

[研究助成 (B)]

デジタルツインを活用し脳と直接繋がるスマートホーム

Smart-home directly connected to the user's brain using digital-twin

2221901



研究代表者

東京大学
大学院新領域創成科学研究科

教授 小谷 潔

[研究の目的]

今後の高齢化社会、福祉社会を活力あるものにする上で、人間の衰えた機能を機械によって補綴する研究は必要不可欠である。その中で、脳-コンピュータインタフェース (Brain Computer Interface: BCI) は脳活動から直接利用者の意図を読み取り外部機器を操作するインタフェースであり、四肢麻痺あるいは ALS (筋萎縮性側索硬化症) の患者の支援が期待されている。しかしながら、BCI を含めた既存の支援機器では、患者は介護者による人的な支援を受けずに生活を送ることは困難であり、また近年では対面での支援に伴う感染リスクも問題となっている。BCI を発展させ、ALS の患者などが自分の意志で家での生活を送れる空間を構築することは社会的に重要な意義がある。

本研究の目標は、デジタルツインと BCI を融合することで、利用者の脳からの指令一つで望みの場所への車椅子移動や部屋の片づけなどを行えるシステムを実現することである。具体的には、デジタルツイン上の現在の部屋情報認識および過去の部屋情報を活用して、仮想空間で生成された情報を利用者の視覚・聴覚に重畳提示し、その際の利用者の脳活動からリアルタイムにロボットアーム、車椅子操作を可能とする。特に過去の物体配置情報や位置に応じた多感覚刺激を活用することで、利用者が1つのアクションで簡単に部屋の整理 (ホームポジショ

ンへの回帰) や移動を行えるシステムとする。それらによって、家全体を BCI で駆動可能なスマートホームに発展させ、本システムを介護や支援が必要な利用者が自らの力で生活を切り拓くツールへと発展させることに挑戦する。

以下では具体的な研究の内容として、1. ロボットアームを用いた片付け・物体配置変更、2. 電動車椅子を用いた移動支援、についてそれぞれまとめる。

[研究の内容、成果]

1. ロボットアームを用いた片付け・物体配置変更

1.1 システムの概要

本システムは運動想起の検出、物体検知、選択肢の配置、脳波計測、および選択肢の選定から構成される。被験者は第一段階で運動想起を行うことで体を動かすことなくシステムを開始させ、第二段階で定常状態視覚誘発電位を用いて、動かしたい物体を選択し、第三段階で物体の移動先を選択した。

被験者は AR ゴーグル (Microsoft 社 Hololens2) を頭に装着し、物体の真上には白球を表示して明滅刺激を行った。また、ロボットアーム (Niryo 社 Ned2) の上部にカメラ (Microsoft 社 AzureKinectDK) を机全体が画像に収まるようにアルミフレームで固定した。QR コードを用いてロボットアーム、AR ゴー

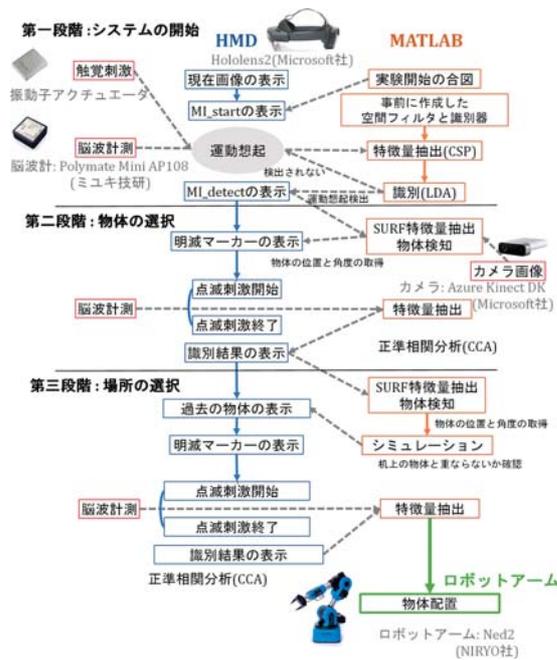


図1 データ処理のフローチャート

グル、そしてカメラ画像の座標を合わせた。データ処理のフローチャートは図1の通りである。

1.2 実験手法

本実験は被験者1名が参加し、第一段階から第三段階まで15回行い、各分類の精度とロボットアームで物体配置を終えるまでにかかった時間を計測した。1試行のパラダイムについて時系列で説明する。

〈第一段階：システムの開始タイミングの決定〉

1. PCとARゴーグルでのUDP通信が正常に行われると、ARゴーグルのHMD上にconnectという文字が表示される。
2. 4秒間安静にする。
3. 上記2.の間で運動想起が検出されない場合は4に移行し、検出されれば2.に戻る。
4. 2秒間安静にした後、2秒間右手で掌握する運動を筋感的にイメージする。
5. 運動想起が検出されれば、6.に移行し、検出されなければ4.に戻る。
6. HMD上にdetectedの文字が表示され、第二段階に移行する。

〈第二段階：物体の選択 (図2)〉

1. 物体上に白球が1秒間表示される。
2. 被験者が注目すべき球が1秒間緑色になる。
3. 4秒間異なる周波数 (8 Hz, 10 Hz, 12 Hz) で明滅する。被験者は上記2. で緑色になった球の明滅に注目する。
4. リアルタイムで識別を行い、ボールを赤色にすることで結果を表示する。

〈第三段階：移動先の選択 (図2)〉

1. 第二段階で選択された物体の過去の位置に白球を配置する。その際、現在の物体の位置と重なっている場合、選択肢から除外する。
2. 以降は第二段階と同様に行う。

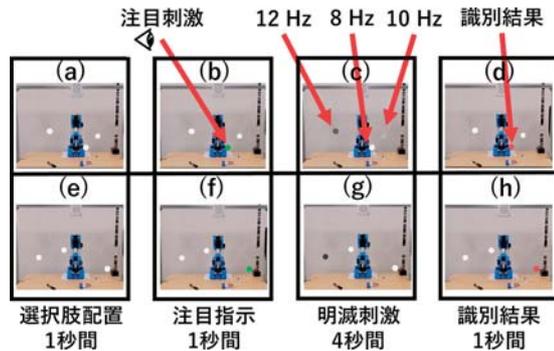


図2 実験パラダイム

脳波計測には、ミユキ技研のPolymate Mini AP108を使用し、500 Hzのサンプリングレートで取得した。電極の配置は視覚野と運動野をカバーするように図3(右)のように設置した。リファレンス電極とグラウンド電極を左耳朶に設置した。図3(左)に実験の様子を示す。

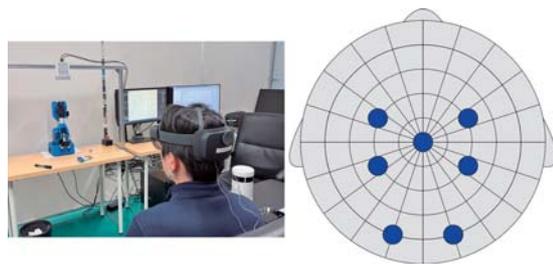


図3 実験の様子 (左), 電極配置 (右)

1.3 解析手法

〈第一段階〉

第一段階の識別に使用した電極は、FC3, FC4, Cz, CP3, CP4, 左目の下に設置した6つである。5~40 Hzのバンドパスフィルタを適用し、事前実験で作成した独立成分分析による眼電成分を除去する変換行列を用いて、瞬きに由来する成分を除去して再構成した。6次のバンドパスフィルタにより、 α 波帯域(8~13 Hz)と β 波帯域(14~30 Hz)に分け、CSP(Common Spatial Pattern)により特徴量ベクトルを算出し、線形判別分析により分類した。学習器は事前実験で作成した。

〈第二段階と第三段階〉

第二段階および第三段階の識別に使用した電極は、O1, O2に設置した2つである。3~90 Hzのバンドパスフィルタを適用した後、視覚刺激中の4秒間のデータを抽出した。その後、CCA(Canonical Correlation analysis)を行い、注目周波数を検出した。

1.4 結果と考察

第一段階にかかった時間は16.04(±8.94)秒であった。第一段階からロボットアームが物体配置を終えて初期位置に戻るまでにかかった時間は49.1秒であった。第二段階と第三段階を通した識別精度は80%であった。一般にP300を用いたBCIでは1つの選択を行うのに数十秒必要であるため、高精度で短い時間で目的を達成できる物体配置システムを提案できた。

2. 電動車椅子を用いた移動支援

2.1 システム開発

1回の計測で利用者が直感的に任意の位置や方向へ車椅子を移動または回転させることを可能にするため、選択肢の提示方法として複合現実(Mixed Reality: MR)および仮想音源を用いた。

具体的には、デジタルツイン上の部屋の形状・自己位置から移動・回転動作の候補を選

定し、視野内前方への移動(以下、前進と呼ぶ)の選択肢は、MRゴーグル(HoloLens2, Microsoft)を通して提示した。予めMRゴーグルに、Mixed Reality Toolkitを用いて作成したUnityアプリをインストールした。アプリ内で、現実空間の3次元情報を取得することで地面を認識し、選択肢として青色の仮想マーカーを5行5列の形状で配置した(図4)。視野外への回転(以下、回転と呼ぶ)の選択肢として、仮想音源を被験者の側方および後方に5個配置した(図5)。利用者にとって音の聞き分けを容易にするため、仮想音源は261.626~391.995 Hzのドからソの音階とした。

注目している選択肢が提示された後300 ms程度で生じる振幅であるP300を用いて利用者の意図を判別した。利用者が前進したい場合は、移動したい場所のマーカーが赤色に発光した時に回数を数え、回転したい場合は、回転したい方



図4 MRゴーグルを通して仮想マーカーが地面に配置された様子

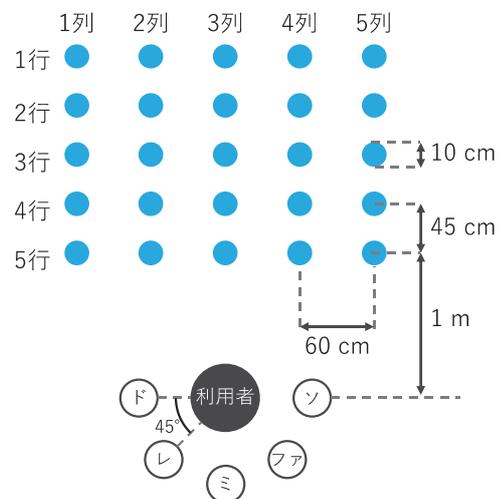


図5 仮想マーカーおよび仮想音源の配置場所

向から音が提示された時に回数を数えることで、P300 が誘発される。マーカを発光させる回数を減らし計測時間を短縮するため、マーカは1行ずつ、または1列ずつ発光させ、各行および各列のマーカの発光に対する応答波形を解析することで、利用者の注目した行と列の番号を判定し、注目したマーカを特定することとした。また、1つのインタフェースで、前進または回転のいずれも選択できるようにするため、行ごとのマーカの発光、列ごとのマーカの発光、音の提示の順番で、刺激を 300 ms ごとに提示した。また、各行・列のマーカの発光、各音の提示が 15 回ずつとなるように、繰り返し提示した。

2.2 判別器の訓練と選定

視覚刺激と聴覚刺激に対する応答波形は異なるため、本実験で提示する行ごとのマーカの発光、列ごとのマーカの発光、音の刺激に対する応答波形は異なると考えられる。異なる形状の波形を同一の判別器で分類することで、判別精度が低下する可能性がある。そこで、刺激の種類ごとに応答波形の判別器を作成した。

判別器の訓練データを取得するため、マーカに注目する場合と音に注目する場合について、それぞれ 10 回ずつ計測を行った。被験者は 24~27 歳の男女 7 名であった。注目するマーカおよび音は毎回ランダムに指定した。被験者には、行ごと・列ごとの発光を区別せずに注目するマーカの発光回数を数える、または注目する音の提示回数を数えるよう指示し、計測後に回数を回答させた。

刺激の種類により P300 の判別に適切な応答波形の長さや、判別モデルが異なると考えられる。判別器を訓練するにあたり、応答波形の長さを 400 ms, 600 ms, 800 ms の 3 通り、判別モデルを線形判別分析とサポートベクターマシンの 2 通りとして、合計 6 通りの中から刺激の種類ごとに判別精度が最大となるような応答波形と判別モデルの組み合わせを選定した。

2.3 オンライン解析と車椅子操作

判別器の訓練データを取得した時と同様に、マーカに注目する場合と、音に注目する場合について 10 回ずつ計測を行った。各計測では、刺激の種類ごとに選定した判別器を用いてオンライン解析を行った。オンライン解析では、刺激の種類ごとに、ターゲットに分類される事後確率のスコアが最大となる刺激の番号およびそのスコアを求め、3 種類の刺激についてスコアを比較した。行や列ごとのマーカの発光のスコアのほうが高い場合は、マーカに注目していたと判定し、音のスコアのほうが高い場合は、音に注目していたと判定した。オンライン解析の後、注目していたと判定されたマーカの場所または音の方向へ、車椅子を前進または回転させた。

2.4 結果と考察

仮想マーカに注目した試行においては、7 名中 7 名全ての被験者がチャンスレベル (2.7%) を超える精度でターゲットへの移動を達成でき、識別精度は平均 37.1% であった。仮想音源に注目した試行においては、7 名中 6 名の被験者でチャンスレベル (6.7%) を超える精度で適切な回転を達成でき、識別精度は平均 25.7% であった。

3. まとめ

本研究では、デジタルツインを活用した屋内の位置・物体情報およびその履歴を活用することで、ロボットアームを用いた片付けと電動車椅子を用いた移動支援の 2 つの支援を構築した。現実に情報を付与する拡張現実型の刺激を行い、さらにその情報を脳活動から読み取ることでスマートな支援が可能となるシステムを構築し、その有効性を示すことができた。

[成果の発表, 論文など]

- ・ Tianyi Zheng, Masato Sugino, Bin Li, Kiyoshi Kotani, Yasuhiko Jimbo Visual attention modulates neuronal response through changing the pathway current

- among neuronal populations: a computational study using multicolumnar model 2022 年 電気学会 電子・情報・システム部門大会, SS2-2, 2022
- ・ Mai Tanaka, Fumina Mori, Kiyoshi Kotani, Yasuhiko Jimbo Effects of transient levels of speech on auditory attention decoding performance in a two-speaker paradigm IEEJ Transactions on electrical and electronic engineering, Volume 18, Issue 5 722-729, 2023
 - ・ Fumina Mori, Masato Sugino, Takaaki Nara, Yasuhiko Jimbo, Kiyoshi Kotani Limiting Parameter Range Enables Estimation of Activated Domain in Auditory Cortex by Cortical-Spherical Mapping 45th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society 1707, 2023
 - ・ Masato Sugino, Fumina Mori, Tianyi Zheng, Mai Tanaka, Kiyoshi Kotani, Yasuhiko Jimbo Measuring Non-Linear and Time-Delayed Activity in Cortical Visual Cortex Using Code-Modulated VEP 45th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society 1705, 2023
 - ・ Mai Tanaka, Masato Sugino, Kiyoshi Kotani, Yasuhiko Jimbo Effect of Correlation Windows on Auditory Attention Decoding Performance 45th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society 1780, 2023
 - ・ Tianyi Zheng, Masato Sugino, Kiyoshi Kotani, Yasuhiko Jimbo Transcranial Alternative Current Stimulation (tACS) Modulates Behavior and Brain Dynamics in Visual Attention Task 45th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society 1781, 2023
 - ・ 佐藤仁, 杉野正和, 黄云珊, 新沼拓豊, 小谷潔, 神保泰彦 デジタルツイン BCI とロボットアームによる物体配置システムの構築 2023 年 電気学会 電子・情報・システム部門大会 PS4-2-3, 2023
 - ・ Jyun Senda, Mai Tanaka, Fumina Mori, Masato Sugino, Reo Otsuki, Kiyoshi Kotani, Yasuhiko Jimbo Auditory stimulus reconstruction with latent diffusion model from MEG signals 2023 年 電気学会 電子・情報・システム部門大会 SS1-1-1, 2023
 - ・ Huang Yunshan, Sato Jin, Sugino Masato, Zheng Tianyi, Mori Fumina, Kenta Shimba, Kotani, Kiyoshi, Jimbo Yasuhiko. Multi-class Classification for Intuitive MI-BCI in 3D Spaces, 2024 年度精密工学会春季大会学術講演会, E-11, 2024
 - ・ Fumina Mori, Masato Sugino, Kenta Kabashima, Takaaki Nara, Yasuhiko Jimbo, Kiyoshi Kotani Limiting parameter range for cortical-spherical mapping improves activated domain estimation for attention modulated auditory response Journal of Neuroscience Methods Vol. 402, 110032, 2024
 - ・ Fumina Mori, Masato Sugino, Yunshan Huang, Kiyoshi Kotani, Yasuhiko Jimbo Control of Electric Wheelchair by Brain-computer Interface Using Mixed Reality and Virtual Sound Source IEEJ Transactions on electrical and electronic engineering, (in press)