
感知语义的三维建模技术发展动态*

程志全¹, 徐凯¹, 许威威³, 夏佳志², 李宝¹, 党岗¹⁺

¹(国防科学技术大学 计算机学院, 湖南 长沙 410073)

²(中南大学 信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410001)

³(杭州师范大学 国际服务工程学院, 杭州 浙江 310012)

State of the Art in Semantic-aware 3D Modeling *

CHENG Zhi-Quan^{1,2}, XU Kai¹, XU Weiwei³, XIA Jiazhi², LI Bao¹, DANG Gang¹⁺

¹(School of Computer, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

²(School of Software, Central South University, Changsha 410001, China)

³(Institute of Service Engineering, Hangzhou Normal University, Hangzhou 310012, China)

+ Corresponding author: Phn: +86-0731-84575993, Fax: +86-731-84575993, E-mail:cheng.zhiquan@gmail.com,

<http://www.computer-graphics.cn>

Received 0000-00-00; Accepted 1111-11-11

Abstract: 3D modeling, the kernel issue of computer graphics, builds the objects in 3D virtual environment. But it is well known that traditional modeling methods show limited performance. The technology of 3D modeling with semantic information has received significant attention in recent years, as the new high-level way could alleviate the modeling difficulty for a general user. Numerous methods have been proposed to extract and exploit the semantic information from specific subject for a wide variety of modeling tasks. This report surveys recent developments in semantic-aware 3D modeling. We classify existing methods to gain a better understanding of the fundamental scheme of semantic-aware modeling technology, whose framework could be divided into four levels: visual-shape, structural, functional, and field-specific knowledge recognized by humanity. Besides these, the representative algorithms are discussed to enlighten the following researching.

Key words: 3D modeling; semantic information; semantic analysis

摘 要: 三维建模技术构建了三维虚拟世界中的对象, 是计算机图形学领域的核心课题。众所周知, 传统三维建模方法建模能力受限。因此, 面向特定三维模型, 研究人员提取其蕴含的语义信息, 进而有效利用语义信息实现三维建模。这种更高级的新型建模方法, 能增强大众用户的建模能力, 成为当前国际前沿的研究热点。本综述

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant No. 61103084, 61272334 (国家自然科学基金).

作者简介: 程志全,男,博士,主要研究领域为可视计算;徐凯,男,博士,主要研究领域为计算机图形学;许威威,男,博士,主要研究领域为计算机图形学;夏佳志,男,博士,主要研究领域为计算机图形学;李宝,男,博士,主要研究领域为计算机图形学;党岗,博士,副教授,主要研究领域为虚拟现实。

回顾感知语义的三维建模工作,将所使用的语义分为视觉外形、结构、功能、领域信息等层次,并探讨了代表性算法的工作机理以启发后继研究。

关键词: 三维建模; 语义信息; 语义分析

中图法分类号: TP391

文献标识码: A

三维模型是各领域中对象的图形学表示,对象既可以是现实世界的实体,也可以是虚构的。随着三维建模与处理研究的深入发展,人们逐渐认识到,要更加有效地建立、表示和处理三维模型,需要面向特定应用需求,有效提取和利用其蕴含的语义信息。这有别于传统三维建模技术所关注的几何属性度量问题,研究的主题转移到感知语义的高层次(high-level)级别[1]。感知语义的三维建模方法能显著增强大众用户的建模能力,具有广阔的应用前景。基于此现状,本文探讨感知语义的三维模型技术发展动态。

1 前言

继音频、图像和视频等数字媒体后,三维模型作为一种媒体形式,正在引领用户进入三维(3D)时代。三维模型带来巨大机遇的同时也在技术方面提出了全新的挑战。在传统三维设计领域,人们借助于 MAYA 和 3D Max 等建模工具“设计”三维模型,但是这些工具学习难度较高,主要供专业人员用于创作;在逆向工程领域,人们通常使用昂贵的专业三维扫描设备在理想的实验室场景下获取点云数据,设备和环境条件要求较高。受限于这些因素,相比于音频、图像、视频内容的繁荣而言,三维信息作为物体的基本属性迟迟不能被大众用户方便使用,三维模型的建模依然是一项被少数群体掌握的技术。

面向特定应用需求,研究人员提取三维模型所蕴含的语义信息,能有效利用语义信息实现三维建模。这种更高级的新型建模方法,智能化程度高,易用性强,用户参与程度低,能方便实现用户的建模意图。一个实例就是:在家具、机械等的人造模型的设计上,对于对称的部件,可充分利用对称性结构语义信息进行对称区域的建模。我国产学研界对此也达成共识,例如《国家中长期科学和技术发展规划纲要》明确指出:“……重点解决信息技术产品的可扩展性、易用性和低成本问题”。因此,研究这种更智能化的三维建模技术具有重要的科学意义和应用价值。

2 概念与内涵

2.1 三维模型的语义分析

迄今为止,计算机图形学尚未明确定义三维模型的语义信息这一概念。对于感知语义的三维建模工作,既有研究关注对三维模型的几何外形和结构组成的解释,该解释往往与模型的设计意图和功能相关。因而,三维模型的语义描述了人类关于其形状结构与功能设计的对应关系,这种对应关系是通过观察和识别大量三维模型过程中学习到的认知经验。因此,本文将三维模型的形状语义总结为:它描述了人类关于三维模型的视觉外形、结构、功能、领域相关以及它们之间联系的知识。

文献[2]以基于语义的模型检索为背景,将三维模型的形状知识按照由低到高分四个层次:视觉、结构、功能和领域知识。本文借鉴了这种分类方法,但本文以三维建模为背景,对各层次知识的解释与文献[2]有不同。图1描述了三维模型语义的层次结构图:

- 视觉(visual)知识处于三维模型语义的底层,它主要包括三维几何模型外观上体现出来的信息,如曲率(curvature)[3]、特征线(feature curves)[4]等。这些信息完全由模型曲面的内蕴或外蕴几何属性定义。视觉知识的提取、分析和处理是传统的低层次数字几何处理的主要研究内容,也是迈向高层次感知语义的三维建模的必经阶段;
- 结构(structure)知识是对三维模型组成部分的拓扑描述。结构知识的描述依赖于对三维模型的分割(segmentation)/分解(decomposition)[5]。模型分割是指根据一定的几何、拓扑或语义特征,将封闭的三维几何模型分解为一组数目有限、各自具有简单形状意义的、且各自连通的子部分。即,

模型分解将三维模型分解为相互独立的子部分的集合。需要指出的是，对称性（symmetry）[6] 作为一种特殊的形状知识，贯穿了由视觉到功能的各个层次。首先，对称性是几何属性，基于几何信息进行定义和检测。但是，对称性对于模型的结构分析具有重要作用。相比视觉感知，对称性可以更直接、更准确地反映模型的语义。故研究人员一般将其视作结构知识，将对称性与语义的关联知识运用到模型分割中，可以得到更有意义的分割结果。但是，不论是基于感知还是基于对称性，所涉及到的分割原则都是人类识别三维物体结构的经验规则。正因为如此，真正符合语义的分割原则很难用数学方法形式化地表达出来。尽管目前基于几何属性分析得到的结构知识距离语义还尚有差距，但是正如很多学者所认同的，结构分析是迈向功能语义分析的重要途径；

- 功能（functionality）知识是物体各部件的功能描述。在三维模型中，功能知识往往通过对分割出的功能部件进行语义标注（annotation/labeling）[7] 来表示的。因此，对三维模型的功能分析本质上是对模型各功能部件的识别，标注三维模型的功能部件，并探讨部件间的作用关系。为实现语义标注，仅仅基于几何属性显然是不够的，需要将模型的语义信息和几何属性的度量结合起来。
- 不同应用领域对三维模型的设计规范、工程参数等的约束构成了模型的领域知识。目前，围绕领域知识的分析大多数集中在如何以领域知识为引导，提取模型的相关特征并得到领域知识表示。典型的应用为 CAD 模型、人（human）[8] 和动态机械（mechanism）[9] 的建模。

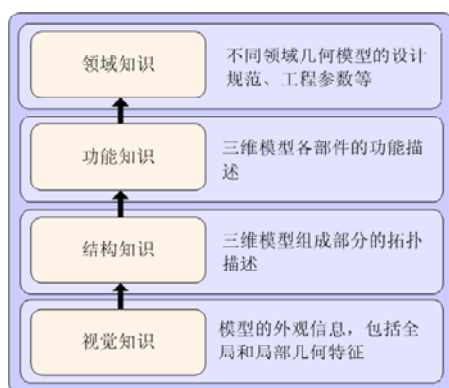


图 1. 三维模型的语义层次结构

Figure 1. The four-level framework of 3D model semantics

三维模型的语义分析是将形状知识与几何处理技术相结合，通过智能分析和学习等手段从三维模型中提取形状语义知识的过程。三维模型的语义分析主要研究三维模型的抽象描述、识别、分类和解释，其目标是对三维模型的理解，即在（半）自动分析和理解三维模型的结构、功能和领域等知识。当前研究的大多集中于模型分割[5] 以及对应关系计算[11] [12] 等方面。

2.2 感知语义的三维建模

语义分析的结果对于高层次的三维建模具有举足轻重的作用。众所周知，三维建模的主要方式包括：交互式编辑、模型生成、基于图像/点云的三维重建。我们分别讨论形状分析这几种建模方式中的应用。感知语义的三维建模主要体现在以下三个方面：

1) 感知语义的交互式编辑（editing）。通过对三维模型的语义分析，可以为用户提供更为高效、智能的辅助，以帮助用户（甚至是初级用户）更加方便、快速地编辑现有的三维模型。例如图 2（左）所示的椅子模型，在结构分析的基础上，实现感知结构的模型编辑，增强用户编辑的能力；

2) 感知语义的模型生成（creation）。模型生成亦需要对三维模型的高层次语义分析。例如，最近广受关注的建议式生成就是这方面的典型例子（图 2-中）：在分析同类三维模型集的结构的基础上，借助抽象的图

表示方法, 创建表征语义的概率模型。进而, 利用学习 (learning) 训练出的参数, 根据用户当前操作, 推断 (inferring) 出下一步合理的部件建议, 以启发用户的创作。

3) 感知语义的三维重建 (reconstruction)。在基于图像的三维重建中, 从图像中推断深度信息显然是一个病态问题, 其求解往往需要结合各种约束条件。感知语义的重建方法通过对辅助重建的三维几何模型进行形状和结构分析, 得到几何约束实现重建; 基于扫描获取的三维点云重建, 能够针对扫描数据不完整性和噪声等问题, 在满足视觉外形、结构、功能、领域相关等语义信息的前提下尽可能地逼近真实数据。以人体模型为例, 图 2 (右) 显示了该概念的基本原理: 不完美的原始数据是语义信息的验证基础, 语义信息则提供指导, 有效重建出原始数据所表示的目标三维模型。针对不完美的数据, 将视觉外形、结构、功能和领域等语义信息显示/隐式结合到虚拟人模型的重建过程中。



图 2. 感知语义的三维重建实例. 从左至右: 感知结构的编辑[23]、建议启示的生成[38]、基于单视角粗糙点云的个性化人体模型重建.

Figure 2. Semantic-aware 3D modeling examples. Left-to-right: structure-aware editing[23], creation with suggestion cues[38], and personalized avatar reconstruction from single-view coarse point set.

3 既有算法的分类

随着语义分析研究的深入和应用需求的拓展, 感知语义的三维建模在研究范围、研究对象、研究方法等各个方面都在进行发展。

- 研究内容由基于低层次形状表示的分析与识别, 发展为面向更高层次应用的结构和功能分析与理解, 乃至如何有效利用领域知识增强建模能力;
- 研究对象由原来的单个物体发展为模型集合和更复杂的三维场景上;
- 对于研究方法, 按照语义的表示和使用方式, 感知语义的三维建模则出现了数据驱动等方法;

下面, 通过对既有算法进行分类 (表 1), 本文将深入阐述感知语义的三维建模问题。对于每个算法, 描述的特征包括: 语义层次、建模类型、输入数据的类型与级别、交互程度、是否用到数据库和有监督学习、一句话简述。其中, 语义层次包括前文所定义的视觉、结构、功能和领域信息; 建模类型则涉及编辑、生成与重建; 对于数据类型, 则指的是基本的像素/点、分割好的部件/块、以及独立的对象; 交互程度则指的是自动的还是交互的。

对于视觉外形的语义分析, 已有采用学习机制加速特征线等几何特征的求解方法。如, [3] 基于独立成分分析 (Independent Component Analysis, ICA), 进行数据驱动的曲率求解, 用以实时绘制动态模型的特征线。主要处理的对象包括基于骨架的关节 (articulated)、衣服和基于 blendshape 的人脸等模型, 根据不同的对象分别构建 ICA 参数, 将对象的参数空间映射到曲率空间。[4] 将研究对象聚焦于建筑物模型的特征线分析, [13] 则利用两个/多个对象间在视觉上阻挡 (interference) 关系约束用户的编辑操作。

近期, 国际前沿的工作重心为如何分析更高级的结构、功能和领域方面的语义信息, 在下面的章节中对既有算法进行回顾和进一步划分。

表 1. 感知语义的三维建模算法分类表
Table 1. The classification of semantic-aware 3D modeling algorithms

| 分类 | 语义分析层次 | | | | 建模类型 | | | 人造数据? | 数据级别 | | | 智能化 | | 利用数据库? | 参数学习? | 一句话简述 |
|-----------|--------|----|----|----|------|----|----|-------|------|------|----|-----|----|--------|-------|--|
| 论文 | 视觉 | 结构 | 功能 | 领域 | 编辑 | 生成 | 重建 | | 像素/点 | 部件/块 | 对象 | 自动 | 交互 | | | |
| [3] | √ | | | | | | | | √ | | | √ | | √ | √ | 基于独立成分分析 (ICA)，进行数据驱动的曲率求解，用以实时绘制动态模型的特征线 |
| [4] | √ | | | | | | | √ | √ | | | √ | | √ | √ | 基于用户指定线特征学习出特征的 Markov 链模型参数，进而检测建筑物中相似线特征 |
| [6] | √ | √ | √ | | | | | | √ | √ | | √ | | | | 对称性分析综述 |
| [7] [21] | √ | √ | √ | | | | | | | √ | | √ | | √ | √ | 采用有监督学习机制实现标注分割 |
| [13] | √ | | | | √ | | | | | | √ | | √ | | | 利用两个/多个对象间的阻挡信息，约束用户的编辑，生成与特定场景相符的结果 |
| [14] | √ | √ | | | | | | | √ | | | √ | | √ | | 视觉感知模型的凹部，实现模型分解 |
| [15-19] | | √ | | | | | | √ | | √ | | √ | | √ | | 基于无监督学习，自动进行模型集一致分割 |
| [20] | | √ | √ | | | | | | | √ | | | √ | √ | | 引入用户约束，优化无监督一致分割结果 |
| [23-27] | | √ | | | √ | | | √ | | √ | | | √ | √ | | 感知结构，编辑单个模型 |
| [28] [29] | | √ | | | | √ | | | | √ | | | √ | √ | | 用户选取部件，交互式生成新模型 |
| [30] | | | | | | | | | | | | | | | | |
| [31] [32] | | √ | | | | √ | | | | √ | | √ | | √ | | 利用部件对应关系，演化生成新模型 |
| [33] [34] | | √ | | | | | √ | √ | √ | √ | | √ | | | | 利用几何基元的结构信息重建 CAD 模型 |
| [35] | | √ | √ | | | | | | | √ | | | √ | | | 交互式分割和本体驱动的交互式标注 |
| [36] | | | √ | | | | | | | √ | | | √ | | | 上下文启发的半自动标注 |
| [37] [38] | | | √ | | | √ | | | | √ | | | | √ | √ | 基于概率的启发式模型生成 |
| [39] | | | √ | √ | | √ | | √ | | | √ | √ | | √ | √ | 室内场景缺失对象的建议生成 |
| [40] [41] | | √ | √ | √ | | | √ | √ | | √ | | √ | | √ | | 利用关节等功能信息，约束重建过程 |
| [42] [26] | | √ | | √ | | √ | | √ | | √ | | | √ | √ | | 单视角点云/图像，半自动生成感知结构的人造模型 |
| [43] [44] | | √ | | √ | | | √ | √ | | | √ | | √ | √ | √ | 面向室内人造模型的不完美点云，重建满足结构约束的三维场景 |
| [45] | | | | | | | | | | | | | | | | |
| [46] [47] | | √ | √ | √ | | | √ | | | √ | | √ | | √ | √ | 人体几何外形重建及姿态还原 |
| [48] [49] | | | √ | √ | | √ | | | √ | | | √ | | √ | √ | 人体衣物的数据驱动生成 |
| [50] [51] | | √ | | √ | | | √ | | √ | | | √ | | √ | √ | 人体运动姿态的实时重建 |
| [52-55] | | √ | | √ | | | √ | √ | | | √ | √ | | √ | √ | 规则启发的人造场景过程式生成 |
| [58] [59] | | √ | | √ | √ | | | √ | | | √ | | √ | √ | √ | 数据驱动的材质属性编辑方法 |

3.1 结构语义层次

3.1.1 面向结构的语义分析

在结构语义的分析中，主要的工作为对称性检测[6] 和模型分割[5] 。

对称是自然界和人造物体中最为常见的几何现象，近几年被业界高度关注和系统研究。对称性分析是计算模型（或其子部分）到其自身的非平凡对应。对称性是一种连接几何形状和模型语义的桥梁：一方面，对称性是几何属性，其检测可以完全通过对模型几何属性的度量与分析实现；另一方面，对称性蕴含了形状结构，体现了设计意图，甚至暗示了部件功能。按照对称性定义所依赖的几何属性，可以将几何对称性分为外蕴和内蕴两种。外蕴对称的定义基于空间欧式距离，而内蕴对称基于内蕴距离，即曲面的测地距离。按照对称支撑范围的分布，对称又可以分为全局和局部两种。本文主要简介用于对称性检测的四种主要方法：

- 直接方法。直接方法对输入模型施加对称变换，然后将变换后的图像与原始图像进行比较。例如要检测反射对称，需先将模型关于某个平面做镜面反射变换，然后将反射后模型与原始模型比较，如果重叠区域较大，则说明输入模型关于上述平面反射对称。
- 选举策略。选举策略 (voting scheme) 基于以下事实提出：外蕴反射对称轴可以由对称物体上的一个点对唯一确定；类似地，外蕴旋转对称中心可以由两个点对唯一确定。例如，利用选举策略检测三维反射对称时，首先要在模型空间采样并测试很多点对，每个点对利用它们之间的对称轴为二维

空间上的有向直线“投票”。最终得分最高的平面很可能是输入模型的反射对称面。选举方法的优点是对噪声和数据缺失不敏感,具有较好的鲁棒性。但其缺点是计算复杂度高。

- 全局方法。它类似于全局形状分析,即通过计算全局的对称描述子(symmetry descriptor)来度量和分析形状的全局对称性,用于模型的全局对称的检测。
- 局部方法。局部方法用于局部对称性的检测,主要包括对称轴变换(symmetry axis transform)和广义带(generalized ribbons)两种。对称轴变换即著名的中轴变换,它是一个二维(三维)形状的所有内接圆球中心的轨迹。中轴变换是对形状的局部旋转对称的一种紧凑表示。广义带是广义圆柱的扩展版本。它由一条曲线作为脊(spine),使用一条产生线段(generator segment)沿脊以固定夹角扫描生成。脊可以是任意曲线,产生线段为从脊上任意一点出发的三维曲面的测地线,长度亦可以变化。

模型分割本身体现了对三维内容的理解。早期的模型分割大多基于视觉感知,试图将模型分割为若干个凸子部分。分割依据来源于人类视觉系统感知三维物体子部分的方法。例如,在分割一个三维物体时,倾向于在凹形区域做切割[14]。综述[5]详细讨论了传统的视觉分割方法。最近提出的一致分割(consistent segmentation)可以在分割的基础上进一步得到部件的组织结构。此外,由于部件具有语义信息,面向部件匹配的对应该计算[11][12]也被同时关注。研究对象由原来的面向单个物体发展为模型集。下面,面向模型集,阐述如何完成感知结构的模型分割。根据学习方法,既有的工作可划分为无监督和有监督两类:

- 无监督机制。基于联合分析的一致分割对分析一类物体的结构和功能具有重要意义。开创性工作[15]通过全局刚性对准得到一致分割,并在分割的基础上进一步得到部件的组织结构。在一致分割的后继工作中,风格聚类[16]、谱聚类[17]、子空间聚类[18]、基于线性规划的联合分割[19]等都属于无监督学习的方法。在无监督学习中,人类只赋予计算机学习样本,但无样本标注(label)或分类信息。无监督学习不依赖预先定义的类或带类标注的训练实例,需要通过聚类学习等方法自动确定标注。但无监督的分割方法自动生成的结果还不够完美,故[20]在优化过程中将用户交互指定的对应关系作为约束,得到了更合理的分割结果。
- 有监督方法。[7]提出了第一个基于有监督学习的模型标注分割(labeled segmentation)方法。有监督的机器学习(supervised learning)的基本思想是首先定义形状的若干局部几何特征,通过训练数据(training data)隐式地给出模型上局部的几何特征与该部分的标注值之间的关联。标注分割在分割的同时为每个子部分赋予一个标注,对应于模型的某一功能部件。[21]将匹配形状之间的几何相似性与知识驱动的学习结合起来改进分割和标注,[22]进一步将学习过程变为半监督方式,以简化用户的标注难度。

3.1.2 感知结构的建模

交互式编辑是用户通过编辑现有几何模型表达想象力的过程。感知驱动的交互式编辑的目标是通过预先分析或学习到的形状语义知识,结合用户的操作意图,高效地辅助用户表达自己的设计想法。感知结构对于三维人造物体模型的交互式编辑非常重要。例如,如果输入桌子模型的四条腿原本是对称的,那么当用户编辑其中的一条时,形变计算应该智能地将该编辑对称地应用到其它腿上,从而保持原有的对称结构。为实现结构保持的模型编辑,需要对输入模型进行结构分析以得到结构约束。开创性工作 iWires 中最早提出了先分析后编辑(analyze-and-edit)的感知结构的编辑方式[23],后继工作[24][25][26][27]进一步分析结构信息,优化编辑操作,生成更合理的结果。

模型生成是从一种从无到有的建模方法,主要有交互和自动两种方式。1)对于交互方式,易用的智能型交互界面是重要的方面。先驱工作为基于样例的几何建模(Modeling by Example)[28],用户根据设计概念(如参考图片),从模型数据库中逐一检索所需部件,然后将这些部件交互式地组装成一个新模型。[29]采用了数据驱动的方法提供生成建议(creative suggestion),即根据初始设计概念或正在建造中的模型,从数据库中搜索出的用于提示和启发用户的相关部件,合成新模型。[30]进一步将重量和支撑约束加入到家具的生成建议中;2)对于自动的方式,用户几乎不干预生成过程。针对两个同类的模型,利用已经分割部件间的

对应关系和结构特征, [31] 自动合成保持结构语义的新模型, 生成的结果与 morphing 有相似之处; [32] 则面向同类模型集, 利用部件外形的演化变形与部件组合变异的思想, 自动生成具有遗传、变异思想的模型集。

感知结构的重建方法特色在于利用结构语义有效完成建模。[33] 使用广义圆柱体生成管状模型, 从而使得重建的模型满足探测出的管状结构下最大程度地忠实于采样数据。[34] 进一步强化了感知结构的想法, [34] 在人造模型的基元(平面、球、圆柱和圆锥等)拟合过程中, 利用了基元间通常存在的平行、垂直和对齐等结构关系, 提出了一种从点云拟合基元的感知结构重建算法, 拟合结果既忠实于采样数据也满足结构关系。实验结果表面, 感知结构的重建算法在原始点云存在大量噪声、异常点和非均匀采样的情况下依旧具有很好的鲁棒性。

3.2 功能语义层次

三维模型的功能语义分析过程中, 既有工作多关注于如何正确标注模型的部件。前面论述的有监督学习标注方法[7] [21] 是与结构分析过程下的模型分解结合在一起的, 试图通过机器学习的方法直接解决功能语义分割的问题。因而, 好的训练数据是该自动方法成功的关键。此外, 也可以通过手工直接实现标注, 如[35] 提出了一种本体驱动(ontology-driven)的交互式标注技术, 并开发了一种形状标注器。该方法通过分析每个部件的拓扑结构和几何特征, 自动计算部件属性和部件之间的连接关系。但是, 交互式方法对用户的要求较高, 需要繁琐的标记过程。为此, 上下文启发的半自动标注方法[36] 是一种折中方案。

基于各部件间的功能关系, 可以有效启发用户建模过程。众所周知, 哺乳动物一般包括头、躯干、四肢等功能部件。那么, 对于部件合成的建模: 若出现头, 下一步建立躯干的概率要高于四肢, 更高于桌、椅的部件。感知功能的建模方法[37]、[38] 和[39] 就利用了这一基本思想, 通过分析部件/对象之间的上下文关系, 构建表示模型/场景的描述符, 使用同类模型集的概率模型进行建模。其中, [37] 交互式生成单个模型, [38] 自动生成多个模型, [39] 则面向室内办公场景查询缺失对象并提供建议。

[25]、[40] 和[41] 则对(准)机械模型展开功能分析并完成相应的建模工作。他们功能分析的基本思想是, 针对某类模型, 利用物理模拟的方法“实践”该类人造物体的某项功能, 以验证输入模型是否具有该项功能, 并通过分析模拟中的相关参数得到模型的详细功能描述。以此为基础, [25] 提出了感知关节的编辑方法。[25] 以各关节的自由度为形变约束, 实现了符合关节自由度约束的交互式形变。该思想被融入到关节模型[40] 的重建中, 降低了重建过程中求解空间的维度。[9] 与[41] 的技术发展脉络与之类似, [9] 分析了机械模型可能的传导、接触等功能约束, [41] 则将至于模型的重建中。

3.3 领域语义层面

领域语义反映了研究人员面向特定模型种类提取和使用的具体信息。以此观点, 前文所涉及的特定模型(集)的结构和功能方法也归属于领域范围。当前, 研究人员重点对人造模型和人进行了语义分析工作。

预先分析人造模型的结构信息, [26] 通过生成候选模型集的几何变异(variation), 得到与图像中物体相近的三维模型。[42] 则将输入数据更改为信息 RGBD 设备 Kinect 所捕获的单视角粗糙点云, 在技术层面, 目标模型不是候选模型的变异, 而是结构部件的候选组装方案。同时, [43] [44] [45] 也关注了如何面向粗糙原始数据重建室内场景, 但实现方案不同: [43] 通过场景层面的学习, 构建了包含场景中桌、椅等对象的重复性和对象内各部件间的结构关系的抽象模型, 进而快速识别新输入场景, 并用对象变异重建出合理的场景; [44] 利用了室内场景的先验数据库, 对场景中的显著对象, 检索出最大概率的候选对象, 进而通过部件级别的变形实现与场景的匹配, 上述检索-分类(search-classify)过程迭代执行, 自动实现场景的分割与对象分类; [45] 则将用户的交互加入到场景的分割中, 对分割的区域, 变形从先验数据库中检索出的候选对象完成匹配, 重建出室内场景。

形体还原及人物动画(SCAPE, Shape Completion and Animation of People) [46] 基于 3D 扫描、动作捕捉等技术, 构建高质量的人体数据库, 进而提取出人的形体与姿态的参数化模型, 通过形体的部分数据还原出形体全貌; 通过这种技术配合动作捕捉, 还可以在模型动画方面实现平滑的过渡, 也就是通过一个动作数据而应用在不同的人物身上。基于 SCAPE 模型, 不再使用标记点, [47] 尝试了从单张深度图像自动重建人

体模型,使用一套复杂的优化方程来求解最优的 SCAPE 模型的参数,优化过程中考虑了包括轮廓线、身高和单视角点云在内的一系列约束。

[48] 将 SCAPE 参数化模型修改为人体衣物模型,以实时生成不同形体和姿态下的真实感衣物,衣物的褶皱(wrinkle)则用数据驱动方法[49]来实时生成。

为了实时重建人体的运动姿态,[50]通过极限随机森林分类器划分单视角点云,进而识别姿态、生成人体骨架。后继工作[51]提出了基于最大后验概率的姿态跟踪方法,将跟踪与姿态检测相结合,获得了某些场景下比[50]更优的人体姿态生成结果。

需要点明的是,由于利用规则建立特定类型的模型,故我们将基于规则的建模方式划分在感知范围。基于规则的知识驱动又称为过程式(procedural)方法。过程式形状分析方法将关于形状的外形、结构、功能以及它们之间的关系表述为规则或语法,通过计算机执行这些规则来生成新的模型。例如,对于家具模型,[52]基于过程式结构分析研究了如何自动生成可用于加工制造的部件和连接器;[53]则面向建筑物,分析样例模型(exemplar)的局部外蕴对称结构,得到严格保持局部相似性的形状修改规则,并基于此提取出一组形状语法(shape grammar)来描述输入样例。该形状语法可以用来生成局部结构与输入样例模型相近的新模型。[54]和[55]进一步通过分析建筑群乃至城区的过程式规则,进而生成规划合理的建筑群。[56]和[57]则面向室内场景,以规则启发家具的布局。

3.4 讨论

感知语义的建模工作正式起步于2009年,随后3年,研究范围从结构推广到功能和领域等方面。此外,三维模型表面属性(如颜色、材质、纹理等)展示了模型的丰富细节,使得建立的三维模型更加生动逼真,并有助于创意设计。因此,三维模型表面属性的建模工作也正在步入和促进感知语义的潮流,[58][59]基于模型属性分析获取的语义信息,探讨更逼真的交互式属性编辑和智能建议等新型解决方案。

图3说明了发表论文的分类统计情况。由于存在对称性[6]、对应关系计算[11][12]等最新综述文献,故图3中并未统计上述两个方面的工作。而人体、衣物、建筑物和材质等的建模为经典的领域方向的研究内容,表3仅统计了本文选取的代表性工作。此外,本文重点关注SIGGRAPH、SIGGRAPH ASIA等会议上的最新原创论文,故论文的选取过程中存在遗漏。正如前文所述,领域方面的工作往往与结构和功能紧密结合,有些工作也兼具功能与结构等方面,故对于表1中的论文,图3以论文所涉及的语义最高层次进行划分。正如图3所示,感知语义的研究工作逐年迅速增长,正处于快速的发展期。根据SIGGRAPH发表论文的经验,一个技术主题的生命周期为5-10年,故感知语义的相关工作是国际前沿的热点研究课题之一。

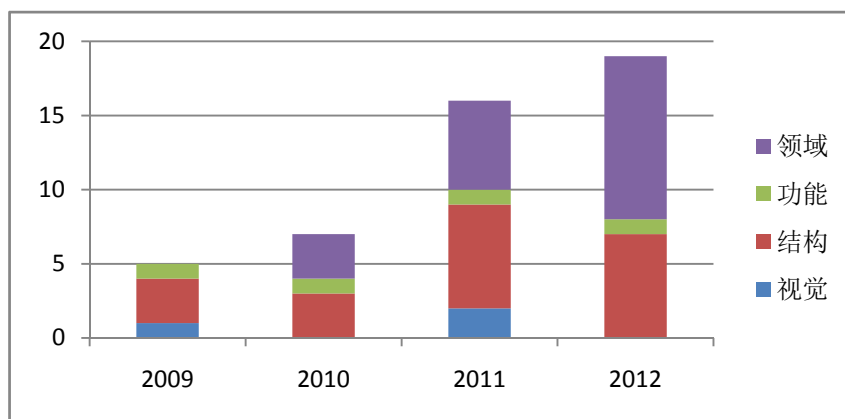


图3. 感知语义的三维建模论文发表情况

Figure 3. The statistics of published semantic-aware algorithms

当前,三维模型的语义分析研究所面临诸多问题。例如,作为语义分析的基础,感知语义的三维模型表

示方法非常重要，传统三维模型表示方式（如表面网格、隐式曲面等）无法有效集成语义信息，迫切需要一种感知语义的结构化描述方式。此外，如何充分利用已有的大规模数据，研究有效的数据驱动形状分析是当前形状分析领域极具挑战性的问题之一。

简而言之，感知语义的三维建模的预期目标为：编辑的智能性、生成的启发性、重建的有效性。其中，智能性是指编辑过程中，充分利用结构、功能和领域信息，降低用户操作的难度；启发性指生成模型过程中具有很好的启发信息，建议合理的预期模型部件，辅助用户完成新的创作意图；有效性则面对低成本三维扫描设备获取的原始数据不理想的现状，改变传统重建方法直接在原始数据基础上处理的思路，升级为满足语义信息约束下的有效重建。

4 代表性算法分析

下面，将以代表性的个例算法为对象，简述其基本思想和实现方案，以启发后继工作。

针对三维人造物体模型，[23] 首先提取出所有特征曲线（feature curve），然后分析每条特征曲线的形状特征以及特征曲线之间的结构关系（如平行、正交、对称等），作为输入模型的广义语义描述。在编辑过程中，用户交互式地操纵某一条曲线，系统通过优化所有特征曲线的形状特征和相互关系来自动计算正确的模型结构。[24] 进一步提出以基元形状（primitive shape）作为形变控制单元，通过保持控制单元的形状特征和相互关系实现感知结构的形变。[26] 实现了轮廓驱动的结构保持形变。该方法根据图像轮廓自动计算控制单元（广义圆柱体）的形状、位置、方向和大小，使用一种迭代式优化算法同时优化所有控制单元得到合理的三维模型。

对同类模型集合的一致分解可以反映同类模型的功能部件结构分解与对应计算。[16] 首次研究了同类三维模型集合的联合语义分析，提出了一种基于风格-内容的联合分析框架，实现了模型“风格”（功能部件的相对尺度比例）与“内容”（几何外形和部件构成）的分离，得到输入模型集合的一致分解。在此基础上，提出了基于形状风格转移的三维模型自动合成算法，该算法以分析后的同类物体模型集为输入，通过对应部件尺度缩放实现模型之间的形状风格转移，以自动生成新的三维模型。基于联合分析得到的模型集语义信息，借助更丰富的图像，提出了图像启发的数据驱动三维生成方法[26]。[26] 以预先经过语义分析的候选三维模型集为基础，通过生成候选模型的“deform-to-fit”变异，得到与图像中物体相近的三维模型。“deform-to-fit”变异技术被[44] 所采纳，以生成合理的三维室内场景。

对于结构相似、部件几何有变异的同类模型集，[29] 提出了数据驱动的开放式（open end）生成方法。在开放式生成中，用户既没有现成的模型可以编辑，也没有建模目标作为指导，是一种自由式的创造性生成过程。开始建模时，用户仅仅通过基元形状提供一个粗略的设计概念，建模系统根据这一设计概念自动为用户提供建议部件，让用户选择并搭建出三维模型。[37] 进一步用已标记的模型集限制了数据驱动中概率模型[29] 的构建，将部件属性和部件之间的连接关系加入到以 Bayesian 网络表示的概率模型中。[37] 利用学习机制，用模型集训练概率模型。从而，用户在生成新模型过程中，概率模型可根据当前用户的操作部件做出推断（inference），启发用户的创作。[38] 进一步学习了同类模型集的结构和几何变异特征，在结构稳定的假设下，最大化特定概率模型的边缘相似性（marginal likelihood），确定各部件的风格等参数，从而合成新模型，扩大同类模型集中模型的数目。

[25] 针对带有关节的机械模型（如机器人、机械手臂等）提出了感知关节的形变模型。该方法对输入模型进行关节分析得到关节约束，即借助相邻部件的刚性接触模拟（rigid contact simulation）来自动检测关节的运动自由度。在交互式编辑中，关节约束确保了各个部件的合理运动，用户无需逐个调整每个部件的姿态。[9] 深入分析了机械模型的关节特征，构建了机械模型的图表示，图的节点为机械部件（如轴、齿轮、皮带）和运动属性（如旋转、齿轮运动），图的边则描述了部件如何交互形成机械运动。更进一步，[41] 提出了运动导向的机械玩具模型设计算法。用户仅需设计最终动画，算法可以自动随机搜索机械零件的组合及其参数以生成用户所需动画，减少了用户在机械玩具设计时的工作量。由于机械模型比桌椅等人造模型更复杂，其研究也更具挑战性，很多问题也亟待研究。

5 结束语

目前,几何建模与处理的研究正由低层次的几何属性度量与分析逐步转向高层次的感知语义的层面上来。以此现实背景,本文阐述了感知语义的三维建模技术发展动态,解析了三维模型的语义分析等基本概念,对有影响力的工作进行了分类,重点总结三维模型的视觉外形、结构、功能和领域知识的提取方法,探讨了语义是如何用于三维模型的编辑、生成和重建等建模过程中的,并分析了代表性算法的实现方案和借鉴意义。

致谢 在此,我们向对本文的工作给予支持和建议的中南可视计算协同创新中心成员,尤其是姜巍、陈寅、李俊、林帅、赖超等表示感谢。

References:

- [1] Kai Xu. Semantics Driven 3D Shape Analysis and Modeling. Ph.D Thesis, National University of Defense Techonlogy, 2011.
- [2] Xiang Pan, Sun-Yuan Zhang, Xie-Zi Ye. A survey of content-based 3D model retrieval with semantic features. Chinese Journal of Computers, 2009, 32(6): 1069-1079.
- [3] Evangelos Kalogerakis, Derek Nowrouzezahrai, Patricio Simari, James McCrae, Aaron Hertzmann, Karan Singh. Data-driven curvature for real-time line drawing of dynamic scenes. ACM Transactions on Graphics, 2009, 28(1): 11.
- [4] Martin Sunkel, Silke Jansen, Michael Wand, Elmar Eisemann, Hans-Peter Seidel: Learning Line Features in 3D Geometry. Computer Graphics Forum, 2011, 30: 267-276.
- [5] Ariel Shamir. A Survey on Mesh Segmentation Techniques. Computer Graphics Forum, 2008, 27(6):1539~1556.
- [6] Niloy J. Mitra, Mark Pauly, Michael Wand, Duygu Ceylan. Symmetry in 3D Geometry: Extraction and Applications. Computer Graphics Forum, 2013.
- [7] Evangelos Kalogerakis, Aaron Hertzmann, Karan Singh. Learning 3D mesh segmentation and labeling. ACM Transactions on Graphics. 2010, 29(4): 102.
- [8] Lifeng Ren, Zhigen Pan, Jiejie Zhu, Hongwei Yang. Avatar in virtual environments: research and progress. Computer Engineering and application, 2008, 44(10): 1-5.
- [9] Niloy J. Mitra, Yong-Liang Yang, Dong-Ming Yan, Wilmot Li, Maneesh Agrawala. Illustrating How Mechanical Assemblies Work. ACM Transactions on Graphics, 2010, 29(4): 58.
- [10] Tangelder J., Veltkamp R. A Survey of Content Based 3D Shape Retrieval Methods [J]. Multimedia Tools and Applications, 2008, 39(3):441-471.
- [11] Oliver van Kaick, Hao Zhang, Ghassan Hamarneh, Daniel Cohen-Or. A survey on shape correspondence. Computer Graphics Forum, 2010, 30(6): 1681-1707.
- [12] Gary Tam, Zhi-Quan Cheng, Yu-Kun Lai, Frank Langbein, Yonghuai Liu, David Marshall, Ralph Martin, Xianfang Sun and Paul Rosin. Registration of 3D Point Clouds and Meshes: A Survey from Rigid to Non-Rigid. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2013.
- [13] David Harmon, Daniele Panozzo, Olga Sorkine-Hornung, Denis Zorin. Interference Aware Geometric Modeling. ACM Transactions on Graphics, 2011, 30(6): 137.
- [14] Oscar Kin-Chung Au, Youyi Zheng, Menglin Chen, Pengfei Xu, Chiew-Lan Tai. Mesh Segmentation with Concavity-Aware Fields. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2012, 18(7): 1125-1134.
- [15] Aleksey Golovinskiy, Thomas Funkhouser. Consistent segmentation of 3D models. Computers & Graphics, 2009, 33(3):262-269.
- [16] Kai Xu, Honghua Li, Hao Zhang, Daniel Cohen-Or, Yueshan Xiong, Zhi-Quan Cheng: Style-content separation by anisotropic part scales. ACM Transactions on Graphics, 2010, 29(6): Article No. 184.
- [17] Oana Sidi, Oliver van Kaick, Yanir Kleiman, Hao Zhang, Daniel Cohen-Or. Unsupervised Co-Segmentation of a Set of Shapes via Descriptor-Space Spectral Clustering. ACM Transactions on Graphics, 2011, 30(6), 126:1-10.
- [18] Ruizhen Hu, Lubin Fan, Ligang Liu. Co-Segmentation of 3D Shapes via Subspace Clustering. Computer Graphics Forum, 2012, 31(5): 1703-1713.

-
- [19] Qixing Huang, Vladlen Koltun, Leonidas Guibas. Joint-Shape Segmentation with Linear Programming. *ACM Transactions on Graphics*, 2011, 30(6), 125:1-11.
 - [20] Yunhai Wang, Shmulik Asafi, Oliver van Kaick, Hao Zhang, Daniel Cohen-Or, and Baoquan Chen. Active Co-Analysis of a Set of Shapes. *ACM Transactions on Graphics (Special Issue of SIGGRAPH Asia)*, 2012, 31(6): 165.
 - [21] Oliver van Kaick, Andrea Tagliasacchi, Oana Sidi, Hao Zhang, Daniel Cohen-Or, Lior Wolf, and Ghassan Hamarneh. Prior Knowledge for Part Correspondence. *Computer Graphics Forum (Special Issue of Eurographics)*, 2011, 30(2): 553-562.
 - [22] Jiajun Lv, Xinlei Chen, Jin Huang, Hujun Bao: Semi-supervised Mesh Segmentation and Labeling. *Computer Graphics Forum*, 2012, 31(2): 2241-2248.
 - [23] Ran Gal, Olga Sorkine, Niloy J. Mitra and Daniel Cohen-Or. iWIRES: An Analyze-and-Edit Approach to Shape Manipulation. *ACM Transactions on Graphics*, 2009, 28(3): 33.
 - [24] Youyi Zheng, Hongbo Fu, Daniel Cohen-Or, Oscar Kin-Chung Au, and Chiew-Lan Tai. Component-wise controllers for structure-preserving shape manipulation. *Computer Graphics Forum (Eurographics)*, 2011, 30(2): 563-572.
 - [25] Weiwei Xu, Jun Wang, KangKang Yin, Kun Zhou, Michiel van de Panne, Falai Chen, Baining Guo: Joint-aware manipulation of deformable models. *ACM Transactions on Graphics*, 2009, 28(3): 35.
 - [26] Kai Xu, Hanlin Zheng, Hao Zhang, Daniel Cohen-Or, Ligang Liu, Yueshan Xiong: Photo-inspired model-driven 3D object modeling. *ACM Transactions on Graphics (Proceedings SIGGRAPH)*, 2011, 30(4): No. 80.
 - [27] Yanzhen Wang, Kai Xu, Jun Li, Hao Zhang, Ariel Shamir, Ligang Liu, Zhi-Quan Cheng, Yueshan Xiong: Symmetry Hierarchy of Man-Made Objects. *Comput. Graph. Forum*, 2011, 30(2): 287-296.
 - [28] Thomas Funkhouser, Michael Kazhdan, Philip Shilane, Patrick Min, William Kiefer, Ayellet Tal, Szymon Rusinkiewicz, and David Dobkin. Modeling by Example. *ACM Transactions on Graphics*, 2004, 23(3):652-663.
 - [29] Siddhartha Chaudhuri, Vladlen Koltun. Data-Driven Suggestions for Creativity Support in 3D Modeling. *ACM Transactions on Graphics*, 2010, 29(6): 183.
 - [30] Nobuyuki Umetani, Takeo Igarashi, Niloy J. Mitra. Guided exploration of physically valid shapes for furniture design. *ACM Transactions on Graphics*, 2012, 31(4): 86.
 - [31] Arjun Jain, Thorsten Thormahlen, Tobias Ritschel, Hans-Peter Seidel. Exploring Shape Variations by 3D-Model Decomposition and Part-based Recombination. *Computer Graphics Forum*, 2012, 31(2): 631-640.
 - [32] Kai Xu, Hao Zhang, Daniel Cohen-Or, and Baoquan Chen. Fit and Diverse: Set Evolution for Inspiring 3D Shape Galleries. *ACM Transactions on Graphics*, 2012, 31(4): 57:1-57:10.
 - [33] Guo Li, Ligang Liu, Hanlin Zheng, Niloy J. Mitra. Analysis, Reconstruction and Manipulation using Arterial Snakes. *ACM Transactions on Graphics*, 2010, 30(6): 152.
 - [34] Yangyan Li, Xiaokun Wu, Yiorgos Chrysanthou, Andrei Sharf, Daniel Cohen-Or, Niloy J. Mitra. GlobFit: consistently fitting primitives by discovering global relations. *ACM Transactions on Graphics*, 2011, 30(4): 52.
 - [35] Marco Attene, Francesco Robbiano, Michela Spagnuolo, Bianca Falcidieno: Characterization of 3D shape parts for semantic annotation. *Computer-Aided Design*, 2009, 41(10): 756-763.
 - [36] Lior Shapira, Shy Shalom, Ariel Shamir, Daniel Cohen-Or. Contextual Part Analogies in 3D Objects. *International Journal of Computer Vision*. 2010, 89(2): 309-326.
 - [37] Siddhartha Chaudhuri, Evangelos Kalogerakis, Leonidas Guibas, and Vladlen Koltun. Probabilistic Reasoning for Assembly-Based 3D Modeling. *ACM Transactions on Graphics*, 2011, 30(4): 35.
 - [38] Evangelos Kalogerakis, Siddhartha Chaudhuri, Daphne Koller, and Vladlen Koltun. A Probabilistic Model for Component-Based Shape Synthesis. *ACM Transactions on Graphics*, 2012, 31(4): 55.
 - [39] Matthew Fisher, Manolis Savva, and Pat Hanrahan. Characterizing Structural Relationships in Scenes Using Graph Kernels. *ACM Transactions on Graphics*, 2011, 30(4), 34:1-11.
 - [40] Will Chang and Matthias Zwicker. Global Registration of Dynamic Range Scans for Articulated Model Reconstruction. *ACM Transactions on Graphics*, 2011, 30(3): 26.
 - [41] Lifeng Zhu, Weiwei Xu, John Snyder, Yang Liu, Guoping Wang, Baining Guo: Motion-guided mechanical toy modeling. *ACM Transactions on Graphics*, 2012, 31(6): 127.

- [42] Chao-Hui Shen, Hongbo Fu, Kang Chen, and Shi-Min Hu. Structure Recovery by Part Assembly. *ACM Transactions on Graphics* 2012, 31(6): Article 180.
- [43] Young Min Kim, Niloy J. Mitra, Dong-Ming Yan, Leonidas J. Guibas. Acquiring 3D indoor environments with variability and repetition. *ACM Transactions on Graphics*, 2012, 31(6): 138.
- [44] Liangliang Nan, Ke Xie, Andrei Sharf: A search-classify approach for cluttered indoor scene understanding. *ACM Transactions on Graphics* 2012, 31(6): Article 137.
- [45] Tianjia Shao, Weiwei Xu, Kun Zhou, Jingdong Wang, Dongping Li, Baining Guo: An interactive approach to semantic modeling of indoor scenes with an RGBD camera. *ACM Transactions on Graphics*, 2012, 31(6): 136.
- [46] Dragomir Anguelov, Praveen Srinivasan, Daphne Koller, Sebastian Thrun, Jim. Rodgers, James Davis. SCAPE: shape completion and animation of people. *ACM Transactions on Graphics*, 2005, 24(3): 408-416.
- [47] Alexander Weiss, David A. Hirshberg, Michael J. Black: Home 3D body scans from noisy image and range data. In *Proc. ICCV*, 2011, 1951-1958
- [48] Peng Guan, Loretta Reiss, David A. Hirshberg, Alexander Weiss, Michael J. Black. DRAPE: DRessing Any PErson. *ACM Transactions on Graphics*, 2012, 31(4): 35.
- [49] Edilson de Aguiar, Leonid Sigal, Adrien Treuille, Jessica K. Hodgins. Stable Spaces for Real-time Clothing. *ACM Transactions on Graphics*, 2010, 29(4): 106.
- [50] Jamie Shotton, Andrew Fitzgibbon, Mat Cook, Toby Sharp, Mark Finocchio, Richard Moore, Alex Kipman, and Andrew Blake. Real-time human pose recognition in parts from a single depth. *Proc. CVPR*, 2011.
- [51] Xiaolin Wei, Peizhao Zhang, Jinxiang Chai. Accurate Realtime Full-body Motion Capture Using a Single Depth Camera. *ACM Transactions on Graphics*, 2012, 31(6): 188.
- [52] Manfred Lau, Akira Ohgawara, Jun Mitani, Takeo Igarashi: Converting 3D furniture models to fabricatable parts and connectors. *ACM Transactions on Graphics*, 2011, 30(4): 85
- [53] Martin Bokeloh, Michael Wand, Hans-Peter Seidel. A Connection between Partial Symmetry and Inverse Procedural Modeling. *ACM Transactions on Graphics*, 2010, 29(4): 104.
- [54] Paul Merrell, Eric Schkufza, and Vladlen Koltun. Computer-Generated Residential Building Layouts. *ACM Transactions on Graphics*, 2010, 29(6): 181.
- [55] Carlos A. Vanegas, Ignacio Garcia-Dorado, Daniel Aliaga, Bedrich Benes, Paul Waddell. Inverse Design of Urban Procedural Models. *ACM Transactions on Graphics*, 2012, 31(6): 168.
- [56] Matthew Fisher, Daniel Ritchie, Manolis Savva, Thomas Funkhouser, and Pat Hanrahan. Example-based Synthesis of 3D Object Arrangements. *ACM Transactions on Graphics*, 2012, 31(6): 135.
- [57] Paul Merrell, Eric Schkufza, Zeyang Li, Maneesh Agrawala, and Vladlen Koltun. Interactive Furniture Layout Using Interior Design Guidelines. *ACM Transactions on Graphics*, 2011, 30(4): 87.
- [58] Chuong Nguyen, Tobias Ritschel, Elmar Eisemann, Karol Myszkowski, Hans-Peter Seidel. 3D Material Style Transfer. *Computer Graphics Forum*, 2012, 31(2): 431-438.
- [59] Arjun Jain, Thorsten Thormählen, Tobias Ritschel, Hans-Peter Seidel. Material Memex: Automatic Material Suggestions for 3D Objects. *ACM Transactions on Graphics*, 2012, 31(5): 143.

附中文参考文献:

- [1] 徐凯. 语义驱动的三维形状分析及建模. 博士学位论文, 国防科技大学, 2011.
- [2] 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.
- [19] 任利锋, 潘志庚, 朱杰杰, 杨宏伟. 虚拟环境中虚拟化身技术的研究与进展. *计算机工程与应用*, 2008, 44(10): 1-5.