

脳内電気活動イメージングとその応用

堀 潤一

新潟大学 工学部 福祉人間工学科

Brain Electrical Activity Imaging and Its Applications

Junichi Hori

Dept. of Biocybernetics, Niigata University

1. はじめに

非侵襲的に脳の空間的な電気活動を把握することができる脳波マッピングまたは脳波トポグラフィは、脳疾病部位の特定、脳内情報処理機構の推定、および情緒活動の解明などを実現する方法として注目をあびている。ところが、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が制限されることや頭蓋骨などの電導特性が低いことが影響し、頭皮電位そのものから信号源の状態を推定するには不十分であった。この問題を解決するため、空間逆フィルタを用いて分解能を改善する種々の方法が提案されてきた[1]-[6]。特に、脳機能ダイポールイメージング法は、脳内に仮想的に設置した等価ダイポール層によって信号源を表現する方法で、信号源の個数、方向などの性質に依存せずに逆問題を解くことができる[6]。このダイポールイメージングによる脳機能逆問題に、雑音や信号の統計的情報を取り入れることにより、頭皮上で非侵襲的に計測された多チャンネル脳波電位から高精度に脳内電気活動分布を推定し、空間分解能を向上させることができる[7]-[12]。

本講演では、ダイポールイメージングによる脳電気活動の可視化の原理及び具体的な実現法について概説し、その応用例、更には今後の展望について述べる。

2. 脳内電気活動イメージング

従来、脳内電気機能を同定する方法として、脳内に電気双極子（ダイポール）を想定し、その時間経過を推定するダイポール追跡法が提案されてきた。信号源の個数が既知であれば、高精度に信号源を同定できるが、実際にはいくつかあるかわからない。そこで、信号源そのものではなく、それを等価的に表現するイメージ（マッピング）によって脳内電気活動を高分解能で可視化する脳内電気活動イメージング手法が開発された。

空間分解能を改善するために、頭部を不均質3層同心球によりモデル化する(Fig. 1)。脳内に存在する信号源を可視化するため、この頭部モデルの脳内に仮想的にダイポール層を設置する。このダイポール層の表面に複数の放射状ダイポールを配置し、これにより信号源の数によらずに信号源の状態を表現する。このダイポール層から頭皮電位までの伝達関数を、頭部モデルの形状と媒質の電気特性を考慮して求める。これは、順問題と呼ばれている。

頭皮で計測された電位は、頭蓋骨などの低導電率の影響により劣化を受け、さらに電極インピーダンスなどの影響による雑音が重畳する。頭皮電位からこのダイポール層の強度を推定するためには、伝達関数の逆関数を求めること

になる。これは逆問題と呼ばれている。従来は、TSVD (Truncated singular value decomposition)やTikhonov正則化法など、一様に分布した白色雑音を想定した復元法が脳波マッピングの先鋭化に用いられてきた。しかし、実際の臨床応用を踏まえ復元精度を改善するためには、電極インピーダンスのばらつきや測定環境の影響を考慮しなければならない。

統計的ノイズ情報を取り入れ、非一様ノイズに対応可能な射影フィルタの概念を用いることによって、復元能力を向上できることが確認されている[7]-[12]。具体的には、前誘発電位より背景雑音の空間分布を求め、その統計的性質として雑音の共分散行列を推定し、復元フィルタに組み込むことによって、逆問題の推定精度を改善する。このフィルタはパラメトリック射影フィルタ(PPF)として知られている。更に、信号の統計的情報も推定可能な場合、ウィナーフィルタによる画像の先鋭化が期待できる。

また、脳内電気活動は3次元空間上に分布すると同時に時々刻々と変化する時変性信号である。このような脳機能の時空間解析を実現するためには、時空間逆フィルタが望まれる。我々は、パラメトリック射影フィルタの正則化パラメータと雑音の共分散行列を時変とすることにより、時空間逆フィルタを構成した。提案法により、瞬目（まばたき）などの時変性アーチファクトの影響を低減できることを示した。

3. 実験

脳機能解析の高精度化を検証するため、等価ダイポール層を用いた脳機能イメージングについて計算機シミュレーションにより検討を行った。逆問題を解くにあたって、雑音の空間分布を考慮し、かつ復元誤差の低減が見込まれるパラメトリック射影フィルタを採用し、従来法と比較検討した。雑音分布として、一様に分布するガウシアン白色雑音と、周辺部、頭頂部、即頭部に偏った分布をもつ非一様雑音を扱った。

様々なダイポール信号源について実験を行い、原画像と復元画像との相対誤差で評価した結果、信号分布と雑音分布の相関が低い場合、従来のTSVDやTikhonov正則化法に比べて有意な改善が見られた。また、相関が高い場合でも、従来法と同程度の精度が得られた(Fig. 2)。

更に、実際にひとの視覚誘発電位より、信号源の局所化を行った。一人の健常被験者を対象とし、96チャンネルの視覚誘発電位分布を推定した。Fig. 3に示すように左視野の刺激に対して、頭皮電位では左右両側に正の電位が広く分布しているが、パラメトリック射影

フィルタによって推定された脳内ダイポールレイヤーイメージでは、右視覚野に正電位が局所化されており生理学的背景と一致が見られた。

4. 今後の展望

脳電気活動イメージングは、非侵襲でかつ信号源の性質によらず脳内電気活動を可視化できる方法として注目をあびており、これまで生理学的な背景のもとで脳機能の解明の一手段として脳波計測が用いられてきた。現在、MRI など他の脳機能計測との組み合わせにより実頭部形状を考慮したより詳細な脳機能計測への拡張が進んでおり、今後、実験的な環境に留まらずより実生活に近い環境での脳内情報処理機能の解明などへの応用が期待できる。更に、情緒活動の解釈への応用としても、脳機能イメージングの役割が注目されている。更に、近年特に注目されている意識のみで情報伝達を可能とする脳マシンインタフェースの開発へも応用できる。

謝辞

本講演の一部は、イリノイ大学シカゴ校 Bin He 教授との共同研究による。研究成果は、科学研究費補助金基盤研究 (B) 及び新潟大学プロジェクト推進経費による。データ解析に協力頂いた新潟大学大学院自然科学研究科の宮田治君、相場雅彰君、大類稔君に感謝の意を表す。

参考文献

- [1] B. He, et al., Med. & Biol. Eng. & Comput., vol. 34, Sup I, Part 2, 257-258, 1996.
- [2] F. Babiloni, et al., Electroenceph. & Clin. Neurophysiol., vol. 102, 69-80, 1997.
- [3] Y. Wang and B. He, IEEE Trans. on Biomed. Eng., vol. 45, 724-735, 1998.
- [4] G. Edlinger, et al., IEEE Trans. on Biomed. Eng., vol. 45, 736-745, 1998.
- [5] B. He, et al., IEEE Trans. on Biomed. Eng., vol. 46, 1264-1268, 1999.
- [6] J. Lian, et al, Proc. of IEEE-EMBS Asia-Pacific Conf. on Biomed. Eng., 605-606, 2000.
- [7] J. Hori and B. He, 2000 World Congress on Medical Physics and Biomed. Eng. and the Proc. of 23rd Annual Int. Conference of the IEEE EMBS, CD-ROM, July 2000.
- [8] J. Hori and B. He, Annals of Biomedical Engineering, vol. 29, 436-445, 2001.
- [9] J. Hori and B. He, 2001 Asia-Pacific Radio Science Conference, p. 265, Aug 2001.
- [10] J. Hori, J. Lian, and B. He, 4th International Workshop on Biosignal Interpretation, pp.311-314, June 2002.
- [11] J. Hori and B. He, PIERS Progress in Electromagnetic Research Symposium, p.595, July 2002.
- [12] J. Hori, J. Lian, and B. He, 2nd Joint Meeting IEEE Eng. Med. Biology Soc. and Biomed. Eng. Soc., pp.929-930, Oct 2002.

(連絡先: hori@bc.niigata-u.ac.jp)

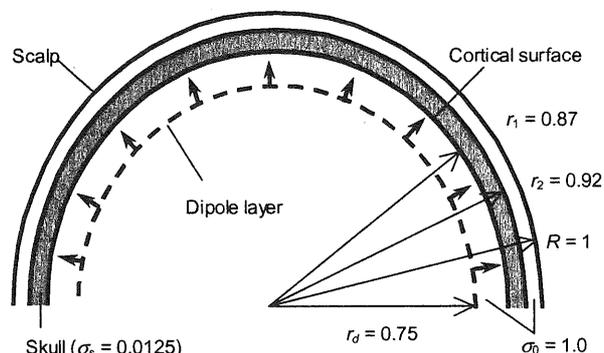


Fig. 1 不均質 3 層同心球頭部モデル. 頭蓋骨の低導電率特性を考慮している. 脳内に仮想的に設置した放射状のダイポールによって脳内信号源を等価的に表現している.

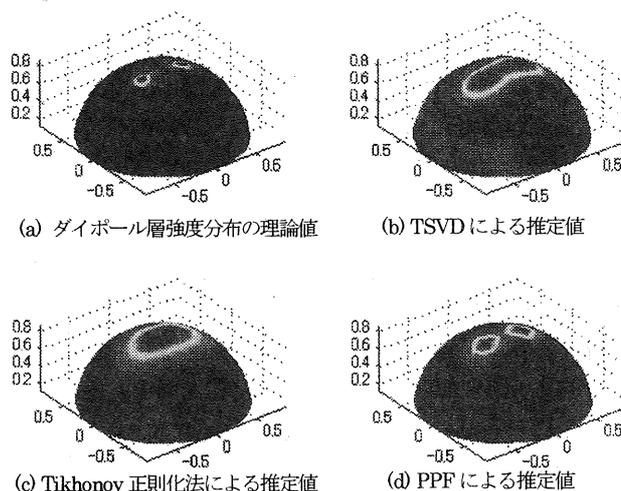


Fig. 2 ダイポールイメージングのシミュレーション結果の一例. PPF により、2つの放射状ダイポールソースによる信号強度分布がより鮮明に確認できる.

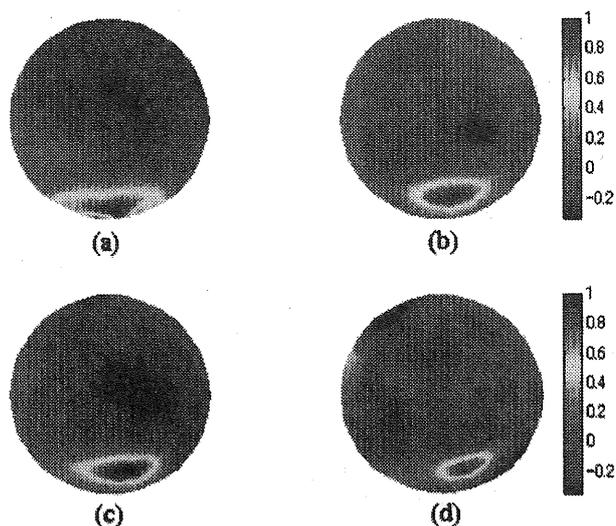


Fig. 3 人の頭部皮質電位 (P100) の推定例. (a) 左視覚誘発頭皮電位マップ, (b) TSVD, (c) Tikhonov 正則化法, (d) PPF による皮質電位の推定結果. マップの下方が後頭部を表す. PPF (d) により活動電位がより局所化されている.