

平成 25 年度 委託研究

課題 173

脳活動推定技術高度化のための測定結果推定シ
ステムに向けたモデリング手法の研究開発

研究計画書

1. 研究開発課題

『脳活動推定技術高度化のための測定結果推定システムに向けたモデリング手法の研究開発』

2. 研究開発の目的

ブレイン・マシン・インターフェース(以下 BMI)は、音声やキーボードなどの身体運動を経由せず、脳活動の計測から情報を抽出して直接機器に入力するもので、肢体障害者の意思疎通やロボット義肢の操作などへの応用が可能であり、将来的には脳から脳への以心伝的な情報通信技術への発展が期待されている。昨今の ICT の利活用の進展に伴う情報量の爆発的増加や人間の意図を機器に伝える手段の限界といった諸問題を鑑みると、これらの解決には、脳活動から直観的に外部機器を操作できるインターフェースの開発が急務であると考えられる。当研究機構においては、日常の自然な環境下で行われる人間の運動行動や発話コミュニケーションの意図、また注意の状態などをテーマとし、脳活動からこれらを推定して BMI に活用するための研究開発を行っているが、現状の BMI 技術は、まだ実験室レベルでの情報抽出(デコード)に成功した段階であり、これを実用化に向けて大きく進展させるためには、以下の諸問題を解決するための研究開発が急務である。

BMI 技術の実用化には、脳情報抽出技術(デコーディング技術)の飛躍的向上が不可欠であるが、現段階では上記の研究を遂行する上で大きく分けて 2 つの問題点がある。1 つは、刺激や課題など外的要因を規定して脳の状態を統制した環境下で脳活動を計測し、個々の刺激・課題事象に対するデコーダを逐一作成している点である。この方法だと、特定の刺激・課題環境でのみ使用可能なデコーダしか作成できず、様々な刺激を受けながら同時に課題を遂行するような日常の自然な環境で使用可能な BMI 技術にはつながりにくい。2 つ目は、現在では各ユーザ(個人)で負荷の高い訓練がなされてデコーダが作成されている点である。ある個人でデコーダを作成しても、これをそのまま他者に転用するためには工夫が必要であり、ユーザ間で汎用性のあるデコーダを作成することが望まれる。上記のような、デコーダ作成のために現在費やされている大量の実験時間や実験費用を大幅に削減し、日常の自然な環境で使用可能で、ユーザ間で汎用性をもつようなデコーダを作成するためには、刺激・課題環境の特徴や各ユーザ(個人)の特徴を入力しただけで、脳活動を生成できるヒト脳機能データ推定システムを開発することが急務になる。このような推定システムの開発により、個々の刺激・課題環境で逐一脳活動を実測しなくとも、また、各ユーザ(個人)で負荷の高い訓練をおこなわなくとも、実測データに即したテストデータを出力することが可能になり、これに基づいてデコーダを作成することで、自然な環境で想定される新規で複数の同時感覚入力にも対応でき、個人間での汎用性をもつような BMI 技術の実用化に大きく近づくことが可能になる。加えて、このような推定システムによりテストデータを生成することで、被験者の個人生データの外部流出を防ぐという倫理上のメリットもある。

このような推定システムを開発するには、様々な刺激・課題環境に対応する脳の情報表現方式をモデル化する必要がある。通常、脳は刺激・課題環境から得られる情報の次元を縮約して、その特徴をうまく処理して環境を認識している。したがって、刺激・課題環境からの入力情報の次元を縮約し、抽象化・パラメータ化して、この情報を推定システムに入力する必要がある。加えて、精度の高いシミュレーションを可能にするためには、推定システムが、脳の解剖学的構造や神経線維連絡、機能局在や機能モジュール間結合などを計算機上にリアルに再現する必要がある。また、これらには個人差が存在し、かつ、脳の可塑性により常に動的にシナプス結合などが変化しているため、推定システムがよりリアルなデータを提供できるためには、これらの神経科学的知見にも配慮した推定システムの開発が望まれる。

本技術は、様々な環境に対する脳活動を被験者に依存しないモデルとしてシミュレートすることで、情報抽出・推定装置開発のためのテストベッドとなる。人的時間的コストや高度な専門性を必要とする脳のモデリングや推定システムの開発を外部に委託し、機構の自主研究においてはデコーディング技術の高度化を並行して行うことで、BMI の根幹である脳活動推定技術の圧倒的な高度化を推進することを目的とする。この意味で、当研究機構の研究開発と連携して、これに実質的に貢献できる研究提案を要望する。

3. 採択件数、研究開発期間及び予算

採択件数：1 件

研究開発期間：平成 25 年度から平成 29 年度までの 5 年間。

予算：平成 25 年度は総額 180 百万円を上限とする。なお、平成 26 年度以降は対前年度比で 6%削減した金額を上限として提案を行うこと。(提案の予算額の調整を行った上で採択する提案を決定する場合がある。)

4. 研究開発の到達目標

全体目標

人間の脳活動の非侵襲的計測に基づいて、脳活動に対する様々な環境の影響やユーザにおける特徴をパラメトライズして評価できるモデリング手法を構築する。ブレイン・マシン・インターフェースのデコーダ開発のためのテストベッドとして使用することを目的とし、脳の機能局在や機能モジュール間結合、神経線維連絡や解剖学的構造などの実データに基づいた精巧なヒト脳機能データ推定システムを計算機上に構築し、被験者実験を大量に行わなくとも、環境やユーザの特徴を入力しただけで、MEG、fMRI、EEG、NIRS などのマルチモダルな手法で観測される脳活動のテストデータが生成できるシステムを開発する。

上記目標を達成するために、以下課題 1、2、3 の 3 要素を想定している。それぞれが連携した研究開発課題であるため、それらを個別課題として分離するのは、

研究遂行上好ましくない。

課題1 入力パラメータの圧縮と脳モデルの高度化

- 1) 入力パラメータの圧縮
- 2) 脳モデルの高度化

課題2 環境・ユーザの影響を評価できるヒト脳機能データ推定システムの開発

- 1) 様々な刺激環境に対する脳活動モデルの構築とこれに基づくヒト脳機能データ推定システムの開発
- 2) ユーザ(個人)の相違を考慮した脳モデルの構築とこれに基づくヒト脳機能データ推定システムの開発

課題3 推定システムが出力する脳活動テストデータの妥当性の検証

課題1 入力パラメータの圧縮と脳モデルの高度化

外界からの入力情報を抽象化・圧縮化する適切なモデリングと脳活動モデルの高度化を並行して行うことで、ヒト脳機能データ推定システムの基盤となるモデルを作成することを目標とする。

1) 入力パラメータの圧縮

複雑な画像を見せても実は脳はこのすべてを処理しているわけではなく、この画像の特徴のみをうまく処理して認識している。ここで、入力情報の次元圧縮が起きているが、この背景にある神経活動の仕組みに立脚した方法、または実験データより発見した方法によりモデル化を行う。

2) 脳モデルの高度化

脳の機能局在や機能モジュール間結合、神経線維連絡や解剖学的構造などの実データに基づいた精巧なヒト脳のネットワークダイナミクスモデルを構築する。脳の可塑性も考慮に入れたリアルな推定システムであることが望ましい。ミリメートル単位の解剖学的・機能的結合をもつ脳を計算機上に仮想的に再現し、ミリ秒単位の脳活動の動態をシミュレートできるシステムの開発を目標とする。

課題2 環境・ユーザの影響を評価できるヒト脳機能データ推定システムの開発

課題1で開発される入力情報と脳モデルに基づき、刺激環境の特徴を入力しただけで、脳活動を生成できるヒト脳機能データ推定システムを開発する。この推定システムの開発では、非侵襲脳活動計測法の代表であるMEG、fMRI、EEG、NIRSなどで観測される脳活動のテストデータを、刺激環境やユーザの特徴を入力しただけでリアルに得ることのできるシステムを開発することを目標とする。~~また、MEGやfMRIのデータに基づく推定システムから、EEGやNIRSなど利便性の高い計測技術で観測される脳活動のテスト~~

~~データが生成できることが望ましい。~~また、これら推定システムの構築においては、生物学的構成要素の積み上げによるアプローチや大量データベースと非線形写像を組み合わせた機械学習のアプローチなど開発対象に応じた手法の検討が望ましい。

1) 様々な刺激環境に対する脳活動モデルの構築とこれに基づくヒト脳機能データ推定システムの開発

人間の代表的な感覚である視覚、聴覚、体性感覚などの刺激環境を想定する。まず、各ユーザ(個人)レベルで、脳の機能局在や機能モジュール間結合、神経線維連絡や解剖学的構造などの実データに基づいた仮想的な脳を計算機上に再現する。これは、感覚刺激の条件データを入力すると、これに対応するヒト脳活動がシミュレートでき、この脳活動データが生成できる推定システムとなるように開発される。その後、視覚、聴覚、体性感覚などの各感覚刺激の次元圧縮された情報を、この推定システムに入力し、それぞれに対応した脳活動を精度高くシミュレートできるかを検証する。これにより作成された各感覚刺激に対応する推定システムを統合し、最終的には、視覚、聴覚、体性感覚などの複数の感覚モダリティー刺激を同時に入力しても、これに対応する脳活動を高い精度でシミュレートできることを目標とする。

2) ユーザ(個人)の相違を考慮した脳モデルの構築とこれに基づくヒト脳機能データ推定システムの開発

脳の神経線維連絡や解剖学的構造、脳の機能局在や脳機能モジュール間の結合には個人差が存在する。ここでは、まず、刺激環境を固定し、ある個人の脳の解剖学的構造や機能結合等に関する実測データに基づいて、この個人内で再現性高く脳活動をシミュレートできるヒト脳機能データ推定システムを開発する。これを複数の個人で検証し、推定システムが複数の個人で一貫して精度の高いテストデータを出力できるように、重要な解剖学および機能的特徴を選抜して、推定システムに実装する。最終的には、ユーザ(個人)の解剖学・機能的特徴を入力しただけで、実測データに即したテストデータが出力できるような推定システムの開発を目標とする。

課題3 推定システムが出力する脳活動テストデータの妥当性の検証

上記で開発されるヒト脳機能データ推定システムに対して、入力と初期値を設定し、データを生成する。新規の環境感覚刺激や新規の被験者(ユーザ)の特徴入力に対し、テストデータが得られることを目標にする。

□提案書作成時の留意点

本研究計画を提案するに当たり留意点は以下の通りである。

1) 上記課題 1、2、3の項目に沿って研究を展開する上で、客観的に評価できる

具体的な達成目標(できれば数値目標)を明確にすること。

- 2) 課題1、2、3の項目を遂行する上で開発されるプログラムはオープンにすること。また、提案に当たって、具体的にどのようなプログラムを公開できると想定しているか記載すること。
- 3) 提案が機構の自主研究の発展に具体的にどのように貢献できるかを明記することが望ましい。貢献内容は、受託者を選定する際の加点評価のポイントとする。

5. 研究開発の運営管理及び評価について

研究開発に当たっては、機構の自主研究との連携を図ること。連携を図るために、定期的に連絡会を開くこと。また、複数のグループが協力して本研究を遂行する場合は、提案代表者がグループ間の連携と調整を行うこと。

平成27年度に中間評価(必要に応じて)を、平成29年度に終了評価を行う。また、研究開発終了後に追跡評価を行う場合がある。

6. その他

(1) 研究開発課題選定の背景および必要性

脳活動の統合的活用による情報通信技術において、委託研究「複数モダリティー統合による脳活動計測技術の研究開発」で研究の進んでいるデコーディング技術を、実用化に向けて進展させるためには、環境やユーザの違いによる影響を評価する必要がある。理化学研究所では、「京」コンピュータ上のソフトウェア開発(文科省研究振興局)プロジェクトにおいて、単一神経細胞から脳全体にわたるシミュレーションを行うことで、脳神経系の機能の解明、さらには発達・学習障害など機能障害の機序の理解につなげる研究開発が行われている。特にDiesmannらのNEST (Neural Simulation Tool) プロジェクトでは、単純な神経細胞モデルから出発し、実際の脳の活動を説明できるかという課題に取り組んでいる。本研究課題では、このようなボトムアップによるアプローチだけでなく、様々なアプローチを検討し、様々な環境やユーザに対する脳の応答の推定を行うテストベッドの研究開発を外部委託することで、デコーディング技術の開発に集中することができ、研究が大いに推進することが期待できる。このためには、人間の脳活動解析に関する十分な実績をもち、高い脳活動推定技術や統計数理モデリング技術を保有する大学、研究所、企業などの外部機関に委託研究として切り出し、機構の自主研究と並行して両者の研究開発を推進することが必要である。

(2) 期待される社会への波及効果

BMI の解釈可能な脳情報量の飛躍的向上のみならず、測定システムとデコーディングシステムを分離して、倫理的な問題を起こさず、被験者実験を削減し、さらに各部を分担して開発が進められるため、将来は標準規格化して BMI 産業のキーテクノロジーとなることが期待できる。今後見込まれる実用化に向けて脳活動測定シス

テムとデコーダの相互接続性を規格化する必要があるが、本研究はそのための基盤となるものであり、先行して実施する必要がある。

(3) 用語集

○ BMI (Brain Machine Interface)

脳内信号を収集し、双方向的に直接コンピュータと接続したり、収集した脳内信号を用いて義手・義足等の外部デバイスを直接コントロールする技術の総称。キーボードやコンピュータマウスの操作など、手や足等による身体動作による間接的な機器操作ではなく、脳信号（電気信号、磁気信号、代謝信号）を利用することで、意図や思考などによる直接的な機器操作を実現するものである。ただし、機器制御に伴う稼働情報のフィードバックや操作に伴う安全手段の確保等が必要となる。

○ BCI (Brain Computer Interface)

BMI とほぼ同義であるが、特に非侵襲計測により人間の脳とコンピュータを直接つなぐインターフェースを指す。

○ デコードおよびデコーダ

BMI を実現するためには、脳活動データから情報を抽出・復号する必要がある。この情報抽出・復号のことをデコードと呼び、情報抽出・復号のためのアルゴリズムや装置などを総称してデコーダと呼ぶ。またこれらの技術を総称して、デコーディング技術と呼ぶ。

○ MEG (Magnetoencephalography)

脳磁図。 脳神経の電気活動に伴う微小な磁場変化をとらえて、脳活動を計測する。fMRI に比べると時間分解能に優れ、EEG に比べると空間分解能に優れた脳活動計測が可能である。

○ fMRI(Functional magnetic resonance imaging)

機能的核磁気共鳴画像。脳神経活動に伴う血流の変化をとらえて、BOLD 信号と呼ばれる脳活動を計測する。血流の供給には時間遅れがあるため、時間分解能には劣るが、MEG や EEG に比べると優れた空間分解能をもつ。MRI 装置では、脳の解剖画像や神経軸索の走行の計測も可能である。

○ EEG (Electroencephalography)

脳波。脳内で起きる電気活動を頭皮上から広汎に記録する。ある事象に関連して出現する脳波を事象関連電位と呼ぶ。もっとも廉価で脳活動を計測できる方法である。

○ NIRS (Near-infrared spectroscopy)

近赤外分光法。脳神経活動に伴う血流の変化をとらえて、脳活動を計測する。fMRI に比べると、利便性に富むが、空間分解能は劣る。頭表など脳活動以外の血流変化をとらえる危険性もある。

○脳活動推定技術

脳神経活動に伴う血流、電気信号、磁場などの物理的信号変化を計測し、そこから逆問題を解くことにより脳活動を推定すること。脳活動に伴う物理的信号変化を計測する部分と、それを解析するアルゴリズム部分に区別される。脳活動推定において逆問題を解くことは、センサーの数に比較して推定すべきパラメータの数が多いため、高度なアルゴリズム処理が要求される。領域間の相関を時間的および空間的に解析することで、運動・知覚・認知に関わる脳の情報処理過程を推定することになる。

○テストベッド

実際に運用されているシステムを危険にさらすことなく、実際の運用体制に近い状況で稼働させるための試験的な運用システム。脳におけるテストベッドは、実際の神経細胞で脳を構成することは不可能なので、コンピューターのプログラム上で稼働するシミュレーターとして構成するしか方法はない。