

脳の仕組みを活かしたイノベーション創成型研究開発
(高精度脳情報センシング技術・脳情報伝送技術、実時間脳情報抽出・解読技術及び脳情報解読に基づく生活支援機器制御技術)

Novel and innovative R&D making use of brain structures;
 high-precision brain information sensing technology and brain information transmission technology, real-time brain information extraction and decoding technology, and life-assisting device control technology based on brain information decoding

研究代表者

石井 信 株式会社国際電気通信基礎技術研究所
 Shin Ishii Advanced Telecommunications Research Institute International

研究分担者

依田 育生[†] 牛場 潤^{††} 井上 芳浩^{†††} 石井 正義^{††††}
 Ikuo Yoda[†] Junichi Ushiba^{††} Yoshihiro Inoue^{†††} Masayoshi Ishii^{††††}
[†]日本電信電話株式会社 ^{††}慶應義塾大学 ^{†††}株式会社島津製作所 ^{††††}積水ハウス株式会社
[†]NTT Corporation ^{††}Keio University ^{†††}Shimadzu Corporation ^{††††}Sekisui House, Ltd.

研究期間 平成 23 年度～平成 26 年度

概要

高齢者・障がい者自立社会（「自立した生活を過ごせる」）の実現に役立つ科学・技術を開発し、「心身ともに健やかで長寿を迎えたい」という人類共通の願いを実現するため、「念じるだけで動く」生活・介護支援ロボット（ライフサポート型ロボット）及びコミュニケーション支援機器への応用を念頭に、簡単な動作や方向、感情等を機器に伝えることを日常的に可能とする技術について基本技術を確認した。

1. まえがき

従来のブレインマシンインターフェース（BMI）の適用範囲を自宅や診療所等、日常的な生活環境に拡張し、日常的に装着できる小型・軽量な計測装置により計測したデータを短時間にネットワークを通じて分析装置へ伝送してデータを解読することで、要介護者等の日常的な動作やコミュニケーションの支援を可能とする BMI（ネットワーク型 BMI）を実現した。この技術により、増加の一途をたどる要介護者等が自立した生活を過ごせるようになり、自由な社会活動への参画を容易にすることができれば、これらの方々の QOL の大幅な向上に寄与し、我が国全体の社会経済の活性化が期待できる。同時に、介護者の負担を軽減する技術として、介護離職者を減少させるなど実用化による社会的な効果も極めて大きい。この技術の実現のために複数の要素技術の開発を行った。次章では各要素技術に関する研究開発内容及び成果について述べる。

2. 研究開発内容及び成果

ネットワーク型 BMI の概要を図 1 に示す。本研究課題ではまず実験環境として脳情報と環境情報を同時に取得することが可能な実環境実験設備(BMI ハウス)を構築した。利用者の脳情報は携帯型脳活動計測装置により測定され、その情報はネットワーク基盤技術により転送される。その後、脳情報は大規模脳活動データベースを利用した脳情報解析技術によって解析され、車椅子や家電の制御等に利用される。各研究項目の詳細を以下に述べる。

2. 1 高精度脳情報センシング技術・脳情報伝送技術に関する研究開発

ア) 携帯型装置による脳情報の非侵襲・高精度・継続的計測技術



図 1 ネットワーク型 BMI の概要

本課題では、実環境で高精度に脳波（Electroencephalogram; EEG）を計測するための準乾式電極と乾式電極を開発した。具体的には、準乾式電極は毛髪の掻き分けと皮膚表面の研磨を同時に実現するブラシ構造とし、分極電圧が低い銀塩化銀電極によってこれを構成した。4時間以上におよぶ長期安定性を担保するために、高分子ポリマーで水分子を含有したジェルシートを電極盤面に用いた。一方、乾式電極については、毛髪の配向特性に基づいて3枚の平行板をバネ支持したブレード構造として構成した。頭部への適切な保持下では4時間以上の連続記録が可能であることを実験的に確認した。以上により、頭部の変動が多く、連続計測時間の長い実験では準乾式電極を用い、頭部変動が少なく、実験準備を短くするニーズがある実験の場合には乾式電極を用いる等、用途に応じて電極選択ができる環境が整備された。また、一連の開発工程において新規に開発した脳波測定機器の評価バッテリーは、本課題における標準化シリーズとした（共焦点レ

一ザ頭微鏡による頭皮性状評価、皮膚電極間インピーダンス計測、皮膚電極間電気的等価回路の同定、臨床脳波検査プロトコルに準拠して同時計測された脳波とのコヒーレンス解析、閉眼アルファ波増強と運動関連ベータ波増強を用いた実測脳波品質解析)。

また携帯型脳計測装置、外部脳活動計測制御装置と外部脳活動データ観測装置とから構成するネットワーク型BMI用携帯型脳計測装置を開発した。携帯型脳活動計測装置において、脳活動データを日常的に取得する技術として、NIRSとEEGによる脳活動の同時計測を継続的に可能とするNIRS-EEGプローブとNIRS-EEGユニットを開発した。NIRS-EEGプローブでは、8チャンネルのNIRSプローブおよび10チャンネルのEEG電極を配置し、簡便な装着と個人差に応じた調整を可能とした。NIRS-EEGユニットは、電動車椅子実験に対応した車椅子搭載型、複数台での同時計測実験に対応した携行移動可能なボディバック型など、実験形態に合わせて改良した。最終的には携行移動使用と車椅子搭載使用の両方に対応可能なバッグパック型とした。取得データ伝送機能については、主にスマートフォンや無線通信を行う家電で使用されている2.4GHz帯域との電波干渉の影響を避けるために、5GHz帯域の無線LAN方式を使用することとして、複数台同時(4台)に長時間(3時間以上、のべ24時間)の安定した計測を実現した。外部脳活動計測制御装置では、複数台の携帯型脳活動計測装置のパラメータ設定、キャリブレーションおよび計測などを同時に制御可能とした。外部脳活動データ観測装置では、複数台の携帯型脳活動計測装置の計測データ、データの管理状況およびデータの処理状況などを同時に観測可能とした。

イ) 脳情報・実環境情報統合に関するネットワーク技術

本課題は、脳活動データ及び環境情報を効率的に通信し、複数人・長時間の脳活動データと環境情報をともに蓄積し、移動支援・家電操作においては1秒未満、感情・情動伝達においては2~3秒以下の遅延でサービス要求に応じた出力を返すことを可能とするネットワーク技術を確立することであった。また、その技術を実装するクライアントサーバ方式のネットワークシステムを試作して実現性を実証することを目標として研究開発を進めてきた。

まず、脳活動データ及び実環境情報の分散管理・処理基盤アーキテクチャの基本検討、および、低遅延解読処理のための検索技術の検討を進めるため、データと処理を同等に扱うソフトウェアコンポーネント(以下、エージェント)を用いたモデリング手法を採用した。エージェントモデルに基づき、脳活動データの分散管理手法と脳活動解読の分散処理手法と実環境情報の分散管理手法を検討し、実空間を人、機器、空間の3種類のエージェントに分けて表現するモデルを拡張した新規モデルに基づく、基本アーキテクチャ(アーキテクチャ1版)を設計した。そのアーキテクチャに基づいた評価環境を試作・構築して基本設計の妥当性や手法間の比較評価を実施した。次に、構築した比較検証環境を用いて特性評価を実施し、その評価結果に基づいて改良したアーキテクチャ(アーキテクチャ2版)に基づく、脳活動データと実環境情報の分散処理基盤を構築した。さらに、この基盤を用いて実証システムを構築し、「分散処理基盤を用いたスマートハウス内機器制御における低遅延性の実証」を実施し、中間目標である「個別ユーザに対し、平成24年度までのスマートハウス内計測条件において、EEG信号に対し、1秒未満でアクチュエータ出力すること」を達成していることを確認した。

続いて、実証結果に基づいた分散管理・処理基盤の改良・検討を進め、大規模脳活動DBを活用したアーキテクチャとしての修正、および、複数ユーザで活用することを考慮した改良を行った(アーキテクチャ3版)。また、脳情報解読の応用例となる感情・情動コミュニケーション支援サービスの分散処理基盤上での実現方法の検討を進め、住環境における同サービスの応用例に基づいた透過的分散管理・処理基盤アーキテクチャのさらなる改良の検討を行った(アーキテクチャ4版)。以上によるアーキテクチャの実装である分散管理・処理基盤を用いて、複数ユーザによる機器制御における分散処理基盤の低遅延・拡張性の実証を行った。具体的には、家電や移動支援機器などの実機制御のための実証システムを実現し、最終目標である「数ユーザによるBMI制御を各ユーザ1秒未満の遅延時間で処理できることを確認した。また、拡張性について、数十人規模の脳活動計測データが同等の時間で処理できることを実証した。さらに、感情・情動コミュニケーション支援手法の検証として、住環境における脳情報を利用した感情・情動コミュニケーション支援サービスの実証システムを構築し、最終目標である「感情・情動コミュニケーション支援サービスに対して2~3秒の遅延」で処理できることを確認した。

2. 2 実時間脳情報抽出・解読技術に関する研究開発

ア) 日常生活時のタグ付き脳活動データベース

日常生活計測制御環境のためのプラットフォーム構築

カメラ、マイク、赤外線センサなど、人の位置、人の状態及び室内環境を計測するセンサと、センサの計測データをデータ処理用計算機にネットワーク接続するための伝送技術を実環境実験設備(BMIハウス)に実装した。また、住空間内で生活・介護を支援するアクチュエータとして、遠隔操作可能な住宅設備、家電などを設計し、実環境実験設備に実装した。また、それらは制御システムにより外部制御できるものとした。脳情報に他の生体情報・環境情報を合わせることで実現される、最適な環境制御機能、アクチュエータ操作制御機能に関して評価検証を行い、ネットワーク型BMIを利用した生活にふさわしい住空間の実用化について可能性を検証した。また、脳活動・生体データに基づくことで空調や照明などの室内環境を調整する睡眠サポートシステムの評価を進め、その実用化の可能性を確認した。さらに、一般の生活環境における脳情報を利用した感情・情動コミュニケーション支援サービスについて、それを用いる生活サポートシステムの試作を行い、有用性を検証した。

日常生活計測制御環境の整備

本課題の後半に実施する長時間日常生活実験を考慮して、カメラ、マイク、赤外線センサなどにより、人の位置、人の状態及び室内環境を計測するセンサの配置を決定し、各種生活機器などアクチュエータの仕様を策定した。実環境実験設備の構築を完了し、実機デモンストレーション等を通じて動作確認を行った。

リファレンス脳活動データベースの構築

本課題では、基本計画における「タグ付き脳活動データベース」のうち、BMIアルゴリズム構築に資する多人数・短時間(100人程度・1時間程度)のものをリファレンス脳活動データベースと称する。平成25年度に、自然な脳活動によるBMI解読技術の確立を目指して、62名の実験参加者の参加を得て、空間注意課題を用いた複数計測モード(fMRIなどの大型脳計測器、およびEEG-NIRSなどの携帯型脳計測装置)からなるリファレンス脳活動データ

ベースを構築した。平成 26 年度に感情・情動コミュニケーション支援に利用可能な BMI 解読技術の確立のため、快・不快の感情を惹起する画像を提示する課題を用いて、複数計測モード (fMRI、EEG、行動実験、心理指標など) からなるリファレンス脳活動データベースを構築した。後者については、パイロット実験の参加者や EEG と fMRI いずれかの測定ができなかった実験参加者を除外することで、最終的に、EEG と fMRI の両方が揃ったものとして、50 名以上のデータが取得できた。平成 25 年度分と合わせて大型脳計測器、携帯型脳計測装置の両方にわたる多人数 (100 名以上)・短時間のリファレンス脳活動データベースを構築した。

タグ付きブレインログデータベースの構築

本課題では、基本計画における「タグ付き脳活動データベース」のうち、日常生活時の複数人・長時間 (のべ 24 時間以上) のものをタグ付きブレインログデータベースと称する。平成 25 年度に、初期型の携帯型脳活動計測装置 2 台を用いて、2 名の実験参加者が実環境実験設備においてのべ 26.5 時間にわたる生活を行っている際の脳活動計測、生体計測及び室内環境計測を行い、それらを統合し、行動ラベルなど付加情報を加えることでタグ付きブレインログデータベースを構築した。平成 26 年度に 2.1 のア) の研究開発により、EEG のチャンネル数増加、計測装置本体ハードウェアの改良、無線通信システムの改良などを行った改良型の携帯型脳活動計測装置を開発し、初期型も加えて最大で 4 台が利用可能となった。それらを用いて、3 人の実験参加者による様々な日常生活行動やシーンを盛り込んだ 5 日間の長時間計測実験を実施し、脳活動計測、生体計測及び室内環境計測の統合と、それに行動ラベルなど付加情報を加えた、合計 30 時間以上のタグ付きブレインログデータベースを構築した。

長時間計測実験データに対して、人手による行動ラベル付けを効率化するため、多数の環境カメラ映像の中から、実験参加者が動作をしている部分を自動的に抜き出す機能を実装したラベリング支援ツールを開発した。また、今後さらなる長時間計測実験データが取得された際に必要となる (半) 自動の行動ラベリング技術の研究を進め、ジェスチャセンサ (Kinect) のスケルトン情報、環境カメラの映像、ウェアラブルモーションセンサ情報、頭部につけた一人称カメラの映像など、異なるセンサ情報を用いた複数の行動認識システムを開発し、その性能を評価した。

イ) 日常生活時計測データからの脳情報解読技術 データ駆動アーチファクト除去法の研究開発

実環境実験設備 (BMI ハウス) が稼働するまでの間に、大規模脳活動測定装置である MEG とモーションキャプチャーを用いて、「ペットボトルのキャップをあける」、「マウスをクリックする」など 10 種類の一般的な手指運動時の脳活動・行動の同時計測データを取得し、これをテストベッドとして眼電およびセンサー位置ずれアーチファクトの除去法を開発するとともに、バイズ正準相関分析による運動再構成法などを通じ実環境 BMI の評価を行った。

大型脳計測器である MEG のデータを脳内電流源からの信号と、眼球運動を含む複数のアーチファクト源からの成分に分離するためのバイズ統計手法 (拡張ダイポール法) を完成させ、MEG の生成過程を模したモデルから作成した人工 MEG データによりその特性を評価した。さらに、固視点を注視したまま、動き続ける指標を心の中で追従する課題を実行中の MEG の実データでその性能を確認した。このアーチファクト除去法を、実験室で取得した

空間注意課題時の EEG-NIRS 計測データに適用して脳情報解読性能を評価し、実環境で用いることの可能な EEG データへの適用可能性を確認した。

実環境実験設備において 9 種類の日常動作を繰り返しているときの脳活動を携帯型脳計測装置で長期間にわたり取得したデータを解析することで、多様な実環境ノイズ・アーチファクトのカタログ化を行った。EEG のアーチファクトカタログを利用したデータ駆動型アーチファクトアーチファクト除去法 (DAD 法) を開発し、統計的外れ値検出にもとづく標準的な方法と比較して、アーチファクトが含まれる試行が支配的でない状況では標準法よりも良好な性質を有することを確認した。

NIRS 計測には脳活動である皮質血流だけでなく、頭皮血流が大きく影響する。この頭皮血流アーチファクトを除去することを目的として、拡散トモグラフィ法 (DOT) の研究開発を行った。具体的には、頭皮血流と皮質血流の空間パターンの違いをモデル化した「変分ベイズ拡散トモグラフィアルゴリズム」により、頭皮血流・皮質血流を正確に 3 次元再構成できることを示した。しかし、本手法の評価過程において、皮質血流 (脳活動) 成分を過剰に推定し、頭皮血流 (アーチファクト) 成分の中に皮質血流の逆転した形の波形が混入するという頭皮血流補償の問題が起りうるということがわかった。この問題はベイズモデルにおいて観測ノイズを大きめに見積もることにより解消できることを発見し、その知見に基づき、皮質・頭皮血流成分の頑健な分解が可能な DOT 法の開発に成功した。

データ駆動ブレインデコード法の研究開発

脳情報の符号化・復号化の標準化を考慮した研究開発を進めるため、脳波からの脳情報解読法において標準的に用いられている Common Spatial Pattern (CSP) をベースとし、実環境に適用できるようにさらにロバスト化した特徴量抽出法の研究開発を進め、一方で、マルチメディア検索における標準技術を参考にしてデータ駆動型脳情報解読アルゴリズムの設計を行った。平成 24 年度には、実環境実験設備における運動想像 EEG-BMI 実験データから作成したリファレンス脳活動データベースを利用してデータ駆動脳情報解読器のプロトタイプを試作し、車椅子および家電の BMI 制御実験を実施した (平成 26 年 11 月 1 日の報道発表)。実環境実験設備において、車椅子生活を想定した実験参加者 (2 名) が、1 秒未満の解読遅延時間 (最初の脳情報特徴量が送信されてから機器が制御信号を受信するまで) で、移動支援機器や家電機器を BMI で操作可能であり、このときの平均正解率が 77.7% となることを確認した。システム遅延時間 (往復通信時間と解読時間の合計) が 1 秒未満になるようにと条件設定した場合、上記 2 名にさらに 2 名を加えた 4 名の実験参加者に対する平均正解率は 82.7% となり、目標である 80% 以上の正答率を達成した。平成 26 年度には、複数人対応化したネットワーク型 BMI の動作確認を行い、開発を完了した。実環境実験設備内で 2 名の実験参加者がそれぞれ異なる携帯型脳波計を装着し、運動想像 BMI による生活支援機器を繰り返し行う実証評価を実施し、両方の実験参加者が 1 秒未満の遅延時間を達成した。さらに、このネットワーク型 BMI システムに基づく複数台の移動支援機器の移動制御の実証実験を、診療所 (「サンセール香里園」デイケアセンター部分) において実施した。これにより、ネットワーク型 BMI と安全・安心自律移動支援技術を統合した本課題の最終的な統合イメージを、利用シーンとして示すことができた。

平成 25 年度に取得したタグ付ブレインログデータベー

スを解析することにより、動きに伴う動作意図などの自然な脳活動中が NIRS の単一回の計測信号で識別可能であることを発見したので、NIRS 計測に基づく動作識別型の新しい BMI を開発した。この成果は、平成 26 年 12 月 4 日の報道発表の一部として、公開デモンストレーションした。平成 24 年 11 月 1 日に実証実験を行った BMI システムのように、運動想像や暗算など「強く念じる」必要がなく、識別するクラスが 2 つから 3 つに増えたにも係わらず正答率が 70%から 84%に向上した。

上記で開発したさまざまなネットワーク型 BMI システムは移動支援機器や家電が動作することにより利用者がフィードバックを得るため、長時間使用による訓練効果も考えられる。さらに、利用者の脳活動はさまざまな要因によって非定常に変動する。これらに対処するため、max-min CSP や beta-divergence CSP などのロバストな特徴量抽出法を考案し、また、行動・情動ラベルのない長時間データから脳活動状態のセグメンテーション(クラスタ分類)をすることができる Latent Coactivity Mixture Model (LCMM) という新しい特徴量抽出法を開発した。

感情・情動コミュニケーション支援の研究

日常生活において重要な、緊張とリラクスの 2 つの情動状態を区別することを目指し、「緊張条件」(緊張を誘導する音楽を聴きながら不安や緊張を感じた出来事を想像する)と「リラククス条件」(リラククスを誘導する音楽を聴きながらリラククスした状況を想像する)において EEG 計測を実施した。このデータを用いて 2 条件の判別性能を評価したところ、3 人の実験参加者のうち 2 人が 70%以上の正解率を達成したことを確認した。さらに、この緊張とリラククスを識別する脳情報解読器を利用して、「不安・緊張の情動状態」をボールランプの色としてアクチュエート(可視化)するネットワーク型 BMI システムを構築し、要介護者の情動状態を介助者等に伝えるツールとして、報道発表(平成 26 年 12 月 4 日)の一部に組み込むことで利用シーンを示した。加えて、オンライン利用時の遅延時間が平均 0.46 秒、携帯型脳計測装置による測定時間まで含めた総遅延時間も 2.0~2.7 秒に抑えられることを確認した。

ネットワーク型 BMI による実空間アクチュエータ制御の研究

上肢の不自由な要介護者の支援を目的として、身体装着型運動支援アクチュエータを開発した。さらに、脳情報解読による実環境実験設備での日常動作の支援を可能にするために、身体装着型運動支援アクチュエータと実環境実験設備内住設機器との連携の実装と、脳情報・筋電情報・関節角情報との統合を完了した。さらに、身体装着型運動支援アクチュエータのユースケースとして、移動してコップをとり、コップを保持して移動し、コップを蛇口にさし出して水を汲み、水を飲むためにコップを顔に近づけるといった動作支援デモンストレーションをシステム構築し、平成 26 年 12 月 4 日の報道発表の一部として公開した。

安静時脳活動を利用した利用者間の転移学習

BMI に用いられる EEG などの信号は実験参加者間で差があり、また、日間・日中で無視できない変動があることが知られている。このため、従来は同じ実験参加者であっても毎回キャリブレーションのための BMI 訓練データを取得する必要がある、BMI 実用化の大きな障害要因となっていた。これに対処するために、辞書学習に実験参加者間やセッション間の差異を吸収する変換項を加えた新しいデータ駆動型の脳情報表現法を提案し、それにより、

新規利用者に対して BMI 課題を用いたキャリブレーションデータを集めなくても、安静時脳活動を使うだけでリファレンス脳活動データベースに登録された他人の脳活動データを有効活用することで解読を可能とする、データ駆動型ブレインデコード法を開発した。さらに、新たに開発された安静時脳活動を使って他人のデータを活用する転移学習法の神経科学的基礎を研究するため、大型脳計測器を用いた安静時機能的結合に関する研究を実施した。

複数人コミュニケーションの神経基盤の研究

実環境におけるコミュニケーション支援 BMI を構築する際に必要となるコミュニケーション時の神経基盤に関する研究を行うため、2 台の fMRI の同時計測に基づく、2 名の実験参加者が観察学習課題を行っている時の神経基盤に関する研究を実施した。

2. 3 脳情報解読に基づく生活支援機器制御技術に関する研究開発

ア) 移動支援機器の自律的な安全技術

移動支援機器の自律移動機能の実現

屋内の見通しのよい通路等で、移動支援機器単体のセンシング機能だけを利用して、介助者の助けを借りることなく、3 種類(車輪移動型車椅子、全方向移動型車椅子、自律移動型ベッド)の移動支援機器が衝突等を回避し安全に移動することを実現した。

具体的には、平成 23 年度は、移動支援機器として電動車椅子および電動移動型ベッドを対象として、センサや PC とのインタフェースを取り付け、障害物検知・回避、自己位置同定、移動制御、緊急停止、安全停止の機能を持つ基本動作制御ソフトウェアと障害物回避ソフトウェアを開発、実装し、移動支援機器の動作実験によって、見通しのよい環境での衝突回避ができることを確認した。平成 24 年度は、センサで感知できない危険地帯への進入回避機能を実現した。危険地帯を記載できるグリッドマップを構築すると共に、地図情報を編集するソフトウェアを実装した。グリッドマップを利用した危険地帯回避アルゴリズムを提案して、移動支援機器に実装し、危険地帯が回避されることを確認した。平成 25 年度は、コマンド入力の遅延(移動支援機器の搭乗者の脳活動が計測・伝送された後、移動支援機器にコマンド入力に戻ってくるまでの時間)が 500 ミリ秒であっても、安全に移動できる移動経路を生成する機能を提案し、移動支援機器に実装し、指令遅延に応じて生成される経路が、衝突等の危険がない安全な経路となることを確認した。平成 26 年度は、平成 23 年度から平成 25 年度までに開発したシステムを統合し、屋内の見通しのよい通路において、移動支援機器単体のセンシング機能だけを利用して、介助者等の助けを借りることなく、移動支援機器が衝突などを回避し安全に移動する機能を実現した。3 種類の移動支援機器(車輪移動型車椅子、全方向移動型車椅子、自律移動型ベッド)を利用した場合、かつ他の人とのすれ違いがない状況で、BMI および生体情報を用いることで、利用者が目的地に到達できることを確認した。

安心な移動のための移動支援機器および制御方式

移動支援機器を上記の「移動支援機器の自律移動機能の実現」での自律移動機能によって移動させる際に、移動支援機器の移動速度、壁からの距離、移動支援機器の搭乗者の視野(通路方向に沿って進んでいる、壁に向かっていないか等)を考慮することにより、数十人規模の実験参加者による実験において、70%以上の参加者が利用時の恐怖を感じない制御方式を実現した。

具体的には、平成 23 年度は、移動支援機器の利用者が安心かつ快適に感じる移動に関して、健常者を対象とした実験を通じて調査し、安心かつ快適に感じる移動状況として、3つの検討項目（1. 次の場面の予想ができて安心・危険、2. 次の場面の予想ができなくて不安、乗り心地の善し悪し）があげられることを明らかにした。平成 24 年度は、移動支援機器搭乗者の安心感と移動時のパラメータ（速度と壁からの距離）の関係を定量化する実験を実施し、その結果から搭乗者の安心を考慮した移動経路計画アルゴリズムのプロトタイプを実装した。最短経路移動計画アルゴリズムとの比較実験を行い、29 名中 26 名の実験参加者が、搭乗者の安心を考慮した移動経路計画アルゴリズムの方がより安心感を得たと回答した。平成 25 年度は、搭乗者の見え方の差異に応じた安心感の変化をモデル化するために、移動支援機器の移動方向に対する搭乗者の見通しの良さを環境形状の 3 次元地図を用いて定量化し、利用者の視野を考慮した指標(Visibility Index)を導入し、この指標を考慮しつつ移動軌跡長を最小化する移動経路計画アルゴリズムを提案した。平成 26 年度は、見通しのよい通路における物体までの距離や速度の安心感地図による評価指標と、曲がり角などにおける見通しの良し悪しの評価指標を統合し、経路計画に導入する手法を提案した。提案した手法によって生成される経路を実験参加者 30 名が体験したところ、恐怖を感じなかった人は 22 名となり、73%の人が恐怖を感じないことが確認できた。これによって、最終目標である 70%以上の利用者が恐怖を感じないことを達成した。

イ) 環境センサと連携した移動支援機器安全制御技術 移動物体の属性認識・衝突予測技術

診療所内の曲がり角や、やや混雑した屋内環境で、移動支援機器の周囲数 m の範囲（移動支援機器単体のセンシング機能では見えない領域も含む）を移動する人々や他の移動支援機器等の位置計測と属性（人、車椅子、歩行補助器、カート）を認識する手法を提案、実装し、実験可能な実際の診療所において 81%以上、平均で 90.2%の精度で属性認識が可能であることを示した。

具体的には、平成 23 年度は、環境センサにより移動物体の属性認識を可能とするための技術として、レーザ距離センサおよび 3 次元距離センサによって、人、車椅子、歩行補助器、カートの 4 種類の属性を認識する手法を開発した。実験可能な実際の診療所「サンセール香里園」にて、環境センサの設置、計測実験を行い、属性認識手法の有効性を示した。平成 24 年度は、平成 23 年度に選定した 4 種類の属性に対して、診療所で計測・蓄積した 3 次元距離センサのデータを用いて、形状に基づき属性を認識する手法を開発した。計測の高さと対象の位置に注目した特徴量を用いることにより、見通しの良い環境で、全ての属性に対して 88%以上の精度での認識を実現した。平成 25 年度は、これまでと同じ 4 種類の属性に対して、3 次元距離センサのデータを用いて、形状に基づき属性を認識する手法を改良し、見通しの悪い場所、複数の移動機器が同時に存在し、互いに遮蔽がある場合にも対応可能なシステムとした。さらに、自律移動している移動支援機器についても自己位置情報から認識できることを示した。実験結果から、見通しの悪い場所であり、複数の移動機器が同時に存在し、互いに遮蔽がある場合においても、4 種類の全ての属性に対して 81%以上、平均で 90.2%の精度での認識を実現した。

移動・すれ違いモデルによる衝突回避技術

診療所内の曲がり角や、やや混雑した屋内環境で、移動支援機器の周囲数 m の範囲（移動支援機器単体のセンシング機能では見えない領域も含む）を移動する人々や他の移動支援機器等の属性（人、車椅子、歩行補助器、カート）の認識結果を利用し、3 台の移動支援機器のセンシング機能と 10 台以上の環境センサのセンシング機能を併用することで、数秒後のこれらの位置を予測し、移動支援機器の加減速、停止等を制御することで衝突や階段等の危険地帯への進入等を回避する安全制御技術を開発した。

具体的には、平成 23 年度は、上記「移動物体の属性認識・衝突予測技術」においてレーザ式距離センサを用いて計測した移動対象の軌跡に基づいて、それぞれの属性の物理的な機構の違いに基づく移動・すれ違いモデルを構築した。診療所（サンセール香里園）での計測実験に基づき、移動モデルのパラメータである最大回転角速度を属性ごとに推定することにより、実際の環境に即した移動モデルの構築を行った。平成 24 年度は、移動支援機器に対する移動・すれ違いに関して、移動時に社会的に働く避ける力をモデル化し、移動・すれ違いモデルを拡張した。移動支援機器とすれ違って移動する対象を計測した移動軌跡に基づき、移動支援機器に対して社会的に働く避ける力を測定し、上記の移動・すれ違いモデルのパラメータを推定した。この移動・すれ違いモデルを用いることにより、移動対象の将来の位置を予測する手法を開発した。診療所内の見通しの良い環境で、歩行者、車椅子、歩行器、カートの 4 種類の移動対象が電動車椅子とすれ違う際の移動・すれ違い行動を予測し、速度や進路を変更するなどにより、移動支援機器の周囲 5m 以内に人が 2 名程度滞在するという見通しの良い状況での衝突予防を達成した。平成 25 年度は、環境センサのセンシング機能に基づいて計測範囲内の移動対象の位置を求め、移動支援機器のセンシング機能を用いて移動支援機器の位置を求め、移動・すれ違いモデルを用いることにより移動対象の将来位置を予測する手法を開発した。高齢者施設の見通しの悪い環境で、歩行者、車椅子、歩行器、カートの 4 種類の移動対象が電動車椅子とすれ違う際の移動・すれ違い行動を予測し、速度や進路を変更することにより、移動支援機器の周囲 5m 以内に人が 5 名程度滞在する状況での衝突予防を達成し、安全な移動制御を実現した。平成 26 年度は、環境に複数台の移動支援機器が存在する時、これらの機器が互いに進路を譲り合うことで、衝突を避け、効率的に移動できるようにする技術を確立した。さらに、これまでに開発してきた属性認識技術、位置推定技術、移動予測技術を統合し、移動支援機器同士が適宜通信して、その進路情報を交換することにより、適切に進路を譲り合ってすれ違える移動支援機器制御システムを構築した。このシステムを用いて、サンセール香里園内の曲がり角など、やや混雑した環境で、3 台の移動支援機器（電動車椅子 2 台、電動移動型ベッド 1 台）と 10 台以上の環境センサ（レーザ距離センサ 4 台、距離画像センサ 6 台）が同時に稼働する場合において、移動支援機器の加減速・停止などを適宜制御することで、移動する人々や他の移動支援機器との衝突回避が可能であることを実証した。

遠隔監視・操作による移動支援機器安全制御技術

上記の「移動物体の属性認識・衝突予測技術」および「移動・すれ違いモデルによる衝突回避技術」で設定した環境において、移動支援機器の利用者が他者による機器操作を希望する状況（利用者の意図したとおりに動作しない場合）等において、遠隔監視・操作により、現地での確認と同程度度の安全性を維持しながら制御可能にした。

具体的には、平成 24 年度は、移動支援機器である電動車椅子を対象として、移動支援機器の状況、および移動支援機器の周囲の状況を遠隔監視センターに送信し、オペレータが必要に応じて移動支援機器を遠隔操作するための基本システムを構築した。平成 25 年度は、移動支援機器の異常状態の検出、および利用者が遠隔からの機器操作を希望しているかどうかにつき機器操作希望状況の発生から 10 秒以内の検出、また、通路の途中で立ち往生した場合等、移動支援機器の異常状態からの遠隔操作による救出を実現した。平成 26 年度は、実現した遠隔監視・操作技術の有効性を検証するために、サンセール香里園の 1 階において、通常の無線 LAN 環境下で、同時に 3 台の移動支援機器が BMI からの入力により制御されている状態で、これらの移動支援機器を遠隔監視、また必要に応じて遠隔操作し、いずれも安全に制御できることを確認した。遠隔監視・操作を用いることで、現地での確認と同等程度の安全性を維持しながら、制御できるものとした。

3. 今後の研究開発成果の展開及び波及効果創出への取り組み

3. 1 データベース公開

平成 25 年度構築したタグ付きブレインログデータベースと空間注意課題を用いたリファレンス脳活動データベースの先行公開を目指して、データの整理や公開先として考えている Brainliner の HDF 形式への変換などの準備を進めている。また、倫理ガイドライン策定の有識者会議において、データ公開におけるプライバシー保護の問題、実験参加者への同意の取り方、公開サイトの運営に関する問題、利用制限や利用者への同意の取り方など多面的な議論を得て、ガイドラインを順守した公開手段の最終検討を行っている。部分公開後、想定していなかった問題が起こらないかを一定期間観察した上で、さらに公開範囲を広げる予定である。

3. 2 研究開発成果を発展させる後継プロジェクト

ImPACT プログラム「脳情報産業の創出による活力溢れる生活の実現」(PM:山川義徳)の革新的脳情報活用技術の開発のうち、実空間において心の状態を左右する脳深部の活動を推測する携帯型ブレインマシンインタフェース (BMI) の開発チームに、本課題に参加していた研究グループが加わっている。このグループは本課題で開発された「実環境において利用者の情動状態を読み出し、フィードバック情報を様々な形で呈示する EEG・BMI」技術をさらに高度化することで、実環境における EEG・NIRS 計測により、fMRI に匹敵する情動状態の解析及びリアルタイムの可視化と、それに基づく簡易な機器制御を通じて、産業競争力強化を可能にする人材育成サービスの実現、例えば、ストレス脳状態の可視化とそれに基づくマネジメントによる人的資源の有効活用や、共感脳状態の可視化によるコミュニケーション能力と共同作業パフォーマンスの向上などの実現を目指している。

3. 3 脳情報通信の応用・実用化にあたっての社会調査倫理・安全指針に関する調査研究

本課題における研究開発、および、将来の社会応用へのすみやかな展開に必要な倫理・安全ガイドラインの構築を目指し、まず平成 23 年度に、北米および国内の神経倫理の研究者を中心とした有識者にインタビューするとともに、生命倫理や医療・介護分野において既に定められている研究者・研究機関が遵守すべきガイドライン、研究に使

用する情報システムのプライバシーやセキュリティに関するガイドラインについて情報を収集した。インタビュー及び調査の結果を元に、倫理・安全ガイドラインの策定に向けて方針を検討する有識者会議を開催した。続く平成 24 年度には、本項目で目標としている倫理・安全ガイドラインの策定において、BMI に関わる脳神経倫理、情報セキュリティ、プライバシーなどを重点課題とし、基礎研究実施のためのガイドライン骨子案について有識者会議において議論した。情報セキュリティやプライバシーなどに関する有識者会議の提言を中間報告としてまとめた。また、アウトリーチ活動の一環として、平成 25 年 3 月 14 日に電子情報通信学会 MBE とバイオサイバネティクス・ニューロコンピューティング研究会において「BMI と倫理」シンポジウムを開催した。平成 25 年度には、上記重点課題についてのこれまでの議論を踏まえて、ネットワーク型 BMI の基礎研究に関する倫理・安全ガイドライン案を策定し、それを有識者会議において集中的に議論した。有識者会議は、ガイドライン案が具体化する平成 25 年度からメンバーを倍増し、より多面的な視点での検討を行い、次年度における最終版策定に向けたドラフト案の策定を達成した。また、アウトリーチ活動の一環として、平成 26 年 3 月 6 日に電子情報通信学会情報論的学習理論と機械学習研究会において「NW・BMI 技術の社会実装と脳情報データベースの活用に向けて」と題したシンポジウムを開催した。平成 26 年度は前年度に策定したネットワーク型 BMI の基礎研究に関するガイドライン案をもとに、有識者会議においてさらに詳細な議論と確認を行い、BMI 研究の倫理ガイドラインの最終版である「ネットワーク型 BMI の基礎研究に関する倫理指針」の策定を完了した。また、研究者へのアウトリーチとして平成 26 年 9 月 10 日に日本神経科学大会においてサテライトシンポジウム「脳情報の産業応用に向けた動向と社会基盤整備」を開催した。

技術および標準化に関する調査研究

本課題で開発するネットワーク型 BMI の関連技術の標準化を目指して、まず平成 23 年度にネットワーク型 BMI の要素技術に関連する標準化団体の調査を実施するとともに、課題参画機関への研究・開発方針などに関するヒアリングを実施し、標準化の対象となり得る技術領域・項目を検討した。続く平成 24 年度は、課題の研究開発状況および標準化に向けた意向と課題を参画機関へのヒアリングを通じて取りまとめ、具体的な標準化項目の候補を整理した。さらに、標準化への方向性を検討するためには、脳情報の活用手法の探索とユースケースの明確化が必要であるとの認識から、ニューロインフォマティクス領域の外部有識者に対するヒアリングを実施した。また、脳情報活用に関連する標準化団体の取り組み状況を調査し取りまとめた。以上の調査結果をもとに標準化ロードマップ案を作成した。平成 25 年度は、前年度作成した標準化ロードマップ案をもとに、具体的な標準化活動の進め方を明らかにするため、まず「脳情報 DB 領域」「通信・BMI 制御領域」「計測機器」の 3 領域について文献調査および有識者へのヒアリング調査を実施した。この調査結果を踏まえ、ネットワーク型 BMI の具体的な標準化活動を取りまとめた。平成 26 年度は、前年度の標準化ロードマップをより具体化し実現していくため、欧米で進められている大規模な脳科学領域の取り組みの状況から、技術標準化を進めていくための検討課題を抽出した。それをもとに、INCF(International Neuroinformatics Coordinating Facility)をはじめ、主に国内における脳情報の産業応用を

進める拠点の取り組みや候補となる標準化団体の状況を調査し、ネットワーク型 BMI 技術の標準化を進める上でマネジメントスキームを整理した。それらのマネジメントスキームについて、国際標準化団体のメンバーを含む有識者へのヒアリングから精緻化を進めた。最終的にそれらの調査をまとめ、インタフェース、プラクティス、評価基準をどのように進めていくかをネットワーク型 BMI 技術標準化ロードマップとして取りまとめた。調査結果を踏まえ、標準化活動を進めるための活動内容を明らかにするとともに、昨年度の標準化活動ロードマップに修正を加えた。修正されたロードマップをもとに、ネットワーク型 BMI の社会展開に向けた標準化戦略案を構築した。またデータベース公開に向けた検討項目の調査を実施し、脳情報データベースの公開及び運用に向けて、必要な要素及び対策が必要な検討項目を整理した。

3. 4 公開デモンストレーション

実環境実験設備内での移動支援機器および生活支援機器（家電、住設機器）制御については、平成 24 年 11 月 1 日の報道発表「ネットワーク型ブレイン・マシン・インタフェース (BMI) の一般生活環境への適用可能性を確認 ～ BMI による生活機器、電動車椅子制御の最新実験を公開～」において、ネットワーク型 BMI プロトタイプシステムの実証実験のデモンストレーションを行った。

またシステムの利用者への生活支援の可能性を明らかにするため、ネットワーク型 BMI の日常生活支援のモデルケースとして、平成 26 年度構築した、(A)運動に伴う自然な脳活動に基づく行動識別 NIRS-BMI、(B)利用者の情動状態を読み出し、フィードバック情報を様々な形で呈示するエージェント対応型 EEG-BMI、(C)上肢の不自由な利用者のための身体装着型運動支援アクチュエータの 3 つの BMI デモンストレーションを統合して、平成 26 年 12 月 4 日に、ネットワーク型 BMI の日常生活支援のモデルケースとしての実証実験とその報道発表「日常生活の支援を可能とするネットワーク型ブレイン・マシン・インタフェース (BMI) の技術開発に成功」を行った。これらの様子はテレビ・新聞など多数のメディアに取り上げられた。

4. むすび

本研究開発では一般の生活環境において、高齢者、要介護者のみならず一般の方々に対して、その意図を脳活動から読み取り家電の操作や環境の制御を行ったり、その情動状態を相手に伝えたりするなど、生活支援サービス実用化のための基盤技術を確立した。この技術は、介護・介助を必要とする人だけを対象とするものでなく、「脳を見まもる」ことで、様々な場面で人々のコミュニケーションを豊かにし、個人として充実した生活を継続する環境づくりのための技術として期待されており、今後は各種サービスの実用化を目指していく。

【査読付発表論文リスト】

- [1]Morioka, H., et al., Decoding spatial attention by using cortical currents estimated from electroencephalography with near-infrared spectroscopy prior information. *NeuroImage*, 90, 128-139, 2014.
- [2]Morishige, K., et al., Estimation of hyper-parameters for a hierarchical model of combined cortical and extra-brain current sources in the MEG inverse problem, *NeuroImage*, 101, 320-336, 2014.

- [3]Furukawa, J., et al., An EMG-driven assist system for vertical component weight bearing force actuated by pneumatic artificial muscles, *IEEE Systems Journal*, PP(99), 1-9, 2014.

【受賞リスト】

- [1]神谷之康、第 10 回日本学術振興会賞、“脳情報デコーディング法の開発”、2013.12.13
- [2]堀川友慈、JNS-SfN Exchange Travel Award、2014.8.18
- [3]Morioka, H., Best Poster Award of the 10th AEARU Workshop on Computer Science and Web Technology, “Subject-transfer decoding by learning a common dictionary from multisubject dataset”, 2014.2.25

【報道掲載リスト】

- [1]“コンピュータ革命 最強 X 最速の頭脳誕生”、NHK スペシャル、2012.6.3
- [2]“考えるだけ 家電操作”、日本経済新聞、2012.11.2
- [3]“ATR「脳活動」で家電遠隔操作 システム改良で成功率 84%”、フジサンケイビジネスアイ、2014.12.5