

基于生成对抗网络的建筑类型学研究方法探索

——以法国盛期哥特式教堂为例

黄河¹, 刘宇波^{1,2,*}, 邓巧明¹

1. 华南理工大学建筑学院, 广州 510641

liuyubo@scut.edu.cn

2. 亚热带建筑与城市科学全国重点实验室, 广州 510641

摘要:

建筑类型学是对建筑元语言的抽象和总结, 对于认知建筑类型具有重要作用。过去建筑类型学研究是基于人工对大量案例的观察、学习和分类, 并从中提取“原型”。如 19 世纪时, J. N. L 迪朗 (Jean-Nicolas-Louis Durand) 在其类型学著作《古代与现代各类大型建筑对照汇编》中对古今建筑进行了总结, 并明确地划分了建筑类型。

而如今基于生成对抗网络 (Generative Adversarial Networks, 简称 GAN) 的图片学习已经成为人工智能应用于建筑学的重要研究方向, GAN 可以在短时间内对大量样本进行学习, 并分析总结案例间的潜在规律, 并服务于后续生成式设计。本研究旨在探索将 GAN 作为类型学统计案例和分析案例中共有规律的高效工具的可行性。研究受夏昌世攻读博士论文期间对法国北部晚期哥特大厅式教堂的地域主义类型研究的启发, 选取类型特征较为突出完备的法国盛期哥特式教堂作为类型学研究对象, 依据 J. N. L 迪朗在巴黎综合理工学院的教學大纲《综合工科学院建筑学课程摘要》中提出的由轴线生成建筑的构图方法, 构建教堂样本集的输入 (主次轴线位置) 和输出 (基于色块划分的平面分区) 的对应关系, 实现对教堂各空间比例划分、柱子跨度、拱券体系等潜在规律进行学习, 并结合对生成效果的分析进一步优化, 最终实现基于一些前提输入条件 (教堂的长宽、主次轴线位置) 的教堂布局生成。

关键词: 类型学; 轴线; 哥特式教堂; 生成对抗网络; 布局生成;

Exploring Architectural Typology Research Methods Based on Generative Adversarial Networks: A Case Study of French High Gothic Cathedrals

He Huang¹, Yubo Liu^{1, 2, *}, Qiaoming Deng¹

1. School of Architecture, South China University of Technology, Guangzhou
liuyubo@scut.edu.cn

2. State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology,
Guangzhou

Abstract:

Architectural typology is an abstraction and synthesis of the meta-language of architecture, playing a significant role in the cognition of architectural types. Historically, research on architectural typology was based on manual observation, study, and classification of numerous cases, from which "prototypes" were extracted. For instance, in the 19th century, Jean-Nicolas-Louis Durand systematically summarized ancient and modern architecture in his typological work and clearly defined architectural types.

Today, the application of image learning through Generative Adversarial Networks (GANs) has become a key research direction for applying artificial intelligence in architecture. GANs can learn from a large number of samples in a short time, analyze and summarize the latent patterns between cases, and support subsequent generative design. This study aims to explore the feasibility of using GANs as an efficient tool for statistical case studies in typology and for analyzing common patterns within cases. Inspired by Changshi Xia's doctoral research on regionalist typology in late Gothic hall churches in northern France, this study selects French High Gothic cathedrals, which exhibit prominent and complete typological characteristics, as the object of typological study.

Based on the compositional method of generating architecture through axes as proposed by J.N.L. Durand in his teaching syllabus, the study constructs a correspondence between the input (positions of primary and secondary axes) and the output (plan zoning based on color blocks) of the cathedral sample set. This approach enables the learning of potential patterns in the spatial proportioning, column spans, and vault systems of the cathedrals. Through analysis of the generative outcomes and further optimization, the study ultimately achieves the generation of cathedral layouts based on certain input parameters (e.g., the length and width of the cathedral, and the positions of primary and secondary axes).

Keywords: Typology; Axis; Gothic cathedral; Generative Adversarial Networks; Layout generation

引言

每种建筑类型都有其空间的特性，而对同一种建筑类型的统计、规律归纳属于类型学的研究方式，比如《建筑设计资料集》就按照不同的建筑类型讲述了其空间特性，具体设计要求和设计的方法。由此可见，建筑类型学研究对建筑师快速掌握某一特定建筑类型有着重要的作用。

追溯历史，类型学鼻祖让-尼古拉-路易·迪朗（Jean-Nicolas-Louis Durand）、阿尔多·罗西（Aldo Rossi）都曾以教堂或修道院作为类型学研究对象进行研究，而华南理工大学夏昌世先生博士期间也针对法国晚期大厅式哥特教堂进行了研究。本次研究尝试以法国盛期哥特式教堂为例，顺应前人对类型学的研究方法，结合当今人工智能技术的强大统计和学习能力，提出建筑类型学研究的新方法。同时基于对人工智能模型训练结果中损失函数（G_GAN、G_L1、D_real 和 D_fake）和测试集生成结果进行分析，提出本方法进一步的改进建议。

一. 早期类型学发展历程

1.1 类型学发展历程



图 1 类型学发展历程（图片来源：笔者自绘）

类型学发端于 18 世纪，经历了 18 世纪以 M. A. 劳吉埃尔为代表的原型类型学、19 世纪以 J. N. L. 迪朗为代表的范型类型学和 20 世纪以阿尔多·罗西为代表的城市类型学（图 1）[1]，目前已经逐渐确定了类型的定义——类型是超越形式的元语言和原则。

1.2 J. N. L. 迪朗的范型类型学

19 世纪前后对类型学做出重大贡献的人是 J. N. L. 迪朗。他于 1776 年在法国著名建筑师布雷（Étienne-Louis Boullée）的工作室当绘图员，布雷以擅长抽象化古典建筑的几何形式而闻名，这对迪朗早期的建筑思想产生了一定影响。

1794 年，迪朗加入了巴黎综合理工学院，他在学院中负责教授“构图结构”这一门课程[2]。他的《古代与现代各类大型建筑对照汇编》于 1799 年出版。提出了建筑类型这一概念[3]。书中将教堂作为一种类型与神庙等进行了区分（图 2），在迪朗看来，建筑是由建筑部件所组成，而建筑部件是由建筑元素所构成的。建筑部件包括了门廊、门厅、楼梯、各种房间和庭院。这些元素是类型的通用语言。而通过将这些元素进行几何地拼接重组，就能产生各种建筑类型。

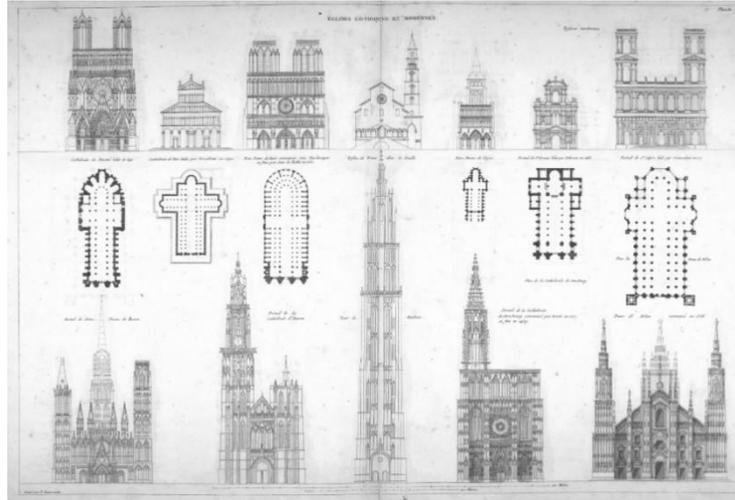


图 2 迪朗于著作中对教堂类型归纳（图片来源：《古代与现代各类大型建筑对照汇编》）

1.3 夏昌世基于类型学的法国哥特教堂研究

华南理工大学建筑系的夏昌世先生在 1930-1932 年德国留学时师从乔治·怀斯，并协助其完成了西班牙的晚期哥特式和文艺复兴时期的大厅教堂的研究[4]。（图 3）其博士论文选择了法国北部哥特式晚期大厅式教堂作为研究对象。文中主要阐述了法国北部哥特式晚期大厅式教堂的分布范围和具体特征，他指出法国北部教堂一个重要特征是的肋拱都是交叉的。[5]

夏昌世基于类型学的角度对法国哥特教堂的柱式和大厅布局进行了总结，这是在信息闭塞时代基于大量的实地调研而得出的规律，在如今建筑高度信息化的时代，笔者受夏先生工作方法对 GAN 学习的启发，尝试运用人工智能对法国哥特教堂进行规律分析并进行自动生成，

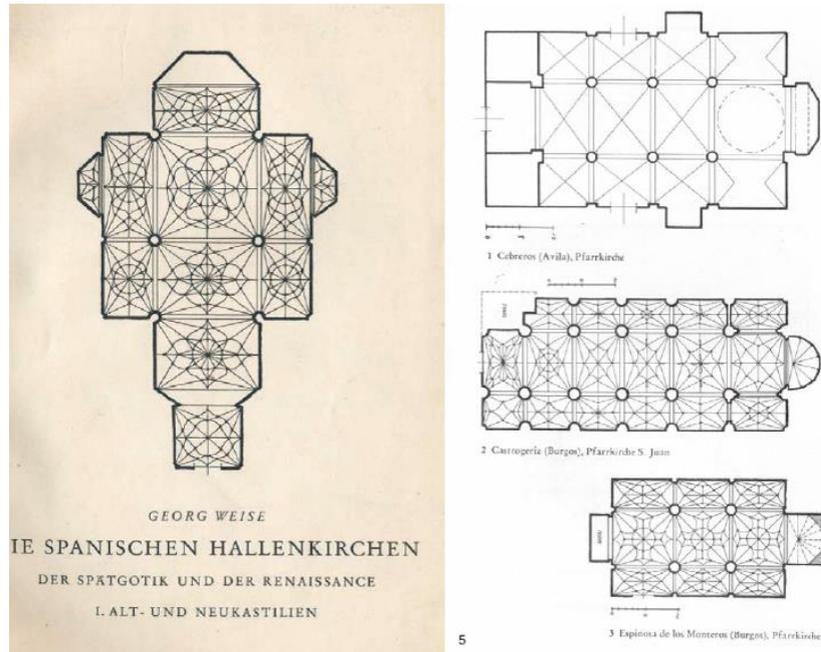


图 3 夏昌世为导师著作绘制的封面（图片来源：Die Spanischen Hallenkirchen der Spätgotik und der Renaissance）

二. 生成对抗网络国内外研究现状

随着人工智能的快速发展，基于生成对抗网络（GAN）的图片学习已经成为人工智能赋能于建筑的重要研究方向。GAN 在图片的学习和生成方面有巨大的优势，目前已经成为主流的图像生成方法。

目前国内外已经有大量学者对生成对抗网络在建筑设计中的应用进行了研究。Yick Hin Edwin, Chan, A. Benjamin Spaeth 用生成对抗网络实现了“建筑草图 - 拟真图像”的生成[6]。De Yu 用生成对抗网络通过学习大量的农业 建筑案例，用来生成“植物种植-建筑”街区模型[7]。Jia Qi Shen, Chuan Liu, Yue Ren 和 Hao Zheng 通过给定城市场地的图片训练生成城市设计的规划图[8]。国内袁烽教授团队基于生成对抗网络和遗传算法，实现了不同密度的建筑群的学习生成[9]。华南理工大学的刘宇波和邓巧明教授团队利用生成对抗网络模型实现了对小学布局、大学布局的生成[10]。

现有研究重在利用 GAN 进行生成探索，GAN 学习训练的是图像之间的映射关系，与设计过程中根据设计条件给出合理设计结果的过程相似，训练过程会根据生成结果的评价不断调整标注（即设计条件），这个过程也是对某建筑类型的学习和研究的过程，因此，本文提出将 GAN 作为类型学研究的工具对法国哥特式教堂的布局规律进行研究。

三. 研究方法论

3.1 生成对抗网络原理

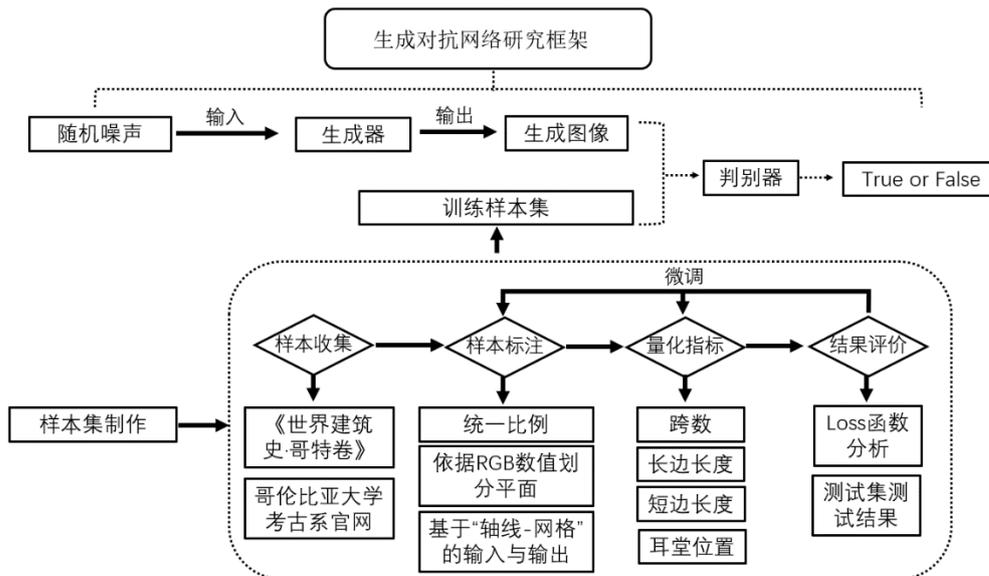


图 4 生成对抗网络研究框架（图片来源：笔者自绘）

生成对抗网络（GAN）主要包括两部分：生成器和判别器，生成器能学习输入与输出样本集

之间的规律，从而生成类似的图片，而判别器需要对生成的图片进行判别，判别该图片是真实数据还是生成的，两个模型的互相博弈学习，最终产生优秀的输出结果。

生成对抗网络模型训练需要基于一定量的数据集，并且要构建清晰的输入与输出关系，为了能让生成器和判别器更好地学习复杂的教堂的平面，需对数据集进行统一的标注，制定相关的量化指标，方便对训练结果进行评价。

3.2 生成对抗网络数据集构建

今天人们所谓“盛期哥特”（High Gothic）或“古典哥特”（Classical Gothic），是指在哥特这种风格的演化过程中，基本特点得到充分体现并以一种最明晰的方式展现出来的阶段。[11]哥特式教堂在法国流行了数百年的时间，其间建造的教堂数不胜数，为了保证样本集的规律清晰且较统一，本次类型研究中只选取了最能体现哥特式风格的中晚期哥特式教堂作为研究对象。

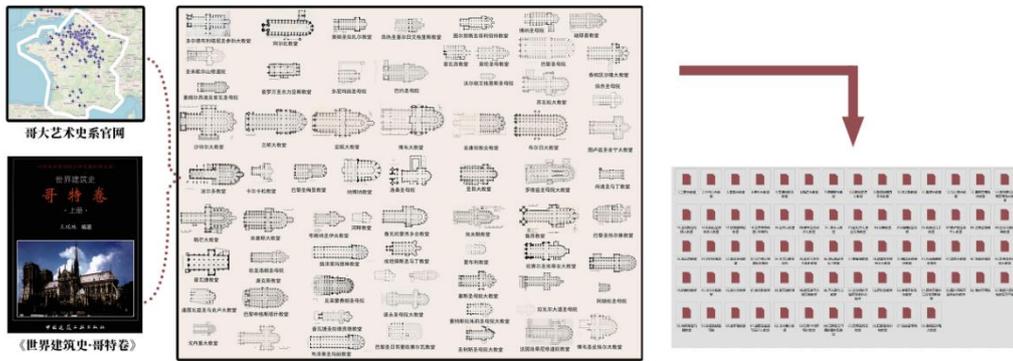


图 5 以统一比例收集哥特式教堂样本过程（图片来源：笔者自绘）

为了保证样本量足够且具有较高可信度，教堂的平面图从《世界建筑史·哥特卷》（上、中、下卷）书中和哥伦比亚大学考古和艺术史系官网获取。（图 5）

样本选取的原则是：

- （1）选取的教堂必须要目前仍然留存下来的，才能通过现场图片、结合立面和剖面对教堂平面进行验证。
- （2）所有教堂平面必须带有比例尺标注，方便放缩统一比例，当前编程的算法模型是基于 256*256 像素的图片进行训练的，为了保证像素点的充分利用，笔者结合教堂的尺度范围，确定了所有教堂标注的比例（500mm/ 像素）。
- （3）所有教堂平面都必须包含耳堂这一元素，因为根据耳堂可以确定一个教堂的次轴线所在的位置。同时应当选取更多包含了回廊和放射状礼拜堂的教堂平面，保证学习样本复杂性而避免过拟合。

最终确定下来的样本总共有 63 个，将他们分成训练样本集和测试样本集。

3.3 生成对抗网络样本集标注

教堂根据功能，主要可以被划分为前厅（Narthex）、过道（Aisle）、耳堂（Transept）、中殿（Nave）、回廊（Ambulatory）、圣坛（Chancel）和后殿（Apse）（图 6）。因此可以将复杂的教堂平面图转换为由数个功能部分构成的图块，并给予不同颜色进行区分。

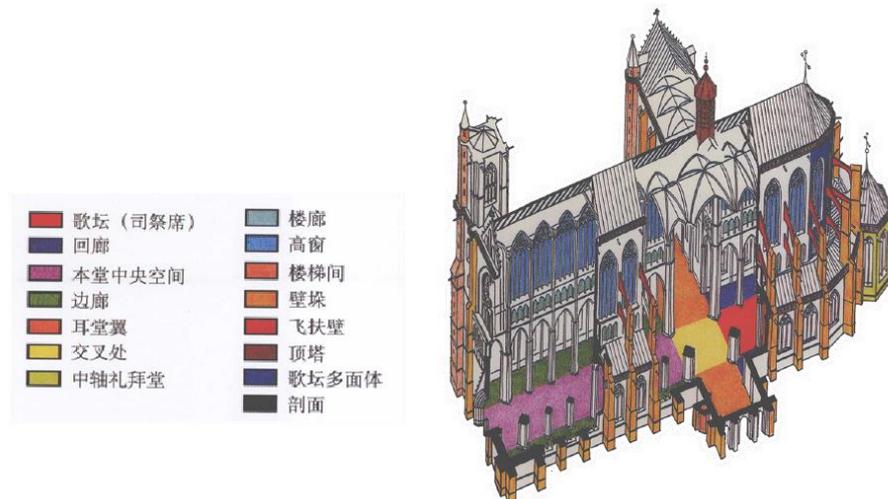


图 6 教堂分区图（图片来源：罗夫·托曼《哥特式风格：建筑·雕塑·绘画》）

而 J. N. L. 迪朗在《综合工科学院建筑学课程摘要》中总结了一套由轴线生成建筑的构图方法——“轴线-网格”法（图 7），该方法对构建训练集教堂平面的输入输出关系具有很好的启示作用。其具体步骤为：

- 第一步：确定平行且等距的主轴。
- 第二步：根据主轴的位置，继续绘制等距的次轴线。
- 第三步：把墙放置在轴线上。
- 第四步：主次轴相交处用来放置柱子或壁柱。
- 第五步：将轴线继续一分为二，以创建新的轴，用来定义门、走廊的位置。
- 第六步：根据平面绘制立面和剖面。[12]

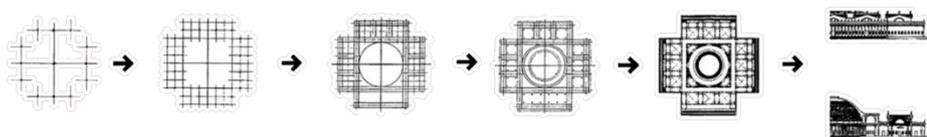


图 7 迪朗的“轴线-网格”构图方法（图片来源：莱安德罗·马德拉佐（Leandro Madrazo））

基于迪朗的“轴线-网格”构图方法，哥特式教堂的柱子可以归结为轴线的交点，因此在标注教堂时，可以用轴线来划分空间。笔者将输入条件设定为轴线的位置和长度，用绿色线（R=127,G=64,B=64）标识教堂主轴（东 - 西轴线）的长度，用红色线（R=64,G=127,B=64）标识教堂次轴（南 - 北轴线）的长度。而输出条件参照罗夫·托曼在著作中对哥特教堂的标注方法，依据哥特教堂的不同分区将输出图像标注为不同 RGB 色块的组合，而不同分区之间的轴线则统一采用蓝色线（R=0,G=127,B=255）进行绘制。其他分区 RGB 颜色选取的原则为二分法，确保 RGB 三个数值都有较强的规律性（图 8）。确定好标注原则后，对 63 个样本的输入和输出图像（图 9）进行标注。

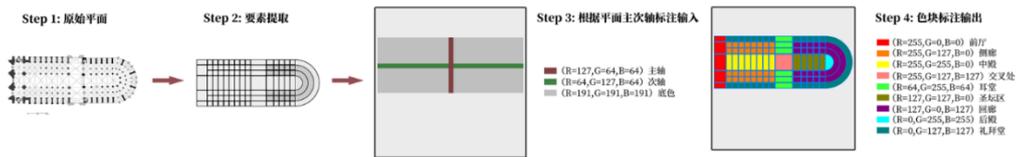


图 8 教堂样本输入与输出图像标注 (图片来源: 笔者自绘)



图 9 基于真实教堂平面绘制的输入和输出样本集 (图片来源: 笔者自绘)

为了更好地判断其平面生成效果, 增加了随机绘制的 10 个输入图像 (图 10), 以进一步测试其生成图像的清晰度。

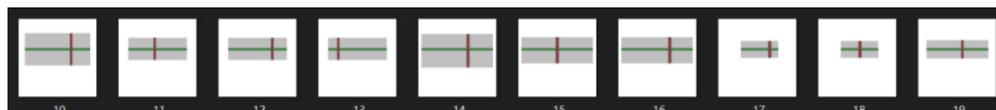


图 10 随机绘制的输入样本集 (图片来源: 笔者自绘)

四. 实验结果与讨论

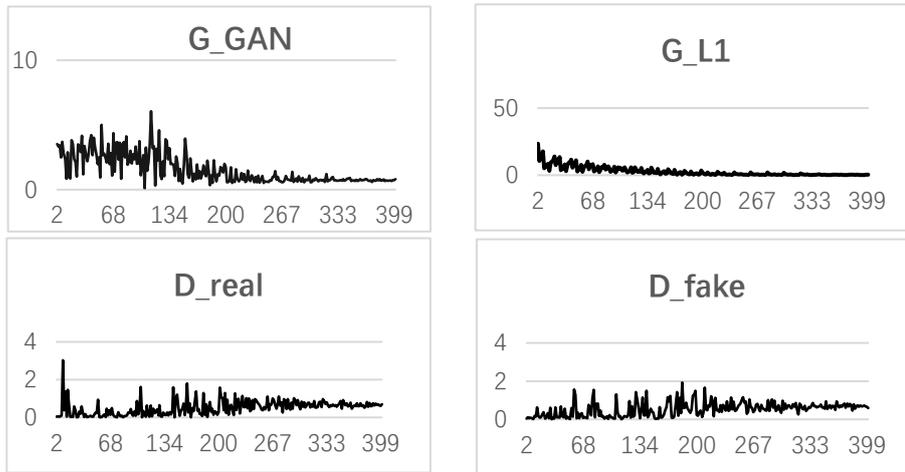


图 11 GAN 训练中的 Loss 函数折线图（图片来源：笔者自绘）

以 400 次迭代，学习速度 0.0001 为参数，进行模型训练。完成模型训练后，用基于真实教堂平面的测试集、随即绘制的输入测试集和真实地块进行学习效果测试。

通过对训练完成后产生的 Loss 函数，里面包含了从 1 到 400 次迭代中四个参数（G_GAN、G_L1、D_real 和 D_fake）的数值变化，将四个参数数据结合 Excel 表格 分别绘制其折线图（图 11）。

通过折线图可以判断，四个参数经过 400 次迭代后都趋于稳定，G_GAN 最终趋近于数值 1，并在 1 附近震荡，G_L1 最终趋近于 0，而 D_real 和 D_fake 都趋近于 0.5。说明模型训练已经收敛。

在进行结果分析评价时，笔者引入四个评价指标：

1. 跨数系数：生成结果跨数 / 真实平面跨数。
2. 短边系数：生成结果南-北边界长度 / 真实平面南-北边界长度。
3. 长边系数：生成结果东-西边界长度 / 真实平面东-西边界长度。
4. 耳堂位置系数：生成结果耳堂所在位置在长边中的比值 / 真实平面耳堂所在位置在长边中的比值。

四个指标比值越接近 1 说明生成结果与实际情况越接近。长度和跨数的测算由人工进行完成。

表 1 基于真实教堂平面绘制的测试集输入验证（图表来源：笔者自绘）

	输入	输出	真实平面
测试样本 1			
测试样本 2			
测试样本 3			

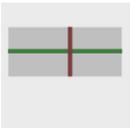
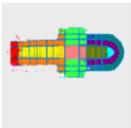
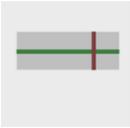
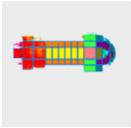
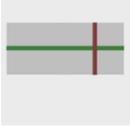
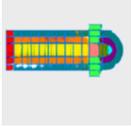
用基于真实教堂平面绘制的测试集输入进行测试，列举了短、中、长三种尺度下 GAN 模型的输出测试结果（表 1）。将测试样本的数据用 Excel 表格进行汇总，并绘制生成结果评价表，用来对比 1、2、3 测试集与真实情况的差距（表 2）。

表 2 生成结果评价表（图表来源：笔者自绘）

测试集	跨数系数	短边系数	长边系数	耳堂位置系数
测试样本 1	1.125	1	1	1
测试样本 2	1.17	1.04	1.08	1.05
测试样本 3	1.23	1.02	1.01	1.01

如生成结果评价表统计所示，测试样本的短边系数、长边系数和耳堂系数都接近于 1，说明生成结果与现实结果很接近，仅在跨数上有些许差别。而测试样本 2 原有礼拜堂并没有位于后殿回廊处而是位于侧廊处，GAN 模型还是遵循大多数的教堂的规律将其布置在了回廊处，所以输出效果与实际结果相差较大。这说明了较为特例的样本集都不容易被 GAN 所掌握，如何基于共性规律的学习的同时能够产生突破性的生成结果，这仍然是当前人工智能学习的一个需要发展的方向。

表 3 基于随机绘制的测试集输入验证（图表来源：笔者自绘）

	输入	输出
随机绘制测试样本 1		
随机绘制测试样本 2		
随机绘制测试样本 3		

用基于随机绘制的测试集输入进行验证（表 3），总的来说，输出结果与输入的长宽度、耳

堂位置等对应较为准确。轴网生成较为清晰。

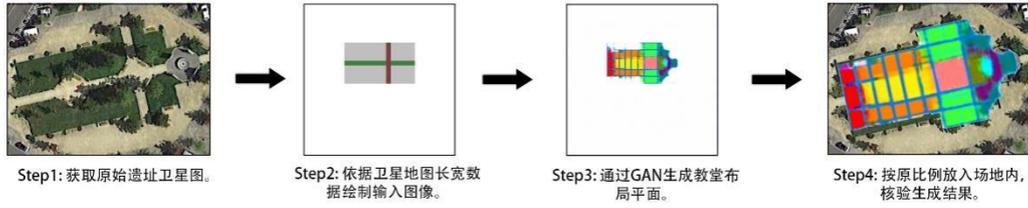


图 12 基于真实遗址的测试集输入验证（图片来源：笔者自绘）

为了进一步测试训练完的 GAN 的实际应用场景，笔者将法国阿比维尔的一个哥特教堂遗址公园作为真实遗址输入测试集，该遗址原有教堂由于缺乏维护，建筑状态逐渐恶化而被拆除，被改造成为了一个集停车和休憩功能的公园，遭到了周边居民的反。该遗址公园保存了原有哥特式教堂的空间格局，如柱子和主次轴位置，而且在教堂的主轴线末端还有一个突出的礼拜堂得以保留。

将基于阿比维尔教堂遗址留存下来的主次轴的长度和位置按照输入标注原则进行标注、制作成一个输入样本，将其输入到 GAN 中。生成的布局非常清晰（图 12），而各元素布局、柱子跨数和间距与教堂遗址原有状况近乎相同，主轴末端的礼拜堂的生成也与实际基本相吻合。此测试显示，GAN 模型似乎掌握了教堂类型的基本设计原则，能基本准确地根据原有遗址进行布局生成。

五. 结论与展望

在本研究中，GAN 作为一种生成性神经网络，展现了其在类型学研究中的独特优势。研究选取法国哥特式教堂作为类型学研究对象，在 J. N. L 迪朗的“轴线-网格”法的基础上提出了基于主次轴线生成哥特式教堂布局的方法。GAN 通过其自学习能力，能够从有限的训练数据中捕捉并生成具有复杂结构和特征的哥特式教堂平面布局。

GAN 不仅提供了一种自动化、数据驱动的设计生成方法，还展示了其在应对复杂历史建筑类型学研究中的潜力，同时，基于真实地块的测试输入也揭示了其对考古遗址进行快速预测原有布局的应用可能性。但哥特教堂的丰富性不仅在于平面布局，未来可以将立面、剖面上的元素进一步整合，进行更深层次的学习，并可以基于 Grasshopper 插件平台实现三维化的输出结果呈现。

但在本研究中尚存在一些不足，首先，模型训练所使用的样本量较小，样本数据的有限性可能使得模型泛化能力不足。未来研究可以考虑增加数据集或使用数据增强技术来减少这一问题的影响。其次，样本特征的数量有限也是一个挑战。轴线图虽然能标识传统教堂布局中的对称性特征，但对于许多历史建筑中常见的非对称扩建关系，轴线图难以充分反映其复杂性。而且教堂跨数的影响因素之一是跨度，与结构性能相关，这可能是最终评价结果偏差稍大的原因。这也可能解释了验证结果中跨数系数表现低于其他三个参数的原因。未来的研究可以考虑引入非对称轴线或使用更先进的特征提取方法，以更好地反映建筑形式的复杂性。

参考文献

- [1] 汪丽君. 建筑类型学. [M] 北京: 中国建筑工业出版社.
- [2] 曲茜. 迪朗: 其人及其建筑理论[D]. 南京大学.
- [3] Durand J N L. Recueil et parallèle des édifices en tout genre, anciens et modernes..[M]. Uhl, 1986.
- [4] Weise G. Die Spanischen Hallenkirchen der Spaetgotik und der Renaissance. I. Alt- und Neukastilien[M]. Tuebingen: 1953.
- [5] 夏昌世, 乔治·怀斯. 法国北部晚期哥特式教堂[D]. Eberhard-Karls-Universitaet Tuebingen
- [6] Chan, Yick Hin Edwin and Spaeth, A. Benjamin. Understanding and Visualizing Generative Adversarial Networks in Architectural Drawings. Architecture and Fabrication in the cognitive age – Proceedings of the 38th eCAADe Conference – Volume 2, TU Berlin, Berlin, Germany, 16-18 September 2020, pp. 299-308
- [7] De Yu.Reprogramming Urban Block by Machine Creativity - How to use neural networks as generative tools to design space. eCAADe 2020: Anthropologic : Architecture and Fabrication in the cognitive age
- [8] Jia Qi Shen, Chuan Liu, Yue Ren ,Hao Zheng. Machine Learning Assisted Urban Filling. Proceedings of the 25th International Conference on Computer- Aided Architectural Design Research
- [9] Yao, Jiawei et al. “Generative design method of building group - Based on generative adversarial network and genetic algorithm.” CAADRRIA proceedings (2021): n. pag.
- [10] 邓巧明, 林文强, 刘宇波等. 基于生成对抗网络的校园总平布局生成式设计探索——以小学校园为例 [J]. 世界建筑
- [11] 王瑞珠. 世界建筑史 哥特卷 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社: 383
- [12] Madrazo L. Durand and the Science of Architecture[J]. Journal of Architectural Education, 1994, 48(1): 12-24.

图表来源

图 1: 笔者自绘

图 2: Durand J N L. Recueil et parallèle des édifices en tout genre, anciens et modernes..[M]. Uhl, 1986.

图 3: Die Spanischen Hallenkirchen der Spaetgotik und der Renaissance

图 4-5: 笔者自绘

图 6: 托曼 R. 哥特式风格: 建筑 雕塑 绘画[M]. 中铁二院工程集团有限责任公司译. 武汉: 华中科技大学出版社, 2020.

图 7: Madrazo L. Durand and the Science of Architecture[J]. Journal of Architectural Education, 1994, 48(1): 12-24.

图 8-12: 笔者自绘

表 1-3: 笔者自绘