WPW 症候群患者心磁図の独立成分分析を用いた電流密度解析

Visualization of the Current Density Distribution in MCGs of a WPW Syndrome Patient Using Independent Component Analysis

小林宏一郎, 吉澤正人, 山崎賢治*, 内川義則*, 中居賢司**

岩手大学工学部, 岩手県盛岡市上田 4-3-5 (〒020-8551)

*東京電機大学理工学部, 埼玉県比企郡鳩山町石坂 (〒350-0394)

**岩手医科大学臨床検査医学講座, 岩手県盛岡市内丸 19-1 (〒020-8505)

K. Kobayashi, M. Yoshizawa, K. Yamazaki*, Y. Uchikawa* and K. Nakai**

Faculty of Engineering, Iwate Univ., 4-3-5 Ueda, Morioka, Iwate 020-8551

*College of Science and Engineering, Tokyo Denki Univ., Ishizaka, Hatoyama, Hikigun, Saitama 350-0394

**Laboratory Medicine, Iwate Medical Univ., 19-1 Uchimaru, Morioka, Iwate 020-8505

We measured magnetocardiograms (MCGs) of a normal subject and a Wolff-Parkinson-White (WPW) syndrome patient. It is generally difficult to separate the accessory pathway and normal conduction system by visualization of the current density distribution (VCDD), because the VCDD has a wide range. Independent component analysis (ICA) is a useful method for separating independent signals from overlapping signals. In this study, the source of the accessory pathway was estimated by using ICA to obtain the VCDD.

First, principal component analysis was applied to the MCG as a pre-process and ICA was performed on the same dominant components. The activity of the accessory pathway was extracted from these components, and the waveform was reconstituted.

The VCDD was displayed from the onset of the delta wave (150 ms) to the R wave region (220 ms). The positions of the current density (a) without the ICA and (b) with the ICA were particularly different at 160 ms and 180 ms. The current density with the ICA remained in the same position, D5, from 160 ms to 220 ms, and was also about 2 cm different from the current density without the ICA.

It was confirmed that ICA is useful method for estimating the VCDD of an MCG of a WPW syndrome patient.

Key words: magnetocardiogram, independent component analysis, Wolff-Parkinson-White syndrome, accessory pathway, source estimation.

1. はじめに

刺激伝導系疾患の1つである WPW 症候群にはKent束と呼ばれる副伝導路が存在し、発作性上室性頻拍症を呈する。この治療には、体内にカテーテル電極を挿入し副伝導路を見つけ、焼灼するカテーテル焼灼法が用いられている^{1),2)}。この際、非侵襲計測によって事前に副伝導路の正確な位置推定を行うことができれば、手術の時間短縮や患者の負担軽減に大きな貢献をすることが期待される。

WPW 症候群患者のKent束の位置推定は、いくつかの

報告^{3)~6)}がある。しかし、WPW 症候群患者の正常刺激伝導路と副伝導路の分離について検討した報告は少ない。一方、刺激伝導路を電流密度分布によって表示する方法も試みられている⁶⁾。しかし、一般に電流密度表示された心臓内の電流源は広がりを示し、正常刺激伝導路と副伝導路の分離は概して難しい場合が多い。

近年信号解析の手法としてさまざまな分野で応用されている独立成分分析を用いれば、心磁図波形から信号をいくつかの独立な伝導チャンネルに分離できる可能性がある。

本研究では、電流密度分布推定の前処理として、独立成分分析を用い、WPW 症候群患者の副伝導路に依存する信号成分の抽出を行った。独立成分分析を前処理とすることによって、副伝導路の活動が抽出され、局在化した活動として電流密度表示が行えたので報告する。

2. 計測・解析方法

2.1 計測方法

心磁図計測は、WPW 症候群患者1名と健常者1名を対象に行った。計測は、3×3×6 cm からなる直方体に2回の差分磁界を検出する二次勾配型磁界検出コイルを用いた SQUID 磁束計で行った。本磁束計は、12点の計測用コイルと1点のリファレンスコイルから構成されている。測定部位は、Fig.1に示す前胸壁面上のA1~H6に至る48点(印:X方向間隔4cm,Y方向間隔4cm)とし、本磁束計を4回移動させて計測した。Fig.1の太線は1人の被験者の胸部X線画像から求めた心臓の輪郭を示す。また、心磁図の計測前に標準12誘導心電図(ECG)も計測し、副伝導路のおおよその部位を推定した。計測された心磁図に対し1Hz~80Hzの帯域通過フィルタ用い、ECGのR波同期で約150回の加算平均により磁界データ収集を行った。

2.2 解析方法

副伝導路の解析として、はじめに心磁図波形に対して主成分分析を行い、寄与率が0.1%未満の成分を取り除きデータを縮約する。このことにより、ノイズの除去とデータの直交化を行う。また、閾値を0.1%未満とした理由は、計測システムが持つノイズレベルや環境ノイズレベルを考慮して、経験的に決定した値である。次に、この縮約したデータに対して独立成分分析(後述する)を行

い、正常な刺激伝導路の活動と示唆される成分を取り除き波形の再構成を行う。得られたデータに対して、電流密度表示⁶⁾を行う。本解析では、健康者の心電図（第Ⅱ誘導）と最も相関が高い成分を正常な刺激伝導路の活動と仮定して行った。また、心電図と心磁図では同じ波形が得られるわけではないが心電図を比較に用いた理由は、心磁図は測定点による波形のばらつきが多く比較対照となる波形を選定することが困難になる。一方、心電図（第Ⅱ誘導）は健康者であれば非常に良く似た波形が得られるため、比較対照として有効である。

2.3 独立成分分析

独立成分分析とは、いくつかの独立な信号源 S からの信号が線形に混合されて測定されるとき、測定された信号から元の互いに独立な信号 S を復元する手法である⁷⁾。ここで、測定点 k ($k=1,2,3,\dots,K$) におけるサンプリング時間 m ($t=1,2,3,\dots,M$) 中に得られる磁界 B は、各測定点における時間ベクトルの集合として以下の様に $K \times M$ の行列として表せる。

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1M} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{K1} & b_{K2} & \cdots & b_{KM} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式(1)の行列 B に対して独立成分分析を行う。

磁界信号 B は、信号源 S とセンサ間の距離や信号が伝わる媒質によって決定されるリードフィールド行列 L とで以下のように現される。

$$B = LS \quad (2)$$

ここで $n \times m$ の実数行列 W を用いて、

$$U = WB \quad (3)$$

となる式を考える。 U は復元された信号である。 $WL=I$ (I は単位行列) となる W を求めれば

$$U = WLS = S \quad (4)$$

より、元の独立な信号が復元可能となる。独立成分分析ではこの W をどのようにして推定するかが問題となる。その推定法として相互相関最小化法⁸⁾を用いた。

この変換行列 W を用いて、元の独立な信号 S は

$$S = WB \quad (5)$$

で求められる。さらに W と S が分かれば、

$$B = W^{-1}S \quad (6)$$

より信号を再構成できる。

3. MCG 計測結果

Fig.2 に WPW 症候群患者の心磁図波形を示す。Fig.2 は、測定された 48 点のデータを重ね書き表示している。WPW 症候群患者の特徴であるデルタ波（図中の縦線の区間：150ms～220ms）が確認できる。

Fig.3 に WPW 症候群患者の心磁図波形を主成分分析した結果

Fig. 1 Coordinate system and measurement positions on a subject's chest.

Fig. 2 MCG waveforms of a WPW syndrome patient.

Fig. 3 PCA of MCG waveforms of a WPW syndrome patient.

を示す。縦軸は寄与率を表し、横軸は寄与率の高い順番に並べた第 n 次主成分 ($n:1 \sim 48$) を表す。主成分分析による寄与率が 0.1% 未満になる成分は、第 6 次主成分（寄与率：0.0098%）以降であるため、第 5 次主成分までのデータに縮約することとした。このデータを利用して、独立成分分析を行った。

Fig. 4 MCG waveforms separated by ICA of the WPW syndrome patient (ICA1 – ICA5).

Fig. 5 ECG waveform of a normal subject and ICA4 waveform of a WPW syndrome patient.

Fig. 6 Reconstituted MCG waveforms of a WPW syndrome patient with ICA.

Fig.4に独立成分分析より5次元 (ICA1~ICA5) に分離した波形を示す。縦軸は正規化された各成分の強度を表し、横軸は時間を表す。Fig.4を見ると、ICA4に健常者の波形と類似した波形が得られた。そこで健常者の心電図 (第II誘導) とICA4の振幅を正規化し、重ね書きした結果をFig.5に示す。ICA4にもデルタ波の影響が若干現れているが、5つに分離されたICAの中で最も相関係数が高く、2つの波形の相関係数は0.83となり高い相関が得

(a) VCDD without ICA

(b) VCDD with ICA

Fig.7 Visualization of the current density distribution (VCDD) of MCGs of the WPW syndrome patient (a) without ICA and (b) with ICA.

られた。したがって、ICA4は正常な刺激伝導路の影響と捉えていることが示唆される。そこで、正常な刺激伝導路の影響を取り除き、デルタ波を抽出するため、ICA4を取り除き式(6)を用いて波形を再構築した。

Fig.6に再構築した心磁図の波形を示す。Fig.6を見ると、デルタ波 (図中の縦線の区間: 150ms~220ms) が大きな割合を占めていることが分かる。

Fig.7にWPW症候群患者のデルタ波の時間に対して、電流密度分布表示を行った。Fig.7(a)は、計測された心磁図に対して推定した結果であり、Fig.7(b)は、独立成分分析により再構築した心磁図に

対して推定した結果である。それぞれ体表面下約 8cm に相当し、この面の電流密度が最も大きかった。時間はデルタ波の開始 150ms から R 波領域 220ms まで 10ms 毎に表示した。縦軸と横軸は Fig.1 に示した測定点を表す。また、電流密度の強度は白黒の濃淡で表わし、白抜きの部位が推定された電流密度が大きい部位を表し、三角が方向を示している。Fig.7(a)の独立成分分析を行っていない結果では、150~160ms で C3 付近に電流密度が存在し、170ms で C3,C4,D3,D4 の中心付近に移動し、180~220ms にかけて C4 と D4 の中心付近で広がりを持って分布している。一方、Fig.7(b)の独立成分分析を行った結果では、150ms で C2,C3,D2,D3 の中心付近に存在し、160~220ms にかけて D4,D5 の中央付近に Fig.7(a)と比較して局在化した分布を示した。

4. 考察

WPW 症候群患者の心磁図波形の特徴として、デルタ波の時間領域での電流ダイポールの局在性が良いことが知られている。Fig.7 で示した独立成分分析で抽出したデルタ波を強調した再構成波形の電流密度表示は、独立成分分析を行っていない元の信号と比較して、160ms から 220ms にかけて長い時間一定の箇所に電流ダイポールの局在が観測された。この局在性を定量的に評価するため、推定された電流密度の強度が 90%以上の範囲と 70%以上の範囲の割合を求めた。190ms から 220ms の平均値として、独立成分分析を行っていない結果、強度 90%以上の範囲が 1.99%、強度 70%以上の範囲が 6.41%となり、独立成分分析を行った結果、強度 90%以上の範囲が 1.02%、強度 70%以上の範囲が 4.72%となった。独立成分分析を前処理として用いることにより、推定された電流密度分布の局在性が向上することが分かる。また、Fig.7(a)と Fig.7(b)では、電流密度の最強点位置も時間によっては約 2cm のずれを示している。この 2 点が、独立な伝導路を抽出した影響と考えられる。独立成分分析を行うことにより、正常な刺激伝導路の活動とセント束の活動を分離し、電流密度表示することにより、セント束の活動をより正確に推定できたと考えられる。

本解析では、健常者の心電図と最も相関が高い成分を取り除き波形の再構成を行う方法であるが、正常な刺激伝導路の活動のみを取り除けることではない。今後、さらに適切な信号の分離方法や ICA の適応限界など検討する必要がある。

5. まとめ

WPW 症候群患者と健常者の心磁図計測を行った。WPW 症候群患者の副伝導路の解析を行うため、独立成分分析を前処理とした電流密度分布表示を行った。独立成分分析により、正常な刺激伝導路の活動と副伝導路の活動を分離し、副伝導路の活動を抽出した。この抽出されたデータを用いて電流密度表示することにより、臨床で知られている局在性の高い信号として推定することができた。

謝辞 本研究の一部は、科学技術振興事業団岩手県地域結集型共同研究事業および財団法人磁気健康科学研究振興財団の研究助成として行ったものである。

文 献

- 1) Y. Gojima, K. Ohbayashi : *Electrocardiogram ABC*, p.106 (Japan Medical Association, Tokyo, 1992).
- 2) M. Kokubo, K. Sugiyama : *Internal Medicine* p.500 (Asakura, Tokyo, 1977).
- 3) T. Katila, J. Montonen, M. Makijarvi, J. Nenonen, M. Raivio, P. Siltanen: *BIOMAGNETISM'87*, Tokyo Denki University press, 274(1987).
- 4) R.R. Fenici, M. Masselli, L. Lopez, G. Melillo: *BIOMAGNETISM'87*, Tokyo Denki University press, 282(1987).
- 5) J. Nenonen, T. Katila, M. Leinio, J. Montone, M. Makijarvi, P. Siltanen: *IEEE Trans. on Biomedical Engineering*, 38, 648(1991).
- 6) M. Yoshizawa, K. Nakai, K. Kobayashi, Y. Nakamura, Y. Uchikawa: *The Journal of Japan Biomagnetism and Bioelectromagnetics Society*, 15, 109 (2002).
- 7) S. Amari, N. murata : *Independent Component Analysis*, p.1, (Science corp, Tokyo, 2002)
- 8) J.F. Cardoso, A. Souloumiac: *SIAM Journal Mat. Anal. Appl.*, 17(1), 161(1996).
- 9) Uchikawa and S. N. Erne : *Biomagnetism '87*, Tokyo Denki Univ. Press, 322 (1988).
- 10) K. Kobayashi, Y. Uesugi, Y. Uchikawa, K. Nakai, M. Yoshizawa : *Journal of Magnetism Society of Japan*, 20, No.2, 673 (2001).

2003 年 10 月 22 日受理, 2004 年 2 月 10 日採録