

基于二次曲面拟合的机械模型交互式分割方法

吴仲琦¹⁾, 郭建伟²⁾, 肖俊^{1)*}, 曾祥永³⁾, 王颖¹⁾, 严冬明²⁾

¹⁾ (中国科学院大学, 人工智能技术学院 北京 100049)

²⁾ (模式识别国家重点实验室, 中国科学院自动化研究所 北京 100190)

³⁾ (北京盛开互动科技有限公司 北京 100191)

* (xiaojun@ucas.ac.cn)

摘要: 三维网格模型分割在计算机图形学、计算机视觉等诸多领域有着重要的作用。在很多实际应用中, 一个有意义的分割往往涉及到人类对三维模型的主动认知, 因此全自动分割方法很难得到符合人类感知的准确结果。本文针对三角网格全自动分割方法的自适应能力较差的问题, 提出了一种基于二次曲面拟合的交互式半自动分割方法。我们首先采用变分方法对网格模型进行二次曲面拟合和分割, 然后引入用户的交互信息来指导模型的分割, 并配合迭代优化算法交替使用。具体地, 算法包括以下三个步骤: 基于 Random Sample Consensus (RANSAC) 的初始化、迭代优化、交互式合并与切分。其中, 初始化方法可以取得一个较好的划分结果, 而交互式合并与交互式切分步骤可以与迭代优化步骤交替使用, 利用用户的主观先验知识对分割不够准确的地方进行局部操作, 从而使得分割的效果更为准确、真实。实验结果表明, 本文提出的算法与其他传统方法相比, 在收敛速度与拟合误差方面都有明显的优势, 并且可以对具有不同特征的三维机械模型以及带噪声的模型进行准确、合理的分割。

关键词: 网格分割; 用户交互; 二次曲面拟合

中图法分类号: TP391.41

Interactive Segmentation of Scanned Mechanical Models Based on Quadratic Surfaces Fitting

Wu Zhongqi¹⁾, Guo Jianwei²⁾, Xiao Jun^{1)*}, Zeng Xiangyong³⁾, Wang Ying¹⁾, Yan Dong-Ming²⁾

¹⁾ (School of Artificial Intelligence, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049)

²⁾ (National Laboratory of Pattern Recognition, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190)

³⁾ (Beijing Shengkai Interactive, Beijing, 100191)

Abstract: Mesh segmentation plays an important role in computer graphics and computer vision. In a variety of practical applications, a meaningful segmentation often involves humans' active recognition about the 3D models. Thus, an automatic method is difficult to obtain accurate results that meet humans' perception. This paper proposes an interactive semi-automatic segmentation approach based on quadric surface fitting, aiming at the problem of poor self-adaptability of automatic segmentation methods. We first apply the variational method to perform quadratic surface fitting and segmentation on the input mesh. Then user interaction is introduced to guide the segmentation process, and it is used interchangeably with the Lloyd's iteration algorithm. Specifically, the algorithm includes three steps: RANSAC-based initialization, the iterative optimization, interactive merging and split. The in-

基金项目: 北京市自然科学基金资助项目(4184102), 国家自然科学基金(No. 61471338, 61761003, 61502490, 61501464, 61772523, 61802406); 中国科学院青年促进会(2015361); 中国科学院前沿科学重点研究项目(QYZDY-SSW-SYS004); 北京市科技新星计划(Z171100001117048)。吴仲琦(1993-), 女, 硕士; 郭建伟(1988-), 男, 博士, 助理研究员, CCF 会员, 主要研究方向为计算机图形学、几何处理; 肖俊(1981-), 男, 博士, 教授, 博导, CCF 高级会员, 通讯作者, 主要研究方向为计算机视觉、三维建模、多媒体内容安全; 曾祥永(1978-), 男, 博士, 主要研究方向为计算机视觉、图像处理等; 王颖(1969-), 女, 博士, 教授, 博导, 主要研究方向为计算机图形学、工程计算; 严冬明(1979-), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为计算机图形学、数字几何处理、可视化等。

itialization method can achieve a good partitioning result, and the interactive operations can be used interchangeably with iterative optimization to make the segmentation more accurate and real. The experimental examples show that compared with other traditional methods, our approach has obvious advantages in convergence speed and fitting error. Further, we can accurately segment the mechanical models with complex structure and noise.

Key words: mesh segmentation; user interaction; quadratic surfaces fitting

1 引 言

三维网格模型分割,是将多边形网格模型依据一定的分割准则(几何位置、拓扑结构等特征),分解为一组数目有限、各自具有简单形状意义、且各自连通的子网格片的操作[1,2].由于网格分割有助于减小模型表示的复杂度和提高模型处理的计算速度,并且能够得到一个对三维几何形体的高层语义表示,因此网格分割已成为数字几何处理、计算机图形学和计算机视觉领域的重要研究话题,并且已经广泛应用于很多实际问题中,如三维网格压缩[3],特征识别[4],纹理映射[5],网格变形[6],网格重构[7]等等.

在计算机辅助设计(Computer-aided design, CAD)领域,由CAD软件导出的离散网格模型或者由逆向工程扫描重建得到的网格模型,往往丢失了原始模型中的高层语义信息,如各曲面的几何类型信息,以及曲面之间的对称、平行等几何约束关系等.因此,为了对获取的离散模型进行后续分析处理,关键的一步就是网格模型分割.在过去的几十年中,针对机械零件模型的网格分割已经获得了很多关注.目前,比较经典的分割算法都是基于层次聚类或基于边界特征识别的技术. Cohen-Steiner 等人[8]首先提出了变分形状近似(Variational shape approximation, VSA)框架,将三维网格划分成一个最小的平面代理集合,同时通过迭代优化的方式来最小化拟合误差. Wu 和 Kobbelt [9]则进一步扩展了 VSA 框架,通过引入其他类型的基元代理(球面、圆柱面和过渡面)来更好的逼近输入的网格模型. Yan 等人[10]和 Quan 等人[11]分别使用一般二次曲面对三角形网格表示的三维物体进行分割和拟合.由于二次曲面模型仅采用少量参数就能描述大量不同形状的三维目标,并且形状易于控制,因此可以得到更好的分

割效果.

以上方法都是自动地对输入的模型进行分割.虽然自动分割算法能够满足很多场合的应用需求,但是由于自动分割算法的最优参数难以确定,因此该类算法的适应性较差,很难实现对不同类型的模型同时获得满意的分割效果.鉴于以上问题,本文提出了一种交互式的半自动分割方法,我们首先采用变分方法对网格模型进行二次曲面拟合和分割,然后对自动分割算法的结果加以人工干预,利用先验知识并通过基于勾画的交互方式对不准确的分割结果进行改进,从而得到更为准确的分割结果.注意我们将交互操作集成到迭代优化的过程中,因此该操作可以减少整个算法需要的迭代次数,从而能有效降低算法的计算复杂度.

2 相关工作

针对研究目的和使用的领域不同,研究者们已经提出了大量的网格模型分割算法.由于论文篇幅有限,我们仅介绍与我们的工作密切相关的网格分割算法,有兴趣的读者可以参考更详细的综述文献[2, 12, 13].

2.1 面向机械模型的网格分割

贪心方法.这种方法主要包括区域增长、层次聚类和层次分解.在区域增长方法中,通常先选择一组三角面片作为种子区域,然后遍历这些种子使其生长,直至网格的所有面片被分配到一个区域.该方法通常使用局部特征如法向量和主曲率来指导生长过程[14,15,16].层次聚类方法一般采用自下而上的策略,首先将网格的每个面片视为一个单独区域,然后根据某种度量,将这些类合并为较大的类,直到所有的对象都在一个类中,或是满足某个终止条件为止[17,18,19].最后,层次分解方法与层次聚类相反,网格表面以自上而下的方式分割成有意义的组件[20,21,22].但是,上述

贪心方法的主要特点是只考虑当前的状态是否为最佳状态,而不考虑整体最优,即三角面片被分配给一个区域,且在后面的过程不会被改变。

变分方法. Cohen-Steiner 等人[8]提出了一种变分形状近似的几何分割框架. 在他们的方法中,平面被看作是基本的几何代理,然后通过引入一个新的适当的误差度量来测量总的逼近误差. 变分方法和迭代聚类有非常密切的联系,因此作者将 Lloyd 算法[23]进行有效扩展,提出了一种新的迭代优化方法. 事实上,这个方法包含两个步骤:几何分割(通过 Lloyd 算法将原始面片分成不重叠的连接区域)和代理匹配,为每个分割的区域计算最佳几何代理. 但是该方法只考虑了平面,一些研究人员通过引入更高阶或特殊类型的几何基元,如椭球面[24],可展曲面[25]. Wu 和 Kobbelt [9]也扩展了该框架,可以拟合出球面、圆柱面和更复杂的滚球面. 但是该方法容易造成过分割的效果,并且对噪声的处理不够鲁棒. Yan 等人[26,10]则通过迭代的二次曲面拟合来对 CAD 模型进行分割. Zhang 等人[27]提出了另外一种变分方法将输入的网格模型分解成具有一定语义的子结构. 该方法将 Mumford-Shah 模型扩展到三维网格,在优化的过程中考虑了每个类内的变化情况以及类之间的边界的长度。

2.2 交互式网格模型分割

网格分割算法按照分割的自动程度可以分为自动分割和半自动分割. 虽然自动分割算法能够满足很多场合的应用需求,但目前基于语义的分割对自动算法来说依然是一个难题. 为了得到更有意义的分割结果,近年来基于交互操作的半自动分割算法备受重视[28, 29, 30, 31]. 根据综述文献[28]的划分方法,基于手工交互的分割算法大体分为以下 5 类: (1)基于区域增长的交互分割. Ji 等人[32]利用改进的 isophotic 度量来计算网格顶点之间的特征距离,并使用区域增长法进行网络的分割,在此过程中设计了一个基于前景和背景勾画的用户界面用于辅助网格分割. Wu 等人[33]提出了类似的区域增长算法,但是他们使用了不同的度量方式. (2)基于 Random walks 的交互分割. Lai 等人[34]、Zhang 等人[35]和 Zhou 等人[36]提出的 Random walks 算法也提供了用户交互界面,用于指定前景和背景信息来指导分割过程. (3)基于层次聚类的交互分割. Xiao 等人[37]提出的自底向上的区域聚类算法提取网格高层特征,在此过程中

也可以加入用户交互的前景和背景信息,用于指导网络的分割. (4)基于图割的交互分割. Brown 等人[38]根据用户指定的约束,提出使用最小割算法来确定最优的分割边界. (5)基于网格上保持特征调和场的勾画交互式网格分割技术. Zhang 等人[39]提出基于调和场的分割方法,并使用一种可以跨边界的笔刷用于网络的交互分割. 具体地,用户沿着与边界垂直的方向进行勾画,然后算法自动构造网格上调和场并使用等值线来定义网络的分割边界. Zheng 等人[40, 41]同样基于凹度的调和场,设计了一个称为“Dot Scissor”的分割系统,允许用户通过简单的操作即可达到比较满意的分割效果. 目前已有的方法大多数属于基于部件的分割,这些方法也没有的对分割的部分进行拟合,因此这些方法适合于一般的物体对象(如人体、动物等),而我们的方法则更适合于机械零件模型的分割。

3 问题定义

3.1 问题描述

令 M 是构成网格表面的有限三角形集合 $\{t_j\}_{j=1}^m$. M 的分割可以用 R 来表示,即 $R = \{R_i\}_{i=1}^n$, 其中对于任意 $i \neq j$, 有 $\bigcup_{i=1}^n R_i = M$ 且 $R_i \cap R_j = \emptyset$. 每个子集 R_i 都是一个连通区域,也被称为一个分割聚类,它由一个最佳拟合几何代理所拟合形成,每个几何代理可以用 $P_i = \{s_i, f_i(x)\}$ 表示,其中 $s_i \in R_i$ 是 P_i 的种子三角形, $f_i(x) = 0$ 是一般的二次曲面(平面可以看作是一般二次曲面的特例). 对于一个固定的 $n > 0$, 基于二次曲面拟合的分割可以通过优化一个目标函数实现,该目标函数定义为:

$$E(R) = \sum_{i=1}^n E(R_i, P_i) = \sum_{i=1}^n \sum_{t_j \in R_i} E(t_j, f_i) \quad (1)$$

$E(t_j, f_i)$ 称为三角形到几何代理的距离. 我们按照 Yan 等人[10]给出的定义计算该距离,. 二次曲面 $f(x) = 0$ 的隐式方程为 $f(\mathbf{x}) = \mathbf{C}^T \cdot \mathbf{F}$, 其中 $\mathbf{x} = [x, y, z]^T \in \mathbb{R}^3$ 是三维空间内的一个点, $\mathbf{C} = [c_0, c_1, \dots, c_9]^T$ 是二次曲面的未知系数向量, $\mathbf{F} = [1, x, y, z, xy, xz, yz, x^2, y^2, z^2]^T$. 为计算三角形与几何代理之间的距离,我们同时考虑了欧几里得距离和法向偏差:

$$E(t, f) = E_{L^2}(t, f) + \lambda E_{L^{2,1}}(t, f) \quad (2)$$

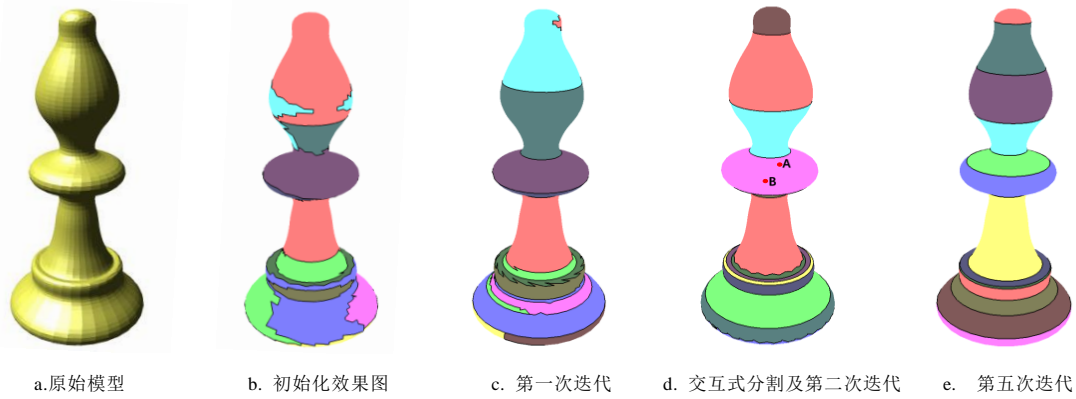


图1 本文算法的工作流程图

E_L 测量三角面片 t 与二次曲面 f 之间欧几里德距离的平方, $E_{L^2,1}$ 计算从 t 到 f 的法向量偏差, λ (默认值为 0.5) 表示平衡权重.

$$E_L(t, f) = \int_t \frac{f(x)^2}{|\nabla f(x)|^2} \cdot d\sigma \quad (3)$$

$$E_{L^2,1}(t, f) = \int_t \left(\frac{\nabla f(x)}{|\nabla f(x)|} - n_t \right)^2 \cdot d\sigma \quad (4)$$

其中 n_t 是 t 的单位法向量, σ 是积分单位.

3.2 算法概述

本文提出的算法主要包括三个步骤: 基于 RANSAC 的初始划分、迭代优化以及交互式合并与切分. 整个分割的过程如图 1 所示, 图 a 为输入的 Chess 模型, 图 b 为使用 RANSAC 算法初始化之后的效果, 图 c 为第一次迭代后的效果, 图 d 是第二次迭代的效果图, 其中 A、B 两点是用户进行交互式切分选择的两点, 用于指导下次迭代的分割, 图 e 为第五次迭代也是最终的分割效果图. 算法初始化的目的是给出一个相对较好的初始划分, 这样可以加快后续迭代的收敛速度. 迭代优化算法的关键步骤是把最佳分割的问题转化为能量最小化问题. 交互式合并切分的意图是加入最少的人工交互操作, 使得分割结果更加精确.

4 算法设计

4.1 初始化

在这个步骤中, 我们首先将输入网格统一缩放到单位立方体 $[0,1]^3$ 中. 同时, 为了提高算法的鲁棒性, 我们进一步对网格进行细分, 使得三角网格 M 的每一条边的长度都小于某一特定的阈值 (默认值为 0.03) [42]. 这种方法可以去除带长边的

细长三角形进而提升分割的准确性.

经典的 VSA 框架中, 随机策略通常用于初始化操作. RANSAC 是一种稳健的模型参数估计算法, 本文同样用该算法进行初始化操作. 首先, 得到一组与三角网格 M 一一对应的对偶点集 S , 其中每个三角形面片的重心对应于 S 中的每个点, 因此 S 中每个点的法线等于其相应的三角形面片的法线. 然后我们使用 RANSAC 进行二次曲面拟合, 主要是采用了平面、圆柱面、球面、圆锥面等几种比较常见的面类型. 基于 RANSAC 算法的分割之后, 我们可以得到 S 的初始分割, 即得到三角网格 M 的初始分割. 但是 RANSAC 算法的结果是非连接的, 并且可能留下一些未分类的点, 因此需要进行进一步的操作来获得连通且不重叠的区域.

移除不连通区域. 该操作需要遍历所有的区域, 并且对每个区域 R_i 检查其连通性. 如果该区域是连通的, 则这个区域保持不变; 如果该区域中有两个连通要素, 则创建新的聚类; 如果该区域多于两个连通要素, 且第二大连通要素的连通比大于 0.25, 则保留最大的连通要素和第二大的连通要素. 通过这一操作之后得到的所有聚均为连通的.

处理未分类的面. RANSAC 算法执行之后, 会存在一些面没有被分配到任何聚类之中. 此外, 上述操作之后也会产生新的未分类的三角形, 利用逐个分配这个简单且原始的策略可以把这些三角形分配到相邻的聚类中. 此时网格中的所有三角形面片均被划分成连通且不重叠的区域.

4.2 迭代优化

在我们的方法中, 网格分割问题被看作能量最小化问题, 可以通过简单扩展的 Lloyd 算法[43]的来解决. Lloyd 算法是最为经典的 K-means 迭代

算法之一, 这个算法包括分区和表面拟合两个步骤, 并有先后顺序. 由于上述初始化的随机性, 为了提高算法分割质量, 特别是针对噪声模型, 引入了几何约束优化算法.

4.2.1 分区

在执行重新分组之前, 对于每个区域 R 先找到种子区域. 在 VSA 框架中, 通常用拟合误差最小的三角形作为种子三角形. 然而, 对噪声模型来说, 这种方法并不稳健, 这就是 QSF[10]对噪声敏感的原因. 为了提高稳定性和对噪声的鲁棒性, 我们用种子区域代替种子三角形. 具体来说, 对于每一个聚类 R_j , 我们首先计算 m ($m=10$) 个最小拟合误差三角形 $T = \{t_i\}_{i=1}^m$, 并遍历这些三角形的邻域三角形记为 $N = \{N_i\}_{i=1}^m$, 其中 N_i 是三角形 t_i 的一组相邻三角形. N_i 中三角形的数量等于 $0.1 \times |R_j|$, 其中 $|R_j|$ 是集合 R_j 中三角形的数量. 对于每个 N_i , 先计算该区域平均拟合误差, 然后选取区域拟合误差最小的 N_i 当作种子区域来进行重组.

在分区的过程中, 动态地维护全局优先级队列 Q , 其优先级为三角代理对 $P(t_i, P_j)$ 的距离. 每个三角形有两个属性, 即访问 (默认为 'false') 和聚类索引 (默认为 -1), 用 $\langle v, \text{idx} \rangle$ 来表示. 首先, 计算所有聚类中种子区域的三角形面片的三角代理距离, 对于这些种子三角形, 将 $v = \text{true}$ 和 idx 设置为相应聚类的索引, 然后将其插入队列 Q . 接下来, 我们逐步提取 Q 的队头元素 $P(\tilde{t}; \tilde{P})$ 其具有当前最小的三角代理距离, 并检查三角形 \tilde{t} 的值. 如果 $\text{idx} \neq -1$, 我们不需要做任何处理; 反之, 将 idx 设置为当前代理 \tilde{P} 的索引. 下一步, 遍历当前代理 \tilde{P} 中 \tilde{t} 的所有未访问的三角形面片 (即 $v = \text{false}$), 并将这些新的三角代理对 (最多两个) 插入 Q 中. 当队列为空时, 停止区域生长这一过程, 从而获得输入网格的新分区.

4.2.2 表面拟合

一旦上述操作获得新的聚类, 我们就为每个区域 R_j 分配一个最优代理 P_j . 主成分分析 (Principal Component Analysis, PCA), 是一种统计方法, 通过正交变换将一组可能存在相关性的变量转换为一组线性不相关的变量, 转换后的这组变量叫主成分. 我们用该算法计算区域 R_j 的平面度[44], 平面度的定义如下:

$$p(R_j) = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3} \quad (5)$$

其中 $0 \leq \lambda_1 \leq \lambda_2 \leq \lambda_3$ 表示协方差矩阵的三个特征值, 这个协方差矩阵构筑于 R_j 中所有三角形的顶点和重心之上. 如果平面度小于阈值 (默认值为 10^{-6}), 则区域 R_j 用一平面来拟合. 否则, 用一个二次曲面来拟合. 值得注意的是, 由于 PCA 对于噪声模型更加健壮, 所以我们使用 PCA 来确定区域是否为平面, 不同于[10]中使用的平面的绝对拟合误差.

4.2.3 区域融合

对于简单的机械模型, 通过 RANSAC 算法初始化后, 再数次迭代即可得到预期的分割效果. 若机械模型较为复杂, 初始化后会形成很多的聚类, 本文在迭代的过程中加入区域融合方法.

一般的, 通过计算两个相邻聚类中的法向量夹角的平均度数, 即可判断这对相邻聚类是否共面. 但在实际情况中, 每个机械模型形成的三角网格的特征、密度各不相同如图 2, 三角面片的形状和大小都会对法向量的方向造成影响. Shamir [2]等提出选择重心为权值来估算法向量和主曲率的方法. 本文参考这一方法, 先估算每个聚类中所有三角形面片以重心加权的法向量, 再比较相邻聚类的法向量夹角, 令两聚类间的法向夹角为 θ , 当 θ 小于等于 4° 时, 我们判定这些三角形面片处于同一个平面, 并将相邻三角形面片加入队列, 继续遍历; 当 θ 大于 4° 时, 将该三角形面片放入新的聚类. 遍历完初始聚类后, 重新遍历产生新的聚类. 但在有些情况下, 自动区域融合的效果并不理想, 因此本文提出交互式的区域合并切分方法.

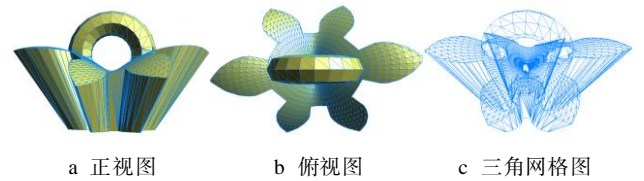


图 2 三角网格特征示意图

4.3 交互式合并切分

不同机械模型特征各不相同, 使用全自动网格分割算法很难得到理想的分割效果. 本文结合很多场合的实际需求使用半自动分割方法, 提出多种新的交互式合并与切分方法, 尽量使用较少的人工干预并且达到预期的效果, 从而提高三维机械模型分割的准确性.

4.3.1 区域合并

使用 RANSAC 算法初始化之后, 我们可以得

到带有颜色信息的聚类分割结果, 此时可以根据实验结果进行调整, 将应属于同一聚类但被误分为多个聚类的模块进行人工合并, 然后再进行自动迭代, 这样可以大大减少迭代的次数, 且提高迭代效果. 如图 3-a 中存在聚类过度分割的情况, 标号 1、2、3、4 的四块聚类应处于同一平面, 我们可以通过鼠标选取进行手工操作, 把这四个聚类合并为一个聚类. 执行该操作时, 可将多个聚类同时进行合并, 合并后该算法会为每个聚类重新分配颜色进行标记, 效果见图 3-b.

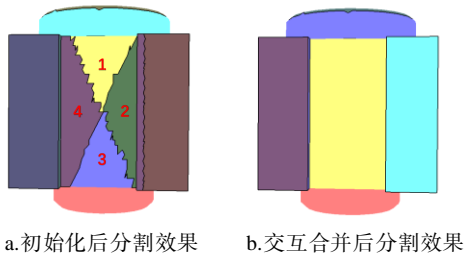


图 3 区域合并操作示意图

由于迭代算法包含不确定性, 交互式合并算法也可以在多次迭代之后调用, 此时把包含过度分割缺陷的聚类直接合并, 可一步到位达到准确的分割目的.

4.3.2 聚类切分

在 RANSAC 算法初始化之后, 存在一个聚类过多地包含相邻聚类的三角形面片的现象, 使得分割结果不够准确. 如图 4 中, a 为原始模型、b 为加入噪声后的模型、c 表示对噪声模型 b 进行初始化的效果图, 其中红色虚线标记出了模型的两条棱. 由于 b 模型的噪声较强, 二次曲面存在过度拟合, 从而模型初始化的效果存在问题, 即使经过多次迭代仍然存在问题. 如图 4 所示紫色聚类包含了相邻聚类的三角形面片. 针对这一问题本文提出了三种改进方案. 第一种方案是选取一个存在过度拟合的聚类, 从聚类中计算出与拟合平面最近和最远的三角形面片. 使这两个三角形面片作为种子面片进行区域生长, 与相邻三角形面片形成新的聚类, 再进行迭代优化至函数收敛, 然后进行边界平滑处理.

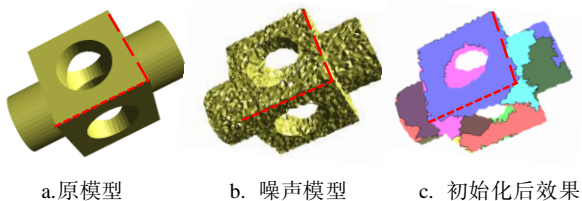


图 4 需聚类切分处理的模型实例

第二种方案是本文提出的一种基于三角形面片法向量进行局部切分的新算法. 选取一个未达到预期目标的聚类进行局部操作, 在该聚类中手动选择位置插入两个种子点, 将种子点所在的三角网格作为种子三角形, 计算该三角网格的法向量, 并通过该三角网格的半边结构对其邻域三角网格进行遍历. 假定种子三角形的法向量与其相邻三角网格的法向量之间的夹角为 θ , 当 θ 小于等于 5° 时, 我们判定这些三角网格处于同一个平面, 并将相邻三角网格加入队列, 继续遍历; 当 θ 大于 5° 时, 我们判定这些三角网格处于不同的平面内, 并将其放入新的聚类中. 遍历完该聚类中所有的三角网格后, 形成多个聚类, 将所有的聚类标记新的颜色信息, 达到精准分割的目的. 如图 5-a 中, 我们在同一聚类中插入两个点 A 和 B, 进行局部切分, 可以得到图 5-b 的效果, 此时使用一次迭代优化即可形成图 5-c 的分割结果.

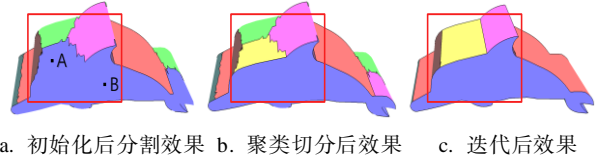


图 5 基于法向量切分操作示意图

第三种方案是通过鼠标勾画式交互的方法, 选取一个未达到预期目标的聚类进行局部操作, 在分割不准确的位置用鼠标直接画一条线, 并按照线所在的位置进行切分. 如图为了便于观察, 我们在模型表面显示出三角网格, 图 6-a 为初始化之后的效果图, 图 6-b 中用鼠标画出一条红色的线, 图 6-c 为该算法分割之后的结果.

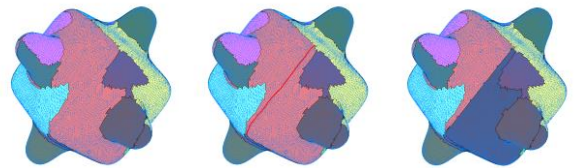


图 6 鼠标画线分割操作示意图

本文所提及的交互式切分方法均可与迭代优化过程交替使用, 减少整个算法的迭代次数以及计算复杂度, 且模型的实际分割效果更为理想. 在交互的实验过程中, 若我们对当前的交互结果满意时, 可以人工选择保持这一聚类的边界不动, 对其他聚类继续进行迭代优化.

5 实验结果及分析

为了验证本文算法的有效性,我们展示了对多个机械模型进行分割的效果.另外,通过与经典的VSA算法[8]、QSF算法[10]、QUAN[11]的算法进行比较,进一步证明了本算法可以获得更合理的分割结果.本算法用C++实现,所采用的实验环境为 Intel Core I7-7500U (2.70GHz), 8GB 内存, Windows 10 (64-bit)操作系统的笔记本电脑.

实验结果展示.为了验证本文方法的有效性,我们证明了具有不同特征和复杂性的模型分割效果.如图7所展示,RANSAC算法可以给出较好的初始预测,尤其是对于平面区域的识别.基于这一预测,本文的方法可以稳健且快速的得到合理的分割结果.如表1所示,我们统计了不同模型的三角形面片数量(F)、分割后形成的聚类数量(p)、自动分割所需要的时间($T1(s)$)、手动分割时间($Total Time(min)$)及使用的交互次数($Frequency$).结合本文展示的分割效果图,不难看出,本文的结果更接近真实模型,可以将模型表面的孔洞等细节信息处理的更好,且修复一些锯齿状的边缘信息使其变得更加平滑.

表1 对不同模型的三角形面片数量 $|F|$ 、聚类数目 $|p|$ 、自动分割时间 $T1$ 、手动分割时间 $T2$ 及使用时长交互次数 $|I|$ 的统计

Model	$ F $	$ p $	$T1(s)$	$T2(min)$	$ I $
Chess (图1)	8500	12	0.52	1.18	2
Bumpy-cube (图11)	39940	12	2.65	2.03	2
Bone (图9)	30210	5	0.977	0.43	4
Sample (图7)	26700	15	0.437	0.40	1
Grayloc (图7)	68580	58	4.503	9.31	10
Rolling_stage (图7)	100000	33	4.684	2.39	3
Matsya pose (图5)	34840	18	0.807	0.48	1
Plate_noise (图8)	60680	9	2.521	0.58	3
Brake disc (图7)	32560	72	3.297	5.46	6
Cylinder stacking (图13)	41050	40	4.406	1.57	2
Carter_Lp (图15)	40030	44	2.438	5.27	6
Car mold (图7)	20010	22	0.535	3.08	3
Pylon (图7)	101660	14	3.65	4.32	1
Block_noise(图8)	23010	14	1.176	1.07	2

表2 六名不同背景用户的分割情况统计

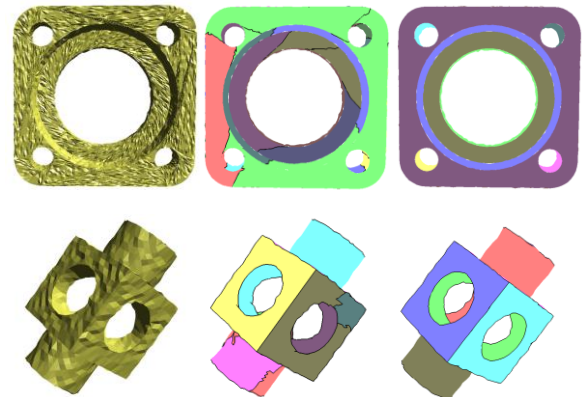
Model	User average time(min)	User average frequency	Average ErrorI
Chess	2'11	2.66	0.0037
Carter_Lp	7'34	8.16	0.0052

为了验证本文交互操作的性能,我们选取了6名具有不同背景的用户进行学习,有的用户对分割的概念较为熟悉,而有的则具备很少的相关知识.本文所提出的交互方法分为两类,一类区域合并方法,另一类区域切分方法.其中,区域切分中包含三种不同的操作方案,我们建议在多个聚类分割不准确的时候优先使用方案一;若一个聚类中需要切分的边界较长时,优先使用方案二;反之选择方案三.用户也可根据当前的分割进度,自行选取合适的方法.表2中统计了六名不同背景的用户分割 Chess 和 Carter_Lp 模型的平均分割时间、平均使用的交互次数及平均分割后的误差率.我们发现,这6名用户能够比较容易的使用我们的交互工具,在较短的时间内达到比较好的分割效果.

鲁棒性.本文所用的算法具有较强的鲁棒性,对于含有一定噪声的模型同样可以达到预期效果.实验中所采用噪声模型是在原始模型上选择一些随机点,对每个点 v 计算出一个新的坐标 v_{noise} ,计算公式定义如下:

$$v_{noise} = v + \sigma * \omega * \mathbf{n}_v \quad (6)$$

其中 σ 为偏移量,默认值为0.01; ω 为均匀分布的随机数,且 $\omega \in [-1,1]$; \mathbf{n}_v 为顶点 v 的单位法向量.如图8,可以看出QUAN的分割方法对于噪声强的模型会出现过度分区的情况,而我们的方法可以避免这一问题,减少聚类的数量,分割结果更加简洁、准确.



a.原始噪声模型 b.QUAN的分割效果 c.本文的分割效果
图8 Plate_noise(上)和 Block_noise(下)模型分割效果

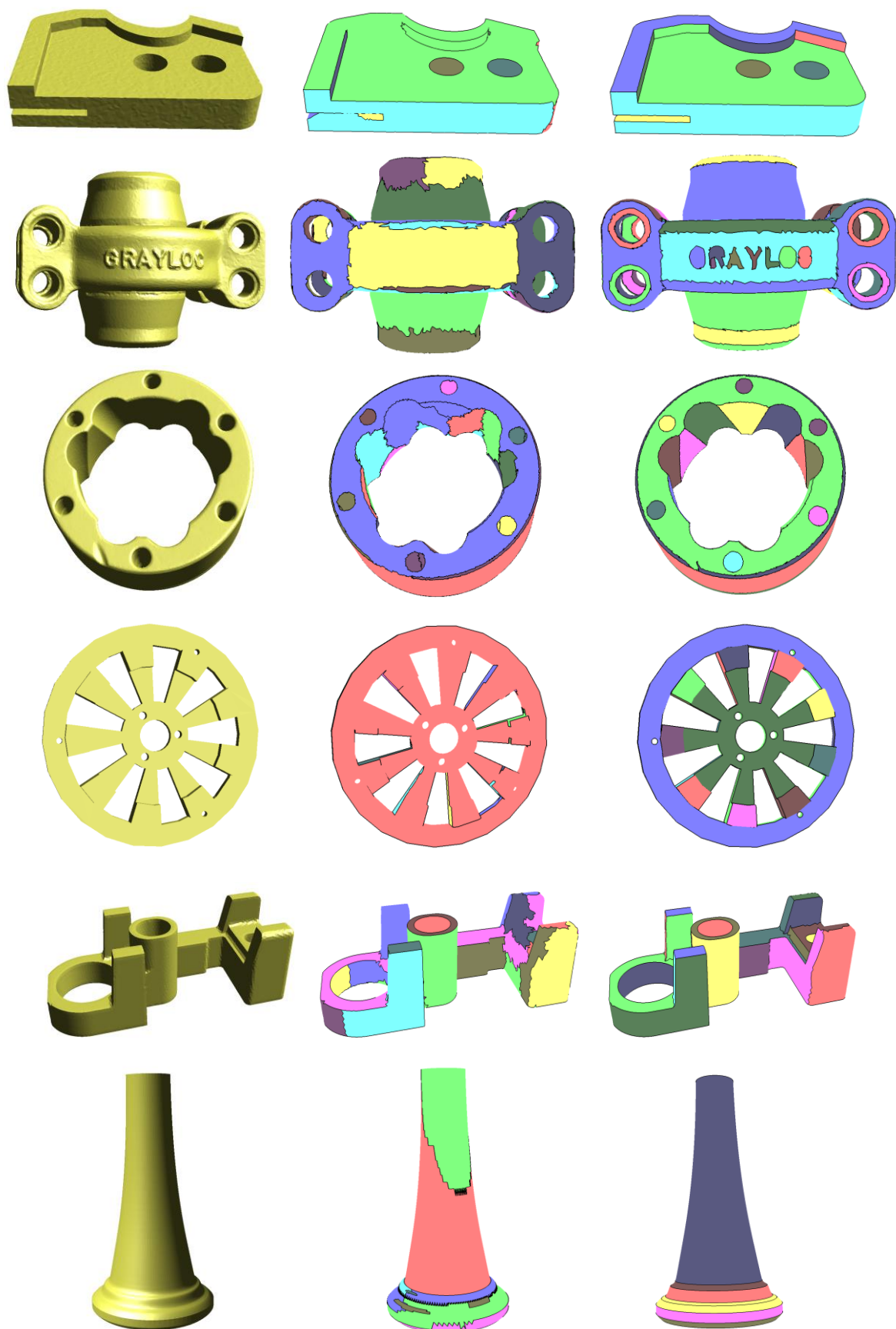


图7 不同模型的分割效果, 从左至右分别为: 输入的原始模型, 初始化效果, 最终分割效果图。从上至下模型名称分别为: Sample, Grayloc, Rolling_stage, Brake disc, Car mold, Pylon。相关参数见表1。

对比实验. 表 3 列举了 VSA 算法、QSF 算法、QUAN 的算法以及本研究所使用的算法对选取的四种模型 (Bone、Bumpy-cube、Carter_Lp、Cylinder stacking) 的分割结果的比较. 为了比较的公平性, 每个方法的输入模型都是一样的, 即都做了细分. 其中, Error 0 表示分割时初始误差率, Error 1 表示分割后的误差率, Time(s) 表示整个自动分割所用的时间. 通过对比分析, 可以发现 VSA 算法的分割时间最短, 然而分割时的拟合误差率是最大的. 本文使用的算法得到的拟合误差率和时间 (注意: 这里比较的时间为自动算法的用时) 相对于 QSF 算法和 QUAN 的算法都是较好的, 下面我们将对这三种算法进一步分析.

表 3 四种不同算法对四种模型进行分割时拟合误差率及自动分割时间的统计

Model	Name	Error 0	Error 1	Time(s)
Bone	VSA	0.552 3	0.348 2	0.567
	QSF	0.251 1	0.014 2	8.536
	QUAN	0.034 1	0.014 1	1.575
	Ours	0.012 5	0.003 4	0.977
Bumpy-cube	VSA	0.907 5	0.240 3	1.986
	QSF	0.092 4	0.060 0	6.251
	QUAN	0.053 6	0.018 3	4.417
	Ours	0.038 4	0.013 5	2.650
Carter_Lp	VSA	1.055 6	0.576 0	0.562
	QSF	0.235 4	0.035 9	4.085
	QUAN	0.026 9	0.003 0	0.908
	Ours	0.023 4	0.004 3	0.437
Cylinder stacking	VSA	2.379 4	1.924 2	1.721
	QSF	0.220 3	0.042 3	9.673
	QUAN	0.307 6	0.059 5	6.876
	Ours	0.203 0	0.022 1	2.844

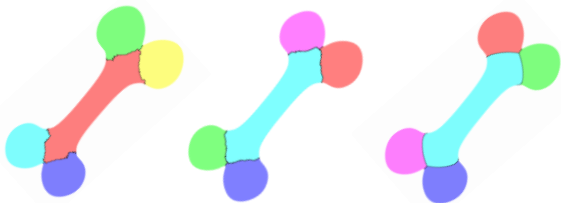


图 9 Bone 模型的分割效果图. 左中右分别表示使用 QSF 算法、QUAN 算法、本文所用的算法

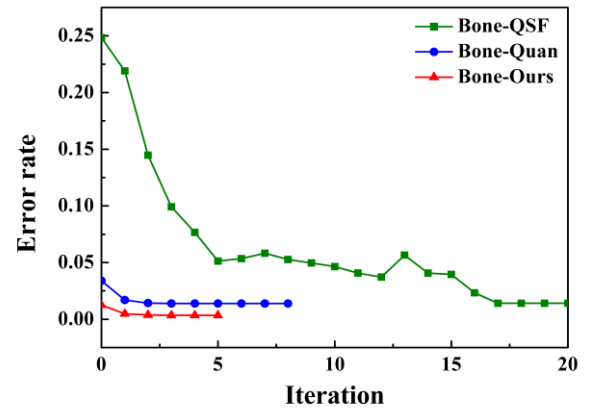


图 10 Bone 模型分割时迭代次数与拟合误差率的关系
结合图 9 和图 10, 比较分析得出本文使用的算法可以对 Bone 模型得到更为平滑的分界线, 拟合误差率较低且收敛速度更快.

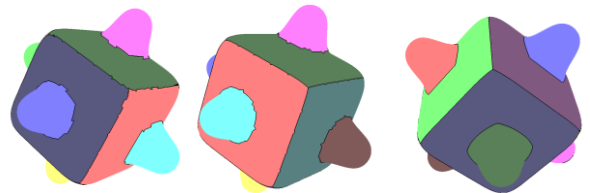


图 11 Bumpy-cube 模型的分割效果图. 左中右分别表示使用 QSF 算法、QUAN 算法、本文所用算法

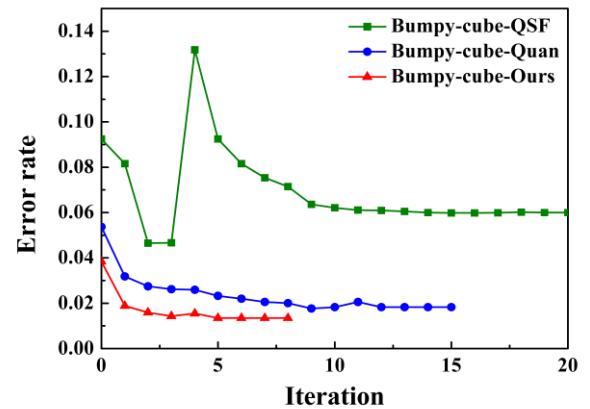


图 12 Bumpy-cube 分割时迭代次数与拟合误差率的关系
通过比较分析图 11 与图 12, 可以看出本文的分割效果图边界清晰平滑, 没有锯齿状. 初始拟合误差率与最终拟合误差率均低于其他两种算法且迭代次数最少即可达到预期的效果.

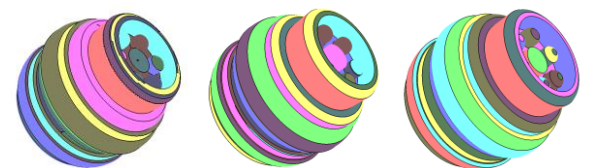


图 13 Cylinder stacking 模型的分割效果图. 左中右分别表示使用 QSF 算法、QUAN 算法、本文所用的算法

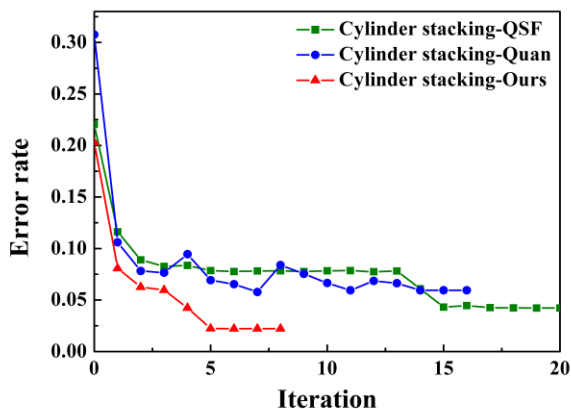


图 14 Cylinder stacking 模型分割时迭代次数与拟合误差率的关系

如图 13 与图 14 所示, 模型分割效果图可以看出 QSF 算法分割之后, 圆环处有锯齿状连接, 模型中有一些过小的三角形面片未被移除, QUAN 的算法将这两个问题进行了改进, 但拟合误差率会有些波动. 本文所用的算法既可以解决上述问题, 还可以把顶部小圆柱状区域识别出更好的效果.

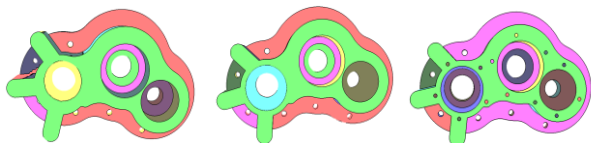


图 15 Carter_Lp 模型的分割效果图. 左中右分别表示使用 QSF 算法、QUAN 算法、本文所用的算法

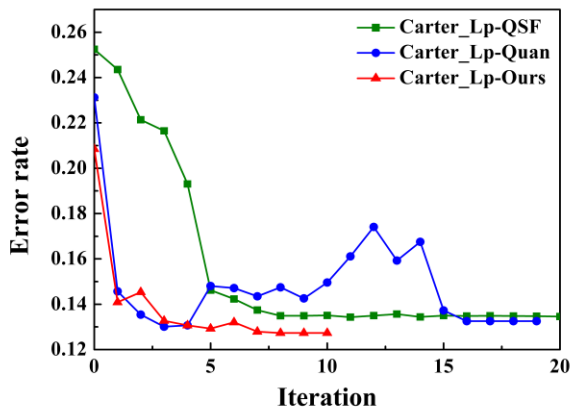


图 16 Carter_Lp 分割时迭代次数与拟合误差率的关系

结合图 15 与图 16 比较发现, 我们的分割效果更接近真实的模型, 可以识别出模型表面的孔洞, 对于模型凹陷的圆柱形边缘也可以更好的识别. 相比其他两种算法拟合误差率较低且收敛速度快.

最后, 我们与交互式分割方法 Easy mesh cutting (EMC) [32]进行了比较, 如图 17 所示. EMC 方法使用 5 次交互操作将该模型分成了 6 个部分, 而我们的方法只使用 2 次交互即可将该模型分割成 12 个部分, 因此使用我们的方法可以更容易得到

精细分割.



图 17 EMC 方法 [32] (左)和本文所用方法 (右)的对比

6 结 语

本文设计并实现了一种交互式的半自动分割方法, 用于解决全自动分割方法难以对不同特征的模型产生自适应分割结果的问题. 本算法首先采用变分方法对网格模型进行二次曲面拟合和分割, 再根据用户的意图, 对自动分割的结果加以交互式合并与交互式切分操作, 配合迭代优化算法, 最终可得到理想的分割效果. 通过充分实验结果表明, 本文的算在分割精度、分割效率、迭代次数方面均优于现有的算法. 未来工作中可以将模型按照特征分类, 形成一套系统的半自动分割方法, 尽量减少人工干预, 并逐步在面片数量更大的模型中实现. 另外, 虽然我们的算法具有一定的抗噪能力, 但是当噪声的尺度很大时, 分割算法很难鲁棒, 因此在这种情况下仍然需要对模型进行单独去噪[46].

参考文献(References):

- [1] 孙晓鹏, 李华. 三维网格模型的分割及应用技术综述. 计算机辅助设计与图形学学报, 2005, 7(8).
- [2] Ariel Shamir. A survey on mesh segmentation techniques. In Computer graphics forum, 2008, volume 27, pages 1539–1556. WileyC Online Library.
- [3] Shyi-Chyi Cheng, Chen-Tsung Kuo, and Da-Chun Wu. A novel 3d mesh compression using mesh segmentation with multiple principal plane analysis[J]. Pattern Recognition, 2010, 43(1):267–279.
- [4] Bing Yi, Zhenyu Liu, Jianrong Tan, Fengbei Cheng, Guifang Duan, and Ligang Liu. Shape recognition of cad models via iterative slippage analysis[J]. Computer-Aided Design, 2014, 55:13–25.
- [5] Pedro V Sander, John Snyder, Steven J Gortler, and Hugues Hoppe. Texture mapping progressive meshes[C]/In Proceed-

- ings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, 2001, pages 409–416. ACM.
- [6] Daniel Sieger, Sergius Gaulik, Jascha Achenbach, Stefan Menzel, and Mario Botsch. Constrained space deformation techniques for design optimization[J]. *Computer-Aided Design*, 2016, 72:40–51.
 - [7] Martin Marinov and Leif Kobbelt. A robust two-step procedure for quad-dominant remeshing[J]. In *Computer Graphics Forum*, volume 25, 2006, pages 537–546. Wiley Online Library.
 - [8] David Cohen-Steiner, Pierre Alliez, and Mathieu Desbrun. Variational shape approximation[J]. *ACM Trans. Graph*, 2004, 23(3):905–914.
 - [9] Jianhua Wu and Leif Kobbelt. Structure recovery via hybrid variational surface approximation[J]. *Computer Graphics Forum (Proc. Eurographics, 2005)*, 24(3):277–284.
 - [10] Dong-Ming Yan, Wenping Wang, Yang Liu, and Zhouwang Yang. Variational mesh segmentation via quadric surface fitting. *Comput. Aided De*, 2012, 44(11):1072–1082.
 - [11] Quan Weize, Guo Jianwei, Zhang Xiaopeng, and Yan Dongming. Improved quadric surfaces recognition from scanned mechanical models[J]. *Computer Aided Drafting, Design and Manufacturing*, 2016, 26(4):9.
 - [12] Panagiotis Theologou, Ioannis Pratikakis, and Theoharis Theoharis. A comprehensive overview of methodologies and performance evaluation frameworks in 3d mesh segmentation[J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2015, 135:49 – 82.
 - [13] Rui SV Rodrigues, Jos ́e FM Morgado, and Abel JP Gomes. Part-based mesh segmentation: A survey[J]. In *Computer Graphics Forum*, 2018, Wiley Online Library.
 - [14] G Papaioannou, E. A. Karabassi, and T. Theoharis. Segmentation and surface characterization of arbitrary 3d meshes for object reconstruction and recognition[J]. In *Pattern Recognition, 2000. Proceedings of 15th International Conference on*, volume 1, 2000, pages 734–737 vol.1.
 - [15] Guillaume Lavou ́e, Florent Dupont, and Atilla Baskurt. A new cad mesh segmentation method, based on curvature tensor analysis[J]. *Computer-Aided Design*, 2005, 37(10):975–987.
 - [16] A. Jagannathan and E. L. Miller. Three-dimensional surface mesh segmentation using curvednessbased region growing approach[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2007, 29(12):2195–2204.
 - [17] Marco Attene, Bianca Falcidieno, and Michela Spagnuolo. Hierarchical mesh segmentation based on fitting primitives[J]. *The Visual Computer*, 2006, 22(3):181–193.
 - [18] Huijuan Zhang, Chong Li, Leilei Gao, and Guoping Wang. Hierarchical mesh segmentation based on quadric surface fitting. In *Computer-Aided Design and Computer Graphics (CAD/Graphics)*, 2015 14th International Conference on, 2015, pages 33–40, IEEE.
 - [19] Huijuan Zhang, Chong Li, Leilei Gao, Sheng Li, and Guoping Wang. Shape segmentation by hierarchical splat clustering[J]. *Computers & Graphics*, 2015, 51:136–145.
 - [20] A. P. Mangan and R. T. Whitaker. Partitioning 3d surface meshes using watershed segmentation[J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 1999, 5(4):308–321.
 - [21] Sagi Katz and Ayellet Tal. Hierarchical mesh decomposition using fuzzy clustering and cuts[J]. *ACM Trans. Graph*, 2003, 22(3):954–961.
 - [22] Yu-Kun Lai, Qian-Yi Zhou, Shi-Min Hu, and Ralph R. Martin. Feature sensitive mesh segmentation[C]//In *Proceedings of the 2006 ACM Symposium on Solid and Physical Modeling*, 2006, SPM '06, pages 17–25.
 - [23] S. Lloyd. Least squares quantization in pcm[J]. *IEEE Trans. Inf. Theor*, 1982, 28(2):129–137.
 - [24] Patricio D. Simari and Karan Singh. Extraction and remeshing of ellipsoidal representations from mesh data[C]//In *Proceedings of Graphics Interface*, 2005, pages 161–168.
 - [25] Dan Julius, Vladislav Kraevoy, and Alla Sheffer. D-Charts: Quasi-Developable Mesh Segmentation[J]. *Computer Graphics Forum*, 2005, 24(3):981–90.
 - [26] Dong-Ming Yan, Yang Liu, and Wenping Wang. Quadric surface extraction by variational shape approximation[C]//*Proceedings of the 4th International Conference on Geometric Modeling and Processing*, 2006, pages 73–86.
 - [27] Juyong Zhang, Jianmin Zheng, Chunlin Wu, and Jianfei Cai. Variational mesh decomposition[J]. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2012, 31(3):21.
 - [28] Min Meng, Lubin Fan, and Ligang Liu. A comparative evaluation of foreground/background sketchbased mesh segmentation algorithms[J]. *Computers & Graphics*, 2011, 35(3):650–660.
 - [29] Lubin Fan, Min Meng, and Ligang Liu. Sketch-based mesh cutting: A comparative study[J]. *Graphical Models*, 2012, 74(6):292–301.
 - [30] Victor Lucquin, S ́ebastien Deguy, and Tamy Boubekeur. Seamcut: interactive mesh segmentation for parameterization. In *SIGGRAPH Asia 2017 Technical Briefs*, 2017, page 25. ACM.
 - [31] Yixin Zhuang, Hang Dou, Nathan Carr, Tao Ju. Feature-aligned segmentation using correlation clustering[J]. *Computational Visual Media*, 2017, 3(2): 147-160
 - [32] Zhongping Ji, Ligang Liu, Zhonggui Chen, and Guojin Wang. Easy mesh cutting[J]. In *Computer Graphics Forum*, 2006, volume 25, pages 283–291. Wiley Online Library.
 - [33] Huai-Yu Wu, Chunhong Pan, Jia Pan, Qing Yang, and Songde Ma. A sketch-based interactive framework for real-time mesh segmentation[J]. In *Computer graphics international*, 2007.
 - [34] Yu-Kun Lai, Shi-Min Hu, Ralph R Martin, and Paul L Rosin. Fast mesh segmentation using random walks[C]//*Proceedings of the ACM symposium on Solid and physical modeling*, 2008, pages 183–191.
 - [35] Juyong Zhang, Jianmin Zheng, and Jianfei Cai. Interactive mesh cutting using constrained random walks[J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2011, 17(3):357–367.
 - [36] Jun Zhou, Weiming Wang, Jie Zhang, Baocai Yin, Xiuping Liu. 3D shape segmentation using multiple random walkers[J]. *Computational Applied Mathematics*, 2018, 329: 353-363.
 - [37] Chunxia Xiao, Hongbo Fu, and Chiew-Lan Tai. Hierarchical ag-gregation for efficient shape extraction[J]. *The Visual Computer*, 2009, 25(3):267.
 - [38] Steven Brown, Bryan Morse, and William Barrett. Interactive part selection for mesh and point models using hierarchical graph-cut partitioning. *Canadian Information Processing Society*, 2009.

- [39] Juyong Zhang, Chunlin Wu, Jianfei Cai, Jianmin Zheng, and Xue-cheng Tai. Mesh snapping: Robust interactive mesh cutting using fast geodesic curvature flow[J]. In *Computer graphics forum*, 2010, volume 29, pages 517–526. Wiley Online Library
- [40] Oscar Kin-Chung Au, Youyi Zheng, Menglin Chen, Pengfei Xu, Chiew-Lan Tai: Mesh Segmentation with Concavity-Aware Fields[J]. *IEEE Trans. Vis. Comput. Graph*, 2012, 18(7): 1125-1134.
- [41] Youyi Zheng, Chiew-Lan Tai, Oscar Kin-Chung Au. Dot Scissor: A Single-Click Interface for Mesh Segmentation[J]. *IEEE Trans. Vis. Comput. Graph*, 2012, 18(8): 1304-1312.
- [42] Guo J, Yan DM, Jia X, Zhang X. Efficient maximal poisson-disk sampling and remeshing on surfaces[J]. *Computers & Graphics*, 2015, 46:72 – 79
- [43] Cohen-Steiner D, Alliez P, Desbrun M. Variational shape approximation[J]. *ACM Trans Graph*, 2004, 23(3):905-914
- [44] Pauly M, Gross M, Kobbelt LP. Efficient simplification of point-sampled surfaces[C]//*Proceedings of the Conference on Visualization*, 2002, '02, VIS '02, pp 163-170.
- [45] Li Y, Wu X, Chrysathou Y, Sharf A, Cohen-Or D, Mitra NJ. Globfit: Consistently fitting primitives by discovering global relations[J]. *ACM Trans Graph*, 2011, 30(4):52:1-52:12.
- [46] Peng-Shuai Wang, Yang Liu and Xin Tong. Mesh Denoising via Cascaded Normal Regression, *ACM Transactions on Graphics(SIGGRAPH Asia)*, 35(6), 2016.