



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

2024 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

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、意図に応じたサイバネティック・アバター(CA)操作を実現する。この Brain Assistant 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する。外科的手術を要する侵襲型 BMI(Brain Machine Interface)及び極低侵襲 BMI を活用することで、身体または精神に障害を抱える利用者においても、コミュニケーションの速度や CA 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十分な非侵襲 BMI の開発を実施してきた。成果としては、R5 年度に作成した、万人に共通して利用可能な「無校正(自動校正)、即応、高精度な精神、身体状態の読み出しアルゴリズム」の知財化、論文化、学術利用の推進を進めた。国際論文コンペでは Final Top 12 に選出、国際ハッカソン競技では Data Analytics Projects 部門で一位を獲得、国際出願中の知財の公開と事業化主体(研究成果活用企業(株)LIFESCAPES)への権利譲渡、多様な脳活動特性を有するユーザに対して、30 秒程度の時間でただちに BMI の利用が開始できる「プラグ・アンド・プレイ」を実現(R7 年度夏に実施予定の大阪・関西万博での体験展示への組み込み設計を実施)、論文化を完了した(Iwama et al. IEEE TNSRE 2024) (研究開発課題1-1-1)。非接触 BMI 技術に関して、外骨格ロボットを使って指の高速動作感覚を脳にインプットすることで、技能が頭打ち状態の段階から更に一段成熟を促せることに成功し、論文化を完了、国内外で大きな反響を読んだ(Furuya et al. Science 2025; 表紙カバー写真) (研究開発課題1-1-2)。目標1南澤プロジェクトとの連携によって、自己主体感・身体所有感の発生条件に関する大規模文献調査を実施し、要素抽出を完了した(研究開発課題1-2-1)。呼吸から情動を推定・制御する手法の開発を実施し、非侵襲、非接触、表面情報からの心理や情動の状態推定技術の構築を推進した(研究開発課題1-2-3)。

研究開発項目2:IoB ミドルウェア開発:脳情報の取得から解読・伝達・応用までを一気通貫で高精度化し、次世代 BMI 基盤を大きく前進させた。脳波計 (EEG: Electroencephalography)では大規模学習と転移学習を組み合わせ、従来侵襲手法でしか到達できなかった発話解読精度を実現した。また霊長類長期 ECoG(Electrocorticogram、皮質脳波)や fMRI(functional magnetic resonance imaging、磁気共鳴機能画像法)を含む世界最大級のマルチモーダル脳データベースを整備し、生成 AI を用いて脳内概念表現を可視化する手法を確立した。脳ダイナミクスを高次元・非線形・非定常系として扱う制御理論と熱力学的コスト推定を提示し、最適入力設計の指針を獲得した。複数人が複数ロボットを協働操作するシミュレーションで BMI 連携を実証し、改良した HRI(Human Robot Interaction)ソフトのユーザスタディも完了した。遠隔環境での脳間同期の成立条件を明らかにし、サイレントスピーチ認識と技能獲得支援モジュールを高精度化した。これらの成果により、脳-AI-アバターを接続する汎用ミドルウェアとしての実装可能性が示され、X-Communication (XC, 次世代インターフェースによって実現する、身体、脳、空間、時間の制約を超えたコミュニケーション)実現に向けたデータ資源・数理基盤・応用検証を一体的に達成した。

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、マウス、オルガノイド)と人間のてんかん患者および麻痺患者で並行して進めている。神経細胞活動が検出されたら電気パルス信号を出力する小型コンピューターチップ(ニューロチップ)をマカクサル個体に搭載し、自由行動下のサルの神経細胞活動・筋活動・行動データを、無線を介してパーソナルコンピューターに保存することに成功した。Cortec 社製の体内埋込型脳波計を2年以上2頭のニホンザルへ留置し、皮質脳波計測およびのう情報解読と皮質刺激を安定して実施できることを示した。これにより、長期安定して多点の侵襲的脳計測をするシステムが実現した。また、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 が実現できてきた。ホログラフィック刺激による時系列刺激により情報伝送を実現した。項目2との連携により、直感的な感覚を直接に伝える XC 技術を開発するため、上記のホログラフィック刺激が実現し、さらに AI の潜在空間を介した脳情報解読に基づく想起内容推定が実現したことで、XC の開発が進捗した。

研究開発項目4: 共通基盤技術開発:

ブレインテックに関する国際的な基盤整備においては、『ガイドブック Vol.2』および『エビデンスブック Vol.2』を日英両言語で刊行し、OECD ツールキットへの収載を通じて国際基準策定への寄与が評価された。この取り組みが国際的に評価され、UNESCO の Ethics on Neurotechnology の勧告作成の AHEG(Ad Hoc Expert Group)に金井 PM が招聘され、勧告文草稿の作成に参画し国際的ルールメイキングへの貢献を果たした。本プロジェクトで取り組むニューロテクノロジーの社会受容性の向上に向けた取り組みとして SF プロトタイピングのプロジェクトを推進し UC バークレーとの連携による国際展開を実現した。CA の産業応用のフィールドとして選定した建設現場での空間可視化に向けた技術的検証も進み、今後のプロジェクトの社会実装に向けた土台作りが進んでいる。

ELSI 領域では、Marcello Ienca 氏の招聘による国際ワークショップを開催し、国際神経倫理学会等を通じた発信力の強化を図った。AI 支援型 BMI-CA 技術の教育応用や、実利用環境を意識したシステム改良が進み、大阪・関西万博への展開準備も順調に進めた。極低侵襲 BMI の分野では、マルチモダリティを活用したプロトタイプ開発に加え、国際展開を見据えたワークショップ設計を進めており、研究から実装への移行が本格化しつつある。

研究開発項目5:IoB 極低侵襲技術開発:本項目ではこれまでに、柔軟なエレクトロニクス技術で作製した生体計測用薄膜電極やセンサを、極細径ガイディングカテーテルとガイドワイヤーへ表面実装することで、血管内計測デバイスを実現してきた。大型動物への埋め込み直後の実験において従来技術と比較して、信号・ノイズ比が高い血管内脳波の計測を実現してきた。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 R6年度は、血管内への長期的な留置と、連続計測、さらには血管内から得られた脳情報の信号処理技術の開発に取り組んだ。その結果、49日間の長期留置と、高精度の自発脳波の計測を実現することができた。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。

(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

R6 年度は、研究成果の社会実装を見据え、スタートアップ創出と事業化に向けた取り組みを本格化させた。簡易脳波計(課題 1-1-1)や Science Robotics 掲載のエクソスケルトンによるピアノ演奏能力拡張(課題 1-1-2)の事業化検討を進める一方、極低侵襲 BMI 技術(課題 3-2-2、5-1-1、5-1-2)の社会展開を目指す新会社の設立計画も具体化している。PM は VC との面談を重ね、事業計画と資金計画への助言を受けながら資金調達の準備を進めている。さらに、サイレントスピーチ技術(課題 2-3-1)による国内スタートアップの立ち上げや、米国でのスタートアップ(課題 3-3-1、調達額 5,000 万ドル)など、学術的インパクトを超えた社会的価値創出が加速している。

広報、アウトリーチ

R6 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

R5 年度に引き続き、プロジェクトの目標と具体的な取組について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。特に R6 年度はホームページのリニューアル改修を行った。コンセプトをよりデザインに反映させたサイトビジュアル、PI 以外のプロジェクト参画メンバーも掲載できる仕様の変更、記事を掲載する「アクティビティ」にてイベント開催報告や研究者インタビューなどのコンテンツの発信も開始した。

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ている。

R6 年度は日本神経科学大会 (NEURO2024)、サイエンスアゴラ、みんなの脳世界でのブース出展を通して、トークイベントなどの発信に近い形態ではなく、直接、専門家や市民とのコミュニケーションを取る機会に注力した。また、渋谷芸術祭では「NeuWorld」のポスターをミヤシタパークに展示し、より日常に身近な形で本プロジェクトやムーンショット目標 1 を浸透させる施策を実施した。トークイベントとしては 3 月に一般向けとしては初の海外イベントとしてサンフランシスコのジャパントウンで現地の研究者やアーティストと「NeuWorld」を題材に未来について対話するパネルディスカッションを行い海外でのコミュニケーション活動も始めている。

データマネジメントに関する取り組み

本プロジェクトにおいては、課題推進者間での共同研究開発を行っていくため、データの共有が必要となる。侵襲型 BMI の実証実験に使われた動物実験のデータについては、データ解析と AI 構築を効率的に実施するため、課題推進者間で分業体制を築いて推進する。個人データ等の観点から懸念の少ない動物実験データについては、論文発表のタイミングでオープンサイエンスのプラットフォームを利用して、適宜公開を行っていく。

非侵襲・非接触の実験からは人の脳波データ・非接触データが蓄積し、それらを最大限活用するために参加する研究グループとの連携が重要となる。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。匿名性を担保するために、データ管理の仕組みとして次の体制を用意する。

- 社会実験は、各機関の倫理規定に沿って連結可能匿名化による管理
- プロジェクト終了後は照合表の廃棄による連結不可能匿名化
- 被験者からの申し出があった場合に、バックデート式でのデータ消去機構
- 専従管理者を擁立、別の監査役を設置

2. 当該年度の研究開発プロジェクトの実施内容

(1) 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

脳波、筋電図、眼球運動などの多様な生体由来信号を時間同期的に収録できる「脳情報シーケンサー」を構築し、得られた脳情報オミックスデータの解析を通じて、キャリブレーションが不要で 100 ミリ秒以下の即応性が担保された形でユーザの精神と身体状態を推定するアルゴリズムを開発した。

R6 年度は、R5 年度に作成した、万人に共通して利用可能な「無校正(自動校正)、即応、高精度な精神、身体状態の読み出しアルゴリズム」の知財化、論文化、他研究機関での学術利用の推進を実施した。

成果としてはまず、本推定アルゴリズムを用いたアバター操作実験の内容が、BMI の国際論文コンペ The Annual BCI Award 2024 で、全 80 件の応募の中から Final Top 12 に選出された(Seri et al. Intuitive avatar control through a non-invasive multimodal Brain-Computer Interface, The Annual BCI Award, Final Top 12 Nominees, 2024)。Final Top 12 Nominees の筆頭著者の内訳は、ファカルティ(教員)が 2 名、ポスドクが 6 名、博士課程生が 3 名、そして本件の筆頭著者である瀬理大我君 1 名が修士課程生であり、若手人材の育成という観点からも顕著な結果を納めることができた。BR41N.IO DESIGNERS' HACKATHON(IEEE SMC 2024 06-07 October, 2024, サテライトイベント)では、全 379 名の参加者から 74 組のチームが組成されて競技が実施され、全部で 3 部門あるうちの Data Analysis Projects 部門で、本件内容を一部含む技術が第一位を獲得した。

以上、国際成長の著しい BMI/BCI 分野において、国際競争力のある若手人材の育成の面で一定の成果を得るに至った。

知財化に関しては、R5 年度(2023 年 10 月 26 日)に実施済みの国際出願(脳波解析装置及び脳波解析プログラム、並びに、運動支援システム及び運動支援方法、PCT/JP2023/038668)を、R6 年度に入って国際公開とした(国際公開番号: WO2024/095886)。その後、本件は各所で各種の協議と承認を経て、学内外の規定に基づき、事業化主体(研究成果活用企業(株)LIFESCAPES)へ独占実施権を付与した。なお、本アルゴリズムは外部業者に一部委託してリファクタリング、ライブラリ化して利便性の向上を完成させ、下記2)で述べる、開発中の脳状態管理アプリ、脳コンディショニングアプリに組み込み、精度向上を実現した。具体的には、被験者ごとの脳活動特性の違いに関わらず、30 秒程度の時間でただちに BMI の利用が開始できる「プラグ・アンド・プレイ」を実現している。知財文書中には、100 名超のユーザから取得した脳波を例に、当該アルゴリズムの性能に関して「校正時間が最大 30 秒以内」「校正精度が誤差 1Hz 以内」「汎用面において 80 人以上に適合」の 3 項目で定量的に評価した結果を記載した。

論文化に関しては、次の通り査読付き論文への掲載を完了した。Iwama & Ushiba. Rapid-IAF: Rapid Identification of Individual Alpha Frequency in EEG Data Using

Sequential Bayesian Estimation. IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng 32:915-922, 2024.

本技術は、ムーンショット事業目標1の課題推進者(研究開発課題1-1-2、研究開発課題1-2-1)や石黒プロジェクト、研究に広く利用されるに至った。

ムーンショット事業目標1の課題推進者(研究開発課題1-1-2、研究開発課題1-2-1)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

装脱着が簡便な非侵襲 BMI デバイスに精神・身体状態の推定アルゴリズムを組み込み、ユーザが日常環境で精神・身体状態を把握して、健康管理に役立てたり Brain Assistant (BA)、サービスロボット、パーソナルモビリティ、VR 空間アバターを操縦したりする(X-Communication)アプリを、一般商用レベルの UI/UX 下で構築している。

具体的には R5 年度までに、科学的根拠に基づく脳指標と利用ガイドラインに準拠した脳状態管理アプリ、脳コンディショニングアプリの設計を終え、集団データからのベストプラクティスを発見したケース(午睡の質の評価、瞑想の質の評価、反応時間の短縮訓練)について、R6年度に脳状態管理アプリ、脳コンディショニングアプリの実働品(学術研究に供することが可能な大学での試作品であって、産業規格への適合は未実施であり、製造業許可のある法人での品質システム下での製造や販売は行っていないもの)を完成させ、コミュニティへの再投入を開始した。この際、上記1)で開発した「無校正(自動校正)、即応、高精度な精神、身体状態の読み出しアルゴリズム」を組み込んで、システムの頑健性と可用性を向上させた。

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

民生カメラから手指や胴体の画像情報を取得し、深層学習に基づいて姿勢を推定した後、脳・身体への過負荷による誤学習の要因となる姿勢特徴量を推定可能なシステムを開発し、スマートデバイス上で動作するようアプリに実装した。ピアニストを対象とした評価実験の結果、推定精度は 92%を示した。スマホに内蔵されたマイクを通して計測した楽器音の情報から、コンディションの良し悪しや熟達度を推定するシステムを開発し、研究開発課題 1-1-1 で開発するモバイル脳波計と同期計測できる機能を実装した。これにより、コンディションの推定が、脳波情報と、音声情報の両方を用いて実現できるようになった。

技能のコンディションに関連する非侵襲脳情報を制御するニューロフィードバックシステムを開発し、アプリに組み込んだ。脳波の計測・情報抽出・可視化・リアルタイム制御までが一気通貫に実現できるシステムであり、1/f 揺らぎをはじめとする技能やコンディションと関連することが知られている特徴量を可視化・制御し、ニューロフィードバックを実施することが可能となった。

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

技能が頭打ちになる状態(天井効果)から熟達を促すハプティックトレーニング機能の効果を実証し、アプリに実装した(Furuya et al. 2025 Science Robotics)。当該ハプティックトレーニングを利用者はピアニスト 110 名に及んだ。

ソニー CSL が主催するピアノアカデミープログラムの受講生らが 1 年間にわたり、脳波アプリを用いたコンディション推定を継続利用した。その結果、脳波の 1/f 揺らぎ情報から、心身状態の揺らぎが技能に及ぼす影響を推定精度 83% で推定可能であることを明らかにした(Shih et al. in preparation)。

心的ストレスに対する応答性が、技能の学習における報酬と罰が学習効果に及ぼす影響と関連することを明らかにした。つまり、不安の高いピアニストほど、不確実性の高い状況下では報酬からより速く学習する一方、不確実性の低い状況下では罰からより速く学習することを同定し、背後にある脳波の活動パターンとの関連を明らかにした。VR 環境を用いた心的ストレスを与えることにより、ピアニストのストレスを心拍数、発汗、視線の固視時間、刺激に対する反応時間を組み合わせることで、87% の精度で推定可能であることを明らかにした。

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 年度の大幅な研究計画変更に基づき、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研究開発を他のチームと共同で行うこととなった。そのため、R6 年度は南澤プロジェクトの研究開発課題 1-1、2-1 との横断型の自己主体感・身体所有感研究を立ち上げた。この中で、複数操作者の身体所有感・自己主体感計測に必要な測定方法の開発に向けて、CA 操作テストベッドのスペックの確認と基本システムの構築を行い、マウスカーソルの集団操作などを行っての動作確認を進めた。

加えて、集中的な文献調査と技術サーベイを行い、近年の身体所有感・自己主体感の動向の把握を行い、その結果、身体所有感・自己主体感の客観的計測方法は、現在のところ非常に限られた知見のみ(Temporal binding(行為とその結果に主体感を感じるときには、その行為と結果の時間感覚が過小評価される現象)、sensory attenuation(自発的に起こした行為に付随する感覚刺激の知覚強度が減衰する現象)、皮膚電位)であり、近年になって、特に「temporal binding」が自己主体感の指標にならない可能性が示唆されていることが明らかとなっている。

R5 年度から続けている研究のとりまとめも進め、人が AI と一緒に意思決定を行う場面において、協調的/敵対的に対応するかに関して文化差があることを示した研究や、自己主体感と所有感の間に正の相関があること(「自分で動かしているものは自分のもの」)を示す研究などを、査読付き国際誌に発表した。歩容からの心身状態把握技術の自己主体感・身体所有感研究への応用可能性の検討も、南澤プロジェクトの研究開発課題 2-1 と共同で進めており、日常生



活の歩容から心身状態を把握するプロジェクトも開始した。

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

基本システムの構築はほぼ完了し、調整を行いながら課題を作成することで、R7年度の前半にはマイルトーンに追いつくことができる。その上で、研究開発課題 4-1-2 が主導しているメタアナリシス分析に本課題の構成員のうち研究員 1 名及び博士課程大学院生 1 名が参加しているが、そのうち前者は査読付国際誌として採用され、エビデンスブックの一部としても公開された。



図2: 複数人のマウス操作の軌跡記録。これらに別々の重みづけをした位置が単一カーソルとして出力される。

課題推進者: 渡邊克巳 (早稲田大学)

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

本課題では、「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 PM)」プロジェクトの中で、「非接触表面情報からの気分の推定」の開発課題が掲げる「表面情報からの気分の推定に向けた知的基盤技術」と「精神障がい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」の2つのテーマに沿った計画を Brain Assistant (BA) チームと連携しながら遂行し、特に R6 年度では、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。具体的な環境整備としては、3名ほどからなる複数の被験者集団による自然な社会的インタラクションを促す実験課題を独自に開発し、さらに、複数被験者の動きや距離感等を ID を取り違えずに動画から推定する AI アルゴリズムの開発に着手した。現在、実験実施スタッフのトレーニングを重ね、R7 年度 4 月からの予備実験開始を見込んでいる。

精神障がい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

さらに、「表面情報からの気分の推定に向けた知的基盤技術」と「精神障がい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」を実現するため、当該年度では、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、脳波を用いた実験では、呼吸から情動を推定・制御する手法とメカニズムの検証を重ね、40名のデータ収集を完了し、R7 年度には論文文化およびアプリケーション応用を見込んでいる。上記(1)(2)を通じて、金井 PJ の「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)

(2) 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:

R6 年度は、非侵襲デバイスによる脳解読技術の高度化と、発話困難者を含む多様な被験者への適用可能性を探ることに注力した。まず、大規模 EEG データを解析するためのインフラ整備やデータ整合性の確認を行い、そのうえで EEG-音声対応づけの対照学習を進めた結果、従来の EEG 解析の精度を大きく上回る成果を得た。これは、非侵襲型計測が抱える空間解像度のサブテーマを、データ量の増大および高度なニューラルネットワークの導入によって補う戦略が有効であることを示す重要な進捗である。

計測デバイスの違いに起因する信号特性のばらつきを考慮しながら、健常者と神経変性症患者のデータを統合的に扱うマルチタスク学習モデルを開発し、各被験者に応じた線形変換層の学習を組み合わせることで、患者データの少なさを健常者の大規模データで補う転移学習を実現した。

その結果、単一被験者学習に比べて大幅に高い分類精度を達成できた。R5 年度までに計画してきた目標に対して R6 年度は飛躍的な進展を遂げることができ、今後は得られた成果のさらなる発展と社会実装に向けた検証を継続して進めていく。

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、XC 実現に向けた基礎的実験検証をめざす。

R6 年度は、引き続き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)に埋め込んだ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、高次視覚野に限定すれば、世界的に見ても最大規模な長期神経活動計測を行い、データベース構築を行った。複数の実験動物について、電極埋め込み後、半年～1年経過してなお、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収集を実現した。取得した大規模神経データを AI 処理することで、神経情報の解読と視覚的イメージとしての再構成技術開発を進めた。

言葉では伝えることが困難な情報のうち、材質感、未だ脳内の認知処理メカニズムすら明らかにされていない。R6 年度は、材質感の中でも「半透明感」に世界に先駆けて注目し、パラメータ同定が困難な半透明感を適切に制御できる生成 AI モデルを利用した実験手法により、半透明感を符号化している神経活動の大規模計測を進め、神経データから対象物の半透明度が推定できることを確認した。形と半透明度の神経情報表現の解析を進め、研究成果を学会発表した。

この他、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 AI 実装を進め、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のプロトタイプを構築した。

異なる情報システムを統合するための数理基礎の構築と実験的検証の一環として、異なる脳や AI 間で概念情報を共通化する AI 技術開発を行い、研究成果が Q1 国際学術雑誌に論文として採択された。(D. Nakamura, S. Kaji, R. Kanai, R. Hayashi, “Unsupervised Method for Representation Transfer from One Brain to Another”, Frontiers in Neuroinformatics, vol.18, pp.1-14, 2024. <https://doi.org/10.3389/fninf.2024.1470845>)

異なる脳と脳の間での情報通信では、個々の情報表現の違いが問題となるが、以下の3つの研究を推進し、それぞれの研究成果が Q1 国際学術雑誌の論文として3報採択された。

- a) MRI 技術を用いて、ヒトおよびマカクサルスの脳内ネットワークを定量評価し、個人差・動物種横断的な異同性を明らかにした。(K. Ouchi, D. Yoshimaru, A. Takemura, S. Yamamoto, R. Hayashi, N. Higo, M. Obara, Y. Sugase-Miyamoto, T. Tsurugizawa, “Multi-scale hierarchical brain regions detect individual and interspecies variations of structural connectivity in macaque monkeys and humans”, Neuroimage, vol.302, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2024.120901>)
- b) 感情や意図の情報表現のモダリティ差の比較研究を実施した。具体的には顔の表情から読み取られる感情の表現、言語処理を学習した AI ならびに画像と言語の共通表現を学習したマルチモーダル AI における感情の表現、さまざまな感情体験をした脳活動による感情の表現を比較し、脳情報が表現する感情が、マルチモーダル AI による感情表現と最も一致することを明らかにした。(H. Kiyokawa and R. Hayashi, “Commonalities and variations in emotion representation across modalities and brain regions”, Scientific Reports, 14, 20992, 2024. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-71690-y>)
- c) 脳内概念表現の個人差研究を行い、位相的データ解析手法という数理技術の有効性を明らかにした。(R. Hayashi, S. Kaji, Y. Matsumoto, S. Nishida, S. Nishimoto, H. Takahashi, “Homogenization of word relationships in schizophrenia: Topological analysis of cortical semantic representations”, Psychiatry and Clinical Neurosciences, vol.78, no.11, 687-695, 2024. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/pcn.13727>.)

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ー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。R6 年度は、CA システムとして、生成 AI を利用したマカクサルアバターを開発した。潜在変数と呼ばれるパラメータにより表情の制御が可能であり、かつ当該生成 AI の潜在変数が、脳内の情報表現と良く対応することが示唆された。研究成果は国際学術論文誌へ論文を投稿した。同生成 AI 技術を介して、リアルタイムに非ヒト霊長類が対話できるアバターシステムのプロトタイプを構築した。

R6 年度中、IoB コア技術開発を行う研究開発課題 3-2-2 や 3-1-1 から提供を受ける脳情報データを活用しつつ、研究開発課題 2-1-1 や 2-1-3 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。ア

バター開発では、研究開発課題 2-1-1 の協力を得て、生成 AI によるアバター構築を行った。また、CA との対話システム構築では、南澤プロジェクトの研究開発課題 2-1 とともに連携した。

以上の研究成果を通じて、言葉では伝えることが困難な、感情、モノ、形、材質感、色彩などの脳内情報表現の解明と、その脳情報通信利用に向けた数値 AI 技術を確認する当初の目標を達成することができた。異なる脳同士、AI システム同士、モダリティ情報から概念情報を共通化し、情報解読するための数値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値基盤技術の開発

当該年度実施内容：

1) 高次元でかつ非線形の神経ダイナミクスを適切に記述するモデル

我々は R6 年度に、Dynamic Mode Decomposition (DMD) と呼ばれる方法を拡張して、高次元でかつ非線形のダイナミクスを適切に記述することを試みた。DMD とは高次元の線形ダイナミクスに対して、少数の時空間モードに分解する方法であり、流体の分野などで大きく成功を収めている。一方、神経科学においては適用例がまだ少なく今後理論・応用面での発展が望まれる。DMD は普通のやり方では線形システムを同定することしかできないが、拡張することによって、非線形のシステム同定が可能である。具体的には、元の座標系に対して非線形な変換を行った新しい座標系を考え、その座標系の元で DMD を行うという方法である。これによって、非線形システムの Koopman 作用素を近似的に求めることができる。この方法は、Extended DMD (EDMD) あるいは Kernel EDMD (KEDMD) といった方法として知られている。

我々はまず、Kernel EDMD を用いて、非線形システムのダイナミクスの距離を測る方法論を提案した。Lorentz 系などの非線形システムに提案手法を適用し、過去研究の方法として比較して、上手く系の性質に基づいたダイナミクスの類似度の評価ができることを示した。これは ICLR の workshop に論文が採択されている(Kamiya, Kitazono, Oizumi, ICLR workshop Re-Align, 2024)。

我々はさらに、EDMD や KEDMD とは別の有力な方法として、時間遅れ座標系を用いた Hankel DMD を用いて Koopman 作用素を近似的に求めることを行った。これは、Takens の定理を理論的根拠にした方法論で、元の座標系に対して時間的に遅れた座標系を多数追加し、DMD を行うという方法論である。我々はこの方法を用いると、Fitz-Hugh Nagumo model などの非線形システムが上手く近似できることを確かめ、次節(2)で示すような熱力学的コストの推定及びモード分解ができることを確かめた。

2) 非平衡かつ非定常の神経ダイナミクスと熱力学的コストの推定

我々は R6 年度に、非平衡かつ非定常の神経ダイナミクスにおいて熱力学的コストを推定する方法論を提案し、熱力学的コストと神経振動との関係を定量化する関係式を導出した(Sekizawa, Ito, Oizumi, PRX, 2024)。具体的には、まず近年提案されたエントロピー生成の分解を用いて(Dechant et al., 2022, PRR)、神経ダイナミクスを記述するランジュバン方程式と等価なフォッカー・プランク方程式における速度場をまず確率分

布を変化させる速度場と、確率分布を変化させずに維持する速度場に分解する。それらの速度場はそれぞれ、過剰エントロピー生成、ハウスキーピングエントロピー生成に対応し、全体のエントロピー生成はこれらの和となる。このエントロピー生成の分解を用いて、我々はハウスキーピングエントロピー生成がダイナミクスにおける様々な振動モードの寄与に分解できることを示し、PRX 誌において発表した(Sekizawa, Ito, Oizumi, PRX, 2024)。PRX は物理の全分野から年間で約 250 報だけ、ランドマークとなる可能性がある論文しか出版されない雑誌である。

より具体的に言えば、この論文における振動モードとは、線形システムにおける DMD モードに対応し、それぞれの振動モード(DMD 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 ECoG データに対して適用し、覚醒時と麻酔時では、エントロピー生成に対する振動モードの寄与が大きく異なることを示した。

3) 実際の制御入力に対する神経ダイナミクスの応答性の推定

R6 年度は実際の脳に対して刺激をすることで、実際の脳がどのような制御性を持っているかどうかを推定する方法論を提案し、その方法論の検証を行った(Shikauchi et al., 2025, bioRxiv)。方法論としては、TMS(Transcranial Magnetic Stimulation)磁気刺激のようなインパルス刺激を想定したときに、系の制御性を記述する可制御性グラミアンが、インパルス刺激に対する応答から簡単に求めることができることを示した。通常、可制御性グラミアンを求める際には、 $y = Ax + Bu$ のようなモデルを仮定して A と B という行列を推定することが必要であるが、インパルス刺激を仮定した場合この手順をスキップして、インパルス応答から直接的に可制御性グラミアンを求めることができる。この方法論を、研究開発課題 4-1-2 で記録した運動課題実行中に TMS 磁気刺激を加えた、EEG データに適用し、方法論の有効性を検証した。具体的には、TMS 刺激に対する可制御性グラミアンを推定し、この可制御性グラミアンによって、脳状態を弁別することが可能であるかどうかを調べた。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、bioRxiv にプレプリントとして公開し、現在 Journal of Neuroscience 誌で査読中である(Shikauchi et al., 2025, bioRxiv)。

我々はインパルス応答に限らず、一般の外部入力を考えて、どのような入力を加えることが系の制御性を正確に推定するうえで最適かを調べる理論的フレームワークを提案した(Ogino, Sekizawa, Kitazono, Oizumi, 2025, bioRxiv)。この理論の基になる考え方は、系に外乱を加えることで、定常状態で減衰してしまって観測されづらくなっているモードを観測可能にするということにある。我々は神経科学でもよく用いられる、振動入力を想定して、推定精度が最も高くなる振動の周波数を求める理論式を導出した。現在は、シミュレーションの段階であるが、この方法論を実際の神経データでも適用す

ることが次の課題となる。この研究成果は bioRxiv にプレプリントとして公開した(Ogino et al., 2025, bioRxiv)。

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:

1)ロボットによる巧緻動作制御方針の開発

多様なタスク(例:物体の並べ替え、容器の開閉等)を遂行可能とするため、強化学習を用いて操作ポリシーの開発を進めている。

R6 年度は特に、ロボットの遠隔操作性能の向上に注力した。これは、遠隔操作により機械学習アルゴリズムの訓練データ収集が可能となるためである。

本研究成果は、2025 年年 IEEE/SICE 国際統合システムシンポジウム(SII)に採択され、2025 年年 1 月に発表を行った。

なお、開発した制御方針には堅牢性の課題が残っていたため、R6 年度末には、制御ポリシーの頑健性を高めるための研究に着手している。

2)人間とロボットのインターフェース(HRI)開発

既存の HRI ソフトウェアを改良し、大規模なユーザスタディを実施した。

さらに、同ソフトウェアを拡張し、2 名の人間が BMI を通じて協働でタスクを実行可能とする仕組みを開発した。

3)ファウンデーションモデルを活用した文脈的知能の強化

視覚と言語モデル(VLM)等のファウンデーションモデルを活用し、人間・ロボット協調(HRI)における文脈的知能(contextual intelligence)の向上に取り組んでいる。

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:

1)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

有声発話ではなく、口唇映像(lipreading)、囁き声、皮膚振動からの発話意図認識により、場所に限定されない音声インタラクションや、AI や CA のサイレントスピーチによる制御が可能になる。本技術をより実用的にするために、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認識精度を向上させた。

1.1 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

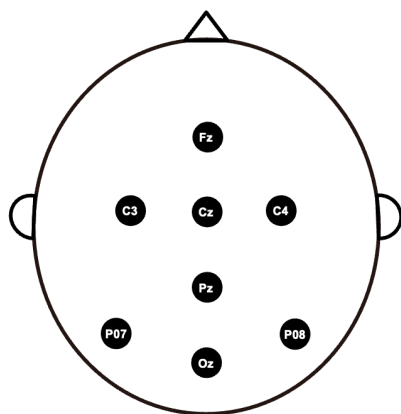
喉部皮膚振動計測による発話認識の実験を発展させた。サイレントスピーチの必要性として、秘匿性(外部に発話内容が露呈しない)、社会性(声を出すことが許容されない環境でも利用できる)を担保した(サイレント)音声インターフェースの利用がある。近年、音声発話による生成系 AI との対話が可能になり、内的発話に近い発話と AI とを接続できれば、AI を脳の延長として利用する可能性がある。

本研究では、LipReading や囁き声の研究を行っているが、R6 年度は喉の振動及び囁き声を併用するサイレントスピーチ機構を構築した。R5 年度の実験により皮膚に接触させた音声周波数帯域の振動を検出可能な MEMS 加速度センサ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が、より高い音声認識性能を得るために気導音からの音声情報も併用する機構を構築した。この方式は外部騒音の影響を受けにくく、サイレントスピーチとしての成立要件を満たしており、より実現可能性の高いサイレントスピーチ機構である。

1.2 遠隔脳同期現象の確認と同期成立条件の解明

脳間同期 (Inter-brain synchronization, IBS) とは、個人間における神経活動の同調を指し、効果的な社会的相互作用およびコミュニケーションの基盤となる基本的なメカニズムである考えられている。先行研究では、IBS は協調作業中に発生しうること、そしてそれがコミュニケーションの効果と深く関連していることが示されてきた。近年、IBS が遠隔コミュニケーション中にも発生しうることが報告されており、物理的距離や通信遅延があっても個人間の脳活動が同期する可能性は、遠隔脳間コミュニケーションやサイバーアバター連携の観点からも興味深い。本研究ではこれを Remote-IBS と名付け、その現象確認と成立条件の特定を目指している。

しかしながら、遠隔環境においてどのような条件下でこの同期が成立または阻害されるのか、特に通信遅延の影響については従来研究では十分には解明されていなかった。そこで、本研究では、通信遅延の変化が IBS に与える影響を検討し、同期が阻害される閾値を特定することを目的とする。脳波位相間の同期を捉える指標として先行研究で一般的に用いられている Phase Locking Value(PLV)を用いて脳波同期計測を行い、まず対面条件下での同期を確認した。さらに、遠隔コミュニケーションのさまざまな状況における IBS の変化を観察した。図1に実験環境の概略を示す。実験参加者は同室(対面環境の場合)あるいは別室(遠隔環境)で EEG 計測装置を装着し、遠隔環境の場合は画面および音声によって会話をする。その際の遅延時間を設定できるように通信環境を構築している。



これらの結果は、IBS が遠隔コミュニケーションにおけるコミュニケーション品質の重要な指標となりうることを示唆しており、遠隔協働および通信システムの改善に資する知見を提供するものである。

空間的に隔絶された遠隔環境でも脳同期現象が成立することが確認でき、従来の対面や近接環境における脳同期の成立機序として、同一環境化の何らかの刺激(外部騒音や振動など)ではなく、脳と脳のインタラクションによって同期は成立し、さらにインタラクションに一定値以下の遅延があっても同期が成立することを確認し、脳同期現象の原理解明に貢献した。

メトロノームやホタルの集団の同期など、同期現象は自然界には普遍的であり、蔵元モデルとして知られる数学モデルが同期現象の説明として用いられている。今回、蔵元モデルに遅延項を導入しても遅延の値が一定以下であれば同期が成立することをシミュレーションでも確認しており、現実の脳同期現象との関連の解明を行っている。(Augmented Humans 2025[ACM incorporated conference]にて論文発表)さらに、画像と音声の情報によって脳同期が成立することから、将来的には遠隔アバターや AI と人間との脳同期の成立可能性を想定することができ、CA 社会での協働状況の計測手段としての可能性が出てきた。

2) BMI 技術を利用した技能獲得促進の練習メソッドの開発と検証

CA 社会においては、人間から人間や CA への技術転移が重要な要素技術となる。アバターに技能を教示する、また他の人間へ技能を教示することが必要であり、両者を共通の枠組みで成立させることが本研究の特徴となる。技能獲得手法として、R5 年度までに構築した人間の発話や運動などの行為から習熟度を抽出する深層学習機構を応用し、ピアノ演奏者の技能判定、外国語学習における発音訓練支援システムを構築した。人間の熟練者が練習者の習熟度を短期間に見抜く能力を参考に、深層学習における注意機構(attention)を利用して、習熟度を自動判定する原理に基づいており、対象は多次元時系列情報(発話や運動など)に一般的に適用できる。

R6 年度は、一人称視点および視覚情報を大規模言語モデルと接続する手法(GazeLLM)を構築した。Multimodal LLM (MLLM)と総称される、言語に加えて音声、静止画、動画を取り扱うことのできる LLM が急速に発展しているが、GazeLLM では技能熟練者の技能行為を頭部搭載デバイスによる一人称視点動画、視線情報、音声情報により LLM に理解させ、他者への技能伝承等を支援する枠組みである。図3に視線情報と一人称画像を MLLM と統合した GazeLLM の構成を示す。

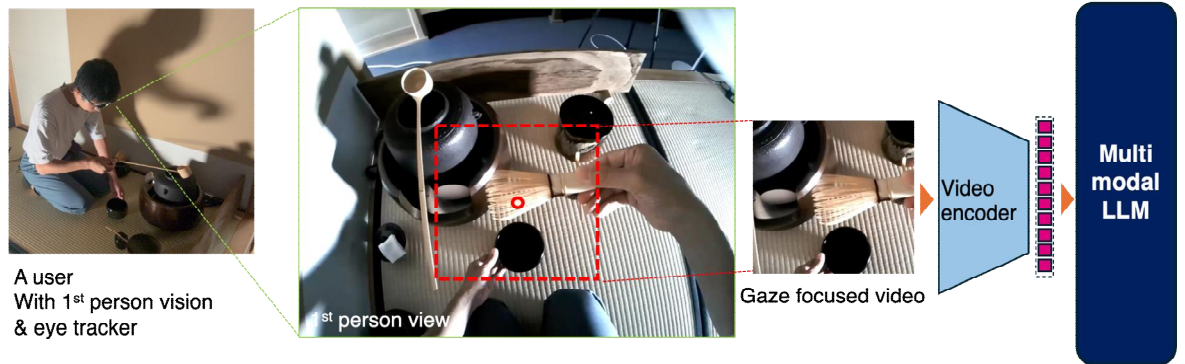


図3: GazeLLM: 視線情報・一人称動画と MLLM の接続
[Rekimoto, Augmented Humans 2025]

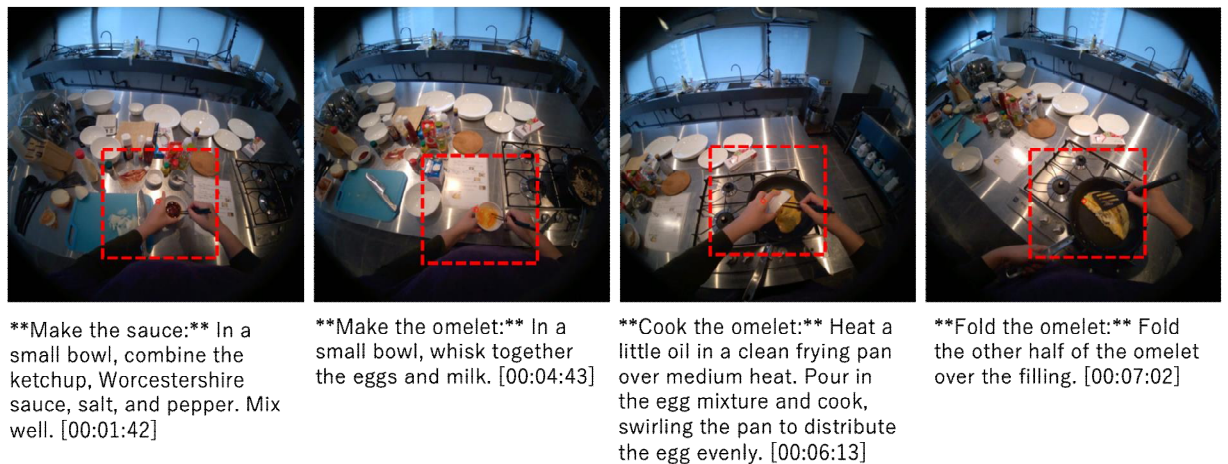


図4: GazeLLM による技能理解[Rekimoto, Augmented Humans 2025]

図 4 は、視線中心動画像を MLLM に与えて装着者の操作が正しく MLLM に認識されている状況を示している。複数のデータセットによる検証を行い、視線中心動画像は装着者の行為をより正確に認識できることを確認した。

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

本研究の狙いは、本ムーンショットプロジェクトの目標の 1 つである、脳波による CA の自由な制御を念頭に、従来の「外部から観測可能な姿勢情報から姿勢を推定」するのではなく、「外部から観測の困難な内部情報から姿勢を推定する」手法の開発を行う。現状では運動する人のクリーンな脳波を計測することが困難なため、足圧という内部状態を利用することとしている。

(1-1)R4 年度および 5 年度に開発した、インソールセンサから得られる足圧データを用いた 3 次元姿勢推定手法の社会応用として、荷物搬送歩行時の姿勢の安全度(危険度)を実時間でフィードバックするシステムを開発した [Koike1, Koike2]。具体的には、姿勢推定のコアとなる深層学習ネットワークの Transformer のアーキテクチャに変更を加えた。また、学習用データとして、被験者にダンボールの箱を様々な姿勢で持

たせトレッドミル上を歩いてもらい、この時の3次元姿勢をマーカーレスモーションキャプチャで計測すると同時に、インソールの足圧情報を計測した。この学習用データにより上記ネットワークを学習させ、姿勢推定を行った。本実験における姿勢推定の精度は、歩行の種類8種類の判別では72.42%、これらを危険度に応じて3種類に分類した場合の3種類の判別では81.63%であった。危険度に応じてユーザにはヘッドフォンに警告音を提示した。

[Koike1] Shino Ito et al. SoleLoadEvaluator: A Real-Time Feedback System for Walking Posture with Anterior Load Using Insole Sensors, *Augmented Humans Int'l Conf. Abu Dhabi*, 11 pages, March 2025.

[Koike2] 伊藤詩乃他. インソール型センサによる荷物負荷時の歩行姿勢フィードバックシステム, 日本ソフトウェア科学会インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ(WISS2024), ポスター発表, 3 pages, 2024.

(1-2)脳波を用いたCAの姿勢自動生成については、顔画像生成で標準的に使用される8つの基本感情(Normal, Calm, Happy, Sad, Angry, Fearful, Disgust, Surprised)時の脳波データを生成すべく、インターネット上に公開されているデータセットを調査し、最終的に以下のデータセットを使用することとした。

The Ryerson Audio-Visual Database of Emotional Speech and Song (RAVDESS)
<https://zenodo.org/records/1188976#.YFZuJ0j7SL8>

このデータセットを被験者に視聴させた時の脳波データを計測し、これを分類する深層学習ネットワークを開発中である。

2) 脳情報を用いた時空間歪曲学習手法の最適化

(2-1) 過年度に開発した時空間歪曲学習の1つとして、ゴルフトレーニングを効率化するためにVR空間内でのRedirectionの適用を行った結果、スイングの改善を定量的に示すことができた。[Koike3]具体的には、ユーザがHMDを装着し仮想空間内でボールを見ている際に、ユーザがバックスイングを開始するとユーザの認知できない程度にボールの位置を移動させる。ユーザはボールの移動には気づかないがボールに当てるためにスイングフォームを動的に変化させる。これにより、例えば初心者にありがちな「アウトサイドイン」軌道を「インサイドアウト」に変化させることが可能となった。本研究成果は以下の学会で発表された。

[Koike3] Chen-Chieh Liao et al. ShiftingGolf: Gross Motor Skill Correction using Redirection in VR, in *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics (IEEEVR 2025)*, pages 1-11, 2025.

(2-2) 学習者の視線を熟練者のそれに近づける研究として、高速かつ時間的に不規則な視線移動を学習させるための手法として、リズムを導入する手法を提案し、プロトタイプを開発、その有効性を検証した[Koike4, Koike5]。具体的には、ある画像を見せた時のユーザの視線を計測し、この視線情報をそのまま別のユーザに提示して真似させるタスクと、視線の滞留がある一定のリズムに基づいてなされるように時間的な変更を加えこれを真似させるタスクとを比較した結果、後者において追従率が高いことが示された。

[Koike4] Makimoto et al. Eye Guidance System Applying Rhythm Game, ACM Symposium on Eye Tracking Research & Applications (ETRA 2025), poster paper, accepted.

[Koike5] 牧元勇人他, リズムゲームを応用した視線誘導システム, 日本ソフトウェア科学会インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ(WISS2024), ポスター発表, 3 pages, 2024.

課題推進者: 小池英樹(東京科学大学)

(3) 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

他チームと連携して行っていたマーモセットアバターの開発が遅れておりアバターの介したコミュニケーションには至らなかったが、動画・音声を用いたバーチャルマーモセットを作成し、2個体でバーチャルマーモセットとのコミュニケーションを実現した。バーチャルマーモセットとコミュニケーション中のマーモセットからの神経活動計測に成功した。これらの行動・神経活動を解析し、コミュニケーションが生じる条件について検討を行った。

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 BMI 研究会での基調講演を含む3件の招待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

前項目でも記載の通り、マーモセットアバターの作成に難航しておりアバターへの接続に至らなかった。動物飼育施設の変更があったため、3か月程度の実験の停止と実験装置の再セットアップを行う必要があった。

一方で、これらの実験停止期間にデータロガーを用いた長時間の行動指標・神経活動計測システムを開発し、1個体で生活環境での24時間計測に成功した。当該システムで計測したモーションセンサの情報がマーモセット頭部の運動を再現できることが確認され、AI 支援型 BMI-CA 開発においてボトルネックになっていた行動解析の自動化に解決策を見出した。このシステムを用いることで AI 支援型 BMI-CA 開発の基礎となる大規模データ取得を加速させることが可能になる。マーモセット広域 ECoG の知見を活用し、国立研究開発法人 国立精神・神経医療研究センター(NCNP)との共同研究で、マカクサル広域 ECoG を用い、覚醒・麻酔状態を推定するデジタル脳ツインの開発に成功した。これにより広域皮質脳波が脳状態を予測するデジタル脳ツインの学習データとして有効であることが示された。

課題推進者: 小松三佐子(東京科学大学)

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) 脳への情報書き込みを可能とする人工神経接続の開発の実施

R5 年度までに開発した、入力電気信号から神経細胞活動を検出し電気刺激信号に

変換・出力する小型コンピューターチップ(ニューロチップ)をマカクサルに搭載し、OnChip 人工神経接続システムの検証を開始した。このシステムを用いて麻酔下のサルの脊髄を電気刺激し、上肢の伸展・屈曲運動を誘発させることができた。さらに、このシステムを脊髄損傷サルに適用することで、自由行動中の一次運動野の神経細胞活動に基づいて麻痺した上肢の筋活動と屈曲運動を誘発することができた。しかし、把持運動の改善には至らなかった。その理由として、神経細胞活動の検出から電気刺激までの遅延時間が適切でない可能性が考えられたので、遅延時間を任意に設定できるようにプログラムを改良した。

2) 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

四面透明塩ビ製の実験ケージ内でボタン押し・レバー引き運動課題を学習させた1頭のマカクサルに対して、手首運動に関連した左大脳運動野に記録電極を、右脊髄 C5/C6 硬膜外に刺激電極を埋め込んだ。また、このサルの頸髄 C5/C6 右側索を損傷させ、右手指の運動麻痺を誘発後、(1)で開発したニューロチップを搭載し、自由行動中のニューロチップ人工神経接続システムの運動麻痺に対する身体運動機能再建への有効性の検証を開始した。このシステムの適用により、麻痺した右上肢の親指と人差し指の屈曲を誘発させることができたが、学習させた課題で要求される、レバー把持機能を向上させることはできなかった。そこで、手指運動の機能性をより多面的に評価するために、ボール移動課題を新たにデザインし、装置の製作を行った。

3) 人工神経接続による人工情動の惹起の実施

2 頭のマカクサルの脳深部への刺激電極と大脳皮質運動野の脳活動電極の慢性埋め込みに成功した。大脳皮質運動野へ埋め込んだ記録電極は複数のユニット活動を1年以上に渡り記録できた。しかし、記録されるユニット数は徐々に減少していった。同時に埋め込んだ刺激電極は1頭では、埋め込み後3ヶ月程度まで刺激電流の出力を確認できたが、その後は刺激電流が流れなくなった。また、別の1頭では埋め込み後1ヶ月時点ですでに刺激電流が流れなかった。以上のことから、慢性埋め込み法とそれらを用いた人工神経接続法の確立は達成できたが、刺激電極の選定が必要となった。

4) 2 個体間での神経コミュニケーション技術の開発の実施

R5 年度までに確立した、イントラネットを介したヒト2人間の運動共有パラダイムを用いて、その運動に伴う運動感覚(関節覚)も共有されるかを検討した。「送信者」は手首の背屈運動を行い、その運動生成に寄与する筋肉(橈側手根屈筋)の筋活動の大きさに応じた周波数で「受信者」の同じ筋肉を磁気刺激することによって、送信者と同様の手首関節運動を受信者に誘発できたことを、モーションキャプチャーシステムを用いて確認した。運動共有中に受信者が感じた運動感覚の大きさを、運動直後に5段階で報告してもらうことによって定量化した。運動の共有度がある程度高い(相関係数 ~ 0.7)場合でも、受信者が感じた運動感覚の大きさにはかなりのばらつきがみられた。

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

頭蓋内脳波による意図・注意情報・想起・思考内容の推定技術を開発し意思伝達技

術の実現のための POC を得ることを目標とした。R6 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、想起内容の出力について 80%以上での制御を達成目標としていた。視覚的想起と外界の視覚的情報との共通概念空間として CLIP を用いることで、ヒトが画像を想起することで、意図した意味の画像を 200 万枚の画像から検索し、250ms 以内に出力できる BMI を実現し論文を投稿した (Fukuma et al., BioRxiv, 2024, Science Advances in review、R6 年度マイルストーン達成)。

推定した CLIP ベクトルに基づいて頭蓋内脳波から画像と文章を生成するオンラインシステムを開発し論文で報告した (Ikegawa et al., J.Neural Eng. 2024)。同様の BMI を脳磁図でも実現し、健常者が想起によって画像検索する環境を構築した。自由行動中の患者の前頭葉から得た頭蓋内脳波を用いて、他の患者の運動時頭蓋内脳波を識別したところ、high- γ 帯域パワーを用いた場合よりも高い精度で運動内容を推定できた。別の患者の後頭・側頭葉の頭蓋内脳波で、視覚認知内容の推定を行ったところ、同様に高い精度で識別が可能であった。さらに、知覚画像を脳波からゼロショットで推定するために、複数の潜在空間に対して VAE をもとにした時限削減を行い、その際に、画像知覚時の fMRI データにアラインさせる Brain-Grounding を行い、脳活動に近い反応をする潜在空間を作成し、MEG や ECoG での脳情報解読に適用したところ、それらの画像推定精度が改善した。

研究開発課題 3-2-2 から研究開発課題 3-3-1 (Chang Pf) ヘスタッフを派遣し、Chang ラボが保有する発声意図時の μ ECoG の解析を開始した。

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頭のサルに留置し、1年以上にわたる長期安定性、有効性を示した。同データについて、データ公開の準備を進めている。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。電気刺激に応じて、サルが反応することで、2頭のサルの間で電気刺激を介した意思伝達ができることが示された。

3) 皮質電気刺激による情報入力

ヒトを対象として島皮質と一次体性感覚野の同時刺激により、一次体性感覚野単独では得られない自然な知覚を誘発できることを3例で示した。サルの皮質電気刺激について、長期に刺激を行うことで、安静時の活動状態に可塑的变化が誘導されることが示された。特に、刺激した部位だけでなく、遠隔部位にも影響が生じることが示されたサルに対して音刺激と共に電気刺激を行うことで、2択で 80%以上の精度で音刺激に反応することができ、サルに音声言語情報を脳電気刺激として入力できることが示された。

4) 血管内脳波を用いた BMI の開発

本項目では、研究開発課題 5-1-1 および 5-1-2 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。実際、ブタの皮質静脈に電極を留置し、脳波が計測でき、SEP、VEP が確認された。同電極の電気刺激により MEP の誘発に成功した。特に、脳表静脈を選択することで、特定の体部位に筋反応を誘発できることを明らかにした。これまでに5頭以上で脳表静脈からの計測が得られ、SSS(Superior Sagittal Sinus)などの静脈洞から得られた脳波と比較して、高い精度の信号が得られる場合があることを明らかにした。同データを用いて、Neural Decoding を行った。特に SEP のデータを用いて

左右上肢刺激の識別を行ったところ、SSS 電極では左右識別が 48.0%でチャンスレベルの精度であったのに対して、CV 電極では 65.5%と有意な精度であった。CV 電極の Neural Decoding での優位性も示された(マイルストーン達成)。

R5 年度よりムーンショットに加わった研究開発課題 5-2-1 に、我々のラボの大学院生を派遣し、ヒツジの横静脈洞に留置した血管内脳波からヒツジに提示した画像の種類を識別できることを明らかにした。R6 年度はお互いのポスドクを交換する形で技術交流を行った。メルボルン大学より大阪大学へ 2 名のポスドクが滞在し、大阪大学で保有するヒトデータを用いた解析を開始した。また、大阪大学よりメルボルン大学へポスドクを派遣し、頭蓋内脳波の解析方法の開発を開始した。

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) アバターの高度 BMI 制御による発話とジェスチャーの同時デコーディングの実現
アバターの高度 BMI 制御による発話とジェスチャーの同時デコーディングの実現のため、リアルタイムアバター神経人工器官システムをさらに開発し、臨床試験参加者(B1)が皮質信号をテキストに変換して口頭でコミュニケーションできるようにするとともに、全身アバタージェスチャーアニメーションを通じて非言語でコミュニケーションできるようにした(ClinicalTrials.gov; NCT03698149)。システムを訓練するために、参加者が無言で話したり、身振り手振りをしたり、あるいはその両方を同時に行おうとするときの神経データを記録した。発話のみのデータセット、ジェスチャーのみのデータセット、発話とジェスチャーの同時データセットを記録した。これらの信号は、参加者の感覚運動皮質と側頭葉の一部に埋め込まれた 253 チャンネルの高密度 ECoG アレイから取り込まれた。発話のみのタスクの刺激は画面上のテキストとして表示され、ジェスチャーのみのタスクはアバターが目標動作を行うアニメーションとして表示され、同時タスクはテキストと目標動作のアニメーションの両方で促された。

これらのデータセットを用いて、ディープラーニング・アルゴリズムを用いた 2 つのモデル(神経活動から音声を分類するモデルと、ジェスチャーを分類するモデル)をトレーニングした。発話とジェスチャーを順次または同時にデコードするために、発話とジェスチャーを並行してデコードできるパイプラインを備えたリアルタイム・インフラを拡張した。デコードされた音声はテキストとして画面上に表示され、デコードされたジェスチャーは事前に記録されたアニメーション・シーケンスを使用してアバターを直接アニメーション化する。両モデルに「休息」クラスを追加し、休息から自発的に発話やジェスチャーを予測する概念実証を行った。Unreal Engine システムにグラフィカルユーザインターフェースを統合し、タスク、アバターの外観、3D 仮想世界など、リアルタイム実験のさまざまな側面を選択できるようにした。このアプローチにより、効率的な実験設定が可能になり、エンゲージメントを高めることができた。

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

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ため、既存の Unreal Engine リアルタイムアバター神経補綴システムをベースに、ジェスチャーデータセットを拡張し、一般的に使用される 30 以上の会話ジェスチャー

を追加した。このデータセットには、音声の代わりとなるジェスチャーのほか、方向を示す指示的ジェスチャーや具体的な物体を表すアイコン的ジェスチャーなど、音声とよく共起するジェスチャーも含まれている。それぞれのジェスチャー・アニメーションは、1つの動きを単独で示しており、アニメーションは、中立的なポーズ(アバターが両腕を脇に置いて立っている状態)で始まり、中立的なポーズで終わる。各ジェスチャー・アニメーションの長さは数秒である。アバターは、Unreal Engine と MetaHuman Animator を用いて、参加者からのフィードバックを受けながら、参加者に似せて開発された。

別の参加者を対象に、アメリカ手話(ASL)のアルファベット 26 文字すべてを分類する別のモデルをトレーニングした。ASL アルファベットは、特定の手の形、動き、手の向きに依存して、英語アルファベットの異なる文字を表現する。デコーディングの精度は偶然を大幅に上回った。

課題推進者:Edward Chang (UCSF)

研究開発課題3-4-1:ホログラフィック刺激による感覚学習の操作と情報伝送技術の構築 当該年度実施内容:

1)ある個体の神経回路活動を多角的(時空間的)に操作することで、神経回路の時間的活動の意義を実証する

開発したホログラフィック顕微鏡を用いて、生体動物覚醒下で神経細胞に対するホログラフィック刺激による時系列刺激により情報伝送を実現した。項目2との連携により、人為的な感覚を直接に伝える X-Communication 技術の開発が順調に進捗している。下記に具体的事項を記す。

R6 年度は、時系列情報を含む神経活動情報を他個体に移植することで、神経回路の時系列情報の意義を検証した。まずこの時系列情報を設定するために、1、ホログラフィック顕微鏡の時系列刺激のための GUI の作成、2、他個体への情報移植のための条件検討を行い、行動の誘発を検証した。1に関して、時系列細胞活動情報を同一動物から経日的に取得し、これを追跡し、解析するために、細胞を自動抽出し、この活動を計測し、画像の歪みを補正して、日を跨いだ画像の同一細胞を同定するアプリを作成した。これを元に作成した時系列情報を解析するアプリを用いて、これをデジタル変換し、(2)の研究項目へとつなげた。

2)ある個体の神経回路活動を複数の他個体で再現することで、情報伝送(テレパシー)を可能とし、神経回路活動を実証したときの機能的意義を明らかにする

本項目では、個体1から個体2への情報伝送を行うことを目的とする。ヒゲの感覚識別学習中の個体1のヒゲ感覚領域の神経活動をカルシウム感受性蛍光タンパク質で発現させ、この蛍光輝度を、2光子顕微鏡を用いて生体で計測することで記録する。この計測された神経活動を自動細胞抽出し、デジタル変換することで、伝送する神経活動を決定する。そこから細胞活動の類似情報に基づいて、細胞同士を個体間で結びつけ、これを GUI 上で表現し、細胞活動をホログラフィック顕微鏡で再現することを可能とした。結果、自発活動を含めて、50%程度の類似度を再現することに成功した。

3)情報処理に外部の脳(マウス脳、オルガノイドなどのヒトの小型脳)を使用し、これをアナログ信号として戻すことで、脳機能拡張を目指す

情報処理に外部の脳(マウス脳、オルガノイドなどのヒトの小型脳)を使用し、これをア

ナログ信号として戻すことで、脳機能拡張を目指す。
本研究を遂行することで、神経回路活動の他個体間及びオルガノイドへの移植を可能とし、これによって脳機能拡張を目指す。
本項目ではヒト iPS 細胞由来の脳オルガノイド(ヒトの小型脳)を培養することに成功し、これをマウスに移植し、神経活動を誘発することに成功した。

課題推進者:和氣 弘明 (自然科学研究機構 生理学研究所)

(4) 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

Berger(南カリフォルニア大学)グループの人工海馬など、海馬インターフェース技術に関する研究について調査した。海馬デコーディング技術、海馬のオーグメンテーションによる記憶定着の改善、認知症治療への応用についても調査した。介入技術としては薬理、オプトジェネティクス(動物)、TMS、tDCS(Transcranial Direct Current Stimulation)、tACS(Transcranial Alternating Current Stimulation)、DBS(Deep Brain Stimulation)などが挙げられ、海馬への介入目的としては癲癇が圧倒的多数を占め、他に鬱、アルツハイマーなどが続く事が明らかとなった。

2) AI 支援型 Trusted BMI のアプリ開発に関する調査

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、研究開発項目5のチームと連携して実施し、今後のプロジェクトの重点領域の精査を実施した。ユーザ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。本調査では、外部委託先に第三者の視点による本プロジェクトの成果と国内外での動向との比較分析も実施され、血管内電極技術に関する市場性および低侵襲型 BMI 技術の優位性について、多角的な観点から評価が行われた。Synchron や Neuralink といった先行企業との比較を通じて、より広範な脳部位からの計測を可能とするなどの本技術ならではの特徴や強みを明確にすることができた。

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

R6 年度は、ブレインテック ガイドブック vol.2 -責任ある製品開発の手引き- を日英二言語で公開した。本書は、一般消費者向け BMI/ブレインテック製品・サービスの開発・販売を行う、または検討する事業者・研究者を対象とした。本プロジェクトが公的資金に基づく活動であることから、「チェックリスト」という語の直接的使用は避け、実質的に同様の機能を持つ表を掲載した。これは、意図せぬ政府推奨の誤認を回避しつつ、現場での実用性を確保するためである。

同表は、法規制対応、安全性、科学的妥当性、情報開示の4項目で構成され、理解を補うために5つの仮想製品事例も示した。流通例が少ない分野における課題の可視化を目的とした構成である。

本ガイドブックと併せて作成した資料は、OECD の Neurotechnology Toolkit に収載さ

れ、国際規範への反映という目標も達成された。UNESCO の倫理勧告策定に金井 PM が専門家として参画し、我々の知見が一定程度反映されていると考えられる。

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、被験者がコート右側に打つか左側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。画像からの姿勢推定に際しては、Openpose (<https://github.com/CMU-Perceptual-Computing-Lab/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で、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

OpenCA 開発チーム (研究開発課題 4-3-1) の BMI-CA プロジェクトと協力し、脳波・筋電・アイトラッキングなど多様な生体信号に対応する BMI システムのプロトタイプを完成させた。この BMI システムを各種の CA 制御環境に接続するための BMI-CA プラットフォームの構築を進めており、共通プラットフォーム課題をベースとしたロボット制御環境との統合を完了した。研究開発課題 2-1-1 の BMI システムと連携し、多様な BMI アルゴリズムの性能評価が可能となるよう拡張を進めている。

6) 社会との対話コミュニケーション基盤

『Neu World』新規 SF 作品 2 作品を公開。うち 1 作品は南澤プロジェクトとの連携企画として南澤プロジェクトの研究開発課題 2-1 とのコラボレーション漫画作品を制作して公開した。新規の SF 小説 4 作品を制作。新たな手法として読みやすさを重視した従来よりも文字数の少ないショートショート SF 小説 5 作品を制作。

国内の市民だけでなくグローバルな対話の展開も同時に進行中で、現在、Institute of Neuroethics とのコラボレーションでの対話プログラムを開発中であり、R6 年度は日本科学未来館での倫理や脳神経科学の研究者によるクロードワークショップを開催。サンフランシスコでも UC バークレーカブリセンターとの意見交換や JAPAN TOWN での公開セッションを開催した。

イベントにおいては、これまでのワークショップやトークセッションと異なり、R6 年度は展示会での対話を重視した出展を 3 件、実施した。小説の緻密な描写を活かすために朗読＋ワークショップのフォーマットを開発、3 月に手話通訳を入れて実施した。メディア露出では、Tokyo FM の生放送出演や日経新聞での掲載とより一般に近いメディアとの連携を進み、日本 SF 大賞の一般エントリーでエントリーされるなど認知度

が向上している。それに伴い SNS での感想も増加し、それらを解析すると未来や社会への影響を考え、問いを提示する疑問形の投稿が多いことがわかり、ビジョンではなく共に考える対話プラットフォームという目的と一致していることがわかってきた。

7) 産業界でのデジタルツインと CA の活用に向けた予備的検討

建設現場という高リスク・高認知負荷環境において、BMI 技術により従来の主観的評価では限界があった作業者の脳活動状態(集中度、疲労度等)を客観的に測定し入門者の業務改善を行うことが可能となる。一般的に非侵襲の BMI 技術(EEG 等)では、歩行中は頭部の上下動や筋電(EMG)ノイズが EEG 信号に混入してしまうため、脳活動状態を計測することが困難である。本提案では現場データからバーチャル現場を構築することで、体を動かすことなく現場の進捗確認や点検タスクの実行が可能になるため、BMI 技術により熟練者の脳活動状態を取得し、また入門者の業務と比較して改善提案することが可能となる。バーチャル現場化することで熟練者は複数の現場で物理的移動を伴わずに現場業務を実施することが可能となり、業務効率化が図れる。

現場業務の洗い出しとして、建設中の大規模ビルの工事長へ実際の現場業務や課題、本システムに対するコメントをヒアリングした。その他、複数の工事経験者からもヒアリングを行い、現場状況・課題の整理を行った。

建設中の大規模ビルにおいて、実際の現場データ(点群データ、360° 画像)を 2 回取得した。工事進捗の差が得られるように、1 回目と 2 回目は約 1 ヶ月間の間隔を設けた。取得したデータは、色付き点群による空間構築を実施した。1 回目のデータは部屋のフレーム・柱が多く、2 回目のデータは壁などが出来上がっており、部屋形状を目視でき、工事進捗の差を確認できるような結果となった。

バーチャル現場として、CA1 人がバーチャル空間を歩き回れるシステムのベースを構築することができた。現場の状況把握の手段として画像認識 AI による物体検出を考えており、建設現場のサンプル画像において検証することができた。

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:

信頼獲得の基盤整備

ブレインテック ガイドブック vol.2-責任ある製品開発の手引き-を、日英二言語で公開した。同書は一般消費者向けの BMI/ブレインテック製品・サービスの開発と販売をしている、あるいは今後の開発と販売を検討している、事業者と研究者を想定読者として作成された。なお、チェックリストは、本プロジェクトの影響力、公的資金によってサポートされている研究活動であることを加味して、直接的に「チェックリスト」という言葉を使って公表することは避けた。チェックリストという形で公表することは、我々が意図せずとも、チェックリストを用いた政府お墨付きの製品・サービスという形で喧伝されるリスクがあるためである。その一方で、商品を開発する事業者や研究者にとっての使いやすさも重視したため、実質的にチェックリストとして用いることが可能な表を同書には掲載した(表1)。

当該の表(実質的なチェックリスト)は、4 つの項目で構成された。各種法規制やガイドラインへの対応(例:医療機器の該当性、個人情報保護)、安全性の保証(例:製造物としての安全性、生物学的な安全性、情報セキュリティ対策)、科学的な妥当性の検

証(例:効果や計測精度の保証、そのための検証試験の設計や倫理審査)、消費者にわかりやすい情報開示(例:正しい使用方法、期待できる効果)、である。これらに加えて、5つの仮想的なブレインテック製品の開発・販売事例を示し、製品の開発や販売における課題の理解をサポートする構成とした。一般消費者向けブレインテック製品は市場への流通が少ないため、どういった製品があるのか、またそこにどのような課題があるのかをイメージしにくい読者も多いことが考えられたためである。

チェックリストやガイドブックの内容を国際機関における規範的な文書に反映する、という目標に関しても、OECDが発行したNeurotechnology Toolkitにガイドブックとエビデンスブックが収載されたことで達成された。UNESCOが推し進めているニューロテクノロジーの倫理に関する勧告の作成に関しても、金井PMが草案作成の専門家に選ばれたことで、規範文章に我々の活動の内容を少なからず反映できているものと考えている。

エビデンスの整理

表 1. 安全性と有効性をSRする12項目の疑問

①ニューロフィードバックは運動能力を向上させるか	②ニューロフィードバックは記憶力を向上させるか
③ニューロフィードバックは睡眠の質を向上させるか	④ニューロフィードバックは集中力を向上させるか
⑤非侵襲脳刺激は運動能力を向上させるか	⑥非侵襲脳刺激は記憶力を向上させるか
⑦非侵襲脳刺激は睡眠の質を向上させるか	⑧非侵襲脳刺激は集中力を向上させるか
⑨脳波はリラックス状態の指標になるか	⑩脳波はストレスレベルの指標になるか
⑪脳波を用いて集中度を評価できるか	⑫脳波を用いて感情を推定できるか

安全性と有効性をシステマティックレビュー(SR)する12項目の疑問は表1の通りである。R6年度中に10と11を除いた10項目の調査を完了することができた。調査を完了した項目のうち、9項目の内容に補足1項目を追加してエビデンスブックを更新した。更新したエビデンスブックは専門業者の校正を受けた上で、日英二言語で公開した。プレプリントは、R6年度末までに①、④、⑥、⑦、⑨の疑問に対する調査結果が公開されたR6年度中に査読付き英文誌に新たに受理された項目はない。SRを支援するために開発した自動化ツールの開発は順調に進んでいる。現在は①～④のニューロフィードバックを対象とした論文のスクリーニングに特化して作成を進めている。ここ数年進歩が目覚ましいLLMを活用することで、従来論文スクリーニングを自ら実施していた研究者が我々の開発した自動化ツールを使用した際に、納得できる形で判定結果を出力することが可能になりつつある。

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

R5年度には、AI支援型BMI-CAの操作体験ができるタイムトライアルレース「国際ブレインピック」を開催し、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)の参加を得たため、R6年度にはこの際に得たフィードバックを基に、ヘッドフォン型脳波計の被りやすさに関する設計変更、プログラムのキャリブレーション

の体験設計の変更、脳波反応と CA 動作の対応関係の見直しを実施した。エンターテインメントとしての体験設計を向上させるために、従前の 1 人プレイではなく 4 人同時対戦型とし、脳波反応の強さに応じて CA のビジュアルやサイバー空間のビジュアルが連動する仕組みに変更し、AI 支援型 BMI-CA の操作体験の向上を推進した。

大阪・関西万博で R7 年 8 月に体験展示を実施することが決定したため、研究開発計画を一部見直して実施した。注力事項としては、展示期間中のシステムの可用性を高める必要が生じたため、ヘッドフォン型脳波計の構造上、性能上の課題を抽出して、ユーザの多様な頭部形状や寸法にもフィットし、耐用性がある形状改良を施した。具体的には、サイズ調整を段階的に行えるスライド機構の採用、電極保持部分のバネ機構の採用、破壊試験に耐えうるプラスチック素材の採用と金型を利用した成形プロセスの確率確立、電池の差し替えを簡易にするための設計変更を実施した。その後の試験では製造上の特性が大幅に改善したことを確認した。

ユーザごとの脳波の個人特性をスクリーン上で可視化しつつ全自動校正できる機能改修を、課題 1-1-1 の成果物を利用して実施した。これにより多人数同時使用が可能なシステム開発を完了させた。プログラムの内部構造やスクリプトそのものは秘匿化しつつライブラリとしての部分公開を進めたほか、メタバース上の競技会場の公開準備を完了させた。これにより、開発イニシアチブを持ちながら利用者と開発者を増やす OpenCA 施策の準備を推進した。

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

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学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にまとめて公開する。慶應義塾大学理工学部生命情報学科 3 年生 40 名超を対象とした正科の演習授業に組み入れて利用を実施した。

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。

具体的には、R5 年度に構築した「脳波の AI 処理に関する自習教材」を基に、R6 年度はブラッシュアップを実施した。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できるよう、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。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ウェブ公開した。一連の教材とサンプルコードを、慶應義塾大学理工学部 (生命情報学科 3 年生) 40 名超に対する正科の演習課題として利用し、夏季休暇期間に研究室訪問した中高大生に対しては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実施し、理解度、難易度を確認した。得られたフィードバックを基に教材の改訂を実施し、改めてウェブ公開した。集合教育を受けた全学生が脳波によるアバター操作プログラムの自作を成功させた。

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)国際ワークショップの開催(主要な ELSI 研究者との国際的な連携基盤の強化)

R6 年 12 月に Marcello Ienca 氏を招聘した国際ワークショップを主催した。日本側からの主な参加者は、研究開発課題 4-1-1、4-1-2、4-1-3、4-2-1 からであり、MS の研究開発の現在や、ブレインテック・ガイドブックについて、IoB-S の活動について、主要な国際的 ELSI 研究者の Marcello Ienca 氏にインプットすることができた。さらに、Marcello Ienca 氏より次年度の国際シンポジウム登壇の内諾を得ることができた。

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、R5 年度に作成したレポートの改訂と追記作業を行った上で、ELSI レポート、「IoB-S 研究会・実装実験系中間報告書 脳神経科学技術(ブレインテック)の法的課題—神経法学(Neurolaw)の構築に向けて」を刊行した。なお、同レポートの刊行に際して、「IoB-S 研究会実装実験系中間報告書発刊記念会合」を主催するとともに、国内の主要研究者、出版社、メディアに同レポートを送付したことで、国内へ刊行成果を発信した。

3)国際学会・研究会における研究成果の発信

R6 年度も、IEEE Neuroethics Framework における Wellness 班への貢献(福士珠美・小久保智淳)を引き続き行った。意見交換・交流先は当初想定していたよりも多岐に渡ったため、R5 年度に交流したヨンセイ大学、OIST との交流を深化させただけでなく、主に米国・欧州の研究者・大学との交流関係を発掘した。以上のことから、それに留まらず、多くの研究者・研究機関と交流・意見交換を行うとともに、研究報告を行った。

その過程では、国際学会(国際神経倫理学会)においてプレナリーセッションを主催した。それにより、セッションの主催という野心的な目標も達成することができた。駒村圭吾が、国連人権理事会の公表する報告書についての、フィードバックを求められたことは、主要な成果の1つに数えられるだろう。国際学会・研究会への参加についてはその数が多くなるためその全ては記載しないが、以下にその主要なものを記すことにしたい。

International Neuroethics Society (INS), Baltimore, MA, USA R6 年 4 月 18 日

*プレナリーセッションを主催

参加者:駒村、福士、小久保

ICON・S(International Society of Public Law), Madrid. Spain R6 年 7 月 9 日

参加者:駒村、福士、小久保

Workshop @ Utrecht University, Utrecht, Netherland R6 年 7 月 11 日

参加者:福士、小久保

Workshop -Ethics and Governance of Emerging Technologies: European and Asian Perspectives-, Germany, Munich R6 年 7 月 12 日

参加者:福士、小久保

EPFL, Hybrid Mind Conference, Geneva, Switzerland R6 年 10 月 16 日から 18 日

参加者:駒村、小久保

III Seminar of the International Network on Neurolaw and Human Rights, Zoom conference, R6 年 10 月 28 日から 30 日

参加者:駒村、福士、小久保

4)国内学会における研究報告

以下の3つの研究報告を実施した。

1:大阪大学 CiNet における招待講演の実施

参加者:駒村、福士、小久保

2:松尾剛行氏の論文二件の公表

3:法学セミナー連載の書籍化作業の実施(R7 年度刊行予定)

(5)大学・高校における啓蒙的な講座の実施

1:慶應義塾高校にて計 2 回、啓蒙的内容の講座の実施

2:慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科にて講義を実施

課題推進者:駒村 圭吾(慶應義塾大学)

研究開発課題4-3-1:極低侵襲 BMI の研究開発

当該年度実施内容:

BMI-CA 基盤プロトタイプ of 構築

脳波を新たな操作信号として活用する際に最適なモダリティ組み合わせを検証する実証実験を見据え、UI 上で自由にモダリティを組み合わせたインターフェースを構築可能とする基盤を開発した。

BMI-CA 基盤のプロトタイプを構築し、EEG、EMG (ElectroMyoGraphy、筋電位)、キーボード等、複数のモダリティ信号を簡易的な UI 操作でユーザ独自の操作コマンドへ変換可能なシステムを実現した。各デバイスのカリブレーション、解析パイプラインの構築、GUI 上でどのデバイスのどの特徴量を利用して CA の操作信号に変換するかの設定ができるプロトタイプが完成した。各モダリティに対応する複数のデバイスから得られた信号を組み合わせることで、デモ機としてのロボットをシミュレーターおよび実機の両方で動作させることに成功した。デバイス毎の異なるフォーマットを統一的に扱えるような構成も提案し現在検証を行っている(図.1)。本システムは当初よりオープンソースとしての公開を想定して設計されており、CA 操作を前提としたアーキテクチャ(図.2)として、Docker 上で ROS2 サーバーにより稼働する構成を実現した。

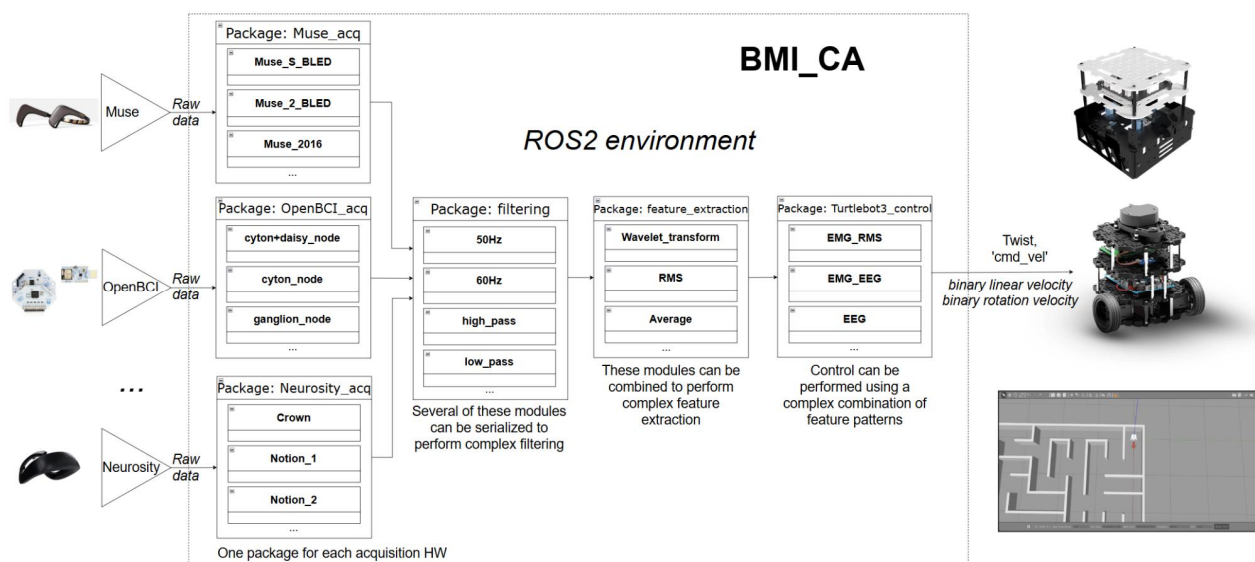


図.1 デバイス間でのデータ標準化機構

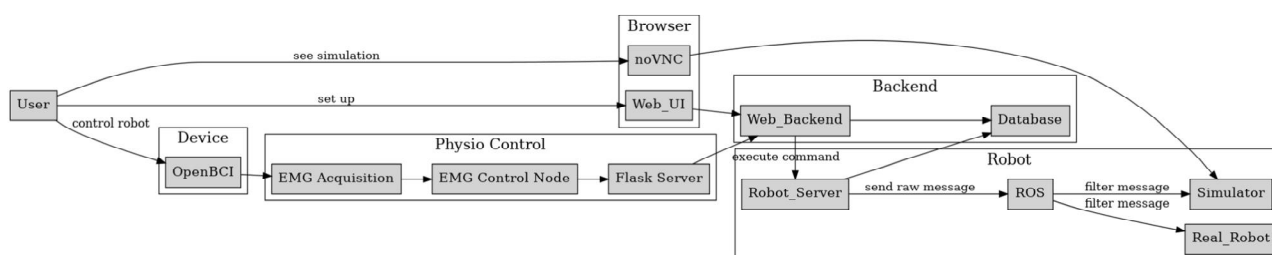


図.2 全体アーキテクチャ

ワークショップの企画・実施とフィードバックの収集

研究者を対象とした体験型ワークショップを企画・実施し、BMI-CA 基盤を活用したロボット操作のデモンストレーションを行った。本体験会では、複数名の研究者に対し、マルチモーダルな信号を用いたアバター操作を体験してもらい、実際の使用感や操作性に関するフィードバックを得ることができた。ユーザビリティ、操作時のタイムラグ、信号の安定性、UI の直感性といった観点から具体的な改善点が明確になり、今後のオープン化・実装展開に向けて技術的および設計的な改良項目を体系的に整理することができた。

体験会でのフィードバックも踏まえ、今後の研究開発事項としては、デバイスの追加、解析 GUI の汎用化(図. 3)、機械学習モジュールの追加を順次実施する予定である。

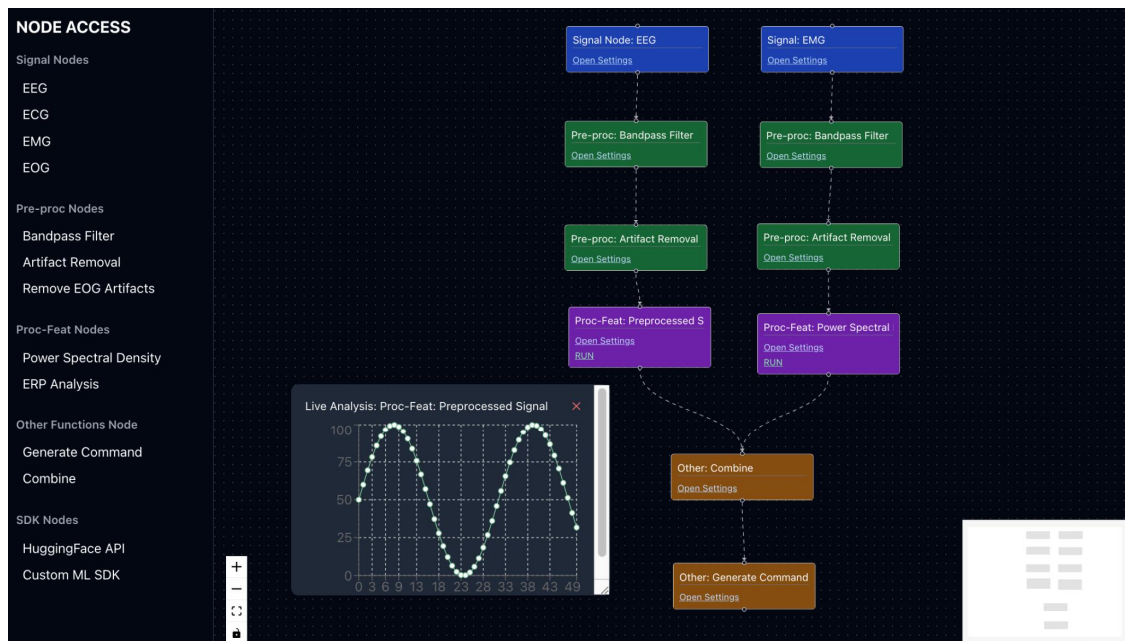


図.3 解析 GUI 画面設計

ドバイでの国際連携とプロモーション活動

目標 1 におけるドバイとの国際連携の型化を目的とし、R7 年 1 月より本プロジェクトと Dubai Future Lab との共同研究を正式に開始した。これは、石黒プロジェクトにおいて先行的に構築された座組(契約スキーム、パートナーシップ構築プロセス、知財・成果物の取り扱い等)を汎用化・展開可能な形に整理し、それをベースとして応用したものである。

この標準化モデルを活用することで、契約交渉やプロジェクト開始までの事務手続きにおける齟齬を最小限に抑え、円滑かつ迅速に国際共同研究をスタートすることが可能となった。

加えて、本型化により、今後他の目標 1 内プロジェクトが同様にドバイとのコラボレーションを開始する際にも、スムーズな展開を実現できる再利用可能な枠組み(テンプレート、プロセス、契約モデル等)を構築することができた。

OpenCA 横断連携の戦略構想

現在開発中の基盤をオープン化し、国際展開を視野に入れた海外研究機関との円滑な連携を実現するため、以下の施策を実施した。

OpenCA (Cybernetic Avatar のオープンプラットフォーム)に関する今後の拡大と社会実装に向け、PD、SPD、PM、Pf(課題推進者)を含む多層的な関係者が参加する横断的な議論を実施した。

この議論では、各プロジェクト間の連携強化や技術・実装面でのシナジー創出を目的に、OpenCA の戦略的展開に向けた方向性が検討された。その結果として、R7 年度よりプロジェクトを跨いだ連携体制を正式にスタートさせる方針が合意され、必要となるプロジェクトチームの組成に向けた準備が進められている。

議論では以下のような要素が重点的に取り上げられた：

- 各プロジェクトにおける OpenCA 技術の活用実態と課題の共有
- 技術仕様の標準化に向けた共通基盤の整備方針
- 国際展開や社会実装フェーズにおける共通戦略(例：法制度対応、インフラ整備)
- 他分野・他機関との連携可能性の検討(産業界、教育機関、自治体など)

- これらの議論を通じて、OpenCA の価値最大化と実装スピードの加速に向けた具体的な戦略の構想が着実に進展している。

課題推進者:阿久津 完(株式会社アラヤ)

(5) 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) 薄膜電極及びセンサの細径実装と血管内 BMI システムのプロトタイプ試作および動作確認

R6年度は、細径ヘリカル電極を複数実装したガイドワイヤーおよびガイディングカテーテルの動作検証を、R5年度から継続して実施した。複数の細径ヘリカル電極を組み込んだ状態で、血管内に同時に挿入し、各ヘリカル電極の機能が安定的に維持されているかを重点的に評価した結果、その有用性を実証することができた。特に、複数本の電極を同時に入れることで、差動計測が可能となり、信号・ノイズ比の高い血管内脳波計測を実証することができた。信号品質の向上のみならず、実臨床での応用を視野に入れた構造および素材の最適化に取り組んだ。特に、医学部との連携を強化し、長期にわたって高い信号品質と生体適合性を両立できる電極・センサデバイスの設計改良を進めた。

細径ヘリカル電極に用いる薄膜フィルム電極に関しては、R5年度に構築した薄膜フィルム電極の性能向上と多機能化を図り、体外および血管内での性能評価を行い、材料によるインピーダンスや信号品質、電気刺激耐久性、長期耐久性の差異に関する有意な知見を得た。これらを踏まえ、薄膜センサの素材、製造プロセス、構造の最適化を行い、血管内での高精度な脳波信号の長期取得を目指した。

大型動物実験を通じて、デバイスの電氣的・機械的特性の検証に加え、医師のニーズに即した操作性や、ガイドワイヤーとカテーテルの連動性についても検討を重ねた。その結果、ガイドワイヤーを血管内複数電極として使用した急性実験では、これまで以上に高い品質の血管内脳波信号の取得に成功した。

R6 年度は、極細径血管内デバイスを脳内血管に 49 日間留置し、その間、安定して高品質な脳波信号を継続して計測することに成功した。これにより、本デバイスが血管内における長期連続脳波モニタリングに適していることを実証した。

さらに、体内外間のワイヤレス通信とワイヤレス給電の最適化にも着手し、高周波無線・赤外線による通信方式や高周波・電磁誘導による給電方式の比較検討を進めた。加えて、これら技術の回路試作と動物実験による動作・性能評価を実施し、いずれの方式においても実験動物体内に埋め込んだ基板からワイヤレスで脳波信号を送信し体外で再生できる実験結果が得られた。

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)極細径血管内 BMI システムの開発

本研究課題の目的は、脳の各所を走る脳静脈に極細径血管内電極を留置し、ここから得られた脳波信号を BMI に活用する「極低侵襲血管内 BMI システム」を開発することである。その第一歩として、1)極細径血管内電極を安全に脳静脈に留置できること、2)留置した血管内電極から精度の高い脳波信号が得られること、3)長期にわたり脳波信号を検出できること、を検証するために大型動物実験を計画した。

R4 年度および R5 年度の実験により、ブタを用いた血管内脳波計測のメソッドを確立した。そのため、R6 年度は多チャンネル極細径血管内電極の留置実験を繰り返し、デバイスの視認性、柔軟性、遠位送達性、血管壁への密着性など、さまざまな要素の改良を行った。具体的には、合計 9 頭のブタの上矢状静脈洞に多チャンネル極細径血管内電極を留置し、ここから脳波の計測を行った。また、開発したデバイスの長期留置実験にも着手し、合計7頭のミニブタに留置を試み、そのうちの 4 頭はデバイス留置に成功した。留置したブタは、長期間(最長 49 日間)生存し、脳波計測が可能であることを確認した。

2)ヒト脳表静脈モデルを用いた極細径血管内 BMI システムの検証

R6 年度は R5 年度に作成した脳血管モデルの更なる改善を試みた。壁の構造や印刷方向などで試行錯誤を行い、良好な血管モデルの作成に成功した。脳実質のモデルも作成を試みたが、こちらは市販の脳モデルを使用する方針とした。このモデルに我々が作成した静脈モデルを設置し、デバイス誘導実験を行うことができるようになった。このモデルは上矢状静脈洞から脳表静脈への分岐部がうまく再現されており、同部位のカテーテル誘導を行うに有用なモデルであると判断した。

しかし、この 3D モデルの脳表静脈は、ヒトの静脈と比べて剛性が高く、再現性が不十分であった。そこで、光造形式の 3D プリンターではなく、より柔軟なシリコンを用いた血管モデルを作成するべく、Blue Practice 社と相談し、精緻な脳表静脈モデルを作成した。これは実臨床(脳神経外科手術)で触れる脳表静脈と酷似しており、このモデルを用いて、デバイス誘導のテストを実施できるようになった。今後は本モデルを活用し、脳表静脈留置のシミュレーションを行う方針とした。

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:

本プロジェクトにおいて目標として掲げる AI 支援型 BMI-CA の実現には、脳と外部を双方向に繋ぐインターフェースが必要となる。プロジェクト内には、侵襲型、極低侵襲型、非侵襲型、非接触型という 4 つの柱となる技術の開発が含まれ、それぞれが侵襲度とシグナルのトレードオフの関係にある。本課題においては極低侵襲型技術の開発を推進し、極低侵襲でありながら侵襲型に近いレベルで皮質脳波シグナルを記録ということに挑戦する。本研究では、視覚野に近い横静脈洞で血管内脳波を記録し、視覚的意味情報を解読することを目指す。脳内の意味づけは、初期視覚野(V1、V2、V3)に存在するとされ、ヒトでは物体分類に利用される可能性がある。血管内留置装置によって脳内領域にアクセスできるようになったことで、この装置による意味づけの可能

性は計り知れない。

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

血管内ステント電極と皮質硬膜下電極を組み合わせたヒツジのコホートは、R7 年 1 月に完了した。これには、制御されたセマンティッククラス(ヒツジ、イヌ、花)とさまざまな主要な視覚特徴(背景、画像スケール、顔と全身)を使用して視覚刺激を提示しながら、視覚野からの神経記録が得られた 6 頭のヒツジを含んでいる。

拡張インプランテーションのヒツジのコホートは、R7 年 4 月に開始される予定で、ここでは、セマンティッククラスのより大きなセットを研究し、動物が積極的に注意を払っているときに刺激が合図で提示される行動パラダイムを実装する。

2) 頭蓋内記録から神経情報を解読する機械学習

エンコーダとデコーダのみの LLM を備えたディープニューラルネットワークが、被験者固有の視覚的意味的復号化のために提案された。エンコーダは ECoG データを高レベルの神経表現にマッピングし、デコーダは表現を自然言語に解釈する。このプロジェクトでは、GPT-2.0 という自己回帰生成モデルがオープンで入手可能で、アーキテクチャが十分に文書化されていることから、デコーダとして利用した。この実験研究では、オープンボキャブラリーニューラルデコードのエンコーダとして、さまざまな深層学習アルゴリズムの探索に焦点を当てており、我々は 3 つのエンコーダを採用したが、それぞれがシーケンシャル依存関係をキャプチャする既知の機能を備えている:(1)時間領域に適用される 1 次元カーネル(1D CNN)を持つ畳み込みニューラルネットワーク。(2)空間的次元と時間的次元の両方に共同で対応するカスタマイズされたトランスフォーマー。(3)時間的因果関係に注意を払った単純化されたトランスフォーマー。3,000 の信号とテキストのペアを使用して、1 人の被験者($n = 1$)からのデータでモデルを訓練し、750 のテストサンプルでのパフォーマンスを評価した。

最もパフォーマンスの高いアルゴリズムは、6 人の被験者からのデータでさらにテストされた。個々の被験者モデル($n = 6$)は、よく知られている NLP メトリックを使用してトレーニングおよび評価された(意味的類似性のための BERTScore と WordNet 同義語マッチングを含む単語レベルの精度)。6 つのモデルすべてが、ディープラーニングを使用した ECoG 信号からのオープンボキャブラリービジュアルセマンティックデコードの実現可能性を検証した。

3) 血管内および硬膜外アレイを用いたヒツジの視覚野および運動野の刺激

Weijie Qi 博士は、R6 年 9 月に研究員としてプロジェクトに参加し、動物外科と電気生理学の専門知識をもたらした。彼の役割は、実験プロトコルの設計において極めて重要であった。

血管内電極は、移植前に製造され、インビトロ試験を受け、それらの電気化学的特性は、インピーダンス解析、電荷蓄積容量、および電圧過渡測定を使用して特徴付けられた。原子間力顕微鏡(AFM)と走査型電子顕微鏡(SEM)を用いた表面評価を行った。その結果、最適化された粗さプロファイル($R_q: 17.24 \pm 2.46$ nm, $R_a: 13.90 \pm 1.84$ nm)が示され、チャージインжекション効率が最大化された。さらに、運動皮質を活性化するための刺激プロトコルが開発され、パイロット研究でテストされ、誘発電位記録の成功が実証された。しかし、ステント電極自体からの記録は、電極の近接性によって

引き起こされたと思われる強い刺激アーティファクトのために不明瞭であった。

データ収集は現在進行中で、さらに2頭のヒツジの追加記録を予定している。この研究は、特に抗てんかん薬投与に反応して、興奮状態が変化する運動皮質の活動を評価することを目的としている。1ヵ月間にわたる薬物注射の繰り返しによる興奮性の動的变化を捉えるために、改良されたプロトコルが実施される予定である。2種類の投与量をテストし、各条件を3回の反復測定でモニターし、経時的な興奮性の変動を追跡する。

4) 光ブレイン・コンピュータ・インターフェース

ポスドク研究者は採用され、エンジニアは採用された。博士課程の学生が採用された。

フェーズ1 ハードウェア (ミニスコープ) 開発

マイルストーンを達成。我々は、ヒツジの脳皮質で視覚化可能なニューロンを取得するための適切なアデノウイルス血清型と発現戦略を見つけることは困難な作業になると予想していた。しかし、我々の最初の試みでは、蛍光 GCaMP6 コンストラクトの明確な発現が得られた。

ジョイスティックの解読を試みる前に、我々は重要な原理証明実験を行った。これは、げっ歯類が脳のニューロン信号のみを解読することによって自己摂食デバイスを活性化することを可能にした Chapin et al(1999)の実験を再現したものになる。我々は、前肢でタッチセンサを作動させることにより、マウスが自分自身を養うように訓練した。これに先立ち、カルシウムフルオロフォアは右一次運動皮質で発現し、ミニスコープが取り付けられており、自社開発のリアルタイムカルシウムイメージングデコーダを使用して、前肢の動きに関連する運動皮質ニューロン活動の特徴を抽象化することができた。タッチセンサが非アクティブになると、動物は光学 BCI を使用して自発的に摂食することができた。

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

研究開発課題5-3-1: 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) 埋込可能な小型バイオセンサの印刷技術による作製プロセスの構築

本研究チームは、運動時に発生する汗中の Na や K イオン濃度を測定するバイオセンサの製作技術を保有していたが、従来はイオン選択電極と参照電極を手作業で製作しており、小型・高精度な埋込型センサの実現には限界があった。そこで今年度は、製作工程を機械的な印刷プロセスへと移行し、高い再現性を持つセンサ製作に挑戦した。具体的には、ディスペンサ方式を導入し、Na センサの安定的な製作に取り組んだ。溶媒には従来のテトラヒドロフランに代え、乾燥性の安定したシクロヘキサノンを使用。さらに、室内湿度がセンサ応答に影響することが判明したため、低湿度環境での作製体制を整備した。これらの改善により、歩留まりは 50% から 92% に向上し、電極の小型化 (直径 3mm → 1mm) も達成された。結果として、R6 年度のマイルストーン「体液中のイオン濃度を測定可能な小型バイオセンサの設計試作」は達成されたと判断される。

2) センサ感度と安定性の電氣的評価技術の構築

本研究では、従来の汗中イオンセンサの短時間評価に加え、長期間計測を可能にするための改良を行った。まず、生体埋込型を見据えて液絡を持たないソリッドステート型参照電極(PVB 膜使用)を開発し、生理食塩水中での長時間電位変動をモニタリングした。その結果、電位変動は+5.1 mV/h から+0.7 mV/h まで低減され、安定性向上が確認された。また、実際の汗を用いた評価でも、2 時間の計測で Na や K イオンに対して十分な感度を示したが、電位の若干の変動が観察された。この原因として、センサ表面への夾雑物の付着や機械的柔軟性が挙げられ、今後は親水・疎水コーティングや抗血栓性材料による表面処理で安定性向上を図る予定である。これらの成果により、「血液や体液中でのセンサ感度検証と劣化メカニズムの推定」という R6 年度のマイルストーンは達成されたと評価される。

課題推進者: 植村隆文(大阪大学)

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

PM である金井は株式会社アラヤの代表取締役であるが、本プロジェクトを推進するにあたり、円滑なプロジェクトの推進を実現するために、国家プロジェクトによる研究開発で数多くの実績を持つ国際電気通信基礎技術研究所(ATR)に籍を設けることで、代表機関を ATR に設置した。

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、ATR の管理部門の協力体制を構築した。

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の推進を実施する PM 支援チームを ATR とアラヤの連携で組成し推進している。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は、ATR で兼任する立場を得て、代表機関として、金井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 PM チームとして行う。

作り込み期間を終え研究開発の開始時には、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体制を準備し、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、E3LSI の専門家と共に企画と対策を進める体制を構築しプロジェクトを推進してきた。

R3 年度の途中(2022 年 1 月)より、課題推進者の間での協同体制を強化するために、BA 開発に取り組む BA チームと XC 開発に取り組む X-Communication(XC)チームを組成し、それぞれにサブ PM(SPM)のポジションを設置し、BA・XC 開発における課題推進者のマイルストーンの設定を精査する体制を構築した。BA チームと XC チームにそれぞれ SPM を選任し、チーム内での密な議論の機会を設け、共同研究体制を強化した。この SPM 体制を取ることで、プロジェクトの目標達成に向けた、各課題推進者の R4 年度以降の目標の精度を高める体制を設けた。

R4 年度の途中(2022 年 8 月)より、5 つ目の研究開発項目として IoB 極低侵襲技術開発を追加した。この研究開発項目では、前人未到となる“極低侵襲の脳静脈血管への輸送デバイス”と“極低侵襲の脳静脈血管への長期留置型ブレインマシンインターフェース(BMI)デバイス”を同時に創出することを目的とし、研究開発を実施してきている。

R5 年度からは、R4 年度に研究開発項目5として極低侵襲 BMI の開発を開始したことを反映し、極低侵襲 BMI チームをつくり新たに SPM を任命し、チーム内での密なマネジメント体制を構築する。XC チームの SPM については、見るべき課題数が多いため、XC チームを XC ミドルウェアチームと XC コア技術チームに分割し、それぞれに SPM を設けた。

R5 年度に、国際連携によって本プロジェクトを加速するために、新たに海外の課題推進者

が加えた。

R6 年度より、これまで課題 4-1-1 内部で検討を進めてきた OpenCA の開発と社会的なムーブメントを起こすための準備に基づいて、OpenCA の開発及び国際的実証実験を加速させるため、新規の研究開発課題 4-3-1 として設定した。

研究開発項目5の取組である血管内脳波計測の研究開発の進捗により、血管内での生体計測の有用性が明らかになってきたことを受け、これを発展的に拡張するために、脳活動の結果を血流内の化学物質の変化として捉えることの有用性が見えてきた。これは目標1の他のプロジェクトでの体内 CA の開発と本プロジェクトをつなぐ技術となることも期待できる。そのため、脳活動を計測・解釈する上で、脳波などの電気的な計測手法に加えて、脳内や体内循環、または体外に分泌される多数の化学物質を特定し、リアルタイム計測することを可能とする技術開発への期待が高まってきた。このような観点より、血管内でのナトリウムイオンやカリウムイオンの濃度をリアルタイムで計測可能とする新規技術開発を R6 年度より開始する。これは研究開発課題5-3-1として設定している。

これまで X-Communication の情報入力技術として適切な技術が見つかっていなかったという課題があるが、R6 年度より和氣 Pf(研究開発課題 3-4-1)に参画してもらうことで、Holographic Optogenetics のアプローチをとって技術的な課題をクリアする目処が立つようになった。

一方で、研究開発課題2-2-1については、R5 年度をもって終了とすることを決定した。本プロジェクトでは AI 支援型 BMI-CA のスポーツ領域での活用を見据えた研究開発を進めてきたが、R5 年度までにデータ取得という観点では一定の成果が得られた。

重要事項の連絡・調整(運営会議の実施等)

R6 年度と同様に、金井 PM と課題推進者および必要に応じて参加するオブザーバーからなる運営会議を設置し、プロジェクト全体の活動に関わる議論および意思決定を行う。具体的には下記のような事案が議論の対象となる。

- プロジェクト運営上重要な連絡事項の共有
- 課題推進者間での研究開発内容の連携と調整
- 新規課題の設定と課題推進適任者の選定
- 成果報告書取りまとめなどのスケジュールの確認

R6 年度では、新規課題推進者(研究開発課題4-3-1、研究開発課題5-3-1、研究開発課題3-4-1)を適宜参画させ、技術のポートフォリオを拡充してきたが、R6 年度では、新規課題推進者の参画は予定していない。

管理運営上の重要事項の連絡等は、代表機関および PMO メンバーより、メールおよび Slack により随時行う。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)

研究開発機関における研究の進捗状況の把握は、必要に応じて柔軟に形式を変更して実施しており、R6 年度も引き続き、週次ミーティング、PM と Pf の 1on1、PM/SPM 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て実施する。公開シン

ポジウムや定期的なサイトビジットも実施することで、プロジェクト外への発信にも力を入れている。本格的な外部発信を実現することで、多くの潜在的な人材にいち早く本プロジェクトの目標と意義を伝える活動を行う。

R3 年度より、PM と各課題推進者との 1on1 を随時実施してきており、各課題の進捗確認だけでなく、新規の研究開発計画の創出や研究開発における困りごとなどの拾い上げに重要な役割を果たしてきている。

R6 年 9 月には、大阪大学産業科学研究所を訪問し、本プロジェクトに関連するプレゼンテーションとデモンストレーションを国際アドバイザリーボード委員に対して実施した。この際、プロジェクトの進捗状況や今後の構想についても議論を行い、国際的な視点からの意見を収集することで研究計画の精度向上を図った。

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。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。

年度内の計画として、フェーズ 2 に向けたヒアリングを実施する予定であり、各研究課題推進者から現状の研究成果と課題についての意見を収集し、今後の研究開発のビジョン設計を支援する。

サイトビジットについては、課題推進者間で各研究拠点を訪問することを予定している。R6 年度も引き続き、個別のオンラインミーティングを開くなど、課題推進者の円滑な研究開発の開始に向けた状況を確認するとともに、課題遂行計画について議論しフィードバックを与える。

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。R6 年度では、新規課題推進者（研究開発課題 4-3-1、研究開発課題 5-3-1、研究開発課題 3-4-1）を適宜参画させ、技術のポートフォリオを拡充してきた。

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

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。

R6 度では本プロジェクトの成果の社会実装に向けたスタートアップの創出の可能性や、技術の事業化に向けた取り組みも始めている。具体的には、研究開発課題 1-1-1 で取り組む簡易脳波計や研究開発課題 1-1-2 の Science Robotics 誌に掲載されたエクソスケルトンによるピアノ演奏の能力拡張などの事業化についての議論を進めてきた。そして、研究開発課題 3-2-2、5-1-1、5-1-2 で推進する極低侵襲 BMI の技術を社会に展開していくためのスタートアップ設立の計画が始まっており、これに向けた事業計画や資金計画についての議論も進めている。また、資金調達の実現に向けて VC との面談も PM が適宜設定し投資家の視点からのフィードバックを得て、資金調達の準備も進めている。また研究開発課題 2-3-1 もサイレントスピーチに関連したスタートアップを立ち上げている。研究開発課題 3-3-1 も米国でスタートアップを立ち上げ 5000 万ドルの資金調達を既に実現している。このように、R6 年度では、ハイインパクトな論文などを通じた学術研究のみならず、成果を社会につなげるための事業化の推進を本格的に進めることができた。

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。R6 年度には、プロジェクトリーダーである金井 PM は、UNESCO のニューロテクノロジー倫理勧告の作成に外部専門家として参画したこともあり、我が国のニューロテクノロジーにおける国際ルールメイキングにおける存在感を示すことができた。

ELSI の取り組み

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っている。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.2 を公表し、国際規範への反映を実現した。「ブレインテック ガイドブック vol.2 -責任ある製品開発の手引き-」は、一般消費者向けの BMI/ブレインテック製品の開発・販売に携わる事業者や研究者を対象に、実質的な指針を示す内容として日英二言語で公開された。本ガイドブックおよびエビデンスブックは、

OECD が発行する「Neurotechnology Toolkit」に正式に収載され、国際的な規範文書への反映という当初の目的を達成する成果となった。UNESCO が策定を進めているニューロテクノロジーの倫理勧告においても、金井 PM が草案作成メンバーとして参画し、本活動の国際的な波及効果を一層高める結果となっている。

(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。研究開発課題4-1-1 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、目的とコミュニケーション対象に応じて企画運営を行っている。

上記体制の元、R6 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

R5 年度に引き続き、プロジェクトの目標と具体的な取組について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。特に R6 年度はホームページのリニューアル改修を行った。コンセプトをよりデザインに反映させたサイトビジュアル、PI 以外のプロジェクト参画メンバーも掲載できる仕様の変更。記事を掲載する「アクティビテ

ィ」にてイベント開催報告や研究者インタビューなどのコンテンツの発信も開始した。

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。

R6 年度は神経科学大会 2024、サイエンスアゴラ、みんなの脳世界でのブース出展を通して、トークイベントなどの発信に近い形態ではなく、直接、専門家や市民とのコミュニケーションを取る機会に注力した。また、渋谷芸術祭では「NeuWorld」のポスターをミヤシタパークに展示。より日常に身近に本プロジェクトやムーンショット目標 1 を浸透させる施策を実施した。トークイベントとしては 3 月に一般向けとしては初の海外イベントとしてサンフランシスコのジャパントウンで現地の研究者やアーティストと「NeuWorld」を題材に未来について対話するパネルディスカッションを行い海外でのコミュニケーション活動も始めている。

(4) データマネジメントに関する取り組み

本プロジェクトにおいては、課題推進者間での共同研究開発を行っていくため、データの共有が必要となる。侵襲型 BMI の実証実験に使われた動物実験のデータについては、データ解析と AI 構築を効率的に実施するため、課題推進者間で分業体制を築いて推進する。個人データ等の観点から懸念の少ない動物実験データについては、論文発表のタイミングでオープンサイエンスのプラットフォームを利用して、適宜公開を行っていく。

非侵襲・非接触の実験からは人の脳波データ・非接触データが蓄積し、それらを最大限活用するために参加する研究グループとの連携が重要となる。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。匿名性を担保するために、データ管理の仕組みとして次の体制を用意する。

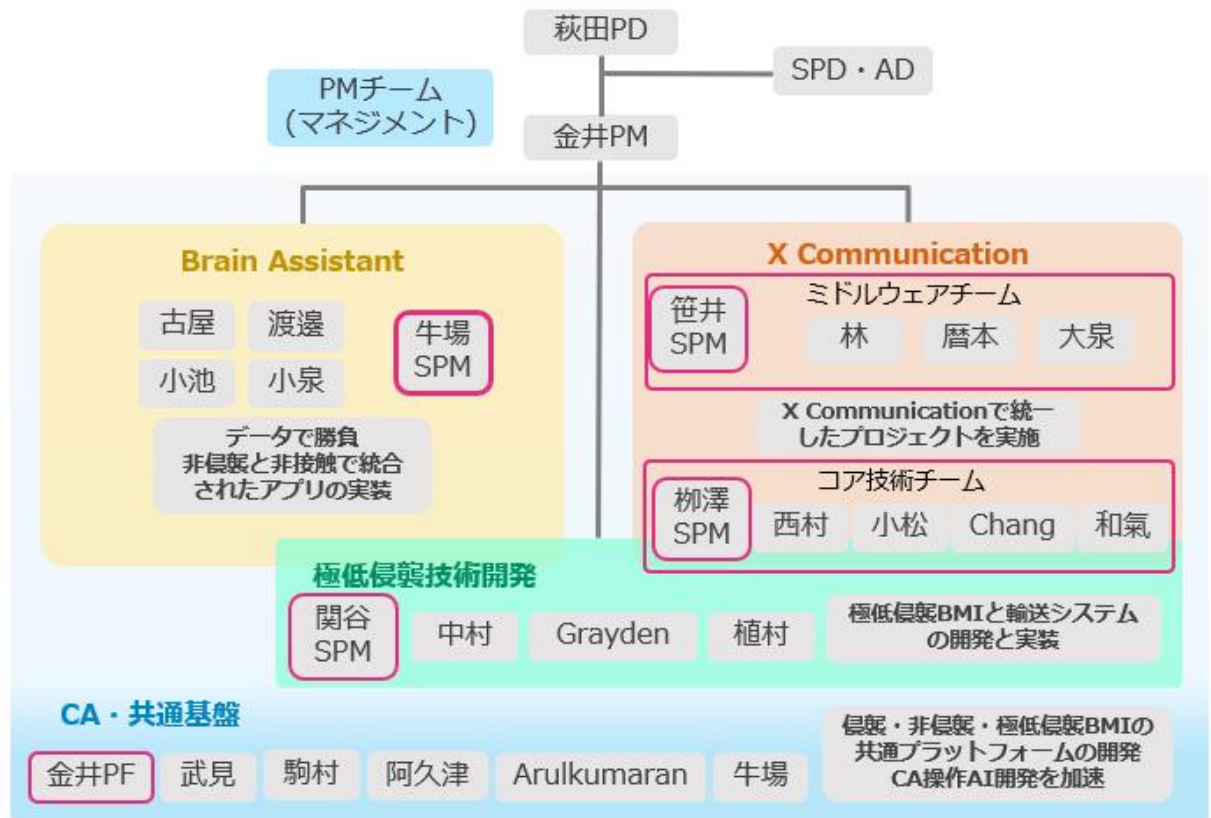
社会実験は、各機関の倫理規定に沿って連結可能匿名化による管理
プロジェクト終了後は照合表の廃棄による連結不可能匿名化
被験者からの申し出があった場合に、バックデート式でのデータ消去機構
専従管理者を擁立、別の監査役を設置

実験参加者に対しては次のポイントを明確にした上で、ご理解いただいた上で同意を得た上で実験を進める。

- 研究利用の目的の明示
- 学術目的 DB への匿名状態での登録の承認
- DB 登録後の申し出においては、バックデートでのデータ消去が不可能であることの承認
- 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 設計を実施する。

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	1	2	1	0
登録件数	0	0	0	0
合計(出願 件数)	1	2	1	0

会議発表数			
	国内	国際	総数
招待講演	48	37	85
口頭発表	31	50	81
ポスター発 表	26	39	65
合計	105	126	231

原著論文数(※proceedingsを含む)			
	国内	国際	総数
件数	2	46	48
(うち、査読 有)	0	37	37

その他著作物数(総説、書籍など)			
	国内	国際	総数
総説	5	0	5
書籍	2	2	4
その他	2	0	2
合計	9	2	11

受賞件数		
国内	国際	総数
7	6	13

プレスリリース件数
7

報道件数
21

ワークショップ等、アウト リーチ件数
5