

城市形态生成设计的案例推理策略研究*

——以街区尺度为例

Case-Based Reasoning Strategy for Urban Morphological Generative Design: A Case Study of Block Scale

张柏洲¹, 莫怡晨², 李飏³

ZHANG Baizhou, MO Yichen, LI Biao



开放科学(资源服务)

标识码(OSID)

[本文引用格式]

张柏洲, 莫怡晨, 李飏. 城市形态生成设计的案例推理策略研究——以街区尺度为例[J]. 南方建筑, 2023(1): 09-18.

ZHANG Baizhou, MO Yichen, LI Biao. Case-Based Reasoning Strategy for Urban Morphological Generative Design: A Case Study of Block Scale[J]. South Architecture, 2023(1): 09-18.

摘要 在数字化城市设计方法涌现的当下, 基于案例推理的技术策略为城市形态设计拓宽了研究思路, 也为城市数据的深度挖掘与利用提供了灵感。研究建立了街区尺度的形态案例库, 并通过形态量化指标的计算与案例相似性检索, 搭建起基于案例推理方法的形态案例匹配与生成设计框架。探索了数字技术背景下城市形态量与形的转化与生成策略, 从而为数据驱动的城市设计决策提供帮助。

关键词 城市形态; 案例推理; 生成设计; 量与形; 街区尺度

*** 基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51978139): 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; 2021年江苏省省级绿色建筑发展专项资金: 基于智能设计与先进建造的绿色公共建筑设计方法与示范; 江苏省研究生实践创新计划项目(SJCX21_0025): 基于算法规则与云平台的公共建筑生成研究——以商业街为例。

中图分类号 TU984.1

文献标志码 A

DOI 10.3969/j.issn.1000-0232.2023.01.002

文章编号 1000-0232(2023)01-0009-10

作者简介 ^{1&2} 博士研究生; ³ 教授, 通讯作者, 电子邮箱: jz.generator@gmail.com; ^{1&2&3} 东南大学建筑学院建筑运算与应用研究所

ABSTRACT With the emergence of digital urban design methods, the case-based reasoning (CBR) strategy has broadened research ideas for the design of urban forms, as well as provided inspiration for the deep mining and utilization of urban data. The CBR strategy uses existing knowledge to solve problems, which makes it possible for urban morphological research to lead from the analysis of "index" to the generation of "form". With the establishment of morphological case database, the calculation of quantitative indicators, together with case similarity retrieval, makes building a framework for morphological case matching and generative design based on CBR a feasible research direction. Taking block scale as an example, the current study selected six representative cities in OpenStreetMap as data sources, extracted block unit data and its internal building data with the help of geometric operation, and then stored them on the database. For each block case, three quantitative indicators were calculated and inserted into the database as attributes: the urban form control index, block geometric shape descriptor, and block primary and secondary axis. The urban form control index was based on the collection and calculation of the basic geometric information of the case, which consisted of three data: area,

GSI and FSI. The block geometric shape descriptor was based on the geometric features of the block contour (e.g., area, perimeter, convex hull and bounding box). Eight descriptors were calculated and integrated into the shape feature vectors for each case, which were used as comparison factors for case similarity. Calculation of the block primary and secondary axes makes it possible to record the direction of blocks in advance, which is helpful towards directly obtaining the matching angle in the process of matching and generating. By comparison, the OBB method was chosen as the calculation method, and the exhaustive calculation was combined in order to conduct the direction matching. Based on the case collection and indicator calculation outlined above, a five-step workflow for single case matching generation can be constructed: target block preprocessing, form control index screening, shape similarity retrieval, optimal direction matching, and building volume generation. An experiment was conducted in the current study in which two European cities were selected as test sites and eight blank target blocks with different scales were selected for the experiment. Based on the abovementioned workflow, the program code screens and sorts the top eight most similar cases from the database according to the input conditions and morphological characteristics of each target block. One case was manually selected based on the site situation as the best matching case, and the model was then generated by analyzing the geometric information of the building to obtain the final generation result. The results revealed the different effects of the three quantitative indicators. As a pre-screening condition, the urban form control index narrowed the optional range of the search results. The block geometric shape descriptor provided an important basis for similarity retrieval, and the retrieval results varied according to morphological particularity and case richness. The block primary and secondary axes played a role in the process of direction matching, which can improve the efficiency of automatic direction searching. The research method used in this study presents a feasible technical strategy for the aspects of quantitative urban-form data mining, the application of database system, and case-retrieval-based generative design. This strategy provides a digital perspective for the transformation of index and form in the design of urban forms and provides support for decision-making around urban design.

KEY WORDS urban morphology; case-based reasoning; generative design; index and form; block scale

引言

形态设计作为城市设计工作中的核心工作,建立量(index)与形(form)的统一互动机制是其关键内容之一^[1]。在新城市科学的发展背景下,以数据为基础的形态特征分析与算法驱动的形态生成方法正在推动城市设计的范式变革和建筑学科的价值更新^[2, 3]。当前,由城市形态数据到量化指标的方法研究众多,但由量到形的策略探索则较为稀缺,也是一大研究难点。因此,立足于城市数据,建立数据驱动的形态生成设计框架,具有重要的研究意义。

案例推理(Case-Based Reasoning)是一种基于既有知识进行推理和问题求解的方法^[4],在城市设计工作中,为保证城市环境形象的和谐有序,对近似先例的解读与参照不可或缺^[5]。由城市形态“量”的分析而形成的参数、变量、几何约束等特征,是设计案例知识表示(knowledge representation)的途径之一^[6],通过对案例定量地表征与描述,使其便于检索并得以重用,进而由近似案例实现“形”的生成。在数字化时代,城市形态信息的广度和深度逐渐扩张,为基于案例推理的策略打下了数据基础;而数字技术在案例推理过程中的介入,使案例可被系统化地分析重组以适应新的目标^[7],为这一策略的实现提供了技术可行性。

研究基于案例推理,以组成城市空间基本平面单元的街区尺度^[8]为例,通过收集街区形态案例并进行特征提取、检索匹配、重组生成,探索数据驱动的形态生成设计方法,从而提出城市形态设计中“量”与“形”的转化策略以支持设计决策。

1 相关研究回顾

对城市形态而言,建立有效的案例检索与重用机制,是进一步将形态问题纳入案例推理工作过程中的前提。因此,如何对城市形态案例进行量化表述并查询检索,以及如何将数字技术应用于形态生成设计的过程中,是两个重要的相关研究主题。

1.1 城市形态特征量化与检索方法研究

国内外研究者针对街区、地块、聚落等中微观尺度的城市形态特征量化分析存在着大量探索,也有着不同的技术方法作为切入角度,例如基于空间指标统计的分析^[9]、基于几何形状特征的分析^[10, 11]、基于影像的分析等^[12]。该方面研究多以类型区分或案例比较作为研究结论,能够据此建立量化的评价标准或提出宏观的设计建议,这为城市形态相关的特征表述提供了较为丰富的策略参考。

部分研究者在此基础上更进一步,以大量数据作为基础,试图建立形态案例的检索机制。例如 Benjamin

Dillenburger 基于数据库原理,整合了建筑产权地块的形状信息和空间环境信息,提出了一种查询索引系统,简化了案例研究的过程^[13]。Cai Chenyi 等使用深度卷积神经网络对住宅区平面形态图像进行特征提取,并通过聚类分析和特征距离的计算,建立了形态相似样本的匹配推荐工作流^[14]。上述研究说明,从形态特征量化到案例检索匹配的研究方法具有可靠的技术依据,并能够更深入地挖掘特征量化数据背后的隐性价值。

1.2 城市形态生成方法研究

近年来,数字技术背景下的城市形态生成设计研究不断出现,其中,基于规则系统(Rule-Based System)框架下的生成策略得到了较多探索,例如L系统(L-System)的规则模拟^[15],基于几何规则的建模生成^[16]等等。而由于城市规划与设计的复杂性,基于案例系统(Case-Based System)的设计方法逐渐得到了讨论,旨在通过案例和数据的学习来解决规则系统中知识获取和黑箱操作的难题^[17, 18]。

例如 Daniel G. Aliaga 等提出了一个交互式城市形态布局系统,在基于几何规则生成道路和街区的基础上,使用真实的城市图像数据来合成新的布局^[19]。林博等建立了一个城市形态案例数据库,继而使用深度学习的手段生成路网和建筑空间布局,随后借助参数化建模软件进行三维体量生成^[20]。唐芃等借助案例学习的策略,探索了街区形态空间的相似性检索和优化算法,以罗马为数据来源和实验场地,提出了城市历史地段肌理织补与自动生成的方法^[21]。上述研究说明,在案例推理系统下进行城市形态生成设计,是一种可行且具有理论支持的研究思路。

以上两方面相关研究,分别对形态量化检索和形态生成设计方法进行了讨论,但二者之间仍然存在一定间隙。城市形态量化所得的数据,检索所得的案例,如何更加充分地应用于形态生成的工作流中,建立量到形的映射关系,是本研究值得关注的问题。

2 数据来源与研究方法

在案例推理的过程中,形态量化指标的选择与案例的筛选检索机制、匹配生成方法,以及数据源的解析挖掘相关。本研究以开源矢量地图 OpenStreetMap 作为街区案例的数据来源,选取三类量化指标进行案例属性的记录。

① 城市形态控制指标:以用地面积、建筑密度、容积率为代表的指标是控制性详细规划的重要内容,其数据可对街区案例的开发强度和形态控制提供筛选参考。

② 街区几何形状描述符:几何形状测度是城市形态

维度定量分析的主要方法之一^[22], 同时也在案例形态的比较上占据较大比重, 通过多种形状测度数据的计算可以为案例的相似检索提供依据。

③ 街区主次轴: 方向作为形态分析的一种补充, 在针对城市地块的相关研究中得到了论证^[23]。类似地, 在街区尺度的案例推理中, 通过主次轴的计算可使匹配案例与目标街区进行方向适配。

研究方法流程总体分为三个部分(图1): 首先采集并筛选街区尺度的形态数据, 建立形态案例库; 继而计算各案例的三类量化指标, 作为其特征属性记录于数据库中; 最后根据案例特征相似度的计算, 为目标街区进行案例匹配与三维体量生成的实验。整个工作流通过Java语言编程实现, 使用JTS Topology Suite作为主要几何处理库, PostgreSQL与数据库扩展PostGIS作为空间数据库管理系统(Spatial Database Management System)。

2.1 案例数据采集

OpenStreetMap(以下简称OSM)中存储的原始地理空间数据需要被提取、整理和筛选, 方可建立有效的案例数据库。由于OSM中并未对街区层级单元进行定义, 因此需从城市的原始地图数据中, 进一步解析和提取出街区数据和街区内部的建筑数据, 作为研究所需的案例单元。

(1) 街区数据。街区指街道围合而成的区域范围, 将OSM中标签为“highways”的路径数据¹⁾根据标签值分为R1、R2、S1、S2、S3五个类别^[24], 取中间的R2至S2作为街区的限定范围。使用JTS Topology Suite对道路网络做拓扑操作后得到路网定义的所有街区轮廓多边形, 继而以地理空间坐标定义的LineString²⁾格式存入数据库中, 作为基础单元^[25]。

(2) 建筑数据。将OSM中标签为“buildings”的路径数据处理为地理空间坐标定义的LineString, 并存入

数据库中。后续可通过PostGIS内置的几何查询语言, 直接索引到街区内部所包含的建筑。

OpenStreetMap中不同地区数据完整程度不一, 部分城市的形态数据存在缺失的情况, 因此, 考虑到形态典型且数据充足的需要, 研究选取了苏黎世、维也纳、巴黎、雅典、纽约、伦敦作为城市数据源进行采集³⁾。经过上述的提取流程后, 共计得到了52488个原始街区数据和1109345个原始建筑数据, 分别以街区数据表和建筑数据表的方式存储在服务器上的数据库中, 并支持相互索引。

街区数据表的信息包含ID、街区轮廓(geom)、所属城市(city_name)、内部建筑ID(building_ids); 建筑数据表的信息包含ID、建筑基底轮廓(geom)、建筑名称(name)、建筑类型(building_type)、三维信息(s3db)。通过记录在两个数据表中的信息, 可在后续进行提取和计算量化指标, 继而对表格进行填补更新, 以满足对数据的反复调用, 避免重复运算。

2.2 城市形态控制指标

街区案例库中的形态数据包含了街区轮廓几何信息, 建筑轮廓几何信息, 以及三维建筑信息, 由此可以对用地面积、建筑密度、容积率三项城市形态控制指标进行测算。其中, 用地面积可以通过将街区多边形的地理空间坐标等面积投影到二维后直接计算, 而建筑密度和容积率的计算涉及三维建筑信息, 需要对数据进一步处理。

OSM中的建筑三维信息以S3DB⁴⁾的数据模型进行存储, 其基本属性包含了“height”、“building:levels”、“roof:shape”、“min_height”等标签, 但并非每个建筑单体都有完整的三维属性描述, 因此, 在既有数据存在缺失的情况下, 为满足指标计算需要, 采取“筛选+估测”的方式来进行计算。“筛选”指将完全不包含三维建筑信息的街区案例进行剔除, 该类案例不符合本研究的数据需求; “估测”指对于部分包含三维建筑信息的街区案例进行处理, 根据同街区内三维信息完整的建筑数据, 使用其总体均值赋给三维信息空缺的部分建筑作为估计值。这一做法是数据条件参差不齐情况下的折中策略, 即尽可能地在数据质量和数量之间寻找平衡, 通过相似参照的方式应对数据缺失的问题。

数据清洗后, 共计剩余14103个有效街区案例可供后续处理, 且各案例内所有建筑均包含二维与三维信息, 即建筑轮廓及该轮廓的层数或高度范围。进而将轮廓多边形的地理空间坐标等面积投影后, 计算得到底层建筑面积和总建筑面积, 从而求得街区的建筑密度与容积率。

2.3 街区几何形状描述符

案例街区与目标街区几何形状的相似检索可被视作

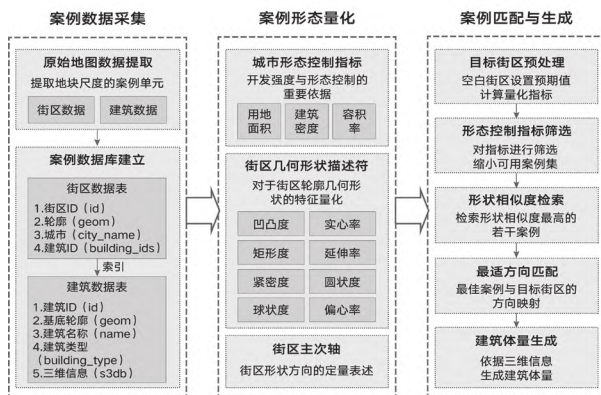


图1 研究方法流程

形状匹配 (Shape Matching) 问题, 基于形状几何特征进行相似匹配是一类典型的策略^[26]。形状特征的描述方法在经典几何理论、图像处理理论中已得到大量探索, 其中通过边界和区域信息来计算各项形状指标的方法对于简单形状较为适用^[27, 28], 且具备直观性、可解释性, 因此在城市街区轮廓的形状描述上具有一定应用价值。参考王晓峰等^[29]将面积、周长、凸包、包围盒等绝对值整合后得到的特征提取方式, 研究选取了凹凸比、实心率、矩形度等 8 项形状描述符, 以表示街区轮廓的几何形状特征 (表 1)。

上述 8 项描述符具有以下两个特点: (1) 均为非矢量数值, 具有平移不变性和旋转不变性, 这一点有助于在数据量有限的情况下, 可以检索到形态相似但方向不同的案例, 增加潜在匹配结果的数量; (2) 各项数值的范围均在 (0,1] 区间内, 可以保证各个描述符的单位统一, 不受取值范围导致的权重差别。

对于每个街区轮廓分别计算 8 项描述符后, 将各项

指标整合为 8 维向量 (图 2), 作为每个街区形状的特征向量 (feature vector), 并作为案例的属性之一预存储于数据库中, 以供后续调用。通过该特征向量, 可以对不同案例之间几何形状的相似程度进行量化比较, 并且便于计算机处理与统计分析。

2.4 街区主次轴

案例街区与目标街区的最适方向匹配, 对形态生成结果有重要影响。一般情况下, 案例与目标的方向匹配可以通过穷举的方法解决 (图 3): 将案例与目标街区几

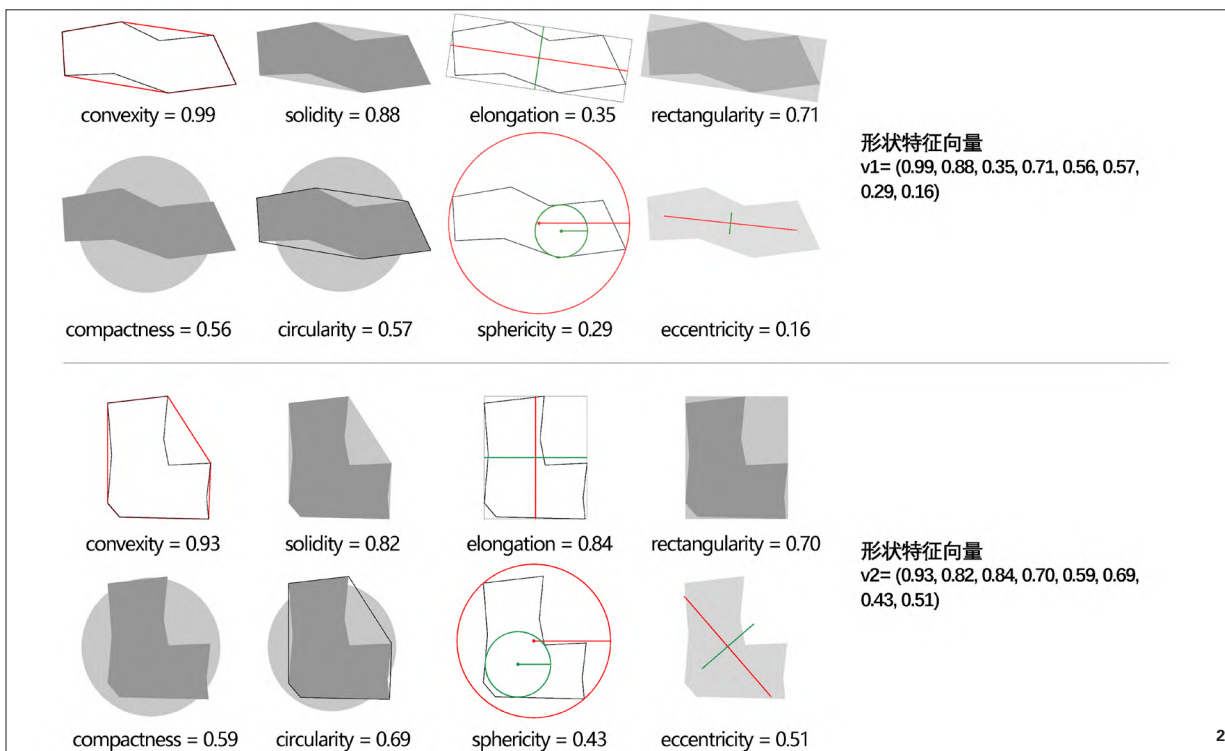
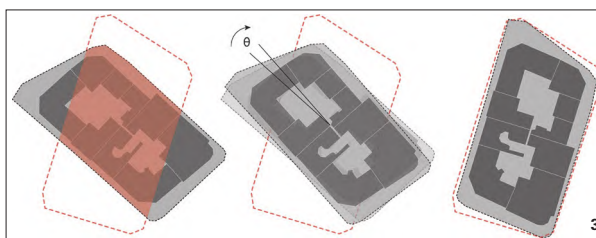


图 2 不同街区形状的描述符计算示意
图 3 穷举法寻找最适方向

表 1 各项形状描述符及说明

描述符	计算式	含义	说明
凹凸比	$convexity = \text{Perimeter} / (\text{Convex Perimeter})$	形状周长与凸包周长比值	反映街区形状与凸形的相对差异
实心率	$solidity = \text{Area} / (\text{Convex Area})$	形状面积与凸包面积比值	反映街区形状区域的实心程度 (相较于内部含洞情况)
矩形度	$rectangularity = \text{Area}_{\text{shape}} / \text{Area}_{\text{bounding-box}}$	形状面积与最小有向包围盒面积比值	反映街区形状与矩形的相对差异
延伸率	$elongation = \text{Width}_{\text{bounding-box}} / \text{Length}_{\text{bounding-box}}$	最小有向包围盒短边与长边比值	反映街区形状的延伸程度
球状性	$sphericity = 4\pi \times \text{Area} / \text{Convex Perimeter}^2$	形状面积和与凸包等周长圆形的面积比值	反映街区形状区域的整体规则程度
紧密度	$compactness = 4\pi \times \text{Area} / \text{Perimeter}^2$	形状面积与等周长圆形的面积比值	反映街区形状区域的局部规则程度
圆形度	$circularity = R_{\text{inscribed circle}} / R_{\text{excircle}}$	最大内切圆半径与最小外接圆半径比值	反映街区形状与圆形的相对差异
偏心率	$eccentricity = \text{AxisLength}_{\text{short}} / \text{AxisLength}_{\text{long}}$	形状短轴与长轴长度比值	反映街区形状的偏心程度

何中心点对齐, 以中心为锚点, 在每次迭代中将案例街区旋转一定角度 θ , 并计算案例与目标街区的形状交集, 选择交集面积最大时的旋转角度作为最适方向。 θ 的取值越小, 穷举的精度将越高, 得到的结果越贴近理想情况, 而计算时间则会增加。上述方法虽可作为理论上的最优解, 但计算量较大, 因此研究拟通过主次轴的计算预先记录街区的方向, 以轴的夹角作为旋转角度, 提高方向匹配的效率, 而穷举方法则可作为主次轴方向匹配后的补足手段。

主次轴的计算有两种常用方法: OBB法和PCA法(图4)。基于OBB的方法即使用最小有向包围盒(Oriented Bounding Box)的长边作为主轴(长轴)方向, 短边作为次轴(短轴)方向。这一方法对于街区一类几何形状相对规整的形态要素较为适用。基于PCA(Principle Components Analysis)的方法也是一种形状检索的常用方法^[30], 其在几何上表现为通过主成分分析将原样本点的坐标系变换为新的正交坐标系, 使新的坐标轴指向样本点散布最大的正交方向。

在使用PCA方法进行主次轴的计算中, 街区轮廓顶点的分布对计算结果有一定干扰。由于部分街区存在对形状影响较小但分布较为密集的顶点, 若直接使用原始顶点的X、Y坐标作为样本点, 则会导致计算结果与视觉

判断不相符的情况出现。因此, 将形状轮廓均匀等分, 由若干均分点作为PCA计算的样本点, 可以最大程度避免上述情况出现, 更标准地描述街区的形状方向(图5)。

为比较两种主次轴计算方法的效果, 进行了46个街区的对比测试(图6)。从整体上看, 两种方法计算得到的主次轴方向相对接近, 但其中部分街区的计算结果出现了差异。例如, 对于接近菱形的街区形状, OBB法计算的主次轴趋向于平行某一边线, 而PCA法计算的主次轴趋向于对角方向; 对于接近三角形的街区形状, OBB法计算的主次轴趋向于平行侧边, 而PCA法计算的主次轴趋向于指向三角形的尖角, 这种差异是由于两种方法的计算原理导致的。虽然PCA法在计算机图像处理领域比起OBB法更具通用性和复杂适应性, 但针对城市街区而言, 平行于轮廓边界的轴向往往更加符合城市肌理的形态特征, 因此选用OBB法计算街区主次轴。

3 生成实验与讨论

3.1 案例匹配生成工作流程

在案例采集和形态量化的基础上, 案例库中的各项数据得到了补足, 由此可以搭建起对于单个目标街区的案例匹配生成框架(图7), 并在后续多个街区的生成实验中依次应用, 流程分为5个步骤:

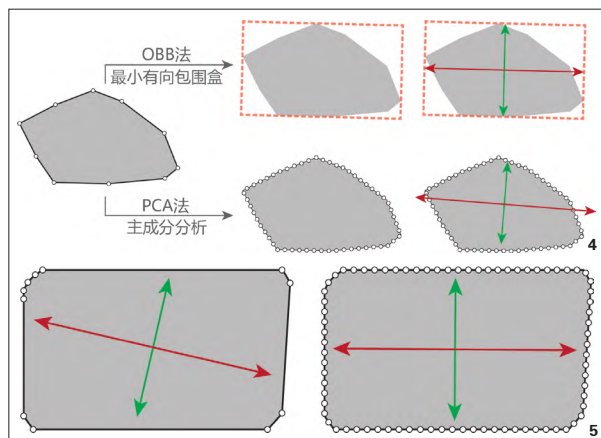
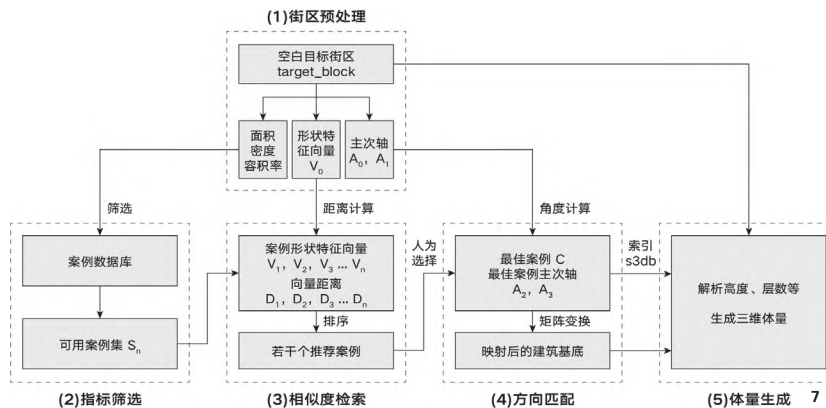


图4 OBB法与PCA法计算主次轴

图5 使用原顶点和均分点计算主次轴的结果对比

图7 匹配生成工作流程



(1) 目标街区预处理：对空白目标街区进行预处理，由设计师根据周边城市环境预设建筑密度和容积率的预期指标，并根据 2.3 节和 2.4 节中的方法计算形状特征向量 V_0 和主次轴 A_0, A_1 。

(2) 形态控制指标筛选：将目标街区的用地面积、建筑密度、容积率三项形态控制指标作为筛选条件，根据实际情况选择一定的浮动筛选范围，向数据库请求若干符合条件的案例，作为可用案例集 S_n 。

(3) 形状相似度检索：基于最近邻法^[31]，计算目标街区形状特征向量 V_0 与可用案例集 S_n 中各个案例形状特征向量 (V_1, V_2, \dots, V_n) 的欧几里得距离 (D_1, D_2, \dots, D_n) ，继而通过对距离值的排序，得到形状相似度最高的若干案例推荐，并根据与场地的实际适应情况，在推荐案例中人为选择一个结果作为最佳案例 C。

(4) 最适方向匹配：首先计算目标街区主次轴 A_0, A_1 与最佳案例 C 主次轴 A_2, A_3 的角度 θ ；随后通过平移、旋转、缩放的矩阵计算，对案例 C 各图元的坐标进行变换，将 C 与目标街区的中心点平移对齐，并旋转 θ 角度，进而将其全部图元进行缩放，缩放倍率为案例 C 与目标街区面积比；最后对于部分不满足重合度要求的案例，可

以再采取穷举方法对匹配方向补充优化。

(5) 建筑体量生成：根据最佳案例所存储的每栋建筑的 ID，从数据库的建筑数据表中索引对应的三维信息 (s3db)，继而将二维建筑轮廓生成为对应高度或层数的三维体量，并置于原目标街区中，从而完成建筑体量的生成。

3.2 生成结果与分析

生成实验选择了 2 个不同城市 (数据源城市之外) 作为测试场地，场地 1 位于德国汉堡，场地 2 位于意大利普拉托。在 2 个场地中共选取 8 个尺度形状各异的街区，删除内部原有建筑后作为实验的目标街区。该实验旨在模拟城市更新过程中，对部分地段的拆除与重新设计，两个测试场地所使用的案例库和匹配生成算法均相同。

根据筛选与相似度检索的算法框架，每个目标街区可分别得到若干个匹配案例以供决策。本实验根据相似度检索中向量距离的排序，截取了前 8 个案例，随后可由设计者对场地情况进行评估，例如考虑肌理连续、密度相近、形状相似等不同需求，从中人为选择一个案例 (图 8)，经过方向匹配与体量生成环节得到最终结果 (图 9)。整体而言，8 个目标街区与其检索结果表现出一定的形态



图 9 两个测试场地的生成结果

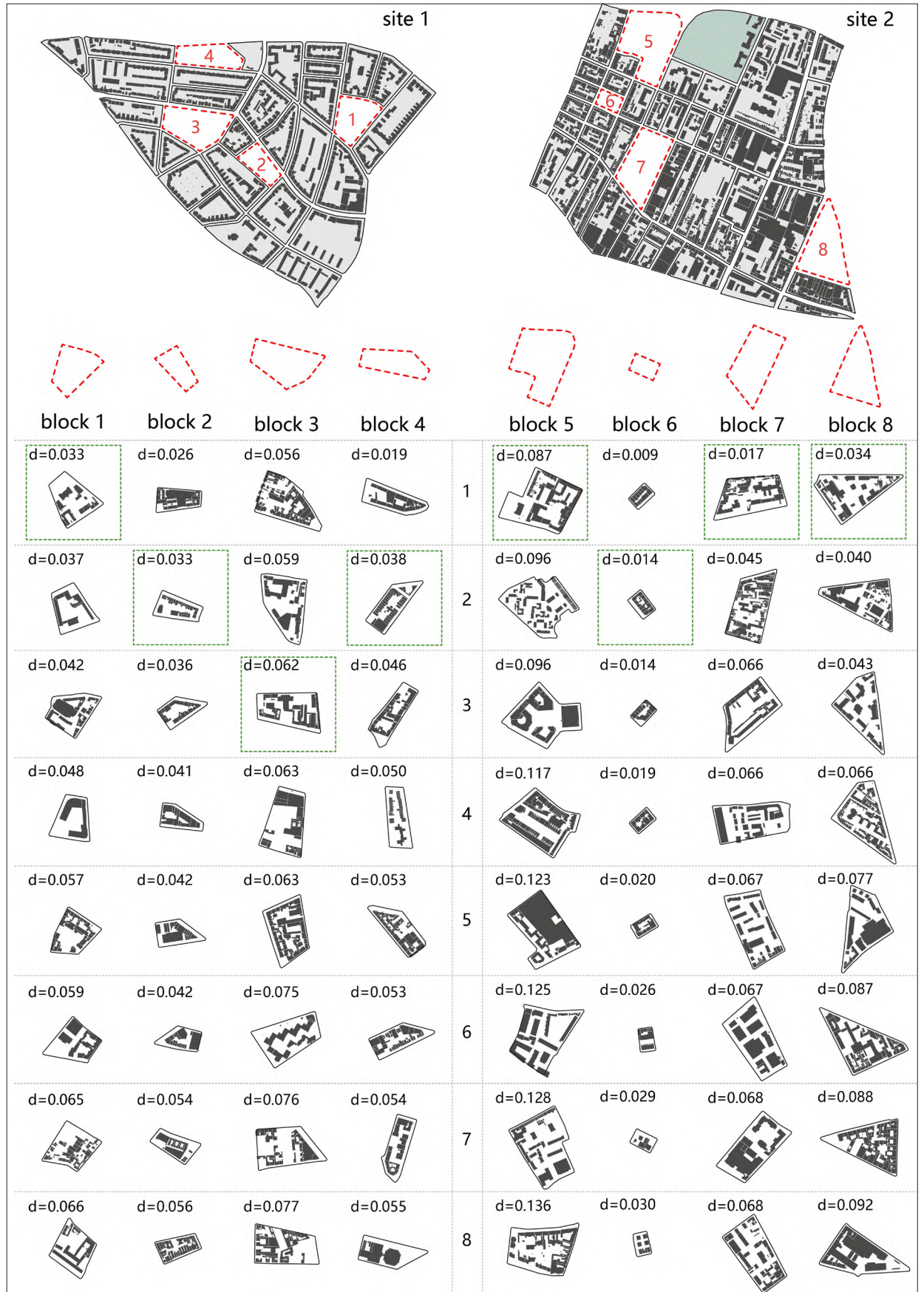


图 8 目标街区前 8 个检索结果及人为选择的最佳案例

相似性，生成结果与周边肌理产生了一定的契合度。三类指标在实验过程中则产生不同影响。

(1) 城市形态控制指标作为请求数据时的预先筛选条件，能够避免检索结果与周边城市环境相差过大，但由于数据量的限制，指标筛选范围往往需要不同程度的外扩，从而保留更多的案例可供匹配。

(2) 街区几何形状描述符组成的形状特征向量是相似度检索的重要依据，而由于形态特殊性和案例丰富度的不同，检索结果表现出差异。例如 1、2、4、6、7 号街区，其与 8 个匹配案例的特征距离值整体相对较小，说明该类街区拥有更多相似肌理的案例可供检索，后续的生成结果也表现出更高适应性；而 5 号街区由于形状较为特殊，案例库中与其高度近似的街区较为稀缺，因此 8 个匹配结果虽然在形态趋势上有所相似，但特征距离值仍然较大，需要设计者在选择最佳案例时进行更多考量，以得到相对可取的生成结果；3、8 号街区的异形程度、近似案例数量相对适中，因此整体特征距离以及生成效果亦相对适中。

(3) 街区主次轴的计算在最佳案例与目标街区的方向匹配过程中发挥作用。为直观显示其影响，研究以匹配重合区域与目标街区的面积比值作为重合度，对 8 个目标街区进行了计算。其中，根据主次轴初次匹配的重合度大小，选择了 1、3、5、8 号街区进行穷举优化，并计算了最终重合度（表 2）；作为对比，另对 8 个街区单独使用穷举方法进行方向匹配并计算重合度（表 3）。结果显示，主次轴的计算在多数情况下可直接得到最适匹配方向，而穷举优化后重合度提升较大的 8 号三角形街区，其自身与匹配案例均存在较为主导的长斜边，斜边位置、长度的微小改变对于 OBB 法计算主次轴有较大影响，故更需搭配穷举方法进行方向优化。

3.3 研究方法讨论

本文提出的研究方法在城市形态案例匹配与生成方面提供了一种可行的技术策略，主要体现在以下几点。

第一，在城市形态案例量化的基础上对数据的进一步挖掘进行了探索。不同于直观的三维模型或二维图像，

研究通过形态控制指标、形状描述符、主次轴的计算，将形态案例数据化，并且在此基础上继续搭建了匹配与生成的算法框架。这一研究思路在大量由形到量的既有研究基础上，探索了由量到形的转化策略。

第二，数据库系统的应用为形态案例库的使用提供了便利。根据形态量化数据所搭建起的数据库，不仅支持对案例数据的预存储从而实现反复调用，同时也能够在数据量庞大的情况下提供快速的统计操作，例如指标的筛选、排序等。此外，搭建在服务器上的数据库也为数据的跨平台调用以及多人协作提供了可能。

第三，研究方法提供了一个可扩展的形态案例检索与生成设计思路。研究的核心策略是由多维度量化指标的相似性检索进行案例匹配，并在匹配的基础上以变换映射的方式试图实现形态的生成设计。通过案例库中量化指标的类型化和针对化，这一方法同样适合扩大到更具体的应用场景，例如针对历史风貌地段，针对新城开发地段，或是针对某种建筑类型，均可以通过特定的指标计算与案例库的建立，实现基于案例的生成设计。

研究总体而言存在三点待完善之处：(1) 案例匹配的特征描述和应用范围有待拓宽。城市形态生成由多种复杂因素共同决定，本研究选择的三类形态量化指标对于异形地块、街墙肌理、建筑朝向等特殊情况识别不足，仅在形状相对规整、肌理相对均匀的街区案例中表现出较好的应用价值。后续应进一步探索更加精确的特征提取方法，以及结合例如拓扑分析、图像分析等针对建筑肌理与朝向的量化手段，构建更完善的案例特征描述。

(2) 案例库仍可进一步扩充和定制。一般而言，案例库的扩大可以囊括更多样本，在相似检索方面拥有更多的选择；此外，宜针对不同的街区属性对案例库进行定制，例如按照功能类型、肌理特征进行区分等，使案例库内的数据具有共同特征，由此可更针对性地应对一类街区的匹配生成问题。(3) 案例重用的生成策略需继续完善。目前的策略是将匹配案例向目标街区进行直接映射，后续研究宜进一步增加适应性的生成策略，例如提取拓扑与几何规则等，实现更具创新的形态生成。

表 2 最佳案例方向匹配重合度结果

	block 1	block 2	block 3	block 4	block 5	block 6	block 7	block 8
主次轴匹配重合度	0.918	0.982	0.917	0.928	0.901	0.989	0.926	0.894
是否进行穷举优化	是	否	是	否	是	否	否	是
最终重合度	0.933	0.982	0.917	0.928	0.901	0.989	0.926	0.941

表 3 仅使用穷举方法的重合度结果

	block 1	block 2	block 3	block 4	block 5	block 6	block 7	block 8
穷举方法重合度	0.933	0.983	0.917	0.928	0.901	0.989	0.928	0.941

4 结语与展望

研究基于案例推理的方法,以街区尺度的形态设计为研究对象,借助开源地图数据建立了街区形态案例库,并通过形态控制指标筛选、形状相似度检索和主次轴方向匹配,搭建了案例匹配与生成设计框架。研究策略可以为城市形态设计中量与形的转化问题提供数字化视角的技术思路,并为城市设计决策提供支持。

在大数据和人工智能高速发展的当下,城市形态量化与自动生成不仅成为研究热点方向之一,也为设计实践提供了更多方法和思维上的更新,从设计原型上帮助建筑师更好地发挥决策性作用^[32]。研究从案例推理的角度为该方向提供了策略上借鉴意义,但同时也在技术探索和应用范围上表现出一定的局限性,需要在后续研究中进一步予以解决,同时也仰赖城市数据的逐步扩张与完善。在可以预期的未来,随着运算化设计方法的深入探索,城市形态的生成设计也将拥有更广阔的发展空间。■

图、表来源

文中所有图、表均为作者绘制或编写程序生成。

注释

1) OpenStreetMap 中的基本数据结构分为三类:节点(node)、路径(way)、关系(relation),其中路径数据用于表示地面上的线状特征。详见 <https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Way>。

2) LineString 是 OpenGIS Simple Features Specification For SQL 中定义的几何图元类型,表示点之间为线性插值的曲线。详见 https://portal.ogc.org/files/?artifact_id=829。

3) OSM 中欧洲及北美地区的数据量远超其他大洲,为保证本研究方法的运行,因此从欧美地区选择城市作为数据源。后文的实验场地选择同样延续了这一考虑。

4) S3DB(Simple3DBuildings) 是 OpenStreetMap 中记录简单 3D 建筑的数据模型。详见 <https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Simple3DBuildingsV1>

参考文献

- [1] 韩冬青. 城市形态学在城市设计中的地位与作用[J]. 建筑师, 2014(4):35-38.
HAN Dongqing. The Meaning of Urban Morphology in the Urban Design[J]. The Architect, 2014(4):35-38.
- [2] 叶宇, 黄镛, 张灵珠. 量化城市形态学: 涌现、概念及城市设计响应[J]. 时代建筑, 2021(1):34-43.
YE Yu, HUANG Rong, ZHANG Lingzhu. Quantitative Urban Morphology: Emergence, Conceptualization and Design's Response[J]. Time + Architecture, 2021(01):34-43.
- [3] 李颺, 张佳石, 卢德格尔·霍夫施塔特, 等. 算法模型解析设计黑箱[J]. 建筑师, 2019(1):94-99.
LI Biao, ZHANG Jiashi, Ludger Hovestadt, et al. Analyzing the Black Box of Design with Algorithm Model[J]. The

Architect, 2019(1):94-99.

[4] Slade S. Case-based reasoning: A research paradigm[J]. AI magazine, 1991, 12(1): 42-55.

[5] 张愚, 王建国. 城市高度形态的相似参照逻辑与模拟[J]. 新建筑, 2016(6):48-52.

ZHANG Yu, WANG Jianguo. The Similarity Reference Logic of Urban Vertical Form and Its Simulation[J]. New Architecture, 2016(6):48-52.

[6] Maher M L, de Silva Garza A G. Case-based reasoning in design[J]. IEEE Expert, 1997, 12(2):34-41.

[7] Hua H. A case-based design with 3D mesh models of architecture[J]. Computer-Aided Design, 2014, 57:54-60.

[8] 顾大治, 蔚丹. 城市更新视角下的社区规划建设——国外街区制的实践与启示[J]. 现代城市研究, 2017(8):121-129.

GU Dazhi, WEI Dan. Community Building under the Perspective of Urban Renewal: Inspiration from the Development of Foreign-made Blocks[J]. Modern Urban Research, 2017(8):121-129.

[9] 庄宇, 周玲娟. 上海中心城街区形态及其密度指标的量化研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(8):1090-1099.

ZHUANG Yu, ZHOU Lingjuan. Quantitative Research of Urban Form and Density Index of Central City Block in Shanghai[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2019, 47(8):1090-1099.

[10] 浦欣成. 传统乡村聚落二维平面整体形态的量化方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.

PU Xincheng. Quantitative Research on the Integrated Form of the Two-dimensional Plan to Traditional Rural Settlement[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.

[11] 李彦潼, 朱雅琴, 周游, 等. 基于分形理论下村落空间形态特征量化研究——以南宁市村落为例[J]. 南方建筑, 2020(5):64-69.

LI Yantong, ZHU Yaqin, ZHOU You, et al. Quantitative Study of the Spatial Morphological Characteristics of Villages Based on Fractal Theory: Nanning Village as an Example[J]. South Architecture, 2020(5):64-69.

[12] 吴绍彦. 基于影像的城市街道空间形态量化分析研究[D]. 南京: 南京大学, 2014.

WU Zouyan. An Image-based Quantitative Analysis of Street Spatial Configuration[D]. Nanjing: Nanjing University, 2014.

[13] Dillenburger B. Space Index: A retrieval system for building-plots[A]// Future cities: 28th eCAADe Conference Proceedings[C]. Zurich: ETH Zurich(Switzerland), 2010: 893-899.

[14] Cai C, Guo Z, Zhang B, et al. Urban Morphological Feature Extraction and Multi-Dimensional Similarity

- Analysis Based on Deep Learning Approaches[J]. Sustainability, 2021, 13(12): 6859.
- [15] Parish Y I H, Müller P. Procedural modeling of cities[A]//Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques[C]. 2001: 301-308.
- [16] Wilson L, Danforth J, Davila C C, et al. How to generate a thousand master plans:a framework for computational urban design[A].2019 Proceedings of the Symposium on Simulation for Architecture and Urban Design[C],2019:113-119.
- [17] Yeh A G O, Shi X. Applying case-based reasoning to urban planning: a new planning-support system tool[J]. Environment and Planning B: Planning and Design, 1999, 26(1): 101-115.
- [18] 黎夏, 刘小平. 基于案例推理的元胞自动机及大区域城市演变模拟 [J]. 地理学报, 2007(10):1097-1109.
- LI Xia, LIU Xiaoping. Case-based Cellular Automaton for Simulating Urban Development in a Large Complex Region[J]. Acta Geographica Sinica, 2007(10):1097-1109.
- [19] Aliaga D G, Vanegas C A, Benes B. Interactive example-based urban layout synthesis[J]. ACM transactions on graphics (TOG), 2008, 27(5): 1-10.
- [20] 林博, 刁荣丹, 吴依婉. 基于人工智能的城市空间生成设计框架——以温州市中央绿轴北延段为例 [J]. 规划师, 2019, 35(17):44-50.
- LIN Bo, DIAO Rongdan, WU Yiwan. Urban Space Generative Design Based on Artificial Intelligence: Northern Extension of Central Green Axis, Wenzhou[J]. Planners, 2019, 35(17):44-50.
- [21] 唐芑, 李鸿渐, 王笑, 等. 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 火车站周边街区城市更新设计为例 [J]. 建筑师, 2019(1):100-105.
- TANG Peng, LI Hongjian, WANG Xiao, et al. 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[J]. The Architect, 2019(1):100-105.
- [22] 牛强, 鄢金明, 夏源. 城市设计定量分析方法研究概述 [J]. 国际城市规划, 2017, 32(6):61-68.
- NIU Qiang, YAN Jinming, XIA Yuan. An Overview of the Quantitative Analysis Methods in Urban Design[J]. Urban Planning International, 2017, 32(6):61-68.
- [23] 龙瀛, 沈振江, 毛其智. 地块方向: 表征城市形态的新指标 [J]. 规划师, 2010, 26(4):25-29.
- LONG Ying, SHEN Zhenjiang, MAO Qizhi. Parcel Direction: A New Index of Measuring Urban Form[J]. Planners, 2010, 26(4):25-29.
- [24] Beirão J N, Montenegro N, Gil J, et al. The city as a street system: A street description for acity ontology[A]//Proceedings of the 13th Congress of the Iberoamerican Society of Digital Graphics[C]. 2009:132-134.
- [25] Mo Y, Li B, Wu J, et al. Archibase: A City-Scale Spatial Database for Architectural Research[A]// Proceedings of the 26th CAADRIA Conference: Volume 2[C]. Hong Kong: The Chinese University of Hong Kong and Online, 2021: 519-528.
- [26] 丁险峰, 吴洪, 张宏江, 等. 形状匹配综述 [J]. 自动化学报, 2001(5):678-694.
- DING Xianfeng, WU Hong, ZHANG Hongjiang, et al. Review on Shape Matching[J]. Acta Automatica Sinica, 2001(5):678-694.
- [27] Wirth M A. Shape Analysis & Measurement[EB/OL]. (2004-06-05) [2021-10-14]. <http://www.cyto.purdue.edu/cdroms/micro2/content/education/wirth10.pdf>
- [28] Sonka M, Hlavac V, Boyle R. Image processing, analysis, and machine vision[M]. Stamford, CT: Cengage Learning, 2014:.
- [29] 王晓峰, 黄德双, 杜吉祥, 等. 叶片图像特征提取与识别技术的研究 [J]. 计算机工程与应用, 2006(3):190-193.
- WANG Xiaofeng, HUANG Deshuang, DU Jixiang, et al. Feature Extraction and Recognition for Leaf Images[J]. Computer Engineering and Applications, 2006(3):190-193.
- [30] Wang B, Bangham J A. PCA based shape descriptors for shape retrieval and the evaluations[C]//2006 International Conference on Computational Intelligence and Security. IEEE, 2006, 2: 1401-1406.
- [31] 罗忠良, 王克运, 康仁科, 等. 基于案例推理系统中案例检索算法的探索 [J]. 计算机工程与应用, 2005(25):230-232.
- LUO Zhongliang, WANG Keyun, KANG Renke, et al. Study on a Case Retrieval Algorithm in Case-based Reasoning System[J]. Computer Engineering and Applications, 2005(25):230-232.
- [32] 孙澄宇, 罗启明, 宋小冬, 等. 面向实践的城市三维模型自动生成方法——以北海市强度分区规划为例 [J]. 建筑学报, 2017(8):77-81.
- SUN Chengyu, LUO Qiming, SONG Xiaodong, et al. A Practical Approach to Generating 3D City Models A Case Study of the Density Zoning Project in Beihai[J]. Architectural Journal, 2017(8):77-81.