

分类号: TP391.72
密 级:

单位代码: 10335
学 号: 11106011

浙江大学

博士学位论文



中文论文题目: 语义引导的交互式建模与处理
英文论文题目: Semantics-guided Interactive Modeling and Processing

申请人姓名: 樊鲁斌

指导教师: 刘利刚 教授

专业名称: 应用数学

研究方向: 计算机图形学

所在学院: 理学院

论文提交日期: 二〇一四年四月

语义引导的交互式建模与处理



论文作者签名: _____

指导教师签名: _____

论文评阅人 1: 雍俊海 教授 清华大学

评阅人 2: 陈发来 教授 中国科学技术大学

评阅人 3: 苏志勋 教授 大连理工大学

评阅人 4: 李桂清 教授 华南理工大学

评阅人 5: 何发智 教授 武汉大学

答辩委员会主席: 冯结青 教授 浙江大学

委员 1: 章仁江 教授 浙江工商大学

委员 2: 汪国昭 教授 浙江大学

委员 3: 王国瑾 教授 浙江大学

委员 4: 刘利刚 教授 浙江大学

委员 5: _____

答辩日期: 二〇一四年六月

Semantics-guided Interactive Modeling and Processing



Author's signature: _____

Supervisor's signature: _____

External Reviewers: _____
Prof. Jun-Hai Yong, Tsinghua University

Prof. Falai Chen, USTC

Prof. Zhixun Su, Dalian University of Technology

Prof. Guiqing Li, South China University of Technology

Prof. Fazhi He, Wuhan University

Examining Committee Chairperson:

Prof. Jieqing Feng, Zhejiang University

Examining Committee Members:

Prof. Renjiang Zhang, Zhejiang Gongshang University

Prof. Guozhao Wang, Zhejiang University

Prof. Guojin Wang, Zhejiang University

Prof. Ligang Liu, Zhejiang University

Date of oral defence: _____ June 2014 _____

浙江大学研究生学位论文独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得 浙江大学 或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

学位论文作者签名： 签字日期： 年 月 日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解 浙江大学 有权保留并向国家有关部门或机构送交本论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人授权 浙江大学 可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索和传播，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

(保密的学位论文在解密后适用本授权书)

学位论文作者签名： 导师签名：

签字日期： 年 月 日 签字日期： 年 月 日

致 谢

首先,我要向我的导师刘利刚教授致以诚挚的谢意.本文是在刘老师的悉心指导和严格要求下完成的.在攻读博士学位期间,刘老师从各个方面都给予了我极大的关怀和指导.刘老师严谨的治学态度、渊博的专业知识、敏锐的学术洞察力以及开阔的学术视野都给我留下了深刻的印象.我从这些宝贵的科研品质中受益匪浅,它们对我未来的研究工作帮助巨大.回首五年,我所取得的每一点成绩和进步都与刘老师密不可分.刘老师对于本文的选题、内容的安排和文章的修改都提出了许多宝贵意见,倾注了大量时间与精力.在此论文完成之际,谨向刘老师致以深深的敬意和衷心的感谢!

在学习期间和论文撰写过程中,浙江大学数学系计算机辅助几何设计与图形学课题组(CAGD&CG Group)的王国瑾教授、汪国昭教授和杨勋年副教授在各个方面都给予了极大的支持和帮助,衷心向各位老师表示感谢.

在博士求学期间,我有幸在中国科学技术大学图形和几何计算实验室(GCL)以及沙特阿拉伯阿卜杜拉国王科技大学几何建模与科学可视化中心(GMSV)进行交流访问.通过在国内外顶尖学术机构的交流,我拓展了自身的学术视野,学习了先进的技术与方法,我的学术研究也因此受益颇多.在此,我谨向中国科技大学陈发来教授、邓建松教授、杨周旺副教授,以及阿卜杜拉国王科技大学的Helmut Pottmann教授和Peter Wonka教授表示衷心的感谢,感谢各位老师在生活和学习上提供的无私帮助与指导.感谢维也纳理工大学博士后Przemyslaw Musialski在项目上给予的帮助.

求学数载,实验室朝夕相处的同学情谊让我终生难忘.我与曾经一同奋斗过的实验室战友们留下了许多美好回忆并结下了深厚友谊.特别感谢曾经合作过的孟敏、刘堃、胡瑞珍、王睿曼、徐琳琳,他们在科研思路、代码及数据上为本文的完成提供了帮助.感谢韩晓光、黄海斌和楼奇在硕士阶段给予我在各方面的帮助与指导以及生活中带给我的无穷乐趣.感谢周世哲、朱薇、吴金亮、徐寅、刘刚、李果、郑翰林、段小娟、吴晓堃、金聪健、王晓、沈小勇、谭富文、袁泉、吴菁、张红霞、

霍佳博、周瑾、王伟明等诸位师兄师姐和同学在学习与生活中对我的支持和帮助。感谢中国科学技术大学和阿卜杜拉国王科技大学一同奋战过的朋友们，你们在各个方面给予我的帮助，使我度过了两段愉快的交流时光。

最后感谢我父母多年的培养与教导，我所取得的每一点成绩都凝结着他们对我无私的爱。我的求学生涯充满了他们对我的无尽理解、关怀与支持，这是我一路走来最坚强的后盾。感谢我的妻子智慧长期以来在生活和学习上给予我的关心、鼓励与支持。

谨以此文献给所有关心、帮助和支持过我的人！

二〇一四年五月 于求是园

摘 要

随着人们对数字媒体的认识与利用从数字音频、数字图像、数字视频步入数字几何时代,人们对于高质量三维模型数据的需求也在与日俱增。三维模型正在被广泛应用于工业设计与制造、生物医学、多媒体娱乐等日常生活的各个领域。作为计算机图形的重要研究内容之一,三维模型建模与处理,一直广受关注。如何准确、智能、高效及方便的创建与处理三维模型始终是计算机图形学的重要研究课题。近年来,人们逐渐意识到通过对模型形状、结构以及功能等语义信息的分析与理解有助于三维模型的创建与处理,因此数据几何处理研究正在由低层次的几何属性分析逐步向高层次的语义分析转变。此外,智能交互技术的蓬勃发展激发了用户参与模型建模与处理的热情。用户对于简单易用的交互建模工具的需求正在不断增大。在这两大发展趋势的相互影响与促进下,三维模型建模与处理也呈现出基于语义分析的形状分析方法与用户交互的建模手段相结合的趋势。

本文围绕语义引导的交互建模与处理这一核心问题进行研究,针对具体的三维形状分割与三维形状建模问题提出了新颖的解决方法和交互方式。并将语义引导的模型处理思想推广到建筑外立面建模领域。论文主要研究成果包括:

1. 针对三维形状分割,我们提出了一种语义引导的前景勾画式三维形状分割技术,Paint Mesh Cutting。与之前的交互分割算法不同,用户只需关注感兴趣的前景区域,并通过在前景区域渐进式勾画,实时得到形状的语义分割结果。这种分割方式体现了“所画即所得”的设计宗旨。我们是通过引入模型的语义分析实现这一交互分割技术的。我们利用高斯混合模型和形状直径函数(Shape Diameter Function)对模型的结构与用户分割意图加以学习与理解,并结合基于视觉感知的极小值原则(minima rule)及图分割优化算法对模型进行分割。实验结果与用户测评表明,我们提出的算法能够协助用户轻松的完成形状分割任务并得到精确的分割结果。
2. 针对三维形状建模,我们提出了一种语义引导的草图勾画式三维形状建模技

术. 用户使用草图勾画的交互方式, 并通过三维模型部件装配的方法创建新模型. 与之前的草图勾画式形状建模技术不同, 我们的系统在用户进行草图勾画时, 在草图下方动态提供阴影引导图以协助用户准确快速的表达设计意图. 系统采用基于草图的三维形状检索技术实现形状检索与阴影引导图合成, 并利用用户草图辅助模型部件的拼接. 此外, 借助于对数据库中三维形状的结构语义分析, 我们创建的模型保持了原有模型的结构特征. 用户通过勾画草图还可对模型进行进一步的编辑处理. 用户测评表明, 我们的系统可以辅助用户准确高效的表达建模意图及创建新模型.

3. 我们将语义引导的分析与建模思想推广到建筑外立面建模领域, 提出了一种语义引导的建筑外立面结构化修复技术. 我们通过分析将外立面抽象的表达为一组网格的布局, 并将外立面修复问题分解为外立面网格布局的结构修复与外观修复两个部分. 我们首先利用概率图模型对大量建筑外立面的结构进行学习与理解, 并对外立面的网格属性信息进行分析. 给定不完整的外立面, 我们首先通过贝叶斯网络对外立面高层次属性进行推测, 并利用因子图模型进行采样, 得到符合可见部分约束的外立面网格布局. 随后再利用因子图模型对外立面的建筑元素(门、窗及装饰物等)的属性进行采样, 实现对外立面的外观修复. 实验表明, 我们的方法可以修复大数据量缺失的外立面, 并得到美观且风格一致的修复结果.

关键词: 数字几何处理 语义分析 勾画式交互 网格分割 几何建模 城市重建
外立面建模 结构修复

Abstract

As people's awareness and usage of digital media into the digital geometry era from digital audio, digital images, and digital video, the demand of high-quality 3D models is increasing quickly. 3D models are being widely used in industrial design and manufacturing, biomedical sciences, multimedia entertainment and other areas of daily life. As one of the important problems in computer graphics, 3D modeling and processing are drawing more and more attention. How to model and process 3D models accurately, intelligently, efficiently, and easily is an important research topic. In recent years, people realize that analyzing and understanding the semantic information of 3D models, such as geometry, structure, and function, would assist the modeling and processing. To this end, geometry processing is moving towards high-level semantic analysis. Moreover, the development of smart and convenient interactive technology stimulates the enthusiasm of users participating in 3D modeling and processing. The demand of a simple-to-use interactive tool is also increasing. With these tendencies of interacting with the promotion, 3D modeling and processing based on both of semantic analysis and user interaction is getting popular.

In this dissertation, we focus on the semantics-guided interactive modeling and processing, and study three topics. The main contributions of this dissertation include:

1. **Foreground sketch-based 3D shape segmentation.** We present a novel foreground sketch-based mesh cut out tool, called Paint Mesh Cutting. Different from previous user interfaces, the user only needs to focus on region of interest and draw strokes on it. During the user's drawing, the system will return the cutting results instantly. This tool embodies the motif "what you paint is what you get", which is achieved by applying semantic analysis of 3D shapes. We employ the Gaussian mixture models and shape diameter function to understand the user's intention and structure of the shape. Combining with the minima rule and efficient local graph-cut based optimizations,

we obtain the plausible cutting part at an interactive rate. The experiment results and user study show that our method can help the user obtain the desired cutting part easily and precisely.

2. **Sketch-based 3D shape modeling with shadow guidance.** We present a novel sketch-based modeling system which allows novice users to create 3D custom models by assembling parts based on a database of pre-segmented 3D models. Different from previous systems, our system instructs the user with shadow guidance under his strokes dynamically to convey his design concept easily and quickly. Our system employs sketch-based shape retrieval to return the 3D candidate parts and compose the shadow image. Our system also interprets the user's strokes as hints to conjoin the parts. Moreover, we preserve the high-level structure in generated models and allow the user to create custom parts by additional strokes. The user study shows that our system can help the user to convey his design concept and generate new models easily and quickly.
3. **Facade completion with grid layouts.** We extend the idea of semantic analysis and modeling to facade modeling, and propose a semantics-guided facade completion method. We present the facade as the layout of a set of grids and decompose the completion problem into grid structure computation and appearance computation. We first employ the probabilistic graphical model to learn the grid attributes from dataset, and analyze the common structure of the facades. Given a partial facade image, we sample the grid attributes from Bayesian network and sample the possible grid layout by using factor graph. Then we recover the appearance by sampling the attributes of elements with factor graph again. We demonstrate that our method can complete the facade with large missing area and obtain plausible results.

Keywords: digital geometry processing, semantic analysis, sketch-based interface, mesh segmentation, geometric modeling, urban reconstruction, facade modeling, structure completion

目 次

致谢	I
摘要	III
目次	
1 絮论	1
1.1 研究背景	1
1.1.1 三维模型建模与处理	1
1.1.2 语义引导的模型分析	4
1.1.3 交互式建模与处理	6
1.2 研究现状	7
1.2.1 语义引导的模型分析	7
1.2.2 交互式三维几何建模	14
1.2.3 建筑外立面建模	17
1.3 本文工作	19
2 语义引导的前景勾画式形状分割	21
2.1 引言	21
2.2 相关工作	22
2.3 基于图分割的优化算法	23
2.4 Paint Mesh Cutting系统	25
2.4.1 用户界面	25
2.4.2 渐进式分割算法	25
2.4.3 实现细节	27
2.4.4 基于块的分割算法	28
2.5 实验结果	28
2.5.1 用户测评	31
2.5.2 算法局限性	34

2.6 本章小结	34
3 语义引导的草图勾画式形状建模	35
3.1 引言	35
3.2 相关工作	36
3.3 算法概述	37
3.4 数据库构建	39
3.4.1 三维形状部件库	39
3.4.2 二维图像库	40
3.4.3 检索引擎	42
3.5 基于草图的形状建模	42
3.5.1 视点相关的形状检索	42
3.5.2 阴影引导图合成	44
3.5.3 三维形状部件拼接	45
3.5.4 三维形状变化	46
3.6 实验结果	47
3.6.1 用户测评	47
3.6.2 算法局限性	50
3.7 本章小结	51
4 语义引导的建筑外立面结构修复	53
4.1 引言	53
4.2 相关工作	54
4.3 算法概述	55
4.3.1 定义	55
4.3.2 用户交互	56
4.3.3 算法流程	56
4.3.4 建筑外立面数据库	57
4.4 基于贝叶斯网络的网格布局估计	57

4.5 基于因子图的网格布局优化	59
4.5.1 网格布局评分函数	59
4.5.2 因子图设计	61
4.5.3 因子权重学习	62
4.5.4 随机采样	63
4.6 外立面外观估计	63
4.6.1 建筑元素位置与对齐	64
4.6.2 建筑元素属性	65
4.7 实验结果	67
4.8 本章小结	70
5 总结与展望	72
5.1 工作总结	72
5.2 研究展望	73
参考文献	75
简历	90
攻读博士学位期间主要研究成果	91

图 目 录

1.1 形状分割的两种不同类型. (a) 基于部位的分割 ^[1] ; (b) 基于块的分割 ^[2]	8
1.2 三维形状分割算法的四种不同交互方式 ^[3] . (a) 基于边界勾画的交互方式; (b) 基于前景和背景勾画的交互方式; (c) 垂直于边界勾画的交互方式; (d) 基于前景勾画的交互方式.	9
1.3 三维形状对应与联合分割: (a) 三维形状对应 ^[4] ; (b) 三维形状联合分割 ^[5]	11
1.4 Princeton三维模型检索引擎 ^[6]	13
1.5 常用的三维几何建模交互方式: (a) 基于草图勾画的交互方式 ^[7] ; (b) 放置替换的交互方式 ^[8] ; (c) 代理控制的交互方式 ^[9] ; (d) 特征探索的交互方式 ^[10]	15
2.1 Paint Mesh Cutting分割示例. 从左至右: 用户在网格曲面感兴趣的区域进行渐进式勾画(蓝色), 系统实时反馈分割结果(橙色).	21
2.2 Armadillo模型的SDF值信息. 左图为Armadillo模型的SDF值颜色映射. 右图为SDF直方图, 分别采用2个和4个核的高斯混合模型学习前景及剩余部分的SDF值分布.	24
2.3 Paint Mesh Cutting的渐进分割流程演示.	25
2.4 前景区域的渐进扩张. (a) 给定前景区域 F (橙色)及当前的画刷 P (蓝色), F' 为渐进局部优化得到的前景局部扩张. (b) 红色种子点 S^f 来自画刷 P 与背景 B 的交集, 蓝色种子点由前景边界向内扩张而得. 区域 R 通过向外扩张前景边界而得. 渐进局部优化在两条黄色边界间的区域进行.	26
2.5 用户通过渐进式勾画前景区域分割飞机机翼.	28
2.6 用户使用我们的工具可以轻松的分割不同模型的相同部位.	29
2.7 分割结果对用户的勾画方式不敏感. 用户可以通过在网格上随意交互得到期望的分割结果.	29

2.8 使用我们的分割工具对模型进行多块分割.	29
2.9 对Bunny模型进行基于块的分割. 该例中进行了两次前景勾画.	30
2.10 不同噪音影响下算法的分割结果. 图下的数字表示附加的噪音大小. . .	30
2.11 不同形状度量对分割结果的影响. 基于相同的算法框架和前景交互, 不同的曲面度量得到不同的分割结果(从左至右分别为高斯曲率、平 均曲率及SDF). SDF度量给出了最具语义性的分割结果.	30
2.12 使用我们的分割工具得到的分割结果.	31
2.13 三种不同勾画式网格分割工具的用户界面. 从左至右分别为基于 前景和背景勾画的交互方式(FBB) ^[11] , 垂直于边界勾画的交互方 式(CBB) ^[12] 及我们提出的前景勾画的交互方式(FB).	32
2.14 三种分割工具的效率比较. 左: 用户交互的平均用时及其标准误差. 右: 分割算法的平均运行时间及其标准误差.	33
2.15 三种分割工具的分割准确性比较: 平均 BJI 值及其标准误差.	34
3.1 用户使用系统创建座椅模型的实例. 用户在屏幕上连续使用画笔(红 色)表达设计意图. 系统自动返回对应的三维部件并为用户提供阴影 引导图. (a)-(e)上排展示了用户绘制草图的过程及系统实时提供的阴 影引导图, 下排显示了对应的三维模型及阴影. 用户也可以通过在模 型轮廓线周边勾画的方式对模型进行编辑(e). (f)最终创建的模型. . .	35
3.2 系统界面. 中间为用户绘画区域, 动态变化的阴影引导图显示在用户 草图下方. 右侧的建议列表展示候选的三维模型部件. 左侧的工具栏 包含一些常用工具.	38
3.3 阴影引导的草图勾画式建模流程. 用户采用逐个部件建模的方式完成 模型整体建模. 当用户在画布上进行模型草图勾画时, 系统将相应的 在数据库内进行检索, 合成阴影引导图并反馈对应的三维模型部件. 然后系统依据模型先验知识以及用户草图将模型部件进行拼接整合. 用户可以通过在模型轮廓周边勾画对模型进行编辑.	39

3.4 三维形状部件库. 收集的模型经过预分割构成三维形状部件库(上). 在模型的联合分割后, 我们对每个模型进行层次结构、接触点及对称性分析. 图中接触点进行了特别标注, 其中卯(mortises)和榫(tenons)分别标注为绿色与红色.	40
3.5 二维图像库. 所有三维形状部件在单位球(左下)预设视点下的特征线渲染图构成了二维图像库(上). 对于每个视点 v (蓝色), u 是其当前相机向上向量, u^* 是其一致相机向上向量. 视点 (v, u) 下的特征线渲染图是通过旋转矩阵 R 作用于视点 (v, u^*) 下的特征线渲染图而得.	41
3.6 视点相关的形状检索及阴影引导图合成. 首先, 将用户草图 \mathcal{K} (a)与视点位置 v 下的一致向上向量 u^* 进行对齐得到矫正后的用户草图 \mathcal{K}^* (b); 然后使用三维投票直方图进行检索(c)并合成向上向量为 u^* 的阴影图 \mathcal{S}^* (d); 最后, 得到用户视点下的阴影引导图 \mathcal{S} 并显示在用户草图下方(e).	43
3.7 三维形状部件拼接. (a)用户草图; (b)建立已创建模型(蓝色)与新部件(红色)间的连接关系; (c)通过对齐新部件与已创建模型的对称平面修正对齐; (d)拼接结果.	45
3.8 使用系统增强三维形状变化. (a)用户勾画椅背草图, 候选部件的轮廓通过变形以贴合用户草图. (b)用户通过勾画对飞机左侧机翼进行局部编辑, 对称编辑结果自动应用于右机翼.	46
3.9 用户使用系统创建的模型. 下图为用户使用系统创建的自行车模型. 上图为红色自行车的创建过程.	48
3.10 用户测评I每类模型中排名前三的模型. 红色模型为参考模型. 用户创建的模型(蓝色)按照相似度评分降序排列(1代表完全不同, 5代表完全一致), 每个模型的平均得分显示于模型下方.	49
3.11 用户测评III统计数据. 左图为用户完成每个任务的平均时间. 右图为用户进行擦除操作的平均次数.	50
3.12 用户使用系统创建的三维模型.	52

4.1 从单张图片开始, 用户通过交互工具在已矫正的图像上选取建筑物并 标定可见的建筑元素(窗户、门和装饰物等). 我们的结构修复算法可 以修复布局中遗失的部分. 右侧分别展示了外立面修复后的二维和三 维渲染效果.	53
4.2 建筑外立面布局定义. (a) 一个布局由一组元素的集合组成, 每个元素 包含位置、包围盒以及外观属性等信息. 对于外立面布局, 元素通常 由一组网格组织. (b) 网格中的重要参数.	56
4.3 由外立面数据库学习而得的贝叶斯网络. 椭圆代表节点, 网络结构通 过有向边表示.	58
4.4 网格布局的因子图模型. 左图: 网格布局初始化举例. 贝叶斯网络决定 了顶部、底部语义网格及两个额外网格的存在. 右图: 左图网格布局 的因子图表示.	59
4.5 提议运动示例.	64
4.6 网格对齐约束的因子图模型. 左图: 图4.4的一个采样网格布局. 右图: 左图网格对齐约束的因子图表示.	65
4.7 建筑元素属性示例.	66
4.8 用户测评. 上图: 用于用户测评的18组建筑外立面缩略图. 每一组图片 由三张图片组成: 不完整的外立面(0)、真实布局(1)及我们的修复结 果(2). 在用户测评中, 我们要求参与者在1和2中选出最美观的结果. 下 图: 用户测评结果. (说明: 在用户研究阶段, 1和2的摆放位置是随机的.)	68
4.9 可见部分比例对结构修复结果的影响. 每组的左图为真实布局, 从中 间至右侧依次对应于可见部分比例下降的建筑外立面修复结果.	69
4.10 不可见区域不连续的建筑外立面修复结果. 每组从左至右: 真实布局、 可见部分及算法修复结果.	69
4.11 更多外立面结构化修复结果. 每组从左至右分别为真实布局、可见部 分及算法修复结果.	69

4.12 给定相同的不完整外立面, 算法可以生成多种不同的修复结果. 每组 中上图分别为外立面图片、真实布局和可见建筑元素; 下图为三个采 样的修复结果.	71
4.13 算法局限性. 每组中从左至右分别为真实布局、可见部分及算法修复 结果.	71

表 目 录

2.1 针对不同模型, 算法各阶段运行时间(单位:毫秒). T_1 , T_2 及 T_3 分别代表 初始全局优化、渐进局部优化及后期全局优化的平均用时.	32
3.1 针对不同模型集, 算法各阶段运行时间(单位:毫秒). T_R , T_S 及 T_C 分别 代表视点相关的三维部件检索、阴影引导图合成及三维形状部件拼 接的平均用时.	51

第1章 绪论

历经四十年的发展,计算机图形学已从最初专注于研究图形在计算机显示器栅格化显示发展成为一门横跨多领域的交叉学科,其在工业设计与制造、生物医学模拟、多媒体娱乐产业等日常生活的各个领域都发挥着重要作用。三维模型作为计算机图形学研究的重要载体,一直广受关注。如何准确、智能、高效及方便的创建与处理三维模型始终是计算机图形学的重要研究课题。近年来,围绕三维模型的建模与处理呈现两大发展趋势。其一,人们逐渐意识到通过对模型形状、结构以及功能等语义信息的分析与理解,有利于准确高效的表达、创建、处理与维护三维模型。其二,通过引入智能便捷的交互技术,更多的用户可以通过简单方便的交互操作来创建与编辑模型。在这两大发展趋势的相互影响与促进下,三维模型建模与处理迎来了崭新的发展机遇。基于这样的背景,本文主要研究语义引导的交互式建模与处理技术。

1.1 研究背景

建模与处理是计算机图形的重要研究内容之一,同时也是其他研究方向的基础。如何准确、智能、高效及方便的创建与处理三维模型始终是其核心研究内容。本节首先简要介绍三维模型建模与处理,然后分别从语义引导的模型分析方法以及交互式的建模手段两个方面介绍本文的研究背景。

1.1.1 三维模型建模与处理

自二十世纪七十年代起,计算机图形学已经从一门新兴科学迅速发展成为一门横跨多领域的交叉学科。其研究的主要方向也从传统的三维几何模型的生成、处理和显示,逐步拓展到计算机动画、科学计算可视化、自然景物仿真、虚拟现实等。总结计算机图形学的主要研究内容,其主要包括四大部分:建模(modeling)、渲染(rendering)、动画(animation)和人机交互(human-computer interaction)。

三维模型建模是指三维几何模型的建立与获取过程,它是计算机图形学的重要研究内容之一,其研究发展历程贯穿着整个计算机图形学的发展史。其研究产物——

三维模型——是计算机图形学中各个研究方向的重要载体。数字几何，作为三维模型的重要表现形式，正在引领继数字音频、数字图像、数字视频之后的第四波数字媒体浪潮^[13]。由此，三维模型建模的重要性可见一斑。

三维模型建模包含了极其丰富的研究内容与研究问题。构建的模型被广泛应用于工业设计与制造、生物医学模拟、城市建模、多媒体娱乐产业等诸多领域。可以说，三维模型的建模技术已经应用于人类生活的方方面面，并不断向新领域拓展。根据建模过程中用户的不同参与方式可以将三维建模分为自动建模和交互建模两种基本方式。根据不同领域的研究需要和实际应用的不同，三维建模的方法也不同，主要包括四种基本方法。第一种方法是广泛应用于工业设计中的计算机辅助设计(CAD)建模，这也是计算机辅助几何设计(CAGD)^[14]所研究的主要内容，如广泛运用的NURBS(非均匀有理B-样条、Bezier曲线曲面)等。第二种方法是基于预定义的语法或规则的过程式建模(procedural modeling)^[15]，这种建模方式适合于具有重复特征和结构的几何物体与场景，其广泛应用于树木、建筑和城市建模等。第三种是通过2D或3D数据采集设备获取真实形体的数字表示以重建模型的方法，如计算机视觉领域的基于图像的三维建模(image-based 3D modeling)^[16]以及基于三维扫描点云数据的建模方法^[17]。第四，随着三维模型数量的爆炸式增长，三维模型质量的不断提高，通过对现有模型或模型数据集编辑与合成新模型的建模方法^[8, 18]应运而生。近五年来，这种建模方式在“大数据”背景下迅猛发展，引起越来越多学者的关注。由于建模问题的复杂性，三维模型建模呈现出不同方法、不同手段、不同领域深刻融合的现象。因而，针对具体建模问题，寻求准确、智能、高效及方便的建模方法是计算机图形学的重要研究课题之一。

为了创建三维模型，我们需要对现有模型进行分析与处理。建模与处理二者是密不可分的。三维模型的建模为处理提供了研究对象；三维模型的处理技术为建模提供了分析的手段和方法，为建模过程提供了数据准备、理论支撑和技术保障。数字几何处理(digital geometry processing)作为三维模型建模与处理的主要工具，它的研究范围包括针对三维模型的获取、重建、表示、分析、编辑、处理和传输等诸多方面^[19]。传统的数字几何处理主要以离散微分几何为理论支撑，研究离散三维曲面的几何特征，并在此基础上广泛吸收了包括优化理论、数字信号处理等学

科的研究方法, 处理三维模型数据去噪(denoising and smoothing)、修复(repairing)、简化(simplification)、层次细节表达(level of detail)、参数化(parameterization)、变形(deformation and editing)、分割(segmentation)、形状检索(shape retrieval)等问题.

随着计算机技术在软硬件方面的飞跃发展, 数据捕捉能力、计算能力、存储能力和传输能力不断提高, 同时人们对数字三维模型的认知也日趋深刻. 三维建模与处理的发展表现出以下特点. 首先, 三维建模与处理的应用领域正在迅速拓展. 它已从最初的工业设计与制造拓展到包括游戏动画领域的模型构建、生物医学数据的3D重建及可视化、数字城市数字地图的建模等诸多领域. 同时它正在3D打印技术的驱动下迅速走进人们的日常生活^[20]. 其次, 三维模型数据量正在呈几何级数增长. 随着2D和3D数据获取方式的日趋便捷和多样, 用于生成三维模型的原始数据量正在迅猛增长. 与此同时越来越多的三维模型被设计和创建出来. 再次, 三维模型建模与处理的用户数量迅猛增长. 随着获取三维模型的处理设备和制造设备日趋便利, 越来越多的普通用户对三维模型的建模和处理表现出了前所未有的参与热情和期待, 越来越多的人渴望发挥自身的想象力, 创建出属于自己的三维模型. 由此可见, 三维模型建模与处理面临着崭新的发展机遇.

挑战与机遇并存, 面对巨大的发展机遇与空间, 三维建模与处理技术也面临着一系列的挑战.

第一, 需要高层次的分析与理解模型. 模型分析为建模与处理提供了必要的信息准备. 传统基于模型几何特征的分析属于低层次的特征分析, 为了增强对模型数据的理解与处理能力, 厥待从结构与功能等高层次信息对模型加以理解与认识.

第二, 需要加强对同类模型的联合分析. 模型数量的快速增长, 对研究者们分析与理解模型的效率与方式提出了更高要求. 一组同类物体的三维模型往往共享相似的高层次信息, 因此基于模型集的联合分析对于理解该类模型的结构和功能具有十分重要的意义, 同时基于此联合分析的模型构造更容易符合该类模型的本质特征和内在约束.

第三, 需要直观易用的建模手段与工具. 研究与分析模型高层次信息的终极目标是处理与创建模型. 用户作为建模行为的主体, 需要更为方便智能的建模手段与工具, 即希望突破传统人机交流模式简洁高效的完成三维模型建模与处理任务.

语义引导的三维模型分析方法与交互式的建模与处理手段为上述问题提供了解决途径。一方面，语义引导的三维模型分析可以帮助用户从结构和功能等方面对三维模型进行理解。语义作为三维模型的高层次信息，能够更好的表达同类模型之间的共性和特点，可以辅助用户理解同类模型的共同特性，有利于从已有数据中获得启发。另一方面，交互式的建模与处理手段直观易用，激发了用户的参与热情，并提供了用户层面的语义信息以协助完成建模与处理任务。

1.1.2 语义引导的模型分析

模型分析是对模型所包含信息进行提取的过程。它的主要研究对象是现有模型整体或部分特定信息。对模型进行分析可以帮助人们从理论层面更好的理解与认识三维模型，为三维模型建模与处理提供理论与数据支持，它的重要性不言而喻。在三维几何建模与处理中，模型的形状分析通过对模型的几何属性(如空间位置、法向、曲率等)进行分析、描述与解释，帮助用户理解模型的几何形状。目前，形状分析已经广泛的应用于几何建模与处理中的各个研究方向，例如模型分割^[21]、形状对应^[4]和模型的检索^[22]等。

近些年来，人们对模型的理解与分析的关注点逐渐从对模型的低层次几何属性转向人的认知角度。由于人类对于模型的理解与分析通常是按照视觉感知、结构知识、功能知识、领域知识逐层递进的^[23, 24]，同时是基于人类自身长期的经验积累而不断形成的，由此不难发现基于感知、结构和功能等高层次的模型分析更直观、更易被人们理解。因此如何将人们关于模型的先验知识与现有的模型分析方法相结合成为模型分析研究的重要任务与内容。在计算机图形学领域，研究者们通常将感知、结构和功能等模型的高层次抽象信息称为语义信息(semantic information)。

语义(semantics)，在语言学中主要指符号的涵义。虽然在计算机图形学对于语义没有明确的定义，但是我们已经可以通过语义信息在模型分析中的作用对其有初步的理解。文献[24]以三维几何模型的形状语义为背景，分别从狭义与广义两个角度对形状语义进行了阐释。本文借鉴这种分析思想将语义的解释推广到整个三维模型分析领域。狭义的模型语义描述了模型的形状、结构、功能等人类通过自身学习与经验积累而得的对模型在特定应用领域的高层次理解；广义上来说，模型语义是指在特

定应用领域中模型在几何外形、组织结构、功能用途等多方面各种形式的约束集合。由此可见，广义模型语义包含了狭义模型语义。

以上所讨论的语义信息来自于以模型为代表的数据，除此之外语义信息还包括来自用户层面的信息和约束，例如交互式分割^[3, 25]中用户给出需要分割的部分，交互建模^[7, 18]中用户给出的模型轮廓约束等。因此在进行基于语义的模型分析时，同样需要考虑此类直接由用户给出的语义信息，因为此类信息通常反应了用户的设计意图、先验知识等，对于简化模型分析问题、得到更准确的分析结果有着重要作用。

由于语义引导的模型分析从人类的认知角度理解与分析模型的结构和功能，有助于从整体上理解建模与处理过程中模型所需要满足的约束条件和用户意图；同时它结合了传统基于几何属性的模型分析方法，为解决建模与处理过程中的几何细节问题扫清了障碍。因此，近年来它被广泛应用于三维模型建模与处理的各个方面，如三维几何模型的形状分析^[24]、室内场景建模^[26]、家具模型建模^[27]、建筑外立面建模^[15]等方面。

面对三维模型建模深厚的研究背景与丰富的研究内容，基于语义的模型分析面临的最主要问题是，如何跨越低层特征属性(如模型的几何属性等)与高层语义(如模型的结构与功能等)这道鸿沟。其具体表现在以下三个方面：

- 高层语义：如何根据实际建模与处理问题需要，抽象出问题的最佳高层语义。
- 低层特征：如何根据问题目标与高层语义选取最佳的模型低层特征属性。
- 分析方法：如何将低层特征转化为高层语义的抽象描述。

除此之外，由于模型语义分析的研究对象正在从最初的单个模型发展为面向同类的模型集，在数据驱动的模型建模与处理中，利用模型集的联合语义分析结果引导建模与处理的方式日渐成为一种趋势。如何有效进行模型集的联合语义分析也是需要关注的问题。如何充分发挥用户层面提供的语义信息辅助建模与处理，也随着交互式建模手段的广泛应用而备受关注。

本文在后面的章节，通过三维模型分割(第2章)、三维几何模型建模(第3章)和建筑外立面建模(第4章)等实际工作介绍和解释语义引导的建模与处理思想。

1.1.3 交互式建模与处理

人机交互是指人与计算机之间以一定的交互方式或交流界面, 来完成特定任务的人与计算机之间的信息交换过程. 近十年来, 人机交互技术得到了跨越式发展, 随着设计理念及软硬件技术的发展, 人机交互技术步入了以用户为中心的设计阶段. 2010年, 微软推出的Kinect^[28]将人体本身作为人机交互界面, 通过人的姿势变化完成人机间的信息交流. 随后出现的Leap Motion^[29], MYO^[30], Google Glass^[31]等交互设备极大的丰富了人机交互方式, 将人的双手从鼠标与键盘上解放出来, 通过极其自然的操作方式完成与计算机的信息交换. 随着人机交互研究的持续升温, 计算机图形学界对人机交互的关注也在不断增加, 如何将方便自然的交互方式引入计算机图形学领域辅助解决传统计算机图形学问题成为新的研究热点.

交互式三维模型建模的研究几乎与计算机图形学的发展是同步的. 相较于全自动的模型生成算法, 交互式模型建模方式在用户体验与算法功能方面都有诸多优势. 从用户角度而言, 交互式的建模方式直观方便, 通过有限数量的交互操作即可得到建模结果. 交互式的建模方式实际降低了用户的使用门槛. 用户对建模过程的控制能力、可编辑性、参与感都强于自动算法. 从算法角度而言, 交互式三维建模方式通过人机交互提供了用户层面的语义信息, 可以辅助解决和简化模型分析和构造中的问题. 由于引入了交互信息, 算法的灵活性得以增强, 建模结果的准确性可以随着交互信息量的增大而显著提高. 因此, 交互式三维建模方式一直在模型建模与处理方面发挥着重要作用. 经过几十年的努力, 研究者在各个应用领域开发了大量交互建模工具, 例如广泛应用于工业制造的Auto CAD, 应用于动画设计等娱乐产业的3DS Max, Maya, ZBrush等, 应用于城市建模的CityEngine等. 近年, Google公司面向普通用户推出了一款名为SketchUp的建模工具^[32]. 用户通过绘制草图即可得到理想的三维模型, 建模过程得到了极大简化.

交互式三维模型建模的终极目标是通过简单易用的、符合人类自然表达方式的交互工具协助用户(包括高级专业用户和普通中低端用户)表达用户语义信息, 高效的进行三维模型建模. 目前, 研究者们主要面临四个方面的问题:

第一, 如何在三维模型建模的各个应用领域引入适合的交互手段. 例如, 虽然交互式模型建模方式已经应用于诸多建模问题, 但是对于传统依赖于程式化建模的城

市建模等领域仍然以自动建模为主, 用户参与程度低、可控性差。近年, 针对城市建模问题的特殊性, Lipp等人^[33]提出了一种可视化的过程式建模交互系统。

第二, 如何选用合适的交互方式。对于同一问题, 不同交互方式的效果往往不同。对于需要用户直接参与的建模方式, 研究者需要对各种交互算法进行研究, 对各种交互方式的作用进行分析与比较。近年, 对交互式三维模型分割问题, Meng和Fan等人^[3, 25]分别从客观与主观两方面对不同的交互式分割算法进行了深入分析比较, 进行了有益的探索与尝试。为了提高交互式算法在模型建模与处理中的应用, 垂待在更多建模与处理问题中开展此类研究与分析。

第三, 如何有效利用用户的交互信息。用户的交互信息中蕴藏着丰富的用户语义信息。从语义的广义概念理解, 交互信息是用户针对特定问题给出的明确而具体的约束, 对于解决具体建模和处理问题起着至关重要的作用。对用户语义信息进行有效分析, 并结合语义引导的模型分析, 可以促进准确高效的建模。

第四, 如何开发高效智能的交互设备。此问题有关于硬件领域, 本文不做讨论。

近年来, 交互式的模型建模与处理还出现了面向普通用户发展的趋势, 即希望通过尽可能简单直观的交互操作满足用户的一般建模与处理需求, 这对交互方式与交互算法提出了更高要求。本文在后面的章节, 针对具体的建模和处理问题提出了新颖的交互方式, 尽可能满足普通用户的需求, 并通过统计学习等手段对用户交互信息进行分析研究以辅助建模。

1.2 研究现状

围绕本文的研究内容, 本节首先回顾语义引导的形状分析的相关工作。再根据本文主要研究的三维几何建模与建筑外立面建模两大问题分别进行回顾。由于建模与处理问题的研究内容非常丰富, 为了清晰的讨论本文研究在三维模型建模与处理领域中的具体定位, 本节中各部分首先对基本研究方法和现状进行简要回顾, 再着重介绍本文的相关研究内容。本文后续章节还将有针对性的对相关工作进行补充。

1.2.1 语义引导的模型分析

语义引导的三维形状分析是指在模型的几何特征及人类知识的共同辅助下对三维模型的功能、结构等语义进行分析, 其终极目的是对几何形状的高级理解。它的主

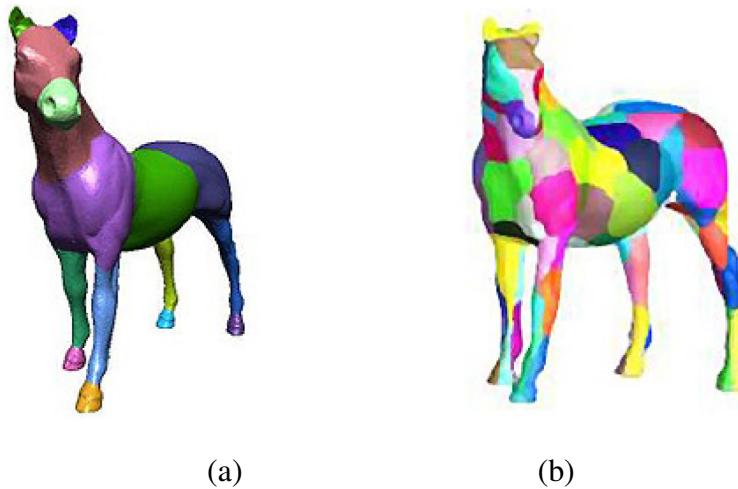


图 1.1 形状分割的两种不同类型. (a) 基于部位的分割^[1]; (b) 基于块的分割^[2].

要内容包括形状分割^[21]、形状对应^[4]和形状检索^[22]等三个方面.

语义引导的形状分割. 形状分割是三维形状理解与认识的基础, 是形状分析的重要研究内容之一. 简单来说, 三维形状分割就是将三维几何物体分解成若干个具有简单形状意义(通常称为“语义”的子部分. 依分割结果主要可以分为两类: 基于块(patch-type)的分割和基于部位(part-type)的分割. 基于块的分割(图1.1(a))是将模型分割成若干个拓扑同胚于圆盘的子块; 基于部位的分割(图1.1(b))是将网格模型分成若干视觉上有意义的部位, 如马的四肢、头部等. 无论是基于部位分割还是基于块分割, 都要求将形状分割成具有语义的子部分. 目前, 对于分割单个模型的语义理解主要是基于人类视觉认知理论中的极小值原则(minima rule)^[34, 35]. 直观上, 它符合人们在分割一个三维模型时, 倾向于在模型表面的凹陷区域做切割. 依据形状分割过程中用户的参与程度, 三维形状分割算法可以分为自动分割与交互式分割两类.

三维形状的自动分割算法的研究成果非常丰富,文献[21]给出了三维形状分割的详细综述.多数自动分割算法是在视觉感知的二维图像分割基础上结合三维几何特征和拓扑结构信息发展而来的,因此本质上它们是基于感知的二维图像分割算法在三维形状上的推广.例如Shlaman等人^[36]利用K-means对模型面片进行聚类分割,Lai等人^[37]提出的基于随机游走(random walk)的模型分割算法.Katz等人分别提出了一种自上而下的模糊聚类分割算法^[38],以及基于显著特征点和模型核心抽

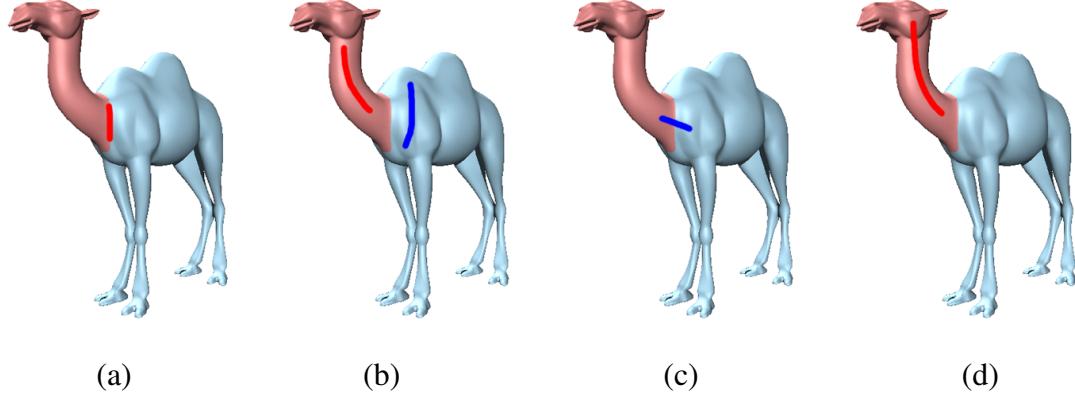


图 1.2 三维形状分割算法的四种不同交互方式^[3]. (a) 基于边界勾画的交互方式; (b) 基于前景和背景勾画的交互方式; (c) 垂直于边界勾画的交互方式; (d) 基于前景勾画的交互方式.

取的分割算法^[39]. 基于三维模型的几何特征, Shapira等人^[40]提出了三维模型的形状直径函数(Shape Diameter Function, SDF)概念, 并利用SDF值的姿势不变性, 通过对其进行统计分析得到分割结果. Golovinskiy与Funkhouser^[41]提出了一种随机化分割(randomized cut)方法, 这种分割方法结合了目前最为成熟的一系列分割方法. 该方法在接受分割任务后, 对同一模型应用不同方法进行分割, 通过对分割结果进行统计分析, 综合各分割结果并给出最优分割. 最近, Wang等人^[42]还提出了一种基于投影分析的三维模型自动分割算法.

由于人类的主观认知系统极为复杂, 对于分割任务“有意义”的部位和块的理解非常主观, 同时不同的模型处理任务对同一模型的分割结果要求又不尽相同. 交互式分割算法正好满足此类问题的需求. 最初, 交互式形状分割工具通常是由用户显式指定分割边界得到分割结果^[1, 8]; 近年来, 交互式分割算法将基于视觉感知的分割规则与用户交互语义相结合提出了一系列算法. 这些算法不仅吸收了自动分割算法的精华, 还通过设计最适合的交互界面力争发挥算法的最大功效. 交互式分割算法依交互界面可以分为四大类:

- 基于边界勾画的交互方式(如图1.2(a)). Funkhouser等人^[8]与Lee等人^[1]分别提出用户在期望分割边界处显式选取部分边界点并自动形成闭合分割边界的方法.

Meng等人^[43]提出了一种基于调和场的分割算法, 用户只需在期望边界附近进行勾画, 算法通过构造网格上的调和场并抽取最佳等值线作为最优分割边界.

- 基于前景和背景勾画的交互方式(如图1.2(b)). 2006年, Ji等人^[11]率先提出了一种基于改进的isophotic度量^[44]作为网格顶点间距离, 并以区域增长算法为核心的前景和背景交互式分割算法. 随后Wu等人^[45]对算法进行了改进. 此外, 许多之前提出的自动分割算法可以通过加入前景与背景交互信息指导三维形状的分割, 例如文献[37, 46]. 2009年, Brown等人^[47]提出了基于图分割理论的该类交互式分割算法.
- 垂直于边界勾画的交互方式(如图1.2(c)). Zheng等人^[12]提出了一种名为Cross Boundary Brush的交互分割工具. 用户只需垂直于期望分割边界勾画一条短线作为输入, 算法通过自动构造网格上的调和场并抽取最佳等值线作为分割边界.
- 基于前景勾画的交互方式(如图1.2(d)). 2011年, Fan等人^[48]提出了一种“所画即所得”的分割工具. 用户沿着感兴趣的部位渐进式勾画, 算法通过计算模型顶点属于前景与背景的概率并利用图分割算法实时给出分割结果.

近十年来, 围绕三维形状的语义分割涌现出大量自动和交互式分割算法, 但是如何将这些算法置于统一的标准下进行评价成了困扰形状分割算法发展的一大问题. 自动分割算法的评估工作从早期通过肉眼直观比较^[49], 逐步发展在特定测试模型集下的定量比较^[50, 51]. 其中最著名的是Chen等人^[52]提出的普林斯顿三维网格分割测评基准(Princeton 3D mesh segmentation benchmark), 他们全面深入的对已发表的七种分割算法进行统一定量测评. 该基准包括19类380个三维模型的4,300个手工分割结果, 以及包含11个几何属性的4项量化标准. 通过对三维形状分割算法进行定性与定量的比较, 研究者们得以深入理解各种算法的特性, 为提出新的分割算法起到了积极促进作用. 与传统自动分割算法评估不同, 交互式分割算法评估不仅需要了解算法的分割结果, 还需要对交互方式的可靠性、实用性与易用性进行分析. Meng等人^[25]对前景和背景勾画的五种交互式网格分割算法分别从精度、效率和稳定性等方面进行了定量分析. Fan等人^[3]从基于勾画交互的形状分割技术中选取了四种不同交互方式

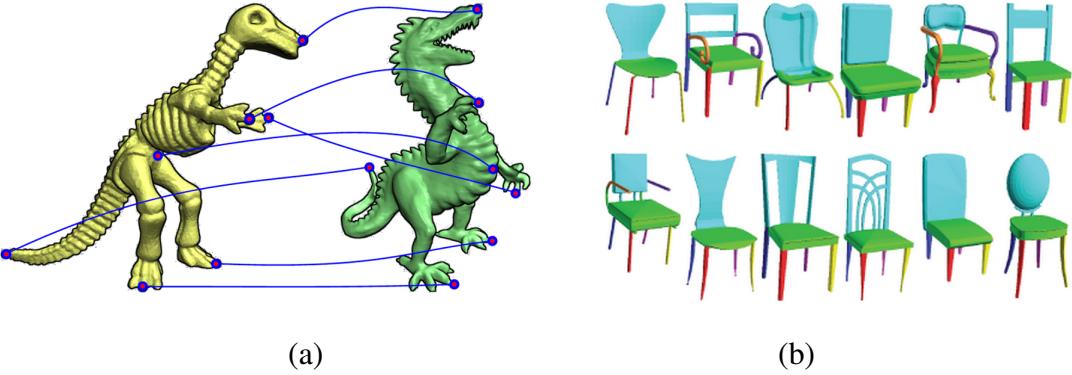


图 1.3 三维形状对应与联合分割: (a) 三维形状对应^[4]; (b) 三维形状联合分割^[5].

的代表性算法, 对算法性能与交互方式进行了定量分析. Fan等人首次应用层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)^[53]对大量用户主观体验数据进行分析讨论, 深层次的解读用户的使用偏好、交互工具的设计问题及可能的改进方向.

语义引导的形状对应与联合分割. 三维形状对应是指给定两个或多个模型寻找形状间有意义的对应关系^[4], 见图1.2.1(a). 在不同的应用领域, 形状对应可以理解为形状注册、对齐或者简单的形状匹配等多种形式. 但严格来说, 形状对应不等于形状注册或对齐, 因为在寻找对应的模型间不需要具有完全重复的几何结构. 如图1.2.1(a)中的两个恐龙模型完全不同, 但模型间仍然存在对应关系(图(a)中对应箭头标注的部分). 基于三维形状对应的算法及应用内容非常丰富, 例如刚性注册(rigid registration)^[54]、非刚性注册(non-rigid registration)^[55]、形状插值(shape morphing)^[56]、模型形变迁移(deformation transfer)^[57]、自身对称检测(self-similarity detection)^[58]、时间变化的曲面重建(time-varying surface reconstruction)^[59]等, 文献[4]给出了详细综述. 总体而言, 早期的三维形状对应一般是基于定义在欧式空间或变换空间上的各种扭曲度量, 模型间的对应关系主要还是通过模型的几何信息进行分析的^[24].

近年, 基于语义的形状分析方法发展迅速. 通过在分析过程中引入模型的结构与功能等语义信息, 形状对应分析结果得到了显著提高. 最近五年, 三维形状的联合分割(co-segmentation)逐渐成为形状对应的研究热点, 见图1.2.1(b). 联合分割与上节回顾的分割问题不同. 它的研究对象是具有同类模型的模型集. 它的目的是对模型集内的所有模型进行分割或对模型的语义部位进行标注, 并要求具有相同结构或功

能的模型部位拥有相同的标注信息^[5]. 因此, 模型的联合分割兼具有形状分割与形状对应的问题特性, 对模型的语义理解要求非常高. Golovinskiy与Funkhouser^[5]最早对模型的联合分割进行尝试, 他们通过对所有模型进行分割并进行刚性对齐得到模型的联合分割结果; Xu等人^[60]通过对所有模型进行类型化的聚类, 再在每一类中通过对齐得到模型部位的对应. 由于模型的联合分割问题通常归结为所有模型的特征学习问题, 因此基于学习的分析方法得到了广泛应用. Kalogerakis等人^[61]提出了一种监督学习的方法, 通过对训练集的学习同时完成对所有模型的分割与标注. van Kaick等人^[62]转而通过训练数据学习一个分类器完成对模型的联合分割任务. Huang等人^[63]虽然也同时完成对模型集的分割与标注任务, 但他们将联合分割问题归结为线性规划问题来解决. Sidi等人^[64]提出了一种基于多种几何特征的谱聚类方法. 该方法首先将多种特征串连成为一个新描述符, 再在此特征空间中进行谱聚类. 由于不同特征对联合分割结果贡献不同, Hu等人^[65]提出了一种基于子空间聚类的方法. 该方法通过在由所有几何特征构成的高维空间中抽取表达最紧的子空间的方式进行模型的联合分割. 类似的, Wu等人^[66]提出了一种基于特征融合的谱聚类算法. 最近, Kim等人^[67]提出了一种基于模板学习的大型模型集分析方法. 该方法由初始模板开始, 同时优化模型分割与分割结果间的对应, 并不断对模板进行更新, 同时完成了模型的联合分割和模板学习这两项任务. 传统的联合分割都是基于分割和标注结果的扁平式表达(flat representation), van Kaick等人^[68]提出了模型的联合层次分析(co-hierarchical analysis), 利用树状结构对同类模型相同结构部件间的对应关系进行表达.

近来, 研究者开始关注如何通过交互技术协助用户快速理解模型间的对应关系. Kim等人^[69]提出了一种新的浏览界面, 通过用户交互可以快速浏览模型间的模糊对应关系. Wang等人^[70]提出了一种用户协助的模型联合分割方法. 用户通过标定少量对应关系, 算法则自动将用户提供的语义信息转化为聚类约束, 通过弹簧系统实现模型的联合分割. 整个过程中, 用户可以通过不断修正标定以得到最佳分割结果. 类似的, Wu等人^[71]提出了一种基于标签蔓延(label propagation)的形状联合分割方法. 用户只需指定模型集中少量模型部位的标签, 即可对整个模型集完成对应的联合分割.

语义引导的模型检索. 2003年, Funkhouser等人^[6]在普林斯顿大学发布了第一个三维

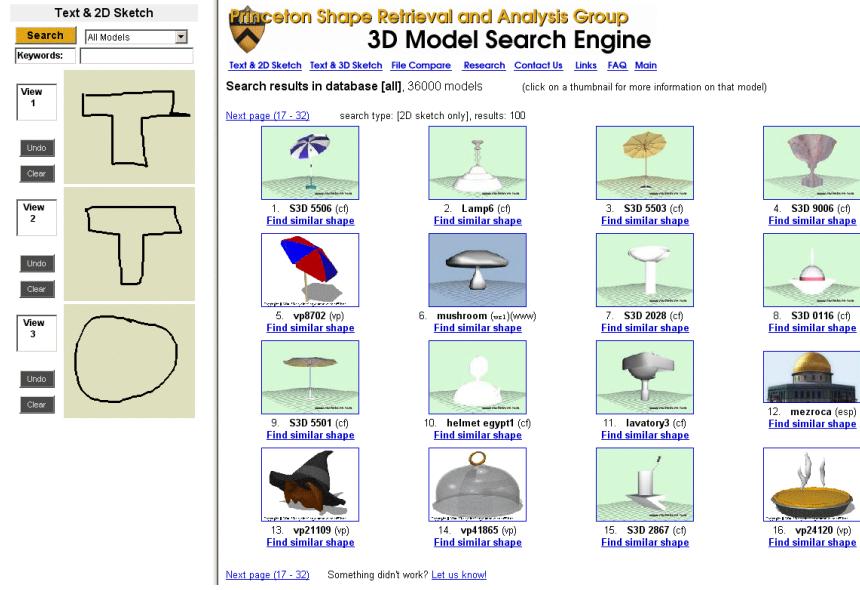


图 1.4 Princeton三维模型检索引擎^[6].

形状检索引擎(Princeton Search Engine), 见图1.4. 他们的工作将传统的检索引擎从检索文字及图片信息推向了快速发展的三维模型领域, 具有跨时代的意义. 近十年来, 随着三维数字模型数量呈几何级数增长, 三维形状检索领域迅速成为形状分析方向的研究热点, 涌现了一大批研究成果, 文献[22]对形状检索的基本框架、主要方法及应用等做了详尽综述. 形状检索技术的关键在于三维模型描述符(descriptor)的选取. 语义引导的形状检索技术将低层次的几何属性与高层次的语义知识相结合, 使得用户可以通过类别、结构、功能等信息有效表达检索意图, 并且快速获取检索模型的信息. 目前, 语义相关的描述符主要来自于拓扑信息^[72]、形状统计信息^[73]及距离函数^[74]等.

形状检索的交互界面主要分为基于样例(example-based)与基于草图(sketch-based)两类. 由于在检索过程中, 通常用户不具有模型样例, 并且绘制草图是一种符合人类日常交流习惯的表达方式, 因此基于草图的形状检索方式受到用户的偏爱. 此外, 用户绘制的草图提供了模型形状、结构和功能等丰富的语义信息. 事实上, 也可将样例模型在多个视角下的线框渲染图作为草图输入进行基于草图的形状检索. Chen等人^[75]提出了一种从多个角度对三维模型轮廓线进行采样而成的光场描述符, 并基于该描述符提出了基于样例的搜索引擎. 同时该方法还可以直接将用户绘制的

模型草图作为输入,对模型进行检索. Daras和Axenopolous^[76]提出了一种统一的检索框架,同时支持基于样例与基于草图的两种检索方式.该算法选取32个视角并在每个视角下计算模型的3个2D旋转不变形状描述作为每个模型的形状描述符. Yoon等人^[77]提出了一种基于扩散张量的草图线朝向直方图作为模型的形状描述符.针对用户绘制的草图通常不完整且质量不高的问题,Shao等人^[78]提出了一种基于2D形状表示和基于采样的形状匹配算法.该算法实现了基于草图的部分匹配,同时具有较强的抗噪和抗扭曲特性.2012年,Eitz等人^[79]提出了一种视角相关的三维形状特征线词袋(bag-of-words)检索模型.该方法对用户的表达习惯、视角选择和特征选取进行综合研究,利用视角相关的匹配方式进行模型检索,取得了较好的检索结果.

1.2.2 交互式三维几何建模

交互式三维几何建模是通过直观、易用的交互界面辅助用户构建新模型的过程.它的研究几乎与计算机图形学的发展是同步的.与全自动的模型生成算法相比,交互式模型建模方式简单易学、容易使用,用户可以通过不断修改与编辑得到期望的模型,用户的参与性和可控性强.更重要的是,用户提供的交互信息简化了模型分析与构造中的问题,提高了建模效率.本小节围绕模型的生成方式与建模的交互方式回顾交互式三维几何建模的相关内容.

模型的生成方式.交互式几何建模的模型生成方式主要有三种:

- 从无到有的创建新模型(modeling from scratch)^[7, 80-83].许多知名的商业软件如3DS Max, Maya等大多采用该种建模方式.这种模型生成方式通过用户的交互,完全从零开始创建模型,模型创建结果取决于用户提供的交互信息以及计算机对交互信息的语义理解能力.因此这种方式对于用户的要求非常高,用户需具有较强的计算机图形学知识、几何学知识以及非常强的交互表达能力.
- 编辑现有模型生成新模型(modeling by editing)^[9, 18, 84].这种模型生成方式主要通过用户交互对现有模型进行形状编辑得到新模型.新模型与原模型的差异取决于用户加载的交互编辑.商业软件ZBrush, Mudbox就是采用了这种方式生成细节丰富的三维模型.

- 数据驱动的合成新模型(modeling by example)^[3, 8, 85–89]. Funkhouser等人^[8]最早提出了这种建模方式. 该方式将来自数据库不同模型的部件保持原有结构约束的组装在一起, 生成新模型. 随着三维几何模型数量的爆炸式增长, 这种建模方式逐渐受到人们的亲睐, 因为用户不需要具有非常强的专业背景, 通过现有模型的启发就可以创建新模型. 本文第3章介绍了一种数据驱动的交互式建模方法.

建模的交互方式. 交互式三维几何建模的交互手段与交互方式多种多样, 通常交互方式与建模目标、模型类型和模型生成方式有关. 三维几何建模常用的交互方式有代理控制、放置替换、特征探索以及基于草图勾画的交互方式, 见图1.5.

代理控制的交互方式通常适合编辑现有模型得到新模型的建模方法. Gal等人^[9]提出了一种模型编辑方法, 通过抽取模型的智能线框(iWIRES)作为模型的代理. 在保持模型原有对称性及其他几何约束下, 用户通过编辑线框的位置、大小生成新模型. Zheng等人^[84]通过引入模型部件的包围盒作为模型代理对模型进行编辑. 在模型结构约束的限制下, 用户通过编辑模型各部件包围盒的方式编辑模型. Jain等人^[90]提出了一种通过形状插值构建新模型的方法. 算法通过基于结构的形状分析引入层次化结构作为模型代理, 用户只需通过控制层次结构间的插值因子即可得到新的模型. 放置替换的交互方式通常适合通过模型部件组装新模型的建模方法, 模型部件通常来源于数据库中的模型. Chaudhuri等人^[85]提出了一个数据驱动的三维形状建模系统InspireMe. 该系统主要依靠预先建立模型间的结构相似性对应关系. 用户基

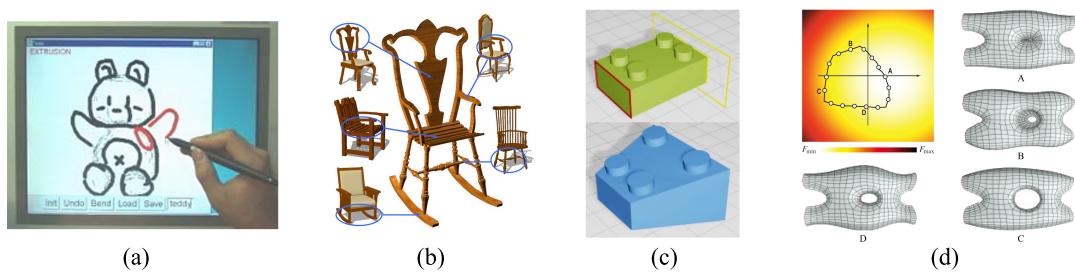


图 1.5 常用的三维几何建模交互方式: (a) 基于草图勾画的交互方式^[7]; (b) 放置替换的交互方式^[8]; (c) 代理控制的交互方式^[9]; (d) 特征探索的交互方式^[10].

于一个初始模型开始建模,当用户希望替换某一个部件时,系统根据部件的对应关系给出可替换的部件作为参考.此外,Chaudhuri等人^[86]还提出了一种基于贝叶斯网络(Bayesian network)推荐的建模系统.用户通过拖放和简单的编辑模型部件组装新的模型.与传统的样例式建模不同,系统根据用户已经组装的部分推荐可能会涉及的其余模型部件.随后,Chaudhuri等人还对系统进行了改进推广提出了AttribIt系统^[87].特征探索是一种新颖的交互建模方式.通过对原有模型的几何属性与结构信息进行分析与抽象,生成由模型需要满足的约束构成的特征空间.用户在特征空间中的探索,实际修改了模型的部分约束条件,完成了对现有模型的编辑并生成了新模型.Yang等人^[10]首次提出了形状空间探索的概念.该算法通过对网格模型所具有的隐式非线性约束集进行特征化得到其约束特征空间,并通过在特征流形的切丛上进行探索,生成符合原模型总体约束的新模型.Zhao等人^[91]将此方法推广到自由形态的建筑模型上.Deng等人^[92]改进了算法使得可以对模型局部进行微调.Bao等人^[93]将这种思想应用到了建筑布局的生成上.通过在建筑布局约束流形上的探索,用户可以基于最初的布局结构得到新的优质建筑布局.

基于草图勾画的交互方式模拟了人类日常的纸笔工作环境,是一种极为自然的人机交互方式.在建模过程中,用户通过输入设备勾画模型的轮廓线或特征线对模型的几何形状进行粗略描绘,计算机通过对用户的草图进行语义分析,生成相应的三维几何模型.由于勾画式的交互方式符合人类的思维与表达习惯,操作非常自然,在三维模型建模领域发展迅速.到目前为止,已经出现了多种勾画式交互建模系统,文献^[94]对此进行了详细综述.值得一提的是,自2004年起,欧洲计算机图形学联合会(European Association for Computer Graphics)开始举办“勾画式交互与建模”(Sketch-Based Interface and Modeling, SBIM)国际会议,对勾画式交互技术及建模进行交流研讨.

基于草图勾画的交互式建模技术的关键在于计算机如何通过用户绘制的2D草图分析理解3D模型的属性.这需要从几何特征与语义信息两方面入手.许多系统将2D勾画理解为3D几何形状的提示,Teddy^[7],SmoothSketch^[81],FiberMesh^[80]等建模系统将用户的笔画理解为模型的特征曲线用于推断3D闭合曲面的几何形状.SKETCH^[82],ILoveSketch^[83]及Yang等人^[95]提出的建模系统首先从用户笔画中提取

几何模型的参数,再进行建模. Rivers等人^[96]直接要求用户绘制模型两个特定视角下的轮廓线,并通过实体几何构造(Constructive Solid Geometry)的方式进行建模.以上这些建模方式从模型的生成方式来说都属于从无到有的建模方式. Nealen等人^[18]与Zimmermann等人^[97]通过用户直接在已有模型上绘制编辑曲线得到新模型,显然这一类的建模系统属于编辑现有模型生成新模型的范畴.随着共享模型数量的快速增长,近年来许多学者关注于通过草图勾画的交互方式利用现有模型合成三维场景和创建新模型. Magic Canvas^[98]建模系统通过用户绘制模型轮廓线的方式设计三维场景. Xu等人^[99]提出了一种名为Sketch2Scene的室内场景建模技术.系统基于用户勾画的室内草图进行模型的联合检索与联合摆放,在模型检索与摆放的过程中充分考虑了模型在原始场景中的大小、位置与结构特征. Lee和Funkhouser^[88]对Magic Canvas加以推广,用于创建新的三维几何模型.该方法中,用户笔画不仅用于模型部件的检索,同时用于引导部件的组装与拼接. Xie等人^[89]提出的Sketch-to-Design系统先对数据库中的模型进行基于内容信息(context information)的形状分析,再通过用户笔画进行检索与组装.

1.2.3 建筑外立面建模

当用户在感叹Google Maps^[100]给日常生活带来的便利时,人类所生活的城市正在被高度数字化.随着数字城市的蓬勃发展,城市重建(urban reconstruction)^[101]已成为建模领域的又一研究热点.建筑外立面建模(facade modeling)是城市重建领域的重要研究课题之一.它是通过建筑外立面的图像或扫描点云数据生成与之相对应的建筑外立面模型的过程^[102].它的研究内容涉及数字图像处理、计算机图形和计算机视觉等多个领域.目前,建筑外立面建模主要采用过程式(procedural modeling)和逆向过程式建模(inverse procedural modeling)方式,采用最广泛的建模规则是CGA(Computer Generated Architecture)语法^[103].

建筑作为人类活动的重要场所,早已不局限于它最初的用途,它是几何学发展成果的体现,同时也是经济、文化以及人类活动的一种外在展示载体.建筑外立面则可以被看作是这种展示载体的外在表现.因此利用计算机进行建筑外立面分析和建模时不仅需要考虑其几何属性,同时需要充分考虑它的语义特征,例如建筑设计约束、功能需求、结构特性和美学属性等.

建筑外立面分析. 建筑外立面分析指对外立面数据(通常为图像或扫描点云数据)进行自动的结构检测^[101]. 目前, 建筑外立面的检测主要有三种方式: 启发式的检测、基于结构语义的检测和基于先验知识的检测.

启发式的检测主要采用低层信息推断外立面的楼层、窗户等结构信息, 其中低层信息主要包括外立面图像上的边^[104]、角^[105]以及其他特征^[106, 107]. 在进行结构检测过程中, 研究者通常会预先定义一些启发式的分析原则作为外立面结构的推断依据, 例如窗户与外墙的纹理不同^[108]、窗户与外墙之间有明显的边线结构^[109]等.

基于结构语义的检测主要是在推断外立面结构时加入结构语义信息, 例如对称性、图案重复性及网格结构等. 出于建造成本与美学考虑, 建筑外立面通常都具有对称性或重复的图案. 这些结构语义信息可以辅助研究者进行结构检测. Pauly等人^[110]与Mitra等人^[111]通过检测扫描数据中的结构规律性对建筑进行分析. 对于外立面图像, 研究者们通过检测线性排列的重复图案^[112, 113]、网格状对称性^[114]、平移对称性^[115]等方法对外立面进行分析. 此外, Ceylan等人^[116]还通过检测同一建筑的多张外立面图像的对称性进行分析. 最近, Zhang等人^[117]提出了一种基于层次结构的外立面表达方法, 他们的分析是基于对称极大化原则进行的.

基于先验知识的方法利用来自于数据的先验结构知识对外立面进行分析. 这种分析方法实际上采用了逆向过程式建模的思想. 其中大量的工作是通过逆向分析语法规则进行的. Alegre和Dellaert^[118]通过引入语法并利用马尔可夫链蒙特卡罗方法(Markov Chain Monte Carlo, MCMC)优化语法参数分析模型结构. 文献 [119, 120] 提出了一系列基于隐式形状模型(implicit shape model)^[121]的方法对窗户进行检测和重建外立面. Müller等人^[122]通过对CGA语法进行拟合的方式分析外立面子区域. Brenner和Ripperda提出了一系列基于外立面图像和扫描数据的工作^[123, 124]以检测外立面元素. 该方法首先从外立面图像集中导出一个内容自由的语法(context-free grammar), 再利用RJMCMC(Reversible Jump Markov Chain Monte Carlo)方法对新的外立面模型进行拟合. Teboul等人^[125]提出了一种基于形状语法的监督学习方法对建筑外立面进行分析. 随后, Teboul等人^[126]利用增强学习(reinforcement learning)对这种方法进行了改进.

建筑外立面建模. 建筑外立面建模按照建模结果通常可以分为外立面布局建模和外立面几何建模两类.

外立面布局建模指的是基于外立面的图像特征以及结构与功能语义信息构建满足一定约束条件的建筑外立面. 由于只研究外立面的布局形式, 例如楼层高度、窗户风格、位置和对齐方式等, 研究的输入输出通常是外立面图像. 早期, Wonka等人^[103]和Müller等人^[15]分别利用预定义的语法使用过程式建模方式建模. 随后, Bao等人^[127]通过分析样例的结构约束, 利用二次规划生成新外立面布局. Alhalawani等人^[128]提出了一种利用外立面的网格结构恢复建筑外立面的方法. 最近, Yeh等人^[129]和Dai等人^[130]都提出了基于拼贴的(tile-based)布局方法. 不同之处在于, Yeh等人^[129]采用基于概率模型中的因子图(factor graph)方法, 而Dai等人^[130]采用遗传算法. 两种方法都可以合成与样例风格一致的外立面.

外立面几何建模是指通过外立面图像或扫描点云数据生成具有丰富细节特征的三维建筑外立面模型, 主要是通过交互建模工具进行建模. Hohmann等人^[131]提出了一种基于GML形状语法^[132]的建模方法, 类似的还有Aliaga等人提出的方法^[133]. SmartBox^[134]是一种基于LiDAR数据的建模系统, 它通过半自动的组装整合结构单元进行建模. Xiao等人^[135]提出了一种基于图像的外立面建模方法. 该方法可以基于街景图片快速重建整条街的外立面模型. 最近, Musalski等人^[136]还提出了一个基于图像的半自动建模系统. 该系统提供了丰富的交互工具, 能够对外立面上结构相似的建筑元素(如窗户、阳台和装饰物等)进行自动检测与分组, 同组内的元素可以共享编辑操作. 用户可以使用该系统在较短时间内建出高质量的三维外立面模型.

1.3 本文工作

本文研究语义引导的交互式建模与处理技术. 基于模型语义分析, 我们研究了单个几何模型的交互式分割算法和语义引导的草图勾画式形状建模问题. 同时, 我们将语义引导的分析与建模思想推广到建筑外立面建模领域, 研究了建筑外立面的结构化修复技术. 论文主要贡献如下:

- 提出了一种语义引导的前景勾画式网格分割算法. 通过对模型进行语义分析, 用户只需要在感兴趣的区域进行渐进式勾画, 算法即可反馈对应的分割结果,

分割结果随用户交互进行动态调整。这种分割方法真正体现“所画即所得”的设计宗旨。

- 提出了一种语义引导的草图勾画式形状建模技术，给出了一种满足初级非专业用户需求的形状建模工具。通过对模型集进行包括类型、结构和功能在内的联合语义分析，针对用户绘制的模型轮廓，计算机实时分析用户建模意图并通过阴影引导图的形式给出进一步的草图勾画建议，辅助用户准确、快速的表达建模意图。同时，算法通过模型部件组装的方式快速构建新模型。此外，用户还可以对已创建模型进行编辑与处理。
- 提出了一种基于建筑物外立面结构语义理解的外立面修复与建模技术。通过对数据库中外立面的结构功能语义分析，针对大数据量丢失的外立面，算法利用概率图模型进行结构修复与外观修复，得到符合语义分析结果且与原外立面风格一致的完整外立面。

本文共分为五章，围绕模型建模与处理，贯穿语义引导的模型分析方法与用户交互相结合的建模与处理思想。各章的内容安排如下：

第一章简要介绍语义引导的交互式建模与处理问题的研究背景，重点介绍了基于语义的模型分析和交互式建模与处理，阐明了课题的重要性与问题，并对相关工作进行了系统回顾。

第二章介绍了一种语义引导的前景勾画式形状分割技术。

第三章介绍了一种阴影引导的草图勾画式形状建模技术。

第四章主要介绍了一种基于结构语义引导的建筑外立面修复算法。

第五章对本文的研究成果进行总结，并讨论了未来的研究方向与问题。

第2章 语义引导的前景勾画式形状分割^{*}



图 2.1 Paint Mesh Cutting 分割示例. 从左至右: 用户在网格曲面感兴趣的区域进行渐进式勾画(蓝色), 系统实时反馈分割结果(橙色).

2.1 引言

三维形状分割是计算图形学中的一个重要研究课题, 并在众多研究方向中具有广泛应用. 在过去的十年间, 大量学者关注于三维形状的分割问题, 并提出了许多自动分割算法, 文献 [21] 对此进行了详细综述. 但是, 自动算法面临着来自用户主观意识与认知多样性的挑战. 由于不同的用户对于分割结果理解不同, 不同用户面对相同的分割任务得到的结果也往往不尽相同, 传统的自动分割算法很难满足所有用户的需求. 在此背景下, 交互式的形状分割算法逐渐受到用户和研究者的青睐. 用户通过在三维模型上进行简单的勾画与选取就可以得到对应的分割结果. 在此之前, 按照用户的交互方式划分, 交互式分割算法主要可以分为三类: 基于边界勾画的交互方式^[1, 8, 43]、基于前景和背景勾画的交互式^[11, 45]、垂直于边界勾画的交互式^[12]. 通过这些交互工具, 用户可以轻松完成模型的分割任务.

在实际进行形状分割时, 用户通常只关注于前景部分, 对背景部分并不关心. 受前景勾画式图像分割^[137]算法的启发, 本章提出了一种语义引导的前景勾画式形状分

^{*}本章内容发表在: Paint Mesh Cutting. Computer Graphics Forum, 2011, 30(2): 603-611.

割算法, Paint Mesh Cutting, 用于三维形状的分割. 通过对模型结构语义和用户交互语义的理解与分析, 系统不断更新对用户分割意图的推断, 并通过三维形状的分割结果对用户交互进行忠实的反映. 该系统使用简便, 用户只需要关注于感兴趣的前景区域并进行交互即可, 系统会自动得到相对应的分割结果. 更重要的是系统对用户的反馈是实时的, 可以跟随用户的交互进行渐进式分割, 见图2.1. 从用户体验的角度而言, Paint Mesh Cutting体现了“所画即所得”的设计宗旨.

本章内容安排如下: 2.2节介绍语义引导的三维形状分割的相关工作, 针对具体研究问题对1.2.1节内容进行补充; 2.3节介绍基于图分割的优化算法, 对Paint Mesh Cutting算法原理进行介绍; 2.4节对Paint Mesh Cutting渐进式分割框架进行详细阐述; 算法的分割结果、效率分析以及用户测评将在2.5节进行展示与介绍; 2.6节, 我们对语义引导的前景勾画式形状分割技术进行小结.

2.2 相关工作

语义引导的形状分割技术研究内容非常丰富, 在本文的1.2.1节已对相关工作进行了详细回顾, 此处不在赘述. 形状分析是形状分割的关键, 正如1.1.2节所阐述的, 如何跨越形状的低层几何属性与高层语义信息间这道鸿沟是语义引导的形状分割技术所要面临的首要任务. 曲面度量的选择则是问题的关键.

曲面度量. 这里所指的曲面度量即是网格曲面上定义的标量函数, 它在网格分割中扮演着重要角色. 选择合适的曲面度量可以有效的表达与获取形状具有语义的部位. 极小值原则(minima rule)^[34, 35]通过曲面上负曲率的极小值诱导出模型部位的边界. 其他重要的曲面度量还包括基于测地距离的曲率映射^[138], isophotic 度量^[44], 基于测地距离和isophotic度量的特征敏感度量^[139], 扩散距离(diffusion distance)^[140], 基于各向异性的测地距离的曲率张量^[141]等. 还有一些度量是依赖于形状体信息(volumetric information)^[142]的. 形状直径函数(Shape Diameter Function, SDF)^[40]度量了曲面上每个点在物体内部所构成锥体的直径, 它将物体的体信息映射到物体的表面. 它的一个重要性质是对形状姿态变化保持不变. 体形状图像(Volumetric Shape Image, VSI)^[143]也是一种形状部位感知度量, 它综合了SDF度量、曲面测地距离与曲面法向差异等多种度量的特性. 但显而易见, VSI度量的计算复杂度远高于SDF度量.

2.3 基于图分割的优化算法

我们采用分割问题中常用的图分割优化算法(graph-cut optimization)^[144]作为主要分割工具,但为了达到“所画即所得”的目标,我们对曲面度量与分割能量进行了慎重的选择与设置.

曲面度量. 我们采用形状直径函数(SDF)^[40]作为形状度量. SDF度量了曲面上每个点在物体内部所构成锥体的直径, 它将物体的体信息映射到物体的表面. 从单个模型的角度而言, 模型的不同功能部件往往具有与其他部件不同的几何特征, 其中最为直观与明显的就是模型的形状直径, 例如人的四肢与躯干的形状直径就存在巨大差异, 而手臂与大腿的形状直径也存在明显不同. 因此利用SDF对模型的形状直径加以量化分析, 从本质上而言即是通过模型的形状直径特征对三维形状进行语义分析和理解. 此外, SDF还具有一个重要性质, 即对物体姿态变化保持不变. 这一性质保证了对相同类型不同姿态模型的形状分析结果稳定性. 这也体现了SDF是一种合适的模型语义分析度量. 此外, SDF值易于计算, 这也为形状分析提供了便利. 在进行模型分割之前, 我们首先计算网格上所有点的SDF值 $M(\cdot)$. 图2.2左图显示了Armadillo模型的SDF值.

分割能量. 我们将形状分割问题转化为图分割问题加以解决, 并利用计算得到的SDF值在网格上的分布来定义能量函数. 我们考虑三角网格 $M = \{V, E\}$, 其中 V 对应于网格的顶点, E 对应于网格的边. 首先通过用户的交互笔刷 P 在模型上选取前景种子点 S^f . 我们的目标是由 S^f 计算网格上属于前景的顶点集合 F .

在最初的状态, 属于背景的顶点集合 $B = V$ 且 $F = \emptyset$. 同时在 B 中随机采样一定数量的顶点(通常为网格顶点数的10%), 并构造具有 k_b 个核的高斯混合模型(Gaussian mixture model, GMM)拟合其SDF值得到背景的SDF值概率密度函数 $p_b(\cdot)$; 类似的, 基于 S^f 建立前景的SDF概率密度函数 $p_f(\cdot)$ (具有 k_f 个核的高斯混合模型), 如图2.2所示.

依据SDF值的概率密度函数 p_f 和 p_b , 我们可以利用基于图分割的优化算法得到前景 F . 定义相对于顶点集合 V 的二值标号集合 $L = \{l_v \mid v \in V\}$. 则 L 可以通过极小

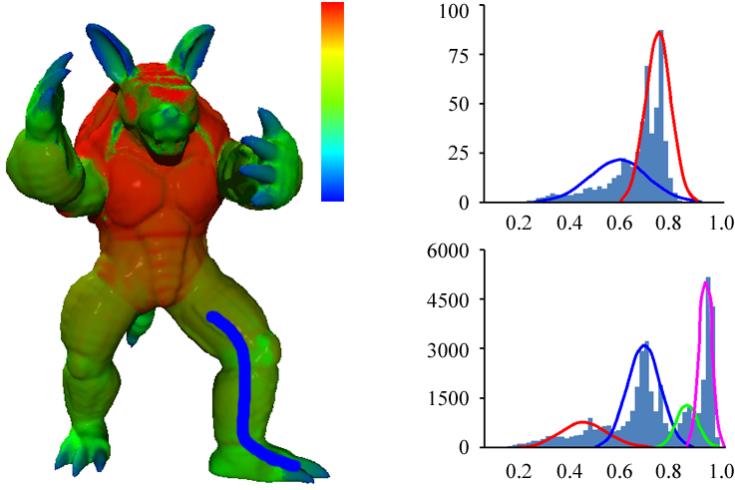


图 2.2 Armadillo 模型的 SDF 值信息. 左图为 Armadillo 模型的 SDF 值颜色映射. 右图为 SDF 直方图, 分别采用 2 个和 4 个核的高斯混合模型学习前景及剩余部分的 SDF 值分布.

化如下能量函数得到

$$E(L) = \sum_{v \in V} E_d(l_v) + \lambda \sum_{(v,u) \in E} E_s(l_v, l_u), \quad (2.1)$$

其中数据项 E_d 用于惩罚顶点 v 的标号 (1-前景, 0-背景), 光滑项 E_s 用于惩罚相邻两个顶点 v 和 u 被指定为不同标号的情形, 权值 λ 取 0.05.

我们定义数据项 E_d 为

$$E_d(l_v) = \begin{cases} (1 - l_v) \cdot K, & \forall v \in S^f, \\ l_v \cdot L_v^f + (1 - l_v) \cdot L_v^b, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.2)$$

其中 K 是一个足够大的常数, $L_v^f = -\ln(p_f(M(v)) + \epsilon)$ 且 $L_v^b = -\ln(p_b(M(v)) + \epsilon)$, $\epsilon = 10^{-6}$, $M(v)$ 为顶点 v 的 SDF 值.

光滑项 E_s 定义如下

$$E_s(l_v, l_u) = -|l_v - l_u| \cdot \ln((1 - \beta)n(v, u) + \beta g(v, u)), \quad (2.3)$$

其中 $n(v, u) = \frac{1 - \mathbf{n}_v \cdot \mathbf{n}_u}{2}$, $g(v, u) = \frac{e(v, u) - e_{min}}{e_{max} - e_{min}}$. \mathbf{n}_v , \mathbf{n}_u 分别是顶点 v 和 u 的法向, $e(v, u)$ 是边 $(v, u) \in E$ 的长度, e_{max} 和 e_{min} 分别是边长的最大与最小值, β 为权值(默认值为 0.05). 与 VSI 度量^[143]相似, 我们在光滑项的定义中综合了 SDF 度量、法向差异 $n(v, u)$ 以及测地距离 $g(v, u)$.

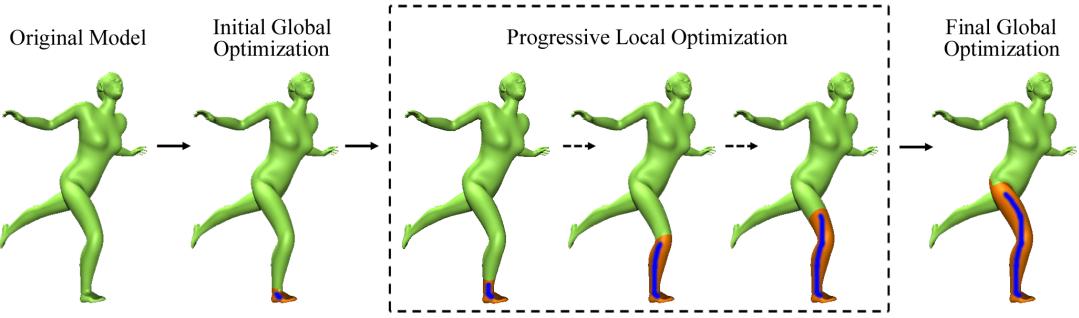


图 2.3 Paint Mesh Cutting 的渐进分割流程演示.

2.4 Paint Mesh Cutting 系统

本节, 我们将介绍Paint Mesh Cutting的算法框架.

2.4.1 用户界面

我们的用户界面简单易用. 用户在模型感兴趣的部位(前景)按住鼠标左键并拖动画刷即可以分割模型的子部分. 与之前在鼠标松开后进行分割计算的用户界面不同, 我们的系统在笔刷进入背景区域时将自动触发分割算法进行分割, 见图2.3. 一旦分割算法被触发, 我们通过渐进式的分割算法实时捕捉用户交互信息并通过扩大前景区域的方式反馈分割结果.

通过观察新前景区域, 用户可以继续拖动鼠标并不断扩大前景, 直到用户满意为止, 见图2.3. 在交互过程中, 用户并不需要在整个前景区域上进行勾画, 系统会根据用户笔刷自动计算最适合的分割边界. 此外, 用户可以通过这种交互方式反复修改分割结果.

2.4.2 渐进式分割算法

我们采用渐进式分割算法使分割结果可以随着用户的交互而实时更新, 真正做“所画即所得”. 渐进式分割算法分为三个部分:

初始全局优化. 在用户交互的最初阶段, 我们设置背景高斯混合模型 $p_b(\cdot)$ 具有 $k_b = 4$ 个核. 当用户开始勾画时, 触发初始全局优化. 我们用具有2个核的高斯混合模型估计前景种子点的SDF值概率密度函数 $p_f(\cdot)$. 通过极小化式2.1定义的能量函数,

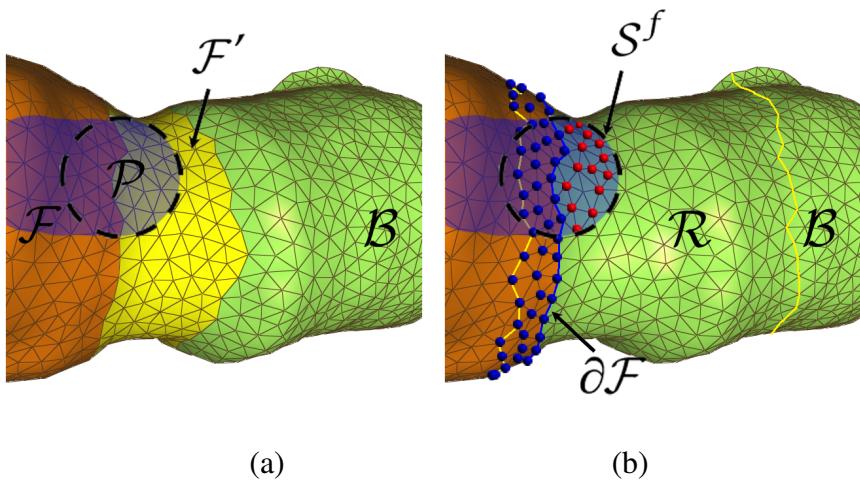


图 2.4 前景区域的渐进扩张. (a) 给定前景区域 F (橙色)及当前的画刷 P (蓝色), F' 为渐进局部优化得到的前景局部扩张. (b) 红色种子点 S^f 来自画刷 P 与背景 B 的交集, 蓝色种子点由前景边界向内扩张而得. 区域 R 通过向外扩张前景边界而得. 渐进局部优化在两条黄色边界间的区域进行.

我们可以得到初始的前景区域 F , 见图2.3.

渐进局部优化. 当已存在前景 F 和当前笔刷 P 时, 我们首先计算前景 F 在背景 B 中的局部扩张 F' (见图2.4(a)). 然后, 前景部分更新为 $F = F \cup F'$, 并作为下一次交互的前景部分.

我们选取当前笔刷 P 与背景区域 B 的交集作为种子点 $S^f (S^f = P \cap B)$. 为了得到稳定的估计, 我们将前景 F 边界处的顶点也作为种子点(如图2.4(b)所示), 并利用具有1个核的GMM模型估计前景种子点 S^f 的局部概率密度函数 $p^f(\cdot)$. 在用户的交互过程中, 我们在靠近分割边界处构造局部区域 R , 并由 $R \cap B$ 处顶点的SDF值更新背景GMM模型 $p_b(\cdot)$.

由 p^f 和 p_b 两个GMM模型,在局部区域 R 极小化式2.1定义的能量函数,我们可以得到扩张的前景区域 F' 及更新后的前景区域 F ,见图2.3.

后期全局优化.当用户通过释放鼠标左键停止交互时,我们首先分别对前景区域 F 和背景区域 B 的高斯混合模型 $p_f(\cdot)$ 和 $p_b(\cdot)$ 进行更新,接着我们再次采用全局的图分割优化更新模型分割结果,见图2.3右图.此处我们设置 k_f 和 k_b 分别为2和4.

2.4.3 实现细节

渐进式分割算法可以为用户提供高质量的实时分割结果反馈, 主要有两方面的原因. 第一, SDF是一种对形状姿态变化保持不变的曲面度量. 第二, 由于每次只有一小部分顶点参与到渐进式局部优化计算, 因此可以在用户拖动画刷时迅速反馈结果. 针对算法与实现中的一些细节问题, 我们进行如下讨论:

分割边界优化. 在用户释放鼠标左键结束交互并通过后期全局优化得到分割结果后, 我们采用基于snakes的边界优化算法^[11]对边界进行优化处理.

背景交互. 与基于前景和背景的交互式分割算法^[11]类似, 如果用户需要, 我们也允许用户直接对背景区域进行交互处理. 在我们的系统中, 用户可以通过鼠标右键切换前景笔刷与背景笔刷. 假设 S^b 是背景笔刷上的种子点, 我们可将数据项(式2.2)修改为如下形式

$$E_d(l_v) = \begin{cases} (1 - l_v) \cdot K, & \forall v \in S^f, \\ l_v \cdot K, & \forall v \in S^b, \\ l_v \cdot L_v^f + (1 - l_v) \cdot L_v^b, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (2.4)$$

自适应的权重设置. 权 λ 在式2.1中发挥着重要作用. 在基于图分割的优化中, 较小的 λ 倾向于得到与交互笔刷处顶点具有相似SDF值的分割部位, 这是因为起决定作用的数据项会趋向选择具有与前景种子点相近SDF值的顶点作为前景区域; 另一方面, 较大的 λ 倾向于得到较为光滑的分割边界, 这是由于此时光滑项的作用会增大, 并倾向于由minima rule引导分割. 在渐进式分割中, 我们可以通过调节 λ 值控制分割结果. 在初始全局优化中, 我们设置 λ 为一个较小的 $\lambda_{initial}$ 以确保得到一个主要由SDF值引导的分割结果. 接着, 在渐进局部优化阶段, 系统增大 λ 值为 λ_{local} 使得其可以在渐进分割过程中得到较好的分割边界. 最后在后期全局优化中, 系统设置 $\lambda = \lambda_{finish}$ 以得到既满足SDF值相似性又满足光滑边界要求的分割结果. 在实际操作中, 我们设置 $\lambda_{initial} = 1.0$, $\lambda_{local} = 10.0$, 以及 $\lambda_{finish} = 2.0$.

加速策略. 我们的算法依赖于形状的SDF值. 用户将三维形状导入系统时, 系统就自动计算网格顶点的SDF值. 但是, 计算大型网格SDF值的开销仍然较大. 为了减少用

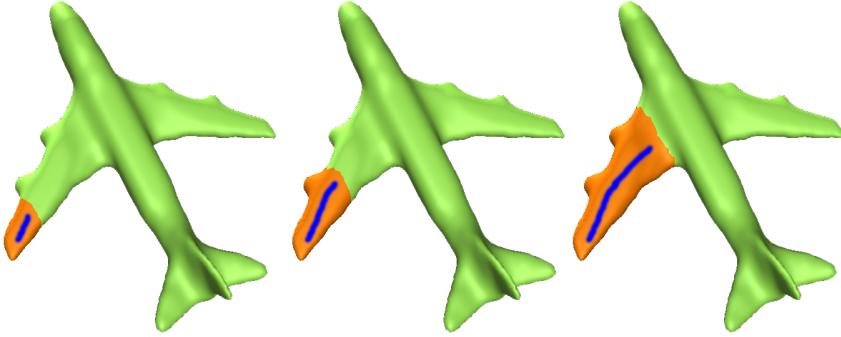


图 2.5 用户通过渐进式勾画前景区域分割飞机机翼.

户的等待时间,对于特大型模型(顶点数大于 10^5),我们首先在对应的简化网格上计算顶点的SDF值,再利用Poisson方程插值计算原网格顶点上SDF值^[145].此外,我们在系统中还采用了加速的图分割的优化算法^[146]以提高计算速度.

2.4.4 基于块的分割算法

与文献 [12]相似,我们的系统允许用户进行基于块的分割操作.这得益于我们的系统为基于块和基于部位的分割任务提供了统一的框架.我们只需要通过调整式2.1中的 λ 值即可.在进行基于块的分割时,我们设置 $\lambda_{initial} = 5.0$, $\lambda_{local} = 3.0$ 以及 $\lambda_{finish} = 5.0$.通过设置如上的权值,初始和后期全局优化会得到与勾画处顶点具有相似SDF值的块,同时在渐进局部优化中将得到具有尖锐特征的分割边界.

2.5 实验结果

本节将展示语义引导的前景勾画式分割技术的实验结果.本节所展示的所有实验都是在3GHz双核处理器及4G内存的个人计算机上进行的.

图2.5展示了利用画刷渐进分割飞机机翼的例子.通过例子可以看到,即使模型模型表面不完全光滑,我们的方法仍然可以得到合理的分割结果.

由于SDF具有对于相同模型不同姿势保持不变的特性,我们可以轻而易举的从不同姿势的模型中分割得到一致的部位,见图2.6.在图2.7中,用户通过三种不同方向的勾画都可以得到相同的分割结果,说明我们的算法对于用户的交互方式不敏感,具有一定容错性.

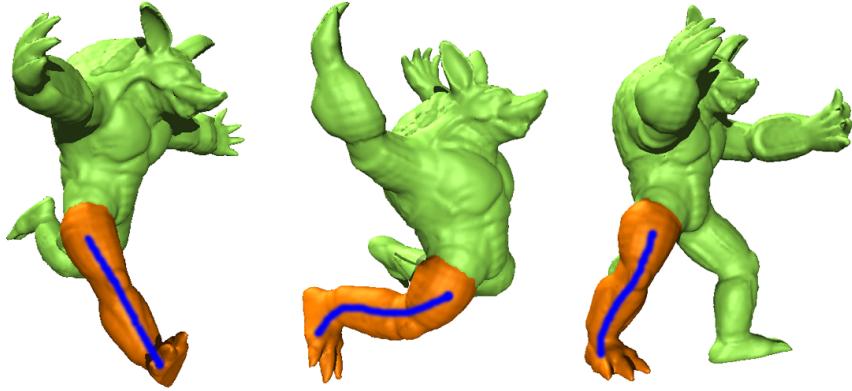


图 2.6 用户使用我们的工具可以轻松的分割不同模型的相同部位.



图 2.7 分割结果对用户的勾画方式不敏感. 用户可以通过在网格上随意交互得到期望的分割结果.

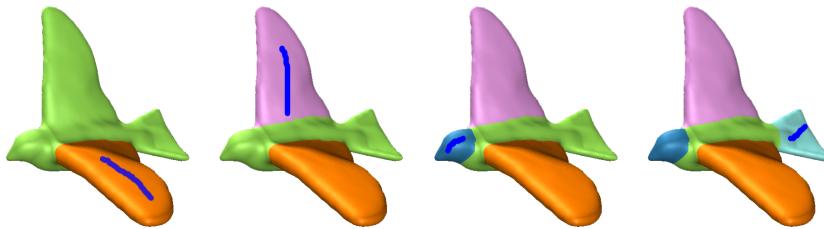


图 2.8 使用我们的分割工具对模型进行多块分割.

图2.8展示了使用我们的分割工具对模型进行多块分割的例子. 图2.9展示了基于块的渐进分割实例. 用户通过添加额外的勾画交互可以得到期望的分割结果.

我们的方法对于网格噪音不敏感, 见图2.10. 在原始模型表面上加入一定噪音, 我们的系统无论是基于部位的分割还是基于块的分割仍然可以得到合理的分割结

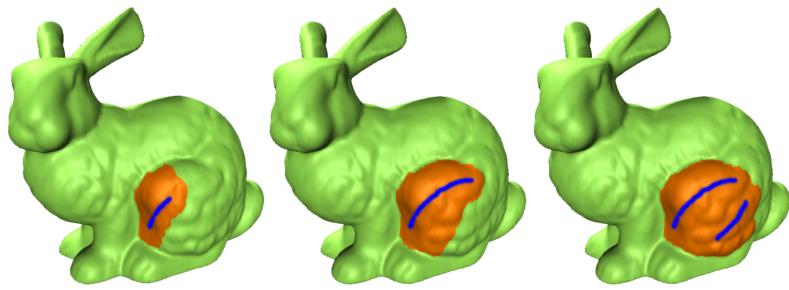


图 2.9 对Bunny模型进行基于块的分割. 该例中进行了两次前景勾画.

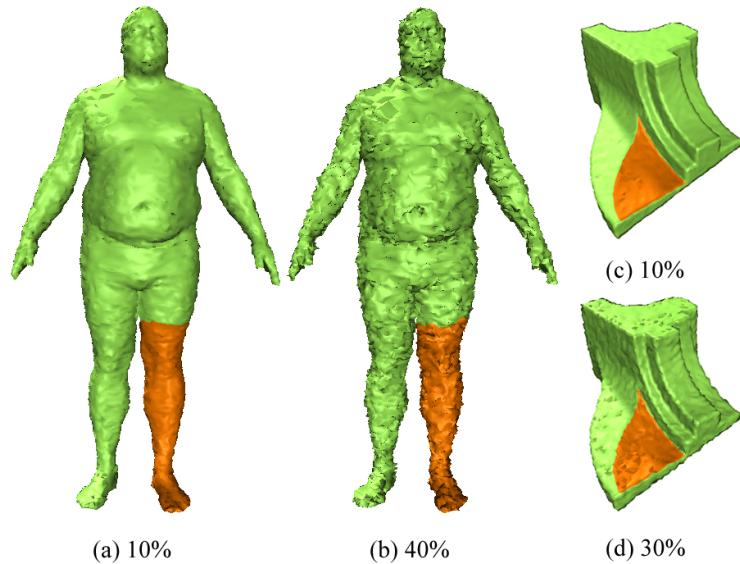


图 2.10 不同噪音影响下算法的分割结果. 图下的数字表示附加的噪音大小.



图 2.11 不同形状度量对分割结果的影响. 基于相同的算法框架和前景交互, 不同的曲面度量得到不同的分割结果(从左至右分别为高斯曲率、平均曲率及SDF). SDF度量给出了最具语义性的分割结果.



图 2.12 使用我们的分割工具得到的分割结果.

果. 我们还对Princeton Segmentation Benchmark数据库^[52]中的模型进行了测试, 部分结果展示在图2.12中.

值得注意的是, 由于SDF度量是一种姿势不敏感的部位感知形状度量, 它度量了曲面上每个点在物体内部所构成锥体的直径. 因此我们基于SDF的分割算法可以给出合理的分割结果. 将其替换为其他度量将不能给出相似结果, 例如高斯曲率和平均曲率, 见图2.11. 原因是基于曲率的度量不是部位感知的. 位于不同部位的网格顶点可能会具有相似的曲率. 因此通过建立高斯混合模型不能反映分割部位的整体几何特征. 另一方面, 虽然基于曲率的度量可以很好的处理基于块的分割问题, 但是曲率度量对网格噪音非常敏感, 对于带有噪音的网格模型则难以得到合理结果, 而我们的基于SDF的方法可以得到稳定的分割结果, 如图2.10.

表2.1列出了文章中模型的分割运行时间. 我们可以看到, 在所有实验中我们的系统都能在交互速率下完成分割任务.

2.5.1 用户测评

为了研究不同交互方式在三维形状分割任务中的实用性, 我们进行了一项用户测评. 我们比较了三种不同交互方式的模型分割算法, 它们分别是基于前景和背景勾画的交互方式(记作FBB)^[11], 垂直边界勾画的交互方式(记作CBB)^[12], 以及我们的基

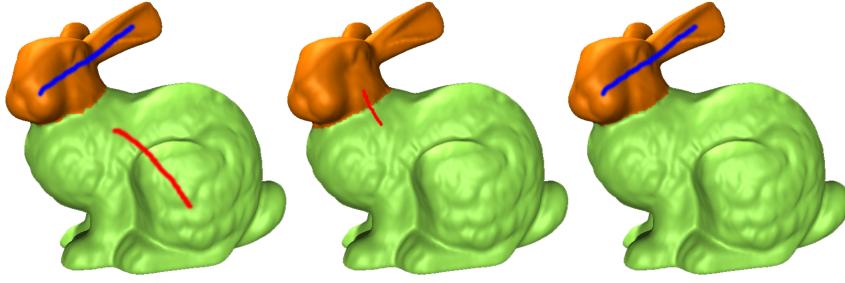


图 2.13 三种不同勾画式网格分割工具的用户界面. 从左至右分别为基于前景和背景勾画的交互方式(FBB)^[11], 垂直于边界勾画的交互方式(CBB)^[12]及我们提出的前景勾画的交互方式(FB).

于前景勾画的交互方式(记作FB). 图2.13展示了三种不同的交互界面. 在用户研究中, 我们通过比较三种算法在基于部位的分割任务中的结果, 分别从效率和正确性两个方面对它们进行评估.

任务设置. 我们邀请了16位参与者参与我们的实验, 其中12位参与者具有三维交互经验, 其余4位参与者不熟悉三维交互. 每一位参与者在正式开始实验前都有充足的时间了解和熟悉各分割算法和实验任务.

我们从Princeton Segmentation Benchmark数据库^[52]19个模型类中的16个模型类中各选取1个模型组成测试模型集, 其余3个模型类由于不适合基于部位的分割而没有选取. 每个模型都带有相对应的分割任务描述图片以帮助参与者明确分割任务. 为了获得充足的实验数据, 我们构建了16个子测试集, 每个子测试集中包含来自不同模

Model	#Vertices	T1(ms)	T2(ms)	T3(ms)
Dino(图2.1)	28,150	53	10	178
Woman(图2.3)	5,691	8	6	27
Airplane(图2.5)	6,797	12	5	24
Armadillo(图2.2)	25,193	36	10	120
Bunny(图2.9)	34,835	54	11	248

表 2.1 针对不同模型, 算法各阶段运行时间(单位:毫秒). T_1 , T_2 及 T_3 分别代表初始全局优化、渐进局部优化及后期全局优化的平均用时.

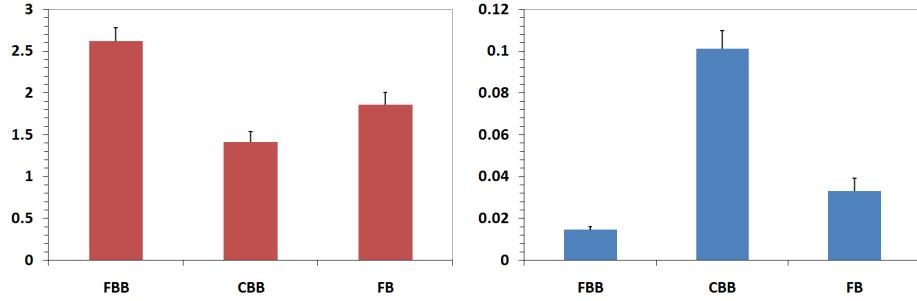


图 2.14 三种分割工具的效率比较. 左: 用户交互的平均用时及其标准误差. 右: 分割算法的平均运行时间及其标准误差.

型类的6个模型. 然后每个参与者随机的分配到一个子测试模型集, 并要求参与者对其中的每个模型利用3种交互工具分别完成3个不同的分割任务.

在实验的最后, 每位参与者还要填写一份简单的问卷. 用户需要对以下的问题进行1-3分的评分: 用户使用分割工具的难易程度如何, 得到预期分割结果的速度如何, 最终分割结果的准确性如何. 其中1代表最低分, 3代表最高分. 最后, 用户还需对三种交互算法进行总体评分.

比较与分析. 基于三种交互式分割算法的用户测评, 我们对它们的效率和分割准确性进行了比较与分析.

图2.14显示了三种算法的时间统计结果. 我们得出以下观察结论. 交互时间方面, CBB所需的交互时间最少, 其次为FB, 耗时最多的是FBB. 算法的计算时间方面, 由于FBB的算法核心为区域增长算法, 因此用时最短, 其次为FB, 由于CBB需要求解Poisson方程, 因此耗时最长. 研究显示, 虽然FB需要多次运行图分割优化, 但算法效率仍然较高.

我们采用双向指标(Binary Jaccard Index)^[147]作为分割精度的度量, 其定义为

$$BJI(S_1, S_2) = \frac{\|S_1^o \cap S_2^o\|}{\|S_1^o \cup S_2^o\|}, \quad (2.5)$$

其中 S_1^o 和 S_2^o 分别为交互式分割方法 S_1 和 S_2 抽取出的区域. 在实验分析中, 我们设置 S_2^o 为标准分割结果. 也就是说, 较高的 $BJI(S_1, S_2)$ 值对应于较精确的分割结果 S_1^o . 图2.15展示了三种交互式分割算法的平均 BJI 值. 其中, FB对应的 BJI 值最高, 这表示总体上FB得到的分割结果比其余两种算法的结果准确.

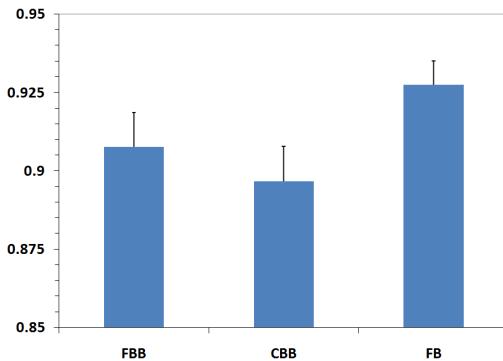


图 2.15 三种分割工具的分割准确性比较: 平均 BJI 值及其标准误差.

基于参与者在调查问卷中的反馈, FB得到了最高分, 后续分别为CBB和FBB. 这表明, 参与者总体上偏爱我们提出的交互方式. 换言之, Paint Mesh Cutting可以为用户提供最佳的用户体验.

2.5.2 算法局限性

Paint Mesh Cutting由于采用了图分割优化算法, 因此也带有其本身所具有的局限性. 首先, 它很难分割出光滑模型的部分区域. 例如, 对一个光滑的圆柱进行分割时, 分割结果会是整一个圆柱面. 为了解决这个问题, 需要引入类似于Easy Mesh Cutting^[11]的背景交互. 其次, 对于细节非常丰富的复杂三维模型, 用户通常需要通过多笔交互才能得到满意的结果. 这是由于优化方法趋向于抓取尖锐的特征作为分割边界. 总体而言, 以上局限性可以通过结合其他交互式分割工具来克服.

2.6 本章小结

我们提出了一种新颖的交互式三维形状分割技术——语义引导的前景勾画式形状分割. 用户只需在前景区域进行简单勾画即可得到分割结果, 同时系统可以跟随用户的交互进行渐进式分割并实时反馈分割结果. 用户研究表明, 我们的分割系统为用户提供了良好的用户体验, 使得用户只需关注于模型中所感兴趣的部分即可, 真正体现了“所画即所得”的设计宗旨.

第3章 语义引导的草图勾画式形状建模*

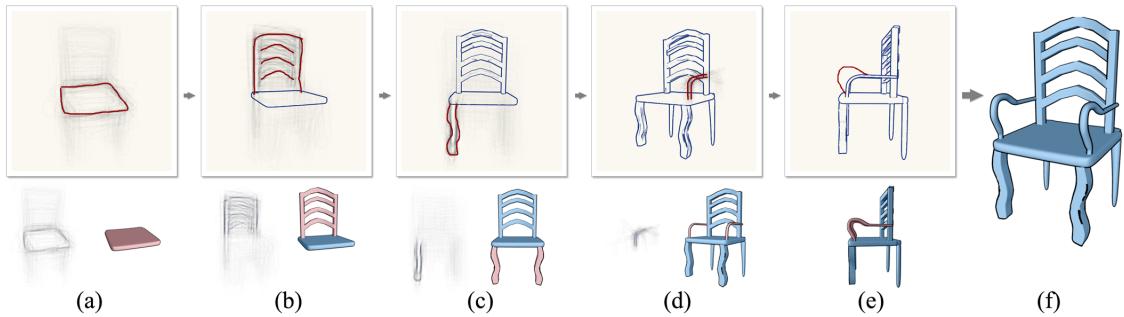


图 3.1 用户使用系统创建座椅模型的实例. 用户在屏幕上连续使用画笔(红色)表达设计意图. 系统自动返回对应的三维部件并为用户提供阴影引导图. (a)-(e)上排展示了用户绘制草图的过程及系统实时提供的阴影引导图, 下排显示了对应的三维模型及阴影. 用户也可以通过在模型轮廓线周边勾画的方式对模型进行编辑(e). (f)最终创建的模型.

3.1 引言

三维形状建模是计算机图形学领域中重要的研究问题之一, 目的是将用户的设计意图转化为三维模型. 然而将用户的设计意图转化为模型的过程是非常复杂与困难的. 用户的模型设计意图通常来源非常广泛, 除了源自于用户自身的想象以外, 还可能来自于现有三维模型^[8, 88, 98]或图像^[148]的启发. 此外, 用户设计模型的过程往往是创建与修复两个步骤迭代进行的. 这些因素也无形中增加了三维形状建模的难度.

使用专业的建模工具, 例如3DS Max, Maya, ZBrush和MudBox等, 对于没有受过专业训练的普通用户而言非常困难. 近些年来, 以modeling by example^[8]为代表的一系列基于样例的模型生成方式使普通用户创建模型成为可能, 用户只需要选择合适的模型部件就可以通过组装合成新的模型. 但研究发现, 用户在选择模型部件时仍然

*本章内容发表在: Modeling by Drawing with Shadow Guidance. Computer Graphics Forum, 2013, 32(7):157-166.

面临着困难。此外，完全满足用户意图的模型部件也许并不存在于数据库中，这给用户设计与部件选取也带来了额外的困难与挑战。

基于草图勾画的建模方式为用户提供了一种自然直观的设计意图表达途径。过去二十年来，围绕基于草图勾画的建模方式涌现了大量工作，文献[94]对其进行了详细综述。其中大多数工作都是以从无到有的方式创建新模型，但是这种方式并不利于用户表达建模初期的构想，同时要求用户具有立体几何知识以及较强的绘画能力。

本章介绍了一种语义引导的基于草图勾画的三维形状建模工具。它结合了基于样例的建模方式和基于草图勾画的交互方式。它通过简单易用的操作界面协助用户完成三维模型的创建与定制，见图3.1。受ShadowDraw系统^[149]的启发，我们的系统通过为用户提供动态的阴影引导图协助用户表达其设计理念。在整个建模过程中，用户可以在任意视点自由浏览模型和勾画草图。据我们所知，我们的系统是首次将阴影引导图引入三维形状建模。为了提供准确有效的阴影引导以及简单易用的勾画建模工具，我们进行了细致而严密的设计。相较于早期的基于草图勾画的建模系统，我们的系统具有以下三方面的优点：第一，降低了对用户的要求与限制，用户可以轻松自由的通过画笔创建三维模型；第二，我们提出了一个高效的基于草图的形状检索系统，系统不仅可以反馈与草图相似的模型，同时可以指出其对应位置；第三，通过系统创建的模型保持了高层次结构语义信息，可以用于进一步的编辑与处理。

本章内容安排如下：3.2节介绍语义引导的草图勾画式三维形状建模的相关工作，主要对语义引导的草图绘制相关研究内容进行回顾；3.3节对系统整体进行概述，包括数据库构建、用户界面以及算法流程；3.4节详细介绍了数据库的构建方法，为建模系统进行数据准备；对于阴影引导的草图勾画式建模系统的详细算法，3.5节将进行细致介绍；3.6节将通过建模实例和用户测评两方面分析系统的性能；3.7节，我们将对语义引导的草图勾画式三维形状建模技术进行小结。

3.2 相关工作

近年来，语义引导的形状建模方法与基于草图勾画的交互方式受到了学者的广泛关注，同时涌现出一大批研究成果。本文所提出的语义引导的草图勾画式三维形状建模系统，涉及到三维模型建模与处理中的诸多内容，例如语义引导的三维形状检

索、形状对应、交互式三维几何建模等。本文在1.2.1节对语义引导的三维形状检索，尤其是基于草图的形状检索方法进行了回顾；同时，在1.2.2节围绕交互式三维几何建模的发展历程进行了详细介绍。因此，本文在此处不再赘述。本文提出的阴影引导的草图勾画交互方式是受语义引导的草图绘制方式启发。

语义引导的草图绘制。越来越多的普通用户开始对基于草图绘制的二维与三维模型建模表现出极大热情，由此推动了语义引导的草图绘制技术的迅速发展。iCanDraw系统^[150]提供了一种实时协助用户进行人脸绘制的交互界面。在用户绘制过程中，系统通过对用户绘画结果进行分析，逐步提供绘画建议，使得用户可以画出与参考图片一致的人脸。ShadowDraw系统^[149]通过在用户画笔下显示阴影提示图的方式协助用户进行二维绘图。用户在绘图的过程中，系统根据用户绘画结果实时提供阴影提示信息，引导用户进行绘画。值得注意的是，将阴影提示推广到三维形状建模需要解决诸多问题，其中最重要的问题是系统需要在任意视角下为用户提供准确的草图勾画建议。

3.3 算法概述

本系统由离线数据库与在线阴影引导的草图勾画式建模两个部分组成。

数据库构建。数据库中的模型是基于已分类的预分割三维形状构成的。目前，为了验证系统的建模能力，我们选用了5类模型，分别为飞机、座椅、桌子、花瓶和自行车。数据库由两个子部分组成。第一个子部分是由每类模型的语义部件构成，并且所有部件都完成了语义结构分析，并按照语义标签进行分类，例如机翼、引擎、机身等。第二个子部分是二维图像库。它是由每一个形状部件在114个预设视角下的二维特征线渲染图组成。这些图片采用二进制的特征描述符进行特征提取并利用min-hash进行编码，以便搜索引擎可以在建模环节进行高效检索。

用户界面。我们的系统提供了一种虚拟的二维用户界面，用户的草图勾画交互如同在一张分辨率为 600×600 的画布上进行绘图一样，见图3.2。当用户开始勾画模型草图时，系统在用户的画笔下动态显示阴影引导图，以引导用户进一步的草图勾画。此外，系统还提供了一个形状部件的推荐列表以显示根据用户草图检索得到的相似形状

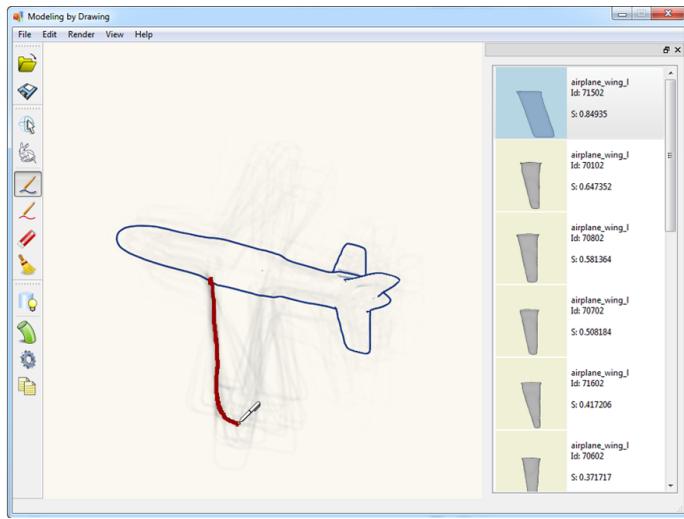


图 3.2 系统界面. 中间为用户绘画区域, 动态变化的阴影引导图显示在用户草图下方. 右侧的建议列表展示候选的三维模型部件. 左侧的工具栏包含一些常用工具.

部件. 系统对用户勾画创建的新模型采用非真实感渲染(Non-Photorealistic Rendering, NPR)方式显示在画布上, 使得整体风格与用户草图相近, 交互界面简洁自然. 值得注意的是, 在整个建模过程中, 用户可以在任何视点下浏览模型和进行草图勾画操作.

基于草图的形状建模. 用户通过逐一加入部件的方式创建三维模型. 用户首先以默认视角在空白画布上进行勾画, 然后系统自动提供进一步勾画的阴影引导. 整个建模过程可以分为以下5个步骤(如图3.3所示):

1. 阴影引导下的模型草图绘制. 用户在阴影引导图的引导和启发下在画布上不断勾画模型部件草图. 用户勾画的草图不仅提供了三维形状部件的几何信息, 同时提供了大小和放置位置等信息.
2. 视点相关的形状检索. 基于用户勾画的部件草图, 系统自动进行视点相关的三维形状检索, 并将检索结果按照匹配度降序排列([3.5.1](#)节).
3. 阴影引导图合成. 由形状检索过程中得到的部件特征线渲染图, 并基于空间位置信息合成新的阴影引导图. 系统将合成的阴影引导图与用户草图对齐后显示在其下方([3.5.2](#)节).
4. 三维形状部件拼接. 在用户草图与预分析的部件结构信息的共同引导下, 由系

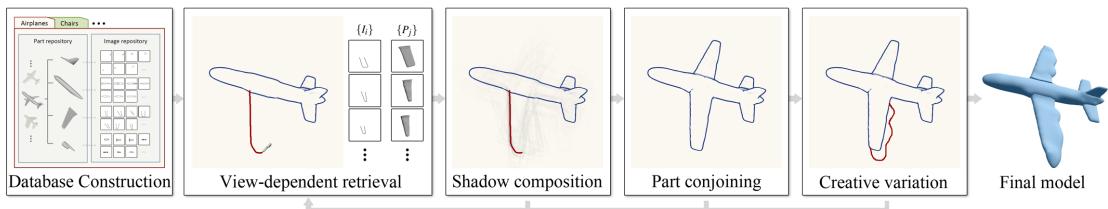


图 3.3 阴影引导的草图勾画式建模流程. 用户采用逐个部件建模的方式完成模型整体建模. 当用户在画布上进行模型草图勾画时, 系统将相应的在数据库内进行检索, 合成阴影引导图并反馈对应的三维模型部件. 然后系统依据模型先验知识以及用户草图将模型部件进行拼接整合. 用户可以通过在模型轮廓周边勾画对模型进行编辑.

统检索而得(或由用户选择)的形状部件将与工作区中已创建的模型部分进行拼接, 组成新模型([3.5.3节](#)).

5. 三维形状变化. 为了创造个性化的模型, 系统还允许用户在已创建的模型轮廓线周边绘制新的编辑曲线, 对已合成的新模型进行基于勾画的形状变形和编辑([3.5.4节](#)).

3.4 数据库构建

算法预处理部分主要由三个步骤组成. 首先, 基于收集的三维形状构建三维形状部件库. 接着, 我们在采样视角下抽取每一个形状部件的特征线渲染图并构建二维图像库. 最后, 我们对采样的特征线渲染图进行编码, 为三维形状检索做准备.

3.4.1 三维形状部件库

为了构建三维形状部件库, 我们首先对同类的三维形状进行尺寸归一化和对齐. 接着, 我们采用最新的联合分割技术^[70]对三维形状进行语义引导的联合分割, 将所有形状分解为语义部件. 例如, 我们将飞机模型分解为机身、机翼、机尾和引擎等4部分. 为了方便建模时将来自不同原始模型的语义部件组装为一个新模型, 我们对每一个三维形状和它的语义部件进行结构语义分析, 其中包括层次结构、接触点和对称性等(见图[3.4](#)).

层次结构. 对于每一个原始模型, 我们对其层次结构进行分析. 我们首先将模型中最

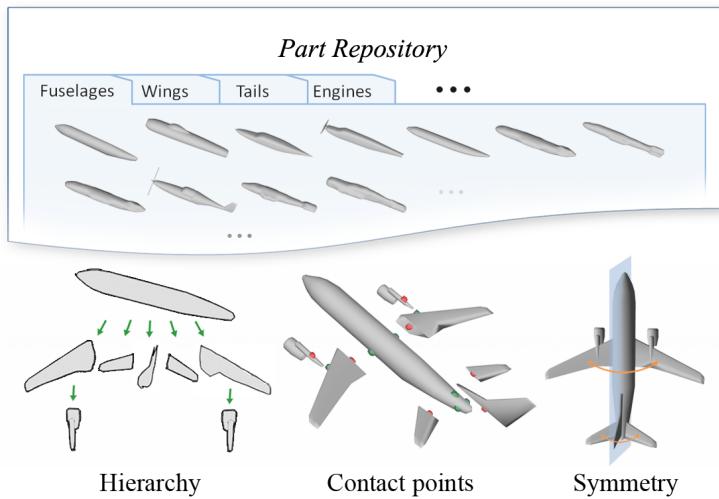


图 3.4 三维形状部件库. 收集的模型经过预分割构成三维形状部件库(上). 在模型的联合分割后, 我们对每个模型进行层次结构、接触点及对称性分析. 图中接触点进行了特别标注, 其中卯(mortises)和榫(tenons)分别标注为绿色与红色.

靠近形状整体有向包围盒中心的部件作为根节点. 然后由根节点出发通过部件间连接关系的分析迭代寻找相连接的形状部件并作为子节点插入层次结构. 值得注意的是, 这样的分析符合用户绘制草图时由粗糙至精细的绘画过程.

接触点. 为了方便后期对来自不同原始模型的语义部件进行组装, 我们记录原始模型中任意一对相连的语义部件间的接触点. 我们将形状分割时所得到的分割边界的中点定义为接触点. 为了简化部件的拼接问题, 我们将接触点分为两类: 卯(mortise)和榫(tenon). 在一对来自相连部件的接触点中, 我们定义位于低层次部件上的接触点为卯, 位于高层次部件的接触点为榫. 在建模过程中, 只有分别为卯和榫的一对接触点才可以连结在一起.

对称性. 我们对每个三维模型的全局对称和部件间对称进行分析^[151]. 我们记录对称轴, 并在建模过程中通过对齐对称轴的方法保持对称模型的全局对称性.

3.4.2 二维图像库

为了提供基于草图的三维形状检索和阴影引导图, 我们通过提取预设视角下的部件特征线渲染图构建二维图像库.

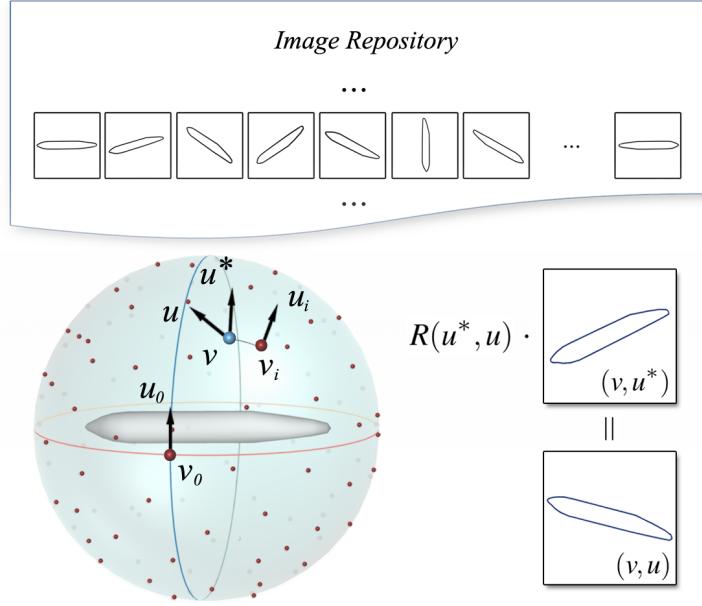


图 3.5 二维图像库. 所有三维形状部件在单位球(左下)预设视点下的特征线渲染图构成了二维图像库(上). 对于每个视点 v (蓝色), u 是其当前相机向上向量, u^* 是其一致相机向上向量. 视点 (v, u) 下的特征线渲染图是通过旋转矩阵 R 作用于视点 (v, u^*) 下的特征线渲染图而得.

视点采样.我们在单位视球上预先采样了包含100个均匀分布视点、6个标准正视点和8个角点的总计114个视点位置. 为了在后期实现阴影图的精确对齐, 我们通过算法设置每个采样视点的相机向上方向. 我们设置初始视点位置 $v_0 = (0.0, 0.0, 1.0)$ 以及对应的相机向上方向 $u_0 = (0.0, 1.0, 0.0)$. 记 $T(v_0, v)$ 为 v_0 到 v 的三维旋转矩阵, 则视球上任意一点 v 的一致相机向上方向 u^* 可以通过 u_0 按 $T(v_0, v)$ 旋转而得, 如图3.5所示. 我们设置每一个采样视点位置 v_i 的相机向上方向为其一致相机向上方向. 由此, 我们得到了114个采样视点 $\{(v_i, u_i)\}_{i=0}^{113}$.

形状特征线渲染图.对于每一个形状部件, 我们通过抽取其位于采样视点集 $\{(v_i, u_i)\}_{i=0}^{113}$ 且分辨率为 300×300 的*suggestive contour*^[152]作为其形状特征线渲染图. 因此, 二维图像库由三维形状部件库中的所有部件的形状特征线渲染图组成.

通过以上方法, 对于视球上的任一视点位置 v 及其切平面上的相机向上方向 u , 我们可以通过周边的采样视点近似估计形状部件在视点 (v, u) 的特征线渲染图. 我们只需选取距离 v 最近的采样视点位置 v_i , 并将该点的特征线渲染图进行 $R(u_i, u)$ 的二维

旋转, 其中 $R(u_i, u)$ 为 v_i 的一致相机向上向量 u_i 到 u 的二维旋转矩阵. 通过这样的采样设置方法, 我们减小了系统的信息存储量以及搜索空间, 使得可以高效的进行视点相关的形状检索.

3.4.3 检索引擎

系统的检索引擎是基于二维图像库中的图片块编码进行的.

描述符. 对于每一张特征线渲染图, 我们将其分解为重叠覆盖率为50%的 $9 \times 9 = 81$ 个图像块. 因此每一个图像块的分辨率为 60×60 像素. 对于每一个图像块, 我们计算其二进制BiCE描述符^[153]. 该描述符是通过图像中边的位置与方向直方图对图像块进行编码的. 目前采用的描述符参数为18个垂直于边的位置, 6个边切向位置, 以及4个离散边朝向的三维直方图.

Min-hash. 我们采用基于min-hash算法^[154]的倒向文件结构(inverted file structure)作为我们的检索引擎. 为了增大查准率与查全率, 我们采用64个词组(phrase)的min-hash码为所有图像块的BiCE描述符进行编码. 对于每一个新词组(phrase), 我们为其在倒向文件中创建一个新条目(entry)用于存储. 同时我们为114个采样视点创建索引. 因此, 最终的检索空间是由词组(phrase)与视点索引的交集构成的.

3.5 基于草图的形状建模

在建模过程中, 系统依靠构建的数据库与检索引擎对用户的勾画草图实时反馈建模结果.

3.5.1 视点相关的形状检索

给定用户的勾画草图 \mathcal{K} , 以及其对应的视点位置 v 和向上向量 u , 系统反馈前 N 张匹配图片 $\{I_i\}_{i=1}^N$ 以及它们所对应的候选形状部件 $\{P_j\}$.

向上方向对齐. 由于特征线渲染图是基于采样点的一致相机向上抽取的. 我们首先依照3.4.2节描述的方法将用户草图 \mathcal{K} 与视点位置 v 所对应的一致相机向上方向对齐. 由此得到矫正后的用户草图 $\mathcal{K}^* = R(u, u^*)\mathcal{K}$ (见图3.6(b)).

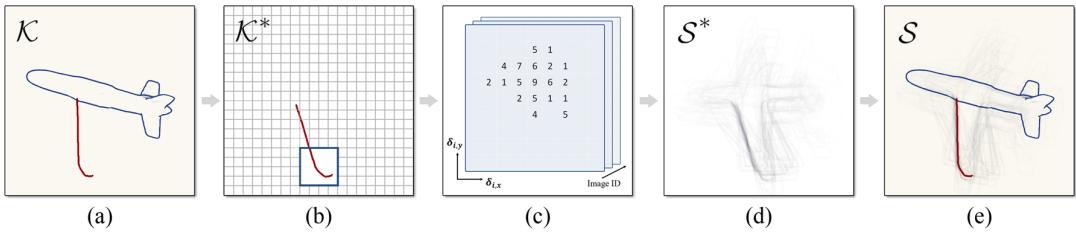


图 3.6 视点相关的形状检索及阴影引导图合成. 首先, 将用户草图 \mathcal{K} (a)与视点位置 v 下的一致向上向量 u^* 进行对齐得到矫正后的用户草图 \mathcal{K}^* (b); 然后使用三维投票直方图进行检索(c)并合成向上向量为 u^* 的阴影图 \mathcal{S}^* (d); 最后, 得到用户视点下的阴影引导图 \mathcal{S} 并显示在用户草图下方(e).

候选图片检索. 随后, 我们将矫正后的用户草图 \mathcal{K}^* 连同它的视点位置 v 作为查询项进行检索, 得到按照匹配程度降序排列的候选特征线渲染图列表 $\{I_i\}$. 由于我们将利用 $\{I_i\}$ 合成阴影引导图, 我们采用如下的方法计算得到一系列三元组 $\{(I_i, s_i, \delta_i)\}_{i=1}^N$, 其中 I_i 是候选特征线渲染图, s_i 是对应的匹配得分, δ_i 是 \mathcal{K}^* 与 I_i 之间的偏移量.

给定 \mathcal{K}^* , 我们首先计算其图像块的BiCE描述符. 为了增强平移不变性, 我们将图片分解为重叠覆盖率为75%的 17×17 个图像块. 给定用户视点位置 v , 我们选取 K 个最近的采样视点位置 $\{v_j\}_{j=1}^{j=K} (\subset \{v_i\}_{i=1}^{i=N})$ 作为查询视点位置.

利用逆向查询表, 我们在二维图像库中通过匹配 \mathcal{K}^* 的每一个词组(phrase)以及 $\{v_j\}_{j=1}^{j=K}$ 进行检索. 在检索过程中, 我们在三维投票直方图中累计相似图像块个数并估计 \mathcal{K}^* 与 I_i 间的偏移量(见图3.6(c)).

三维投票直方图的尺寸为 $m \times n \times n$, 其中 m 为二维图像库中视点位置为 $\{v_j\}$ 的所有特征线渲染图个数, n 表示系统在对 \mathcal{K}^* 在 x 和 y 方向所允许的最大偏移量. 候选图像 I_i 的匹配得分 s_i 为对应的2D直方图中的最大值. 同时, 偏移量 δ_i 通过计算直方图最大值与中间值的偏移量而得. 通过以上方法计算, 我们可以高效的得到 $\{I_i\}$. 由于用户的交互笔刷通常是缓慢连续移动的, 因此在每一个时间步长中, 系统只需要更新直方图中部分投票值即可. 目前, 系统设置 $K = 6$ 个采样视角返回 $N = 100$ 张候选图片, 3D直方图中的 n 设为9.

候选部件排序. 基于三元组 $\{(I_i, h_i, \delta_i)\}$, 我们可以得到候选形状部件及对应的排序等级 $\{(P_j, r_j)\}$. 我们将候选图 $\{I_i\}$ 对应的形状部件集合定义为 $\{P_j\}$. 由于可能存在多张

候选图对应于同一形状部件的情形, 形状部件的数量通常小于 N . 我们定义每个形状部件的排序等级为

$$r_j = \frac{\sum_i \kappa(I_i, P_j) h_i w_i}{\sum_i h_i w_i}, \quad (3.1)$$

其中, $\kappa(I_i, P_j)$ 为 I_i 与 P_j 之间的对应关系. 如果 P_j 是 I_i 对应的形状部件, 则 $\kappa(I_i, P_j) = 1$, 否则为 0. 我们定义 w_i 为权值图 W_i 中非 0 像素的平均值, 其中 W_i 将在 3.5.2 节中加以介绍. W_i 度量了候选图像 I_i 与 \mathcal{K}^* 之间的全局相似性. 依照候选形状部件排序等级的降序排列, 系统将所有候选部件 $\{P_j\}$ 显示于形状部件推荐列表中(见图3.2).

3.5.2 阴影引导图合成

基于图像检索结果 $\{(I_i, s_i, \delta_i)\}_{i=1}^N$, 我们在本小节合成阴影引导图 \mathcal{S} , 见图3.6(d-e). **阴影引导图的合成.** 首先, 我们基于近似的偏移量 $\{\delta_i\}$ 修正候选特征线渲染图 $\{I_i\}$ 与对应的用户草图 \mathcal{K}^* 间的对齐. 与文献 [149]类似, 我们使用 Generated Hough 变换对 $\{\delta_i\}$ 进行修正, 并得到一组新的对齐图像 $\{\tilde{I}_i\}$ 及相应的修正偏移量 $\{\tilde{\delta}_i\}$.

为了充分发挥阴影引导图的引导作用, 我们希望阴影引导图能够清晰的显示 \tilde{I}_i 与 \mathcal{K}^* 匹配度较高的区域并淡化匹配度较低的区域, 因此我们计算每一张修正候选图 \tilde{I}_i 的权值图 W_i :

$$W_i = \frac{s_i V_i}{\sum_j s_j V_j}, \quad (3.2)$$

其中, s_i 为 I_i 的匹配得分, V_i 为文献[149](式8)中的空间位置变化匹配项.

随后系统通过插值 $\{\tilde{I}_i\}$ 与对应的 $\{W_i\}$ 得到一致向上方向的阴影引导图 \mathcal{S}^* :

$$\mathcal{S}^* = \alpha \sum_{i=1}^N W_i \tilde{I}_i, \quad (3.3)$$

其中, α 用于调节阴影引导图的整体可见性. 由于 \mathcal{S}^* 相机向上方向为 v 的一致向上方向 u^* , 而非用户的向上方向 u , 因此最后我们还需将 \mathcal{S}^* 进行旋转, 得到与用户观察方向一致的阴影引导图 $\mathcal{S} = R(u^*, u)\mathcal{S}^*$.

基于层次的引导. 为了增强低层次形状部件在阴影引导图中的显示, 我们还通过显示原始模型的外形以增强对外形的预测和引导. 我们利用预先分析的模型对称性与层次结构, 显示其位于同层次的对称部件以及其相邻部件的外形阴影(见图3.1(a-e)). 我

们通过添加对应的阴影项对式3.3进行改写,

$$\mathcal{S}^* = \alpha \sum_{i=1}^N W_i \tilde{I}_i + \mathcal{S}_{sym}^* + \mathcal{S}_{adj}^*, \quad (3.4)$$

其中, $\mathcal{S}_{sym}^* = \beta \sum_j \tilde{I}_{sym}^j$ 与 $\mathcal{S}_{adj}^* = \gamma \sum_k \tilde{I}_{adj}^k$ 分别为对称部件与相邻部件的阴影. $\{\tilde{I}_{sym}^j\}$ 为与 $\{I_i\}$ 位于同一视角的对称部件特征线渲染图, 并且这些图像经过了与 $\{\tilde{I}_i\}$ 一致的偏移量 $\{\tilde{\delta}_i\}$ 纠正. $\{\tilde{I}_{adj}^k\}$ 也进行了类似处理. 在实际操作中, 我们设置 $\beta = \frac{\alpha}{2}$, $\gamma = \frac{\alpha}{4}$, 以及 $\alpha = 1.0$.

3.5.3 三维形状部件拼接

当用户希望将检索得到的形状部件 P_{new} (默认为候选部件中相似度最高的部件, 用户也可从形状部件推荐列表中直接选取部件)加入到当前已创建的三维模型 $\{P_s\}$ 中, 系统将自动对 P_{new} 的尺寸进行调整, 使得其贴合用户草图 \mathcal{K} . 然后我们考虑部件放置与拼接中的三个问题: 如何获取与部件 P_{new} 进行连接的部件 $\{Q_t\} (\subset \{P_s\})$; 如何进行拼接; 如何保持模型原有的结构语义, 尤其是对称性(见图3.7).

首先, 系统通过检测用户草图 \mathcal{K} 是否覆盖已存在的三维模型 $\{P_s\}$ 来获取 $\{Q_t\}$. 此外, 我们还从 $\{Q_t\}$ 中靠近用户草图 \mathcal{K} 的部件提取模型中的卯点 $\{m_\alpha\}$. 然后我们建立 P_{new} 与 $\{Q_t\}$ 之间接触点 $\{t_\beta\}$ 与 $\{m_\alpha\}$ 的联系. 我们采用贪婪搜索的方式进行匹配. 系统每一次选取最近的接触点对 (m_α, t_β) 直到没有接触点对剩余为止. 我们计算每一对接触点间的变换矩阵, 并将它们进行混合以得到最终的变换矩阵. 在最后, 我们采

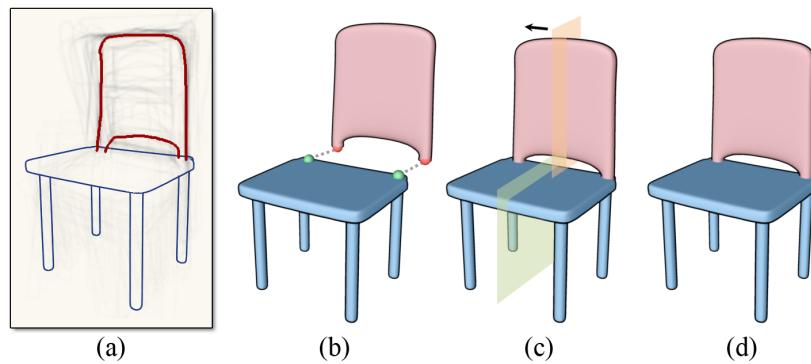


图 3.7 三维形状部件拼接. (a) 用户草图; (b) 建立已创建模型(蓝色)与新部件(红色)间的连接关系; (c) 通过对齐新部件与已创建模型的对称平面修正对齐; (d) 拼接结果.

用弹簧质量系统^[90]校准拼接. 为了保持模型的原有对称性, 我们同时考虑模型整体对称和内部部件间的对称. 一些相邻的部件(例如座椅的靠背与坐凳)都是自身对称的并且他们共享对称平面. 我们首先将 P_{new} 的对称平面与其他部件的对称平面对齐. 对于 P_{new} 存在部件间对称的情形(如飞机机翼), 一旦 P_{new} 加入原有模型, 我们自动从三维形状部件库中获取对称部件并对称的安置于模型上.

3.5.4 三维形状变化

用户还可以通过简单的草图勾画对生成的模型进行变形和编辑.

全局调整.当用户通过勾画草图不能得到满意的形状部件时, 系统会自动将最相近的模型部件的轮廓通过变形以贴近用户的草图(见图3.8(a)). 首先, 用户从推荐面板中选取与用户草图 \mathcal{K} 最相近的部件加入画布中. 然后系统为其自动嵌套具有控制顶点的有向包围盒, 并计算控制顶点与用户笔画之间的对应. 最后利用均值坐标(mean value coordinates)^[155]对模型部件进行变形.

局部编辑.此外, 系统还为用户提供了基于勾画的局部形状编辑工具(见图3.8(b)). 系统自动抽取用于模型非真实感渲染的特征线, 并将其修补为连续曲线. 随后系统建立其与用户笔画之间的对应. 我们采用改进的Laplacian网格编辑技术^[18]对形状部件进行局部编辑.

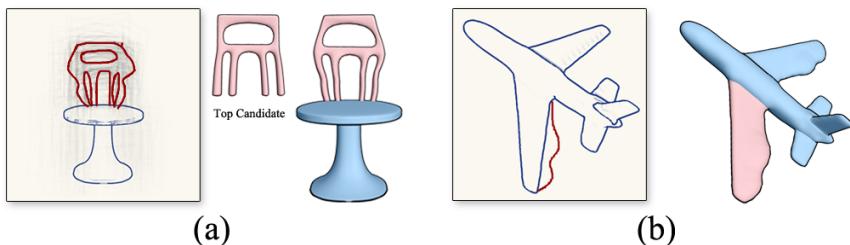


图 3.8 使用系统增强三维形状变化. (a)用户勾画椅背草图, 候选部件的轮廓通过变形以贴合用户草图. (b)用户通过勾画对飞机左侧机翼进行局部编辑, 对称编辑结果自动应用于右机翼.

3.6 实验结果

本节将展示语义引导的草图勾画式形状建模结果。本节所展示的所有实验都是在Intel i5双核处理器及4G内存的个人计算机上进行的。

数据集。为了验证系统的可靠性，我们构建了一个包含5类249个模型的数据库，三维模型数据来源于Princeton Shape Benchmark(PSB)^[156], COSEG^[70]及文献 [68]。5类模型包括花瓶与茶壶(52个)、飞机与鸟(62个)、桌子(40个)、座椅(75个)和自行车(20个)。每一类模型都由相似的三维形状组成。我们按照3.4节描述的方法构建三维形状部件库及二维图像库。其中我们对来自于PSB的同类模型采用文献 [70]的方法进行联合分割，我们直接采用了文献 [68, 70]所提供的联合分割结果。对于模型中的分割与标记错误(少于8%)，我们进行了手工修正。构建三维形状部件库总共耗时4小时，相对应的二维图像库用时半小时。

实验结果。图3.1展示了完整创建座椅模型的例子。当用户在不同视角下绘制草图时，系统可以在用户画笔下动态提供阴影引导图以引导用户进一步的交互。同时考虑用户当前画笔与模型结构的先验知识(见图3.1(a-c))，系统可以为用户提供层次化的阴影引导图。例如，当用户勾画坐凳时，椅背和椅腿的阴影也会被显示出来。当用户绘制细节部件时，例如座椅扶手，阴影则集中于当前用户画笔周围。这种基于层次结构的阴影引导可以帮助用户在建模初期认识与理解模型总体结构，而不是过度关注于细节。此外，用户通过在座椅扶手轮廓线附近进行额外的勾画对原始模型进行编辑，得到了一个定制模型。

图3.9展示了用户创建的自行车模型集。其中红色自行车的构建过程在图3.9上方得以展示。图3.12展示了用户自由创建的模型。从创建结果中可以看出，用户创建的模型样式丰富，系统能够较好的反应用户的建模意图。

3.6.1 用户测评

为了验证系统的可靠性与有效性，我们进行了四项用户测评：参考引导建模、自由建模、阴影引导建模及其他系统比较。我们招募了19位大学生(8女, 11男)进行实验，其中8名学生具有使用商业软件进行3D建模的经历。11位参与者具有计算机图



图 3.9 用户使用系统创建的模型. 下图为用户使用系统创建的自行车模型. 上图为红色自行车的创建过程.

形学背景, 其他的参与者对3D建模不熟悉但表示感兴趣. 在实验开始前, 每位参与者有15分钟的时间了解系统使用方法. 在测评的最后, 所有参与者被要求填写一份简单的问卷. 在实验过程中, 我们详细记录了用户的交互操作(勾画与擦除)以及在每一项任务上的耗时.

测评 I: 参考引导建模. 该实验的目的是评估系统的可靠性. 我们通过提供由专业人士使用本系统设计的模型作为参考模型(花瓶、飞机、桌子和座椅), 要求参与者使用本系统尽可能相似的重建参考模型. 在他们完成建模任务后, 参与者对建模结果进行交叉评分. 图3.10展示了每类模型评分前三的模型. 可以发现, 参与者可以使用我们的系统近乎一致的重建模型. 其中, 花瓶类的差异比其他模型类大, 这是由于参考模型中的花瓶手柄是通过编辑而得, 数据库中本没有完全一致的部件.

测评 II: 自由建模. 该测评的目的是了解用户自由设计模型时系统的有效性. 通过给定模型类型的名称, 参与者被要求创建相关模型. 图3.12展示了用户创建的不同类型模型. 我们注意到, 用户通过混合来自不同模型类型的部件以及加入模型编辑创造出了变化丰富的模型.

测评 III: 阴影引导建模. 给定两个参考模型(飞机与自行车), 我们要求用户分别使用和不使用阴影图引导重建参考模型. 为了消除学习因素, 用户被要求随机的完成4个

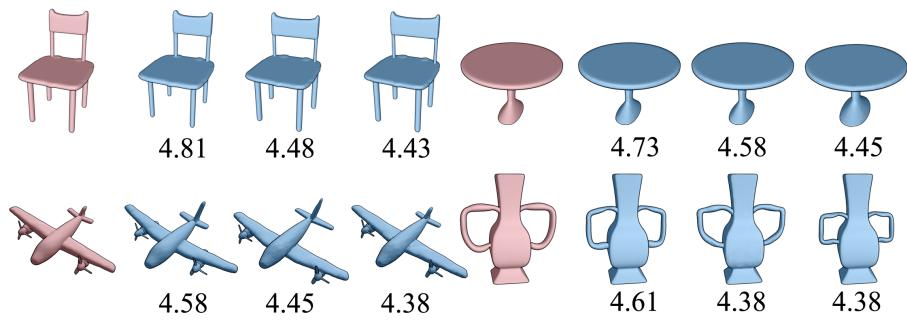


图 3.10 用户测评I每类模型中排名前三的模型. 红色模型为参考模型. 用户创建的模型(蓝色)按照相似度评分降序排列(1代表完全不同, 5代表完全一致), 每个模型的平均得分显示于模型下方.

子任务. 图3.11左图展示了每个任务的平均用时, 右图展示了平均使用擦除功能的次数. 我们发现, 阴影引导图帮助参与者准确高效的表达其绘画意图. 这一点也通过问卷调查得以证实, 用户对于阴影引导图的作用给出了3.7的均分. 参与者反应, 阴影引导图帮助他们在正确的位置以合适的尺度绘制模型形状.

测评 IV: 与Sketch-to-Design系统比较. 最近, Xie等人提出了一款名为*Sketch-to-design*^[89]的草图勾画式交互建模工具. 他们通过对用户的勾画进行分析, 反馈基于内容的建模辅助信息. 随后用户通过替换参考模型的模型部件进行建模. 我们与该系统进行了比较. 由于*Sketch-to-design*的座椅数据库非常小, 不适合我们的系统, 因此我们进行了一项简单的主观比较. 在比较过程中, 每位参与者被要求分别使用两个系统创建座椅模型. 然后回答以下三个问题:

问题一 您认为哪个系统更容易使用?

问题二 您认为哪种建议方式更直观?

问题三 您更喜欢哪个系统?

从参与者的反馈, 我们发现参与者对两个系统的评价基本相当. 但是, 我们的系统提供更直观的交互并且允许用户进行模型编辑. 对于问题一, 大约有42%的参与者认为我们的系统比*Sketch-to-design*容易使用; 此外, 大约57%的参与者认为阴影引导图的提示方式非常直观; 对于问题三, 大约52%的用户偏爱我们的系统.

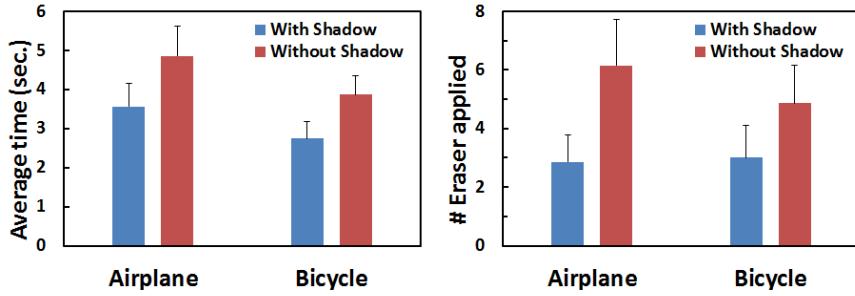


图 3.11 用户测评III统计数据. 左图为用户完成每个任务的平均时间. 右图为用户进行擦除操作的平均次数.

数据统计 表3.1展示了建模过程中系统各部分对于每个模型类的平均响应时间. 由于我们采用了min-hash技术以及倒向文件结构作为系统的检索引擎, 因此系统的检索响应时间与数据库的大小无关, 而与数据库中三维形状的几何差异性有关. 三维形状部件库的几何差异越小, 特征线渲染图块中共享的词组(phrase)就越多, 则搜索空间越稠密, 用时越长. 阴影合成时间与检索阶段估计的初始偏移量有关. 由于飞机模型类中机翼与机尾的变化较多, 因此需要较多的时间用于合成阴影引导图.

总体而言, 参与者在测评I中平均3分钟创建一个模型, 在研究II中平均4.5分钟创造一个模型. 可以看出参与者使用较短时间就可以创造模型, 由此表明系统易于用户使用. 这一点也在调查问卷中得到证实, 大约89%的参与者认为系统易于使用, 并且94%的参与者认为我们的用户界面非常直观. 总体而言, 参与者认为阴影引导图在交互式建模过程中是一种有意义的引导方式. 他们对阴影引导图的质量给出了3.6的平均分(1分为非常差, 5分为非常好). 89%的参与者表示喜欢我们的系统, 其余参与者认为阴影引导图有用但仍然希望通过从无到有的方式创建模型, 而不是通过组装形状部件的方式生成模型.

3.6.2 算法局限性

我们的系统存在一定局限性. 首先, 模型的多样性有限. 为了增强模型的变化, 可以引入其他基于勾画的形状编辑工具. 但是作为基于数据库的三维模型建模工具, 当用户的设计意图与数据库中现有模型部件差异非常大时, 仍然面临着问题, 对数据库进行扩充是一种可行的选择. 其次, 我们的系统主要关注于快速直观的表达用户设计

Database	#Models	#Parts	T_R	T_S	T_C
Chairs	75	485	110	86	22
Tables	40	185	139	93	33
Airplanes+Birds	62	271	76	105	38
Vases+Teapots	52	170	129	62	15
Bicycles	20	86	83	83	17

表 3.1 针对不同模型集, 算法各阶段运行时间(单位:毫秒). T_R , T_S 及 T_C 分别代表视点相关的三维部件检索、阴影引导图合成及三维形状部件拼接的平均用时.

意图. 我们通过接触点的匹配设计简化了形状部件放置问题, 但是这种方法减小了部件放置的自由度. 再次, 系统依赖于离线数据库的构造. 总体上, 我们的预处理环节是自动的. 但是对于不满足要求的结果, 例如错误的分割结果, 我们仍然需要通过手工修正. 可以预见, 对于规模特别大或者带有特别多变化的三维形状库, 需要在预处理环节加入更多的人工干预. 这个问题可以通过引入更加成熟的三维形状分析技术得以克服, 例如文献[68].

3.7 本章小结

本章中, 我们提出了一种协助新手用户简单快速创建三维模型的基于草图勾画式的三维形状建模系统. 我们的系统为用户提供了可视化的阴影引导, 协助用户表达设计意图. 系统通过基于视点相关的三维形状检索技术以及语义引导的阴影合成技术实现阴影引导, 为用户提供帮助. 此外, 系统在建模过程中保留了模型原有的高层次结构语义特征, 以及允许用户进行后期编辑以丰富模型多样性. 通过用户测评, 我们初步验证了系统的可靠性和有效性.

对于未来工作, 我们将致力于寻找更加高效智能的建模提示方式. 尽管目前的阴影引导图可以为用户动态提供引导, 但是它仅依赖于检索而得的特征线渲染图. 一个可能的研究方向是在阴影引导时加入其他信息, 例如数据集的先验信息和部件的功能信息等.

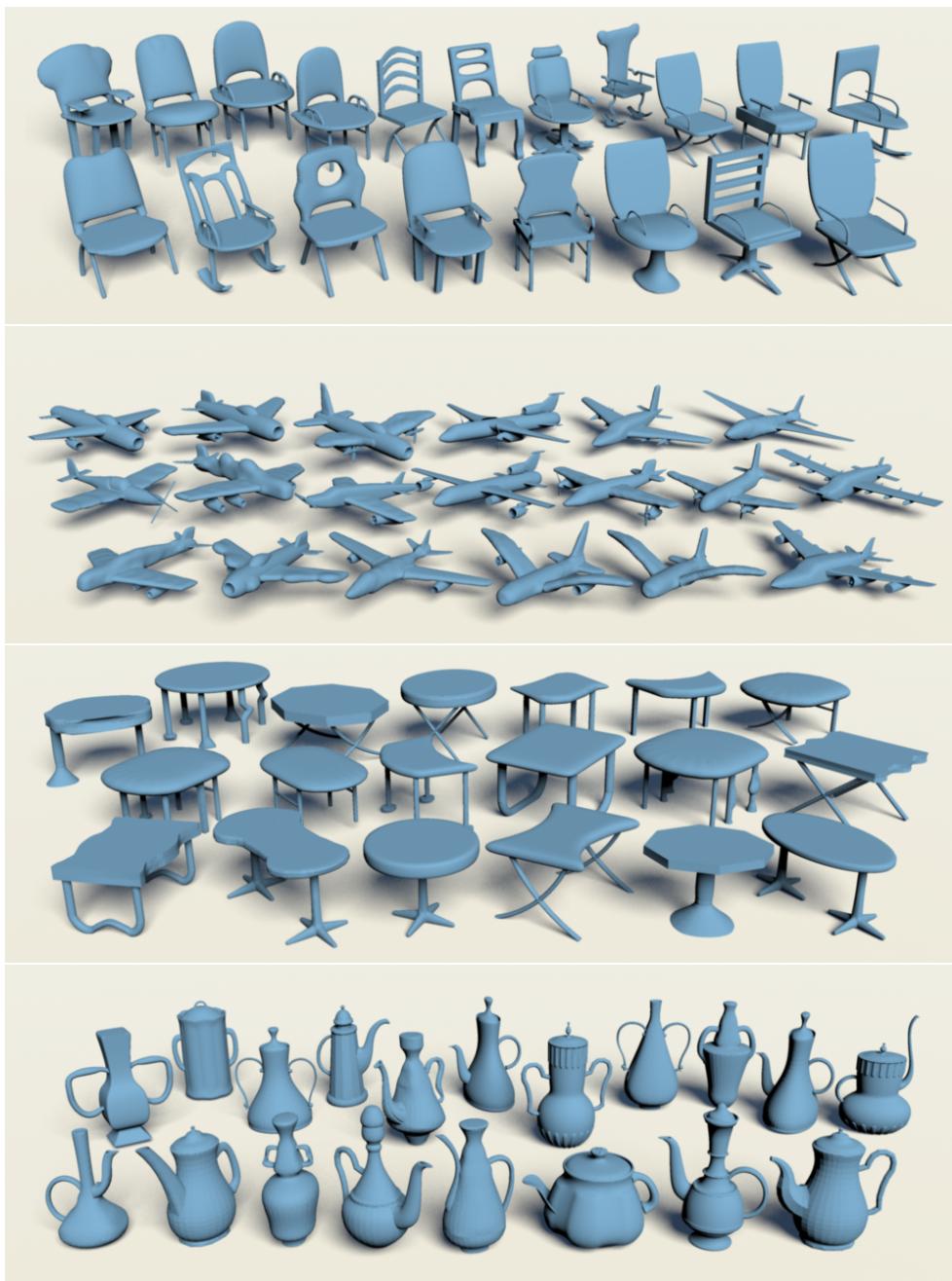


图 3.12 用户使用系统创建的三维模型.

第4章 语义引导的建筑外立面结构修复*

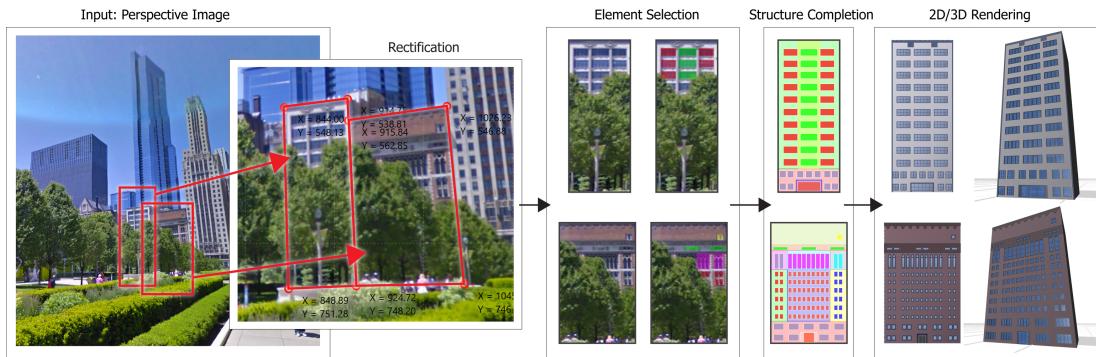


图 4.1 从单张图片开始, 用户通过交互工具在已矫正的图像上选取建筑物并标定可见的建筑元素(窗户、门和装饰物等). 我们的结构修复算法可以修复布局中遗失的部分. 右侧分别展示了外立面修复后的二维和三维渲染效果.

4.1 引言

当用户在感叹Google Maps给日常生活带来的便利时, 人类所生活的城市正在被高度数字化. 随之而来的大量数字城市应用正在改变人类日常的生活和出行习惯, 例如三维电子地图、车载导航、数字城市模拟等. 随着数字城市技术的蓬勃发展, 城市重建(urban reconstruction)已成为三维建模领域的又一研究热点. 建筑外立面建模(facade modeling)是城市重建领域的重要研究课题之一. 在建筑外立面建模过程中通常非常难以在一张图片中捕捉完整的建筑外立面, 大多数的外立面都受到了来自其他建筑物或植物的遮挡, 如图4.1所示. 目前在Google Street-View或Flickr中存在着大量不完整的外立面图片, 并且通过这些不完整外立面图片构建完整外立面模型, 在实际应用中存在着巨大需求.

建筑外立面是一种具有丰富结构和功能语义信息的数据. 建筑师在设计建筑外立面时通常要考虑包括建筑结构、采光通风、风格样式和建筑美学在内的多种因

*本章内容已投稿: Structure Completion for Grid Layouts, submitted.

素. 此外, 建筑外立面通常具有许多重复的元素, 例如窗户、阳台及装饰物等. 这些信息都带有极强的结构特性. 虽然对不完整的建筑外立面恢复工作可以看作是图像修复的一种拓展, 但是由于传统图像修复关注于利用局部信息修复图像中的划痕等小块信息丢失区域, 而建筑外立面修复通常面对较大的信息丢失问题. 因此传统图像修复方法并不适合. 考虑到建筑物具有丰富的结构和功能语义特征, 对于建筑物外立面的修复可以从语义角度理解, 从结构修复处下手. 但是, 基于结构修复的方式面临两大挑战: 第一, 由于外立面信息丢失较大, 合理的外立面解空间非常大; 第二, 恢复过程中需要对建筑元素的数量与位置进行估计, 估计结果又会影响外立面结构.

本章介绍了一种数据驱动的基于概率图模型的外立面结构化修复方法. 基于外立面中重复元素通常以网格状结构排列的观察(见图4.2), 我们提出了一种基于建筑元素网格布局的修复方法. 为了解决修复结果的不确定性, 我们基于数据库分析结构布局的概率分布, 选择概率较大的网格布局. 接着通过概率模型的辅助恢复建筑的外观, 即建筑元素的种类、数量和位置.

本章内容安排如下: 4.2节介绍建筑外立面修复的相关工作, 针对具体研究问题对1.2.3节进行补充; 4.3节对用户交互、算法流程、基本定义和数据库进行介绍; 4.4节介绍基于贝叶斯网络的网格布局属性估计; 4.5节介绍基于因子图模型的网格布局优化; 在结构修复的基础上, 4.6节介绍外立面的结构化外观修复方法; 4.7节展示外立面结构化修复结果和用户测评结果, 并对算法结果进行讨论与分析; 4.8节, 我们将对语义引导的建筑外立面结构修复方法进行小结.

4.2 相关工作

数字城市的蓬勃发展推动了城市重建研究. 研究领域涉及图像处理、计算机图形学、计算视觉等, 研究内容包括输入数据处理、建筑建模与处理、外立面建模与分析和城市处理与分析等. 文献 [101, 102]对城市重建领域的工作及方法进行了详细回顾.

建筑外立面建模与处理涉及对外立面结构的理解与分析和外立面建模的方法等内容. 在本文1.2.3节对相关工作已经做了较为全面的回顾, 此处不再赘述. 从图像处理的角度理解, 建筑外立面结构恢复是基于结构的图像恢复研究的拓展. 研究内容与

分析方法限制于建筑外立面,需要更多的考虑建筑外立面的结构和功能语义信息等.事实上,在图像处理领域存在大量丰富的研究工作围绕基于结构的图像修复展开,在此对相关内容进行回顾.

基于结构的图像修复.最早的图像修复工作由Bertalmio等人^[157]于2000年提出,他们的方法将保持图像的光滑性作为重要的修复准则用以修复图像中的小划痕.随着数字图像研究的不断深入,众多研究者关注于图像修复(image inpainting, image completion)、纹理修复(texture inpainting)等研究领域,同时涌现了大量研究成果.文献[158, 159]对其进行了详细综述.近些年来,不少研究者开始关注于通过对可见部分进行结构化的分析以辅助图像修复. Sun等人^[160]介绍了一种结构引导的图像修复方法.该方法借鉴了传统基于样例的图像修复方法,通过用户在未知区域勾画结构引导线辅助算法进行结构化修复. He等人^[161]受建筑外立面重复性结构的启发提出了一种新颖的修复方法.该方法通过分析图像可见部分中图像块偏移量的显著性,对图像重复规律加以理解,再通过shifted image^[162]优化方法对图像进行修复. Korah等人^[163]通过在外立面图像上建立近乎规则的纹理模型(Near Regular Texture)对外立面图像进行修复.最近Dai等人^[130]提出了一种通过分析外立面纹理间结构约束并利用遗传算法合成新外立面纹理的方法.该方法可以较好的生成外立面图像.但是该方法仍然遗留了重要的问题,即如何联合分析建筑元素的位置与属性,以及如何修复信息大量缺失的建筑外立面.

4.3 算法概述

4.3.1 定义

我们将二维区域 Ω 中形状的集合 $\{S_i\}$ 称为一个布局(layout),其中 Ω 是多边形,通常为矩形.形状 S_i 的位置通常由其中心位置 Pos_i 给出.此外,形状 S_i 的高与宽分别为 h_i 和 w_i .对于一个非矩形形状,高和宽分别与其包围盒的高和宽相对应.每一个形状 S_i 还带有标签 L_i 及外观属性,例如颜色、材质和深度等.

一个网格布局是指通过一系列网格进行组织的形状(见图4.2(a)). Zhang等人在文献[117]中也提出了类似的结构.一个网格 g 通过其包围盒($g.width$ 与 $g.height$),网

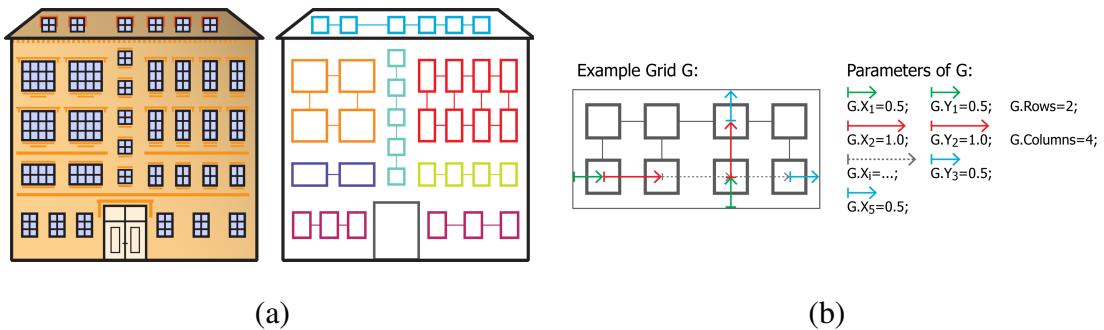


图 4.2 建筑外立面布局定义. (a) 一个布局由一组元素的集合组成, 每个元素包含位置、包围盒以及外观属性等信息. 对于外立面布局, 元素通常由一组网格组织. (b) 网格中的重要参数.

格的行列数($g.rows$, $g.columns$), 网格左下角在区域中的位置($g.position$), 以及行列向量($g.x_i$ and $g.y_j$)来定义(见图4.2(b)). 在建筑外立面中, 我们通常称形状为建筑元素. 一个建筑外立面 F 由一个网格布局组成 $G = \{g_i\}_{i=1}^n, i = 1, 2, \dots, n$, 其中 n 为网格的数量. 我们定义可见的建筑元素集合为 $\{e_i\}$.

4.3.2 用戶交互

本章提出的算法在数据与处理阶段需要用户对需要修复的外立面图像进行交互操作,如图4.1.首先,用户需要通过选择框工具选择需要修复的建筑外立面.程序自动对外立面进行矫正.接着,用户需要再次利用选择框工具标定建筑元素,并对每一类元素赋予一个独立标签.至此,用户交互工作全部完成.对于一张中等复杂度的外立面图像,用户通常在5分钟内可以完成所有交互操作.

4.3.3 算法流程

给定带有标注信息的不完整外立面布局，我们通过以下3个步骤对其进行修复：

第一步 利用贝叶斯网络(Bayesian network)模型估计外立面的高级属性信息,例如对称性、门的位置及网格结构特征等([4.4节](#)).

第二步 利用因子图(factor graph)模型估计和优化外立面网格结构的几何布局. 外立面由一系列的矩形框进行表示, 所有位于矩形框内的建筑元素都通过网格结构进行排布([4.5](#)节).

第三步 再次利用因子图模型估计外立面外观细节, 例如建筑元素的个数、对齐方式、大小以及元素类型等(4.6节).

4.3.4 建筑外立面数据库

我们构造了一个包含100张建筑外立面图片的数据库, 图片来自于我们自己的收集以及其他文献^[117, 125, 136]中的图片. 数据库中的所有图片都是完整未遮挡的建筑外立面, 这些图片将被用于外立面结构学习与算法评估. 在数据库的创建过程中, 我们对图片进行了手工分割与处理, 其他自动分割算法也可以采用.

4.4 基于贝叶斯网络的网格布局估计

我们首先采用贝叶斯网络估计外立面网格布局的属性. 贝叶斯网络最近被广泛应用于楼层布局建模^[164]和数据驱动的三维模型合成^[86, 165]等. 与我们的工作相比, 之前的工作可以通过抽象显著的语义信息(例如, 厨房、客厅、四肢及躯干等)构建模型, 但是建筑外立面并不具有这样的显著信息. 因此, 我们面临的首要挑战就是如何利用网格布局抽象表达外立面的结构信息. 我们首先对数据库中的外立面进行网格布局标定, 并且利用高斯混合模型估计网格长宽的分布.

在贝叶斯网络中, 我们定义了建筑外立面的如下两类随机变量(属性):

- 全局属性: 高度类型($\text{height type} \in \{\text{low-rise (1-5 floors), mid-rise (6-9 floors), high-rise (10+)\}\}$), 楼层数(#floors), 高宽比(aspect ratio), 元素数量(#elements), 主门位置(main door position), 对称性(symmetry(yes or no)).
- 网格结构属性: 左侧网格存在性(left grid exists), 右侧网格存在性(right grid exists), 顶部网格存在性(top grid exists), 底部网格存在性(bottom grid exists), 其他网格存在性(other grids exist), 额外网格数量(#additional grids (in addition to left, right, bottom, top)).

如何学习贝叶斯网络? 给定一组随机变量和一个训练集, 我们需要学习网络结构(变量是否出现及有向边)以及其参数(条件概率分布). 我们的目的是基于随机变量构建

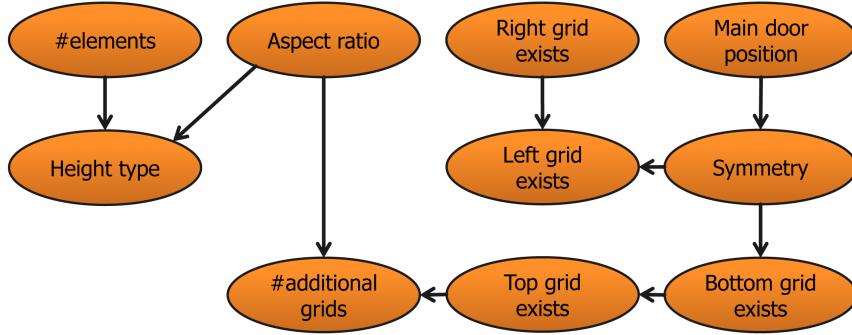


图 4.3 由外立面数据库学习而得的贝叶斯网络. 椭圆代表节点, 网络结构通过有向边表示.

贝叶斯网络, 使得其在给定训练数据情况下极大化网络结构的后验分布. 我们通过两个步骤学习贝叶斯网络. 首先, 我们采用贪婪的等价搜索方法(Greedy Equivalent Search, GES)^[166]计算网络结构. 在学习过程中, 我们首先构造一个空图, 再通过添加有向边使得模型的信息量达到最大, 最后再去除不相关的边. 在实际操作中, 我们采用贝叶斯信息准则(Bayesian information criterion)计算信息量. 随后, 我们采用MAP方法直接估计贝叶斯网络参数. 图4.3展示了我们通过数据库学习而得的贝叶斯网络.

在构造贝叶斯网络时, 最重要的是选择有意义的随机变量. 我们尝试了多种随机变量及其组合. 例如, 其他门是否存在、门的数量、商店是否存在以及网格数量等.

如何处理一个新网格布局? 我们假设输入布局(layout)的可见形状(observed shape)为矩形. 此外, 可见形状依据其标签进行分类, 相同标签的可见形状属于同一个网格. 为了推断布局的语义属性信息, 我们首先依据可见数据计算可见随机变量的值, 例如高宽比, 主门的位置等. 同时用户也可以通过指定贝叶斯网络中随机变量的方法加入先验信息以控制输出.

如何对贝叶斯网络采样? 我们采用两种方法采样贝叶斯网络中的潜在变量值. 其一, 我们可以采用Junction Tree算法^[167]通过极大化贝叶斯网络的联合分布得到随机变量的值. 其二, 我们可以采用拒绝采样算法对学习的贝叶斯网络进行采样. 通过第一种方法, 我们可以得到唯一的随机变量值; 而通过第二种方法, 我们可以采样出大量不同的外立面高级属性.

4.5 基于因子图的网格布局优化

本节中, 我们将通过采样得到的网格布局属性, 利用因子图(factor graph)模型优化网格布局. 我们的输入有外立面 F 大小、可见的建筑元素 $\{e_i\}$, 以及通过贝叶斯网络采样而得的外立面布局高级属性: 主门位置、对称性、左侧网格存在性、右侧网格存在性、顶部网格存在性、底部网格存在性以及额外网格数量. 输出结果为网格布局 G , 特别是网格的数量, 网格的位置、大小. 其余外立面外观细节属性, 如建筑元素的数量、大小和位置将在下一节中给出.

网格布局 G 初始化. 我们通过4步对网格布局 G 进行初始化. 1) 对于可见的建筑元素, 所有相同标签的元素置于一个网格的包围盒中. 2) 对于语义网格, 如果它们存在, 我们设定其大小为任意值. 如果他们覆盖了第1步中的网格, 这两个网格将会合并为1个新网格, 除非这个网格为门网格. 3) 如果贝叶斯网络指出外立面包含有门, 而可见部分不存在门, 则构造一个初始大小的门网格. 4) 随机设置其余网格的大小. 图4.4左图给出了 G 的初始化结果例子. 下面我们将介绍用于生成因子图的一系列网格布局评分函数.

4.5.1 网格布局评分函数

我们共定义了六种评分函数.

语义网格大小. 通过对大量建筑外立面分析, 我们发现语义网格通常是较扁的矩形.

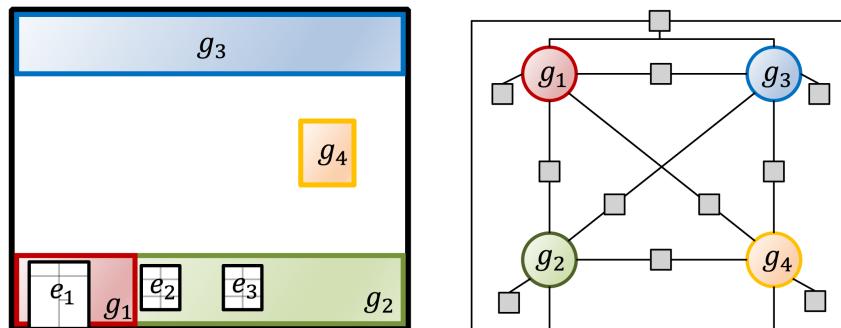


图 4.4 网格布局的因子图模型. 左图: 网格布局初始化举例. 贝叶斯网络决定了顶部、底部语义网格及两个额外网格的存在. 右图: 左图网格布局的因子图表示.

通常在靠近建筑物边界一侧较长,而在另一个方向较短,例如底部网格通常横跨整个外立面,但往往只有一至二层楼高.因此,我们使用高斯混合模型估计语义网格长宽的分布.对于每一个语义网格 g_s ,我们定义评分函数:

$$f_{ss}(g_s) = -\mathcal{L}_w^s(g_s) \cdot \mathcal{L}_h^s(g_s), \quad (4.1)$$

其中, $s \in \{\text{left}, \text{right}, \text{top}, \text{bottom}\}$, $\mathcal{L}_w^s(g_s)$ 为网格 g_s 高度的对数似然, $\mathcal{L}_h^s(g_s)$ 为网格 g_s 长度的对数似然.如果 g_i 不是语义网格,则 $f_{ss}(g_i) = 0$.

可见网格大小.对于每一个绑定可见建筑元素的网格,网格需要尽可能的覆盖所有具有相同标签的建筑元素.我们定义评分函数 f_{os} 对可见网格的大小进行评价:

$$f_{os}(g_o) = -n(g_o) \cdot c \quad (4.2)$$

其中, $n(g_o)$ 是没有被 g_o 覆盖的但具有相同标签的建筑元素个数, c 是一个常数(设置为外立面 F 的面积).如果 g_i 没有绑定任何可见元素,则 $f_{os}(g_i) = 0$.

网格的边界位置.出于美观的考虑,网格包围盒既不能穿越建筑元素也不能与建筑元素距离太近.对于任意网格 g_i 我们定义评分函数 f_b 用于评价网格 g_i 的包围盒与其周边建筑元素的关系:

$$f_b(g_i) = \sum_d f_d(g_i), \quad (4.3)$$

其中, $f_d(g_i)$ 计算网格 g_i 的 d 侧到距其最近元素的贴近程度, $d \in \{\text{bottom}, \text{top}, \text{left}, \text{right}\}$

$$f_d(g_i) = -l_d(g_i) \cdot \left(e^{-\frac{(dist_d^+(g_i)-\mu_d)^2}{\sigma_d^2}} + e^{-\frac{(dist_d^-(g_i)-\mu_d)^2}{\sigma_d^2}} \right), \quad (4.4)$$

其中, $dist_d^+(g_i)$ 和 $dist_d^-(g_i)$ 是网格 d 侧边界距两侧最近元素的距离.如果 $d \in \{\text{left}, \text{right}\}$,则 $\mu_d = \frac{w}{2}$, $\sigma_d = \frac{w}{3}$, $l_d(g_i) = g_i.height$, w 是最近元素宽度;如果 $d \in \{\text{bottom}, \text{top}\}$,则 $\mu_d = \frac{h}{2}$, $\sigma_d = \frac{h}{3}$, $l_d(g_i) = g_i.width$, h 是最近元素高度.

网格间重叠.通常网格 $\{g_i\}_{i=1}^n$ 间的重叠区域非常小.我们基于两个网格间的重叠部分面积定义评分函数:

$$f_{inter}(g_i, g_j) = -A(g_i \cap g_j), \quad (4.5)$$

其中 $i, j = 1, 2, \dots, n$ 且 $i \neq j$, $A(\cdot)$ 为面积算子.

外立面 F 的覆盖程度。完整的外立面 F 应被网格完全覆盖。我们定义覆盖评分函数 f_c 为 F 中未被覆盖区域的面积相反数，

$$f_c(g_1 \cdots g_n) = -A \left(F - \bigcup_{i=1}^n g_i \right). \quad (4.6)$$

镜面对称性。如果通过贝叶斯网络推断外立面 F 是对称的，我们使用对称评分函数 f_{sym} 度量网格布局的对称性：

$$f_{sym}(g_1 \cdots g_n) = - \sum_i \int_0^{g_i.height} \lambda(x_i)(x_i - x_F) dy, \quad (4.7)$$

其中 x_i 与 x_F 分别为网格 g_i 与外立面 F 对称轴的 x 坐标。同时定义 $\lambda(x_i) = |x_i - x_F| + 1.0$ 。

4.5.2 因子图设计

因子图是一个将复杂多变量概率分布分解为一系列因子的概率图模型。在我们的问题中，每一个网格 $g_i, i = 1, 2, \dots, n$ 决定了图模型中一组变量的值，例如网格 g_i 的大小和位置。网格之间的相互关系通过我们定义的评分函数构成因子 \mathcal{F} 。与传统方法类似，我们将评分函数分为三类：单元评分函数，双元评分函数及全局评分函数。每一类评分函数构成一个单独的因子，如图4.4举例。由于因子图与贝叶斯网络采样得到的属性相关，因此不同的外立面通常具有不同的因子图。

单元因子由只含有单个网格的评分函数构成。他们是与网格大小相关的评分函数以及网格边界位置评分函数：

$$\mathcal{F}_{unary}(g_i) = \exp(w_{ss}f_{ss}(g_i) + w_{os}f_{os}(g_i) + w_b f_b). \quad (4.8)$$

双元评分函数由计算网格间重叠的评分函数构成：

$$\mathcal{F}_{binary}(g_i, g_j) = \exp(w_{inter} \sum f_{inter}(g_i, g_j)). \quad (4.9)$$

全局评分函数由覆盖评分函数和对称评分函数组成：

$$\mathcal{F}_{global}(g_1 \cdots g_n) = \exp(w_c f_c(g_1 \cdots g_n) + w_{sym} f_{sym}(g_1 \cdots g_n)). \quad (4.10)$$

综上,由因子图导出的外立面网格布局整体概率分布为

$$p(G|\mathbf{w}) = \frac{1}{Z(F, \mathbf{w})} \prod_{\mathcal{F}} \mathcal{F}(Scope_{\mathcal{F}}(G)), \quad (4.11)$$

其中, $Scope_{\mathcal{F}}$ 表示与因子 \mathcal{F} 相连的随机变量, $Z(F, \mathbf{w})$ 是与外立面相关的归一化函数. 概率分布由通过数据库学习而得的因子权重 \mathbf{w} 参数化.

4.5.3 因子权重学习

因子权重学习问题可以归结为极大似然参数估计问题. 权重的估计在因子图模型使用中发挥着重大作用. 式 4.11 按照权向量 \mathbf{w} 整理, 可以被改写为

$$p(G|F, \mathbf{w}) = \frac{1}{Z(F, \mathbf{w})} \prod_{w \in \mathbf{w}} \exp(w \cdot f_w(G, F)), \quad (4.12)$$

其中 $f_w(G)$ 是所有共享 $w \in \mathbf{w}$ 的评分函数 f 的和函数.

给定数据集, 权重的对数似然函数为

$$\mathcal{L}(\mathbf{w}|\mathcal{D}) = \sum_{(F, G) \in \mathcal{D}} \sum_{w \in \mathbf{w}} w \cdot f_w(G, F) - \ln Z(\mathbf{w}). \quad (4.13)$$

则权向量可以通过极大化对数似然函数得到

$$\mathbf{w}^* = \arg \max \mathcal{L}(\mathbf{w}|\mathcal{D}). \quad (4.14)$$

该问题可以通过梯度上升法求解. 对应权值的偏导数为

$$\nabla_w \mathcal{L}(\mathbf{w}|\mathcal{D}) = \sum_{(F, G) \in \mathcal{D}} f_w(G, F) - \mathbb{E}_{\mathbf{w}}[f_w(G, F)], \quad (4.15)$$

其中 $\mathbb{E}_{\mathbf{w}}$ 是在权 \mathbf{w} 下模型的期望. 由于期望项的计算非常复杂, 我们采用 *Contrastive Divergence*(CD) [168] 对似然梯度进行估计

$$CD_w^k(\mathbf{w}|\mathcal{D}) = \sum_{(F, G) \in \mathcal{D}} f_w(G, F) - f_w(\hat{G}, F), \quad (4.16)$$

其中 \hat{G} 是初始网格布局 G 经由运行 MCMC 链 k 步得到的结果.

为进行权值学习, 我们从数据库中选取了 50 张外立面图片, 人为处理为不完整的外立面并手工标定了标准结果和对应的网格布局. 这些外立面中一半为对称外立面,

其余为非对称外立面. 我们设置 $k = 20$, 并且初始化非负权值为1. 在学习过程中, 我们分别处理包含与不包含对称评分函数的情形.

通过学习, 我们得到了如下结果: 若外立面是对称的, 则对应权值分别为 $w_{ss} = 1.19$, $w_{os} = 1.0$, $w_b = 1.21$, $w_{inter} = 1.24$, $w_c = 1.51$, 以及 $w_{sym} = 2.87$; 若外立面为非对称的, 则对应权值分别为 $w_{ss} = 1.31$, $w_{os} = 1.0$, $w_b = 1.43$, $w_{inter} = 1.73$, 以及 $w_c = 1.82$.

4.5.4 随机采样

我们采用Metropolis-Hastings算法^[169]对由上节因子图定义的密度函数进行采样. 算法每一次迭代生成新的网格布局 G^* , 其接受概率为

$$\alpha(G \rightarrow G^*) = \min \left(1, \frac{p(G^*)q(G|G^*)}{p(G)q(G^*|G)} \right), \quad (4.17)$$

其中, $q(G^*|G)$ 为给定网格布局 G 提议新布局 G^* 的条件概率分布.

提议运动. 为了高效拓展网格布局空间, 我们设计了 G 到 G^* 包含局部和全局调整的提议运动(proposal moves). 基于我们的实验, 我们提出如下运动:

- 随机的滑动网格 g_i 的一条边, 距离为 $d \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2)$.
- 反转网格 g_i 和 g_j 的相邻边, 其中 g_i 与 g_j 都不具有可见建筑元素, 且两者是对齐的.
- 交换相邻对齐的网格组.

为了使得网格是对齐的, 采取类似于文献 [164]中的自动对齐方法. 图4.5给出了提议运动的示例.

我们所提出的提议运动具有对称性, 即 $q(G^*|G) = q(G|G^*)$. 因此接受概率可以表示为

$$\alpha(G \rightarrow G^*) = \min \left(1, \frac{p(G^*)}{p(G)} \right). \quad (4.18)$$

4.6 外立面外观估计

使用上一节计算得到的网格布局, 我们可以通过填充建筑元素恢复完整的建筑外立面. 我们通过两个步骤解决这个问题: 首先求解较重要的建筑元素数量与位置,

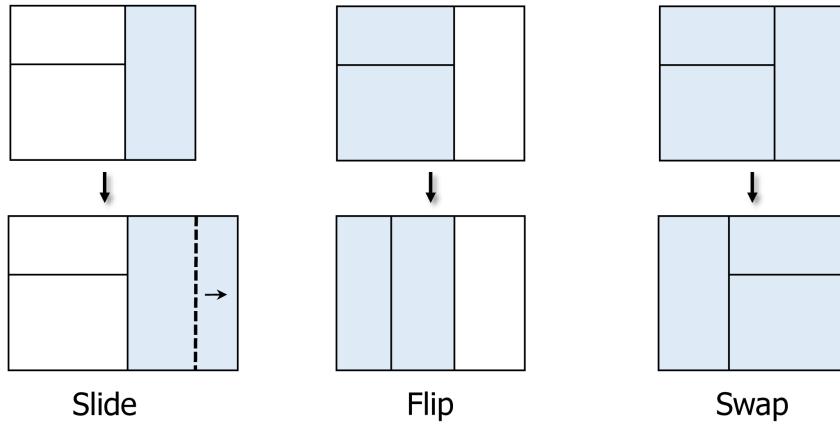


图 4.5 提议运动示例.

接着对每一个外立面元素进行估计, 例如窗户的类型、大小和颜色等. 由于在外立面元素数量未知的情形下直接估计元素位置非常困难. 因此, 我们先分析网格的对齐约束, 再估计元素数量并通过二次优化求解元素位置, 最后通过随机方法估计元素的属性.

4.6.1 建筑元素位置与对齐

我们需要估计每个网格中建筑元素的数量以及网格线的位置. 由此, 我们可以得到每个网格在两个方向的间距向量, 即 $g.x_i$ 和 $g.y_i$. 我们所面临的困难是, 元素的数量、元素在网格内的位置和其余网格的分布三者之间是相关联的. 相较于直接采样网格线位置的方法, 我们首先采样网格间的对齐约束关系. 然后在二次规划过程中, 我们利用这些对齐约束精确求解网格线的位置.

对齐约束. 对于每一对网格, 他们之间存在多种情况的对齐约束. 我们通过一系列方法简化问题. 第一, 我们单独求解网格之间在 x 和 y 方向上的对齐. 第二, 我们只考虑投影重叠的两个网格间的对齐关系. 我们将网格间的对齐约束归结为如下因子图模型. 每一个网格 g_i 都是因子图中的一个节点, 并且他们之间的对齐关系通过因子进行表示(见图4.6). 我们定义两种因子: 双元因子与逻辑因子. 双元因子 $\phi_{binary}(g_i, g_j)$ 描述两个网格对齐的概率. 逻辑因子 $\phi_{logical}(g_1, \dots, g_n)$ 描述网格间对齐的逻辑关系, 当网格间的对齐关系合乎逻辑时为1, 相反为0. 例如, 当 g_1 与 g_2 对齐, 且 g_2 与 g_3 对齐, 如果 g_1 与 g_3 之间存在重叠, 则我们要求两者是对齐的. 于是, 由因子图模型定义的网格

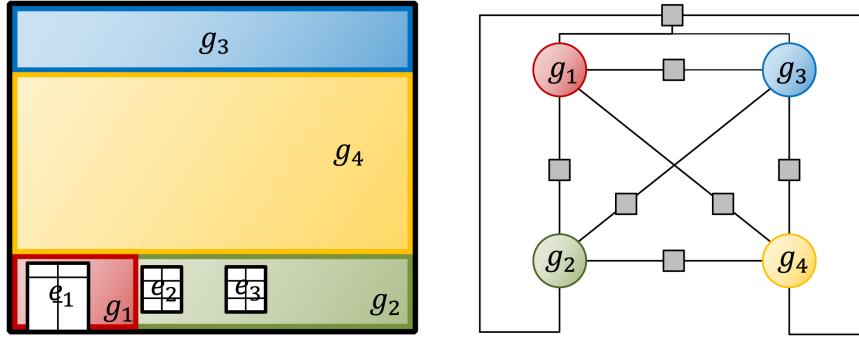


图 4.6 网格对齐约束的因子图模型. 左图: 图4.4的一个采样网格布局. 右图: 左图网格对齐约束的因子图表示.

布局对齐概率分布为

$$\Phi(G) = \frac{1}{Z(F)} \prod_{\phi} \phi(\text{Scope}_{\phi}(G)). \quad (4.19)$$

我们仍然采用与4.5.4节相似的Metropolis-Hastings算法进行采样. 在采样过程中, 我们通过随机反转一对网格的对齐关系来拓展解空间.

网格线位置. 我们将求解网格线问题归结为一个由可见建筑元素位置构成约束条件的二次规划问题. 首先, 我们将所有可见建筑元素的位置复制给与之相对齐的网格. 然后, 对于每个网格 g_i 估计其行列数($g_i.rows$, $g_i.columns$), 采样网格线间距, 并将其表达成二次规划问题.

令 $P = \{p_0, p_1, \dots, p_n\}$ 是网格 g_i 的网格线在 x 或 y 方向的位置, 其中 p_0 与 p_n 是网格的边界. $\{d_i\}$ 为网格线间距. 则网格线位置可以归结为如下二次规划问题

$$\begin{aligned} \min_P \quad & \sum_{i=0}^{n-1} (p_{i+1} - p_i - d_i)^2 \\ \text{s.t.} \quad & p_i < p_{i+1}, \quad i = 0, \dots, n-1 \\ & p_j = p_k^{obs}, \quad j \in \{0, \dots, n-1\}, k = 0, 1, \dots, K \end{aligned} \quad (4.20)$$

其中 $\{p_k^{obs}\}_{k=0}^K$ 是建筑元素中心在 x 或 y 方向上的投影.

4.6.2 建筑元素属性

以上, 我们已经得到了外立面网格布局以及网格线的位置. 接下来, 我们填充网格内的建筑元素使得其与可见元素的形式和风格相协调. 我们需要估计窗户与门的

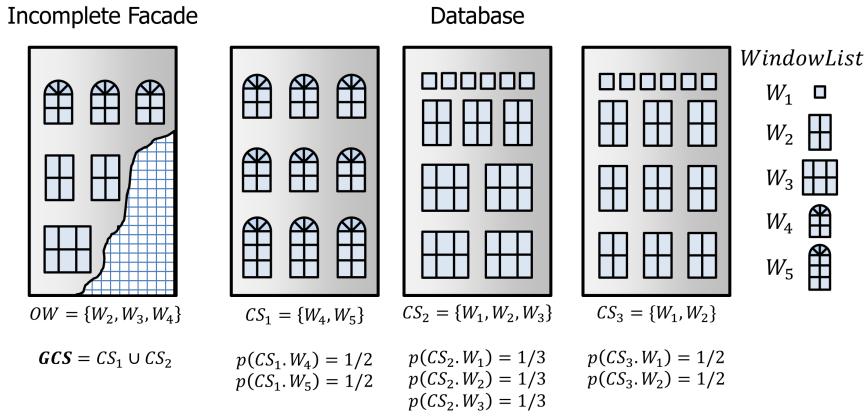


图 4.7 建筑元素属性示例.

类型、大小、装饰物及外立面颜色. 此处我们以窗户类型为例介绍其估计方法, 其余问题可以采用相同方法进行估计. 我们的基本思想是基于可见元素寻找候选的窗户类型集, 我们称之为全局协调集(Global Consistence Set, GCS). 然后对其进行采样, 得到窗户的类型.

全局协调集(GCS). 我们通过分析数据库中外立面的窗户类型, 得到窗户类型列表 $WindowList = \{W_1, W_2, \dots, W_n\}$. 对于每一个窗户, 我们指定其尺寸范围. 对于具有相同结构, 但大小显著不同的窗户, 我们定义其为不同的类型. 我们的目标是采样与可见元素相协调的窗户类型. 我们定义同一外立面中的窗户类型集合为窗户协调集(Coherence Sets, CS), 并由此分析窗户类型之间的协调关系. 每一类窗户的概率为包含该类窗户的网格数量与总体网格数的比, 见图4.7.

接着我们合并元素完全一致的协调集(CS)并相应更新各窗户类型的概率. 给定不完整外立面的可见窗户类型集, 例如 $OW = \{W_2, W_3, W_4\}$, 我们的目标是找到由协调集的并集构成的全局协调集(GCS). 其中协调集的并集必须覆盖观测集, 且包含的协调集个数最少:

$$\begin{aligned} GCS &= \arg \min_{\cup CS_i} \# \left\{ \bigcup CS_i \right\} \\ s.t. \quad OW &\subseteq \bigcup CS_i. \end{aligned} \tag{4.21}$$

实际操作中, 我们采用贪婪搜索的方法查找全局协调集. 若存在多个全局协调集, 我们根据其中协调集的概率进行采样.

GCS中建筑元素的概率. 给定与可见窗户类型相协调的全局协调集GCS. 我们根据概率分布对窗户的类型进行采样. 对于每种窗户类型 W_i , 我们定义如下评分函数:

- 频率- $\varphi_f(W_i)$: 对于窗户类型 W_i , 计算其在构成GCS的所有 CS_i 中出现的频率.
- 大小- $\varphi_s(W_i)$: 窗户的大小必须与网格线间距相适应. 由数据库中 W_i 型窗户的尺寸与对应间距的比值, 我们估计其分布, 并定义 $\varphi_s(W_i)$ 为分布的对数似然.
- 观测- $\varphi_o(W_i)$: 我们建立三种情况的似然函数, 并由数据库进行分析. 第一, 相邻且对齐的网格间通常不存在一致的建筑元素. 第二, 不相邻但对齐的网格间较可能存在一致的建筑元素. 第三, 不相邻且不对齐的网格间通常不存在一致的建筑元素.

最后, 我们定义 W_i 窗户出现的概率为

$$p(W_i) = \frac{1}{Z} \prod \varphi(W_i), \quad (4.22)$$

其中 $z = \sum_i \prod \varphi(W_i)$ 为归一化函数.

目前, 我们通过选取数据库中25个外立面构建了外立面外观数据库. 我们相信, 通过扩大数据库, 外观估计将更加准确.

4.7 实验结果

我们基于C++和Matlab实现了目前的算法框架. 本节将展示语义引导的建筑外立面结构修复结果. 本节所展示的所有实验结果都是在3.07Hz Inter Xeon双核处理器及8G内存的计算机上进行的.

定性分析. 我们选取了18张未出现在数据库中的外立面图像构成测试数据集. 尽管目前存在一些结构修复算法, 但他们的方法不能直接应用到我们的问题中. 原因主要有两点: 第一, 我们的结构恢复是在抽象布局而不是真实图片上进行的; 第二, 先前的工作只能修复较小的数据缺失. 我们认为Dai等人^[130]最近提出的工作最有可能解决与我们相似的问题. 作者对我们的数据进行了测试. 但是他们向我们报告称, 他们的算法不能解决我们的问题. 经过分析, 我们认为他们对于缺失数据有更严格的要求, 他们还不能解决如此大数据缺失的修复问题. 因此, 我们进行了一个小型的用户研究.

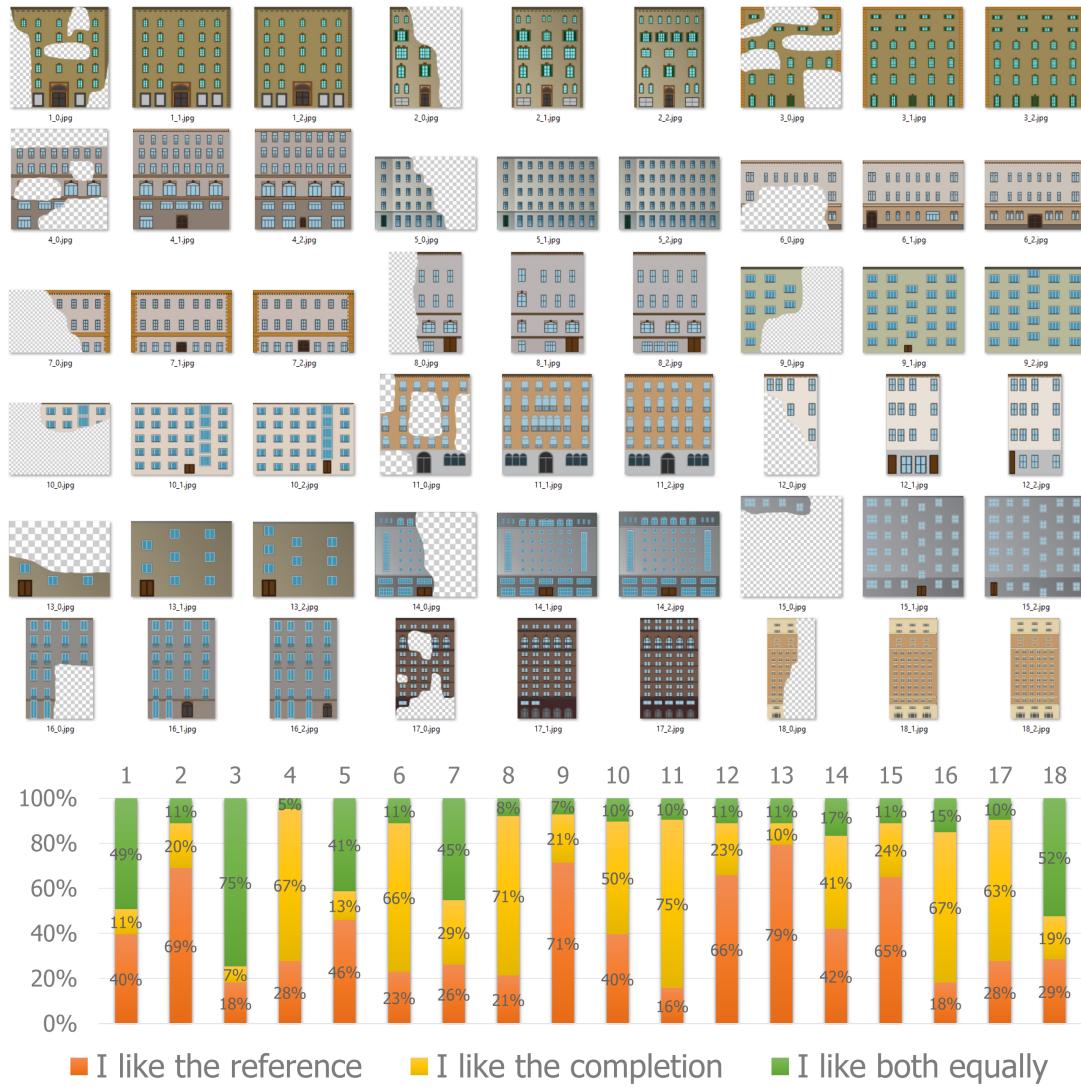


图 4.8 用户测评. 上图: 用于用户测评的18组建筑外立面缩略图. 每一组图片由三张图片组成: 不完整的外立面(0)、真实布局(1)及我们的修复结果(2). 在用户测评中, 我们要求参与者在1和2中选出最美观的结果. 下图: 用户测评结果. (说明: 在用户研究阶段, 1和2的摆放位置是随机的.)

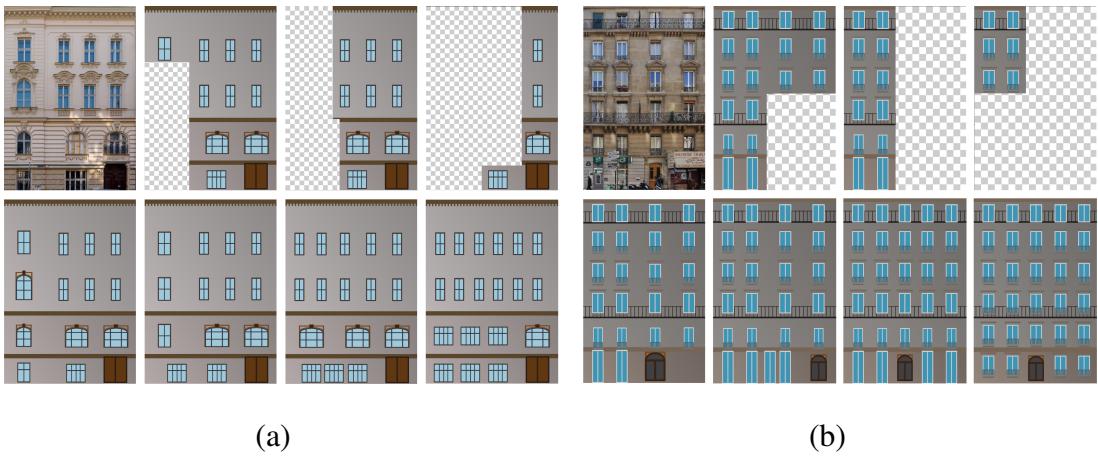


图 4.9 可见部分比例对结构修复结果的影响. 每组的左图为真实布局, 从中间至右侧依次对应于可见部分比例下降的建筑外立面修复结果.



图 4.10 不可见区域不连续的建筑外立面修复结果. 每组从左至右: 真实布局、可见部分及算法修复结果.

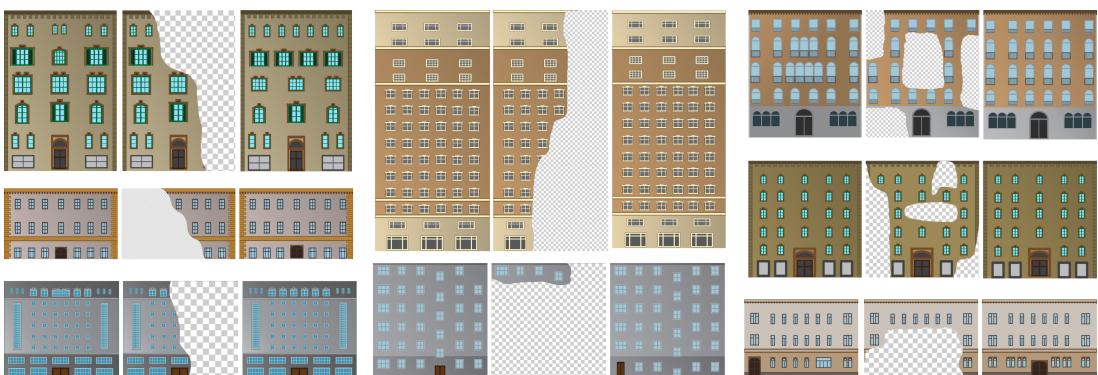


图 4.11 更多外立面结构化修复结果. 每组从左至右分别为真实布局、可见部分及算法修复结果.

我们同时展示标准结果与修复结果,请参与者选取认为最美观的结果. 用户可以选取两个结果中的任意一个或者表示他们难以进行区分. 我们共有126位参与者进行了实验. 在所有投票中, 标准结果占40.3%, 我们的修复结果占37.5%, 两者难以区分的结果占剩余的22.2%. 图4.8展示了我们的用户测评. 如我们预期, 标准结果略胜于我们, 但是可以看出我们的结果总体上是美观合理的.

在用户测评中, 我们从两个方面对算法进行了分析. 其一, 我们通过逐步扩大数据丢失比例了解算法可靠性与结构恢复能力, 见图4.9. 可以看到, 尽管数据丢失比例不断扩大, 算法仍然可以生成合理的修复结果. 其二, 我们对数据丢失的形式加以调整, 图4.10展示了外立面图片中的数据丢失区域不相连接的情形. 但从恢复结果中可以看到, 我们的算法可以生成保持原有结构语义(例如对齐)的修复结果.

我们的算法可以通过两种方式生成修复结果: 返回最有可能的外立面修复结果以及随机返回采样结果. 在用户调查中我们全部采用的是返回最有可能的外立面修复结果. 图4.12中我们展示了随机采样生成的修复结果, 相同的数据缺失情况可以生成多种结构合理的修复结果.

在我们的测试中, 我们也发现了算法所具有的局限性. 一个显著的局限来自于方法所具有的概率特性. 由于希望尽可能多的处理外立面变化, 我们在外观模型中仍然可能采样到可能性较小的修复结果, 例如网格中的元素个数(见图4.13上图). 另一个局限是异常的观测值可能会影响整个外立面修复结果(见图4.13下图). 在图4.11中, 我们展示了更多的实验结果.

运算时间. 我们记录了用户测评中所有结果的运算时间. 修复算法的平均耗时是11.9秒. 其中, 贝叶斯网络采样耗时1毫秒, 结构布局估计用时8.0秒, 外观恢复耗时3.9秒. 算法耗时与外立面的复杂度以及数据丢失比例有关. 因此, 我们观测到修复算法耗时变化很大, 最短用时1.1秒, 而最大用时为30.4秒. 此外, 在预处理阶段, 贝叶斯网络学习用时17.7秒, 网格布局估计中因子图模型权值学习耗时44.1秒.

4.8 本章小结

我们提出了一种外立面布局结构化修复算法. 与早前工作相比, 我们关注于大数据量丢失的不完整外立面修复问题. 通过层次化的使用概率图模型, 我们首先对外立

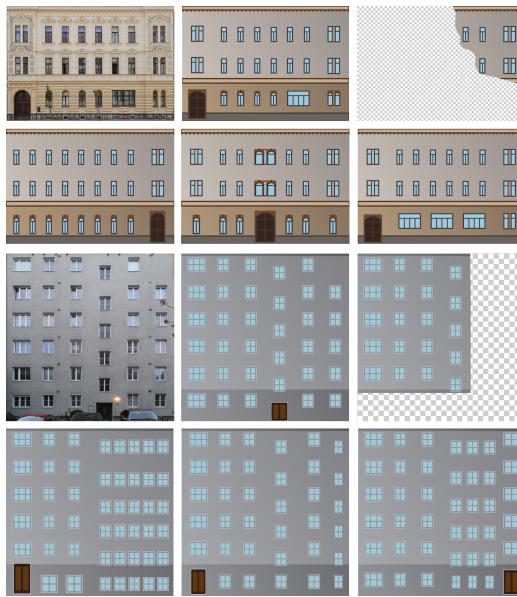


图 4.12 给定相同的不完整外立面, 算法可以生成多种不同的修复结果. 每组中上图分别为外立面图片、真实布局和可见建筑元素; 下图为三个采样的修复结果.

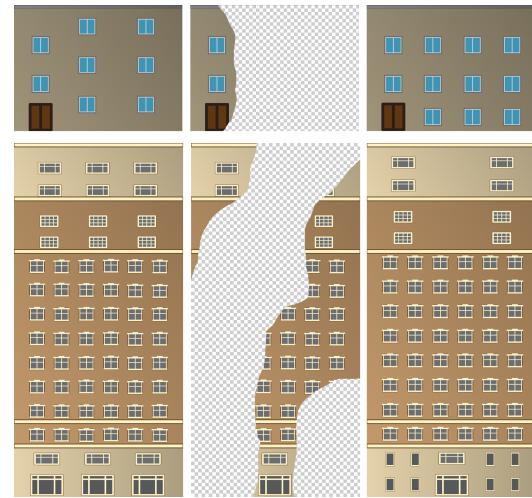


图 4.13 算法局限性. 每组中从左至右分别为真实布局、可见部分及算法修复结果.

面结构进行估计, 再对外观细节进行修复. 此外, 在修复过程中我们同时对建筑元素位置以及元素属性进行了估计. 实验表明, 我们的算法可以给出与可见部分相协调的外立面结构化修复结果.

第5章 总结与展望

5.1 工作总结

围绕模型建模与处理,计算机图形研究领域中最重要的研究课题之一,本文针对不同的实际应用问题,贯穿语义分析与用户交互相结合的模型建模与处理思想,提出了一系列算法。本文从语义引导的三维形状处理出发,将语义引导的交互处理思想推广到语义引导的三维形状建模,并进一步将高层次语义分析与用户交互相结合的思想应用到建筑外立面的分析与处理中,取得了丰富的研究成果。我们相信这种将基于高层次语义分析方法与交互式建模手段相结合的思想有助于解决模型建模与处理领域中的更多实际问题。具体来说,围绕语义引导的交互建模与处理,本文取得了以下成果:

1. 对于三维形状分割问题,本文提出了一种语义引导的前景勾画式分割算法。该算法通过对三维形状进行结构语义分析,并结合用户提供的交互语义,实现了对三维形状的准确高效分割。通过我们提出的用户界面,真正实现了“所画即所得”的设计宗旨,用户只需关注于感兴趣的前景区域,并通过渐进式交互,实时得到准确的分割结果。通过大量实验和用户测评表明,我们提出的算法无论是在交互方式还是分割结果上都优于此前的方法。
2. 对于三维形状建模问题,本文提出了一种语义引导的草图勾画式建模算法。用户通过在虚拟二维画布上勾画模型草图创建三维模型,并可以对模型进行进一步的编辑与处理。与此前基于勾画的模型建模方式不同,本文提出的方法在用户绘制草图阶段,在用户的画笔下实时提供阴影引导图,协助用户准确表达设计理念及交互意图。算法采用了数据驱动的基于样例的模型建模方式(*modeling by example*),利用大量的现有模型进行基于用户意图的模型再创造。这种建模思想也符合当前“大数据”的时代背景。通过大量的用户测评表明,我们的算法可以协助用户更好的表达建模意图并生成富有变化的新模型;与同类建模工具相比,我们的方法更受用户欢迎。

3. 对于建筑外立面修复问题,本文提出了一种语义引导的建筑外立面结构化修复算法. 我们将基于结构语义的模型分析与建模思路应用到外立面修复问题中. 基于外立面中重复元素通常以网格状结构排列的观察, 我们将外立面修复问题分解为网格布局恢复及外观恢复两个子问题. 通过数据驱动的概率图模型, 分别对结构与外观问题进行建模. 此外, 在恢复外立面结构的同时, 我们对建筑元素的数量与位置进行了估计. 实验结果表明, 我们的算法可以对大数据量丢失的建筑外立面进行结构化修复, 并生成美观协调的外观. 用户测评表明, 算法恢复的建筑外立面与真实结果相当, 具有可比性. 此外, 该方法的思想可以推广到外立面建模的其他问题中.

5.2 研究展望

本文通过语义分析与用户交互相结合的模型建模与处理思想, 对三维形状分割、三维形状建模及建筑外立面结构化修复问题进行了深入研究, 取得了丰富的研究成果. 在接下来的工作中, 我们首先希望对现有问题开展进一步的研究, 并希望能够将语义分析与用户交互相结合的思想应用到三维模型建模与处理的其他问题中. 基于这一考虑, 未来的工作主要包括:

1. 对于三维几何模型的语义分析, 目前还主要集中在结构语义分析层面. 我们认为对于三维形状的功能语义分析将在未来的形状分析处理中发挥更大的作用. 随着三维模型建模手段的不断丰富, 用户的建模与编辑意图将通过更宏观的功能语义进行表达, 例如用户可以通过命令“建造水路两用飞机”而将具有飞行与陆地行进功能的模型部件自动进行组装. 这需要我们对现有的形状几何分析、结构分析以及对模型的功能语义标注及分析进行全面的整合. 通过高层次语义的理解与表达可以进一步简化用户的分析与建模操作, 算法将更智能更高效.
2. 随着普通用户对三维模型建模与处理的参与热情不断高涨, 我们关注于如何为用户提供简单易用的交互工具. 通过对模型进行全面的语义分析, 为用户提供更智能的交互提示建议系统, 将有助于用户精确表达操作意图, 提高操作效率. 同时, 随着交互硬件设备的不断丰富, 开发具有针对性的交互算法与交互提示系统也是我们今后的关注方向. 此外, 对于高级用户与普通用户对于模型建模

与处理的不同需求,我们也将针对不同用户的交互方式进行区别化设计和研究.

3. 我们认为语义分析与用户交互的结合是一种强大而有效的模型建模与处理思想,这种思想可以广泛的应用于其他研究问题中.目前三维形状的联合分析仍然是图形学界的研究热点,将功能化的语义分析与用户在分析中的交互引导相结合将发挥巨大作用.此外,我们也可以将这种模型处理思想应用于城市重建中的其他问题,如城市点云数据的恢复与重建、城市道路和区域规划等.
4. 随着数据量不断增大,模型语义与用户语义的分析方式也发生了重大变化.我们发现基于统计学习与概率模型的研究方法正在成为语义分析的主要工具.因此,我们将关注于寻找更加准确高效的分析表达工具,以跨越低层次模型信息与高层次语义信息之间的鸿沟.

参 考 文 献

- [1] Lee Y, Lee S, Shamir A, Cohen-Or D, Seidel H P. Mesh Scissoring with Minima Rule and Part Salience[J]. Computer Aided Geometric Design, 2005, 22:444–465.
- [2] Sander P V, Snyder J, Gortler S J, Hoppe H. Texture Mapping Progressive Meshes[C]// Proc. SIGGRAPH. 2001: 409–416.
- [3] Fan L, Meng M, Liu L. Sketch-based Mesh Cutting: A Comparative Study[J]. Graphical Models, 2012, 74(6):292–301.
- [4] van Kaick O, Zhang H, Hamarneh G, Cohen-Or D. A Survey on Shape Correspondence[J]. Computer Graphics Forum, 2011, 30(6):1681–1707.
- [5] Golovinskiy A, Funkhouser T. Consistent Segmentation of 3D Models[J]. Computers & Graphics, 2009, 33(3):262–269.
- [6] Funkhouser T, Min P, Kazhdan M, Chen J, Halderman A, Dobkin D, Jacobs D. A Search Engine for 3D Models[J]. ACM Trans. Graph. (Proc. SIGGRAPH), 2003, 22(1):83–105.
- [7] Igarashi T, Matsuoka S, Tanaka H. Teddy: A Sketching Interface for 3D Freeform Design[J]. ACM Trans. Graph. (Proc. SIGGRAPH), 1999, 409–416.
- [8] Funkhouser T, Kazhdan M, Shilane P, Min P, Kiefer W, Tal A, Rusinkiewicz S, Dobkin D. Modeling by Example[J]. ACM Trans. Graph. (Proc. SIGGRAPH), 2004, 23(3):652–663.
- [9] Gal R, Sorkine O, Mitra N J, Cohen-Or D. iWIRES: An Analyze-and-Edit Approach to Shape Manipulation[J]. ACM Trans. Graph. (Proc. SIGGRAPH), 2009, 28(3):33.
- [10] Yang Y L, Yang Y J, Pottmann H, Mitra N J. Shape Space Exploration of Constrained Meshes[J]. ACM Trans. Graph. (Proc. SIGGRAPH Asia), 2011, 30(6):124.
- [11] Ji Z, Liu L, Chen Z, Wang G. Easy Mesh Cutting[J]. Computer Graphics Forum (Proc. Eurographics), 2006, 25(3):283–291.

- [12] Zheng Y, Tai C L. Mesh Decomposition with Cross-Boundary Brushes[J]. Computer Graphics Forum, 2010, 29(2):527–535.
- [13] Schroder P, Sweldens W. Digital Geometry Processing[C]// Proc. of 6th Annual Symposium on Frontiers of Engineering. 2001: 1–44.
- [14] 王国瑾, 汪国昭, 郑建民. 计算机辅助几何设计[M]. 高等教育出版社, 2001.
- [15] Müller P, Wonka P, Haegler S, Ulmer A, Gool L V. Procedural Modeling of Buildings[J]. ACM Trans. Graph. (Proc. SIGGRAPH), 2006, 25(3):614–623.
- [16] Zhang R, Tsai P S, Cryer J E, Shah M. Shape from Shading: A Survey[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1999, 21(8):690–706.
- [17] Hoppe H, DeRose T, Duchamp T, McDonald J, Stuetzle W. Surface Reconstruction from Unorganized Points[J]. Proc. SIGGRAPH, 1992, 26(2):71–78.
- [18] Nealen A, Sorkine O, Alexa M, Cohen-Or D. A Sketch-Based Interface for Detail-Preserving Mesh Editing[J]. ACM Trans. Graph. (Proc. SIGGRAPH), 2005, 24(3):1142–1147.
- [19] 胡事民, 杨永亮, 来煜坤. 数字几何处理研究进展[J]. 计算机学报, 2009, 32(8):1451–1469.
- [20] Lipson H, Kurman M. Fabricated: The New World of 3D Printing[M]. John Wiley & Sons, 2013.
- [21] Shamir A. A Survey on Mesh Segmentation Techniques[J]. Computer Graphics Forum, 2008, 27(6):1539–1556.
- [22] Tangelder J W, Veltkamp R C. A Survey of Content Based 3D Shape Retrieval Methods[J]. Multimedia tools and applications, 2008, 39(3):441–471.
- [23] 潘翔, 张三元, 叶修梓. 三维模型语义检索研究进展[J]. 计算机学报, 2009, 32(6):1069–1079.
- [24] 徐凯. 语义驱动的三维形状分析及建模[D]. 博士学位论文. 国防科学技术大学, 2011.

-
- [25] Meng M, Fan L, Liu L. A Comparative Evaluation of Foreground/Background Sketch-based Mesh Segmentation Algorithms[J]. *Computers & Graphics*, 2011, 35(3):650–660.
 - [26] Merrell P, Schkufza E, Li Z, Agrawala M, Koltun V. Interactive Furniture Layout using Interior Design Guidelines[J]. *ACM Trans. Graph. (Proc. SIGGRAPH)*, 2011, 30(4):87.
 - [27] Umetani N, Igarashi T, Mitra N J. Guided Exploration of Physically Valid Shapes for Furniture Design[J]. *ACM Trans. Graph. (Proc. SIGGRAPH)*, 2012, 31(4):86.
 - [28] Kinect[EB/OL]. www.microsoft.com/en-us/kinectforwindows/.
 - [29] Leap Motion[EB/OL]. www.leapmotion.com/.
 - [30] MYO[EB/OL]. www.thalmic.com/en/myo/.
 - [31] Google Glass[EB/OL]. www.google.com/glass/.
 - [32] SketchUp[EB/OL]. www.sketchup.com/.
 - [33] Lipp M, Wonka P, Wimmer M. Interactive Visual Editing of Grammars for Procedural Architecture[J]. *ACM Trans. Graph. (Proc. SIGGRAPH)*, 2008, 27(3):102.
 - [34] Hoffman D D, Richards W A. Parts of Recognition[J]. *Cognition*, 1984, 18(1):65–96.
 - [35] Hoffman D D, Singh M. Salience of Visual Parts[J]. *Cognition*, 1997, 63(1):29–78.
 - [36] Shlafman S, Tal A, Katz S. Metamorphosis of Polyhedral Surface using Decomposition[J]. *Computer Graphics Forum (Proc. Eurographics)*, 2002, 21:219–228.
 - [37] Lai Y K, Hu S M, Martin R R, Rosin P L. Fast Mesh Segmentation using Random Walks[C]// ACM Symposium on Solid and Physical Modeling. 2008: 183–191.
 - [38] Katz S, Tal A. Hierarchical Mesh Decomposition using Fuzzy Clustering and Cuts[J]. *ACM Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH)*, 2003, 22:954–961.
 - [39] Katz S, Leifman G, Tal A. Mesh Segmentation using Feature Point and Core Extraction[J]. *The Visual Computer*, 2005, 21:649–658.

- [40] Shapira L, Shamir A, Cohen-Or D. Consistent Mesh Partitioning and Skeletonisation using the Shape Diameter Function[J]. *The Visual Computer*, 2008, 24(4):249–259.
- [41] Golovinskiy A, Funkhouser T. Randomized Cuts for 3D Mesh Analysis[J]. *ACM Trans. Graph. (Proc. SIGGRAPH Asia)*, 2008, 27(5):145.
- [42] Wang Y, Gong M, Wang T, Cohen-Or D, Zhang H, Chen B. Projective Analysis for 3D Shape Segmentation[J]. *ACM Trans. Graph. (Proc. SIGGRAPH)*, 2013, 32(6):192.
- [43] Meng M, Liu L, Fan L. iCutter: A Direct Cut Out Tool for 3D Shapes[J]. *Journal of Computer Animation and Virtual World*, 2011, 22(4):335–342.
- [44] Pottmann H, Steiner T, Hofer M, Haider C, Hanbury A. The Isophotic Metric and Its Application to Feature Sensitive Morphology on Ssurfaces[M]. Springer, 2004.
- [45] Wu H Y, Pan C, Pan J, Yang Q, Ma S. A Sketch-based Interactive Framework for Real-time Mesh Segmentation[C]// Computer Graphics International. 2007.
- [46] Xiao C, Fu H, Tai C L. Hierarchical Aggregation for Efficient Shape Extraction[J]. *The Visual Computer*, 2009, 25(3):283–291.
- [47] Brown S, Morse B, Barrett W. Interactive Part Selection for Mesh and Point Models using Hierarchical Graph-cut Partitioning[C]// Proc. Graphics Interface. 23–30: 2009.
- [48] Fan L, Liu L, Liu K. Paint Mesh Cutting[J]. *Computer Graphics Forum (Proc. Eurographics)*, 2011, 30(2):603–612.
- [49] Attene M, Katz S, Mortara M, Patané G, Spagnuolo M, Tal A. Mesh Segmentation - A Comparative Study[C]// Shape Modeling and Applications. 2006: 1–7.
- [50] Benhabiles H, Vandeborre J P, Lavoue G, Daoudi M. A Framework for The Objective Evaluation of Segmentation Algorithms using A Ground-truth of Human Segmented 3d-models[C]// Shape Modeling and Applications. 2009: 36–43.

-
- [51] Benhabiles H, Vandeborre J P, Lavoué G, Daoudi M. A Comparative Study of Existing Metrics for 3D-mesh Segmentation Evaluation[J]. *The Visual Computer*, 2010, 26(12):1451–1466.
 - [52] Chen X, Golovinskiy A, Funkhouser T. A Benchmark for 3D Mesh Segmentation[J]. *ACM Trans. Graph. (Proc. SIGGRAPH)*, 2009, 28(3).
 - [53] Saw T L. *The Analytic Hierarchy Process*[M]. Hill, 1980.
 - [54] Gelfand N, Mitra N J, Guibas L J, Pottmann H. Robust Global Registration[C]// *Proc. Symposium on Geometry Processing*. 2005: 197.
 - [55] Chang W, Zwicker M. Automatic Registration for Articulated Shapes[J]. *Computer Graphics Forum (Proc. SGP)*, 2008, 27(5):1459–1468.
 - [56] Kraevoy V, Sheffer A. Cross-Parameterization and Compatible Remeshing of 3D Models[J]. *ACM Trans. Graph. (Proc. SIGGRAPH)*, 2004, 23(3):861–869.
 - [57] Sumner R W, Popović J. Deformation Transfer for Triangle Meshes[J]. *ACM Trans. Graph. (Proc. SIGGRAPH)*, 2004, 23(3):399–405.
 - [58] Gal R, Cohen-Or D. Salient Geometric Features for Partial Shape Matching and Similarity[J]. *ACM Trans. Graph.*, 2006, 25(1):130–150.
 - [59] Pekelný Y, Gotsman C. Articulated Object Reconstruction and Markerless Motion Capture from Depth Video[J]. *Computer Graphics Forum (Proc. Eurographics)*, 2008, 27(2):399–408.
 - [60] Xu K, Li H, Zhang H, Cohen-Or D, Xiong Y, Cheng Z Q. Style-Content Separation by Anisotropic Part Scales[J]. *ACM Trans. Graph. (Proc. SIGGRAPH)*, 2010, 29(6):184.
 - [61] Kalogerakis E, Hertzmann A, Singh K. Learning 3D Mesh Segmentation and Labeling[J]. *ACM Trans. Graph. (Proc. SIGGRAPH)*, 2010, 29(4):102.
 - [62] van Kaick O, Tagliasacchi A, Sidi O, Zhang H, Cohen-Or D, Wolf L, Hamarneh G. Prior Knowledge for Part Correspondence[J]. *Computer Graphics Forum (Proc. Eurographics)*, 2011, 30(2):553–562.

- [63] Huang Q, Koltun V, Guibas L. Joint Shape Segmentation with Linear Programming[J]. ACM Trans. Graph. (Proc. SIGGRAPH), 2011, 30(6):125.
- [64] Sidi O, van Kaick O, Kleiman Y, Zhang H, Cohen-Or D. Unsupervised Co-Segmentation of A Set of Shapes via Descriptor-Space Spectral Clustering[J]. ACM Trans. Graph. (Proc. SIGGRAPH Asia), 2011, 30(6):126.
- [65] Hu R, Fan L, Liu L. Co-Segmentation of 3D Shapes via Subspace Clustering[J]. Computer Graphics Forum (Proc. SGP), 2012, 31(5):1703–1713.
- [66] Wu Z, Wang Y, Shou R, Chen B, Liu X. Unsupervised Co-Segmentation of 3D Shapes via Affinity Aggregation Spectral Clustering[J]. Computers & Graphics, 2013, 37(6):628–637.
- [67] Kim V G, Li W, Mitra N J, Chaudhuri S, DiVerdi S, Funkhouser T. Learning Part-based Templates from Large Collections of 3D Shapes[J]. ACM Trans. Graph. (Proc. SIGGRAPH), 2013, 32(4):70.
- [68] van Kaick O, Xu K, Zhang H, Wang Y, Sun S, Shamir A, Cohen-Or D. Co-Hierarchical Analysis of Shape Structures[J]. ACM Trans. Graph. (Proc. SIGGRAPH), 2013, 32(4):7.
- [69] Kim V G, Li W, Mitra N, DiVerdi S, Funkhouser T. Exploring Collections of 3D Models using Fuzzy Correspondences[J]. ACM Trans. Graph. (Proc. SIGGRAPH), 2012, 31(4):54.
- [70] Wang Y, Asafi S, van Kaick O, Zhang H, Cohen-Or D, Chen B. Active Co-Analysis of A Set of Shapes[J]. ACM Trans. Graph. (Proc. SIGGRAPH Asia), 2012, 31(6):165.
- [71] Wu Z, Shou R, Wang Y, Liu X. Interactive Shape Co-Segmentation via Label Propagation[J]. ACM Trans. Graph. (Proc. SIGGRAPH Asia), 2014, 38:248–254.
- [72] Hilaga M, Shinagawa Y, Kohmura T, Kunii T L. Topology Matching for Fully Automatic Similarity Estimation of 3D Shapes[C]// Proc. SIGGRAPH. 2001: 203–212.

-
- [73] Osada R, Funkhouser T, Chazelle B, Dobkin D. Shape Distributions[J]. ACM Trans. Graph., 2002, 21(4):807–832.
 - [74] Podolak J, Shilane P, Golovinskiy A, Rusinkiewicz S, Funkhouser T. A Planar-Reflective Symmetry Transform for 3D Shapes[J]. ACM Trans. Graph. (Proc. SIGGRAPH), 2006, 25(3):549–559.
 - [75] Chen D Y, Tian X P, Shen Y T, Ouhyoung M. On Visual Similarity Based 3D Model Retrieval[J]. Computer Graphics Forum (Proc. Eurographics), 2003, 22(3):223–232.
 - [76] Daras P, Axenopoulos A. A 3D Shape Retrieval Framework Supporting Multimodal Queries[J]. International Journal of Computer Vision, 2010, 89(2–3):229–247.
 - [77] Yoon S M, Scherer M, Schreck T, Kuijper A. Sketch-based 3D Model Retrieval using Diffusion Tensor Fields of Suggestive Contours[C]// Int'l. Conf. Multimedia. 2010: 193–200.
 - [78] Shao T, Xu W, Yin K, Wang J, Zhou K, Guo B. Discriminative Sketch-based 3D Model Retrieval via Robust Shape Matching[J]. Computer Graphics Forum (Proc. Pacific Graphics), 2011, 30(7).
 - [79] Eitz M, Richter R, Boubekeur T, Hildebrand K, Alexa M. Sketch-based Shape Retrieval[J]. ACM Trans. Graph. (Proc. SIGGRAPH), 2012, 31(4):31.
 - [80] Nealen A, Igarashi T, Sorkine O, Alexa M. FiberMesh: Designing Freeform Surfaces with 3D Curves[J]. ACM Trans. Graph. (Proc. SIGGRAPH), 2007, 26(3):41.
 - [81] Karpenko O A, Hughes J F. SmoothSketch: 3D Free-Form Shapes from Complex Sketches[J]. ACM Trans. Graph. (Proc. SIGGRAPH), 2006, 25(3):589–598.
 - [82] Zeleznik R C, Herndon K P, Hughes J F. SKETCH: An Interface for Sketching 3D Scenes[J]. ACM Trans. on Graphics (Proc. SIGGRAPH), 1996, 163–170.
 - [83] Bae S H, Balakrishnan R, Singh K. ILoveSketch: As-Natural-As-Possible Sketching System for Creating 3D Curve Models[C]// Proc. User Interface Software and Technology. 2008: 151–160.

- [84] Zheng Y, Fu H, Cohen-Or D, Au O K C, Tai C L. Component-Wise Controllers for Structure-Preserving Shape Manipulation[J]. Computer Graphics Forum (Proc. Eurographics), 2011, 30(2):563–572.
- [85] Chaudhuri S, Koltun V. Data-Driven Suggestions for Creativity Support in 3D Modeling[J]. ACM Trans. Graph. (Proc. SIGGRAPH Asia), 2010, 29(6):183.
- [86] Chaudhuri S, Kalogerakis E, Guibas L, Koltun V. Probabilistic Reasoning for Assembly-based 3D Modeling[J]. ACM Trans. Graph. (Proc. SIGGRAPH), 2011, 30(4):35.
- [87] Chaudhuri S, Kalogerakis E, Giguere S, Funkhouser T. AttribIt: Content Creation with Semantic Attributes[J]. ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST), 2013, 193–202.
- [88] Lee J, Funkhouser T. Sketch-based Search and Composition of 3D Models[C]// Proc. EUROGRAPHICS Workshop on Sketch-Based Interfaces and Modeling. 2008: 97–104.
- [89] Xie X, Xu K, Mitra N J, Cohen-Or D, Gong W, Su Q, Chen B. Sketch-to-Design: Context-Based Part Assembly[J]. Computer Graphics Forum, 2013, 32(8):233–245.
- [90] Jain A, Thormählen T, Ritschel T, Seidel H P. Exploring Shape Variations by 3D-Model Decomposition and Part-based Recombination[J]. Computer Graphics Forum (Proc. Eurographics), 2012, 31(2pt3):631–640.
- [91] Zhao X, Tang C C, Yang Y L, Pottmann H, Mitra N J. Intuitive Design Exploration of Constrained Meshes[J]. Advances in Architectural Geometry, 2013, 305–318.
- [92] Deng B, Bouaziz S, Deuss M, Zhang J, Schwartzburg Y, Pauly M. Exploring Local Modifications for Constrained Meshes[J]. Computer Graphics Forum (Proc. Eurographics), 2013, 32(2pt1):11–20.
- [93] Bao F, Yan D M, Mitra N J, Wonka P. Generating and Exploring Good Building Layouts[J]. ACM Trans. Graph. (Proc. SIGGRAPH), 2013, 32(4):122.

-
- [94] Olsen L, Samavati F, Sousa M C, Jorge J. A Taxonomy of Modeling Techniques using Sketch-Based Interfaces[J]. *Computers and Graphics*, 2009, 33(1):85–103.
 - [95] Yang C, Sharon D, van de Panne M. Sketch-based Modeling of Parameterized Objects[C]// Proc. EUROGRAPHICS Workshop on Sketch-Based Interfaces and Modeling. 2005.
 - [96] Rivers A, Durand F, Igarashi T. 3D Modeling with Silhouettes[J]. *ACM Trans. Graph. (Proc. SIGGRAPH)*, 2010, 29(4).
 - [97] Zimmermann J, Nealen A, Alexa M. SilSketch: Automated Sketch-based Editing of Surface Meshes[C]// Proc. EUROGRAPHICS Workshop on Sketch-Based Interfaces and Modeling. 2007: 23–30.
 - [98] Shin H, Igarashi T. Magic Canvas: Interactive Design of a 3-D Scene Prototype from Freehand Sketches, booktitle = Proc. Graphics Interface, pages = 63–70, year = 2007[C]//.
 - [99] Xu K, Chen K, Fu H, Sun W L, Hu S M. Sketch2Scene: Sketch-based Co-Retrieval and Co-Placement of 3D Models[J]. *ACM Trans. Graph. (Proc. SIGGRAPH)*, 2013, 32(4):123.
 - [100] Google Maps[EB/OL]. <https://maps.google.com>.
 - [101] Musalski P, Wonka P, Aliaga D G, Wimmer M, Gool L, Purgathofer W. A Survey of Urban Reconstruction[J]. *Computer Graphics Forum*, 2013, 32(6):146–177.
 - [102] Vanegas C A, Aliaga D G, Wonka P, Müller P, Waddell P, Watson B. Modelling The Appearance and Behaviour of Urban Spaces[J]. *Computer Graphics Forum*, 2010, 29(1):25–42.
 - [103] Wonka P, Wimmer M, Sillion F X, Ribarsky W. Instant Architecture[J]. *ACM Trans. Graph. (Proc. SIGGRAPH)*, 2003, 22(3):669–677.
 - [104] Canny J. A Computational Approach to Edge Detection[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986, (6):679–698.

- [105] Harris C, Stephens M. A Combined Corner and Edge Detector[C]// Proc. Alvey Vision Conference. 1988.
- [106] Lowe D G. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints[J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2):91–110.
- [107] Bay H, Ess A, Tuytelaars T, Van Gool L. Speeded-Up Robust Features (SURF)[J]. Computer Vision and Image Understanding, 2008, 110(3):346–359.
- [108] Wang X, Hanson A R. Surface Texture and Microstructure Extraction from Multiple Aerial Images[J]. Computer Vision and Image Understanding, 2001, 83(1):1–37.
- [109] Lee S C, Nevatia R. Extraction and Integration of Window in A 3D Bbuilding Model from Ground View Images[C]// Proc. CVPR. 2004: II–113.
- [110] Pauly M, Mitra N J, Wallner J, Pottmann H, Guibas L J. Discovering Structural Regularity in 3D Geometry[J]. ACM Trans. Graph. (Proc. SIGGRAPH), 2008, 27(3):24.
- [111] Mitra N J, Bronstein A, Bronstein M. Intrinsic Regularity Ddetection in 3D Geometry[C]// Proc. ECCV. 2010: 398–410.
- [112] Musialski P, Recheis M, Maierhofer S, Wonka P, Purgathofer W. Tiling of Ortho-Rectified Facade Images[C]// Proc. the 26th Spring Conference on Computer Graphics. 2010: 117–126.
- [113] Zhao P, Quan L. Translation Ssymmetry Detection in A Fronto-Parallel View[C]// Proc. CVPR. 2011: 1009–1016.
- [114] Wu C, Frahm J M, Pollefeys M. Detecting Large Repetitive Structures with Salient Boundaries[C]// Proc. ECCV. 2010: 142–155.
- [115] Park M, Brocklehurst K, Collins R T, Liu Y. Translation-Symmetry-Based Perceptual Grouping with Applications to Urban Scenes[C]// Proc. ACCV. 2011: 329–342.
- [116] Ceylan D, Mitra N J, Li H, Weise T, Pauly M. Factored Facade Acquisition using Symmetric Line Arrangements[J]. Computer Graphics Forum (Proc. Eurographics), 2012, 31(2pt3):671–680.

-
- [117] Zhang H, Xu K, Jiang W, Lin J, Cohen-Or D, Chen B. Layered Analysis of Irregular Facades via Symmetry Maximization[J]. ACM Trans. Graph. (Proc. SIGGRAPH), 2013, 32(4):104.
 - [118] Alegre F, Dellaert F. A Probabilistic Approach to The Semantic Interpretation of Building Facades[C]// Proc. International Workshop on Vision Techniques Applied to the Rehabilitation of City Centres. 2004: 25–27.
 - [119] Mayer H, Reznik S. Building Facade Interpretation from Uncalibrated Wide-Baseline Image Sequences[J]. Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2007, 61(6):371–380.
 - [120] Reznik S, Mayer H. Implicit Shape Models, Model Selection, and Plane Sweeping for 3D Facade Interpretation[J]. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2007, 36:173–178.
 - [121] Leibe B, Leonardis A, Schiele B. Combined Object Categorization and Segmentation with An Implicit Shape Model[C]// Proc. Workshop on statistical learning in computer vision, ECCV. 2004: 7–14.
 - [122] Müller P, Zeng G, Wonka P, Van Gool L. Image-based Procedural Modeling of Facades[J]. ACM Trans. Graph. (Proc. SIGGRAPH), 2007, 26(3):85.
 - [123] Ripperda N. Determination of Facade Attributes for Facade Reconstruction[J]. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2008, 37:285–290.
 - [124] Ripperda N, Brenner C. Application of A Formal Grammar to Facade Reconstruction in Semiautomatic and Automatic Environments[C]// Proc. AGILE Conference on GIScience. 2009: 1–12.
 - [125] Teboul O, Simon L, Koutsourakis P, Paragios N. Segmentation of Building Facades using Procedural Shape Priors[C]// Proc. CVPR. 2010: 3105–3112.
 - [126] Teboul O, Kokkinos I, Simon L, Koutsourakis P, Paragios N. Shape Grammar Parsing via Reinforcement Learning[C]// Proc. CVPR. 2011: 2273–2280.

- [127] Bao F, Schwarz M, Wonka P. Procedural Facade Variations from a Single Layout[J]. ACM Trans. Graph. (Proc. SIGGRAPH), 2013, 32(1):8.
- [128] AlHalawani S, Yang Y L, Liu H, Mitra N J. Interactive Facades Analysis and Synthesis of Semi-Regular Facades[J]. Computer Graphics Forum (Proc. Eurographics), 2013, 32(2pt2):215–224.
- [129] Yeh Y T, Breeden K, Yang L, Fisher M, Hanrahan P. Synthesis of Tiled Patterns using Factor Graphs[J]. ACM Trans. Graph. (Proc. SIGGRAPH), 2013, 32(1):3.
- [130] Dai D, Riemenschneider H, Schmitt G, Van Gool L. Example-based Facade Texture Synthesis[J]. 2013.
- [131] Hohmann B, Krispel U, Havemann S, Fellner D. CityFit-High-Quality Urban Reconstructions by Fitting Shape Grammars to Images and Derived Textured Point Clouds[C]// Proc. of the International Workshop 3D-ARCH. 2009.
- [132] Havemann S. Generative Mesh Modeling[D]. PhD thesis. University of Braunschweig-Institute of Technology, 2005.
- [133] Aliaga D G, Rosen P A, Bekins D R. Style Grammars for Interactive Visualization of Architecture[J]. Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2007, 13(4):786–797.
- [134] Nan L, Sharf A, Zhang H, Cohen-Or D, Chen B. SmartBoxes for Interactive Urban Reconstruction[J]. ACM Trans. Graph. (Proc. SIGGRAPH), 2010, 29(4):93.
- [135] Xiao J, Fang T, Tan P, Zhao P, Ofek E, Quan L. Image-based Facade Modeling[J]. ACM Trans. Graph. (Proc. SIGGRAPH Asia), 2008, 27(5):161.
- [136] Musalski P, Wimmer M, Wonka P. Interactive Coherence-Based Facade Modeling[J]. Computer Graphics Forum (Proc. Eurographics), 2012, 31(2pt3):661–670.
- [137] Liu J, Sun J, Shum H Y. Paint Selection[J]. ACM Trans. Graph. (Proc. SIGGRAPH), 2009, 28(3):69.
- [138] Gatzke T, Grimm C, Garland M, Zelinka S. Curvature Maps for Local Shape Comparison[C]// Shape Modeling International. 2005: 244–253.

-
- [139] Lai Y K, Zhou Q Y, Hu S M, Wallner J, Pottmann D, et al. Robust Feature Classification and Editing[J]. *TVCG*, 2007, 13(1):34–45.
 - [140] De Goes F, Goldenstein S, Velho L. A Hierarchical Segmentation of Articulated Bodies[J]. *Computer Graphics Forum*, 2008, 27(5):1349–1356.
 - [141] Seong J K, Jeong W K, Cohen E. Anisotropic Geodesic Distance Computation for Parametric Surfaces[C]// Proc. Shape Modeling International. 2008: 179–186.
 - [142] Dyer R, Zhang H, Möller T. Surface Sampling and The Intrinsic Voronoi Diagram[J]. *Computer Graphics Forum (Proc. SGP)*, 2008, 27(5):1393–1402.
 - [143] Liu R, Zhang H, Shamir A, Cohen-Or D. A Part-Aware Surface Metric for Shape Analysis[J]. *Computer Graphics Forum (Proc. Eurographics)*, 2009, 28(2):397–406.
 - [144] Boykov Y Y, Jolly M P. Interactive Graph Cuts for Optimal Boundary & Region Segmentation of Objects in ND Images[C]// ICCV. 2001: 105–112.
 - [145] Kovacic M, Guggeri F, Marras S, Scateni R. Fast Approximation of The Shape Diameter Function[C]// Proc. Workshop on Computer Graphics, Computer Vision and Mathematics (GraVisMa). 2010.
 - [146] Boykov Y, Kolmogorov V. An Experimental Comparison of Min-cut/Max-flow Algorithms for Energy Minimization in Vision[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2004, 26(9):1124–1137.
 - [147] McGuinness K, O’ Connor N E. A Comparative Evaluation of Interactive Segmentation Algorithms[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2010, 43(2):434–444.
 - [148] Xu K, Zheng H, Zhang H, Cohen-Or D, Liu L, Xiong Y. Photo-Inspired Model-Driven 3D Object Modeling[J]. *ACM Trans. Graph. (Proc. SIGGRAPH)*, 2011, 30(4):80.
 - [149] Lee Y J, Zitnick C L, Cohen M F. ShadowDraw: Real-Time User Guidance for Freehand Drawing[J]. *ACM Trans. Graph. (Proc. SIGGRAPH)*, 2011, 30(4):27.

- [150] Dixon D, Prasad M, Hammond T. iCanDraw: Using Sketch Recognition and Corrective Feedback to Assist a User in Drawing Human Faces[C]// Proc. the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems. 2010: 897–906.
- [151] Mitra N J, Guibas L J, Pauly M. Partial and Approximate Symmetry Detection for 3D Geometry[J]. ACM Trans. Graph. (Proc. SIGGRAPH), 2006, 25(3):560–568.
- [152] DeCarlo D, Finkelstein A, Rusinkiewicz S, Santella A. Suggestive Contours for Conveying Shape[J]. ACM Trans. Graph. (Proc. SIGGRAPH), 2003, 22(3):848–855.
- [153] Zitnick C L. Binary Coherent Edge Descriptors[C]// ECCV. 2010: 170–182.
- [154] Chum O. Near Duplicate Image Detection: min-Hash and tf-idf Weighting[C]// Proc. BMVC. 2008.
- [155] Ju T, Schaefer S, Warren J. Mean Value Coordinates for Closed Triangular Meshes[J]. ACM Trans. Graph. (Proc. SIGGRAPH), 2005, 24(3):561–566.
- [156] Shilane P, Min P, Kazhdan M, Funkhouser T. The Princeton Shape Benchmark[C]// Proc. Shape Modeling International. 2004: 167–178.
- [157] Bertalmío M, Sapiro G, Caselles V, Ballester C. Image Inpainting[C]// Proc. SIGGRAPH. 2000: 417–424.
- [158] Zhang H y, Peng Q c. A Survey on Digital Image Inpainting[J]. Journal of image and graphics, 2007, 12(1):1–10.
- [159] Fidane I B. A Survey on Variational Image Inpainting, Texture Synthesis and Image Completion[J]. Preprint, 2008.
- [160] Sun J, Yuan L, Jia J, Shum H Y. Image Completion with Structure Propagation[J]. ACM Trans. Graph. (Proc. SIGGRAPH), 2005, 24(3):861–868.
- [161] He K, Sun J. Statistics of Patch Offsets for Image Completion[C]// Proc. ECCV. 2012: 16–29.
- [162] Pritch Y, Kav-Venaki E, Peleg S. Shift-Map Image Editing[C]// Proc. ICCV. 2009: 151–158.

-
- [163] Korah T, Rasmussen C. Analysis of Building Textures for Reconstructing Partially Occluded Facades[C]// Proc. ECCV. 2008: 359–372.
 - [164] Merrell P, Schkufza E, Koltun V. Computer-Generated Residential Building Layouts[J]. ACM Trans. Graph. (Proc. SIGGRAPH Asia), 2010, 29(6):181.
 - [165] Kalogerakis E, Chaudhuri S, Koller D, Koltun V. A Probabilistic Model for Component-based Shape Synthesis[J]. ACM Trans. Graph. (Proc. SIGGRAPH), 2012, 31(4):55.
 - [166] Chickering D M. Learning Equivalence Classes of Bayesian-network Structures[J]. The Journal of Machine Learning Research, 2002, 2:445–498.
 - [167] Dawid P, Lauritzen S L, Spiegelhalter D J. Probabilistic Networks and Expert Systems: Exact Computational Methods for Bayesian Networks[M]. Springer, 2007.
 - [168] Hinton G E. Training Products of Experts by Minimizing Contrastive Divergence[J]. Neural Computation, 2002, 14(8):1771–1800.
 - [169] Hastings W K. Monte Carlo Sampling Methods using Markov Chains and Their Applications[J]. Biometrika, 1970, 57(1):97–109.

简 历

基本情况

樊鲁斌，男，浙江大学数学系博士研究生。

教育状况

2005年9月至2009年6月，武汉大学，信息与计算科学专业，本科。

2009年9月至2014年6月，浙江大学，应用数学专业，博士研究生。

2012年9月至2013年1月，中国科学技术大学，访问学生。

2013年3月至2014年1月，阿卜杜拉国王科技大学，访问学生。

研究兴趣

计算机图形学、数字几何与图像处理、三维形状处理、城市建模

联系方式

通讯地址：杭州市浙江大学玉泉校区数学系，邮编：310027

Email: lubinfan@gmail.com

攻读博士学位期间主要研究成果

- 1 **Lubin Fan**, Ligang Liu, Kun Liu. Paint Mesh Cutting. *Computer Graphics Forum (Proc. Eurographics)*, 30(2):603-611, 2011. (SCI)
- 2 **Lubin Fan**, Ruimin Wang, Linlin Xu, Jiansong Deng, Ligang Liu. Modeling by Drawing with Shadow Guidance. *Computer Graphics Forum (Proc. Pacific Graphics)*, 32(7):157-166, 2013. (SCI)
- 3 **Lubin Fan**, Min Meng, Ligang Liu. Sketch-based Mesh Cutting: A Comparative Study. *Graphical Models*, 74(6):292-301, 2012. (SCI)
- 4 Ruizhen Hu, **Lubin Fan**, Ligang Liu. Co-Segmentation of 3D Shapes via Subspace Clustering. *Computer Graphics Forum (Proc. Symposium on Geometry Processing)*, 31(5):1703-1713, 2012. (SCI)
- 5 Min Meng, **Lubin Fan**, Ligang Liu. iCutter: A Direct Cut Out Tool for 3D Shapes. *Journal of Computer Animation and Virtual World (Proc. Computer Animation and Social Agents)*, 22(4):335-342, 2011. (SCI)
- 6 Min Meng, **Lubin Fan**, Ligang Liu. A Comparative Evaluation of Foreground /Background Sketch-based Mesh Segmentation Algorithms. *Computers & Graphics (Proc. Shape Modeling International)*, 35(3):650-660, 2011. (SCI)
- 7 **Lubin Fan**, Przemyslaw Musalski, Ligang Liu, Peter Wonka. Structure Completion for Grid Layouts. *Submitted*.