

基于图卷积神经网络的疲劳驾驶检测方法

刘建, 侯启恩

淮北职业技术学院, 安徽 淮北 235000

DOI:10.61369/ERA.2026050012

摘 要 : 道路交通事故多由驾驶疲劳引起, 传统检测手段多依赖视觉特征及单一生理信号, 存在抗干扰能力不足、特征提取不充分、易受环境干扰等问题, 本文探讨了运用图卷积神经网络实现的疲劳驾驶检测技术, 以大脑电活动为焦点, 非欧几里得结构建模与图卷积神经网络的融合, 剖析脑区间的空间联系结构, 依托注意力机制对权重进行优化配置。实施脑电信号的前期处理、动态图形结构的建立及模型设计的改进, 依托 SEED-VIG 数据集及十折交叉验证实验, 平均检测精度高达91.2%, 与常规 CNN 及基础 GCN 对比, 分别高出8.7% 及4.3%, 实现了疲劳驾驶检测的高效精确新飞跃。

关 键 词 : 图卷积神经网络; 疲劳驾驶检测; 脑电信号; 特征提取; 空间关联

Fatigue Driving Detection Method Based on Graph Convolutional Neural Network

Liu Jian, Hou Qi'en

Huaibei Vocational and Technical College, Huaibei, Anhui 235000

Abstract : Most road traffic accidents are caused by driving fatigue. Traditional detection methods mostly rely on visual features and single physiological signals, which suffer from insufficient anti-interference capability, inadequate feature extraction, and susceptibility to environmental interference. This paper explores a fatigue driving detection technology implemented using a graph convolutional neural network. Focusing on brain electrical activity, it integrates non-Euclidean structural modeling with a graph convolutional neural network to analyze the spatial connection structure between brain regions, optimizing weight allocation through an attention mechanism. By implementing preprocessing of EEG signals, establishing dynamic graphical structures, and improving model design, and relying on the SEED-VIG dataset and ten-fold cross-validation experiments, an average detection accuracy of 91.2% is achieved. This represents an 8.7% and 4.3% increase compared to conventional CNNs and basic GCNs, respectively, marking a new leap in efficient and accurate fatigue driving detection.

Keywords : graph convolutional neural network; fatigue driving detection; EEG signals; feature extraction; spatial correlation

引言

交通运输业迅猛扩张, 道路安全状况日益恶化, 研究数据表明, 约30% 的重大交通事故与疲劳驾驶有直接关系, 目前疲劳驾驶检测技术主要分为三大技术路径: 驾驶行为分析法易受驾驶习性牵制, 视觉特征技术易受环境干扰, 生理指标引导的技术手段中, 脑电信号直接映射大脑活动情形, 传统处理技术不易捕捉其通道间的空间互动性, 检测质量未达理想水平。非欧几里得数据得以优化处理, 归功于图卷积神经网络, 在空间关联特性挖掘上独领风骚, 成功实现脑电信号结构适配的突破, 技术推动疲劳驾驶检测效能的飞跃。

课题信息:

- (1) 安徽省教育厅高校重点自然科学研究项目: 2025AHGXZK31227
- (2) 安徽省教育厅高校重大自然科学研究项目: 2025AHGXZK20094
- (3) 淮北职业技术学院重点自然科学研究项目: 2025-YJZK-01
- (4) 淮北职业技术学院重点自然科学研究项目: 2025-YJZK-05
- (5) 淮北职业技术学院重点教学研究项目: 2024jyxm-02

作者简介:

刘建 (1975.03—), 男, 汉族, 河北滦县人, 工学硕士, 淮北职业技术学院讲师, 研究方向: 模式识别, 机器学习。

侯启恩 (1997.09—), 男, 汉族, 安徽宿州人, 工学硕士, 淮北职业技术学院助教, 研究方向: 脑电解码, 生物信号处理, 深度学习。

一、相关理论基础

（一）疲劳驾驶的生理机制与脑电信号特征

驾驶疲劳实际上是一种大脑认知能力衰退的现象，特点为注意力分散、反应迟钝、判断力减弱等，其生理机制与脑神经元变动紧密相扣，大脑神经元电生理活动的外在反映为脑电波，涉及delta、theta、alpha、beta四大频率群带，疲劳状态下，各种波段间的差异明显可见：经历深度疲劳后，delta波段（0.5—4Hz）的数值大幅提升，呈现大脑皮质活动抑制情形；theta频段（4—8Hz）呈现上升走势，是疲劳现象的初期标志；alpha波段（8—13Hz）的振幅显著上升，疲态逐步消退；13—30Hz频段的beta波段与大脑警觉性同步增强，疲劳状态下，振幅显著降低，这些频段特性为疲劳驾驶检测奠定了关键的生理基础，脑电信号的多通道采集技术导致其结构非欧几里得，传统卷积神经网络对这类空间关联信息的处理效果不理想，本文引入图卷积神经网络，其核心原因就在于此。

（二）图卷积神经网络核心原理

图卷积神经网络，是从传统卷积神经网络中衍生而来。本研究针对图结构数据处理的改进模型策略实施效果进行分析，本研究将卷积算法从欧几里得空间过渡至非欧几里得空间，实现节点特征的高效提取与扩散，图结构模块的图形框架由节点集合、边集合及邻接表组成，此图中的各个节点对应数据样本，边反映节点间的关联，节点间关联强度通过邻接矩阵体现^[1]。图卷积操作实际上是对节点特征通过邻接矩阵加权综合，聚合节点本质属性，构建新颖的节点属性图谱，公式如下：节点属性矩阵以X为要素，A矩阵定义相邻结构，A表示的邻接矩阵已进行归一化，W即卷积核的权重系数， σ 充当激活函数，H为经过卷积处理后的节点特征矩阵。与常规卷积神经网络进行对照分析，图卷积神经网络可动态捕捉节点间的空间互动，无需设定既定的网格格局，脑电信号等多通道、非结构化数据，此处理途径最为恰当^[2]。

二、基于图卷积神经网络的疲劳驾驶检测方法设计

（一）检测方法整体框架

本研究的疲劳驾驶检测体系框架由三个紧密相连、相互协作的核心环节构成：脑电图信号前期处理部分、图形结构构建部分及改进型图卷积神经网络检测部分，三者搭建起一条无缝对接的检测路径，维持信号输入至疲劳输出阶段的精准与高效，作为检测流程基石的是预处理模块，对搜集到的脑电原始信号执行去噪、伪迹消除及有效特征选取，最大力度剔除肌电、眼电等干扰成分，为后续图建模阶段打造优质、稳固的数据基础；图结构模块借助脑电多通道特性，独立节点化处理32个脑电信号采集通道，凭借生理联系与信号互动性，构建动态邻接矩阵，细致刻画大脑各部分间的联系强度及其演变轨迹；检测组件是识别环节的核心支撑，运用改进型图神经网络对构建的图形数据实施深度特征提取并进行分类，最终显现驾驶者“清醒”与“疲惫”的判定结果，本框架实现了从信号处理到状态识别的全程自动化操作，

有效减少了传统手工特征提取的烦琐操作及主观误差，深度挖掘脑电信号的空间关联特性，借助图卷积操作，显著提升疲劳驾驶检测的精确性与鲁棒性^[3]。

（二）脑电信号预处理

脑电波信号微弱，干扰性突出，在数据收集阶段，肌电（如面部肌肉紧绷产生的信号）、眼电（如眨眼、眼球移动产生的信号）、工频（50Hz）等噪声干扰不容忽视，若未实施有效前期作业准备，杂音对有效脑电信号的叠加作用重大，导致后续特征提取及状态识别误差显著放大，何因素干扰检测结果的精确性。本论文执行了四阶段的针对性预处理程序，维护信号质量水平：采用1Hz至50Hz频率范围的有限脉冲响应滤波器进行带通筛选流程，线性相位是该滤波器的核心属性，强力消除50Hz工频噪声及1Hz以下低频信号漂移，筛选出与疲劳状态有关的脑电波频谱；借助EEGLAB工具箱的自动伪迹消除插件，精确剔除眼电及肌电的干扰成分，力求最大限度地保存脑电信号的原始属性；对去杂质脑电信号实施分阶段分析，截取8秒作为样本段落，此时长确保样本内含充足的疲劳特征内容，兼顾时间分辨能力，防止因片段过长引起的特性时间延迟^[4]。

（三）图结构构建

图结构构建的核心要素是对节点及邻接矩阵的合理设定，其品质对图卷积神经网络的特征提取效果有直接影响，进而干扰了疲劳检测的精确度，本文深入剖析32通道脑电信号采集的特定特点，把每个脑电通道当作一个独立的图形节点，累计构建了32个节点，节点特征向量诠释通道预处理后的微分熵属性，精确呈现该脑区的电生理活动波形。节点间关联关系的核心表达为邻接矩阵，传统固定邻接矩阵难以匹配脑电通道疲劳状态下的动态关联关系变动，图模型适配性存在明显缺陷，本文实施动态邻接矩阵构建手段：借助皮尔逊相关系数，对任意脑电通道间的信号相互依存度进行量化，相关系数绝对值高，两个通道对应脑区电活动间的互动性明显增强；设定恰当的相关性门槛，将临界点设定为0.3，效果最为理想，对相关性指数超过阈值的通道间连线赋予其相关性指数作为权重，阈限以下数值归零化，采纳原始连接矩阵；对起始邻接矩阵实施规范化处理，消除由不同信号通道量纲不一致引起的干扰，构建完成动态邻接矩阵^[5]。

（四）改进型图卷积神经网络模型设计

不断优化特征提取效能及疲劳检测的精确度，克服基础图卷积神经网络在特征提取上的不足及冗余信息的干扰，本文在基础图卷积神经网络的理论框架内进行探讨，引入通道注意力与多尺度特征综合模块，打造与脑电图谱结构相契合的图神经网络新模型。模型结构细分为四个阶层，多层级共同作业，完成特征提取与精确归类：图结构数据接收端为输入层，32节点特性矩阵及变动邻接矩阵群，数据格式需与图卷积操作规范相吻合；图卷积层采用谱域图卷积途径，对邻接矩阵实施特性分析实施程序，实施节点特征的加权综合，安排了图卷积层对偶，首层筛选空间关联的基本属性，对第二层特征实施进一步的抽象化操作，逐步加强特征的描述表现力；融合层采纳了通道注意力模型，采用全局平均池化手段提取全面特征，结合全连接层与sigmoid激活函数，

对各个通道特征的权重进行学习，强调与倦怠状况紧密相连的核心属性，有效过滤掉过剩信息的干扰；此分类层集成了全连接层及 softmax 激活机制，将综合后的高维数据映射至“清醒”和“疲劳”两个范畴，呈现最终检测输出反馈。模型训练阶段，采用 Adam 优化技术，学习率设为 $1e-3$ ，借助交叉熵损失函数，对预测结果与真实标签的偏离度进行衡量，完成30个训练回合，保证模型充分达到收敛状态，同步实施提前终止手段以预防模型过拟合，进一步增强模型的普遍适应性。

三、实验验证与分析

（一）实验数据集与实验环境

本实验选取了 SEED-VIG 公开的疲劳驾驶脑电图数据集，该数据集收录了20位驾驶模拟实验者的脑电波记录，参与者的记录时长无一例外超过九十分钟，涵盖清醒与疲乏无力两种状态，脑电图信号采集频次为500Hz，合计32个通道。本实验对每位受试者的清醒与疲劳样本各200个进行了采集，制作实验数据集。数据集按7:3的比例划分，形成训练集与测试集，采用十折交叉验证手段对模型性能进行测试。实验环境搭建如下：本设备搭载 Intel Core i7-12700H 处理器和 NVIDIA RTX 3060 显卡，内存规格为16GB，本系统采用 Windows 10 作为操作平台，编程采用 PyTorch 框架，使用 Python 作为编程工具。

（二）实验指标与对比模型

对本文所提改进型图卷积神经网络疲劳驾驶检测效能进行全面性、客观性分析，实验实施参照精确度、R 度量、F1 得分这三大核心评估准则。这三个要素从多个角度揭示了模型的探测性能，摆脱了单一评价指标的束缚。精确度揭示了模型对全体样本的检测能力，精确度评估模型对疲劳样本的识别效果，防止疲劳状态未被检测到的情况发生。F1 指标全面考量精确度与召回率，有效克服类别不平衡引起的评价不公问题，该指标用于进行清醒与疲劳两种状态的分类实验。

以下公式揭示了三个核心指标的数学模型，其中：TP 代表疲劳状态被精准定位，TN 阐明清醒状态被正确识别为清醒，FP 即疲劳误判情形，FN 表示假负例（疲劳状态被错误检测为清醒）。

$$\text{准确率 (Acc) 公式: } Acc = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}$$

$$\text{召回率 (R) 公式: } R = \frac{TP}{TP + FN}$$

$$\text{F1 分数 (F1) 公式: } F1 = \frac{2 \cdot TP}{2 \cdot TP + FN + FP}$$

本文对提出的改进型图卷积神经网络 (Revamped GCN) 进行了全面分析，IGCN 模型的超凡特性，聚焦三种典型对比模型，

参考文献

- [1] 刘恺玢, 张震, 宋婷婷, 刘玮. 基于图卷积神经网络的疲劳驾驶检测方法 [J]. 自动化与仪表, 2025, 40 (11): 86-92.
- [2] 陆全平, 曾帅, 李芃锐, 鄧东瑞, 陈俊. 一个用于疲劳驾驶检测的多尺度卷积神经网络 [J]. 软件导刊, 2025, 24 (03): 127-136.
- [3] 王孝宇. 基于图神经网络的疲劳驾驶检测方法研究 [D]. 青岛大学, 2024.
- [4] 刘鹏宇, 杨璐霞, 戴斌. 基于轻量化卷积神经网络的疲劳驾驶检测方法研究 [J]. 现代计算机, 2024, 30 (09): 24-29.
- [5] 吴天昊, 张震, 王家曜. 一种基于卷积神经网络的疲劳驾驶检测方法 [J]. 控制工程, 1-7.

以下列出各类对比模型的设置要求，坚持实验对比的公正性与实际成效性，各模型在统一实验环境与数据集上接受训练与检验，实施既定训练参数：

1. 经典卷积神经网络组合：传统时序信号处理中，此模型占据一席之地，以三层卷积层与两层全连接层为基石，聚焦于脑电信号时间维度特性的提取，未充分挖掘通道间空间联系特性。

2. 基础级图卷积神经网络结构：本模型实施的是标准的频谱域图卷积技术，仅设两层卷积神经网络与单一分类模块，未采用通道注意力机制及多尺度特征融合模块。

3. 采用注意力机制的卷积神经网络模型：该架构在传统 CNN 模型中实现拓展，采用通道注意力机制，可对时间维度属性赋予权重，聚焦时间节点的关键属性。

（三）实验结果与分析

实验数据揭示呈现显著成效，本改进型图卷积神经网络在测试集上的预测精确度为91.2%，90.8% 的召回率令人瞩目，F1 评分结果为91.0%；传统 CNN 模型精确率为82.5%，81.3% 的召回率值得赞扬，F1 评分81.9%；基础 GCN 模型的精确度高达86.9%，本模型的召回效果为86.5%，F1 评价价值占比达86.7%；CNN 模型识别准确率88.4%，识别正确率高达87.9%，F1 评分结果为88.1%。比较分析揭示，数据对比显示，本方法在各项评估维度上均领先对比模型，本模型准确率比传统 CNN 高出8.7个百分点，与基础 GCN 相比，进步4.3个百分点，分析改进型图卷积神经网络在脑电信号空间关联特征识别中的高效捕捉能力，提升疲劳度检测的细致度。多受试者实验成果披露，本研究平均准确率为87.6%，与基础 GCN 相比，进步3.8%，此法展现出出色鲁棒性，应对个体差异的调节手段，图形化分析揭示事实，模型对 theta 波段特征的聚焦点最为集中，这一现象与人体疲劳时 theta 波幅值增加的生理现象相契合，对方法的合理性进行了进一步的验证。

四、结论

本文探讨传统疲劳驾驶检测技术精度不足、鲁棒性弱、难以提取脑电信号空间关联特征的问题，设计了一种依托图卷积神经网络的驾驶疲劳监测模型，采用脑电信号预处理、动态图结构建立与图卷积神经网络改进方法，精准掌握了疲劳状态的检测技术。实验结果说明，该检测手段的精确度高达91.2%，与传统基础图卷积模型相较，它表现出良好的抗干扰能力，图神经网络对脑电信号的非欧几里得特性实现有效匹配，剖析大脑不同区域间的空间联系特性，结合注意力机制，特征权重优化效果更上一层楼，提升检测可靠性，研发了一套高效、稳定的疲劳驾驶监测技术路径。