

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の改善

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

藤澤 璃子* 大園 健史* 金谷 一輝* 大崎 美穂* 白浜 公章*
 松川 真美* 小林 恭代† 齋藤 こずえ† 山上 宏‡
 Riko Fujisawa Kenshi Ohzono Kazuki Kanaya Miho Ohsaki Kimiaki Shirahama
 Mami Matsukawa Yasuyo Kobayashi Kozue Saito Hiroshi Yamagami

1. はじめに

脳動脈閉塞は、身体麻痺・失語症などの重度後遺症や死亡の主要な原因の1つである。脳細胞が壊死して後遺症や死を引き起こす前に、救急現場の迅速な診療が不可欠である。しかし、脳動脈閉塞診断用のCT、MRI、MRAは大型装置であり救急現場では使用できないので、閉塞の発見が遅れる恐れがある。そこで我々は、救急車で使用可能な脳動脈閉塞診断支援システムを開発してきた。本システムは閉塞からの反射を含む脈波を測定する装置と、機械学習を脈波データに適用して閉塞有無を推定する手法から成る。

閉塞患者のデータ不足を解決しつつ、閉塞推定を可能にすべく、過去の研究では図1の閉塞推定手法を提案した[1]。これは、健常者の脈波のみを学習したオートエンコーダ(AE)と、AEによる脈波の再現性能が低ければ閉塞があると判定する閾値ベース分類器から成る。我々は今回、本手法の性能向上を目的とする。データ入力・モデル構造の変更、および、情報源(人工的に合成した脈波データ)の導入という2つの改善方法を提案し、有効性を検証する。

2. 閉塞推定手法の改善方法

2.1. 改善方法1：データ入力・モデル構造の変更

従来の閉塞推定手法は、「脳の左右一方に閉塞が生じやすい」「閉塞からの反射が脈波に重畳する」という医学知識に基づく。そして、左右の頸動脈で測定した脈波の差異を手がかりとして、閉塞の有無を推定する。図1の通り、従来は被験者の左および右の脈波1周期を個別に再生部のAEに入力していた。そして、分類部の閾値ベース分類器に左と右の再生性能の差を与えて、差が閾値を超えれば閉塞ありと判定した。

本研究で閉塞推定手法に加える改善方法1では、左右の脈波を同時にAEに入力する。これにより、左右差の情報を直接的に学習させて閉塞推定性能の向上を狙う。さらに、モデル構造の改善も試みる。勾配消失を防ぐために提案され、大規模データに対して有効と言われるスキップ接続を導入する。この接続はパラメータを増加させるが、勾配の値を維持して閉塞推定性能を高める可能性がある。

2.2. 改善方法2：他の情報源の導入

改善方法2では学習データ自体を疑似的に増やす。ただし、移動や回転等の変換で水増しするデータ拡張は脈波の自然な動特性を逸脱する恐れがある。ゆえに我々は、医学的・物理的に理に適った血流シミュレータが合成した人工脈波PWDB[2]を採用する。まず、他の情報源として人工脈波を用い、閉塞推定手法の事前学習を行う。次に、実測した健常者の脈波で再学習することで、データ不足を補って性能を向上させる。再学習には更新対象が全パラメータであるファインチューニングと、出力層のパラメータのみである転移学習の2種類を検討する。

3. 評価実験

3.1. 評価実験I：改善方法1の有効性検証

本実験では、改善方法1(データ入力・モデル構造の変更)が脳動脈閉塞の推定性能を向上させるのかを検証した。具体的には、閉塞推定手法に改善方法1を加える前後で性能比較した。AEには、過去の研究[1]で性能が高かったMLP AE、GRU AE、CNN AEの3種類を採用した。脈波データも過去の研究と同じ、青年から高齢者の被験者50名分(閉塞なし29名、閉塞あり21名)とした。各AEの構造を決定するハイパーパラメータと探索条件は表1の通りである。

実験の結果は我々の期待に反して、改善方法1を加えると正解率が3[%]、F値(適合率と再現率の総合値)が2[%]低下した。大規模データであれば有効であろう同時入力とスキップ接続は、パラメータの増加をもたらした。脈波のような小規模データでは、この増加が学習不足を招いた可能性が高い。以上より、データの規模に適するモデル構造の重要性が示唆された。

表1: 各AEのハイパーパラメータと探索条件

AE	ハイパーパラメータ	上限	下限	探索幅
MLP AE	中間層のニューロン数	100	400	100
	中間層の層数	1	10	3
GRU AE	状態ベクトルの次元数	100	400	100
	セル数	1	3	1
CNN AE	出力チャンネル数	10	50	20
	畳み込みカーネルサイズ	20	40	10
	プーリングカーネルサイズ	1	3	1
	セル数	1	3	1

*同志社大学 Doshisha University

†奈良県立医科大学 Nara Medical University

‡筑波大学 Tsukuba University

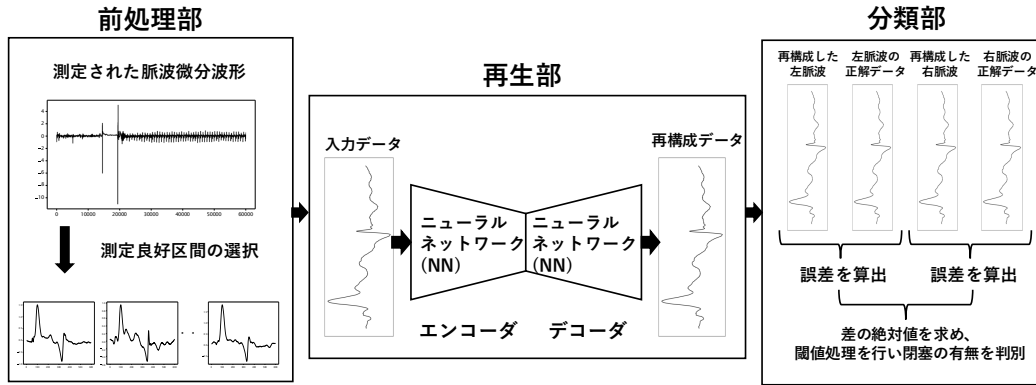


図1: AEに基づく閉塞推定手法 [1]

表2: 評価実験IIの結果。従来からの性能向上には↑を、性能低下には↓を付与。

AE	閉塞推定手法	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	改善2 (Fine Tuning)	0.59 ↑	0.02	0.56 ↑	0.01	0.91 ↓	0.07	0.70 ↑	0.03
	改善2 (転移学習)	0.60 ↑	0.02	0.57 ↑	0.01	0.94 ↑	0.02	0.71 ↑	0.03
	従来の閉塞推定手法	0.57	0.03	0.55	0.02	0.92	0.03	0.69	0.03
GRU AE	改善2 (Fine Tuning)	0.59 ↑	0.03	0.56 ↑	0.02	0.95 ↑	0.01	0.70 ↑	0.01
	改善2 (転移学習)	0.60 ↑	0.02	0.57 ↑	0.01	0.93 ↑	0.04	0.70 ↑	0.02
	従来の閉塞推定手法	0.57	0.05	0.55	0.03	0.90	0.04	0.68	0.03
CNN AE	改善2 (Fine Tuning)	0.59 ↑	0.02	0.56 ↑	0.01	0.91 ↓	0.03	0.70 ↑	0.02
	改善2 (転移学習)	0.60 ↑	0.01	0.57 ↑	0.01	0.94 ↑	0.02	0.71 ↑	0.01
	従来の閉塞推定手法	0.57	0.05	0.55	0.04	0.92	0.04	0.69	0.02

3.2. 評価実験II：改善方法2の有効性検証

本実験では、閉塞推定手法に改善方法2を加える前後で性能比較して、他の情報源の導入による性能向上の効果を調べた。ここでも、AEはMLP AE, GRU AE, CNN AEの3種類とした。人工脈波にはPWDB[2]から取り出した4374人分、実測脈波には評価実験Iと同じ50名のデータを用いた。ハイパーパラメータの条件は評価実験Iと同じである。

実験で得られた脳動脈閉塞推定の性能を表2に示す。大半の条件で性能向上を意味する↑が多く、改善手法2の有効性が確認できる。ファインチューニングでは正解率59[%]、F値70[%]であり、従来の閉塞推定手法よりも正解率は2[%]、F値は1~2[%]向上した。転移学習では正解率60[%]、F値70~71[%]であり、正解率は2[%]、F値は2[%]向上した。以上から、改善方法2は全AEに共通して性能を向上させると明示された。事前学習によりAEが脈波の一般的な形状を捉え、再学習では閉塞推定に寄与する局所の変動を重点的に学習できたと考えられる。

また、再学習にはファインチューニングよりも転移学習が適することも分かった。少ない実測脈波では調整し得るパラメータ数に限界があり、出力層に絞り込む転移学習が功を奏したと言える。

4. おわりに

救急現場で使用可能な脳動脈閉塞診断支援システムの実現に向け、本研究ではシステムに含まれる閉塞推定手法の改善に取り組んだ。閉塞推定手法はオートエンコーダと閾値ベース分類器の組合せにより、閉塞からの反射がもたらす左右の頸動脈波の差異を捉えて閉塞の有無を識別する。今回は閉塞推定の性能向上を目指して、本手法に改善方法1(左右脈波の同時入力・スキップ接続)と、改善方法2(人工脈波を用いた事前学習)を加えた。実験の結果、改善方法1はパラメータ増加により逆効果が現れたが、改善方法2は正解率とF値を2~3[%]向上させることに成功した。今後は、血流シミュレータ SimVascular [3]を導入して人工脈波の量と質を高め、改善方法2のさらなる性能向上を図る。

参考文献

- [1] 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、2024年度人工知能学会全国大会、4L1-GS-10-02 (2024)。
- [2] P. H. Charlton et al., Modeling Arterial Pulse Waves in Healthy Aging: A Database for in Silico Evaluation of Hemodynamics and Pulse Wave Indices, *AJP Hear. Circ. Physiol.*, vol.317, no.5, pp.H1062-H1085 (2019)。
- [3] A. Updegrove et al., SimVascular: An Open Source Pipeline for Cardiovascular Simulation, *Ann. Biomed. Eng.*, vol.45, no.3, pp.525-541 (2017)。