

人工智能与现代城市规划互补的新思考

单珊

摘要: 人工智能是我们时代最重要的通用技术。它正在改变着城市组织结构,改变着规划师们获取信息的方式和行业格局,并影响着规划决策。如何在城市规划背景下认识人工智能,运用好人工智能,将规划经验和人工智能学习充分结合,是本文的关注点。以往的文章多集中在人工智辅助城市规划的单向度思考,并未深入考虑二者的互动补充。本文客观分析了现阶段城市规划的瓶颈,以及人工智能的优点及局限性。通过借鉴国内外学者的研究成果,构建了人工智能与城市规划循环互补的系统框架,即在遵循自然环境、人居环境、人的三大规划原则前提下,形成现代规划自上而下的基本思想和人工智能自下而上的反馈机制的互动整合。本文核心观点是,人工智能的优势可以弥补现代规划的局限性,在公众参与度、复杂模型精准度和实际应用中更好地提供实时反馈信息,同时现代规划也为人工智能提供充足的学习素材和数据支撑,从而形成对包含民生环保、公共安全、城市服务、经济商业活动在内的多种需求的积极反馈,真正实现智慧化城市的良性管理模式,创建人类更加美好宜居的城市生活。

关键词: 人工智能, 城市规划, 互补

Artificia: intelligence is the most important general technology in our time. It is changing the organizational structure of cities, changing how planners obtain information, changing the industry landscape, and influencing planning decisions. How to recognize artificial intelligence in the context of urban planning, use artificial intelligence, and fully integrate planning experience with artificial intelligence learning is the focus of this paper. Previous articles have emphasized on the one-way thinking of artificial intelligence-assisted urban planning, and have not considered the interactive complement of the two. Based on the problems and limitations of modern planning, combined with the advantages and limitations of artificial intelligence planning, this paper constructs a framework of artificial intelligence and urban planning interaction by referring to the research results of domestic and foreign scholars, that is, under the three major planning principles of natural environment, human settlements, and people, a complementary integration of the modern top-down planning and the bottom-up feedback mechanism of artificial intelligence is formed. The viewpoint of this paper is that the advantages of artificial intelligence can make up the limitations of modern planning, and provide real-time feedback information in public participation, complex model accuracy, and practical applications, while modern planning provides sufficient learning for artificial intelligence. The material and data foundation form a timely response to various needs including people's livelihood environmental protection, public safety, civil services, and economic and commercial activities, truly realize the benign urban intelligent management mode, and create a smart and livable city for human beings.

Keywords: artificial intelligence, urban planning, complementarity

1 问题提出

技术革新是驱动城市规划理论和实践发展的最强推动力。技术改变了建筑师、规划师关注的研究对象,改变了社会组织架构,改变了人与人的互动方式。我们这个时代最重要的创

新技术是人工智能,它正在改变着我们获取信息的方式和行业格局,影响着规划决策。自1956年约翰·麦卡锡(John McCarthy)^[49]提出了人工智能一词以来,目前人工智能的展现形态多是机器学习^[23],即让机器逐渐具备可以不断自我提高学习的性能。2017年人工智迎来第三次热潮,世界各国纷纷将人工智能作为国家战略,政府和企业将人工智能作为重要领域大力投资。同年7月国务院印发了《新一代人工智能发展规划》,成为我国发展人工智能的国家级远景规划;其中强调了智能社会、智慧城市的新格局^[6],布局了未来人工智能的重点突破方向。

在现代城市规划中空间开发和城市功能布局是重点,如今空间的高效利用和空间品质是城市可继续发展、幸福宜居的关键。这要求我们规划师理解人工智能、善用人工智能,深度思考人工智能和城市规划的互补关系,在城市规划设计成果上导入人工智能,发挥人工智能优势,顺应人工智能发展的潮流,弥补现代规划的不足,创建城市规划的智慧系统。

这里的关键问题是:如何在现代规划的背景下定人工智能?如何在综合复杂的城市决策中应用人工智能?人工智能可以解决哪些现代规划中的瓶颈,又存在哪些自身的局限性?人工智能可否帮助我们精准理解城市系统总体和城市系统子集的关系,以及规划整体和单元区块之间的联系?我们是否可以构建一个城市规划体系,让人工智能与现代规划实现互动,取长补短?

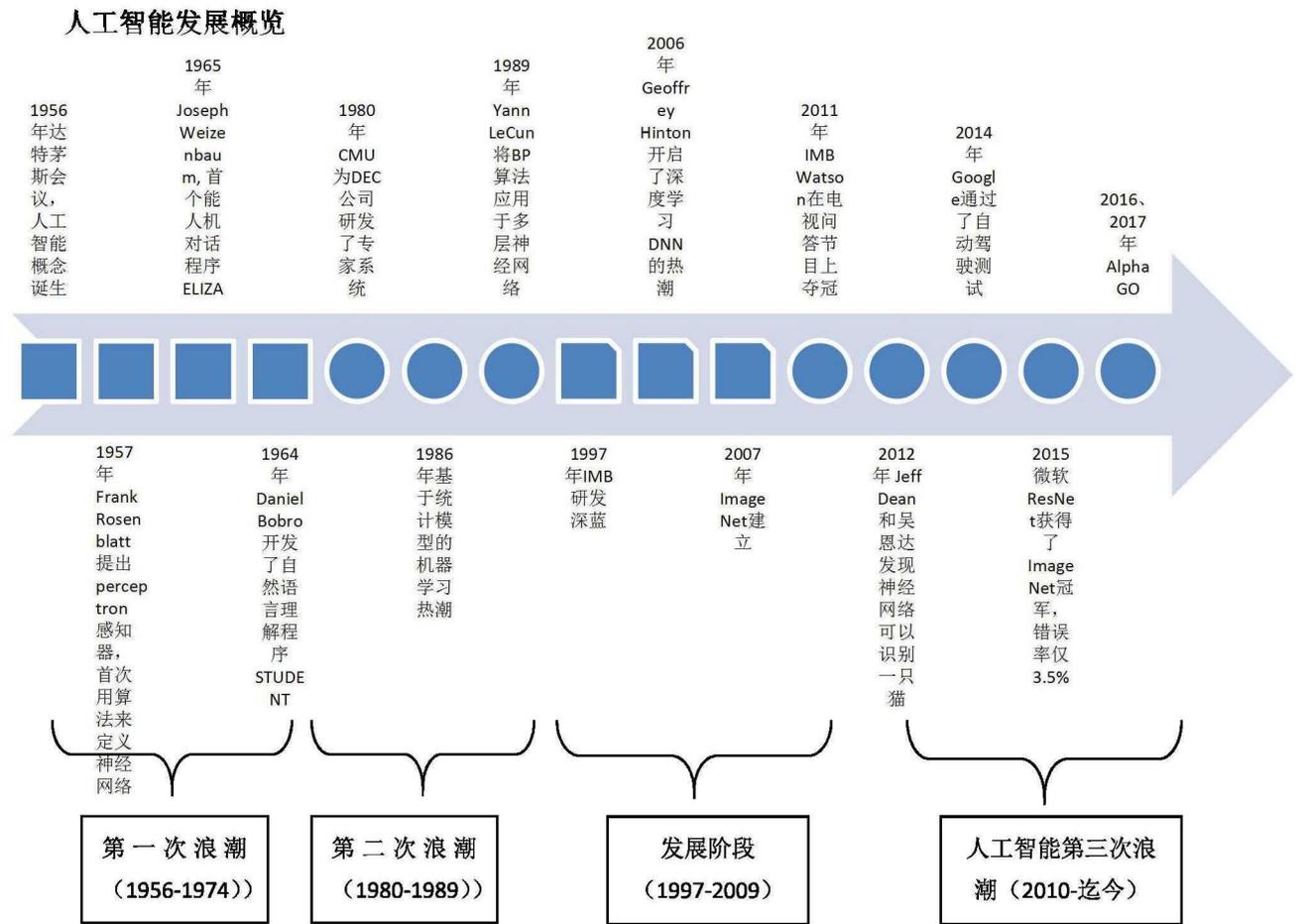
2 人工智能和城市规划互补分析

2.1 现代规划驱动下的人工智能

人工智能(AI)的变革有三个驱动力:1)大数据,为人工智能提供了训练数据;2)计算机算力和机器学习算法的重大突破,提高了人工智能模型的运算速度和精准度;3)物联网和大数据的推广,提供了技术保障,提升了深度算法的性能,使人工智能的影响力超越技术层面,渗透到社会生活的方方面面^{[2][6][8][11][8][1][8]}。1956年麦卡锡首次提出人工智能一词,并定义了“强人工智能”,即“制造机器模仿学习的各个方面或智能的各个特征,使机器能够读懂语言,形成抽象思维,解决人类目前的各种问题,并且自我完善”^{[49][23]}。今天大多数的人工智能,是“机器学习”(ML),它是一个算法范畴,来自统计学、计算机科学等多学科融合,用算法来处理数据、做出预测并帮助决策;它属于“弱人工智能”的定义^[11],即机器处理特定的问题包括视觉处理,语言识别,自然语言处理,不需要完全具备人类思考的能力。弱人工智能是目前的人工智能的发展阶段,强人工智能仍然是一个未真正突破的目标。所以本文探讨的人工智能是具有实际应用意义的弱人工智能。

在过去50年间,国外城市规划已经从传统的、线性的调研分析规划模式转变为更加综合、多功能、交融的体系研究中取得了很大的成绩。社会更加强调创建宜居、智能城市的模式,关注自下而上的公民参与的城市社会治理理念,相应的城市规划模型也由20世纪20年代起的自上而下,中心控制的方式转型到自下而上,去中心化,多方参与的城市规划模式;

人工智能模型例如 CA 模型，ABM 模型等应运而生（见图 1）。

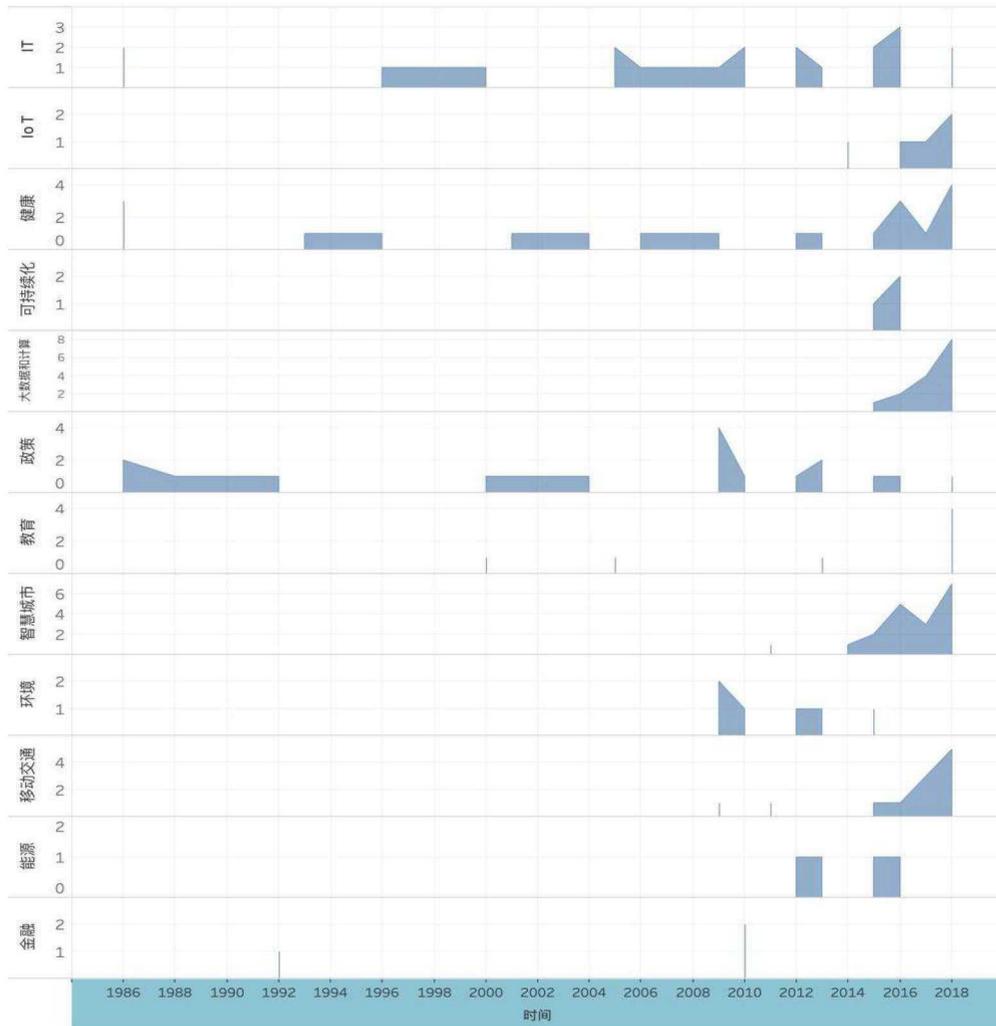


数据来源: AITopics^[16], Perez, et al. 2017^[48]

图 1 人工智能、城市形态、城市规划范式及城市规划模型的相应发展

2.2 人工智能和规划主题分析

本文根据 Allam & Dhunny (2019)^[18] 的数据，重新统计分析后，发现如下人工智能 (AI) 和城市规划研究主题的规律：人工智能和城市规划（智能城市）文献主题自 1984-2019 年共计 12 类，包含 IT，金融，移动交通，大数据和计算，环境，智慧城市，教育，政策等。其中 1986-1992 年的文献主要集中在人工智能与政治政策的互动研究，自 1996 起 IT 和人工智能的相关研究多次成为研究主流，人工智能和城市健康的主题自 1993 年起也一直备受关注，智慧城市、移动交通、大数据和人工智能的研究自 2014 年愈来愈热（见图 2）。这些反映出人工智能在城市规划中应用的多元化。社会更加关注如何将人工智能技术和城市结合起来^[28]，让政策制定者、数据科学家和规划师多方位合作，加强人工智能和 IT、大数据、城市政策等的整合，激活智能城市，实现城市智慧规划、管理和运行，增进城市的宜居性和创造力^[53]。



数据来源：Allam & Dhunny, 2019:85

图 2 人工智能和城市规划文献主题分析

2.3 人工智能和城市规划理论实践

从理论研究角度分析,目前国内的人工智能在理论上已渐成雏形。专家学者对于人工智能和城市规划的互动持有客观的看法:一方面,人工智能目前的发展限定在特定的领域和任务中,无法完全替代人类思考和决策;另一方面,城市发展的不确定性和复杂性,需要人工智能辅助提供决策,使城市更智能、宜居、有活力。例如,吴志强院士提出人工智能辅助城市规划的理念,以及新一代人工智能的三步走战略,提倡用人工智能来把握城市规律,实现人机共智的城市规划运作模式^{[6][2]}。国外的人工智能的理论和研究主要源于智慧城市中人工智能的应用,由物联网(IoT)及其产生的大数据推动发展。较具影响力的是英国皇家科学院院士 Michael Batty 的城市规划“复杂系统理论”,其中强调了 ABM 等人工智能模型在城市规划信息系统及政策制定中的重要性^{[20][21][22]}。

从技术层面看,国内外专家学者认同城市是一个影响因素繁多,内部关系复杂的系统。如何挖掘城市规划变量之间的交互关系,在大规模范围内对众多变量进行系统建模,获取高质量数据支持,优化规划流程,实现最优选址,是大家关注的主要问题。具体而言,1)在模拟预测城市规模增长趋势以及城市系统仿真方面,Rienow et al. (2013)^[60]将元胞自动机模型CA SLEUTH 和MAS ReHoSh模型结合互补,进行时空动态功能和区域土地利用的拓展功能分析,将人工智能算法与SVMS的学习算法相结合来优化仿真能力,实时、校准、验证和预测区域土地的覆盖模式和城市扩张的规律性;用CA、ABM、MSM模型实现精细化城市模拟(龙瀛,2014)^[5];2)在自动化控制方面,针对人工智能系统和SCADA数据采集与监视控制系统的结合展开研究^[46];同时依据全球导航卫星系统(GNSS)^{[52][43]}、飞行器传感器和数据处理器,对自动驾驶汽车融入城市规划轨道系统做出了探讨(Pelton et al. 2019)^[47];并基于SVM-Kalman滤波动态模型,提高公交车行程时间预测精准度(柏丛、彭仲仁,2015)^[1];3)在参与式规划方面,学者们不断地探究拓展多主体模型,利用已有资源确立发展目标,并在实施过程中不断更新监测和评估模型,不断界定新的问题、新的发展目标和新的发展活动,循环迭代找到规律,提供最优方案^[42];4)在城市活动时空维度方面,在实现大规模收集、统一、分类和验证人群日常活动行为数据(POI)的基础上,用TimeGeo的框架结合空间R-EPR模型,模拟人们日常活动行为和土地利用,实现智能化选址(Jiang et. al)^{[33]-[37]};5)在城市公共安全规划方面,人机协同的成果显著。例如 Muhammad (2014)等人提出的AIDR人工智能灾难响应机制^[31],基于社交大数据挖掘进行城市灾害系统构建,助力社会预警防灾;6)在智慧城市方面,Google和IBM的专家强调了城市系统内部的关联性,强调了数据资源对人工智能、智慧城市的重要性,努力探索集成资源的信息平台^[45]。以上这些研究和应用成果,探究了人工智能与城市互动的技术背景、应用思路和发展前景,为人工智能在城市规划中的研究探索具有重要借鉴意义。

3 规划理论及模型局限性

现代规划在理论、范式、方法论、技术应用方面存在着局限性。本文认为局限性集中体现在如下四个方面：

首先，规划政策实施和民众意愿平衡。尽管自下而上的规划模式更利于公众参与、社区发展、城市可持续规划，但是如何解决好客观的用地和基础设施需求与自由的公众意愿的平衡，仍存在着挑战。正如 Crooks 等（2008）^[24]提出，去中心化的自下而上模式不仅在创新成本和模型计算成本上高昂，而且众口难调的个人主义规划意向与客观地域条件、技术条件准绳下的规划方案很难调和。这种案例很常见，2018 年笔者在波士顿大学留学生活期间，所居住的 Western Ave 哈佛大学社区听证会几乎每几个星期就要发布一次居民社区规划会议。邀请社区居民以及工作人员谈论 Allston 和 Brighton 规划与发展以及即将建立的新社区和校园。为平衡政府、投资商、居民等多方面意愿，有时一个小的街道天桥的修补工作讨论就要耗时整一年时间。这个小社区是西方国家规划意图的社会缩影，真实地反映了自下而上的范式和实际高效操作之间实现两全其美的难度。

其次，复杂模型和复杂城市系统平衡。本文认为，复杂的模型并不能完全精准地模拟出城市的发展，也并不利于城市规律的解读。模型复杂多是因为它的模拟过程复杂，而并不是它的假设和结构。在应用统计学上，模型的灵活度 (flexibility 图 3 横轴) 和模型的可解读性 (interpretability 图 3 纵轴) 难以两全，越灵活、复杂的模型例如 SVM 及 Boosting，现实中的解释程度就越低。正如 Lee Jr, D.B. (1994)^[41]所分析，在大规模城市规划中建立模型时，规划战略、政策和规划的解读意义会出现顾此失彼 (trade off) 的现象，即战略上越是宏观高端 (图 4 横轴 Time Horizon of Decision)，细节呈现则越少 (图 4 纵轴 Detail)，群众参与度 (participatory line) 和可操作性 (implementation) 就越下降。

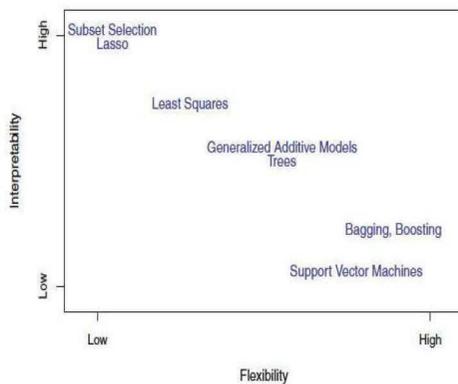


图 3^[32] 模型解释度和灵活度

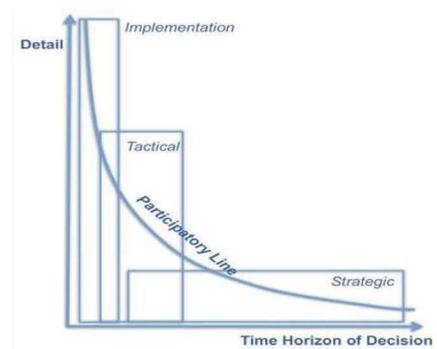


图 4^[41] 规划战略实施和群众参与度

再次，规划模型和实际需求平衡。本文认为，实际规划中需要什么样的模型和模型的复杂程度并不直接相关。过于复杂的模型一方面需要很大的运算成本，另一方面它自身很容

易脱离现实背景 (context) 成为黑匣子 (black box)，然而在实际决策中成效并不显著。2013 年我在纽约联合国总部全球地理信息系统专家委员会 UN-GGIM 实习时，作为 GIS 专家助理有幸一睹了美国纽约城市的紧急监控中心。工作人员们对城市进行着实时的监控，但是背后并不是复杂的建模，而是以事实数据、统计描述和观测为主。其实如果将实时高质量数据可视化，通过常见的描述性统计模型就能反映出趋势 (pattern)，总结出规律，很好地服务于城市规划和社会需求，而并非一些复杂、冗余的模型。

最后，规划结构和经验细节的平衡。现在很多的模型过分依赖于过去的规划经验，过于关注细节而非结构，过于关注观察到的行为偏好，而无法真正地实现科学的模拟和分析。经验性固然重要，但是随着规划范围的变化，固有的经验有很多局限性，并不能精准实时地反映出城市关键要素。

本文认为以上四条是现代规划问题存在的主要原因。城市是由社会、经济、政治、文化等各项活动构成的空间有机体，是一个复杂、多维度的庞大系统。如何解决现代规划的桎梏，弥补现代规划的不足，更好地在复杂环境中作出规划决策，是城市规划发展前景最为迫切的需求。

4 人工智能在规划应用中的优势

城市规划要求在一定空间和时间内，发掘城市性质和特色，制定发展目标和城市规模，分配社会和土地资源，保证城市生产和生活功能^[12]。城市规划重要的环节有 1) 为未来城市发展设定清晰的目标；2) 考虑备选方案，去除影响目标的限制因素。在第二个环节中，公众参与、多主体参与模式是关键。本文重新统计分析了 Hawas (2017)^[30] 在城市规划中总结的已用人工智能模型，回顾了城市增长，人口分析，土地利用，污染检测等使用的人工智能模型，例如 CA, ANN^{[33][35][26][29]}，模糊逻辑等在 1999-2016 年间的发展趋势 (见图 5)。



数据统计来源: AI-Sayedand Penn(2017)^[17], Hawas (2017)^[30]

图 5 城市规划中的人工智能模型

基于已有文献和模型梳理, 本文认为人工智能相比较现代的规划模型有如下优势:

首先, 分析因果关系优势。在分析因果关系时, 人工智能能够采用多种变量来代表城市的复杂性, 更好地做出预测, 比现代的模型精准度要高。具体而言, 人工智能可以同时在大范围、多因素之间进行分析, 同时根据数据模型优化调试, 自我学习, 实时调整, 不断提高精准度。其中, 人工智能和贝叶斯模型的结合可以让规划师同时也在多维度事件和多时间层级上探索因果关系, 更有助于解决城市规划复杂模型在实际中的应用, 便于分析多维度的因果关系。

第二, 规划仿真模拟优势。在将数据分析转化为规划仿真模型方面, 人工智能胜于现代规划模型。人工智能模型可以同时拥有多个自动化模块, 解码和重建城市系统的分析途径。例如应用聚类模式来衡量城市空间地理结构, 同时用人工神经网络模型(ANNs)对数据进行训练, 从而捕捉街道宽度, 建筑高度, 街区密度和土地功能等重要信息; 既能简化城市网格的模拟, 又能有效地进行结构形状相关的分析和功能属性的预测, 减少城市规划问题的不确定性。

第三, 参与式规划模型绩效评估优势。在多维度、多源数据中, 人工智能可以更好地提供评估系统(expert review system)^[26]。人工智能通过非常具体的分析任务, 逐步学习, 在不稳定、不可计算的条件下, 仍能评估出潜在的选址决策, 实现从下到上的规划方式。

第四, 量化不确定性优势。目前人工智能主要应用贝叶斯算法量化不确定性, 在城市安全测试和预警都有不俗的表现。比如, 利用人工智能模糊逻辑模型(AI fuzzy logic)模拟月度热浪风险图, 并综合地理空间信息、计算出热波对人口、社会经济的影响等^[40], 其中对城市道路拥挤概率预测以及城市水文系统的不确定性预测的效果远好于现代规划模型^[38]。

5 现阶段人工智能局限性

尽管人工智能有优越性, 但现在仍是弱人工智能阶段, 我们需要客观地看待人工智能。本文总结了三点人工智能与城市规划互动的局限性:

第一, 部分和整体挑战性。人工智能应用的基本原则是环境越是简单, 越是单向性目标, 人工智能越是容易预测、模拟。人工智能完全可以胜任一个整齐划一的封闭式场景规划, 帮助我们理解各个功能区块。但面对城市整体和功能区块间的关联关系, 虽然ANN, ABM等人工智能模型已经可以初步在整体和部分元素之间提出解决方案, 但是仍然受到模型、算力、数据的限制^[49], 处于初步阶段。实际规划是整体系统和区块元素的逐层相关联布局, 城市系统整体并不是各个子系统机械相加。所以, 如何更全面、准确地分析城市功能区块和整体系统的关系, 着实任重道远。

第二, 数据和技术有限性。我们目前的数据, 还不足以完全刻画城市。数据的质量、数量, 数据的结构, 数据和算法的一致性等都是人工智能应用的巨大挑战。人工智能学习需要数以百万及以上的数据记录, 但城市中基础设施系统复杂交错, 人们的互动复杂多变, 数据的分类采集工作较难; 即使采集了原始的数据集, 目前的数据分类(人工标注信息)仍是一

个庞大的工作。此外，技术的限制，包括计算机算力，训练人工智能的策略，目前尚在起步阶段。

第三，人工智能发展的客观差异性。人工智能的真正全面实施需要基础设施，IoT，人才等资源集合配套平台。我迄今犹深刻记着联合国地理信息系统专家 Greg Scott 向我讲述的经历。2010 年的区域制图大会上，他正壮志满怀地演示如何用 GIS 来规划智能城市，来自布基亚纳法索的代表突然着急地询问“如何打开电脑，如何操作 GIS”，因为这位代表本人是第一次见到电脑。Scott 先生慨叹技术在世界各国的差异，至此之后一直坚持着技术的普惠才能实现真正的智能和宜居的理念。人工智能辅助城市规划在我国各地区仍然存在发展差异，包括人才的储备，智能配置的齐备，理念的应用，城市的成熟度等都有巨大的不同，唯有真正平衡好这种差异性，才能让人工智能辅助城市健康发展。

6 人工智能与城市规划互补架构

基于上述研究，本文根据人工智能在单向度目标和实时反馈机制的优势，现代规划在中心规划和经验积累上的优势，遵循规划三大原则：生态自然、居住环境、人^[13]，构建人工智能和城市规划的互补系统框架（图 6）。通过推进人工智能在规划研究、编制、管理全流程中的应用，感测、分析、整合城市运行核心系统的各项关键数据信息，通过不断地将城市规划经验和人工智能学习结合，充分实现人工智能和城市规划的互补关系，形成更好的规划决策。

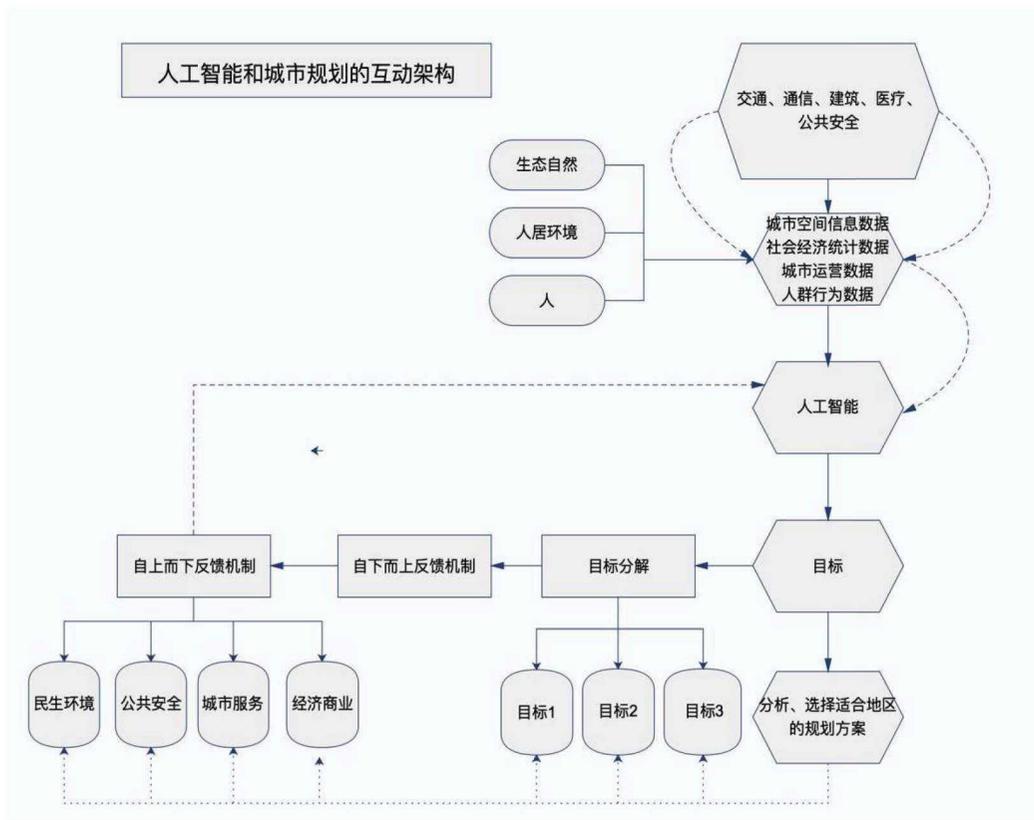


图 6 人工智能和城市规划互补架构

具体步骤如下:

- 1) 以规划三大原则, 生态环境、人居环境和人为本;
- 2) 分类城市的主要功能, 如交通、通信、建筑、医疗、公共安全等 5 个核心功能系统;
- 3) 以诊断、规划、决策为应用目标, 以城市空间信息数据, 社会经济统计数据, 城市运营数据, 人群行为数据等为支持和训练数据;
- 4) 人工智能以城市规划中的规划要素和规划指标的数理模型为基础, 构建决策辅助平台;
- 5) 根据规划目标和实际需求不断地调整规划中的自上而下和自下而上的两大系统;
- 6) 两大体系相互补充、构建人工智能的反馈机制, 形成对民生环境、公共安全、城市服务、经济商业活动等需求的积极响应, 不断完善城市规划决策。

本文的建议框架弥补了以往人工智能对城市规划的单向度研究, 将人工智能和现代规划互补结合, 充分发挥人工智能在规划研究、规划编制、规划管理全流程中的作用, 促进决策优化。

7 探索总结

人工智己进入我们规划师的视野, 改变着我们获取信息的方式和行业格局, 影响着我们的规划决策。如何去认识人工智能, 运用好人工智能, 是规划行业面临的新挑战和新机遇。

现阶段的规划模型更依赖于规划经验, 在公众参与度、复杂模型精准度、和实际落地的相关度上存在局限性。人工智能在复杂的城市系统的模拟方面, 在因果分析方面, 在公众参与度的评估方面, 在城市灾害预警方面, 都有明显的优势和巨大的潜力。然而, 目前的人工智能仍处在弱人工智能的阶段, 受限于技术、数据、和社会经济发展水平, 在拟合城市单独的元素和整体的关联方面仍然刚刚起步。

本文通过深入思考人工智能在城市规划中的优势和局限性, 通过构建人工智能与城市规划循环互补的系统框架, 自上而下的基本程序和自下而上的反馈机制整合互补, 让现代规划为人工智能提供充足的学习素材和有力的数据支撑, 结合人工智能的反馈机制, 民生环境、公共安全、城市服务、经济商业活动等在内的诸多需求的积极响应, 才能真正实现智慧城市的运行管理模式, 创造更加美好宜居的人类新生活。

参考文献

- [1] 柏丛, 彭仲仁. 基于 SVM-Kalman 滤波的公交车行程时间动态预测模型, 2015 年 8 月 21 日[J]. 计算机工程与应用, 2015.
- [2] 本刊编辑部; 吴志强; 黄晓春; 李栋; 彭仲仁; 龙惟定; 刘浏; 李颖欣; 王东辉; 张宏; 杨堂堂; 牛强; 甄峰; 王德; 宋小冬 2018. “人工智能对城市规划的影响”学术笔谈会. 城市规划学刊 [J], 05.
- [3] 弗里德曼, 符荆捷, 朱映臻, 崔艺 2018. 谢谢你迟到: 以慢制胜, 破题未来格局 an optimist's guide to thriving in the age of accelerations [M]. 湖南科学技术出版社; 长沙.
- [4] 冯意刚, 喻定权, 张鸿辉 2017. 城市规划中的大数据应用与实践 [M]. 中国建筑工业出版社; 北京.

- [5] 国务院 国务院关于印发新一代人工智能发展规划的通知 (国发 [2017] 35 号) [M].
- [6] 李开复 2018. AI 未来 [M]. 浙江人民出版社.
- [7] 龙瀛, 茅明睿, 毛其智, 等. 2014. 大数据时代的精细化城市模拟: 方法, 数据和案例. 人文地理 [J], 29: 7-13.
- [8] 李彦宏 2017. 智能革命: 迎接人工智能时代的社会、经济与文化变革 [M]. 中信出版集团; 北京.
- [9] 马尔科夫 郭雪 2017. 人工智能简史: the quest for common ground between humans and robots [M]. 浙江人民出版社; 杭州.
- [10] 强磊, 勾善文, 林明, 曲哲, 王红安 2018. 互联网+智慧城市 核心技术及行业应用 [M].
- [11] 吴志强 2018. 人工智能辅助城市规划. 时代建筑 [J]: 6-11.
- [12] 吴志强, 李德华 2018. 城市规划原理 (第 4 版) [Principles of Urban Planning(4th Edition)] [M]. 中国建筑工业出版社.
- [13] 吴良镛 2001. 人居环境科学导论 [M]. 中国建筑工业出版社; 北京.
- [14] 杨正洪, 郭良越, 刘玮 2019. 人工智能与大数据技术导论 [M].
- [15] ABDALLA R, ESMAIL M 2019. Artificial Intelligence and WebGIS for Disaster and Emergency Management. 57-62.
- [16] AITOPICS A Brief History of AI [M].
- [17] AL SAYED K, PENN A 2017. Translating Analytical Descriptions of Cities into Planning and Simulation Models [M]: 537-554.
- [18] Allam Z, Dhunny Z A. On big data, artificial intelligence and smart cities[J]. Cities, 2019, 89: 80-91.
- [19] ANTONI J-P, JUDGE V, VUIDEL G, et al. 2018. Constraint cellular automata for urban development simulation: an application to the Strasbourg-Kehl cross-border area [M], Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios. Springer: 293-306.
- [20] BATTY A C C C M 2008. Key challenges in agent-based modeling for geo-spatial simulation. Computers, Environment and Urban Systems [J], 32: 417-430.
- [21] BATTY M 2007. Cities and Complexity: Understanding Cities with Cellular Automata, Agent-Based Models, and Fractals [M]. The MIT Press.
- [22] BATTY M, MARSHALL S 2012. The origins of complexity theory in cities and planning [M], Complexity theories of cities have come of age. Springer: 21-45.
- [23] BRYNJOLFSSON E, MCAFEE A 2017. The business of artificial intelligence. Harvard Business Review [J].
- [24] Crooks A, Castle C, Batty M. Key challenges in agent-based modeling for geo-spatial simulation[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2008, 32(6): 417-430.
- [25] CULLEN I 1986. Expert systems in planning analysis. Town Planning Review [J], 57: 239.
- [26] FAHLMAN S E 1980. NETL: A system for representing and using real-world knowledge. Computational Linguistics [J], 6.
- [27] FERNÁNDEZ-GÜELL J-M, GUZMÁN-ARAÑA S, COLLADO-LARA M, et al. 2016. How to Incorporate Urban Complexity, Diversity and Intelligence into Smart Cities Initiatives [C] //, Springer; City. 85-94.
- [28] HAKEN H, PORTUGALI J 2017. Smart Cities: Distributed Intelligence or Central Planning? [M], Smart City Networks. Springer: 65-86.
- [29] HARDIN P J, JACKSON M W, OTTERSTROM S M 2007. Mapping, measuring, and modeling urban growth [M], Geo-spatial technologies in urban environments. Springer: 141-176.
- [30] Hawas M A. Are We Intentionally Limiting Urban Planning and Intelligence? A Causal Evaluative Review and Methodical Redirection for Intelligence Systems[J]. IEEE Access, 2017, 5: 13253-13259.

- [31] IMRAN M, CASTILLO C, LUCAS J, et al. 2014. AIDR: Artificial intelligence for disaster response [C] //, ACM; City. 159-162.
- [32] JAMES G, WITTEN D, HASTIE T, et al. 2013. An introduction to statistical learning [M]. Springer.
- [33] JIANG S, ALVES A, RODRIGUES F, et al. 2015. Mining point-of-interest data from social networks for urban land use classification and disaggregation. Computers, Environment and Urban Systems [J], 53: 36-46.
- [34] JIANG S, FERREIRA J, GONZALEZ M C 2017. Activity-based human mobility patterns inferred from mobile phone data: A case study of Singapore. IEEE Transactions on Big Data [J], 3: 208-219.
- [35] JIANG S, FERREIRA J, GONZÁLEZ M C 2012. Clustering daily patterns of human activities in the city. Data Mining and Knowledge Discovery [J], 25: 478-510.
- [36] JIANG S, FERREIRA JR J, GONZALEZ M C 2012. Discovering urban spatial-temporal structure from human activity patterns [C] //, ACM; City. 95-102.
- [37] JIANG S, YANG Y, GUPTA S, et al. 2016. The TimeGeo modeling framework for urban mobility without travel surveys. Proceedings of the National Academy of Sciences [J], 113: E5370-E5378.
- [38] KACPRZY J, Advances in Human Factors, Sustainable Urban Planning and Infrastructure: Proceedings of the AHFE 2018 International Conference on Human Factors, Sustainable Urban Planning and Infrastructure, July 21-25, 2018, Loews Sapphire Falls Resort at Universal Studios, Orlando, Florida, USA[M]. Springer, 2018.
- [39] KADAIFCI C, USTA S K, CEVIKCAN E 2017. Analytic hierarchy process and fuzzy rule based system-integrated methodology for urban land use planning [M], Intelligence Systems in Environmental Management: Theory and Applications. Springer: 385-411.
- [40] KERAMITSOGLU I, KIRANOUDIS C T, MAIHEU B, et al. 2013. Heat wave hazard classification and risk assessment using artificial intelligence fuzzy logic. Environmental monitoring and assessment [J], 185: 8239-8258.
- [41] Lee Jr D B. Requiem for large-scale models[J]. Journal of the American Institute of planners, 1973, 39(3): 163-178.
- [42] MARSAL-LLACUNA M-L, DE LA ROSA-ESTEVA J-L 2013. The representation for all model: An agent-based collaborative method for more meaningful citizen participation in urban planning [C] //, Springer; City. 324-339.
- [43] Marsal-Llacuna M L. How to succeed in implementing (smart) sustainable urban Agendas: “keep cities smart, make communities intelligent” [J]. Environment, Development and Sustainability, 2018: 1-22.
- [44] NEMATOLLAHI M A, SHAHBAZI S, NABIAN N 2019. Application of AI in Urban Design [M], Computer Vision and Audition in Urban Analysis Using the Remorph Framework. Springer: 1-12.
- [45] Palmisano S J. A smarter planet: the next leadership agenda[J]. IBM. November, 2008, 6: 1-8.
- [46] PELTON J, SINGH I 2019. Using Intelligent Data Analytics for Urban Planning and Design: Better Technology, Infrastructure and Security [M]: 85-101.
- [47] PELTON J N, SINGH I B Smart Cities of Today and Tomorrow. Chapter 1,2,13,14.
- [48] PEREZ P, BANOS A, PETTIT C 2016. Agent-based modeling for urban planning current limitations and future trends [C] //, Springer; City. 60-69.
- [49] REPORT S 2011. Stanford's John McCarthy, seminal figure of artificial intelligence [M].
- [50] RIENOW A, STENGER D, MENZ G 2014. Sprawling cities and shrinking regions – forecasting urban growth in the Ruhr for 2025 by coupling cells and agents. Erdkunde [J]: 85-107.
- [51] ROGGEMA R, POPOV N 2017. Swarm Planning—Developing a Tool for Innovative Resilience Planning. 223-250.

- [52] Zhang G, Hsu L T. A new path planning algorithm using a GNSS localization error map for UAVs in an urban area[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2019, 94(1): 219-235.
- [53] ZHENG Y 2017. Urban computing: enabling urban intelligence with big data [M].

作者简介

单珊, 数据研究中心研究员, 中建设计集团城乡与风景园林院