

Sleep-CAM：説明可能な睡眠ステージ自動判定

堀江和正とゆかいな仲間たち

筑波大学

2025 年 10 月 20 日

概要

睡眠ステージの判定は睡眠診断における重要な検査であるが、専門家による手作業判定には多大な労力を要する。本研究では、Class Activation Mapping (CAM) を導入した深層学習モデル「Sleep-CAM」を提案し、判定根拠の可視化を可能にした。評価実験では、正解率 86.9 % を達成し、専門家間一致率 (約 82 %) を上回る結果を得た。このことから、Sleep-CAM は説明可能性と臨床応用に十分な精度を両立したモデルであることが示された。

1 はじめに

睡眠ステージ (W, REM, N1, N2, N3) は睡眠医療において重要であり、従来は専門家が PSG (EEG/EOG/EMG) から特徴波を同定して目視判定する。自動化の研究は発展しているが、臨床での信頼を得るには、どの信号のどの部分を根拠に判定したかを提示できる説明可能性が鍵である [1, 3]。

2 提案手法の要点

Sleep-CAM は、各生体信号に対して CNN ブロックで特徴抽出し、割り当てモジュールでクラス活性度 (CAM) を時系列上に出力する。GAP (Global Average Pooling) により、波形が出現する位置に依存せず特徴を集約し、最終的なステージ確信度を得る (図 1)。なお、本提案手法においては損失関数にクロスエントロピー (式 1) を用いている。

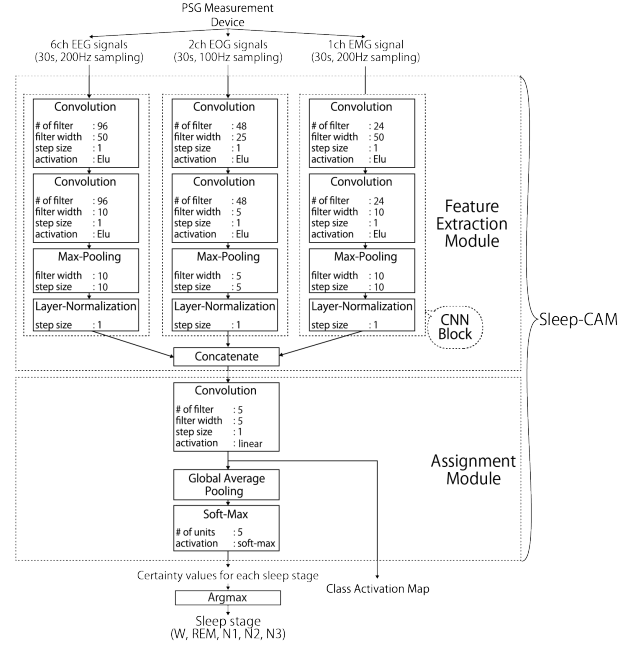


図 1 Sleep-CAM 構成図

$$\mathcal{L}(\theta) = - \sum_{i=1}^N \sum_{k \in \text{stage}} y_{ik} \log p_{\theta}(k | x_i), \quad (1)$$

3 実験結果

図 2 より、判定根拠が提示でき、かつ専門家の判断根拠と一致することが確認できた。

109 名の終夜記録 (オープンデータ MASS と自施設データの統合) に対する 7 分割交差検証の例では、全体正解率約 86.9%, $\kappa \approx 0.81$ を得て、専門家間一致 (約 82%) と同等以上を示したと報告される。また、REM や N3 で指標波 (REM 眼球運動、デルタ波) に高 CAM が重なる一方、K-complex や覚醒 (arousal) の扱いは課題として残ると議論された。

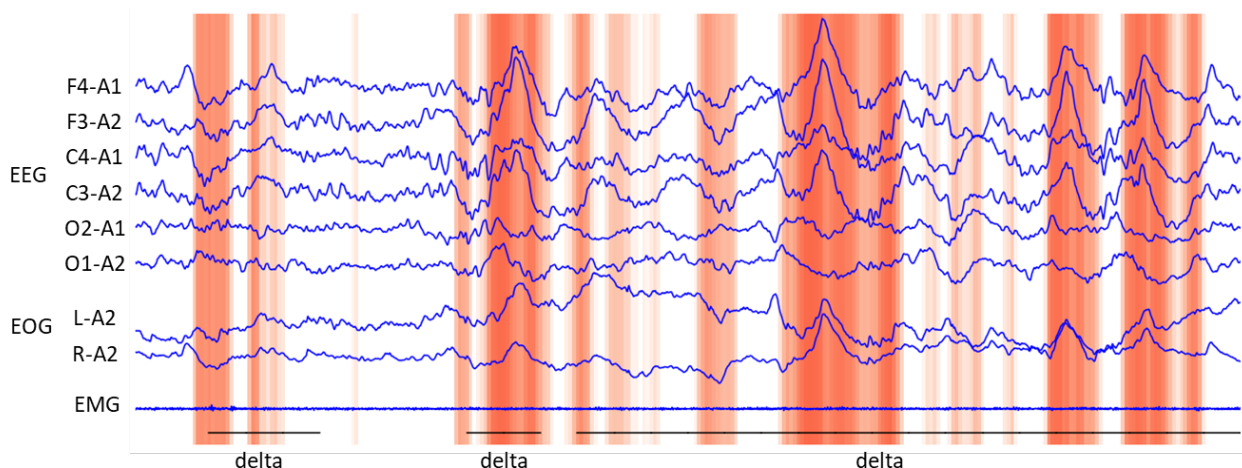


図 2 判定根拠提示例

表 1 性能比較の例 (イメージ)

手法	Accuracy	κ
Sleep-CAM	0.869	0.81
U-time [2]	0.838	0.77
Stanford Stages [3]	0.824	0.75

4 考察

GAP は時刻情報を平均化するため、AASM 規則の一部 (波形の出現タイミングや割合) を完全には再現できない。一方でパラメータ削減・学習安定化の効果があり、全体精度では有利に働く。孤立エポック (遷移付近) や覚醒イベントへの対処は今後の改良点である。

5 まとめ

本研究では、推論機構を備えた新しい睡眠ステージ自動判定モデル「Sleep-CAM」を提案した。提案法は、判定根拠となる信号区間を明示し、波・紡錘波・REM 眼球運動・徐波など、専門家が用いる特徴波と一致することを確認した。また、86.9% の精度を達成し、既存法および専門家間一致を上回った。

謝辞

本研究は株式会社 S' UIMIN との共同研究として実施された。計算資源は筑波大学計算科学研究

センターの共同利用プログラム「Cygnus」を利用した。

参考文献

- [1] *The AASM Manual for the Scoring of Sleep and Associated Events: Rules, Terminology and Technical Specifications*. American Academy of Sleep Medicine, version 2.5 edition, 2018.
- [2] Mathias Perslev, et al. U-time: A fully convolutional network for time series segmentation applied to sleep staging. In *Advances in Neural Information Processing Systems*, Vol. 32, pp. 4415–4426, 2019.
- [3] Jesper B. Stephansen, et al. Neural network analysis of sleep stages enables efficient diagnosis of narcolepsy. *Nature Communications*, Vol. 9, No. 5229, 2018.