



地图综合智能化研究的发展与思考

武芳¹ 杜佳威^{1,2} 钱海忠¹ 翟仁健¹

1 信息工程大学地理空间信息学院,河南 郑州,450001

2 航天工程大学航天指挥学院,北京,101416

摘要:地图综合是地图制图和多尺度空间数据变换的核心与关键技术。20世纪60年代以来,数字地图数据的自动综合研究逐渐展开并取得了长足的进步,囿于人工智能技术的限制,地图综合的智能解决方法虽有不少成果,但距离真正的智能化、实用化仍有一定的距离。近年来,以深度学习为代表的人工智能技术应用于诸多研究领域并取得显著成效,地图综合的智能化研究也有诸多新的尝试。首先,在归纳自动地图综合研究模式的基础上,阐述了智能地图综合研究的必要性;然后,结合人工智能发展历程回顾智能地图综合研究,梳理和分析了基于传统机器学习与基于深度学习的智能地图综合研究现状,并归纳了地图综合智能化研究的主要方法;最后,围绕地图综合智能化研究中的几个热点问题,探讨了智能地图综合的发展趋势。

关键词:地图综合;机器学习;深度学习;智能化

中图分类号:P283;P237

文献标志码:A

地图综合的目的是解决缩小、简化的地图表象与实地复杂现实之间的矛盾^[1],涵盖了利用大比例尺地图派生小比例尺地图的全过程。

20世纪60年代,计算机数字制图的开展使得地图学界萌发出利用计算机编程实现自动地图综合的想法,这一想法成为日后最具挑战性的研究难题之一。近60年来,地图综合效果、自动化程度都有了显著提高,自动地图综合理论与方法也取得了巨大进展。国内外学者已经开展过一些对于自动地图综合研究进展梳理、总结的综述。如通过对早期计算机辅助自动综合研究的基本问题进行梳理,针对早期点、线、面要素几何层次的自动综合方法进行回顾和总结^[2];从地图综合的定量描述、自动综合的模型算法和知识、自动综合的人机交互、自动综合的过程控制和质量保证等方面展开重点论述的自动综合研究进展^[3];回顾1966—2006年自动地图综合的发展历程,对具有代表性的自动综合模型、自动综合过程、自动综合算子与算法等进行梳理与评述^[4];对模型综合时代和数字综合时代下具有代表性的自动综合理论、观念、技术的演进与变化进行分析与总结^[5];按地图综合处理流程组织自动综合

研究内容,系统回顾综合知识的分类与获取、综合的算子与算法、质量评价、过程建模与控制等方面的地图综合研究进展^[6]等。这些综述性文献分别从不同视角对地图自动综合进行了梳理、总结与展望。

近年来,随着人工智能技术的快速发展,利用人工智能理论与方法学习、模拟地图综合的智能化研究得到展开。本文在分析现有地图综合研究方法的基础上,指出数据驱动的智能地图综合研究的必要性,并回顾智能地图综合的研究历程,分析智能地图综合研究现状,归纳智能地图综合研究思路,进一步探讨智能地图综合研究的发展趋势。

1 智能地图综合研究的必要性

1.1 “自上而下”的经典自动综合模式

长期以来,自动地图综合研究采用“自上而下”的研究模式,如图1所示,即通过人为模拟地图综合任务实现自动化应用。首先,通过观察、记录、分析地图综合任务,人为地提取、总结、抽象出与地图综合任务相适应的、明确的地图综合知识;然后,将人为明确的地图综合知识翻译成

收稿日期:2021-12-20

项目资助:国家自然科学基金(41801396);河南省自然科学基金杰出青年基金(212300410014)。

第一作者:武芳,博士,教授,主要从事自动地图综合与空间数据智能处理研究。wufang_630@126.com

通讯作者:杜佳威,博士,讲师。whdxdjw@126.com

计算机能够处理的地图综合约束,以此控制、指导方法过程设计;最后,利用程序语言对构建的约束过程进行编译,实现对地图综合任务的自动化模拟。这种模式能够确保地图综合知识应用的有效性和自动化过程的可控性,符合人类对任务模拟的认知过程,具有良好的可解释性,很多经典地图综合问题都采用此模式进行自动化研究。例如,分析认知规律、总结制图经验发现,人工化简线要素时常以弯曲作整体单元进行处理,由此产生了很多具有代表性的基于弯曲的线要素自动综合方法^[7-11];结合具体应用场景和编绘规范,特殊线要素综合还要顾及专门的几何约束和地理约束,由此产生了专门针对某些线要素的特殊弯曲综合方法^[12-16]。

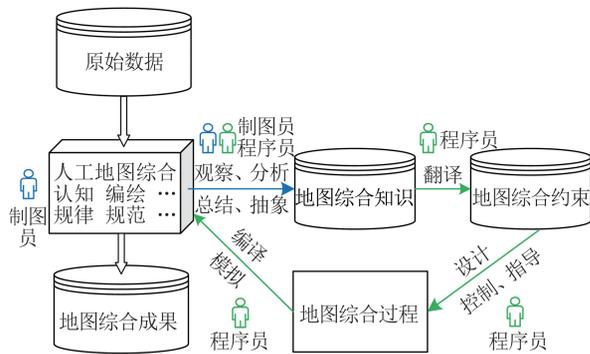


图1 “自上而下”的经典自动综合研究模式

Fig. 1 Classic Map Generalization Model Based on Manual Simulation

经典自动地图综合模式利用可理解的地图综合知识约束自动化过程,通过“知识—约束—过程—结果”的层层递进,“自上而下”地模拟地图综合。然而,地图综合知识获取(图1蓝色流程)及其在“知识—约束—过程—结果”传递过程(图1绿色流程)中不可避免的完备性和准确性损失,导致“自上而下”地实现自动地图综合存在瓶颈,主要表现在以下两个方面:

1)人为明确的综合知识难以全面、准确地描述地图综合任务。地图综合知识体量庞大、错综复杂、应用灵活,更隐含于制图员的经验认识、主观感受和具体行为中,即使通过调查问卷、现场访谈、观察记录法、眼动实验等手段能够将部分模糊知识明确化、客观化,但未必足够准确,也几乎无法穷尽,更难以厘清知识间的相互影响。

2)地图综合知识传递过程中不可避免地存在损失。利用地图综合知识设计、实现约束驱动的地图综合自动化过程中,受程序员对地图综合知识认识的局限性以及方法过程设计的多样性

影响,“自上而下”实现的自动地图综合未必对已知地图综合知识进行了准确、全面的利用。

1.2 “自下而上”的智能地图综合模式

利用人工智能技术从地图综合成果中学习、模拟地图综合成为突破经典自动综合模式瓶颈的关键。这种数据驱动的“自下而上”的智能地图综合模式如图2所示,即利用人工智能技术从地图综合成果中发现地图综合知识、学习地图综合任务,使学习后的智能体能够对地图综合任务进行自动化模拟。该模式减少了人的主观干预,增强了自动地图综合的客观性和适应性。特别是人工智能技术拉近了从人工地图综合到自动地图综合的距离。人工智能技术既能够从数据成果中发现机器可理解的地图综合知识,又能够利用这些知识指导地图综合的学习模拟;既缓解了人为提取地图综合知识的不完备性,又降低了人为设计约束过程的主观性;既发挥了其对解决非线性问题的优势,又利用了其对人类心智、行为活动的学习模拟能力。因此,数据驱动的智能地图综合研究具有理论必然性。

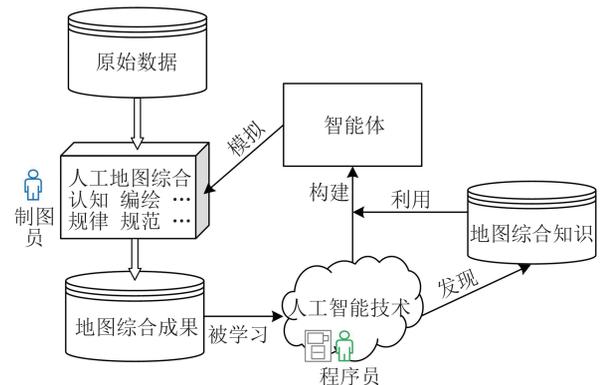


图2 “自下而上”的智能地图综合研究模式

Fig. 2 Intelligent Map Generalization Model Based on Data Driving

2 智能地图综合的研究历程

人工智能起源于1956年的达特茅斯会议,其发展历程跌宕起伏^[17],其中,深度学习的提出^[18]引发了前所未有的人工智能研究浪潮,具有里程碑意义。人工智能与地理信息科学研究相结合,形成以地理空间人工智能(geospatial artificial intelligence, GeoAI)为代表的诸多研究成果^[19],也引发了智能地图制图的诸多思考^[20-22]。本文以深度学习为分界点,系统梳理基于传统机器学习和基于深度学习的智能地图综合研究成果,归纳当前智能地图综合的两种研究思路。

2.1 基于传统机器学习的智能地图综合研究

从人工智能的提出到深度学习的应用,60多年的人工智能研究中涌现出很多经典机器学习方法^[23],常用的方法见表1。传统机器学习方法实现便捷、效果稳定,已应用于地图综合研究的各个方面。本文从地图综合知识获取、算子和算法、过程控制和质量评价4个方面,回顾基于传统机器学习的智能地图综合研究成果。

表1 常用的传统机器学习方法

Tab.1 Frequently-Used Traditional Machine Learning Methods

中文名称	英文名称	缩写
主成分分析	principal component analysis	PCA
决策树模型	decision tree	DT
支持向量机	support vector machine	SVM
朴素贝叶斯模型	naive Bayesian model	NBM
K均值	K-means clustering algorithm	K-Means
K邻近	K-nearest neighbor	K-NN
遗传算法	genetic algorithm	GA
蚁群模型	ant clony optimization	ACO
反馈型神经网络	back propagation neural network	BPNN
自组织映射	self-organizing map	SOM

2.1.1 地图综合知识获取

地图综合知识获取旨在识别、发现地图综合知识。利用传统机器学习方法,能够从地图数据成果中发现影响地图综合的数据特征知识和综合过程知识。

数据特征知识包含影响地图综合的形态特征、分布特征和语义特征。例如,利用K-Means进行非监督学习,可实现对不同形态特征线要素的识别与区分^[24-25],为线要素综合算法选择和设计提供了必要的形态特征知识。利用随机森林来区分影响建筑群综合的不同空间分布模式^[26];基于道路网眼特征分别构建SOM、DT、PCA分类器^[27-29],或基于离散化弧段特征学习构建SVM分类器^[30],用来识别道路网的网格分布模式;通过构建NBM分类器,用来区分河网的主支流分布^[31]等,这些方法都为建筑群、路网、河网综合提供分布特征知识。而利用SVM、DT识别不同建筑群的功能类型^[32],利用SOM提取平行道路^[33],基于SVM识别天桥主桥^[34],则为居民地、道路网综合提供了必要的语义信息支撑。

综合过程知识是指影响地图综合过程中涉及的约束、原则以及它们的组织、结构、顺序等。文献[35]认为利用DT学习地图综合过程知识具

有可行性,文献[36]利用DT、SVM等传统机器学习方法从数据成果中挖掘居民地选取中的隐含原则,实现了地图综合过程知识的推理发现。

2.1.2 地图综合算子和算法

不同学者划分的地图综合算子并不相同,本文围绕地图综合最常用的选取、化简、移位算子^[6]梳理基于传统机器学习的地图综合算子和算法研究现状。

1) 选取

选取算子通过有选择地删除一些对象达到综合、概括的目的,选取可以看作是个体依据其包含的地图综合相关特征执行的取舍二分类任务。机器学习方法适于处理分类任务^[23],特别是传统机器学习算法在二分类任务中的应用广泛,效果良好。因此,基于要素几何、拓扑、语义等特征,利用传统机器学习方法构建、学习、拟合要素取舍决策的选取算子研究相对较多,在点群、面群、线网选取中都有所尝试。

针对点群要素选取,包括基于GA的点群选取模型^[37]、基于BPNN的水深选取监督学习方法^[38]以及利用SOM实现的点状居民地选取的非监督学习方法^[39]。针对面群要素选取,以面状居民地为研究对象,包括利用DT、K-NN、PCA学习构建的面状居民地选取模型^[40-42],以及利用DT、K-NN、NBM、SVM等经典机器学习方法在面状居民地选取中的应用效果研究^[43];类似地,传统机器学习方法在设计面状湖泊群选取算子^[44]中也有所应用。针对线网选取,以道路网为研究对象,包括基于道路特征构建BPNN、DT的取舍模型^[45-46]和基于Stroke特征构建的BPNN、SVM取舍模型^[47-48],这些方法分别实现了对道路取舍的监督学习;而道路取舍的非监督学习则有学者利用SOM来实现^[49];至于不同学习方式的诸多传统机器学习方法对道路取舍的学习模拟效果,也有学者对其进行了验证比较^[50-51]。另外,传统机器学习方法在河网选取^[52]中也有所尝试。

2) 化简

化简算子相对复杂,包含几何形态化简及其基础上的空间结构化简。

几何形态化简研究相对较多^[6],当前基于传统机器学习的几何形态化简算法研究大体分为矢量思路和栅格思路两种。矢量思路通过对构成待化简对象矢量单元处理过程的学习模拟,设计、实现化简算法。根据矢量单元处理过程不同,还可进一步细分:(1)将化简过程抽象为顶

点、弯曲的取舍过程,利用传统机器学习方法拟合取舍任务,例如,利用GA^[53]、ACO^[54]、SVM^[55]学习拟合顶点或弯曲取舍任务实现化简;(2)将化简过程抽象为顶点、弯曲的聚类过程,利用传统机器学习算法解决聚类问题,如利用SOM实现基于顶点特征的自适应聚类达到化简的目的^[56]。栅格思路利用机器学习在栅格数据处理中的优势,基于矢栅转换、从栅格层次学习模拟化简过程,设计、实现化简算法,如利用移动窗口追踪居民地轮廓、截取栅格图像,使用BPNN学习构建从局部图像到窗口移动方向的映射,通过追踪移动窗口实现单个居民地轮廓化简^[57]。

空间结构化简以合并、典型化为主,当前基于传统机器学习的空间结构化简算法研究集中于居民地的结构化简。合并将地图综合知识约束下的多个相似个体聚类成一个整体,实现空间结构的简化。例如,考虑合并过程中邻近距离约束的基于智能体的居民地合并算法^[58];基于SOM聚类居民地的无监督学习合并算法^[59];顾及空间认知理论量化影响合并的居民地特征,利用SVM所实现的基于居民地特征的监督学习合并算法^[60]等。典型化通过具有相同空间结构的少量新对象实现对原始对象典型结构的简化表达,基于机器学习的聚类方法具有自适应性,利用结构特征保持,可用于典型化算法的设计。例如,将SOM、邻近传播等聚类算法应用于建筑物的典型化研究^[61-62]。

3) 移位

移位算子通过调整对象位置以达到避免冲突、良好表达的可视化要求。移位的影响具有传递性,具有自适应优化能力的机器学习方法适于对象移位的调整和优化。一些传统机器学习中的优化算法已用于移位算法研究,如利用梯度下降、模拟退火来设计和优化移位算法^[63]、利用遗传算法及其改进方法^[64-66]等。

2.1.3 地图综合过程

地图综合过程研究旨在把零散的综合算法有效地组织起来。从算子层次看,利用传统机器学习方法能够自适应地协调、控制同一综合算子的不同综合算法,得到更优的综合结果。例如,利用BPNN实现对建筑物化简算法进行最优选择的监督学习^[67],利用K-Means实现对曲线弧段与恰当化简算法匹配的非监督学习^[68],基于案例推理而实现的对不同化简算法的参数寻优^[69]等,这些研究通过协调化简算法、控制化简过程优化

了化简算子。从整体上看,地图综合过程需要多算子的协同参与和协调控制。具有自治性、社会性、反映性、能动性的经典人工智能研究成果——智能体(Agent),为协同算子、控制综合过程提供了研究思路。20世纪90年代,法国地理信息学会联合多家机构设置了利用Agent建模、控制多要素、多算子协同综合的过程研究项目^[70],产生了一些具有代表性的研究成果,如避免冲突的Agent协作机制^[71]、基于多Agent协同综合模型^[72]等。除Agent技术外,有学者设计了一种基于监督学习的线要素综合过程控制策略,基于DT协调化简、夸大、光滑等线要素综合过程^[73]。

2.1.4 地图综合质量评价

当前,基于机器学习的质量评价研究很少,以利用传统机器学习方法整合多种量化评价指标的定性评价研究为主。文献[74]利用DT整合了几种建筑物直线排列相关的量化指标,从“很好、好、中、差、很差”5个层次定性评价了建筑物直线排列效果;文献[75]利用BPNN构建从道路属性、形态变化等量化指标到人工评价的映射,实现了对道路综合结果认知评价的拟合;文献[76]利用SVM学习拟合了从信息量、空间分布特征、对象复杂度、图像分辨率等量化指标到地图清晰易读与否的映射,可用于全要素地图综合结果的定性评价。

2.2 基于深度学习的智能地图综合研究

深度学习作为机器学习的深层次发展^[17],具有更深的层次、更复杂的结构和更强的学习能力。深度学习是机器学习的一个子领域,它使用了多层次的非线性信息处理和抽象,用于有监督或无监督的特征学习、表示、分类和模式识别。基于深度学习的智能地图综合研究刚刚起步,主要集中于地图综合知识获取和地图综合算子研究。表2所示的深度学习神经网络及代表性模型相对成熟^[77-80],已用于地图综合智能化研究。

地图综合知识获取上,以研究利用深度学习识别、提取影响地图综合的数据特征为主,主要体现在三类不同深度学习模型的应用:(1)顾及CNN在图像处理、目标检测中的良好应用^[77],基于矢栅转换,利用CNN从栅格数据中识别、区分对象几何、语义的差异性,获取影响地图综合的几何、语义特征。如利用AlexNet从矢量数据中提取的包含立交桥的栅格图像中区分出不同类型的立交桥^[81];利用构建的CNN和Unet从二值化的栅格道路网中识别、分割、提取公路路口及路口组

成^[82];利用 CAE 提取栅格建筑的特征编码、识别具有典型形态特征的建筑物^[83]等。(2)顾及 GNN 在图分类、模式识别中的应用良好^[78],基于图结构建模矢量数据,利用 GCN 从中识别、区分对象形态、分布的差异性,发现隐含于矢量数据中的地图综合知识。如通过对建筑物进行图结构建模,利用 GCN、GCAE 区分不同形态的建筑物^[84];

通过对建筑群、道路网进行图结构建模,利用 GCN 展开面向地图综合的建筑群、道路网空间分布模式识别研究^[85-88]。(3)顾及 RNN 在时序数据处理中的良好应用^[78],将矢量数据转换为序列数据,利用 RNN 学习、发现地图综合知识。如将建筑物边界进行序列化建模,利用 Seq2Seq 提取特征编码,用于区分不同形态的建筑物^[89]。

表 2 常用的深度学习模型

Tab.2 Frequently-Used Deep Learning Models

神经网络	英文名称	缩写	代表性模型
卷积神经网络 ^[77]	convolutional neural network	CNN	AlexNet、CAE、Unet、ResUnet、Unet++
图卷积神经网络 ^[78]	graph neural network	GNN	GCN、GCAE
循环神经网络 ^[79]	recurrent neural network	RNN	LSTM、Seq2Seq
生成对抗网络 ^[80]	generative adversarial network	GAN	Pix2Pix、CycleGAN

地图综合算法研究大都采用了矢栅转换、栅格学习的研究思路。顾及地图综合过程与编解码过程的可类比性^[90],具有编解码结构的深度神经网络常用于地图综合算法研究。例如,利用 Unet 学习模拟单个建筑物综合前后的栅格图像变换^[21];利用 ResUnet 模拟综合前后栅格建筑群地图瓦片的图像变换^[91];顾及综合尺度设计栅格样本剖分、提取方法,从而实现对几种具有编解码结构的深度学习模型模拟建筑群综合前后图像变换效果的比较^[90];顾及卷积神经网络需要和线要素特征设计栅格样本剖分、提取方法,利用 ResUnet、Pix2Pix 模拟线要素综合前后的图像变

换^[92-93],形成了基于卷积神经网络的线要素智能综合方案及相应矢量综合结果,等等。此外,直接从矢量数据及其特征中学习地图综合算法的深度学习研究也得到初步开展。例如,抽象道路网图结构,利用具有不同结构的 GCN 构建道路网智能选取方法^[94]。

2.3 智能地图综合的两种研究思路

智能地图综合大致有两种实现思路,如图 3 所示。一种是特征学习思路,即通过学习人为抽象出与任务相关的量化特征拟合地图综合任务(图 3(a));另一种是数据学习的策略,即通过学习结构化数据拟合地图综合任务(图 3(b))。

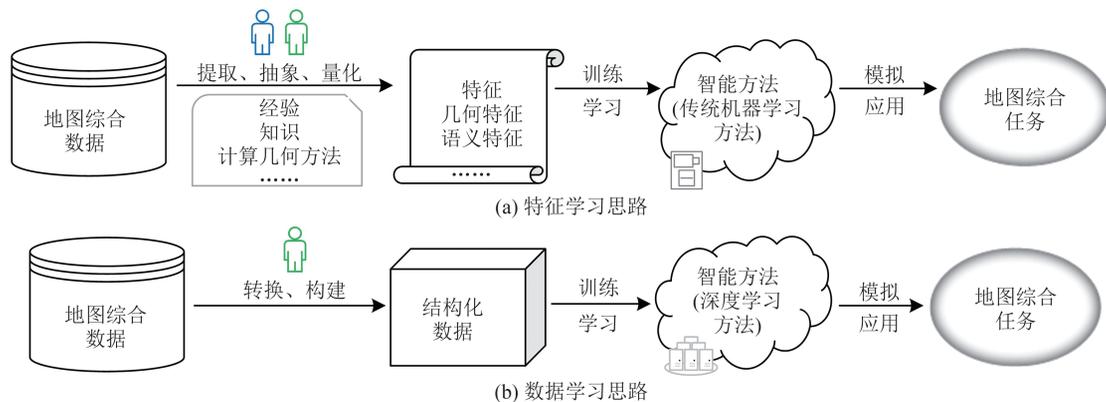


图 3 智能地图综合的两种研究思路

Fig. 3 Two Research Approaches of Intelligent Map Generalization

特征学习需要人为提取、抽象、量化与地图综合任务相关的特征,具有一定的主观性和不完备性,但缓解了机器学习的难度,强化了智能地图综合的可控性和可解释性;且人为抽象的特征种类不会很多,利用成熟稳定、效率较高的传统机器学习算法即可有效拟合。因此,特征学习思

路常见于基于传统机器学习的地图综合研究。数据学习避免了人为抽象特征的主观性和不完备性影响,通过学习大量结构化的数据成果拟合地图综合任务,充分发挥机器学习能动性和数据驱动主体性,但学习难度很大,需要采用学习能力很强的深度学习模型;且过于依赖深度学习模

型,导致智能地图综合的可控性和可解释性都较弱。因此,数据学习思路常见于基于深度学习的地图综合研究。

3 智能地图综合研究的几点思考

人工智能研究中,以人工智能为支撑的智能地图综合研究也出现了很多热点议题,下面围绕“基于什么数据”“选择什么方法”“采用什么策略”几个焦点议题探讨智能地图综合发展趋势。

3.1 矢量数据、栅格数据和时空大数据

数字制图环境下的地图综合旨在处理矢量数据,随着图像处理技术的进步和数据转换技术的成熟,矢栅转换基础上的栅格数据处理技术也应用于地图综合研究^[95-98];进一步地,随着深度学习技术在图像处理中的不断突破,直接实现从遥感影像到地图瓦片、到多级瓦片的栅格地图变换研究也得到尝试^[99-102],从矢量还是栅格层次研究智能地图综合值得探讨。

矢量数据便于计算分析,适用于特征学习的智能地图综合研究;栅格数据方便与众多图像处理深度学习模型结合,推动了数据学习的智能地图综合研究。大多数的智能地图综合研究都是对矢量数据的学习模拟,即使通过矢栅转换、进行栅格数据学习的智能地图综合研究基本也会回到矢量要素。矢量数据的学习处理符合数字地图自动化生产的整体流程,在可预见的未来仍是智能地图综合研究的出发点和落脚点。栅格数据作为中间数据或补充数据,也能使快速升级的图像处理深度学习模型应用于智能地图综合研究^[103]。基于栅格数据学习的多级瓦片地图生成成为快速制图提供了新思路,虽然在制图效果和地图应用上都有局限,但也值得期待。

多源时空大数据中,各类数据来源不一,格式多样,特别是尺度繁多,给尺度表达带来了新挑战。传统地理空间数据的系列比例尺概念(如1:1万、1:5万、1:25万等)已经不能满足时空大数据尺度表达要求。时空大数据需要任意尺度表达、多尺度共存的新局面。

3.2 传统机器学习方法和深度学习方法

传统机器学习方法和深度学习方法在地图综合智能化研究中都有所应用,随着机器学习向深度学习进阶,地图综合智能化研究中,深度学习是否能够取代传统机器学习值得思考。

通常认为深度学习优于传统机器学习,特别是在特征提取、模式识别中深度学习应用效果良

好。60多年的地图综合研究明确了不少地图综合问题的影响因素,当综合问题的特征描述足够准确时,简单的机器学习方法即可取得不错的学习模拟效果,深度学习在消耗大量计算资源后未必能进一步优化综合效果。地图综合智能化不仅要依赖于深度更深、结构更加复杂的深度学习模型,还要思考如何利用已知综合知识、综合规律、综合方法实施更加可靠的特征工程。因此,无论是传统机器学习还是深度学习,都可能在地图综合智能化中起到良好效果。

3.3 有约束和无约束的智能化策略

通常认为,地图综合是明确知识和模糊知识协同指导下的线性、非线性混合任务,利用明确知识约束地图综合的学习模拟过程能够优化智能地图综合效果。但是,对确定明确知识的可靠性、合理性和适应性的疑虑和对智能方法鲁棒性、实用性和不可解释性的认同,削弱了剥离明确知识、约束智能地图综合的必要性,是否需要利用已有知识约束智能地图综合过程也存在不同看法。

有约束的智能地图综合实现策略仍是主流,特别是在智能方法学习能力有限、模拟准确度不高的情况下,引入已知地图综合知识能够简化综合任务、优化学习效果、避免常识性错误等。基于传统机器学习的智能地图综合研究大都需要已有知识干预、指导和约束,随着深度学习的引入,依赖强大的智能方法从海量数据成果中学习、模拟地图综合任务的无约束策略也得到初步实践。随着地图综合和人工智能研究的双线推进,既需要思考如何通过更加多元的方式向智能综合中引入先验知识约束“不太可靠”的智能方法,增强智能地图综合的可解释性^[104-105];也期待更先进的智能方法在地图综合智能化中尝试、改进,从海量成果数据中学习发现机器可知、可用的“知识”,并自发拟合地图综合任务。

4 结 语

总体而言,对地图综合来说,人工智能并不是一个新事物。地图综合本身就需要人类的抽象、概括、归纳等智能化行为。人工智能作用于地图综合的最终目的,是实现全自动综合,也就是说智能综合发展的终极目标是地图自动综合。目前的人工智能还处于感知智能阶段,这是一种大数据驱动统计学习方法,因此当前地图综合

智能化研究大都集中于识别、分类等基础感知任务的学习模拟,表现为面向地图综合的数据特征识别研究相对较多,还需要在地图综合样本提取^[106]、样本库构建维护机理^[107]、智能综合效率效果的平衡等方面进行深入探讨。

如今的深度学习对于感知(相对简单的比对和识别)而言虽然是成功的,但是还存在问题,不仅需要大规模人工标注的高质量样本数据,而且缺乏高级认知能力如推理、解释能力等。随着下一代人工智能(认知智能)的发展,其核心将向推进统计与知识推理融合、与脑认知融合的方向发展,因此,高质量超大规模知识图谱的构建、具有知识理解能力的面向认知的深度学习算法,是未来研究的重点。地图综合作为一种复杂的专业心智行为,更需要对演绎、推理等高级认知任务的拟合。深度学习与知识图谱结合能够强化智能方法的推理能力,使研究更加高级的具有认知智能的地图综合成为可能^[108-110]。坚持跨界(学科)学习与合作,结合脑神经科学^[111]研究地图综合认知机理,并改进、创造适合地图综合认知智能方法,期待从被动借鉴其他领域智能方法到主动设计地图综合智能方法能够取得突破。

当前,人工智能的研究还在继续发展,还远没达到人类智能的高度。不管是人工智能,还是地图综合,都需要齐头并举,既要借助人工智能外部力量,也要进一步加强地图综合新理论、方法和技术的内生基础创新。

参 考 文 献

- [1] Wang Jiayao, Sun Qun, Wang Jiangxia. Theories and Methods of Cartography [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2014 (王家耀, 孙群, 王江霞. 地图学原理与方法 [M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2014)
- [2] Brassel K E, Weibel R. A Review and Conceptual Framework of Automated Map Generalization [J]. *International Journal of Geographical Information Systems*, 1988, 2(3): 229-244
- [3] Wang Jiayao. The Progress and Trend of Automatic Generalization of Spatial Data [J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2008, 25(1): 1-7 (王家耀. 空间数据自动综合研究进展及趋势分析 [J]. 测绘科学技术学报, 2008, 25(1): 1-7)
- [4] Li Z L. Digital Map Generalization at the Age of Enlightenment: A Review of the First Forty Years [J]. *The Cartographic Journal*, 2007, 44(1): 80-93
- [5] Cebrykow P. Cartographic Generalization Yesterday and Today [J]. *Polish Cartographical Review*, 2017, 49(1): 5-15
- [6] Wu Fang, Gong Xianyong, Du Jiawei. Overview of the Research Progress in Automated Map Generalization [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10): 1645-1664 (武芳, 巩现勇, 杜佳威. 地图制图综合回顾与展望 [J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1645-1664)
- [7] Lecordix F, Plazanet C, Lagrange J P. A Platform for Research in Generalization: Application to Caricature [J]. *GeoInformatica*, 1997, 1(2): 161-182
- [8] Ai Tinghua, Guo Renzhong, Liu Yaolin. A Binary Tree Representation of Curve Hierarchical Structure in Depth [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2001, 30(4): 343-348 (艾廷华, 郭仁忠, 刘耀林. 曲线弯曲深度层次结构的二叉树表达 [J]. 测绘学报, 2001, 30(4): 343-348)
- [9] Guo Qingsheng, Huang Yuanlin, Zhang Liping. The Method of Curve Bend Recognition [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2008, 33(6): 596-599 (郭庆胜, 黄远林, 章莉萍. 曲线的弯曲识别方法研究 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2008, 33(6): 596-599)
- [10] Peng Dongliang, Deng Min, Liu Huimin. Morphing Transformation of Linear Features by Using Independent Bend Structures more Sufficiently [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2014, 43(6): 637-644 (彭东亮, 邓敏, 刘慧敏. 更充分利用独立弯曲结构的线状要素 Morphing 变换方法 [J]. 测绘学报, 2014, 43(6): 637-644)
- [11] Du Jiawei, Wu Fang, Gong Xianyong, et al. Progressive Line Simplification Approach Based on the Double-Oblique-Dividing-Curve Method [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2017, 22(10): 1455-1466 (杜佳威, 武芳, 巩现勇, 等. 采用双向斜拉式弯曲划分的曲线渐进化简方法 [J]. 中国图象图形学报, 2017, 22(10): 1455-1466)
- [12] Li J H, Wu F, Gong X Y, et al. Depth Contour Smoothing Based on the Fitting of Multi-Segment Bezier Curves [J]. *Marine Geodesy*, 2018, 41(4): 382-404
- [13] He Haiwei, Qian Haizhong, Wang Xiao, et al. Avoiding Special Conflicts in Road Simplification by Using Road Bends [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016, 45(3): 354-361 (何海威, 钱海忠, 王骁, 等. 采用弯曲进行道路化简冲突避免的方法 [J]. 测绘学报, 2016, 45(3): 354-361)
- [14] Li Wenjing, Qiu Jia, Lin Zhiyong, et al. Approach of Curve Bends Recognition and Contour Cluster Structuralization [J]. *Acta Geodaetica et Carto-*

- graphica Sinica*, 2013, 42(2): 295-303 (李雯静, 邱佳, 林志勇, 等. 曲线弯曲识别与等高线簇结构化方法[J]. 测绘学报, 2013, 42(2): 295-303)
- [15] Zhang Lihua, Tang Lulu, Jia Shuaidong, et al. A Collaborative Simplification Method for Multiple Coastlines Based on the Hierarchical Triangulation Network Partition [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2019, 48(4): 520-531 (张立华, 唐露露, 贾帅东, 等. 多条海岸线协同化简的层次化三角网分区法[J]. 测绘学报, 2019, 48(4): 520-531)
- [16] Du J W, Wu F, Xing R X, et al. An Automated Approach to Coastline Simplification for Maritime Structures with Collapse Operation[J]. *Marine Geodesy*, 2021, 44(3): 157-195
- [17] China Electronic Standardization Institute. White Paper on Artificial Intelligence Standardization [R/OL]. [2018-01-24]. <http://www.cesi.cn/201801/3545.html> (中国电子技术标准化研究院. 人工智能标准化白皮书[R/OL]. [2018-01-24]. <http://www.cesi.cn/201801/3545.html>)
- [18] Hinton G E, Salakhutdinov R R. Reducing the Dimensionality of Data with Neural Networks [J]. *Science*, 2006, 313(5786): 504-507
- [19] Gao Song. A Review of Recent Researches and Reflections on Geospatial Artificial Intelligence [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(12): 1865-1874 (高松. 地理空间人工智能的近期研究总结与思考[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(12): 1865-1874)
- [20] Wang Jiayao. Cartography in the Age of Spatio-Temporal Big Data [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10): 1226-1237 (王家耀. 时空大数据时代的地图学[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1226-1237)
- [21] Touya G, Zhang X, Lokhat I. Is Deep Learning the New Agent for Map Generalization? [J]. *International Journal of Cartography*, 2019, 5(2/3): 142-157
- [22] Ai Tinghua. Some Thoughts on Deep Learning Enabling Cartography [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2021, 50(9): 1170-1182 (艾廷华. 深度学习赋能地图制图的若干思考[J]. 测绘学报, 2021, 50(9): 1170-1182)
- [23] Mehryar M, Afshin R, Ameet T. Foundations of Machine Learning [M]. Massachusetts: MIT Press, 2018
- [24] García-Balboa J L, Ariza-López F J. Generalization-Oriented Road Line Classification by Means of an Artificial Neural Network [J]. *GeoInformatica*, 2008, 12(3): 289-312
- [25] Plazanet C, Bigolin N M, Ruas A. Experiments with Learning Techniques for Spatial Model Enrichment and Line Generalization [J]. *GeoInformatica*, 1998, 2(4): 315-333
- [26] He Y K, Ai T H, Yu W H, et al. A Linear Tessellation Model to Identify Spatial Pattern in Urban Street Networks [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2017, 31(8): 1541-1561
- [27] Tian Jing, Zhang Boyu, Yang Wenyu. Grid Pattern Recognition Based on Clustering of Self-Organizing Maps [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(11): 1330-1334 (田晶, 张泊宇, 杨雯雨. 对自组织映射聚类实现道路网网格模式识别[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2013, 38(11): 1330-1334)
- [28] Tian Jing, Ai Tinghua, Ding Shaojun. Grid Pattern Recognition in Road Networks Based on C4.5 Algorithm [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2012, 41(1): 121-126 (田晶, 艾廷华, 丁绍军. 基于C4.5算法的道路网网格模式识别[J]. 测绘学报, 2012, 41(1): 121-126)
- [29] Tian Jing, He Qiu, Zhou Mengjie. Grid Pattern Recognition in Road Network Using Principal Component Analysis [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(5): 604-607 (田晶, 何迺, 周梦杰. 运用主成分分析识别道路网中的网格模式[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2013, 38(5): 604-607)
- [30] He X J, Zhang X C, Xin Q C. Recognition of Building Group Patterns in Topographic Maps Based on Graph Partitioning and Random Forest [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2018, 136: 26-40
- [31] Duan Peixiang, Qian Haizhong, He Haiwei, et al. Naive Bayes-Based Automatic Classification Method of Tree-Like River Network Supported by Cases [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2019, 48(8): 975-984 (段佩祥, 钱海忠, 何海威, 等. 案例支撑下的朴素贝叶斯树状河系自动分级方法[J]. 测绘学报, 2019, 48(8): 975-984)
- [32] Steiniger S, Lange T, Burghardt D, et al. An Approach for the Classification of Urban Building Structures Based on Discriminant Analysis Techniques [J]. *Transactions in GIS*, 2008, 12(1): 31-59
- [33] Zhang Yuan, Li Jingzhong, Shuai Yun. Identifying Major Structures of Urban Roads Using Self-Organizing Map Networks [J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2018, 41(10): 27-29 (张

- 圆,李精忠,帅赞.使用自组织映射网络识别城市道路主要结构[J].测绘与空间地理信息,2018,41(10):27-29)
- [34] Ma Chao, Sun Qun, Chen Huanxin, et al. The Recognition of Overpass in Volunteered Geographic Information[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(2): 246-252 (马超,孙群,陈换新,等.志愿者地理信息中天桥的自动识别方法[J].测绘学报,2017,46(2):246-252)
- [35] Sester M. Knowledge Acquisition for the Automatic Interpretation of Spatial Data[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2000, 14(1): 1-24
- [36] Karsznia I, Weibel R. Improving Settlement Selection for Small-Scale Maps Using Data Enrichment and Machine Learning[J]. *Cartography and Geographic Information Science*, 2018, 45(2): 111-127
- [37] Deng Hongyan, Wu Fang, Qian Haizhong, et al. A Model of Point Cluster Selection Based on Genetic Algorithms [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2003, 8(8): 970-976 (邓红艳,武芳,钱海忠,等.基于遗传算法的点群目标选取模型[J].中国图象图形学报,2003,8(8):970-976)
- [38] Wang Jiayao, Tian Zhen. The Cartographic Generalization of Soundings on Chart by Artificial Neural Network Techniques[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 1999, 28(4): 335-339 (王家耀,田震.海图水深综合的人工神经网络方法[J].测绘学报,1999,28(4):335-339)
- [39] Zhong Ji, Qian Haizhong, Wang Xiao, et al. SOM Clustering Selection Algorithm of Hash-Style Settlements Considering Multiple Characters[J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2020, 37(6): 643-651 (钟吉,钱海忠,王骁,等.顾及多特征的散列式居民地SOM聚类选取算法[J].测绘科学技术学报,2020,37(6):643-651)
- [40] He Haiwei, Qian Haizhong, Liu Chuang, et al. Auto Generalization of Settlement by Using Decision Tree Algorithm [J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2016, 33(6): 623-628 (何海威,钱海忠,刘闯,等.采用决策树算法进行居民地自动综合[J].测绘科学技术学报,2016,33(6):623-628)
- [41] Xie Limin, Qian Haizhong, He Haiwei, et al. A Habitation Selection Method by Using Case-Based Reasoning[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(11): 1910-1918 (谢丽敏,钱海忠,何海威,等.基于案例推理的居民地选取方法[J].测绘学报,2017,46(11):1910-1918)
- [42] Hu Huiming, Qian Haizhong, He Haiwei, et al. Auto-Selection of Areal Habitation Based on Analytic Hierarchy Process[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2016, 39(4): 41-45 (胡慧明,钱海忠,何海威,等.采用主成分分析法的面状居民地自动选取[J].测绘与空间地理信息,2016,39(4):41-45)
- [43] Lee J, Jang H, Yang J, et al. Machine Learning Classification of Buildings for Map Generalization [J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2017, 6(10): 309
- [44] Duan Peixiang, Qian Haizhong, He Haiwei, et al. A Lake Selection Method Based on Dynamic Multi-Scale Clustering [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(10): 1567-1574 (段佩祥,钱海忠,何海威,等.一种基于动态多尺度聚类的湖泊选取方法[J].武汉大学学报·信息科学版,2019,44(10):1567-1574)
- [45] Cai Yongxiang, Guo Qingsheng. Method for Streets Progressive Selection Based on Neural Network Techniques [J]. *Journal of Geomatics*, 2008, 33(5): 24-26 (蔡永香,郭庆胜.基于神经网络的街道渐进式选取[J].测绘信息与工程,2008,33(5):24-26)
- [46] Guo Min, Qian Haizhong, Huang Zhishen, et al. Intelligent Road Network Selection Method Based on Cases Inductive Reasoning [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2013, 18(10): 1343-1353 (郭敏,钱海忠,黄智深,等.采用案例归纳推理进行道路网智能选取[J].中国图象图形学报,2013,18(10):1343-1353)
- [47] Li Jin. Study on the Road Network Selection Methods Based on the BP Neural Network [D]. Nanjing: Nanjing University, 2014 (李进.基于BP神经网络的道路网选取方法研究[D].南京:南京大学,2014)
- [48] Liu Kai. Research on Intelligent Selection of Road Network Automatic Generalization Based on Kernel-Based Machine Learning [D]. Nanjing: Nanjing University, 2017 (刘凯.核机器学习在地图自动综合中的道路网智能选取研究[D].南京:南京大学,2017)
- [49] Jiang B, Harrie L. Selection of Streets from a Network Using Self-Organizing Maps[J]. *Transactions in GIS*, 2004, 8(3): 335-350
- [50] Zhou Q, Li Z L. Use of Artificial Neural Networks for Selective Omission in Updating Road Networks [J]. *The Cartographic Journal*, 2014, 51(1): 38-51
- [51] Zhou Q, Li Z L. A Comparative Study of Various Supervised Learning Approaches to Selective Omis-

- sion in a Road Network[J]. *The Cartographic Journal*, 2017, 54(3): 254-264
- [52] Shao Lixia, He Zongyi, Ai Zixing, et al. Automatic Generalization of River Network Based on BP Neural Network Techniques[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2004, 29(6): 555-557 (邵黎霞, 何宗宜, 艾自兴, 等. 基于BP神经网络的河系自动综合研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2004, 29(6): 555-557)
- [53] Wu Fang, Deng Hongyan. Using Genetic Algorithms for Solving Problems in Automated Line Simplification[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2003, 32(4): 349-355 (武芳, 邓红艳. 基于遗传算法的线要素自动化简模型[J]. 测绘学报, 2003, 32(4): 349-355)
- [54] Zheng Chunyan, Guo Qingsheng, Hu Huake. The Simplification Model of Linear Objects Based on Ant Colony Optimization Algorithm[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2011, 40(5): 635-638 (郑春燕, 郭庆胜, 胡华科. 基于蚁群优化算法的线状目标简化模型[J]. 测绘学报, 2011, 40(5): 635-638)
- [55] Duan Peixiang, Qian Haizhong, He Haiwei, et al. A Line Simplification Method Based on Support Vector Machine [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(5): 744-752 (段佩祥, 钱海忠, 何海威, 等. 基于支持向量的线化简方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(5): 744-752)
- [56] Jiang B, Nakos B. Line Simplification Using Self-Organizing Maps[C]// ISPRS Workshop on Spatial Analysis and Decision Making, Hong Kong, China, 2003
- [57] Cheng B Y, Liu Q, Li X W, et al. Building Simplification Using Backpropagation Neural Networks: A Combination of Cartographers' Expertise and Raster-Based Local Perception [J]. *GIScience & Remote Sensing*, 2013, 50(5): 527-542
- [58] Qian Haizhong, Wu Fang, Tan Xiao, et al. The Algorithm for Merging City Buildings Based on ABTM [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2005, 10(10): 1224-1233 (钱海忠, 武芳, 谭笑, 等. 基于ABTM的城市建筑物合并算法[J]. 中国图象图形学报, 2005, 10(10): 1224-1233)
- [59] Allouche M K, Moulin B. Amalgamation in Cartographic Generalization Using Kohonen's Feature Nets [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2005, 19(8/9): 899-914
- [60] Zhang L Q, Deng H, Chen D, et al. A Spatial Cognition-Based Urban Building Clustering Approach and Its Applications [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2013, 27(4): 721-740
- [61] Sester M. Optimization Approaches for Generalization and Data Abstraction[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2005, 19(8/9): 871-897
- [62] Yan X F, Chen H, Huang H R, et al. Building Typification in Map Generalization Using Affinity Propagation Clustering [J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2021, 10(11): 732
- [63] Ware J M, Jones C B. Conflict Reduction in Map Generalization Using Iterative Improvement [J]. *GeoInformatica*, 1998, 2(4): 383-407
- [64] Wilson I D, Ware J A. Reducing Graphic Conflict in Scale Reduced Maps Using a Genetic Algorithm[C] // The 7th ICA Workshop on Progress in Automated Map Generalization, Paris, France, 2003
- [65] Sun Yageng, Guo Qingsheng, Liu Yuangang, et al. A Real-Coded Genetic Algorithm Considering Gestalt Principles to Building Displacement [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(2): 269-273 (孙雅庚, 郭庆胜, 刘远刚, 等. 顾及格式塔原则的建筑物群移位实数编码遗传算法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2015, 40(2): 269-273)
- [66] Liu Yuangang, Li Shaohua, Cai Yongxiang, et al. An Immune Genetic Algorithm to Buildings Displacement with Constraint of Safety Zones[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2021, 50(6): 812-822 (刘远刚, 李少华, 蔡永香, 等. 移位安全区约束下的建筑物群移位免疫遗传算法[J]. 测绘学报, 2021, 50(6): 812-822)
- [67] Yang M, Yuan T, Yan X F, et al. A Hybrid Approach to Building Simplification with an Evaluator from a Backpropagation Neural Network[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2022, 36(2): 280-309
- [68] Park W, Yu K. Hybrid Line Simplification for Cartographic Generalization [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2011, 32(9): 1267-1273
- [69] He Haiwei, Qian Haizhong, Duan Peixiang, et al. Automatic Line Simplification Algorithm Selecting and Parameter Setting Based on Case-Based Reasoning [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(3): 344-352 (何海威, 钱海忠, 段佩祥, 等. 线要素化简及参数自动设置的案例推理方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(3): 344-352)
- [70] Lamy S, Ruas A, Demazeau Y, et al. The Applica-

- tion of Agents in Automated Map Generalization [C]// The 19th International Cartographic Conference, Ottawa, Canada, 1999
- [71] Duchêne C, Cambier C. Cartographic Generalisation Using Cooperative Agents[C]// Proceedings of the 2nd International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems, Melbourne, Australia, 2003
- [72] Touya G, Duchêne C, Ruas A. Collaborative Generalisation: Formalisation of Generalisation Knowledge to Orchestrate Different Cartographic Generalisation Processes[M]// Fabrikant S I, Reichenbacher T, van Kreveld M, et al. eds. Geographic Information Science. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010: 264-278
- [73] Mustiere S. Cartographic Generalization of Roads in a Local and Adaptive Approach: A Knowledge Acquisition Problem[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2005, 19(8/9): 937-955
- [74] Cetinkaya S, Basaraner M. Characterisation of Building Alignments with New Measures Using C4.5 Decision Tree Algorithm [J]. *Geodetski Vestnik*, 2014, 58(3): 552-567
- [75] García-Balboa J L, Reinoso-Gordo J F, Ariza-López F J. Automated Assessment of Road Generalization Results by Means of an Artificial Neural Network [J]. *GIScience & Remote Sensing*, 2012, 49(4): 558-596
- [76] Harrie L, Stigmar H, Djordjevic M. Analytical Estimation of Map Readability[J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2015, 4(2): 418-446
- [77] Rawat W, Wang Z H. Deep Convolutional Neural Networks for Image Classification: A Comprehensive Review [J]. *Neural Computation*, 2017, 29(9): 2352-2449
- [78] Zhang S, Tong H H, Xu J J, et al. Graph Convolutional Networks: A Comprehensive Review [J]. *Computational Social Networks*, 2019, 6(1): 1-23
- [79] Schmidt R M. Recurrent Neural Networks (RNNs): A Gentle Introduction and Overview [EB/OL]. [2019-11-23]. <https://arxiv.org/abs/1912.05911>
- [80] Cao Yangjie, Jia Lili, Chen Yongxia, et al. Review of Computer Vision Based on Generative Adversarial Networks [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2018, 23(10): 1433-1449 (曹仰杰, 贾丽丽, 陈永霞, 等. 生成式对抗网络及其计算机视觉应用研究综述[J]. *中国图象图形学报*, 2018, 23(10): 1433-1449)
- [81] He Haiwei, Qian Haizhong, Xie Limin, et al. Interchange Recognition Method Based on CNN [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2018, 47(3): 385-395 (何海威, 钱海忠, 谢丽敏, 等. 立交桥识别的 CNN 卷积神经网络法 [J]. *测绘学报*, 2018, 47(3): 385-395)
- [82] Touya G, Lokhat I. Deep Learning for Enrichment of Vector Spatial Databases: Application to Highway Interchange [J]. *ACM Transactions on Spatial Algorithms and Systems*, 2020, 6(3): 21
- [83] Ma Lei, Yan Haowen, Wang Zhonghui, et al. Geometry Shape Measurement of Building Surface Elements Based on Self-Supervised Machine Learning [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2017, 42(12): 171-177 (马磊, 闫浩文, 王中辉, 等. 机器自监督学习的建筑物面要素几何形状度量 [J]. *测绘科学*, 2017, 42(12): 171-177)
- [84] Yan X F, Ai T H, Yang M, et al. Graph Convolutional Autoencoder Model for the Shape Coding and Cognition of Buildings in Maps [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2021, 35(3): 490-512
- [85] Yan X F, Ai T H, Yang M, et al. A Graph Convolutional Neural Network for Classification of Building Patterns Using Spatial Vector Data [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2019, 150: 259-273
- [86] Yan X F, Ai T H, Yang M, et al. A Graph Deep Learning Approach for Urban Building Grouping [J]. *Geocarto International*, 2020, 37(10): 2944-2966
- [87] Meng Nina, Wang Andong, Zhou Xiaodong. A Graph Convolutional Neural Network Method for Pattern Recognition of Linear Building Alignment [J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2019, 36(6): 627-631 (孟妮娜, 王安东, 周晓东. 建筑物线型排列模式识别的图卷积神经网络方法 [J]. *测绘科学技术学报*, 2019, 36(6): 627-631)
- [88] Wang Miqi, Ai Tinghua, Yan Xiongfeng, et al. Grid Pattern Recognition in Road Networks Based on Graph Convolution Network Model [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(12): 1960-1969 (王米琪, 艾廷华, 晏雄锋, 等. 图卷积网络模型识别道路正交网格模式 [J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2020, 45(12): 1960-1969)
- [89] Yan Xiongfeng, Ai Tinghua, Yang Min, et al. Shape Cognition in Map Space Using Deep Auto-Encoder Learning [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2021, 50(6): 757-765 (晏雄锋,

- 艾廷华, 杨敏, 等. 地图空间形状认知的自编码器深度学习[J]. 测绘学报, 2021, 50(6): 757-765)
- [90] Du Jiawei, Wu Fang, Xing Ruixing, et al. Trial and Comparative Study of Some Encoder-Decoder Based Deep Learning Models for the Automated Generalization of Buildings[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(7): 1052-1062 (杜佳威, 武芳, 行瑞星, 等. 几种具有编解码结构的深度学习模型在建筑物综合中的应用与比较[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2022, 47(7): 1052-1062)
- [91] Feng Y, Thiemann F, Sester M. Learning Cartographic Building Generalization with Deep Convolutional Neural Networks [J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2019, 8(6): 258
- [92] Courtial A, El Ayedi A, Touya G, et al. Exploring the Potential of Deep Learning Segmentation for Mountain Roads Generalisation[J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2020, 9(5): 338
- [93] Du J W, Wu F, Xing R X, et al. Segmentation and Sampling Method for Complex Polyline Generalization Based on a Generative Adversarial Network[J]. *Geocarto International*, 2021, 37(14): 4158-4180
- [94] Zheng J, Gao Z R, Ma J S, et al. Deep Graph Convolutional Networks for Accurate Automatic Road Network Selection[J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2021, 10(11): 768
- [95] Su B, Li Z L. An Algebraic Basis for Digital Generalization of Area-Patches Based on Morphological Techniques [J]. *The Cartographic Journal*, 1995, 32(2): 148-153
- [96] Wang Huilian, Wu Fang, Zhang Linlin, et al. The Application of Mathematical Morphology and Pattern Recognition to Building Polygon Simplification [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2005, 34(3): 269-276 (王辉连, 武芳, 张琳琳, 等. 数学形态学和模式识别在建筑物多边形化简中的应用[J]. 测绘学报, 2005, 34(3): 269-276)
- [97] Shen Y L, Ai T H, Li W D, et al. A Polygon Aggregation Method with Global Feature Preservation Using Superpixel Segmentation[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2019, 75: 117-131
- [98] An Xiaoya, Cheng Xiaoqiang. Visual Clarity of Vector Curve and Its Application in Web Map Generalization[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2020, 49(2): 245-255 (安晓亚, 成晓强. 矢量曲线的视觉清晰度及在网络地图综合中的应用[J]. 测绘学报, 2020, 49(2): 245-255)
- [99] Isola P, Zhu J Y, Zhou T H, et al. Image-to-Image Translation with Conditional Adversarial Networks [C]//2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Honolulu, USA, 2017
- [100] Kang Y H, Gao S, Roth R E. Transferring Multi-scale Map Styles Using Generative Adversarial Networks [J]. *International Journal of Cartography*, 2019, 5(2/3): 115-141
- [101] Ganguli S, Garzon P, Glaser N. GeoGAN: A Conditional GAN with Reconstruction and Style Loss to Generate Standard Layer of Maps from Satellite Images [EB/OL]. [2019-4-25]. <https://arxiv.org/abs/1902.05611>
- [102] Shen Y L, Ai T H, Chen H, et al. Multilevel Mapping from Remote Sensing Images: A Case Study of Urban Buildings [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60: 1-16
- [103] Du Jiawei, Wu Fang, Zhu Li, et al. An Ensemble Learning Simplification Approach Based on Multiple Machine-Learning Algorithms with the Fusion Using of Raster and Vector Data and a Use Case of Coastline Simplification[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2021, 51(3): 373-387 (杜佳威, 武芳, 朱丽, 等. 图形、图像融合利用的集成学习智能化简方法及其在岛屿岸线化简中的应用[J]. 测绘学报, 2021, 51(3): 373-387)
- [104] Christoph M. Interpretable Machine Learning: A Guide for Making Black Box Models Explainable [M]. Raleigh: Lulu, 2021
- [105] Gahegan M. Fourth Paradigm GIScience? Prospects for Automated Discovery and Explanation from Data[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2020, 34(1): 1-21
- [106] Jiao Yangyang, Liu Pingzhi, Jiang Meng, et al. Construction of Sample Library for Intelligent Cartographic Generalization of Residential Feature [J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2021, 38(4): 430-434 (焦洋洋, 刘平芝, 蒋萌, 等. 面向居民地要素智能化综合的样本库构建[J]. 测绘科学技术学报, 2021, 38(4): 430-434)
- [107] He Haiwei, Qian Haizhong, Liu Chuang, et al. Application Background and Method of Case Based Reasoning in Cartographic Generalization[J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2017, 34(4): 427-432 (何海威, 钱海忠, 刘闯, 等. 案例推理的制图综合应用背景与方法[J]. 测绘科学技术学报, 2017, 34(4): 427-432)
- [108] Guo Xuan, Qian Haizhong, Wang Xiao, et al. A Method of Road Network Selection Based on Case and Ontology Reasoning[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2021, 50(12): 1717-1727 (郭

- 流, 钱海忠, 王骁, 等. 道路网选取的案例与本体推理方法[J]. 测绘学报, 2021, 50(12): 1717-1727)
- [109] Guo X, Qian H Z, Wu F, et al. A Method for Constructing Geographical Knowledge Graph from Multi-source Data[J]. *Sustainability*, 2021, 13(19): 10602
- [110] Zhou Chenghu, Wang Hua, Wang Chengshan, et al. Geoscience Knowledge Graph in the Big Data Era [J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2021, 51(7): 1070-1079 (周成虎, 王华, 王成善, 等. 大数据时代的地理知识图谱研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2021, 51(7): 1070-1079)
- [111] Anderson B. Computational Neuroscience and Cognitive Modelling [M]. California: SAGE Publications Inc, 2014

Overview of Research Progress and Reflections in Intelligent Map Generalization

WU Fang¹ DU Jiawei^{1,2} QIAN Haizhong¹ ZHAI Renjian¹

¹ Institute of Geospatial Information, Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China

² Institute of Aerospace Command, University of Aerospace Engineering, Beijing 101416, China

Abstract: Map generalization is one of the core technologies of cartography and multi-scale spatial data transformation. Since the 1960s, the research on the automated generalization of map data has gradually developed and made great progress. Furthermore, there are many intelligent solutions on map generalization. However, due to the limitation of the artificial intelligence technology, these intelligent solutions on map generalization are not really intelligent and practical. In the past 10 years, deep learning, as a presentative artificial intelligence technology, was applied in many fields, and the deep-learning-based researches achieved remarkable results. And thus, many new attempts have been made in the intelligent research of map generalization. Firstly, based on analyzing and abstracting models of the automated map generalization, the necessity of the intelligent research on map generalization is pointed out. Secondly, combining with the development of artificial intelligence, the intelligent map generalization is overviewed. Researches of intelligent map generalization based on traditional machine learning and deep learning are sorted and analyzed, and two common strategies of intelligent map generalization are summarized. Finally, focusing on some hot issues of intelligent map generalization, the development tendency of intelligent map generalization is discussed.

Key words: map generalization; machine learning; deep learning; intellectualization

First author: WU Fang, PhD, professor, specializes in automated map generalization and intelligent spatial data processing. E-mail: wufang_630@126.com

Corresponding author: DU Jiawei, PhD, lecturer. E-mail: whxdxjw@126.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China (41801396); the Natural Science Foundation for Distinguished Young Scholars of Henan Province (212300410014).

引文格式: WU Fang, DU Jiawei, QIAN Haizhong, et al. Overview of Research Progress and Reflections in Intelligent Map Generalization[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(10):1675-1687. DOI:10.13203/j.whugis20210687(武芳, 杜佳威, 钱海忠, 等. 地图综合智能化研究的发展与思考[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2022, 47(10):1675-1687. DOI:10.13203/j.whugis20210687)