

令和 5 年 6 月 7 日現在

機関番号：12102

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K20334

研究課題名（和文）敵対的生成ネットワークを用いたノイズ除去手法の開発と生体信号への応用

研究課題名（英文）Development of Noise Reduction Techniques Using Adversarial Generative Networks and Their Application to Biological Signals

研究代表者

堀江 和正（HORIE, Kazumasa）

筑波大学・計算科学研究センター・助教

研究者番号：60817112

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、敵対的生成ネットワーク（GANs）や、オートエンコーダといった深層学習モデルを用いたノイズ除去手法を開発し、その性能を評価した。本提案手法は、お手本となるノイズ除去前後の生体信号サンプルを学習時必要としないという実用上の利点を有しているが、期間中に認識精度を改善させるまで至らなかった。ただし、本研究で得られたモデルの構造とノイズ除去性能に関する知見は、今後の研究開発に大いに役だつと思われ、研究代表者も引き続き手法の開発を進める所存である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

生体信号認識は、直感的に操作可能な入力インターフェースや自動診断に必要な技術の一つである。これらのシステムにおいては認識精度を低下させるノイズは可能な限り取り除くのが望ましい。しかしながら、認識において重要な波形とノイズの主要な周波数成分が一致することがある、ノイズ単体での計測が困難であるといった理由から、従来手法の適用が困難だった。本研究で得られた、深層学習によるノイズ除去の知見は生体信号認識システムの有用性向上につながる可能性がある。

研究成果の概要（英文）：In this study, I developed and evaluated noise reduction methods using deep learning models such as adversarial generative networks (GANs) and autoencoders. The proposed methods have a practical advantage in that they do not require noise-removed and noise-contaminated biological signal samples during training. However, I have still not achieved improvements in recognition accuracy during the study period. Nevertheless, the insights gained regarding the model structure and noise removal performance in this research are expected to be valuable for future research and development. I also intend to continue developing the method.

研究分野：深層学習

キーワード：機械学習 ノイズ除去 生体信号処理

1. 研究開始当初の背景

筋電位を中心とした生体信号入力インタフェースは、利用者の動作やその意図を直接的に操作として反映できる、直感的な入力インタフェースである。しかしながら、筋電位計測のためのセンサ取り付けに多くの手間を必要としており、実際に普及するには至っていない。この問題を解決するシンプルな方法としては、計測に際して乾式電極を採用することが考えられる。乾式電極とは、むき出しの電極面を直接皮膚表面に押し付けることで電位の変化を捉える方法で、ジェルやシールを用いた湿式電極と比べてセンサの取り付けを非常に簡便に行うことができる。しかしながら、押し付ける圧力の変化や皮膚表面と電極面の角度の変化、皮膚表面の汗の有無によって、電気特性が大きく変化するという問題を抱えている。これらが原因で発生した「ノイズ」は筋電位からの筋張力・動作・意図の推定を困難にするため、除去することが望ましい。しかし、どのようなノイズが発生するかは、利用者の特性やセンサの取り付け方のばらつきに大きく左右されるため、多種多様かつ非常に予想がしにくかった。

このようなノイズを除去するためには、Hand-Engineered な方法よりも、機械学習・深層学習的なアプローチの方が適していると思われる。音声認識分野においては、教師あり学習ベースのノイズ除去手法も提案されており、筋電位・生体信号分野においても一定の成果が期待される。しかしながら、生体信号は音声と異なり、ノイズを単独で計測することはほぼ不可能である。教師となる学習サンプル(お手本となる入出力信号)を用意できないため、これら既存手法の適用は困難だった。

本研究はコロナの蔓延に伴い、筋電位サンプルの計測が困難になったことから、対象を睡眠時生体信号からの睡眠ステージ判定に変更している。近年、家庭用睡眠計から得た生体信号を基に、自動的に睡眠ステージや睡眠障害の有無、睡眠の質を判断するシステムの開発が求められている。これら家庭で計測する生体信号も乾式電極で得た筋電位信号と同様、性質・形状が予想しづらい、判定に必要な波形とノイズの主要な周波数成分が重なるといった課題を抱えており、研究題目として適している。

2. 研究の目的

筋電位や脳波といった生体信号を対象としたノイズ除去深層学習モデルの開発

3. 研究の方法

本研究では、敵対的生成ネットワーク(GANs)やオートエンコーダといった、「お手本となる入出力信号のペア」を学習に利用しない深層学習モデルに着目、これらを基としたノイズ除去モデルを開発・検証した。先述のように、申請時は乾式電極で計測した筋電位信号を対象とする予定だったが、コロナのため被験者を集めることができなかつたため、他の研究で計測したマウスやヒトの睡眠時生体信号を採用した。

4. 研究成果

(1) GANs をベースとしたノイズ除去モデル NR-GAN を開発した(図1)。本モデルは、計測した生体信号に含まれる信号部分に比べノイズが十分に小さいという仮定の下、

1. Generator は、Discriminator が「計測したノイズのない信号」と判断するような信号を出力する
2. Generator は、入力された信号に対して最小限の変更を加える
3. Discriminator は、Generator の出力が計測した信号化をなるべく正確に判断するという3つの条件を満たすように学習される。具体的な損失関数は以下ようになる。

$$L_g = \sum_{x \in S_n} [\log(1 - D(G(x))) + \alpha \|x - G(x)\|^2],$$

$$L_d = \sum_{x \in S_n} [\log(D(G(x)))] + \sum_{y \in S_c} [\log(1 - D(y))],$$

なお L_g, L_d は Generator と Discriminator の損失関数、 $G(x), D(y)$ は Generator と Discriminator による変換、 S_n, S_c はノイズを含む/含まない学習サンプルの集合、 α は、ノイズ除去作業においてどの程度信号を変化させてよいかを決定するハイパーパラメタである。一般的な GANs の損失関数に加え、 $\alpha \|x - G(x)\|^2$ を用いることで、Generator の入出力の差を可能な限り小さくすることを意図している。

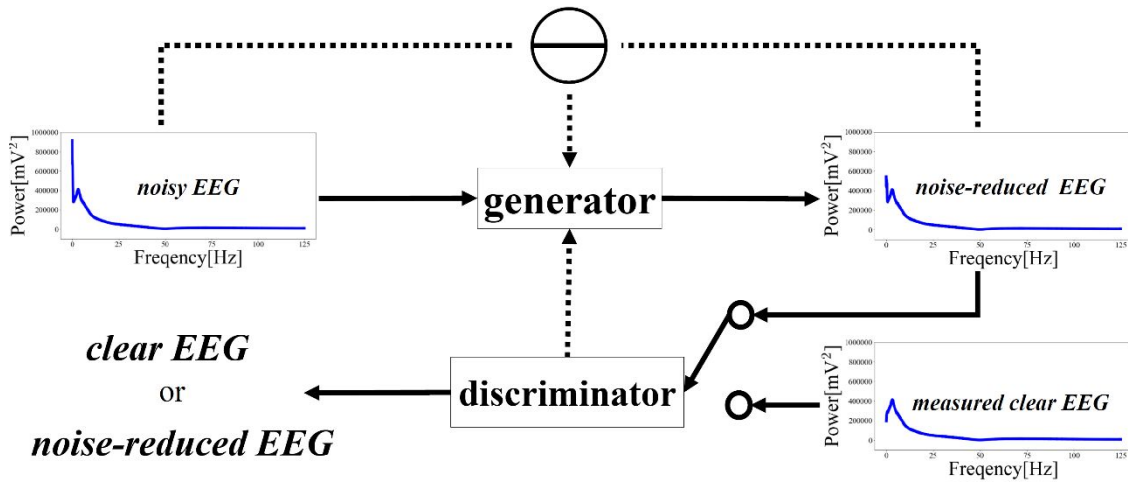
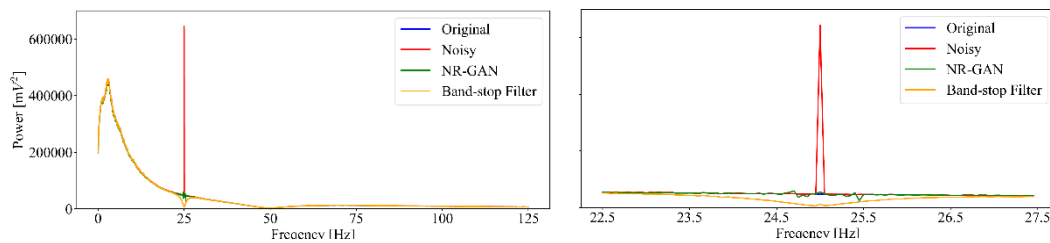


図 1 . NR-GAN の構成

NR-GAN の性能を評価すべく、人工的に生成したノイズをマウス生体信号に混入させ、これをどの程度除去できるか評価を行った。なお、本報告では直流コンバータ由来の 25Hz ノイズを混入させた場合について述べる。



(a) 周波数領域全体

(b) 25Hz 周辺

図 2 . 25Hz ノイズに対する提案手法の有効性

図 2 は、ノイズの含まれていない信号 (Original), 人工的なノイズを加えた信号 (Noisy), Noisy に対して NR-GAN を適用した場合と 25Hz バンドストップフィルタを適用した場合の信号の周波数成分を示している。(a)を見ると、提案手法はノイズの含まれていない周波数成分をほとんど変化させておらず、追加した損失の効果が表れている。ノイズを含む 25Hz 周辺領域に着目すると (図 2 (b)), バンドストップフィルタが 25Hz 成分をほぼ 0 にしているのに対し、提案手法では、Original に含まれていた程度の 25Hz 成分は残している。このような方式であれば、ノイズと認識に必要な波形が同じ周波数成分を含む場合であっても、必要な波形を誤って消してしまう可能性が少なくなると思われる。

ただし、本提案手法の問題点も見えてきた。今回のモデルでは、「生体信号に含まれる信号部分に比べノイズが十分に小さいという仮定」が大きいため、SN 比が悪い信号に対しては適用が困難である。また、ノイズと必要波形が似通っている場合、ノイズを除去するよりも必要波形の形状に近づくことで問題を解決するケースがあった。実際に本手法を利用する場合には、ある程度ノイズや適用信号の背景知識を基に検討する必要があるようだ。

(2) NR-GAN の問題を踏まえ、SN 比が悪いケースにおいても適用可能な手法として、オートエンコーダをベースとしたノイズ除去モデルの開発・検討を行った (図 3)。本手法は、生の睡眠時脳波を各波形に対応する複数の潜在表現時系列ベクトルに変換、復元の際に「睡眠ステージ判定に不

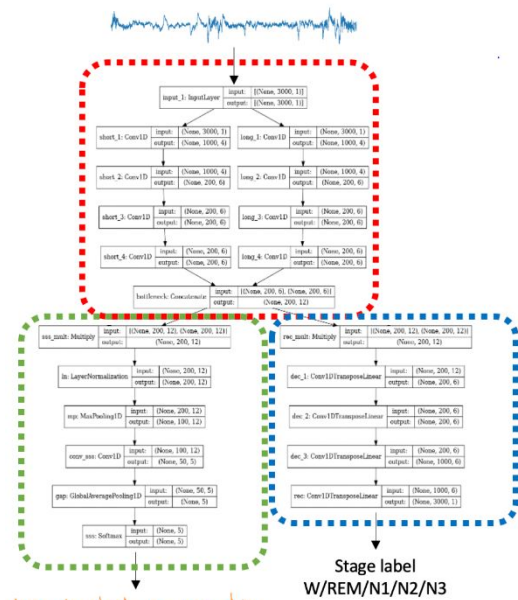


図 3 . オートエンコーダベースのノイズ除去手法の構成

必要なベクトル」を0に置き換えることでノイズ除去を行っている。「ノイズ」自体の形状を把握するのは先述のように困難であることから、より把握しやすく事前知識が豊富なステージ判定に必要な波形（特徴波）を利用することで多種多様なノイズに対応することを意図している。

構造は大きく、信号の潜在表現ベクトル化を担当するエンコーダ部（図3・赤点線部）、潜在表現ベクトルを信号に復号するデコーダ部（同・緑点線部）と潜在表現ベクトルから睡眠ステージを判定する判定部（同・青点線部）の3つから構成される。判定部がどの潜在表現ベクトルを重視しているかをステップダウン的に決定し、重要度の低いものから順に0に置き換えた。12個の潜在表現ベクトルのうち、重要度の低い7つを復号時に置き換えた例を図4に示す。

図4は被験者がステージN2（ノンレム睡眠の一種）の時の脳波の例である。N2の判定根拠はいくつかあるが、この例では中央に見えるK複合波（特徴波の一種、大きな陰性鋭波とそれに付随する陽性成分からなる）からステージN2であることが分かる。この例を見ると、K複合波の形状を大きく損ねることなく、周辺の「判定に不必要な波形」の振幅が抑えられていることが分かる。

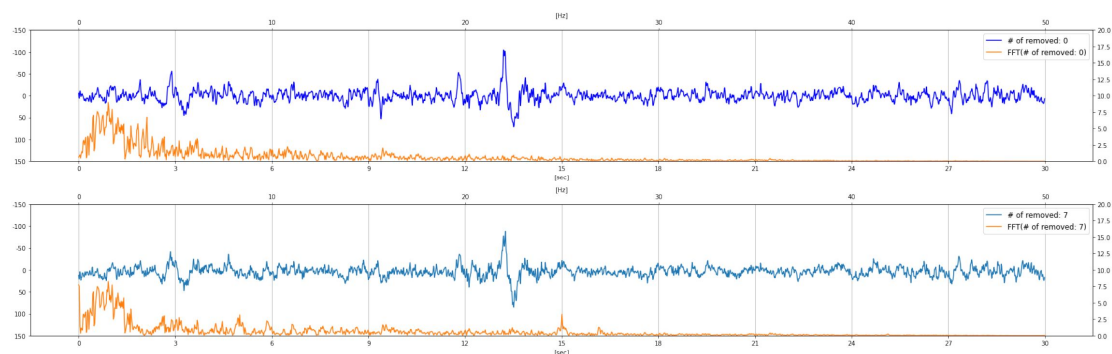


図4．オートエンコーダベースモデルを用いたノイズ除去の例（上）ノイズ除去前の信号とその周波数成分，（下）ノイズ除去後の信号とその周波数成分

このように、本手法は定性評価において一定の成果を上げている。しかしながら、既存の睡眠ステージ自動判定手法の前処理とする実験においては、判定精度の向上には至らなかった。その理由としては、いくつかの特徴波が正確に再現できていないことが挙げられる。特徴波の中には形状・定義が複雑なものがあり、これらを「複数の潜在表現ベクトル」で表現するケースがあった。この場合、ステージ判定はこれらのうち1つを採用すればよいから、他の要素が再現信号から除かれてしまうことが分かった。

現在、このような問題に対応するべく、判定部以外の方法で必要な潜在表現ベクトルを見つけ出す方法を検討中である。これらについては別の研究として進めていきたい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 大宮直樹
2. 発表標題 深層学習を用いた睡眠ステージ判定のための脳波信号スタイル変換
3. 学会等名 電子情報学会NC研究会
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 Yuki Sumiya
2. 発表標題 NR-GAN: Noise Reduction GAN for Mice Electroencephalogram Signals
3. 学会等名 2019 4th International Conference on Biomedical Imaging, Signal Processing (ICBSP2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------