

DoctorPupil: A Virtual Reality System for Parkinson's Diagnosis Through Task-Evoked Pupil Response

DoctorPupil: 利用任务型瞳孔反应进行帕金森疾病检测的虚拟现实系统

IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics (J-BHI), vol. 29, issue 8, August 2025

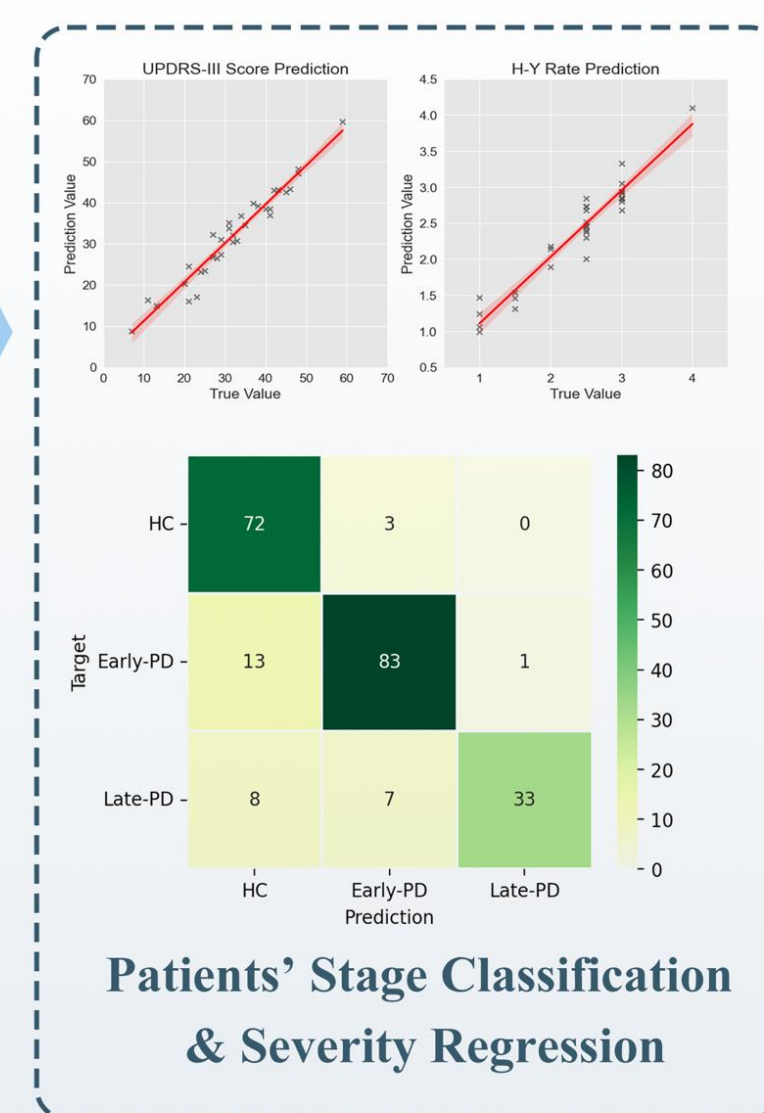
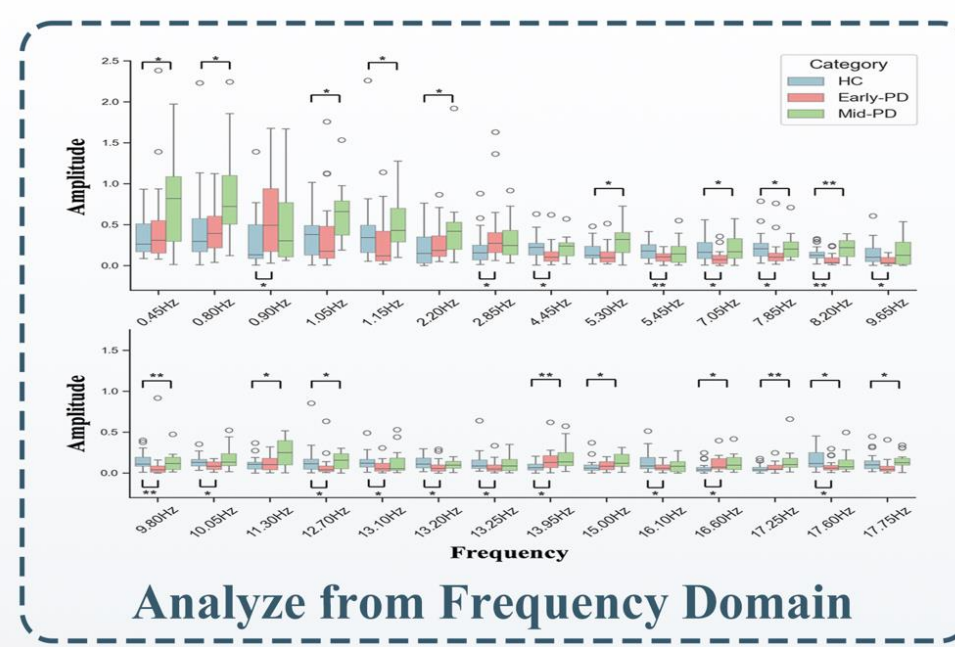
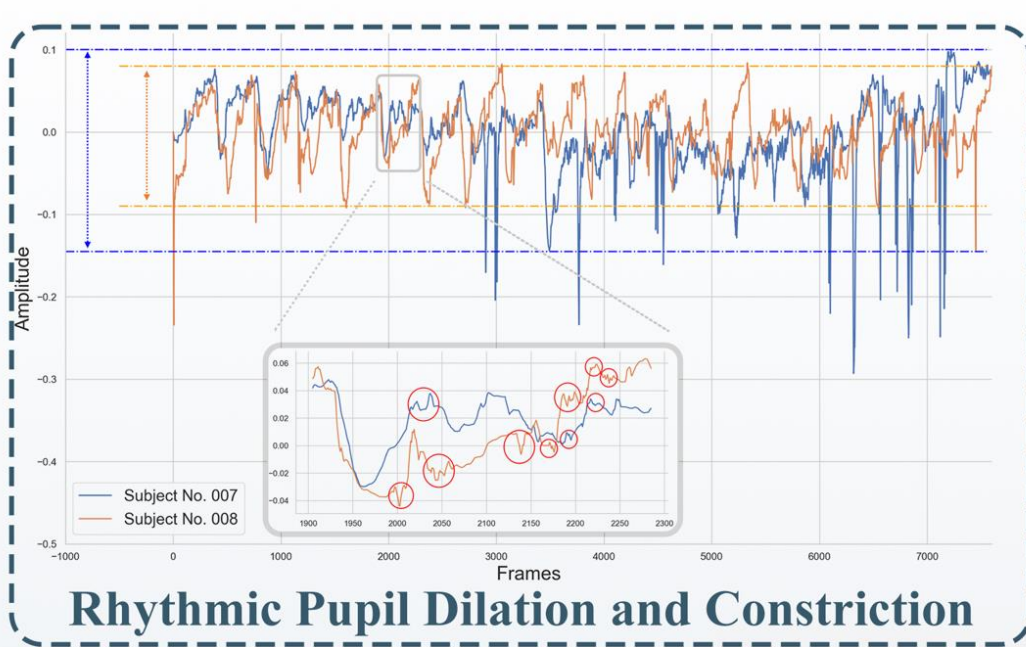
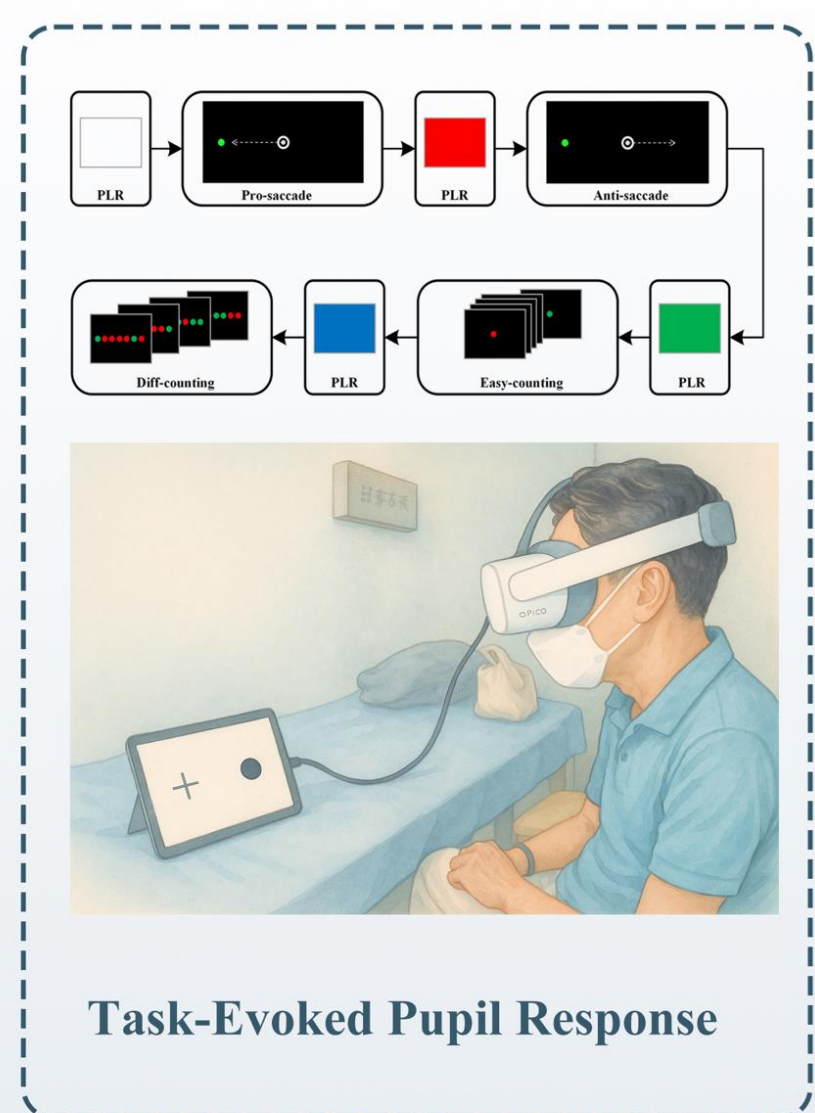
张旭橙, 万志荣, 赵静, 李信金, 刘岸风, 范向民, 孙伟*, 田丰*, 王大阔

张旭橙 zhangxucheng@iscas.ac.cn; 孙伟 sunwei2017@iscas.ac.cn

引言

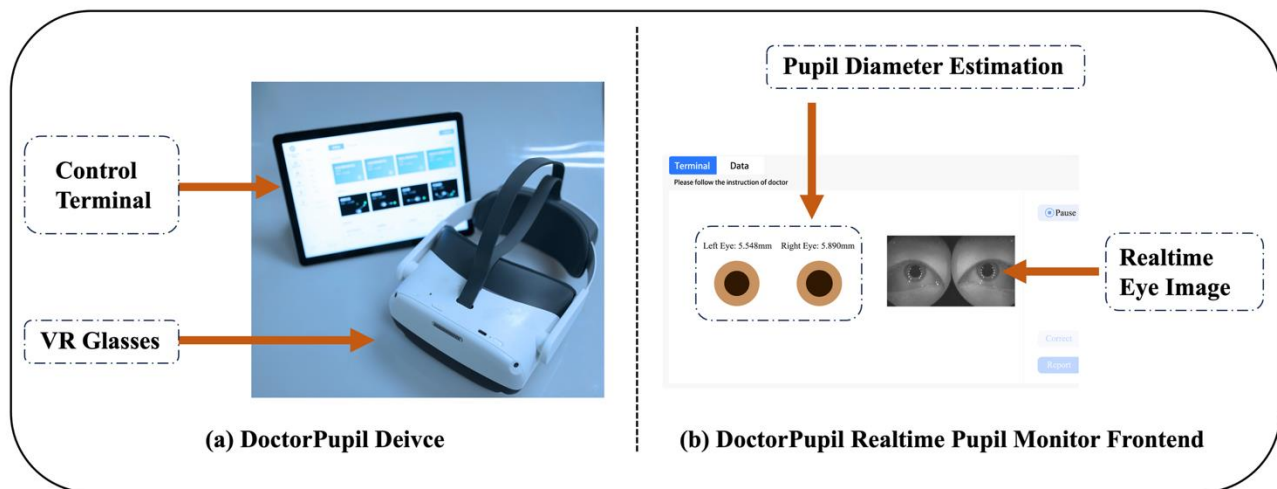
帕金森病 (PD) 是最为严重的神经退行性疾病之一, 目前并没有完全根治的治疗方法, 现有治疗手段主要致力于延缓病情进展。因此, 尽早发现PD患者, 对于实施更有效的治疗至关重要。我们的项目参与了一项旨在支持早期PD诊断的研究, 该研究设计了一个基于虚拟现实 (VR) 的系统, 用以监测瞳孔直径模式。受认知评估中关于瞳孔大小观察的启发, 我们注意到瞳孔的收缩与扩张往往呈现出与任务重复相一致的节律性模式, 这种模式类似于特定信号, 促使我们在频域内分析瞳孔的动态变化。

Assess Parkinson's Disease Severity from the Rhythmic Pupil Motion in the View of the Frequency Domain



系统构成

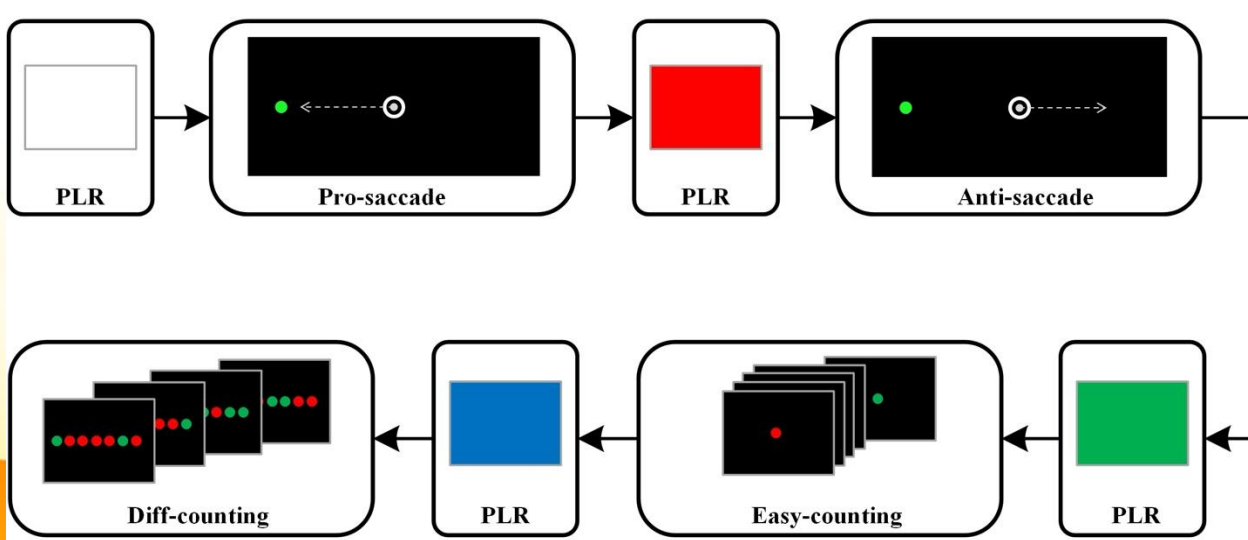
整个系统由两部分硬件构成: VR眼镜采用了PICO Neo3 Pro Eye VR眼镜, 集成了Tobii眼动追踪系统, 可用于捕捉眼动轨迹和估算瞳孔直径, 采样率高达90 Hz; 控制端使用了Microsoft Surface Go 2便携电脑。



任务设置

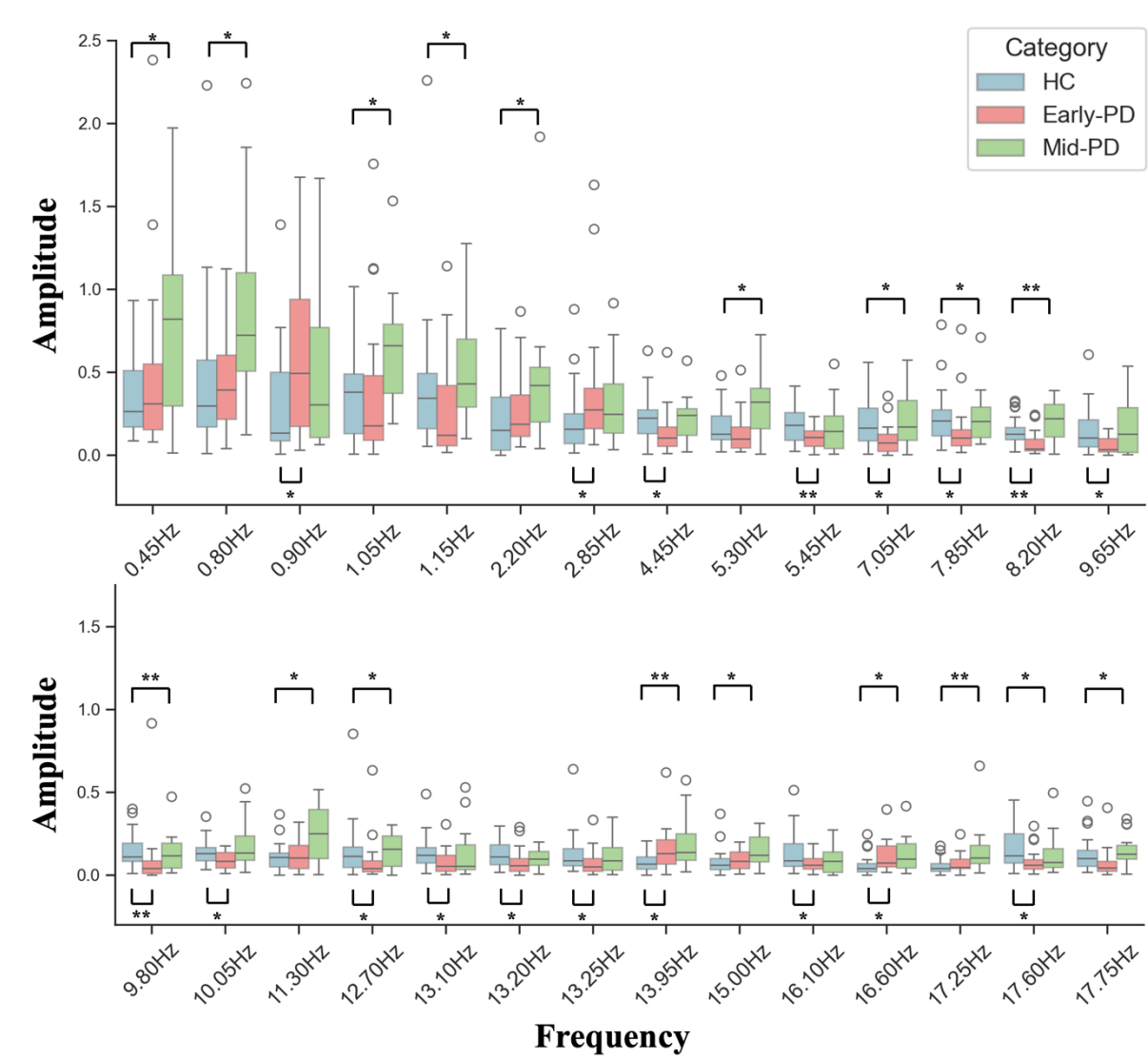
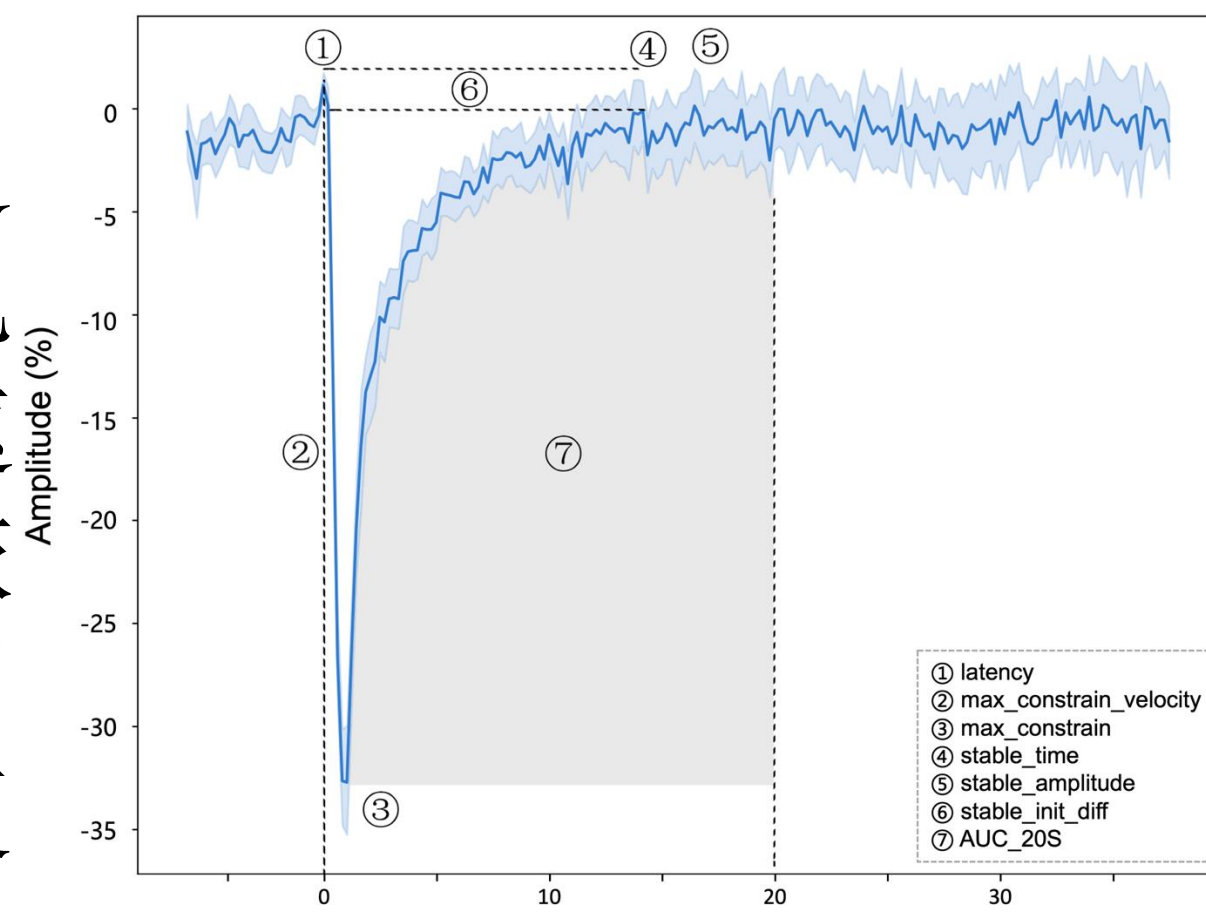
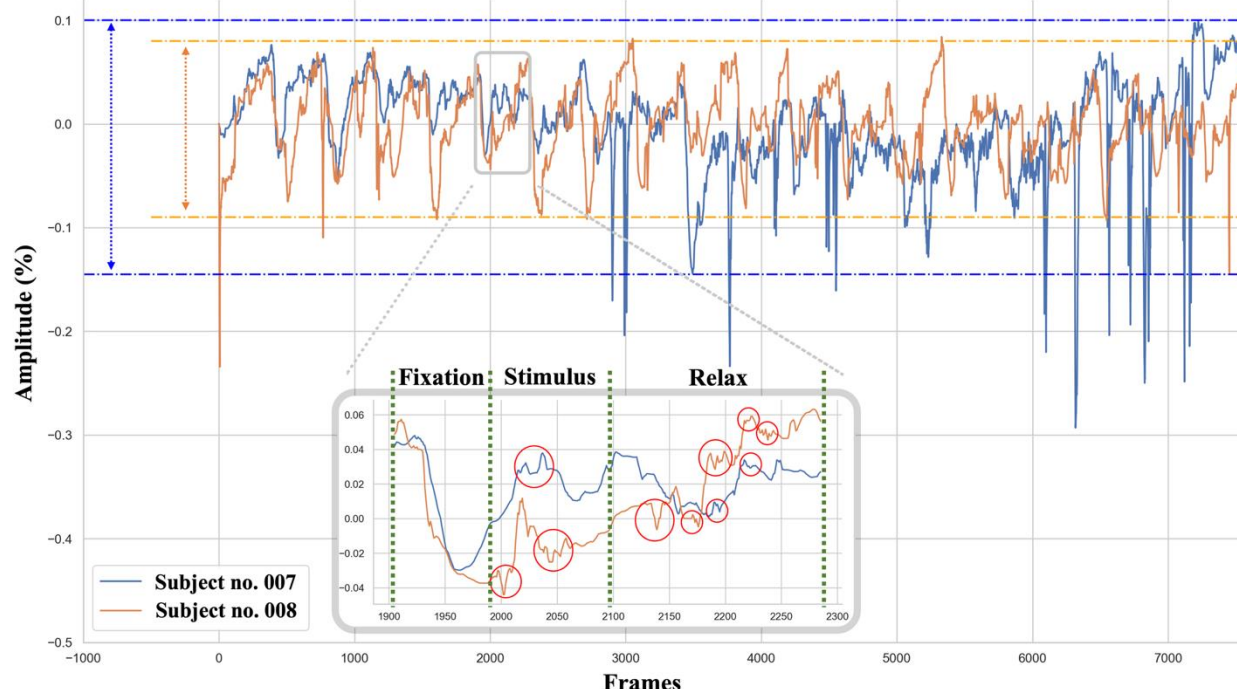
每位受试者在实验中将完成一组测试, 该组测试包含瞳孔对光反射 (PLR) 测试、扫视任务 (Saccade) 和计数任务 (Counting)。

- 光反射:** 瞳孔在短暂强光刺激下的快速收缩以及随后恢复至黑暗环境水平的过程。
- 扫视任务:** 朝向扫视要求受试者有意识地将视线移向一个新的目标点, 而反扫视则要求他们向相反方向移动视线。
- 计数任务:** 受试者观察屏幕, 并回忆与计算特定颜色小球的数目。



特征提取方法

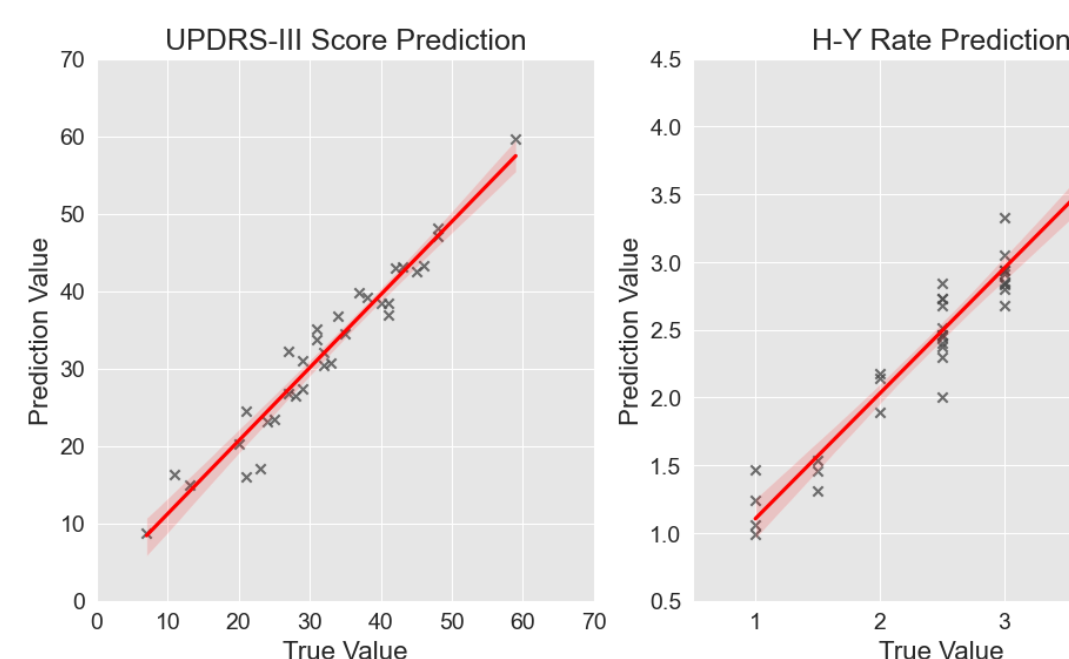
- 光反射瞳孔变化:** 我们总结了在之前研究中一系列显著的光反应瞳孔收缩特征, 包括收缩延迟、收缩速度等。同时, 为了弥补瞳孔扩张恢复期难以确定的难题, 我们补充了恢复曲线下面积作为衡量瞳孔恢复能力的补充参数。
- 任务唤起性瞳孔收缩:** 在扫视和计数任务中观测到的瞳孔动态均呈现周期性扩张-收缩模式。基于这种周期性信号特征, 本研究采用快速傅里叶变换 (FFT) 方法对瞳孔直径时序数据进行频域分解, 通过提取不同频率成分的幅度特征实现信号特征分析。



实验结果

基于特征工程与机器学习算法, 在55例样本的帕金森病诊断系统验证表明: 在健康对照与早期患者识别中达89.42% (n=55), 扩展至晚期患者后能保持最高83.64%准确率。UPDRS-III 评分预测MAE为2.16 (PE 8.65%), H-Y分期MAE为0.16 (PE 7.21%)。

Task [Best Feature Set]	K-Folds (K=5)		
	ACC	F1	AUC
SubID	0.6750	0.6399	0.6786
PLR [White-Red]	0.8250	0.8222	0.8433
Saccade [All]	0.8456	0.8242	0.8756
Pro-saccade [Half+Loss]	0.8015	0.7556	0.7931
Anti-saccade [Half+Loss]	0.7976	0.7555	0.8129
Counting [All]	0.8333	0.8312	0.8398
Easy-counting [Easy+Loss]	0.8250	0.7925	0.8333
Diff-counting [Diff]	0.7619	0.7259	0.7821
Overall	0.8942	0.8985	0.9064



结语

作为早期运用频域分析方法研究帕金森病相关瞳孔反应的研究之一, 我们的研究结果展示了该方法在揭示与神经退行性疾病相关的新型生理模式方面的潜力。此外, 我们的发现也突显了基于VR的系统作为帕金森病早期检测工具的潜力, 它便捷且非侵入式, 有望在实际的日常环境中得到应用, 并为未来的认知监测技术开辟道路。