

基于深度强化学习的 BCI 机械臂控制系统

徐正

2025 年 12 月 1 日

项目介绍

- **项目概述:** 基于 BCI (*Brain-Computer Interface*) 与 EEG 信号的深度强化学习机械臂控制方案，目标是将脑信号解析为离散控制策略并验证端到端可行性。
- **数据基础:** 采用 BCI Competition IV-2a/2b 数据集，借助 MNE-Python 完成 8–30 Hz 带通滤波、ICA (*Independent Component Analysis*) 伪迹剔除、注释驱动的 epoch 划分，并输出 Clean Raw、Epochs、ICA 统计及可视化结果。
- **特征工程:** 构建 OVR-CSP (*One-vs-Rest Common Spatial Pattern*) + LDA (*Linear Discriminant Analysis*) 基线，执行分层交叉验证、混淆矩阵与分类报告；将 CSP 滤波器、空间模式、特征矩阵、训练管线及指标元数据统一持久化，供后续 RL 直接调用。
- **深度模型:** 在 PyTorch 中实现 1D-CNN + LSTM 结构的 DQN (*Deep Q-Network*)，集成经验回放 (Replay Buffer)、目标网络 (Target Network) 软更新、Huber Loss、梯度裁剪与 ε -greedy 策略，支持多时间步状态堆叠。
- **系统整合:** 利用 CSP 特征驱动仿真环境 (PyBullet / Gym 等) 实现离散动作控制，构建“目标里程碑 vs. CTNet (*Convolutional Transformer Network*) 基准 vs. 当前 DQN”性能对照图，跟踪强化学习迭代效果并规划策略优化路线。
- **成果与工具链:** 成功复现 CTNet 文献性能，搭建可复用的数据处理与模型仓库；结合 NumPy/Pandas 进行指标分析，使用 Matplotlib/PGFPlots 生成会议图表，并借助 Git 与 LaTeX 完成阶段性汇报。
- **后续计划:** 推动大规模 RL 训练与 reward shaping、policy evaluation 等实验，拓展至真实机械臂通信接口与安全约束，实现从仿真到物理系统的迁移学习与实时闭环控制验证。