

ムーンショット目標1 金井プロジェクト Internet of Brains (IoB) とは？

PROJECT

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

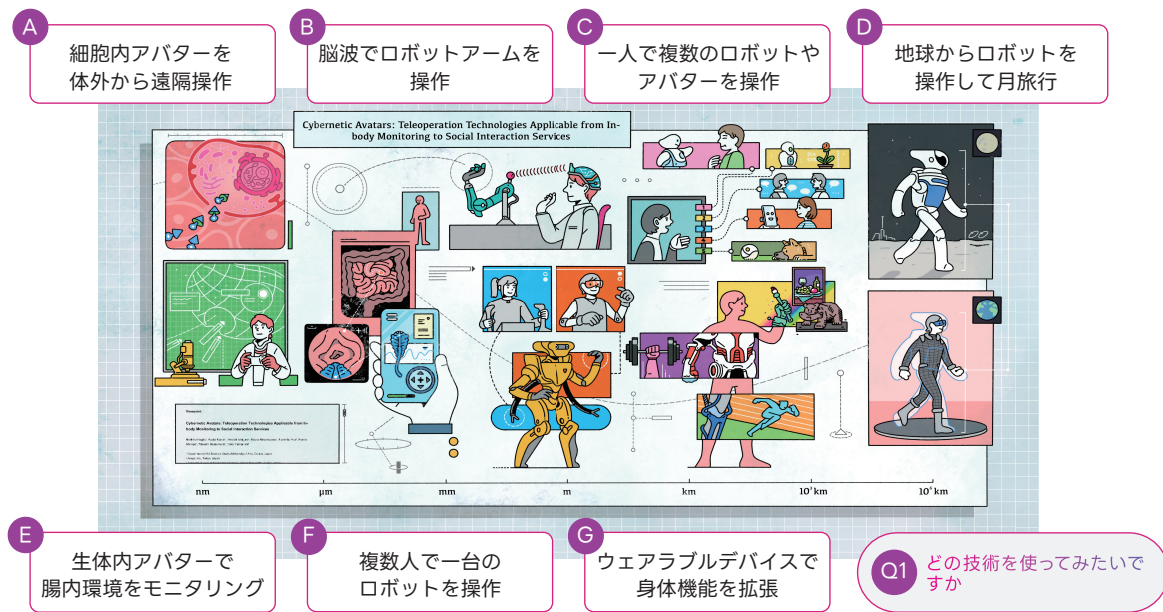
ムーンショット目標1は

「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」することを目指して、サイバネティック・アバター（CA）を利用することで、誰もが自由に身体能力や認知能力を拡張し、生活に活用できる技術開発と社会への普及を目指します。



プロジェクトマネージャー
金井 良太

株式会社アラヤ 代表取締役
株式会社国際電気通信基礎技術研究所
経営企画・イノベーション戦略部 担当部長



ムーンショット目標1のサイバネティック・アバター（CA）の将来イメージ図

さまざまな Communication チャンネルでの発信活動



Internet of Brains
IoB 公式 WEB サイト



公式 X (旧 Twitter)



公式 YouTube

社会とのコミュニケーション基盤プロジェクト 「Neu World」

Neu World は IoB によるコミュニケーションプロジェクトです。

IoB では、脳や AI の最先端研究から新しい生活の実現を目指して研究を進めていますが、研究と生活の間には研究発表だけでは埋められないコミュニケーションの隔たりがあります。

そこで、作家・クリエイター、研究者、市民とともに SF 作品を制作し、作品を起点に未来について対話し、次につながるアクションを創造していくプロジェクトとして Neu World を始めました。

Neu world



「Neu World」公式サイト



非侵襲BMIによる精神・身体状態の推定

慶應義塾大学理工学部 牛場潤一

産産

IoBインターフェイスでは、さまざまなデバイスを活用して脳活動から思考や精神状態を抽出する技術を開発し、アプリとして社会実装することで、ブレイン・マシン・インターフェース (BMI) 技術の普及を目標としています。具体的には、ヘッドホンのようなガジェット型脳波センサーや、携帯電話のカメラ映像などを組み合わせて、日常環境で思考や精神状態を短時間抽出できるアルゴリズムを開発しています。これらを用いて、自分では意識できない日々の体調変化を見える化して自己調節を可能にするアプリケーションや、自分の意図が外部表出できない状態や状況にある利用者の意思伝達を支援するアプリケーションを作成することで、BMI技術を社会に普及させることを目指しています。牛場グループでは特に、小型・ワイヤレス・迅速装着が可能な脳波センサーと、実環境で混入する多種多様なノイズを自動分離するAIフィルタを開発し、「BMIのある日常」の創出を推進しています。



小型・ワイヤレス・迅速装着が可能な脳波センサー

いつでもどこでも、簡便・正確に脳波を測る

自分では分かっていても、心や体が思ったように動いてくれない・加齢、事故、けがなどのライフイベントによって精神や神経の機能に不調をきたすことは誰にでもあります。私たちが開発しているウェアラブル型の脳波センサーは、そうした精神・神経の悩みごとを可視化したり、自己調節を可能にしたりしようとしています。

ヘッドフォンを装着するように、誰でも簡単に（しかも医学的に正しく）脳波を記録できるよう、独自に開発した筐体にはさまざまな工夫がされています。スタイリッシュな見た目で、街中で脳波計測していても違和感のないプロダクト・デザイン。耳裏と頬に自然とフィットする接地電極とリファレンス電極。身体の運動や感覚を司る脳領域や、認知と覚醒を司る脳領域である「セントラル領域」に電極がロケーションするよう、長さ調整が可能なヘッドバンド部。その他、電極の保持部分にパネ機構を備え、スポンジや独自乳液の利用によって「たったの30秒で」「30 kΩ以下の皮膚電極間インピーダンスを」「どんな人でも」実現することができました。

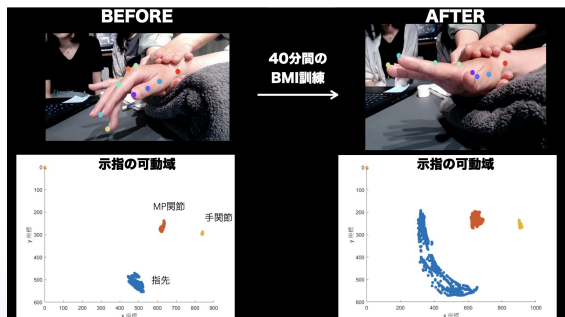
この革新的技術によって、科学的に確からしさを伴ったウェアラブル型ブレイン・コンピュータ・インターフェースの一般利用性が一気に広がったと思います。

脳のセルフケア

脳卒中を発症し、医療機関での治療を終えて社会復帰した後もなお、症状固定したまひが残り、生活に苦労されている方々がおられます。私たちが新しく開発している脳波センサーとタブレットPCの内蔵したAIを組み合わせることで、「運動しようとしているときの脳内回路の活動の様子」をリアルタイムに可視化。その活動を自己調節する訓練をすることで、力の入れ方や抜き方を学習することができ、手指の可動域の大幅な改善を認めました。

これまでは、身体のコントローラである「脳」の様子を直接捉えることは困難でしたが、これからはこの脳波センサーを使って直接、脳から出る運動シグナルの様子を見える化し、トレーニングすることができるようになるでしょう。

現在は、脳卒中だけではなくジストニアやパーキンソン病など、他疾患への適応拡大を目指した取り組みを推進しています。



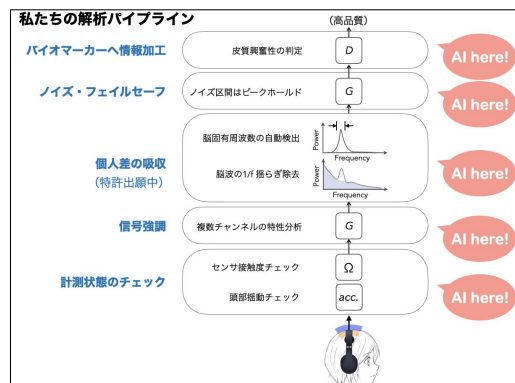
脳卒中後のまひが残存する方に、脳波センサーを使って運動シグナルを出し方を訓練した結果

今後の展望

脳や身体に制約によって暮らしに困難を抱えている方を、AIを駆使したBMI技術やアバター操作技術によって支えていける未来社会を実現します。そのために、適切な審査・承認プロセスを経て、私が創業・兼務しているBMIメーカー（株）LIFESCAPESやその他の協力企業へ知財継承を進め、国内外において持続可能な形で事業化を推進します。こうした取り組みを通じて、脳とAIのサイエンスを深め、科学と事業の調和に関して見識のある次世代人材を育成していきます。

あらゆるノイズから脳信号を保護するAI技術

脳波は数マイクロボルトという微弱な信号のため、さまざまな理由で多様なノイズが混入します。私たちは「ノイズ」を科学し、その1つ1つにAIを適用して全自動で信号をクレンジング（洗浄）する技術を開発。リアルワールド環境であっても頭皮脳波を生理学品質で分析可能なAIエンジンを利用しています。



ノイズが混入するプロセスごとに最適化した機械学習や統計モデリングを活用して信号品質を担保

脳波でアバターを走らせ、競争する！

開発した脳波センサーとAI技術の性能検証を目的として、大阪・関西万博では10日間にわたって2,200名超の来場者に「脳波でアバターを操作する」ゲーム体験を提供しました。全ての方にワンタッチ・30秒で脳波計測が可能だったことは技術面での収穫でしたが、脳波でアバターを操作する未来体験を通じて、「障害のあるなしに関わらず、誰もが繋がれる社会の実現」にBMI技術が貢献することを広く知っていただくことができました。



2025年8月20日から10日にわたって体験展示したBCIブレインピックの模様



牛場潤一

慶應義塾大学理工学部 生命情報学科・教授

1978年7月8日生まれ、東京都出身。2001年、慶應義塾大学理工学部卒。2004年に博士（工学）を取得。同年、生命情報学科に助手として着任。以降、専任講師（'07～）、准教授（'12～）、基礎科学・基盤工学インスティテュート主任研究員（'14～'18）を経て、2022年より教授。研究成果活用企業株式会社LIFESCAPES（'19～）の代表取締役社長を兼務。The BCI Research Award 2024, 2019, 2017, 2013, 2012, 2010 Top 10-12 Nominees、文部科学省「平成27年度若手科学者賞（ブレイン・マシン・インターフェースによる神経医療研究）」ほか、受賞。





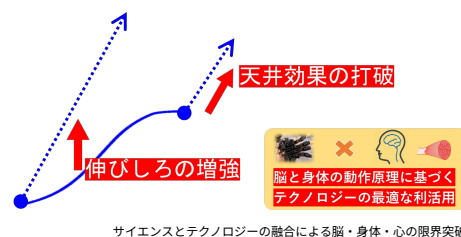
非侵襲BMIによる精神・身体状態の調節

ソニーコンピュータサイエンス研究所 東京リサーチ リサーチディレクター 古屋晋一

強調

私たちの能力の限界は、何が決めるのでしょうか？もちろん、生まれつきの遺伝によって決まる部分も少なくありません。しかし、日常生活や高度なトレーニングの中で感じる限界を決める要因は、これまで十分に明らかにされてきませんでした。

私たちのプロジェクトは、脳・心・身体を突破し、誰もが創造性を具現化する喜びを享受できる未来社会の実現を目指して、生体を傷つけない（非侵襲）脳機能評価技術や、ロボティクスや神経科学に基づくトレーニングシステムの開発に取り組んできました。自分の脳や身体をより良く知ることによって、私たちが「限界」だと思っていた能力には、方法によってはまだ向上し得る「伸びしろ」があることを発見しました。



サイエンスとテクノロジーの融合による脳・身体・心の限界突破

技能の限界を突破するための脳への書き込み技術

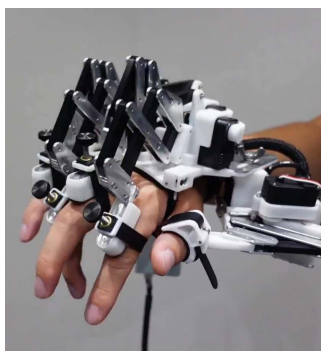
ピアニストやアスリート、外科医など、長年練習を重ねてきた熟練者でも、ある時点で技能の向上が停滞する「天井効果」が問題になります。従来は練習量を増やすことで突破を試みられてきましたが、過剰な練習は怪我や故障のリスクを伴い、また効果が十分でないことも報告されてきました。さらに、高速かつ複雑な動きは、実際に体験できないことが多く、言葉だけの指導では身体で覚えることが難しいという課題がありました。

- 指を独立して、高速で動かせる外骨格ロボットを装着し、自分自身では不可能な複雑かつ高速な手指運動を熟練したピアニスト約100名が体験。
- まず自宅で通常の課題を2週間練習し、技能が頭打ちの状態を作った後、外骨格ロボットを用いたトレーニングを実施。
- ロボット装着のトレーニングにより、複雑かつ高速な演奏課題を、正確性を保ちながら限界より速く演奏できるようになった。
- 効果はトレーニングを行った手だけでなく、反対の手にも見られた。
- 手指の筋力・敏捷性や知覚機能の変化は認められなかったが、運動野（大脳皮質）の可塑性（脳の機能変化）が確認された。
- 受動体験が脳の運動野に、高速複雑動作の技能を書き込んだことを示唆。

この研究は「天井効果＝不変の限界」ではなく、質の高い体験があれば限界を乗り越えられるという考えを提示しています。音楽だけでなく、スポーツ、外科手術などでの技能向上、さらには過剰練習による怪我の予防にも応用が期待されます。将来的には、こうした外骨格ロボットや仮想現実（VR）技術を活用した新しいトレーニングプログラムの普及や、人間の創造性・身体能力の制約を乗り越える教育・技能獲得手法としての展開が期待されます。



成果はScience Robotics誌の表紙を飾った他、The Times、BBC Newsなどで紹介



脳の調子を推定する技術

脳の調子は日によって異なります。牛場SPMのグループが開発したヘッドホン型脳波計を用いて、我々のピアノアカデミーの受講生であるジュニアピアニストの演奏前の準備脳波を、1年間という長期間に渡って計測しました。

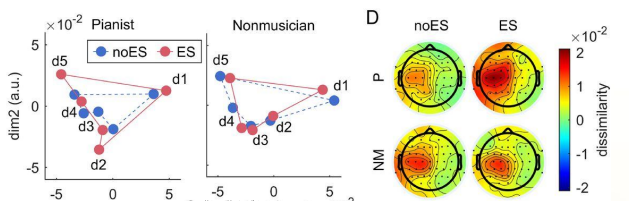
脳波信号から、1/fゆらぎと呼ばれる成分を抽出して解析した結果、パフォーマンスの日間の違いを予測することに成功しました。これは本人に無自覚の調子の良し悪しを、非侵襲の脳機能計測とデータサイエンス技術によって推定できる可能性を示唆しています。



国際コンクール入賞歴のあるアカデミー受講生

脳の状態のコンディショニング技術

「身体の調子が悪い」と感じることは、身体を動かすことが職業であるアスリートや音楽家、外科医などには致命的な問題です。特に、巧緻な動作を実施する際に、指の動きがもつれてしまい、失敗してしまうことは、時に医療・文化・産業の質を落としかねない問題です。その背後には、各指から脳に送られる力触覚の情報が、脳の中で、それぞれの指の部屋に正しく送られない仕組みがあることや、各指からの情報が混線しないようにするための脳コンディショニング技術として、知覚できない微弱な電気刺激を末梢神経に与えることが有効であることを発見しました。



（左図）感覚の情報が脳内で混線し、指の動きがもつれる仕組み（上図）それぞれの指の脳内の部屋の距離が末梢電気刺激によって離れる仕組みを熟練者において発見



成果はThe Journal of Neuroscience誌に掲載

今後の展望

脳の状態から調子の良し悪しを予測できるということは、BMI技術を用いることで脳の調子の良し悪しを整えられる「Peaking」ができる可能性があり、そのためのシステムのプロトタイプを開発しました。今後はその効果を検証し、脳の状態を整えることが可能な世の中の実現を目指します。

また、私たちの身体・心の限界だと思っていたものは、サイエンスやテクノロジーによって突破可能であることが明らかになりました。その一つの手段である外骨格ロボットを全身に拡張し、より高度で複雑な技能の限界の突破を実現することや、長年培われたきた暗黙知を他者に転写したり、時代を超えて継承し続けたりする技術の実現に取り組んでいきます。

スポーツ選手にとつてのスポーツ科学やナショナルトレーニングセンターがあるように、パフォーマンスアーティストの科学やトレーニングセンターの確立にも取り組み、文化の持続可能な発展を目指します。

プロジェクトメンバー

平野雅人／Pei-Cheng Shih／西岡勇人／小笠原祐樹／汐谷祥子／塩木ももこ



古屋晋一

ソニーコンピュータサイエンス研究所 東京 リサーチディレクター

ソニーコンピュータサイエンス研究所 東京リサーチ リサーチディレクター、一般社団法人NeuroPiano代表理事、ハノーファー音楽演劇メディア大学 客員教授、東京藝術大学・京都市立芸術大学・桐朋学園大学 非常勤講師、東京音楽大学 特任教授、大阪大学基礎工学部、人間科学研究所を経て、医学系研究科にて博士（医学）を取得。ミネソタ大学 神経科学部、ハノーファー音楽演劇メディア大学 音楽生理学・音楽家臨床研究所、上智大学理工学部にて勤務した後、現職。研究の主な受賞歴に、ドイツ研究振興会（DFG）Heisenberg Fellowship、Klein Vogelbach Prize、Alexander von Humboldt財団Postdoctoral Fellowship、文部科学省 卓越研究員、日本学術振興会賞など。主な演奏活動として、Ernest Bloch音楽祭出演（アメリカ）、KOBE国際音楽コンクール入賞など。主な著書・訳書に、ピアニストの脳を科学する、ピアニストならだれでも知っておきたい「からだ」のこと。





非接触情報からの気分の推定

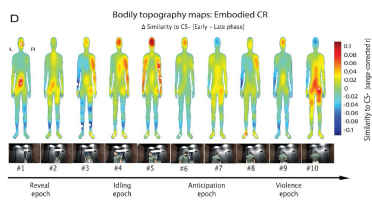
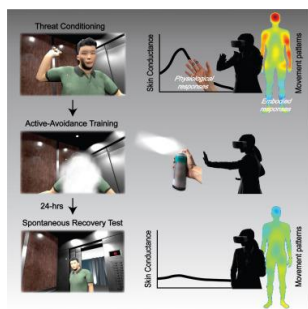
ソニーコンピュータサイエンス研究所 リサーチャー 小泉愛

概要

本研究開発は、JSTムーショット「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）のもと、非接触の身体情報から気分や心身状態を推定する基盤技術と、社会実装に向けた実証を進めています。心拍・発汗・瞳孔・眼球運動・表情・身体動揺などを、実験室と日常生活の双方でウェアラブルやスマホを用いて計測し、AIで現在の状態を推定・近い将来を予測して、予定調整やセルフケアなどの具体的なフィードバックにつなげます。特に、事故後のPTSD予防など支援が届きにくい高リスク層に焦点を当て、医療・福祉機関と連携しつつ、匿名アバターを活用した安心なコミュニティや、仮想空間での認知行動トレーニングの提供も検証します。実験機材や熟練者に依存せず、誰もが日常の中でBMI（ブレイン・マシン・インターフェース）の恩恵を受けられる社会の実現を目指します。

個人と集団の気分を身体運動から推定

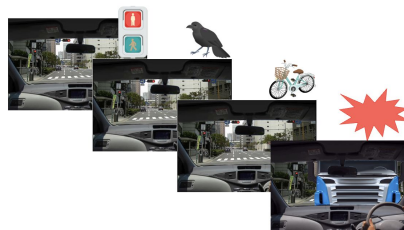
私たちは、身体の動きだけから心の状態をそっと読み解く技術を開発しています。まず、VR環境での行動・生体反応を解析し、恐怖や緊張を反映する運動パターンを抽出し、VRの3D空間で恐怖学習の後に自らの身ぶりで回避操作を練習すると、翌日（24時間後）も発汗反応などの生理指標や動きの指標が有意に低下することを示しました（iScience 2024）。能動的な身体運動による訓練は、観察のみや従来の「恐怖の消去」よりも効果の持続が見られた点が特徴です。この研究は、スマートフォンをハンドルに見立てて回避操作を練習できる試作アプリも検討中です（効果検証はこれから実施します）。こうした試みを通し、将来的には、個人の不調の兆しを、日常の活動を妨げず非接触・匿名性配慮で見守れることを目指します。



恐怖や緊張を運動パターンから抽出 (iScience 2024)

身体と脳から解き明かす恐怖記憶の推移

恐怖体験は「忘れられない」と同時に「思い出せない」という矛盾した現象を生みます。私たちは、恐怖体験当日は連合記憶によって恐怖の対象が広がり、翌日以降は体験の時系列が統合されることで恐怖の範囲がせままることを示しました。この経日変化は、扁桃体-腹内側前頭前野回路に対して、海馬と背外側前頭前野が時系列情報を伝える働きのバランスが切り替わることで説明できます。さらに、PTSDリスクの高い不安傾向者ではこの切り替えが弱く、時系列の取り込み低下が「（連合は）忘れられない／（順序は）思い出せない」症状に関与する可能性があります。これらの成果はNature Communications (2024) に報告しており、ムーショットの目標に沿って実装へつなぐため、現在は柳澤SPMとともに頭蓋内計測での詳細検証を進めています。



忘れられない

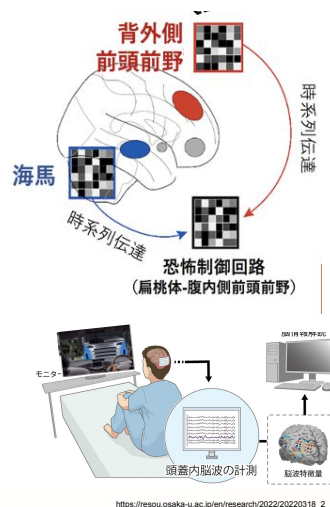
思い出せない



自転車を聞くたびに恐怖がよみがえってしまう



車に衝突するまでに何がどのような順番で起きたのか思い出せない



fMRIを用いた研究成果 (Nature Comm 2024) と頭蓋内計測を用いた検証内容 (進行中)

今後の展望

まずは学校や職場での小さなパイロットから、非接触・匿名性配慮で「そっと見守る」仕組みを試し、気分のゆらぎを可視化して休憩の提案や呼吸・回避トレーニングなど簡単なフィードバックにつなげます。医療・福祉・デザインのみならず共創し、公平性と説明性を検証しながら、PTSD予防や女性のメンタルヘルスなど支援が必要な領域へも広げ、「BMIのある日常」の実装を着実に進めています。

小泉愛

リサーチャー
ニューヨーク州立大学卒業（心理学・映画学ダブルメジャー）、東京大学大学院 人文社会系研究科で博士号（心理）取得。コロニア大学心理学部、情報通信研究機構 脳情報通信融合研究センター 研究員を経て、2019年1月よりソニーコンピュータサイエンス研究所リサーチャー。現在、国際電気通信基礎技術研究所 連携研究員、科学技術振興機構 さきがけ研究員。



Maria Alemany Gonzalez
ポスドク研究員



Amirmahmoud Houshmand Chatroudi
ポスドク研究員



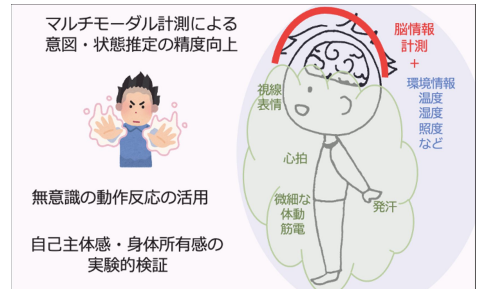
人間中心BMI

—使用者の意識的・無意識的過程の活用—

早稲田大学・理工学術院・教授 渡邊克巳

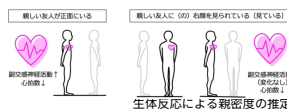
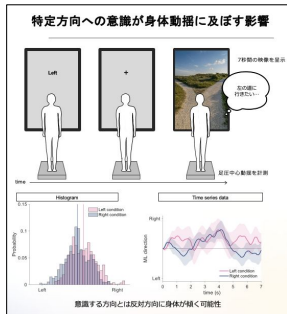
意識

本研究では、BMI技術やサイバネティック・アバター（CA）関連技術に適用できる心身状態の推定に関する科学的知見の蓄積と、身体表面に現れる潜在的情報の活用に関する研究開発を行います。特に、非接触表面情報で解読可能な意図や精神状態の限界と射程を明確にし、脳情報と相補的に組み合わせることで、性能の向上と日常環境での活用可能性の拡大を目指します。また、複数操作者と複数CAが存在する未来を想定した、身体所有感・自己主体感・パフォーマンスなどの関係を明らかにする研究を行い、BMI技術やCAの個人・集団の両方でのユーザーエクスペリエンスの計測および向上の科学的基盤を構築します。



研究開発スタンス：思わず出てしまう反応とその過程の活用

無意識的な身体反応・行動反応の活用



人間は自分では何もしない（あるいはしないようにしている）と思っている時でも、意図や感情などが、顔や身体、行動に現れています。本テーマでは、そのような無意識的な反応をノイズとは捉えず、人間を自由にするBMI技術を補完する重要な情報として扱い、より自由自在な状態を実現する技術につながる科学的知見を蓄積しています。

例えば「左に行きたいと思っている時には、無意識的に重心が右側に偏る」「道徳的に悪いことをした人の顔が目の前に提示されると、重心が変化する」「親しい友人が自分の正面にいるか右側にいるかで、心拍と副交感神経活動の活動が変わる」などの知見は、人間が知らず知らず発信している情報で、これらをBMI情報と組み合わせて使うことで、意図・状態推定の精度向上が期待できます。

主体感エンジニアリングに向けた研究基盤構築

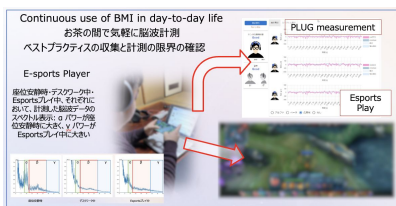
目標1のキーコンセプトの1つとして、サイバネティック・アバター（CA）があります。自分の分身として物理世界・仮想世界に関わらず活動する存在ですが、描く未来の中には「複数の操作者が単一のCAを」「1人の操作者が複数のCAを」さらには「複数の操作者が複数のCAを」使っている世界があります。生産性や創造性の向上といった目的もありますが、それらが真に人々の喜びや価値につながるためには、自分がやっている感じ（主体感）や自分が参加している感じ（貢献感）の維持や向上が必要になります。

認知科学や脳科学などの分野で、個人の主体感の研究は多く積み上げられてきましたが、複数の操作者や複数のCAの研究はほとんど行われてきませんでした。そこで、我々は、複数操作者と複数CAが存在する未来を想定した、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チーム横断型研究開発を行っています。

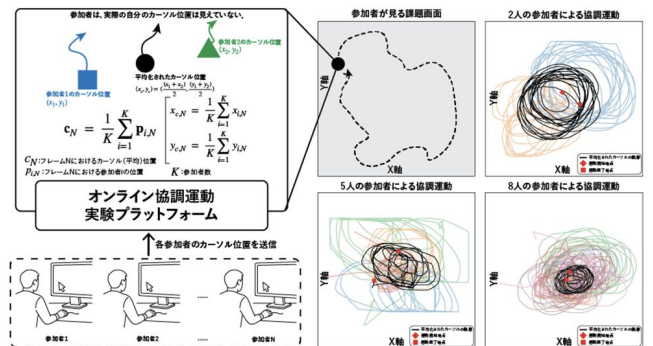
例えば、1つのカーソルでなるべく滑らかな円を描くという課題を、多くの人でやるとしましょう。個々の参加者は全員のカーソルの位置の平均の位置しか見えません。このような状況で、「課題のパフォーマンスがどのように変わるか」「チームとしてうまくいったか」「自分はどれくらい貢献したか」「他の人の入力に対して協調的に対応できるか」などを細かく分析していくことで、複数CA操作・複数被験者参加の特性と限界、展開可能性などを明らかにしようとしています。特に、複数操作者の自己主体感・主観的貢献度を維持したまま、各個人の実際の貢献を最適化する方法を探っています。また、このような知見はAIによるサポートをCA操作やBMI技術に、どのような時にどれくらい導入すべきかという問題に対しても指針を与える可能性があります。

日常生活でのBMI

BMIに限らず新しい技術が世の中に浸透していくには、技術の進歩だけでなく、生活の中での使われ方や社会としての受け入れられ方が重要です。「使ってみて初めて分かることもある」という立場から、本テーマでは実際に長期間計測し続けることで、日常生活の中で計測するのは難しいと諦めるのではなく、「計測できるのはどのような時なのか」また「どのような使い方をすればより役にたつ使い方になるのか」などをボトムアップに発見していくことを進めています。



お茶の間でオンラインゲームをやっている時の脳波



集団共同作業実験プラットフォームの構築

今後の展望

生産性や創造性を向上させながら、個人の幸福感を維持する（あるいは向上する）ことを想定した場合に、CA技術やBMI技術を使っている使用者の「主観的体験」をどのように計測し、それを社会や個人にフィードバックするべきかを明らかにするには、技術の進展だけではなく「使用者（人間）の意識的・無意識的過程研究」が重要だと考えています。今後も、ムーショットで達成される未来を先取りした形での、個人や集団の「気持ち」を大切にしながら研究を進めていきます。

笠原 俊一

ソニーコンピュータサイエンス研究所・リサーチャー

高田 真一

沖縄科学技術大学院大学 身体性認知科学ユニット 博士課程



渡邊 克巳

早稲田大学・理工学術院・教授

2001年カリフォルニア工科大学計算科学神経システム専攻終了（PhD）。東京大学先端科学技術研究センター准教授などを経て、現職。2020年よりムーショット事業に参画。専門分野は、認知科学・心理学（認知心理学）、神経科学。人間の心という主観的な現象に対して、認知科学・心理学・脳神経科学などの最先端の方法を使って、心を作り出している意識的・無意識的過程の科学的解明、認知科学のその他の研究分野への拡張、それらの知見の産学連携を通じた社会への還元を目指した研究を行っている。

向井 香環

名古屋大学・情報科学研究科・助教

白井 理沙子

早稲田大学・理工学術院・次席研究員

その他にも多くの方の協力を頂いています



X Communication

株式会社アラヤ CRO 兼 研究開発部 部長 / ムーンショット目標1金井プロジェクトSPM
笹井俊太郎

語彙

手術のいらない脳波・生体信号を大規模に収集することで、利用者の「意図」を正確に読み解くAIを開発し、自律的に生活を支援するシステムを開発します。この技術により、身体操作に困難を感じる方を含め、誰もが制約から解放される社会を目指します。

大規模脳波・生体信号データ

実用精度の脳情報解読

開発プラットフォーム



脳波を用いた発話解読におけるスケーリング則の発見

脳波計は代表的な非侵襲計測手法であり、ウェアラブル化も可能なため、多くの研究で Brain Machine Interface のためのセンシングデバイスとして用いられてきました。しかし脳波は頭皮上から測定を行うため、その信号には体動や周辺環境による雑音が多く含まれます。そのため、言葉のような自由度の高い脳情報の解読に対しての実用は難しいとされてきました。

最近になって、LLMなどのAIの精度は、AIの訓練に利用するデータ量に伴って向上するスケーリング則と呼ばれる経験則が存在することがわかってきました。しかし脳波の解読においても、スケーリング則が同じように働くことはわかっていませんでした。これに対してX Communicationチーム（株式会社アラヤ）は、同一の被験者から記録した400時間を超える文章読み上げ中のEEGデータを使ってAIを訓練することで、EEGデータから512個の発話セグメントを60-80%の精度で正答させることに成功しました。

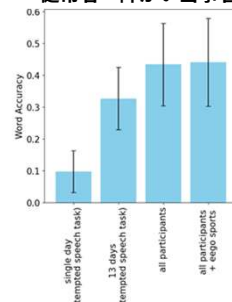
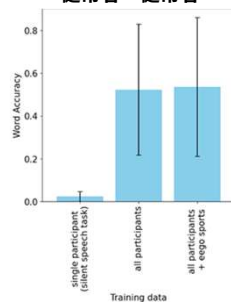
スケーリング則による大規模データ基盤の創出～他者の脳波データでの障がい当事者の発話解析精度向上～

スケーリング則の発見は、大規模なデータを蓄積することによって、脳波を用いた高精度で高自由度の脳情報解読ができることを示唆しています。一方で、脳波データは被験者間のばらつきが非常に大きく、別の被験者から取得されたデータや、そのデータによって訓練されたAIが、他の被験者に転用可能であるかどうかはわかっていませんでした。これに対して本研究は、たとえる被験者で取ったデータが少なくとも、他の被験者で取得したデータを合わせて利用することによって、発話解読の精度を向上させることができることを明らかにしました。さらにこの結果は、健康者と発話・身体動作がほとんどできない重度の神経疾患患者との間でも成立することがわかりました。このことは、大規模脳波データ基盤を構築することによって、BMI利用開始時の負担を大きく減らせることを示唆しています。

他被験者データを利用した精度向上

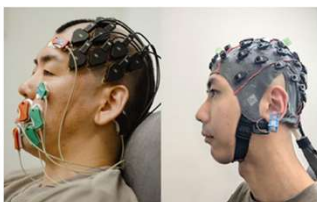
健康者→健康者

健康者→障がい当事者

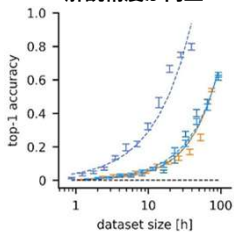


※日常での普段使いを想定し、簡易なデバイスであるeEEGrid（耳周りの16電極）で計測した結果

超高密度脳波計 高密度脳波計

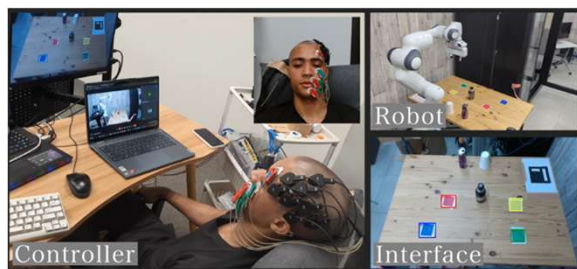


訓練データに伴い解読精度が向上



超高密度脳波計とAIによるロボットアームの遠隔操作実験

X Communicationチームと強化学習チーム（株式会社アラヤ）は、超高密度脳波計とAIを利用してロボットアームを遠隔で操作することに成功しました。本研究では、非侵襲型の超高密度脳波計を使用して、色を発話したときの脳波データをAIに学習させ、脳波による単語の識別を可能にしました。また、模倣学習によってロボットアームの遠隔操作を実現しました。



今後の展望

現時点では、ロバクのように、（声は出さずとも）言葉を話するような動作を行わなければ、高い解読精度の達成には至っていません。また、体動や環境雑音が大い環境下でも解読ができるかについては、まだわかっていません。今後は発話動作を必要とせず、体動や環境雑音が大い環境下でも安定した解読を可能にするミドルウェア技術の開発に取り組んでいます。



笹井俊太郎

株式会社アラヤ CRO 兼 研究開発部 部長 / ムーンショット目標1金井プロジェクトSPM

2013年に東京大学大学院教育学研究科にてPhD取得（早期修了）。渡米し、University of Wisconsin-Madison医学部研究員として、意識の神経メカニズムの研究に従事。意識の統合情報理論の提唱者と共に理論の構築と検証に取り組む。意識の神経基盤に対応する脳部位の特定に寄与する成果を挙げたのち、2020年11月にアラヤに入社し、2021年10月より現職。意識理論を応用した「心をつなげるBMI」の社会実装を目指し、神経科学とAIの融合領域における基礎研究と、それを応用した新たなニューロテックプロダクトの開発を進めている。

井上 昌和

株式会社アラヤ チーフリサーチャー

留岡 健一

株式会社アラヤ リサーチャー

島山 恵璃

株式会社アラヤ 研究スタッフ

喜多 勇哉

株式会社アラヤ 研究スタッフ/BMIパイロット

西岡 智子

株式会社アラヤ 研究スタッフ

佐藤 仁智

株式会社アラヤ 研究スタッフ/BMIパイロット

小野 克樹

株式会社アラヤ 研究スタッフ/BMIパイロット

堀口 維里優

株式会社アラヤ インターン

Nah Nathania

株式会社アラヤ インターン



Internet of Brains

国立研究開発法人 科学技術振興機構 ムーンショット型研究開発事業 / 株式会社国際電気通信基礎技術研究所
Copyright: Advanced Telecommunications Research Institute International (ATR)



脳波制御支援ロボット

Dr. Kai Arulkumaran

音源

アラヤの強化学習チームは、介助ロボット、ブレイン・ロボット・インターフェース、マルチエージェントシステムの研究に取り組んでいます。ムーンショット型研究の一環として、未来の社会の技術を構想し、脳波の計測・解読、制御理論、強化学習、マルチエージェントアルゴリズムなどを活用し、肢体不自由者や高齢者を支援する介助ロボットの研究開発を進めています。本チームでは、単に支援するだけでなく、利用者が自立感を持ち、社会的な交流を行い、さらには社会に貢献できるようになることを目的としています。そのために、機械学習、ロボティクス、神経科学、そしてヒューマン・コンピュータ・インタラクション (HCI) の交差領域において、学際的な研究を行っています。

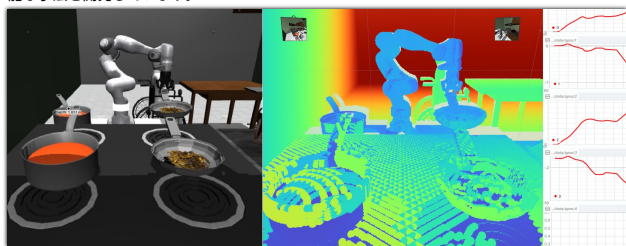


キッチン作業支援ロボットシステム



キッチン作業支援ロボットシステムを実現するために、「アシストキッチン環境」と呼ばれる仮想キッチンを構築しています。この場面では、障害のある方と仮定した2人のユーザーが存在し、それぞれに1台のモバイルロボットアームが割り当てられています。ユーザーは、脳波計測およびイトラッカーを用いてロボットを操作し、食卓と一緒にセッティングすることを課題としています。具体的には、ユーザーは視線によって、ロボットに移動してほしい場所や、取得・配膳してほしいアイテムを指定します。次に、ユーザーにはロボットに実施してほしい行動（食事を配膳するなど）を想像してもらい、脳波をもとにした機械学習アルゴリズムで意図解読を行い、ロボットに指示を与えるという仕組みも考えられます。

これを実現するには、ロボット工学環境の構築、ユーザーフレンドリーなインターフェースの設計、ユーザーの脳波をリアルタイムで解読するAIモデルの学習、そしてこれらすべてを連携させるソフトウェアの開発が必要です。ユーザーに高い自由度を持たせるため、食器棚、コップ、グラス、コンロなどのアイテム操作も可能としています。さらに、ユーザーから指示される多様な課題に対応し、ロボットがこうした多様なタスクを実行できるようにするために、コンピュータービジョン、機械学習、ロボティクスの最新技術を展開しながら組み合わせています。現在、シミュレーター上で実験を行っていますが、現実世界でも活用可能な手法を開発しています。



今後の展望

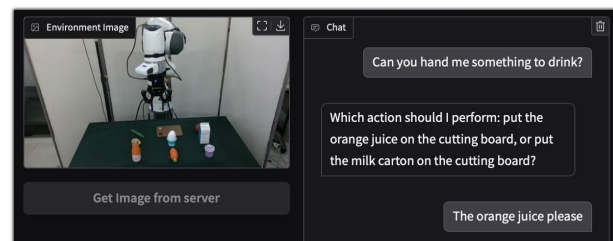
最新の研究成果である「アシストキッチン環境」は現在シミュレーション上で開発中ですが、実世界への展開を視野に入れた技術開発を進めています。AIとロボティクスのアルゴリズムは実世界でも活用できるため、次のステップとして、ユーザーがロボットを操作して目の前の物体を操作できる複合現実 (MR) インターフェースの開発を目指しています。共に世界をより良い方向に変えていきましょう！

学際的なアプローチ

これらの分野における研究開発には、真に学際的なアプローチが必要だと考えられます。技術的な観点からは、人間の脳波や他の生体信号を十分効率的に分析できるアルゴリズムと、汎用性、効率性、安全性を兼ね備えたロボット制御装置が必要です。さらに、現実世界でリアルタイムに機能しなければなりません。

人間中心の視点からは、ユーザーのニーズや要望を理解することが重要です。例えば、障害のある方や高齢者は日常生活の支援を必要としているかもしれませんが、押し付けられることは望んでいません。本研究では、技術的な要求とユーザーのニーズを踏まえ、より積極的に社会に参加できるよう、エンパワメントを図ることを目的としています。

家庭内のロボット



本研究では、家事などの日常作業を支援するために、ロボットを家庭内に導入することでも検討しています。この場合、ロボットの細かい制御には同じアルゴリズムを用いますが、ユーザーが言語を用いてロボットに指示できることも目的としています。さらに、チャットボットから派生した技術を活用することで、ユーザーはテキストや画像入力を使い、ロボットとの会話を通じて指示を出すことができるシステムも想定しています。

チャットインターフェース以外にも、この技術は次の2つの重要な機能の実現に活用されています。1つ目は、ロボットが指示に応じて自分の行動を計画できるようにすることです。具体的には、「テーブルを片付けてほしい」といった指示に対して、ロボット制御アルゴリズムが順番に実行可能なサブタスク（「テーブルに移動」、「汚れたお皿を積む」、「台所に運ぶ」など）に分割することを指します。2つ目は、ユーザーの指示が曖昧な場合に、それをユーザーに確認し、会話を通じて明らかにできる機能です。例えば、ロボットに飲み物を持ってきてもらうよう指示した際に、冷蔵庫に複数あるドリンクのうちどれを持ってくるかを判断するために、ユーザーに確認できるようにすることです。



Kai Arulkumaran

Visiting Researcher, Araya Inc.

Kaiはアラヤの訪問研究員（元：強化学習チームリーダー）であり、IoBムーンショットの主任研究者（PI）です。アラヤ入社前は、ケンブリッジ大学でコンピュータサイエンスの修士号を取得し、インペリアル・カレッジ・ロンドンでバイオエンジニアリングの修士号と博士号を取得しました。博士課程在籍中は、Google DeepMind、Facebook AI Research、Twitter Cortex、Microsoft Researchで勤務経験があります。

Dan Ogawa Lillrank

Chief Researcher, Araya Inc.

Rousslan Fernand Julien Dossa

Chief Researcher, Araya Inc.

Shogo Akiyama

Senior Researcher, Araya Inc.

Marina Di Vincenzo

Senior Researcher, Araya Inc.

Shivakanth Sujit

Senior Researcher, Araya Inc.

Hannah Kodama Douglas

Senior Researcher, Araya Inc.

Luca Nunziante

Senior Researcher, Araya Inc.





脳内情報表現の解読と数理基盤技術の開発

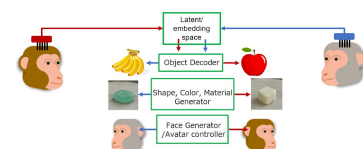
産業技術総合研究所・人間情報インタラクション研究部門・主任研究員 林 隆介

通読

本研究開発課題では、発話や四肢機能等に重度の身体的・精神的障害を抱える人が、侵襲的な脳情報計測により、それ以外の方法では実現が難しい意思伝達と運動補助を行うためのIoB要素技術を開発しています。目指すのは、複数モダリティでの意思伝達を可能にするマルチモーダルBMIを利用した多彩なコミュニケーションと、CA操作による、人間機能の拡張技術の実現です。コア技術として、脳と脳の間で直接意思疎通する技術（X-Communication）の実現に向けた、新規AI開発と数理理論の構築ならびに、その実験的検証に取り組みました。情報量の多い「神経細胞レベルの電気活動信号」からなる大規模データと、マルチモーダル／生成AIを活用した脳情報解読技術の開発において進展がありました。このほか、マルチモーダルな脳機能活動信号の解析を、サルーヒト横断的に実施し、概念・質感・感情・感性などの情報を脳と脳、脳とAI間で伝達するためのBMI要素技術開発に成果がありました。

言葉では伝えきれない「質感・感性・感情」を脳情報で伝える技術開発研究

- 物体のカテゴリだけでなく、色、テクスチャ、形、材質を伝える。
 - 感情をCAを介して伝える。
 - 将来的には、芸術的インスピレーション、イメージネーションなど感性を伝える基盤技術開発をめざす。
- ミドルウェア開発
- AI/数理基盤技術の開発
 - MS内オープンソース神経データベース構築
 - X-Communicationの動物実験によるPoF



高次視覚野神経情報に基づく画像復号化技術

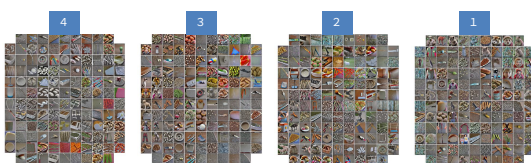
非ヒト霊長類（マカクサル）から神経細胞レベルの活動電位を大規模に同時計測するシステム構築を進めてきました。これまでに2頭の実験動物に、512chからなる慢性記録電極を、物体認識処理を担う高次視覚野に埋め込み、長期間にわたり数百～1千個規模の神経細胞群の電気的活動を、覚醒下で同時記録することに成功しました。高次視覚野の慢性記録としては世界でも最大規模のデータ記録を実現しています。これまでに、静止画像（数万枚）ならびに、27時間分の動画観察中の神経活動を記録し、IoB開発のためのデータ基盤を確立しました。

画像一言語の共通情報表現を学習したマルチモーダルAIの基盤モデル（CLIP）を活用し、脳と基盤AIとの間の相互の情報変換を教師あり学習（データ間で「対応表」がある学習）する情報処理アーキテクチャを開発しました。開発システムを画像生成AIに組み込むことで、わずか500msの間の脳情報に基づき、実験動物が見ていた画像を高精度に再構成することが可能になりました。見ていた画像の色、テクスチャ、形、カテゴリを忠実に再構成することができます。また、電極一つ一つから記録される神経データとAIの情報表現との対応を解くことで、電極間隔（400μm）の空間解像度と高い時間解像度（1ms）で脳機能マップを可視化することも可能になりました。

世界最大規模の非ヒト霊長類・高次視覚野の慢性神経活動記録システム

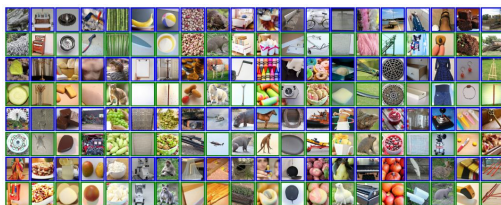


電極間隔(400μm)の空間解像度で機能マップの可視化に成功



奇数段：提示画像→
偶数段：再構成画像→

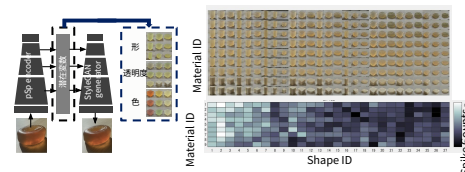
色、テクスチャ、
形、カテゴリ
の高精度解読に成功



(Fei, ..., Nakada, ..., Hayashi, arXiv 2025)

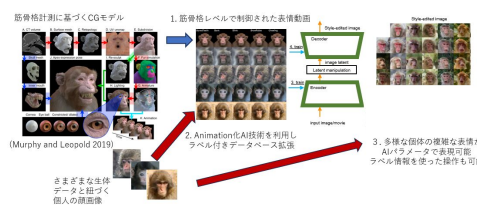
神経情報に基づく物体の半透明感の解読

言葉で伝えることが難しい情報として、物体の形や材質感が挙げられます。特に物体の透明・不透明感は、われわれの認知の仕方自体が未解明です。さまざまな光透過度をもつ物体画像データを学習した生成AIを用いて、異なる形と透明度をもつ画像を生成し、神経記録を行うことで、形と半透明感の違いによって変化する神経応答を世界にさがりかけて計測することに成功しました。そして、神経データをAIに学習させることで、透明感のヒト評定値を予測することに成功しました(Nakada, Nakamura, Hayashi, 2024)。



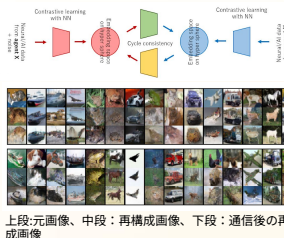
生成AIを利用したCA開発

画像生成AIを使って精緻なサルアバターを作成し、高速カメラで撮影した表情をリアルタイムでアバターに反映するシステムを構築しました。研究成果は、国際学術雑誌に投稿中です(Igaue, ..., Hayashi, under review)。現在、脳から記録した感情・表情情報に基づくアバター制御の研究を進めています。



異システム間の情報変換技術

脳と脳、脳とAIのように異なるシステム間で情報通信を行う場合、情報表現を「翻訳」する必要があります。金井PMと共同で、脳情報の「対応表」がなくとも、互いの「翻訳」ができる脳情報通信技術を開発しました。検証計算機実験では、伝達された情報だけから、画像を高精度に再構成できることを示しました(Nakamura,...,Kanai, Hayashi, 2024; 特許出願番号：2022-152153)。



上段:元画像、中段:再構成画像、下段:通信後の再構成画像

今後の展望

非ヒト霊長類から記録した脳・神経情報を用いたX-Communicationによる人間機能の拡張研究をさらに加速させます。言葉で伝えきれない物体の質感、感性や感情を伝える技術を実現するため、マルチモーダル／生成AIを活用したIoB研究を推進すると共に、脳の情報処理を精緻にモデル化したデジタル脳の構築により、脳情報の解読精度を高める研究を進めます。また、アバター操作が引き起こす認知や脳機能の変化の検証、脳内のネットワーク活動を制御する手法にも取り組み、IoBに展開したいと考えています。



林 隆介
主任研究員

仲田穂子
産総研特別研究員

穴倉基文
産総研特別研究員

中村大樹
旧メンバー

清川宏暁
旧メンバー



間接的生体情報を用いた 人間状態推定とその応用

東京科学大学 教授 小池英樹

編纂

人間の姿勢や運動状態の推定は、リハビリテーションや技能習得支援など多くの分野で重要な技術であり、将来的には脳波（EEG）を用いた高次の状態推定が期待されているものの、現段階ではノイズ耐性やリアルタイム性に課題があり、実用化には至っていない。そこで小池研究室では、筋電（EMG）・視線・足圧といった、より安定的かつ取得容易な間接的生体情報に着目し、これらを用いた姿勢推定技術を構築する（図1）。その中でも本研究では足圧センサに焦点を当て、小型の装着型センサから得られる情報のみで高精度な三次元姿勢推定手法を開発することで、高額で場所の制約がある光学ベースのデバイスに依存せず、現場での実用に足るリアルタイムかつ汎用的な推論システムの確立を目指す。

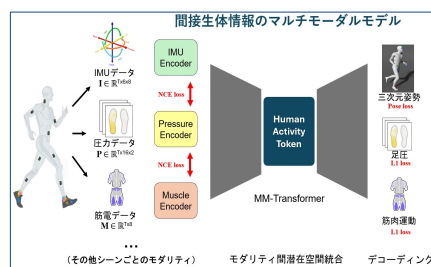
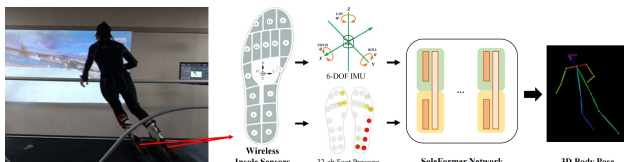


図1 研究全体の概要

SolePoser: 足圧から姿勢へ

本研究では、インソール型足圧センサのみを利用し、軽量かつリアルタイムに全身の3次元姿勢を推定する手法「SolePoser」を提案した。従来のモーションキャプチャは高価なカメラ設備や多数のIMU装着を必要とし、日常利用やスポーツ現場への適用に制約があった。一方で本手法は、インソールセンサから得た足裏の圧力分布の情報を入力とし、Dual Stream Transformer「SoleFormer」によって全身17関節の3次元姿勢を推定する。特に、出力姿勢からIMU値・足圧を再構成するDual Cycle Lossと、IMU・圧力間の関係性を強調するCross Attentionを導入することで、物理的一貫性を保ち高精度な推定を実現している。



さらに、本研究では足圧による姿勢推定の評価のために、新たに大規模なマルチモーダルデータセットを構築した。スポーツに特化したSP-Sデータセットでは、スキー・スノーボード・ゴルフスイング・卓球など高難度の動作を収録し、28名の被験者から計606Kフレームを得た。日常動作に焦点を当てたSP-Eデータセットでは、歩行・スクワットなどを対象に10名（平均年齢25.9歳）から302Kフレームを収集した。両者を合わせると計908Kフレームに及び、既存のTMMデータセットを大きく超える多様性と規模を実現した。実験の結果、スポーツ動作データで平均関節位置誤差が65.3mm、日常動作で51.0mmを達成し、推定角度誤差が29.7°および22.3°であった。推論速度は1フレームあたり11ms（@RTX3090Ti）であり、実時間応用に十分可能である。

Network	Inference Time (ms)	Results w/o Elbow and Wrist (13 Joints)						Results w/ Elbow and Wrist (17 Joints)					
		SP-S	SP-E	TMM100 [40]	MPJPE	MPJAE	MPJAE	SP-S	SP-E	TMM100 [40]	MPJPE	MPJAE	MPJAE
PoseFormer (RGB) [76]	22.5	63.8	29.9	49.2	22.2	42.7	19.0	65.2	31.3	48.0	21.4	46.9	20.4
IMUPoser (2 IMUs) [31]	10.2	85.0	39.1	80.2	37.4	X	X	103.7	47.9	99.9	46.1	X	X
AvatarPoser (3 IMUs) [18]	6.1	74.6	37.6	69.7	31.3	X	X	70.7	34.9	66.7	30.0	X	X
Simple Foot IK [8]	5.0	119.3	49.3	100.7	46.7	X	X	135.3	56.6	118.5	53.3	X	X
Direct Transformer	8.7	72.2	35.3	69.5	31.0	X	X	87.6	40.3	77.4	36.6	X	X
PressNet (Inversed) [40]	38.9	87.3	40.9	82.8	38.2	54.3	25.8	94.4	44.6	89.9	41.9	59.7	27.5
SoleFormer (Pressure Only)	10.2	81.7	39.0	79.9	37.6	40.0	18.3	90.4	42.4	86.3	40.1	48.5	22.0
SoleFormer w/o CA	10.9	65.4	30.2	51.0	22.1	X	X	71.5	35.2	70.2	31.1	X	X
SoleFormer (Ours)	11.0	65.3	29.7	51.0	22.3	X	X	70.9	34.6	67.1	30.3	X	X

比較実験において、RGBカメラベースのPoseFormerや、2〜3個のIMUを用いるIMUPoser・AvatarPoserを勝る性能を示し、足圧のみを利用した既存法PressNetを大幅に上回った。また、アブレーション実験では、足圧入力を加えることでIMUのみの場合に比べて関節の平均位置誤差17mm・角度誤差8°改善された。さらにDual Cycle LossとCross Attentionの導入が精度向上に寄与することも確認した。実環境での評価として、アルペンスキーや自然環境下での歩行における検証を行った。ここでは、17個のIMUを用いたXsensや、胸部・頭部カメラを用いた第三者視点映像を比較対象とした。その結果、SolePoserは6個のIMUを用いるTransPoseやPIPIに次ぐ性能を示し、RGBベース手法PoseFormerよりもスキー動作では優位、歩行動作では関節位置誤差0.4mmの差と同等の精度を達成した。

以上の成果を国際学会のUIST2024にて登壇発表を行った^[1]。

- [1] Erwin Wu, Rawal Khirdkar, Hideki Koike, Kris Kitani, "SolePoser: Full Body Pose Estimation using a Single Pair of Insole Sensor", ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST) 2024.
[2] Shino Ito, Yichen Peng, Erwin Wu, Hideki Koike, "SoleLoadEvaluator: A Real-Time Feedback System for Walking Posture with Anterior Load Using Insole Sensors", Augmented Humans (AH) 2025.
[3] Toshihiro Hirano, Yuki Tabei, Yichen Peng, Chen-Chieh Liao, Erwin Wu, Hideki Koike, "SkiTechCoach: A Multimodal Alpine Skiing Dataset with 3D Body Pose, Sole Pressure, and Expert Coaching", ACM Multimedia (MM) 2025.

今後の展望

これまで技能獲得のために熟練者の外観、つまり身体姿勢を真似することが中心であったが、今後は、脳波、筋電、視線といった生体情報を知ること重要である。現在は、こうした生体情報の計測のコストが大きいが、これを画像処理やAI技術を用いて簡易に計測、あるいは推定する技術が重要となる。

Peng Yichen
東京科学大学 特任助教

Wu Erwin
東京科学大学 特任准教授

小池英樹
東京科学大学 教授

東京科学大学（旧東京工業大学）情報理工学院教授。1991年東京大学博士課程修了。工学博士。ヒューマン・コンピュータ・インタラクション(HCI)、特に画像認識を利用したVision-based HCIの研究に従事。最近では、JST CREST, JST ASPIREなどの研究代表者として、コンピュータビジョン、AI、VR/ARを用いたスポーツアシスト、熟練ビュースト、外科医のための技能獲得支援に関する研究を実施。IEEE論文賞、日本ソフトウェア学会基礎研究賞、情報処理学会フロンティア。

Liao Chen-Chieh
東京科学大学 研究員



脳を制御する理論

東京大学大学院 総合文化研究科 広域科学専攻 准教授
大泉 匡史 (Masafumi Oizumi)

意識

脳は自分自身を制御するシステムだと考えられます。その制御の仕組みを解き明かすことができれば、脳を望む状態へ導くことが可能になるかもしれません。我々は現在、脳の制御性の解明に取り組んでいます。例えば覚醒時の制御性と睡眠時・疲労時の制御性は著しく違うはずで、このような制御性の違いに基づいて脳の状態を分類できるのかを調べるのが本研究の目標の一つです。脳の制御性がわかると、今度は脳を希望の状態に近づけるにはどうしたら良いか、最適な制御は何かという問題にアプローチできます。これが本研究が目指すもう一つの方向性です。

脳がどのように制御できるかを探る

1. 摂動によるシステム同定 (Ogino et al, bioRxiv, 2025) : 脳の制御を実現するには、脳活動の時間変化、ダイナミクスの特徴をなるべく正確にモデル化・推定する必要があります。この正確な推定には、単に脳活動を観測するだけでなく「摂動入力」を与えて、脳活動の応答を観測することが有効であることが分かっています。これは、本来隠れていて見えないダイナミクスの特徴が、摂動によって見えるようになることが理由です (図1)。我々は実際に、どのような摂動入力を加えれば、最も同定精度を向上させることができるかを調べる理論を構築しました。この理論に基づくと、摂動入力の振動数をシステムが持つ固有の振動数と同じにしたときに最も効率的にシステム同定が可能になります。

これらの結果は、経頭蓋磁気刺激法(TMS)等の脳刺激を用いた脳状態の弁別の有効性も裏付けています。今後、実データでの有効な摂動入力の同定などの検証を行っています。

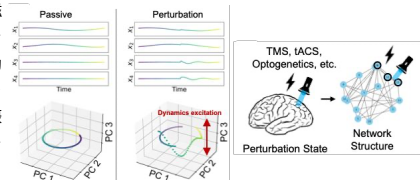


図1 刺激による見えないダイナミクスの動起

2. 脳の制御性による状態の分類 (Shikauchi et al, bioRxiv, 2025) : 脳は、安静状態から運動活動への移行のように、状態間を遷移する制御システムとみなすことができます。本研究では、可制御性グラミアンという制御指標を導入することで、脳の状態の制御性を推定する簡単な方法を提案しました (図2)。この方法は、制御理論に基づき、インパルス刺激のときに可制御性グラミアンが時系列データXのGram行列として表されることを用いたものです。可制御性グラミアンを導入することで、状態の制御のしやすさ (グラミアン固有値の大きさ) と制御の方向 (グラミアンの固有ベクトルの方向) を評価でき、脳の制御性がどの方向に、どれだけ制御できるかという2つの軸で完全に記述することが可能となります。データ解析では運動状態および安静状態における経頭蓋磁気刺激法(TMS)-脳波(EEG)のデータに提案手法を適用し、計6種類の脳の状態を制御性の観点から特徴付けました。結果、一部の脳状態の制御方向性に違いがあることが分かりました。

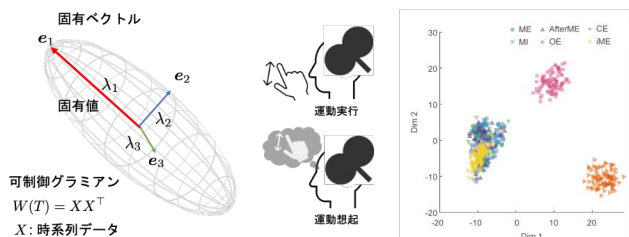


図2 可制御グラミアンの固有値分解イメージと運動タスクにおける分類性のプロット

成果のまとめ

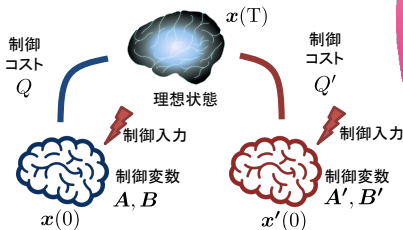
本研究では、以下の成果を得ることができました。

- [1] システム同定における摂動入力の最適なデザイン (Ogino et al, bioRxiv, 2025)
- [2] インパルス刺激で可制御性グラミアンを推定する簡単な方法の提案 → EEGデータに適用して運動状態弁別 (Shikauchi et al, bioRxiv, 2025)
- [3] 確率的なシステムにおける制御コストの定量化 → ヒトfMRIデータに適用して様々なタスク状態への遷移コストの定量化と貢献する領域の同定 (Kamiya et al, Journal of Neuroscience, 2023)
- [4] 状態維持コストと神経振動を結び関係式の導出 → サルECoGデータに適用して覚醒状態と麻酔状態の特徴付け (Sekizawa et al, Physical Review X, 2024)

今後の展望

これまで構築してきた理論的な枠組みを実際の神経データへ適用し、脳の状態、例えば疲労度合い、覚醒レベルなどを制御性の観点から弁別することができるかを検証していきます。また、将来的には、特定の状態に脳を誘導するための最適な介入方法や、異常な制御性を修正する臨床応用にもつながると考えています。

$$x(t+1) = Ax(t) + Bu(t) + \xi(t)$$



ゆらぎありの制御コストを解明する

3. 確率的制御コストの定量化 (Kamiya et al, Journal of Neuroscience, 2023) : 制御のコストを定量化することは、脳が如何に制御されるか、そして脳の状態を制御する際に、どの脳領域が最も重要であるかを明らかにするために必要です。脳の制御性を明らかにする上での一つの困難は、脳活動データはノイズが大きく、そのダイナミクスは確率的であることです。従来研究では、この確率的なゆらぎが無視されてきましたが、これでは制御コストの正確な推定は困難です。本研究では、神経ダイナミクスの確率的なゆらぎを考慮した制御コストの新しい定量化枠組みを構築しました。確率的制御コストの解析的表現を確立し、そのコストを平均の制御コストと共分散の制御コストに分解できることを示しました。提案した指標の有用性は、ヒトの全脳イメージングデータを用いて確認し、安静状態から7つの認知課題状態への制御において、重要な脳領域を同定しました。結果、これらの制御を実現する際には、下位視覚野が平均の制御において共通して重要な役割を果たし、一方で後帯状皮質が共分散の制御において共通して重要な役割を果たすことを見出しました。

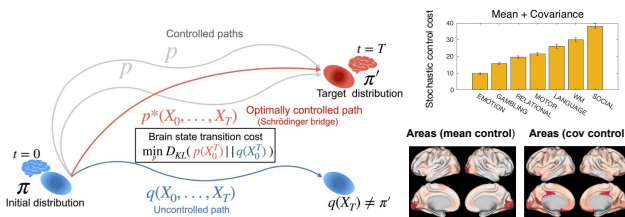


図3 脳状態遷移と確率システムにおける制御コスト

4. 熱力学的維持コスト (Sekizawa et al, Physical Review X, 2024) : 脳が現在の状態を別の状態に変化させる際に制御コストがかかるが、現在の状態を維持し続けることにも制御コストがかかります。この維持コストは確率熱力学を応用することで定量化することが可能になります。我々は、脳の神経振動と確率熱力学で使用されるエントロピー生成率の関係を導きました。まず、全体のエントロピー生成率のうち確率分布の維持に関係する「維持エントロピー生成率」が、独立した正の寄与として振動表現で分解できることを数理的に示しました (図4)。具体的には、振動数の2乗と振幅をかけたものの和がエントロピー生成と一致します。つまり、振動数が速い波ほど維持コストがかかります。また、提案手法をサルの脳波データに適用したところ、覚醒状態と麻酔状態では振動の寄与に明確な違いが見られました。具体的には、麻酔状態ではデルタ波の寄与が増え、シータ波などの高周波成分の寄与は減少していました。これにより、脳の状態変化に伴う神経振動の特徴を、熱力学的な散逸や情報処理の限界という物理的視点から解釈できることが示されました。

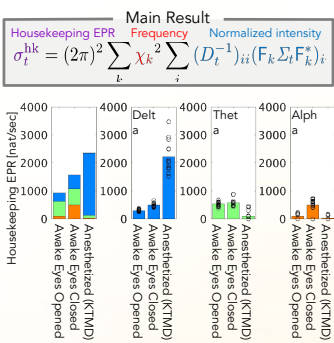


図4 エントロピー生成率の分解とサルの脳波データへの適用

氏名 大泉 匡史 (Masafumi Oizumi)

東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻 准教授
東京大学理学部物理学科卒業、東京大学大学院新領域創成科学研究科 岡田真人研究室にて博士取得。2019年4月より現職。博士取得後から2017年3月まで、理化学研究所脳科学総合研究センター 甘利俊一チームに所属。2011年10月から2013年10月まで米ウイスコンシン大学 Giulio Tononi研究室に所属。2015年4月から2016年10月まで蒙モナッシュ大学 土谷尚嗣研究室に所属。2017年3月から2019年3月まで株式会社アラヤ技術部基礎研究グループに所属。

東京大学大学院 総合文化研究科 広域科学専攻 大泉研究室

氏名 荻野幹人 (代表発表者)

肩書 特任研究員

氏名 鹿内友美

肩書 特任研究員(当時)

氏名 神谷俊輔

肩書 博士課程学生(当時)

氏名 関澤太樹

肩書 博士課程学生

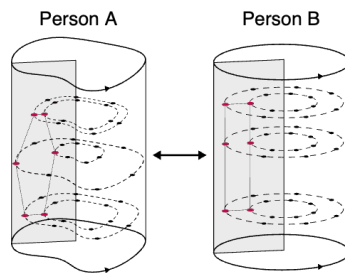


主観の質は 個人間で同じ？違う？

東京大学大学院 総合文化研究科 広域科学専攻 准教授
大泉 匡史 (Masafumi Oizumi)

意識

2人の人が同じものを見ているとき、その2人の主観の質は同じでしょうか？それとも異なっているのでしょうか？もし異なっているとすれば、どのように異なるのでしょうか？私たちは、同変性という情報処理システムの性質に注目することで、主観の質（クオリア）の人どうしに共通している部分と人ごとに異なりうる部分とを予測する理論を開発しました。開発した理論から、人どうしに共通しているクオリアの部分はシステムが同变的にふるまう部分であり、同变的なふるまいの外ではクオリアが人ごとに異なりうると予測されます。理論の提案と同時に、この理論のもとで、人の主観の質を研究するための新しい研究パラダイムの提案も行いました。



主観の質（クオリア）の分解： 固いクオリア × 柔らかいクオリア

1. クオリアの構造と神経活動の構造との間には一貫性がある

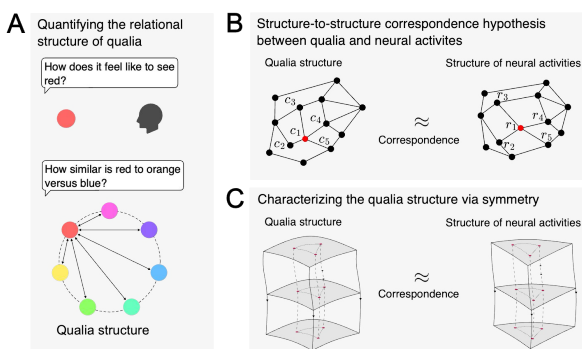


図1 構造に着目したクオリアへのアプローチ

2. 同変性によるクオリアの分解：固い軌道 × 柔らかい商空間

同変性はシステムに対する入力の変化に対して定義されます。システムがある入力の変化に対して同変であるとは、入力の変化とシステムによる処理が可換であることを言います（図2）。同変性という性質に注目することで異なるシステムを統一的に扱うことができます。同変性に基づくシステムの理解では、システムを同変である変化に対するふるまい（軌道: geometry of qualia attributes）と同変ではない変化に対するふるまい（商空間: geometry of qualia signatures）とに分けて考えることになります（図3）。システムがある変化に対して同変であるとき、ある入力を作る軌道とまた別の入力を作る軌道とは「同じ形」になります。この「同じ形」は同じ同変性を持つ2つのシステム間においても成り立っています（本研究の主結果）。つまり2つのシステムの細部が異なっても、同変であれば一部のふるまいが揃うということです。

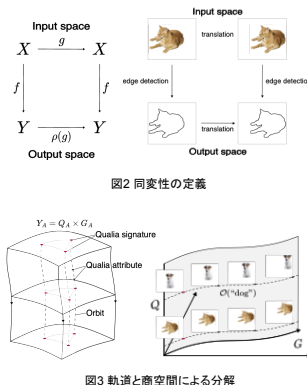


図3 軌道と商空間による分解

提案する研究パラダイム

3. クオリアの構造全体での比較

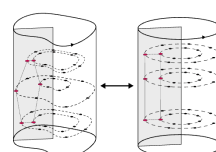


図4 クオリア構造全体の比較

4. 構造を分解しての比較

まず固いクオリア（軌道）を比較します。固いクオリアは外界で起きうる自然なものの変化を反映しています。次に柔らかいクオリア（商空間）を比較します。柔らかいクオリアはその個人の生まれ持った性質や過去の経験を反映しています。

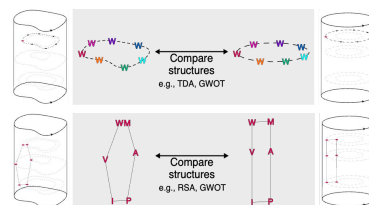


図5 分解したクオリア構造の比較

色相同変性ニューラルネットワークでの検証

私たちの理論研究から、同じ同変性を持つ2つのシステムは同変性を持たない2つのシステムよりも軌道方向のふるまいが揃う一方、商空間の方向のふるまいの比較では、それら2つのペア間に差がないことが予想されます。この予想の検証の簡単なケースとして、色相の変化に対して同変なニューラルネットワーク（NN）を用いて検証を行いました。まず全体での比較から同変NNペアと非同変NNペアとは同変NNペアの方がより色に対して似たふるまいをすることがわかりました。次に軌道方向と商空間方向それぞれについて検討を行いました。すると軌道方向（色相のみが変化する）では同変NNのペアの方が非同変NNのペアよりも高いふるまいの類似性を示した一方、商空間の方向（色相以外が変化する）では両ペアとも同程度の類似性を示し、私たちの理論を支持する結果を得ました（図6）。

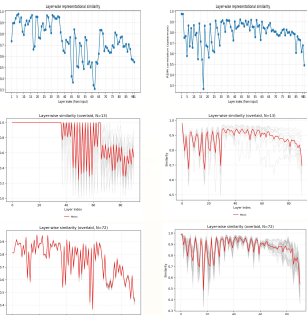


図6 全体、軌道方向、商空間方向に対する同変性の影響

成果のまとめ

本研究では主観の質が個人間で共通する部分と異なる部分がどこであるかを予測する理論の開発を行うと同時に、その理論に基づいた新しい実験パラダイムの提案を行うことができました（Oizumi, Lim, and Kanai. Principal Bundle Geometry of Qualia: Understanding the Quality of Consciousness from Symmetry. PsyArXiv, 2025）。

今後の展望

今回ご紹介できた結果はクオリアに関する理論的な予想です。そのためこれを実証していくことが今後の第一目標だと考えています。この研究を発展させることで、「私」の感じたとことを鮮明に伝える技術の開発に繋がると同時に、私たちがコミュニケーションをとるとき基礎、つまり主観的体験の中で何が共通しており何が異なりうるのか、を脳の情報処理メカニズムの観点から繋げたいと思っています。この研究が異なる個人が持つ主観の相互理解の一助になることを期待して研究を進めていきたいと思います。



氏名 大泉 匡史 (Masafumi Oizumi)

東京大学大学院総合文化研究科 広域科学専攻 准教授

東京大学理学部物理学科卒業。東京大学大学院新領域創成科学研究科 岡田真人研究室にて博士取得。2019年4月より現職。博士取得後から2017年3月まで、理化学研究所脳科学総合研究センター 甘利俊一チームに所属。2011年10月から2013年10月まで米ウイスコンシン大学 Giulio Tononi研究室に所属。2015年4月から2016年10月までモナッシュ大学 土谷尚嗣研究室に所属。2017年3月から2019年3月まで株式会社アラヤ技術部基礎研究グループに所属。

東京大学大学院 総合文化研究科 広域科学専攻 大泉研究室

氏名 林燦碩（代表発表者） 特任研究員

株式会社アラヤ

氏名 金井良太 代表取締役



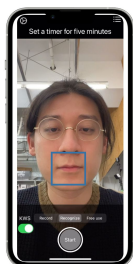
Silent Communication

東京大学情報学環教授 ソニーコンピュータサイエンス研究所 フェロー・CSO 暦本純一

議題

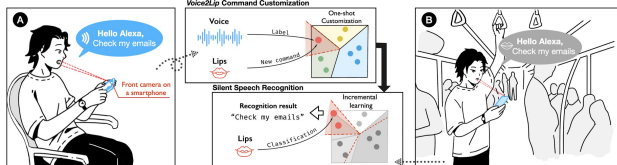
AIエージェントとの会話や遠隔コミュニケーションなど、声によるコミュニケーションは次世代HCI (Human-Computer Interaction) の大きな潮流となっています。しかし、公共環境など声を出せない場面も多く、秘匿性の担保もできません。BCIによる発話意図認識は、脳への侵襲が必要で、普通の会話速度での認識速度や精度は達成できていません。本プロジェクトでは、無声あるいは無声に近い微小音声の発話を深層学習により認識する「サイレントコミュニケーション」技術の確立を目指しています。本技術により、いつでもどこでもAIと会話をしながら思考を強化できるthink communicationの世界が到来します。また、遠隔コミュニケーション時の脳同期機構の解明、視線をMLLMに結合し人間の高度技能をAIに理解させる機構の研究に取り組んでいます。

LipLearner: 話者非依存リップリーディング



LipLearnerは、リップリーディングによるサイレントスピーチ技術です。従来のリップリーディングでは話者依存の学習が必要でしたが、本研究では、CLIP (Contrastive Language-Image) Pretraining, 対照的言語イメージ事前学習) の手法をリップリーディングに適用し、話者非依存の認識を実現しました。さらに、スマートフォンでも動作するモバイル版により、いつでもどこでも利用できるサイレントスピーチの実現に貢献しました。

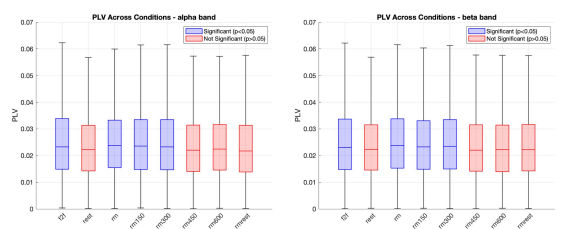
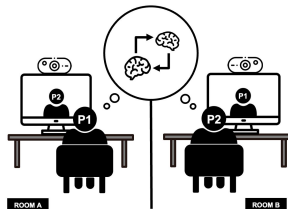
(ACM CHI2023 best paper)



遠隔脳同期機構の解明

共同作業を行う人々の間で脳波が同期することは知られていましたが、遠隔環境でも脳同期が発生するかは未知でした。本研究では通信遅延を制御した遠隔環境での脳同期計測により、450ms以下の遅延環境では共同作業により脳同期が発生することを確認しました。このことから、脳同期の発生機序として、外部要因ではなく脳間の相互作用によることを明確にしました。

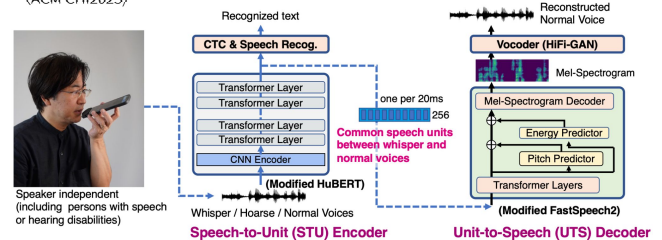
この知見は、遠隔環境での共同作業品質の指標などへ展開が期待されます。(Augmented Humans 2025)



WESPER: 実時間囁き声変換

微小音声による囁き声も、サイレントコミュニケーションの手段として有望です。本研究では、大量の囁き声を事前学習(pretraining)することで、特定の言語や喋り方に依存しない speech unit を抽出することで、微小音声→通常音声の変換を可能にしています。

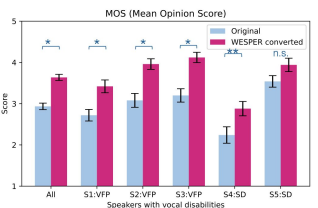
(ACM CHI2023)



発声困難者の発話支援

AIによる音声変換技術を活用し発声困難者の発話支援研究を行いました。声帯摘出、声帯ポリープ、ジストニア、聴覚障害など、種々の要因で通常の発声が困難な方の発声からの通常声の変換を行うことで、有意に音質が改善しました。Voice cloning 技術と融合し、各人の本来の声を取り戻す技術を目指しています。

(ACM CHI2023)

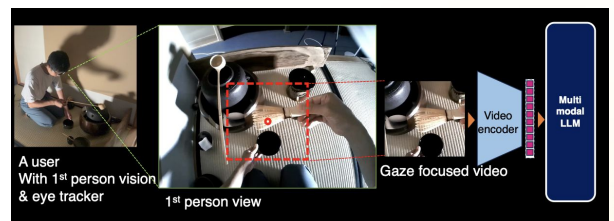


VFP: vocal fold polyp (声帯ポリープ)
SD: spasmodic dysphonia (痙攣性発声障害)

GazeLLM: 視線を利用するマルチモーダルLLM

一人称視点映像をMLLM (Multimodal LLM) に直接理解させ、人間の技能をAIを介して他者に伝達する機構を構築しています。視線情報を援用することで、技能者の注意をLLMに反映させることができ、行動理解精度が向上することが確認できました。

(Augmented Humans 2025)



今後の展望

HCI (Human-Computer Interaction)の今後の大きな潮流は人間とAIの融合です。本プロジェクトで推進しているサイレントコミュニケーションは、AIといつでもどこでも会話の世界を構築し、人間の思考が自然にAIによって強化される世界を目指しています。



蘇子雄 (Zixiong Su)
東京大学情報学環博士課程

頼欣好 (Sinyu Lai)
東京大学情報学環修士課程

張清 (Qing Zhang, Ph.D.)
東京大学情報学環特任助教



脱・記号的インターフェース:動きの知覚情報によるデュアルタスクナビゲーション支援

東京大学大学院情報学環教授、ソニーコンピュータサイエンス研究所副所長 暦本純一

課題

従来の歩行ナビゲーションは、画面上の記号的指示に依存するため、ユーザーの視覚的注意を要求し、二次課題との両立を困難にする。本研究ではこの問題に対し、記号を介さず人間の「運動知覚」に働きかけるウェアラブル方向誘導手法を提案する。身体に装着したデバイスが提示する触覚等の運動知覚キューにより、ユーザーは視線を奪われずに直感的に方向を把握できる。実験評価の結果、提案手法は従来の視覚記号による誘導と比較して、ナビゲーション性能を維持しつつ、二次課題の遂行成績を統計的に有意に向上させることを実証した。本成果は、より安全で効率的なデュアルタスク環境を実現する非記号的インタラクションの設計に貢献するものである。

背景

モバイルコンピューティングとウェアラブル技術の普及により、誰もがどこでもナビゲーション支援を受けられるようになりました。しかし、現在主流となっている手法は、スマートフォンやスマートウォッチの画面上に表示される地図や矢印といった視覚的な「記号」に大きく依存しています。このパラダイムは、ユーザーに画面を頻繁に注視することを強いるため、本質的な課題を抱えています。

第一に、人間の視覚的注意 (Visual Attention) は有限なリソースであり、ナビゲーション情報と周囲の物理環境 (他の歩行者、障害物、信号など) がこのリソースを奪い合います。この競合は、ユーザーの状況認識 (Situation Awareness) を著しく低下させ、衝突事故などのリスクを高めます。第二に、この視覚への依存は、観光地で風景を楽しんだり、友人と会話したりといった、移動中に本来行いたい二次的なタスク (デュアルタスク) の遂行を妨げます。これは、記号を認識し、その意味を解釈し、行動に変換するという一連のプロセスが、無視できない認知的負荷 (Cognitive Load) をユーザーに課すためです。

したがって、本研究では、この「視覚記号への依存」という根本課題を解決するため、限られた視覚リソースを消費することなく、より安全かつ効率的にデュアルタスクを支援できる、新たなウェアラブルナビゲーションのあり方を問い直すことを目的とします。

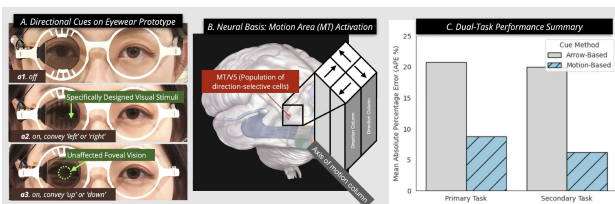


図1: この図は、私たちが開発した「動き」で方向を教える新しいシステムと、その性能を調べた結果の概要である。(A) 開発した装置を実際に使っている様子である。視界の端 (はし) の方で光のバーが動いて方向を知らせるため、視界の中心部分 (何かにぶつかる時に使う部分) の邪魔をすることなく、前をしっかり見ながらでも方向が分かる。(B) このシステムの脳科学的な仕組みを表した図である。視界の端から入ってくる「動き」の刺激が、脳の中にある「動き」を専門に感知するセンサー部分 (専門用語でMT野という) に直接働きかけるように設計されている。これにより、頭で考えなくても直感的に方向を理解できる。(C) 「ながら作業」をしてもった時の性能を比較したグラフである。従来の「矢印」で方向を教える方法と比べ、私たちが開発した「動き」で教える方法の方が、作業中のミス (専門用語でAPE: 平均絶対パーセント誤差) が平均して少なかったことが分かる。

アプローチ

本研究では、記号的「読解」プロセスを必要としない、より直接的で身体的な情報伝達チャネルとして、人間の「運動知覚 (Motion Perception)」能力に着目しました。これは、生物が進化する過程で獲得した、動きを素早く低負荷で検出・解釈するための根源的な能力です。

この原理を応用し、我々は運動知覚キューを生成するウェアラブルデバイスを設計・開発しました。プロトタイプは、手首や腰といった身体部位に装着するバンド型のデバイスで、その内部には複数の触覚アクチュエーター (超小型振動モーター) が線形に等間隔で配置されています。方向を指示する際には、これらのアクチュエーターを特定の時間パターン (例: 左から右へ0.1秒間隔で順次作動) で起動させます。これにより、ユーザーの皮膚上を何かが滑らかに「移動」していくかのような、明確な仮現運動感覚 (ファントムセンサーション) を生成します。

ユーザーは、この「動き」が感じられる方向へ直感的に進むだけでナビゲーションが可能です。この手法は、視覚を全く介さない完全なアイズフリー (Eyes-Free) を実現するだけでなく、記号解釈に伴う高次の認知プロセスをバイパスするため、認知負荷を最小限に抑えることができます。これにより、ユーザーは認知リソースを周囲の環境認識や二次課題へ自由に割り振ることが可能になります。

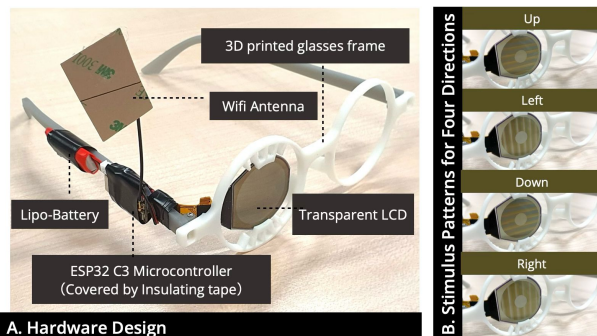


図2: これは、開発したウェアラブル装置の試作品と、そのディスプレイに表示される光のイメージである。(A) 装置の内部構造を示したものである。メガネの骨格となるフレームは3Dプリンターで作成した。右側のレンズ部分には、透明な液晶ディスプレイ (LCD) が組み込まれている。内部には、装置全体を制御する頭脳となる小型コンピュータ (ESP32-C3)、電源のバッテリー、そして無線通信のためのWi-Fiアンテナが搭載されている。(B) 透明ディスプレイに表示される「動き」のパターンを、コマ送りで示したものである。この光のバーが滑らかに動いて見えることで、脳が「動き」として認識する。ここでは例として、上下左右の基本4方向を、それぞれのような動きで伝えていくを示している。

結果と意義

提案手法の有効性を検証するため、従来の視覚記号 (スマートフォン画面の矢印) を統制群とし、歩行ナビゲーション (一次課題) と視覚的な認知課題 (二次課題) を同時に行わせるデュアルタスク実験を実施しました。

結果: 実験の結果、ナビゲーションのタスク完了時間や経路の正確性といった一次課題の成績においては、両手法間に有意な差は見られませんでした。しかし、二次課題の成績 (正答率、反応時間) については、本提案手法を用いた参加者の方が、統計的に有意に高いパフォーマンスを示すことが明らかになりました。また、実験後の主観評価アンケートにおいても、提案手法は「認知的負荷が低い」「周囲への注意を払いやすい」「より安全だと感じる」といった項目で、従来手法を大幅に上回る評価を得ました。

学術的意義: 本研究は、ウェアラブルHCI (ヒューマン・コンピュータ・インタラクション) において、従来の記号的情報提示の限界を克服する「知覚中心設計 (Perception-Centric Design)」の有効性を実証しました。運動知覚という情報チャネルが、特にリソースが競合するモバイル環境下で、極めて効率的であることを示し、今後の非記号的インタフェース設計に新たな理論的基盤を提供します。

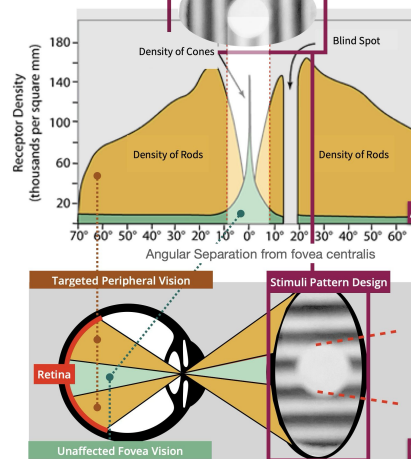


図3: これは目の仕組みに合わせて、光のパターンをどのように設計したかを示す図である。(A) 目の奥にある「網膜 (もうまく)」という部分の、光を感じる細胞の分布を示したものである。中心部には、細いものや色を見るのが得意な「錐体 (すいたい) 細胞」が密集している。一方で、その周りの周辺部には、光や動きに敏感な「桿体 (かんたい) 細胞」が数多く分布している。(B) 我々の光のパターンは、この目の仕組みを巧みに利用した設計である。動きに敏感な細胞が多く集まる「目の周辺部」を狙って動きの情報を提示する。これにより、物を見るために最も重要な「目の中心部」の邪魔を一切することなく、必要な情報だけを伝えることができるのである。



Junyu Chen 修士2年 (卒業)
東京大学大学院情報理工学系研究科

Yifei Huang 特任研究員
東京大学生産技術研究所

Jing Huang 博士3年生
東京藝術大学大学院美術研究科



Thad Starner 教授
ジョージア工科大学



Kai Kunze 教授
慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科



暦本純一 教授
東京大学大学院情報学環

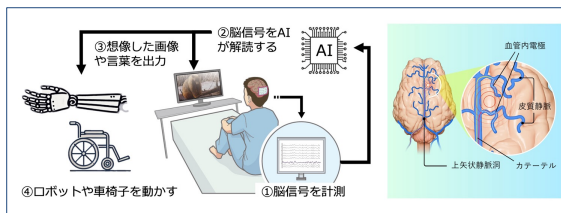


侵襲BMIの臨床応用に向けた開発

大阪大学大学院医学系研究科神経情報学 教授 柳澤琢史

概要

我々は、筋萎縮性側索硬化症（ALS）などで重度の麻痺があっても、脳活動だけでCAを制御し社会参加することができる社会を目指しています。このために、脳から高精度な信号を計測し、人の考えや意図を解読する技術を開発し、次世代BMIを社会実装します。特に①頭の中に留置した電極で計測した脳波（頭蓋内脳波）から、ヒトが想像した画像を推定し出力する技術を開発しました。また、②血管の中から頭蓋内脳波を計測することで、開頭手術をせずに極低侵襲に高精度な脳波を得られる技術を開発しました。さらに、③体に埋め込んだ脳波計で、長期間脳波を安定して計測することで、安定した精度のBMIを実現できることを示しました。



頭蓋内脳波による脳情報解読技術の開発

我々は、頭蓋内脳波を用いてヒトの意図や想起、思考内容を推定する技術を開発しBMIによる意思伝達へ応用しました。特に、ヒトの頭蓋内脳波を用いて、人が想起した意味の画像を80%以上の精度で出力するBMIを開発しました（図1）。ここでは、CLIPと呼ばれるAIを使い、ヒトが想起した画像の意味をベクトルとして表し、推定された意味内容にもっとも近い意味を持つ画像を230万枚の画像からオンラインで検索し、モニターへ表示しました（Fukuma et al., Comm. Biol., 2022, Fukuma et al., under review）。さらに、推定した意味ベクトルを用いて文章や画像を生成することにも成功しました（Ikegawa et al., J. Neural Eng., 2024）。また、ヒトが日常的に経験する自発的思考に関連する脳活動を長時間の頭蓋内脳波計測から明らかにしました。特に、海馬と呼ばれる記憶に関連する脳部位で、記憶の定着に重要な機能を持つSharp-Wave Ripple(SWR)と呼ばれる特徴的な脳波が、自発的思考の一種であるマインドワンダリングに関連していることを世界で初めて明らかにしました（Iwata et al., Nature Communications., 2024, 図2）。これらの成果により、ヒトの想像や思考内容を詳細に解読し、伝達するBMIの実現が期待されます。

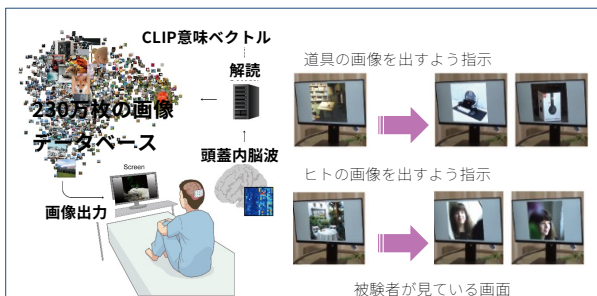


図1 頭蓋内脳波を計測中の患者に、道具もしくはヒトなどの2種類の画像を画面に提示するよう指示した。頭蓋内脳波から、ヒトが想起した意味内容を推定し、その内容に最も近い画像を230万枚のデータベースから検索し250ms毎に画面へ出力した。被験者は出力された画像を見ながら、指示された意味の画像になるよう、画像を想像した。2種類の指示に対して、3名中2名で、80%以上の正解率が得られた。

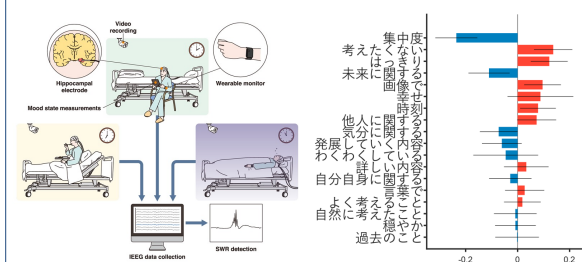


図2 頭蓋内脳波とウェアラブルデバイスによる活動量・心拍等を連続10日以上計測しながら、ヒトの思考内容を1時間毎に調査した。特に海馬に留置された電極からSWRを検出し、その頻度の変動を思考内容や活動量・心拍から混合効果モデルで説明した。その結果、SWRの変動は、思考内容により高い精度で説明され、特に、ヒトが現在の課題に集中していないMind wanderingの状態にあると増加する傾向があることが示された。

血管内脳波を用いたBMIの開発

これまでの頭蓋内脳波計測では、患者に全身麻酔をかけ開頭手術を行い電極を留置してきました。しかし、ALSなど重度の神経障害がある患者さんでは、全身麻酔が大きな負担となることも多く、開頭せず局所麻酔で行える処置で高精度な頭蓋内脳波を得る方法が必要です。我々は、局所麻酔で開頭せずに、カテーテルを使い血管を経由して頭蓋内へ電極を留置する、極低侵襲BMIを目指しています。特に、旧来の血管内電極では、固い電極しかなかったため、頭頂部の中心を通る上矢状静脈洞からしか脳波が計測できず、BMIに重要な手や口の運動野など広範囲の脳波を得ることが困難でした。そこで我々は、JPMJMS2012-5-1-1/5-1-2グループと共同で柔らかく細い血管内脳波電極を開発し、これまで困難であった脳表静脈から頭蓋内脳波を得ることに成功しました。実際、豚を用いた実験では、脳表静脈に留置した電極から、高精細な誘発反応（SEPやVEP）を計測することに成功し、同時に計測したECoGよりも大きい信号を得ることができました。また、運動野上の静脈電極刺激により豚の顔や腕に筋反応を誘発できることも明らかにしました（Iwata et al., Adv. Intel. Sys., 2025）。この成果は血管内脳波BMIの新たな可能性を示し将来的な医療応用につながります。



図3（左）極細血管内脳波BMIの概念図。脳表の細静脈を経由して、手や口の運動野近くへ留置された電極から頭蓋内脳波を計測し、胸部皮下に埋め込まれた送信機で信号を外部へ送信します。これを解読することで、CAを操作します。（右）豚を用いた実験では、脳表静脈から計測した頭蓋内脳波で体性感覚誘発反応が捉えられ、同時に計測されたECoGよりも高い振幅で反応が得られました。また、開頭手術でも電極留置が困難な脳深部から血管内脳波を得て、視覚誘発反応を得ることに成功しました。

体内埋込型脳波計の安全性・有効性評価

上記の血管内電極に接続し、体内から無線で脳信号を送信する体内埋込型脳波計の安全性・有効性を評価しました。特に、ヒトへ適用可能なデバイスを2頭のニホンザルへ留置し、2年以上にわたり安定した皮質脳波の計測が可能であることを示しました。長期間にわたり運動課題・知覚課題を行い、得られたビッグデータで学習を行うことで、安定した精度でBMIを実現できることを明らかにしました。特に、深層学習を用いることで、データ量に対してログ則で精度が改善することが示されました（図4）。

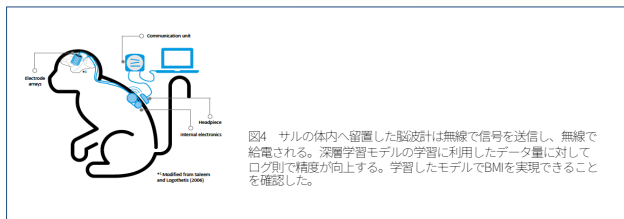


図4 サルの体内へ留置した脳波計は無線で信号を送信し、無線で給電される。深層学習モデルの学習に利用したデータ量に対してログ則で精度が向上する。学習したモデルでBMIを実現できることを確認した。

今後の展望

血管内脳波を使ったBMIを医療機器として実現し、これまでに開発したBMIを使った意思伝達やCA制御を筋萎縮性側索硬化症（ALS）などで重度の麻痺がある患者さんへ届けます。また将来的には、こうした技術を使って「ストレスのモニタリング」や「自律神経の調整」など、心と体の健康を支える応用も目指しています。



楊恵翔

大阪大学大学院医学系研究科 神経情報学 特任助教



福岡良平

大阪大学大学院医学系研究科 神経情報学 特任准教授



柳澤琢史

大阪大学大学院医学系研究科 神経情報学 教授

2000年、早稲田大学大学院理工学専攻修士課程を修了後、大阪大学医学部医学科に編入学し、2004年に卒業。脳神経外科での初期研修を経て、皮膚脳波を用いたBrain-Machine Interfaceの開発に携わり、2009年に大阪大学大学院医学系研究科にて医学博士を取得。2012年より大阪大学大学院医学系研究科助教。2013年、科学技術分野の文部科学大臣表彰若手科学者受賞。2016年、大阪大学国際医療情報センター臨床神経医学専攻研究部門講師。2018年より大阪大学高等共創研究教授。2024年より現職。脳神経外科認定医、てんかん専門医。



An ECoG-BCI for Virtual Embodiment

Chang Lab, Weill Institute for Neurosciences - University of California, San Francisco, USA.

Overview

Brain-computer interfaces (BCI) have the potential to facilitate high-bandwidth information transfer between users and technology. As a part of the UCSF BRAVO (BCI Restoration of Arm and Voice) clinical trial, we recorded neural activity directly from the surface of the brain using electrocorticography (ECoG). Here, we show that both speech and facial movements can be decoded directly from the neural activity of individuals with severe vocal-tract and bodily paralysis, and used to subsequently animate a virtual avatar. These findings form a key proof-of-concept demonstrating the potential for naturalistic, embodied communication through BCI-controlled virtual avatars.

ECoG-BCI control of a personalized facial avatar

- Embodied communication is comprised of not only speech outputs, but also intonation, expressiveness, and identity.
- Therefore, in addition to decoding speech output, decoding the accompanying facial expressions and synthesized speech are necessary steps towards a naturalistic speech neuroprosthesis.
- Towards this goal, we designed a three-component, multimodal decoding system capable of decoding speech output as text and synthesized audio, as well accompanying facial and vocal tract movements.
- This articulatory-gesture decoding system used deep, recurrent neural network modeling.
- While speech output as text was incrementally decoded, synthesized audio and facial expressions were decoded after the participant was done speaking, leading to latencies around 8 seconds.
- A combination of high and low frequency features from neural activity from the sensorimotor cortex (SMC) are decoded into flexible but discrete latent articulatory gesture units, which then animate a facial avatar.
- The facial avatar can be used alongside speech attempts or in isolation, such as to convey emotional expressions.
- The avatar (Speech Graphics, Unreal Engine 4.26) is personalized to resemble the participant.
- For further details and figures, see the published paper “A high-performance neuroprosthesis for speech decoding and avatar control” in *Nature* (<https://doi.org/10.1038/s41586-023-06443-4>).

Towards streaming speech synthesis and articulatory control

- Though our prior work was the first successful demonstration of high accuracy speech synthesis from neural activity during silently attempted speech, the high latencies are prohibitive to natural conversation.
- Ideally, synthesized speech and facial movements would be decoded and played or animated in real time.
- Towards this goal, we developed a speech decoding framework capable of streaming synthesized speech output.
- This model used a recurrent neural network transducer framework, enabling the model to learn both a neural encoder and implicit speech models that can act as a streaming version of a language model over latent units.
- This framework achieved faster decoding speeds (47.4 versus 28.3 words per minute) and lower latencies (1.7 versus 8.0 seconds), compared to prior work, while still maintaining a similar level of accuracy (45.3% versus 45.7% word error rate).
- Combined with our prior work showing that facial movements can be decoded from the same neural signals, future work may apply this same framework to decoding facial movements with low latencies.
- For further details and figures, see the published paper “A streaming brain-to-voice neuroprosthesis to restore naturalistic communication” in *Nature Neuroscience* (<https://doi.org/10.1038/s41593-025-01905-6>).

Future Prospects

Together, these findings demonstrate that an ECoG-BCI can be used to animate a virtual avatar alongside speech decoding. This work is an important step towards naturalistic, embodied neuroprostheses. Expanding the avatar to larger movement repertoires using continuous control and increasing the speed of the system are important future research directions.



Edward F. Chang, MD

Professor and Chair of Neurosurgery

In addition to being the Joan and Sanford I. Weill Chair of the Department of Neurological Surgery at UCSF, E.F.C. is the Jeanne Robertson Distinguished Professor at the UCSF Weill Institute for Neurosciences, the Co-Director of the UC Berkeley-UCSF Center for Neural Engineering and Prostheses, and a Chan Zuckerberg Biohub Investigator.

BRAVO Research Team: Jessie R. Liu, PhD; Samantha C. Brosler; Irina P. Hallinan; Alexander B. Silva, PhD; Cady M. Kurtz-Miott; Jonah Dunkel Wilker.

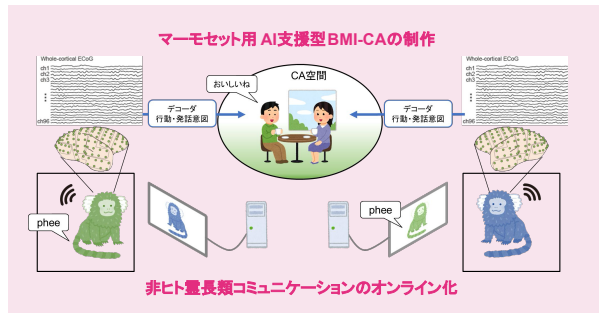


意図コミュニケーションのための 基盤技術開発

東京科学大学総合研究院 特任准教授 小松三佐子

意識

小松グループでは、動物用意図コミュニケーション環境の開発を通して侵襲・非侵襲・非接触信号を網羅的に計測し、AIを用いて意図の読み取りに必要な信号をデータ駆動的に検討しています。デコーディング性能に優れた侵襲信号から非接触信号までを一貫して計測することで目的に応じた侵襲度の検討がはじめて可能になります。ブレインマシンインタフェース機能を持つサイバネティック・アバター（BMI-CA）を実現するためのIoBコア技術を提供します。



あたらしい霊長類研究のかたち ～自由行動下霊長類からの大規模神経活動計測～

小松グループでは、霊長類（マーモセット）を用いて侵襲的BMIの開発を行っています。特に、AIを使って想起や意図内容を推定し、思いを言葉にしたり、脳へ情報を入力する技術を開発しています。

一般的にサルを使った脳研究は動物を拘束して脳活動を計測しますが、それでは自然な行動が観察できないことや長時間の実験が難しいといった課題がありました。わたしたちは、自由に動き回っているマーモセットの大脳皮質全域から脳活動を計測することに世界で初めて成功しました（下図A）。それによってマーモセット同士の音声コミュニケーションや自然な運動中の高精度の脳活動を長時間にわたって計測することが可能になりました。高精度の脳活動を大規模に取得することは、すべてのBMI開発のコアとなる技術要素です。

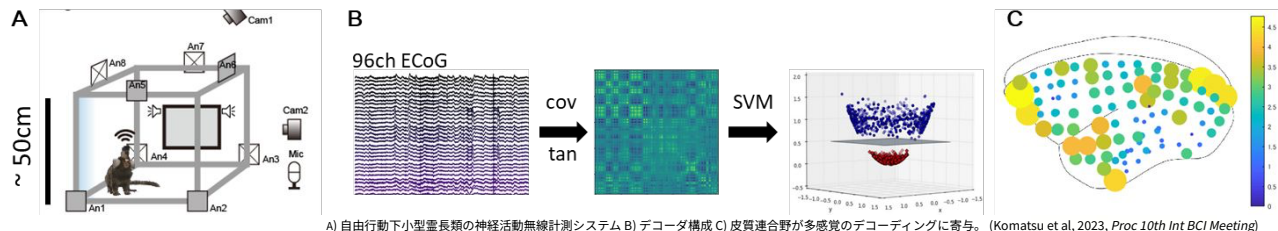
BMI開発以外の脳研究においても、ヒトの共感、意識、言語等の高度な脳の機能や精神疾患等の原因・メカニズムを解明するには、脳の発達した霊長類を用いた研究が欠かせません。近年、欧米では動物愛護などの観点から霊長類研究が少なくなっていますが、わたしたちの開発した自由行動下マーモセットからの大規模神経活動計測技術は計測に伴う動物の負担も少なく、これからの霊長類研究の主流になっていくでしょう。

脳活動からマルチモーダル意図の抽出に成功

BMIは、病気やけがで体を動かせない人が義手を動かしたり、言葉を話せない人が気持ちを伝えたりするために役立つと期待されています。ところが、今のBMIは特定の動作しかできないことが多く、もっと幅広く使うためには「体を動かす」と「声を出す」などのマルチモーダルな意図を正確に解釈する必要があります。

わたしたちは、マーモセット大規模神経活動計測技術を用いて、音声コミュニケーションや自然な運動中の脳活動を大規模に取得しました。同時に、カメラで行動を、マイクで声を録音し、笹井グループと連携して脳活動から「動き」や「鳴声の種類」を予測できるかを検証しました。その結果、「連合野」と呼ばれる脳の高次領域が、未来の「動き」と「鳴声の種類」の両方を解釈するのに重要であることが分かりました。つまり、体を動かすことと声を出すことは、脳の一部で共通して処理されている可能性が示唆され、その「意図」を脳活動から読み取ることが出来ることが示されました。

この研究は、より高度なBCIを実現するための大きな一歩だと考えています。もし脳活動から複数の意図を同時に読み取れるようになれば、体を自由に動かせない人がより自然に義手を使ったり、言葉を伝えたりできる未来が近づきます。

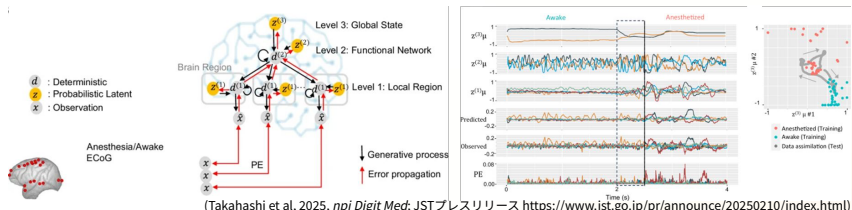


デジタルツイン脳シミュレータ

わたしたちは皮質脳波から脳ネットワーク構造を推定し脳信号をシミュレートする手法を開発しています。

右図では、ムーンショット目標3山下祐一博士（国立精神神経医療研究センター）との共同研究で、サルの大脳皮質脳波をリアルタイムでシミュレーションし、覚醒状態をモニタリングする新たな「デジタルツイン脳シミュレータ」

を開発しました。このシミュレータは、脳の異なる階層における潜在状態をモデル化し、仮想的な皮質脳波信号を高精度に予測生成します。さらに、予測と観測の誤差に基づいて、リアルタイムに潜在状態を推測し、予測を更新すること（データ同化技術）により、その時の脳の状態をリアルタイムに反映させたシミュレーションを実現しました。このモデルを活用することで、仮想的な投薬シミュレーションの実施や、ECoG信号の背景にある機能的ネットワークの推定も可能であることを示しました。



個体ごとの脳の情報処理機構をリアルタイムに明らかにしようとする本研究は、今後の個別化医療への応用が期待されます。

将来的に、脳活動に加えて外受容感覚（視覚・聴覚など）、内受容感覚（心拍・呼吸感覚など）、固有感覚（関節位置や筋肉の感覚）などの感覚信号を統合的にモデル化することで、精神・神経疾患における情報処理の変調を包括的に再現する研究を進めています。

今後の展望

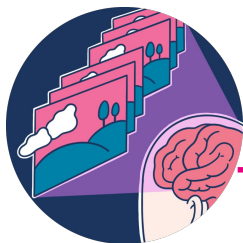
金井プロジェクトの課題を進める中で、ひとつのデバイスを使って様々な意図を予測的に読み取ることができるよう手掛かりを得ることができました。この発見はこれまでのBMIとはまったく異なるコンセプトで動作する次世代BMIの開発につながると考えています。今後、さらにデータを増やし、脳の一部に電極を付けるだけで様々な意図を持った行動を実現するBMIを開発していきたいです。



小松三佐子

東京科学大学総合研究院 特任准教授

東京都立大学理学部物理学卒業後、東京工業大学大学院総合理工学研究科にて博士号（理学）を取得。理化学研究所リサーチアソシエイト、研究員として、ニューラルネットワーク、電気生理学を用いた研究に従事。現在、東京科学大学総合研究院特任准教授。霊長類（マーモセット）の広域皮質脳波（ECoG）計測技術を開発し、脳広域の情報処理機構の解明を目指している。



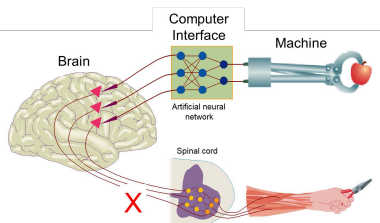
人工神経接続による身体と心の制約からの解放

東京都医学総合研究所 脳機能再建プロジェクト プロジェクトリーダー 西村 幸男

意識

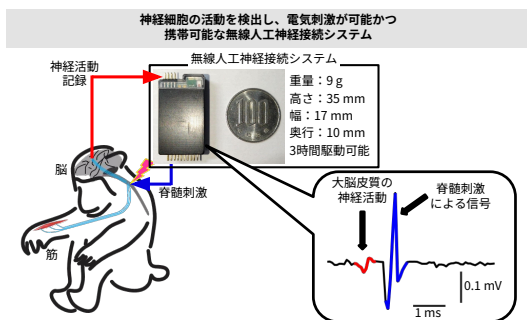
脳卒中、脊髄損傷、ALS等の神経障害等、脳と身体とを繋ぐ神経の断絶により身体運動麻痺と体性感覚麻痺が生じる。また、中枢神経障害ではうつ症状を併発し、それが機能回復を妨げる。このような身体と心の制約からの解放を実現し、中枢神経障害患者のQoLを向上させることで、中枢神経障害患者の社会の中での活躍の場が広がり、新しい市場の可能性も非常に大きくなる。

本研究開発では、中枢神経障害の身体と心の解放を目指したAI支援型ブレインマシンインターフェイス（Brain Machine Interface, BMI）による人工神経接続システムを開発する。具体的には、1）脳・脊髄への情報書き込み技術の開発、2）運動麻痺に対する身体運動機能再建、3）体性感覚の拡張、4）人工情動の惹起、5）神経間コミュニケーション技術の開発を行う。これらの研究開発を実施することで、中枢神経障害患者の身体と心がサイバーフィジカル空間で解放され、同様に実世界においてもAI支援型BMIによる人工神経接続により自分自身の身体と心を自在に操作できる能力を獲得するための技術基盤を整備し、その有効性をマカクサルを対象にして実証する。



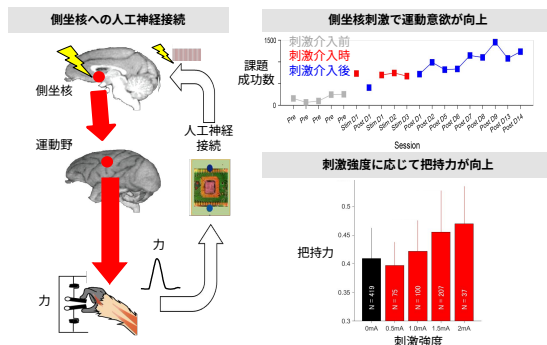
脳への情報書き込みを可能とする人工神経接続の開発

信号（神経細胞活動・筋活動）の検出や電気刺激出力の可能な小型コンピュータチップと、その挙動を無線通信によって制御可能なPCソフトウェアを開発し、マカクサルを対象にそのシステムの動作検証を行った。



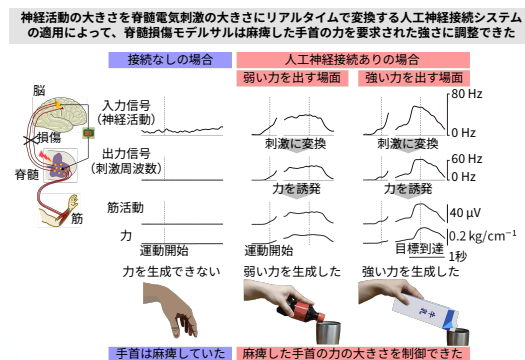
人工神経接続による運動意欲向上

把持運動課題中のマカクサルに対して把持力をトリガーとする側坐核への人工神経接続により、運動課題への意欲の向上と刺激強度に依存した運動パフォーマンス（把持力）の向上につながった。



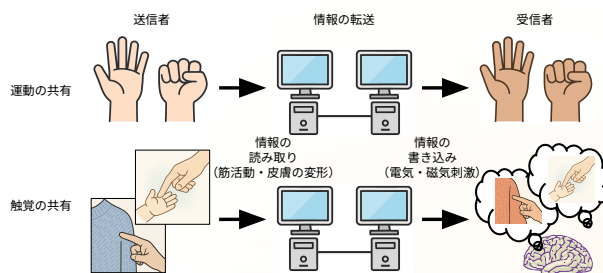
人工神経接続による運動麻痺に対する身体運動機能再建

ラックマウントシステム型人工神経接続によって、脊髄損傷モデルサルは神経活動の大きさを随意的に調整し、麻痺した手首関節の力の大きさを制御能力を回復した。



2个体間での神経コミュニケーション技術の開発

生体信号・神経信号をコンピューター間ネットワークを介して転送することによって、一人や動物一人など2个体間で運動や感覚をリアルタイム共有する技術を開発している。手の動作をイントラネットに転送し、再現することに成功した。種々の手触り（触覚）の転送技術も開発している。



今後の展望

- ・運動機能と体性感覚機能を同時に再建する人工神経接続システムの開発
- ・セラピストと運動麻痺患者で遠隔人工神経接続リハビリ
- ・種間をこえた人工神経接続による機能向上
- ・脳状態のアップロード・ダウンロード



西村 幸男

東京都医学総合研究所 脳機能再建プロジェクト プロジェクトリーダー

＜兼任＞
東京大学大学院 新領域創成科学研究科 メディカル情報生命専攻 客員教授
新潟大学大学院 医歯学総合研究科 連携大学院 客員教授

＜受賞歴＞

2023 東京都福祉保健局長賞 職務発明部門
2024 塚原仲児記念賞

田添 歳樹

東京都医学総合研究所 脳機能再建プロジェクト 主席研究員

横山 修

東京都医学総合研究所 脳機能再建プロジェクト 主任研究員

鈴木 迪詔

東京都医学総合研究所 脳機能再建プロジェクト 主任研究員

欄占 雅史

東京都医学総合研究所 脳機能再建プロジェクト 研究員

尾原 圭

東京都医学総合研究所 脳機能再建プロジェクト 研究員



個体間の神経活動情報を伝送する技術 基盤と情報伝送

自然科学研究機構生理学研究所 多細胞回路動態研究部門 教授 和氣弘明

概要

脳が学習し記憶した情報を抽出し、別の脳へと転写できる技術が開発されれば、SF作品で描かれる「情報伝送」は現実となる。そのためには、局所神経回路がどのような細胞規模・時空間活動パターンで情報を表現しているのかを因子的に理解する必要がある。こうした学習に伴う神経動態は認知や記憶の基盤であるだけでなく、神経発達症や精神疾患など脳病態にも深く関わる。

近年の光遺伝学と生体イメージングの進展により、感覚知覚を人工的に生じさせる最小細胞集団やその結合様式が明らかになりつつある [Dagleish et al., 2020; Carrillo-Reid et al., 2019; Marshel et al., 2019]。しかし、細胞群の時空間活動パターンそのものを人為的に創出し、学習や記憶の原理に迫る研究は未開拓であり、新たな技術開発が求められている。

本研究では、ホログラフィック顕微鏡技術により単一細胞活動を同時に計測・操作する。学習関連の神経動態を抽出し、未学習回路で再現することで、回路変容と行動を因子的に検証する。さらにアストロサイトを含むグリア操作を組み合わせ、ニューロンとグリアが奏でる秩序ある時系列活動が、柔軟な知覚学習機能を支える仕組みに迫る。

Research: 情報伝送内容 (左列) と研究アプローチ (右列)

Results: マウスの体性感覚野・パレル皮質には多様なニューロン応答があり、学習関連情報が存在する

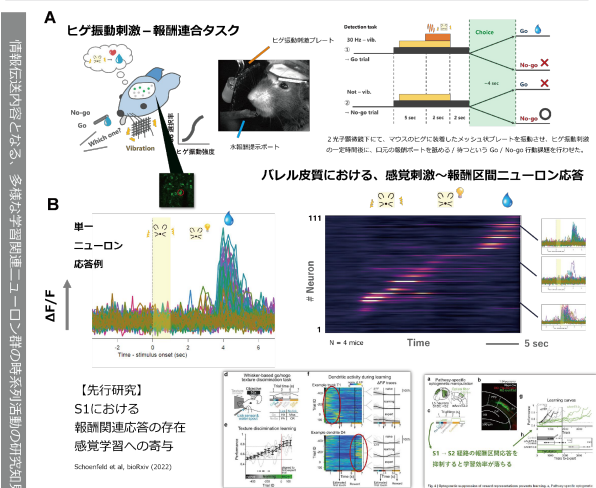


Fig. 1 A) 2光子顕微鏡下における、ヒゲ振動刺激-報酬連合タスクの概要。B) 先行タスク時の単一ニューロン Ca^{2+} 活動例。C) ヒゲ振動刺激により、報酬連合タスクの学習に寄与する。

Results: 学習率上に相関するアストロサイト活動（操作技術開発）、およびニューロン相関が存在した

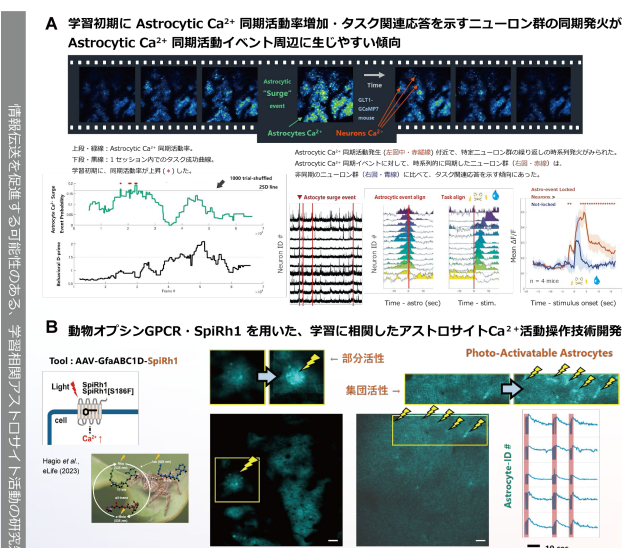
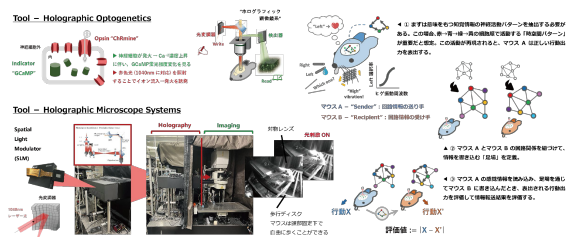


Fig. 2 A) 上: トランスジェニックマウス (GAL4-GFP) マウスのアストロサイトおよびニューロン活動の同時イメージング。アストロサイトの同期活動 (burst event) が生じると、ニューロン活動が同期化する。下: アストロサイト活動の同期化 (burst event) が生じると、ニューロン活動が同期化する。B) 動物オプシニングPCR・SpRrh1を用いた、学習に相関したアストロサイト Ca^{2+} 活動操作技術開発。動物オプシニングPCR・SpRrh1を用いた、学習に相関したアストロサイト Ca^{2+} 活動操作技術開発。

Highlights: ホログラフィック顕微鏡技術を用いた、マウス個体間-情報伝送プロジェクト



Methods: 情報伝送実験プロトコル | 操作可能細胞の選出・マウス2個体間の回路関係の紐づけ

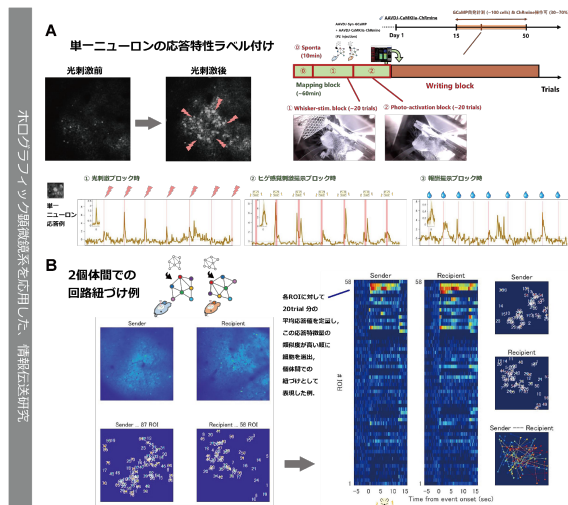


Fig. 4 A) 情報伝送の概要。B) 2光子顕微鏡を用いたマウス2個体間の回路紐づけ。A) 単一ニューロンの応答特性ラベル付け。B) 2光子顕微鏡を用いたマウス2個体間の回路紐づけ。

Results: 情報伝送実験結果 | Senderの学習情報を圧縮伝送すると、行動出力変化の傾向があった

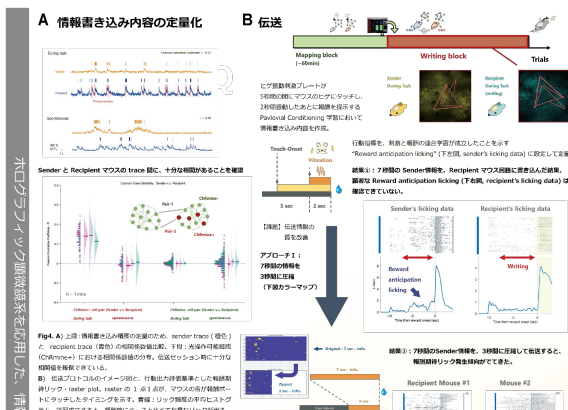


Fig. 5 A) 情報書き込み内容の定量化。B) 伝送。A) 情報書き込み内容の定量化。B) 伝送。

Discussion: 情報伝送の量・質の改善

今後、複数の伝送方法を比較検討し、明確な行動出力変化を定量化する必要がある。

- 学習に重要なアストロサイト活動を活性化しながら、伝送強化
- 時間方向に情報を圧縮することで、伝送強化
- 複数細胞の情報を、単一細胞に濃縮することで、伝送強化
- + more ...

和氣弘明
生理学研究所 教授

今後の展望
情報伝送を可能にすることで、オルガノイドや動物脳を用いた脳機能拡張を目指す！

谷隅勇太 生理学研究所 研究員
深津紀純 生理学研究所 研究員

IoB極低侵襲技術開発 長期計測が可能なウェアラブルデバイスの開発

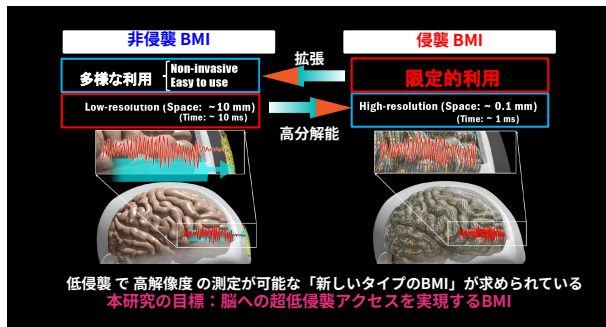
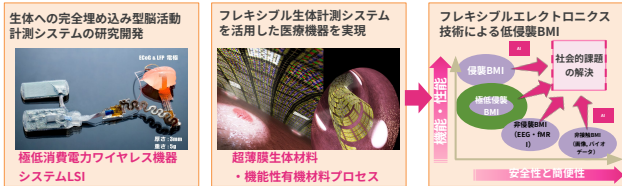
大阪大学・産業科学研究所：関谷 毅(SPM), 植村 隆文(PI), 荒木 徹平, 根津 俊一,
大阪大学・医学系研究科：中村 元(PI), 大阪大学・高等共創研究院：柳澤 琢史(SPM)

IoB極低侵襲技術開発においては、外科的な処置が必要な侵襲型と比べ、ごくわずかな侵襲で、かつ、体の表面から情報をとらえる非侵襲型より高性能なBMI技術を開発し、既存技術では実現困難な高精度と安全性の両方を有する、新しいBMI領域の創出を目指した取り組みを実施しています。具体的には、低侵襲治療のひとつであるカテーテルを使用した血管内治療技術を活用して脳静脈血管内から脳波信号を取得する技術の開発を実施しています。

本研究開発を通して、血管内から長期的に高精度な計測と介入をすることができる技術を実現し、**身体的・認知・知覚能力の拡張**をより高度なレベルで実現することを目指しています。

研究開発項目5：極低侵襲BMIの実現

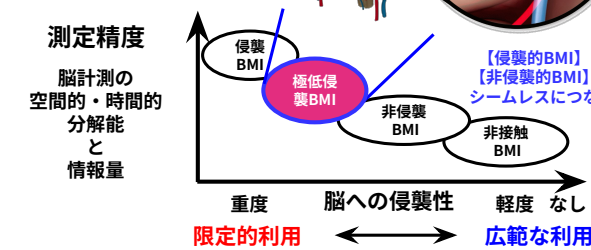
超薄膜フレキシブルエレクトロニクス技術を用いた
「血管内脳波記録システム」と「極細径血管内搬送デバイス」の実現



- 極低侵襲BMI -

超極細軟質
血管内留置デバイス

脳表静脈血管からの長期脳活動測定



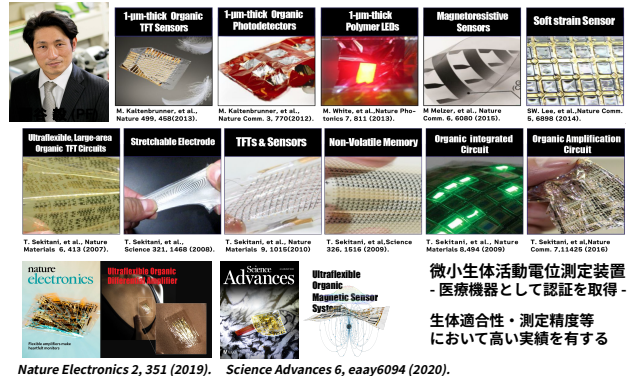
極低侵襲BMIシステムのための「2つのデバイス」

- 超微細で柔らかい血管内留置デバイスによる【極低侵襲BMIシステム】
- BMIトランスポーターとして機能する【血管内脳波測定デバイス】

研究体制

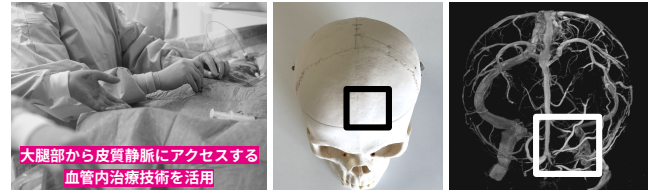


薄膜エレクトロニクスによる「極低侵襲化」
超薄膜 (1 μm), 軽量, フレキシブル, 伸縮自在のセンサーと集積回路 (以下・過去の実績)

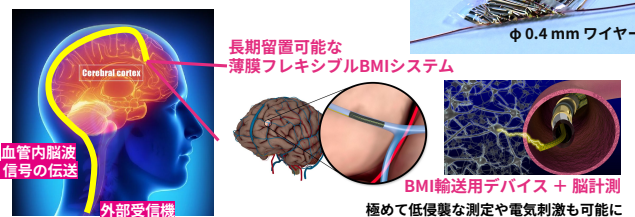


大脳の表面を走る 皮質静脈へのアクセスは極めて難しい

血管径が小さい, 血管壁が薄く脆い, 屈曲蛇行が強い



皮質静脈は硬膜に包まれていないため脆弱である
しかし脳の表面に接しており、超低侵襲の装置を埋め込むことで
高品質の脳波信号が得られる可能性がある



実施中の研究開発内容

- 高精度な血管内脳波測定実現のための研究開発を推進
- 生体適合性電極と薄膜センサー搭載プローブの開発
- 血管内の微小生体信号伝送技術の開発

関谷 毅 大阪大学産業科学研究所 教授
E-mail: sekistani@sanken.osaka-u.ac.jp

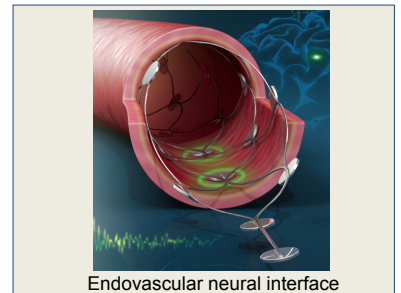


Brain-Machine Interfaces

David B. Grayden, Clifford Chair of Neural Engineering, University of Melbourne, Australia

Overview

Our groundbreaking brain-computer interface (BCI) research is paving the way for revolutionary advancements in human-machine interaction. We are exploring innovative methods to decode visual information from the brain using endovascular recordings near the visual cortex, potentially enabling object classification through brain signals alone. Our studies also demonstrate that electrical stimulation of the brain through blood vessels can be achieved. Furthermore, our optical BCI system using fluorescent imaging can measure the activities of individual neurons with real-time decoding. Simultaneously, we are harnessing large datasets and machine learning to enhance BCI accuracy and reliability, bringing us closer to practical, home-based applications. These cutting-edge projects promise to transform how we interact with technology.



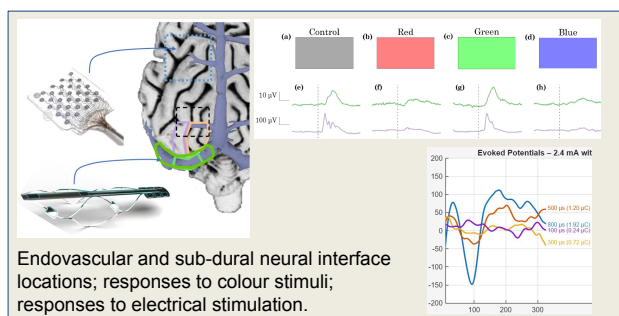
Endovascular Recording and Simulation

Endovascular recording of visual responses

Six sheep were implanted with endovascular electrodes near the visual cortex. Visual stimuli were presented with different colours and with controlled semantic classes: sheep, dog, and flowers, with varying primary visual features: background, image scale, and face vs. full body. A temporal convolutional network was applied to learn to classify the neural recordings. Moderate success was achieved for discriminating colours, and dog and dandelion flower images, while sheep images were not clearly distinguished from flower images. The neural signal can be differentiated when dividing into closeup images of dog or sheep faces vs. full-body images.

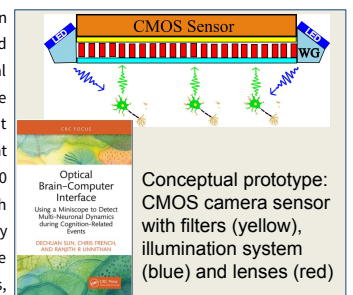
Endovascular stimulation of the cerebellum

Endovascular electrodes were manufactured and underwent *in vitro* testing to characterise their electrochemical properties, including impedance analysis, charge storage capacity, and voltage transient measurements. Surface characterization using atomic force microscopy (AFM) and scanning electron microscopy (SEM) was conducted. Results indicated an optimized roughness profile, maximizing charge injection efficiency. Endovascular electrodes were implanted near the cerebellum in sheep along with sub-dural electrodes in the motor cortex region to record cortical evoked potentials elicited by the stimulating the endovascular electrodes. There were prominent responses at approx. 100 ms post-stimulation, suggesting cerebellum activation.



Optical Brain-Computer Interface

In this project, we aim to develop an optical BCI and associated rapid real-time decoding of the optical signals. We have extensive experience with intracranial neuronal fluorescent imaging with miniaturised fluorescent microscopes. We have found >500 neurons can be tracked for >1 year with minimal signal degradation and very high information content. Notably there is no direct contact with neurons, avoiding the tissue damage and signal impairment occurring with penetrating electrodes. Fluorescent signal in brain cells is achieved by using an innocuous viral vector to express fluorescent proteins and these techniques have been used in non-human primates. A key to implementing this technology as a BCI is the need for rapid real-time decoding of the optical signals. We have recently developed a real-time decoder using machine learning techniques that achieves an extremely high rate of decoding (~200 frames/second).



AI and Machine Learning for BCI Decoding

A deep neural network with an encoder and a decoder-only Large Language Model (LLM) is investigated for subject-specific visual semantic decoding. The encoder maps the ECoG data into high-level neural representations, while the decoder interprets the representations into natural language. The experimental work has focused on exploration of different deep learning algorithm as the encoder for open-vocabulary neural decoding. We employ three encoders, each with a well-known ability to capture sequential dependencies: (1) a convolutional neural network with 1-dimensional kernels (1D CNN) applied to the time domain; (2) a customized transformer that jointly attends to both spatial and temporal dimensions; and (3) a simplified transformer with temporal causal attention.

Future Prospects

Full closed-loop BCI using endovascular electrodes that both record and stimulate to provide human-machine and human-human communication.

High density, minimally invasive neural recording using optical BCI for complex human-machine interactions.



David B. Grayden

Clifford Chair of Neural Engineering, University of Melbourne, Australia
Department of Biomedical Engineering, Faculty of Engineering & Information Technology and the Graeme Clark Institute for Biomedical Engineering. Co-Director of the Victorian Medtech Skills and Devices Hub and Director of the ARC Training Centre in Cognitive Computing for Medical Technologies. Main research interests are in understanding how the brain processes information, how best to present information to the brain using medical bionics, such as the bionic ear and bionic eye, and how to record information from the brain, such as for brain-machine interfaces. Teaches BioDesign Innovation in collaboration with the Melbourne Business School. Co-Director of Biodesign Australia.

Project Faculty: Sam John, Chris French, Takufumi Yanagisawa
Postdoctoral Fellows: Joel Villalobos, Stella Ho, James (Weijie) Qi, Dechuan Sun
Research Assistants: Huakun Xin, Luke Weston
Student: Qi Meng

Collaborators: Joseph West, Ranjith Unnithan, Anthony Burkitt, Yi-De (Frank) Tai, Bryce Widdicombe, Jingyang Liu, Martin Spencer, Jelle H. M. van der Eerden, Po-Chen Liu

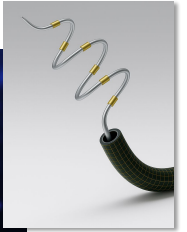


極低侵襲血管内Brain-Machine Interface (BMI)システムの開発

大阪大学大学院医学系研究科 脳神経外科学 講師 中村 元

概要

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イスが必要であり、その方法の違いから「侵襲BMI」「非侵襲BMI」の2つに分けられる。侵襲BMIは外科的手法を用いて頭蓋内に電極を留置し、そこから得られる脳波信号をBMIに活用するため、多くの情報を遅延で扱うことが可能である。しかし、開頭術を要することやコストの大きさから、ヒトへの応用には課題があった。本研究開発項目では、脳血管に誘導可能な柔軟で細径の血管内電極を作製し、これを用いて極低侵襲に精度の高い脳波信号を検出し、BMIに活用する「極低侵襲血管内BMIシステム」の開発を目指している。本プロジェクトは、柳澤琢史SPM（研究開発課題3-2-2）、関谷毅SPM（研究開発課題5-1-1）、植村隆文PI（研究開発課題5-1-3）と密に協力しながら取り組んでいる。これまでの研究成果と今後の展望について以下に記載する。



1. 血管の中から脳波を計測できるのか？

脳の表面を走行する静脈（cortical vein: CV）から脳波信号を検知し、それをBMIに活用するという技術は存在しておらず、その有用性は証明されていない。そのため、まずはブタやヒツジなどの大型動物を用いて、CVに留置した血管内電極を用いて脳波信号を検知するか否かを検証することとした。大型動物の脳はヒトと比べてはるかに小さく、その表面を走る血管も極めて小さい（Figure 1）。そのため、実際の手術で使用される脳血管造影装置が設置されているふくしま医療機器開発支援センターの大型動物実験用ハイブリッド手術室を使用することとした。同施設でブタの大腿静脈から脳表静脈（直径0.8mm）までマイクロカテーテルを誘導し、これを介して我々の開発した極細径血管内電極を留置し、脳波計測を行った。脳波計測の精度を検証するために、侵襲BMIと同じ方法でブタの開頭を行い、脳表に留置したシート型電極で計測した脳波信号と比較した（Figure 2）。本実験の結果、シート型電極よりも高い精度で血管内電極から体性感覚誘発電位（Somatosensory Evoked Potential: SEP）を計測できることが明らかとなり、CVからの血管内脳波計測の有用性が示された（Figure 3）。また、上矢状静脈洞（superior sagittal sinus: SSS）と呼ばれる最大径2-3mm程度の頭蓋内血管に血管内電極を留置した状態で長期間ブタを飼育し、長期安定性を確認したところ、留置後49日目（最長）での脳波計測にも成功した（Figure 4）。

これらの結果から、脳静脈をターゲットとした極低侵襲血管内BMIシステムは、シート型電極を用いた侵襲BMIと比較して、少ない侵襲で精度の高い脳波信号を長期間の計測できる可能性が示唆された。

Figure 1



Figure 2

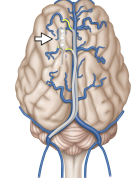


Figure 3

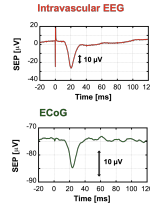
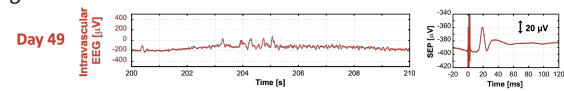


Figure 4



今後の展望

本研究により、極低侵襲血管内BMIシステムの有用性と将来性が示されました。今後はデバイスの長期安全性の検証を行うついで、前臨床試験に向けて準備を進めていく予定です。また、ヒト3Dモデルを用いた留置シミュレーションシステムも確立し、留置手術の安全性向上にも努めてまいります。本システムの社会実装を実現すべく、IoB Minimally Invasive Teamの皆様とともに全力で取り組む所存です。

貴島 晴彦

大阪大学大学院医学系研究科 脳神経外科学 教授

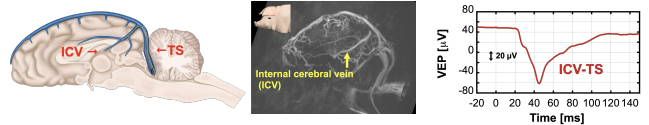
尾崎 友彦

大阪大学大学院医学系研究科 脳神経外科学 特任助教

2. 極低侵襲血管内BMIシステムの可能性

極低侵襲血管内BMIシステムは細径かつ柔軟なデバイスであり、脳深部を走行する静脈である内大脳静脈（Internal cerebral vein: ICV）にも留置可能であった（Figure 5）。ICVは後頭葉や視床の近くを走行しており、ICVに留置した血管内電極を用いて世界ではじめて視覚誘発電位（Visual evoked Potential: VEP）の検知に成功した。我々の開発した極細径血管内電極を用いることで、従来の方法ではアクセスできなかった部位の脳波信号を計測できるため、BMI以外の様々な用途（てんかんの焦点検索、高次脳機能障害への介入など）にも利用できる可能性がある。

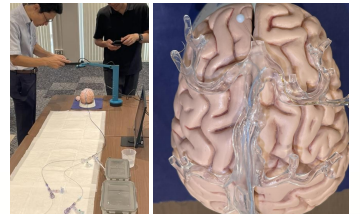
Figure 5



3. 3Dプリンタを用いたシミュレーションシステム

ブタを用いた実験により、極低侵襲血管内BMIシステムの有用性が明らかとなった。しかし、ヒトへの応用を試みるためには、ヒトの血管モデルを用いて、デバイスのサイズ・柔軟性・潤滑性・視認性など、様々な性能を評価しなければならない。我々は、ブタ実験と並行してヒトの脳血管造影検査のデータを元に作成した3D脳静脈モデルによるデバイスの留置シミュレーションも行っている（Figure 6）。

Figure 6



4. 血管内CA開発拠点構想@大阪大学

ムーンショット型研究開発事業のご支援により、令和7年度に大阪大学医学部の動物実験施設に最新型脳血管造影装置（Siemens社製 ARTIS icono）が導入された。本装置を用いることで、極低侵襲血管内BMIシステムの開発が加速され、社会実装への道のりが近づくことが期待できる。



中村 元（なかむらはじめ）

大阪大学大学院医学系研究科 脳神経外科学 講師
大阪大学医学部附属病院 脳卒中センター 副センター長

大阪大学医学部附属病院において、脳血管障害治療チームの責任者を務めています。開頭手術と血管内手術を組み合わせて、患者さんに優しく、より効果的な治療戦略を立てるよう心がけています。本研究課題では、脳神経外科診療技術を最大限に活用し、極低侵襲血管内BMIシステムの開発に尽力いたします。

高垣 匡寿

大阪大学大学院医学系研究科 脳神経外科学 助教

松村剛樹, 棕本悠嗣, 寺西邦臣, 山崎弘輝, 倉本仁美, 他多数

大阪大学大学院医学系研究科 脳神経外科学 脳血管障害グループ医員



IoB極低侵襲技術開発 長期計測が可能なウェアラブルデバイスの開発

大阪大学 産業科学研究所 准教授 植村 隆文

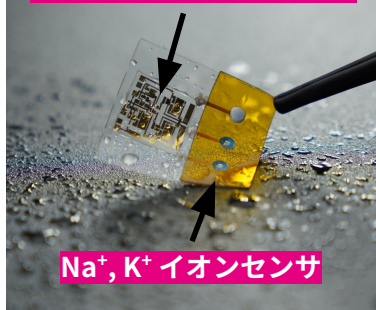


講演

IoB極低侵襲技術開発においては、外科的な処置が必要な侵襲型と比べ、ごくわずかな侵襲で、かつ、体の表面から情報をとらえる非侵襲型より高性能なBMI技術を開発し、既存技術では実現困難な高精度と安全性の両方を有する、新しいBMI領域の創出を目指した取り組みを実施しています。具体的には、低侵襲治療のひとつであるカテーテルを使用した血管内治療技術を活用して脳静脈血管内から脳波信号を取得する技術の開発を実施しています。

本研究では、イオンや分子などの生体由来の化学量を長期的に計測可能なウェアラブルセンサを実現するため、化学量センサの長期利用に向けた基礎検討を実施しています。人間の生理応答の結果として血液もしくは体外に分泌されるイオンや各種分子の定量計測を目指すものであり、脳波などの物理量計測に加えて、生体からの分泌物の成分計測を同時に実現する事によって、身体的・認知・知覚能力の拡張をより高度なレベルで実現することを目指しています。

フレキシブル信号処理回路

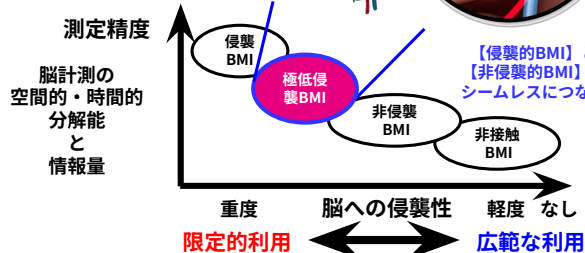
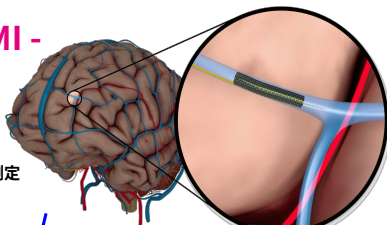


Na⁺, K⁺ イオンセンサ

IoB極低侵襲技術開発

- 極低侵襲BMI -

超極細軟質
血管内留置デバイス
脳表静脈血管からの長期脳活動測定



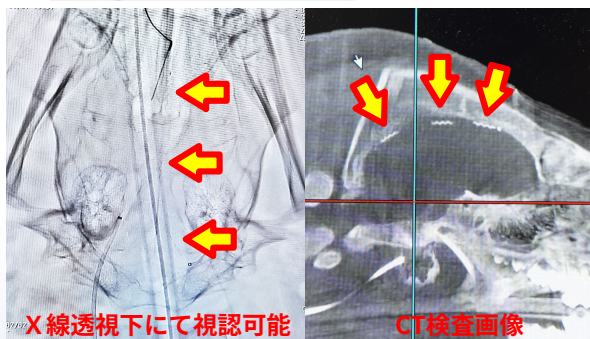
極低侵襲BMIシステムのための「2つのデバイス」

- ・超微細で柔らかい血管内留置デバイスによる【極低侵襲BMIシステム】
- ・BMIトランスポーターとして機能する【血管内脳波測定デバイス】

フレキシブルエレクトロニクス技術の活用



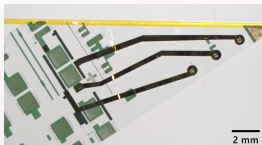
直径 1 mm
血管内電極



X線透視下にて視認可能
CT検査画像
らせん形状の電極を脳静脈血管に留置し、脳波計測が可能

今後の展望

脳静脈血管に柔軟な電極を留置し、脳波計測を実現しました。今後は、脳波計測だけでなく電解質をはじめとする化学量計測を実現すると共に、右図に示すような薄膜柔軟電子回路を血管内に搭載し、高品質な生体信号計測を実現したいと考えています。



ウェアラブルデバイス開発の現状

◆ 生体電位計測



◆ 化学分析



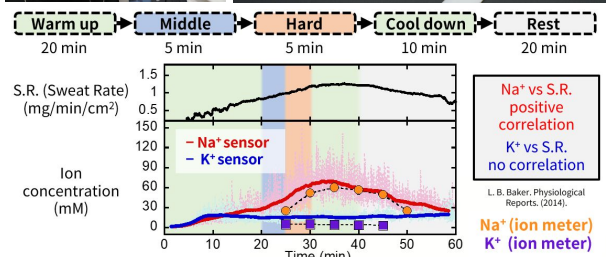
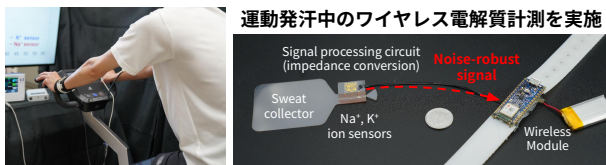
涙の計測
グルコース、乳酸 etc.
N. M. Farandos, et al.
Adv. Healthcare Mater. (2015)

ウェアラブル汗センサ
グルコース、乳酸 etc.
Na⁺: 脱水症状
K⁺: 心臓疾患
Gao, W. et al. Nature (2016)

代謝物（化学物質）は有用な分析対象
例：定期健康診断における血液・尿分析
ウェアラブルへの課題：
化学・バイオセンサーの長期安定性

【目標】安定性を有するバイオセンサを開発し血管内計測に活用する

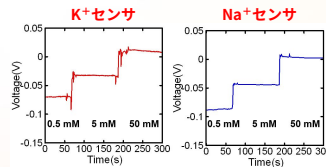
運動発汗中の電解質濃度連続計測



運動発汗中の電解質濃度の連続計測に成功

血液中の化学量計測に向けて

血液中に浸漬（15分）後のセンサ応答を調査



抗血栓性ポリマー
（たんぱく質の吸着を抑制）
のコーティングにより
センサ応答維持を確認

植村 隆文

大阪大学 産業科学研究所 准教授
先進薄膜機能物性研究分野 准教授
大学院情報科学研究科 情報システム工学専攻（兼任）
https://researchmap.jp/Takafumi_Uemura : QRコード
Email : uemura-t@sanken.osaka-u.ac.jp





CA操作に向けた新しいインターフェース開発 ～複数の感覚情報を統合するプラットフォーム～

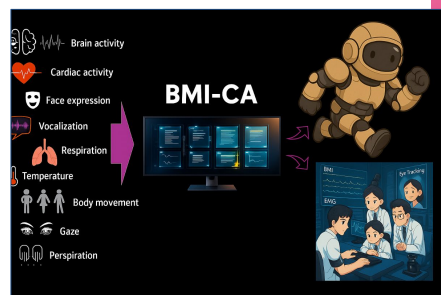
株式会社アラヤ チームリーダー 阿久津 完

特徴

サイバネティックアバター（CA）を操作するインターフェースの1つとして脳と外部を繋ぐブレイン・マシン・インターフェース（BMI）の利用が期待がされている。一方、誰でも利用できるレベルでの最適なインターフェースは存在していません。

本研究は、社会実装を視野に入れ、脳波のみならず筋電等、複数の感覚情報を統合、組み合わせることで、CA操作に最適な新しいインターフェースを見つけることを目的としています。

脳波や筋電といった異なる型の生体データは組み合わせるの取り扱いが難しく、汎用的なのが多かったため、複数の生体信号の共通化や、GUI操作のみで完結できる”BMI-CAプラットフォーム”と呼ばれるプラットフォームを構築し、専門家だけでなく、アバター操作のためのインターフェースの開発を可能にしました。



BMI-CAプラットフォームの構築

BMI-CAプラットフォームは、脳波・筋電など多様な生体信号を手軽に同期取得し、リアルタイム解析と可視化を可能にするソフトウェアです。研究者には柔軟なマルチモーダル解析環境を、一般ユーザーには直感的な操作体験を提供し、医療・教育からエンターテインメントまで幅広い応用を目指します。

特徴

- ✓ 多様な信号処理：EEG・EMG・視線を同期取得し、解析、可視化がリアルタイムで可能。
- ✓ 利用者に合わせた柔軟性：プログラミングに不慣れなユーザーにはシンプルなGUIブロック、エキスパート向けには高度なカスタマイズが可能
- ✓ デバイス差異の吸収：センサごとのデータ形式やキャリブレーション方法を統一し、開発効率を向上
- ✓ 操作コマンド化：解析結果を仮想環境や物理ロボットの制御コマンドに容易に変換可能
- ✓ クロスプラットフォーム対応：DockerベースでLinux / Windows / Macに対応、環境構築を簡易化

将来展望

本プラットフォームはオープンソース化を見据え、商用センサ対応・リアルタイム処理・機械学習統合をさらに強化していきます。将来的には「インターネットのように誰もが利用可能なBMI基盤」として発展し、世界規模での共同研究・産業応用・新しい操作体験の社会実装を加速させることを目指しています。



BMI-CA プラットフォーム解析画面

今後の展望

複数のモダリティを統合できるプラットフォームを開発したことで、マルチモーダルでの解析やアプリケーション開発のハードルを下げることができました。今後はIoBプロジェクト内で作られた様々なコア技術を統合するプラットフォームにアップデートしていきます。そして、研究用途から分野を限定しないアプリケーション制作、教育用途まで幅広い応用的な利用まで、社会にとって必要なユースケースを増やしていき、より多くの方に使ってもらえるように利用者の声を反映したプラットフォームに進化させていきます。

様々なユースケース

産業

複数の生体信号を統合してロボットやゲームキャラクターを操作する次世代コントローラーとして応用できます。小型ロボットから大型建設機械まで幅広い対象に対応し、ユーザーの意図を自然に反映した直感的な操作を実現することが期待されています。さらに、BMIを利用したアプリケーション開発の共通基盤として、新しいゲームキャラクターの操作などのエンターテインメントへの利用も期待されています。

ヘルスケア

脳活動や身体状態をリアルタイムに可視化し、健康状態や集中度、ストレスレベルを継続的にモニタリングする基盤として期待されています。これにより、日常的なセルフケアやパフォーマンス管理を支援するだけでなく、リハビリや福祉領域における補助的なインターフェースとしても活用でき、医療・福祉分野での応用が期待されます。

ドバイ・フューチャー・ラボとの共同研究

Internet of Brains (IoB) は、ドバイ未来財団（DFF）が運営するドバイ・フューチャー・ラボ（DFL）と連携し、人々が自身の脳波（脳から発生する電気信号）や筋電位（筋肉から発生する電気信号）を用いてロボットやアバターを自在に操る、次世代のブレイン・マシン・インターフェース（BMI）技術の共同研究開発に着手しました。



2025年5月日本でのサイトビジットの様子

DFLとの連携は、我々が開発する先端技術の社会実装を劇的に加速させるための戦略的な一手です。DFLは、ドバイ政府の強力な支援のもと、都市全体を「リビングラボ（生きた実験室）」として活用し、未来技術の実証と社会実装を世界でも、スピーディに推進する機関の一つです。

200以上の国籍の人々が共存する多様性に富んだドバイの環境は、我々の技術がグローバルに受け入れられるかを検証する上で、他に類を見ない理想的なテストフィールドとなります。本提携を通じて、技術開発に留まらず、多様な文化や社会における受容性までを検証し、真に価値ある研究成果として世界へ展開することを目指します。

阿久津 完

株式会社アラヤ MultiSense Foundation チームリーダー

2012年に東京大学大学院情報理工学系研究科を修了後、DeNAに入社し複数のIPタイトルを開発・企画。その後、ZEALSで汎用的な対話ロボットの開発にプロダクトオーナーとして従事。現在は株式会社アラヤでMultiSense Foundationチームリーダーを務め、IoBのプロジェクトにおいて金井PMのもと課題推進者（PI）として、脳情報を含むマルチモーダル生体信号を用いたアバター操作共通基盤の研究を進めています。

Ángel Muñoz González

株式会社アラヤ MultiSense Foundation チーフリサーチャー

Ates Eren Dogus

株式会社アラヤ MultiSense Foundation Product Development Manager

松本 慶太

株式会社アラヤ 建設ソリューション事業部 リーダー

Sarah Cosentino

株式会社アラヤ MultiSense Foundation チーフリサーチャー

吉田 曉人

株式会社アラヤ MultiSense Foundation リサーチャー

Yi-Chen Lin

株式会社アラヤ NeuroAI事業部 シニアリサーチャー



ニューロテックのある未来社会の姿を人文・社会科学から検討する “Internet of Brains”-Society

慶應義塾大学 法学部 教授 駒村圭吾

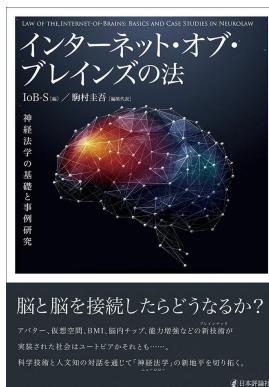
東京大学大学院 情報学環 助教 小久保智淳

巻頭

“Internet of Brains”-Society は、法学者、倫理学者、哲学者、弁護士を中心に構成されたチームです。私たちは「Internet of Brains」が実現した社会が到来したとき、IoBと個人がどのような関係を取り結ぶことが望ましいのかを検討しています。

具体的には、私たちが大切にしてきた価値、権利、自由を守りつつ、技術がもたらす福利を確保するにはどうすれば良いのか。在るべき社会の姿から逆算し、法的・倫理的にどのような対応や政策、制度が必要になるのかを検討しています。

そのために「神経法学」という新しい法分野を中心に検討を行い、国内外で研究活動を展開すると共に、SF的な想像力の助けを借りた検討、次世代を担う若者と対話を重ねてきました。



インターネット・オブ・ブレインズの法

IoB-Sでは、金井プロジェクトに参画する自然科学者・技術者を中心に、神経科学、認知科学、精神医学の領域で研究を自然科学者や医師との対話を重ねてきました。具体的には、研究・開発が進む神経科学・技術の現在地とその展望を共有してもらうことで、そこにはどのようなリスク・ベネフィットが潜在しているのかを、時には大胆な未来予測も含めながら法学的・倫理的に検討しました。そこでは、インターネット・オブ・ブレインズという構想を達成・実現していく上で、私たちの社会において重視されてきた価値、自由、権利を守りつつ、新しい技術の研究開発を加速させ、それらがもたらす福利を最大限に享受するためには、どのような制度や仕組みが必要になるのかも検討しています。その成果は、「法学セミナー」という著名な法学雑誌に、2022年~2023年度の2年間にわたり連載されました。その後、内容のアップデートを重ねて、2025年には『インターネット・オブ・ブレインズの法』という一冊の書籍として刊行しました。

このほか課題推進者である駒村圭吾が企画し、神経科学技術を中心とする諸技術の可能性を議論した「人類の可能性を開拓する総合知の未来」や、ELSIのあり方を問う「文・理を超えてこれからの課題にどう向きあうか」と題する座談会を実施し、経済界にも多くの読者がある『三田評論』に掲載されました。また、ニューロテクノロジーを含む先端的な諸技術と「自由」との関わりを論じた書籍『Liberty2.0』も刊行しています。

こうした取り組みを通じて、まだ日本では馴染みのない新領域である「神経法学（neurolaw）」に取り組み重要性和意義を研究者コミュニティに発信すると同時に、そこにおける先駆的な業績を多数残しました。

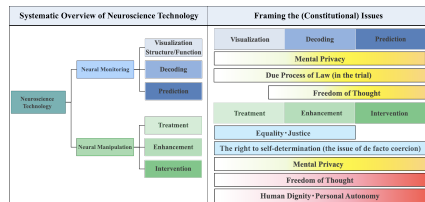
また、IoB-Sのメンバーが新聞の取材を受けたり、web記事を執筆することを通じて、研究者コミュニティに限られない多様なステークホルダーにも情報発信を行いました。



国際的な舞台での研究・意見の発信

国際神経倫理学会（International Neuroethics Society）や国際公法学会（ICON・S）といった国際学会や、諸外国で開催されるカンファレンス、イベント、共同の研究会において研究成果を報告することで、国際的な舞台でも積極的な研究成果・意見発信を行うと共に、グローバルに進む議論の中でも、一定の存在感を発揮してきました。

また、UNESCO、WHO、国連人権理事会や、OECD、IEEEで進む勧告文書やガイドラインの策定にメンバーが参加し、国際的なルール形成の場においても積極的な意見の発信を行なっています。今後はこうした活動をより強化していく予定です。



神経科学技術の体系的俯瞰と憲法的課題の一覧
(小久保「神経法学の体系」2024より抜粋、一部改変)

社会との関わりの中で

IoB-Sはアカデミックな活動だけでなく社会との関わりを大切にしながら、実効性のあるELSI議論を目指してきました。

メンバーが攻殻機動隊公式グローバルサイトに連載されたエッセイを執筆し、世田谷文学館で開催されたイベントに登壇する等、SF的想像力や、SFの世界に興味がある一般の方々の期待と不安の双方に向き合ってきました。また、CIC Tokyoで開催されたイベントに登壇し、企業や実務家との交流・対話も行いました。



さらには、慶應義塾大学博士課程リーディングプログラムのサマースキャンプにおいて企画を実施したり、慶應義塾高校で次世代を担う若者を相手に講演会を行いました。そこでは、ニューロテクノロジーが普及した次世代を担う人材との対話を通じ、情報の提供や問題意識の共有を行うと同時に、ELSIや科学研究を担う人材の育成に努めています。

今後も、本の中だけに閉じたELSI研究ではなく、社会との関わりの中で役割を発揮できるELSI研究を目指していきます。

今後の展望

現在、神経科学技術の社会実装が急速に進捗していくことを受けて、様々な国際機関において神経科学技術の実装に照準したルールを形成する動きが加速しています。こうした動きに日本から参画し、ルールづくりにIoB-Sの観点・意見を反映していくことを目指して、積極的な国際発信を行っています。また、大きな可能性を秘めた神経科学技術が社会が適切に受け止め、リスクとベネフィットのバランスを実現できるよう、今後も研究や多様なステークホルダーとの対話、情報提供も積極的に行っていきます。



駒村 圭吾（こまむら けいこ）

慶應義塾大学 法学部 教授

駒村 圭吾（こまむら・けいこ）：1960年東京生まれ。慶應義塾大学法学部法律学科卒業。白鴎大学教授、慶應義塾大学法学部・同大学院法務研究科助教授を経て、現在同大学法学部教授。法学博士。専攻は憲法学。ハーヴァード大学ライシャワー研究所・憲法改正研究プロジェクト諮問委員会委員。著書に『憲法訴訟の現代的転回』（日本評論社）、『ジャーナリズムの法理』（嵯峨野書院）、『権力分立の諸相』（南窓社）など。

小久保 智淳（こくぼ まさとし）

東京大学大学院情報学環 助教

大島 義則（おおしま よしのり）

弁護士・専修大学法務研究科 教授

堤根 剣（つつまばやし けん）

慶應義塾大学法学部教授・同法学部長

横大道 聡（よこだいどう さとし）

慶應義塾大学大学院法務研究科 教授

斉藤 邦史（さいとう くにふみ）

慶應義塾大学総合政策学部准教授

松尾 剛行（まつお たかゆき）

弁護士

数藤 雅彦（すどう まさひこ）

弁護士

成原 慧（なりはら さとし）

九州大学法学研究院 基礎法学部門 准教授

福士 珠美（ふくし たまみ）

東京通信大学人間福祉学部 教授

西村 友海（にしむら ともうみ）

九州大学大学院法学研究院 准教授



Internet of Brains

国立研究開発法人科学技術振興機構ムーンショット型研究開発事業／株式会社国際電気通信基礎技術研究所
Copyright: Advanced Telecommunications Research Institute International (ATR)



ブレインテック／ニューロテクノロジーの民主化を目指して

広島大学 大学院先進理工系科学研究科 准教授 武見亮晃

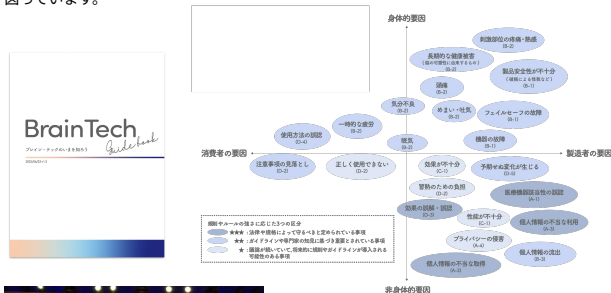
巻頭

ブレインテックが急速に普及する現在、①消費者・事業者のリテラシー不足、②科学的根拠の分散、③人体への影響の不明瞭さが社会実装の課題となっている。本プロジェクトでは「知識共有」「エビデンス整理」「生体影響評価の標準化・簡易化」でこれらの解決を図る。

知識共有としては、一般消費者や事業者に向けたブレインテック ガイドブックを作成した。Vol.1では、ブレインテックの基本概念、主要な計測・介入技術、利用時の留意点とリスク等を説明し、Vol.2は責任ある製品開発の手引きとして、法規・安全性・科学的妥当性・情報開示の要件を体系化した。エビデンス整理では、非医療ブレインテックを対象に12件のシステムティックレビューを実施し、結果をエビデンスブックとして公開した。ガイドブックとエビデンスブックは OECD Neurotechnology Toolkit に引用され、国際的に参照されている。生体影響評価では、皮質興奮性や機能評価を自動化するTMSロボットを開発し、国内外複数施設で安全に運用、事業化も進展している。これらの取り組みを通じて、誰もが安全かつ公正にブレインテックを活用できるエコシステムの構築を目指す。

消費者・事業者向けガイドブックの作成

一般利用から事業化までを視野に、ブレインテックの共通言語と実務指針を整備しました。Vol.1では、基本概念・主要な計測・介入技術・利用時の留意点とリスクをわかりやすく整理し、ユーザーと事業者が製品価値を見極める基盤を提供。Vol.2は「責任ある製品開発の手引き」として、法規（広告表示・医療機器該当性・個人／脳情報の保護等）、安全性、科学的妥当性、消費者に対する情報開示を体系化しました。内容は OECD Neurotechnology Toolkit にも引用され、多くの国際機関との対話を通じて国際的な整合も図っています。



非医療ブレインテックの有効性と安全性調査

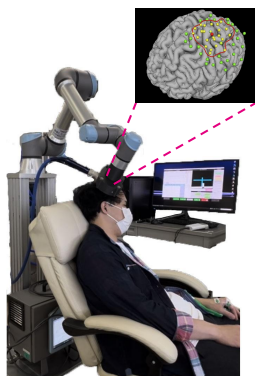
一般消費者向けのブレインテック（非医療領域）は、医療分野ほど規制や検証の枠組みが整っておらず、誤解や過大な期待が生じやすい領域です。そこで本プロジェクトでは、この非医療領域を対象に、12の主要クエスチョン（例：ニューロフィードバックで運動能力は向上するか／非侵襲脳刺激は記憶力を高めるか／脳波はリラクスの指標となるか）を設定し、それぞれの有効性・安全性・信頼性をシステムティックレビューで評価しました。成果は『エビデンスブック』として公開しており、各クエスチョンごとに簡潔な結論とその根拠となる調査結果を、主要文献と併せて提示しています。レビューには教授から学部生まで、6カ国の研究者40名超が参加し、多角的な視点で議論を重ねました。なお、一部のレビューの結果は、プレプリントおよび査読付原著論文としても公表しています。

CONTENTS	
はじめに	
01 ユーザーフレンドリーなガイドブックの作成	02 ユーザーフレンドリーなガイドブックの作成
03 ユーザーフレンドリーなガイドブックの作成	04 ユーザーフレンドリーなガイドブックの作成
05 ユーザーフレンドリーなガイドブックの作成	06 ユーザーフレンドリーなガイドブックの作成
07 ユーザーフレンドリーなガイドブックの作成	08 ユーザーフレンドリーなガイドブックの作成
09 ユーザーフレンドリーなガイドブックの作成	10 ユーザーフレンドリーなガイドブックの作成
11 ユーザーフレンドリーなガイドブックの作成	12 ユーザーフレンドリーなガイドブックの作成
付録	
01 ユーザーフレンドリーなガイドブックの作成	02 ユーザーフレンドリーなガイドブックの作成
03 ユーザーフレンドリーなガイドブックの作成	04 ユーザーフレンドリーなガイドブックの作成
05 ユーザーフレンドリーなガイドブックの作成	06 ユーザーフレンドリーなガイドブックの作成
07 ユーザーフレンドリーなガイドブックの作成	08 ユーザーフレンドリーなガイドブックの作成
09 ユーザーフレンドリーなガイドブックの作成	10 ユーザーフレンドリーなガイドブックの作成
11 ユーザーフレンドリーなガイドブックの作成	12 ユーザーフレンドリーなガイドブックの作成
補足情報と参考文献	

生体影響評価の自動化：TMSロボットの開発

TMS (Transcranial Magnetic Stimulation) は、頭部外から短い磁気パルスで脳を刺激し、手の筋肉反応などを測る非侵襲的な評価法です。私たちは、この評価を安全かつ正確に自動実施できるTMSロボットを開発しました。これにより、熟練者でなくても短時間で同品質の測定が可能となり、再現性とスループットが向上します。その結果、生体への影響を多施設で検証する研究を力強く推進できます。

現在、TMSロボットは国内外の複数施設で安全に運用され、事業化も進展しています。今後は、脳波・瞳孔径・心電図・筋電図などの生体信号を組み合わせて脳状態を推定し、刺激パターンを自動最適化する自律評価基盤へ拡張します。現行機は主に一次運動野の機能評価に適用していますが、多信号化により運動以外の機能評価や新たな治療プロトコルの自律的探索へ展開していきます。



武見 亮晃

広島大学 大学院先進理工系科学研究科 准教授

2011年 慶應義塾大学理工学部卒業、2015年 同大学大学院理工学研究科後期博士課程修了、博士（工学）の学位取得。その後、ポスドク／任期付教員として、Danish Research Center for Magnetic Resonance（デンマーク）、東京大学大学院教育学研究科、慶應義塾大学大学院理工学研究科に勤める。2025年より現職。専門はニューロテクノロジー、運動制御。

今後の展望

国際ルールメイクの潮流を踏まえ、今後5年は「実装」に焦点を据える。国内学会と連携し、講義動画・実験デモ・Python演習からなる教育教材を制作し、日英二言語で公開する。わが国は、当該教材を事実上の標準として普及させ、提示する概念・手続を共通言語として定着させること。この共通言語をここに国際教養の議論を収斂させ、ルールメイクの方向性を先導する。併せて、エビデンス評価の国際ネットワークを拡充し、各国の結果の相互参照を可能にして、building trust in neurotechnologyを加速する。さらに、機能性表示食品に似た「機能性表示デバイス」の枠組みを査読付英文誌等で提案し、事業者・研究者・ユーザーが納得可能な実務的規格へ結実させる。

女川 亮司

システムティックレビューチーム チームリーダー

日本学術振興会海外特別研究員 / Postdoc Researcher, Queen's University

「ニューロフィードバックで運動能力は向上するか」論文の共同第一著者 (Onagawa et al., 2023)

木村 一皓

Postdoc Researcher, Danish Research Centre for Magnetic Resonance

「ニューロフィードバックは注意力を高めるか」論文の共同第一著者 (Kimura et al., 2024)



社会とのコミュニケーション基盤プロジェクト 「Neu World」

株式会社アラヤ サイエンスコミュニケーター 宮田龍



概要

Neu Worldはムーンショット目標1 金井プロジェクトInternet of Brains (IoB) によるサイエンスコミュニケーションのためのプロジェクトです。

IoBは脳やAIの最先端研究から新しい生活の実現を目指して研究を進めていますが、研究と生活の間には研究発表だけでは埋められないコミュニケーションの隔たりがあります。そこで多くの人が参加できる場としてNeu Worldを立ち上げました。SFプロトタイピングの手法を取り入れたNeu Worldでは、漫画家や小説家をはじめとしたクリエイターや研究者、そしてみなさんと一緒になってSF作品をつくり、「こんな世界にしたい」「この未来はちょっと違うかな」など異なる意見を楽しみながら、ともに新しい世界を共創していきたいという想いから誕生しました。



SF作品でつくる新しい世界



Neu World キービジュアル © Ququ

SFプロトタイピングの科学コミュニケーションへの応用可能性という仮説に基づき、「Neu World」では未来へ向けてBMIを中心としたサイバネティック・アバター技術をどう社会実装していくかについて、オリジナルのSF作品の制作と公開を中心に社会のみなさんと対話・共創を行うための科学コミュニケーションのフローを制作しました。

STEP1 Co-imagination : ともに想像することからSF作品をつくる

IoBの研究・開発をテーマに、市民、クリエイター、研究者が集まり多様な未来の可能性についてコミュニケーションを行います。そこからオリジナルのSF作品を制作いただきます。
例) 双方向トークイベント・少人数ワークショップ・研究者×作家での対談など

STEP2 Co-munication : SF作品公開および発信・拡散

制作されたSF作品を公開。メディアなどのコラボレーションにより、普段科学に関心のない人たちにも届けます。SNSなどでの作品の感想を通して、多様な人々が未来への不安や期待を共有し合うコミュニケーションプラットフォームの創出を目指します。

STEP3 Co-Creation : 未来へ向けた共創活動の推進

一人ひとりの価値観や社会課題に対する向き合い方、アイデアなどをより深い対話を通じて発展させるための活動を展開。ムーンショットが目指す未来ビジョンのアップデートと、多様なステークホルダーとの新たな共創活動の醸成を目指します。

例) 学校ミュージアムでの活用するコミュニケーションツールの制作・展開、意見収集の解析、結果の公開やディスカッションの実施など

今後の展望

「未来」と聞くとい何を感じるでしょうか？

日々進歩する科学・技術、複雑化する社会のなかで、未来を想像することが益々難しくなっています。そんな未来を無理なく想像する手助けとなるのは私の大好きな漫画、小説にありました。Neu Worldは、究極の群像劇であるこの世界のその先を、研究者、クリエイター、そしてみなさんの視点をもとに一緒につづいていきたいという想いが込められています。

みなさん一人ひとりがこの世界の主人公です。それぞれの物語を一緒に進めましょう。

ムーンショット目標1の研究を テーマとしたSF作品の公開

Neu Worldでは、プロジェクトのビジョンや予測ではなく、社会のみなさんと未来をともにつくっていくための対話のきっかけとなることを目指してSF作品を制作しています。

2025年9月現在、Neu World公式ウェブサイトにて、漫画3作品、小説2作品の計5作品を無料公開中です。今後も続々と新作を公開していく予定です。



国境を越えた市民対話に向けて

国際的なコミュニケーションを推進し、ボトムアップ的な価値観の多様性を可視化することを目的に、神経倫理を専門とする米国のシンクタンク組織「Institute of Neuroethics (IoNx)」との連携プロジェクトを行っています。

本プロジェクトでは、国内外で対話を実施するためのアンケートツールの作成や海外でのコミュニケーション活動を実施。2025年8月には、大阪・神戸で『もし、あなたの記憶を自由自在に「デザイン」できるとしたら？』をテーマとしたワークショップ、大阪・関西万博でニューロテクノロジーの倫理的、法律的、社会的な課題 (ELSI) をテーマとしたパネルディスカッションを実施しました。

社会とのコミュニケーション基盤の創出

トークイベントやワークショップを中心に、IoBの研究について知ってもらい、そこから未来について対話をする活動を行っています。どの回も、参加者層が異なることで視点の違ったコミュニケーションが生まれています。

教育機関や科学コミュニケーションプログラムを求めているステークホルダーとの連携による発展施策実施から、作品の和訳やオーディオブックの提供、イベントでの手話サポート、地方でのイベント開催などDE&Iに配慮したコンテンツ開発を行っています。



宮田龍

株式会社アラヤ サイエンスコミュニケーター

株式会社アラヤ 研究開発部にてIoBやアラヤの研究に関わるサイエンスコミュニケーションを担当。個人の科学コミュニケーターとしても活動中。「閉塞感のない社会」の実現を目指し、科学技術と社会の未来について対話するイベントや、展覧会などを通じたサイエンスコミュニケーション活動に従事。日本SF作家クラブ会員。

プロジェクトメンバー
モーション瞳 / 園山由希江 / 小林知世 / 竹田聖 / 杉田祐輔 / 土橋一斗 / 小澤美咲
※メンバー全員がサイエンスコミュニケーター