

オートエンコーダと閾値ベース分類器による脳動脈閉塞推定

Cerebral Artery Occlusion Inference
Based on Autoencoder and Threshold-based Classifier

藤澤 璃子*

松川 真美*

Riko Fujisawa
Mami Matsukawa

大園 健史*

小林 恭代†

Kenshi Ohzono
Yasuyo Kobayashi

大崎 美穂*

斎藤 こずえ†

Miho Ohsaki
Kozue Saito

白浜 公章*

山上 宏‡

Kimiaki Shirahama
Hiroshi Yamagami

1. はじめに

脳動脈閉塞では、発症から診断治療までの時間が予後を大きく変える。迅速な簡易診断ができれば、死や麻痺・失語などの後遺症を防ぐ可能性が高まる。しかし、現在はCT, MRI, MRA等の大型装置による画像診断が主であり、救急医療現場では使用できない。そこで、小型圧電センサと機械学習に基づき、救急車における使用が可能な脳動脈閉塞診断支援システムが開発されつつある[1, 2, 3]。図1のように、本システムではセンサを左右の頸動脈に押し当て、脳動脈の情報を含む脈波を測定する。閉塞は左右一方に起こりやすい事実を踏まえ、機械学習は脈波の左右差を手がかりとして閉塞有無を推定する(図2参照)。

過去の閉塞推定では、脈波の左右差を定式化したハンドクラフト特徴量とロジスティック回帰を用いた[1]。この手法は閉塞推定が可能であると初めて示した点で意義深い。一方で、収集困難な閉塞患者データを多く要すること、人が考え得る特徴量に限界があることが課題となった。そこで、本研究では従来と異なるアプローチとして、オートエンコーダ(AE)と閾値ベース分類器を組み合わせた閉塞推定手法を提案・評価する。なお、我々は以前よりこの提案手法に取り組んできたが、性能評価は断片的であった[2, 3]。本稿では、詳細に性能評価した結果に重点を置いて報告する。

2. 提案手法

我々は、AEが持つ特徴量抽出と異常検知の機能、および、閾値ベース分類器が持つ陽性事例の性能調整機能から着想を得た。これらの機能により、特徴量の自動抽出と閉塞なし事例のみで閉塞推定する仕組みを実現する。提案手法は図3に示す前処理部と、再生部、分類部から成る。前処理部は相関と振幅の平均を基準として、測定ノイズを脈波から除去する。再生部のAEは閉塞なし脈波を自己再生するように学習し、その過程で特徴量も自動抽出する。そして、閉塞なし脈波は再生できるが閉塞なし脈波は再生し難い状態になる。学習後、AEは分類対象である未知の脈波を受け取り、それを自己再生する。閾値ベース分類器は自己再生性能を閾値処理して、性能が高ければ学習時と同質の脈波(閉塞なし)、低ければ異質の脈波(閉塞あり)と判定する。

予備実験の結果に基づき、提案手法への脈波の入力は点ごとではなく周期ごとに行う。AEには様々な選択

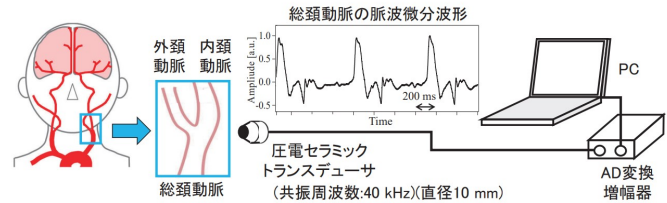


図1: 脈波測定装置。文献[2, 3]より引用。

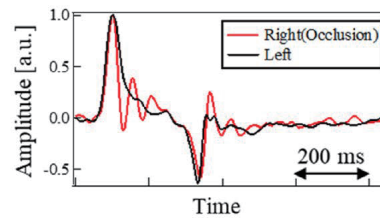


図2: 閉塞患者の左右の脈波の一例。文献[1]より引用。

肢が考えられるため、最も基本的なMLP AE、時系列の変動記述に優れるRNN AE, LSTM AE, GRU AE, 形状記述に優れるCNN AEを候補とする。AEの損失関数は入力と出力の平均二乗誤差である。閉塞有無の判定では、自己再生の個人差の影響を抑制しつつ、閉塞あり事例に対する性能を高める必要がある。これを満たすように、閾値ベース分類器の閾値は同じ被験者の左右脈波の自己再生性能の最小差分とする。

3. 評価実験

3.1. 目的と条件

本実験の目的は、提案手法の閉塞推定における有効性検証と適するAEの選定である。データには、文献[3]と同じ20代~80代の50名(閉塞なし29名, 閉塞あり21名)から測定した脈波微分波形を用いた。再生部と分類部が提案手法の中核機能を担うが、脈波のような生体信号では測定ノイズが性能に大きな影響を及ぼす。そこで今回は、前処理部についても詳細に検討した。全自動で測定良好区間を切り出す条件、および、自動切出後に医師が測定良好区間を選び出す2条件で実験を行った。AEのハイパーパラメータと探索条件・方法、性能の計算方法も文献[3]と同じにした。紙面の都合上、詳細は省略するが、性能評価の再現性・信頼性を確保すべく、以下の工夫を施したことを述べておく。データ順序と初期乱数を変えながら入れ子交差検証を5回行い、試験性能の平均と標準偏差を求めた。

*同志社大学 Doshisha University

†奈良県立医科大学 Nara Medical University

‡筑波大学 Tsukuba University

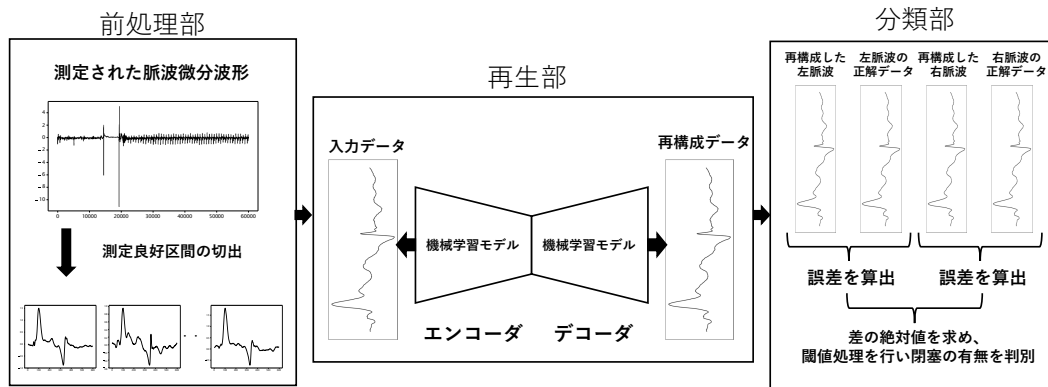


図 3: 提案手法の構成図

表 1: 評価実験における提案手法の閉塞推定性能。

自動前処理のみの結果

AE の種類	正解率		適合率		再現率		F 値	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差
MLP AE	0.57	0.03	0.55	0.02	0.92	0.03	0.69	0.03
RNN AE	0.55	0.03	0.54	0.02	0.91	0.03	0.67	0.02
LSTM AE	0.55	0.02	0.53	0.01	0.95	0.00	0.68	0.01
GRU AE	0.57	0.05	0.55	0.03	0.91	0.03	0.68	0.03
CNN AE	0.57	0.05	0.55	0.04	0.92	0.04	0.69	0.02

自動前処理と医師による選定の結果

AE の種類	正解率		適合率		再現率		F 値	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差
MLP AE	0.56	0.03	0.54	0.02	0.89	0.05	0.67	0.03
RNN AE	0.55	0.03	0.54	0.03	0.92	0.03	0.68	0.01
LSTM AE	0.53	0.03	0.52	0.02	0.86	0.06	0.65	0.03
GRU AE	0.59	0.06	0.56	0.05	0.90	0.04	0.69	0.04
CNN AE	0.58	0.02	0.56	0.01	0.93	0.02	0.70	0.02

3.2. 結果と考察

表 1 の上側に自動前処理のみの結果、下側に自動前処理と医師による選定を経た結果を示す。上下を比較すると、最も高い正解率と F 値は下側に見られた。ただし、上下間で最も高い性能とそれに次ぐ性能の差は 1[%] 程度、かつ、平均的には正解率、F 値ともにほぼ差異はなかった。ゆえに医師による選定がなくても、自動前処理は適切に測定良好区間を切り出せると分かった。

次に、表 1 全体の傾向に基づき提案手法の有効性を議論する。最低限超えるべき性能として、ランダム分類の正解率 50[%]、F 値 46[%]、全陽性分類の正解率 42[%]、F 値 59[%] が挙げられる。提案手法の性能はこれらよりも十分に高い。過去の手法 [1] の正解率 65[%]、F 値 58[%] と比較すると、正解率は 8[%] ほど下がるが、F 値は約 11[%] 高くなっている。閉塞患者に対する見落としや正確さの重要性から、F 値の向上は望ましい。AE に関して、表 1 の大半の条件で CNN AE と GRU AE が上位 1~2 位を占めている。以上より、提案手法が閉塞推定に有効であること、CNN AE と GRU AE が適することが明らかになった。

4. おわりに

救急医療における脳動脈閉塞診断支援の実現に向け、脈波を用いた閉塞推定手法を提案・評価した。提案手法はノイズを除去する前処理、脈波を自己再生する AE、自己再生性能に基づき閉塞の有無を判定する閾値ベース分類器で構成した。評価実験では、前処理の妥当性と、自己再生に CNN AE と GRU AE が適すること、提案手法がランダム分類や全陽性分類、過去の手法よりも高性能であることを確認できた。今後は、データ不足を補うために他の情報源を利用する転移学習を導入したい。CNN AE と GRU AE の双方の長所を持ち、説明可能性も満たす新しい AE にも取り組む。

参考文献

- [1] T. Shimada et al., Development of Evaluation System for Cerebral Artery Occlusion in Emergency Medical Services: Noninvasive Measurement and Utilization of Pulse Waves, Scientific Reports, vol.13, no.3339 (2023).
- [2] 山田紘丘ら, 脈波を用いた脳動脈閉塞の推定: LSTM オートエンコーダによる閉塞有無の教師なし分類, 情報科学技術フォーラム FIT2023, G-017 (2023).
- [3] 大園健史ら, 脈波を用いた脳動脈閉塞の推定: 閉塞有無分類のためのオートエンコーダの選定, JSAI2024, 4L1-GS-10-02 (2024).