

研究終了報告書

「脳波を用いたセルフケア・サポートシステム」

研究期間：2017年10月～2021年3月

研究者：吉村 奈津江

1. 研究のねらい

本研究は脳波計測を通して心と身体の健康維持を自分で行えるシステムを構築することを目的として、身体と心の状態を「自分で自覚する前に」脳波から推定するための技術確立を目指すものである。これは、脳波を用いて脳内情報を解読し機械を操作する「ブレイン・マシン・インタフェース(BMI)」と呼ばれる技術の1つである。

人間が生涯健康で高齢になっても自立した生活を送るために必要な機能には様々なものが考えられるが、高齢者の転倒による寝たきり生活への移行を防ぐための「運動調整能力の低下防止」と、無理をし続けることで悪化してしまう心の病を未然に防止するための「精神状態の気づきと安定化」に主に着目してきた。高齢者が転倒しやすくなるのは筋力の低下だけでなく運動調整能力の衰えも関与していると考えられ、この能力は脳機能にも関与すると本研究では考えている。この低下を手遅れになる前に防ぐことができれば、転倒による怪我などを機に要介護に陥るケースを防ぐことができ、超高齢化社会が抱える経済的負担が軽減されることが期待できる。一方、精神状態の推定は、特にうつ病に代表される昨今の精神疾患の増加を防ぎ、日本社会を支える労働世代の生産性低下の防止に寄与すると考えられる。精神疾患は社会的な孤立を恐れて第三者に相談しにくい疾患であることから、自分でも気づかないうちに悪化してしまうケースが多く、社会活動が継続できなくなって初めて治療にかかるため、回復までに多大な時間と精神的負担を要するという問題もある。

これらの目的と問題に対して本研究では、脳活動信号には自分でも気づかない心や身体の情報が出てくるという考えに基づき、個人の運動調整能力や精神状態を「未病の段階で脳波から捉え」、健康な状態を維持できるようにサポートできる技術の確立を目指している。脳波は頭皮に付着した電極から記録される微弱な電気信号であるため、本研究で目指すような情報抽出は困難と考えられている。そのため現在主流のBMIでは、身体のどこを動かそうとしているか、精神状態が快不快のどちらか、という大別された情報の弁別をベースに構築されているものが多い。これに対して本研究の研究者はより詳細な情報を脳波から抽出することを目指して幾つかの手法を提案し成果を挙げてきている。これらの手法を更に発展させることにより、本研究で目指す社会に貢献できる技術の構築が期待される。

2. 研究成果

(1) 概要

運動調整能力に相関する脳内活動を特定：自分が意図した位置に正確に遅れなく身体を動かせる能力が加齢に伴い低下するとの仮説に基づき、その能力と年齢に関連する脳活動を特定する検討を実施した。その結果、何も運動をしていない安静時中において、運動に関連する領域のネットワークが運動調整能力と相関することが示された。一方、運動の遅れに明確に気づいているか否かに関与する脳領域や、運動前に結果を予測する際の脳活動

も脳波から検出できる可能性も示した。これらの特徴は、自分の身体位置制御の精密性を高めるトレーニングアプリ(効果検証中)を通して変化が見られると予測している。

細かい感情の揺らぎに関与する脳領域を特定: 様々な要因によって変動する微細な感情の違いを脳波から検出するために、脳波を用いた感情抽出手法の開発に加えて、同じ外的要因に対して誘発される感情の個人の性格による違い、記憶や経験に左右されない感情誘発刺激を用いたときの感情の判別可能性、についても検討を行った。個人の性格による影響については、年齢、性別、性格は誘発される感情には関与は見られなかった。また、脳波を用いた微細な感情抽出の実現可能性については、脳波信号を分離する手法の1つである独立成分分析を用いた結果、楔部、楔前部、中心前回、後頭部に位置する独立成分が細かい感情度合いの推定に寄与したことが示された。特に、頭頂部から後頭部にかけての領域の関与は、風という物理的刺激により誘発された感情への関与も示唆された。さらに、精神状態をセルフケアする手法としてゲームによる感情変化に着目したシンプルなビデオゲームを構築した。ゲーム中のスピードや難易度の変化に応じて感情が変化することが確認できたことから、脳波計測と組み合わせて細やかな感情推定とコントロールの実現可能性が示唆される。

「聞こえ」を客観的に調べる技術を開発: 聴覚障害は加齢や聴覚疾患だけでなく精神疾患によっても起こりうる現象である。本研究の進展させた成果として、その人にその音声かどのように聞こえているかを脳波から再現する技術を確認した。音声を再現するだけでなく、その際に脳のどの領域を使っていたかを可視化することもできるため、自分でも気づかないうちに加齢や精神疾患が進行している可能性を把握できる可能性がある。

(2) 詳細

研究テーマ A 「運動調整能力の評価法確立」

KINARM(図 1、BKIN Technologies 社製)という筋骨格ロボットを用い、見えない自分の手先の位置を正確に把握できる能力を調べた。20 代と 60 代で位置のズレに気づく能力に差があることが示され、この手法を本研究における運動調整能力の評価法として用いることとした。運動調整能力は年齢のみならず個人ごとの運動習慣にも依存することが予想されるが、この評価法ではその個人差も見られる結果となった(図 2)。一方、運動の遅れに気づく能力の評価法は、自分の動きに起因する周囲の動きのズレに気づく能力に着目し、自分の動きに応じて動くカーソルの遅れ時間を変更し、気づくかどうかを判断させる評価法を構築した(図 3)。遅れに気づいた時と気づかない時の脳活動を、脳波の独立成分分析を用いて調べた結果、明確に気づいた時とそうでない時に関与する脳領域に違いがあることが確認された(テーマ B 参照)。これら結果からテーマ A に関する目的は達成されたと考えている。

研究テーマ B 「運動調整能力と加齢に関する脳活動の特定」

テーマ A で構築したタスクで計測された指標と年齢に相関する脳活動の特徴を特定するために、核磁気共鳴画像法を用いて脳の構造や活動の画像を撮像した(図 4)。運動制御に関する脳領域としては様々な領域が発表されているが、本研究では脳波を用いてモニタリ

グ可能な特徴であることが必須となるため、脳皮質に着目して検討を実施した。その結果、脳の構造には有意な差は認められず、運動関連領域内のネットワークの活動が(図 5)、手先の位置ズレに気づく能力と加齢に相互作用効果を示すことが確認された(Yoshimura et al., Brain Sciences 2020)。このネットワーク的活動は、研究者が保有している脳波の信号源推定技術を用いることで特定可能な特徴である。



図 1. KINARM

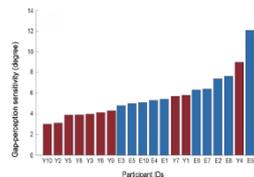


図 2. 運動調整能力の個人差
(赤: 20代、青: 60代)

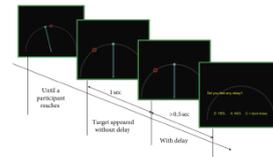


図 3. 遅れに気づく能力の評価

一方、カーソルの遅れ時間に気づく能力については、遅れ時間を変えて実験を行い、遅れていた(Yes)、遅れていなかった(No)、わからない、の3択で参加者が返答した際の脳波の独立成分を用いて、“Yes vs. No”の識別率と、“Yes+No vs. わからない”の識別率を比較した。その結果、遅れに明確に気づいた時の識別(“Yes vs. No”の識別)には脳の頭頂葉から後頭葉に位置する独立成分が寄与していたのに対し、遅れに気づいたかどうかを判定する識別(“Yes+No vs. わからない”の識別)では前頭葉から頭頂葉への関与が示唆された(Kim et al., J. Healthcare Eng. 1418437, 2020)。

また、人間が運動する前に無意識に運動予測をしている時の脳活動を用いて運動意思を脳波から抽出できる可能性を示した(Ganesh et al., Science Advances, 2018; Kim et al., Front. Hum. Neurosci., 2019)。

これらの結果はテーマ B の目的達成を示唆するものであるが、今後はテーマ C で構築するトレーニング法と合わせてこの傾向が加齢に伴いどのように変化するかをさらに多くの対象者で追跡する必要がある。

研究テーマ C 「運動調整能力のトレーニング法の開発」

運動調整能力をセルフケアできるトレーニング法として、指示された姿勢や動きをいかに正確に再現できるかどうかをフィードバックするプログラムを、テーマ A および B の手法を元に考案し、自宅でもトレーニング可能なシステムの構築が完了した。現在、システムを長期利用する前と後で、テーマ B で得られた脳活動の特徴に変化が認められるか科学的効果を検証している。

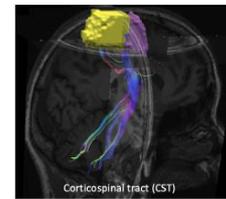


図 4. 脳領域の体積と軸索繊維の可視化

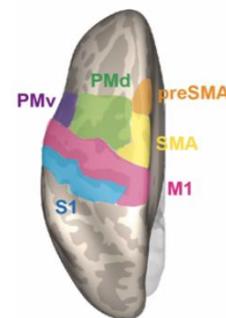


図 5. 運動関連領域内のネットワーク

研究テーマ D 「微細な精神状態の違いを脳波から検出する可能性の検討」

快・不快といった原始的な精神状態は扁桃体や視床下部という脳深部の活動が関連することがわかっているが、脳深部の活動を脳波から捉えることは原理的に困難である。そこで本研究では、脳波で捉えられる脳皮質領域の活動から感情を捉える検討を実施した。さらに快・不快といった大まかな精神状態ではなく微細に揺らぐ精神状態を捉えることを目指し、感情の種類を“判別”するのではなく感情の“度合い”を推定することを試みた。脳波信号を分離する手法の1つである独立成分分析を用いた結果、楔部、楔前部、中心前回、後頭部を発生源とする独立成分が、様々な感情を表現する座標系(Russell の感情モデル)内の感情レベルの推定に寄与する可能性が示唆された(図 6, 7, Maruyama et al., Brain Sciences, 2020)。これらの結果は脳波を用いて細やかな感情推定が実現できる可能性を示唆するものである。

また感情と脳活動の関係を調べるこれまでの研究では、感情を誘発させるために様々な画像や動画を呈示させることが一般的であるが、画像や動画は個人の記憶や経験による影響が反映された感情になる。そこでそれらの2次的要因に左右されない感情誘発として、物理的な風を用いることで誘発される快適性を脳波から検出できる可能性を検討した。その結果、他の研究でも感情への関与が示唆されている島皮質の γ 帯域が肌で感じる環境の快・不快に関連する可能性が示唆された(図 8, 中村ら, 日本建築学会, 2020)。これらの結果はいずれも脳波を用いて微細な感情を推定できる可能性を示唆するものである。

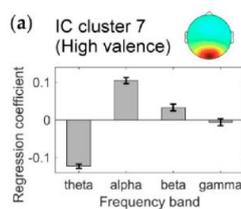


図 6. 楔部の θ 帯と α 帯は感情モデルの感情価度合いの推定に寄与し、覚醒度にも寄与することが示唆。

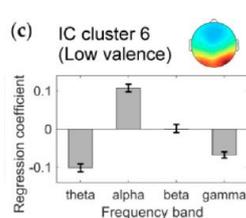


図 7. 楔前部の θ 帯と α 帯は感情モデルの感情価の低い度合いの推定に特に寄与し、 α 帯は高い覚醒度合いの推定にも寄与することが示唆。

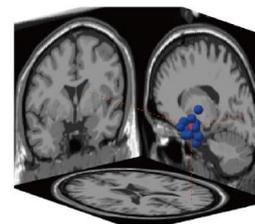


図 8. 島皮質に分類された独立成分。 γ 帯の活動が記憶や経験によらない風の心地良さ推定に関連することが示唆。

研究テーマ E 「精神状態の制御アプリの開発」

本研究で目的としていた精神状態をセルフケアする手法として、ゲームによる感情変化に着目してシンプルなビデオゲームを構築した(図 9, Martinez-Tejada L, et al., IEEE SMC, 2020)。ゲーム中のスピードや難易度の変化に応じてイライラ、興奮、平静、退屈などの感情に変化すると予想した結果、自己報告した感情が予想通りの相関を示したことが確認された(図 9)。これにより、シンプルなゲームで精神状態を制御できる可能性が示唆された。

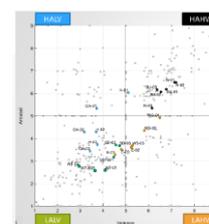


図 9. ゲームのパラメータと感情の相関

研究テーマF「聞こえを客観的に調べる技術の開発」

聞いた音、思い浮かべた音を脳波から音声として合成する技術を開発した(Akashi et al., Advanced Intelligent Systems, 2021)。合成した「あ」と「い」の発話音声は耳で聞いても十分明瞭であり、85%以上の確率で聞き分けられる程度の精度を実現した。さらに、ディープラーニングで学習させた脳波からの音声合成器を調べたところ、何の音かを特定するための“What stream”と呼ばれる脳内の側頭部を含む経路に位置する脳領域が合成に利用されていることが判明した。これらの領域は、音を聞いた時と思い浮かべた時にも異なることが判明した。この論文では2つの母音と白色雑音の再現を示しただけではあるが、脳波を用いて音声合成できる可能性を示唆する世界初の成果である。聴覚障害は加齢や聴覚疾患だけでなく精神疾患によっても起こりうる現象であり、本技術では脳内の音声を客観的に出力できるだけでなく、その音声処理に利用された脳領域を可視化できるため、たとえ正常に聞こえていたとしても、自分でも気づかぬうちに聴覚レベルでの加齢や精神疾患が進行している可能性を把握できる可能性がある。本成果は特許出願済みである。

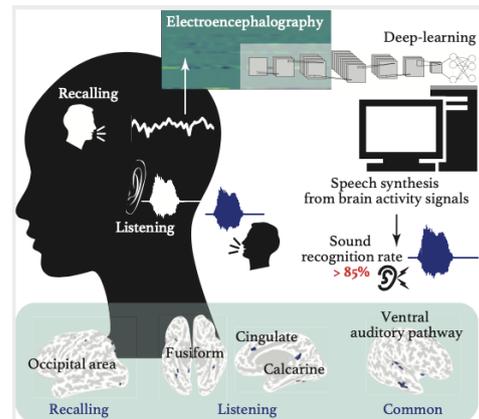


図 10. 脳波を用いた音声合成

3. 今後の展開

運動調整能力:これまでの取り組みで特定した脳活動の特徴の信頼性をより多くの対象者による検討を通して検証し、それらの特徴がトレーニングアプリの利用により予想した方向に変化するかどうかを検証する。アプリの効果が検証された後に簡易脳波計と統合し、セルフケア・システムとしての効果を小規模から大規模への利用者展開を通して検証していく。

精神状態の推定:これまでの取り組みから特定された各種の脳活動の特徴を用いて、より多様な対象者の様々な感情の度合いについて、推定精度の向上を試みる。構築したゲームアプリをしている間の脳波から感情が推定できるかどうかを検証し、精神状態のセルフケアシステムとしての可能性を見極める。別途構築中のアプリ(未発表)と合わせて、運動調整能力と同様に、簡易脳波計と統合したセルフケア・システムとしての効果を小規模から大規模への利用者展開を通して検証していく。

聞こえの可視化技術の応用展開:年齢による聴覚処理の違い、精神疾患と聴覚処理の関係について調べていく。

4. 自己評価

研究目的の達成状況

脳科学に根差した心と身体の健康維持を自分で行えるシステムの構築を目指し、いずれもアプリを構築するまでに到達した。また、いずれの健康指標も、脳波で検出可能な脳皮質における活動から捉えられるものを見出すことができ、本研究で目指すセルフケアシステムの実現可能性を大幅に高めた成果であると考えている。効果検証は現在実施中であるが、本研究を通して社会実装に向けた現実的な取り組みに着手することができたことも成果の1つと考えている。

研究の進め方(研究実施体制および研究費執行状況)

学生の実験補助員の雇用と国内外の研究者との複数の共同研究を意欲的に進めたことで、研究の進捗効率を上げることができた。一方で、最終年度は COVID-19 の影響で実験が行えず、実験にかかる費用の計画が大幅変更となった。また MRI 実験補助員のリクルートが難航したため、研究実施体制・研究費執行ともに当初の計画とは異なる進め方となった。しかしその反面、実験に予定していた費用で簡易脳波計の追加購入に充当したことで、社会実装に向けた現実的な取り組みを前倒して着手することができた。本研究を通して新たな研究者とのネットワークを大きく広げることができたことは、今後の研究においても大変有意義であった。

研究成果の科学技術および社会・経済への波及効果

本研究は国内外でもまだ実績のない、健常者を対象とした非侵襲の BMI の実現を目的としたものである。運動調整能力の維持は超高齢化社会が抱える経済的負担と個人の生涯の QOL 向上に資するものと考えられ、精神状態の客観的指標による自己モニタリングの実現は、現代社会が抱える精神疾患患者の増加を抑制して労働世代の生産性低下を防ぐものと考えられる。いずれも実現すれば日本の国際競争力を確実に高めることができる技術である。本研究で得られた成果の効果検証をできる限り早急に完了し、この技術および知見をアプリだけでなく産業界との連携を通して様々な形で社会実装していくことも考えている。一般社会の脳に関する興味は急速に高まっていることから、効果検証が得られれば、本研究で提案する健常者のための BMI は必ず普及すると考えられる。これを日本発信で実現するために、国内のみならず国外での特許出願も企業と連携して進めていく予定である。

領域独自の評価項目

本研究を通して領域内外の研究者との様々な連携を展開することができた。また、産業界との連携においても、SciFos 活動を通して新たな共同研究の可能性が見出され、更なる社会問題の克服に寄与できる可能性が出てきている。

5. 主な研究成果リスト

- (1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数:18件

1. Gowrishankar Ganesh, Keigo Nakamura, Supat Saetia, Alejandra Mejia Tobar, Eiichi Yoshida, Hideyuki Ando, Natsue Yoshimura, Yasuharu Koike, Utilizing sensory prediction errors for movement intention decoding: a new methodology, *Science Advances*, 2018, 4, 1-8.

人間は運動する際に動きを予測していると考えられており、その予測と実際の動きが異なった場合に脳内では誤差検知に起因する神経活動が生じると言われている。従来のブレイン・マシン・インタフェースでは人間が意図した運動方向の判定に1秒以上要するのに対し、本研究では 100msec 以内の速さで高い精度で運動方向を判定できる可能性を示した。この誤差信号は、高齢者の運動調整能力の評価と向上にも利用可能と考えている。

2. Yasuhisa Maruyama, Yousuke Ogata, Laura Alejandra Martinez-Tejada, Yasuharu Koike, Natsue Yoshimura, Independent components of EEG activity correlating with emotional state, *Brain Sciences*, 2020, 10, 1-16.

快・不快といった大まかな感情識別ではなく、より詳細な感情を脳波から推定することを目的として、様々な画像を提示した時に誘発される感情度合いを、脳波の独立成分を用いて推定した。脳内の楔部、楔前部、中心前回、後頭部を発生源とする独立成分の主に θ 帯、 α 帯の成分が感情度合いの推定に寄与する可能性が示唆された。この結果は脳波を用いて細やかな感情推定が実現できる可能性を示唆するものである。

3. Wataru Akashi, Hiroyuki Kambara, Yousuke Ogata, Yasuharu Koike, Ludovico Minati, Natsue Yoshimura, Vowel sound synthesis from electroencephalography during listening and recalling, *Advanced Intelligent Systems*, 2021, 2000164, 1-9.

人が頭の中で聞いたり思い浮かべたりした母音の音声を、脳波を用いて再現することに成功した。合成された音声は 10 名すべての実験参加者のデータにおいて、85%以上の確率で耳で聞いて明瞭に聞き分けられるほどの品質であった。さらにこの手法では、聞いた音、思い浮かべた音进行处理している脳領域の違いも示唆することができ、今後ヒトの聴覚情報処理の可視化やサイレントスピーチ技術への可能性を広げるものと考えられる。

(2) 特許出願

研究期間累積件数:2件(特許公開前のもも含む)

(3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

1. Shi Y, Koike Y, Yoshimura N, The control of the wheelchair by decoding human movement intention based on prediction error using EEG signals, JNNS2019, Tokyo, Japan, September 5, (2019).

2. Martinez-Tejada LA, Gonzalez AP, Yoshimura N, Koike Y, Videogame design as a elicit tool for emotion recognition experiments, 2020 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC), Oral presentation, Paper WeCT11.5, Toronto (virtual conference), Canada, October 14, (2020).

3. Natsue Yoshimura, Behavioral and neuroimaging approaches for investigating

sensorimotor control using non-invasive methods, Workshop 1: Multidisciplinary approaches to quantify sensorimotor control and adaptation of skilled and pathological hand movements, International Society of Electrophysiology and Kinesiology (ISEK 2020), Oral presentation, Virtual conference, July 12, (2020).

4. Wataru Akashi, Yasuharu Koike, Natsue Yoshimura, Auditory information decoding from Electroencephalography using neural network, JNNS2019, Tokyo, Japan, September 5, (2019).

5. Kaito Umetsu, Ujwal Chaudhary, Azim Malekshahi, Aygul Rana, Yasuharu Koike, Niels Birbaumer, Natsue Yoshimura, Yes/No classification of Completely Locked-In Syndrome (CLIS) patients using EEG cortical current based on standard brain model, 第 41 回日本神経科学大会, (2019).