

令和 6 年 6 月 18 日現在

機関番号：32675
研究種目：基盤研究(C)（一般）
研究期間：2021～2023
課題番号：21K03970
研究課題名（和文）効率的な深層学習：脳信号を使用したロボットベースのリハビリテーションの実装

研究課題名（英文）Efficient Deep Learning and its implementation for Robot-Based Rehabilitation Using Brain Signals

研究代表者
Capi Genci (Capi, Genci)
法政大学・理工学部・教授

研究者番号：20389399
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、効率的な深層学習アルゴリズムを用いたブレインマシンインターフェース（BMI）システムを開発した。主な研究トピックは以下の二つである：1）BMIシステムにおけるCNNの認識率を向上させるための電極チャンネルの最適化：本システムの主な目的は、システムの性能を損なうことなく、DLネットワークの計算複雑性と訓練時間を最小限に抑えることである。2）遺伝的アルゴリズム（GA）を用いた高精度EEG分類のためのデータ選択の最適化：運動想起および実際の手や腕の運動タスクから得られたEEGデータを使用し、GAを用いて転移学習に最適な訓練データを選択し、CNNの分類精度を向上させた。

研究成果の学術的意義や社会的意義
研究結果の学術的および社会的意義は以下の通りである：1. 訓練データの質を向上させることで、BMIシステムに向けたDLベースのネットワークを改善した。2. 訓練データを最適化し、CNNの認識精度の顕著な向上と訓練時間の短縮を実現した。3. Deep Q-learningベースの手法を用いて、BMIシステムにおけるEEGチャンネルの最適化を実現した。これらの結果は、脳信号を使用したCNNの高速訓練にも利用することが可能である。また、このような柔軟性があり訓練が容易なCNNは、リハビリテーションなどのヒューマン・ロボット・インタラクションに応用することができる。

研究成果の概要（英文）：In this research work, we developed efficient deep-learning algorithms for Brain Machine Interface (BMI) systems. The two main research topics were: 1) Optimization of electrode channels to improve the recognition rate of CNNs. We evaluated the performance in motor execution (ME) and motor imagery (MI) tasks. For channel optimization, we integrated DL and Deep Reinforcement Learning (DQL) algorithms. The primary objective of this system is to minimize the computational complexity and training time of the DL network without deterioration in the system performance. 2) Training data optimization for high-accuracy EEG classification using Genetic Algorithm (GA). EEG data from motor imagery and real hand/arm motion tasks were considered. The developed optimized systems are implemented in efficient robotic applications. The robots are controlled using EEG/EMG bio-signals. Such applications can be implemented in rehabilitation, human-robot interactions, and assistive robotic systems.

研究分野：知能ロボット

キーワード：深層学習 BMI ロボット動作 転移学習

1. 研究開始当初の背景

過去 10 年間、障害者向けのユーティリティシステムの研究開発は前例のない注目を集めており、生活の質向上や社会復帰をしようとしている人に貢献している。BMI (ブレインマシンインターフェース) は、脊髄損傷、筋萎縮性側索硬化症 (ALS)、ロックイン症候群などの患者にとって非常に大きな可能性を持ち、他の生体信号ベースのアプローチに対して明確な利点を持っている。しかしながら、EEG 信号の持つ独自の特性が、柔軟性に富んだ BMI システムの開発を非常に困難なものにしている。この研究の主な目的は、EEG 信号のノイズや被験者依存性の特徴に対処することであり、BMI システムの性能を向上させることに着目している。

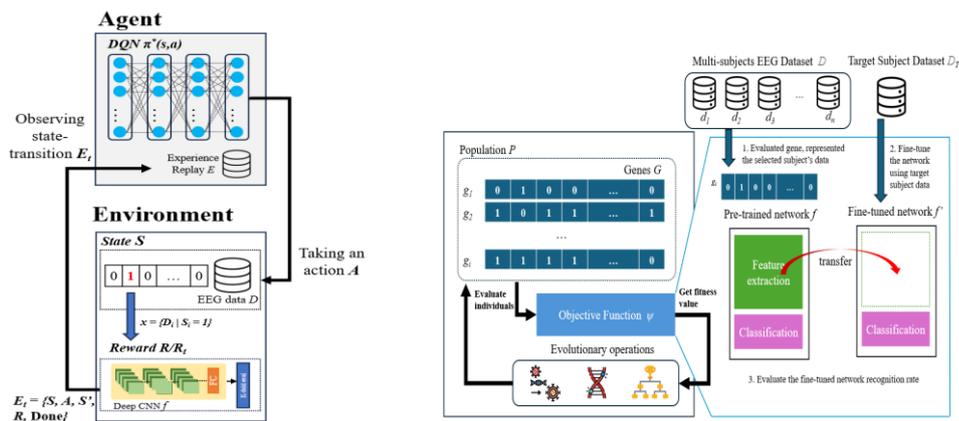
2. 研究の目的

本研究の主な目的は、EEG 信号のノイズや被験者依存性の特徴などに対処することによって、BMI システムの性能を向上させることである。

3. 研究の方法

○強化学習ベースのチャンネル最適化

主な目的は、EEG デコーダーの性能を損なうことなく、計算の複雑性と訓練時間を最小化することである。まず、チャンネル最適化をマルコフ決定プロセス (MDP) として定式化を行なう。ここで、チャンネルの組み合わせを一状態とし、チャンネルが組み合わせに追加または削除されると、状態遷移が発生する。このようにチャンネル最適化を扱うことで、強化学習を用いた最適化が可能となる。強化学習には、エージェントと環境という二つの基本要素が含まれている。基本的なアイデアは、「エージェントが任意の行動を取り、その結果を観察しながら環境と相互作用を行う」というプロセスを終端状態に達するまで行うというものである。このシステムでは、エージェントが提供する組み合わせを EEG デコーダーが利用した際に認識が改善されることが成果となる。図 1(a)は提案システムの概略図である。



a) DQN channel optimization b) Combining GA and transfer learning

図 1: Proposed algorithms

○転移学習のための遺伝的アルゴリズム

転移学習は、特定のドメイン向けに最初に設計された事前訓練済みネットワークを、関連はする異なるドメインに適応させる技術である。この技術は、事前訓練済みネットワークの層を新しいネットワークに複製し、その後、新しいドメインに合わせて層を微調整することで、少ないデータから高いパフォーマンスを実現する。この手法は、特にデータ要求が大きいことが原因でネットワークをゼロから訓練することが実際的でない深層学習において、重要とされるアプローチであり、転移学習は BMI を含むさまざまなアプリケーションで広く採用されている。しかしながら、EEG 信号の高い被験者依存性により、事前訓練済みネットワークが高い認識率を達成していたとしても、性能が最適ではない場合がある。このような BMI システムの転移学習の問題に対処するために、遺伝的アルゴリズム (GA) を使用して事前訓練済みネットワークの訓練用の被験者データを選択する第二のシステムを設計した。最初に、ターゲット被験者データ D_T をデータセット D から引き出し、 $D \leftarrow D - D_T$ とし、 D を事前訓練済みネットワーク、 D_T を微調整されたネットワークに使用した。転移学習と GA を組み合わせたシステムのアーキテクチャの概要を図 1(b)に示す。

4. 研究成果

4.1 DQN で得られた最適チャンネル

全てのアルゴリズムによって最適化されたチャンネルの位置を分析すると、最適化されたチャンネルが前頭および中心後頭領域に集中していることがわかる (図 2.a)。これは、MRCP の活性化パターンが中心部から始まり、徐々にすべての領域に広がるためである。結果は、GA や DQN に比べて BE の方が選択されたチャンネルに関して高い変動性を示している。

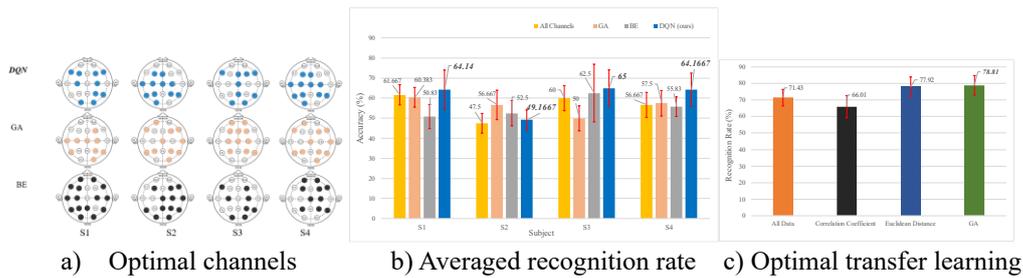


図 2: Proposed algorithms results

図 2.b は異なるアルゴリズムを使用して事前訓練ネットワークを構築するために被験者データを選択した場合の認識率を示している。すべてのデータを使用した場合、認識率は 71.43%に達し、ベンチマークとしての基準となる。GA を使用して被験者 2、3、7 を選択して事前訓練ネットワークを構築した場合、データ量が少ないという条件下では、認識率は 78.81%と著しく向上した。一方、相関係数に基づく選択では、被験者 2、1、7 を最も類似として特定したが、認識率は 66.01%と低下した。

4.2 GA によるデータ選択

図 2.c は、DQN、GA、BE、およびすべてのチャンネルを使用するベースライン法において、4 分割交差検証を使用した場合の全被験者の平均認識率を示している。被験者 1 から 4 のベースライン認識率は、被験者 1 が 61.667%、被験者 2 が 47.5%、被験者 3 が 60%、被験者 4 が 56.667% となった。これらの認識率は、CNN モデルの性能を評価するための基準となり、EEG-MRCP 認識タスクにおいて CNN モデルが良好に機能することを確認した。

4.3 ロボット実験

図 3.a は、提案された遠隔操作システムを使用した実験のビデオキャプチャを示す。タスクはランダムに選択され、被験者の正面のモニターに映し出されている。各試行で選択されたタスクには、次の 3 つの物体をつかむ動作あるいは待機 ((a) ボール、(b) ペン、(c) 待機、(d) 箱) が含まれている。最初の試行では、システムは EEG 信号を使用してボールの把持を正しく認識した。2 回目と 3 回目の試行でも正しい認識結果が示された。しかし、箱タスクの試行は失敗し、EEG データが待機タスクとして分類されたため、ロボットは動作しなかった。ロボットの応答性は現在のネットワークの遅延に依存しており、応答時間はすべてのタスクで 100ms 未満であった。実験では MQTT ブローカーのモスキートを使用した。送信されるデータが単一の文字 (認識された動作) のみであることを考慮すると、伝送速度は高い。さらに、このシステム設計では、利用可能なアクションの数を 255 の可能なタスク (文字データ型のサイズ) に拡張でき、ロボットによって、より複雑なタスクの実行が可能である。

図 3.b では、3 つの異なる試行からのビデオキャプチャが示され、ロボットのパフォーマンスを確認する参考となる。電極の位置がわずかにずれたことにより、認識率がほぼ 60%まで低下したことが観察された。この変動性は、データ収集のわずかな不一致がパフォーマンスに大きな影響を与えるため、ブレインマシンインターフェース (BMI) システムの柔軟性を強化するために広範な訓練データが必要であることを示している。



a) Robot control using optimized EEG channels b) Robot control using CNN in transfer learning

図 3: Robotic implementations

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 G. Pongthaisorn, and G. Capi	4. 巻 12
2. 論文標題 Deep Q-Learning for Channel Optimization in MRCP BMI Systems: A Teleoperated Robot Implementation	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 73769-73778
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ACCESS.2024.3405967	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 G. Pongthaisorn, and G. Capi	4. 巻 13(1)
2. 論文標題 Genetic Algorithm-Based Data Optimization for Efficient Transfer Learning in Convolutional Neural Networks: A Brain Machine Interface Implementation	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Robotics	6. 最初と最後の頁 1-12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/robotics13010014	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 E. Petoku, R. Takahashi, G. Capi	4. 巻 18/5
2. 論文標題 IMPROVING THE CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK PERFORMANCE THROUGH TRANSFER LEARNING FOR BRAIN-MACHINE INTERFACE SYSTEMS	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Innovative Computing, Information and Control	6. 最初と最後の頁 1587 1600
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.24507/ijicic.18.05.1587	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 1件／うち国際学会 10件）

1. 発表者名 Y, Sugimoto, G. Pongthaisorn, and G. Capi
2. 発表標題 Image Reconstruction from Visual Perception and Visual Imagery for BMI systems
3. 学会等名 The 16th edition of the IEEE International Symposium on Robotic and Sensors Environments, ROSE2023（国際学会）
4. 発表年 2023年

1 . 発表者名 S. Suguro, G. Pongthaisorn, S. Kaneko and G. Capi
2 . 発表標題 Data Selection Using Genetic Algorithm to Improve Transfer Learning Efficiency in Brain-Machine-Interface Systems
3 . 学会等名 2023 the 5th International Conference on Control and Robotics (ICCR 2023) (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 G. Pongthaisorn, and G. Capi
2 . 発表標題 Combining Genetic Algorithms and CNNs for Efficient Brain-Machine Interface Systems
3 . 学会等名 2023 IEEE 15th International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks (CICN) (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 G. Capi, K. Iizawa, S. Kaneko
2 . 発表標題 Combining Transfer Learning and Genetic Algorithms for Real-Time Gesture Recognition using EMG Signals
3 . 学会等名 The 10th International Conference on Mechatronics and Robotics Engineering, (国際学会)
4 . 発表年 2024年

1 . 発表者名 S. Sugiyama, G. Pongthaisorn, S. Aya and G. Capi
2 . 発表標題 EEG Channels Optimization for Wireless BMI-based Robot Interaction for Internet of Robotic Things
3 . 学会等名 2023 6th Conference on Cloud and Internet of Things (CIoT) (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 S. Sugiyama, E. Petoku, R. Takahashi and G. Capi
2 . 発表標題 Optimizing Convolutional Neural Networks to Control the Robotic Hand using Brain Signals
3 . 学会等名 2022 JSME-IIP/ASME-ISPS Joint Conference on Micromechatronics for Information and Precision Equipment (MIPE2022) (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 G. Capi
2 . 発表標題 INTELLIGENT ASSISTIVE ROBOTS OPERATING IN HUMAN ENVIRONMENTS: DIRECTIONS AND CHALLENGES
3 . 学会等名 2022 JSME-IIP/ASME-ISPS Joint Conference on Micromechatronics for Information and Precision Equipment (MIPE2022) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 G. Pongthaisorn, S. Sugiyama, A. Shirai and G. Capi
2 . 発表標題 Combination of Reinforcement and Deep Learning for EEG Channel Optimization on Brain-machine Interface Systems
3 . 学会等名 2023 International Conference on Artificial Intelligence in Information and Communication (ICAIIIC) (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 K. Iizawa, T. Soeda, A. Shirai and G. Capi
2 . 発表標題 Effect of Number of Electrodes on Gesture Recognition: A Robotic Hand Implementation
3 . 学会等名 2022 JSME-IIP/ASME-ISPS Joint Conference on Micromechatronics for Information and Precision Equipment (MIPE2022)
4 . 発表年 2022年

1. 発表者名 E. Petoku and G Capi
2. 発表標題 Mobile Humanoid Robot Control through Object Movement Imagery
3. 学会等名 2022 4th International Conference on Control and Robotics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 R. Takahashi, S. Sugiyama, E. Petoku, A. Shirai and G. Capi
2. 発表標題 BMIにおける転移学習を用いたCNNの性能向上
3. 学会等名 第19回コンピューテーショナル・インテリジェンス研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Fukano, K. Iizawa, T. Soeda, A. Shirai and G. Capi
2. 発表標題 Deep Learning for Gesture Recognition based on Surface EMG Data
3. 学会等名 The 2021 (11th) International Conference on Advanced Mechatronic Systems (ICAMechS 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

ディープラーニングを用いたBMIシステムの開発
http://assistrobotics.ws.hosei.ac.jp/research_group_bci_jp.html

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
---------	---------