

「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。

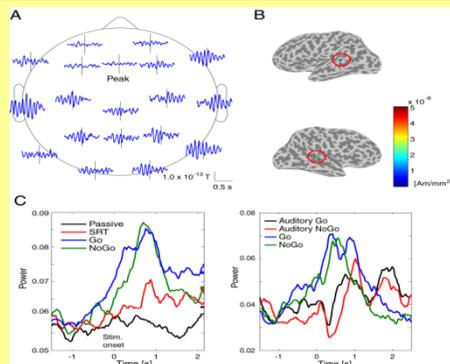
2. 研究開発の背景

・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すれば、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

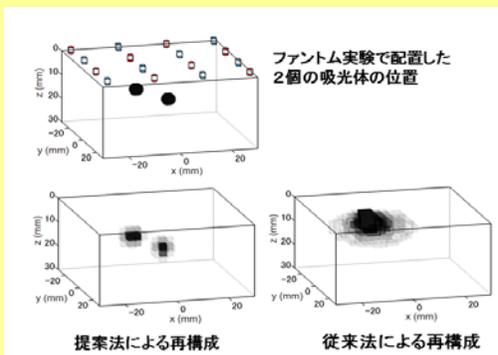
本研究開発では、複数モダリティ統合による高時間・高空間分解能を持つ脳活動推定手法開発を目指し、以下の研究開発を推進する。①課題アでは、fMRIとMEGを組み合わせたオンライン脳活動推定法の研究開発を行い、NIRSとEEGを組み合わせた可搬型システムの検証用として用いる。②課題イでは、NIRSとEEGを組み合わせたオンライン脳活動推定法の研究開発を行い、日常生活で使用できる可搬型の脳活動計測法を開発する。③課題ウでは、心拍や眼球運動等によるアーチファクト除去方法の研究開発を行い、脳活動計測に不可避なアーチファクトの影響を取り除き、信頼性の高い脳活動推定法を実現する。

①fMRI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



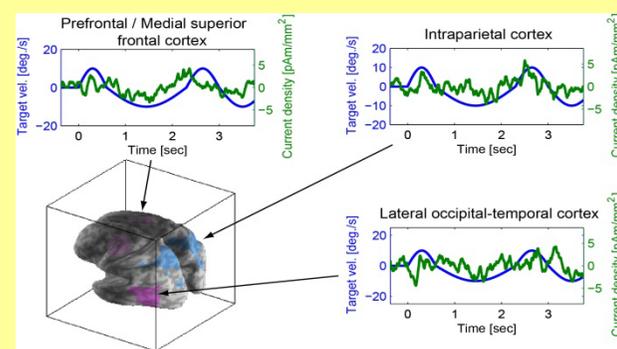
- ・ダイナミクスモデルに基づく階層変分ベイズ推定の有効性の検証
- ・オンライン階層変分ベイズ推定の日をまたがる汎化性能の向上
- ・複雑な認知運動課題(フライトシミュレータ)における脳活動データの解読
- ・MEGデータからの内的な脳活動の抽出

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



- ・高空間分解能3次元拡散光トモグラフィ法の開発
- ・生成モデルに基づく頭皮血流アーチファクト除去
- ・NIRSを事前情報として用いたEEGからの脳活動推定
- ・EEGオンラインフィードバック学習の長期訓練効果

③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



- ・異なる日に計測したEEGデータでのアーチファクト除去
- ・アーチファクトに歪められたMEG実データからの皮質電流推定

4. 研究開発の期間及び体制

平成20年9月24日～平成25年3月31日

株式会社国際電気通信基礎技術研究所

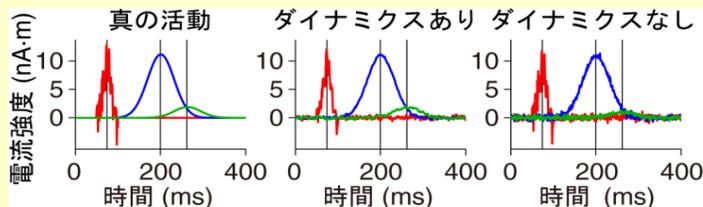
【課題ア-1】fMRIと超多チャンネルMEGによる脳活動計測のオンラインアルゴリズム技術

主な研究成果

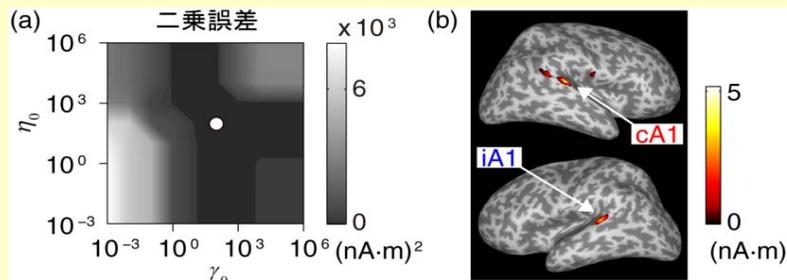
- ダイナミクスモデルに基づく階層変分ベイズ推定の有効性の検証
- オンライン階層変分ベイズ推定の日をまたがる汎化性能の向上

ダイナミクスモデルに基づく階層変分ベイズ推定

- ダイナミクスモデルに基づく階層変分ベイズ推定の有効性を検証するため、従来の階層変分ベイズ推定との結果比較、適切なハイパーパラメータ値の探索、を行った。
- ダイナミクスモデルに基づいた手法を用いた場合、従来法に比べ、強度が小さい活動に対する推定精度が向上した。
- 実データを模擬したシミュレーションデータを用いて、正しい推定結果が得られるハイパーパラメータ値を明らかにした。この値は、実データ適用の際にも生理学的に妥当な結果を導くことを示した。



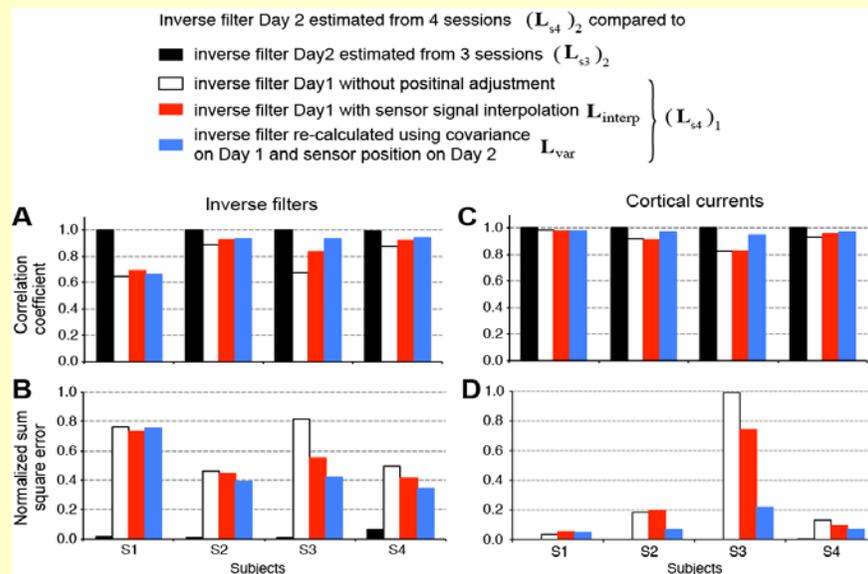
シミュレーションデータに対する適用例。ダイナミクスを考慮することにより、強度が小さな成分（緑色で表示）であっても正しく元の活動を復元できることが示された。



(a) 各ハイパーパラメータ値に対する二乗誤差の等高線図。(b) 左図において○で示したハイパーパラメータ値を用いた場合の聴覚誘発磁場に対する脳活動推定結果。

オンライン階層変分ベイズ推定の汎化性向上

- 異なる日の脳活動計測データをオンライン階層変分ベイズ(VBMEG)推定に利用するためには、センサの位置ずれを補正する必要がある。
- センサの位置ずれを無視したVBMEGフィルタを用いた場合、異なる日の汎化性能は悪化したが、センサの位置ずれを近傍センサで補間補正した場合、汎化性能が向上した。
- 大脳皮質上の電流分散と位置ずれ補正した順モデルを用いたVBMEGフィルタは、汎化性能がさらに向上した。



日をまたがるVBMEGフィルタの汎化性能

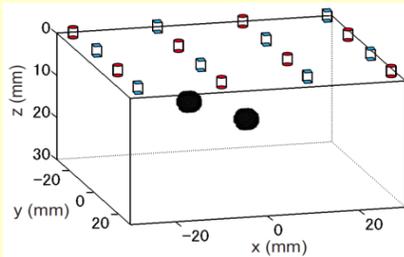
【課題イー1】 NIRSとEEGの同時計測によるオンラインアルゴリズムの開発

主な研究成果

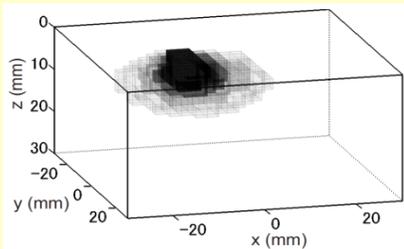
- 高空間分解能3次元拡散光トモグラフィ法の開発
- 生成モデルに基づく頭皮血流アーチファクト除去

高空間分解能3次元拡散光トモグラフィ法の開発

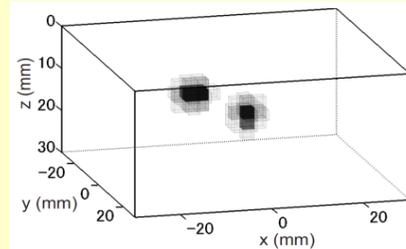
- 近赤外光計測における拡散光トモグラフィ法とは、光子の散乱過程を解く順問題と、それを用いて推定を行う逆問題により、生体内部の光学特性を求める方法である。
- 逆問題解法を工夫することで、高空間分解能の3次元再構成が可能なアルゴリズムを提案した。
- 提案法の検証のためファントム実験を行った。
- プローブ間隔よりも短い距離に置いた2つの吸光体をも識別可能であることを実証した。



ファントム実験で配置した2個の吸光体の位置。
(ファントム内部は脳と同じ光学特性を持つ液体で満たし、上部表面にある送光プローブ(赤)と受光プローブ(青)から近赤外光計測を行った。)



従来法による
三次元再構成



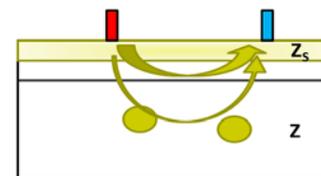
提案法による
三次元再構成

生成モデルに基づく頭皮血流アーチファクト除去

- NIRSを用いた脳計測において、頭皮血流成分の混入が大きな問題である。
- 光子の散乱過程を物理シミュレーションすることによって、観測生成モデルを構築し、それに基づく皮質脳活動と頭皮血流を分離するアルゴリズムを提案した。
- 右指タッピング時の脳活動に提案手法を適用し、局所的な皮質活動とスムーズな頭皮血流に分離できることを確認した。

観測は皮質と頭皮血流の和

$$Y = G \cdot Z + G_s \cdot Z_s$$



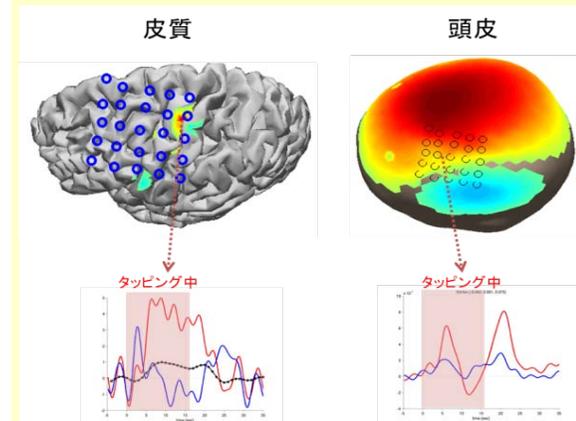
皮質活動: 局所的

$$P(Z) \propto \exp\left(-\frac{1}{2} \sum a_i Z_i^2\right)$$

頭皮活動: 大域的

$$P(Z_s) \propto \exp\left(-\frac{c}{2} (\nabla^2 Z_s)^2\right)$$

皮質血流と頭皮血流からなる
観測生成モデル



推定された頭皮血流と皮質血流の空間
マップと時系列

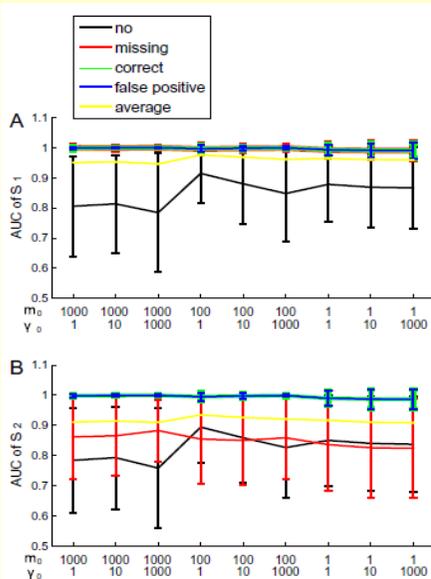
【課題イー2】 NIRSとEEGを組み合わせたリアルタイム脳活動推定手法の開発

主な研究成果

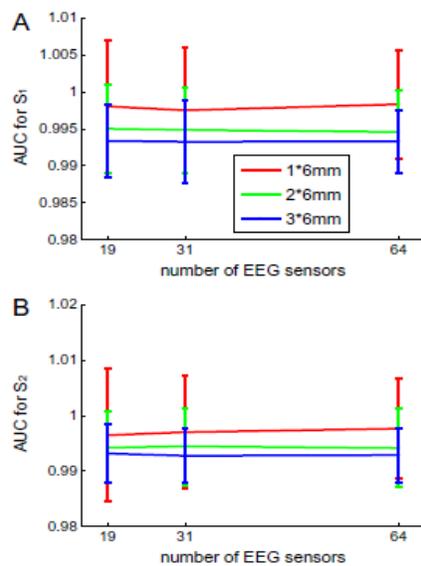
- NIRSを事前情報として用いたEEGからの脳活動推定
- EEGオンラインフィードバック学習の長期訓練効果

NIRSを事前情報として用いた EEGからの脳活動推定

- 階層変分ベイズ推定 (VBMEG)によるNIRSを事前情報として用いたEEGからの脳活動推定の有効性を、シミュレーション実験で検証した。
- NIRSの事前情報が得られる場合、EEGのセンサ数が少なくても、脳活動が高い精度で推定できることが分かった。これは、NIRSとEEGを用いた脳活動推定の臨床応用への有効性を示すものである。



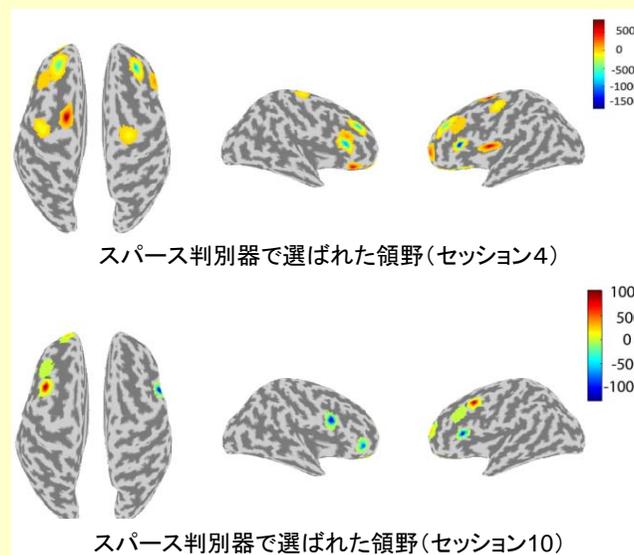
様々なNIRS事前情報を用いた場合の電流源検出精度



EEGセンサ数と電流源検出精度の関係

EEGオンラインフィードバック学習の長期訓練効果

- 初心者でも簡単に運動想像を出来るようにするために、階層変分ベイズ推定とスパース判別器を組み合わせた手法を用いて、脳活動の状態をリアルタイムにフィードバックし訓練した。
- 訓練前は約54%だった正答率が、4セッションの短期訓練後に96%まで向上した。この時、判別に有効だった領野は運動前野、補足運動野などであった。
- さらに訓練を続けたところ(10セッション)、判別に有効だった領野は、運動意図に関わる前頭前野に変化し、これは被験者の内観とも一致した。



スパース判別器で選ばれた領野(セッション4)

スパース判別器で選ばれた領野(セッション10)

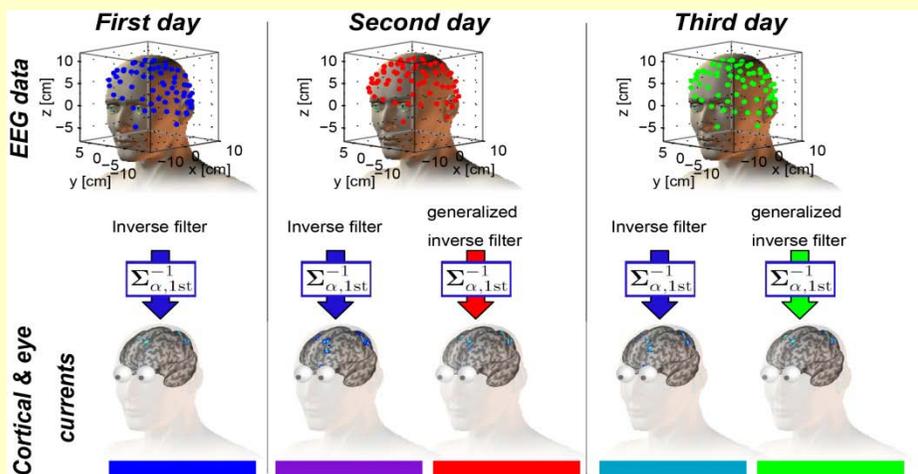
【課題ウ】 心拍や眼球運動等によるアーチファクト除去方法の研究開発

主な研究成果

- 異なる日に計測したEEGデータでのアーチファクト除去
- アーチファクトに歪められたMEG実データからの皮質電流推定

異なる日に計測したEEGデータでのアーチファクト除去

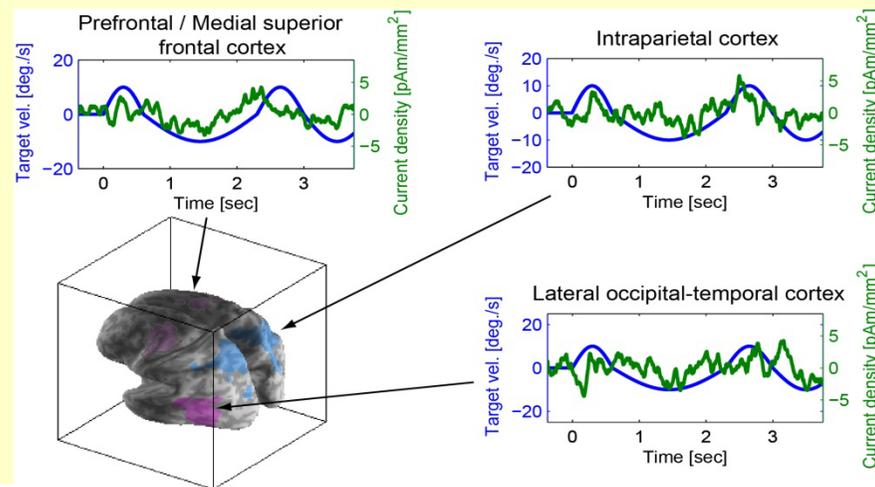
- 同じユーザが異なる日にEEGを記録する際、EEGセンサの位置ずれを避けることができない。
- そのため、EEGデータをアーチファクトと皮質電流に変換するための逆フィルタを計算しても、計測日ごとに再度時間をかけて計算し直す必要があった。
- 本研究では、位置ずれがあっても短時間で逆フィルタを用意する方法を開発した。提案手法を用いることで、異なる日に計測したEEGデータであっても、眼球アーチファクトの影響を除去し、高精度かつ短時間で皮質電流を推定できた。



異なる日に計測したEEGデータから、眼球アーチファクトの影響を除去し、皮質電流を推定した結果の比較。

アーチファクトに歪められたMEG実データからの皮質電流推定

- アーチファクトに歪められたMEG実データに提案手法を適用することで、アーチファクト成分を分離して皮質電流の時系列データを推定できるか検証した。
- 被験者は、動き続ける視標を心の中で追跡し続ける課題を行い、その際のMEGデータを記録し、解析を行った。
- 実データでは心拍や眼球の固視微動によるアーチファクトが混入するが、それらの影響を除去し、タスクに関連した脳活動の時間的特徴が眼球運動に関連する皮質領域で得られた。



動き続ける視標を心の中で追跡し続ける課題を行ってる際の皮質電流の時系列データ。

4. これまで得られた成果(特許出願や論文発表等)

※成果数は累計件数と()内の当該年度件数です。

	国内出願	外国出願	研究論文	その他研究発表	プレスリリース	展示会	標準化提案
複数モダリティ統合による脳活動計測技術の研究開発	4(1)		26(2)	99(42)	3(2)		

5. 研究成果発表会等の開催について

MEGとfMRIを統合して可視化するソフトウェア「VBMEG」公開

本委託研究で開発を進めてきた時間分解能に優れたMEGと、空間分解能に優れたfMRIを統合して脳活動を高精度に可視化するソフトウェア「VBMEG」をインターネットを通じて平成23年6月15日に無料公開し、同日に東京国際フォーラムにてプレス発表と記念講演会を行った。記念講演会には、MEGやfMRIに関する著名な研究者のみならず企業からも数多くの参加者があった。またソフト公開後のアクセス数は国内外を含めて3400、ダウンロード数は2300を超えており大きな反響があった。

6. 今後の研究開発計画

- ・fMRIとMEG、及びNIRSとEEGの組み合わせによって、高時間・高空間分解能を持つオンライン脳活動推定システムを開発する。
- ・オンライン脳活動推定システムを用いて、複雑な認知運動課題における脳活動から時空間的特徴量を抽出してブレインマシンインタフェースに役立てる。
- ・NIRS計測の高精度化を実現する、拡散光トモグラフィに最適な階層ベイズ推定を開発する。
- ・MEGやEEGアーチファクトのモデル化による階層ベイズ推定を用いた除去手法を確立する。