

睡眠診断・治療の自動化を目的とした深層学習モデルの開発 Development of deep learning models for automated sleep diagnosis and treatment

堀江和正

筑波大学 計算科学研究センター 計算情報学研究部間

1. 研究目的

睡眠は日々を健康的に過ごすための重要な要素の一つである。しかしながら、日常生活におけるストレスなどを理由に、睡眠に関するトラブルや不安、睡眠障害が増加している。睡眠臨床の普及が急務である一方、睡眠の専門的な知識を持つ医師・技師を育成するのは容易ではなく、需要と供給のギャップが生まれている。この状況を踏まえ、睡眠臨床における医師・技師の利用負担を減らすことを最終的な目標とし、以下の3点を中心とした睡眠診断・治療支援システムの開発を行った。

- 1) 家庭用睡眠計向け睡眠ステージ自動判定手法のさらなる改善
- 2) 睡眠介入によるパニック障害・悪夢障害への治療支援
- 3) 睡眠検査結果の解説文自動生成

2. 研究成果の内容

1) 家庭用睡眠計向け睡眠ステージ自動判定手法のさらなる改善

近年普及が進む家庭向けの睡眠計で計測した脳波（EEG）には電極接触不良に由来するノイズが多く含まれている。従来手法ではステージ REM（レム睡眠）と N1（浅いノンレム睡眠）の誤判定が顕在化している。本研究では、家庭用睡眠計 In-homeEEG を対象に電極接触不良に対して頑健な睡眠ステージ判定モデルの開発に取り組んだ。提案手法は、複数の小モデルを用意し、これの多数決で最終的なステージを決定するアンサンブル手法を一部改良たものである。一般的なアンサンブルとは異なり、各小モデルは異なる信号（と元となる電極）を利用している。ある電極に接触不良が発生した際は、その電極を利用しない小モデルのみ用いて多数決を取ることで、システム全体としてはその電極を「無視」した判定を実現した。

このアイデアを私たちが過去に開発した睡眠ステージ判定モデル Sleep-CAM に適用、SHHS v2 データセットで評価したところ、①接触不良があるデータに対する、誤判定率の増加は 7.9%pt→0.3%pt に抑えられた、②接触不良が無いデータに対しても判定精度が 0.7%pt 改善した、という結果が得られた。

この成果は在宅長期モニタリングの質を高め、潜在的睡眠障害の早期発見につながると期待される。

2) 睡眠介入によるパニック障害・悪夢障害への治療支援

パニック障害や悪夢障害では、レム睡眠中に情動的夢内容と覚醒反応が集中することが知られている。そこで、振動刺激等を用いた穏和介入を遅延なく行うためのトリガとして、Sleep-CAM をベースに、30 秒窓を 1 秒ステップで推論するリアルタイム REM 検出器に転用した。構築したパイプラインは、推定結果を UDP/TCP で外部デバイスへ送出でき、平均推論レイテンシは約 90ms と 1s 以内の臨床要件を十分に満たす。検証実験では確定レムの検出精度が Accuracy 93.9 %, Precision 83.0 %に達し、夜間の発作兆候を早期に捉え得る性能を確認した。今後はウェアラブル振動モジュールと連携し、介入プロトコルの有効性を臨床前試験で評価する計画である。

3) 睡眠検査結果の解説文自動生成

株式会社 S'UIMIN が提供する家庭用睡眠計は、内蔵アルゴリズムにより一晩の睡眠ステージ推定結果をクラウド経由で出力し、そこから自動算出される睡眠効率・睡眠潜時・中途覚醒時間など十数種の指標を CSV 形式で提供する。本研究では、これら客観指標に加えて国際標準アンケート (ISI, PSQI, ESS) のスコアを統合し、生成 AI を用いて患者向けの解説文を作成するワークフローを検討した。具体的には GPT-4o へ ①デバイス由来の指標と②アンケート結果 を系統立てて提示し、「医学的に重要なポイントを優先し、専門用語を極力避けて説明する」という内容の指示の元でテキストを生成した。

生成レポートを医師・技師計 4 名が 5 段階で評価したところ、医学的妥当性

(Soundness) で 68 %、わかりやすさ (Validity) で 65 % が Acceptable (4 以上) を獲得し、プロンプトエンジニアリングを最小限に留めても十分な品質が得られることが確認できた。

本システムにより、睡眠検査後の説明書作成に要する手間を大幅に削減できるため、現行の当日フィードバック体制を維持したまま、対応件数を拡充しやすくなる。今後は電子カルテ連携による自動配信を実装し、患者理解度の向上と医療スタッフの作業効率化を図る予定である。

3. 学際共同利用プログラムが果たした役割と意義

学際共同利用プログラムから提供いただいたバジェットを利用し、1) ~ 3) における複数の深層学習モデルの学習を実行した。特に 1) の小モデルアンサンブル手法の開発では、多数のモデルを並行して学習することで研究全体の効率化につながった。

4. 今後の展望

多属性一体型モデル：呼吸イベントを統合した HMM-CNN ハイブリッドの完成。

情動推定モデルのレム睡眠適用：転移学習と夜間プロトコル試験。

睡眠特化 LLM の精度改善：医師監修データ追加と RAG 構成。
新 GPU 世代を想定した大規模学習パラメータのスケーリング検証。

5. 成果発表

- (1) 学術論文 1 本採択
- (2) 学会発表 3 本発表, 1 本採択済
- (3) その他 なし

使用計算機	使用計算機に ○	配分リソース※		
		当初配分	移行*	追加配分
Cygnus	○	0	0	0
Pegasus	○	15000	0	0
Wisteria/BDEC-01		-		-
	※配分リソースについてはノード時間積をご記入ください。 *バジェット移行を行った場合、「+2000」「-1000」のように記入			