

土木工程与机器学习交叉研究生课程体系探索与建设

黄永 张坤鹏

哈尔滨工业大学土木工程学院, 中国·黑龙江 哈尔滨 150090

摘要: 伴随“新基建”国家战略的纵深推进, 传统土木基础设施的转型与升级已步入关键期, 将机器学习技术深度融入土木工程成为了必然的行业趋势。智能化的发展大幅增加了对于复合型交叉人才的需求, 相关研究生课程的建设与改革迫在眉睫。本文聚焦于机器学习与土木工程的深度交叉融合, 全面探讨该类课程的教学机制与实施路径。研究着力构筑涵盖算法理论解析、工程场景应用与底层代码实操三大维度的立体化教学体系, 旨在为培养具备扎实数理根基与开阔国际视野的新时代智能土木卓越人才提供体系参考与改革借鉴。

关键词: 土木工程; 机器学习; 交叉学科; 课程体系建设

Exploration and Construction of Cross Graduate Course System of Civil Engineering and Machine Learning

Huang Yong, Zhang Kunpeng

School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, China Heilongjiang Harbin 150090

Abstract: With the deepening of the national strategy of "new infrastructure," the transformation and upgrading of traditional civil infrastructure has entered a critical period, and the deep integration of machine learning technology into civil engineering has become an inevitable industry trend. The development of intelligence has greatly increased the demand for compound cross-disciplinary talents, and the construction and reform of related graduate courses are imminent. This paper focuses on the deep cross-integration of machine learning and civil engineering, and comprehensively discusses the teaching mechanism and implementation path of this kind of course. The research focuses on building a three-dimensional teaching system covering the three dimensions of algorithm theory analysis, engineering scene application and underlying code practice, aiming to provide a system reference and reform reference for cultivating excellent talents of intelligent civil engineering in the new era with solid mathematical foundation and broad international vision.

Keywords: Civil engineering; Machine learning; Interdisciplinary; Curriculum system construction

0 引言

以机器学习理论为核心的交叉科学, 为突破传统工程领域的发展瓶颈提供了重要思路, 已成为当前学科前沿的焦点。建国以来特别是改革开放以来, 我国修建了超 74 万座公路桥梁、6.5 万座铁路桥梁以及大规模的高层城市基础设施, 建设规模稳居世界第一。但与此同时, 土木工程在设计、建造、运维及防灾等全生命周期的智能化水平仍相对滞后, 严重依赖人工的重复性劳作。伴随国家“新基建”战略的全面推进以及融合基础设施的前瞻性布局, 利用机器学习技术降低传统密集劳动力的依赖、支撑传统基础设施转型升级, 已经在土木工程领域展现出了显著的应用潜力。

行业的信息化与智能化发展, 全面推动了对高水平交叉学科人才的迫切需求。面对这一必然趋势, 土木工程

学科在深入探索交叉前沿技术的同时, 亟须加快开设土木工程与机器学习的交叉课程, 以培养具有数理基础与交叉创新素养的复合型创新人才。近年来, 国内虽有少数高校意识到了这一大方向, 并试水开设了《土木工程中的大数据》等机器学习相关的研究生课程, 但授课时往往直接照搬现有的计算机专业机器学习大纲, 未能真正将机器学习方法与土木力学、结构分析深度统筹融合。迄今为止, 国内对土木工程与机器学习深度交叉研究生课程体系的构建、配套教材的开发以及统一教学目标的系统性研究依然非常匮乏。

本研究旨在立足上述丰富的交叉课程建设基础与前期教学实践, 对该多学科融合的新型教学路径进行系统性的探讨与提炼。以期构建契合新时代要求的土木工程交叉学科教学体系提供有价值的参考, 并致力于实现人才培养

效果的最优化。

1 研究背景

机器学习作为数据科学与计算机科学的基石分支,其核心在于构建高维算法模型,使系统能够从海量数据中不断优化自身的预测与决策逻辑^[1]。近年来,依托 LeCun、Goodfellow 等学者在深度特征表达与生成式架构上的重要突破^[2],机器学习技术在工程界展现出了巨大的应用潜能。在土木工程领域, Salehi^[3] 与 Farrar^[4] 等权威学者率先提出,将机器学习深度渗透至大型基础设施的健康监测、计算分析与防灾评估中,已成为引领经典土木学科迈向数据驱动新范式的重要路径^[5];近期 Avci 等^[6] 的综述进一步指出,从传统的数理统计向深度学习过渡,是当前土木动力学诊断的必然演变方向。

面对土木工程高度非线性与多源物理场的复杂特征,各类机器学习算法展现出了强大的场景适应性。特别是在计算机视觉领域, Cha 等^[7] 利用深度卷积神经网络率先实现了真实环境下的混凝土裂缝高精度识别,奠定了智能表观检测的基础; Spencer^[8] 与 Azimi^[9] 等也相继验证了此类前沿算法在大型桥梁无人机巡检与海量数据监测中的可靠性^[10-12]。此外,在信号压缩与机理建模方面,基于贝叶斯推断^[13] 的稀疏信号重构在土木监测防灾中取得了显著成效^[14],而极限学习机^[15] 亦凭借其高效的训练特性在构件状态回归预测中得到广泛应用。然而,聚焦上述处于科研最前沿的各类算法模型,其底层多源于纯粹的理论计算机体系,数学基础要求较高。如果不经针对特定学情的专业重构,直接将其原版照搬进土木研究生的课堂,极易造成学生的学习障碍与“力学-算法”专业逻辑的割裂。

在交叉学科人才培养与教学现状层面,国内高教界正积极展开理论建构与实践探索。国内高校以钟登华院士^[16] 提出的“新工科”行动及林健^[17] 等学者主张的跨学科课程体系重塑为指引,推动传统工科与前沿学科深度融合,探索交叉学科人才培养的有效路径。马世媛等剖析了相关智能前沿技术融入研究生培养的理论架构^[18];马晓雨等基于传统结构概念设计的重构,推演了算法思维的早期植入路径^[19];黄永深度聚焦于课程体系的落地,先后围绕土木工程机器学习交叉课程的线上多维教学实证^[20] 以及教学闭环中的策略构建^[21],开展了高度系统的机制探索。然而,在现有教学成效向全国高教体系辐射的过程中,仍暴露出诸多局限和不足:市面核心教材多依赖通用计算机大纲而缺乏土木专业底色;课堂授课往往偏重抽象的算法公式推演,割裂了底层 Python 代码实操与土木物理力学机制的教学融

合;引入国际高水平教研视野与联合建课机制方面仍显滞后。综上可知,系统构建兼具土木专业底蕴与实践能力的机器学习交叉课程体系,仍是当下亟待填补的教育空白。

2 土木工程与机器学习交叉学科教学方法与对策

对于土木工程学科而言,机器学习技术往往要求受众具备较为扎实的数学背景与编程基础。在当前的土木工程研究生教学中,直接开设机器学习专业课程极易出现理论过于抽象、学生思维方式难以适应的问题。这主要是因为现有的机器学习课程大多侧重于算法数学推导,缺乏与土木力学、结构分析机制的协调统一;学生在学习过程中缺乏专业代入感,难以将算法模型与自身课题深度融合。同时,土木背景的学生普遍对机器学习所依赖的程序语言不够熟练,底层代码编程困难,这也在一定程度上影响了学习积极性。

针对上述痛点,为切实提升土木工程与机器学习交叉学科的教学效果,本研究探索出“机器学习算法理论、土木应用实例、Python 编程实现”三条主线并行的立体化教学方法与对策。在授课过程中,将抽象的机器学习算法直接应用于背景清晰的土木工程实际数据(涵盖智能设计、施工、运维和防灾场景),并引导学生结合土木力学与结构知识进行深度的关联分析,真正做到在专业语境下掌握算法理论。此外,全面引入 Python 程序语言平台构建专属代码库指导教学,使其真正具备动手解决实际工程问题的能力。同时,摒弃传统的单向答题模式,采用任务导向型的项目制设计,让学生自行分组,运用所学代码解决真实的土木科研问题。这种三线并行的立体化培养与互动式作业,有效激发了研究生的求知欲,缓解了学生面对复杂算法的畏难情绪。

3 三条主线并行的立体化教学方法体系的实现

为使三条主线并行的立体化教学体系顺利实施,本研究高度重视资源共享,将“数据、算法、算力”作为课程的三大基石。首先构建了梯度分明、背景清晰且高度契合土木工程的实际应用案例库;同时,基于 Python 语言建立了逻辑一致的专用机器学习程序代码库。最终,通过汇聚国内外高端教研资源,实现了算法理论、土木应用案例、代码编程实现深度融合的立体化教学目标。具体实现路径如下:

3.1 构建面向实践的土木工程应用案例大数据库

教学适用的案例大数据库不仅需要涵盖分类、回归等

机器学习的典型任务,更要贴近土木基础设施全生命周期的前沿痛点。本研究依托课题组深厚的科研积累,从历年的脱密科研项目、国际结构健康监测竞赛以及真实的工程监测数据中不断筛选。例如,引入自主开发的“大型桥梁大数据灾害与健康智能诊断系统”中的多类型实测数据,提炼出入门、初级、进阶三个层次的案例数据库,让学生直接在真实世界的土木工程数据集上进行实践,以达到良好的教学展示与实操效果。

3.2 设计建立具有土木特色的 Python 机器学习程序代码库

Python 作为目前机器学习领域应用最广的语言,其开源生态发展迅速。针对建立的土木案例库,本研究着力打造了与之配套的专属 Python 程序代码库。通过广泛收集和加工前沿的开源算法代码,去粗取精,统一了计算流程与命名规范。为了便于有土木背景的学生快速理解,所有代码程序均注重逻辑清晰,并辅以针对土木应用场景的全面注释。此外,结合实验室的自有计算资源,向学生开放算力共享,帮助学生克服编程应用困难,高效验证算法模型。

3.3 探索国际教研一体化的硕博贯通三线并行教学机制

考虑到交叉学科的特殊性以及土木工程中优质教学资源的匮乏,本课程体系在重构算法、案例、代码三大主线比重的同时,特别引入了“硕博贯通”的培养理念与国际高水平教研资源。在教学实践中,通过与国际名校联合开展高端共建课程,将国际最前沿的土木机器学习研究成果直接融入课堂大纲。在理顺学科逻辑的基础上,积极推动课程实践报告与真实的科研竞赛、科研课题挂钩,强化前瞻性的教研一体化互动,全方位培养学生在机器学习交叉领域解决国际前沿土木难题的卓越创新能力。

4 结语

国家“新基建”战略的全面推进以及传统基础设施的智能化转型,激发了行业对土木工程与机器学习交叉卓越人才的迫切需求。当前国内针对土木工程与机器学习深度交叉的研究生课程体系研究尚处于起步阶段,具备土木力学与结构分析特色的教学成果鲜有报道。本研究系统研究了包含“算法理论、土木应用实例、Python 代码编程实现”这三条主线并行的立体化教学方法与对策,同时探索了将算力、算法、数据作为教学基石的硕博贯通培养新路径,为该领域交叉研究生课程的教学改革与体系建设提供了切实可行的参考。

本研究的主要创新点包括:

(1) 探索建立了传统土木力学与新兴机器学习交叉融合的课程体系与教学模式。在注重土木本源的结构分析基础之上,深度融入现代数据驱动的方法机制,缓解了土木学生对底层算法抽象难懂的学习障碍。

(2) 构建了基于“算法理论、土木应用案例、代码编程实现”三条主线并行的实操型教学方法。通过资源共享机制,自主开发了贴合前沿痛点的土木案例大数据库及配套的实战版 Python 程序代码库,强化了学生的案例实操与代码编程能力。

(3) 开拓了依托国际高水平资源的“教研一体化”高端共建平台。在国际合作交流层面打破了极少涉及教学层面的局限,利用国际知名高校的学术前沿资源与校内的大型桥梁大数据健康诊断系统,全面培养有较强数理基础和交叉科研素养并具备国际化视野的综合型土木人才。

参考文献:

- [1] JORDAN M I, MITCHELL T M. Machine learning: trends, perspectives, and prospects [J]. *Science*, 2015, 349 (6245): 255-260. DOI:10.1126/science.aaa8415.
- [2] LECUN Y, BENGIO Y, HINTON G. Deep learning [J]. *Nature*, 2015, 521 (7553): 436-444. DOI:10.1038/nature14539.
- [3] SALEHI H, BURGUEÑO R. Emerging artificial intelligence methods in structural engineering [J]. *Engineering Structures*, 2018, 171: 170-189. DOI:10.1016/j.engstruct.2018.05.084.
- [4] FARRAR C R, WORDEN K. Structural health monitoring: a machine learning perspective [M]. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2012. DOI:10.1002/9781118443118.
- [5] 鲍跃全, 李惠. 人工智能时代的土木工程[J]. *土木工程学报*, 2019, 52(5): 1-11. DOI:10.15951/j.tmgcxb.2019.05.001.
- [6] AVCI O, ABDLEJABER O, KIRANYAZ S, et al. A review of vibration-based damage detection in civil structures: From traditional methods to machine learning and deep learning applications [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 147: 107077. DOI:10.1016/j.ymssp.2020.107077.
- [7] CHA Y J, CHOI W, BÜYÜKÖZTÜRK O. Deep learning-based crack damage detection using convolutional neural networks [J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2017, 32(5): 361-378. DOI:10.1111/mice.12263.
- [8] SPENCER F B, HOSKERE V, NARAZAKI Y.

Advances in computer vision-based civil infrastructure inspection and monitoring [J]. *Engineering*, 2019, 5(2): 199-222. DOI:10.1016/j.eng.2018.11.030.

[9] AZIMI M, ESLAMLOU D A, PEKCAN G. Data-driven structural health monitoring and damage detection through deep learning: state-of-the-art review [J]. *Sensors*, 2020, 20(10): 2778. DOI:10.3390/s20102778.

[10] 孙利民, 尚志强, 夏焯. 大数据背景下的桥梁结构健康监测研究现状与展望[J]. *中国公路学报*, 2019, 32(11): 1-20. DOI:10.19721/j.cnki.1001-7372.2019.11.001.

[11] 李雪松, 马宏伟, 林逸洲. 基于卷积神经网络的结构损伤识别[J]. *振动与冲击*, 2019, 38(1): 159-167. DOI:10.13465/j.cnki.jvs.2019.01.023.

[12] NI F, ZHANG J, CHEN Z. Pixel-level crack delineation in images with convolutional feature fusion[J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2019, 26(1): e2286. DOI:10.1002/stc.2286.

[13] TIPPING E M. Sparse Bayesian learning and the relevance vector machine[J]. *Journal of Machine Learning Research*, 2001, 1: 211-244.

[14] HUANG Y, BECK L J, WU S, et al. Robust Bayesian compressive sensing for signals in structural health monitoring [J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2014, 29(3): 160-179. DOI:10.1111/mice.12051.

[15] HUANG G B, ZHU H M, DING X J, et al. Extreme

learning machine for regression and multiclass classification [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 2012, 42(2): 513-529. DOI:10.1109/TSMCB.2011.2168604.

[16] 钟登华. 新工科建设的内涵与行动[J]. *高等工程教育研究*, 2017 (3): 1-6.

[17] 林健. 新工科专业课程体系改革和课程建设[J]. *高等工程教育研究*, 2020 (1): 1-13+24.

[18] 马世媛, 唐勇. “人工智能 + 土木工程”研究生培养模式研究[J]. *中国多媒体与网络教学学报(上旬刊)*, 2020, (7): 129-131.

[19] 马晓雨, 生龙. “新工科”背景下引入人工智能理念的“结构概念与创新设计”课程的构建[J]. *高教学刊*, 2019, (6): 36-37+40. DOI:10.19980/j.cn23-1593/g4.2019.06.011.

[20] 黄永. 土木工程机器学习交叉课程的线上教学实践与探索[J]. *教学方法创新与实践*, 2020, 3(9): 97. DOI: 10.26549/jxjfcxysj.v3i9.5214.

[21] 黄永, 高竞泽, 周文松等. 人工智能与土木工程交叉学科教学方法与对策研究[J]. *中文科技期刊数据库(全文版)教育科学*, 2022 (10): 1-4.

基金项目: 哈尔滨工业大学研究生教育教学改革研究项目(编号: 23HX012)。

作者简介: 第一作者: 黄永(1984.05.01), 男, 博士, 教授, 研究方向: 智能建造。