

ラッソロジスティック回帰による 脳動脈閉塞推定に役立つ脈波特徴量の分析

Analysis of Pulse Wave Features Contributable to Cerebral Artery Occlusion Inference

山田 紘丘* 田儀 樹* 大崎 美穂* 嶋田 啄真*
 松川 真美* 小林 恭代† 斎藤 こずえ† 山上 宏‡
 Hiroki Yamada Itsuki Tagi Miho Ohsaki Takuma Shimada
 Mami Matsukawa Yasuyo Kobayashi Kozue Saito Hiroshi Yamagami

1. はじめに

脳動脈閉塞は死亡や深刻な後遺症につながる恐れがあるため、救急医療における迅速な診断と処置が求められる。我々は、救急救命士が現場で使用できる脳動脈閉塞の診断支援システムの開発に取り組んできた。過去に圧電センサによる脈波測定装置を開発し、脈波からの特徴量抽出と分類器による閉塞推定を行った。複数の特徴量を用いるには「どの特徴量がどの程度、閉塞推定に役立つのか」を明らかにする必要がある。ゆえに、本研究では閉塞推定に貢献する特徴量の同定を目的とする。具体的には脈波の特徴量 5 種類を抽出して、各特徴量にロジスティック回帰 (LOGR) を、全特徴量にラッソロジスティック回帰 (Lasso LOGR) を適用する。これらの条件間で閉塞推定の性能と特徴量の重みを比較し、重要な特徴量を見出す。

2. 関連研究

現在、CT や MRI で得た画像による脳動脈閉塞診断が主流である [1]。大型で高価なこれらの機器は救急車に搭載困難であり、法的にも使用者が限られる。我々は救急医療のための脳動脈閉塞診断支援を目指して、小型で安価な脈波測定装置を開発した [2]。さらに、閉塞からの反射が脈波の動的变化をもたらすという物理学的知見を得た [3]。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波を測定し (図 1 参照)、左右差に基づく閉塞推定手法を考案した [4]。この手法では脈波の特徴量 3 種類を抽出して、医学的解釈が容易な分類器 LOGR を適用した。その結果、試験データの正解率はチャンスレベルよりも高い 66[%] となり、一定の成果が得られた。一方、推定に役立つ特徴量の同定という課題が残された。

3. 提案手法

3.1. 特徴量

本研究では、医学的・物理学的な知識に基づき下記の特徴量 5 種類を抽出する。F1: 脈波微分波形の左右の相互相関関数の最大値。F2: 脈波微分波形の正負のピーク数の左右差。F3: 脈波の立ち上がりの傾きの左右差。F4: 脈波微分波形の最大振幅のばらつきの左右差。F5: 脈波微分波形の切痕後のピーク振幅の左右差。閉

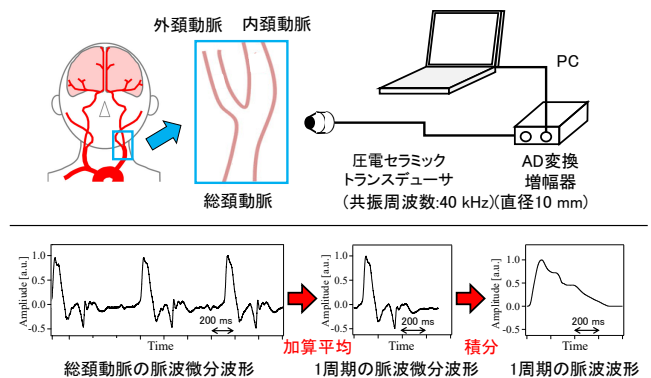


図 1: 頸動脈波測定と 1 周期波形導出の過程。

塞からの反射がもたらす左右脈波の差異について、F1 は大局的な傾向を、F2 から F5 は局所的な傾向を表す。F1, 2, 3 は過去の研究 [4] で用いたもの、F4, 5 は新規に追加したものである。

3.2. 分類器

過去の研究 [4] では、特徴量と推定結果の関係を理解し易い LOGR を用いたが、本研究でもそれを踏襲する。ただし、閉塞推定に役立つ特徴量を同定するために、特徴量の貢献度合いに応じて重みを二極化できる Lasso LOGR も導入する。LOGR, Lasso LOGR [5] は式 (1) に示す共通のモデル構造を持つ。ここで、 $P_w(\mathbf{x})$ は閉塞ありの確率である。 \mathbf{x} はある人の特徴量ベクトル、 \mathbf{w} は分類器が特徴量に与える重みベクトルである。なお、変数 $x_0 = 1$ とその重み w_0 を用いてベクトルに切片を含めている。

$$P_w(\mathbf{x}) = 1/(1 + \exp(\mathbf{w}^T \mathbf{x})) \quad (1)$$

Lasso LOGR の目的関数は式 (2) の通り、負の対数尤度と重み λ をかけた L1 正則化項の加重和である。 $\lambda = 0$ にすれば、これは LOGR の目的関数となる。第 1 項の N は訓練データ点数、 \mathbf{x}_i は i 番目の人の特徴量ベクトル、 y_i はこの人が閉塞なしならば 0、閉塞ありならば 1 を返す指示変数である。第 2 項では、特徴量の数 D と j 番目の特徴量の重み w_j から L1 ノルムを求め、正則化を課す。訓練ではこの目的関数を最小化して重みを求める。 λ は検証により求める。

*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

表 1: 評価実験の結果. - は存在しない, もしくは不要を意味する. 数値基準を超えたものは太字にした.

| 条件 I (各特徴量, LOGR) | F1 | F2 | F3 | F4 | F5 | 全特徴量 |
|-------------------|---------------|---------------|--------|---------------|---------------|------|
| 試験で求めた正解率 | 0.5547 | 0.6994 | 0.4489 | 0.8169 | 0.6728 | - |
| 訓練・検証で求めた重み | - | - | - | - | - | - |

| 条件 II (全特徴量, Lasso LOGR) | F1 | F2 | F3 | F4 | F5 | 全特徴量 |
|--------------------------|---------|---------------|---------|---------------|--------|---------------|
| 試験で求めた正解率 | - | - | - | - | - | 0.8201 |
| 訓練・検証で求めた重み | -0.1883 | 0.6368 | -0.0001 | 1.0642 | 0.1049 | - |

$$J(\mathbf{w}) = - \sum_{i=1}^N \{y_i \log P_{\mathbf{w}}(\mathbf{x}_i) + (1 - y_i) \log(1 - P_{\mathbf{w}}(\mathbf{x}_i))\} + \lambda \sum_{j=1}^D |w_j| \quad (2)$$

4. 評価実験

4.1. 目的と条件

本実験では, 脈波の左右差の特徴量 5 種類のうち, 脳動脈閉塞の推定に役立つものを同定することを試みた. そのために以下の 2 条件で閉塞推定を行い, 条件間で結果を比較検討した. 条件 I: 特徴量ごとに LOGR を適用. 条件 II: 全特徴量に Lasso LOGR を適用. データは閉塞なし 20 名, 閉塞あり 23 名 (計 43 名) の左右の頸動脈波であった. 分類器の設定は, 学習率 0.01, 最大エポック数 10000, ミニバッチ 16 点とした. Lasso LOGR の正則化項の重み λ は検証で設定した. 訓練・検証・試験には, 内側と外側のループともデータを 5 分割する層別入れ子交差検証を用いた.

推定性能の下限であるチャンスレベルは $23/(20 + 23) = 0.5349$ であった. 閉塞推定に貢献する特徴量の正解率はこの数値基準を超えるはずである. 各特徴量を用いる条件 I では, LOGR が与える重みが特徴量の貢献を表すとは言い難い. 一方, 条件 II では Lasso LOGR が全特徴量に対して貢献度合いに応じた重みを与える. ゆえに重みの絶対値も考慮し, 全特徴量が同程度貢献する場合の重み $1/5 = 0.2000$ を数値基準とした.

4.2. 結果と考察

表 1 に条件 I, II の結果を示す. 各特徴量に LOGR を適用した条件 I では, F2, F4, F5 の正解率が推定性能の数値基準 0.5349 を大きく超えた. これらは閉塞推定に有効と考えられる. 全特徴量に Lasso LOGR を適用した条件 II では, 正解率が推定性能の数値基準 0.5349 を大きく超えた. 特徴量 5 種類に閉塞推定に貢献するものが含まれることと, 特徴量の組合せが有効であることが示唆された. 学習で得た重みに着目すると, F2, F4 が重みの数値基準 0.2000 を大きく超えた. 条件 II からは F2, F4 が重要と考えられる.

条件 I, II を比較すると, 各特徴量よりも全特徴量の正解率が高い. さらに, 特徴量 3 種類に LOGR を適用した過去の研究 [4] と比べ, 66[%] から 82[%] へと大幅な性能向上となった. なお, 条件 II における適合率は 0.8572, 再現率は 0.8344 であり, 性能のバランスも取れていた. 特徴量の組合せ, および, Lasso LOGR

による閉塞推定・変数選択が功を奏したと考えられる. F2, F4 が性能と重みの両方で高評価となり, 閉塞推定に貢献すると明らかになった. 以上から, 閉塞推定の高性能化を達成した上で重要な特徴量を同定できたと言える. 今後は, 統計的に同定した F2, F4 が有効である理由を医学的・物理的に解釈する必要がある.

5. おわりに

我々は救急現場における脳動脈閉塞の診断支援を目指し, 脈波測定装置の開発と, 脈波を用いた特徴量抽出・閉塞推定を行ってきた. 今回は, ドメイン知識に基づき抽出した特徴量が閉塞推定に役立つ度合いを, データに基づき検証した. 脈波の特徴量 5 種類に対し, 個別にロジスティック回帰を適用する条件と, 全てにラソロジスティック回帰を適用する条件で実験を行った. 条件間の結果の比較により, 正負のピーク数の左右差, および, 最大振幅のばらつきを左右差の 2 特徴量が閉塞推定に大きく貢献すると分かった. 今後は, 特徴量の解釈や, 新たな特徴量の追加と貢献度合いの検証, 分類器の改善による性能向上に進みたい.

謝辞

本研究は JSPS 科研費 21H01344 と JST A-STEP JPMJTM20Q1 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] M. Saito et al., "Noninvasive Assessment of Arterial Stiffness by Pulse Wave Analysis", IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control, vol.59, no.11, pp.2411-2419 (2012).
- [3] 清水啓仁, 他, "人工血管チューブ内の狭窄で反射した圧力波の伝搬特性", 信学技報, vol.119, no.374, US2019-72 (2020).
- [4] 嶋田啄真, 他, "頸動脈波波形による脳動脈閉塞の判別手法の検討", 電子情報通信学会, 2021 年総合大会, A-4-3 (2021).
- [5] T. Hastie et al., "The Elements of Statistical Learning", Springer (2017).