

城市应急管理中多源异构数据的联邦学习融合分析框架

田高亮, 罗 香, 唐 发

重庆城市职业学院 重庆

【摘要】随着城市规模的不断扩展及其面临的应急管理需求日益复杂,城市应急管理中的多源异构数据融合成为一个亟待解决的问题。本文提出了一种基于联邦学习的多源异构数据融合分析框架,旨在通过分布式学习方式整合来自不同传感器、监控系统及社交媒体等异构数据源的有价值信息,从而实现应急响应与决策的精准化与智能化。框架充分考虑数据隐私保护,采用联邦学习技术,使得各参与方无需交换原始数据即可共同训练模型,提高数据安全性和分析效果。实验表明,该框架能够有效提升应急管理系统的响应效率和准确性,适应快速变化的城市环境。

【关键词】城市应急管理; 多源数据; 异构数据; 联邦学习; 数据融合

【收稿日期】2025 年 7 月 17 日 **【出刊日期】**2025 年 8 月 18 日 **【DOI】**10.12208/j.sdr.20250163

Federated learning fusion analysis framework for multi-source heterogeneous data in urban emergency management

Gaoliang Tian, Xiang Luo, Fa Tang

Chongqing City Vocational College, Chongqing

【Abstract】 With the continuous expansion of urban areas and the increasing complexity of emergency management needs, multi-source heterogeneous data fusion has become an urgent issue in urban emergency management. This paper proposes a federated learning-based multi-source heterogeneous data fusion framework, aiming to integrate valuable information from diverse data sources including sensors, monitoring systems, and social media through distributed learning methods, thereby achieving precise and intelligent emergency response and decision-making. The framework fully considers data privacy protection by employing federated learning technology, enabling all participants to jointly train models without exchanging raw data, thus enhancing both data security and analytical effectiveness. Experimental results demonstrate that this framework can significantly improve the response efficiency and accuracy of emergency management systems, adapting to rapidly changing urban environments.

【Keywords】 Urban emergency management; Multi-source data; Heterogeneous data; Federated learning; Data fusion

引言

城市在快速发展过程中面临着日益复杂的应急管理挑战。从自然灾害到突发事件的应急响应,传统的数据处理方式已经无法满足高效决策和实时响应的需求。多源异构数据的集成分析在这一背景下显得尤为重要,如何有效融合来自不同来源、不同格式的数据并确保数据隐私保护,仍然是一个亟待解决的问题。基于联邦学习的融合框架,通过分布式的学习方式,能够在不交换数据的情况下,完成高效的数据分析和模型训练,极大提升了应急管理

系统的精准度和响应速度。

1 城市应急管理中多源异构数据融合的挑战与需求分析

城市应急管理面对的数据环境呈现出高度多样化和异构化的特征。城市物联网设备、视频监控系统、气象传感器、交通流量监测平台、社交媒体等渠道不断生成多类型、多格式的数据,包括结构化、半结构化与非结构化信息。这些数据在采集标准、时间精度、空间分辨率以及语义描述等方面存在显著差异,导致数据直接融合分析的难度大幅增加。在

应急事件中,数据不仅来源多样,而且更新速度快,信息冗余与噪声比例高,增加了信息筛选、标准化处理和实时传输的压力。

隐私保护与数据安全同样构成不可忽视的挑战。应急管理涉及大量敏感数据,如人口分布、通信记录、监控画面和基础设施运行状态等,若直接集中存储与分析,极易带来隐私泄露风险及网络攻击威胁。各数据持有方往往受制于法规、行业规范或机构自身政策,限制了原始数据的直接共享,形成“数据孤岛”现象。这不仅削弱了跨域信息流通能力,也制约了全局态势感知与综合研判的效率。如何在保证数据安全合规的前提下实现有效融合,成为城市应急管理必须突破的关键技术难点。

在实战背景下,数据的多源异构特性还会引发信息时效性与准确性之间的矛盾。突发事件的应对窗口期极为有限,决策者需要在短时间内基于多维信息做出判断,但传统集中式数据整合模式无法在不牺牲传输延迟的前提下保证分析精度。不同来源的数据在采集频率、传输链路与处理机制上的差异,使得信息到达分析端的延迟不一致,甚至出现数据时序错位,直接影响态势预测和指挥调度的精准性。构建一种既能适应多源异构特性,又能在保障隐私的条件下实现高效融合与实时分析的技术路径,已成为提升城市应急管理水平的一个重要突破口。

2 基于联邦学习的数据隐私保护与分布式建模方法设计

联邦学习通过分布式建模方式,将模型训练任务分配至各数据持有方的本地节点,在不传输原始数据的前提下完成全局模型的迭代优化。这一机制有效规避了集中存储带来的隐私泄露与合规风险,保留了数据的多样性与真实性。对于城市应急管理中涉及的传感器数据、视频信息、地理位置轨迹以及社交平台内容,联邦学习可在本地进行特征提取与梯度计算,再将模型更新参数上传至中心协调节点,由协调端进行参数聚合,从而实现跨机构、跨领域的模型协作训练。这种架构能够兼顾数据安全与计算效率,适应多源异构数据的复杂特性。

在隐私保护方面,联邦学习可引入差分隐私、同态加密及安全多方计算等技术,进一步降低参数更新中可能泄露的隐私信息风险。差分隐私通过在梯度中添加噪声,实现统计意义上的隐私保护;同态加密确保参数在传输与聚合过程中保持加密状态,

即使被截获也无法直接获取有效信息;安全多方计算则允许多个参与方在不泄露自身数据的情况下共同完成计算任务。这些技术的结合,使得联邦学习在应急管理场景中能够满足数据保护法规的要求,同时维持模型训练的收敛性与性能表现。

分布式建模方法在面对多源异构数据时,还需针对不同数据模态与分布特性设计个性化的本地训练策略。例如,对于高频率流数据可采用增量学习机制,以适应快速变化的城市动态;对于视频和图像类数据可结合卷积神经网络进行特征提取;对于文本与社交媒体数据可引入自然语言处理模型进行语义分析。中心节点在聚合过程中可采用加权平均、模型蒸馏或分层聚合等策略,以兼顾不同数据源的重要性与质量差异。通过这种灵活的分布式建模设计,联邦学习不仅能够有效整合城市应急管理的多源异构数据,还能在保障隐私的条件下实现高精度、高鲁棒性的智能分析与预测能力。

3 多源异构数据的联邦学习融合分析框架构建与实现路径

多源异构数据的联邦学习融合分析框架需要兼顾数据的分布特性、隐私保护需求以及分析效率,其构建过程通常从系统架构设计入手。整体架构可分为本地数据处理层、模型训练与更新层以及中心协调与聚合层。本地数据处理层负责对不同来源的数据进行预处理,包括格式转换、噪声过滤、时间对齐与特征提取,以确保后续建模阶段能够在统一的特征空间中运作。模型训练与更新层在本地完成针对特定模态的数据建模任务,如传感器数据的时间序列建模、视频图像的卷积特征提取、文本信息的语义编码等,并生成对应的梯度或模型参数。中心协调与聚合层则负责收集各节点的更新信息,通过加权平均、模型蒸馏或分层聚合等方法,形成能够反映全局数据分布特征的综合模型。

在实现路径上,可采用迭代式训练策略,通过多轮本地更新与全局聚合逐步提升模型的泛化性能。系统部署时可结合安全多方计算与同态加密技术,确保模型更新过程中参数传输的加密性与计算的安全性,以防止潜在的推断攻击。对于存在显著数据分布差异的场景,可引入个性化联邦学习方法,使各参与节点在共享全局模型基础上,保留适应自身数据特征的局部模型,从而提升特定领域的预测精度。在面对高频率的应急事件数据时,可通过在线

联邦学习机制, 动态更新模型权重, 以适应实时变化的环境特征, 实现持续优化与快速响应。

框架的落地应用还需要配套的资源调度与通信优化机制, 以降低分布式训练中的延迟与带宽消耗。可在中心协调端部署模型版本管理系统, 追踪各轮训练的参数变化与性能指标, 并根据任务优先级动态调整各节点的计算与通信频率。在网络条件受限或节点计算能力差异较大的情况下, 可采用异步聚合策略, 避免训练过程因个别节点延迟而阻塞整体进度。通过将多源异构数据的特征处理、分布式建模、隐私保护与通信优化相结合, 该联邦学习融合分析框架能够在城市应急管理中实现高安全性、高实时性和高准确度的综合分析能力, 为突发事件的快速研判与科学决策提供有力支撑。

4 框架在城市应急管理中的应用效果与性能评估

在实际部署中, 该联邦学习融合分析框架在城市应急管理的多个关键环节展现出显著成效。通过分布式的训练与聚合机制, 不同部门、不同地域的节点能够在不暴露原始数据的前提下参与模型构建, 使得应急管理系统在面对多源异构数据时, 既能保持信息完整性, 又能遵循隐私与安全规范。在模拟城市洪涝、地震以及公共卫生突发事件的测试场景中, 该框架能够在较短时间内完成对海量传感器数据、视频监控流、社交媒体动态以及气象预测信息的综合分析, 并在态势评估、风险预测和资源调配等环节提供高精度支持。这种多模态数据的协同分析能力, 显著提升了决策响应的实时性与科学性。

性能评估结果显示, 该框架在不同网络条件和硬件资源配置下均保持了较高的稳定性与鲁棒性。在低带宽环境中, 通过参数压缩与异步聚合等优化策略, 有效降低了通信负载, 确保了模型训练的连续性与收敛速度。实验对比表明, 在相同数据规模下, 基于该框架的联邦模型在事件预测准确率、异常检测召回率以及模型泛化性能方面, 均优于传统集中式分析方法。在数据分布不均衡的情况下, 通过引入个性化模型和加权聚合机制, 使各参与节点在共享全局模型优势的同时, 保留了对本地特征的适配能力, 从而提升了特定场景的分析精度。这种性能优势, 使得框架能够在应急处置的高压条件下保持稳定输出。

在多次实地演练与历史案例复盘, 该框架的应用效果得到了进一步验证。在应急指挥平台中接入框架后, 指挥中心能够实时获取来自不同部门的

综合分析结果, 包括灾害影响范围估计、受灾人口预测、交通疏散路线优化以及医疗资源调度建议等, 并根据模型输出快速生成行动方案。框架的高并发处理能力确保了在信息爆发期依然能够维持毫秒级的响应延迟, 避免因数据处理滞后而错失最佳干预时机。其可扩展架构支持后续接入更多数据源与分析模块, 形成持续优化的应急管理生态。这种在安全性、效率与准确性之间取得平衡的能力, 使其成为提升城市应急管理水平的关键技术抓手。

5 结语

在城市应急管理领域, 多源异构数据的价值只有在安全、高效的融合分析中才能得到充分释放。联邦学习的引入, 为跨部门、跨区域的数据协同提供了可行路径, 不仅消除了数据孤岛的限制, 也在隐私保护与实时分析之间取得了平衡。融合框架在多场景测试与实战应用中展现出稳定的性能、优异的预测精度以及强大的适应性, 为应急指挥与资源调度提供了坚实技术支撑。依托这一技术体系, 城市管理者能够在突发事件中更快速地感知态势、研判风险并优化决策流程, 推动应急管理向智能化、精准化方向发展。

参考文献

- [1] 吴洪彬. 多源数据融合的高速改扩建交通安全风险动态监测与智能预警研究[J/OL]. 企业科技与发展, 1-6[2025-08-08].
- [2] 吴丹, 王莹, 乐莺. 基于无人机多源遥感数据的城市公园绿地生境空间识别研究[J]. 园林, 2025, 42(08): 121-130.
- [3] 程豪. 基于深度神经网络的智库多源数据资源融合理论模型初探[J/OL]. 智库理论与实践, 1-8[2025-08-08].
- [4] 李斌. 智慧工地多源数据融合与通信集成化架构设计研究[J]. 中国宽带, 2025, 21(09): 153-155.
- [5] 黄湘南. 人工智能在城市应急管理中的应用与挑战[N]. 江苏经济报, 2025-07-30(T03).
- [6] 吕小刚, 章燕. 数据驱动城市应急管理现代化的路径研究[J]. 城市与减灾, 2025, (04): 24-27.
- [7] 刘忠萍. 智慧应急背景下城市社区应急管理指标体系构建及应用[J]. 湖北应急管理, 2025, (12): 9-13.
- [8] 王小娟, 曲秋蔚, 丁楠, 等. 城市轨道交通换乘通道客流监测与应急管理[J]. 交通世界, 2025, (14): 10-12.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS