

基于法矢调整的浮雕曲面粘贴算法

刘胜兰, 汤正翔, 李 博, 张丽艳

(南京航空航天大学 机电学院, 南京 210016)

(mecsliu@nuaa.edu.cn)

摘 要:浮雕是一类将细节附着在平面或曲面背景上的复杂曲面,设计时其背景大多为平面,应用时根据需要将基粘贴在不同的三维产品表面上,这就是浮雕曲面的粘贴问题。将浮雕和目标物体均用三角网格模型表示,提取粘贴的区域作为目标曲面并将其参数化到一个平面上,建立浮雕附着的平面与目标曲面之间的关系,然后设计一种法矢调整算法使得浮雕在目标曲面上变形较小,最后将浮雕和目标曲面合成为一个完整的三角网格。所提算法不仅适合形状变化平缓、曲率小的目标曲面,对于曲率大的目标曲面也有较好的粘贴效果。

关键词:浮雕曲面;剪切粘贴;网格编辑;曲面参数化

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A

Relief pasting algorithm based on normal vector adjustment

LIU Sheng-lan, TANG Zheng-xiang, LI Bo, ZHANG Li-yan

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing Jiangsu 210016, China)

Abstract: Relief is a kind of complex surface where the detail is attached onto a flat or curved background surface. The detail is usually designed on a plane background and then pasted onto 3D shapes for various applications, which is defined as a relief pasting problem. In this paper, both relief and target object were expressed as triangular mesh models. Firstly, an area on the target object was specified and parameterized onto a plane, so the relationship between the source relief and the target area was established. Secondly, an algorithm based on normal vector adjustment was designed for relief wrapping on the new base with less distortion. Finally, the relief and the target area were integrated into a complete triangular mesh. The proposed method is not only suitable for the target surface with a shape of flat or small curvature, but also has a good result for the target area with large curvature.

Key words: relief surface; cut-and-paste; mesh editing; surface parameterization

0 引言

浮雕,从艺术上说,是在平面或曲面上雕刻出凹凸起伏形状的一种雕塑艺术。在现代工业生产中,浮雕应用遍及人类生活的各个方面,例如:产品铭牌、钱币、瓷器、建筑装饰等。在浮雕产品数字化设计制造过程中,为简单方便,人们通常将浮雕和产品基体分别进行设计,初始设计的浮雕通常附着在平面上,然后根据需要将其粘贴在产品基体表面上,这就是浮雕曲面的粘贴问题。图1显示了浮雕粘贴在花瓶产品模型上的结果。

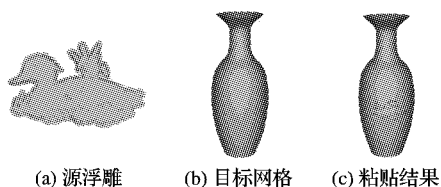


图1 浮雕粘贴实例1

从几何表达上,浮雕可以看成是一类将模型细节附着在平面或曲面背景上的复杂曲面,其附着的背景被称做基曲面。由于三角网格模型有很强的任意复杂形状的表达力,因而常用来描述浮雕这种形状复杂变化、细节多的曲面。在本文中,浮雕和被粘贴的产品模型均用三角网格模型来描述,浮雕

粘贴也可以看成是将两个网格曲面相结合、形成一个整体网格的过程。作为网格编辑的一种方法,网格粘贴往往与剪切结合在一起,形成剪切与粘贴操作,也就是在源网格模型上剪切出部分特征区域,变形后放置并粘贴在目标网格曲面上。

近年来,许多学者对网格的剪切与粘贴问题进行了深入的研究,根据粘贴部分是源网格中的细节还是全三维网格曲面,可将这些方法分为两类:细节包裹法和混合法。细节包裹法对选择的源网格特征区域进行基曲面和细节的分离,重点考虑其中的细节,将其映射并包裹在目标网格曲面上。采用这种方法的代表性文献有:Biernann 等人^[1]对多分辨网格曲面进行了剪切与粘贴研究,讨论了基曲面提取、粘贴区域的确定等问题,他们采用参数化方法建立源网格的基曲面与目标网格的关系进而实现网格粘贴;文献^[2]采用B样条曲面/体拟合的方法对所选的网格进行参数化,实现细节曲面分离以及网格粘贴;文献^[3]采用孔洞填充和光顺的方法实现基曲面和细节曲面提取,可用于源网格为非零亏格的情况。混合法对源网格不进行基曲面和细节的分离,将选取的源网格直接或者适当变形后与目的网格进行布尔组合,并在相交线处进行光滑处理。如:Kanai 等人^[4]通过对源网格区域边界的变形、网格的参数化等技术实现网格的剪切与粘贴;Yu 等人^[5]提出一种基于Poisson方程的梯度操作方法对网格进行

收稿日期:2010-07-05;修回日期:2010-08-09。 基金项目:国家自然科学基金资助项目(50875126)。

作者简介:刘胜兰(1972-),女,湖北武穴人,副教授,主要研究方向:逆向工程; 汤正翔(1987-),男,湖北汉川人,硕士研究生,主要研究方向:CAD/CAM、逆向工程; 李博(1982-),男,河南许昌人,博士研究生,主要研究方向:CAD/CAM、逆向工程; 张丽艳(1967-),女,辽宁宽甸人,教授,博士生导师,主要研究方向:CAD/CAM、逆向工程。

编辑,并实现了两个网格之间的粘贴。本文算法借鉴了已有研究中,粘贴目标区域的提取、网格间的参数化映射等技术。对浮雕粘贴,为达到好的设计效果和视觉效果,通常希望在粘贴过程中浮雕的变形量小,但已有的算法没有对此问题进行讨论。另外值得说明的是,本文中的源浮雕的基曲面均为平面,因而无需考虑基曲面和细节曲面的分离问题。

本文考虑浮雕粘贴过程中的变形,提出一种基于法矢调整的浮雕粘贴算法。首先让用户指定粘贴的目标区域,通过将该区域参数化到平面上的方法建立源浮雕基平面与目标曲面之间的映射关系,然后设计一种法矢调整算法使得浮雕在新曲面上变形较小,最后将浮雕和目标曲面合成为一个完整的三角网格,实现产品的浮雕添加。

1 浮雕的设计和粘贴变形分析

如前文所述,从几何表达上,浮雕由附着的基曲面和其上的细节曲面组成,借鉴文献[6]用偏置映射对细节曲面的表示,浮雕曲面(记为 F)可表示成如下的形式:

$$F = B + D = B + h \cdot n \quad (1)$$

其中: B 为基曲面; D 为细节曲面; n 为基曲面的法矢; h 为细节对基曲面的偏置,也即浮雕的高度。

要进行浮雕粘贴,首先就需要得到浮雕模型。在现阶段,浮雕的设计方法主要有三种:1)基于二维图形或图像的浮雕设计方法,目前已经发展得比较成熟,广泛应用于国内外市场上的主流浮雕设计商业软件,如 ArtCAM、Type3、精雕、文泰雕刻等;2)基于三维模型的浮雕设计方法,以三维几何模型为输入,通过对模型进行给定方向上的深度压缩得到浮雕^[7-9];3)基于逆向工程的浮雕设计方法,先通过三维扫描仪获取浮雕实物的三维数据(如三角网格),再经过识别、浮雕分割、背景基曲面求解、展平等步骤得到浮雕^[10-11]。

本文实例中的浮雕是运用基于逆向工程的浮雕设计方法得到的,对另两种方法设计的浮雕同样适用。这里讨论的浮雕是2.5维的,也即:浮雕附着的基曲面 B 是一个平面,与该平面垂直的任意直线和浮雕曲面的交点数不大于1。

改变浮雕附着的基曲面 B ,计算基曲面各点的法矢 n ,保持各点的浮雕高度 h 不变,可将浮雕在不同的模型间进行转换和粘贴。由于初始浮雕附着的基曲面是平面的,因此当浮雕粘贴的部位是平面时,浮雕附着的基曲面还是平面,不会产生变形;但是当浮雕粘贴的部位是曲面时,此时浮雕附着的基曲面由平面变成了曲面,就会产生很大的变形。这种变形的影响因素可以分为两类:1)由于基曲面的形状不同,在两曲面之间建立映射时会产生变形;2)由于浮雕是有高度的,当基曲面的曲率较大时,浮雕附着在基表面上的底部与浮雕的最高处的大小不一致,两者之间存在变形。

图2为将基曲面为平面的浮雕粘贴至一曲面上的变形情况截面示意图。设截面处源浮雕的长度为 l ,高度为 h ,当将其粘贴至曲率半径为 r 的曲面上时,其粘贴宽度为 θr ,很显然,当该曲面为非可展曲面时, θr 通常并不等于 l ,这就是前文中提到的第1)类变形影响因素,对这类变形可通过合适的参数化方法(如文献[12-13])来降低。假设目标曲面为可展曲面,且其参数化结果与曲面间没有变形,如柱面,将浮雕按式(1)粘贴后,由于目标曲面各处的法矢不同(如图2(b)),使得粘贴后浮雕底部宽度为 θr ,而顶部宽度却为 $\theta(r+h)$,存在变形。对上述的这种第2)类变形可通过调整目标曲面的法矢来减少,如图2(c)所示。因此,本文对底部与顶部变形

较大处的法矢进行调整,变形较小处的法矢保持不变。

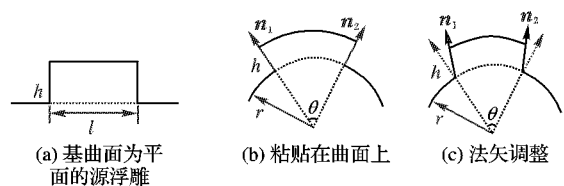


图2 浮雕粘贴变形示意图

2 基本算法

设被粘贴的源浮雕为 F^R ,目标物体为 M^T 。本文算法分为以下4个步骤。

1)目标曲面提取。用户在 M^T 上选择浮雕粘贴的区域,得到目标基曲面 B^T 。

2)曲面参数化。将源浮雕基曲面 B^R 和目标基曲面 B^T 参数化到平面上,得到平面三角网格 P^R 与 P^T ,再通过平移、旋转和比例变换,确定 P^R 在 P^T 中的位置,根据三角形的重心坐标得到 B^R 与 B^T 的对应关系。

3)浮雕重构。在 B^T 上重构拓扑形状与 B^R 一致的网格,并对重构的网格各顶点法矢方向进行调整,使得在各点的法矢方向上加上浮雕高度后,重构的新浮雕 F^T 与源浮雕 F^R 之间变形较小。

4)网格融合。删除目标基曲面 B^T 上与新浮雕 F^T 重叠的三角网格,得到网格 H^T ;将与 F^T 合成为一个三角网格曲面 F^C ,进而得到一个完整的三角网格 M^C ($F^C \cup H^T$),其中 $\bar{F}^T = M^T - F^T$ 。

2.1 目标曲面提取

算法的第一步是在目标物体 M^T 上指定粘贴的区域,这个粘贴区域就是目标浮雕的基曲面 B^T 。用户在目标物体上按逆时针方向选择一些点,找出两相邻点间的最短路径,将这些路径连接起来,得到一条封闭环,封闭环内的区域就是目标曲面。其中网格上两点间的最短路径采用Dijkstra算法^[14]计算,因而路径上每一点都是网格模型的顶点。本文算法中,对目标区域的形状没有限制,为了得到较好的参数化结果,建议其边界为凸多边形。

2.2 曲面参数化

曲面参数化是指对源浮雕基曲面 B^R 和目标基曲面 B^T 的参数化,从而建立两个基曲面间的映射关系。文献[12-13]给出了两种代表性参数化方法:Floater^[12]通过给每条边附加1个与边长相关的权值提出了一种具有保形的凸组合参数化方法,能够保证参数化的结果为一一映射,对于不同网格曲面的参数化变形情况比较稳定;Desburn等人^[13]提出了一个保面积和保角度两者线性混合的度量,提供了一个参数来平衡两因素对最终扭曲产生的影响,然后最小化线性混合的扭曲能量函数。

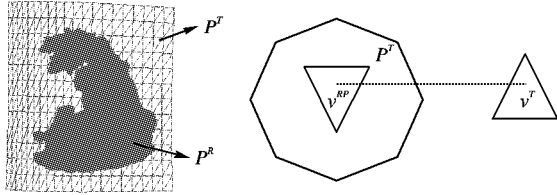
本文中,源浮雕是附着在 XOY 平面上的一个2.5维的曲面,则式(1)可简化为 $F^R = B^R + h \cdot (0,0,1)^T$,即各点的 Z 轴坐标就是浮雕在各点的高度。由于基曲面 B^R 为平面,其参数化结果 P^R 就等于 B^R 。

对目标基曲面 B^T 的参数化,本文采用Desbrun等人^[13]提出的基于网格自身特性的参数化方法。该方法无需固定参数化模型的边界,只需给定边界上的两点,即可获得具有自然展开边界的参数化结果,且变形较小,很适合本文算法中具有任意边界形状的目标区域。实际编程中,参数化边界的第一点为用户选择区域时的第一点,边界上的第二点为在几何距离

上离第一点最远的点,即可生成平面网格 P^T 。

获得两个基曲面的参数化结果 P^R 和 P^T 后,对 P^R 进行平移、旋转和比例变换,确定 P^R 在 P^T 中的位置,也就确定了浮雕在目标物体上的粘贴位置,如图 3(a) 所示。

对 P^R 上的每个网格顶点 v^{RP} ,找出其在 P^T 中对应的三角片,计算 v^{RP} 在该三角片中的重心坐标 v^{TP} ,即可建立两个基曲面间的映射关系。计算该重心坐标 v^{TP} 在三维目标基曲面 B^T 上的空间坐标,就可获得源浮雕的基平面 B^R 上的各点映射在目标基曲面 B^T 上的空间位置 v^T ,如图 3(b) 所示。



(a) 两个基曲面的参数化结果 (b) 两个基曲面上的对应点
图3 两个基曲面上点的对应关系

2.3 浮雕重构

在上一节中,已经获得了源浮雕的基平面 B^R 上的各点 v^R 映射在目标基曲面 B^T 上的空间位置 v^T ,各 v^T 点所对应的浮雕高度 h 保持不变,因此如果计算出各 v^T 点的法矢,根据式 (1) 就可获得新的浮雕曲面。如在第 1 章中所分析的,由于目标基曲面法矢和浮雕高度 h 的共同作用,浮雕会有所变形,特别是在形状变化急剧(即曲率大)的部位,因而必须对目标基曲面各点 v^T 的法矢进行调整,减少邻点间法矢的夹角,从而减少浮雕变形。

如图 4(a) 所示,设 v_i^T, v_j^T 是基曲面上两相邻顶点,浮雕底面在此处的长度为 l^B ,顶部的长度为 l^U ,则顶部与底部的变形量为 $\varepsilon = \left| \frac{l^U - l^B}{l^B} \right|$,若变形量在阈值范围内,即 $\varepsilon < \varepsilon_a$ (本文实例中,通常取 $\varepsilon_a = 0.5$),则认为该处的法矢合适,可不进行处理;否则定义该相邻顶点互为法矢影响点,将某顶点的所有法矢影响点的集合记为 S ,对顶点 v_i^T 进行法矢调整,有:

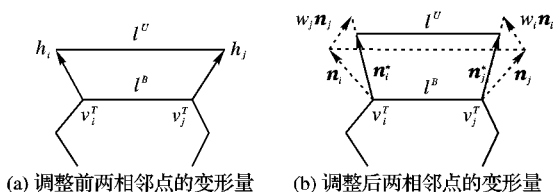
$$n_i^* = n_i + \sum_{j \in S(i)} w_j n_j \quad (2)$$

其中 w_j 为权值,当 $\varepsilon_{ij} > 1$ 时, $w_j = 1/\varepsilon_{ij}$; 当 $\varepsilon_{ij} \leq 1$ 时, $w_j = \varepsilon_{ij}$ 。

如图 4(b) 所示,当单独研究 v_i^T 与 v_j^T 这对法矢影响点时,法矢调整前后,顶部的长度 l^U 发生了变化,可计算得到调整后变形量小于调整前的变形量。

由于调整一个顶点法矢会影响一阶邻域上的多个三角片,因此这里进行多次迭代更新。这里 v 为浮雕上一点, f_n 为第 n 次迭代时 v 的一阶邻域上的总变形量,令 $\eta = \frac{|f_n - f_{n+1}|}{f_n}$ 。当浮雕上任意一点都满足 $\eta \leq 0.05$ 时,迭代结束;或者当迭代次数 $n \geq 10$ 时,迭代结束。

用调整后的法矢进行浮雕重构,就可获得新的浮雕曲面 F^T 。在目标基曲面 B^T 上删除与 F^T 的对应三角片,就可删除重合部分,并得到目标基曲面 B^T 的外围部分 H^T 。



(a) 调整前两相邻点的变形量 (b) 调整后两相邻点的变形量
图4 两相邻点的变形量

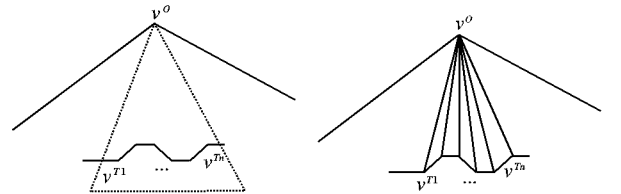
2.4 网格融合

经过上述步骤,已经得到新的浮雕 F^T 、目标基曲面 B^T 的外围部分 H^T ,但两者之间还是分离的,需要进行合成。可以将 F^T 与 H^T 的合成看成环形孔洞的修补问题。国内外许多学者对三角网格中孔洞修补问题进行了研究^[15-16],主要孔洞修补方法有两种:1)不添加新采样点的直接孔洞修补。在提取孔洞边界之后,直接用相连边界形成三角形,将孔洞填充^[15]。该方法快速简单,但大面积复杂孔洞修补效果不佳,修补形状突兀。2)添加采样点的孔洞修补。在孔洞内部增加新的采样点,获得与原始网格布局和密度相近的修补网格,且实现修补网格与原始网格的光顺连接^[16]。本文中孔洞修补(其中 H^T 的内边界就是孔洞的外边界, F^T 的外边界就是孔洞的内边界)需要添加一些采样点。具体过程如下:首先在目标基曲面 B^T 上找到与孔洞内边界点对应的空间点,将孔洞的内边界点与这些空间点连接起来;然后建立这些空间点与孔洞外边界点的对应关系,再将这些空间点与孔洞外边界点连接起来;最后完成孔洞的修补。

先将孔洞内边界点与添加点连接起来。对于孔洞的内边界上任意一点 v^I ,由 2.3 节中可知在目标基曲面 B^T 上,都存在着空间点 v^T 与之对应,依次将这些 v^I 与 v^T 连接起来,生成新的三角片。

再将添加点与孔洞外边界点连接起来。 v^O 为孔洞的外边界上任意一点(也是 H^T 的内边界点),根据 2.3 节由 B^T 删除网格得到 H^T 的过程,可以知道在 v^O 的一阶邻域上存在三角片 f ,使得 B^T 上的一小部分空间点 $v^{T1}, v^{T2}, \dots, v^{Tn}$ (与孔洞的内边界点 $v^{I1}, v^{I2}, \dots, v^{In}$ 对应)落在 f 内,这样就找到了 v^O 与 $v^{T1}, v^{T2}, \dots, v^{Tn}$ 的对应关系(图 5(a));依次将 v^O 与 $v^{T1}, v^{T2}, \dots, v^{Tn}$ 连接起来,生成新的三角片(图 5(b))。

最后所有类似 v^T 这样的空间点,都被添加到网格模型中,孔洞就被填充起来,得到合成的三角网格 F^C 。进而与网格 F^T 合成,得到最后的网格 M^C 。



(a) 外边界点与空间点 (b) 外边界点与空间点连接成的三角片
图5 孔洞外边界点与添加的空间点的对应关系

3 实验结果

运用本文的算法,在主频 2.5 GHz、内存 2 GB 的 Pentium Dual-Core 计算机上对多个浮雕模型进行了粘贴。由第 1 章中可知,浮雕存在着两种变形,第一种变形与网格参数化方法有关,这里不予讨论。我们只对第二种变形进行计算,具体就是 2.3 节中提到的变形量 ε 。表 1 列出了几种典型浮雕粘贴时的变形。

图 6 是将浮雕粘贴在一茶壶模型曲率较小区域上的结果,(a)在粘贴的过程中没有调整法矢,(b)调整了法矢。从表 1 中可以看到,调整了法矢的 ε 的最大值和方差都小于没有调整法矢时。由于粘贴区域的曲率较小,只在极个别位置有较大变形,因而从外观上看两者变化不大。

图 7 和图 8 是将浮雕粘贴在目标模型曲率较大区域的结果,可以明显地看到调整了法矢的浮雕粘贴比没有调整法矢的浮雕粘贴结果要好(图 7 中长方体的棱边处;图 8 中立方体

的棱角处)。另外从表 1 中也可以看到,调整了法矢的 ε 的最大值和方差都远小于没有调整法矢时。

表 1 粘贴过程中浮雕变形的大小

实例		ε 的最大值	ε 平均值	ε 的方差
实例 2	法矢调整前	2.2344	0.0566	39.8127
	法矢调整后	0.7849	0.0506	32.6901
实例 3	法矢调整前	6.8107	0.0267	80.1909
	法矢调整后	0.4999	0.0233	21.4443
实例 4	法矢调整前	8.9215	0.0385	80.1418
	法矢调整后	0.7432	0.0342	22.3004

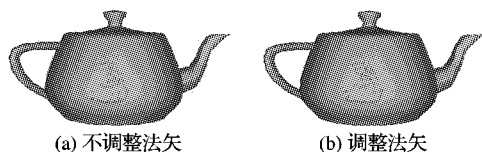


图 6 浮雕粘贴实例 2

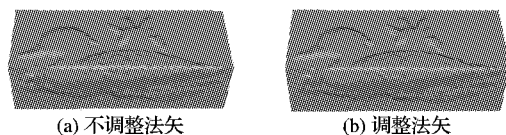


图 7 浮雕粘贴实例 3

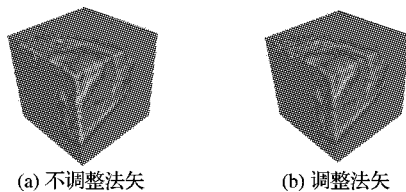


图 8 浮雕粘贴实例 4

4 结语

本文提出了一种基于法矢调整的浮雕粘贴算法。目前已有的粘贴算法都是针对普通三角网格模型的粘贴,很少考虑网格的变形,并且当粘贴区域的曲率较大时,粘贴的效果也不是太好。本文算法不仅实现了浮雕的粘贴,而且通过调整法矢的方法减小了浮雕在粘贴过程中的变形。通过实例可以发现,本文算法在减小浮雕变形的基础上,不管是对形状变化平缓、曲率小的粘贴区域,还是曲率较大的粘贴区域,都有较好的结果。

同时,本文算法还存在着一些不足,主要针对 2.5 维的浮雕模型。当浮雕模型具有三维性时,本文算法无法处理。如何进行三维性浮雕的粘贴,将是以后研究工作中需要重点关注的方面。

参考文献:

[1] BIERMANN H, MARTIN I, BERNARDINI F, *et al.* Cut-and-paste editing of multiresolutionsurfaces[J]. ACM Transactions on Graphics, 2002, 21(3): 312 - 321.

[2] FURUKAWA Y, MASUDA H, MIURA KT, *et al.* Cut-and-paste editing based on constrained B-spline volume fitting [EB/OL]. [2010 - 02 - 10]. <http://www.nakl.t.u-tokyo.ac.jp/~masuda/papers/CGI03.pdf>.

[3] FU H B, TAI C L, ZHANG H X. Topology-free cut-and-paste editing over meshes[C]// Proceedings of the 3rd International Conference on Geometric Modeling and Processing. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2004: 173.

[4] KANAI T, SUZUKI H, MITANI J, *et al.* Interactive mesh fusion based on local 3D metamorphosis[C]// Proceedings of Graphics Interface. San Francisco, CA: Morgan Kaufmann Publishers, 1999: 148 - 156.

[5] YU YIZHOU, ZHOU KUN, XU DONG, *et al.* Mesh editing with poisson-based gradient field manipulation[C]// International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York: ACM, 2004: 644 - 651.

[6] KRISHNAMURTHY V, LEVOY M. Fitting smooth surfaces to dense polygon meshes[C]// Proceedings of the 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York: ACM, 1996: 313 - 324.

[7] WEYRICH T, DENG JIA, BARNES C, *et al.* Digital bas-relief from 3D scenes[J]. ACM Transactions on Graphics, 2007, 26(3): 32 - 38.

[8] KERBER J, BELYAEV A, ZAYER R. Feature sensitive bas-relief generation[C]// International Conference on Shape Modeling and Applications. New York: IEEE, 2009: 148 - 154.

[9] SUN X F, ROSIN P L, MARTIN R R. Bas-relief generation using adaptive histogram equalization[J]. Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2009, 15(4): 642 - 653.

[10] LIU S L, MARTIN R R, LANGBEIN F C, *et al.* Segmenting reliefs on triangle meshes[C]// Proceedings of the 2006 ACM Symposium on Solid and Physical Modeling. New York: ACM, 2006: 7 - 16.

[11] LIU S L, MARTIN R R, LANGBEIN F C, *et al.* Segmenting periodic reliefs on triangle meshes[C]// Proceedings of the 12th IMA International Conference on Mathematics of Surfaces. Berlin: Springer-Verlag, 2007: 290 - 306.

[12] FLOATER M S. Parameterization and smooth approximation of surface triangulations[J]. Computer Aided Geometric Design, 1997, 14(3): 231 - 250.

[13] DESBRUN M, MEYER M, ALLIEZ P. Intrinsic parameterizations of surface meshes[J]. Computer Graphics Forum, 2002, 21(3): 209 - 218.

[14] DIJKSTRA E W. A note on two problems in connection with graphs [J]. Numerical Mathematics, 1959, 1: 269 - 271.

[15] 唐杰, 周来水, 周儒荣, 等. STL 文件修补算法研究[J]. 机械科学与技术, 2000, 19(4): 677 - 679.

[16] 张丽艳, 周儒荣, 周来水. 三角网格模型孔洞修补算法研究[J]. 应用科学学报, 2002, 20(3): 221 - 224.

(上接第 5 页)

[14] SHILANE P, MIN P, KAZHDAN M, *et al.* The princeton shape benchmark[C]// Proceedings of Shape Modeling International. Washington, D C: IEEE Computer Society, 2004: 167 - 178.

[15] GOSPODNETIC O, HATCHER E. Lucene IN ACTION 中文版 [M]. 谭鸿, 译. 北京: 电子工业出版社, 2007.

[16] 潘翔. 三维模型形状分析和检索[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.

[17] FUNKHOUSER T, MIN P, KAZHDAN M, *et al.* A search engine for 3D models [J]. ACM Transactions on Graphics, 2003, 22

(1): 83 - 105.

[18] IYER N, JAYANTI S, LOU K, *et al.* Three-dimensional shape searching: state-of-the-art review and future trends [J]. Computer-Aided Design, 2005, 37(5): 509 - 530.

[19] VRANIC D, SAUPE D, RICHTER J. Tools for 3D-object retrieval: Karhunen-Loeve transform and spherical harmonics [C]// IEEE Workshop on Multimedia Signal Processing. New York: IEEE, 2001: 293 - 298.