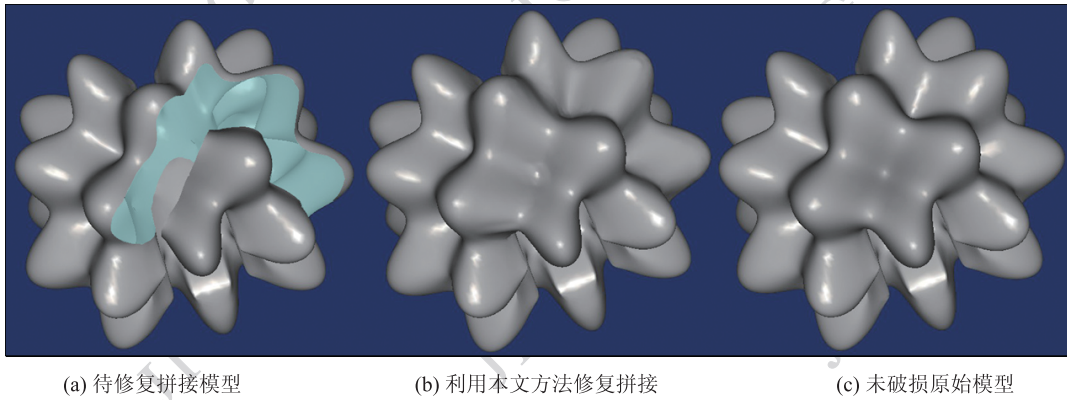


图 5 Bumpy Torus 模型修复拼接

Fig. 5 Mesh repair and stitching result of Bumpy Torus model

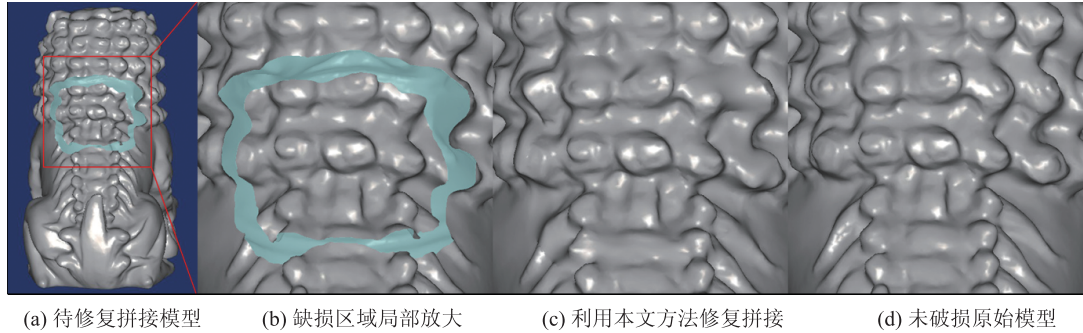


图 6 Chinese Lion 模型修复拼接

Fig. 6 Mesh repair and stitching result of Chinese Lion model

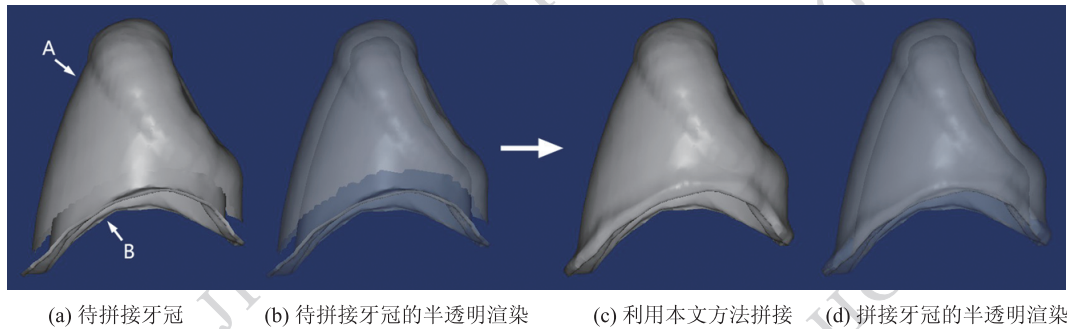


图 7 修复拼接算法在口腔临床 CAD 牙冠生成上的应用

Fig. 7 The application of mesh repair and stitching in dentistry CAD

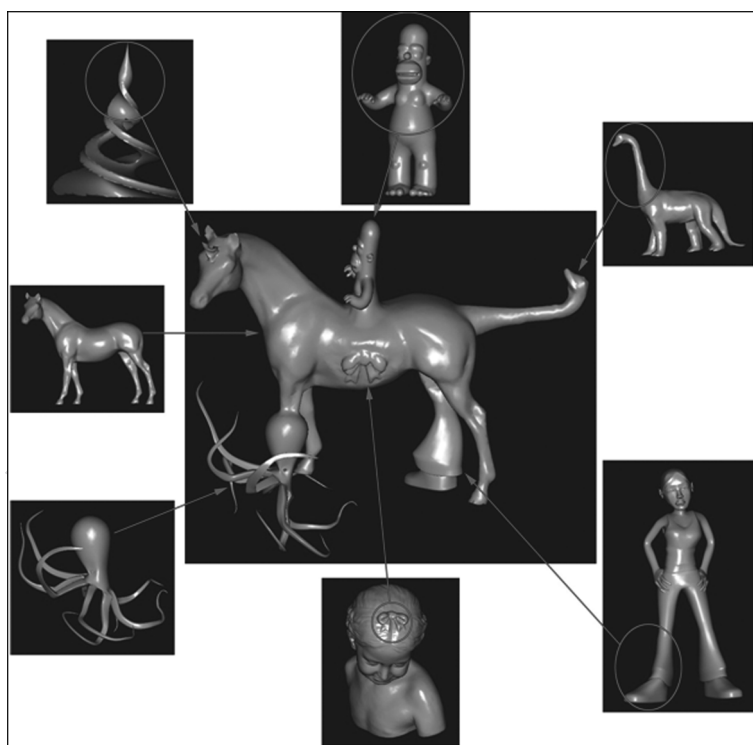


图8 多个网格模型的融合实例

Fig. 8 Mesh fusion result of several models

4 结 论

基于 Hermite 插值,提出了一种三角网格模型无缝光滑拼接和融合方法。该方法首先对待拼接或融合模型边界进行 B 样条曲线插值,然后利用边界曲线及其切向信息对待拼接区域进行 Hermite 曲面插值,最后对拼接曲面进行三角网格化和光顺处理。利用 B 样条曲线插值待拼接模型边界顶点获取边界曲线,在两条边界形状较接近情况下保证了该方法适用于复杂边界之间的拼接和融合。利用 Hermite 插值两条边界曲线得到过渡曲面,使得该方法产生的拼接网格能光滑地衔接待拼接模型。

一般来说,Hermite 曲面插值方法能够根据边界信息来生成过渡曲面,它可以有效修复边界附近区域的局部细节;然而,当待拼接模型两条边界曲线之间的空缺区域较大时,该方法虽能修复出完整模型,但在远离边界的区域其修复结果却不一定能精确反映原始模型信息而导致部分细节丢失,这将是未来进一步的研究工作。

参考文献 (References)

- [1] Botsch M, Pauly M, Kobbelt L, et al. Geometric modeling based on polygonal meshes [C] //Proceedings of ACM SIGGRAPH 2007 Course Notes. New York, USA: ACM Press, 2007: 1-181.
- [2] Bedi S. Surface design using functional blending [J]. Computer-Aided Design, 1992, 24(9): 505-511.
- [3] Barequet G, Shapiro D, Tal A. Multilevel sensitive reconstruction of polyhedral surfaces from parallel slices [J]. The Visual Computer, 2000, 16(2): 116-133.
- [4] Cong G, Parvin B. Robust and efficient surface reconstruction from contours [J]. The Visual Computer, 2001, 17(4): 199-208.
- [5] Kanai T, Suzuki H, Mitani J, et al. Interactive mesh fusion based on local 3d metamorphosis [C] //Proceedings of Graphics Interface. San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers, 1999: 148-156.
- [6] Kanai T, Suzuki H, Kimura F. Three dimensional geometric metamorphosis based on harmonic maps [J]. The Visual Computer, 1998, 14(4): 166-176.
- [7] Singh K, Parent R. Joining polyhedral objects using implicitly defined surfaces [J]. The Visual Computer, 2001, 17(7): 415-428.

- [8] Carr J C, Beaton R K, Cherrie J B, et al. Reconstruction and representation of 3d objects with radial basis functions [C] // Proceedings of ACM SIGGRAPH. New York, USA: ACM Press, 2001: 67-76.
- [9] Du J, Zhang L Y, Wang H T, et al. Hole repairing in triangular meshes based on Radial Basis Function [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2005, 17 (9) : 1976-1982. [杜佶, 张丽艳, 王宏涛, 等. 基于径向基函数的三角网格曲面孔洞修补算法 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2005, 17(9):1976-1982.]
- [10] Ju T. Robust repair of polygonal models [J]. ACM Transactions on Graphics, 2004, 23 (3) : 888-895.
- [11] Zhou S C, Geng G H, Zhou M Q. A multiscale method for mosaicing 3d fragmented objects [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2006, 18 (10) : 1525-1530. [周术诚, 耿国华, 周明全. 三维破碎物体多尺度拼接技术 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2006, 18(10): 1525-1530.]
- [12] Biermann H, Martin I, Bernardini F, et al. Cut-and-paste editing of multiresolution surfaces [J]. ACM Transactions on Graphics, 2002, 21 (3) : 312-321.
- [13] Fu H, Tai C L, Zhang H. Topology-free cut-and-paste editing over meshes [C] // Proceedings of Geometric Modeling and Processing. New York, USA: IEEE Computer Society Press, 2004: 173-184.
- [14] Adams B, Dutre P. Interactive boolean operations on surfel-bounded solids [J]. ACM Transactions on Graphics, 2003, 22 (3) : 651-656.
- [15] Pauly M, Keiser R, Kobbelt L, et al. Shape modeling with point-sampled geometry [J]. ACM Transactions on Graphics, 2003, 22 (3) : 641-650.
- [16] Jin X, Lin J, Wang C L, et al. Mesh fusion using functional blending on topologically incompatible sections [J]. The Visual Computer, 2006, 22 (4) : 266-275.
- [17] Lin J, Jin X, Wang C L, et al. Mesh composition on models with arbitrary boundary topology [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2008, 14 (3) : 653-665.
- [18] Guan L T, Luo X N, Li L L, et al. Computer Aided Geometric Design [M]. Beijing: High Education Press, 1999: 136-161. [关履泰, 罗笑南, 黎罗罗, 等. 计算机辅助几何图形设计 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1999: 136-161.]
- [19] Wang G J, Wang G Z, Zheng J M. Computer Aided Geometric Design [M]. Beijing: High Education Press, 2001: 1-4. [王国瑾, 汪国昭, 郑建民. 计算机辅助几何设计 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2001: 1-4.]
- [20] Elber G. Generalized filleting and blending operations toward functional and decorative applications [J]. Graphical Models, 2005, 67 (3) : 189-203.
- [21] Zhang X Y, Zhou M Q, Geng G H. A method of detecting the edge of triangular mesh surface [J]. Journal of Image and Graphics, 2003, 8 (10) : 1223-1226. [张献颖, 周明全, 耿国华. 空间三角网格曲面的边界提取方法 [J]. 中国图象图形学报, 2003, 8(10): 1223-1226.]
- [22] Nealen A, Igarashi T, Sorkine O, et al. Laplacian mesh optimization [C] // Proceedings of ACM GRAPHITE. New York, USA: ACM Press, 2006: 381-389.