



ムーンショット目標 1

2050年までに、人が身体、脳、空間、時間の制約から
解放された社会を実現

実施状況報告書

2023年度版

身体的能力と知覚能力の拡張による

身体の制約からの解放

金井 良太

株式会社国際電気通信基礎技術研究所

経営企画・イノベーション協創部



1. 当該年度における研究開発プロジェクトの実施概要

研究開発プロジェクトの概要

非侵襲 BMI で計測する脳波や生体情報に対して AI 技術を適用することで、利用者が頭に思い浮かべた言葉や行動を読み取り、意図に応じた CA(Cybernetic Avatar)遠隔操作を実現する。この技術により、サイバー空間で買い物・情報検索などの生活自立行動を可能となる。身体または精神に障害を抱える利用者が、外科的手術を要する侵襲 BMI 及び極低侵襲 BMI を活用した CA 遠隔操作によって、コミュニケーションの速度や遠隔操作技術において、脳や身体の制約を超えた能力拡張を実現する。

(1) 研究開発プロジェクトの実施状況

研究開発項目1:IoB インターフェース開発:意図推定技術により、サイバーフィジカル空間における対話、購買、散策、情報検索といった日常行動の支援に必要な非侵襲 BMI を開発した。当該年度は、IoB リサーチスタジオを最大限活用して収集した大規模な EEG-BMI データセットの公開と、これを使用した脳波の特徴の個人差を自動較正する AI アルゴリズムの特許出願を完了した。これにより、脳波上で多様な特徴を示す被験者が様々なノイズに暴露される環境においても、BMI を安定的に利用できる技術基盤を整備した。現在、学術コミュニティにおける普及促進と産業化時の知財保護の両立を目指したオープン&クローズ戦略の構築を開始し、当該プログラムのライブラリ化を推進中である。本品を活用した研究事例として、遠隔操作者が念じて VR 環境中のアバターを散策させてタイムを競う「ブレインピック」の公開イベントの実施、脳状態の可視化と自己調節訓練を通じた身体能力の向上、口唇部に局所性ジストニアを罹患した管楽器奏者やジュニアピアニストの演奏パフォーマンスに影響を与える脳活動パターンの特特定などの成果を挙げた。本品を用いて心理、精神の状態を精緻に分析するための環境を整備し計測を開始した。

研究開発項目2:IoB ミドルウェア開発:想像した行動や言語を具現化するシステムの実装を目標にして、超高密度脳波計を用いた発話解読や、非接触情報を用いた lip reading 技術の PoC に成功した。ヒト行動データ、fMRI データ、マーモセットの ECoG データなどによって、発話や行動データの大量蓄積とメタデータの整理も達成された。開発した技術の活用に関する広報活動や、科学者と作家とのコラボレーションによるイベント主催を通して、IoB の科学的知見の普及と社会実装の促進を推進した。

研究開発項目3:IoB コア技術:AI 技術との融合による侵襲型 BMI の性能向上に向けて、頭蓋内脳波による意図・想起内容の推定と意思伝達技術の開発を、実験動物(マーモセット、マカクザル)と人間のてんかん患者および四肢麻痺患者で並行して進めた。長期安定して多点の侵襲的脳計測が実現し、ヒトの想起した視覚的意味内容や発話内容、表情を含むアバター操作を高い精度で推定し、出力する BMI が実現できた。項目2との連携により、直感的な感覚を直接に伝える X-Communication(XC)技術の開発が順調に進捗した。

研究開発項目4:共通基盤技術開発:新規技術探索調査に端を発して、研究開発項目の設置と新規課題推進者の発掘を行い、国際連携強化の観点から、極低侵襲 BMI 技術開発を世界的にリードするオーストラリア・メルボルン大学の David Grayden 教授が参画し、及び、カリフォルニア大学サンフランシスコ校の Edward Chang 教授が参画した。これらの世界的なリーダーを本プロジェクトに迎えることで、世界的にトップレベルの体制を築くことに成功した。ブレインテックガイドブック・エビデンスブック vol.1 の公表を達成し、国際プレゼンス向上に向けて英訳版を刊行した。UNESCO などの国際機関からもニューロテクノロジーのル

ールづくりについて、注目を集めており、期待していた国際的な波及効果が得られてつつある。ガイドブック vol.2 の作成も内容をほぼ確定し R6 年度の刊行への準備を整えた。エビデンスの整理も進展し複数の論文化が進められた。うち 1 件は既に査読付き雑誌に掲載されている。

研究開発項目5:IoB 極低侵襲技術開発:本項目は、家畜豚およびミニ豚を用いた動物実験において、極細径ガイドリングカテーテルとガイドワイヤ先端の導電材料を組み合わせ、急性実験向けの電極として活用することで血管内脳波の計測を実現した。脳波計測の中でも、体性感覚誘発電位(SEP)と視覚誘発電位(VEP)の取得を達成し、血管内から脳活動電位を計測可能であることを示すことができた。特に R5 年度は、薄膜シート型電極の導入やその形状、表面に塗布する生体適合性材料、体内と体外の通信や給電システムの最適化を行い、従来計測技術と比較した時の優位性を確認することができた今後更なる計測精度の向上と非侵襲性向上に資する技術開発を行い、R6 年度には長期の血管内留置技術を構築する。

(2) プロジェクトマネジメントの実施状況

研究開発プロジェクトのガバナンス

プロジェクト全体の管理・運営は PM 支援チームを設置し実施している。進捗管理などの負荷分散とプロジェクト間の連携の促進を目的に、R5 年度からは合計 4 名のサブ PM (SPM) のポジションを設置して、各課題推進者の研究開発計画、予算計画、進捗状況の把握や報告書を研究開発項目ごとに取りまとめを行った。週次ミーティング、PM/SPM 定例ミーティング、PM と課題推進者との 1on1 ミーティングなど、プロジェクトのフェーズと体制に対して適切なものを都度採用しつつ、マイルストーンに向けて研究開発の管理、新規計画の創出や課題の発見を行った。

研究成果の展開方法

プロジェクト全体としての研究成果は主に学会や論文を通じて公表した。PM は各課題推進者や SPM との 1on1 ミーティング等で研究開発の進捗報告を受け、社会実装に向けた成果の特許出願の可能性について、経済安全保障を十分に考慮して検討した。プロジェクトにおいて新規技術の開拓を目指し、技術動向調査、市場調査等も実施し、革新的な技術候補が発見された場合には、新規課題推進者の抜擢人事を検討した。

広報、アウトリーチ

R5 年度は広報・アウトリーチについて以下 2 つのアプローチで実施した。

研究開発発動の情報発信・活動のアーカイブ

積極的な情報発信のチャンネルとして X (旧 Twitter) を活用し、活動のアーカイブについては公式 WEB サイトおよび YouTube チャンネルにて実施した。X は R4 年度から約 450 人フォロワーが増加し R4 年度よりも本プロジェクトの取り組みに関心を持つ層が多様化している。X-Communication (XC) チームを始めとした研究活動のブランディングのためのコンセプトムービーも公開した。それに伴いメディアリレーションの機会が R4 年度に比べて増加し、テレビや新聞など非専門家をターゲットとしたメディアへの露出の機会も得ることができた。

双方向コミュニケーション

一方向的な発信だけでなく、多様なステークホルダーとの双方向コミュニケーションの機会の施策も実施した。特に「Neu World」や「ブレインピック」では、研究活動を元に社会で生きる全ての人が、未来でどのように活用したいか、それに対する期待と不安を直接対話することができる機会として、トークイベントやワークショップ、体験会などを合計で 10 回に渡り実施した。

データマネジメントに関する取り組み

研究開発項目ごとに実験系の研究においてはデータ収集を実施してきており、データ取得の完了したものについては論文出版と合わせて積極的なデータ公開を実施した。人間のデータを利用するため、個人情報保護に関わるガイドラインに準拠した、データ共有の仕組みが求められるが、実験参加者に対しては次のポイントを明確にした上で、ご理解いただき同意を得た上で実験を進めた。

- 研究利用目的の明示
- 匿名で学術目的 DB 登録の承認
- データ加工により得られた AI プログラム内部のパラメータは情報加工者の著作権であり、被験者のデータではない (被験者の権利が及ばない) ことの承認

以上の点に留意しつつ、代表機関及び課題推進者の所属機関の倫理委員会からの意見や、本プログラムの PD・アドバイザーからの助言を参考に、個人情報保護に配慮すると同時に、研究成果として得られるデータの利活用が円滑に行える DB 設計を実施した。

2. 当該年度の研究開発プロジェクトの実施内容

研究開発項目1:IoB インターフェース開発

研究開発課題1-1-1:非侵襲 BMI による精神・身体状態の推定

当該年度実施内容:

(1)脳情報オミックス解析による精神、身体状態の推定アルゴリズムの開発

次に示す通り、年次計画書に記載した計画全てを予定通り達成した。

R4 年度に学術論文として公表に至った BMI 利用中の被験者 100 名超から収録した生体由来信号データベース(Iwama et al., Scientific Data 2023)を利用して、脳波に含まれる 1/f ゆらぎと固有周波数の分布を、個人ごとの特性を考慮して自動校正する AI アルゴリズムを完成させてこれを実時間実装し、特許出願した。また、脳波に混入する筋電図、眼球運動などの生体シグナルを波形分類する AI アルゴリズムを AI の 1 つである Convolutional Autoencoder 技術を活用して実時間で実装し、ノイズ時区間を高精度に特定して BMI 動作の安全停止機構を構築した。以上のとおり R5 年度は、複数種の独自 AI を構築して脳波加工品質を向上させ、精神・身体状態の推定精度を高めた。「脳波の特徴」や「脳波計測の実際」に関する深いドメイン知識に基づいて作成した独自 AI を、1つのシステムとして機能するようにパッケージにした「コンポジット AI(複合 AI)」は、発想自体がまだこの分野に存在せず、世界的に競争優位性が高い技術であると考えている。(この分野の標準的なアプローチは、「ノイズが入らない実験環境で実験を実施する」、「被験者にノイズが乗らないように体動や瞬きをしないように指示する」、「脳波の個人ごとの違いをキャリブレーションするために、事前に 5~10 分程度の BMI テスト利用を実施して、得られた脳波の特徴を基に脳波判読器のパラメータを校正する」等の代替的措置に留まることが一般的で、実社会利用に向かない。一方で、本研究成果物はこうした BMI の問題を AI 支援技術によって解決したものである。現在、学術コミュニティにおける普及促進と商用利用時の知財保護の両立を目指したオープン&クローズ戦略の構築を開始し、当該プログラムのライブラリ化を推進中である。

次に、VR 環境内のオブジェクトを識別する Semantic Segmentation AI を作成し、CA が走行すべき歩行路の位置推定を行って、CA に半自律的機能を実装した。前段で説明した AI 技術を使って脳波で CA 操作する際に精度不十分な場面で、この半自律的機能を発動させて性能を補う「Shared Autonomy」機能を実装し、これを応用して、VR 環境内での脳波による AI 支援型 BMI-CA 操作の 3 名同時自立行動を実現させた。2024 年 2 月 25 日に実施された国際ブレインピックイベントに技術提供し、デモンストレーションとして、海外留学生と障害当事者からなる 3 人チームが 1 体の CA を操作して VR 環境内を散策し、タイムトライアルを行う実証実験を全 10 組以上で成功させた。このときにボイスチャットによる対話を併用することも実現可能であることを確認した。これとは別に、出前アプリを操作してメニュー情報の検索と購買が行えることをデモンストレーションによって確認した。

一連のトライアル中にユーザーが CA に対して一体感を感じているかどうか、生理指標(皮膚発汗、心拍、脳波反応)、アンケート調査(KVIQ)を組み入れた定量メトリクスのパッケージを開発し、試験運用の結果と共に学会投稿し、R6 年度に公表する予定である(OHBM 2024、韓国ソウル、2024 年 6 月 23~27 日)。

(2)脳疾患の予防と有病社会復帰者の脳状態管理を実現する非侵襲 BMI の社会実験

次に示す通り、年次計画書に記載した計画全てを予定通り達成した。

R4 年度に公開した E³LSI 検討資料の1つであるブレインテック利用ガイドブックの内容に準拠しつつ、脳状態を自分で確認したり調節したりして能力向上やヘルスケアに繋げる「Brain Assistant (BA)」のための技術仕様を決定した。具体的には、過年度における武見 G の成果であるシステムチック・レビュー (Onagawa et al., Neuroimage 2023) の記載内容を活用して、BA を用いて陸上競技者や e スポーツ競技者の運動反応時の中枢潜時を短縮させる訓練方法を策定し、実験計画法に基づいてその検証方法を策定した。事前検討により割り出したサンプルサイズを元に被験者 26 名を募集し、うち不備なく実験を完遂した 18 名の結果を取り込んで解析したところ、通常単純訓練では疲労等による運動反応遅延が見られたのに対し、BA を用いた訓練では遅延抑制が統計的に有意に確認された。層別解析の結果から、BA を用いた訓練による脳波変化が顕著な被験者で大きな効果が発現することを認めた。

同様に、脳卒中サバイバー (医療機関での治療を終え、生活復帰したものの麻痺が残る方) に対しても、BA による身体管理のための技術仕様を決定した。具体的には、日本脳卒中学会編 脳卒中治療ガイドライン 2021 (改訂 2023) が 8 月に刊行されたことを受けて、収載されている複数の論文の内容を分析し、使用する脳波電極位置 (セントラル) と周波数 (アルファ帯域、ベータ帯域)、訓練総時間 (1 時間程度の訓練を 10 日間以上)、比較対照群の設置 (通常単純訓練) を確定した。今回は初期の検討のために訓練量を単回に修正した上で 3 名の当事者で実験を行ったところ、運動イメージの質の向上、麻痺肢のこわばりの緩和が確認された。当該の結果については R6 年度も引き続き事例集積を継続し、科学的なエビデンスの獲得に繋げる。

このほか、音楽演奏家の日々の調子の管理への利活用の可能性については古屋 G、e スポーツ競技者での実践の可能性については渡邊 G に昨年度までに試作したヘッドフォン型脳波計を貸し出して研究連携を進めた。

課題推進者: 牛場潤一 (慶應義塾大学)

研究開発課題1-1-2:非侵襲 BMI による精神・身体状態の調節

当該年度実施内容:

(1) 多様で高解像度な精神・身体の状態の推定・調節が可能な BMI 技術の開発

高速度で複雑な運動時の感覚情報の干渉を脳波から同定

高速度で複雑な運動時の感覚情報の干渉を脳波から同定するために、高速かつ複雑な指運動を他動的に提示した際の脳波を計測した上で、「提示した指運動のタイプ」と「得られた脳波反応」の対応関係をマトリクス状に配置して分析する Representational dissimilarity matrix (RDM) 解析を実施した。その結果、高速度の運動時に、脳内の個々の指の領域が互いに干渉しあう現象を明らかにした。この指同士の脳内地図の干渉は、ある指を動かす際に、他の指の感覚機能を抑制する機能(周辺抑制)の低下と関連しているかを調べるために、周辺抑制を増強することが知られている微弱な末梢神経電気刺激を手指に加えた。その際の、手指の脳地図を前述の手法で調べたところ、微弱な末梢神経電気刺激を手指に加えることで、高速度の運動時に脳内の個々の指の領域が互いに干渉する現象が低減することが明らかになった。さらに、電気刺激を加えながらピアノを高速度で演奏する際に見られる指の動きのもつれ(=指を動かす順序のエラー)が減少した。本研究を通して、多指の高速で複雑な動きの安定性という、身体の状態を高解像度で非侵襲脳情報から推定する技術を新たに開発し、運動中の脳の安定性の背後にある脳神経系の抑制機能の役割を明らかにした(Hirano et al. under review. doi: 10.1101/2024.01.23.576947)。

技能の分解と可視化による熟達支援トレーニングの効果の実証

脳状態を自分で確認したり調節したりして能力向上やヘルスケアに繋げる Brain Assistant の実現に向けて、非接触で脳から身体への出力信号を高解像でセンシングし、可視化提示する技術を構築し、その有効性を検証した。

具体的には、脳の状態を色濃く反映している指運動のタイミングのエラーを、ミリ秒単位のオーダーで提示可能なシステムを構築し、動作のエラー情報の提示に基づいて、技能の限界状態を打破できるかを、ピアニスト 60 名を対象とした実験を通して評価した。

その結果、複雑な技能を構成する単純な動作に分解し、個々の単純な動作を練習する際に、脳状態を反映している指の動きのエラーを提示する際に、探索と利用の学習の仕組みを脳は利用しながら、熟達困難な技能を向上できることを明らかにした(Kimoto et al. under minor revision, Communications Biology)。

当該介入手法は、動作の反復訓練を通じた学習効果が現れない状態後にも、有効であったため、演奏家の技能の天井効果の状態を調節可能な新しい Brain Assistant として、ジュニアピアニストを対象とした身体教育プログラムに導入する計画である。

(2) 訓練に伴う心身の不調の推定・調節を実現する AI 支援型 BMI-CA の社会実験

以下の実験研究を通して、開発システムを用いた音楽家の心身の状態や不調の推定が可能か検証するために、ピアニストのデータ収録と心身の状態や不調に関する非侵襲脳情報(脳波)と非接触脳情報(動き, 力, 筋活動など)の同定に取り組んだ。対象とした脳の状態は(A)蓄積疲労, (B) 脳への過負荷に伴って発生する不可逆性の誤学習, (C)技能の不安定性, (D)調子の良し悪しであり、計 126 名のピアニストを対象とした実験を通して、脳状態の推定可能性を統計的に検証した。

(A)非接触脳情報に基づく蓄積疲労の推定(牛場 G、武見 G と連携)

4 時間に及ぶ指運動トレーニング中の筋活動、力発揮、運動の俊敏性を計測する実験を、ピアニスト 30 名を対象に実施し、得られた非接触脳情報と回帰モデルを用いて、脳の蓄積疲労に伴う運動学習機能の低下を推定可能であることを明らかにした(Takemi et al., 2023)

Scientific Reports)。

(B) 非接触脳情報に基づく脳への過負荷に伴って発生する不可逆性の誤学習の推定

脳から身体への情報を高解像度かつ非接触に取得する方法として、指のわずかな姿勢の変化をカメラ画像から非接触に取得し、脳からのアウトプット情報として捉え、オートエンコーダーを用いて脳の誤学習状態を推定可能か検証した。健常ピアニスト 20 名と局所性ジストニアを罹患したピアニスト 16 名を対象とした実験を通して、判別率 81.2%, 誤答率 11.8% の推定精度で、脳の不可逆性の誤学習である局所性ジストニアを推定可能なことが明らかになった (Oku et al. 2024 Frontiers in Neurology)。

(C) 非侵襲脳情報に基づく脳状態の安定性の推定

運動中の脳状態の安定性を推定する手法として、ピアノ演奏中に、聴覚情報に人工的な外乱を与え(発音タイミングを遅延させる)、その応答を運動計測と脳波計測を用いて評価するシステムを構築した。15 名のピアニストと 15 名の非音楽訓練経験者に対して、脳状態の安定性を評価した結果、低次知覚情報処理を担う脳波信号に基づいて、運動中の脳状態の安定性を推定可能であることを明らかにした (Yasuhara et al. 2024 iScience)。

(D) ピアノアカデミーにおける簡易脳波計を用いた調子の推定(牛場 G と連携)

牛場 G が開発した簡易脳波計測システムを用いた社会実験として、我々が主催するピアノアカデミーに参加するジュニアピアニストらの脳活動を計測する研究を1年間に渡り反復して実施した(縦断研究)。

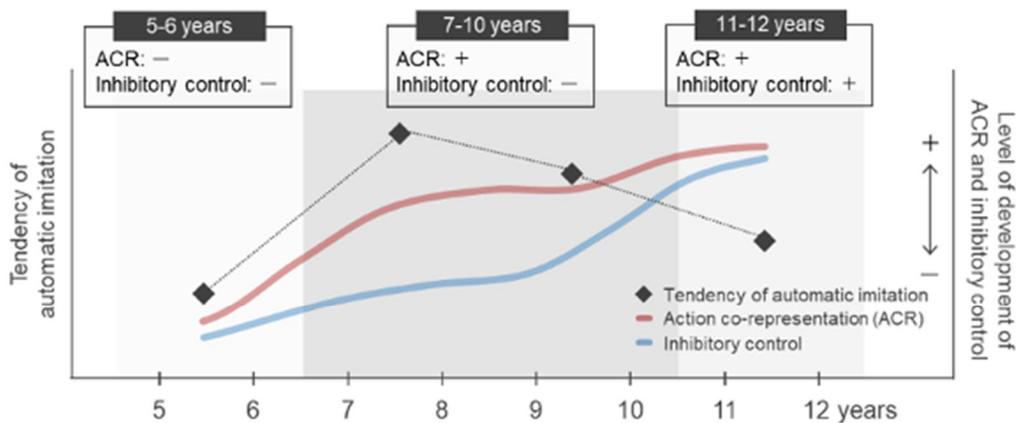
課題推進者: 古屋晋一 (Sony CSL)

研究開発課題1-2-1:非接触表面情報による心身状態の推定

当該年度実施内容:

(1) 表面情報からの心身状態の推定に向けた知的基盤技術

R5 年度には、表面情報計測パラメータの絞り込み・組み込みを継続しながら、より個人差を考慮した状況や「他者」(他のアバターも含む)が存在するような環境での心身状態の計測可能性を探る研究を進めた。具体的には、内受容感覚の文化差の研究、ヒトが他者(アバターも含む)の行動に同調する傾向(ACR: Action Co-Representation)の年齢による変化の研究(7 歳~10 歳に他者の動作に影響を受けやすくなる: 図1: Mukai et al., Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 2024)、他者が空間内に存在する時の心拍活動の研究(親しい友人が正面にいるときと右側にいる時に心拍数が下がる: 図2: Mukai et al., Scientific Reports, 2014)など、CA の使用シーンの多様さを先取りし、考慮した研究を行い、学術論文として発表した。



- 5-6歳：他者の運動表象機能が弱い・他者の動きに注意が向かない ⇒ 模倣傾向が弱い
- 7-10歳：表象機能は徐々に発達するが、抑制機能が弱い ⇒ 模倣傾向が強い
- 11-12歳：表象機能・抑制機能が強くなる ⇒ 模倣傾向が弱くなる

図1

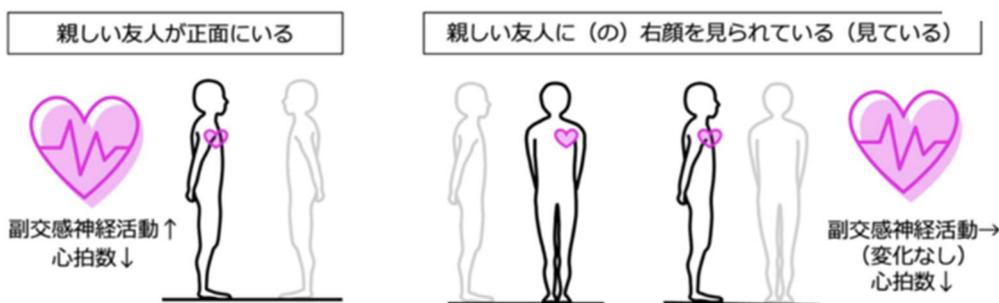


図2

上記の概要で述べたように、R5 年度は大幅な計画変更の議論を行い、その中で R6 年度以降は、複数操作者と複数 CA が存在する未来を想定した場合の、身体所有感・自己主体感・パフォーマンスなどの関係を調べる認知科学的実験を他のチームと共同で行うことによって、科学的根拠の蓄積に重点をおいた研究開発を行い、目標1で開発される技術に「共通して活用できる身体所有感・自己主体感・パフォーマンス計測基盤」を築くことを主眼とすることが決定した。そのため、生体信号オミクス解析システムの別サイトでの複製に関しては、この計測基盤が確立してから行うこととなった。

(2) 日常生活環境下での心身状態非侵襲推定に向けた社会実験

R5 年度には、ヘッドフォン型ワイヤレス脳波計を中心として、心身状態推定デバイス使用プラクティスの多様性分析を継続して行い、分析を行った。

このテーマに関しても、計画の見直しに向けた集中した議論を行い、R6 年度以降は、「表面情報からの心身状態の推定に向けた知的基盤技術」で得られた知見を活用する形で、「複数の操作者が複数の CA を操作する際」の、身体所有感・自己主体感・パフォーマンスなどの関係を調べる実験をウェブ上で行えるようにする「CA 操作テストベッド」の開発を進めることとなった。本テーマの主要な目的であった、ユーザーの顕在的・潜在的反応を継続して調べ、CA 操作の多様性(普遍性や文化依存性)にも着目した分析も行うことも決まった。

本課題推進者の所属機関でのムーンショットプロジェクト全体を俯瞰する「ムーンショット早稲田デー」に参加し、社会実装を念頭においた目標1以外のプロジェクトとの連携可能性も探った。加えて、本グループの構成員のうち研究員 1 名と博士課程大学院生1名が、武見

Gのメタアナリシス分析を継続し、査読付国際誌に投稿中である。

課題推進者: 渡邊克巳 (早稲田大学)

研究開発課題1-2-2:非接触表面情報からの身体運動を伴う場合の心身状態の推定

当該年度実施内容:

(1)表面情報からの身体運動を伴う場合の心身状態推定に向けた知的基盤構築(R5年4月～R6年3月)

R5年度はヘッドフォン型ワイヤレス脳波計による脳波計測が限定的な環境下、すなわち体動が少ない環境に限られたため、e-sports とゴルフのパターの計測に絞って実施した。並行して、野球のバッティングや歩行時の脳波計測を一般の脳波計測機器を用いて実施した。歩行に関しては歩行開始課題時に脳波を計測し、深層学習を用いて歩行開始前の脳波から歩行意図を80%程度の精度で予測することに成功した。バッティングに関してはVRを用い、プロ野球選手のスイング時と非スイング(見送り)時の比較から意思決定過程に関連する脳活動と思われる活動の抽出に成功した。また e-sports を対象とし、脳波のフィードバックにより脳活動を変調し、パフォーマンスへの影響を調べるための実験を開始した。

(2)障害があるアスリートの運動系脳機能トレーニング(R5年4月～R6年3月)

当該年度は、ヘッドフォン型ワイヤレス脳波計によるデータ計測がうまくいかず、パラアスリートでのトレーニング実験に至らなかったため、安定したデータ記録が可能なeスポーツ場面での脳波計測を実施した。その結果、eスポーツパフォーマンスと前頭葉の δ 波および θ 波との間に優位な関係性を見出すことができた(Neurosci Lett 誌に採択)。この結果を基にニューロフィードバックトレーニング法を試験する準備ができ、実験を開始した。

課題推進者:中澤公孝(東京大学)

研究開発課題1-2-3:非接触表面情報からの気分の推定

当該年度実施内容:

表面情報からの気分の推定に向けた知的基盤技術

精神状態(特に不安・恐怖・鬱・PTSD 傾向)の予測に繋がる心身環境情報計測のための機材・人員を実装し、安定した実験・データ収集ができる環境を整えた。具体的には、環境整備として、R3~4 年度に開発したスマートフォンアプリのテストフライト版を完成させ、瞳孔・身体(手腕)動揺・心拍等の指標を用いて映像観察による恐怖条件付け時の不安・恐怖状態推定アルゴリズムのたたき台を構築し、R5 年度には呼吸と脳波の計測を追加した。これにより、脳波と環境センサーで捉えた生体行動情報から、自分では気づきにくい心理的、精神的な状態を認識するための知覚拡張アルゴリズム(ドラフト1)を完成させた。

外部被験者を対象としたテストフライトアプリを用いた実験開始に向けて、小泉所属先(SONY)の倫理安全審査を経て実施承認を得た。牛場 G・渡邊 G・中澤 G 他と議論して開発時の非接触表面情報、特に呼吸の計測パラメータと推定心身状態の目標精度の整合性を定期的に確認し、20名の行動データ計測、4名の fMRI データ計測、4名の脳波データ計測を実施した。テストフライト版アプリを用いて心理的不安状態の推移をリアルタイムかつ非侵襲的にモニタリングし、アバターへ投影して本人にフィードバックしたり、他者間コミュニケーションに役立てるなど、R6 年度以降の研究発展への布石とした。

精神障害高リスク群における心身状態非侵襲推定に向けた社会実験

心身状態を表面情報から推定するアルゴリズムを日常空間で活用することを念頭に、理研での脳イメージング研究の倫理審査・共同研究契約を経て、予備実験を開始した他、Sony CSL の自社スペースにて脳波計測を実施すべく環境を構築し、脳波計測に着手した。具体的には、小泉開発の不安・恐怖状態を学習・喚起させる実験素材(動画等)を用いた実験環境を構築し、同時計測を伴う実験の倫理安全審査に繋げた。上記(1)(2)を通じて、金井プロジェクトマイルストーン(2025 年)「身体的・認知・知覚能力の拡張」の精神不安フィールドにおける実現につなげた。

課題推進者:小泉愛(Sony CSL)

研究開発項目2:IoB ミドルウェア開発

研究開発課題2-1-1 :脳情報の共有と統合のための数理基盤技術の開発

当該年度実施内容:

(1)行動の予測に関する情報解読の実証

ヒトの fMRI とマーマモセットの ECoG データを利用して、自発的な行動を行っている際の近未来の行動の予測を行う研究を進めた。

まずヒト fMRI データを用いた研究において、GW(Global Workspace)から未来の行動に関する情報を抽出できるかどうかを検証した。二つの多変数データ間において、各データに固有の変動成分と、データ間で類似した変動成分(shared response)に分割する、Shared response model と呼ばれる手法が存在する。この方法を fMRI データに対して用いれば、異なる脳領域の間で類似していた活動成分を取り出すことができる。またこれらの類似度を用いることで、脳領域間の情報共有の度合いを定量することができる。そこで全ての脳領域のペアについて shared response の類似度を計算したところ、前頭葉および頭頂葉に広がる脳領域が、相手の領域によらず、高い類似度を示すことを、R4 年までに明らかにした。このことは、上記の領域は脳における情報のハブ領域になっていることを示している。そこでこの脳情報が集積するハブ領域から、近未来に被験者が何を見るかが予測可能であるかどうかを検証した。動画視聴中のヒトは絶えず目を動かしながら視覚的な経験を重ねていく。その経験は、時々刻々と提示される豊富な視覚情報をどのように選択するか、すなわち、動画視聴中にどのように視線を移動させていくかに依存するはずであり、その視線移動の個人差が、視聴経験の個人差を産みだすと考えられる。しかしこれまでの視線移動の理論は、主として動画像のもつ視線誘導要員(saliency)によって説明しようとするものがほとんどであり、脳から外部への能動的な働きかけを無視したものであった。これに対して我々の研究により、頭頂葉と側頭葉にまたがる側頭頭頂接合部 (TPJ: temporo-parietal junction) と呼ばれる領域の活動を用いることによって、近未来(2 秒後)の視線の先にある対象物を有意に予測できることが明らかになった。また動画の saliency の変化が低いとき、すなわち、環境による視覚誘導の影響が低いときのみ、この予測が可能であることがわかった。これらの結果は、TPJ が、動画視聴中においても、外部環境からの入力状態によらず内的な状態に基づいて情報生成を行う領域であることを示している。また、動画視聴中の視線移動の能動性(環境の持つ視線誘導要因で説明できない視線移動)には個人差があるが、TPJ とその他の領域との機能的結合性によって、その個人差が説明可能であることも明らかにした。すなわち、TPJ が、環境に対して能動的な働きかけを行う情報を生成する脳領域である可能性を示している。このことは、TPJ の個人差を用いることによって、個々人の行動における環境からの影響度を定量できる可能性があることを示唆している。

また自由行動下のマーマモセットから取得された ECoG データを使用し、GW に対応するチャンネルを同定した。特定のチャンネルから、発話や移動の起始に関連する情報、および移動後の目的地を高い精度で予測する手法を開発した。この手法により、BMI によって行動が予測できるという新たな可能性を示すことができた。現在、この研究成果は学術誌へ投稿中である。

(2)発話の解読技術の開発

非侵襲型超高密度脳波計を装着したユーザーが、脳波データと ChatGPT を組み合わせて Gmail の操作を行う実験を実施した。この実験では、特定の色の名前を発話する際に得られる脳波データを取得し、これを AI モデル (EEGNet) に学習させることで脳波からの単語

識別を実現した。解読に利用される電極の同定を行ったところ、言語野や運動野などの限局された領域が貢献していることが明らかになった。脳波計の計測では、各電極は脳の多様な信号源からの電流を混合して計測してしまうという有名な問題(Volume Conduction)が存在しており、ECoG などの侵襲計測手法や、fMRI などの方法と比較して、脳波計の空間解像度は大幅に下がると考えられていた。しかし上記の事実は、fMRI など解像度の高い計測手法でしか明らかにできないとされていた事実を再現可能であることを示唆している。本結果をまとめた論文は投稿が完了しており、現在査読中である。発話解読 BMI の精度向上を目指して、1 名の被験者による発話課題データを複数日にわたって取得し、データ蓄積に成功した。このデータは R6 年度の発話解読技術の進化に利用予定である。

これらの研究成果に加えて、XC 技術が利用可能となった際に、本課題や他の課題推進者の開発する手法を用いることで、信頼性を担保して安全に運用できることを啓蒙する広報活動や、第2回数理学者と解く神経科学のオープンプロブレムを主催する等の成果も達成した。これらの活動は、科学的な知見の普及と社会への影響を目指し、広範な関心を集めることに成功した。

以上、R5 年度の研究開発課題の実施概要と主要な成果について報告する。今後も研究成果の深化と応用に向けて、継続的な努力を行っていく。

課題推進者: 笹井俊太郎(株式会社アラヤ)

研究開発課題2-1-2:脳内情報表現の解読と数理基盤技術の開発

当該年度実施内容:

本研究開発課題では、ヒトに近い脳を持つマカクサルから、多点微小電極から記録される神経活動電位(Unit Activity、以下 UA)信号、fNIRS(機能的近赤外分光法)信号、fMRI(機能的磁気共鳴画像法)信号、fUS(機能的超音波画像法)などマルチモーダルな脳機能活動信号を収集することで、概念共通化技術の実験的検証をめざしている。

R5 年度は、動物実験による各種神経活動計測実験ならびにそのデータ解析を実施した。UA記録実験では、視覚物体認識に関わる腹側視覚経路の脳表面(TEO 野、TE 野後部、TE 野中央部、TE 野前部)に埋め込みこまれた4つの微小電極アレイ(電極間隔 400um、1アレイにつき 128 本、電極総数 512 本)から、さまざまな画像や動画を観察する際に生じる神経細胞の活動電位を多点同時記録した。マカクサルから慢性的に同時記録する神経活動としては、国内最大であり、世界的に見ても大規模な長期神経データ収集環境の構築に成功した。電極埋め込み後、1年以上経過してなお、毎日数百の視覚応答を伴う UA 信号の記録継続を確認しており、埋め込み電極による長期信号安定性評価に資するデータが収集できた。画像にして、のべ数万枚、動画は27時間分に相当する神経活動データを蓄積することに成功した(現在でもデータベースを拡大中)。取得した大規模神経データを AI 処理することで、神経情報の復号化技術開発を進めている。

心的イメージの可視化モジュール開発では、最先端の diffusion model をベースとしてマルチモーダルな情報の復号化を組み込んだ心的イメージの可視化モジュール実装を進めている。

R4 年度より引き続き行っている脳内概念を共通化するための数理基礎構築については、成果の論文投稿準備を進めた。R5 年度中、XC チームとして連携する柳澤 G から提供を受ける脳情報データを活用しつつ、笹井 G や大泉 G と連携しながら、異なる脳と脳の間や、脳と AI の間での情報転送の検証についても引き続き行っている。

X-Communication(XC)によるサイバー・コミュニケーションの実験的検証の一環として、CA の表情を脳・神経データを用いて自在に制御するインタフェース開発を目指している。ユーザの意図情報として、感情を推定し、推定結果をアバターの表情変化として反映させることで、意思伝達の効率化と、コミュニケーションの多彩化が実現し、ユーザ・エクスペリエンスが向上すると期待される。R5 年度は、検証のプラットフォームとして、deepfake 技術を応用したアバター生成AIインタフェース開発を進めた。

公開 fMRI データベースを用いて、感情に関わる脳情報と、言語情報、表情情報との間のマルチモーダルな情報表現の比較研究を行った。特定の脳領域が、特定のモダリティとより類似した感情を符号化していることを明らかにした他、言語と画像のマルチモーダルな情報表現が、脳における感情表現に最も類似性が高いことを明らかにし、研究成果の論文投稿を進めた。加えて、R4 年度より進めていた、AI によるCAの感性評価に関する研究成果は、国際論文誌への掲載ならびに国際学会発表を終えた。

この他、ヒトとサルから脳の構造データとfMRI 信号を取得し、脳内ネットワークを比較することで、サルで得られた知見を、ヒトの BMI 技術へと展開するための研究を行い、成果の論文投稿を行った。

fUS 信号の計測に関しては、約 15mm 四方の範囲の血流動態活動を、空間分解能 0.1mm、時間分解能 0.1 秒という非常に高解像度にイメージングする研究を実施している。R5 年度は、マカクサルに展開する前段階として、げっ歯類への適用を行い、研究成果の論文投稿を行った。

以上の研究成果を通じて、視覚的イメージを再構成し、計測モダリティ間ないし、感覚モダリティ間の転移技術開発に関する当初の目標を達成することができた。異なる脳や AI、計測／感覚モダリティの間で概念情報を共通化するための数理基礎の実験的検証フェーズが着実に進展した。

課題推進者：林隆介（産業技術総合研究所）

研究開発課題2-1-3:脳状態遷移コストの定量化と最適制御のための数理基盤技術の開発

当該年度実施内容:

(1)実際の制御入力に対する脳活動データを用いて制御性を定量化する方法論の提案とTMS-EEGデータへの適用

これまでの研究では、制御入力なしの脳活動のダイナミクスに対して確率モデルを推定し、そのモデルに「仮に」制御入力を入れたときの最適制御を考えてきた(Kawakita et al., Network Neuroscience, 2022; Kamiya et al., Journal of Neuroscience, 2023)。しかしながら、ここで推定されたダイナミクスはあくまで要素間の相関関係に基づくものであり、要素間の因果関係を正しく推定することはできていない。因果関係を正しく推定するためには、制御入力(外乱)を加える必要がある。したがって、R5年度では実際に脳に制御入力を加えたデータを用いて、ネットワークの要素間の因果関係をより正確に推定することを試みた。

具体的に、神経活動データからネットワークの制御性を推定するには、可制御性グラミアンと呼ばれる行列を求めることが目標となる。我々はまず、最適制御理論に基づく、インパルス刺激に対する可制御性グラミアンが、線形自己回帰モデルを推定することなく、刺激によって誘起された脳活動の時系列そのものを使って、簡単に計算できるという方法論を提案した。このことによって、インパルス刺激とみなせるような外部刺激(例えば TMS)を用いると、脳がどの状態に制御することができるかということが、容易に推定可能となる。

この我々が提案する新しい方法論の最初の適用例として、武見 G が記録した運動課題実行中に TMS 磁気刺激を加えた EEG データを用い、可制御性グラミアンが様々な脳状態においてどのように変化するかどうかを調べた。具体的に可制御性グラミアンを用いると、ある制御入力に対して、どの方向にどれだけ動かすことができるのかということが、グラミアンの固有ベクトルと固有値によって調べることができる。結果、可制御性グラミアンに基づく、安静状態の閉眼及び開眼と、運動タスク状態は弁別できることが分かった。これは安静状態が運動タスク状態と比較すると、制御性、すなわち動かせる方向と距離とが著しく異なることを示唆する。一方、運動タスクの中には、実際の運動タスク実行中と、運動タスクを想像している状態の2つがあるが、これらは制御性の観点からは区別できないことも分かった。このように、制御性という観点から、異なる脳状態が弁別できるということを実例をもって示し、提案した方法の有効性を示した。この研究成果は、国内学会にて口頭発表した(Shikauchi et al., 神経回路学会, 2023; Shikauchi et al., ヒト脳イメージング研究会, 2023)。

(2) 確率熱力学に基づく脳状態の遷移コストの振動成分への分解

実際の脳活動のダイナミクスにおいては、状態に応じて振動成分の変化することが知られており、これらの振動成分の変化がどのように遷移コストに寄与しているのかを知ることは重要であった。R5年度は、エントロピー生成という確率熱力学的な遷移コストの指標が、様々な振動モードの寄与に分解できることを示した。具体的には、それぞれの振動モードは周波数の大きさの2乗と振幅の大きさの積でエントロピー生成にインター寄与し、全体のエントロピー生成はそれぞれの振動モードの寄与の和で書けることを示した。つまり、高周波の成分ほど遷移コスト(エントロピー生成)が大きくなり、低周波の成分ほど遷移コストには寄与しない。

この手法を覚醒時および麻酔時におけるサルの ECoG データに対して適用し、状態に応じて、エントロピー生成がどのような振動モードに由来するものかどうかを調べた。結果、覚醒時ではエントロピー生成は α 波帯域の振動モードの寄与が主であり、麻酔時ではより遅い

周波数成分、 δ 波帯域の振動モードの寄与が主になることが示された。この研究成果は既に国際学会にアブストラクトが採択されポスター発表を行い(Sekizawa et al., Cosyne, 2024)、arXiv にも投稿し終えた(Sekizawa et al., arXiv, 2023)。

(3)X-Communication(XC)における脳翻訳技術の開発

R5 年度は実際の脳に対して刺激をすることで、情報を伝送する技術 (X-Communication(XC))に必要な異なる脳の間で、情報表現を翻訳する技術の開発も行った。具体的には、Gromov-Wasserstein 最適輸送法という方法に着目し、技術開発及び実データへの適用を行った。これらの成果は既に arXiv にはアップロード済みで査読中である (Kawakita et al., psyArxiv, 2023; Sasaki et al., bioRxiv, 2023)。R6 年度はこの技術を、神経活動データに適用し、有効性の検討を行う予定である。

課題推進者:大泉匡史(東京大学)

研究開発課題2-2-1:マルチエージェントの協調制御と理論構築

当該年度実施内容:

BMI 制御ロボットに関する話題では、年初に笹井 G と協力して、パーシーバー・アクター (Perceiver-Actor) アルゴリズムに基づく我々のロボット・コントローラを彼らの BMI デコーディング・ソフトウェアと統合し、秘密音声からデコーディングした EEG を使ってロボット・アームを遠隔操作して物体を押すデモンストレーションに成功した。その後、RL チームは BMI デコーディング・ソフトウェアをさらにカスタマイズし、EEG 用の新しいユーザー・インターフェースを開発した。我々は、人間とロボットの相互作用 (HRI) のための視覚的 EEG インターフェースと聴覚的 EEG インターフェースの比較実験を計画し、結果は、Frontiers in Robotics and AI 誌に掲載された。その後、マルチロボット制御研究のためのシミュレータ環境の開発に着手した。これに加えて、いくつかの遠隔操作デバイス (ゲームパッド、SpaceMouse、GELLO) を統合してきた。金井 G と共同で、マルチロボットシミュレータ環境をタスクとした HRI ベンチマークソフトウェア (いくつかの定量的 HRI 指標を自動計算する) の開発を開始した。年初には、事前学習された AI モデルを用いてロボットの制御方針を改善する方法についての研究も行った。

模倣学習アルゴリズムのベンチマークに関する研究も継続し、6 つの異なる模倣学習アルゴリズムを再実装し、そのうち 3 つをオフポリシーに更新した。これらのアルゴリズムを共通のオフポリシーアルゴリズム (SAC) に基づいて、広く使用されているデータセット (D4RL) を用いて評価した。異なる模倣学習アルゴリズムを公平に比較し、それぞれの強みと弱みを明らかにすることで、今後の研究や実践における指針を示した (Arulkumaran et al.2023、Asian Conference on Machine Learning)。

意識のグローバルワークスペース理論をベースとすることで AI エージェントを設計しようと、マルチモーダル環境で動作するエージェントを設計し評価を行った。グローバルワークスペースのサイズが異なるエージェントを広範に実験し、注意パターンや情報処理の違いを明らかにした。具体的には、小さなワークスペースを持つエージェントは、より多様な注意パターンを発展させ、複数のモダリティから情報を統合する能力を示した。このような研究により最終的に適切なデザインを同定し、グローバルワークスペースの機能的利点を明らかにした (Dossa et al., 2024, Frontiers in Computational Neuroscience)。

課題推進者: Kai Arulkumaran (株式会社アラヤ)

研究開発課題2-3-1:脳情報を用いたコミュニケーション技術の開発

当該年度実施内容:

侵襲・非侵襲・非接触情報からの発話意図を解読するミドルウェア開発

生体信号から得られる多次元時系列情報を、自己教師型学習を中心とする深層学習技術により解析するミドルウェアの精度を向上させた。

(1)サイレントスピーチ(無声発話、囁き・掠れ声発声)の認識と発声困難者への適用:

R4 年度に研究実施した LipLearner (Contrastive Learning による話者非依存 LipReading) と、WESPER (深層学習による囁き声認識) がヒューマンコンピュータインタラクションのトップカンファレンス CHI 2023 にフルペーパー採録され、R5 年度に論文発表を行った。LipLearner は best paper award を受賞した。

利用者の発する囁き音声(whisper speech)を深層学習機構により通常音声に復元する機構 WESPER を発展させ、発声困難者の発話補正への適用実験を行った。現状では発声困難者は電子咽喉(Electro Larynx) や、食道発声などの「代用発声」と呼ばれる技法で発話をしているが、前者は人工的なロボット音声になってしまい、後者は発声の習得が困難などの課題がある。両者とも掠れ声としての発声はできているので深層学習による音声復元の可能性がある。R5 年度は発声困難者用の発話コーパスによる性能評価と、某大学と共同で代用発声としてのサイレントスピーチ技術の適用検討と、発声困難者へのヒアリングを行った。

喉部皮膚振動計測による発話認識の実験を開始した。

サイレントスピーチの社会ニーズとして、秘匿性(外部に発話内容が露呈しない)、社会性(声を出すことが許容されない環境でも利用できる)を担保した(サイレント)音声インタラクションの利用がある。これにより、いつでもどこでも音声インタラクションを行うことができ、自然言語による生成系 AI との会話が可能になると、ほぼ脳の延長として AI を利用することができる。その候補として、LipReading や囁き声の研究を行っているが、R5 年度より喉の振動を計測するサイレントスピーチの実験を開始した。通常の発話では声帯が喉の皮膚を振動させるのでこれをコンタクトマイク等でセンシングすることは可能であり、「咽喉マイク」として実現されている。しかし囁き声などの、声帯振動を伴わない発話は咽喉マイクでは発話を捉えられないと従来考えられていた。R5 年度の実験により、皮膚に接触させたピエゾ振動子や、音声周波数帯域の振動を検出可能な MEMS 加速度センサーにより囁き声の発話も音声として計測可能なことを見出した。この方式は皮膚振動のみを計測するので、外部騒音の影響を受けないという有利な特性も併せ持っている。R5 年度は原理検証を行い、R6 年度に計測データからの通常音声への復元や音声認識への接続、発声困難者への適用検証を計画している。

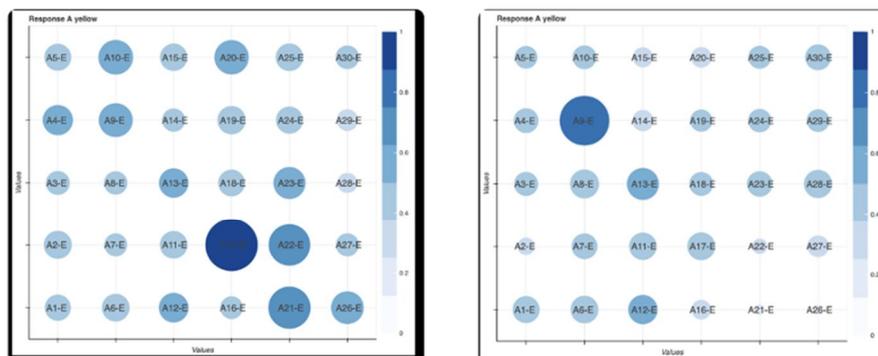
視覚能力の減退をシミュレーションする眼鏡を構築した。

液体レンズにより眼鏡の度を動的に調整する眼鏡により「老眼」などの状態を再現することができる。これにより、若年者が老眼状態での世界を実体験することが可能になり、ユニバーサル社会の構築に貢献できる。本研究は人間拡張分野の国際学会である Augmented Humans 2024 で best poster award を受賞した。

2) 皮質脳波データからの深層学習による発話意図認識:

皮質脳波(EECoG)からの発話でコーディング実験(大阪大学 柳澤 G との共同)を進展させた。サイレントスピーチでの多次元時系列信号を解析する深層学習機構を ECoG 信号に適用した。大阪大学が提供する ECoG データセットに基づいている。本データセットは、サン

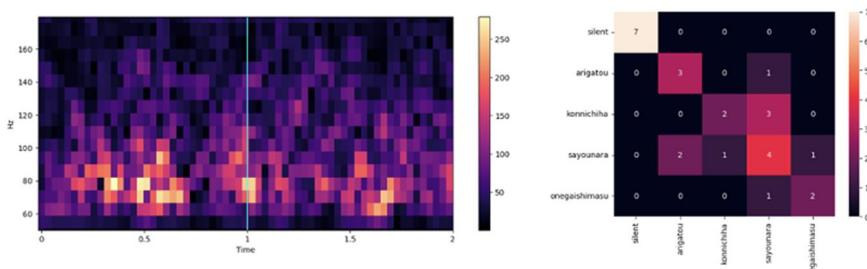
プリング周波数 1000Hz の 98 チャンネルの ECoG 信号で構成されており、約 94 時間分の日常の脳活動記録と、単語検索タスク中の 198 試行分の脳活動記録がある。単語検索タスクでは、被験者が「こんにちは」「ありがとう」「さようなら」「おねがいます」の 4 つの単語のうちの 1 つを思い出し、すぐに発声する。ECoG 信号に基づく音声認識の可能性を探るために、まず、サポートベクターマシン(SVM)モデルを用いて各単一チャンネルから学習し、どのチャンネルが異なる単語と最も相関があるかを見出す。次に、70-170Hz の周波数帯域のブロードバンドガンマパワーを抽出し、CNN(convolutional neural networks)を用いて多チャンネルデータを学習し、分類精度のベースラインとする。そして、自己教師あり音声表現学習のための深層学習モデルである HuBERT を、多チャンネルデータである ECoG データに適用できるように拡張し、対照学習の目的関数でモデルを学習した。



Broadband-gamma power of internal speech and vocalized speech of the command “ありがとう”. We applied common average reference and normalized the power between 0 and 1.

図に示すように、インナースピーチにおいて、チャンネル A17-E、A21-E、A26-E は有意に強い応答を示すのに対し、A9-E などの他のチャンネルは低いパワーを示す傾向にある。これは、右側の電極は発話に利用されるブローカ野に近く、左側の電極は顔面筋を動かして発話を調節する運動野に近いと推測される。次に、どのチャンネルがインナースピーチに寄与しているかを定量的に見つけるために、単一のチャンネルのみを使用して SVM モデルで異なる単語を分類する。SVM では 2 次元データを扱うことができないため、各チャンネルの平均パワーを入力として使用する。この結果から、ノイズが多く精度が低いとされるチャンネルを除外した。

ECoG データのマルチチャンネル情報を利用するために、ブロードバンドガンマのスペクトログラムを抽出し、CNN を用いてマルチチャンネルモデリングを行った。図に示すように、CNN はオーバートスピーチの 5 クラス分類で 67%の精度を達成した。しかし、インナースピーチ(非発声)の精度ははるかに低い(33%)ことがわかり、自己教師あり学習の使用によって改善の余地が大いにあることが示唆された。



Left: broadband-gamma power spectrogram. The cyan line indicates the time when the user vocalized the word. Right: the confusion matrix using CNN for classification.

そこで、(教師レベルの付与されていない) 自由生活データを用いて拡張 HuBERT モデルを事前学習し、従来の手作りの特徴量ではなく、学習された表現を提供した。これは音声認識領域において、非教師型の大量の発話データにより事前学習したモデルは少数の教師付きデータにより fine tuning 可能であるという知見に基づいている。この結果、学習損失は滑らかに減少したが、パープレキシティも時間とともに低下している。このことから、学習された表現が、発話意図抽出のための情報を効果的に保持していない可能性が示唆される。そこで、ベースラインと同じプロトコルを用いて、学習済み HuBERT 埋め込みを用いてモデルを 5 クラス音声認識タスクで評価した。しかし、モデルの精度は 34.75%にとどまった。この結果は、大量の教師なしの(常に発話に関係しているとは限らない) 日常記録から事前学習するには、より洗練された前処理とクラスタリングが必要であり、現在の学習設定が想定通りに機能していないことを示している。今後の研究では、最適なパラメータと、より慎重なノイズ除去手法の探索に重点を置き、最終的には、容易に入手可能なデータを有効に活用し、脳活動デコーディングの適用を促進するための効果的なパイプラインを確立したいと考えている。

課題推進者: 暦本純一(東京大学)

研究開発課題2-3-2:脳情報を用いた技能獲得技術の開発

当該年度実施内容:

(1)脳情報と身体情報を用いた未来予測手法の開発と技能獲得への応用

R4年度に開発した、インソールセンサで得られる足圧データを用いた3次元姿勢推定手法は、下半身と上体(背骨)の姿勢推定においては比較的高精度な姿勢推定を実現したが、両腕の姿勢推定の精度が低いという問題点があった。この問題を解決するために R5年度は、小型慣性センサを片方の手首に装着させ、この慣性センサからの情報(3次元位置と姿勢の6自由度)を同時に使用する深層学習ネットワークを新たに設計・実装し、数名のユーザー6動作データを教示データとして学習を行い、このネットワークを用いた姿勢推定を行った。実験の結果、歩行、ランニング、跳躍といった基本運動に対して、姿勢推定精度の向上がなされた。今後は学習用データセットを充実させ、推定精度の更なる向上を目指す。本研究成果は国内学会でポスター発表された。

(2)脳情報を用いた時空間歪曲学習手法の最適化

R4年度までに開発した、スキーを対象とした時空間歪曲トレーニングシステムにおいては、ユーザが装着するヘッドマウントディスプレイに提示される仮想空間内の前方には熟練者のアバターが提示されていた。被験者実験の結果、アバター表示では姿勢の修正箇所が分かりづらく、必ずしも効果的な学習ができないことがわかった。そこで R5年度は、姿勢修正において重要な情報を抽象化して提示する視覚化手法を実装し、被験者実験を行った。実際のスキー指導においては上体(背骨)を鉛直に保つこと、両手を前方に維持すること、肩を平行に保つことが重要であるとされている。そこで、上体を縦のラインとして簡素化して表示し、上体が鉛直から傾いた場合にはラインの色を変えた。両手を結ぶ横方向のラインを提示し、両手が一定の高さより低くなった場合、あるいは両手をつなぐラインが水平から外れた場合には、同様にラインの色を変えた。初中級者を対象とした被験者実験の結果、鉛直ライン提示はアバター提示に比べて有意に良い成績を納めた。一方、水平ライン提示は効果が見られなかった。本研究成果は VR 系のトップ国際会議である IEEE VR2024 に採択され発表を行った。

課題推進者:小池英樹(東京工業大学)

研究開発項目3:IoB コア技術

研究開発課題3-1-1:意図コミュニケーションのための基盤技術開発

当該年度実施内容:

(1) マーモセットのコミュニケーションのオンライン化実験

R4 年度までに取得したデータを用いて BMI-CA 技術の精緻化・低侵襲化のための研究を実施した。

研究開発課題2-1-1と連携してマーモセット ECoG を用いた発話デコーダ、行動デコーダを開発した結果、連合野と呼ばれるこれまで BMI で着目されてこなかった高次大脳皮質領野の神経活動を使うことでマルチモーダルな情報を取り出すことができる可能性があることがわかった。この結果はこれまでの単一モダリティの情報を用いる BMI と一線を画す、次世代 BMI 開発の足掛かりになる事が期待される。本成果について国内会議1件でポスター発表、査読付き国際会議において口頭発表を行い、国際誌に論文投稿中である。

音声コミュニケーション中の神経活動について解析を進め、発声に先立ってコルタイプ毎に異なる活動が前頭前野に見られることをわかり、国際会議で報告した。連合野からの発話デコーディングが有効であることを示す証拠のひとつであると思われる。

本プロジェクトで開発した自由行動下マーモセットからの大規模神経活動計測技術は学術領域からの関心が高く、日本神経科学学会での教育講演を含む3件の教育・技術講演の依頼を受け実施した。

(2) マーモセット用 AI 支援型 BMI-CA の制作

R3 年度に導入したマーモセット用 XR 空間においてマーモセット 2 個体を長時間飼育し、XR 空間でのリアルタイムコミュニケーションを実現するための環境設定を完了した。R5 年度は動物 2 個体を実験環境に馴致し、自然な発声行動が観察されたタイミングで音声の計測を行い、マーモセットの発生に含まれる周波数情報が欠落しないためのマイクの音量調整およびシステムの環境ノイズの低減を行った。R4 年度未実施だったスピーカーのパラメータ調整作業を完了した。

課題推進者:小松三佐子(東京工業大学)

研究開発課題3-2-1:人工神経接続による身体と心の制約からの解放

当該年度実施内容:

(1)人工神経接続による運動麻痺に対する身体運動機能再建の実施

脊髄損傷によって失われた運動機能再建法としての有効性を検証するために、2頭のマカクサルに対し、第4-5頸髄の右側索と後索を損傷させることで片麻痺を呈する脊髄損傷モデルサルを作製した。また、右上肢の運動に関連する神経活動を記録するため左一次運動野前腕領域にマルチチャンネル剣山電極を埋め込み、右上肢の運動を生成するために右の頸髄膨大部の後根神経束上に電気刺激用電極を埋め込んだ。このサルに対して、記録された1つの神経細胞の活動周波数の変調に依存して脊髄への電気刺激の強度と周波数を変調するように設計された人工神経接続を行った。人工神経接続を適用していない際には、脊髄刺激が出力されないため、右手首関節のトルクは生成されず、片麻痺を呈する脊髄損傷モデルサルの手は麻痺したままであった。人工神経接続を適用すると、要求されるトルク出力量に依存して、人工神経接続の入力信号として使われている運動野の神経細胞に、その活動頻度の変調が観られるようになった。その神経細胞活動の変調により、脊髄刺激の強度と周波数が調節され、要求されたトルク出力量に依存して麻痺していた手首関節のトルク量の制御ができた。この結果から、ラックマウントシステム(拘束下での)での人工神経接続によって脊髄損傷サルは麻痺した手関節の随意的なトルク制御可能であることが明らかになった。

(2)人工神経接続による人工情動の惹起の実施

マカクサル1頭に対して、側坐核へ刺激電極を刺入した状態で、到達把持課題を行わせた。把持力あるいは自身の筋活動が任意の値を超えた時に側坐核へ電気刺激が流れる人工神経接続を行った。把持力トリガーの刺激では、動物は行動と刺激の関係性を学習したようで、積極的に課題に取り組むようになった。一方で、上肢前腕筋の活動をトリガーにした条件下では、刺激と行動の関係を学習できないようで、課題への取り組み時間や反応時間の変化は認められなかった。さらに、把持力をトリガーとする条件下では、刺激強度が強いほど、かつ刺激時間が長い(最大1秒50Hz)方が、行動への変化が現れやすかった。よって、意欲の自己制御が実現可能な人工神経接続の組み合わせは、行動がトリガーとなる刺激条件であることがわかった。

課題推進者:西村幸男(東京都医学総合研究所)

研究開発課題3-2-2: 侵襲 BMI の臨床応用に向けた開発

当該年度実施内容:

(1) 頭蓋内脳波による脳情報解読技術の開発

R5 年度は、ヒト皮質脳波の脳情報解読について精度を改善し、ヒト ECoG-Based BMI の環境構築を行い R6 年度の達成目標としていた精度を実現した。視覚的想起と外界の視覚的情報との共通概念空間を用いて、ヒトが画像を想起することで、意図した画像をリアルタイムに出力できる BMI を開発した。また、ヒトが想起によって画像を制御するための共通概念空間の特徴を明らかにした。

また、皮質脳波から推定した CLIP 特徴に基づき、文章を生成し、さらに画像を生成する BMI を実現した(Ikegawa et al., JNE 2024)。文章と画像の生成速度を早めることで、リアルタイムで文章と画像を生成することに成功した。

ヒトが画像を想起する際のトップダウン信号として、海馬の Sharp-Wave Ripple (SWR) が関与することが知られている。そこで、ヒトの頭蓋内脳波より SWR を長時間検知し、ヒトがマインドワンダリングにより自発的に想起している際に SWR が増加することを明らかにした(Iwata et al., Nature Communications 2024)。視覚的想起だけでなく、様々な思考状態の変化と SWR が関連することを明らかにした。

(2) ヒトへの体内埋め込み型脳波計測装置適用のための医学的検討

ヒトへ適用可能な体内埋込型脳波計測装置を2頭の猿に留置し、1年以上にわたり安全に安定した計測ができることを示した。サルが運動課題や知覚弁別課題を行う際の皮質脳波を計測、脳情報解読ができることを示した。脳情報解読結果に基づいてサルの脳へ電気刺激入力をするシステムを構築した。

(3) 皮質電気刺激による情報入力

ヒトを対象として脳への電気刺激により自然な感覚を誘発することに成功した。さらに、詳細なパラメータを同定するために、症例を蓄積している。猿を対象として、皮質電気刺激を長期的に安全に実施できることを確認した。

(4) 血管内脳波を用いた BMI の開発

関谷 G 及び中村 G と共同で血管内脳波デバイスのプロトタイプ開発を行った。豚を用いた急性期実験を行い、旧来の技術よりも多様な脳波を正確に計測できることを確認した。さらに、R5 年度よりムーンショットに加わったオーストラリアの David Grayden G のラボに、我々のラボの大学院生を派遣し、Stentrode を用いた視覚的脳情報解読が可能であることを明らかにした。

課題推進者: 柳澤琢史 (大阪大学)

研究開発課題3-3-1:バーチャルアバターの全身制御を実現する BMI 技術

当該年度実施内容:

(1):リアルタイム心電図-アバターアニメーションシステムの設計と実装

目的を達成するため、ゲーム開発や映画業界で一般的に使用されている Unreal Engine を使用して、リアルタイム心電図-アバターアニメーションシステムを開発した。臨床試験 (ClinicalTrials.gov; NCT03698149) の参加者 B1 と B3 を対象に、システムを改善するためのフィードバックを収集した。このシステムは、神経データを処理し、関連する特徴をデコードし、仮想アバターをアニメーション化するための堅牢なパイプラインを提供し、リアルタイムのタスクを処理することができる。デコードされた動きは、アニメーションノードのパラメータまたはプリロードされたシーケンスを通じて、アバターのアニメーションを直接制御する。このシステムは、成果物 1.1a のほぼすべての要素を満たしているが、現在ワイヤフレームインターフェイスとして存在する実験者 GUI の統合に取り組んでいる。これにより、音声合成、アバター制御、ナビゲーション、仮想環境での自然なインタラクションが可能になると考えている。

マイルストーン(1)および(2) (「BMI によるアバターの制御を可能にし、非スピーチコミュニケーションジェスチャーを行う」)に向けた予備的な進捗の一環として、我々は、ユーザーがモニターに表示される全身ジェスチャーを試みるリアルタイムタスクを開発した。合図が与えられると、ユーザーはジェスチャーを模倣しようとし、その神経活動がモデルによって処理され、画面上のアバターのアニメーションが駆動される。複数の参加者によるリアルタイムタスクにおいて、チャンス以上のシステム精度を達成した。

(2):パーソナライズされたリアルタイムのストリーミング顔アバター制御と音声合成の実現

目的を達成するために、臨床試験参加者 (B3) が神経信号から意図された音声を合成してコミュニケーションできるように、音声合成とアバター制御のための神経人工器を設計した。これらの信号は、言語感覚運動皮質と側頭葉の一部に埋め込まれた 253 チャンネルの ECoG (electrocorticography) アレイから取り込まれた。システムを訓練するために、参加者が無言で文章を話そうとしている間の神経データを記録した。モニターにテキストプロンプトが表示され、視覚的な合図が緑色に変わると無言で発話を開始した。その後、合成音声は近くのスピーカーから流され、デコードされたテキストがモニターに表示され、同時にデコードされた音声は構音運動に変換され、実写のアバターがアニメーション化された。

自動音声認識 (ASR) 技術にヒントを得て、ASR 用に設計された汎用性の高いニューラルネットワークアーキテクチャを使用した。このフレームワークを、リアルタイム音声合成、アバター制御、神経信号からのテキスト解読に応用した。参加者は話すことができないので、最初はテキスト音声合成モデルを使って音声波形を生成した。その後、参加者の発話速度に合うように、パーソナライズされた音声合成器を訓練し、合成された音声は、参加者が話せなくなる前に録音した短い音声クリップに基づいている。出力は、パーソナライズされたアバター上の顔のアニメーションを駆動し、このシステムのさまざまな側面を、オフラインとリアルタイムの両方で、少ない語彙と多い語彙の文を使って評価し、これにより、マイルストーンを達成した。

課題推進者: Edward Chang (UCSF)

研究開発項目4: 共通基盤技術開発

研究開発課題4-1-1: プロジェクト共通課題の検討と社会実装に向けた研究開発

当該年度実施内容:

(1) AI 支援型 Trusted-BMI に利用可能な新規技術探索調査

脳入力技術の総説論文“Stimulation technology for brain and nerves now and future”を arXiv に掲載し、査読付き論文に提出した。また、X-Communication(XC)の達成に向けて、刺激技術についての研究が必須である中で、脳刺激の究極的な形として神経細胞の個別刺激が挙げられるが、100 個以上の神経細胞を非常に早い速度でホログラフィックに刺激する技術がその為に非常に有用と考え、その技術を有する新課題を設定し新課題推進者の選定に至った。

(2) AI 支援型 Trusted BMI のアプリケーション開発に関する調査

極低侵襲 BMI 開発の将来的な社会実装を見据えて、血管内からの生体信号のセンシングに関する知財調査を、関谷 G と連携して実施し、今後のプロジェクトの重点領域の精査を実施した。さらに、ユーザーとして想定される身体障害者における関連機器の市場の広がりについても外部委託等も利用し調査を進めた。

(3) ブレインテックガイドブック・エビデンスブックの作成支援と普及活動

チェックリスト(ブレインテック ガイドブック vol.2)の素案の作成が完了した。公開に向けて、引き続き支援を行った。BMI/ブレインテック製品・サービスが主張する効果効能と安全性に関するクエスチョンを 8 項目完了し、そのうち 4 項目分の結果を「ブレインテックエビデンスブック」として日英 2 言語で公表した。残るクエスチョンについても、引き続き支援を行う。

ブレインテックガイドブックとエビデンスブックの英語版の出版により、ユネスコなどの国際機関より本プロジェクトの取組みが注目を浴び、金井がユネスコの Ethics of Neurotechnology の勧告作成チーム(Ad Hoc Expert Group)へ抜擢されるなど、国際的な科学政策のルールメイキングへの寄与を果たしている。

(4) 非侵襲・非接触計測での意図推定精度の高解像化

本プロジェクトにおいては、EEG と動画を同時計測したデータとして、Open Neuro の ping pong dataset を解析した。この dataset においては、卓球をプレイしている被験者の動画データと EEG データが同時計測されている。まず、画像データを解析して、被験者がコートの右サイドに打つか左サイドに打つかをラベル付けし、これを打球直前(100ms 前)の被験者の姿勢、および EEG から推定することを試みた。neural network model である EEGNET を用いて、EEG からの推定を行ったところ、適合率 0.60、再現率 0.59 となり、chance level performance(0.5)と比べて、有意に高い推定成績を得た。また、画像からの姿勢推定に際しては、Openpose を用いて関節の位置情報を推定し、これを入力に用いて SVM により、被験者が打つ方向(右/左)の推定を行い、適合率 0.64、再現率 0.65 で、EEG と比べて、より高い推定成績が得られた。

これらを decision tree により組み合わせたアンサンブル学習器を作成したところ、姿勢推定に基づくモデルと同等の推定成績(適合率 0.67、再現率 0.67)を得ることができ、動画解析に脳波解析を組み合わせることにより、推定精度を向上可能であることが示された。

(5) 侵襲・非侵襲・非接触共通の複数 CA 制御の性能評価プラットフォーム構築及び複数

CA 同時操作の認知機能拡張の実現

R5 年度の達成目標は、複数 CA 制御の性能評価プラットフォームにおける評価課題の実装であった。これに対し、R4 年度に選出した OpenAI Gym をベースにした 4 つのゲームを選出し、それらを AI 支援下で同時操作する評価課題を実装した。AI 支援については、人間を支援する強化学習アルゴリズムの選出を行い実装した。同時操作に関しては、複数のゲーム画面からアイトラッキングを用いて画面を選択しながら操作するユーザーインターフェースを構築した。さらに、これらの技術を応用し、Arulkumaran G と共同で、シミュレーション環境上の複数のロボットアームを様々なデバイスで同時操作する評価課題を実装した。ICRA2024 ワークショップに投稿し、採択された。

(6) CA 開発プラットフォームとしての OpenCA フレームワークの開発

プロジェクト内外の 8 名以上の課題推進者、PM より OpenCA フレームワークの構想に関する技術要素及び構想に関してヒアリングを行い、OpenCA に関するプラットフォームで必要な連携マイルストーンの可視化を他の課題推進者と協力して行った。複数の CA を同時に操作するソフトウェア基盤を構築している他のプロジェクトとも具体的な連携をすることが決まり、OpenCA のアウトリーチの一環として共同で講演を企業コンソーシアム向けに実施。OpenCA に繋がる BMI のインターフェース基盤としての BMI-CA の基本コンセプトとアーキテクチャの概要を作成して、具体的な開発に必要なエンジニアリングのリソースの洗い出しが完了した。

(7) SF プロトタイピングを用いた市民向けコミュニケーションプロジェクト『Neu World』

『Neu World』の公式 WEB サイトを開設。WEB サイトではプロジェクトが制作する SF 作品だけでなく、イベントの案内、研究解説やイベント報告記事の掲載など社会とのコミュニケーションの基盤となるプラットフォームの一つとして運用を行っている。R5 年度公開作品はどちらも笹井 G の X-Communication(XC)チームの研究をテーマとし、漫画家 Ququ 氏による第 1 弾作品「.raw」、小説家人間六度氏による第 2 弾作品「彼と彼女のテレパシーにいたる 4748 日」を公開。サイト開設1ヶ月で 10,000PV を達成。一般向けメディアでも取り上げられる。「.raw」は著者 Ququ 氏の X での作品投稿が約 180 万インプレッションを記録。また、それぞれの作品に紐づく社会との対話イベントも実施。また、R6 年度に制作する柳澤 G の研究をテーマにした作品制作に向けた市民対話ワークショップも実施した。さらに、教育機関・ミュージアムなどでの対話を最終目的としたワークショップコンテンツも制作し、一般向けに試行会を実施した。また、同じく目標1の南澤 G とともに日本 SF 作家クラブが開催した SF カーニバルにて共同でトークイベントも開催しプロジェクト間の連携強化を図った。

(8) 現在の BMI ユーザーと市民との対話による BMI の社会実装への期待と懸念に関する社会意識の調査

BMI 技術を自身の身体の拡張として実験的に私用を試みている BMI ユーザーをゲストに迎え、金井 G とともに CA 技術が目指す未来への期待と課題について DE&I の視点から語り合うトークイベントを実施。本イベントには研究者や科学・技術の関心層だけでなく、社会に対してバリアを感じている当事者の方も多く参加し、SNS などでコメントや感想を投稿していた。

また、BMI ユーザーと大阪大学 ELSI センターの標葉先生、IoB の柳澤 G と共に、BMI が発展した未来でどのように活用したいか、そしてその社会は今とどのように変わっているのかを考えるワークショップを開催。東京と大阪の2箇所で行った。大阪については取材が入り、ワークショップの様子や BMI ユーザー、標葉先生、柳澤 G へのインタビューがテレビで放送

された。

課題推進者: 金井良太(株式会社アラヤ)

研究開発課題4-1-2:Trusted BMI を実現する社会基盤整備

当該年度実施内容:

(1)ブレインテックガイドブック vol.1 の英訳版を公開した

R3 年度に公開した「ブレインテックガイドブック vol.1」を英訳し、これを慶應義塾大学の図書館を經由して doi を取得して公開した。また英訳版公開後には、国際的に認知度の高い科学ニュース配信サイトである Eurekalert に、公開をアピールするための英文記事を掲載した。

(2)国際標準の制定に関わる団体に連絡をとり、国際ルールメイクに関与するための素地を整えた

IEEE Standard Association において、Recommended Practice for the Responsible Design and Development of Neurotechnologies (<https://standards.ieee.org/ieee/7700/11038/>) という名目の、ブレインテックの社会実装のための基準作りが進んでいる。このグループに加入し、勧告作成に関与しているが、その進展は遅い。非医療のブレインテックを対象とした勧告を作成するという合意は得られ、この点は本研究開発課題とゴールを合致させることができたものの、今後の進展は不透明である。よって、本 IEEE の活動を R6 年度のマイルストーンとして設定することを考えていない。

一方で、「ブレインテック ガイドブック vol.1」の英語版は、国際的にも注目され、これをきっかけに金井 G および武見 G は UNESCO International Conference on the Ethics of Neurotechnology に招待された。また、ニューロテクノロジーに関する国際勧告を他の国際機関に先駆けて公開した OECD とも、今後のコラボレーションの可能性に関する協議を開始した。国際ルールメイクに関与するための素地を整えるという観点では、当初目論見以上の成果を得ることができた。

(3)チェックリスト(ブレイン・テックガイドブック vol.2)の素案を作成した

ブレインテックガイドブック vol.2 は、事業者自らによる責任あるブレインテック製品の開発をサポートするために、関連法規やガイドライン、安全性や有効性の検証、消費者とのコミュニケーション等において必要な要件をチェックリストとしてまとめる形でその素案を作成した。一般消費者向けブレインテック製品の開発・販売や事業での活用を検討している事業者の皆様と、政策や規制の策定に関与している方々を想定読者として作成している。なお同書は、製品・サービスの信頼性を確認するために事業者や研究者がセルフチェック的に用いることを想定している。

チェックリストは、各種法規制やガイドラインへの対応、安全性の保証、科学的な妥当性の保証、消費者に分かりやすい情報開示、という 4 つのカテゴリーで構成した。これは、一般消費者向けブレインテック製品については、「規制やルールがない」「有効性と安全性の検証が不十分」「消費者の保護が不十分」といった懸念が国際的に指摘されているため、これに沿う形のチェックリストが有用であると判断したからである。また素案作成後には、実際にブレインテック事業に関わる 7 事業者とガイドブックの内容の有用性や妥当性について意見交換して、より現場で活用できるガイドブックとなるよう内容を更新した。さらに、当該分野の規制等に関わりうる監督官庁として、厚生労働省、消費者庁、国立研究開発法人科学技術振興機構研究開発戦略センター(CRDS)にも本文を確認いただき、助言を受けた。

課題推進者:武見充晃(慶應義塾大学)

研究開発課題4-1-3:AI 支援型 BMI-CA 技術の国際アウトリーチ

当該年度実施内容:

(1)AI 支援型 BMI-CA 技術を用いたタイムトライアル競技「ブレインピック」の国際化と実施
項目 1-1-1 で開発中の AI 支援型 BMI-CA 技術を用いて、AYA 世代を中心に世界的に人気のメタバースゲーム「Fortnite」(epic games 製、米国)内のアバターを操作し、メタバース内に構築した教習所を使ってタイムトライアル競技「ブレインピック」を実施した。

R5 年度は、R4 年度に項目 1-1-1 で実施されたブレインピックを基に、技術開発のためのプラットフォームを整備して、競技参加者(技術者)の呼び込みを行った。具体的には、項目 1-1-1 で開発中のポータブル脳波計 PLUG で収録した脳波を深層学習によって情報加工するため、Sony が提供する Web サービス NNC (Neural Network Console)との突合をおこない、ノンコードで深層学習のフレームワークが利用できる機構を整備した。次に、NNC によって生成した深層学習パラメータをオープンプログラミング言語 Python に転送し、Python 上で PLUG からの脳波を実時間加工して波形分類結果を可視化する機構を整備した。最後に、ユーザーの視線情報や頭部傾斜情報などを突合するセンサフュージョン機構と、Fortnite 画面内の物体認識 AI を実装して、これらを連動してプログラミングできるプラットフォームを公開した。

以上のブレインピック用開発環境を使って協議に参加する国際チームを呼び込み、2024 年 2 月 25 日にタイムトライアル競技「ブレインピック」を実施した。国際チームの呼び込みは、課題推進者が所属する慶應義塾大学理工学部が取り組んでいる教育プログラム JEMARO に参加している欧州3大学からの留学生を中心に行った。既に 200 名を超える留学生が日本に滞在して研究をおこなっていることから、コロナ情勢における人流性にリスクがある昨今でも安定的に国際イベントが実施できると考えた。このほか、他の課題推進者が所属する大学、研究所の留学生にも広く周知し、参加を呼びかけた。以上の取り組みの結果、当日は全7か国(イタリア、ドイツ、中国、ベルギー、フランス、英国、スペイン)の留学生全18名と、4種類の障害当事者6名(ALS、脳性麻痺、脊髄損傷、筋ジストロフィー)が参加し、混合チームで複数人の脳波に基づいて一人のアバターを共同制御してゴールを目指すレースを実施した。R5 年度は以上の通り、国内でブレインピックの競技化、国際化を実施して経験を獲得し、R6 年度以降に海外拠点でのブレインピック開催の実現可能性について判断した。

(2) 中高大生を対象とした AI 支援型 BMI-CA 学習教材の開発と共用の開始

テーマ1で開発された「AI 支援型 BMI-CA の開発を誰もがこなえるプラットフォーム」を、初学者である中高大生でも扱えるように教材化した。具体的には、脳科学の知識、脳波計測の基礎、深層学習を使った脳波の波形分類、ROS などについて、各 10 分程度のビデオチュートリアルを組み合わせ、オンラインドキュメント管理ツールである Notion にまとめて登録者に対する限定公開を実現した。また、中目黒リサーチスタジオで研究機材を使った集合教育を中高大生に対して実施した。これにより、AYA 世代を中心とした BMI 支持層の形成と拡大を図った。

Sony が提供する Web サービス NNC (Neural Network Console)は、ウェブブラウザを使ってノンコード型で深層学習が学べるプラットフォームであり、豊富なビデオチュートリアル(操作法 28 件、深層学習のロジック 41 件)とサンプルコードが整備され、多くの初学者が自宅で本格的な知識獲得と技能習得に取り組むことができることから、このビデオチュートリアルの動画構成を分析して、テーマ1で開発された「AI 支援型 BMI-CA の開発を誰もがこなえるプラットフォーム」を初学者に提供するために必要な教材の構成を立案・作成した。具体

的には、次に挙げるカテゴリーごとのビデオチュートリアルを整備する計画である:脳科学入門、脳波計測の仕組み、ポータブル脳波計 PLUG の利用ガイド、Sony NNC を用いた深層学習による脳波の波形分類、脳波データロガーへの深層学習結果の組み込みとリアルタイム処理について作成を完了した。次に、トピックごとに最適な講師を他の課題推進者からも選定し、動画を収録、内容のレビューや課題推進者の研究室に所属する学生の試験運用結果を踏まえてブラッシュアップしたものを限定公開した。

課題推進者の中には、AI 支援型 BMI-CA の取り組みに共感する中高大生からのインターンや研究室活動への参加希望の問い合わせが定期的にあるため、この半年で連絡のあった約 10 名の学内外の中高大生を招待して、前期ビデオチュートリアルの履修を促した。次に、ビデオチュートリアルを修了した学生を中目黒リサーチスタジオに招待し、ポータブル脳波計 PLUG などの実機を使った実習教育を実施した。以上の教育実験を通じて、AYA 世代を中心とした BMI 支持層の形成と拡大を図った。

課題推進者:牛場 潤一(慶應義塾大学)

研究開発課題4-2-1: BMI-CA 活用における法学的検討

当該年度実施内容:

(1)IoB-S 研究会の開催(技術開発の最先端の調査及び ELSI 課題の洗い出し)と法学セミナー連載

「IoB-S 研究会を頻回開催することで、技術開発を行う各 PI と協力し、想定事例を作成し、それに対する ELSI 課題の探索とそれに対応する議論を行う。また、これらの議論について国内刊行物を中心に公表する。」

「実装場面(契約・裁判・行政手続き・銀行業務等)の ELSI 課題への暫定的回答を完了し、実務家へヒアリングを行う。実装場面の ELSI 課題への暫定的回答を実証実験(CA 模擬裁判、CA 行政手続き等)を行い検証。研究成果を IoB 実装/ELSI レポートとして発行。」

(2)ELSI レポートの改訂・追記作業の完了

IoB-S 研究会の研究成果をもとに、R4 年度に作成したレポートの改訂と追記作業を行った。R5 年度は特に、神経倫理の議論動向の調査、技術開発状況の把握、実証実験のシナリオの作成を行った。なお、実証実験のシナリオとして作成した各事例は、R6 年度以降法学セミナーで実施する事例研究の素材として活用する予定である。

(3)国際学会・研究会における研究成果の発信

R5 年度は、①IEEE の開催した国際学会への参加、②韓国ヨンセ大学におけるシンポジウムの共催と研究報告、③IEE Neuroethics Framework への参加(ガイドライン作成の動きへの参画)を行い、積極的な国際発信を行ったところである。

R6 年度についても、すでに複数の国際学会にパネルが採択されており、ルールメイキングに関わる国際的な議論が進展(IEEE、UNESCO、OECD、EU)する中で、継続して国際発進力を強化していきたい。

(4)国内学会における研究報告

①日本神経科学学会にて作成したレポートに基づく研究成果の公表(目標1として共催)を行ったほか、②日本生命倫理学会にて研究報告を行った。各種倫理学会における複数報告、生理研の生命倫理部会での報告を行った。目標1内部の他の ELSI チームが開催した共同シンポジウムにも参加し、目標1内部での ELSI チームの交流の強化も図った。

(5)研究論文・研究書の刊行

①IoB-S の研究内容にかかる英語論文の刊行、②先端技術とプライバシー、肖像権の関係につき取り上げた単著の刊行、③神経法学にかかる単著論文の刊行等によって、国内刊行物の刊行を積極的に行った。

特に、③については、国内でも研究者の少ない神経法学(neurolaw)について、その体系と検討すべき課題を概観してみせた点で、大きな意義のある刊行業績と言える。

(6)啓発活動の企画

①寄附講座の設置可能性について検討したほか、②当該講座にて教科書として使用できる書籍の刊行企画を立ち上げた。

課題推進者: 駒村 圭吾(慶應義塾大学)

研究開発項目5:IoB 極低侵襲技術開発

研究開発課題5-1-1:極低侵襲 BMI の研究開発

当該年度実施内容:

(1) 計測対象とする動物種および静脈血管を選定【関谷 G、中村 G、柳澤 G との連携】

取り組みを通して「動物種」については、家畜豚およびミニ豚を用いて、今後の長期留置やそれに資するデバイス開発を行うことで確定した。特に、一連の研究開発を通して、デバイス開発においては、脳表静脈までの血管形状が複雑でない家畜豚を用いる。一方で、BMIの血管内長期留置実験では、大きく成長しないミニ豚を用いて取り組む方針を固めることができた。

静脈血管に関しても、さまざまな皮質静脈へのアプローチし、留置することができる静脈血管について詳細なデータを得ることができた。特に、体性感覚誘発電位(SEP)、運動誘発電位(MEP)、視覚誘発電位(VEP)などの刺激を伴う脳活動計測実験を通して、血管内から計測出来る脳活動のマッピングを行うことができることを確かめた。

さらに長期留置で実績のある動物種である羊を計測対象とする検討を GraydenG と開始した。

(2) 血管内皮質脳波と従来技術で得られる大脳皮質脳波の信号比較を行い、信号品質を検証。【中村G、柳澤 G との連携】

家畜豚およびミニ豚を用いて、“血管内皮質脳波”と“従来技術である皮質脳波計測(ECoG)による皮質脳波”の差異を詳細に調べることで、血管内 BMI 計測の信号品質の検証することができた。具体的には、家畜豚およびミニ豚を用いた大型動物実験において、上矢状静脈洞または皮質静脈に計測電極を配置した状態で開頭手術を行うことで血管内皮質脳波と大脳皮質脳波(ECoG)の同時計測を実現した。この結果により、従来の ECoG と比べて、血管内 BMI 計測の方が、信号ノイズ比において優れている可能性を得ることができた。さらに、シンクロンなどが取り組んでいる静脈洞での血管内 BMI 計測技術との比較においても、信号ノイズ比における優位性が見え始めており、現在その計測数を増やし、再現実験に取り組んでいる。

(3) 脳血管内において局所留置した多チャンネル電極で皮質脳波計測精度を検証【関谷 G、中村 G、柳澤 G との連携】

ガイドワイヤ先端を電極として用いた簡易型 BMI デバイスは、極めて細いため、上矢状静脈洞(Superior Sagittal Sinus: SSS)に3本程度を同時に挿入することができる。これにより、SSS や皮質静脈(Cortical Vein: CV)等に複数本の電極を血管内へ送達し、3ch~4ch同時計測することに成功した。特に、複数本の電極を活用することで、差動計測が可能となった。実際に、皮質静脈(CV)ー皮質静脈(CV)、静脈洞(SSS)ー静脈洞(SSS)、皮質静脈(CV)ー静脈洞(SSS)の差動計測を行い、信号ノイズ比の違いなどを検証することにも成功した。さらに、ヘリカル構造の薄膜電極プローブをガイドワイヤへ装着した電極を複数本、CV や SSS へ局所留置した多チャンネル計測においても、低ノイズな信号品質であることを確認した。

課題推進者:関谷毅(大阪大学)

研究開発課題5-1-2:ヒトへの長期留置を目指した極低侵襲 BMI システムの開発

当該年度実施内容:

(1) 極細径 BMI デバイスのプロトタイプ製作

R5 年度は、頭頸部血管の評価法、誘導に用いるデバイス、誘導時の X 線透視方法などを改良したことで、9 度の実験すべてにおいて脳表静脈に到達可能となった。これにより、脳表静脈に留置した血管内電極(ワイヤー型電極、フィルム型電極)による安静時脳波および体性感覚誘発電位の計測を安定して行えるようになった。脳表静脈のみならず、脳深部の静脈(直静脈洞)にもこれらの電極を誘導できることがわかり、脳波を計測できる領域が拡大した。

血管の中から脳表静脈に進入し、ここから脳波信号を獲得もしくは脳組織を刺激することを計画しているが、これまで侵襲型 BMI で汎用されてきた硬膜下電極と検出精度を比較するために、血管内電極と硬膜下電極からの同時計測実験も行った。いまのところ実験回数が少なく、血管内電極の優位性は示されていないが、R6 年度にも追加実験を行い、ひきつづき検証していく予定である。また、硬膜下電極を留置する際に、脳表静脈に留置したワイヤー型電極を直視下に確認し、我々の実験手技による血管穿孔がないことを確認した。

このように R5 年度末までに、1)ブタの脳表静脈への血管内アクセス法、2)血管内電極による脳波計測の妥当性、を明らかにすることができた。R6 年度は極低侵襲 BMI システムのプロトタイプをブタの頭蓋内血管に留置し、留置直後の脳波計測の可否や、長期留置後の脳波計測の可否、を検証する予定である。

(2) ヒト脳および脳表静脈の 3D モデルの作成

R5 年度は昨年選定した 3D プリンターを用いて脳表静脈のシリコンモデル作成を行った。実臨床において収集されたヒトの脳静脈画像をもとに、画像解析ソフト Osirix の surface rendering 機能を用いて立体画像を作成した。ここから STL (standard triangulated language) ファイルを作成し、Meshmixer を用いてトリミング、スムージング等を行い、血管壁が 1.0mm となる中空血管モデルを作成した。プリンターは Form3+ (Formlab 社製)を用い、インクはエラストックレジンを使用することとした。その結果、1.0mm 厚設定では比較的安定した血管モデルを作成することができたが、外径 2.0mm 以下の小血管では内腔を維持することができず、印刷時の血管モデル配置の向き等について検証を繰り返した。R6 年度は引き続き印刷条件の検証をすすめる予定である。

また、脳表静脈モデルと組み合わせる脳組織モデルに関しては、剛性や色調の異なるインクを用いることを想定し、3D データを作成した。R6 年度は印刷に適したインクの選定を終了させ、血管モデル完成後ただちに疑似脳表静脈モデルを作成する予定である。

課題推進者: 中村元 (大阪大学)

研究開発課題5-2-1:長期計測が可能なウェアラブルデバイスの開発

当該年度実施内容:

(1) 血管内および硬膜外アレイを用いたヒツジにおける意味的視覚デコーディング

プロジェクトは、ヒツジの脳における意味的視覚デコーディングの実証という包括的目標に向けて着実に進展している。R5 年度は、新しい薄膜電極アレイを開発し、視覚系をターゲットとする血管内インターフェースの外科的植え込みに向けた準備を行った。視覚誘発皮質活動解析のための機械学習アルゴリズムは、概念実証に成功し、ヒツジ一次視覚野のパイロット実験データから、単純な刺激を分類するための深層学習モデルを確立し、これを視覚的意味情報の分類に応用する予定である。

予備実験のデータから、ヒツジの皮質から視覚情報を解読する原理が証明された。これらの予備実験(図 1)は、視覚経路における外科的移植と電気生理学の手順が十分に確立されていることを示した。記録は、硬膜外電極または血管内電極からの皮質信号を用いて、単純な視覚刺激(色、格子の向き、動きなど)を識別する能力の明確な証拠を示した。

羊の視覚皮質信号を解読する能力について、さまざまな機械学習モデルが評価された。重要な比較は、統計モデルと人工ニューラルネットワークを区別することであった。ヒツジの視覚記録に関する予備的な課題は、主に信号の減衰と、動物 1 頭あたりの実験セッションで達成可能なイベント数の少なさに関連していた。計算量が多いが、ニューラルネットワークはヒツジ皮質からの意味的視覚情報の解読に有望である。畳み込みニューラルネットワークは、利用可能なデータを分類する上で、フィードフォワード、時間畳み込み、リカレントニューラルネットワークよりも優れているようだ。

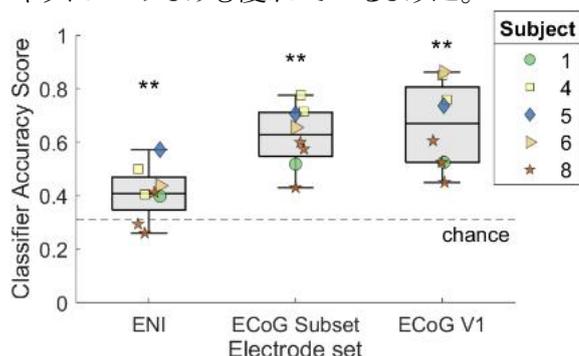


Figure 1. Accuracy of classifying visual colour stimuli (4-class) from the sheep brain using endovascular electrodes (ENI)、a subset of matching/closest ECoG electrodes、or all ECoG.

(2) 頭蓋内記録から神経情報を解読する機械学習

本プロジェクトは、頭蓋内脳波記録から神経情報を解読するための機械学習を用いるという主要目標に向けて、一貫した進展を遂げている。R5 年度は、必要な脳波データの収集と準備に加え、神経デコードのためのディープラーニングモデルの予備的検討を行うことに重点を置いた。3 つの機械学習アルゴリズムの候補が提案された。実験デザインは確立され、これらの機械学習アルゴリズムの評価の準備が整った。

パイロット実験は 2024 年 3 月に開始された。初期の実験では、横洞や上矢状洞に展開するための手術手技を少し変えるだけで、有望であることが示された新しい薄膜血管内電極を評価することに重点を置いた。これらのインプラントは、横静脈や上洞静脈内から視覚皮質のより大きな容積に到達することができる。

視覚刺激に反応する覚醒羊の脳活動の記録は、2024年5月に開始される予定である。視覚電気生理学的実験のために、意味指向の画像ライブラリーが作成された。画像は、記録された皮質信号からこの違いを解読する可能性を最大化するために、意味カテゴリー間の明確な識別を喚起するよう試みられる。また、実験デザインでは、写真画像とAIが生成した画像を比較し、意味ラベルのデコーディングが頑健であることを確認する。

課題推進者: David Grayden (University of Melbourne)

3. 当該年度のプロジェクトマネジメント実施内容

(1)研究開発プロジェクトのガバナンス

進捗状況の把握

代表機関のPM支援体制チーム

代表機関におけるPM支援体制としては、プロジェクト全体での契約の取りまとめ、PM活動を補佐する者の雇用や労務管理、広報・アウトリーチ活動の支援、JSTへの報告を主たる業務としたATRの管理部門の協力体制を構築し、知財・法務、財務・購買、報告書・予算管理の部分で代表機関であるATRより支援を受けられる。

代表機関としてプロジェクト全体の管理を円滑に行うために、本ムーンショットプロジェクト専任の事務員の確保をし、プロジェクト全体についてのPMの企画運営を支援するために、ATRで兼任する立場を得て、代表機関として、金井Gのプロジェクト全体管理(発案・運営・進捗管理・広報企画等)をPMOとして行った。

R3年度には、サイエンスコミュニケーションの専門家と研究成果の社会へのコミュニケーションの企画と推進、ELSIの専門家とともにELSI課題への企画と対策を進める体制を構築した。R4年度には、PMならびにPMOにおいて発案・広報企画などの機能に専念するために、SPMを2名追加しSPM体制へと移行した。執行責任をPMからSPMに一部委譲することで、進捗管理などの負荷の分散に加えてプロジェクト間の連携がより一層促進されている。R5年度からは更に2名追加し、合計4名のSPMを配置することで、新規課題推進者の採用や研究開発項目の拡充に耐えられる組織体制としている。

重要事項の連絡・調整(運営会議の実施等)

プロジェクト推進の方向性に関わる新規課題推進者の追加等の議題が生じた際には、PM、課題推進者とともにPD、JST担当者も参画するプロジェクト運営会議を随時開催した。同会議においては、新規課題推進者の参画によりもたらされるプロジェクトへの利点や方向性の確認等を行い、PM決議のもとPD/JST承認を得る形で進められた。2022年10月以降、5名の新規課題推進者(うち2名は海外の課題推進者)がプロジェクトに参画した。また、2024年4月以降は加えて3名の新規課題推進者が参画する予定であり、AI支援型Trusted-BMI技術のポートフォリオ拡充に貢献してきている。

管理運営上の重要事項の連絡等は、代表機関およびPMOより、メール及びSlackにより随時行った。これらの連絡体制は、プロジェクト発足時からすでに積極的に運用されており、プロジェクト参加者全体での連携と共同作業を支えるインフラとして機能している。

研究開発機関における研究の進捗状況の把握(サイトビジット、課題推進者会議等)

週次ミーティング、PM/SPM定例ミーティング、PMと各課題推進者との1on1を、プロジェクトのフェーズと体制に対して適切なものを都度採用し、進捗管理を行なった。進捗状況については、マイルストーンに対して各年度の研究計画を策定し、それに照らし合わせて、進捗状況を確認し、解決すべき課題の同定と対策を行った。また、これらのミーティングにより、具体的なアウトプットのリスト化、推進にあたって直面している課題の洗い出し、新規の研究開発計画の創出やコアとなるサイエンス部分におけるアイデア出し・課題抽出を行い、PMの観点からフィードバックを随時行った。

サイトビジットについては、中目黒 IoB リサーチスタジオ及び株式会社アラヤの2 拠点にて、PD/SPD/AD/JST を招待してサイトビジットを開催した。PM、SPM によるプロジェクトマイルストーン達成に向けた取り組みの紹介のほか、リサーチスタジオでの脳波データ取得のデモンストレーション等の企画を実施した。また、PD/SPD/AD/JST とマイルストーン達成に向けたディスカッションを実施し、課題推進者間での認識合わせを行った。

研究開発プロジェクトの展開

研究資金の効果的・効率的な活用(官民の役割分担及びステージゲートを含む)

研究開発体制の構築

R3 年度は、プロジェクトの初期段階にあり、研究開発体制の構築を行った。課題推進者間の相互理解を深めるための週次ミーティングを行い、全体会議に向けては、マイルストーンとの対応を明確にすべく、事前に報告内容をプロジェクト内で共有し議論した。当初からプロジェクト全体での目標とのアラインメント度合いに応じて、予算の調整を行っていくことを課題推進者にも説明をしてきており、1on1 においてはその可能性を個別に議論した上で、プロジェクトの目標達成に向けて最適な予算配分を以降も柔軟に行っていく想定であった。

R4 年度以降も PM 統括のもと、プロジェクトマイルストーン達成に向けての目標周知、進捗管理を実施した。プロジェクトの目標の共有を課題推進者全員に対して徹底し、それを実現するためのミッション・ビジョン・バリューに基づいた評価を行っていくことを明確にメッセージングした。その文脈で、各課題推進者には自分の研究開発の位置づけと、期待される成果について確認し、プロジェクト全体での目標への貢献と整合しない研究、または、研究成果が期待される質と量に達しているかどうか等の評価を伝えた。

特に、R4 年度からは BA・XC チームごとの SPM による研究開発のディレクション及び進捗管理を本格化し、各チームで中間評価・ステージゲートに向けたマイルストーン達成のための目標と進捗管理を徹底している。R5 年度からは課題推進者の増加を受けて SPM も増員し、SPM 体制をより強化した。進捗管理に関しては、週次ミーティング、PM/SPM 定例ミーティング、PM と各課題推進者との 1on1 を、プロジェクトのフェーズと体制に対して適切なものを都度採用し実施した。

産業界との連携・橋渡し(民間資金の獲得状況(マッチング)、スピンアウトを含む)

研究計画で「ベンチャー・サイエンティストのエコシステムをつくる」と掲げており、プロジェクト初期に、公的資金を適切に事業化の加速に活用する仕組みを作るために知財相談窓口を設置した。その後実際に、課題推進者の特許出願の手助けを行っている。

国際連携

初期の段階では課題レベルでは国際的な研究が進んでおり、IEEE などの国際学会でのプレゼンスを高めてきた。その後、プロジェクトレベルでの連携も視野に入れて調査のみならず海外の課題推進者の参画を目指して活動を継続していた。R5 年度には、海外の課題推進者 2 名の参画が決定し、順調に国際連携の機会を増やしている。

ELSI の取組み

本プロジェクトにおける技術開発と社会実装がもたらしうる ELSI 課題について、法学や倫理

学の観点から議論し、本プロジェクトの成果が社会に受け入れられ活用されるための要件を明確にしてきている。IoB-S 研究会を設立し、ELSI レポートの作成等の取り組みを行なっている。また、法学セミナーにおける連載に加え、書籍・雑誌記事の刊行、新聞掲載、シンポジウムや学会発表などさまざまな媒体を通して国内並びに国際発信を行ってきている。

ブレインテックガイドブック・エビデンスブック vol.1 の公表を達成し、国際プレゼンス向上に向けて英訳版を刊行した。UNESCO などの国際機関からもニューロテクノロジーのルールづくりについて、注目を集めており、期待していた国際的な波及効果が得られている。

(2) 研究成果の展開

以下の内容を含んだ実施規約を課題推進者、所属機関との間で締結し、プロジェクトとしての一貫性、機動性、実効性を担保する。また、知財運用会議の設置を行った。

知財出願の計画

- プロジェクト内での統一を図るため、課題推進者全員と共通の実施規約を締結し、学会や論文での公表に先立つ公表申請書の提出と PM 承認を必須とした。金井 G は必要に応じて萩田 PD から助言を受け、研究開発成果に基づく特許出願を確実にかつ戦略的に実施した。
- 課題推進者の職務発明を所属機関の自己都合で承継しない場合には、発明した課題推進者に充てられた直接経費から知財維持管理費用を執行し、知財権利化を行った。

知財活用の戦略

- 課題推進者と課題推進者が所属する機関の知財担当者を含めた知財運用会議(議長金井)を設置して、知財の実施許諾権の運用に関する協議をおこない、課題推進者の研究成果活用企業(ベンチャー企業)や第三者企業による知財活用、産業化が実施しやすい条件を整備した。
- 知財運用会議で、本研究開発プロジェクトの知財内容を一元的に把握し、実用化のための導出先の検討や、複数知財のパッケージングなどの戦略的導出方法を検討した。
- 通常実施権の許諾あるいは譲渡の実施に先立っては、知財運用会議による合意を経ることを必須とし、本研究開発プロジェクトの成果の適正な実用化を図った。
- 知財運用会議では、国内外の産業動向に関する情報収集も実施した。

技術動向調査、市場調査

国内外でのニューロテック、BMI、関連新規技術についての調査を継続して行い、毎月の PD/PM 定例会にて最新動向について共有した。

(3) 広報、アウトリーチ

アウトリーチ広報活動については、代表機関の PMO を担当機関とし、サイエンスコミュニケーションの知見に基づきながら、クリエイターやメディアなど外部ステークホルダーの協力とアドバイスをいただきながら、目的に応じて企画運営を行っている。

上記体制の元、R5 年度は広報・アウトリーチについて以下 2 つのアプローチで実施した。

研究開発発動の情報発信・活動のアーカイブ

R4 年度に引き続き、プロジェクトの目標と具体的な取組を、一般の人に本プロジェクトの成果を伝え、目標実現の意義と、それによってもたらされる未来像をともに考えながらつくりあげていくために開設したホームページの運用を行い、研究内容の紹介をはじめ、人材募集の告知、研究成果の発表、イベント開催の予定を発信した。

ホームページとは別に積極的な情報発信の Channel は X(旧 Twitter)を活用、活動の情報量の多いイベントなどのアーカイブについては YouTube チャンネルにて実施。X は R4 年度から約 450 人フォロワーが増加。約 1450 人となり、R4 年度よりも本プロジェクトが発信する情報に関心を持つ層が多様化している。また、X-Communication(XC)チームを始めとした研究活動の意義やビジョンを対外的に発信するためのブランディング施策としてのコンセプトムービーも YouTube にて公開。それに伴いメディアリレーションの機会が R4 年度に比べて増加。R4 年度のテレビや新聞など非専門家をターゲットとしたメディアへの露出の機会も得ることができた。

双方向コミュニケーション

一方向的な発信だけでなく、多様なステークホルダーとの双方向コミュニケーションの機会の施策も実施。とくに R4 年度から始まった、「Neu World」や「ブレインピック」は R5 年度に更に活動の幅を拡大。研究活動を元に社会で生きる全ての人が、未来でどのように活用したいか、それに対しする期待と不安を直接対話することができる機会として、トークイベントやワークショップ、体験会などを 10 回実施することによって、教育分野や DE&I の視点からも人々に IoB の研究について知ってもらったうえで共創の場としての基盤を形成しつつある。

(4)データマネジメントに関する取り組み

研究開発項目1においては、ヒトでの脳波データや多様な生体データの収集を継続し、また、将来的な本プロジェクト内外でのデータシェアリングに向けたシステムの検討を継続した。ユーザーの精神・身体状態をキャリブレーションが不要でかつ 100 ミリ秒以下の即応性が担保された形で推定するアルゴリズムの構築も行った。

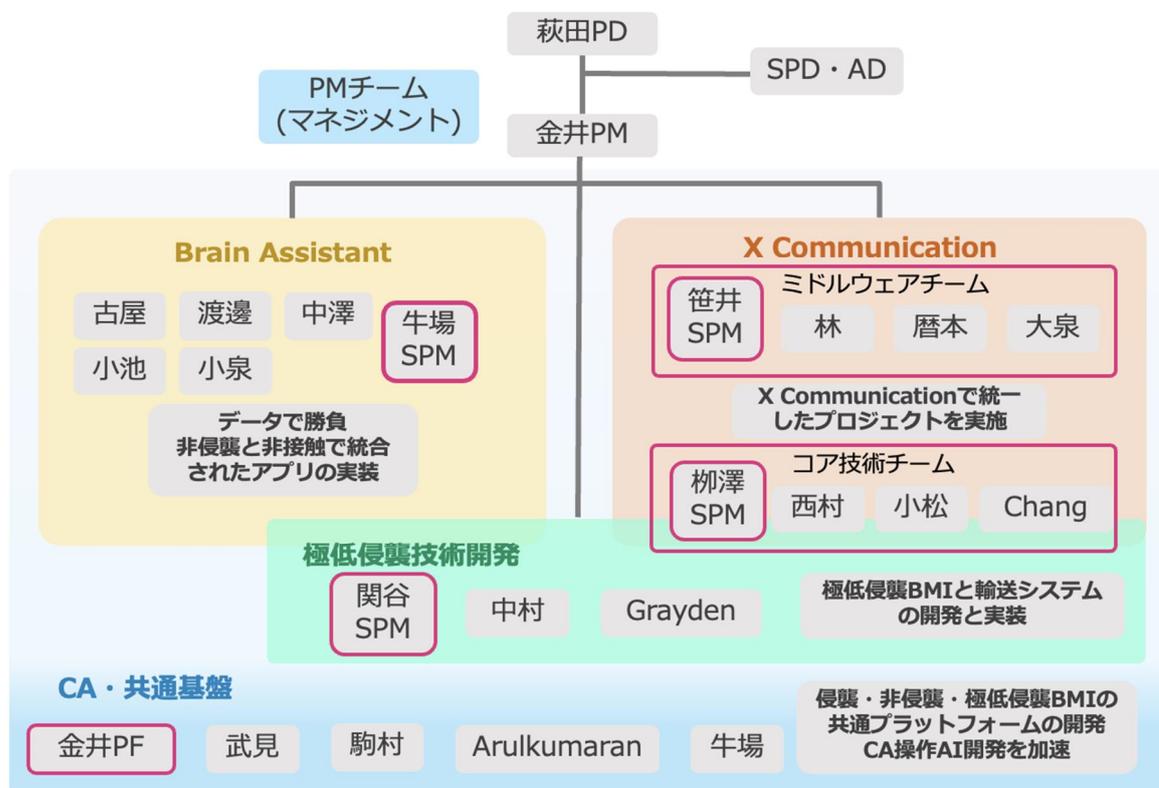
また、課題遂行時や日常生活の場で取得するヒトの行動・生理データの収集も共同で実施した。その他、楽器音の音響信号データ、課題遂行時や日常生活の場で取得するヒトの行動・生理データ、手指の運動情報データの収集を行った。

研究開発項目2においては、視覚刺激時のサル神経活動データの収集を行った。

研究開発項目3においては、自由行動下のマーモセット皮質脳波・発声行動データ・体制運動データの収集を行った。また、サルの上肢運動課題中における皮質ニューロンデータおよび筋活動データも収集した。さらに、運動課題時のサル皮質脳波およびヒトでの視覚・聴覚刺激時の皮質脳波も収集した。

R3 年度の本プロジェクトサイトビジットにおいて、中目黒 IoB リサーチスタジオを来訪した PD 及び AD より、社会に密着し、かつ世界に通用するデータや開発成果を本プロジェクトから創出してほしい旨のフィードバックがあった。そこで、収集したデータに基づく成果の社会実装に向けて、プロジェクト内外での連携体制構築等について課題推進者間で協議した。

4. 当該年度の研究開発プロジェクト推進体制図



5. 当該年度の成果データ集計

知的財産権件数				
	特許		その他産業財産権	
	国内	国際(PCT 含む)	国内	国際
未登録件 数	3	0	1	0
登録件数	0	0	0	0
合計(出願 件数)	3	0	1	0

会議発表数			
	国内	国際	総数
招待講演	49	19	68
口頭発表	24	15	39
ポスター発 表	30	28	58
合計	103	62	165

原著論文数(※proceedingsを含む)			
	国内	国際	総数
件数	3	36	39
(うち、査読 有)	2	29	31

その他著作物数(総説、書籍など)			
	国内	国際	総数
総説	14	1	15
書籍	3	0	3
その他	6	0	6
合計	23	1	24

受賞件数		
国内	国際	総数
7	4	11

プレスリリース件数
3

報道件数
20

ワークショップ等、アウト リーチ件数
32