

数字孪生赋能下的互动生成式规划与治理*

The Interactively Generative Planning and Governance Empowered by Digital Twins

杨滔 田颖 徐艳杰 YANG Tao, TIAN Ying, XU Yanjie

摘要 21世纪以来,数字孪生进入城市规划与治理领域,加快了城市的感知和问题反馈的过程,形成了时间、空间和人之间新的互动机制。数字孪生城市的挑战来自城市的复杂性,提出以人为主的沉浸参与式角度来重新定义空间,强调空间的多维度延伸,以空间流形的模型为基础,建立起数字孪生城市的空间表达方式及其升维与降维的计算逻辑。基于此,探讨数字孪生赋能下的“互动生成式”规划模式:通过数字孪生的参数化设计,以人为主体,不断调整和实时反馈城市的各项规划参数,构建不断演进的数字孪生的规划治理系统及政策。

Abstract Since the 21st century, digital twins have entered the field of urban planning and governance, accelerating the process of urban perception and problem feedback, and forming a new interactive mechanism among time, space and people. This paper argues that the digital twin city faces the challenge of the complexity of the city. In order to meet this challenge, it redefines space from the point of view of human-centered immersive participatory, addressing the multi-dimensional extensions of the spaces, and establishing the spatial expression model of digital twin city and its calculation logic of upgrading and reducing dimensionality based on the model of spatial manifold. Then this paper discusses the interactively generative planning model empowered by digital twins. Taking people as main actors and adopting the parametric design of digital twins, it continuously adjusts real-time feedback of various planning parameters of the city, and thus builds an evolving digital twins' planning and governance system and its inherent policies.

关键词 数字孪生城市;空间流形;参与式;城市信息模型;生成式

Key words digital twin city; space manifold; participatory; city information modeling; generative

文章编号 1673-8985 (2023) 05-0004-07 中图分类号 TU981 文献标志码 A

DOI 10.11982/j.supr.20230502

作者简介

杨滔

清华大学建筑学院 副教授,博士
自然资源部智慧人居环境与空间规划治理技术创新中心 副主任, Taoyang128@qq.com

田颖

清华大学建筑学院 博士研究生
中规院(北京)规划设计有限公司 规划师

徐艳杰

中国建筑学会综合部信息化主管 硕士

0 引言

现在地球上超过半数的人口生活在城市中,并且未来会有更多人在城市中生活^①,正如联合国人居署在最新的《2022年全球城市报告》中指出的,“城市是人类的未来”。正由于城市是人类生活的主要载体,我们一直致力于更好地认识和改造城市。工业革命带来生产生活方式的变化,机械化的世界观和还原论大行其道,但自上而下控制城市的规划方式显然无法构建真正有活力与可持续发展的城市,反而带来犯罪率升高、交通拥堵、生活品质下降等一系列社会问题。因此诸多学者意识到这种远离现实、将城市作为同质化系统的假设,有意或者无意地忽略了城市的本质^[1-4]。

Hopkins^[5]认为,传统规划学者用经济学

及生态学假设的均衡发展思想来解释城市是有一定问题的,因为城市发展有4个“1”的特性,即互依赖性 (interdependence)、不可逆性 (irreversibility)、不可分割性 (indivisibility) 和不完全预见性 (imperfect foresight)。这4个特性决定了城市不同于其他系统,难以用这种分离并征服 (divide and conquer) 的机械手法面对,简单线性的规划思维无法应对城市的复杂性和快速变化。

为了直面城市的复杂性,需要一种适应城市发展特征、快速应对环境变化的规划与决策模式。这种规划方式既不同于完全控制的综合性规划方案,也不是基于模型计算的渐进主义规划,而是可以及时对系统情况进行监测、计算、仿真并快速反馈,以互动协调各方意见的规

*基金项目:国家重点研发计划项目“城市更新设计理论与方法”(编号2022YFC3800301)资助。

注释: ① 联合国人居署在《2022年全球城市报告》中指出,虽然疫情造成了城镇化率渐缓,但预计依然会从2021年的56%增长到2050年的68%。

划生成方式,持续迭代规划治理一体化政策。当然,这就面临如何快速掌握城市这个复杂系统的动态变化和发展规律,如何形成高效的互动协同平台的问题。而随着数字孪生在城市规划设计领域的应用,其通过虚实互动,形成了天然的沉浸参与式互动协同平台,正为这种新的互动生成式规划与治理的发展提供可能。

1 数字孪生进入城市规划领域

“数字孪生”的概念从1970年代被美国宇航局用于航空航天飞行器的模拟仿真,以确保航空器安全,并提高运行寿命^[6];2003年,迈克尔·格里夫(Michael Grieves)教授在美国密歇根大学首先提出“信息镜像模型”(Information Mirroring Model),在2011出版的《几乎完美:通过PLM驱动创新和精益产品》中,他给出数字孪生的3个组成部分:物理空间的实体产品、虚拟空间的虚拟产品、物理空间和虚拟空间之间的数据和信息交互接口^[7]。数字孪生理念逐渐在航空航天、工业制造、农业、电力乃至城市领域快速发展,展现了从复杂性较低的系统到复杂性较高的系统中的应用发展过程。在我国,“数字孪生城市”的概念最早出现在2018年的《河北雄安新区规划纲要》中,即“坚持数字城市与现实城市同步规划、同步建设,适度超前布局智能基础设施,推动全域智能化应用服务实时可控,建立健全大数据资产管理体系统,打造具有深度学习能力、全球领先的数字城市^[8]”。

随着数字孪生理念应用领域的逐步扩展,数字孪生技术经历了技术迭代发展的过程,并在每个发展时期展现了不同的互动方式和特征。总体来看,大致可以分为4个阶段(见图1)。

一是数字孪生萌芽期,以模型仿真技术为主,体现物理实体到数字虚体的映射特征。20世纪80年代以来,CAD、CAE、CAM等计算机建模、模拟仿真技术迅猛发展,主要在工业制造业和建筑领域广泛应用,可以将物理空间的实体形成数字映射的过程。例如现有的数字孪生城市实践是从数字化仿真城市物理环境开始的,包括建筑、道路、桥梁和水系。这种初

步的物理世界到网络世界的映射而产生的三维可视化环境,为城市信息的快速获取和基于信息的判断和交流提供了便捷途径。

二是数字孪生概念期,以模型与感知技术为主,体现物理实体到数字虚体映射后,数字虚体对物理实体的反馈特征。随着模拟技术的不断发展,以及21世纪初“物联网”技术的初步应用,通过感知通信获取产品实时运行数据与实时计算成为可能。2010年NASA将数字孪生应用于航天航空领域,随后通用电气、达索、西门子等制造业龙头企业广泛开展数字孪生应用,推动了物联感知技术与建模仿真技术的集成融合。不过由于缺乏城市尺度物联网的应用,城市的相关应用仅停留在智能建筑的物业、监控管理等方面。

三是数字孪生推广期,以模型、感知、空间位置等多技术融合为主,体现物理实体和数字实体与空间的互动特征。随着全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)等空间定位技术的推广,以及参数化模型的应用,结合物联网、BIM技术的成熟普及和3DGIS的实体语义化发展,形成了以模型、感知、空间位置等多技术融合为主的数字孪生技术。这使得数字孪生逐渐从封闭空间小微场景,向开放空间大中型场景转变,从数字孪生产品、工厂、楼宇,走向数字孪生园区、城市等大尺度范围。

四是数字孪生壮大期,以模型、参数化、位

置、感知、交互、AI大模型等技术全面融合为主,体现物理实体和数字实体与空间和时间协同互动的特征。随着对城市系统规律的认知加深,参数化模型、感知交互(AR、VR)、人工智能(机器学习、深度学习等)、区块链等技术从组织模式和交互模式上彻底改变了城市的生产生活方式。

特别是近两年元宇宙概念兴起,加速推动数字空间与现实空间的深度融合,时间维度的记录和分析也加入数字孪生的能力中,构建全时空、全要素、全能力的数字孪生成为可能。这种新的时空互动能力使得数字孪生能为规划参与者提供便捷、公开、简易的沟通互动模式。然而,城市是远比宇航器、工业产品或建筑物复杂的系统,包含更为复杂的社会、经济、环境、文化等子系统及其关联,本文主要探讨数字孪生城市如何应对城市系统的独特复杂性。

2 城市复杂性的人本内涵

城市的复杂性来源于城市作为开放系统,特别是人作为城市的主体所具备各自不同的目标行为,导致城市中存在大量不确定的因素、过程及其结果。正如Peter Hall^[9]曾提到:卫星上天的航天计划具有明确的目标与指向,类比打固定靶,可精准预测其航天轨迹;而城市规划解决城市中动态变化的问题,更像打移动靶,难以预测城市的发展,反而比航空计划更为困难,也更容易失败。实际上,这指明了城市作为复杂系统以开放的方式不断变化,并

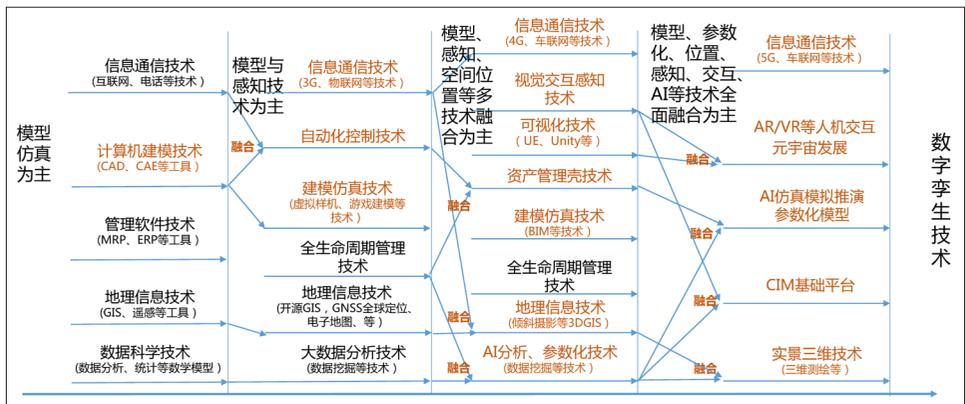


图1 数字孪生技术发展及互动特征
Fig.1 Development and interactive characteristics of digital twins' technology

资料来源:笔者自绘。

随着时间的演变而不断出现突发情况,需要及时学习与适应,因而这种复杂系统很难精准模拟并预测。

随着20世纪80年代以来国际学术界提出复杂科学的概念,城市研究者与规划设计师们借助网络科学、动力系统论、博弈论、机器学习等新兴方法揭示了城市复杂性的部分规律。早在1960年代,面向第二次世界大战后大规模重建带来的社会经济影响,剑桥大学Martin Centre^[10]提出与“建成环境”价值相关的研究问题:城市道路网(urban grid)是否是城市发展的引擎(engine)?这里不仅探讨了道路网两侧的开发模式及其强度,而且辨析了道路网作为空间系统对整个城市功能连通性和区位价值的作用力。与此同时,剑桥学派在讨论怎样的要素(包括空间)组合才能构成人所能使用的建筑物或城市,其中人对城市的使用是开放因素;或者说,哪种组合才能构成人所使用的复杂城市或建筑物。Christopher Alexander^[11]、Bill Hillier^[12]、Michael Batty^{[13]34}等一直在探讨开放复杂系统中局部与整体的问题,即局部要素如何在随机开放的前提下彼此关联而涌现出整体性要素。

虽然他们采用的具体技术都有所差异,但都无一例外地选择了图论中的图来对城市空间进行抽象表达,以此强调要素或局部之间的联系或流动,进而构建起可计算的体系。他们也发现了城市中的各类要素并非都在城市整体层面上彼此作用,而往往在局部层面上与其周边要素互动,作用于个人行为。但是这种作用力反过来通过城市中的社会经济环境等网络体系加以传播并交织,形成了城市整体上的涌现模式,且建构了局部与整体的自相似、自组织、自适应规律。特别是Batty^{[13]36}指出,功能、模式、交互、空间、尺度、规模等都是城市复杂系统的基本组成部分,构成自相似的复杂性机制。

然而,城市系统的复杂性关键在于人,即人在该系统中的感知、认知、推理、行动的过程存在各种不确定因素,同时又是一种复杂的交互行为,并在空间网络传递过程中迭代与演化。因此,

如何从人的视角去探究城市复杂空间网络的连接、生成、演变过程尤为关键。换言之,个人与集体参与到城市空间网络的建构才是研究城市复杂性的关键点之一。实际上,这改变了研究城市复杂空间网络的视角,将从自上而下的鸟瞰视角转化为沉浸在空间中漫游的人看视角,并以个人或集体的行为路径将各类空间联系在一起。以人的感知、体验、交互等为纽带,将不同专业、不同部门、不同人群等协同整合起来,共同建构城市复杂系统的生产方式与结果。特别在数字孪生时代,数字空间提供了相应的系统工具,加速了这种人与人之间的时空性互动,有可能演化出更为精细化的参与式模型乃至生成式数字孪生,去支撑更为复杂而精准的城市规划与治理。

在这种动态式、参与式、生成式的城市级别数字孪生中,复杂性空间规划与治理将会彼此融合。这源于个体化、局部的参与规划行为将在彼此互动中建构出整体式的模式,动态地、自上而下地影响下一阶段的个人化、局部的参与治理行为,从而以动态的局部与整体联动的方式消解规划与治理之间的明确边界,建构新的复杂城市系统演进路径。因而,如何快速准确地掌握“现状治理情况”,并呈现给利益相关者,促进各方基于更有效的证据讨论,不断地生成可选择的行动方案,最终形成共识,就显得尤为重要。正是由于规划与治理融合的变化趋势,才让数字孪生有了在规划与治理领域生存的土壤,因为数字孪生在信息的展示、传递、调整、多方互动沟通方面具有明显优势,可以更加高效、便捷地推动多方共识的形成。不过,对数字孪生中城市空间系统的复杂性讨论,需要回归到空间本身在数字孪生中的模型表达,特别是人的视角如何在数字孪生中进行表达。

3 沉浸参与式的空间范式

从理论方法的角度,人所参与的城市空间及其复杂性应该如何表示,并加以计算、生成并模拟?一般而言,城市空间被视为长、宽、高3个维度所界定的欧几里得空间;而在空间网络的研究中,空间之间的彼此连接模式被视为拓扑空间,其局部的尺寸大小往往被忽略。早在19

世纪上半叶, Bernhard Riemann认为,我们生活中的欧几里得空间仅仅是几何特例,而空间概念需要重新审视。于是他建立起非欧几何空间的理念^[14]。例如,我们生活的地球就是曲面,从北京到纽约的最短距离并不是两个城市之间的直线距离,而是沿地球表面的测地线的长度(一条曲线);而在北京的广场上,我们仍然感觉到是三维的欧几里得空间。这本质是从人所使用空间的角度,重新界定了几何空间,并消解了欧式几何的某些基础性定律,如两条平行线永远不相交。从而, Riemann开辟了非欧几何的领域,并试图对所有的几何空间定义进行统一。从数学角度, Riemann提出流形(manifold)的概念,即局部具有欧几里得几何特征的拓扑空间。这些局部欧氏空间通过连续的拼接构成整体曲率不为零的非欧几何空间。实际上, Riemann认为几何空间是多元延伸量,即根据从一个确定空间到另外一个确定空间之间是否存在连续的过渡,构成了连续的或离散的流形,其中连续的为点,而离散的为元素。

从人在空间中运动的视角,非欧几何空间为我们提供了对空间的新认知,我们对于任何几何空间的认知不再依赖于更高维的空间嵌入。例如,地球的曲面特征不再根据“球”嵌入三维欧氏空间中而得以显示,而是可沿经纬线加以描述。本质上,我们不再从鸟瞰的视角去看待几何空间,而是沉浸参与到几何空间中去认知该空间的内在特征。简言之,我们根据空间的曲率去认知几何空间。例如,我们在空间中行走,从人看体验的视角而言(见图2),左右两侧是对称的,而前后是非对称的,暗示着“前端与后端”“未来与过去”“到达与离开”“还有多远/落下多远”等时空信息;面向前进的方向,代表着“经过”“流失”和“时间之箭”,其中涉及前进过程中所能感知到的空间变化,最简单的就是脚步的计数。按现象学大师胡塞尔的理解,这就是数与空间的基本性关系,即数的变化来源于空间的延伸计量这个动作。换言之,空间延伸属于行为方式,这带来了空间本身的分类逻辑,而最基本的就是计数。

那么,从城市街道空间中行走的角度来

看,街道网络有可能也是“弯曲”的,与鸟瞰的欧式二维平面空间不一样。在完全正交的街道网格中,空间的感知是匀质的,近似对应于二维平面空间;如果中央的街道网密度大于周边的,那么从中央走出去,将会感知到街道网变得稀疏,近似“下坡”,对应于1.8维空间;如果中央的街道网更为稀疏,那么从中央出去,将会感知到越来越紧密的街道构成,近似“上坡”,对应于2.3维空间(见图3)。那么,在后续两种情况中,街道网发生了“弯曲”,可通过沉浸参与式的行走体验所感知到。之前的研究证明^[15],这种街道网的“弯曲”机制构成了城市空间分区的动力,即从人视角下街道密度变化的不连续性构成了城市分区的现象。这构成

了人或集体参与到空间体验中的一种空间认知范式,被称为沉浸参与式的空间范式。

在Riemann提出流形概念之前,康德的批判哲学中就已出现“流形”的词汇,即Mannigfaltigkeit。这表示由杂多构成的统一体,其中mannig表示杂而多, faltig表示折叠, keit表示性质。“杂多”表达每一种直观或显性现象都包含其未经整理的复杂多样的原始内容。这是经由先天的或经验性的感知而呈现出来的,即通过人的感知所获得的复杂多样的内容表象^[16]。这强调了直觉中的“内容”存在,同时也暗示了“杂多”本身也是通过人的感知重建而浑然一体。胡塞尔明确提出:直观的杂多都是被认知精神所塑造的,即杂多本身也通过

人的认知行为获得了原初的统一性,并转化了杂多与统一之间的对立。从而,他提出了时间流形与意识流形。前者指彼此相邻的流形,代表时间的流逝(见图2);而后者指认知过程中动态的流形,代表杂多的整体认知的形成,这依赖于人参与到空间沉浸体验的行为^[17]。因此,我们认为空间中存在着复杂多样的社会、经济、环境、文化等内容,体现为空间行为,且彼此之间相互延展与交织,从而构成了统一而复杂的流形,其中包含不连续性与多样性的深刻内涵。不连续性意味着社会、经济、环境、文化等要素或形状的认识,而多样性暗示着复杂的关联认知。因此,城市空间的复杂性在人或集体参与到空间行为中,才会揭示得更为清晰。

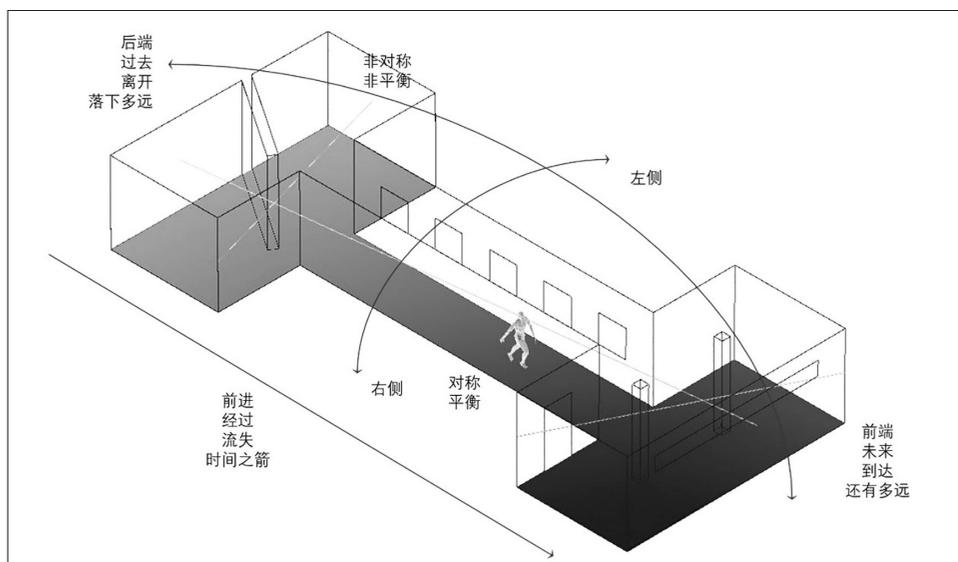


图2 从个人行走的方式看待空间的方向
Fig.2 Viewing the direction of space from the perspective of individual walking patterns

资料来源:笔者自绘。

4 数字孪生中的空间流形模型

在这种意义上,数字孪生中复杂的城市空间体现为某种特定的流形,例如社会、经济、环境、文化等内容在城市街道实体与虚体空间中彼此延展与交织。当个体沉浸参与到虚实街道空间中,由于个体所感知与认知的社会、经济、环境、文化等内容各不相同,这样的内容在空间中延展的曲率并不相同,那么不同个体所感知到的流形也许千差万别。同时,对于同一个局部空间,同一个体对上述位于该局部空间的这些内容的感知也可能差别较大,于是这些内容在该局部空间中根据该个体认知而彼此延伸交织,该个体对于空间的理解也将呈现出杂多的景象。于是,对于每个局部虚实空间的内容延伸,可以用张量来进行“复杂的杂多”情景描述,如5个维度的局部虚实空间,表示为:

$$T_{ijkmn} = T_i \otimes T_j \otimes T_k \otimes T_m \otimes T_n \quad (1)$$

式中: i 为街道、 j 为社会、 k 为经济、 m 为环境、 n 为文化。

其梯度可用于度量“复杂流形曲率”,可表示为:

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} i + \frac{\partial}{\partial y} j + \frac{\partial}{\partial z} k + \frac{\partial}{\partial w} m + \frac{\partial}{\partial v} n \quad (2)$$

对于认知个体而言,每个局部空间的张量对应于该空间的多维度且有方向的属性,表

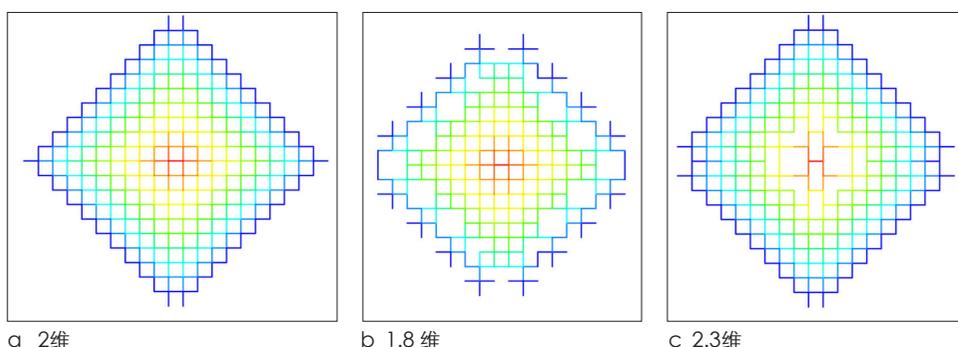


图3 人参与式视角下的不同维度的街道网络类型
Fig.3 Types of street networks in different dimensions from a participatory perspective

资料来源:笔者自绘。

达为诸如街道本身及社会、经济、环境、文化等空间延展。从空间规划的角度而言,这将体现为诸如建筑密度、人口密度、商业密度、汽车尾气密度、网红打卡地密度等,不仅仅体现这些要素的空间分布,而且体现这些要素本身之间的联系及其认知中的连续性。这种复杂的延展性共同构成了空间本身的特征及其认知模式。空间延展的梯度体现为诸如建筑密度或人口密度等在空间延展中的变化率,其综合性的变化体现为“复杂流形曲率”,对应于个体如何认知综合性空间特征的变化情况,以及对空间本身的综合性定义。这体现为空间本身的杂多情景,也体现为不同个体的不同综合性空间认知。然而,在宏观层面上,这又存在某种涌现的规律,表达为某种统一性。

对流形而言,从杂多到统一的过程中,降维是一种模型方法,以便找到核心的不变结构。例如,对于一个圆圈,可以在二维空间中用xy直角坐标系去描述;也可以用极坐标系去描述,那么只需半径 r 变量就可以,这属于一维空间。在直角坐标系中有很多 (x,y) 坐标点并不在圆圈上,这就是冗余的数据,那么可以从 (x,y) 降维到一维的长度去描述。其实人脑的认知方式就是采用了类似的降维模型。Klein^[18]早在19世纪就用“变换群”的理念来强调不同维度的流形之间的转换,认为群变换中不变的特征才是流形的统一结构。在具体的计算过程中,基于最近距离的聚类还是最基本的方法,本质也就是对“不连续性”的识别。例如,从图局部近似角度,拉普拉斯特征映射建立起数据之间的连接,体现为复杂流形在不同维度中所传递的内在特征结构,这表示为:

$$\min \sum_{i,j} \|X_i - Y_j\|^2 W_{ij} \quad (3)$$

式中: $\{X_i\} \in R^{D \times N}$ 与 $\{Y_j\} \in R^{d \times N}$, 以及 $d < D$, W_{ij} 为邻接矩阵。

然而,流形本身内在的特征结构不仅来自多维度的自相似性,而且来自高于局部的多尺度联动模式。这与胡塞尔提到的意识流形有共通之处。每个空间在诸如街道、社会、经济、环境、文化等方面延伸,因此个人在感知局部

空间构成的过程中,也同时根据自己头脑中的知识体系或知识图谱,对不同方面的空间延伸有不同的解读,从而动态地建构起这些空间各自的不连续性,及其彼此之间的连接方式。因此,个体对局部空间的认知会依赖更大尺度的空间延伸情况。例如,个人在十字路口选择路径的过程中,除了感知红绿灯、路口交通情况、路口商业等功能活动分布,同时也会根据自身位置(通过手机虚拟空间或头脑记忆)对出行目的地、周边街道的连通情况、商业等功能延续情况乃至个人交通可负担能力等进行计算,从而选择走向哪条道路。这些不同要素在空间中延展的曲率集合,被称为空间复合曲率。该变量在较大尺度的度量将会决定局部的空间认知,其中包含降维过程。换言之,个人在沉浸式行为过程中,将高维度的空间流形进行降维,从而获得更为清晰的空间复合曲率,指导自身的个体行为动作。这种过程可视为在不同尺度之间的转换(transformer),基于不同尺度涌现的知识的深度强化学习,将不同尺度的空间表征关联起来,形成对于关键特征要素或关注事件的识别,建构编码器与解码器,并生成各自尺度下的空间现象、行为、事件及其内在动力模式。

与此同时,不同个人对空间延伸存在不同的解读和认知,以及不同的个人行为动作选择,这将使得人们不断在虚实空间中切换,从各自对社会、经济、环境、文化等具体情景的不同理解角度,去影响空间的构成与延伸。或者说,不同的专业从各自角度对城市空间网络的过程产生作用力。在集体层面上,这些不同的空间作用力彼此交织在一起,共同生成新的城市尺度的空间特征,被相关的个人所感知到,形成某种集体协同或社会意识。这称为从低维向高维的空间涌现过程,属于城市空间作为复杂系统的基本规律之一。因此,根据个人与社会的虚实空间感知与体验的过程,流形本身的杂多在不同尺度、不同维度之间构成了更为动态的统一,同时也反馈到杂多本身的变化中。本质上,城市的复杂性就体现在杂多的多样性与统一的理解性,而尺度与维度在推动了流形

的动态性感知识识与沉浸体验行为中,构成了数字孪生空间流形的参与式涌现。

5 数字孪生中的互动生成式规划治理模式

上述对于空间流形本质性的思考从源头上辨析城市空间系统生成的内在机制,其核心是个人在空间中通过沉浸参与式行为本身去建构了集体的虚实互动的空间网络。回归到城市这个复杂巨系统的本源,在城市各个子系统的虚实时空协同中,复杂城市空间系统的生成来自沉浸参与式行为对城市空间形态加以互动性的作用力。那么,需探讨如何架构起沉浸参与式的数字孪生城市系统,促进这种跨专业的虚实时空协同生成机制,从而优化城市规划与治理决策。

在数字孪生模拟环境中,人对各种变量或参数的感知与选择,推动了各个子系统的交互与演进,从而在人机互动的过程中优化了空间流形,建构了城市巨系统形态的涌现机制。由此,基于图网络(graph network)和流形学习(manifold learning)等技术,探索城市科学领域内与信息科学相关的人工演进(artificial evolution)概念,即计算模型或仿真可根据人对变量与参数的识别与选择,形成自动演进的算法,从而模拟人参与互动下的数字系统演进过程^[19]。基于此,期望以数字化的方式去模拟城市空间的规划与治理,而其过程又依赖于人们从沉浸式的角度去参与建构和运行城市各个子系统,并挖掘与遵循其内在规律。

这种系统可称为人工演进的元城市空间系统(Meta Urban System of Artificial Evolution, MUSAE),即拉丁文的缪斯,意为艺术与科学的女神,暗示着城市复杂系统的建构本质就是艺术与科学的融合、实体与虚体的交融。这构成数字孪生体,包括两大部分(见图4):一部分是实体城市系统,从生态本底,到空间结构、专业互动、形态生成,直到城市决策;另一部分是虚拟城市体系,从数据工程,到模型整合、机器学习、人机互动,直到应用扩展。前者构成了业务场景,而后者形成了软件架构;两部分经由参数调试而不断演进,其过程包括人的沉浸式干预与

算法迭代,共同构成服务于城市规划与治理决策的城市信息模型搭建基础。于是,城市复杂系统在人与机器互动,以及人(或机器)通过机器与更多的人互动下,进一步实现实体与虚拟城市的交融与迭代,推动相关政策的智慧演进,建构起新的规划与治理一体化模式。

其中,参数调试尤为重要。本质上,参数的选择是个体介入数字孪生体的关键性入口。不管是经由专业知识而形成的算法,还是经由大数据机器学习而获得的算法,都需要与真实的世界进一步对接,开展相关验证,使得基于知识的算法与基于机器学习的算法相互优化,同时又与真实的城市运行相匹配。在这过程中,共性通用的参数可以被识别,而适用特定场所或场景的参数也需要被挖掘。在这种意义上,数字孪生体本身虽然在本体论上是唯一的,但在现象与算法表征中则存在多种形式。因此,参数调试是本体与表征之间的联系,大模型所提供的超大量参数性空间计算使得复杂性得以定量揭示。

人机互动是空间流形在数字孪生空间中的延展。个体深度参与到数字空间的表达、模拟、仿真、决策、操作等环节中,提供了人与人之间更高维度、更远距离的交流环境,也实现了人通过数字世界对实体世界进行操作的可能性;反之亦然。一方面需要建立全面的自下而上感知,增加感知城市运行、发现城市问题

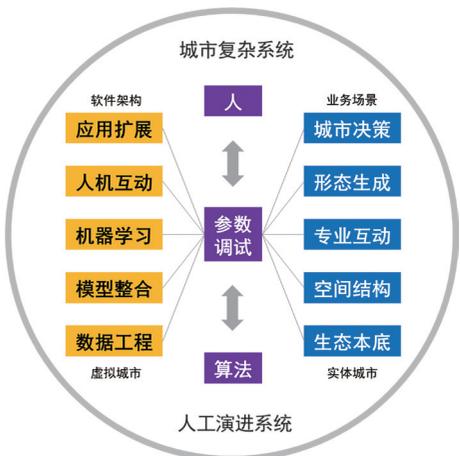


图4 数字孪生体:人工演进的元城市系统^[20]
Fig.4 Digital twins: metaurban system of artificial evolution system

资料来源:笔者自绘。

的能力,通过感知不同主体的行为需求和活动,为规划决策提供更多源、更客观的数据支撑,自下而上形成基于空间流形的数据基底。另一方面,为了让数据可用于城市的政府、企业和市民的决策,服务于城市在目标领域的决策,形成以场景为核心的模拟和协同平台机制,通过叠加多维城市模型进行模拟分析、大模型自我学习迭代和扩展人机交互的方式,提高不同主体的沟通效率和决策的能力,形成自上而下的科学决策与相关政策(见图5)。

6 数字孪生支持规划会商决策的实践

基于苏州城市信息模型(CIM),苏州搭建了数字孪生古城的初步应用版本。基于苏州CIM基础平台的数据和基础功能,对古城更新相关工作进行多场景智能模拟并搭建协同会商机制,旨在辅助提升姑苏区历史文化保护、社会民生和城市更新水平,以及古城数字经济发展,从而提高规划治理的决策水平。

针对古城、街道、社区、地块、建筑的不同尺度,建构起对空间8个维度的度量,如人口、用地、经济、文化、设施、交通、空间(如视廊控制)、建筑,形成张量网络,并加入时间因素(历史、现状、未来),共同建构起识别更新潜力地块的坐标,即流形空间的一种简单表达方式。张量属性来自统计分析、流转表单、物联感知、参数调整等,共同建构个体与集体互动的空间网络。经济账是基于智能模拟的规划决策的重要场景之一。根据更新项目进行精细化建设成本和收益估算,明确项目的投入和产出,进

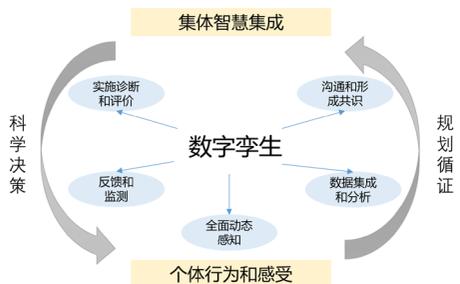


图5 互动反馈规划模式的示意图
Fig.5 Schematic diagram of interactive feedback planning mode

资料来源:笔者自绘。

行项目绩效分析。建设成本估算是根据具体空间生成情况,选择安置补偿方式和货币补偿方式,灵活核算拆迁总费用、配套建设费用,核算总更新成本。收益核算结合项目的地价、楼面价、容积率、使用性质、税金及营收等综合估算项目收益(见图6)。通过模型算法迭代,平台实现自我的古城更新经济政策与空间管控政策的螺旋优化升级。

针对选定的地块,利益相关者可调整参数,定制化自动生成三维模型(见图7),实时对应相关规划设计条件要素值调整,通过直观、可视的三维效果,开展多主体的会商和讨论,提升沟通的效率,有利于政府、公众、企业等多方加入到方案的设计决策中,推动公众参与。这种会商过程又被机器学习,用于相关政策的再评估与迭代。

目前,苏州古城的应用已经实现古城工作底图搭建,对空间、用地、建筑、人口、交通、设施等进行画像,综合进行用地潜力评估,形成多维评估应用模块,以及通过项目管理、辅助选址、设计条件会商、方案管控、方案影响评估等辅助更新决策。并且由于掌握了更精细和个体化的数据,古城微更新方案的三维展示、古城文化的视频与虚拟模型融合等场景将更好地辅助古城保护与更新。虽然这些功能看似辅助“自上而下”的方案制定和管理,但其实古城的应用是通过整合“个体”的更为精细化信息来实现“自下而上”的感知和反馈。比如在历史城区范围内,以建筑(试点区域以房屋)为最小单元,通过地名、地址实现人口、企业法人、公共服务设施、文物保护单位、POI等属性表信息与建筑基底面的关联融合,建筑基底面与建筑实体通过编码进行关联挂接,以丰富三维建筑物信息,为各维度的数据分析统计提供基础,并且在特定的分层分布模型可以挂接人口、权属等信息,服务精细化管理和应用。

7 结语

数字孪生城市的核心是虚实互动,在互动过程中优化参数、协同各方、共享信息。信息技术的发展加快了城市的行为感知、问题反馈、知



图6 预算资金计算
Fig.6 Budget fund calculation

资料来源:苏州市城市信息模型(CIM)基础平台。



图7 规划设计条件会商
Fig.7 Consultation on planning and design conditions

资料来源:苏州市城市信息模型(CIM)基础平台。

识生成和决策行动的过程,人在实体与虚拟城市中的生活生产方式都发生较大变化,体现出更为精细化、敏捷化、多元化的复杂巨系统的特征。同时,我国存量时代需要协调更多的利益相关方,需要达成共识,而数字化方式则可加速协同共识的形成,应对复杂巨系统中可能涌现的“黑天鹅”和“灰犀牛”现象。因此,本文认为数字孪生中强调以人为主体,建构起社会、经济、环境、文化等张量空间网络,通过数字孪生流形空间的参数化互动,支撑利益相关方不断调整和实时反馈城市的各项运行参数,形成以多时空互动反馈支撑的设计生成和以智能模拟及协同平台为支撑的规划辅助决策,推动相关规划治理政策的及时响应与调整,探索“互动生成式”规划治理的新模式。

参考文献 References

- [1] JACOBS J. The death and life of great American cities[M]. New York: Random House, 1961.
- [2] MUMFORD L. The city in history: its origins, its transformations, and its prospects[M]. New York: Houghton Mifflin Harcourt, 1961.
- [3] ALEXANDER C. A city is not a tree[J]. Architectural Forum, 1965, 122(1-2): 58-61.
- [4] BATTY M. New ways of looking at cities[J].

- Nature, 1995, 6550(377): 574.
- [5] HOPKINS L D. Urban development: the logic of making plans[M]. Washington, D. C: Island Press, 2001.
- [6] SHAFTO M, CONROY M, DOYLE R, et al. Modeling, simulation, information technology & processing roadmap[J]. National Aeronautics and Space Administration, 2012, 32: 1-38.
- [7] GRIEVES M, VICKERS J. Digital twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems[M]//KAHLEN J, FLUMERFELT S, ALVES A. Transdisciplinary perspectives on complex systems. New York: Springer, 2017: 85-113.
- [8] 中国测绘学会. 建设数字孪生城市的逻辑与创新思考[EB/OL]. (2021-03-23) [2022-08-20]. https://m.thepaper.cn/baijiahao_11852264. Chinese Society for Geodesy Photogrammetry and Cartography. Logic and innovative thinking on the construction of digital twin city[EB/OL]. (2021-03-23) [2022-08-20]. https://m.thepaper.cn/baijiahao_11852264.
- [9] HALL P. Cities of tomorrow[M]. London: Basil Blackwell, 1998.
- [10] MARTIN L, MARCH L. Urban space and structures[M]. London: Cambridge University Press, 1972.
- [11] ALEXANDER C, ISHIKAWA S, SILVERSTEIN M, et al. A pattern language: towns, buildings, construction[M]. New York: Oxford University Press, 1977.
- [12] HILLIER B. Space is the machine[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.
- [13] BATTY M. The new science of cities[M]. Cambridge, MA: The MIT Press, 2013.
- [14] 冯承天, 余扬政. Riemann流形外微分形式以及纤维丛理论物理学中的几何方法[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2021. FENG Chengtian, YU Yangzheng. Riemannian

- manifolds differential forms, and fiber bundle theory: geometrical methods in physics[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2021.
- [15] 杨滔. 一种城市分区的空间理论[J]. 国际城市规划, 2015, 30(3): 43-52. YANG Tao. A spatial theory of urban parts[J]. Urban Planning International, 2015, 30(3): 43-52.
- [16] KANT I. Kritik der reinen Vernunft[M]. Hamburg: Felix Meiner Verlag, 1998.
- [17] 胡塞尔, 单斌. 自然空间性的现象学起源的基本研究[J]. 中国现象学与哲学评论, 2016(2): 237-257. HU Saier, SHAN Bin. Basic research on the phenomenological origin of natural spatiality[J]. The Phenomenological and Philosophical Research in China, 2016(2): 237-257.
- [18] KLEIN F. Gesammelte Mathematische Abhandlungen Erster Band[M]. Berlin: Verlag von Julius Springer, 1921.
- [19] DUBITZKY W, WOLKENHAUER O, CHO K H, et al. Encyclopedia of systems biology[M]. New York: Springer, 2013.
- [20] 杨滔, 单峰. 复杂系统视角下的城市信息模型(CIM)建构[J]. 未来城市设计与运营, 2022, 10(10): 8-13. YANG Tao, SHAN Feng. Construction of City Information Model (CIM) from the perspective of complex systems[J]. Future City Studies, 2022, 10(10): 8-13.