

草图交互式地质建模研究*

王雨桐, 陈浩, 田唐昊, 金小刚



(计算机辅助设计与图形学国家重点实验室(浙江大学), 浙江 杭州 310058)

通讯作者: 金小刚, E-mail: jin@cad.zju.edu.cn

摘要: 提出一种简单、快捷的草图交互式地质建模方法,旨在帮助地质学家们在地质勘测初期直观、快速地创建无数据地质概念模型。迄今,现存专业地质建模工具依赖成本较高的真实数据创建精细复杂的三维地质模型,且通常具有建模用时长、不易于学习和使用等缺陷,因此,采用直观的“纸-笔”建模隐喻,提供了一套从草图绘制到三维模型创建,再到三维模型编辑的完整建模流程,允许用户在自由定义的绘图平面上绘制描述模型地质特征的三维草图,并对其构成的连通草图网络实时地进行三维模型重建。模型重建使用分治的思想,大致分为3个步骤完成:首先利用三维草图的几何信息,即拐点,根据其拓扑连接搜寻草图网络中近似平面的能量最小圈,然后通过调和函数计算草图网络中每个圈包围区域的目标平均曲率标量及其法线方向,随后以Laplacian方程优化生成曲面片,最后将曲面片拼接成完整的三维模型。褶皱、断层地质现象可以分别通过重绘和切割操作进行建模。此外,利用层级结构树存储地质模型间的层级关系,并通过变形传递的方式对与形变物体接触的地质模型进行形变,从而保持了地质结构中多物质体相互接触的特性。相比现有基于草图的交互式建模工具,该方法融合了地质学知识,且能够更有效地使用少量草图描述地质物体的特征。基于用户体验调查,该方法具有操作简单、建模直观的特点,能够同时满足专业和非专业人士快速创建地质概念模型的需求。

关键词: 概念模型;地质建模;曲面重建;草图;交互式建模

中文引用格式: 王雨桐,陈浩,田唐昊,金小刚.草图交互式地质建模研究.软件学报,2016,27(Suppl.(2)):207-219. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/16035.htm>

英文引用格式: Wang YT, Chen H, Tian TH, Jin XG. Sketch-Based interactive modeling of geology. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2016,27(Suppl.(2)):207-219 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/16035.htm>

Sketch-Based Interactive Modeling of Geology

WANG Yu-Tong, CHEN Hao, TIAN Tang-Hao, JIN Xiao-Gang

(State Key Laboratory of CAD&CG (Zhejiang University), Zhejiang 310058, China)

Abstract: This paper proposes a sketch-based interactive geological modeling method, aiming at helping geologists to effectively create data-free conceptual geological models at the early stage of geological exploration. Up to date, the majority of the existing professional modeling tools take expensive measured data to build sophisticated 3D geological models, and usually suffer from the drawbacks of time-consuming and difficult to learn and use. Therefore, this paper exploits the intuitiveness of “paper-pencil” metaphor and develops a complete sketch-based interactive geological modeling framework, including 3D sketching, surfacing and sketch-based model editing. Geological sketches can be drawn on user-defined 3D drawing planes. Intersecting sketches constitute a sketch network, from which the corresponding 3D model is generated on the fly with the surface patching method. Specifically, surface patching employs the idea of divide-and-conquer and takes three steps. Based on the topology of the sketch network, planar cycles are first collected by minimizing their geometric energies, i.e. the *corners*. Then, surface patches are generated for each cycle by Laplacian optimization of the target mean curvatures and normals, which are pre-computed by harmonic functions. Finally, surface patches are stitched to make a complete 3D

* 基金项目: 国家自然科学基金(61472351); 2015年度高校国内访问学者专业发展项目(No.81)

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (61472351); The Colleges and Universities Program of the Inland Visiting Scholars' Professional Development in 2015 (No.81)

收稿时间: 2016-05-10; 采用时间: 2016-09-07

model. Geological phenomena such as folding and faulting can be modeled by over-sketching and cutting operations, respectively. In addition, the hierarchy of models is preserved in a hierarchical tree structure. To maintain the contact between geo-bodies, the deformation of an edited model is automatically transferred to its siblings and parents on the basis of their hierarchies. Compared to the existing sketch-based modeling tools, awareness of the geological knowledge makes the method advantageous in effectively describing geo-bodies with fewer expressive sketches. Based on user experiences, this method is intuitive and easy-to-use for both professionals and inexperienced users to model illustrative geological scenarios.

Key words: conceptual model; geological modeling; surface patching; sketch; interactive modeling

传统地质勘测初期,地质学家通常会根据先验知识构建一些主观的概念模型,并利用透视绘图等方法绘制一系列专业二维草图对潜在的地质现象进行描述.然而,深度信息的缺失降低了二维草图对三维物体的表现力,且其固有的空间歧义性也会引起不同地质学家们对同一草图解释的分歧.此外,为了描述四维地质演化过程,地质学家需要绘制大量连续的二维草图以正确表现地质结构随时间的变化.该过程通常需要耗费大量的时间,且手动保持复杂草图时间和空间的连贯性也并非易事.因此,二维草图在时间维度上匮乏的表现力也进一步增加了地质学家对动态地质现象描述的难度.幸而得益于计算机图形学和可视化的飞速发展,三维地质建模技术应运而生,并广泛地应用于石油开采、地下水模拟、地球科学研究以及教学领域.迄今,现有的专业建模方法和商用建模软件通常对稀疏或者密集地质勘测数据创建精细复杂的地质模型,并大都具有建模耗时长,不易非专业人士学习和使用等缺点.另外,该类建模方法尚且不支持地质勘测初期无数据快速地质建模的特殊需求.因此,一些基于“纸-笔”隐喻的草图交互式地形建模方法通过过程式建模方法^[1,2]、隐式曲面重建方法^[3]、参数扩散等方法^[4]等进行山脉、丘陵、峡谷、河流、湖泊等三维地形及其细节特征的创建,其直观的表现力在一定程度上降低了传统三维建模对建模人士专业知识和技能的要求.但是,该类方法仅定义了描述地表模型宏观外部特征的建模规则,尚未考虑地质结构多层次、多物质不均匀分布且相互接触、带有盐穹等孔洞的复杂内部属性.此外,地形模型对褶皱、断层等常见地质现象仅有宏观局限的表现力.因此,地质学家们期望有一种符合传统地质概念建模规则且简单、直观的建模工具以实现快速创建三维地质体概念模型的目的.

地质演化过程中,地质结构由于不同形式的外力作用而发生挤压形变、甚至断裂,从而造就了其多层次不规则的内部结构.由于沉积、侵蚀以及火成侵入等作用,多种物质体在地质结构中呈现不均匀分布的现象.由于上述特征,快速创建三维地质概念模型的任务潜在两个技术挑战.第一,如何使用直观少量的参数描述多种特征迥异的地质体;第二,如何设计一种通用的三维模型生成方法使其适用于多种不规则地质体模型的创建.迄今,现存基于草图的地质建模工具通常采用 Ad Hoc 建模思想,即在建模过程中根据创建模型特征的不同设计与其相应的专用建模方法,因而仅有有限的建模能力.尽管 Brazil 等人^[3]提出了基于变分 Hermite 径向基函数的通用二维草图建模方法,但是该方法需要用户手动定义绘制草图的种类(如模型的内外边界、横截面、以及模型表面控制线等),且默认以草图的绘制方向为基准对草图顶点法线进行估计.在实际建模过程中,上述绘图约束会给地质学家带来不便,从而影响建模效率.

基于上述问题,本文提出了一种基于草图的交互式地质建模方法.该方法结合传统地质绘图方法,允许地质学家直观地在三维空间自由绘制草图,并依据连通草图网络实时构建出三维模型.基于分治的思想,三维模型重建算法大致分为 3 个步骤:首先,依据连通草图网络的拓扑结构以其几何信息为能量项搜寻所有近似平面的能量最小圈.随后,对于每一个闭合圈,本文以其曲率和顶点法向为边界约束,通过调和函数求解其内部区域的目标曲率标量和法向,再使用 Lapalcian 方程优化生成三维曲面片.最后,将曲面片拼接成完整的三维模型.褶皱、断层现象分别可以通过重绘和模型切割操作进行建模.地质模型建的层级关系存储在层级结构树中.当地质学家编辑其中一个模型时,变形则通过层级结构树向上或向下传递至与其接触的其他模型上,从而保证了不均匀地质物质体之间相互接触的特征.

本文的主要贡献在于针对无数据快速地质概念建模的需求提出了一种基于草图的交互地质建模方法,并通过于主流经典建模系统的对比以及用户体验评估的方式证实其确实有帮助地质学家提高地质建模的优势.其次,重点研究了基于描述三维流型的连通草图的曲面重建问题,提出了一种快捷的近平面能量最小圈搜索算

法和基于曲率和法向量扩散的曲面片重建算法,从而使重建的三维模型尽量符合草图的预期描述.最后,考虑到层级式地质体之间相互接触且不贯穿的特性,提出了一种基于层级结构树的变形传递机制,用以控制由父模型或子模型形变而引发联动变形的一致性,使传统的基于草图的交互式变形方法更适用于地质学领域.

1 相关工作

1.1 三维地质建模

作为计算机建模可视化技术与地球科学的交叉领域,三维地质建模能够更直观有效地反映出地质构造形态、构造关系及其物质属性等信息,从而减少传统二维地质草图由于空间歧义性和复杂大量信息等因素导致的地质分析误差.依据建模数据的不同,现存的地质建模方法可以分为密集数据建模、稀疏数据建模和无数据建模三类.前两者通过对实地勘测的测井曲线、二维或三维地震反射波以及地表露头岩层的辐射扫描等数据进行分析,进而构建描述地层基本特征的结构模型或描述地质变量变化规律的属性模型.迄今,经典的三维建模方法有基于钻孔数据重建法^[5]、平行地层剖面轮廓拓扑重建^[6]、基于三棱柱^[7]、似三棱柱^[8]以及广义三棱柱^[9]的地层建模方法,基于地震波体数据的地层表面恢复方法^[10]等.此外,专业商用软件如 Petrel^[11]、GOCAD^[12]、GSI3D^[13]等不仅能够从真实勘测数据恢复出精细复杂的三维地质模型,而且能够对沉积、侵蚀、矿体、地震等现象进行模拟.然而,商用软件具有价格昂贵,依赖真实数据输入,建模耗时长,且不易于非专业人士学习操作等缺陷.由于获取真实数据的成本较高,因此在计算机图形学领域通常采用无数据建模方法创建真实感地形模型,并广泛应用于动画、电影以及游戏等众多领域.目前,该类方法大致可以分为 3 类:分形过程建模方法,基于物理模拟的地形生成以及基于样例的地形合成.传统过程建模方法利用分形噪声能够创建真实感地形模型,但是缺乏用户对建模结果的直观控制.Olsen 等人^[1]运用分形布朗运动对传统建模结果施加热力和水力侵蚀模拟,从而生成更自然逼真的虚拟三维地形.Benes 等人^[2]利用流体力学的 Navier-Stokes 方程对体素地形表示进行水力侵蚀模拟并能够生成侵蚀的动态效果.相较于分形过程建模与物理过程模拟,Brosz 等人^[14]提出的基于样例的地形合成方法能够更快速、高效地生成多种不规则的地形模型.此外,Zhou 等人^[15]借鉴纹理合成的思想依据数字高程模型(DEM)中的高度场以地形块为基元进行三维地形的创建.上述方法仅针对地表及其细节进行模拟和创建,但是并不能够对多物质体、多层次结构的地下地质结构体进行建模.

1.2 基于草图的地质建模

早期的草图地质建模系统大都侧重于研究地表模型的创建方法.Harold^[16]是最早的草图地形建模系统之一,通过插值用户绘制草图与基准地面的高度的方式使基准底面隆起形成山丘状的三维地形.随后,Watanabe 等人^[17]利用草图极值分割技术改进 Harold 系统生成不自然地形截面形状的问题,并结合噪声技术生成为生成模型添加更自然的细节.Brazil 等人^[3]利用不同属性的二维草图以及默认法线信息构建三维地形的隐式表示.Gain 等人^[18]通过草图过程地形建模方法增添用户约束,以更直观的方式方便用户对建模结果的直接控制.Hnaidi 等人^[4]支持用户增量式地绘制草图并手动指定其相应参数属性,随后以草图属性为边界约束通过参数扩散的方法求解基准网格上受影响区域的参数值,从而生成具有复杂特征的三维地形.Tasse 等人^[19]支持用户以重绘二维轮廓的方式对输入地形进行交互式编辑.近些年,一些关于地层结构的草图建模研究也蓬勃兴起.基于扫描式建模思想,Google SketchUp^[20]和 Natali 等人^[21]能够依据二维草图构建包含褶皱、断层等特征的 2.5D 地层模型.Bendiksen^[22]等人利用盒型建模工具允许用户在其侧面绘制定义地层边界的草图并通过双线性插值方法生成三维地层模型.此外,该系统支持在三维地层表面添加山脉、河流等简单细节特征.然而,该系统并不支持形如断层等复杂地质结构的创建,同样也不支持除系统预定义平面外的三维绘图操作,因而难以创建出类似裂片等不规则形状的地质结构体.

2 三维草图绘制及其相关操作

地质学家可以在三维空间内自由定义绘图平面用以绘制描述地质体特征的草图.绘图平面的引入能够有效地缓解人类视觉系统对三维空间的感知歧义性,帮助地质学家们更准确地指定屏幕坐标系下草图的空间位

置.系统以 $y=0$ 为默认绘图平面(如图 1(a)所示),可以通过平移、旋转操作自由定义新的绘图平面(如图 1(b)所示).另外,可以在三维曲线上任意一点 v 的局部坐标系下选择一个主方向 n 用来定义满足 $n \cdot x + d = 0$ 的绘图平面(如图 1(d)所示),其中 $d = -(n \cdot v)$.相比于前者,该方法能够更快捷地在感兴趣区域绘制草图.为了保证三维相交草图交点的一致性,系统在创建绘图平面后会计算该平面与现有草图网络的所有交点,并以高亮的形式反馈给使用者(如图 1(c)所示).若新绘制的草图穿过或者靠近(本文使用屏幕坐标系距离阈值 8 个像素)现有交点,系统则默认该草图与其相交于该点并将草图上相应点“拉”到该点.地质学家们可以重绘已有草图的任意感兴趣区域对其进行自由变形编辑(如图 1(e)所示).此外,对于任意三维平面草图,系统允许在其所属绘图平面上通过约束点和变形点指定感兴趣区域,可以在该平面内自由拖动变形点以完成对该平面草图的变形编辑(如图 1(f)所示).切割平面由穿过模型轮廓且起点、终点均在模型外的草图与摄像机位置定义.该平面将模型分割成若干子模型,随后系统自动以 Delaunay 三角剖分填补切口截面的孔洞(如图 1(g)所示).在传统地层概念草图的绘制过程中,通常倾向于使用立方体描述其三维结构.为了遵循传统绘图习惯,系统内置一个虚拟立方体以方便地质学家们在其侧面上绘制草图用以描述地层模型的边界,这些边界首尾相接地定义了一个无限延伸的三维地层曲面与 4 个绘图平面的交线(如图 1(h)所示).基于此,三维地层模型可以通过草图网络曲面重建算法进行创建.重绘地层模型的边界草图可以实时地对地层模型变形(如图 1(i)所示),以模拟地层受外力挤压而发生的褶皱现象.断层现象,包括正断层和逆断层,均可以通过模型切割方法实现,断裂地层的位移方向及偏移量可以通过基于变形传递的平移操作直观定义(如图 1(j)所示).对于地层模型,可以通过自由定义的绘图平面对其内部曲面进行显式的编辑,从而达到增添模型细节的目的(如图 1(k)所示).不规则地质模型,如裂片模型等可以使用自由定义的绘图平面进行绘制.图 1 展示了上述基本绘图操作,更多绘图细节操作请参考本文的演示视频.

3 建模方法

3.1 基于无向草图网络的曲面重建算法

本文主要采用了基于分治思想的曲面重建算法,该算法主要包含以下两个步骤:(1) 近似平面能量最小圈搜索;(2) 曲面片重建.

3.1.1 近似平面能量最小圈搜索

圈搜索算法被广泛用于三维流型的曲面重建,Fatemeh 等人^[23]提出了一种基于圈基的圈搜索算法,利用连通草图网络的拓扑信息,通过贪心思想获得局部最优的圈基集合.在地质建模过程中,通常需要绘制三维模型的横截面草图以传达其深度信息.由于该方法未考虑三维草图网络的几何信息,因而从拓扑上更倾向于搜寻草图网络中边数较少且趋于平面的圈基(如横截面草图等),导致生成不理想的圈基集合(如图 2(b)所示);Zhuang 等人提出了一种更为一般性的圈搜索算法^[24],该算法基于图嵌入思想,利用草图网络的几何信息定义圈的基元“桥”结构及其能量函数,动态规划求解获得能量最小的圈集合.对于非流型复杂草图网络,该方法需要预先显示地指定边的容量.相比于拓扑方法^[23],该方法更倾向于寻找法线平滑过渡的圈而非近似平面的最短路径圈,而这些圈可能在三维空间中定义了具有较大曲率的曲面或构成非简单圈(即圈所构成的路径多次经过某些顶点或边),从而为三维模型的重建增加了一定的挑战和难度.在地质概念建模过程中,地质学家们通常只需要创建描述地质特征的简单三维流型,因此本文改进了文献^[24]中复杂的桥结构,提出基于拐角结构的三维草图网络几何能量的计算方法.此外,本文针对三维流型提出一种结合三维草图网络拓扑结构和几何信息的能量最小圈搜索算法,在保证其正确性的同时将近平面最小圈搜索问题归结为图论中最小权回路问题,并将搜索算法的时间复杂度控制为 $O(n^2)$,其中, n 为草图网络的交点数目.本文的圈搜索算法主要分为两步:第 1 步基于最小旋转标架计算拐角的能量项,搜寻所有能量最小的拐角集.第 2 步基于广度优先遍历算法搜索草图网络拓扑中能量最小圈.

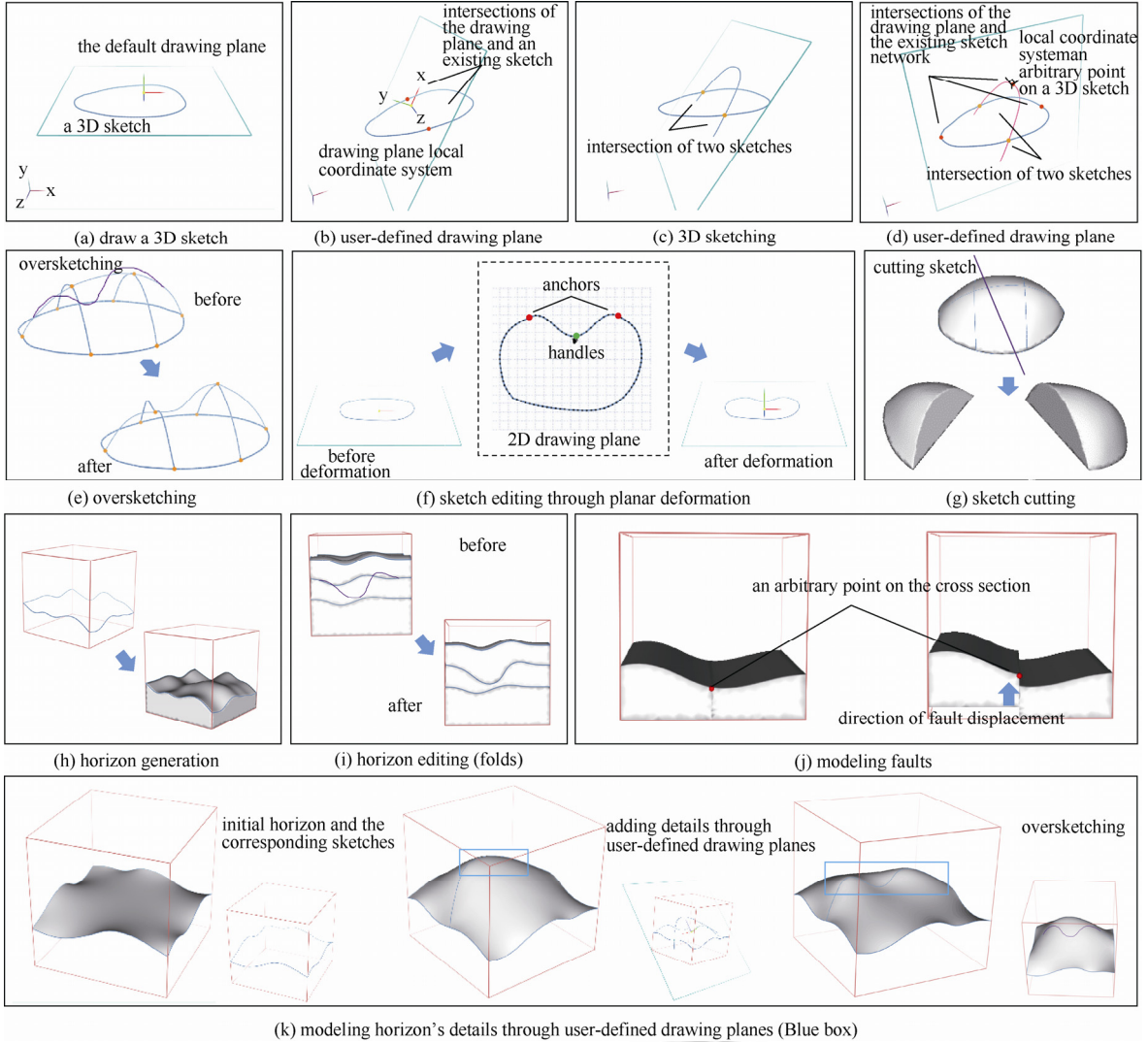
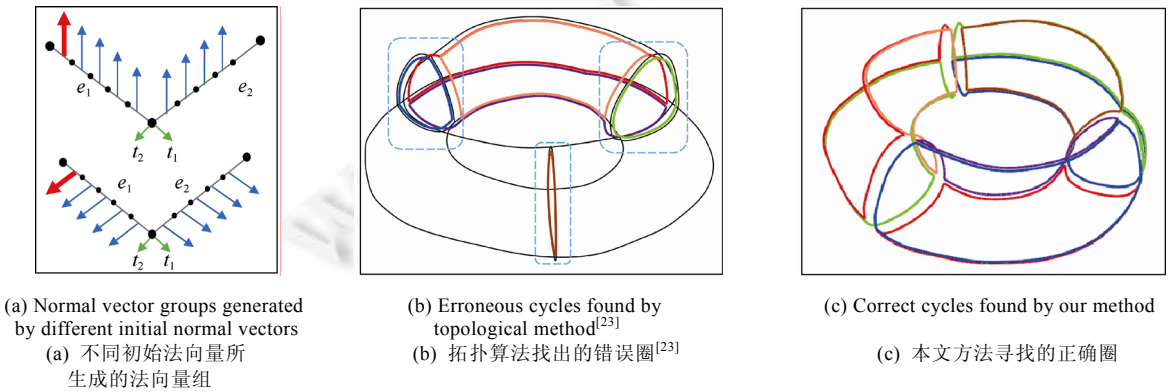


Fig.1 Sketch operations

图1 草图绘制操作



(a) 不同初始法向量所生成的法向量组

(b) 拓扑算法找出的错误圈^[23]

(c) 本文方法寻找的正确圈

Fig.2
图2

令 e_1, e_2 为草图网络中的两个边结构,若它们拥有一个公共顶点 v ,则称 $\{e_1, e_2\}$ 为拐角,一个圈由一组拐角构成,圈搜索算法第 1 步求出所有构成圈的拐角及其相应的最优法向量.本文基于最小旋转标架计算拐角的能量,以穷举方法求解能量最小的拐角集.在绘制草图时,通常按照预想目标曲面绘制特征最明显、最锐利的曲线,并期望这些边构成近似平面的曲面.基于此,本文采用:(1) e_1, e_2 在公共顶点 v 处的法向量夹角;(2) e_1, e_2 的内角;定义拐角的能量方程.其中,拐点的近似平面特征可以通过 e_1, e_2 公共顶点处法向量夹角衡量,夹角越小,越近似平面.此外,圈的内角和与其经过顶点有如下关系: $(n-2)\cdot\pi$,其中 n 为圈上顶点数目.因此,内角和越小的圈经过越少的顶点和边.相较于使用边的长, e_1, e_2 的内角不仅提供了圈经过边的数目信息,同时约束圈搜索算法也在 v 处倾向于选择构成最小内角的边构成圈,从而避免选择横截面草图生成不理想的圈集合.拐角的最小能量及其相应边 e_1, e_2 的最优法向量可以通过穷举法求解.给定 e_1 上初始法向量方向,本文通过双反射法^[25]计算沿 e_1, e_2 切向的旋转最小标架.图 2 展示了两个不同初始法向量所生成的法向量族.红色加粗箭头表示初始法向量,蓝色箭头表示由其生成的法向量族.法向量夹角通过计算 $n_i(i=1,2)$ 的夹角得到, n_1, n_2 分别表示 e_1, e_2 在连接处的法向量.内角通过计算 $t_i(i=1,2)$ 和 l 夹角的和得到, t_1, t_2 分别表示 e_1, e_2 在连接处的切向量, l 为法向量为 n_1 和 n_2 的两个面的交线,即 $l=n_1\times(t_1+t_2)$.拐角的最小开销定义为所有法向量中法向夹角与内角之和的最小值.对于草图网络中每一个拐角,其初始法向量通过等间隔穷举其一周 360° 方向给定(本文使用 1° 作为穷举间隔).草图网络中每个顶点都包含了一定数量的拐角,通过求顶点处的拐角开销和的最小化,可得到该顶点能够构成圈的拐角集.

随后,本文采用基于拐角集最小能量搜索草图网络中的所有能量最小圈.该算法分为 3 步:首先,算法从草图网络边集中任取一条边作为圈上边的初始化;随后,依据拐角能量最小拐角集确定下一条要搜索的边,并基于草图网络拓扑采用广度优先搜索可行边集,直到搜索到该圈的起始边;最后,保存该圈,并从边集和拐角集集中删除该圈的边和拐角,若边集不为空则返回第 1 步,若为空则算法结束,此时获得三维草图网络中所有近似平面的能量最小圈.

3.1.2 三维模型重建

本文采用分治的思想,首先分别对草图网络中的每个圈优化生成目标曲面片(如图 3(b)~图 3(c)所示),然后将这些曲面片拼接起来,构成完整的目标三维模型(如图 3(d)所示).

对于草图网络中任意一个闭合圈,初始曲面片模型可以通过对该圈上顶点在其 PCA 平面上投影包围区域进行 Delaunay 三角剖分生成.为了保证曲面片边界的平均曲率标量及其顶点法向平滑扩散到网格的内部顶点,本文通过求解调和函数公式(1)和公式(2)以获得最优目标平均曲率标量及法向:

$$\arg \min \left\{ \|L(c')\|^2 + \sum_{j \in B} w_j \cdot \|c_j - c'_j\|^2 \right\} \quad (1)$$

$$\arg \min \left\{ \|L(n')\|^2 + \sum_{j \in B} w_j \cdot \|n_j - n'_j\|^2 \right\} \quad (2)$$

其中, $L(\cdot)$ 为带余切权值的 Laplacian 算子,它基于网络的拓扑结构计算其内部顶点的平均曲率标量 c 和法向 n 的差分. c' 和 n' 分别为网格内部顶点的目标平均曲率标量和顶点法向. B 是曲面片边界的顶点集合. c_j 和 n_j 分别表示曲面片边界的平均曲率标量和顶点法向. w_j 是约束项权值.公式(1)、公式(2)的第 1 项均为平滑项,通过基于拓扑的 Laplacian 算子保证网格内部顶点平均曲率标量和顶点法向在其一环邻域内的平滑性.第 2 项为约束项,用以保持网格边界处的目标平均曲率标量和顶点法向与草图网络圈的一致性.曲面片边界的初始平均曲率标量可以草图网络圈的曲线曲率给定,且圈上顶点的初始法向可以通过圈搜索的旋转最小标架给出.目标模型上任意点 v_i 的 Laplacian 坐标 δ_i 可以通过离散 Laplacian 算子计算,即该点的 Laplacian 坐标、由其一环邻域顶点构成的 Voronoi 单元面积、目标平均曲率标量和目标顶点法满足 $\delta_i = A_i \cdot c_i \cdot \bar{n}_i$ ^[26].曲面片模型的目标笛卡尔坐标可以通过以下线性方程系统优化求解:

$$\arg \min \left\{ \|L(v') - \delta\|^2 + \sum_{j \in B} w_j \cdot \|v'_j - v_j\|^2 \right\} \quad (3)$$

其中,第 1 项是平滑项,利用网格拓扑结构保证曲面上任意顶点在其一环邻域的平滑性.第 2 项表示约束项,用来保持曲面边界与三维闭合圈的一致性.事实上,公式(1)~公式(3)都可以写作形如 $AX=B$ 的线性方程系统,且它们都具有相同系数矩阵,因此在求解过程中耗时较长的系数矩阵分解操作只需要进行一次分解,从而保证了实时生成曲面片性能.

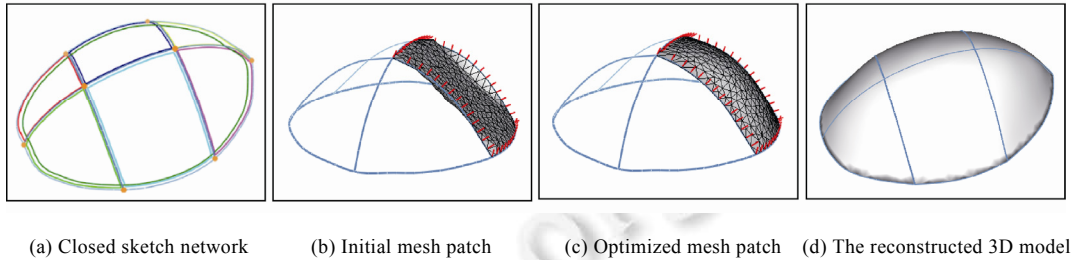
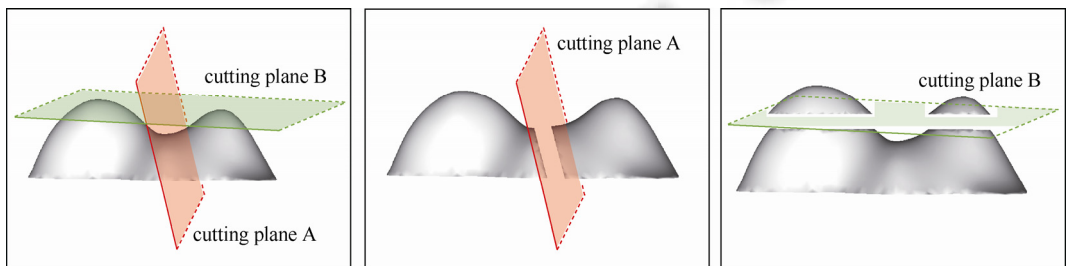


Fig.3 Surface patch reconstruct algorithm

图 3 曲面片重建算法

3.2 基于草图的模型切割

经过模型的直线草图定义为平面切割操作,其切割平面方程可以通过草图起点、终点的场景坐标与照相机位置定义.三维模型上的切割点,即边与切割平面的交点,可以通过边端点与切割平面的位置求得.给定边 $e=\{v_i,v_j\}$ 和切割平面 $n \cdot v+d=0$,当 $(n \cdot v_i+d) \cdot (n \cdot v_j+d) \leq 0$ 时,该边与切割平面相交于点 $v_i+(v_j-v_i) \cdot (-(n \cdot v_i+d)/n \cdot (v_j-v_i))$.平面切割任意三维模型可能会得到以下两种结果:分割为两个子模型(图 4 切割面 A)或者分割为多个子模型(图 4 切割面 B).为了方便处理上述情况,本文采用基于蔓延的通用切割方法.首先,根据切割面方程及绘制草图求得三维模型的切割点集 P_c 与非切割点集 P .然后,从 P 中选取任意一点,并从该点以广度优先方式遍历模型顶点直至遇到切割点.此时,将蔓延过程中遍历的顶点从 P 中删除,并由其生成一个切割子模型.经过一次蔓延后,若 $P=\emptyset$,则原模型不可分割,切割后仍保持为一个整体.若 $P \neq \emptyset$,则重复上述蔓延过程,直至 P 中不存再非切割点.由于平面切割,子模型上的切割面可以通过 Delaunay 三角剖分进行修补.相较于传统基于草图的模型切割,系统在切割过程中能够使用层级结构树记录切割子模型之间及其父模型的层级关系.当其中任意模型发生形变时,该结构决定了确定变形传递的方向,从而保证地质体之间相互接触且不贯穿的特征见第 3.4 节.



(a) Multiple cutting mode

(b) Result generated by cutting plane A

(c) Result generated by cutting plane B

Fig.4 Sketch cutting mode

图 4 草图切割方式

3.3 基于草图的变形

重绘已有草图网络(如图 5(a)、图 5(b)所示)或者模型任意视点下的侧影轮廓线(如图 5(c)所示)都可以对三维模型进行变形编辑.本文采用基于微分坐标的 Laplacian 方程优化求解形变后的模型^[27,28].

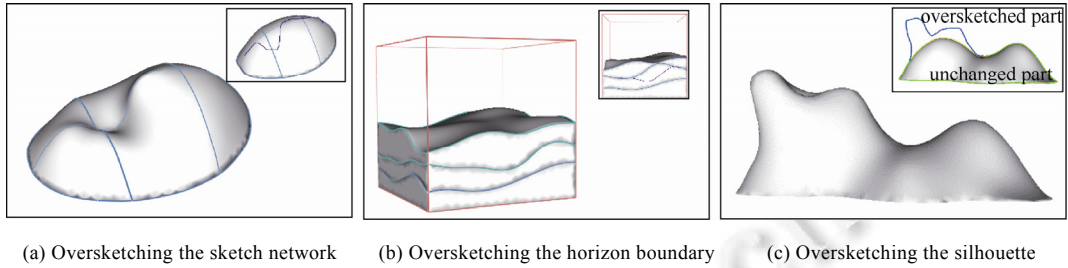


Fig.5 Sketch-Based model deformation

图 5 基于草图的模型变形

通常情况下,模型的简单侧影轮廓线由模型上一系列有序边组成,它们相邻面法向 (n_1, n_2) 与视线 n_v 有关系 $(n_1 \cdot n_v)(n_2 \cdot n_v) \leq 0$.这些边通常描述了该模型在某特定视点下最锐利的特征.然而,当模型存在一系列面法线方向与视线方向垂直的网格时,依据定义该网格上的边也会被错误地被提取为该视点下模型的侧影轮廓边,形成模型在该视点下的退化轮廓线(如图 6(a)所示).为了正确地处理上述情形,本文提出基于 Dijkstra 的侧影轮廓线优化提取算法,用以对退化轮廓边进行优化剪枝(如图 6(b)所示).给定候选边集 $Sil = \{V, E\}$,本文将起点的前驱与终点的后继度数均不为 2 的简单路径定义为极长简单路径.首先,算法检测提取 Sil 中所有极长简单路径,并将其起始终止端点存入集合 U .随后,算法以 $\forall v \in U$ 为单源点搜索到 U 中的另一端点 $v' \in U$ 的最短路径.若 v 和 v' 隶属同一条极长简单路径,则该路径与 v 、 v' 间的最短路径拼接形成构成回路,即一条完整的侧影轮廓线.随后算法将 v 、 v' 从 U 中删除并重复上述步骤直至 $U = \emptyset$.若 v 和 v' 属于两条不同极长简单路径的端点,则用 v 、 v' 间的最短路径将它们拼接成一条更长的极长简单路径,并将 v 、 v' 从 U 中删除.算法重复上述步骤直至 $U = \emptyset$.传统 Dijkstra 算法求解最短路径时需要遍历所有候选点集合以选取到当前顶点距离最近的点.由于网格顶点的拓扑连接,对于当前顶点仅有其一环邻域顶点是直接可达,因此只需要对这些顶点进行遍历,从而减少不必要的顶点遍历.

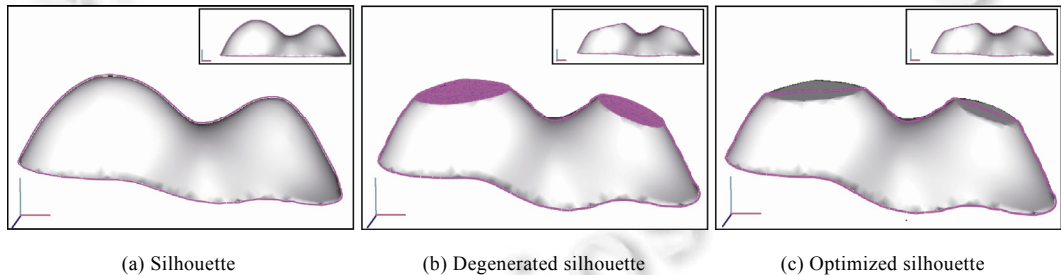


Fig.6 Optimization of degenerated silhouettes

图 6 退化侧影轮廓线优化

为了确定重绘草图与草图网络或模型侧影轮廓线的对应关系,系统通过弧长参数化将它们离散到 $[0, 1]$ 区间,并让具有相同参数值的顶点相互对应.重绘草图在被重绘的草图三维侧影轮廓线所在 PCA 平面的投影决定了它在三维空间的位置.三维模型变形后的新位置则按照传统基于草图的变形方法通过求解以重绘草图为新位置约束的 Laplacian 线性方程系统^[27,28]获得:

$$\arg \min \left\{ \left\| L(v') - \delta \right\|^2 + \sum_{j \in A} w_j \cdot \left\| v'_j - v_j \right\|^2 + \sum_{k \in H} w_k \cdot \left\| v'_k - v_k \right\|^2 \right\} \quad (4)$$

其中, $L(\cdot)$ 为余切 Laplacian 算子, δ 为 Laplacian 坐标, A 为模型固定点集合,即草图网络或侧影轮廓线上未重绘的点集, H 为被重绘草图上的顶点集合, v'_j 和 v'_k 为变形后模型顶点位置, v_j 和 v_k 是约束位置且 v_j 等于重绘草图上对应顶点的位置. w_j 和 w_k 为约束项的权值.

3.4 层级变形传递

地质结构体,如地层、裂片等,通常由多种物质历时沉积形成.因此,在三维建模过程中,若构成地质结构体的某单物质体发生变形,与其接触的物质体应随之变形以保证各物质体相互接触且不穿透的特性.因此,本文使用层级结构树存储模型间的层级关系,并通过变形传递使与发生变形模型相关的其他模型随之变化.变形传递分为两种方式:由子模型变形引发的向上传递(图7红色传递方向)和由父模型变形引发的向下传递(图7绿色传递方向).当子模型发生变形时,变形首先传递到与其接触的兄弟模型上,然后由此向上传递到它们的父模型上并对其进行变形,并按照上述方式将变形继续向上传递,直至到达根节点模型.当父模型发生直接性变形时,变形将沿层级结构树向下传递到与该变形相关的直接子模型上.当该子模型变形后,变形将按照上述方式继续向下传递,直至到达叶子节点模型.图7中,节点3发生变形,依据变形向上传递规则,其兄弟节点4相应地发生变形,3、4节点的变形向上传递到其父亲节点1.节点1将受到的变形传递到其兄弟节点2.随后节点1、2将变形传递到其父亲节点0.由于节点0为层级结构树根节点,变形向上传递终止.由于节点3非叶子节点,变形按照层级结构树的层级关系向下传递,直至到达叶子节点11、12.一般情况下,模型接触面的对应关系可以通过对该区域顶点的协同参数化确定.若子模型由父模型切割生成,子模型间的接触面(即切割面)可以通过具有相同顶点的Delaunay三角化生成,从而快捷、直接地建立了接触面上顶点的对应关系.对于变形的向上传递,当层级结构树中子模型A发生变形,若其兄弟子模型B上与A模型接触面顶点 v_a 相对应的顶点为 v_b ,则算法将顶点 v_b 的位置约束到 v_a ,随后通过公式4求解子模型B接受到的传递变形.由子模型传递到父模型P上的变形也可以通过类似方法求解,即将模型P中顶点约束到与其对应子模型上顶点的位置然后利用公式(4)求解P获得的变形,并将该变形逐层向上传递到层级结构树的根节点模型为止.当仅仅父模型发生变形时,父模型接收的变形需要向下传递到与该变形相关的子模型上.具体来说,本文算法将子模型上与变形相关的对应顶点约束到变形顶点的位置,随后通过Laplacian优化求得子模型获得的变形,并将该变形逐层向下传递到层级结构树的叶子节点模型为止.图7(b)中红色箭头描述了由于子模型发生变形而引发的变形向上传递过程,绿色方框内显示了由子模型传递到其兄弟模型的变形,而红色方框内展示了父模型接受到其所有子模型的相应变形.图7(c)中,绿色箭头描述了由于父模型变形(红色方框内)引发的变形向下传递,绿色方框标识了子模型相应部分接受到的同等程度变形.

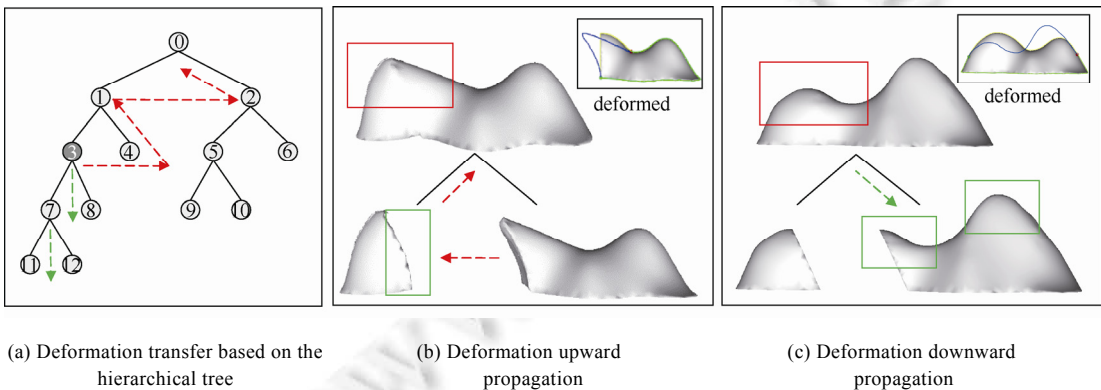


Fig.7 Deformation transfer on the basis of hierarchical tree structure

图7 基于层级结构树的变形传递

4 用户评估与建模结果

本文的建模结果均是在 Intel 酷睿 i7-3770 处理器、4GB RAM 的实验平台上实时获得.为了验证系统创建地质模型的高效、简洁性,本文邀请 16 名用户参与系统的使用体验,其中,10 人具有 3 年及以上传统三维建模经验,4 人具有一定的地质学背景,2 人为专业地质建模人士.首先,用户会接受一段时长约 10 分钟的系统建

模方法详细介绍,并获得约 10 分钟的时间自由熟悉草图绘制方法和建模过程.随后,我们要求用户完成以下两个任务:

任务 1:根据参考地质图,使用本文系统重建其三维模型;

任务 2:给定参考地质裂片概念草图,分别使用 Maya 建模工具^[29]、经典草图交互式建模工具 FiberMesh^[30]以及本文系统创建其三维模型.

完成上述任务后,我们要求用户填写系统性能评估调查问卷.问卷中用户需要对系统的功能性和使用体验进行打分(1分~10分).图 8、图 9 展示了部分用户的对参考模型的建模结果及时间.图 10 展示了用户使用 Maya 建模工具、FiberMesh 建模工具以及本文系统的建模结果及时间.依据建模操作统计结果,使用 Maya 建模工具的,用户需要进行平均 24 次的切割和 37 次的变形操作;使用 FiberMesh 建模工具,用户需要至少 6 次草图绘制,至少 1 次模型切割,以及平均 13 次变形操作才能够完成三维模型的创建;在本文系统下,用户通常只需要定义 6 个绘图平面,绘制 6 条草图就可以重建三维地质裂片模型.图 10(a)~图 10(d)为某具有地质学背景的非专业建模人士的建模结果.从平均建模时间上看,在本系统下具有传统 Maya 建模经验的用户通常需要花费 4 分钟创建地质裂片模型,而使用 Maya 和 FiberMesh 建模工具则分别需要平均 15 分钟和 9 分钟.对于拥有地质学背景且无传统建模经验的用户来说,在本系统下他们通常需要花费 7 分钟完成地质裂片模型的创建,其中 60%的时间花费在对三维绘图平面的绘制和调整操作;而使用 Maya 和 FiberMesh 建模工具则分别需要花费平均 34 分钟和 16 分钟,其中 80%的时间用于对模型细节的添加和编辑.由图 10(f)可以看出,对于仅拥有地质学背景的用户来说,尽管使用本系统的建模时间多于具有传统三维建模经验的用户,但是依然明显少于他们使用其他建模工具的时间.对于拥有传统三维建模经验的用户,他们通常能够比仅拥有地质学背景的用户更快速地创建三维模型.尽管如此,相较于其他建模工具本系统依旧能够大幅度地提高建模效率,缩短建模时间.基于此,拥有传统三维建模经验的先验知识确实能够大幅度地提高使用本系统创建三维地质模型的效率.然而,即使用户不具备这些专业知识,本系统依然能够比现有经典建模系统更快速地完成三维地质模型的创建.依据调查统计(如图 11 所示),用户对本文系统的建模结果及其操作的便捷性均给予正面的反馈.其中,部分用户建议系统提供更直观的深度信息以便他们更准确地定义三维自由绘图平面.其中,11 位用户对于使用系统内置地层绘图平面创建地层模型的简洁表示非常满意,1 位专业地质建模人员表示希望系统能够提供对该内置绘图平面(即虚拟立方体的表面)的旋转、平移等操作,用于创建更复杂的不规则地层模型.13 位用户都认为三维交点自动保持功能非常实用.就创建不规则地质模型而言,10 位用户表示本文的草图重绘模型编辑功能更方便操作,且能够满足他们的建模需求.

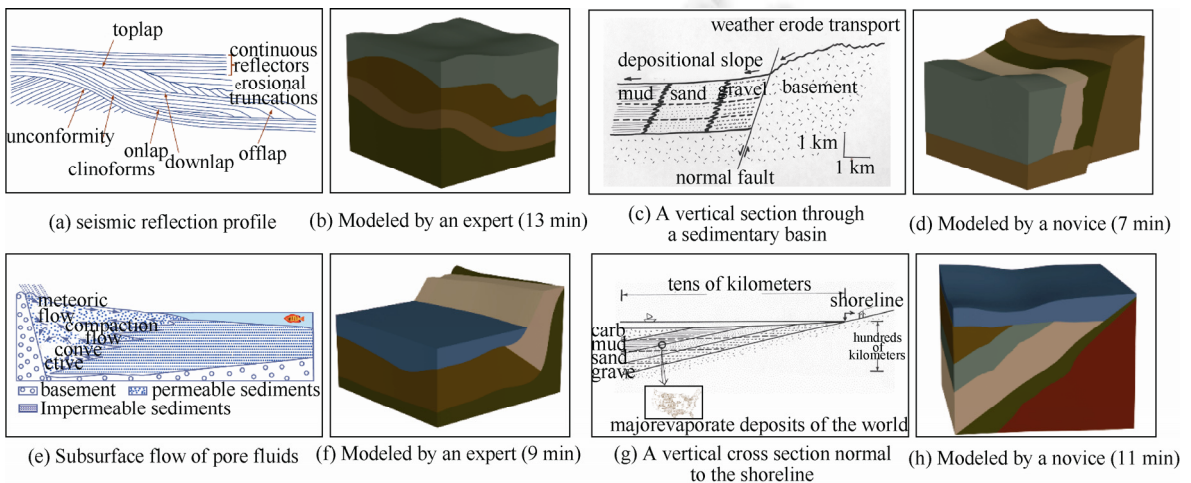


Fig.8 Results of horizon modeling, the geological sketches (a)(c)(e)(g)^[31], the corresponding models(b)(d)(f)(h)

图 8 三维地层建模结果,其中(a)、(c)、(e)、(g)为地质草图^[31],(b)、(d)、(f)、(h)为用户建模结果

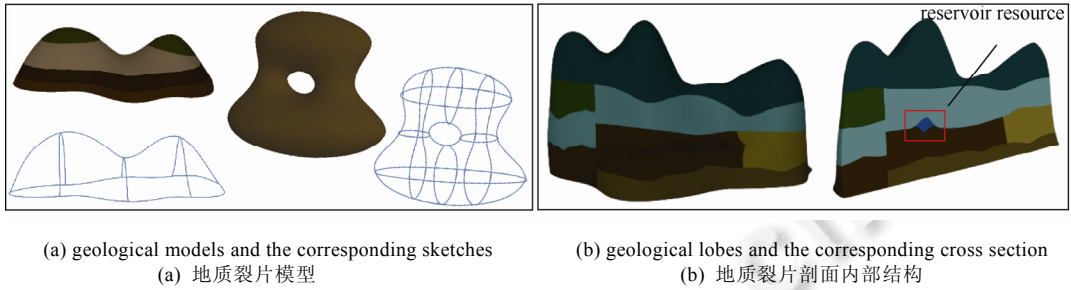


Fig.9 Results of lobe modeling
图 9 三维地质裂片建模结果

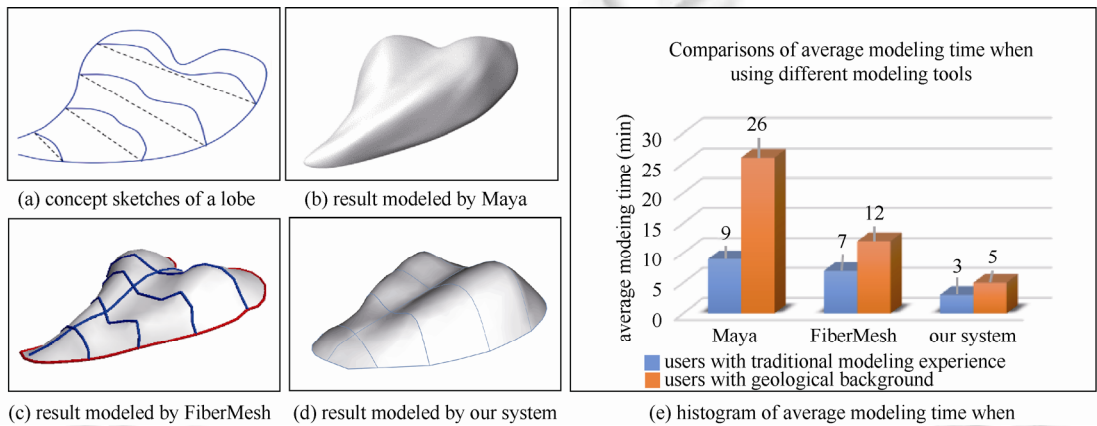


Fig.10 Maya, FiberMesh and the results of the system modeling time comparison
图 10 Maya、FiberMesh 以及本文系统建模时间结果对比

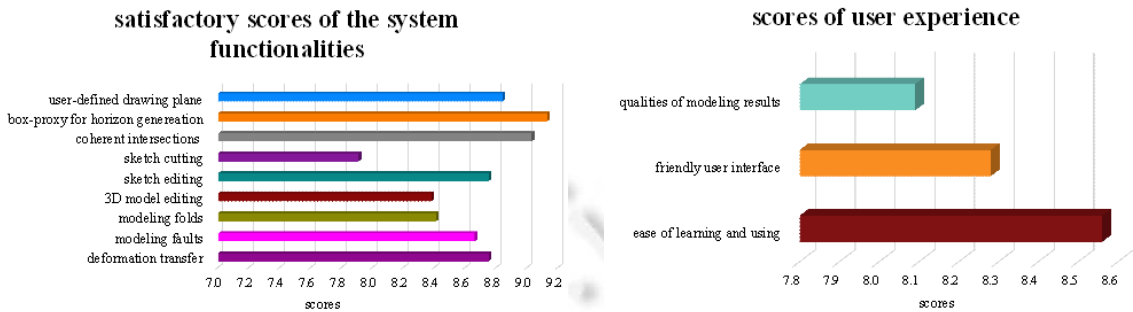


Fig.11 User evaluation result statistics
图 11 用户评估结果统计

5 结 论

本文针对地质建模初期地质学家们期望快速创建地质概念模型的需求提出了一种基于草图的交互式建模工具.该系统允许用户在自由定义的三维绘图平面上直接绘制勾画模型特征的三维草图,并根据草图网络搜寻其近似平面能量最小圈从而生成目标三维模型.用户可以通过重绘的方式对模型直接进行变形编辑操作并通过模型层级结构树将变形传递到与其接触的其他模型上,从而保持了地质结构体相互接触的特征.地质断层现象可以通过草图切割工具实现.依据系统建模结果以及用户评估统计,本文系统能够同时满足专业和非专业人

士快速创建不规则地质概念模型的需求,且系统操作便捷易于学习和使用。

然而,本文系统仍然存在一定的缺陷和不足.基于绘图平面,系统仅允许用户绘制三维空间中的平面草图,尚且不支持三维空间任意不规则曲线草图的绘制,如螺旋线等.模型重建算法假设输入草图网络连通且不存在非流型边.相对整体草图网络,基于分治思想的曲面片重建算法求解得到的是针对每一个草图网络圈的局部最优解,因此在后期曲面片拼接时接缝处可能会出现不光滑的特征.为了使概念地质结构看起来更自然,我们计划在模型表面添加噪声.更细粒度地质现象,如地层物质属性等都可以通过纹理的方式表现.此外,基于草图的纹理变形可以进一步表现地质结构承受的不均匀挤压等.这些,我们都将作为未来工作进行研究.

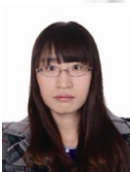
References:

- [1] Olsen J. Realtime procedural terrain generation. 2004.
- [2] Beneš B, Forsbach R. Visual simulation of hydraulic erosion. *Journal of WSCG*, 2002,10(1):79–94.
- [3] Brazil E, Macedo I, Sousa MC, de Figueiredo, LH, Velho L. Sketching variational hermite-RBF implicits. In: *Proc. of the 7th Sketch-Based Interfaces and Modeling Symp. Eurographics Association*, 2010. 1–8. [doi: 10.2312/SBM/SBM10/001-008]
- [4] Hnaidi H, Guérin E, Akkouche S, Peytavie A, Galin E. Feature based terrain generation using diffusion equation. In: *Computer Graphics Forum. Blackwell Publishing Ltd.*, 2010,29(7):2179–2186. [doi: 10.1111/j.1467-8659.2010.01806.x]
- [5] Lemon AM, Jones NL. Building solid models from boreholes and user-defined cross-sections. *Computers & Geosciences*, 2003, 29(5):547–555. [doi: 10.1016/s0098-3004(03)00051-7]
- [6] Herbert MH, Jones CB, Tudhope DS. Three-Dimensional reconstruction of geoscientific objects from serial sections. *The Visual Computer*, 1995,11(7):343–359. [doi: 10.1007/s003710050027]
- [7] Zhang Y, Bai SW. Approach of 3D stratum modeling based on tri-prism volume elements. *Journal of Image and Graphics*, 2001,6(3):258–290 (in Chinese with English abstract).
- [8] Cheng P, Gong JY, Shi WZ, Liu SH. Geological object modeling based on quasi tri-prism volume and its application. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2004,29(7):602–607 (in Chinese with English abstract).
- [9] Qi AW, Wu LX, Li B, Li JM, Yang ZD. Analogict tri-prism: A new 3D geo-spatial modeling methodology. *Journal of China Coal Society*, 2002,27(2):158–163 (in Chinese with English abstract).
- [10] Patel D, Bruckner S, Viola I, Gröller EM. Seismic volume visualization for horizon extraction. In: *Proc. of the 2010 IEEE Pacific Visualization Symp. (PacificVis). IEEE*, 2010. 73–80. [doi: 10.1109/pacificvis.2010.5429605]
- [11] Petrel 2015. 2016,4,15. <https://www.software.slb.com/products/petrel/petrel-2015>
- [12] GOCAD. 2016,4,15. <http://www.pdgm.com/products/gocad/>
- [13] Cullen H, Kessler H, Wood B, Mathers S. GSI3D: Geological surveying and investigation in 3D. *British Geological Survey*. 2016,4,15.
- [14] Brosz J, Samavati FF, Sousa MC. Terrain synthesis by-example. In: *Advances in Computer Graphics and Computer Vision*, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2007. 58–77. [doi: 10.1007/978-3-540-75274-5_4]
- [15] Zhou H, Sun J, Turk G, Rehg JM. Terrain synthesis from digital elevation models. *IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics*, 2007,13(4):834–848. [doi: 10.1109/tvcg.2007.1027]
- [16] Cohen JM, Hughes JF, Zeleznik RC. Harold: A world made of drawings. In: *Proc. of the 1st Int'l Symp. on Non-Photorealistic Animation and Rendering. ACM*, 2000. 83–90. [doi: 10.1145/340916.340927]
- [17] Watanabe N, Igarashi T. A sketching interface for terrain modeling. In: *Proc. of the ACM SIGGRAPH 2004 Posters. ACM*, 2004. 73. [doi: 10.1145/1186415.1186500]
- [18] Gain J, Marais P, Straßer W. Terrain sketching. In: *Proc. of the 2009 Symp. on Interactive 3D Graphics and Games. ACM*, 2009. 31–38. [doi: 10.1145/1507149.1507155]
- [19] Tasse FP, Emilien A, Cani MP, Hahmann S, Bernhardt A. First person sketch-based terrain editing. In: *Proc. of the 2014 Graphics Interface Conf. Canadian Information Processing Society*, 2014. 217–224.
- [20] Google SketchUp. 2016,4,15. <https://www.sketchup.com/zh-CN>
- [21] Natali M, Viola I, Patel D. Rapid visualization of geological concepts. *Graphics*, In: *Proc. of the 25th SIBGRAPI Conf. on Graphics, Patterns and Images. IEEE*, 2012. 150–157. [doi: 10.1109/sibgrapi.2012.29]

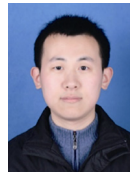
- [22] Bendiksen M. Rapid modeling of geology.[MS. Thesis]. Bergen, Norway: University of Bergen, 2013.
- [23] Abbasinejad F, Joshi P, Amenta N. Surface patches from unorganized space curves. In: Computer Graphics Forum. Blackwell Publishing Ltd., 2011,30(5):1379–1387. [doi: 10.1145/2261250.2261314]
- [24] Zhuang Y, Zou M, Carr N, Ju T. A general and efficient method for finding cycles in 3D curve networks. ACM Trans. on Graphics (TOG), 2013,32(6):180. [doi: 10.1145/2508363.2508423]
- [25] Wang W, Jüttler B, Zheng D, Liu Y. Computation of rotation minimizing frames. ACM Trans. on Graphics (TOG), 2008,27(1):2. [doi: 10.1145/1330511.1330513]
- [26] Wardetzky M, Bergou M, Harmon D, Zorin D, Grinspun E. Discrete quadratic curvature energies. Computer Aided Geometric Design, 2007,24(8):499–518. [doi: 10.1145/1185657.1185663]
- [27] Sorkine O, Cohen-Or D, Lipman Y, Alexa M, Rössl C, Seidel HP. Laplacian surface editing. In: Proc. of the 2004 Eurographics ACM SIGGRAPH Symp. on Geometry Processing. ACM, 2004. 175–184. [doi: 10.1145/1057432.1057456]
- [28] Nealen A, Sorkine O, Alexa M, Cohen-Or, D. A sketch-based interface for detail-preserving mesh editing. In: Proc. of ACM SIGGRAPH 2005. ACM, 2005. [doi: 10.1145/1073204.1073324]
- [29] Autodesk Maya. 2016,4,15. <http://www.autodesk.com/products/maya/overview>
- [30] Nealen A, Igarashi T, Sorkine O, Alexa M. FiberMesh: Designing freeform surfaces with 3D curves. ACM Trans. on Graphics (TOG), 2007,26(3):41. [doi: 10.1145/1275808.1276429]
- [31] Sedimentary Geology. <http://ocw.mit.edu/courses/earth-atmospheric-and-planetary-sciences/12-110-sedimentary-geology-spring-2007/lecture-notes/>

附中文参考文献:

- [7] 张煜,白世伟.一种基于三棱柱体元的三维地层建模方法及应用.中国图像图形学报,2001,6(3):285–290.
- [8] 程朋根,龚健雅,史文中,刘少华.基于似三棱柱体的地质体三维建模与应用研究.武汉大学学报:信息科学版,2004,29(7):602–607.
- [9] 齐安文,吴立新,李冰,李建民,杨中东.一种新的三维地学空间构模方法——类三棱柱法.煤炭学报,2002,27(2):158–163.



王雨桐(1990—),女,陕西西安人,博士,主要研究领域为草图交互式建模,创意建模,树建模.



田唐昊(1993—),男,硕士,主要研究领域为草图交互式建模.



陈浩(1992—),男,硕士,主要研究领域为草图交互式建模,创意建模.



金小刚(1968—),男,博士,教授,博士生导师,CCF高级会员,主要研究领域为计算机动画,视频抽象化和卡通化,布料动画,群组动画,隐式曲面计算和动画,非真实感绘制,纹理设计与合成.