

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 3 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K12623

研究課題名（和文）時空間脳波逆問題解法による視覚情報伝搬経路の可視化

研究課題名（英文）Visualization of visual pathways using spatiotemporal cortical inverse solution

研究代表者

堀 潤一（Hori, Junichi）

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号：80209262

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：自然環境下で非侵襲的に脳内情報伝搬経路の可視化を実現するため、高精度で脳内電気活動をイメージングする方法を確立した。少数電極で簡易的に計測された脳波から、補間法と時空間逆フィルタを用いて、時系列ダイポール信号強度分布を推定した。シミュレーションにより、本提案法により精度の改善がみられ、多数電極と同等の精度が得られることを確認した。実験では、視覚刺激タスクを用いて視覚伝搬経路を確認し、それぞれ生理学的知見と一致することを確認した。加えて、運動野の伝搬経路を可視化することにより、脚部運動種類の識別精度の改善を行い、ブレインコンピュータインタフェースの実用化への可能性を示唆した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

脳波の時間分解能は臨床応用上十分満足しているのに対し、空間分解能は電極数の制限や頭蓋骨など低電導特性が影響し、脳内信号源を推定するには不十分であった。本研究で注目する脳波イメージングによれば、空間分解能の問題を改善でき、さらに時空間解析に拡張することで脳内情報伝搬過程の可視化が期待できる。さらに補間法を適用することにより少数電極によるイメージングが可能となり、より計測の簡略化が達成できる。これまで困難であった視覚情報の脳内情報処理や脚部運動想起の識別が実現できれば、ブレインマシンインタフェースやニューロイメージングといった実用的な場面での神経工学の応用が期待できる。

研究成果の概要（英文）：In order to visualize information propagation paths in the brain non-invasively in a natural environment, a method to image brain electrical activity with high precision was proposed. The time-series equivalent dipole distributions were estimated from the electroencephalogram measured with a small number of electrodes using interpolation and a spatiotemporal inverse filter. In the simulation, we confirmed that the proposed method can achieve high accuracy imaging equivalent to multiple electrodes. In the human experiment, we confirmed that the obtained propagation pathways for the visual stimulations were consistent with physiological findings. In addition, we improved the accuracy of leg movement identification by visualizing the propagation pathways in the motor cortex. This suggested the possibility of practical application of brain-computer interfaces.

研究分野：生体医工学

キーワード：脳波逆問題 時空間イメージング 情報伝搬経路 視覚誘発電位 運動関連電位 補間

1. 研究開始当初の背景

高次脳機能解析や脳内情報伝搬経路の解明、脳内病巣部位の特定のため、脳内の電氣的活動を可視化する時空間脳機能イメージングが望まれている。その中でも脳波を用いた方法は測定環境に制限が少なく、かつ非侵襲で計測できるため、自然に近い環境で脳機能を解明するのに有効な方法である。脳波の時間分解能は十分高いのに対し、頭蓋骨の低電導特性の影響により空間分解能は低く、頭皮電位分布から直接脳内の電気活動を特定するのは困難であった。

この問題を解決するために、頭皮電位から脳内に仮想的に設置したダイポール層における信号強度を推定する脳内ダイポールイメージングが提案されている。脳内で発生した信号源は数や方向の制限を受けることなく脳内のダイポール信号強度分布によって等価的に表現される。ここで、脳内信号源から伝達行列を介して頭皮表面に電位として現れる過程を順問題とすると、この逆問題を解くことでダイポール層における信号強度を推定する。この際、逆問題の解は頭部形状の個人差や電極貼付位置のずれ、脳内の導電率のばらつきといったモデル設計と実測条件との歪みに起因する伝達行列の誤差と、瞬目や体動などのアーチファクトに起因する計測雑音の影響を受ける。よって脳波逆問題の解法においてはいかにこれらの誤差や雑音の影響を軽減できるかが重要である。その手法として、これまでに、雑音や信号の統計情報を用いた正則化法が提案された。また、伝達行列の誤差を抑制するため、打ち切り全最小二乗法(TTLS: Truncated Total Least Squares)を用いた逆推定法が提案された。

ところで、脳内ダイポールイメージングでは、空間分解能を向上させるために 100 チャンネル程度の電極で測定されたデータを必要とした。しかし、多数の電極を用いた測定は準備に時間がかかり、被験者の拘束時間も多くなる。また、多チャンネル計測が必要なため、計測装置のコストもかかる。一方、脳機能解析を目的とした研究やブレインマシンインタフェースなど実用的な場面では、国際 10-20 法と呼ばれる 19 個の電極を用いた測定法が広く採用されている。

2. 研究の目的

本研究では、日常場面での脳内電気活動の非侵襲時空間解析を目的とし、国際 10-20 法による少数の電極からの脳波データを用いたダイポールイメージングの精度を向上させることを目指した。多数の電極を用いた測定法において、国際 10-20 法に該当する電極以外は欠損したと仮定し、19 チャンネル少数電極データから重回帰分析を用いて欠損した 61 チャンネル電極データを補間した。一般に、単純な線形補間では情報量が増えないため、精度の向上は見込めないと考えられる。しかし、雑音環境下で疑似的に測定電極数を増やすことで、逆問題を解くためのランクを増やし、推定精度を向上させることを試みた。シミュレーションにより多チャンネルで計測した場合と、少数チャンネルで計測した場合を想定し、そこから多チャンネルに補間した場合の比較を行い、補間法に適した逆問題解法を検討した。また、多チャンネルで計測したヒトの視覚誘発電位、ならびに運動関連電位に適用し、補間法を用いたダイポール信号強度分布による脳内活動の可視化の有効性を確認した。

3. 研究の方法

(1) ダイポールイメージング

頭皮電位から脳内信号強度分布を推定するため、3層同心球体積伝導体頭部モデルを設定した。この頭部モデルの脳内に、任意の半径で仮想的にダイポール層を設置した。ダイポール層の信号強度分布が頭皮に伝わる過程を伝達行列で表し、測定時の電極のズレなどの伝達行列の誤差、瞬き、体動などのアーチファクトを含む計測雑音を考慮し、ダイポール層における信号強度から頭皮電位を導出する順問題を定式化した。

伝達行列は頭部モデルの形状や電極配置、設定した導電率やダイポール層と頭皮までの距離によって決定され、頭蓋骨の低電導特性による劣化と伝搬中の信号の減衰を表す。実際に計測されるのは頭皮電位であるため、逆フィルタを求めることで頭皮電位からダイポール層信号強度分布を推定した。

頭皮電位の雑音と伝達行列の誤差の両方を考慮するため、逆フィルタの算出には、伝達行列と頭皮電位で構成される拡大係数行列について特異値分解を行う(TTLS: Truncated Total Least Squares)[2]を用いた。特異値は原波形にどれだけ寄与していたかを表す値であり、逆行列を算出する際に、小さな値の特異値を打ち切ることで雑音や誤差の増幅を抑制した。

(2) 補間処理

国際 10-20 法の空間的な情報を補うため、本研究では補間処理によって疑似的に電極数を増加させる方法を提案した。つまり、一般的に広く用いられている脳波測定法である国際10-20法を対象に、足りない電極データを補間することによってダイポールイメージングにおける逆問

題の解を精度よく推定することを試みた．国際 10-10 法と呼ばれる脳波計測法の内 10-20 法電極よりも内側に存在する 42個の電極を補間点とし，10-20法の19個のデータを説明変数，10-10法の61個のデータを目的変数とする重回帰分析を行い，得られた偏回帰係数を基に補間式を作成した．線形和による補間では脳波自体の空間的な情報は変化しないが，ここで重要なことは電極数を増やすことである．TTLS では拡大係数行列の特異値分解で得られる特異値や特異ベクトルを用いて疑似逆行列を算出するが，このときの特異値の数は各伝達行列のランク数であり，これは電極数に等しい．また，得られる特異値や特異ベクトルも補間前後で異なる値をもつ．このことから補間前後の逆問題解析の過程が異なるため，精度の改善が期待できる．

4．研究成果

(1) シミュレーション

補間による精度向上を確認するため，計算機シミュレーションを行った．脳内にダイポール信号源を想定し，3層同心球体積伝導体頭部モデルの伝達行列を考慮し，国際 10-20 法 19 チャンネル，国際 10-10 法 61 チャンネルの頭皮電位を作成した．ノイズ環境による影響を見るため，ガウシアン白色ノイズを付加した．また，本提案法の精度を確認するため，10-20 法 19 チャンネルデータから補間により，61 チャンネル頭皮電位を求めた．ダイポールイメージングを行う際の特異値を打ち切るパラメータは，推定したダイポール層信号強度と真値との相対誤差が最小になるように設定した．シミュレーションの結果，補間法によって有意水準 1%で有意に相対誤差の抑制がみられ，推定精度の向上が確認できた．図 1 に 19 チャンネル，61 チャンネル，補間法で求めた 61 チャンネルのデータから推定されたダイポール信号強度分布の結果の一例を示す．10-10 法実脳波から 10-20 法に該当する電極データを抜粋し，補間あり/なしにおける推定結果を比較したところ，補間ありの方が 10-10 法データの結果に近い，性能が得られた．

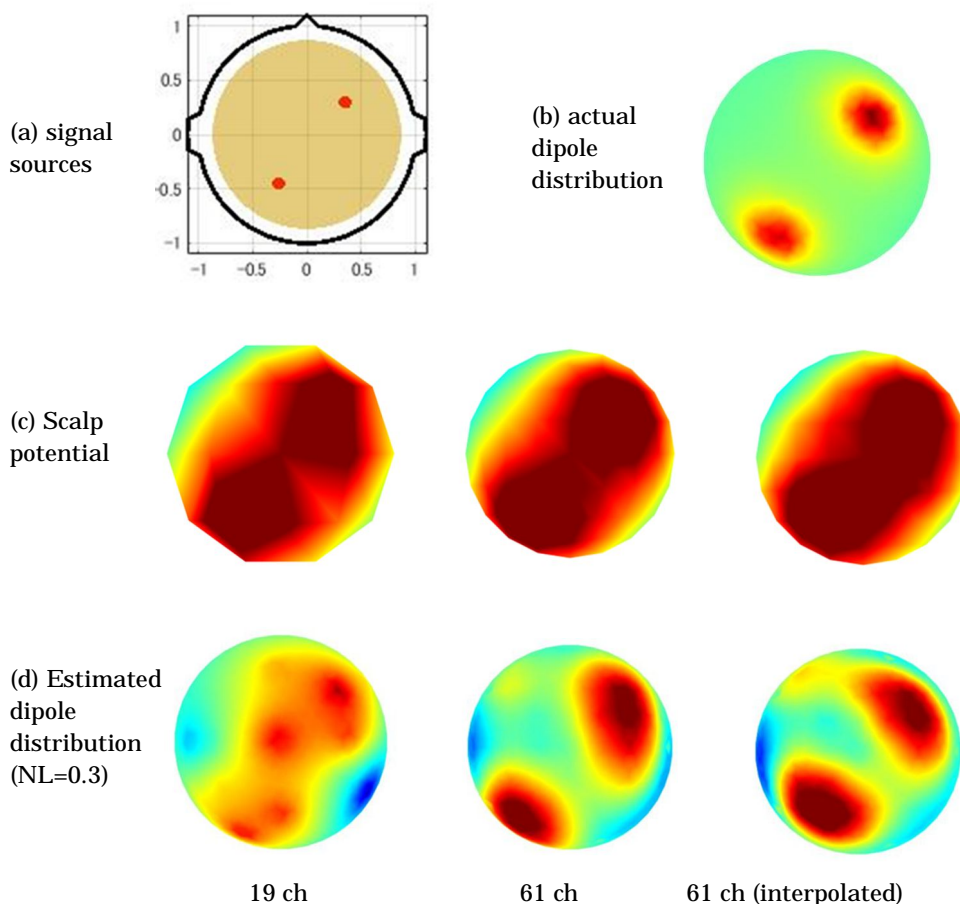


図 1 シミュレーション結果．(a) 電極配置，(b) ダイポール信号強度分布も真値，頭皮電位(c) に比べて推定されたダイポール信号強度分布(d)で分解能の改善が確認できた．19 チャンネルの国際 10-20 法では雑音の影響より分解能が低下しているのに対し，補間を用いた提案法では精度が改善し，61 チャンネル計測の場合と同等の結果が得られた．

(2) 実脳波への適用

実脳波では真のダイポール層が未知であるため、真値との相対誤差を参照して打ち切りパラメータを決定することはできない。逆問題解析においては解を決定する方法として、観測値との誤差を表す残差ノルムと推定解自体の大きさを表す推定値ノルムの両方をバランスよく抑制するものを最適とする方法が多く提案されているが、本研究では、正規化した残差ノルムと推定値ノルムの重み付き線形和を最小にする打ち切りパラメータとした。最少となる解はノイズレベルに比例するため、重み係数は独立成分分析より算出したノイズレベルをパラメータとした関係式を導出し決定した。

設計した時空間逆フィルタを実脳波に適用した。図 2 にチェッカーフラグによる視覚反転刺激とランダムドットによる視覚運動刺激の 2 種類を用いて実験を行った結果を示す。脳皮質電位イメージングの結果、視覚反転刺激では後頭部の一次視覚野で発生した電位が側頭葉へ伝搬していく様子を可視化できた。視覚運動刺激による脳波の場合では、一次視覚野で電位が発生した後、頭頂葉後部に伝搬し、頭頂葉側部の視覚に関する部位に伝搬していく様子を確認できた。一次視覚野に到達した視覚情報は、物体認知のため側頭葉へ伝搬する腹側経路と空間認知のため頭頂葉へ伝搬する背側経路に分岐する。本結果は、これらの生理学的知見と一致した。

さらに、ブレインコンピュータインタフェースなどへの実用化を目指し、運動関連電位に応用した。移動支援を考慮し、左右大腿部屈曲、足指背屈時の運動関連脳電位の時空間解析により動作判別を試みた。図 3 に右大腿部屈曲と右足指背屈の結果を示す。脚部動作の左右判別は類似した伝搬が得られ判別が困難であったが、大腿部と足指の部位間判別では信号源の方向、頭頂に陰性電位が現れるタイミングに違いが見られた。

以上より、ダイポールイメージングと補間法を組み合わせた脳内電気活動の時空間解析法により、脳内信号伝搬経路の可視化の性能向上が実現できた。

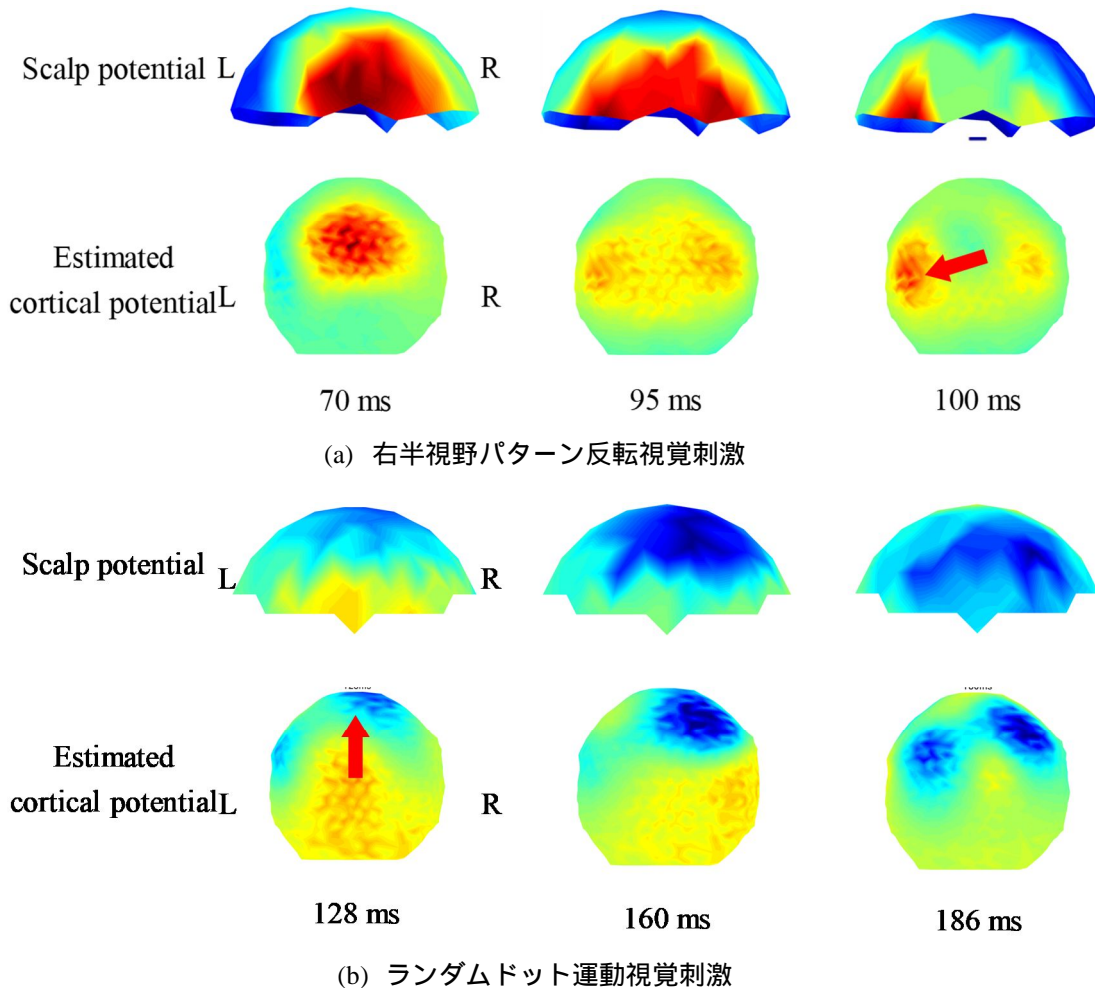
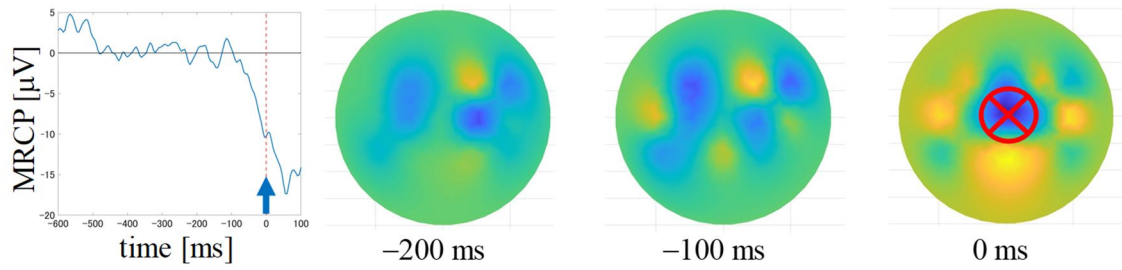


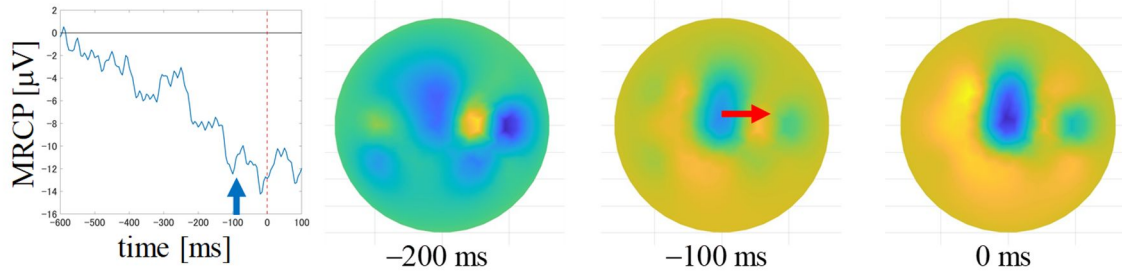
図 2 視覚誘発電位への応用（背面図）。頭皮電位では分布がぼけているのに対し、脳内ダイポール信号強度分布を経由して推定した脳皮質電位では信号の局在化が実現できた。(a) 右半視野パターン反転視覚刺激では一次視覚野から腹側視覚路を通して側頭葉に伝搬し、(b) 運動視覚刺激で背側視覚路を通して頭頂葉に伝搬の様子が確認でき、生理学的知見と一致した。



z 電極頭皮電位

ダイポール信号強度分布

(a) 右大腿部屈曲時のダイポール信号強度分布



Cz 電極頭皮電位

ダイポール信号強度分布

(b) 足指背屈時のダイポール信号強度分布

図3 運動関連電位への応用(頭頂図). 運動関連電位の左右の識別は困難であったが, 信号源の振幅変化と方向より大腿部屈曲(a)と足指背屈(b)の運動を識別できた.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 井山雄大, 堀潤一
2. 発表標題 国際10-20法脳波データを用いた脳内ダイポールイメージングの検討
3. 学会等名 MEとバイオサイバネティクス研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 堀潤一
2. 発表標題 ダイポールイメージングによる脳内信号伝搬の可視化
3. 学会等名 日本生体医工学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤智孝, 堀潤一
2. 発表標題 脚部運動関連脳電位時空間解析による左右判別の検討
3. 学会等名 MEとバイオサイバネティクス研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 井山雄大, 堀潤一
2. 発表標題 国際10-20法による少数電極を想定した脳内ダイポールイメージング
3. 学会等名 生体医工学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤智孝, 堀潤一
2. 発表標題 運動関連脳電位の信号空間分布を用いた脚部動作判別
3. 学会等名 日本生体医工学会甲信越支部大会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	井山 雄大 (Iyama Yudai)		
研究協力者	佐藤 智孝 (Sato Tomotaka)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------