

Journal of Image  
and Graphics

# 中国图象图形学报



ISSN1006-8961  
CN11-3758/TB

2012 **10**  
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10月 第17卷 第10期(总第198期)

## 目次

### 综述

张量值图像插值方法综述 ..... 邵宇, 刘莹, 孙富春(1197)

### 图像处理和编码

利用模运算及其周期性特点的安全隐写算法 ..... 廖琪男(1206)

结合快速融合与颜色传递的双波段夜视图像染色 ..... 李郁峰, 冯晓云, 徐铭蔚, 黄文丽(1213)

Weber 定律下尺度空间的自适应构建 ..... 刘立, 张瑞军, 万亚平, 黄欣阳, 彭复员(1222)

改进权值函数的非局部均值去噪算法 ..... 单建华(1227)

### 图像分析和识别

非相似度保持投影 ..... 陈才扣, 侯钰(1232)

非正交二值子空间模板表示的并行生成 ..... 杨培, 武港山, 杨扬, 任桐炜(1237)

Adaboost 和随机图划分的无监督图像分类 ..... 李巍, 杨素锦, 段晓华(1245)

aiNet 背景抑制的单帧红外弱小目标检测 ..... 陈炳文, 王文伟, 秦前清(1252)

韦伯-中心环绕结构的图像显著性检测模型 ..... 林丽莉, 周文晖(1261)

气象传真图信息提取 ..... 李存东, 肖传毅, 潘海朗, 陈日清, 杨劲松(1268)

### 图像理解和计算机视觉

多要素空间场景相似性匹配模型及应用 ..... 宋腾义, 汪闽(1274)

### 计算机图形学

Delaunay 三角网通用合并算子及分治算法的简化 ..... 刘永和, 冯锦明, 郭维栋, 田根, 金毅(1283)

基于 Laplace 谱嵌入和 Mean Shift 的三角网格一致性分割 ..... 马亚奇, 李忠科, 赵静(1292)  
断裂面匹配的破碎刚体复原 ..... 李群辉, 周明全, 耿国华(1298)

### 虚拟现实与增强现实

核爆炸外观景象实时模拟 ..... 郑涛, 徐晓刚, 邵承永(1305)

### 医学图像处理

全局脑白质纤维群智能跟踪算法 ..... 冯远静, 王哲进, 张贵军, 俞立(1312)

### 遥感图像处理

对偶四元数线阵遥感影像几何定位 ..... 盛庆红, 姬亭, 刘微微, 王惠南(1319)

修正安装矩阵提高 FY-3B/MERSI 的地理定位精度 ..... 吴荣华, 杨忠东, 关敏, 李翔翔(1327)

## 中国图象图形学报

刊名题字: 宋 健

月刊(1996 年创刊)

第 17 卷 第 10 期

2012 年 10 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 ZTTFXZ 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. 10 October 2012

## Contents

### Review

Overview of tensor valued images interpolation technology ..... Shao Yu, Liu Ying, Sun Fuchun (1197)

### Image Processing and Coding

Secure steganography based on modulo and its cyclical characteristic ..... Liao Qinan (1206)

Night vision dual-band images coloration using fast fusion and color transfer  
..... Li Yufeng, Feng Xiaoyun, Xu Mingwei, Huang Wenli (1213)

Adaptive algorithm of scale-space construction method based on Weber's law  
..... Liu Li, Zhang Ruijun, Wan Yaping, Huang Xinyang, Peng Fuyuan (1222)

Non-local means denoising algorithm with enhanced weight function ..... Shan Jianhua (1227)

### Image Analysis and Recognition

Dissimilarity preserving projection ..... Chen Caikou, Hou Yu (1232)

Parallel algorithm for generating template representation based on non-orthogonal binary subspace  
..... Yang Pei, Wu Gangshan, Yang Yang, Ren Tongwei (1237)

Unsupervised image categorization based on Adaboost and stochastic graph partition ..... Li Wei, Yang Sujin, Duan Xiaohua (1245)

Infrared dim target detection in single image based on background suppression by aiNet  
..... Chen Bingwen, Wang Wenwei, Qin Qianqing (1252)

Image saliency detection model with Weber's law based on center-surround structure ..... Lin Lili, Zhou Wenhui (1261)

Information extraction from meteorological facsimile maps  
..... Li Cundong, Xiao Chuanyi, Pan Hailang, Chen Riqing, Yang Jinsong (1268)

### Image Understanding and Computer Vision

Multi-feature based spatial scene matching model and its application ..... Song Tengyi, Wang Min (1274)

### Computer Graphics

Merging planar Delaunay triangulations based on universal operators and the implementation of a divide-conquer algorithm  
..... Liu Yonghe, Feng Jinming, Guo Weidong, Tian Gen, Jin Yi (1283)

Consistence segmentation of triangle mesh using Laplace spectral embedding and Mean Shift  
..... Ma Yaqi, Li Zhongke, Zhao Jing (1292)

Reassembly of broken 3D solids based on fractured surfaces matching ..... Li Qunhui, Zhou Mingquan, Geng Guohua (1298)

### Virtual Reality and Augmented Reality

Real-time simulation of nuclear explosion scene ..... Zheng Tao, Xu Xiaogang, Shao Chengyong (1305)

### Medical Image Processing

Global white matter tractography using swarm optimization ..... Feng Yuanjing, Wang Zhejin, Zhang Guijun, Yu Li (1312)

### Remote Sensing Image Processing

Geo-positioning line-array CCD images with dual quaternion ..... Sheng Qinghong, Ji Ting, Liu Weiwei, Wang Huinan (1319)

Improved FY-3B/MERSI geolocation accuracy using installation matrix  
..... Wu Ronghua, Yang Zhongdong, Guan Min, Li Xiangxiang (1327)

中图法分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2012)10-1292-06

论文引用格式: 马亚奇, 李忠科, 赵静. 基于 Laplace 谱嵌入和 Mean Shift 的三角网格一致性分割[J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(10): 1292-1297.

## 基于 Laplace 谱嵌入和 Mean Shift 的 三角网格一致性分割

马亚奇, 李忠科, 赵静

第二炮兵工程学院 401 教研室, 西安 710025

**摘要:** 针对现有网格分割算法对模型姿态及噪声敏感的不足, 提出一种基于 Laplace 谱嵌入和 Mean Shift 聚类的网格一致性分割算法。采用 Laplace-Beltrami 算子, 将 3 维空域中的网格模型转化成高维 Laplace 谱域中的标准型, 降低了姿态变化和噪声对分割算法的影响, 并增强了网格的结构可分性; 在高维谱域中, 采用非参数核聚类 Mean Shift 算法, 获取模型有视觉意义的语义区域。实验结果表明: 该算法可以快速有效地实现具有分支结构三角网格模型的有意义分割且对模型姿态和噪声具有较好的鲁棒性。

**关键词:** Laplace 谱嵌入; Mean Shift; 一致分割; 三角网格

### Consistence segmentation of triangle mesh using Laplace spectral embedding and Mean Shift

Ma Yaqi, Li Zhongke, Zhao Jing

The Second Artillery Engineering College 401 Staff Room, Shan Xi Province Xi'an 710025, China

**Abstract:** In order to overcome the disadvantage of being sensitive to model gesture and noise in the present mesh segmentation algorithms, we present a consistent mesh segmentation algorithm based on Laplace spectral embedding and Mean Shift. We convert mesh into a normal form from the space domain to the spectral domain by using the Laplace-Beltrami operator. The noise is suppressed and spectral embedding enhances the structural segmentability. We adopt Mean Shift, a nonparametric kernel clustering technique, to gain the visual meaningful semantic patch or sub-mesh in the spectral domain. The experiment results show that the proposed algorithm can yield meaningful result rapidly and effectively for meshes which has an evident branch structure. Meanwhile, this approach is invariant to pose of model and robust to noise.

**Key words:** Laplace spectral embedding; Mean Shift; consistence segmentation; triangle mesh

## 0 引言

近年来, 3 维数据测量设备及其技术的进步, 推动了逆向工程、医学成像、基于图像建模等技术纵深发展, 产生了许多具有复杂细节、复杂拓扑的 3 维模

型。如何根据某局部形状特征, 重用和修改现有 3 维模型, 即 3 维模型的分割, 已经成为几何造型和计算机图形学应用中的一个重要研究课题。

原始三角网格模型缺少足够的结构特征和语义信息, 网格分割通过按照一定的分割准则将原始三角模型分解为不同的部件或曲面片, 有助于相关几

收稿日期: 2010-10-21; 修回日期: 2012-02-21

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2009BAI81B00)

第一作者简介: 马亚奇 (1982—), 男, 计算机应用技术专业博士, 主要研究方向为 3 维网格模型分割, 3 维模型检索, 基于三角网格的几何建模。E-mail: mayaqi\_1982@163.com

何处理问题如曲面压缩、网格重构、参数化、纹理映射、模型检索等问题的有效解决。目前对 3 维模型分割问题的研究,一般分为基于块和基于部件的两类分割算法<sup>[1]</sup>。基于块的分割方法是将网格曲面分解成若干拓扑同胚于圆盘的子块,每块参数化到平面时具有较小的扭曲。而基于部件的分割模拟人类对形状的理解,把给定的网格分成若干有视觉意义的语义区域或子块。由于人对物体形状的感知分解很难进行度量,目前还没有一个有效的 3 维模型分割评价标准,而且分割的结果也往往取决于具体应用,多数工作仅仅致力于进一步提高分割质量。

早期的网格分割算法,多数是面对具体应用问题,从图像分割技术推广而来,例如分水岭法、区域生长法。近年来,随着统计学习和模式识别技术的快速发展和巨大进步,借助聚类分析技术来进行网格分割受到学者们的青睐,先后提出了迭代聚类法、层次分解或合并法、谱聚类分析法等。Garland 等人<sup>[2]</sup>基于顶点收缩的简化方法,提出一种基于层次关系的面片聚类算法。该方法基于面片对的合并,产生聚类的层次结构二叉树,同时避免了指定种子面片,但得不到有意义的分割结果。Shlafman 等人<sup>[3]</sup>提出了基于 K-means 非层次聚类算法。该方法可以由用户控制最终的聚类数目,从而避免了过分割,且适用于动画制作的需求。Katz 等人<sup>[4]</sup>提出了模糊聚类的层次分解。该算法由粗到精获取分割层次树,可以对任意拓扑连接的、或无拓扑连接的、可定向的网格进行处理,避免了过分割和边界锯齿,同时考虑了测地距离和凸性,使分割边界通过凹区域,从而得到有意义的分割结果。Liu 等人<sup>[5]</sup>基于谱分析理论,提出一种谱聚类网格分割算法。该算法通过在网格元素的邻接图上定义的特征值矩阵,应用谱分析理论将特征矩阵嵌入到一个中,通过几何空间分解对网格模型进行分割。Liu 和 Zhang 等人<sup>[6-7]</sup>后来又继续对他们的方法进行了改进。基于谱分析的网格分割方法易于实现并可以获得较好的分割结果,该方法有助于发现语义部件和结构,特别适合于部件分割场合。但为了构造亲邻矩阵,需要计算面片间的测地距离、角度距离或多维距离尺度,同时谱嵌入需要求解大矩阵的特征值和特征向量,其算法效率并不占优势。另外该方法也不能保证较好的分割边界,不利于通过网格分割发现网格特征边界。除上述经典的网格分割算法外,还有一些如 Reeb 图<sup>[8]</sup>、电子图谱<sup>[9]</sup>、基于多分辨率小波分解<sup>[10]</sup>、随机

漫步(random walk)<sup>[11]</sup>等网格分割方法。

现有的大多数网格分割算法对物体的姿态变化比较敏感,同一物体不同姿态的网格模型,采用同一分割算法往往会得到完全不同的分割结果,这违背了人类的视觉感知。受三角网格流形调和分析及谱几何处理<sup>[12-13]</sup>的启发,提出一种基于 Laplace 谱嵌入和 Mean Shift 聚类的网格一致性分割算法。首先计算三角网格的离散 Laplace-Beltrami 算子,获取网格顶点 Laplace 谱嵌入,将空域中的网格分割转化为高维谱域中的标准型,通过谱嵌入,克服了模型姿态变化对分割结果的影响;然后采用非参数核聚类 Mean Shift 算法对模型进行分割,通过选取不同的核窗口尺寸获得层次分割结构;最后结合图切分技术,同时考虑聚类的结果、分割区域的边界平滑和视觉认知中的最小规则,得到有视觉意义的分割结果。

## 1 离散 Laplace-Beltrami 算子

Laplace-Beltrami 算子(LBO)是由定义域在  $\mathbf{R}^2$  空间中的 Laplace 算子,推广至定义在任意黎曼流形的 Laplace 算子。设  $M^n$  为  $n$  维紧致黎曼流形,  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  为  $M$  的局部坐标,  $M$  的黎曼度量为

$$dS^2 = \sum g_{ij} dx^i \otimes dx^j \quad (1)$$

$M$  上的 LBO 定义为

$$\Delta = \frac{1}{\sqrt{g}} \sum_{ij} \frac{\partial}{\partial x^i} \left( \sqrt{g} g^{ij} \frac{\partial}{\partial x^j} \right) \quad (2)$$

式中,  $g = \det(g_{ij})$ ,  $g^{ij} = (g_{ij})^{-1}$ 。定义在微分流形  $M$  上的实值光滑函数  $f$ ,  $\Delta f$  定义为

$$\Delta f = \sum_{ij} g^{ij} f_{,ij} = \frac{1}{\sqrt{g}} \sum_{ij} \frac{\partial}{\partial x^i} \left( \sqrt{g} g^{ij} \frac{\partial f}{\partial x^j} \right) \quad (3)$$

式中,  $f_{,ij}$  为  $f$  的二阶共变导数。

定义在微分流形  $M$  上的 Laplace-Beltrami 算子,其特征值和特征向量满足如下方程

$$\Delta f = -\lambda f \quad (4)$$

根据 LBO 的自伴随性和半正定性,其上述特征方程的解为一正交特征系统  $B \stackrel{\text{def}}{=} \{(\lambda_i, \psi_i)\}_i$ ,  $(\lambda_i, \psi_i)$  为一对特征值和特征向量。

$$\Delta \psi_i = \lambda_i \psi_i \quad (5)$$

$$\lambda_0 = 0 \leq \lambda_1 \leq \dots \leq \lambda_i \leq \lambda_{i+1} \leq \dots \quad (6)$$

不同特征值所对应的特征向量相互正交

$$\langle \psi_i, \psi_j \rangle = \int_M \psi_i \psi_j = 0 \quad (7)$$

该特征系统构成了定义在流形  $M$  上的二次可积函

数空间的基。

定义在  $\mathbf{R}^3$  中的三角网格  $M = \{V, E, F\}$  (顶点集, 边集, 三角面片集) 上的光滑函数  $f$ , 其离散化 LBO 的一般形式为

$$\Delta f(p_i) \stackrel{\text{def}}{=} \frac{1}{d_i} \sum_{j \in N(i)} w_{ij} [f(p_i) - f(p_j)] \quad (8)$$

式中,  $N(i)$  为顶点  $p_i$  的一环邻域,  $d_i$  为顶点的质量,  $w_{ij}$  为对称的边权重。上述 LBO 的特征方程其离散化矩阵表示形式为

$$Lf = \lambda Df \quad (9)$$

式中,  $f \stackrel{\text{def}}{=} (f(p_1), f(p_2), \dots, f(p_n))^T$ , 表示  $f$  在各个顶点上的取值; 刚度矩阵  $L \stackrel{\text{def}}{=} V - W$ ; 权值矩阵  $W \stackrel{\text{def}}{=} (w_{ij})$ ; 对角矩阵  $V \stackrel{\text{def}}{=} \text{diag}(v_1, v_2, \dots, v_n)$ ,  $v_i \stackrel{\text{def}}{=} \sum_{j \in N(i)} w_{ij}$ ; 质量矩阵  $D \stackrel{\text{def}}{=} \text{diag}(d_1, d_2, \dots, d_n)$ 。

根据边权重  $w_{ij}$  和顶点质量  $d_i$  的选取策略, 上述离散化 LBO 分为几何离散算子和有限元离散算子<sup>[14]</sup>。从文献[15]中得知, 相对于几何离散算子, 有限元离散算子具有更好的逼近精度和鲁棒性, 故采用有限元算子进行离散化 LBO。 $\alpha_{ij}, \beta_{ij}, t_1, t_2$  如图 1 所示,  $area$  表示三角形的面积。

$$L(i, j) \stackrel{\text{def}}{=} \begin{cases} \frac{\cot \alpha_{ij} + \cot \beta_{ij}}{2} & (i, j) \in E \\ - \sum_{k \in N(i)} L(i, k) & i = j \end{cases}$$

$$D(i, j) \stackrel{\text{def}}{=} \begin{cases} - \frac{area(t_1) + area(t_2)}{12} & (i, j) \in E \\ - \sum_{k \in N(i)} \frac{area(t_k)}{6} & i = j \end{cases}$$

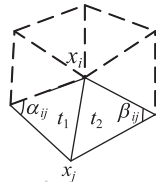


图 1 顶点的邻域

Fig. 1 Neighborhoods of vertex

## 2 Laplace 谱嵌入

对于曲面上的一点  $p$ , 其 Laplace 谱嵌入<sup>[13]</sup> 定义为一无穷维向量

$$L_E(p) \stackrel{\text{def}}{=} \left( \frac{\psi_1(p)}{\sqrt{\lambda_1}}, \frac{\psi_2(p)}{\sqrt{\lambda_2}}, \frac{\psi_3(p)}{\sqrt{\lambda_3}}, \dots \right) \quad (10)$$

式中,  $\psi_i(p)$  表示特征函数在  $p$  点的取值,  $\lambda_i$  表示  $\psi_i$  所对应的特征值(注意:  $\lambda_0 = 0, \psi_0 = const$ , 谱嵌入中舍弃了该分量)。由 Laplace 谱嵌入表达式和三角网格的流形调和和分析可知, 谱域两点间的距离主要由低频成分决定(较小的特征值  $\lambda$ ), 三角网格的低频成分决定了其大体轮廓, 其高频成分(较大的特征值  $\lambda$ ) 决定了模型细节。Laplace 谱嵌入具有旋转、平移不变性, 同时对物体的姿态变化不敏感, 通过谱嵌入, 将同一物体不同姿态转化为标准姿态, 克服了姿态变化对分割结果的影响, 同时抑制了噪声的影响并增强了网格的结构可分性(如图 2 所示, 为了可视化, Laplace 谱嵌入只利用了最小 4 个特征值和特征向量)。

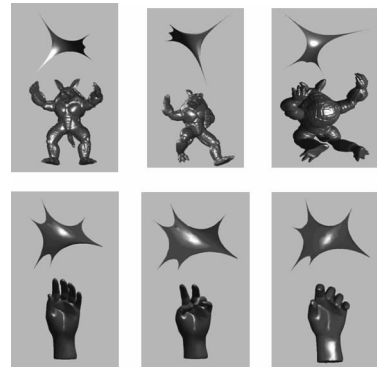


图 2 Laplace 谱嵌入

Fig. 2 Laplace spectral embedding

## 3 Mean Shift 聚类分割

均值漂移(mean shift)算法是一种基于核密度估计的简单而有效的非参数迭代模式搜索算法, 相对目前大多数的聚类算法需要事先确定聚类数目, 它能够通过迭代计算获得数据分布的模式点, 自动确定聚类的数目, 并描述出类的边界, 近年来在图像分割、图像跟踪、数据融合等计算机视觉领域得到了广泛地应用。

给定一个初始点  $x$ , 权值函数  $w(x)$ , 核函数  $G(X)$ , 容许误差  $\varepsilon$ , Mean Shift 算法循环执行下面两步, 直至结束条件满足。

$$1) \text{ 计算 } m_h(x) = \frac{\sum_{i=1}^n G\left(\frac{x_i - x}{h}\right) w(x_i) x_i}{\sum_{i=1}^n G\left(\frac{x_i - x}{h}\right) w(x_i)}$$

2) 如果  $\|m_h(x) - x\| < \varepsilon$ , 结束循环; 否则, 更新  $x = m_h(x)$ , 继续执行步骤 1)。

由步骤 1) 可知,  $m_h(x)$  不断地沿着概率密度的

梯度方向移动,在满足一定条件下,Mean Shift 算法一定会收敛到该点附近的峰值。步长不仅与梯度的大小有关,也与该点的概率密度有关,在密度大的地方,Mean Shift 算法移动的步长小一些,相反,在密度小的地方,移动的步长就大一些。

为加快算法运行速度,选用 Epanechnikov 核函数,其表达式为

$$G(x) = \begin{cases} 1 - \|x\| & 0 \leq \|x\| < 1 \\ 0 & \|x\| \geq 1 \end{cases} \quad (11)$$

同时,忽略权值函数  $w(x)$  的影响,即  $w(x) \equiv 1$ ,采用 KD(K-dimension) 树存储谱嵌入坐标以加快邻域查询速度。

初始核窗口  $h$  的尺寸的选取策略为:计算网格

顶点 Laplace 谱嵌入后的平均位置向量  $\bar{l} = \frac{\sum l_i}{N}$ ,其中  $l_i$  表示索引为  $i$  的网格顶点的 Laplace 谱嵌入, $N$  为网格顶点总数,构造散度矩阵  $S_\sigma = \sum s_i s_i^T$ ,其中  $s_i = l_i - \bar{l}$ ,  $S_\sigma$  为实对称矩阵,有  $r$  个实特征值  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_r$ ,  $r = \text{rank}(S_\sigma)$  表示矩阵  $S_\sigma$  的秩。初始的初始核窗口的尺寸  $h = \max(\|\lambda_i\|)$ 。通过选择不同的核窗口尺寸,可以获得网格的层次分割结果,如图 3 所示。



图 3 模型的层次分割结果

Fig. 3 Hierarchical segmentation of triangle mesh

### 4 分割边界优化

由于三角网格的离散特性,整个模型的 Laplace 谱嵌入只在网格顶点进行了采样,这就影响了分割边界位置的识别。为了更准确识别各部件的分割边界,采用人类视觉理论中的最小值规则(人类倾向于把最小的负主曲率线定义为组成要素的边界线)来优化边界。

采用图最小割技术,将每个顶点分配到合适的区域中,考虑分割每个子部件的边界平滑以及视觉认知中的最小规则。图最小割算法满足如下能量函数最小。

$$E(c) = \lambda \sum_{\{f,g\} \in N} e_1(c_f, c_g) + w \sum_{v \in \Omega} e_2(v, c_v) \quad (12)$$

$e_1$  是边界平滑项

$$e_1(c_f, c_g) = \begin{cases} l(f, g)(1 - \lg(\theta(f, g)/\pi)) & c_f \neq c_g \\ 0 & c_f = c_g \end{cases} \quad (13)$$

$e_2$  是最小规则项

$$e_2(v, c_v) = \begin{cases} k_v & k_v > 0 \\ e^{k_v-1} & k_v < 0 \end{cases} \quad (14)$$

式中,  $c_v$  是顶点  $v$  被分配到的类,  $\lambda$  是平滑因子,  $\theta(f, g)$  是顶点  $f$  和  $g$  之间的法向量的夹角,  $l(f, g)$  为  $f$  和  $g$  之间的长度;  $\Omega$  是类  $c_v$  的边界,  $k_v$  是顶点的法曲率,  $w$  是最小规则因子。  $e_1$  控制分割边界平滑度,其权因子  $\lambda$  越大则边界越平滑;  $e_2$  是关于顶点曲率的函数,曲率越小,此项值越小,它使得分割的边界尽量落在曲面上曲率小的地方,即“凹陷处”,这使得分割结果更加接近人们的视觉直观。  $e_1, e_2$  相互影响,本文实验中,两参数都取 0.5,能得到比较满意的效果,如图 4 所示。

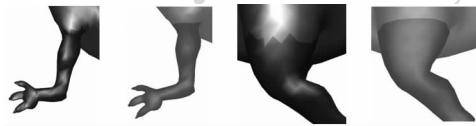


图 4 分割边界优化

Fig. 4 Boundary optimization

### 5 算法实验及分析

为了验证本文算法的有效性,在 Windows 平台上,基于 VC++2003 和 OpenGL 技术实现了本文算法。采用 ARPACK ([www.caam.rice.edu/software/ARPACK](http://www.caam.rice.edu/software/ARPACK)) 求解稀疏矩阵  $L$  的特征值和特征向量,本文所有测试模型均利用  $L$  最小的 15 个特征值和特征向量计算其 Laplace 谱嵌入。将此算法应用于上千网格模型,其三角面片数量从 1 000 至 500 000,部分效果如图 5—图 9 所示。该算法通过 Laplace 谱嵌入,克服模型的姿态变化对分割结果的影响,对同一物体不同姿态的模型能获得一致性的分割结果(图 5 所示)。相对于文献 [16] 中所采用的 MDS (multi-dimensional scaling) 方法,由于不需要计算模型各个顶点间的测距距离和 MDS 变换,本文算法大大提高了运行效率(其复杂度分别为线性复杂度和立方复杂度),如表 1 所示。同时,通过将分割问题

从空域转换到谱域,抑制了噪声的影响,增强了算法的鲁棒性(图 8 所示)。对于具有明显的核心部分和分支结构的模型,该算法将各模型分割为有意义的几部分,得到了较好的分割效果,对于没有明显分支结构的模型,该算法出现了过分割的问题,如图 7 所示。

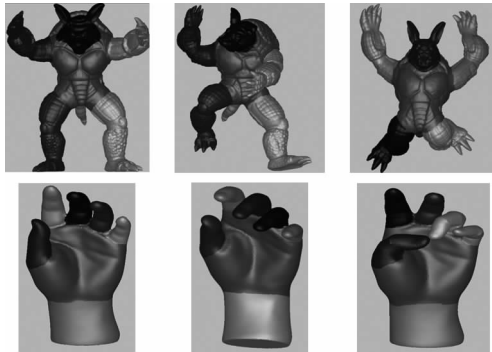


图 5 一致性分割结果

Fig. 5 Consistent segmentation of model

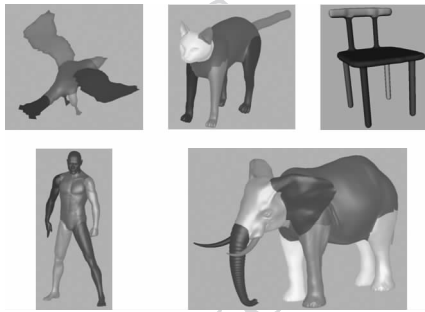


图 6 具有分支结构模型分割结果

Fig. 6 Segmentation of model with obvious branch



图 7 无明显分支结构分割结果

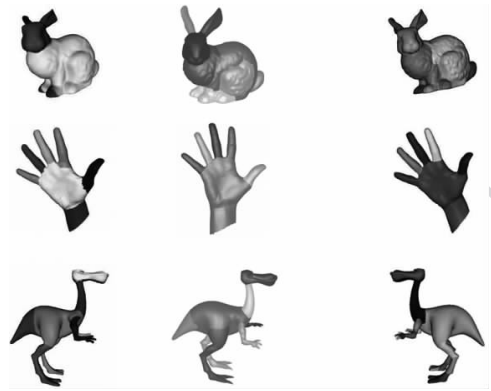
Fig. 7 Segmentation of model without obvious branch



(a) 原始模型 (b) SNR=40 dB (c) SNR=30 dB

图 8 不同噪声强度下的分割结果

Fig. 8 Segmentation of model with different noise



(a) MDS (b) 本文算法 (c) Spectral cluster

图 9 分割结果对比

Fig. 9 Comparison of Segmentation

表 1 算法运行时间对比

Table 1 Comparison of running time

模型(面片数)	MDS	Spectral cluster	本文方法 /s
Bird(2k)	0.66	0.48	0.34
Dinopet(5k)	11.42	1.47	0.97
Cat(15k)	238.39	4.87	2.64
Chair(25k)	1 128.33	8.76	4.18
Man(35k)	3 254.58	16.72	6.07
Hand(50k)	10 512.79	23.68	9.18
Elephant(100k)	82 538.57	38.62	21.69
Armadillo(300k)	2 337 600.14	158.22	60.88

### 6 结 论

本文基于 Laplace 谱嵌入和 Mean Shift 聚类分析,完成了三角网格模型的一致性分割,得到有视觉意义的分割结果。实验结果表明,将网格分割问题从空域转换到 Laplace 谱域,大大降低了噪声和模型姿态对分割结果的影响,对于由核心部件和分支结构构成的网格模型,该算法分割结果比较理想。本文算法回避了基于拓扑连接关系的最短路径算法,计算速度远远优于其他谱系聚类方法<sup>[5-7]</sup>、K 均值聚类方法<sup>[2]</sup>和 K 均值模糊聚类方法<sup>[3]</sup>,同时本文算法可以对退化 3 维模型进行处理。

另外,工作中还需要进一步考虑如下几个问题。首先,对于没有明显分支结构的模型,如何根据其曲率或其他性质构造谱嵌入以增强模型的结构可分

性,是下一步首先需要考虑的问题。其次, Mean Shift 聚类中迭代初始点的选择,本文采用随机选取的方法。如何根据网格模型分割自身特点选取最优的初始点以减少迭代运算次数需要进一步考虑。

### 参考文献 (References)

- [ 1 ] Ariel S. A survey on mesh segmentation techniques[J]. Computer Graphics Forum,2008,27(6):1539-1556.
- [ 2 ] Garland M,Willmott A,Heckbert P. Hierarchical face clustering on polygonal surfaces[C]//Proceedings of ACM Symposium on Interactive 3D Graphics. New York:ACM Press. 2001:49-58.
- [ 3 ] Shlafman S,Tal A,Katz S. Metamorphosis of polyhedral surfaces using decomposition [J]. Computer Graphics Forum, 2002, 21(3):219-228.
- [ 4 ] Katz S,Ayellet T. Hierarchical mesh decomposition using fuzzy clustering and cuts[J]. ACM Transactions on Graphics,2003, 22(3):954-961.
- [ 5 ] Liu R,Zhang H. Segmentation of 3D meshes through spectral clustering [C]// Proceedings of Pacific Graphics. Washington DC:IEEE Press,2004:298-305.
- [ 6 ] Zhang H,Liu R. Mesh segmentation via recursive and visually salient spectral cuts [C]// Proceedings of Vision, Modeling, and Visualization. Berlin:IOS Press,2005:429-436.
- [ 7 ] Liu R,Zhang H. Mesh segmentation via spectral embedding and contour analysis[J]. Computer Graphics Forum,2007,26(3):385-394.
- [ 8 ] Antini G,Berretti S,Bimbo D A. 3D mesh partitioning for retrieval by parts applications[C]// Proceedings of IEEE International Conference on Multimedia. Washington DC:IEEE Press,2005:1210-1213.
- [ 9 ] Wu K,Levine M D. 3D part segmentation using simulated electrical charge distributions[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,1997,19(11):1223-1235.
- [ 10 ] Roudet C,Dupont F,Baskurt A. Multi-resolution mesh segmentation based on surface roughness and wavelet analysis [C]// Proceedings of SPIE. Bellingham:SPIE Press,2007:128-136.
- [ 11 ] Lai Y K,Hu S M,Martinb R R. Rapid and effective segmentation of 3D models using random walks[J]. Computer Aided Geometric Design,2009,26(8):665-679.
- [ 12 ] Vallet B,Lévy B. Spectral geometry processing with manifold harmonics[J]. Computer Graphics Forum,2008,27(2):251-260.
- [ 13 ] Rustomov R M. Laplace-Beltrami eigenfunctions for deformation invariant shape representation[C]// Eurographics Symposium on Geometry Processing. Switzerland: Eurographics Association, 2007:225-233.
- [ 14 ] Reuter M,Wolter F,Peinecke N. Laplace-Beltrami spectra as Shape-DNA of surfaces and solids[J]. Computer Aided Design, 2006,38(4):342-366.
- [ 15 ] Dyer R,Zhang H,Moller T. An investigation of the spectral robustness of mesh Laplacians[R]. Vancouver,Canada:SFU CS School,2007.
- [ 16 ] Katz S,Leifman G,Tal A. Mesh segmentation using feature point and core extraction[J]. The Visual Computer,2005,12(21):865-875.