多次元有向コヒーレンスと脳波解析への応用

今西 なお美, 椎名 毅
筑波大学 電子・情報工学系

Multi-dimensional Directed Coherence and Application to Analysis of EEG

N.Imanishi, T.Shiina
Institute of Information Science and Electronics, Univ. of Tsukuba

1 はじめに

人の脳波は δ 波、θ 波、α 波、β 波など種々のリズムからなる。これらのリズムの伝達パターンを解明することは脳波研究の重要なテーマであり、様々な試みがなされている。それらの試みの1手段としてわれわれはこれまで頭皮上の多数部位 (チャンネル) 間における情報の流れを有向コヒーレンスを用いた因果性解析により定量化し、可視化することを試みてきた。これにより個々の異常個所を発見するのみだけでなく、情報の伝達異常などの病状診断にも応用できると考えられる。

そこで閉眼安静時に発生する α 波 (8 ~ 13Hz) について解析を行った。今回は特にこれまで2チャンネル間でのみ行われてきた解析法を多チャンネルにも適用可能な解析法に拡張した多次元有向コヒーレンス法を示した。また、シミュレーション実験による特性評価を行い、その後実脳波データによる解析により有用性を示した。

2 有向コヒーレンス解析法

コヒーレンスとは相関関係を示す量であり、本来方向性は持たない。しかし、2つ以上の脳波時系列が観測され、その発生構造に因果関係が存在するとして、その生成モデルを同定することができれば、コヒーレンスに情報の流れを持たせることが可能となる。この考えに基づきコヒーレンスに情報の流れを持たせたものを有向コヒーレンスとして定義する。

例として測定部位数が x, y, z の3個所の場合について考える。生成モデルとしては式 (1) のような自己回帰 (AR) モデルを用いる。

$$\begin{pmatrix} x_n \\ y_n \\ z_n \end{pmatrix} = \sum_{m=1}^{M} \begin{pmatrix} \alpha_{xx}^m & \alpha_{xy}^m & \alpha_{xz}^m \\ \alpha_{yx}^m & \alpha_{yy}^m & \alpha_{yz}^m \\ \alpha_{zx}^m & \alpha_{zy}^m & \alpha_{zz}^m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{n-m} \\ y_{n-m} \\ z_{n-m} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_{xx} & 0 & 0 & b_{xs} \\ 0 & b_{yy} & 0 & b_{ys} \\ 0 & 0 & b_{zz} & b_{zs} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w_{x_n} \\ w_{y_n} \\ w_{z_n} \\ w_{s_n} \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここで w_x,w_y,w_z,w_s はともに平均値0で分散が1の互いに独立な白色雑音である。w_x, w_y, w_z はそれぞれ時系列 x, y, z の信号源であり、w_s は x,y,z に共通の信号源である。また a は AR 係数、b は予測残差である。

ここで、信号源と観測値とのコヒーレンスを考えることにより時系列 x, y, z 間に有向コヒーレンス $\gamma(f)$ が定義でき、例えば、xy 間で x から y および x から z へ流出する有向コヒーレンスは次のように表される。

$(x \to y)$

$$\gamma_{yx} = \frac{P_y w_x(f)}{\sqrt{P_y(f) \cdot P_{W_x}(f)}} = \frac{b_{xx} \cdot A_{yx}(f)}{\sqrt{P_y(f)}} \quad (2)$$

$(x \to z)$

$$\gamma_{zx} = \frac{P_z w_x(f)}{\sqrt{P_z(f) \cdot P_{W_x}(f)}} = \frac{b_{xx} \cdot A_{zx}(f)}{\sqrt{P_z(f)}} \quad (3)$$

但し、$P(f)$: パワースペクトル、$A(f)$:AR 係数のフーリエ変換値とする。

3 2次元相関図

頭皮上の多数の測定部位について、ある部位 (基準点 x) はある周波数帯において他の部位 (対象点 y) と相関がどの程度あるかを示すため、2次元相関図を考える。

ある1つの部位を基準点としその他の点 (対象点) に流出する方向を考えた場合、有向コヒーレンスは基準点における信号源 w_x のパワースペクトルに対する対象点 y への分配率と考えられる。

したがって有向コヒーレンス $\gamma_{yx}(f)$ について α 波周波数帯の振幅を頭皮上にマッピングすることで脳内の情報の流れを可視化することにつながる。

4 処理結果

4.1 模擬系列の解析

有向コヒーレンスの有用性を調べるため、人工的に生成した時系列の解析を行う。ここでは図1のモデルにより発生させた時系列の解析結果を示す。

信号源 $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ は AR モデルで発生させたそれぞれ中心周波数 $10Hz$, $11Hz$, $12Hz$ の疑似脳波信号で, 信号源 N_x, N_y, N_z は白色雑音である。それぞれは互いに無相関である。サンプリング周波数は $200Hz$ とした。また、a は伝達係数であり、D は遅延時間である。

図1は、$10Hz$ 付近の ε_x 成分は x から y, z に伝達され、同様に $11Hz$ 付近の ε_y は y から x, z に、$12Hz$ 付近の ε_z は z から x, y に伝達されるようなモデルである。

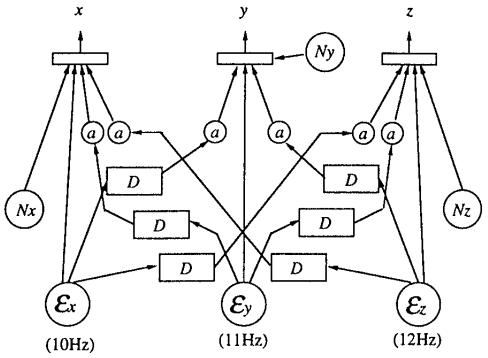


図 1: 模擬系列の発生モデル

図2はモデルの係数を $a = 0.5$, $D = 20msec$ に設定したときの解析結果で、$x-y$ 間の有向コヒーレンス値を示したものである。データのサンプル数は x, y, z 共に $4096points$(約 $20sec$ に相当) であり、AR モデルの次数は 25 次とした。

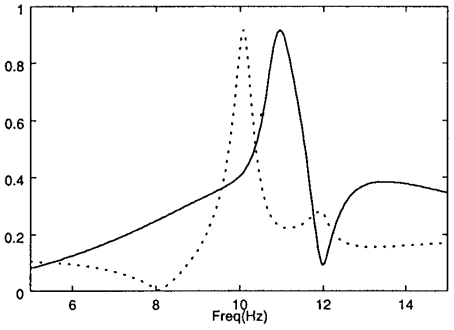


図 2: x-y 間

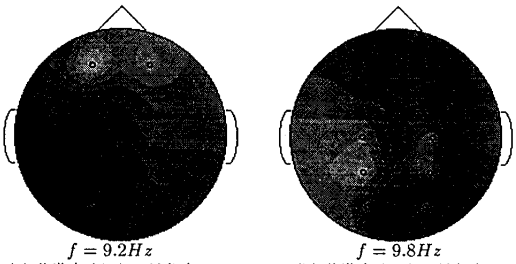
図2より有向コヒーレンス γ_{yx} は $10Hz$ 付近でピークを示し、有向コヒーレンス γ_{xy} は $11Hz$ 付近でピークを示すことがわかる。これは有向コヒーレンスにより、時系列 x, y の間の信号伝達方向が正しく解析できることがわかる。

4.2 実脳波データの解析

使用したデータは脳器質障害を持つ成人女性（40 歳前後）を用いた。この脳器質障害とは左側頭部 AVM 手術による左側視放線切断されているために生じているものである。測定条件は チャンネル数 8、標本化周波数 $200Hz$, 閉眼安静の状態である。解析データ長は $16384points$(約 $80sec$) である。

2 次元相関図として表示した結果を図 3に示す。(この解析では AR の次数は 35 次とした。)

図 3の (a) に示す O_1(左後頭) から流出方向の有向コヒーレンスは、ピーク周波数として $9.2Hz$ をとり、C_3(左頭頂) で最高値をとる。左後頭部からの Fp_1 などの他の部位への情報の流れは少ない。これに対し (b) に示す O_2 (右後頭) からの流出方向の有向コヒーレンスのピーク周波数は $9.8Hz$ で最高部位は Fp_2 である。これは前頭との相関が高いことを示している。このように左右差がありこの違いが手術の影響を特徴づける結果となっている。



$f = 9.2Hz$
(a) 基準点 (O_1) →対象点の相関分布

$f = 9.8Hz$
(b) 基準点 (O_2) →対象点の相関分布

図 3: 患者の処理結果

この他正常者について前頭と後頭を基準として流出方向の分布を調べた結果、α 波の発生と伝搬の機構を示唆する結果が得られた。

5 まとめ

2 系列間の有向コヒーレンスを多系列間に拡張した多次元有向コヒーレンス解析法を提案した。

多次元有向コヒーレンス解析法の有用性を確認するために、疑似脳波信号を用いた解析を行なった。その結果、有向コヒーレンスにより時系列間の相関関係が因果性も含めて、適切に評価できることが示された。

また、この多次元有向コヒーレンス解析法を用いて、実際の脳波データの解析を行なった。障害を持つ患者の脳波の解析から障害部位と相関がある結果が得られた。また、正常者についての解析結果から α 波の発生と伝搬の様子を得ることができた。

今後の課題として、臨床応用への可能性を検討するために疾患と相関図パターンとの関係を導き出すことを考え、そのために多数のデータによる解析を行なうことがあげられる。

参考文献

[1] 椎名, 斎藤, '脳波の頭皮上相関図による因果性解析', 日本ＭＥ学会 「生体環境の時系列情報解析研究会」 研究報告集, Vol.1, No.6, pp74-77, 1990

[2] 今西, 椎名, 斎藤, '多チャンネル有向コヒーレンスによる脳波の因果性解析', 日本ＭＥ学会大会論文集, Vol.34,pp271,1996