计算机快速建筑建模方法综述

李尚林[1),2)] 谢文军[1)] 李 琳[1)] 贾 伟[1)] 刘晓平[1)]

[1)](合肥工业大学计算机与信息学院 合肥 230009)

[2)](湘南学院软件与通信工程学院 湖南 郴州 423000)

摘 要 随着交互式 3D 图形学技术的高速发展,以及人们对虚拟现实、数字化城市、数字化文化遗产保护等需求的日益增长,耗时而低效的传统手工建筑建模方法已经远远无法满足应用市场的需求,快速化、智能化、自动化的建筑建模方法开始逐渐受到人们重视.建筑建模是一个面向应用的综合性研究领域,根据不同的应用场景,其研究方法覆盖多个技术领域和学科.本文对主流建筑建模方法的技术特点、研究现状以及应用背景等多个角度做了比较全面的综述.首先,从不同的学科角度和技术角度讨论了建筑建模方法的特点;其次,对建筑建模技术中以过程建模方法、图像建模方法、点云建模方法为主的三大流派,以及近几年来备受关注和充满挑战的逆向过程建模方法做了详细的概述;然后,针对建筑建模的子问题——建筑内部空间布局,以及建筑与城市的布局问题展开讨论;最后,分析了建筑建模技术存在的问题和挑战,以及对未来的发展趋势做出了预测.

关键词 建筑建模;过程建模;图像建模;点云建模;建筑布局;城市建模

中图法分类号 TP391 **DOI 号** 10.11897/SP.J.1016.2019.01966

Computer Rapid Modeling Methods of Architecture: A Review

LI Shang-Lin[1),2)] XIE Wen-Jun[1)] LI Lin[1)] JIA Wei[1)] LIU Xiao-Ping[1)]

[1)](*School of Computer and Information, Hefei University of Technology, Hefei* 230009)

[2)](*School of Software and Communication Engineering, Xiangnan University, Chenzhou, Hunan* 423000)

Abstract Computer modeling of architecture has been studied for more than 20 years. It is well known that building modeling is a very import issue in virtual reality, digital city and digital cultural heritage protection. In recent years, there are rapidly growing demands of building modeling technology in our society. However, traditional manual building modeling methods are too time-consuming and inefficient to meet the needs of the market. These professional modeling software systems, such as Autodesk 3ds Max, Maya or Google SketchUp, are tedious and require the user to have well-developed artistic skills. Moreover, the quality of the results relies on the user's ability. As a result, rapid, intelligent and automatical modeling of buildings, which can be short for RMB, have been received more and more attentions. RMB is the automatic or interactive modeling of buildings using computer graphics technologies. Such buildings to be modeled include virtual buildings as well as actual historical and urban city buildings. Generally, the rapid modeling of architecture is an application-oriented interdisciplinary research area, that is, its research covers a wide range of technical fields and disciplines. In this paper, we try to make a comprehensive survey on rapid architecture modeling technology. Particularly, in this survey, the data source, technical characteristics, research status and various application background of rapid

收稿日期:2018-03-23;在线出版日期:2019-04-11.本课题得到国家重点研发计划(2016YFC0800100)、国家自然科学基金(61673157,61602146)、安徽省青年自然科学基金(JZ2015AKZR0664)、湖南省青年自然科学基金(2019JJ50564)资助.**李尚林**,博士,主要研究方向为计算机图形学、快速建模.E-mail:lsldd@163.com.**谢文军**,博士,主要研究方向为计算机图形学、计算机动画.E-mail:wjxie@hfut.edu.cn.**李 琳**,博士,副教授,主要研究方向为虚拟现实、计算机动画.**贾 伟**,博士,副研究员,主要研究方向为计算机视觉、模式识别.**刘晓平**(通信作者),博士,教授,博士生导师,中国计算机学会(CCF)杰出会员,主要研究领域为计算机辅助设计、计算机图形学.E-mail:lxp@hfut.edu.cn.

architecture modeling are reviewed. Firstly, the characteristics of building modeling methods are discussed from different disciplinary and technical perspectives, such as computer graphic, computer vision, architecture, and sociology. Secondly, a variety of RMB techniques are available, and they can be classified into two groups: rule-based modeling methods and data-based modeling methods. Rule-based modeling methods use predefined rules and grammar to control the modeling procedure. The most well-known method is the procedural modeling method, which have become the mainstream RMB methods because of their successful applications. Rule-based modeling methods provide a cost-effective solution to modeling all types of buildings, including virtual buildings and historical buildings; however, the majority of these methods require the user to have a high level of technical knowledge to modify the rules and grammar of the model. Data-based modeling methods model or reconstruct buildings using various types of data. Based on the data type used, data-based modeling methods can be divided into image based modeling methods and LiDAR based modeling methods. Data-based modeling methods are user friendly and provide intuitive, human-machine interactions or an automatic reconstruction pipeline. However, the modeling results are highly dependent on the data entered. Then, the layout problem, also known as the spatial allocation problem, is an important aspect of modeling multiple objects. Layout problem can be treated as a sub-problem of RMB, therefore the layout of building interior and layout of the architecture and city are reviewed as a special issue. Finally, this paper presents an in-depth discussion of the current limitations, challenges and future direction of rapid architecture modeling technology.

Keywords　modeling of architecture; procedural modeling; image based modeling; point cloud based modeling; building layout; urban modeling

《计算机学报》

1　引　言

建筑是人类赖以生存和工作的人工环境. 人类自进入文明社会以来，就开始建造不同的建筑物以满足人类的发展需求. 近年来，随着人类社会数字化进程的深化，对各类事物的数字化和虚拟化已经成为一项重要的工作，尤其是建筑建模受到越来越多的关注. 特别地，随着数字城市进程的推进，以及虚拟现实(Virtual Reality，VR)和增强现实(Augmented Reality，AR)技术的迅速发展，数字化文化遗产保护日益受到重视. 建筑建模在虚拟旅游、数字化文化遗产保护、城市设计规划与模拟，以及游戏动画等方面有着非常广泛的应用前景. 在过去二十年中，建筑建模技术得到了长足发展，相关研究和应用取得了丰硕的成果. 本文将对建筑建模技术的研究现状进行综述，并对未来发展趋势和面临的挑战进行展望. 需要特别指出的是：本文所讨论的建筑建模方法有别于传统、低效、依赖专业商业建模软件(如 Autodesk 3D Max[①]、Maya[②] 等)的手工建模方法，而是使普通用户能够完成高效率、高质量建筑模型构建任务方法的总称.

建筑建模方法的研究与发展对我国数字化文化遗产保护具有重要意义. 中国具有世界上数量和种类最多的历史传统建筑. 2014 年住建部的统计表明，我国境内仅传统民居类型就有约 600 种. 然而，大部分中国历史古建筑都是以木制结构为主，容易受到环境或人为因素的破坏而难以长时间保存. 近年来，随着城市化进程的快速发展，以及缺乏足够的保护意识，很多历史建筑正在迅速地被破坏甚至消亡. 2013 年丽江古城火灾，2014 香格里拉独克宗古城火灾和贵州报京侗寨火灾等传统建筑被破坏的事故给人们敲响了警钟. 古建筑数字化保护的需求非常急迫，相应的研究和应用具有极大的应用价值与社会意义.

建筑建模是一个以计算机建模为核心，同时覆盖多个学科的研究领域，人们针对不同的应用对象发展了不同的研究方法和技术手段. 现有文献中相当一部分的综述工作都是针对可应用于建筑建模的

① 3ds Max. Autodesk Inc. https://www.autodesk.com/3ds-max

② Maya. Autodesk Inc. https://www.autodesk.com/maya

某类具体方法进行讨论，如基于过程的建模方法[1]、基于图像的建模方法[2]、基于草图和手绘的方法[3-4]、基于点云的重建方法[5-6]等.另一部分综述工作虽然综合讨论了多种方法[7-8]，但是侧重于讨论方法的原理和细节，相对忽略了对各个方法发展历史及趋势的脉络梳理，或者缺乏针对不同的建筑建模应用背景下对各类方法的特点和局限性进行多维度视角的观察.而对于建筑建模这样具有较强的应用驱动和学科交叉特点的研究领域，结合多个角度对其进行讨论是非常有必要的.本文试图以相对全面的视角对建筑建模领域的现有技术进行归纳整理，以期望给读者呈现一幅建筑建模领域的立体图谱.

本文的贡献和特点主要有如下几点：

(1)从产生背景、技术原理、应用领域、方法优缺点等多个角度对建筑建模的各类方法进行了详细的综述，能够给进入该领域的研究者提供快速而清晰的指引；

(2)将建筑建模领域中较为特殊的布局问题单独提出，并对其中典型的方法和应用做了较为详细的讨论；

(3)从各个流派方法的角度和整个领域的角度对建筑建模方法目前存在的难点和问题进行了讨论，同时对未来的发展趋势做了展望.

本文第2节按照建筑建模技术的特点和数据类型进行分类讨论；第3节重点讨论不同的建筑模型构建方法的发展历史、技术特点和优缺点；第4节讨论建筑、建筑群和城市的布局生成问题；第5节总结了建筑建模技术目前存在的问题，并分析了建筑建模技术未来的趋势与挑战.

2 建筑建模技术特点与分类

2.1 建筑建模领域的特点

建筑建模虽然属于建模的范畴，然而由于建筑本身的特点，其研究方法与思路相对于其他类型的模型建模而言存在较大的区别.下面从几个不同的视角阐述其特点.

(1)计算机图形学视角

以计算机图形学的视角而言，任何场景建模都包含两个重要的任务：对象建模以及对象布局[9].对于建筑建模，前者研究如何生成建筑的几何对象，而后者研究如何将生成的几何对象进行空间摆放，其本质是空间分配问题.建筑建模不仅需要构建单个建筑模型，也需要考虑建筑群，此类大规模的场景建模需要克服创建效率与渲染效率两个核心问题[10]，具体在于：①如何高效地对建筑组件进行分解与重用，并合理的定义组件之间的关系，以加快建模效率，同时避免出现不合理的人造痕迹；②大规模场景，如建筑群与城市，必须考虑实时渲染效率，否则会影响实时的编辑与最终渲染结果，因此需要考虑模型的多层次细节(Levels Of Details，LOD)等；③除此之外，建筑建模还需要权衡用户交互成本、建模效率和模型多样化能力之间的矛盾.

(2)计算机视觉视角

以计算机视觉的视角而言，建筑建模任务更多地倾向于“重建”.本文频繁使用建筑“构建”和“重建”两词，二者区别在于：前者侧重于通过规则或者交互的方式逐步完成建筑模型的生成；后者侧重于从各种建筑数据中自动或者结合交互的方式生成建筑模型.由于大量方法结合了这两种情况，因此本文对此并不做严格意义上的区分.在计算机视觉领域内，建筑建模需要解决的问题集中于以下几点：①数据的采集与处理，如去噪等；②研究鲁棒性的方法，从数据中恢复高质量的建筑结构、形状与纹理；③研究自动化的重建方法，以尽可能降低用户交互负担；④多源数据的融合与协同重建.

(3)建筑学视角

建筑是人类工匠艺术的精华与沉淀.不同历史时期和地域的建筑分别体现了不同的美学特点和人文特点.建筑结构和构图的对称性是建筑永恒和统一的特性[11]，建筑组件的规则而富有变化的重复性也是建筑的重要特征，这些特性被广泛用于指导建筑的建模.此外，现代建筑的几何特征和组合规则，古代建筑的营造规则和人文语义特征，同样在基于规则的建筑建模方法里起到举足轻重的作用.

(4)社会学视角

建筑是人类文明发展的产物，体现了人类社会与空间组织之间紧密联系的内在模式[12].不同类型的建筑空间组织问题映射在图形学领域则成为空间布局问题.举例来说，小型村落的布局集中体现了民俗、风水、地理等诸多因素，中等规模的商业建筑群规划则需考虑人流量、兴趣区域、安全性等问题；大型城市的布局规划则涉及到道路交通优化等复杂因素.解决该类问题必然需要引入建筑学、社会学等领域的知识，如量化描述人居空间结构的空间句法[13]、城市规划相关方法等.通过抽取城市的街区、

《计算机学报》

道路网络模型而提取和研究城市的“功能”[14]，以及通过预先设计城市的局部功能属性而反向推导设计规划整个城市的街区路网[15-16]，都成为最近几年来研究的热点.

2.2　建筑建模所使用的数据类型

建筑建模的研究方法因建筑数据类型的不同而存在较大的差异性. 用于建筑建模的数据通常有以下几种：

(1) 规则数据

该类数据为预先定义的一系列描述建筑组件几何或语义信息的数据. 这类数据通常被特定的语法或者规则所操作，用户通过优化方法或者交互接口来修改参数，从而完成建模任务. 该类以规则为核心的建模方法广泛应用于游戏、影视、虚拟现实以及城市设计规划等建筑场景的建模.

(2) 图像数据

图像是获取最方便、现存数据最丰富的数据类型，以 Google Earth① 为代表的卫星影像数据，以 Google Street-View②、Microsoft Live Street-Side③ 为代表的街景数据服务的发展，为基于图像的建筑建模方法提供了海量的数据支持. 这类方法通过摄影测量技术来恢复图像中的建筑模型结构，广泛应用于快速城市建筑重建和数字化等应用中.

(3) 雷达点云数据

用于建筑建模的雷达点云数据通常来自于激光雷达(Light Detection And Ranging，LiDAR). 这类系统通过发射激光脉冲来主动获取建筑表面点云数据. 雷达点云数据的优点是包含深度信息，相对于摄影测量技术而言，受成像条件影响小；缺点是数据存在大量噪声和缺失，鲁棒性相对较差. 该类数据重建方法同样广泛应用于快速城市重建和数字化等应用中.

除上述三类主要数据之外，建筑建模通常用到大量领域知识数据. 这类数据包括但不限于描述尺寸比例的测绘数据、描述功能或语义的抽象数据、描述人口密度或交通流量的统计数据等. 领域知识数据通常结合上述三类数据应用于真实和复杂的城市模型建模和布局，以及历史传统建筑的建模中. 表 1 进一步概括了建筑建模领域中各类方法及其应用场景. 其中研究对象表示不同建筑建模方法的主要研究内容和对象；输入输出表示方法用到和最终生成的数据类型，注意输入输出可为相同数据类型，如逆向过程建模将输入模型生成新的模型；交互依赖表明不同方法对用户交互的依赖程度；方法目标或适用领域表示不同方法适用的应用场景；输入表示不同方法建模输出结果的数据类型.

表 1　建筑建模不同的应用场景

	研究对象	输入					交互依赖	方法目标或适用领域	输出			
		R	I	L	B	M			R	I	P	M
建筑生成	建筑立面生成	●	●	●			低	建模建筑正面的平面元素(门、窗等)	●	●		●
	快速建筑生成	●	●				中	交互式建模，游戏、影视等虚拟建筑创意制作	●			●
		●				●	低	给定目标(约束)建筑建模	●			●
	建筑概念设计		●				高	快速建筑原型设计、建筑概念设计		●		●
	历史建筑重建	●	●	●	●		中	数字文化遗产保护				●
	城市快速重建		●	●			低	快速城市原型、数字化城市(自动)			●	●
			●	●	●		中	快速城市原型、数字化城市(交互式)				●
建筑布局	房间布局	●			●		低	建筑内部的房间布局、设计	●			●
	街区布局	●	●		●		低	中等规模的城市街区布局、规划	●			●
	城市布局	●	●		●		中	大规模城市的布局、规划	●			●
	城市演化	●	●		●		中	面向真实城市模型的动态演化，城市预测	●			●

R：规则数据；　I：图像数据；　L：雷达点云；　B：背景知识；　M：三维模型；　P：点云模型

3　建筑模型生成

建筑建模的萌芽可追溯至 20 世纪 90 年代 CAD 建筑建模软件的从 2D 视图平面挤出方法[17]. 随着计算机硬件设备和图形学理论研究的发展，建筑建模逐渐发展为以基于语法和规则的过程建模、基于图像的建模，以及基于雷达点云建模的三大主要流派，以及结合了多种方法的混合技术. 本文接下来将介绍这些方法的发展历史背景，讨论其技术特点和适用范围.

3.1　过程建模方法

过程建模(或称程序建模)方法是建筑建模领域使用最广泛的方法. 这类方法通过定义参数和相应的规则来合成具备高度可信细节的建筑模型. 也因

① Google Earth. https://www.google.com/earth/
② https://www.google.com/streetview/
③ https://www.microsoft.com/maps/streetside.aspx

为过度依赖参数和规则，很小的参数变化也可能导致最终模型发生巨大变化. 根据应用的不同，过程建模通常使用随机方法、交互方法或者搜索算法实现对模型生成过程的控制. 由于能够构建任意精度的建筑模型，与生俱来的多层次细节表达能力，以及建模效率高等众多优点，过程建模成为建筑和城市建模的主流方法[18]，且在地形、植物、装饰模式等其他领域都取得了巨大的成功[1].

3.1.1 建筑语法与规则

大自然中广泛存在着分形现象. 受其启发而最早被引入计算机图形学的是被称作 L-system[19] 的产生式规则语法，被应用于某些植物的建模[20-21]. 同样的，建筑作为人类艺术的表达，其几何结构天生存在一定的逻辑和规则，使得用完备的语法来表达建筑结构成为可能[22]. 在建筑建模领域，CityEngine① 成功将扩展的 L-system 方法应用于大规模城市建模[23]，第一次让基于规则语法的过程建模方法取得令人振奋的成果. 在建模过程中，该系统使用随机的、参数化的 L-system 从任意建筑轮廓平面挤出建筑结构，并能适应全局和局部的约束.

真正给建筑建模领域带来深远影响的产生式语法规则方法是形状语法(Shape Grammar)[24-25]，其被定义为如下一个四元组：

$$G=\langle S,L,R,I\rangle \tag{1}$$

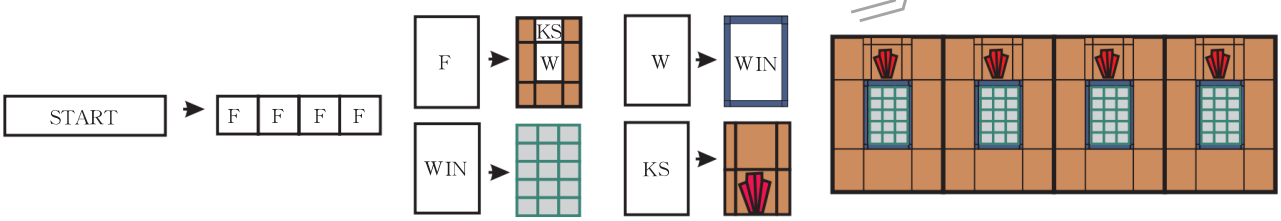
其中 S 表示有限形状集合，L 为有限符号集合，R 为有限规则集合，I 为初始形状. 进一步的，一个形状规则可被表示为如下：

$$\alpha \rightarrow \beta \tag{2}$$

当一个规则作用于形状 s 时，则表示存在一个变换 τ 使得 $\tau(\alpha)$ 成为形状 s 的子形状. 理论上只要定义了足够的规则，初始形状能够以任意精度逼近目标几何形状.

最初的形状语法操作的基本对象为点和线，随着建模对象日益复杂，操作对象被扩展为几何对象集合[26]. 相比于 L-system，形状语法最根本的优势和特点体现在：(1) L-system 操作的对象是字符串，其规则应用体现在字符串的替换上，而形状语法直接作用于形状上；(2) L-system 方法通常都是针对每一个待建模的对象创建一个单独的语法，而形状语法系统背后通常存在一个庞大的语法规则数据库，使得不同的建模对象都能使用这一套规则数据库进行设计.

形状语法被提出后很快受到各个领域研究者的关注，其思想迅速而广泛地应用于同源科学领域[27]，尤其给建筑设计、分析和建模领域带来了极大的灵感[28]. 在其基础上扩展出了大量语法，影响较大的一类是 Wonka 等人[29] 提出的分裂语法. 通过结合分割控制语法和属性匹配系统，分裂语法能够构建相对复杂和精细的城市建筑模型. 图 1 所示为分裂语法构建建筑立面结构的例子，图中不同的字母表示不同的形状(Shape)，其中(a)中的 START 为初始形状，其通过分裂规则能够产生 4 个新的立面形状 F，而 F 又可做进一步分裂，以此类推，直到所有形状都为终止形状时不可再分. 注意图中白色形状为可分割形状，彩色形状为终止形状.



(a) 初始形状 (b) 分裂规则 (c) 最终形状

图 1 分裂语法构建建筑立面示意图[29]

随着形状语法和分裂语法在建筑建模领域取得成功，后续大量的研究都在尝试从不同的角度对其进行提升与改进，如图 2 所示. 总体而言，改进的思路可概括为 4 个方面，相关的工作和具体贡献参见表 2.

(1) 语法表达能力方面

该改进方向旨在提高语法的表达能力，或改进语法的表达方式. 具体包括修改语法的作用单元，使其具备更加高层的表达能力；增加协调不同模型之间关系的能力，从而解决不合理的几何冲突；将形状语法扩展到笛卡尔坐标之外，以突破传统的包围盒表达能力的局限性等.

(2) 交互方面

随着过程建模技术的发展，建筑模型构建的效率和质量越来越高. 然而该类方法最大的问题是整个建模过程必须使用严格的语法描述，用户需要控

① CityEngine. http://www.esri.com/software/cityengine/

表 2　代表性的建筑过程建模工作及其贡献

改进方向	代表工作	方法特点		应用建筑类型
		语法类别	主要改进与贡献	
语法表达能力	CGA shape[30]	分裂语法	(1)具备层次化、结构化和语义化的表达方式，能够更好的被重用；(2)支持在任意朝向的面上放置几何体对象；(3)不同对象之间能够相互感知以解决冲突.	建筑群和城市
	wall grammar[31]	分裂语法	语法操作基本单元为墙的 2.5D 参数化语法.	建筑顶视图
	CGA++[32]	CGA shape	在 CGA 基础上加入事件机制，对象之间通过事件机制相互通信以协调冲突.	建筑群和城市
	Thaller[33]	分裂语法	在凸多面体上执行分裂语法.	复杂多边形建筑
	Edelsbrunner[34]	形状语法	将形状语法扩展到圆柱坐标系和求球面标系，来简化生成曲面几何体.	曲面结构建筑
交互提升	Citygen[35]	分裂语法	最早强调用户交互参与控制过程建模过程的大型城市建筑建模系统.	建筑群和城市
	Lipp[36]	CGA shape	(1)实时选择与编辑，其操作对象包括单个形状、层次对象和语义对象；(2)通过 GUI 规则编辑器完成实时的 CGA Shape 语法树形可视化与交互式编辑.	较规则建筑
	Patow[37]	形状语法	使用有向无环图来替换传统的树形结构，通过拓扑排序简化部分算法.	相对复杂建筑
	Huang[38]	控制点	通过用户调整少量的参数控制点来降低交互难度.	中国古代亭子
	Dang[39]	形状语法	用户通过交互评分方式生成概率密度函数，该函数用于指导生成形状语法.	较规则建筑
并行能力	Lipp[40]	L-System	在 GPU 或者在多个 CPU 上分割、并行执行 L-System.	建筑群和城市
	Marvie[41-42]	形状语法	提出 GPU Shape Grammars，将所有形状语法的计算转移到几何和像素着色器中.	建筑群和城市
	Steinberger[43-44]	形状语法	GPU 并行调度机制 Whippletree[45]，来处理复杂、不规则的动态任务.	建筑群和城市
	Boechat[46]	形状语法	提出“操作图”作为统一的过程描述子，在优化了并行效率的同时，使得 GPU 任务调度不依赖于特定的过程语法和建模领域.	建筑群和城市
语义和知识	Finkenzeller[47]	形状语法	添加相应的建筑语义类型图来辅助构建复杂的建筑模型.	特定建筑
	Leblanc[48]	形状语法	(1)赋予组件空间属性、语义属性和继承机制；(2)逐渐修改和添加组件的方式构建.	建筑内部结构
	CG[49]	形状语法	(1)面向中国传统建筑的组件分解；(2)基于营造规则的组件添加.	中国江南民居
	HACG[50]	CG	(1)面向对象的规则语法；(2)多层参数描述和求解.	徽州传统民居

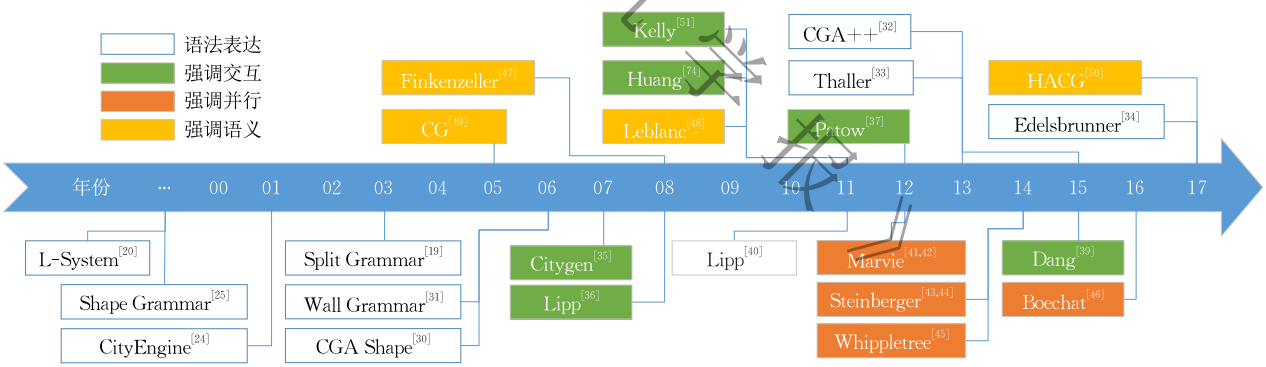


图 2　过程建模语法发展示意图

制和修改脚本中的大量参数或规则，导致建模系统难以被没有计算机领域背景知识的艺术家、建筑设计从业人员掌握和使用. 因此，人们开始逐渐重视提高系统在交互方式上的可用性，甚至提出交互式过程建模应该“消灭”让用户编辑脚本的方式[51].

(3)并行化方面

随着计算机并行计算能力的提升，尤其是图形硬件技术的革新，过程建模与生俱来的并行性优点开始凸显. 一方面，传统的过程建模技术需要保存最终模型的几何信息并传递给 GPU 进行渲染，而基于 GPU 的过程建模语法无需显式存储模型几何信息，仅需存储过程语法的中间形式；另一方面，过程建模的每个并行任务存在很大不规则性，优化 GPU 规则语法的任务调度机制能够在很大程度上提高整个系统的并行效率. 目前最先进的 GPU 过程建模系统能够在数百毫秒内完成上万建筑数量，千万三角形数量规模的城市模型构建，实时的建筑快速构建与渲染时代已经到来.

(4)语义和知识方面

通过引入建筑知识，使过程建模语法具备高层的语义性. 这种改进方法一方面能够降低使用传统形状语法描述复杂建筑的难度，同时能够降低用户交互的负担，适用于较为复杂和特殊的建筑类型.

3.1.2 过程建模智能化

建筑建模的一个重要任务是快速生成大量多样化的建筑模型,同时又要满足用户定义的目标和约束.过程建模系统通常拥有巨大的参数空间,使用交互方式来调整和寻找符合约束的候选解对用户而言是沉重的负担.近十年来随着机器学习理论的发展,各类启发式搜索、随机优化方法、机器学习、基于数据驱动的形状分析[52]等方法开始大量用于解决上述模型多样化和约束限制问题.

模型合成可视作 2D 纹理合成[53]在高维上的拓展,是较早用于快速构建多样化模型的方法.Merrell[54]在其博士论文中详细论证了上下文感知的语法与模型合成方法的相互关系以及相关理论.这方面的代表工作是 Merrell 等人[55]使用分治结合全局搜索算法处理潜在模型冲突和约束的方法.类似的合成方法需要预先将模型在空间网格中做分割预处理,划分的建筑单元不具备语义信息,因此对于空间结构相对复杂的建筑模型难以实现分解和组合,只适用于构建结构简单的虚拟建筑场景.

近几年来,通过机器学习计算模型参数的方法同样受到较多关注.由于概率网络模型[56-57]以及带隐藏变量的概率模型[58]能够较好地表达模型组件之间的语义关系,在快速构建多样化的模型方面做出了较为突出的贡献.Chaudhuri 等人[59]提出了一种基于概率网络的交互式推荐系统,使用贝叶斯推导方法来指导用户一步一步完成模型的构建.基于推荐的交互系统具有很好的用户体验,对用户的背景领域知识要求较低.然而,推荐系统直接用于建筑模型仍然存在一系列问题.对于一般模型(如动物,角色,桌椅模型等)而言,每个组件的标签都是唯一的,而建筑模型的特点是需要大量的重复使用组件,如门、窗等,因此需要解决两类问题:(1)大量组件标签重复性的处理.解决思路包括使用层次网络结构来表示建筑属性的联合概率分布[60],以及将建筑组件语义化和功能化[49,61-63];(2)大量重复组件导致的重复交互.一种解决思路是主动学习交互意图,如 Guerrero 等人[64]在用户交互过程中用概率模型学习建筑组件包围盒之间的几何关系特征,并自动将其几何关系传播给新的模型以降低交互成本,加快建模效率.

概率网络的结构学习是 NP 问题,其算法复杂度与网络节点个数呈现指数关系,实践中通常采用局部启发式搜索[59,65]或贪婪搜索[58]等算法寻找最优解.在建筑建模领域,结合建筑领域背景知识和已知的网络模型来降低网络结构学习算法复杂度,是有效和常用的方法[65].

3.2 图像建模方法

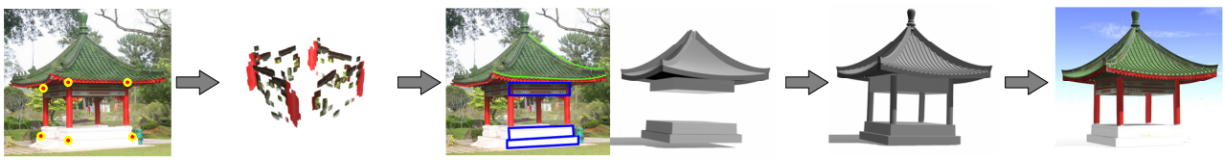
随着地理信息系统(Geographic Information System,GIS)技术和互联网服务的发展,城市的俯视图、街景地图等数据变得日益丰富和易于获取.在这种背景下,基于图像的建模方法(Image-Based Modeling,IBM)获得了迅猛发展并取得了显著的成果,逐渐成为建筑建模的主要流派之一.值得指出的是,近几年来利用深度图像(RGBD 图像)进行建模的研究较为火热[66],尤其是在室内场景[67-68]、人体(动作)[69]、特定物体集合[70]的重建研究中取得了较大的进展.然而对于建筑这样的大型室外对象而言,深度相机并不适用,更多的是采用激光雷达来获取深度信息.

3.2.1 单视图建筑建模

单视图建筑建模被认为是一个病态的问题,其主要原因是单幅图像提供的可用信息太少,因此需要大量额外的信息或用户交互来辅助建模.

相机标定是大部分单视图建筑建模方法的第一步工作,较为常用的方法是 Guillou 等人[71]提出的灭点标注法.这类标注方法通常需要图像满足 4 个前提条件:(1)图像至少存在 2 个灭点;(2)已知一条边的三维长度;(3)相机主点必须位于图像中心;(4)宽高比固定.因此单视图建筑建模方法对图像的拍摄角度和质量有较为严苛的要求.

相机标定完成后,单视图建筑建模方法还需要大量的交互来完成建筑结构的分割和重建,如图 3 所示.利用建筑的对称性[72-73]、平行和正交性[74]、平行六面体约束[75]、结构重复性[76]等特点实现标定和建模,都能够在一定程度上弥补单张图像信息不足的缺陷,同时降低用户交互负担.值得注意的是,结合过程建模方法实现建筑组件的生成和多样化也是目前的趋势.表 3 给出了具有代表性的单视图建筑



(a) 用户指定视锥 (b) 相机标定 (c) 交互式组件构建 (d) 模型优化 (e) 纹理生成

图 3 典型的单幅图像建筑建模流程[73]

表 3　代表性的单视图建筑建模方法

代表工作	技术特点		建模时间	方法应用
	相机标定	建模方法		
Oh[77]	灭点标注	用户标记地面分界线，用不同色块标记不同深度、遮挡层次关系的区域等	数小时	基于图片的建筑编辑和渲染
Jiang[73]	用户标记视锥	用户基于建筑组件的逐个标记	2～10 min	艺术家对互联网图像快速建模
Hou[78]	基于建筑条纹正交性的灭点标注	自适应曲线分段算法交互分割，基于 GGA 的建筑组件语义建模	1～3 min	建筑组件重用与多样化
Wu[76]	灭点标注	利用反射对称性和重复性进行图分割优化	数分钟	重建规则的现代建筑立面
Müller[79]	—	图像分析进行分割，形状语法规则描述立面结构	数分钟	增强低分辨率立面模型和纹理
Fan[80]	—	统计模型和规划算法	平均16.7 s	恢复部分细节被遮挡的建筑立面结构

建模方法，以及其在技术特点、建模时间和方法应用上的特点和区别.

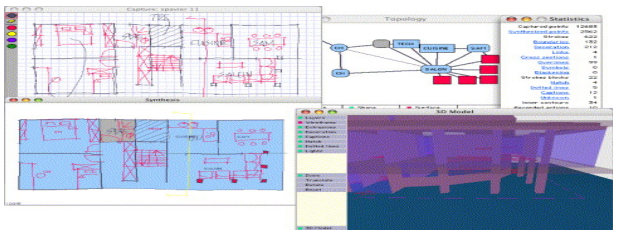
单视图建筑建模存在较多的局限性，具体表现在如下几个方面：(1) 单张图像缺乏足够的深度信息，相机标定、图像分割、建模工作通常需要用户的逐步交互引导完成建模任务；(2) 对图像的拍摄视角要求较高，过于正面或者过于侧面都会影响相机标定，增加光学畸变导致的模型误差；(3) 目标建筑通常需要较高的对称性，或者至少具备部分结构的对称性，否则难以构建建筑在图像之外的结构；(4) 由于纹理直接从单一图片中获取，图像中的光照、阴影都会直接影响纹理的质量.

总之，单视图建筑建模方法构建完整建筑模型局限性较大，相关的应用也相对较少.

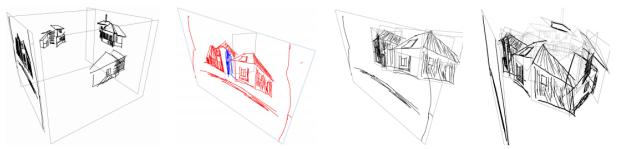
3.2.2　手绘草图建筑建模

手绘作为建筑设计师表达设计灵感的方式已有几百年的历史[81]. 为了解决传统交互方式(Window, Icon, Menu, Pointer, WIMP)枯燥和单一的局限性，基于手绘交互的建模方法(Sketch-Based Interfaces for Modeling, SBIM)逐渐进入人们视野[3]. 这类方法强调用户的参与，尤其注重交互带来的良好用户体验和建模的实时性. 本节所讨论的手绘草图建筑建模方法核心是从手绘或草图中恢复形状[82]，与使用 Google SketchUp① 这类底层的交互建模软件存在较大区别.

从草图生成形状最著名的系统为 Teddy[83]，该系统通过几何识别来生成表面. 由于不具备任何语义信息，该系统仅适用于构建形状与比例要求都不精确、且无需深度信息的“圆形”模型，如毛绒玩具；对于必须考虑比例和深度、以方形为主的建筑模型而言则是极大的挑战. 也因为如此，早期的基于草图的建筑建模方法和系统的目标偏向于 3D 模型的“表达”而非“构建”. 如图 4 所示，Mental Canvas[84] 系统针对的是在 3D 视角下的草图绘制而不是模型



(a) EsQUIsE[85-86]



(b) Mental Canvas[84]

(c) 草图现实系统[87]

图 4　有代表性的草图建筑建模流程

的重建，EsQUIsE[85-86] 以及“草图现实”系统[87] 构建的模型也只是模型的 2.5D 表达，Camozzato 等人[88] 的工作也仅是通过识别用户输入的房屋轮廓草图来辅助生成建筑的平面结构.

最近几年火热的深度学习技术在手绘或草图识别上取得了很大进展. 在训练样本足够的情况下，最新的卷积神经网络框架 Sketch-a-Net[89] 的识别准确率已经超过人类. Nishida 等人[90] 尝试将深度学习引入过程建模方法来改善交互体验，其对每一个建筑组件都训练 2 个 CNN，其中一个用于识别组件的类型，另一个用于估计组件的参数. 为了降低所需要的训练数据数量，其对模型做了较大的简化，如只针对一个视角进行训练. 即便如此，对于约 30 个组件的建筑类型而言，其训练用的图片总数仍然达到 40 000 张. 深度神经网络的引入显著提升了手绘识别的准确率和效率，同时也对训练样本的数量提出

① Google SketchUp. http://www.sketchup.com/

《计算机学报》

了更高要求.

从目前来看,基于手绘或草图的建模方法存在如下局限性:(1)与基于单幅图像的方法一样,其最大的局限性在于无法获取深度信息,因此难以处理不连续的建筑对象;(2)建筑的功能组件或形状特征需要分成若干类别进行训练和识别,对其进行扩展的代价相对太大.目前的手绘建模系统通常将建筑组件抽象为方块、棱柱体、棱锥体、球体等几类,其表达能力相当有限;(3)草图建模方法交互方式生动友好,但是仍然要求用户具备足够的建筑背景知识或美术素养,否则最终模型的质量和建模效率难以得到保证.

综上所述,从手绘草图直接生成最终 3D 建筑模型还存在很多局限性,因此基于草图的建筑建模方法常被用作建筑概念设计工具[91],或者结合过程建模、机器学习等其他方法共同完成建筑构建.

3.2.3 多视图建筑建模

近十年计算机视觉理论的进展极大地促进了三维重建的研究,以立体视觉为理论基础的多视图建筑建模方法取得了瞩目的成就,成为建筑建模领域中炙手可热的方法.

如图 5 所示,来自不同位置的相机拍摄的 j 个图像中观察到 i 个世界空间中的点到图像空间的投影.定义相机朝向 R_j,位置向量 $\boldsymbol{c}_j$,焦距 f_j,则世界坐标中的一点 X_i 通过相机投影得到的图像坐标 X_{ij} 可定义为

$$x_{ij}=f_j\Pi(R_j(x_i-\boldsymbol{c}_j)) \tag{3}$$

其中 Π 为投影函数.理论上,只要观察到的点足够多,即可通过对角几何计算出这些点在世界空间中的位置以及原始相机的位置.然而,大量图像的反投影计算会导致误差的累积,为了降低误差而生成高质量的相机参数和稀疏点云,必须完成下式的优化处理:

$$\underset{x_i,R_j,\boldsymbol{c}_j,f_j}{\arg\min}\sum_{i\sim j}\left\|x_{ij}-f_j\Pi(R_j(x_i-\boldsymbol{c}_j))\right\|^2 \tag{4}$$

其中 $i\sim j$ 表示 X_i 在图像 j 中可见.该优化过程称作集束调整(Bundle Adjustment,BA),通常使用非线性 Levenberg-Marquardt 算法来求解.以上所述的这种能够自动完成相机追踪与运动匹配的自校准的技术叫作运动恢复结构(Structure from Motion,SfM),是多视图建模的理论基础.使用 SfM 恢复出相机姿态并输出稀疏的 3D 点云后,继而使用通用的稠密匹配方法,如双目立体视觉[92]和多目立体视觉(Multi-View Stereo,MVS)[75,93]来生成稠密点云.

SfM 的一个关键问题是如何匹配不同视图中的相同点,也即图像的特征匹配问题.以 SIFT(Scale-Invariant Feature Transform)[94]和 SURF(Speeded Up Robust Features)[95]为代表的特征检测方法的出现为多视图重建研究注入了强大的活力.近似最近邻搜索(Approximate Nearest Neighbor search,ANN)[96]、k-d tree、RANSAC(RANdom SAmple Consensus)[97]等方法的引入使得特征检测方法在匹配准确度、效率和鲁棒性上获得了进一步提升.

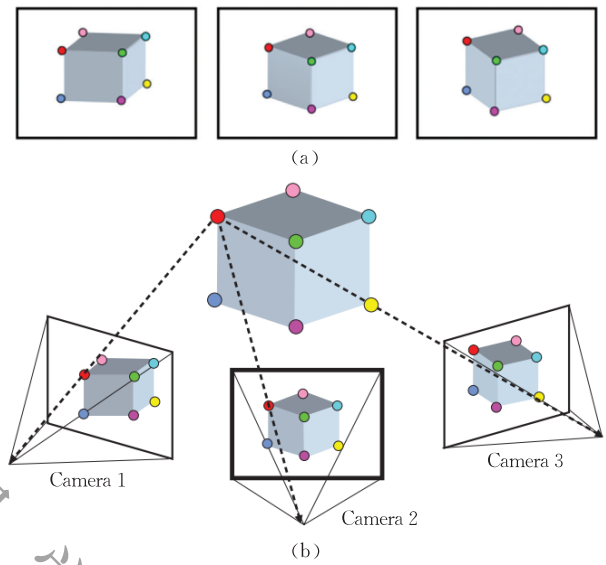


图 5 SfM 原理示意图[98]

然而,通用的 SfM 场景重建方法直接用于建筑重建会存在以下问题:(1)城市建筑通常由大量规则的平面结构组成,由于各个特征点在重建上的独立性,容易导致重建的平面存在大量噪声.常用的解决方法包括引入曼哈顿世界假设[99]、分段平面假设[100]、多层次深度图[101]等;(2)城市建筑中普遍存在大量相似和重复的元素,容易导致匹配错误,影响重建质量.对此,Ceylan 等人[102]提出一种基于图结构的全局分析框架来解决该问题;(3)建筑图片常存在弱纹理区域及曲面结构,容易导致重建错误.针对该问题,王伟等人[103]提出了一种快速 2D 交互式三维场景重建算法,同时能够克服传统分段平面假设等传统方法的缺点.

早期的多视图建筑建模方法由于硬件和理论的局限性而依赖于用户交互或相关的先验知识.如在多视图建筑建模做出了开拓性工作的 Debever 等人[104]通过用户划线的方式标定多个图像中的建筑轮廓,结合建筑的对称性完成几何结构的生成.Dick 等人[105]将建筑描述为一系列墙的组合,通过建筑

《计算机学报》

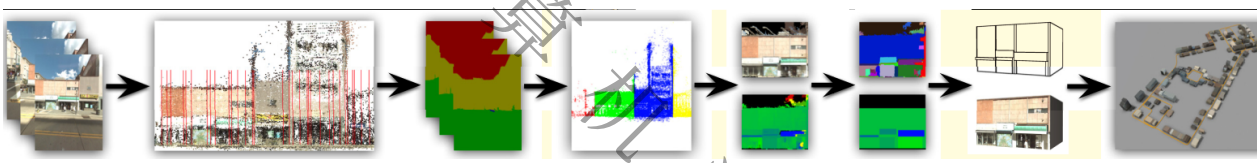
专家的领域知识和训练数据形成参数数据库来识别建筑组件，该方法能在较小的图片序列(2～6 张)上重建建筑. Sinha 等人[93]提出了一个交互式的多视图建筑建模系统，通过结合灭点检测和用户绘制轮廓的方式辅助生成建筑模型. 显然，这类交互式的方法并不适用于大规模城市建筑的重建. 随着计算机视觉理论的发展和计算机硬件并行能力的提升，大规模城市场景的重建技术逐渐成熟. 如表 4 所示，大规模城市重建方法可根据输入图像的类别大致分为如下两大类：

(1) 结构化的图像(视频)数据

这类数据包括航拍图像、街景地图等. 这类数据通常由相同的已标定的相机拍摄，因此还能够结合 GPS、惯性测量装置等传感器来进一步简化计算[106]. 相对于航拍图像，街景图像能够更好地反映建筑的立面信息，构建出的建筑模型质量较高，因此受到广泛关注与研究. 在经历了十亿数量级别街景图像的挑战与检验[107]后，街景图像重建方法的质量、稳定性和效率都得到了充分验证. 图 6 给出了典型的街景重建流程示意图.

表 4　代表性的大规模城市多视图重建方法

图像数据来源	代表工作	用户交互	说明
航拍影像	Zebindin[108]	是	结合稀疏线特征和 Graph Cuts 全局优化
街景图像	Xiao[109]	是	有向无环图表示立面结构，递归划分
	Xiao[110]	否	预定义语义区域进行分割，全自动立面重建
	Klingner[107]	否	结合 GPS 和内部传感器，面向世界尺度的街景重建
互联网图像	Frahm[98]	否	首个单个 PC 上完成城市级别数据重建的系统
	Agarwal[111]	否	利用分布式的服务器集群完成城市规模重建
	Heinly[112]	否	基于流框架，世界尺度的场景重建



(a) 街景图像　(b) SfM点云　(c) 识别/分割　(d) 分块　(e) 组合　(f) 规则化　(g) 建筑模型　(h) 城市模型

图 6　基于街景图像的多视图建筑重建流程示意图[110]

(2) 非结构化的图像数据

这类数据通常指互联网中来自平板、手持设备等终端的海量图像. 这类数据由于在拍摄设备、拍摄时间、拍摄空间等方面存在大量的随机性，给重建工作带来了更大的挑战. 通过搜集互联网上百万级别的建筑和城市图片，“一天之内建成罗马”的任务已经能够在服务器集群[111]甚至单个 PC 机器[98]上完成. 在较新的研究中，基于流的 SfM 框架进一步将重建的范围从城市扩大到世界[112].

多视图建筑建模方法虽然存在重建精度依赖于数据本身，对弱纹理区域空间点的重建可靠性低，以及难以重建建筑内部和局部细节等局限性，然而在构建精度要求不高(如仅用于可视化)的大规模城市重建应用背景下是最佳的解决方案.

3.3　雷达点云建筑建模

随着三维扫描设备的普及，基于点云重建的研究获得了较大的发展. 与被动获取数据的图像建模方法相比，使用三维扫描设备主动采集数据的点云建模方法具备独特的优势. 由于建筑建模属于大场景的室外建模，因此本文主要讨论基于雷达数据的重建(LiDAR-based modeling). 这类扫描设备分为星载合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar，SAR)、机载激光雷达(Airborne LiDAR)、地面激光雷达(Terrestrial Laser)三种. 前者更多的用于地质、水文、海洋等自然资源的探测方面[113]；后两者因其精度相对较高、采集速度较快而广泛的应用于城市三维建模和三维导航中. 虽然雷达点云数据具有较高的密度，然而存在大量的野点和噪声，且数据缺失问题较为严重. 如何利用不完整的雷达点云数据重建建筑是建筑雷达点云重建的核心问题.

早期的机载激光雷达由于精度较低，数据缺失严重，主要用于快速分割出建筑，识别屋顶轮廓[114]. 随着设备精度和数据处理技术的提高，地面激光雷达重建逐渐成为大规模三维数字城市建模的重要方式. 如表 5 所示，具有代表性的建筑点云建模方法按照其技术特点可大致分为以下四类：

(1) 利用城市建筑特点或假设模型

对于较为简单的几何结构，其检测、分割和重建

能够利用建筑结构的重复和自相似信息[115]、多面体几何假设[76]、曼哈顿世界假设[99]、建筑组件特征等[116]实现自动完成;对于较为复杂的几何结构,通常需要用户交互方式进行辅助重建.

(2)利用多源数据融合

即利用其它类型的数据结合点云数据完成建筑重建.如结合航空影像数据、地面图像数据[117]、GIS数据[118].这类多源数据融合的方法通常能够实现自动化重建.

(3)利用用户交互

这类方法通过设计合理的用户接口来引导用户完成建筑点云结构的选定、分割和建模.如图7所示,Nan等人[119]提出的交互式建筑重建系统使用SmartBox作为与用户交互的基本单元;Arikan等人[120]使用更为精细而没有方向约束的多边形作为交互对象.

表5 代表性的建筑点云重建方法

类型	代表工作	交互	数据来源(精度)	技术特点	建筑类型
建筑特点	Chen[121]	是	地面扫描设备	利用多面体几何假设	凸多面体建筑
	Pu[116]	否	Leica terrestrial laser(500 pts/m^2) StreetMapper mobile scanning(100 pts/m^2)	预定义建筑组件特征: 位置,朝向,尺寸,拓扑结构	形状规则的小规模建筑
	Zheng[115]	是	Optec Lynx LiDAR scanner	利用重复和自相似结构	大型城市建筑
	Vanegas[122]	否	Terrestrische laser scans①	利用曼哈顿世界假设	符合曼哈顿假设的建筑
多源数据	Chen[123]	否	Leica ALS 40(1.6 pts/m^2)	结合航空影像数据	粗粒度城市建筑
	Schwalbe[118]	否	机载雷达设备(1.5 pts/m^2)	结合2D-GIS数据	粗粒度城市建筑
	Li[117]	否	地面扫描设备	结合地面图像数据	大型城市建筑
逐步交互	Arikan[120]	是	摄影测量方法生成点云,地面扫描设备	多边形编辑交互	平面结构建筑
	Nan[119]	是	Optec Lynx,StreetMapper (3DLS)	SmartBox拖拽交互	大规模城市建筑群
组件体元匹配	You[124]	是	机载雷达设备	预定义十余种标准CG体元: 立方体、圆柱、圆锥等	粗粒度城市建筑
	Lin[125]	否	机载雷达设备	语义分割与重建	居民区域建筑群
	Wang[126]	是	地面扫描设备	利用中国传统建筑组件结构特点	唐代亭、塔、楼等非平面建筑

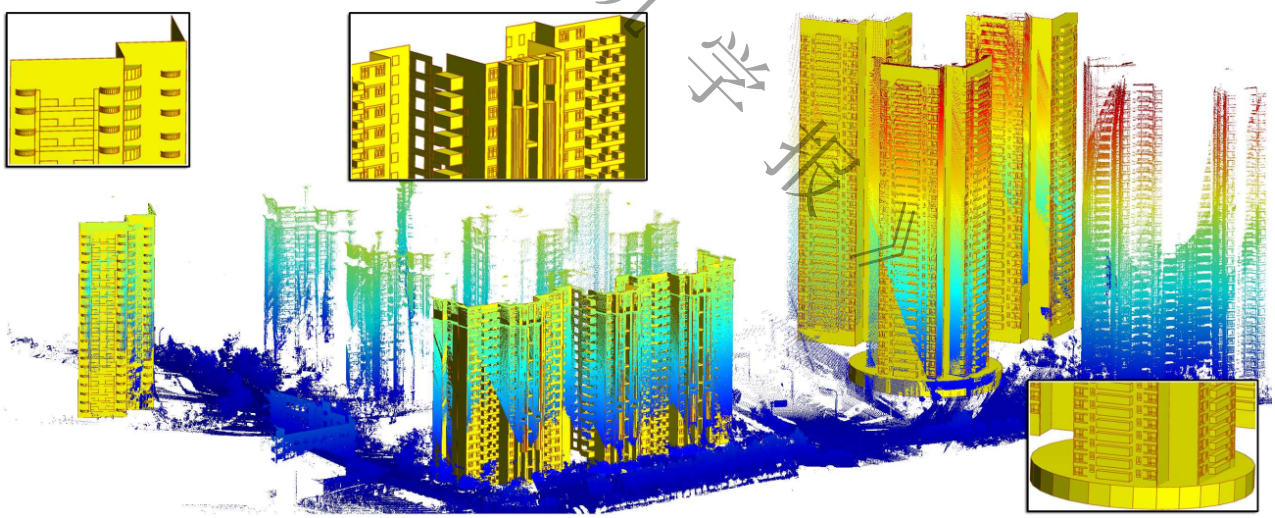


图7 SmartBox交互式点云城市重建系统[119]

(4)利用体元模型

类似草图建模的重建流程,这类方法需要将建筑分解为基本单元,并针对每个单元分别进行训练,重建过程中从点云中提取内部结构来匹配体元数据库中的模型.交互负担和重建精度通常取决于体元的设计.

点云重建和图像重建在技术上存在较多的交叉点.总的来说,建筑的扫描点云数据一致性较好,具备深度信息,然而容易受到设备可达性、天气、障碍物遮挡等影响而导致数据存在大量噪声和缺失;而图像数据易于采集,分辨率高,但是缺乏关键的深度信息,二者具有天生的互补关系[117].因此,建筑点云重建的发展方向和趋势必然是基于混合数据的重建[127].更多关于点云重建几何表面的细节,建议读者阅读综述文献[5].

① https://www.ikg.uni-hannover.de/index.php?id=413

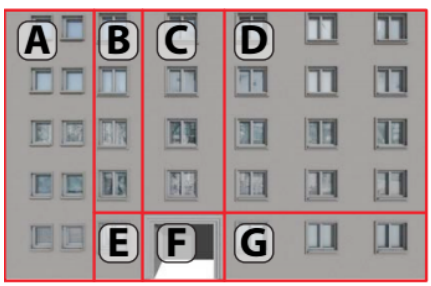
《计算机学报》

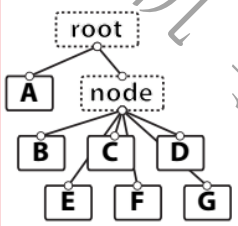
3.4　逆向过程建模

逆向建筑过程建模方法(Inverse Procedural Modeling,IPM)是近几年兴起的混合建模方法,结合了过程建模、图像分析和模型分析等多种技术.其核心思想是通过分析给定的输入建筑模型(包括但不限于图片、点云、3D 模型)自动生成该模型对应的规则,从而能够利用该规则构建多样化的模型.规则的定义本身就是抽象的,逆向过程建模的最大挑战在于从模型中抽取规则的同时还需要将其集成为一种高级语法进行表达.形式语法的学习一度被认为是非常困难的任务[128],直到贝叶斯模型合并方法[129]的提出,使得从数据中获取规则的研究出现了突破性的进展.现在的研究已经进展到能够从输入模型中提取组件概率关系[58]、贝叶斯语法[130]、L-system[131],甚至形状语法[132]等规则.

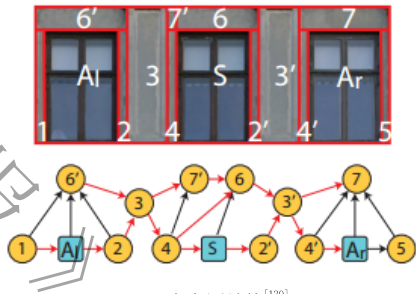
建筑立面由于图片易于获取,且其二维的结构规则相对易于提取,因此成为建筑逆向过程建模最早的研究对象.对建筑立面图片规则的抽取主要利用局部相似性、重复性等结构分析方法,其开拓性研究始于 Aliaga 等人[133]提出的交互式标记——映射方法.Bao 等人[134]的方法同样需要交互方式协助分割门、窗来保证分割的精确性,最后利用启发式搜索和二次规划的方法来完成建筑立面的多样化.Zhang 等人[135]提出一种对全局对称结构最大化的搜索方法来生成不规则的立面结构.Wu 等人[136]提出了一套分裂语法的动态规划框架,分裂语法不仅用于描述立面信息,同时可被用户以交互式的方式自由组合以完成相对复杂的立面建模与多样化工作.Martinović 等人[137]首次尝试将递归神经网络(Recursive Neural Networks,RNN)用于立面图片的分割.

好的立面结构描述方式对于准确分割和定义复杂的建筑立面元素至关重要.树形结构[138]是最直观和常用的方法,如图 8(a)所示.但随着立面元素布局复杂性的增加,其表达能力的局限性便突显出来.一种替代的解决思路是使用“邻接图”[139]的有向图来快速索引每个立面元素的相邻元素,如图 8(b)所示,这样的有向图很容易通过常规的树形结构进行转化.另一种解决复杂立面布局的全新的解决思路是将立面分解为多个“图层”[140],如图 8(c)所示.每个图层使用单独的模板进行网格布局,所有图层的叠加可以转换为连续最优化求解问题.

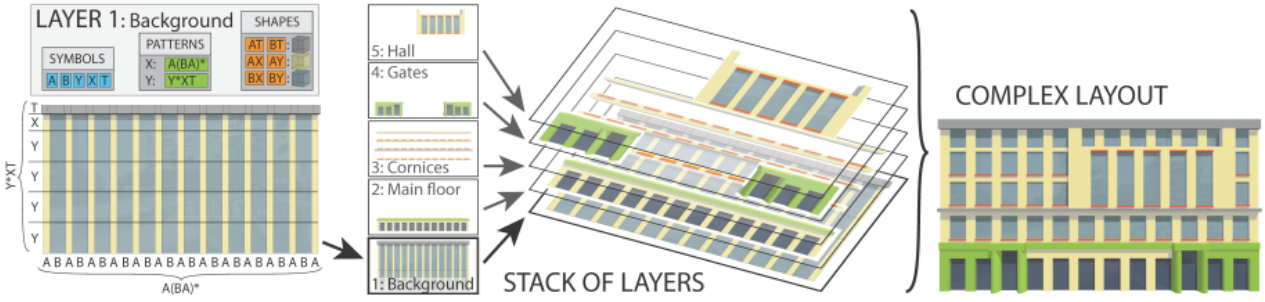




(a) 树形立面结构[138]



(b) 有向图结构[139]



(c) 图层化的立面结构[140]

图 8　建筑立面结构的不同表示方法

逆向过程建模方法在建筑立面取得一定进展后,相关的研究进一步扩展至整个建筑乃至城市.较早的探索性工作输入样例模型后并不直接生成规则语法,而是通过交互方式来完成结构保持的建筑模型重定向任务,如 Lin 等人[141]提供给用户唯一的轴缩放操作完成建筑结构保持的多样化,这样的交互接口很容易被普通用户所接受和掌握.而通过输入已有的建筑或城市模型,从中提取可被直接或交互式编辑的上下文无关的规则语法的技术,被称作建筑程序化[142],如图 9 所示.建筑程序化通常使用曼

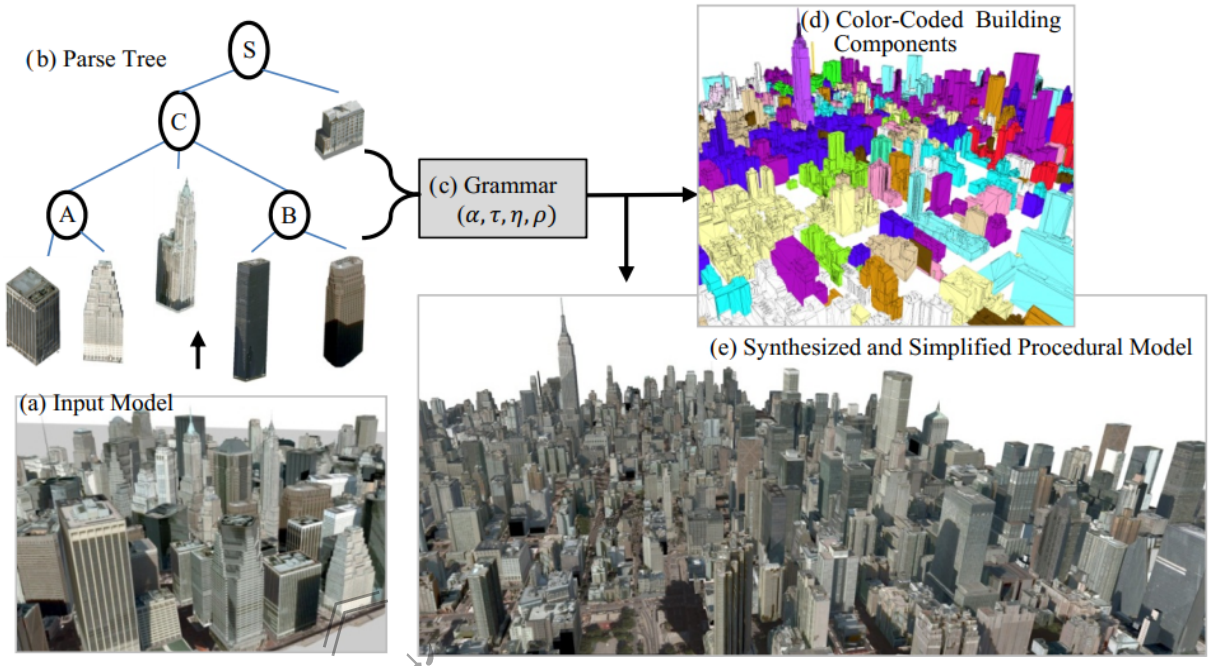


图 9 城市程序化示意图[142]

哈顿世界假设、贝叶斯推导[143]、局部对称性[132]、相似性检测[144]等技术对输入模型进行分割与标定，然后进一步生成相应的规则语法. 进一步的，提供给用户高层次、直观的修改建筑属性的接口，进而实时反向计算和生成新的建筑模型语法的方法，被称作反向设计[145]. 近年来较新的进展如 Demir 等人[146]直接在建筑点云模型上提取上下文无关语法，同时提供用户复制和粘贴的高级交互接口来创建新的建筑点云模型；Ilke 等人[147]通过构建分割树的方式提取建筑模型的分割语法，同时提供一整套交互编辑工具给用户进行高级编辑，最终使用稀疏线性最小二乘优化来反向推导相应的语法参数.

逆向过程建模最大的难点在于寻找合适的过程描述子来表达输入的建筑模型. 至今为止，其中很多问题仍然被认为是开放的[60]. 自动过程化和反向设计具有极其诱人的研究前景，值得研究者做进一步探索.

4 建筑与城市布局

前文所述的建筑建模问题解决的是如何生成合理的建筑表面几何模型，而本节所讨论的建筑布局问题属于建筑建模的子问题，侧重于研究建筑空间位置关系. 具体研究对象为：(1) 建筑室内的布局，需考虑房间之间的大小、功能、连通性等属性；(2) 建筑之间的布局，涉及建筑与其他建筑、街道、地形，乃至城市功能等众多因素. 下面将按照上述两个部分分别展开讨论.

4.1 建筑内部空间布局

建筑空间布局问题研究室内墙、房间等内部结构的布局，其本质是空间分配问题[148]，也是被建筑、工程、计算机等学科广泛研究的跨学科问题. 该类布局问题通常需要满足两类约束：(1) 硬约束. 指几何、拓扑结构上的合理性约束；(2) 软约束. 指高层语义上的合理性约束，如舒适性、功能性、合理性等. 求解该类问题最直接的方法是启发式搜索[149]，在整个解空间中搜索满足用户约束的所有可行解. 借鉴自工程领域的各类优化方法，模拟退火[150]和遗传算法[148,151]广泛的应用于室内布局. 由于布局算法的计算复杂度随着房间复杂度呈指数上升，类似算法难以处理复杂建筑的布局. 一种简单的折衷方法是懒惰生成[152]，即仅生成可见部分的内部结构.

使用迭代的方式来逐步完成符合用户约束的布局是另外一类常见的室内布局方法，房间之间的连接关系通常使用图来表示[153]. Marson 等人[154]介绍了一种方形的树状图算法，通过用户指定房间轮廓、面积和功能性，逐步进行子划分直到形成目标布局. 不同于上述分割方法，Tutenel 等人[155]使用一种迭代扩展房间直到满足用户需求的方法，每个房间类型在语义库中有对应的描述，不同语义类型之间的关系将被用于指导房间布局的生成. Camozzato 等人[88]通过迭代的方式将用户输入的房屋轮廓、用

户指定的房屋约束关系进行求解生成最终的平面布局.

机器学习方法尝试从数据中学习建筑室内房屋布局的内在规律.虽然现实中的房屋布局复杂繁多,但其布局中必然蕴含着一些规则,如人类生活的舒适度,社会关系以及生活习俗等.若借助足够的数据,采取合适的机器学习模型,就能够在理论上能够提取其中的规律,并将其应用于指导设计新的房屋布局.布局领域中常见的机器学习模型如贝叶斯网络模型[65]和高斯混合模型[156].最具有代表性的工作如 Merrell 等人[65]使用房间的高层语义参数作为概率网络模型的节点.经过大量数据训练后的模型可用于接受用户的输入来推导其他节点的参数,从而实现生成新的房屋布局参数.

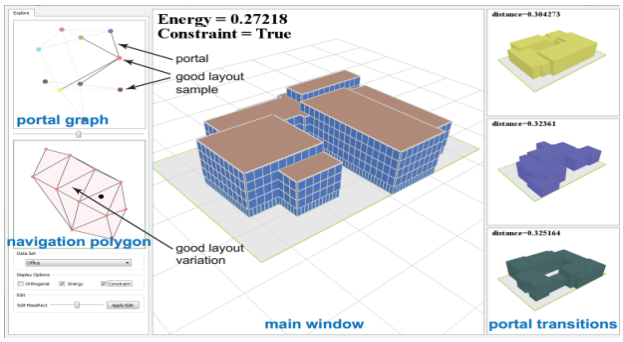
4.2　城市建筑生成与布局

相对于建筑内部布局问题,城市建筑布局问题由于与城市建模、规划、仿真等应用息息相关,是近年来备受研究者关注的热点问题.这类布局涉及到城市的几何模型与行为模型[157],相应的方法也具有较强的跨学科特性.

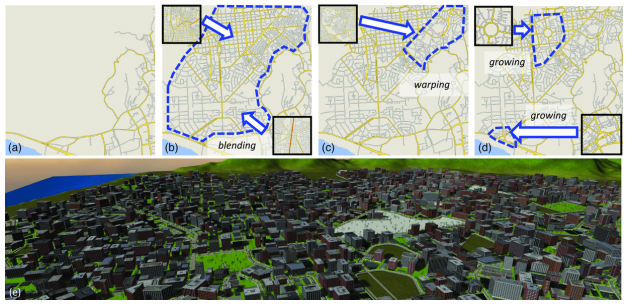
4.2.1　城市的几何模型

城市的几何模型是描述建筑之间,以及建筑与地形、街区等对象之间关系的静态几何模型,也是早期研究方法的主要研究对象.直观的方法是从建筑内部空间布局方法扩展到建筑群,如图 10(a)所示基于图的布局搜索方法[158].此外,由于城市的道路极大程度决定了建筑、街区以及人口的分布,大量研究成果集中在城市路网的生成.直接生成路网的方法包括伪随机方法[159]、MCMC 方法[112]、以 L-system 为代表的过程建模方法[24]、Voronoi 街区布局模型[160]、超流线和张量路网模型[161]等.

一种生成复杂而合理的街区路网的经典的方法是分割-合成方法.这类方法通常需要利用图像处理技术[162]从真实的城市俯瞰图中提取路网结构,然后结合预定义的街区模板和规则进行合成[163-164].分割的方法包括 2D 包围盒法[165]、最小面积边界框法[166]、基于模板的分割方法[167]、图分割法[168]等.其中,Lipp 等人[168]提出的多图层过程建模方法使用图分割的方法保证图层之间移动、合并的拓扑稳定性;Peng 等人[169]使用一系列可变性的模板来对目标区域进行覆盖,以保证生成的布局能够适应任意形状的目标区域;如图 10(b)所示 Nishida 等人[170]提出一种基于样例路网的模板混合方法来交互式生成城市布局.此外,在自适应地形的建筑布局



(a) 基于图的建筑布局[158]

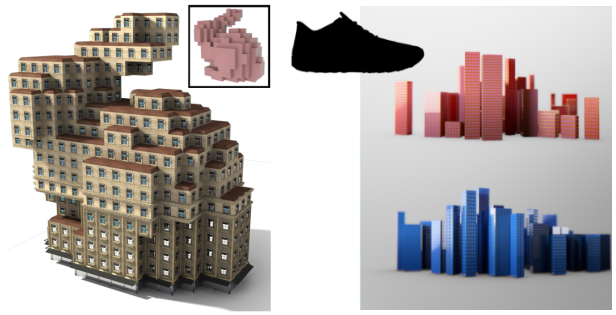


(b) 基于样例混合的街区生成[170]

图 10　典型的面向几何模型的城市布局

方面,Emilien 等人[171]提出了自适应地形的村落规模布局算法.

另一种典型的满足目标约束的布局方法是随机优化方法.这类方法引入能量函数来评估布局结果,将布局问题转化为全局最优化问题.具有代表性的工作有蒙特卡罗方法[172],及其改进的可逆跳转蒙特卡罗[173]、随机顺序蒙特卡罗[174]方法,粒子群算法[175],进化算法[176]等.该类算法能够较好的满足指定的目标参数,目标草图或者目标模型等约束.如图 11 所示,(a)为使用 MCMC 方法生成指定目标体素形状约束的建筑[172],(b)为使用进化算法生成指定目标城市天际线的建筑群模型[176].



(a)目标体素形状约束[172]　　(b)目标城市天际线约束[176]

图 11　给定目标约束的随机建筑建模结果

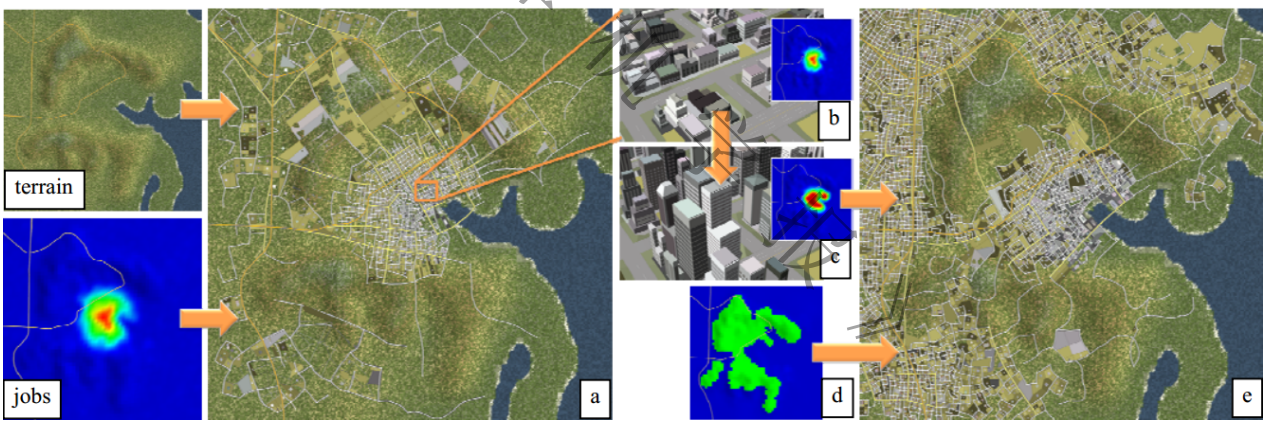
4.2.2　城市的行为模型

城市的行为模型是描述城市的高层功能属性的动态模型,如人口分布、工作机会、交通性、日照、土

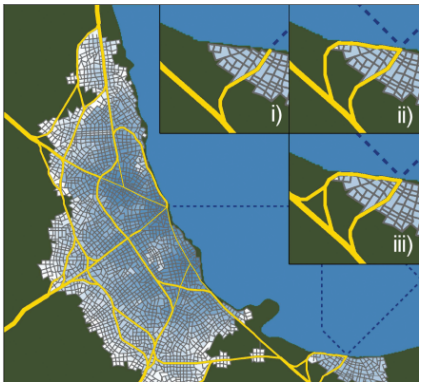
地利用率等.因此,相关研究方法具有强烈的跨学科特性.城市的行为模型能够使得构建的城市模型更加真实,更重要的是能够随着时间维度而推演城市的演变,从而在城市规划、仿真、预测方面产生极高的应用价值.

城市的行为模型广泛用于交通仿真和可视化,以及在城市规划应用中进行演化与验证[177-179].早于过程建模技术在城市建模中的应用,城市规划与设计领域已经在研究自己的模拟系统来预测城市的未来与发展,如 UrbanSim[180].不过这些方法严重依赖 GIS 和人口数据[181],且只能在全局大尺度上进行仿真.基于站点的模型如 CommunityViz[182]能在较小的城镇尺度上仿真.Lechner 等人[183]将过程建模引入上述模型,能够完成城市局部区域的仿真演化.

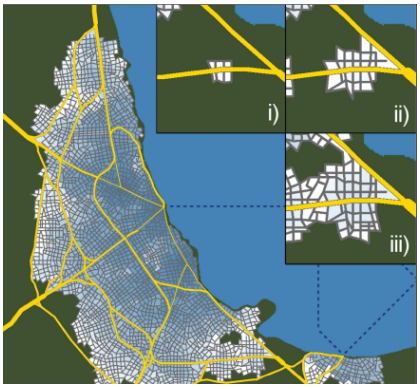
2009 年开始,4D 城市[178]的概念被提出,城市的演化仿真尺度进化到建筑的几何表面,同时也拉开了将城市的行为模型和几何模型结合进行城市布局规划研究的帷幕.Vanegas 等人[184]的工作首次真正将城市的行为模型和几何模型结合起来进行城市布局规划,其使用一种迭代的动态系统来响应用户的修改.如图 12(a)所示,当用户修改了中心城区的建筑高度,周边道路增多,人口随之增长,从而反映了城市内在的功能机制.Beneš 等人[185]通过在一段时间内水上交通(如图 12(b))与陆地交通(如图 12(c))进行模拟的方式来指导主要道路的自动生成与演变.Feng 等人[15]将人类的个性行为学和人群仿真方法用于规划商业区域的建筑布局.人群的属性被抽象为流动性、可达性和舒适性三类,具体表现在每个个体的漫游行为、环境感知行为和运动属性上.通过对大量模拟的人群行为数据进行随机森林回归计算,能够得出建筑的布局特征与人群的行为特征之间的关系.在建筑数量为 20,人群数量为 2000 的规模上进行人群行为模拟 2 小时左右,能够获得较好的布局结果.Peng 等人[16]通过用户指定路网密度、交通方式、交通时间、目的地位置等高层功能参数而自动生成街区路网,并使用基于整数规划的方法来保证生成的路网满足用户输入的限制.



(a) 城市功能属性驱动[184]



(b) 水上交通模型驱动[184]



(c) 陆地交通模型驱动[185]

图 12 基于行为模型的城市布局规划

5　目前的难点与未来趋势

作为典型的应用驱动型研究，建筑建模技术经历了二十多年的发展，已经在多个应用领域取得了瞩目的成就，成为跨越多个学科、形成多种技术流派的研究领域. 本文已经讨论了建筑建模技术的特点、数据来源、常见方法等，最后将从不同的角度讨论建筑建模目前的难点与未来的趋势.

5.1　存在的问题与挑战

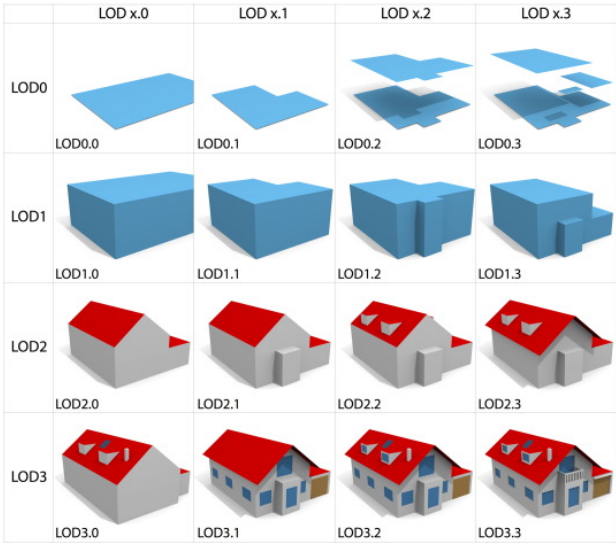
建筑建模技术流派繁多，方法多样，不同技术方法的难点与局限性已经在第三节中分别讨论过，接下来从整个建筑建模领域的角度概括目前存在的问题与挑战：

(1) 缺乏统一的评价体系

整个建筑建模领域目前还没有统一的评价体系，普遍是采取用户学习之类的主观评价方法，其原因在于：① 数据类型不同的建模方法之间难以评价与比较；② 使用同一种数据类型的不同建筑建模方法，又因为采集设备、采集精度的不同而难以比较；③ 不同的建筑类型和风格的建模结果之间不具备比较的意义.

在最新的研究工作中，Verdie 等人[186]提出了场景模型的 LOD 一致性和几何体抽象级别能力应该作为点云重建的评估标准. 此外，为了定义和规范化 3D 城市模型(主要是建筑模型)的多尺度细节标准，开放地理空间信息联盟(Open Geospatial Consortium，OGC)提出了 CityGML 2.0[187]的 5 层层次细节模型标准，如图 13(a)所示. 最近，Biljecki 等人[188]进一步提出了扩展的 16 级 LOD 层次模型，以降低不同级别描述之间的歧义，以及更好的标准化复杂的建筑模型，如图 13(b)所示. 可见，城市建筑 LOD 定义本身也是随着技术的发展和应用的需要进行变化的. 另一方面，Beneš 等人[189]针对真实建筑建模的评价标准，提出了在大尺度上的结构评价和小尺度上的细节评价体系，但整个评价体系仍然存在较大的主观评价性.

(a) OGC的CityGML 2.0标准[187]



(b) 优化的16层LOD标准[188]

图 13　以民居为例的 LOD 标准

总之，建筑建模结果的评价体系仍然还处于探索阶段，对于历史建筑模型、城市功能模型等复杂的模型，其评价体系的建立还有很长的路要走.

(2) 方法的局限性太强

虽然建筑建模方法众多，然而每个方法无论在技术角度和应用角度而言都存在着明显的局限性. 表 6 给出了三大主流建筑建模方法在建模精度、建模效率、模型多样化能力、建筑语义、交互依赖、面向的用户类型以及适用的建筑类型等多个角度的横向对比结果. 概括地来说，交互性越高的方法其建模能力越强，然而往往对用户要求更高，且仅适用于特定建筑类型；自动化的建模方法建模效率高，普通用户也能完成建筑建模任务，但这类方法通常不具备足够的建筑语义信息或模型多样化能力. 为了实现特定的建模目标需要组合不同的方法，这就要求解决多源数据注册、配准、融合等新的问题，因此，为了满足特定的应用需求，通常需要权衡各种建模方法的利弊.

表 6　不同流派建筑建模方法横向对比

方法	建模精度	建模效率	模型多样化能力	建筑语义	交互依赖	面向用户类型	面向建筑类型
过程建模	无限制	高	高	强	是	取决于交互方式	特定类型
图像建模	较高	中	中	中	是	有经验用户	特定类型
	依赖于数据	高	低	弱	否	无限制	无限制
点云建模	较高	中	中	中	是	有经验用户	特定类型
	依赖于数据	高	低	弱	否	无限制	城市建筑为主

(3)复杂建筑的建模仍然困难

所谓复杂建筑,是指存在大量曲面、非凸面体等不规则结构,以及需要构建建筑内部结构的建筑.这类建筑对目前的建筑建模方法而言都是较大的挑战,具体表现在:① 数据采集质量问题.由于结构和细节繁多,采集的数据更容易存在遮挡、细节丢失等问题,从而直接影响建模方法的鲁棒性;② 语法描述困难.虽然以规则为基础的建模方法理论上能够无限精确的描述建筑结构,但其增加的语法复杂性和交互负担值得商榷;③ 建筑组件的识别、分割困难.目前的图像和点云重建方法大部分建立在平面假设、曼哈顿假设或者简单的几何体结构假设的基础上,因此其建模对象都是面向城市的规则建筑,而针对复杂建筑的建模还需要更多的建筑领域知识来指导建模.

5.2 未来趋势与突破点

建筑建模领域未来的发展方向和面临的挑战可以归纳为以下几个方向:

(1)用户生产内容背景下的面向用户建模

互联网和虚拟现实技术的普及和发展给建筑建模带来了更多的数据和研究方法,同时也带来了大量新的挑战.2016 年被称为"VR 元年",同时也拉开了计算机图形学 2.0[190] 的序幕,计算机建模的未来趋势必然是从专家生产内容(Professionally-Generated Content,PGC)向用户生产内容(User-Generated Content,UGC)转变,给普通用户提供各种建模服务的平台层出不穷,如 Google Earth① 鼓励用户制造并上传自己制作的真实建筑模型,Tinkercad② 提供面向大众的在线设计与 3D 打印平台服务,Altizure③ 提供给无人机用户上传航拍图片以自动重建三维场景等.在这个背景下,如何使普通用户高质量、高效率地完成建筑建模任务将成为重要的发展方向.借助虚拟现实、增强现实等新的交互手段,未来的建筑建模将充满高实时性、强互动性、高沉浸感等无限可能.

(2)大数据背景下的数据产生与学习

近几年,大数据与深度学习的结合极大加强了计算机对数据的理解能力.受启发于大型的图像数据库 ImageNet[191],大型的 3D 模型数据库如 ShapeNet[192] 也开始建立,然而其在类别、数量和质量上还远远不能满足"大数据"的要求.目前使用深度学习技术构建 3D 模型的研究还处于初级探索阶段[193-194],深度学习相关技术在建筑建模中的应用仅局限于规则建筑组件的模式识别,建筑模型的特征处理仍然局限于对称性、相似性、重复性、多面体等经典方法.建筑种类繁多,加上建筑模型本身的特殊性,使得深度学习在建筑建模领域存在大量研究空白.庆幸的是,用户生产内容将为基于大数据的建筑建模方法提供海量数据支持,而基于大数据的建筑建模方法又将进一步提高用户生产内容的数量和质量,二者将在很长一段时间内互相促进.

(3)从数据采集到构建的自动化与智能化

建筑建模方法的自动化与智能化趋势将体现在如下几个方面:① 数据采集的自动化与智能化.目前用于建筑建模的数据(主要指图像数据和雷达点云数据)的采集需要大量的人工介入,采集者的经验对数据质量有较大的影响,例如避开障碍物,规划采集路径等.随着无人驾驶、同时定位与地图构建(Simultaneous Localization and Mapping,SLAM)[195] 等技术的发展,无人驾驶汽车采集街景地图,无人机采集航拍数据,携带采集设备的机器人进行主动目标采集,是建筑数据采集自动化和智能化的突破口;② 建模过程的自动化与智能化.建筑建模的交互工作存在大量的重复性.通过机器学习算法主动实时地获取、理解用户交互的意图,能够极大降低用户交互的负担;另一方面,通过逆向过程建模方法学习已有建筑数据的内在模式,能够快速生成大量候选模板或目标模型等等.总之,从数据采集到模型建立的全自动一体化解决方案具备诱人的前景.

(4)面向复杂应用的高维建筑模型

建筑建模应用领域的逐步扩大,对建筑模型提出了更高的真实性和更多的功能性要求,而不再局限于传统的几何三维模型.建筑模型需要增加更多的信息维度来满足复杂和综合性的应用需求,其发展方向可概括为:① 增加知识维度的真实模型.如增加建筑学知识以提高建筑的结构真实性,甚至使其具备 3D 打印的可能性;融合人文、地理、风水等环境因素以提高村镇建模和布局的真实性,增加光照、容积率、交通流量等知识以提高城市建模和布局的实用性等;② 增加时间维度的动态模型.4D 城市的概念要求模型能够在几何尺度上模拟时空变化,从而应用于城市设计和规划、模拟和仿真、演化和预测等应用领域;③ 实时感知的智能模型.从近几年的研究热点来看,融合了城市大数据的城市高维模型的研究尤为火热,是城市数字化、智能化的

① Google Earth. https://www.google.com/earth
② Tinkercad. https://www.tinkercad.com
③ Altizure. https://www.altizure.com

必然趋势. 总的来说，相对于几何数据，建筑和城市的高维属性难以通过数据直接获取，需要挖掘相关领域知识和规则. 结合建筑、城市规划、人居环境、心理等领域的跨学科交叉研究，是构建高维模型的突破点[196].

(5) 历史传统建筑建模的趋势

随着人们对历史文化遗产的日益重视，建筑建模技术将在数字化历史文化遗产、古建筑修复与重建、虚拟旅游等应用中起到愈发重要的作用. 目前的建筑建模技术直接应用在历史建筑上存在两大问题：① 前文所述方法大部分是针对几何形状规则的现代建筑，而历史传统建筑通常具有复杂的几何结构，且数字化文化遗产保护对模型的精度和细节要求相对较高. 针对该局限性，融合多种建筑建模方法优点的混合建模方法是历史建筑重建的必然趋势. 目前普遍的做法是结合图像建模的自动型和过程建模的语义特点[78,197]，如图 14(a)和(b)所示. 更具前瞻性的是 Mathias 等人[198]重建希腊多立克柱式神庙的工作，其中 CGA 用于描述建筑模型，建筑组件检测子用于检测图像中的建筑组件，SfM 用来生成初始点云模型，而整个重建过程由逆向过程建模来驱动，建模结果如图 14(c)所示；② 前文所述方法大部分局限于构建建筑的外表面，而对于历史建筑而言仅仅建模出其表面几何结构是远远不够的. 国内已有部分工作对此作了卓越的探索，如可以较好的描述中国传统建筑室内组件(柱，梁等)的营造语法(Constructive Grammar，CG)[199]，以及定义了中国传统江南民居建筑知识和语义单元的本体论思想[62-63,200-201]等. 进一步地，2009 年提出的历史建筑信息模型(Historic Building Information Modelling，HBIM)[202]重点强调了依据历史建筑模式图书而定义建筑背后的营造规则和细节，并率先对欧洲的历史传统建筑进行了尝试[203]. HBIM 的提出对未来历史建筑建模的发展指明了方向.

(a) 中国古代亭台建筑[78]

(b) 中国传统宫廷建筑[197]

(c) 希腊多立克柱式神庙[198]

图 14　典型的混合多种技术的历史建筑建模结果

致　谢　在此，我们向对本文做出贡献的所有同行，以及计算机图形学与混合现实研讨会(GAMES)、视觉与学习青年学者研讨会(VALSE)等组织表示感谢！

参　考　文　献

[1] Smelik R M, Tutenel T, Bidarra R, Benes B. A survey on procedural modelling for virtual worlds. Computer Graphics Forum, 2014, 33(6): 31-50

[2] Shu Bo, Qiu Xian-Jie, Wang Zhao-Qi. Survey of shape from image. Journal of Computer Research and Development, 2010, 47(3): 549-560(in Chinese)
(束搏，邱显杰，王兆其. 基于图像的几何建模技术综述. 计算机研究与发展，2010，47(3)：549-560)

[3] Olsen L, Samavati F F, Sousa M C, Jorge J A. Sketch-based modeling: A survey. Computers & Graphics, 2009, 33(1): 85-103

[4] Yin Xuetao, Wonka P, Razdan A. Generating 3D building models from architectural drawings: A survey. Computer Graphics & Applications, 2009, 29(1): 20-30

[5] Berger M, Tagliasacchi A, Seversky L M, et al. A survey of surface reconstruction from point clouds. Computer Graphics Forum, 2017, 36(1): 301-329

[6] Wu Long-Hua, Huang Hui. Survey on points-driven computer graphics. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2015, 27(8): 1341-1353(in Chinese)
(伍龙华，黄惠. 点云驱动的计算机图形学综述. 计算机辅助设计与图形学学报，2015，27(8)：1341-1353)

[7] Musialski P, Wonka P, Aliaga D G, et al. A survey of urban reconstruction. Computer Graphics Forum, 2013, 32(6): 146-177

[8] Ning X, Wang Y. 3D reconstruction of architecture appearance: A survey. Journal of Computational Information Systems, 2013, 9(10): 3837-3848

[9] Shinya M, Forgue M C. Laying out objects with geometric and physical constraints. Visual Computer, 1995, 11(4): 188-201

[10] Birch P J, Browne S P, Jennings V J, et al. Rapid procedural-modelling of architectural structures//Proceedings of the ACM SIGGRAPH. Glyfada, Greece, 2001: 187-196

[11] Hargittai I, Hargittai M. Symmetry: A Unifying Concept. Bolinas, USA: Shelter Publications Press, 1994

[12] Alexander C. A Pattern Language: Towns, Buildings, Construction. Oxford, UK: Oxford University Press, 1977

[13] Bafna S. Space syntax: A brief introduction to its logic and analytical techniques. Environment and Behavior, 2003, 35(1): 17-29

[14] Alhalawani S, Yang Yong-Liang, Wonka P, Mitra N J. What Makes London Work Like London? Computer Graphics Forum, 2014, 33(5): 157-165

[15] Feng Tian, Yu Lap-Fai, Yeung Sai-Kit, et al. Crowd-driven mid-scale layout design. ACM Transactions on Graphics, 2016, 35(4): 1-14

[16] Peng Chi-Han, Yang Yong-Liang, Bao Fan, et al. Computational network design from functional specifications. ACM Transactions on Graphics, 2016, 35(4): 1-12

[17] So C, Baciu G, Sun H. Reconstruction of 3D virtual buildings from 2D architectural floor plans//Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology. Taipei, China, 1998: 17-23

[18] Watson B, Müller P, Veryovka O, et al. Procedural urban modeling in practice. IEEE Computer Graphics and Applications, 2008, 28(3): 18-26

[19] Prusinkiewicz P. Graphical applications of L-systems//Proceedings of the Graphics Interface. Toronto, Canada, 1986: 247-253

[20] Prusinkiewicz P, Lindenmayer A. The Algorithmic Beauty of Plants. New York, USA: Springer, 1990

[21] Smith A R. Plants, fractals, and formal languages. ACM SIGGRAPH Computer Graphics, 1984, 18(3): 1-10

[22] Mitchell W J. The Logic of Architecture: Design, Computation, and Cognition. Cambridge, USA: MIT Press, 1990

[23] Parish Y I H, Müller P. Procedural modeling of cities//Proceedings of the 28th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. Los Angeles, USA, 2001: 301-308

[24] Stiny G. Introduction to shape and shape grammars. Environment and Planning B, 1980, 7(3): 343-351

[25] Stiny G N. Pictorial and formal aspects of shape and shape grammars and aesthetic systems. Basel, Switzerland: Birkhäuser, 1975

[26] Stiny G. Spatial relations and grammars. Environment and Planning B: Planning and Design, 1982, 9(1): 113-114

[27] Vitins B J, Axhausen K. Shape grammars overview and assessment for transport and urban design: Review, terminology, assessment, and application. Journal of Transport and Land Use, 2016, 9(1): 65-96

[28] Çağdaş G. A shape grammar model for designing row-houses. Design Studies, 1996, 17(1): 35-51

[29] Wonka P, Wimmer M, Sillion F, Ribarsky W. Instant architecture. ACM Transactions on Graphics, 2003, 22(4): 669-677

[30] Müller P, Wonka P, Haegler S, et al. Procedural modeling of buildings. ACM Transactions on Graphics, 2006, 25(3): 614-623

[31] Larive M, Gaildrat V. Wall grammar for building generation//Proceedings of the International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques in Australasia and Southeast Asia. Kuala Lumpur, Malaysia, 2006: 429-437

[32] Schwarz M, Müller P. Advanced procedural modeling of architecture. ACM Transactions on Graphics, 2015, 34(4): 1-12

[33] Thaller W, Krispel U, Zmugg R, et al. Shape grammars on convex polyhedra. Computers & Graphics, 2013, 37(6): 707-717

[34] Edelsbrunner J, Havemann S, Sourin A, Fellner D W. Procedural modeling of architecture with round geometry. Computers & Graphics, 2017, 64: 14-25

[35] Kelly G, McCabe H. Citygen: An interactive system for procedural city generation//Proceedings of the 5th International Conference on Game Design and Technology. Liverpool, UK, 2007: 8-16

[36] Lipp M, Wonka P, Wimmer M. Interactive visual editing of grammars for procedural architecture. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(3): 1-10

[37] Patow G. User-friendly graph editing for procedural modeling of buildings. IEEE Computer Graphics and Applications, 2012, 32(2): 66-75

[38] Huang Chun-Yen, Tai Wen-Kai. Ting tools: Interactive and procedural modeling of Chinese ting. The Visual Computer, 2013, 29(12): 1303-1318

[39] Dang M, Lienhard S, Ceylan D, et al. Interactive design of probability density functions for shape grammars. ACM Transactions on Graphics, 2015, 34(6): 1-13

[40] Lipp M, Wonka P, Wimmer M. Parallel generation of multiple L-systems. Computers & Graphics, 2010, 34(5): 585-593

[41] Marvie J-E, Gautron P, Hirtzlin P, Sourimant G. Render-time procedural per-pixel geometry generation//Proceedings of the Graphics Interface. Newfoundland, Canada, 2011: 167-174

[42] Marvie J-E, Buron C, Gautron P, et al. GPU shape grammars. Computer Graphics Forum, 2012, 31(7): 2087-2095

[43] Steinberger M, Kenzel M, Kainz B, et al. Parallel generation of architecture on the GPU. Computer Graphics Forum, 2014, 33(2): 73-82

[44] Steinberger M, Kenzel M, Kainz B, et al. On-the-fly generation and rendering of infinite cities on the GPU. Computer Graphics Forum, 2014, 33(2): 105-114

[45] Steinberger M, Kenzel M, Boechat P, et al. Whippletree: Task-based scheduling of dynamic workloads on the GPU. ACM Transactions on Graphics, 2014, 33(6): 1-11

[46] Boechat P, Dokter M, Kenzel M, et al. Representing and scheduling procedural generation using operator graphs. ACM Transactions on Graphics, 2016, 35(6): 1-12

[47] Finkenzeller D, Bender J. Semantic representation of complex building structures//Proceedings of the Computer Graphics and Visualization-IADIS Multi Conference on Computer Science and Information Systems. Amsterdam, The Netherlands, 2008: 1-6

[48] Leblanc L, Houle J, Poulin P. Component-based modeling of complete buildings//Proceedings of the Graphics Interface. Newfoundland, Canada, 2011: 87-94

[49] Liu Hua, Wang Qing, Hua Wei, et al. Building Chinese ancient architectures in seconds//Proceedings of the International Conference on Computational Science. Kassel, Germany, 2005: 248-255

[50] Li Shanglin, Li Lin, Cao Mingwei, et al. Rapid modeling of Chinese Huizhou traditional vernacular houses. IEEE Access, 2017, 5: 20668-20683

[51] Kelly T, Wonka P. Interactive architectural modeling with procedural extrusions. ACM Transactions on Graphics, 2011, 30(2): 1-38

[52] Xu Kai, Kim V G, Huang Qixing, Kalogerakis E. Data-Driven Shape Analysis and Processing. Computer Graphics Forum, 2017, 36(1): 101-132

[53] Wei Li-Yi, Lefebvre S, Kwatra V, Turk G. State of the art in example-based texture synthesis//Proceedings of the Eurographics. Munich, Germany, 2009: 93-117

[54] Merrell P C. Model Synthesis[Ph. D. dissertation]. University of North Carolina at Chapel Hill, Chapel Hill, USA, 2009

[55] Merrell P. Example-based model synthesis//Proceedings of the 2007 Symposium on Interactive 3D Graphics and Games. Seattle, USA, 2007: 105-112

[56] Koller D, Friedman N. Probabilistic Graphical Models: Principles and Techniques. Cambridge, USA: MIT Press, 2009

[57] Heckerman D. A tutorial on learning with Bayesian networks. Learning in Graphical Models. Berlin, Germany: Springer, 1998

[58] Kalogerakis E, Chaudhuri S, Koller D, Koltun V. A probabilistic model for component-based shape synthesis. ACM Transactions on Graphics, 2012, 31(4): 55

[59] Chaudhuri S, Kalogerakis E, Guibas L, Koltun V. Probabilistic reasoning for assembly-based 3D modeling. ACM Transactions on Graphics, 2011, 30(4): 35

[60] Fan L, Wonka P. A probabilistic model for exteriors of residential buildings. ACM Transactions on Graphics, 2016, 35(5): 1-13

[61] Li Shang-Lin, Li Lin, Cao Ming-Wei, Liu Xiao-Ping. Construction-oriented rapid modeling method on Huizhou architectures. Journal of Software, 2016, 27(10): 2542-2556 (in Chinese)
(李尚林，李琳，曹明伟，刘晓平. 面向真实构建的徽州建筑快速建模方法. 软件学报，2016, 27(10): 2542-2556)

[62] Liu Yong, Xu Congfu, Pan Zhigeng, Pan Yunhe. Semantic modeling for ancient architecture of digital heritage. Computers & Graphics, 2006, 30(5): 800-814

[63] Liu Yong, Xu Congfu, Zhang Qiong, Pan Yunhe. The smart architect: Scalable ontology-based modeling of ancient Chinese architectures. IEEE Intelligent Systems, 2008, 23(1): 49-56

[64] Guerrero P, Jeschke S, Wimmer M, Wonka P. Learning shape placements by example. ACM Transactions on Graphics, 2015, 34(4): 1-13

[65] Merrell P, Schkufza E, Koltun V. Computer-generated residential building layouts. ACM Transactions on Graphics, 2010, 29(6): 1-12

[66] Han Jungong, Shao Ling, Xu Dong, Shotton J. Enhanced computer vision with Microsoft Kinect sensor: A review. IEEE Transactions on Cybernetics, 2013, 43(5): 1318-1334

[67] Silberman N, Hoiem D, Kohli P, Fergus R. Indoor segmentation and support inference from RGBD images//Proceedings of the European Conference on Computer Vision. Florence, Italy, 2012: 746-760

[68] Wang Hao, Wang Jun, Liang Wang. Online reconstruction of indoor scenes from RGB-D streams//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Las Vegas, USA, 2016: 3271-3279

[69] Guo Kaiwen, Xu Feng, Yu Tao, et al. Real-time geometry, albedo, and motion reconstruction using a single RGB-D camera. ACM Transactions on Graphics, 2017, 36(3): Article No. 32

[70] Li Dongping, Shao Tianjia, Wu Hongzhi, Zhou Kun. Shape completion from a single RGBD image. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2016, 23(7): 1809-1822

[71] Guillou E, Meneveaux D, Maisel E, Bouatouch K. Using vanishing points for camera calibration and coarse 3D reconstruction from a single image. The Visual Computer, 2000, 16(7): 396-410

[72] Hong Wei, Yang Allen Yang, Huang Kun, Ma Yi. On symmetry and multiple-view geometry: Structure, pose, and calibration from a single image. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(3): 241-265

[73] Jiang Nianjuan, Tan Ping, Cheong Loong-Fah. Symmetric architecture modeling with a single image. ACM Transactions on Graphics, 2009, 28(5): 1-8

[74] Liebowitz D, Criminisi A, Zisserman A. Creating architectural models from images. Computer Graphics Forum, 1999, 18(3): 39-50

[75] Wilczkowiak M, Sturm P, Boyer E. Using geometric constraints through parallelepipeds for calibration and 3D modeling. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2005, 27(2): 194-207

[76] Wu Changchang, Frahm Jan-Michael, Pollefeys Marc. Repetition-based dense single-view reconstruction//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Colorado Springs, USA, 2011: 3113-3120

[77] Oh B M, Chen M, Dorsey J, Durand F. Image-based modeling and photo editing//Proceedings of the 28th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. Los Angeles, USA, 2001: 433-442

[78] Hou Fei, Qin Hong, Qi Yue. Procedure-based component and architecture modeling from a single image. The Visual Computer, 2016, 32(2): 151-166

[79] Müller P, Zeng G, Wonka P, Van Gool L. Image-based procedural modeling of facades. ACM Transactions on Graphics, 2007, 26(3): 1-9

[80] Fan L, Musialski P, Liu L, Wonka P. Structure completion for facade layouts. ACM Transactions on Graphics, 2014, 33(6): 1-11

[81] Goldschmidt G. The dialectics of sketching. Creativity Research Journal, 1991, 4(2): 123-143

[82] Eitz M, Richter R, Boubekeur T, et al. Sketch-based shape retrieval. ACM Transactions on Graphics, 2012, 31(4): 1-10

[83] Igarashi T, Matsuoka S, Tanaka H. Teddy: A sketching interface for 3D freeform design//Proceedings of the ACM SIGGRAPH 2007 courses. San Diego, USA, 2007: 1-8

[84] Dorsey J, Xu S, Smedresman G, et al. The mental canvas: A tool for conceptual architectural design and analysis//Proceedings of the Pacific Conference on Computer Graphics and Applications. Maui, USA, 2007: 201-210

[85] Leclercq P. Invisible sketch interface in architectural engineering//Proceedings of the International Workshop on Graphics Recognition. Barcelona, Spain, 2003: 353-363

[86] Juchmes R, Leclercq P, Azar S. A freehand-sketch environment for architectural design supported by a multi-agent system. Computers & Graphics, 2005, 29(6): 905-915

[87] Chen Xuejin, Kang Sing Bing, Xu Ying Qing, et al. Sketching reality: Realistic interpretation of architectural designs. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(2): 21-28

[88] Camozzato D, Dihl L, Silveira I, et al. Procedural floor plan generation from building sketches. The Visual Computer, 2015, 31(6-8): 753-763

[89] Yu Qian, Yang Yongxin, Liu Feng, et al. Sketch-a-Net: A deep neural network that beats humans. International Journal of Computer Vision, 2017, 122(3): 411-425

[90] Nishida G, Garcia-Dorado I, Aliaga D G, et al. Interactive sketching of urban procedural models. ACM Transactions on Graphics, 2016, 35(4): 1-11

[91] Lipson H, Shpitalni M. Conceptual design and analysis by sketching. AI EDAM, 2000, 14(5): 391-401

[92] Scharstein D, Szeliski R, Zabih R. A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms//Proceedings of the IEEE Workshop on Stereo and Multi-Baseline Vision. Washington, USA, 2001: 131-140

[93] Sinha S N, Steedly D, Szeliski R, et al. Interactive 3D architectural modeling from unordered photo collections. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(5): 1-10

[94] Lowe D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2): 91-110

[95] Bay H, Tuytelaars T, Van Gool L. SURF: Speeded up robust features. Computer Vision & Image Understanding, 2006, 110(3): 404-417

[96] Snavely N, Seitz S M, Szeliski R. Photo tourism: Exploring photo collections in 3D. ACM Transactions on Graphics, 2006, 25(3): 835-846

[97] Raguram R, Frahm J M, Pollefeys M. A comparative analysis of RANSAC techniques leading to adaptive real-time random sample consensus//Proceedings of the European Conference on Computer Vision. Marseille, France, 2008: 500-513

[98] Frahm J M, Fite-Georgel P, Gallup D, et al. Building Rome on a cloudless day//Proceedings of the European Conference on Computer Vision. Crete, Greece, 2010: 368-381

[99] Furukawa Y, Curless B, Seitz S M, Szeliski R. Manhattan-world stereo//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Miami, USA, 2009: 1422-1429

[100] Gallup D, Frahm J-M, Pollefeys M. Piecewise planar and non-planar stereo for urban scene reconstruction//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. San Francisco, USA, 2010: 1418-1425

[101] Gallup D, Pollefeys M, Frahm J-M. 3D reconstruction using an n-layer heightmap//Proceedings of the German Association for Pattern Recognition DAGM. Darmstadt, Germany, 2010: 1-10

[102] Ceylan D, Mitra N J, Zheng Youyi, Pauly M. Coupled structure-from-motion and 3D symmetry detection for urban facades. ACM Transactions on Graphics, 2014, 33(1): 1-15

[103] Wang Wei, Hu Zhan-Yi. Rapid interactive 3D urban scene reconstruction. Science China: Information Science, 2015, 45(9): 1141-1156(in Chinese)
(王伟, 胡占义. 快速交互式三维城市场景重建. 中国科学: 信息科学, 2015, 45(9): 1141-1156)

[104] Debevec P E, Taylor C J, Malik J. Modeling and rendering architecture from photographs: A hybrid geometry-and image-based approach//Proceedings of the 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New Orleans, USA, 1996: 11-20

[105] Dick A R, Torr P H S, Cipolla R. Modelling and interpretation of architecture from several images. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2): 111-134

[106] Pollefeys M, Nistér D, Frahm J M, et al. Detailed real-time urban 3D reconstruction from video. International Journal of Computer Vision, 2008, 78(2): 143-167

[107] Klingner B, Martin D, Roseborough J. Street view motion-from-structure-from-motion//Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision. Portland, USA, 2013: 953-960

《计算机学报》

[108] Zebedin L, Bauer J, Karner K, Bischof H. Fusion of feature- and area-based information for urban buildings modeling from aerial imagery//Proceedings of the European Conference on Computer Vision. Marseille, France, 2008: 873-886

[109] Xiao Jianxiong, Fang Tian, Tan Ping, et al. Image-based facade modeling. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(5): 1-10

[110] Xiao Jianxiong, Fang Tian, Zhao Peng, et al. Image-based street-side city modeling. ACM Transactions on Graphics, 2009, 28(5): 1-12

[111] Agarwal S, Furukawa Y, Snavely N, et al. Building rome in a day. Communications of the ACM, 2011, 54(10): 105-112

[112] Heinly J, Schönberger J L, Dunn E, Frahm J M. Reconstructing the world* in six days* (as captured by the Yahoo 100 million image dataset)//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Boston, USA, 2015

[113] Bovolo F, Marin C, Bruzzone L. A hierarchical approach to change detection in very high resolution SAR images for surveillance applications. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 51(4): 2042-2054

[119] Nan L, Sharf A, Zhang H, et al. SmartBoxes for interactive urban reconstruction. ACM Transactions on Graphics, 2010, 29(4): 1-10

[114] Zhang K, Yan J, Chen S C. Automatic construction of building footprints from airborne LIDAR data. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2006, 44(9): 2523-2533

[115] Zheng Qian, Sharf Andrei, Wan Guowei, et al. Non-local scan consolidation for 3D urban scenes. ACM Transactions on Graphics, 2010, 29(4): 1-9

[116] Pu S, Vosselman G. Knowledge based reconstruction of building models from terrestrial laser scanning data. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2009, 64(6): 575-584

[117] Li Yangyan, Zheng Qian, Sharf Andrei, et al. 2D-3D fusion for layer decomposition of urban facades//Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision. Barcelona, Spain, 2011: 882-889

[118] Schwalbe E, Maas H-G, Seidel F. 3D building model generation from airborne laser scanner data using 2D GIS data and orthogonal point cloud projections//Proceedings of the ISPRS WG III/3, III/4. Enschede, The Netherlands, 2005: 209-214

[120] Arikan M, Schwärzler M, Flöry S, et al. O-Snap: Optimization-based snapping for modeling architecture. ACM Transactions on Graphics, 2013, 32(1): 6

[121] Chen Jie, Chen Baoquan. Architectural modeling from sparsely scanned range data. International Journal of Computer Vision, 2008, 78(2-3): 223-236

[122] Vanegas C A, Aliaga D G, Benes B. Automatic extraction of Manhattan-world building masses from 3D laser range scans. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2012, 18(10): 1627-1637

[123] Chen L, Teo T, Rau Jiann-Yeou, et al. Building reconstruction from LIDAR data and aerial imagery//Proceedings of the IGARSS. Seoul, Korea, 2005: 2846-2849

[124] You Suya, Hu Jinhui, Neumann U, Fox P. Urban site modeling from LiDAR//Proceedings of the International Conference on Computational Science and Its Applications. Montreal, Canada, 2003: 579-588

[125] Lin Hui, Gao Jizhou, Zhou Yu, et al. Semantic decomposition and reconstruction of residential scenes from LiDAR data. ACM Transactions on Graphics, 2013, 32(4): 1-10

[126] Wang Yinghui, Zhang Huanhuan, Zhao Yanni, et al. Three-dimensional reconstruction method of Tang Dynasty building based on point clouds. Optical Engineering, 2015, 54(12): 1-11

[127] Kwak E. Automatic 3D Building Model Generation by Integrating LiDAR and Aerial Images Using a Hybrid Approach [Ph. D. dissertation]. University of Calgary, Calgary, Canada, 2013

[128] Gold E M. Language identification in the limit. Information and control, 1967, 10(5): 447-474

[129] Stolcke A. Bayesian Learning of Probabilistic Language Models [Ph. D. dissertation]. University of California at Berkeley, Berkeley, USA, 1994

[130] Martinovic A, Van Gool L. Bayesian grammar learning for inverse procedural modeling//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Portland, USA, 2013: 201-208

[131] Šťava O, Beneš B, Měch R, et al. Inverse procedural modeling by automatic generation of L-systems. Computer Graphics Forum, 2010, 29(2): 665-674

[132] Bokeloh M, Wand M, Seidel H-P. A connection between partial symmetry and inverse procedural modeling. ACM Transactions on Graphics, 2010, 29(4): 104

[133] Aliaga D G, Rosen P A, Bekins D R. Style grammars for interactive visualization of architecture. IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics, 2007, 13(4): 786-797

[134] Bao F, Schwarz M, Wonka P. Procedural facade variations from a single layout. ACM Transactions on Graphics, 2013, 32(1): 8-20

[135] Zhang Hao, Xu Kai, Jiang Wei, et al. Layered analysis of irregular facades via symmetry maximization. ACM Transactions on Graphics, 2013, 32(4): 1-10

[136] Wu Fuzhang, Yan Dong Ming, Dong Weiming, et al. Inverse procedural modeling of facade layouts. ACM Transactions on Graphics, 2014, 33(4): 70-79

[137] Martinović A, Mathias M, Weissenberg J, Van Gool L. A three-layered approach to facade parsing//Proceedings of the European Conference on Computer Vision. Florence, Italy, 2012: 416-429

计算机学报

[138] Musialski P, Wimmer M, Wonka P. Interactive coherence-based Façade modeling. Computer Graphics Forum, 2012, 31(2): 661-670

[139] Dang M, Ceylan D, Neubert B, Pauly M. SAFE: Structure-aware facade editing. Computer Graphics Forum, 2014, 33(2): 83-93

[140] Ilčík M, Musialski P, Auzinger T, Wimmer M. Layer-based procedural design of facades. 2015, 34(2): 205-216

[141] Lin J, Cohen-Or D, Zhang H, et al. Structure-preserving retargeting of irregular 3D architecture. ACM Transactions on Graphics, 2011, 30(6): 1-10

[142] Demir I, Aliaga D G, Benes B. Proceduralization of buildings at city scale//Proceedings of the International Conference on 3D Vision. Tokyo, Japan, 2014: 456-463

[143] Coughlan J M, Yuille A L. Manhattan world: Compass direction from a single image by Bayesian inference//Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision. Kerkyra, Greece, 1999: 941-947

[144] Demir I, Aliaga D G, Benes B. Coupled segmentation and similarity detection for architectural models. ACM Transactions on Graphics, 2015, 34(4): 1-11

[145] Vanegas C A, Garcia-Dorado I, Aliaga D G, et al. Inverse design of urban procedural models. ACM Transactions on Graphics, 2012, 31(6): 1-11

[146] Demir I, Aliaga D G, Benes B. Procedural editing of 3D building point clouds//Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision. Santiago, Chile, 2015: 2147-2155

[147] Demir I, Aliaga D G, Benes B. Proceduralization for editing 3D architectural models//Proceedings of the International Conference on 3D Vision. Stanford, USA, 2016: 194-202

[148] Rodrigues E, Gaspar A R, Gomes Á. An evolutionary strategy enhanced with a local search technique for the space allocation problem in architecture, Part 1: Methodology. Computer-Aided Design, 2013, 45(5): 887-897

[149] Larive M, Le Roux O, Gaildrat V. Using meta-heuristics for constraint-based 3D objects layout//Proceedings of the 7th International Conference on Computer Graphics and Artificial Intelligence. Limoges, Franch, 2004: 12-13

[150] Michalek J, Choudhary R, Papalambros P. Architectural layout design optimization. Engineering Optimization, 2002, 34(5): 461-484

[151] Flack R W J, Ross B J. Evolution of architectural floor plans//Proceedings of the European Conference on the Applications of Evolutionary Computation. Torino, Italy, 2011: 313-322

[152] Hahn E, Bose P, Whitehead A. Lazy generation of building interiors in realtime//Proceedings of the Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Ottawa, Canada, 2006: 2441-2444

[153] Martin J. Procedural house generation: A method for dynamically generating floor plans//Proceedings of the Symposium on Interactive 3D Graphics and Games. Redwood City, USA, 2006: 1-2

[154] Marson F, Musse S R. Automatic real-time generation of floor plans based on squarified treemaps algorithm. International Journal of Computer Games Technology, 2010, 2010: 1-10

[155] Tutenel T, Bidarra R, Smelik R M, de Kraker K J. Rule-based layout solving and its application to procedural interior generation//Proceedings of the CASA Workshop on 3D Advanced Media in Gaming and Simulation. Amsterdam, The Netherlands, 2009: 15-24

[156] Fisher M, Ritchie D, Savva M, et al. Example-based synthesis of 3D object arrangements. ACM Transactions on Graphics, 2012, 31(6): 135

[157] Waddell P, Ulfarsson G F. Introduction to urban simulation: Design and development of operational models. Handbook of Transport Geography and Spatial Systems. Bingley, UK: Emerald Group Publishing Limited, 2004

[158] Bao Fan, Yan Dong-Ming, Mitra N J, Wonka P. Generating and exploring good building layouts. ACM Transactions on Graphics, 2013, 32(4): 122

[159] Greuter S, Parker J, Stewart N, Leach G. Real-time procedural generation of 'pseudo infinite' cities//Proceedings of the 1st International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques in Australasia and South East Asia. Melbourne, Australia, 2003: 87-94

[160] Glass K R, Morkel C, Bangay S D. Duplicating road patterns in south african informal settlements using procedural techniques//Proceedings of the International Conference on Computer Graphics, Virtual Reality, Visualisation and Interaction in Africa. Cape Town, South Africa, 2006: 161-169

[161] Chen Guoning, Esch G, Wonka P, et al. Interactive procedural street modeling. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(3): 1-10

[162] Nishida G, Garcia-Dorado I, Aliaga D G. Example-driven procedural urban roads. Computer Graphics Forum, 2016, 35(6): 5-17

[163] Hertzmann A, Jacobs C E, Oliver N, et al. Image analogies //Proceedings of the 28th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. Los Angleles, USA, 2001: 327-340

[164] Sun Jing, Yu Xiaobo, Baciu G, Green M. Template-based generation of road networks for virtual city modeling//Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology. Hong Kong, China, 2002: 33-40

[165] Aliaga D G, Vanegas C A, Benes B. Interactive example-based urban layout synthesis. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(5): 160

[166] Vanegas C A, Kelly T, Weber B, et al. Procedural generation of parcels in urban modeling. Computer Graphics Forum, 2012, 31(2pt3): 681-690

[167] Wickramasuriya R, Chisholm L A, Puotinen M, et al. An automated land subdivision tool for urban and regional planning: Concepts, implementation and testing. Environmental Modelling & Software, 2011, 26(12): 1675-1684

[168] Yang Yong-Liang, Wang Jun, Vouga E, Wonka P. Urban pattern: Layout design by hierarchical domain splitting. ACM Transactions on Graphics, 2013, 32(6): 1-12

[169] Lipp M, Scherzer D, Wonka P, Wimmer M. Interactive modeling of city layouts using layers of procedural content. Computer Graphics Forum, 2011, 30(2): 345-354

[170] Peng Chi-Han, Yang Yong-Liang, Wonka P. Computing layouts with deformable templates. ACM Transactions on Graphics, 2014, 33(4): 1-11

[171] Emilien A, Bernhardt A, Peytavie A, et al. Procedural generation of villages on arbitrary terrains. The Visual Computer, 2012, 28(6-8): 809-818

[172] Talton J O, Lou Y, Lesser S, et al. Metropolis procedural modeling. ACM Transactions on Graphics, 2011, 30(2): 1-14

[173] Yeh Yi-Ting, Yang Lingfeng, Watson M, et al. Synthesizing open worlds with constraints using locally annealed reversible jump MCMC. ACM Transactions on Graphics, 2012, 31(4): 1-11

[174] Ritchie D, Mildenhall B, Goodman N D, Hanrahan P. Controlling procedural modeling programs with stochastically-ordered sequential Monte Carlo. ACM Transactions on Graphics, 2015, 34(4): 1-11

[175] Ren Pu, Fan Yachun, Zhou Mingquan, et al. Rapid three-dimensional scene modeling by sketch retrieval and auto-arrangement. Computers & Graphics, 2017, 64(C): 26-36

[176] Haubenwallner K, Seidel H-P, Steinberger M. ShapeGenetics: Using genetic algorithms for procedural modeling. Computer Graphics Forum, 2017, 36(2): 213-223

[177] Vanegas C A, Aliaga D G, Benes B, Waddell P. Visualization of simulated urban spaces: Inferring parameterized generation of streets, parcels, and aerial imagery. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2009, 15(3): 424-435

[178] Weber B, Müller P, Wonka P, Gross M. Interactive geometric simulation of 4D cities. Computer Graphics Forum, 2009, 28(2): 481-492

[179] Honda M, Mizuno K, Fukui Y, Nishihara S. Generating autonomous time-varying virtual cities//Proceedings of the International Conference on Cyberworlds. Washington, USA, 2004: 45-52

[180] Waddell P. UrbanSim: Modeling urban development for land use, transportation, and environmental planning. Journal of the American Planning Association, 2002, 68(3): 297-314

[181] Brail R K, Klosterman R E. Planning Support Systems: Integrating Geographic Information Systems, Models, and Visualization Tools. Redlands, USA: ESRI Press, 2001

[182] Kwartler M, Bernard R N. CommunityViz: An integrated planning support system//Brail R K, Klosterman R E, eds. Integrating Geographic Information Systems, Models and Visualization Tools. Redlands, USA: ESRI, 2001: 285-308

[183] Lechner T, Ren P, Watson B, et al. Procedural modeling of urban land use//Proceedings of the ACM SIGGRAPH Research Posters. New York, USA, 2006: 1-11

[184] Vanegas C A, Aliaga D G, Benes B, Waddell P A. Interactive design of urban spaces using geometrical and behavioral modeling. ACM Transactions on Graphics, 2009, 28(5): 1-10

[185] BenešJ, Wilkie A, Křivánek J. Procedural modelling of urban road networks. Computer Graphics Forum, 2014, 33(6): 132-142

[186] Verdie Y, Lafarge F, Alliez P. LOD generation for urban scenes. ACM Transactions on Graphics, 2015, 34(3): 1-14

[187] Gröger G, Kolbe T H, Nagel C, Häfele K H. OGC city geography markup language (CityGML) encoding standard, Version 2.0, OGC doc No. 12-019. Open Geospatial Consortium, 2012. Available at http://www.opengis.net/spec/citygml/2.0

[188] Biljecki F, Ledoux H, Stoter J. An improved LOD specification for 3D building models. Computers, Environment and Urban Systems, 2016, 59: 25-37

[189] BenešJ, Kelly T, Děchtěrenko F, et al. On realism of architectural procedural models. Computer Graphics Forum, 2017, 36(2): 225-234

[190] Zhou Kun. Computer Graphics 2.0: Towards end-user-generated contents. Frontiers of Computer Science, 2017, 11(5): 743-745

[191] Deng Jia, Dong Wei, Socher R, et al. ImageNet: A large-scale hierarchical image database//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Miami, USA, 2009: 248-255

[192] Chang A X, Funkhouser T, Guibas L, et al. ShapeNet: An information-rich 3D model repository. arXiv preprint arXiv: 1512.03012, 2015

[193] Li Jun, Xu Kai, Chaudhuri S, et al. GRASS: Generative recursive autoencoders for shape structures. ACM Transactions on Graphics, 2017, 36(4): 1-10

[194] Wang Pengshuai, Liu Yang, Guo Yuxiao, et al. O-CNN: Octree-based convolutional neural networks for 3D shape analysis. ACM Transactions on Graphics, 2017, 36(4): 1-11

[195] Fuentes-Pacheco J, Ruiz-Ascencio J, Rendón-Mancha J M. Visual simultaneous localization and mapping: A survey. Artificial Intelligence Review, 2015, 43(1): 55-81

[196] Müller Arisona S, Zhong Chen, Huang Xianfeng, Rongjun Qin. Increasing detail of 3D models through combined photogrammetric and procedural modelling. Geo-spatial Information Science, 2013, 16(1): 45-53

[197] Hou Fei, Yue Qi, Hong Qin. Drawing-based procedural modeling of Chinese architectures. IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics, 2012, 18(1): 30-42

[198] Mathias M, Martinovic A, Weissenberg J, Van Gool L. Procedural 3D building reconstruction using shape grammars and detectors//Proceedings of the International Conference on 3D Imaging, Modeling, Processing, Visualization and Transmission. Washington, USA, 2011: 304-311

[199] Lo Re P M, Olanda D. Realistic modeling and rendering of plant ecosystems//Proceedings of the Conference on Computer Graphics & Interactive Techniques. San Antonio, USA, 2002: 275-286

[200] Liu Yong, Xu Congfu, Pan Zhigeng, Pan Yunhe. Semantic modeling project: Building vernacular house of southeast china//Proceedings of the ACM SIGGRAPH International Conference on Virtual Reality Continuum and Its Applications in Industry. Singapore, 2004: 412-418

[201] Liu Yong, Xu Congfu, Zhang Qiong, Pan Yunhe. Ontology based semantic modeling for Chinese ancient architectures//Proceedings of the International Conference on Artificial Intelligence. Boston, USA, 2006: 1808-1813

[202] Murphy M, McGovern E, Pavia S. Historic building information modelling (HBIM). Structural Survey, 2009, 27(4): 311-327

[203] Murphy M, McGovern E, Pavia S. Historic building information modelling—Adding intelligence to laser and image based surveys of European classical architecture. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2013, 76(2): 89-102

LI Shang-Lin, Ph. D. His research interests include computer graphic, computer modeling.

XIE Wen-Jun, Ph. D. His research interests include computer graphic, computer animation.

LI Lin, Ph. D., associate professor. Her research interests include virtual reality, computer animation.

JIA Wei, Ph. D., associate professor, His research interests include computer vision, pattern recognition, image processing and machine learning.

LIU Xiao-Ping, Ph. D., professor. His research interests include computer aided design, computer graphic.

《计算机学报》

Background

Computer modeling of architecture has been studied for more than 20 years. Due to the rapid development of interactive 3D graphics technologies and the high need of virtual reality, digital city and digital cultural heritage protection, time-consuming and inefficient traditional manual building modeling method has been far from being able to meet the needs of the application market. As a result, rapid modeling method of architecture has been paid more and more attention. The rapid modeling of architecture is an application-oriented and interdisciplinary research area, which means its research methods cover a wide range of technical fields and disciplines.

A variety of computer modeling of architecture techniques are available, and they can be classified into two groups: rule-based modeling methods and data-based modeling methods. Rule-based modeling methods use predefined rules and grammar to control the modeling procedure. The most well-known methods are procedural modeling methods, which have become the mainstream methods because of their successful applications. Rule-based modeling methods provide a cost-effective solution to modeling all types of buildings, including historical buildings; however, the majority of these methods require the user to have a high level of technical knowledge to modify the rules and grammar of the model. Data-based modeling methods model or reconstruct buildings data-based modeling methods can be divided into image-based modeling methods and LiDAR-based modeling methods. Data-based modeling methods are user friendly and provide intuitive, human-machine interactions or an automatic reconstruction pipeline. However, the modeling results are highly dependent on the data entered.

In this paper, the data source, technical characteristics, research status and various application background of rapid architecture modeling are reviewed. Firstly, the characteristics of building modeling methods are discussed from different disciplinary and technical perspectives. Secondly, the procedural modeling method, image based modeling method, point cloud based modeling method and the inverse procedural modeling method for rapid architecture modeling technology are summarized. Then, as a special issue, the sub-problem: layout of building interior and layout of the architecture and city are reviewed. Finally, this paper presents an in-depth discussion of the current limitations and challenges of modeling method of architecture, and looks into the future development trend of this field.

This work was partly supported by grants from the National Key Research and Development Plan under Grant No. 2016YFC0800100, the National Natural Science Foundation of China(61673157, 61602146), the Natural Science Foundation of Anhui Province for Youths (JZ2015AKZR0664), and the Natural Science Foundation of Hunan Province for Youths (2019JJ50564).