

基于机器学习的传统建筑聚落历史风貌保护生成设计方法

——以罗马 Termini 火车站周边地块城市更新设计为例

Generative Design on Conservation and Inheritance of Traditional Architecture and Settlement Based on Machine Learning:
A Case Study on the Urban Renewal Design of Roma Termini Railway Station

唐芃 | TANG Peng 李鸿渐 | Li Hongjian 王笑 | WANG Xiao
[德]卢德格尔·霍夫施塔特 | Ludger Hovestadt

摘要: 本文关注在传统建筑聚落的历史风貌保护或更新设计中, 如何依靠计算机信息技术获得不依赖于人的主观判断的传统空间形态构成规则, 建立数字化生成设计工具, 来解答传统建筑聚落历史文化信息的精确传承和创新利用的问题。文中介绍了人工智能领域中的数据挖掘和机器学习对以上问题的解决可能, 并结合案例介绍了“基于案例学习”等技术工具在城市历史地段城市更新设计中的应用成果。探索了基于知识发现的生成设计工具对传统建筑聚落历史风貌保护所起到的作用。

关键词: 传统建筑聚落、机器学习、生成设计、基于案例推理

Abstract: This paper focused on how to obtain the traditional rules of spatial form that do not rely on human subjective judgments in the conservation planning of traditional architecture and settlement, how to establish the generative design method based on digital technology, and thus to complete the accurate inheritance and innovative use of historical and cultural information. It introduced the possibility of dealing with such problems by data mining and machine learning in the field of artificial intelligence. A case was introduced to show the achievements by using Case-based Learning in darning space texture of urban historical area in the urban renewal design. All the studies explored the role of knowledge discovery on generative design in the conservation planning of traditional architecture and settlement.

Keywords: Traditional Architecture and Settlement, Machine Learning, Generative Design, Case-based Reasoning

作者:

唐芃, 东南大学建筑学院副教授, 城市与建筑遗产保护教育部重点实验室成员;
李鸿渐, 东南大学建筑学院硕士研究生;
王笑, 东南大学建筑学院硕士研究生;
[德]卢德格尔·霍夫施塔特 (Ludger Hovestadt) 瑞士苏黎世联邦理工大学建筑系教授。
自然科学基金项目 (51778118);
北京建筑大学北京未来城市设计高精尖创新中心开放课题 (UDC2017020212)

一、研究背景

当下的数字技术与人工智能的成果很少聚焦城市建筑遗产在其历史风貌保护过程中的技术策略。这些在当代城市中成片存在的建筑聚落(下文统称“传统建筑聚落”), 它们加在一起形成的聚落整体保留着城市的历史记忆和物质空间的连续性, 尤其是在历史城市, 或者城市中的历史地段, 传统建筑聚落反映出城市历史风貌的特点, 是传

承历史文化信息最直接的载体。

1. 传统建筑的历史风貌信息应该怎样精确传递?

无论中外, 当城市化发展到一定阶段, 传统建筑聚落的保护与利用都会成为重大的课题。应对现代生活, 传统建筑聚落风貌的改变集中表现在: 城市化带来街区功能的改变, 人流车流量的增加; 新功能的植入以及改变道路系统等方式损坏了传

统建筑聚落的空间肌理；对既有房屋进行的修缮及增改建，占用了公共空间并经常使用与传统建筑聚落风貌不符的材料与做法。

为保护传统聚落空间的历史风貌同时提升居民生活质量，保护规划方案或者导则的制定用以引导性地解决以上问题。然而，从导则的设计制定到方案实施，需要管理人员、专业人员（设计师和评审专家）、施工人员以及当地居民协同完成。各责任主体由于知识背景的不同，对历史风貌的认知存在偏差。在设计中，空间肌理、建筑风格等与历史风貌息息相关的各要素的理解和演绎依赖于设计师的主观判断，并非建立在各方共享的知识体系上，难以客观准确地表达历史风貌的信息。另一方面，设计与施工的交接依赖于技术图纸。设计师的现场控制能力，当地工匠的经验、技能以及习惯做法均影响施工结果。

以上这些主观认知的差异，信息传递的壁垒，均源自知识信息的认同和共享的缺失，从而降低了保护规划方案或导则制定的意义，有的建设甚至破坏了传统建筑聚落的既有风貌。传统建筑聚落的历史风貌在城市化的过程中逐渐消失或者日渐以讹传讹。多年以后，我们的子孙将怎样了解这些历史城市或者城市历史地段的本来面目？传统建筑聚落的历史风貌的精确传承是保护规划中所面临的第一个问题。提取不依赖人的主观判断的特定地区传统建筑聚落的历史风貌信息，形成可供计算机识别的编码方式来记录和表述这些信息，并应用在保护规划的方案设计到施工验收的全过程中是解决这一困境的途径之一。

2. 海量数据如何深度使用？

每一次的传统建筑聚落保护规划都是从数据的收集和整理开始的。技术手段的日益精进，大大提高了数据收集的效率和测绘的精确度。如今，三维扫描设备能够直接建立三维点云精确模型，将树木、水体、山石等以前靠人工测绘难以把控的要素都涵盖进去，并可在电脑中进行三维的观察和直接测量。利用无人机多向扫描合

成图像 (Drone + photogrammetry) 的方法，可以建立较大范围内传统建筑聚落的三维可视模型，并支持网络共享。同时，大量网络地图数据，例如 OpenStreetMap 等，也提供了城市中更多更详细的空间信息。

信息采集成果从图纸记录向数字化存储的改变，在传统建筑聚落的历史风貌保护规划中起到了重要的参考作用，同时它们也已经具备了建立传统建筑聚落数字化信息库并运用其进行传播的前提。目前，部分基于图像识别和仿真技术的传统建筑信息平台已经日渐成熟，形成了展示和科普的窗口。但带来的负面效果是，对于数字技术在传统建筑保护规划中的作用的认知也往往停滞在数据可视化的阶段。

海量数据的获得，使得传统建筑聚落空间历史文化信息的精确传递成为可能。这些工作，尤其城市与建筑遗产保护中对于残损建筑的修复以及传统建筑聚落空间肌理的织补等，需要通过数据挖掘等手段解析表象背后的客观规则，仅靠对数据的整理和归纳所制定的静态的导则或者动态可视化是远远不够的。在这方面，智能信息 (Intelligent information) 工程和计算机图形学 (Computer graphics) 的相关技术能够助力传统空间形态规则的提取，也为这些规则的运用提供广泛的技术支撑。

二、数字链系统与智能信息处理的方法

1. 基于数字链 (Digital Chain) 系统的生成设计方法

随着计算机辅助建筑设计越来越注重解析和把控设计中各个环节的相互关系和映射机制，作为单纯数学概念的“数字链”被引用至建筑学领域。它能够建立从建筑构造细节到规划层面的各空间要素之间的相互关系。瑞士苏黎世联邦理工学院 (ETH Zurich) 的 Ludger Hovestadt 教授团队在苏黎世郊区 Hardturm 的一个拥有 300 个住户的公寓街区的设计中，开发了针对这个项目的数字链控制系统。它包含三个基本内涵：1) 通过该系统的优化处理，使基

于自动生成的结构框架可以满足不同形式的使用要求；2) 建立汇集优质平面布局图的数据库系统，使之可以匹配多种特殊的客户使用要求，并与既有结构框架整合；3) 设计一种特殊的流水线式建筑立面建造方法，让立面本身承载大量技术，可以迅速适应不同的建构理念。这三个内涵完成了一个数字化周期，也建构了建筑的整体与细节同步处理与变更的系统，是基于数字链系统的建筑设计方法的较早尝试。^[1]

数字链系统的设计方法，其目标是建立从空间肌理到建筑细节之间的相互映射关系，将设计的基本规则与数据联动纳入同一个系统中。数字链系统思维在传统建筑聚落风貌保护上的应用优势在于，一方面，传统建筑聚落从建筑的构造方式到空间组织方式都遵循一定的规律，萨林格 (Nikos A Salingaros) 将其解释为自然界中的普适分布。^[2]如用计算机信息处理方法来解析，可以不依赖于人的主观判断获得传统空间生成规则，用于今后的生成模拟，也可以以此建立历史风貌的数字化表述体系。另一方面，数字链系统可以将传统建筑聚落从空间肌理到单体建筑构造之间建立起层层递进的数据传递方法与映射机制，将设计与施工统一在同一个数据系统中，能够促成传统聚落空间历史信息的准确传递和设计—施工—管理的一体化 (图 1)。

2. 机器学习 (Machine Learning) 和 数据挖掘 (Data Mining)

在数字链系统中应对计算机程序算法的生成设计，需要计算机可识别的生成规则。传统建筑聚落的测绘工作已经可以提供较为完备的数据资料，在此基础上计算机图形学和智能信息学领域的相关研究为生成规则的提取提供了相应的理论工具。在这里必须提及两个概念：机器学习和数据挖掘。

机器学习是人工智能的一个分支，是一类从数据中自动分析获得规律，并利用规律对未知数据进行预测的算法。因为学习算法中涉及大量的统计学理论、机器学习与推断统计学联系尤为密切，也被称为

统计学习理论。机器学习已广泛应用于数据挖掘、计算机视觉、自然语言处理、搜索引擎、医学诊断、证券市场分析、语音和手写识别和机器人等领域。

数据挖掘是一个跨学科的计算机科学分支。它是用人工智能、机器学习、统计学和数据库的交叉方法在相对大型的数据集中发现模式的计算过程。数据挖掘过程的总体目标是从一个数据集中提取信息，并将其转换成可理解的结构以进一步使用。其实际工作是对大规模数据进行自动或半自动的分析，以提取过去未知的有价值的潜在信息。除了原始分析步骤，它还涉及数据库和数据管理方面、数据预处理、模型与推断方面考量、兴趣度度量、

复杂度的考虑，以及发现结构、可视化及在线更新等后处理。

以上两个专业术语的定义互相重叠并包含，是人工智能与计算机相关领域相互交叉的结果。而这两个领域的跨界研究也不断涉及建筑学中的问题，尤其是计算机图形学的研究在建筑形态模拟与生成等方面做出了建筑学学者不能企及的成果，不断提示建筑学学科需要打破本学科的知识壁垒，将其他学科的成果补充到自己的研究中。

3. 基于案例推理 (Case-Based Reasoning, 简称 CBR)

起源于计算机领域的“基于案例推

理”理论，属于机器学习的范畴，其本质是借鉴以往相似问题的解决方案来处理新的问题。基于案例推理最初可追溯到 Roger Schank 在人工智能领域对动态记忆 (Dynamic Memory) 理论的研究，随后在计算机领域不断发展，逐渐运用到土建、机械、军事、医疗等领域的设计当中。^[3] 基于案例推理的设计可以模拟设计师的思维过程：对大量既有建筑方案进行收集、存储和分析，形成设计经验和参考案例记忆库。当面临新的问题时，通过对数据库中的相关方案进行检索、推理等适应性调整后运用于目标问题，再通过测试和优化得到解决方案。最后将生成的方案作为新案例存储于数据库中，完成一整套问题解决和经验积累的过程。

在计算机领域对这类建筑问题的研究可见 Hao Zhang 等基于对称性最大化目标对不规则立面进行层次性分析和重组探索，依据局部和整体对称性找到最优的划分方法，在基于立面图的要素重组、加建、恢复等方面得到应用 (图 2)。^[4] Lubin Fan 等用图像修补的思路，通过既有信息自动补全被遮挡、残缺的建筑立面。对于门窗较多且组合较为规律的建筑立面修复呈现出满意的结果，令人联想这一成果到在残损建筑遗产修复中的应用可能 (图 3)。^[5]

吴宁、温天蓉及其团队基于 CityEngine 平台，探索了传统村落空间形态的解析与重构及在规划中的应用。依据该平台自带的道路及地块生成规则及自定义的 CGA (Computer Generated Architecture) 建筑生成规则，通过对既有村落案例的学习，生成继承研究案例空间形态特征的村落规划方案。^[6] 笔者团队也将基于案例学习的方法尝试运用在罗马 Termini 火车站周边地区城市更新改造的设计教学中。以上基于案例推理的案例，均证实这一方法可以获得既有案例的规则并运用到随之而来的生成设计中。

但基于案例推理的方法也有致命缺陷，如：在案例获取困难、案例清晰度不够、案例修改准则难以建立等情况下会造成基于案例的生成设计系统开发困难。在此情况下如果设计人员过多地参与设计过程，会

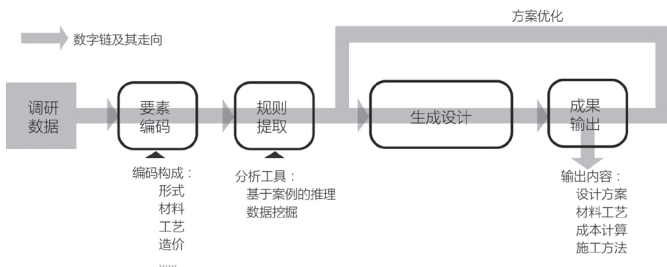


图 1：基于数字链系统的传统建筑聚落历史风貌保护规划设计工具构想

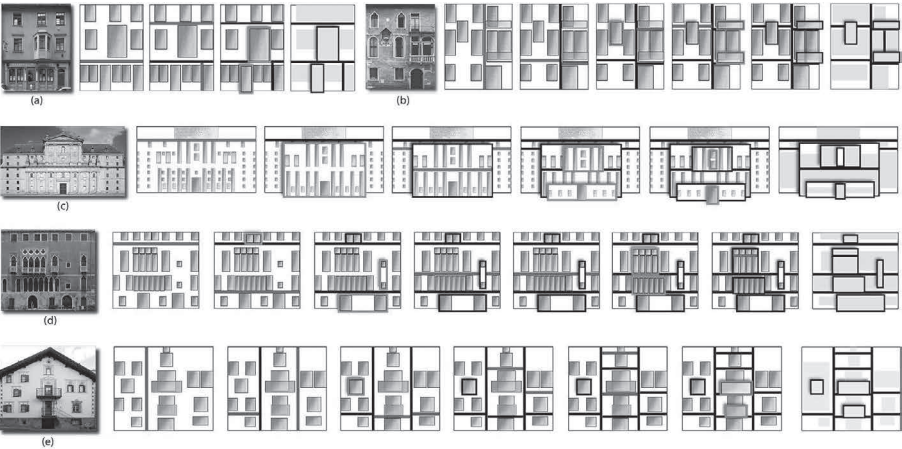


图 2：基于对称性最大化目标对不规则立面进行层次性分析和重组探索



图 3：通过既有信息自动补全被遮挡、残缺的建筑立面

使得后续的生成设计缺乏真正意义上的智能化与自动化,并且难以摆脱对人的主观因素的依赖。因此基于案例推理通常还结合其他数据挖掘工具,共同提取规则。

4. 数据挖掘工具及粗糙集理论

面对急剧增长的数据,如何挖掘潜在的、有利用价值的信息,是智能信息处理技术面临的前所未有的挑战。在数据仓库(Data Warehouse)以及机器学习这两门学科的相互融合下,数据挖掘应运而生。为了能够适应前文所述的不依赖于人的主观判断来获取传统建筑聚落空间组织规则,在数据挖掘工具中,Ontology(语义本体分析)、粗糙集(Rough Set)等工具显示出其优势,并逐渐显现出其应用在建筑学相关研究中的可能。

粗糙集是处理不确定不完整信息、发现共性知识的重要理论工具,它可以支持数据挖掘的多个步骤,其最大的特征是无需提供除问题所需处理的数据集合之外的任何先验信息,即无须对知识或数据的局部给予主观评价。Pawlak在20世纪90年代奠定了粗糙集理论的基础并推动了国际上对粗糙集应用的研究。日本学者森典彦等较早开始了粗糙集理论在建筑学知识发现中的运用。其后,将粗糙集运用于博物馆空间的设计尝试,运用于京都重要历史街区的传统建筑立面更替等的研究不断涌现。在此基础上,东南大学的郭子

君基于对Ontology和Rough Set的认知比较,提出了将其运用到古建聚落建筑外观风貌保护导则编制工作中的可能。接着在“十二五”科技支撑计划“传统古建聚落规划改造提升关键技术与示范”的研究中,结合宜兴丁蜀古南街风貌保护示范工程,笔者团队首次真正将粗糙集应用于制定传统建筑聚落街区的立面整治导则,并开发了相应的互动式生成设计程序工具提供给当地居民进自宅的立面自动生成,为数字技术在传统建筑聚落历史风貌保护中的应用作了初步的尝试。

如果说针对宜兴丁蜀古南街的立面生成工具是一次基于二维模型的自动生成设计尝试,那么罗马Termini火车站周边地块城市更新设计就是机器学习在三维空间肌理规则获取和自动生成设计上的探索。

三、基于案例学习的罗马 Termini 火车站周边地块城市更新设计

1. 研究背景

罗马作为世界知名的历史城市,拥有明显的空间肌理特征。同时,作为一个典型的传统建筑聚落聚集地,其城市空间在漫长的发展过程中遭遇了不断的重构与更新。在东南大学与罗马大学共同进行的关于罗马城市的一系列研究中,“罗马 Termini 火车站周边地块城市更新设计”是一个相当复杂的课题。双方的研究团队

除了进行了基于传统设计方法的都市设计以外,还尝试了基于案例学习的数字化都市设计方法。

罗马 Termini 火车站(Roma Termini Railway Station)是罗马市的主要铁路车站,罗马地铁唯一的转乘站,也是欧洲最大的车站之一,拥有29个月台,每年旅客人次超过1亿5000万人。在1950年完成时,面向站前广场的充满强烈现代感的入口立面宽度就达到了120m(图4)。其功能形态的强势植入直接破坏了该地区原有的城市肌理,切断了边上的古罗马城墙,也割裂了车站两边的城市生活。目前从火车站的东侧到西侧需要经过漫长的绕行,车站两边呈完全分裂的态势。围绕 Termini 火车站总用地约20公顷的片区是为本项目的基地(图5)。将因火车站的植入所破坏的城市肌理进行织补,建构便利的沟通车站两边的人行系统,完善城市功能,恢复城市景观是课题设定的四个任务。

在这几项任务中,基于案例学习的方法被用于对 Termini 火车站周边城市肌理的织补和自动生成中,本文只针对这个问题进行描述。为完成这个任务设定的具体步骤为:1)现场调研;2)利用开源城市地图对以基地为中心的罗马主城区范围内的地图信息进行全面的数据收集;3)对数据进行分类整合,建立反应每一组地块与建筑之间关系的案例数据库;4)对地块周边人的行为流线、城市空间形态,以及各个地块的功能进行分析和归纳;5)探索



图4: 罗马 Termini 火车站周边地区城市现状



图5: 基地范围

基于案例学习的街区形态空间相似性的检索方法与优化设计方法,实现地块空间肌理的自动重构和织补。

2. 数据获取与案例库的建立

基于案例学习的方法用到建筑学空间检索 (Space Index) 中有一定的瓶颈,具体到本研究中的关键问题,就是如何描述地块与建筑的形态及其相互关系使得计算机能够识别和特定案例的检索。完成这个目标,才能够将案例进行记录与学习,并用于需要织补的地块中。

目前为止在其他领域能够高效使用的搜索引擎很难适用于建筑学的设计案例检索。因为建筑学的案例通常是通过图形的方式进行记录和存储。搜索引擎对于语言类表述的反应是比较直接而敏锐的,通过建筑功能分类关键词的方式进行功能查询是可行的,但并不能达到检索出建筑形态的目的。ETH 的 Benjamin Dillenburger 教授指出,目前使用较多的三种建筑检索的方法是基于文本的搜索引擎 (Text-based search engines),形状匹配软件 (Shape-matching software) 和地理信息系统 (Geographic Information Systems),但这些都不适用于精确的空间检索。究其原因,其一,形状相似度的计算比文本更复杂,编辑成本更高;其二,在研究中,有效的案例不仅要描述建筑本身的属性,还需要描述建筑周边区域的属性,更为复杂。其三,这些搜索引

擎的信息以各种文件格式存储,通常过于详细以至于无法有效浏览。^[7]

对于以上问题,笔者将描述地块与建筑关系的包络组合 (Parcel) 作为一个基本数据储存单位来尝试适应建筑学思维方式的空间检索。本研究中的城市设计基本信息来源为 Open Street Map (OSM) 开源网络地图数据库。罗马的 OSM 开源地图数据较为准确和完整,包含了描述建筑与地块案例所需要的相邻道路、建筑轮廓、地块边界、地块功能等信息,可导出为矢量文件,方便计算和判断。在获得的 OSM 数据中,地块和建筑轮廓均为封闭的多边形,且呈现建筑面积、建筑高度、地块多边形与建筑多边形的包含关系,为后续研究提供了方便。在笔者组建的案例中,存储数据有:地块编号、建筑面积、容积率、形状特征、长宽比等基本属性 (图 6)。

这样每一个地块就有了与之对应的一组属性来描述,各组案例之间的相似性被实时计算为不同属性之间相似性的加权和。通过调整加权权重可以指定不同搜索条件的重要性,从而改变相似性排序。图 7 是基于以上案例库进行的测试空间相似性检索成果的程序截图。搭建的搜索引擎成功地从案例库中检索到了可用的案例。程序启动后,计算机在几秒钟内提供与目标空间具有相似性的案例,作为图纸显示在列表中,并按其相似性排序。在后续设计工作中,对于被选出的案例,建筑师可以访问更多详细信息。如果确定使用这个

案例,它将作为地块解决方案和今后设计的起点。利用这样的方法,可以完成空间肌理的自动织补。

3. 空间肌理的重构和织补

建立案例样本库以及空间相似性检索方法测试有效后,开始探索基于案例学习的空间肌理的自动织补方法。首先通过道路连续性、空间连续性、地块功能、地块位置关系以及人流等分析,提出整个设计地块中最需要更新的几个街区 (图 8-a);其次根据街区周边肌理,相邻地块出入口,相邻街道等级等信息,进行待更新街区内部道路自动划分 (图 8-b);划分好的内部道路形成不同的建筑基地,在案例库中搜索与之具有相似性的案例植入基地之中进行匹配,并将植入后的成果与周边街区进行比对。进行进一步的选择、植入和优化的循环往复过程。在此过程中,植入的案例驱使地块状态逐渐逼近预设目标,如区域开放度、绿地率、容积率、功能复合程度等,最终得到最符合基地条件的植入案例 (图 8-c)。

如上所述,案例检索也可以按存储案例的相似度高低依次排序提供建筑师多个选择可能,或者通过调整属性间权重大小控制获得有特殊指向的案例。如果进一步建立实时对话的设计平台,建筑师在预览检索结果后可手动进行调整及再设计,也可根据需要通过计算机进行街区适应性调整。案例置入目标街区后,周边的地图信



图 6 呈现地块与建筑关系多重信息的案例库局部 (按照形态系数从 1~0 的变化顺序排列)

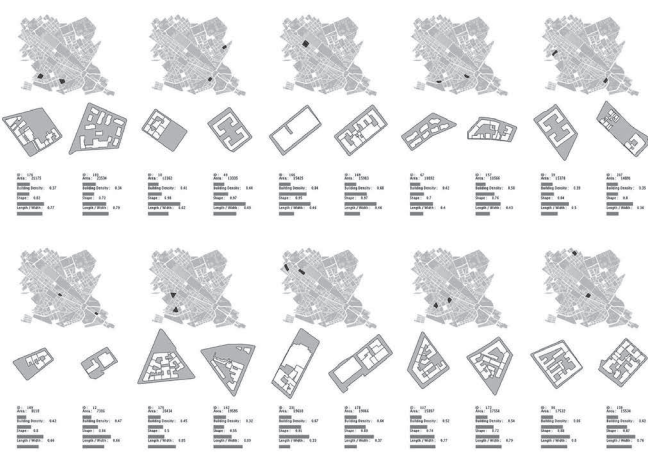


图 7: 建筑与地块关系的相似性检索实验 (局部)

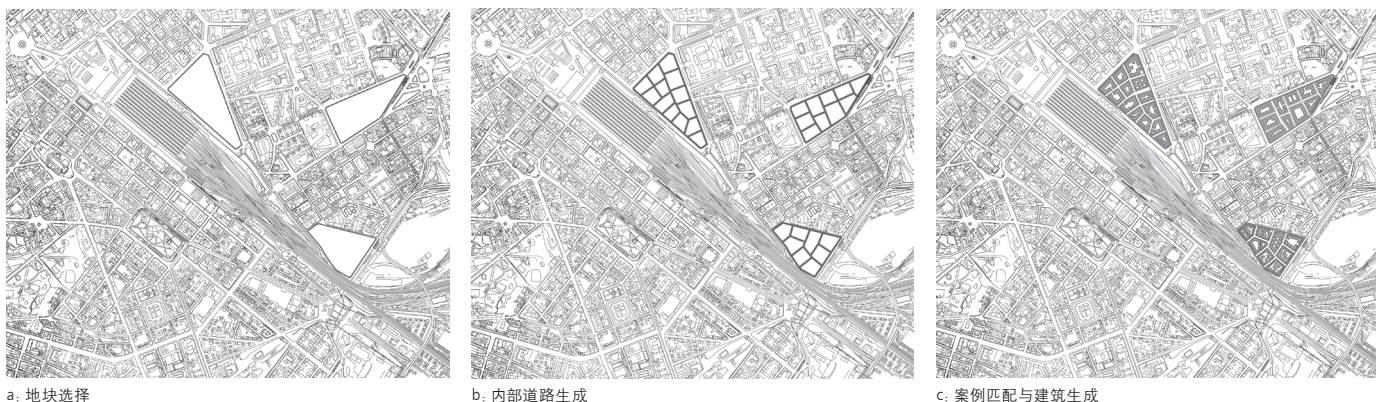


图 8: 空间肌理织补的自动生成过程

息也随之更新存储, 可以实时获得该建筑植入基地后对周边环境的影响, 使设计过程更加理性和高效。

四、总结

数字技术在城市设计和建筑设计中的应用, 越来越多地注重和把控不同尺度层级上各个环节的相互关系和映射机制。这样的机制有利于打破按照图纸比例划分工作界限的壁垒, 建立起从城市设计到建筑细节的全链条数字化表述系统, 从而探索与之相适应的生成设计方法。传统建筑聚落以及城市历史地段因其特有的自下而上的生长方式, 遵循自然界的普适分布规则, 更加适合在传统建筑聚落或者历史地段的保护与更新中使用数字化的生成设计与演绎手法。

罗马 Termini 火车站周边地块空间肌理织补的研究, 验证了机器学习的方法在类似的城市设计中解决复杂问题的优势。历史城市或城市中的历史地段, 因其空间肌理拥有强烈的可辨识性和相似性而适用类似方法。可以预见, 随着人工智能及网络技术的进步, 也随着数据的日益丰富和完善, 基于大数据的计算机深度学习 (Deep Learning), 必将更完美地解决历史城市更新设计中的诸多复杂问题。

数字技术在传统建筑聚落风貌保护上能够作出的贡献, 是通过智能信息等相关技术, 提取传统聚落空间感性信息背后的理性规则, 突破主观因素主导的信息传递方式, 确保传统建筑历史风貌信息的精确

传承。整合相关专业先端技术, 协同人的思维与计算机决策, 数字技术将助力传统空间走向有序未来。

[感谢: 参与罗马 Termini 中央火车站周边地块城市更新设计项目的有李鸿渐、孙世浩、陈允元、徐佳楠等, 以上均为东南大学建筑学院硕士研究生。]

注释

- [1] 参考文献 [1]:36-45.
- [2] 参考文献 [4]:12.
- [3] 参考文献 [5].
- [4] 参考文献 [6].
- [5] 参考文献 [7].
- [6] 参考文献 [8].
- [7] 参考文献 [16].

参考文献

- [1] Ludger Hovestadt. 超越网格 [M]. 东南大学出版社, 2015.
- [2] 李飏. 数字链建筑生成的技术间隙填充 [J]. 建筑学报, 2014(8):20-25
- [3] 唐芃, 郭梓峰, 张佳石, 季云竹. 整合与协同——数字链系统驱动的设计与建造实践 [J]. 建筑学报, 2017(5):6-13.
- [4] Nikos A Salingaros, Twelve Lectures on Architecture: Algorithmic Sustainable Design: Notes from a Series of 12 Lectures Applying Cutting-Edge Mathematical Techniques to Architectural and Urban Design [M]. Umbau Verlag, 2010.
- [5] 魏力恺, 张硕, 张备, 许蓁, 张昕楠. Architable: 基于案例设计与新原型 [J]. 天津大学学报 (社会科学版), 2015(6):556-561.
- [6] Zhang H, Xu K, Jiang W, et al. Layered analysis of irregular facades via symmetry maximization[J].

- Acm Transactions on Graphics, 2013, 32(4):1-13.
- [7] Fan L, Musialski P, Liu L, et al. Structure completion for facade layouts[J]. Acm Transactions on Graphics, 2014, 33(6):210:1-11.
- [8] 吴宁, 温天蓉, 童磊. 参数化解析与重构在村落空间中的应用研究——以贵州某传统村落为例 [J]. 建筑与文化, 2016(5):142-143.
- [9] 徐佳楠, 李鸿渐, 李飏. 城市更新中的实例辅助方法探索 [J]. 新建筑, 2018(4).
- [10] Pawlak Z. Rough Sets: Theoretical Aspects of Reasoning about Data[M]. Kluwer Academic Publishers, 1992.
- [11] 森典彦, 田中英夫, 井上勝雄. ラフ集合と感性データからの知識獲得と推論 [M]. 海文堂, 2004.
- [12] 宗本晋作. 感性評価を取り入れた展示の空間構成法に関する研究 [J]. 京都大学, 2008.
- [13] 郭子君. 基于 Ontology 和 Rough set 理论的传统古建聚落建筑外观风貌保护导则编制技术研究[D]. 东南大学, 2016.
- [14] 王笑. 基于知识发现和数字生成的传统聚落历史风貌分析与保护方法研究——以宜兴市丁蜀镇古南街为例 [D]. 东南大学, 2018.
- [15] Peng TANG, Xiao WANG, Xing SHI. Generative Design Method of Facade of Traditional Architecture and Settlement Based on Knowledge Discovery and Digital Generation: A Case Study of Gunanjie Street in China[J]. International Journal of Architectural Heritage, 2018(04).
- [16] Benjamin Dillenburger. Space Index: A retrieval system for building-plots, Proceedings of 28th eCAADe Conference, ETH Zurich (Switzerland) [Z]. 15-18 September 2010:893-899.
- [17] 张帆, 张伶伶, 张蕾蕾. 区域视角下城市肌理的协同演化研究 [J]. 建筑师, 2017 (6): 31-39.

图片来源

- 图 1: 作者自绘
图 2: 参考文献 [6]
图 3: 参考文献 [7]
图 4、图 5: 谷歌地图以及作者自绘
图 6、图 8: 作者自绘和程序截图