

几何原型与形态编码在商业建筑平面生成的应用探索

张柏洲¹, 李飏^{1*}

(1. 东南大学建筑学院建筑运算与应用研究所, 江苏省南京市 210096, jz.generator@gmail.com)

摘要

在建筑生成设计方法中, 几何原型和形态编码是两类建立在几何运算基础上的规则转译策略。前者通过几何学原型的形式变形与参数调整回应建筑形式问题, 后者通过设计规则的直接提炼和编码对形态要素进行模拟生成。针对部分典型商业建筑平面的设计问题与空间要素, 分别探索了几何原型策略主导的公共空间生成以及形态编码策略主导的营业空间生成方法, 并对室外商业步行街以及室内购物中心的案例进行了平面生成实验, 表现出两类策略对于不同空间要素与设计条件的适用性。

关键词: 规则转译; 商业建筑平面; 几何原型; 形态编码; 建筑生成设计

Keywords: Rule Translation; Commercial Building Layout; Geometric Prototype; Morphological Encoding; Architectural Generative Design

项目资助情况: 本文受国家自然科学基金面上项目“以特征向量矩阵运算为导向的建筑空间组合与生成系统研究”(项目编号: 51978139)资助。

引言

建筑生成设计的发展为建筑设计问题带来了更丰富的解决策略, 以及更宽广的探索方向。在生成设计的系统中, 相关的设计问题和形式原型一般需要通过抽象提炼来进行图解和归纳, 并以图形化方式作为信息存储, 进而编写理性的计算规则完成设计结果的推演^[1]。设计规则到算法规则的转译是这一工作中的关键问题, 常常伴随其他相关领域知识的介入, 其既是设计问题的抽象化分析和归纳的过程, 也是生成结果具象化输出和表达的前提。

几何原型与形态编码可被视作两类典型的规则转译策略。几何原型策略通常以几何学的某类原型出发, 经过形式变形和参数调整, 适应性地解决建筑设计问题, 对空间

生成的逻辑进行反映。例如在城市尺度上，出现了以Voronoi图形为原型的道路生成研究^[2]，以张量场的物理原理与几何形式为基础的城市肌理生成研究^[3]；在建筑尺度上，相关研究针对公寓平面的生成问题，结合了多边形直骨架等几何原型，以及自定义的划分语法来进行形式变形，以得到生成布局^[4]。这一策略在形态特征突出，且能够通过既有原型进行生形或重构的问题上具有应用价值。

形态编码策略通过设计手法和空间特征的模式化分析，对建筑空间形态直接进行生成规则制定。例如，这一策略在建筑平面与形体的过程式建模（Procedural Modeling）工作中得到了应用，通过定义建筑轮廓细分的语法规则，将平面生成问题编码为形状剖分的递归过程^[5]；另有研究将走廊与房间的邻接关系以及几何位置关系编码为一系列基本生成规则，并在此基础上以房间数量和面积作为评价标准，编码迭代优化的规则来进行平面生成^[6]。这一策略通过设计手法的观察和归纳来得出编码逻辑，在规则和语法可被明确定义的建筑问题上具有适用性。

以上两类策略均建立在基本的几何运算基础之上，在生成方法的探索中常常交叉运用以求互补。本文以商业建筑平面为研究对象，探索了两种规则转译策略在公共空间的形态模拟和营业空间的划分生成上的应用方法，进而生成方案阶段可供参考的平面案例。

1 几何原型策略主导的公共空间生成

商业建筑的公共空间主要包含了水平动线、中庭等空间要素。水平动线具有路径属性，主要承载场地内的交通功能；中庭空间根据规模和形状不同，分别具有向心聚拢和线性引导作用，通常以封闭的多边形或曲线形状构成。以上述二者为代表的公共空间要素，均具有形态导向的特点，因此可采用以几何原型策略为主导的生成方法，并通过变形与组合生成理想的公共空间形式。

1.1 基于Prim算法和向量规则的方法

最小生成树（Minimum Spanning Tree）在城市及建筑路径生成中具有一定应用价值，能够生成经过数个指定节点的树状路径系统^[7]。以最小生成树作为水平动线的几何原型，进而可在其基础上结合二维向量的若干计算规则来生成公共空间的平面形态。

（1）Prim算法生成动线路径

Prim算法是计算最小生成树的两种常用算法之一，其算法原理可概述为四个步骤：①对于具有 m 个节点的连通图 G ，定义两个记录图 G 节点的集合 $A=\{\}$ ， $B=\{N_0, N_1, \dots, N_m\}$ ；②将 B 中任意一个节点移至 A 中，作为起始点；③迭代 B 的所有节点，计算出一条连接 A 中某个节点且权值最小的边，将此边连接的节点从 B 移至 A 中，并记录其连接边；④循环执行步骤③，直至 B 的全部节点转移至 A 中，由此可找到 $m-1$ 条边，构成 G 中所有节点的最小生成树。

借助Prim算法可以对给定场地内的水平动线路径进行生成。首先设置可交互调节的

场地出入口点以及场地内部控制点，继而将全部节点构建为全连通图（图1 a），以点与点之间的直线距离作为每条连接边的权重值，计算最小生成树（图1 b）。随后由生成路径偏移得到的动线区域可将原场地进行划分（图1 c），划分得到的次级区域可再次进行同一规则的路径生成，并通过节点位置的交互调节，获得不同连接关系和层次的水平动线路径原型（图1 d）。

（2）公共空间形态的生成规则

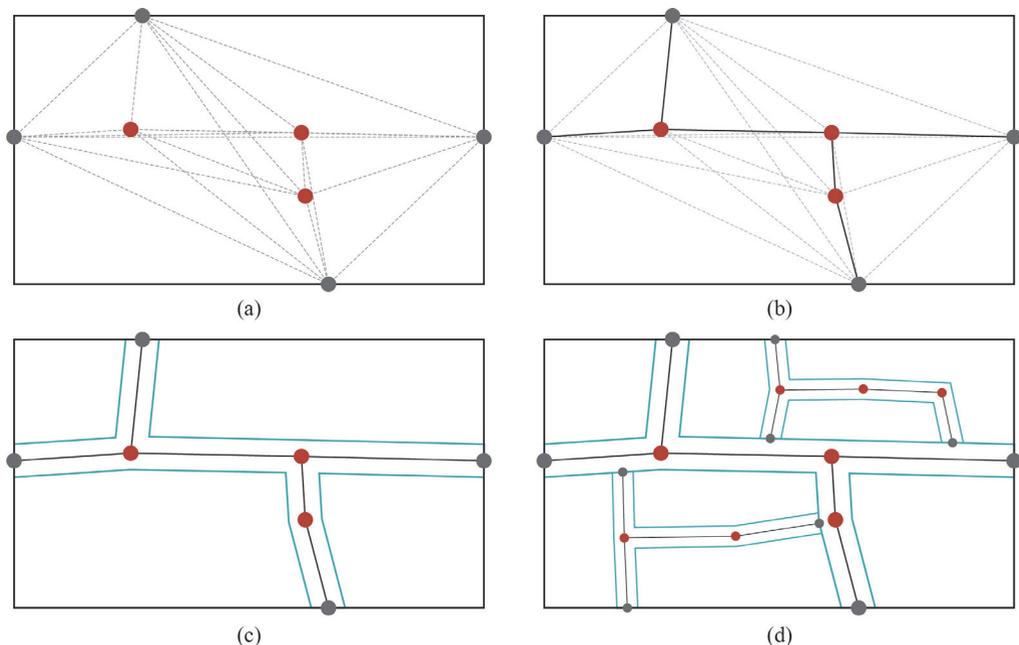


图1 最小生成树生成水平动线路径（图片来源：作者编写程序生成）

在最小生成树作为原型的动线路径生成后，可根据路径控制点和路径边的位置，对中庭及公共空间整体形态进行生成。针对每个内部控制点 N 及其相连的 n 条路径边，可根据中庭尺度的控制，记录沿路径边移动一定距离和比例后的点，并计算出与路径边垂直的两个控制点，由此可得到 $2n$ 个控制点（图2 a）；进而将 $2n$ 个控制点围绕点 N 进行极坐标排序并依次连接，即可得到处在控制点上的中庭形状（图2 b）；其中，对于两条边构成的劣角，可将相邻的控制点直接相连，而对于优角则需额外增加优角平分线上的控制点，得到转折的中庭边（图2 c）；最后将动线路径与中庭形状进行整体偏移得到公共空间轮廓边界（图2 d）。

1.2 基于骨架线与形状建模的方法

直骨架（Straight Skeleton）是一种用内部拓扑骨架表示多边形的方法，由多边形每个角点沿其对应的角平分线等速移动所形成的直线轨迹构成，其通常可被用于表示多

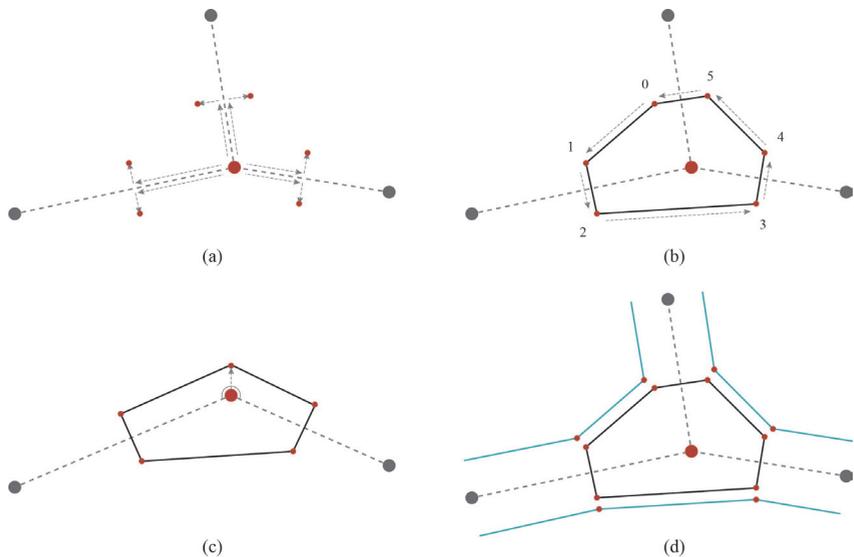


图2 中庭与公共空间生成规则 (图片来源: 作者编写程序生成后绘制)

边形的中轴^[8]。在商业建筑公共空间的生成中, 通过骨架线的计算可以提取到位置相对居中的水平动线路径, 进而通过构建常用中庭几何形来得到公共空间形态生成结果。

(1) 直骨架算法生成动线路径

对于给定的轮廓形状, 第一步计算生成其多边形直骨架, 随后根据骨架线的顶点连接关系, 筛选出与轮廓顶点不相接的线段, 作为动线骨架的初始原型 (图3 a); 第二步对于动线骨架可能产生的分叉情况进行处理, 从骨架任一节点出发, 对全部节点进行两次遍历, 每次遍历均计算与起始节点距离最远的节点, 由此可提取到初始骨架的最长单链 (图3 b); 第三步将最长单链进行均分, 将均分点作为控制点, 使用B样条曲线进行拟合并进行偏移, 由此可得到一条带有内部控制点的动线路径及其区域 (图3 c)。

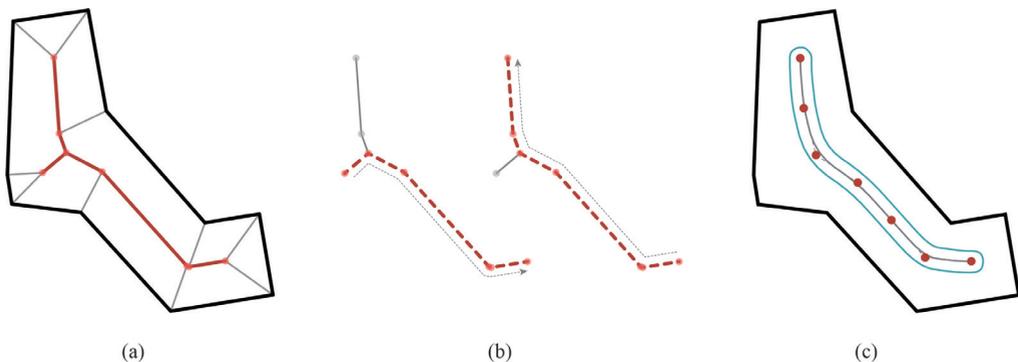


图3 基于直骨架的水平动线生成原理 (图片来源: 作者编写程序生成后绘制)

(2) 中庭形状建模及连廊生成规则

得到水平动线区域后, 可将其作为中庭形状布置的限制区域, 根据常见的中庭形状, 在计算机程序中编写多种形状的创建规则, 并以中心锚点 O 、形状端点 P_n 、锚点到端点的向量 V_n 作为对每个中庭形状的属性记录(图4), 从而满足公共空间设计过程中, 对于中庭形状、面积、位置的交互修改。

对于经过设计者调节和布置的中庭几何形(图5 a), 可进一步制定三种对于多边形的形状重构规则。①B样条曲线重构, 即使用中庭形状端点作为曲线控制点, 重新生成曲线形的中庭形状; ②圆弧倒角重构, 即将中庭形状的每个折角替换为一定半径的圆弧; ③等比例细分方法重构, 即设定比例和细分次数, 取每一对邻边上的相同长度比例的点进行连线, 经过若干次迭代后可得到相对平滑的过渡。

上述三种形态重构规则可由设计者根据公共空间整体效果的需要, 分别进行选择和执行, 从而得到相对自然平滑的中庭形态(图5 b)。随后, 综合中庭形状重构的结果, 将全部形状整体向外侧偏移所需的走廊宽度, 得到最终的公共空间生成结果(图5 c)。

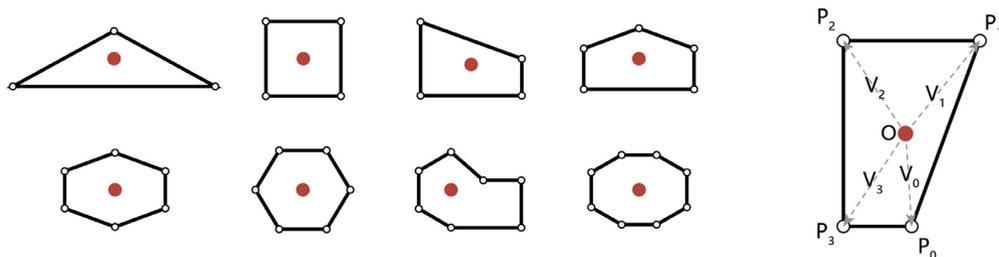


图4 中庭形状创建与属性记录(图片来源: 作者编写程序生成后绘制)

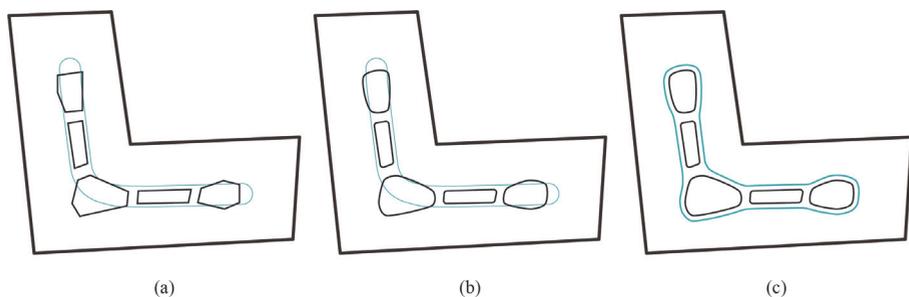


图5 中庭形状重构与公共空间生成(图片来源: 作者编写程序生成)

2 形态编码策略主导的营业空间生成

营业空间的生成以商铺的划分问题为主, 具有较为典型的形态特征, 而其特征大多是以建筑学的规则进行描述和构成, 少有明确定义的几何规则或几何模式, 因此采用以形态编码策略为主导的方法, 通过设计手法的模拟编码进行规则转译。

2.1 基于多种剖分规则的方法

在室外的商业场所（例如步行商业街等），营业空间划分出的区域往往同时也是不同商铺所在建筑的用地区域，其在设计操作手法上可类比为对于大面积场地的地块细分，因此可根据不同的肌理特性，编码多种剖分规则来适应不同形状的营业空间。

较大面积空间通常需对其进行若干次均分后再进行商铺空间细分。参考相关研究提出的OBB方法^[9]，即首先计算形状的最小有向包围盒（Oriented Bounding Box），进而对OBB两条长边的中点进行连线，通过连线将大面积空间划分为两个区域（图6 a）。

整形空间通常具有均匀环绕的商铺划分。这一类空间可对形状轮廓向内偏移合适的进深距离，进而在偏移线上取点（根据面宽均分布点或人为取点），以取得的点作为生成点，生成Voronoi图形，由此可将整形空间剖分为进深面宽相对均匀，方向朝向外侧的组团空间（图6 b）。

长条形空间通常需顺应形状走势进行均匀划分。首先借助本文2.2中提及的直骨架算法，计算出长条状空间的中轴，作为参考线；进而根据空间面宽的需求，对中轴参考线进行若干等分，并由各个等分点出发，向两侧生成与中轴参考线垂直的剖分线，延伸至长条状空间边界，由此可将其切分为若干并排的小空间（图6 c）。

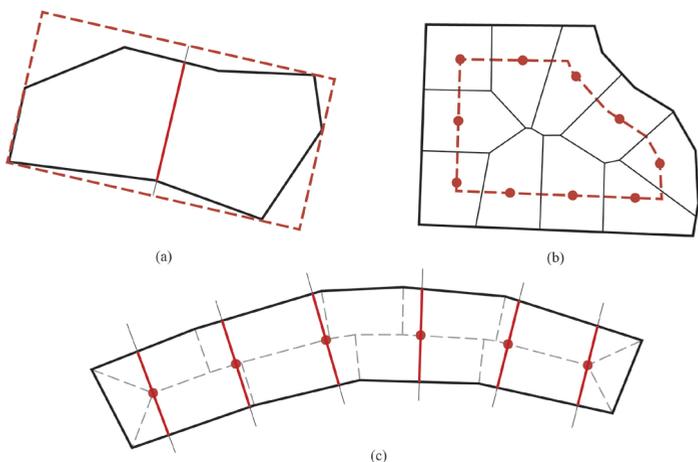


图6 三类营业空间剖分的规则编码（图片来源：作者编写程序生成）

2.2 基于格网线的方法

对于室内的商业场所，其营业空间的划分主要由公共空间两侧的隔墙来完成，铺位的形状和位置往往需在一定的格网和模数之上确定，具有隐含的结构逻辑。因此可采取基于格网线的方法，在格网线之上编码划铺线的生成规则。

（1）格网线生成

商业建筑的结构体系可被简化抽象为若干正交格网对于外轮廓的覆盖，一般需根据

轮廓形状的趋势来确定格网数目。参照该特性，可从外轮廓的包围矩形生成入手，生成格网参考线。

首先，根据二维向量叉积判断夹角正负值的原理，对轮廓多边形各个顶点进行叉积计算，筛选出形状凹角（图7 a），凹角通常是格网体系产生变换的位置；继而，人为设定所需的参考线数量 m ，从各个凹角处向内均匀产生射线，以 $m-1$ 为每组射线的数量，对全部射线进行枚举，并将轮廓划分为 m 个区域（图7 b）；最后计算各组射线划分出区域的最小有向包围盒，排序查找到包围盒与轮廓面积比值最小的一组，作为最紧密的轮廓包围矩形，并在矩形中根据常用模数生成格网线（图7 c, d）。

（2）营业空间划分规则

在格网线的基础上，可结合公共空间生成的轮廓线，编码营业空间的划分语法。首先计算轮廓线与各条格网线的交点，并记录每个交点处的相交角度；随后可对相交角设定一个角度阈值，用以筛选轮廓线与格网线相对垂直的交点；进一步从筛选得到的交点处，沿格网线的方向进行延伸，从而得到若干条划铺线（图8 a），保证各个商铺与公共空间的朝向关系相对适宜。

此外，对于初始的划分结果，可根据常见的商业建筑划铺手法，编码三类细节性的规则：①划铺线转折的规则，即进一步对相交角的大小进行细分判断，将部分划铺线的端头从格网节点处转向与公共空间轮廓线垂直（图8 b）；②铺位选择与合并的规则，即通过人为指定需合并处理的铺位，通过形状布尔运算来进行合并操作，满足较大规模主力店的布置，并处理初次剖分可能产生的不可用空间（图8 c）；③转角区域铺位二次剖分的规则，即从铺位内部的格网点向两侧产生新的带有转折的划铺线，对较大铺位进行二次剖分，符合划铺设计手法的常见操作（图8 d）。

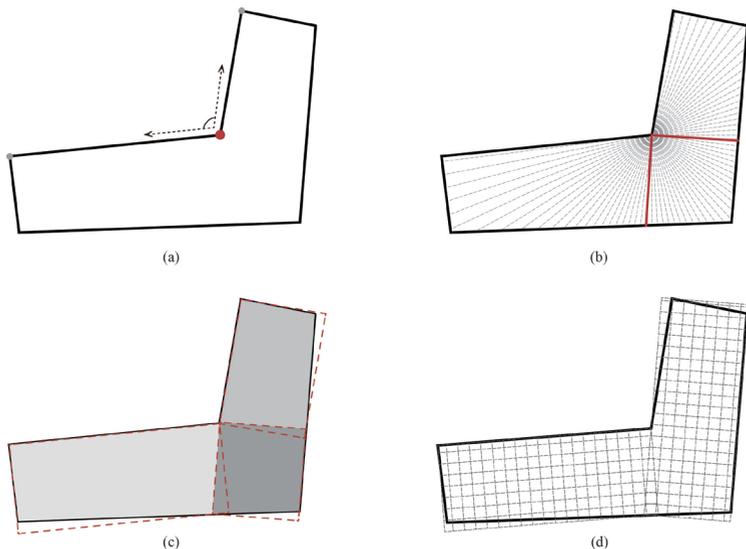


图7 格网参考线生成原理（图片来源：作者编写程序生成）

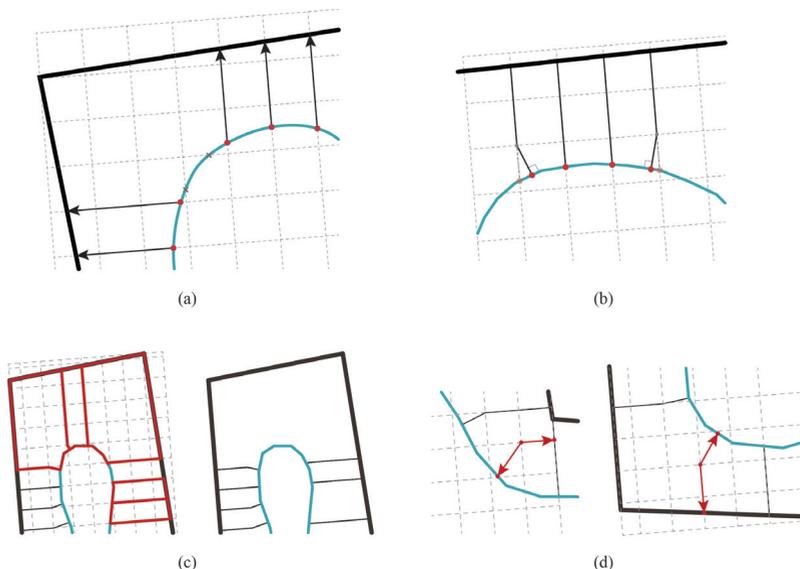


图8 在格网基础上编码的划铺线生成规则、合并规则、二次剖分规则（图片来源：作者编写程序生成后绘制）

3 生成结果

上述的生成方法均通过Java程序编写，部分算法和交互操作的实现借助Processing、JTS Topology Suite等开源程序库完成。进而，以部分商业建筑平面轮廓作为测试案例，进行生成方法的组合验证。

图9(a)为方法2.1和方法3.1结合，在室外步行商业街平面案例中进行的生成模拟，首先由7个控制点（4个出入口点，3个内部控制点）生成最小生成树，并产生主动线及3个中庭挑空形状，将场地分为4个区域；进而在其中面积较大的区域内，进一步设置了3条次动线；最后根据动线划分出的不同形状的营业空间，指定了不同的剖分规则，划分得到最终的商铺区域。

图9(c)为方法2.2与方法3.2结合，在购物中心平面案例中进行的生成模拟。首先通过直骨架和B样条曲线等原型生成了水平动线的控制区域；随后布置了7个中庭形状并生成公共空间形态，其中端头和转角处的中庭使用相对圆滑的曲线重构方法以强调向心性，其余中庭采取倒圆角的重构方法强调线形引导；进而根据L形的轮廓特点，设定2套参考线体系，生成包络矩形及格网；最后根据划铺线的编码规则进行铺位划分，并通过人为交互指定合并与二次剖分的区域，得到最终的生成结果。

在公共空间及营业空间的平面生成基础上，可进一步对生成结果进行后续的程序生成或人工设计。例如针对历史型步行商业街的建筑形式，编码三维建筑体量的生成规则置于划分出的营业空间内，并进行方案深化（图9 b）；或是在当前平面生成的基础上，制定后续例如自动扶梯、疏散楼梯、卫生间等模块的生成规则，得到更为完整和细化的平面生成结果（图9 d）。

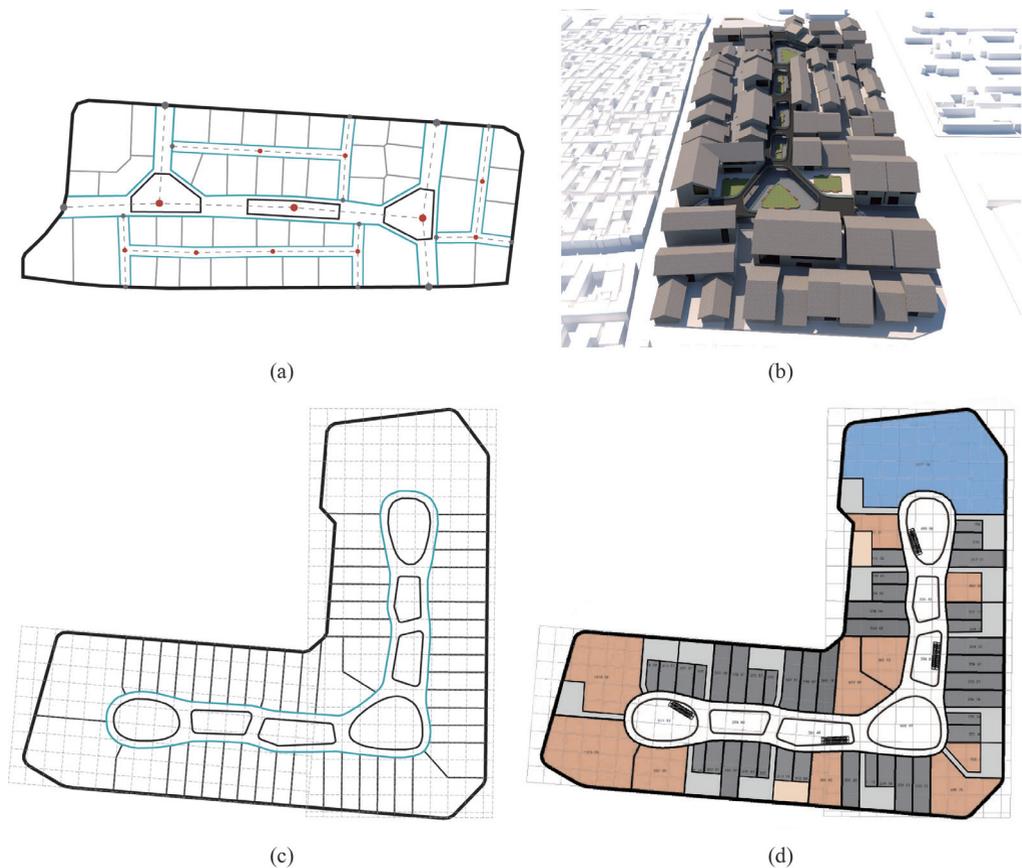


图9 步行商业街案例平面生成 (a) 与后续生成及深化结果 (b); 购物中心案例平面生成 (c) 与后续生成及深化结果 (d)
 (图片来源: (a)(c) 作者编写程序生成; (b)(d) 作者绘制)

结语

规则转译作为建筑生成设计中的重要环节, 对设计要素与手法的分析是其基础工作。研究从商业建筑平面的典型模式、通用手法出发, 进行了设计规则的抽象提炼, 并分别应用几何原型与形态编码两类规则转译策略, 提出了基于最小生成树、基于直骨架的公共空间生成方法, 以及基于剖分规则、基于格网线的营业空间划分方法。两类策略在面对不同设计要素时具有不同的应用价值, 也具有互补的可能, 建筑问题的迁移与转化是决定策略使用的关键。

在后续的研究工作中, 可进一步探索其他空间要素在规则转译过程中的适用方法, 建立更复杂和更全面的规则库, 并借助当前的软件平台、网络平台等工具作为载体, 将生成方法整合为更加通用和灵活的生成设计辅助系统, 从而将基于规则的生成方法拓展至更多可行的建筑实践环节中。

参考文献

- [1] 李飏, 季云竹. 图解建筑数字生成设计[J]. 时代建筑, 2016(05):40-43.
- [2] Glass K R, Morkel C, Bangay S D. Duplicating road patterns in south african informal settlements using procedural techniques[C]//Proceedings of the 4th international conference on Computer graphics, virtual reality, visualisation and interaction in Africa. 2006: 161-169.
- [3] 张琪岩. 基于规则和张量场的街区肌理与空间布局生成方法探索[D]. 东南大学, 2021.
- [4] Rinde L, Dahl A. Procedural Generation of Indoor Environments[D]. Chalmers University of Technology, 2008.
- [5] Adão T, Pódua L, Marques P, et al. Procedural modeling of buildings composed of arbitrarily-shaped floor-plans: background, progress, contributions and challenges of a methodology oriented to cultural heritage[J]. Computers, 2019, 8(2): 38.
- [6] Egor G, Sven S, Martin D, et al. Computer-aided approach to public buildings floor plan generation. Magnetizing Floor Plan Generator[C] //Procedia Manufacturing - The 1st International Conference on Optimization-Driven Architectural Design, 2020, 44: 132-139.
- [7] 李昊. 基于多种寻径算法的路径生成研究与应用[C] //数字技术·建筑全生命周期——2018年全国建筑院系建筑数字技术教学与研究学术研讨会论文集. 2018:68-73.
- [8] Aichholzer O, Aurenhammer F, Alberts D, et al. A novel type of skeleton for polygons[J]. The Journal of Universal Computer Science. 1995: 752-761.
- [9] Vanegas C A, Kelly T, Weber B, et al. Procedural generation of parcels in urban modeling[J]. Computer graphics forum, 2012, 31(2pt3): 681-690.

