

基于数据驱动的室内空间几何图案形态生成设计方法研究

杨凯中¹, 梅亚岚²

摘要: 为顺应现代室内空间图案的多功能趋势, 及以几何布局为核心的平面设计内容, 本文探索了室内空间的平面图案样式设计流程, 对图案布局要素进行归纳, 并提炼为可被转译编码的数字原型。研究基于规则提取, 使用 GH 相关插件和程序编写。首先跟随不同平面原型的既有结构进行轮廓确定, 通过图案划分、主要平面形态及几何布局进行单元要素组合, 尝试对室内空间平面图案设计规则进行转译。之后采用不同算法对单元类型、平面布局、边界划分及基础几何类型等要素进行二次处理。最后结合图形样式, 进行平面布局生成实验, 对不同功能整体组合规律模拟, 进行最终结果生成尝试。

关键词: 规则系统; 室内设计; 等面平铺; 动态生成设计; 几何原型

Research on data-driven design methodology for generating geometric pattern forms in interior spaces

Yang Kaihong¹, Mei Yalan²

1. School of Architecture, Southeast University, Nanjing 210096
2. Tsinghua Shenzhen International Graduate School, Shenzhen 518055
E-mail: 220220076@seu.edu.cn

Abstract: In order to respond to the modern trend of multifunctionality of interior space planes, and the core graphic design layout content, this paper explores the design process of graphic schemes for interior spaces, and summarises the pattern layout elements and refines them into digital prototypes that can be transcoded and encoded. The study is based on rule extraction, using GH-related plug-ins and programming. Firstly, following the established structures of different planar prototypes for contour determination, unit combination through pattern delineation, main planar forms and geometric layouts, an attempt is made to translate the rules of planar pattern design for interior spaces. After that, different algorithms are used for secondary processing of elements such as unit type, plan layout, boundary delineation and basic geometric type. Finally, combined with the graphic elements, the planar layout generation experiment is carried out to simulate the overall combination rules of different functions and try to generate the optimal results.

Keywords: Rule-based System; Interior Design; Isosurface Tiling; Dynamic Generative Design; Geometric Prototyping

¹ 杨凯中, 东南大学建筑学院, 220220076@seu.edu.cn

² 梅亚岚, 清华大学深圳国际研究生院

引言

随着室内空间规模变化，居民审美意识的提高，公共建筑室内图案样式的设计已经成为室内质量和空间效果的重要内容。设计师通过利用物质材料和技术手段创造出适宜居住、生活使用的空间环境，对提升空间质量起到决定作用，同时也是建筑风貌与空间现代化的标志。

1 研究背景

1.1 研究内容

本研究关注室内设计中平面生成阶段的几何划分。在室内设计的平面生成阶段，平面几何的划分通常标志着整个设计过程的开端。因此，它对于室内空间以及场所几何图案的布局设计，提出了更高的要求。研究运用数字技术，探讨了室内设计平面的模块化要素与布局方式，并系统分类和整合设计思想，有效地将设计概念转化为规则驱动的、高度数字化的数学模型。

研究根据约束规则和目标几何建立数理模型进行生成设计的模型搭建，并结合数字技术的数理计算模型与所需的平面图案几何数据高度匹配的特点，综合设计师及业主的个性化要求进行方案排布，促进了多方的紧密集成，形成从前期布局到生成模拟的完整数字链^[1]。数字技术的及时反馈使设计师能够创造复杂而动态的几何形状与特定图案，而适应性排布优化算法在生成端则确保了排布的高效率和精确度。

笔者通过生成设计探索，将上述算法及几何类型的优势结合起来，实现平面的划分与图案填充的同步进行。在规则限制下，实时调整设计方案并获取相关数据反馈，使得所得图案不断迭代以满足设计师的方案评估，从而在为设计带来了广泛的自由度的同时显著提高了设计效率。

1.2 研究基础

近年来，生成算法技术的成熟推动了建筑设计的深刻变革，特别是在平面设计领域，带来了前所未有的变化。平面设计的基础形态已超越传统的几何体系，呈现出更加自由和灵活的特征。然而，单一的平面单元尽管具有某些共同特征，但难以实现规律化和标准化，传统设计方法已不足以应对这种复杂性，平面设计和生产流程面临着更高的要求。在此背景下，依托数字技术的从参数控制到单元建造的生成全流程体系，成为提升平面设计丰富性和效率的关键路径。平面布局的生成是建筑设计中的重要步骤，它要求对几何形态和复杂空间关系进行精确处理。通过参数分析和建模工具，设计师能够及时调整和优化多组设计方案及与参数相关的单元形态。可视化编程工具如 Grasshopper 和 Processing 等，进一步推动了建筑领域的数字化转型，构建了参数化建模与生成设计的交互平台，促进了建筑设计的效率提升和创新发展。

众多学者针对不同算法原理在布局问题上的研究及其适用性进行了深入的探讨。例如，Gero 及其团队通过将输入参数与设计成果相联系，实现了对设计成果的量化评估^[2]。他们运用优化算法在多维空间内寻找最优和较优的解决方案，通过遗传算法的迭代过程，包括种群的初始化、适应度的评估、自然选择、遗传交叉和基因突变，以寻找更优的解决方案。

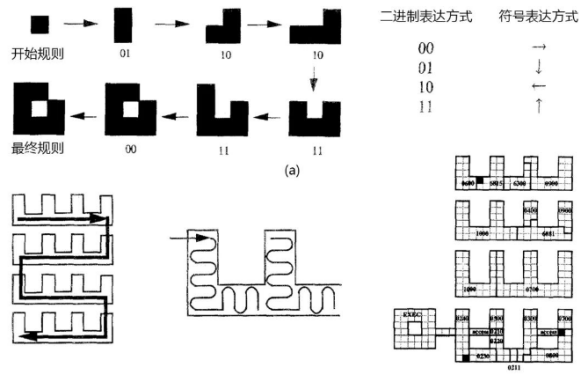


图 1 EDGE 系统的遗传算法 (参考文献[2])

Grünbaum 和 Shephard 对等面体平铺的分类和研究不仅在平面几何的理论研究中具有重要意义,也在实际应用中展示了参数化几何分析的广泛潜力^[3]。在平面设计中,平铺指的是一组形状能够完全覆盖平面而无任何间隙或重叠的排列方式。当平铺的结构可以完全由其与所有直接邻居之间的几何关系确定时,这种平铺被称为等面体平铺。Grünbaum 和 Shephard 将等面体平铺归类为 93 种不同类型^[3],标记为 IH1、IH2、...、IH93。对于每种 IH 类型,可能的平铺形状可以通过模板表示。模板定义了一个基础的平铺多边形,通过在模板规定的约束条件下移动顶点和变形边缘,设计师可以从这一基础多边形中生成所有可能的平铺形状。

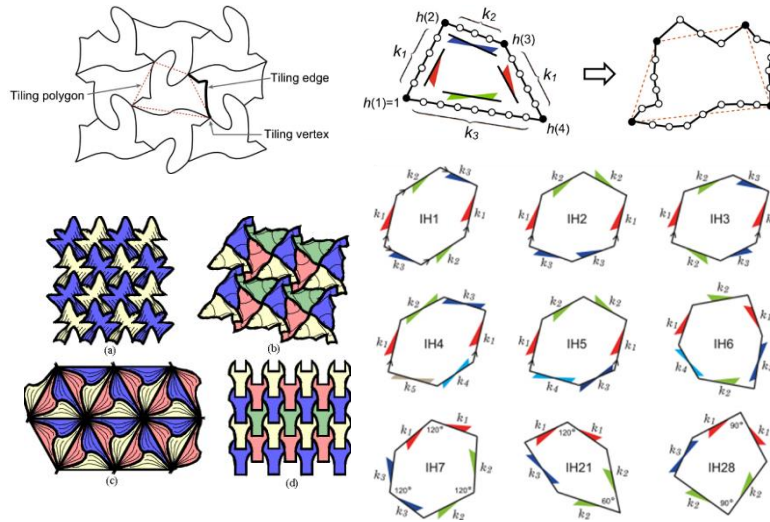


图 2 等面贴砖原理 (参考文献[3])

在传统图案的建模及生成中,吉国华针对古建筑冰裂纹的轨迹形状,利用算法及规则多边形阵列的方式进行冰裂纹图案的随机生成,实现传统纹样图案的数字生成与探索^[4]。在理论探讨方面,王晖等研究了离散几何在计算性设计中的应用及其对建筑形态生成、结构稳定性优化与性能评估的影响。包含镶嵌、关联、离散微分和拓扑组合等多种分支在建筑设计领域的最新进展,目的在于通过基本几何单元的组合与重组,提供创新的设计方案,并展望方法在生成式设计及自动化建造中的应用前景^[5]。

尽管已有研究在算法与平面填充实现方面取得了一定进展。在图案样式生成探索中,室内空间的特定平面图案布局的数字划分方式仍需深入探讨。

2 平面模型生成

相比于网格模型模板确定的排布规律，建立多参数控制的图案及合适的单元排列方式是本研究讨论的重点。通过对各个单元的长度、宽度、位置和形状的控制，进行有规律的组合迭代，完成对满铺图案的细节处理，进而生成合理且满足设计师要求的平面轮廓图案。

2.1 建立平面轮廓类型

根据外部可输入参数定义图案边界及布局条件，预定义目标平面图案系统由集合 N 与单元体 n 组成，它们之间的组合规则由位置和半径参数控制。平面轮廓由正多边形代表的坐标顶点限定，通过参数控制其排布距离是否满足最大排布尺寸，同时组合划分应当满足设计距离限定。

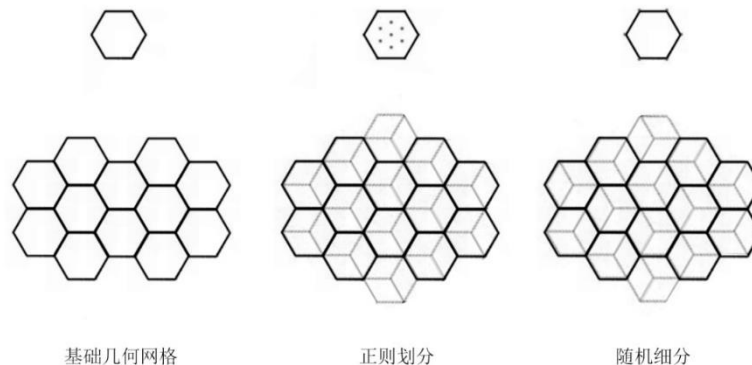


图3 平面轮廓剖分过程（来源：作者自绘）

基础网格由二维平面上的单元子图形阵列确定，每个子单元在图案中的位置及相邻关系通过单元基点 $Site_i$ 与单位向量表示使其具有几何意义。单元代表基点与其他 $n-1$ 个基点所对应的对称投影相接，所有单元均为正多边形，上图显示了正六边形模式的一个线框版本和一个可用于构造它的网格模型，其中轮廓剖分阶段允许有多种状态，这适用于存在多种可能方式来执行更新的规则系统形成均匀多边形。在此基础上再进行单元形状填充的生成以满足各个图案对形状面积的需求。

2.2 规则的数字化建立

单元位置确定后对给定的几何网格进行平面正则划分和随机细分，以此完成对几何图案的初始限定。接下来，研究将专注于子单元的平面布局设计。在这一过程中，一个多边形的顶点可能会被多个子单元共享。当其中某一个子单元发生改变时，与之相连的其他子单元组合也会相应地进行更新。通过这种相互关联的组合方式，实现整体设计的优化。其中几何单元数据演化通过选择进行替换，而产生的多路系统中的路径将具有大量可能的演化，顶点通过单独数据结构控制，子节点也会出现多种几何位置的更新，并且每次出现变化都会引导多路系统中的另一条路径。

每个点的数据由 x 和 y 坐标之和的可能解数决定：解数越多，划分迭代调整越多。这会产生一个对称图案的图像，图4表示该图仅绘制了最多2位数字对。这种图案的颜色代号作为生成色可以由生产厂家配合选定，通过融合色彩类型与设计图案，设计师能够将符合多层次审美的色

彩元素整合进设计当中，从而使空间图案设计更加贴近当前的审美观念和消费趋势^[6]。图案绘制中通过精确数量的单元阵列，将其作为功能设计模块，使得平面布局能够迅速构建。

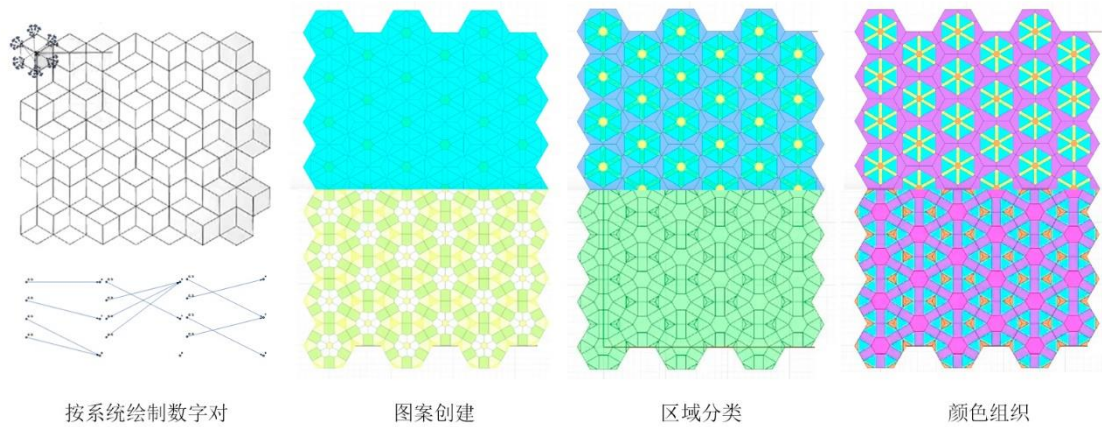


图4 区域单元几何矩阵生成（来源：作者自绘）

在上述流程优化的基础上，我们可以构建出正交化的平面图案布局，从细分子单元的角度出发，对图案模式进行网格划分，将各子节点的数值与之相距最近的网格顶点相结合。此外，通过规则化的数据将函数与图案相联系，以调整相关联的值，最终完成平面网格模型的标准化。

3 方案设计应用

基于前述方法，研究结合河北省张家口市下花园区智能中心楼，建筑用地面积为 1210 m²，总建筑面积为 2317 m²，主要功能分为综合服务大厅、办公区、展览区及辅助设备用房。

目前已完成的研究可以应对两类室内设计问题：一类是以材料及细部构造为主的门窗构件样式图案，要通过其确定的墙面开洞位置进行单元划分及要素组合。另一类是以典型几何特征为主的地面图案设计，需要依据现状平面轮廓绘制需要的平面样式。

3.1 门窗边界与图案生成

首先是门窗构件图案生成，结合实际应用，在功能上生成多种几何样式的相应面宽高度下的参考图案。坐标系建立根据实际门窗几何尺寸确立，将门窗构件置于二维坐标系中，通过数据将各要素之间相对位置用坐标值表示，之后通过计算机在轮廓中绘制点、线、面等几何元素。

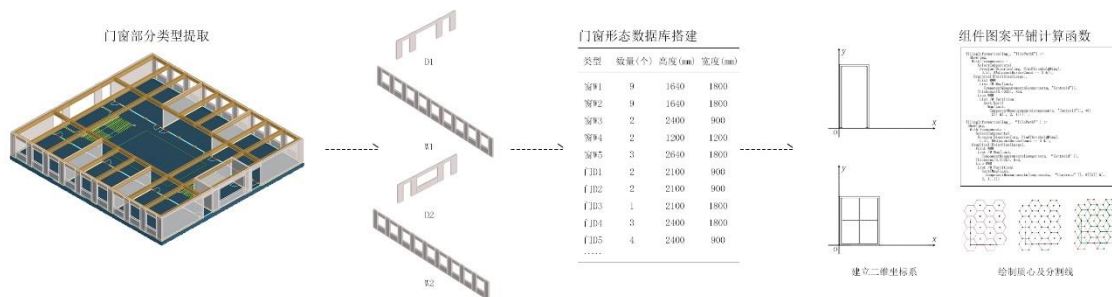


图5 门窗形态数据提取（来源：作者自绘）

根据建筑开洞大小及位置等特定要求提供交互自定义操作，同时根据宽度值、高度值以及相应参量，绘制线框 line，包括外轮廓线、框边线、分隔线。之后置入预先绘制的门窗样式，根据坐标程序会绘制出标准情况下的样板及相应图纸。



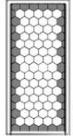



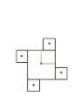

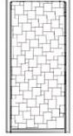


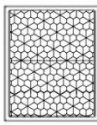
基本形状	平铺形式	门样式	基本形状	平铺形式	窗样式
		 Length: 800mm Height: 2100mm Number: 00			 Length: 1000mm Height: 1000mm Number: 02
		 Length: 800mm Height: 2100mm Number: 00			 Length: 1000mm Height: 1000mm Number: 02

图6 门窗图案样式生成（来源：作者自绘）

设计师可以根据坐标高度及门窗数量位置进行自定义，依照方案效果调整，获得可以参考的图案样式。此外还可以进行色彩控制，以玻璃彩印或 pvb 夹层玻璃为主要方式，其参数可以通过 RGB 颜色标注表示，通过红绿蓝三基色的数值(0-255)，生成不同数值控制下的色彩图案。其透明度控制由光线能透过玻璃的百分比表示，加工中由打印机器精确控制涂料材质的疏密度实现。

3.2 地面边界与图案生成

地面图案的处理以地面边界轮廓为限定，几何填充大小与实际建造中地砖尺寸相符合。与门窗样式不同，地面图案通过函数在完整单元的质心上使用 VoronoiMesh 函数完成。为了实现特定轮廓下的密铺，对完整图块轮廓进行多边形划分。然后进行主边界限定，以便获得更加符合设计目标的成果。改变坐标的 x 和 y 值对质心进行排序，以同一逻辑进行多图案填充生成来增加方案的可变性。

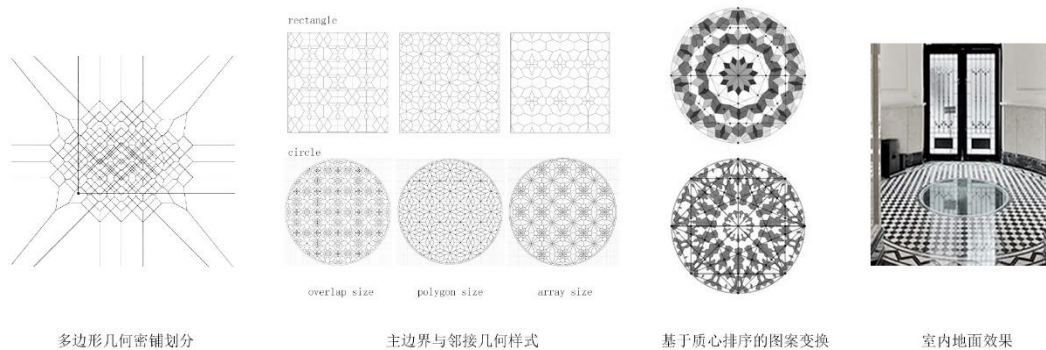


图7 地面砖图案样式生成（来源：作者自绘）

在确定基础图案之后，程序将生成与轮廓相匹配的平面布局。在设计项目中主边界分为以办公空间为主的矩形和展厅空间为主的圆形轮廓，在其中定义图案样式构成的密铺空间^[7]，基于规

则约束生成多边形的平铺样式。生成效果通过图 7 展示，图案样式用以进行对比和效果验证。设计师可以进行二次处理和局部微调，去掉图案质量不佳的单元以优化模型方案。

4 成果结论

4.1 研究成果

在本项研究中，笔者的设计策略是将几何图案的形态与数字生成技术相结合，从而开发出一种精确可控的平面图案生成技术。以此为基础，本文利用数字化工具，依据图案组合的规则，能够在方案设计阶段实时评估设计目标并进行优化，以辅助设计师快速比较不同设计方案的效果，旨在为空间设计工作提供一种更高效的解决方案。本研究的成果体现在两个方面：首先，通过程序化建模手段，实现了设计规则的转换，能够迅速创建出适应不同平面尺寸和单元类型的图案模型。其次，研究结合实际案例，设计了准确可控的图案生成方法，允许对图案的整体布局和单元类型进行同步调整，以提高设计的精确性和效率。

4.2 研究展望

研究在应用阶段虽考虑颜色材料等相关参数，但尚未构建可控方法，未来的研究将致力于对接生产加工阶段，探索图案样式的色彩与材质在不同尺度的模型生成，设计师能够更高效地对设计方案的生产加工进行推敲筛选，以减少设计过程中的成本，不断丰富和完善现有的生成方法。未来研究还将扩展局部图案造型的可变选项，覆盖更多轮廓类型，进而提升设计图案的类型适应性，以进一步优化数字图案模式的生成技术。

参考文献

- [1] 李飏, 郭梓峰, 李荣. “数字链”建筑生成的技术间隙填充[J]. 建筑学报, 2014(08):20-25.
- [2] Jo J H, Gero J S. Space layout planning using an evolutionary approach[J]. Artificial intelligence in Engineering, 1998, 12(3): 149-162.
- [3] Kaplan C. Introductory tiling theory for computer graphics[M]. Morgan & Claypool Publishers, 2009.
- [4] 吉国华. 传统冰裂纹的数字生成[J]. 新建筑, 2015, (05):28-30.
- [5] 王晖, 叶子超, 刘梦嫒, 等. 离散几何在建筑计算性设计中的应用: 一个框架性描述[J]. 建筑师, 2023, (05):12-19.
- [6] 张冰冰. 后疫情时代的趋势色在空间设计中的应用研究[J]. 中国建筑装饰装修, 2021, (02):188-189.
- [7] Zong C. Packing, covering and tiling in two-dimensional spaces[J]. Expositiones Mathematicae, 2014, 32(4): 297-364.

图片来源

图 1: Jo J H, Gero J S. Space layout planning using an evolutionary approach[J]. Artificial intelligence in Engineering, 1998, 12(3): 149-162.

图 2: Kaplan C. Introductory tiling theory for computer graphics[M]. Morgan & Claypool Publishers, 2009.
其余图片均由作者绘制