

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

Cerebral Artery Occlusion Inference Using Pulse Waves: Unsupervised Classification of Occlusion Existence Based on LSTM Autoencoder

山田 紘丘*	前田 一葉*	大崎 美穂*	松原 和正*
松川 真美*	小林 恭代†	斎藤 こずえ†	山上 宏‡
Hiroki Yamada	Kazuha Maeda	Miho Ohsaki	Kazumasa Matsubara
Mami Matsukawa	Yasuyo Kobayashi	Kozue Saito	Hiroshi Yamagami

1. はじめに

CT や MRI で得た画像による脳動脈閉塞診断が主流であるが [1], これらの機器は救急車に搭載困難, かつ法的にも使用者に限られる. 我々は脳動脈閉塞診断支援を目指して, 救急車で使用し得る脈波測定装置を開発し (図 1 参照), 閉塞からの反射が脈波の動的变化を起こすという物理学的知見も得た. そして, 閉塞は脳の片側に起きやすいという医学的知識のもとに, 左右の頸動脈で測定した脈波の差異に基づく閉塞推定手法を考案した [2]. この手法では, 専門家が知見・知識により定義した特徴量を用い, 分類器であるロジスティック回帰が閉塞推定を行う. 試験データの正解率 65[%]を得たが, 人手による特徴量の定義や閉塞患者データの不足に伴う分類器学習の困難さという問題が残った. 本研究では, 再帰型ニューラルネットワーク (RNN) の一種である LSTM とオートエンコーダ (AE) の組み合わせによる閉塞推定手法を提案する. これにより, 特徴量の自動抽出と健常者データのみでの教師なし分類を試みる.

2. 関連研究

上述の我々の研究 [2] が脈波を用いた閉塞推定の初の試みであり, 現時点では同様の他の研究は見られない. 今回の提案手法は LSTM と AE の組合せ (LSTM AE) に基づくので, 本節ではこれらを概説する. LSTM は, 時系列の動的特性を記述する RNN に長期記憶の仕組みを加えたモデルである [3]. AE は, 砂時計型の構造を通して入力データを再生することで, 次元圧縮や異常検知を可能にしたニューラルネットワークの総称である [3]. LSTM と AE を組み合わせた LSTM AE は, 時系列の異常検知手法として着目されている [4]. LSTM AE の応用では, 時系列上の異常な点を見つけるという問題設定が多い.

3. 提案手法

我々は時系列上の異常な点の検知ではなく, 時系列そのものが異常であるかを判別する LSTM AE の枠組みを考案し, 脈波を用いた閉塞推定を実現する. 閉塞推定部に加えて, 測定不良問題を解決する前処理部も備える. すなわち, 提案手法は測定良好区間を切り出す前処理部と, 切り出した 1 周期分の脈波から閉塞の

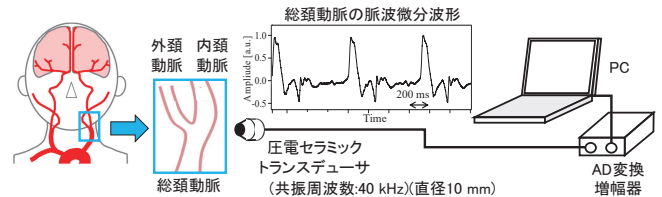


図 1: 頸動脈波測定の機器と手続き.

有無を判別する推定部から成る.

前処理部ではまず, 複数の周期を含む脈波の生データについて, 正負の最大ピークの平均と標準偏差 (SD) を求める. そして, 3SD を超える区間を削除する. これを 2 回繰り返して, 測定良好区間の候補を得る. 次に, 測定良好区間候補を 1 周期ごとの脈波に切り分け, 最大相互相関値を求める. この値が極端に小さいものは除去する. 本手続きを 2 回繰り返した結果, 測定良好な複数の脈波 1 周期分を得る.

推定部は再生部 (LSTM AE) と分類部 (閾値による分類) で構成される. 再生部はセル 1 つから成る LSTM をエンコーダとし, 同じ構造の LSTM をデコーダとする LSTM AE である (図 2 参照). デコーダは RTRL 学習させる. 再生部には脈波 1 周期のベクトルを 1 時点の入力として与える. 予備実験で脈波上の 1 点ずつを入力すると, 性能が低かったため, 1 周期ごとの学習とした. 脈波測定時のサンプリング周波数は 1[kHz], 人間の心拍数が 60-100 [bpm] なので, 入力ベクトルは 600 点 (言い換えると 600 次元) に設定した. 再生部の訓練は健常者データのみで行い, 正常な脈波のモデルを作る.

後半の分類部では, 元の脈波と LSTM AE が再生した脈波の残差平方和 (RSS) を求めて閾値処理する. 具体的には, 推定対象者の左脈波の再現で得た RSS, 右脈波の RSS, および, これらの差を求める. 差の絶対値が閾値より大きければ, 閉塞があると判定する. 患者データの半分を検証用として, 閉塞推定の再現率が最も高くなるように閾値を設定した. 残り半分を用いて試験を行った.

4. 評価実験

4.1. 目的と条件

本実験では提案手法を脈波に適用して, 脳動脈閉塞の有無を推定する. データは閉塞なし 29 名, 閉塞あり

*同志社大学 Doshisha University

†奈良県立医科大学 Nara Medical University

‡国立病院機構大阪医療センター National Hospital Organization Osaka National Hospital

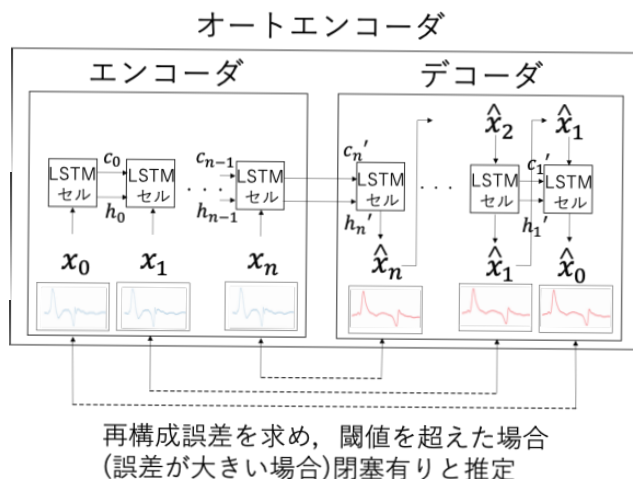


図 2: 提案手法の推定部の構成図. 再生部 (LSTM AE) と分類部 (閾値による分類) から成る.

20 名 (計 49 名) から測定した左右の頸動脈波とした。データをランダムに並べ替えた上で、提案手法の再生部 (LSTM AE) の訓練用、分類部 (閾値処理による分類) の検証用、最終的な汎化性能評価の試験用にデータを分割した。ランダム化を 4 回行い、回ごとに提案手法の訓練・検証・試験を実施して、4 回分の試験性能を求めた。データ分割の詳細は下記の通りである。

再生部に関しては、データ数が少ないことを考慮し、ハイパーパラメータは表 1 の値に固定した。ここでは検証データは使わず、閉塞なし 9 名の脈波を訓練データとした。分類部には、再生部の脈波の再生精度の閾値というハイパーパラメータがある。そこで再生部とは異なる閉塞なし 10 名、閉塞あり 10 名の脈波を検証データとし、最適な閾値を得た。また、分類部の検証に使った閉塞なし 10 名の脈波を再生部の再学習にも活用した。最後に、訓練・検証には未使用の閉塞なし 10 名、閉塞あり 10 名の脈波を試験データとして、汎化を表す試験性能を求めた。

4.2. 結果と考察

表 2 に 4 回のランダム化で得た試験性能を示す。評価基準は正解率 (陰性と陽性の両方で正解した割合)、適合率 (陽性を正確に推定した割合)、再現率 (陽性を漏れなく推定した割合)、F 値 (適合率と再現率の調和平均) である。全てを閉塞ありと見なす場合のチャンスレベルは、全評価基準とも 0.50 である。大半の条件で、正解率から F 値の全てがチャンスレベルよりも高く、F 値は約 0.62-0.68 の範囲 (平均では約 0.65) となった。文献 [2] における正解率 0.65、適合率 0.65、再現率 0.53、F 値 0.58 と比べると、今回は再現率と F 値が高くなっている。特に、総合的な評価基準である F 値は 0.65 であり、7 [%] 程度向上した。以上から、提案手法が閉塞推定に有効であると確認できた。ただし、十分高い性能とは言い難く、今後の改善が必要である。提案手法の前処理では、測定者の手振れ等による測定不良区間を完全には除去できなかった。これにより、健常者の

表 1: LSTM AE のハイパーパラメータ.

隠れ層の数	1
隠れ層のニューロン数	100
学習率	0.01
最大エポック数	10000

表 2: 評価実験における提案手法の試験性能.

ランダム化	正解率	適合率	再現率	F 値
1 回目	0.5800	0.5499	0.8800	0.6758
2 回目	0.6600	0.6635	0.6600	0.6549
3 回目	0.4700	0.4832	0.8500	0.6154
4 回目	0.5550	0.5371	0.8300	0.6510
平均	0.5663	0.5584	0.8050	0.6493
標準偏差	0.0782	0.0758	0.0988	0.0251

脈波にノイズに起因する左右差が生じて、閉塞ありと誤認識した恐れがある。今後、前処理を改善して本問題の解決と性能向上を図る。

5. おわりに

救急現場における脳動脈閉塞診断支援のために、我々は脈波の測定装置と脈波を用いた閉塞推定手法を開発してきた。本研究では、人手による特徴量抽出が不要かつ、健常者データのみで学習が可能な手法として、LSTM AE を用いた閉塞推定手法を提案した。具体的には、健常者の脈波を学習した LSTM AE に推定対象である脈波を再生させた。そして、再生精度が低ければ、閉塞からの反射波が重畳した異常な脈波 (すなわち、閉塞がある) と推定した。提案手法を実測した脈波に適用した結果、適合率と再現率の調和平均である F 値は 0.62-0.68 となり、一定の有効性が示された。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 21H01344 と、GoTech 事業「走行中の救急車での計測も可能な脳動脈閉塞検査システムの開発」の助成を受けた。

参考文献

- [1] D. Birenbaum et al., "Imaging in Acute Stroke", West. J. Emerg. Med., vol.12, no.1, pp.67-76 (2011).
- [2] T. Shimada et al., "Development of Evaluation System for Cerebral Artery Occlusion in Emergency Medical Services: Noninvasive Measurement and Utilization of Pulse Waves," Sci. Rep., vol.13, article no.3339 (2023).
- [3] I. Goodfellow et al., Deep Learning, MIT Press, <http://www.deeplearningbook.org> (2016).
- [4] N. Srivastava et al., "Unsupervised Learning of Video Representations using LSTMs", Int.l Conf. on Machine Learning, pp.843-852 (2015).