

「複数モダリティ統合による脳活動計測技術の研究開発」の開発成果について

1. 施策の目標

・我が国が諸外国をリードしているfMRI, MEG, NIRS, EEG等の複数モダリティを統合した非侵襲型の脳活動計測技術・推定技術を飛躍的に高精度化することにより、安全性の高い、利用者の負担も少ない、いつでも、どこでも、誰にでも利用可能な非侵襲型脳活動計測によるBMI開発に資することで、広く国民に利益をもたらす、国際的優位性を確保することを目指す。

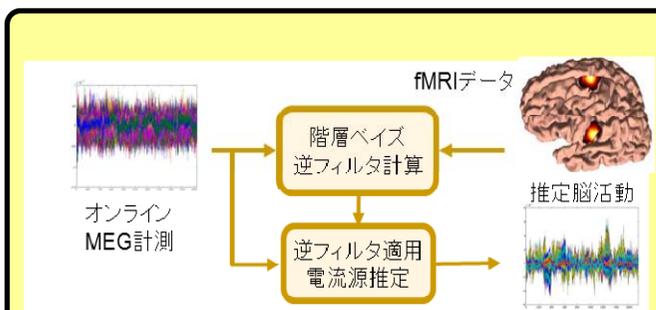
2. 研究開発の背景

・脳神経科学の急速な進歩により、脳活動によってコンピュータやロボットを直接操作することが現実的な目標になって来た。手術や訓練といったユーザに対する負担を無くすために、人が頭の中で考えている意図そのものを非侵襲脳活動計測により推定し、その情報をどこでも誰でもが活用できるようになれば、全ての人に開かれたIT社会の実現に向けて大きく前進することが出来る。

3. 研究開発の概要と期待される効果

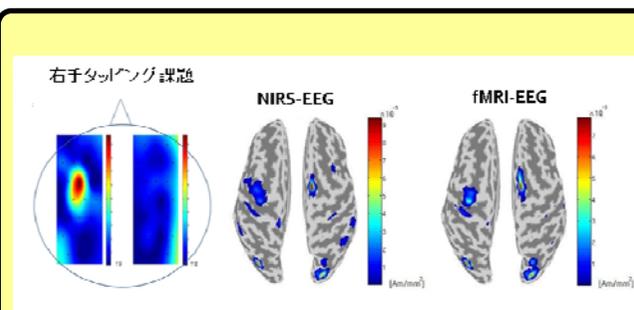
本研究開発では、複数モダリティ統合による高時間・高空間分解能を持つ脳活動推定手法開発を目指し、以下の研究開発を推進する。①課題アでは、fMRIとMEGを組み合わせたオンライン脳活動推定法の研究開発を行い、NIRSとEEGを組み合わせた可搬型システムの検証用として用いる。②課題イでは、NIRSとEEGを組み合わせたオンライン脳活動推定法の研究開発を行い、日常生活で使用できる可搬型の脳活動計測法を開発する。③課題ウでは、心拍や眼球運動等によるアーチファクト除去方法の研究開発を行い、脳活動計測に不可避なアーチファクトの影響を取り除き、信頼性の高い脳活動推定法を実現する。

①完全オンライン階層ベイズ脳活動推定法の開発の研究開発



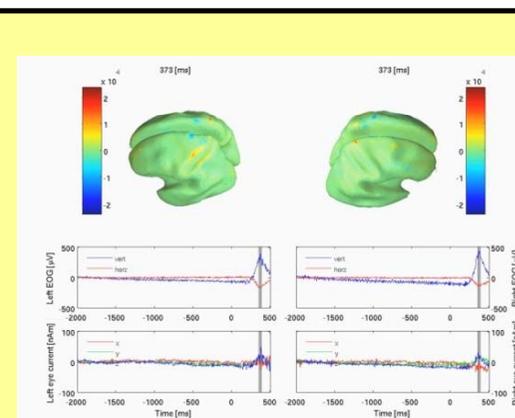
- ・完全オンライン階層ベイズ脳活動推定法の開発
- ・時間拘束条件付き階層ベイズ脳活動推定法の開発
- ・様々な課題中のMEGデータからの試行間共通波形推定
- ・複雑な認知運動課題(フライトシミュレータ)における脳活動データ収集環境の整備

②NIRSとEEGを組み合わせたオンライン脳活動推定法の研究開発



- ・EEGとNIRSを組み合わせた電流源推定法の開発
- ・NIRS拡散光トモグラフィによる脳活動推定
- ・EEG-NIRS確率統合判別器の重み付き統合方式への拡張
- ・準オンライン脳活動推定法を用いた脳活動フィードバック学習による運動想像課題の習得

③EEGに対するアーチファクト除去方法の研究開発



- ・EEGに対するアーチファクト除去法の開発
- ・シミュレーションと実データによりその有効性を確認
- ・眼球と心拍アーチファクトの同時除去

4. 研究開発の期間及び体制

平成20年9月24日～平成23年3月31日

株式会社国際電気通信基礎技術研究所

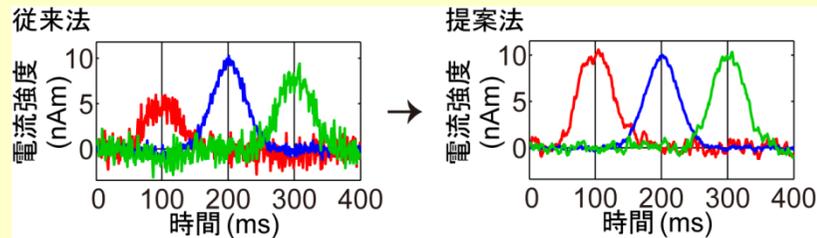
【課題ア-1】 fMRIと超多チャンネルMEGによる脳活動計測のオンラインアルゴリズム技術

主な研究成果

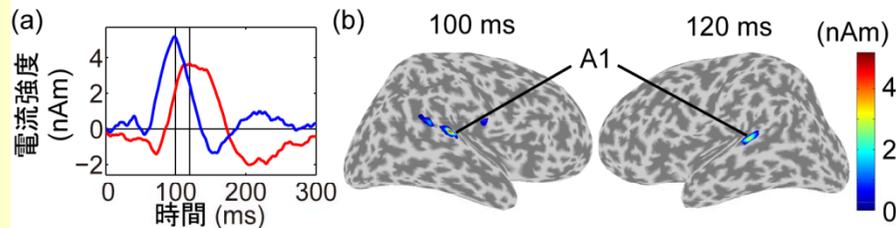
- 時間拘束条件付き階層ベイズ脳活動推定法の開発
- 完全オンライン階層ベイズ脳活動推定法の開発

時間拘束条件付き階層ベイズ脳活動推定法

- 空間的拘束条件、時間的拘束条件の両方を用いて、時間発展ダイナミクスを推定し、MEG逆問題を解く階層ベイズ脳活動推定法を開発した。
- 時間拘束条件付き階層ベイズ脳活動推定法をシミュレーションデータに適用し、従来の空間的拘束条件のみを用いた階層ベイズ推定法よりも、電流源推定の精度が向上することを示した。
- 実データとして聴覚誘発MEGに適用し、生理学的知見と合致する推定結果が得られることを示した。



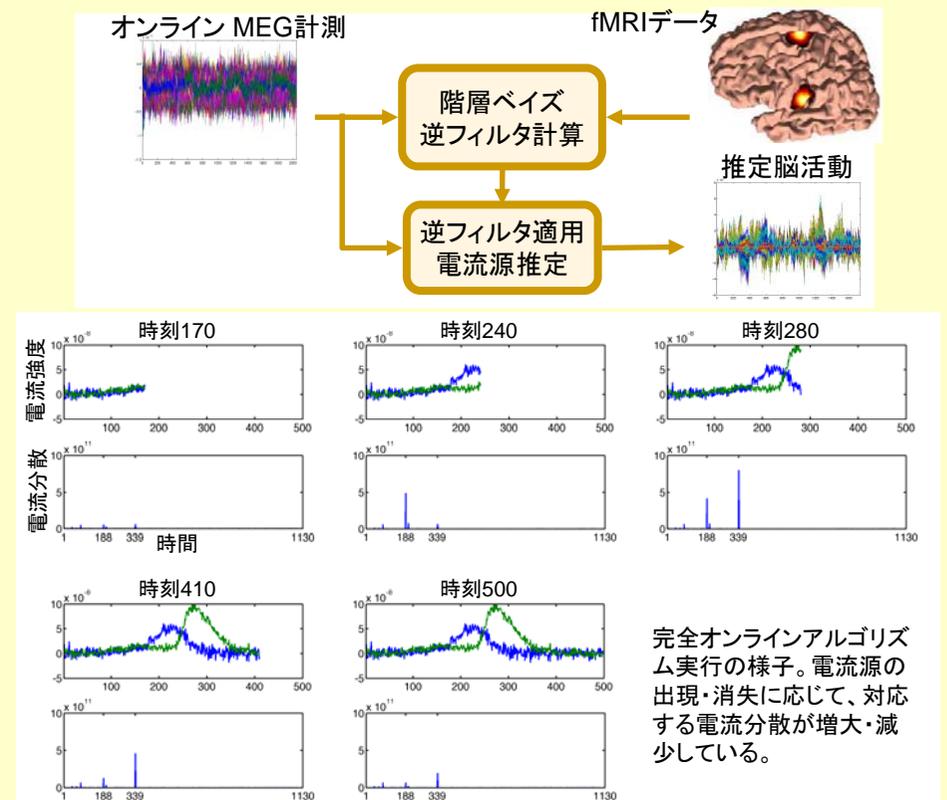
3か所で同程度の大きさのピークをもつシミュレーションデータに対する適用例。従来法で小さく推定されていた第一ピークが、提案法によって元の大きさまで復元されている。



ヒト聴覚誘発MEGデータ(左耳刺激)に対する提案法適用結果。潜時100ms前後に一次聴覚野(A1)に活動が生じる、という生理学的知見と一致した結果が得られている。

完全オンライン階層ベイズ脳活動推定法の開発

- 準オンラインアルゴリズムでは事前に計算されていた逆フィルタをもオンライン的に推定する完全オンライン型アルゴリズムを開発した。
- 割り引き付きオンライン変分ベイズ法により、効率的な計算で非定常な電流源に対応できる。



完全オンラインアルゴリズム実行の様子。電流源の出現・消失に応じて、対応する電流分散が増大・減少している。

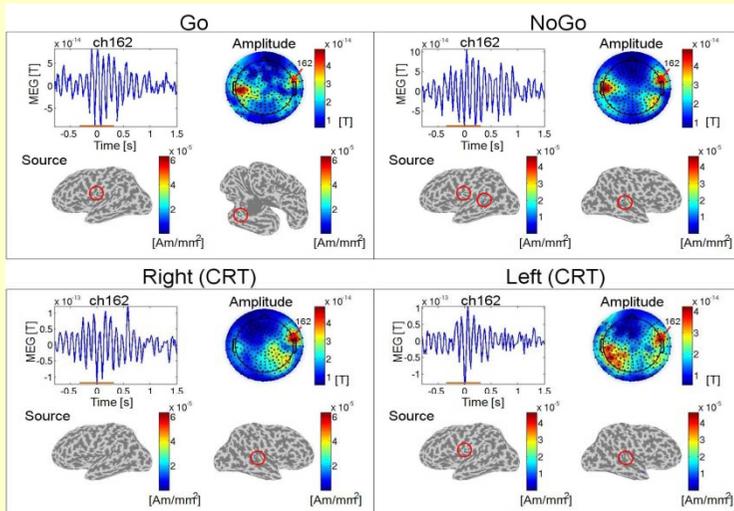
【課題ア-2】 多様な脳活動計測による脳活動の時空間特徴抽出技術の高度化

主な研究成果

- 様々な課題中のMEGデータからの試行間共通波形推定
- 複雑な認知運動課題(フライトシミュレータ)における脳活動データ収集環境の整備

様々な課題中のMEGデータからの試行間共通波形推定

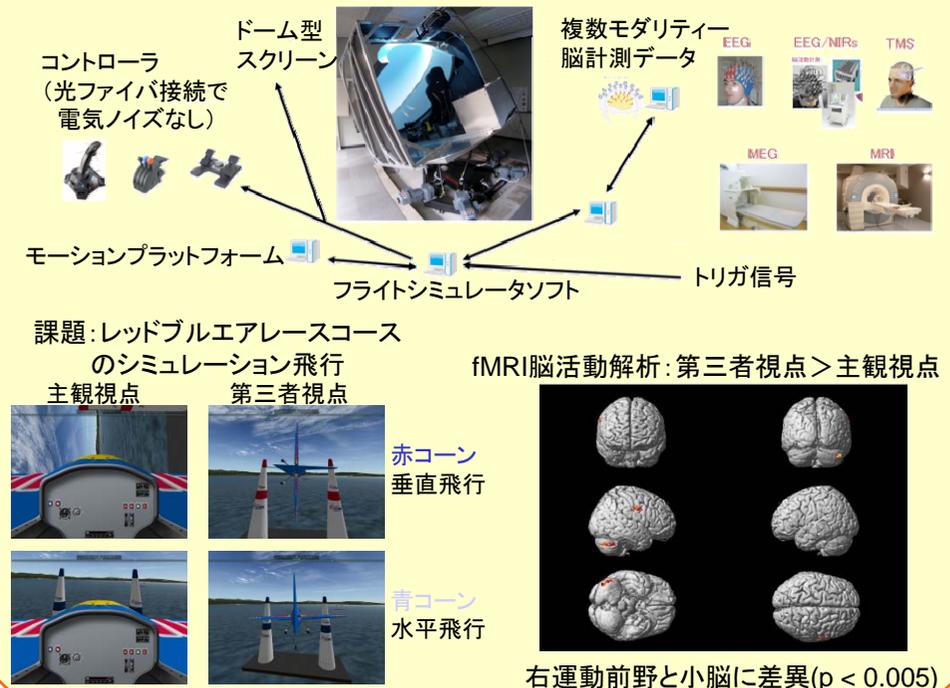
- MEGやEEGデータには試行間で共通した時間パターン(波形)が存在する。我々は最近、こうした波形を全て推定する解析手法を開発した。
- 開発手法を様々な反応課題中のMEGデータに適用し、キュー刺激に時間同期した波形、ボタン押し反応に同期した波形、キュー刺激にもボタン押し反応にも非同期な波形を推定した。
- 結果、課題が複雑になる程多くの波形が推定される傾向があった。これは、課題が複雑になる程脳で多くの処理が行われていることを示唆する結果である。
- また、刺激にも反応にも非同期な波形の性質は課題間で類似していた(下図)。これは、課題間で共通した脳内のプロセスを示唆する結果である。



MEGデータから推定された刺激にも反応にも非同期な波形

複雑な認知運動課題(フライトシミュレータ)における脳活動データ収集環境の整備

- 従来のfMRI・MEG実験では被験者は単純な課題を遂行していた。
- より実世界に近い環境での脳活動データ取得のため、複雑な認知運動課題(フライトシミュレータ)を遂行できる環境を整備した。
- フライトシミュレーション課題中のfMRI計測データの解析により、飛行機操縦における主観視点と、第三者視点による操作の違いが右運動前野に顕著に表れることがわかった。



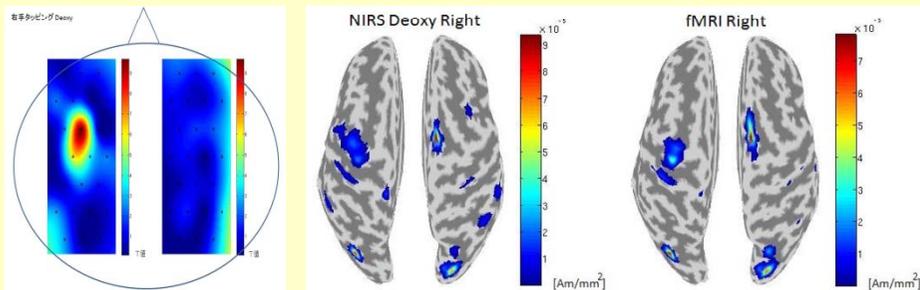
【課題イー1】 NIRSとEEGの同時計測によるオンラインアルゴリズムの開発

主な研究成果

- NIRS-EEGによる脳活動推定
- NIRS拡散光トモグラフィによる脳活動推定

NIRS-EEGによる脳活動推定

- NIRSとEEGはどちらも大型の装置を必要とせず持ち運びが可能である。同時計測も可能である。
- NIRSは空間解像度に優れ、EEGは時間解像度に優れている。二つの測定結果を統合することによって、それぞれの良さを活かすことができる。
- 本研究では、NIRSの測定結果を活動源の空間的な事前情報として用い、EEGから脳活動推定を行った。
- 推定結果の検証のため、空間解像度のより優れるfMRIの測定結果を事前情報として与えたときの、EEGで推定した結果と比較した。その結果、類似した推定結果が得られた。これはNIRSの計測結果を空間的な事前情報として用いることの有効性を示すものである。

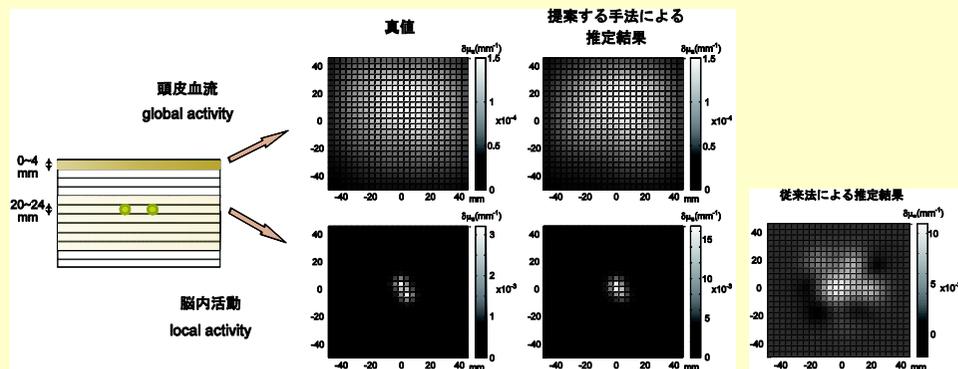


NIRSにより測定された、脳活動源のマップ。ここでは還元ヘモグロビンの値を見ている。

NIRSまたはfMRIの測定結果を事前情報として与え、EEGで脳活動推定を行った。(左)NIRS、(右)fMRIの事前情報を与えたときの推定結果。類似した推定結果が得られた。

NIRS拡散光トモグラフィによる脳活動推定

- NIRSの空間分解能の向上を目的として、拡散光トモグラフィ (Diffuse Optical Tomography, DOT) という手法が提案されている
- DOTとは脳内での光子移動を拡散過程としてモデル化することで、脳内活動と観測光強度変化の関係を物理的に正しく求め、それを利用して推定精度を高めようというものである。
- NIRS信号には頭皮血流に起因するアーチファクトが働くために、それを適切に除くことが要請される。我々は頭皮血流をDOTのモデルに組み込んで同時推定することにより、それを除去し、脳活動のみを推定する階層変分ベイズ法を新しく開発した。
- シミュレーション研究を行った結果、従来手法よりも高い精度で脳活動推定できることを示した。



深い位置に局在した脳内活動があり、浅い位置に空間的に広がった頭皮血流によるアーチファクトがある。我々の提案する手法を用いれば、アーチファクトを分離し、高い精度で脳活動推定できることをシミュレーションにより示した。

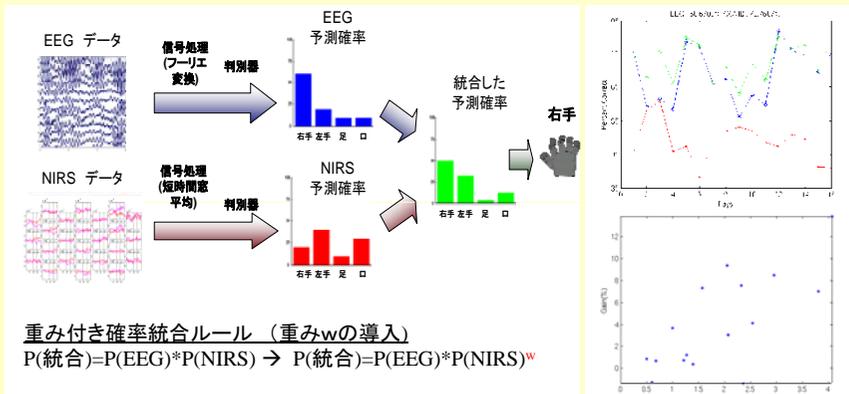
【課題イー2】 NIRSとEEGを組み合わせたリアルタイム脳活動推定手法の開発

主な研究成果

- EEG-NIRS確率統合判別器の重み付き統合方式への拡張
- 準オンライン型アルゴリズムを用いた脳活動によるEEGオンラインフィードバック学習

EEG-NIRS確率統合判別器の重み付き統合方式への拡張

- EEGとNIRS2つの判別器が出す出力結果を確率的に統合して最終的な判別を行う確率統合判別器を提案した。
- ここでは、2つの判別器が出力する予測確率を掛け算で統合を行っていたが、優劣のあるEEG判別とNIRS判別結果を等重みで統合するのは統合結果に悪影響を及ぼす可能性があった。
- 本提案では、重み変数を導入・推定することによって、既存法の拡張を行った。
- 運動想像課題の判別では重みありとなしでは大きな差はなかったが、シミュレーションデータの解析から提案法は負の影響に対するロバスト性が格段に増すことが確認された。

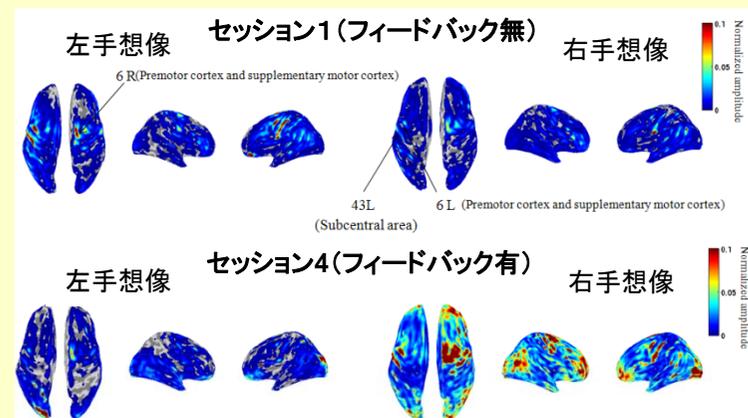


(左)重み付き統合方式の模式図。(右)提案方式によるEEG-NIRS統合判別器の判別結果。上図は16日分の正答率、下図は推定された重みとEEG単体に比べて上昇した正答率の関係。

解析したデータはHonda-ATR-Shimadzuプロジェクト(H21年3月)で計測したものである。

準オンライン型アルゴリズムを用いた脳活動によるEEGオンラインフィードバック学習

- ブレイン・マシン・インタフェースにおいて、正しく運動想像課題を遂行することは、精度向上のための重要な要素の1つである。
- 正確な運動想像の感覚を学ぶ為の方法として、脳活動の状態をリアルタイムにフィードバックし訓練する方法が考えられる。
- EEGデータから推定した皮質電流パターンをもとにフィードバック信号を構成し、リアルタイムに被験者に与える訓練を4セッション行った。
- 4セッションという短い訓練期間で、訓練前は約54%だった正答率が、訓練後には96%まで向上した。また、フィードバック訓練が進むにつれて、運動野の脳活動が強くなり、限局することが確認された。



訓練前(セッション1)と訓練後(セッション4)における推定された皮質上の電流源のマップ。想像中4秒間の平均値。

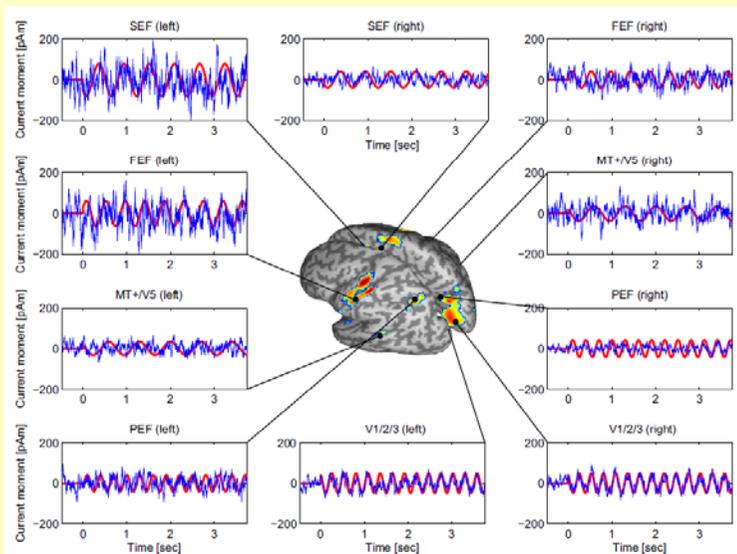
【課題ウ】 心拍や眼球運動等によるアーチファクト除去方法の研究開発

主な研究成果

- 眼球と心拍アーチファクト除去
- EEGに対するアーチファクト除去手法の開発

眼球と心拍アーチファクト除去

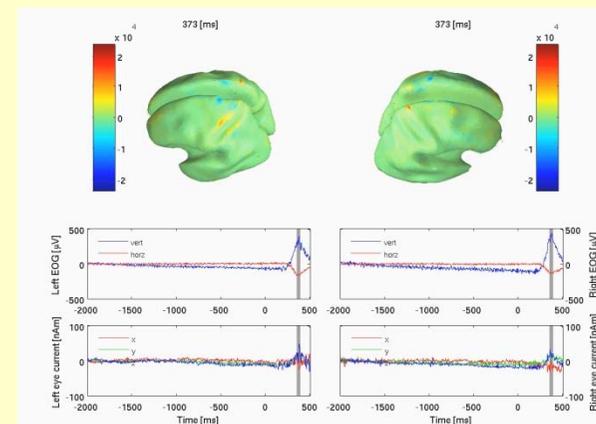
- 眼球運動や心拍によって生じる磁場は、脳活動を反映した磁場に比べて大きく、MEGを歪める原因である。
- 目と心臓に電流源を仮定してモデル化し、MEGデータから脳電流と眼電流、心臓の電流を同時推定して複数のアーチファクトを除去し、脳電流を得る方法を提案した。
- 提案手法を用いることで、アーチファクトに歪められた人工データであっても、領域ごとに異なる脳電流の特徴を精度良く推定できた。



眼球と心拍アーチファクトに歪められたMEGから推定された脳電流波形。

EEGに対するアーチファクト除去手法の開発

- これまでMEGに対して用いてきたアーチファクト除去方法がEEGデータに対してもうまく働くかどうか検証した。
- 眼球運動によるアーチファクトのEEG順モデルを用いて皮質電流と眼電流を同時に推定し、アーチファクトを除去する手法を開発した。
- 人工データでは眼電流を同時推定することでアーチファクトを除去し高い精度で皮質電流を推定できた。実データ(指伸展運動)では指を動かすときに同時に眼球が動くような場合でもそのアーチファクトを除去でき指運動に関連する領域(運動野付近)に脳活動が推定された。



指伸展運動時の推定皮質電流空間マップとEOG、推定眼電流の時系列。

1. これまで得られた研究成果(特許出願や論文発表等)

	特許出願	論文	研究発表	報道発表	標準化提案
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	3	27*	51	1	0

*うち4編が日本神経回路学会論文賞を受賞

2. 研究成果発表会等の開催について

「脳活動計測で指先の動きをPC上に正確に再現する技術開発」について報道発表

NICTバイオICTグループと共同で、fMRIデータ・MEGデータのマルチモーダル脳活動推定によりヒトの指先位置を滑らかに再現できたことについて報道発表(本委託研究で開発した脳活動逆推定法と脳活動からのスパース推定法を使用)。BMIを医療応用のみでなく情報通信におけるインターフェイスとして使用する道を拓いた。朝日新聞、日経産業新聞など主要メディアや多くのネットニュースで配信。