

振幅変動状況下における非因果的平滑化を導入した 適応ノイズキャンセラによる交流雑音除去

長谷川 雅之

指導教員：戸田 尚宏

1 はじめに

適応フィルタを用いて、生体電気信号中に混入する交流雑音を除去する場合に生ずる自己除去成分(生体信号自身を除去しようとするアルゴリズムの応答)の対処法として、測定対象(所要信号)である生体電気信号がパルス状である場合には、その信号が持続する期間、適応フィルタの係数の更新を行わないマスク処理 [1] が提案されている。しかし、所要信号がパルス状信号のような一過性ではなく持続的な信号の際にはマスク処理は適応性を確保できず用いることができない。こうしたことから村松 [2] は高周波刺激に対する ERG 記録の場合について、所要信号の変動が適応フィルタ係数の推定に及ぼす影響を調べ、適応フィルタの係数が、最適値の近傍で細かく振動していることを見出した。そこで図 1 に示したように適応フィルタ係数に対して適切な平滑化を施すことで自己除去成分を減少させられることを明らかにした。

村松はさらに平滑化フィルタの最適化に関しても検討を行い、一次低域通過フィルタを数段縦続接続したものが最適であるとする結果を得ている。しかしながら、この結果は混入する交流雑音が定常な場合での検討によるものであり、交流雑音の振幅や周波数が変動する非定常な実際の状況下で係数平滑化が有効であるか否かに関しては不明であった。

そこで本研究では、正弦波状、及びランダム状に振幅変動する交流雑音が混入する状況での因果的な係数平滑化(以下従来法)は適応フィルタ係数の追従に遅延を発生させてしまい有効でない事を示す。そして、ある程度の遅延(オフライン処理)が許される検査の特性を利用し、非因果的な係数平滑化フィルタにより問題が解決できる事を示し、これを用いた新たな手法を提案する。

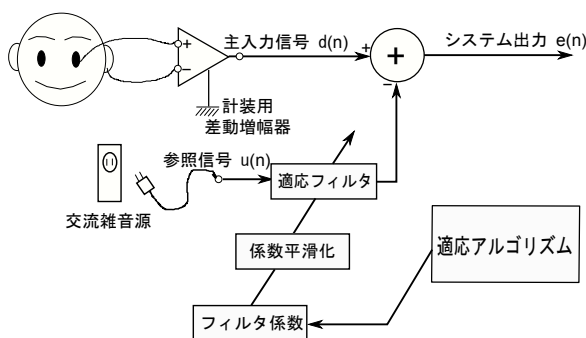


図1 適応フィルタ係数平滑化による交流雑音除去

2 交流雑音の非定常性の要因

測定中被験者に取り付けられているケーブルが振り子のように揺れることによって商用交流雑音源との距離が正弦波的に変わるため、測定対象信号に混入する交流雑音の振幅や位相は周期的に変動する。また、術者やカーテンのような不規則に動く物体が被験者の近くにある場合においては、測定対象信号に混入する交流雑音の振幅や位相がランダムに変動する。

この状況は図 2 に示したように参照信号からの所要信号 $s(n)$ への混入経路の伝達関数 $A(z)$ が変動していることに相当する。

そこで本研究では非定常性として $A(z)$ の振幅が変動する場合について検討する。交流雑音の周波数自体が変動する場合については草間 [3] が検討している。

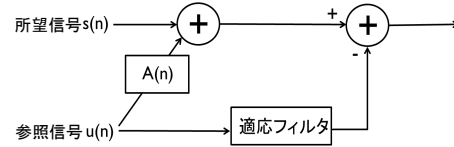


図2 交流雑音の振幅変動の概略

振幅の変動としては正弦波状またはランダムに変化する場合を想定する。

3 従来法の問題

従来法における係数の平滑化には、パラメータ λ を持つ 1 次ローパスフィルタを多段に接続したものが使われる。この λ と適応フィルタの忘却係数 ζ を同一として、0.99 から 1.0×10^{-5} 刻みで 0.99999 まで全探索し、各多段化次数において最適値とその誤差を探索し比較する(図 3, 図 4)。図中の各(ア)は通常の適応フィルタを用いた非定常性を持つ交流雑音除去時の二乗誤差である。(イ)～(カ)はそれぞれ、因果的平滑化フィルタ次数を 1 次, 2 次, ..., 5 次としたものでありフィルタパラメータを変化させる事によって得られる二乗誤差である。非定常性を持たない信号に対してはこの平滑化によって真の生体信号との誤差の最小値が減少し、有効性が確認された [2] が、振幅変動がある場合には、平滑化フィルタ次数、平滑化フィルタパラメータをいくら変化させても誤差の最小値が、平滑化を用いない場合と比べて減少しない。これは変動が正弦波状・ランダム状いずれの場合でも同様である。雑音源として、非定常性を持つ信号が加わる場合での因果的な平滑化フィルタを用いた係数平滑化方式は有効でないことがわかる。

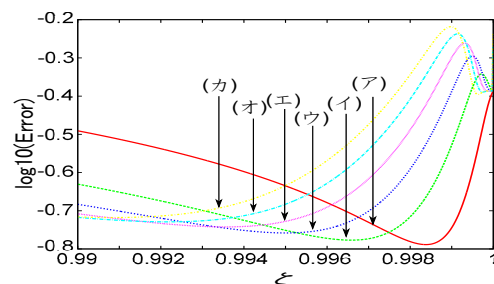


図3 正弦波状の振幅変動

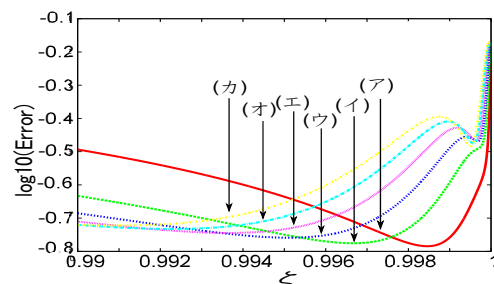


図4 ランダムな振幅変動

4 自己除去成分と非定常性

図 5, 図 6 の (ア), (イ), (ウ) は, 正弦波状, 及びランダムな振幅変動のある交流雑音における真のフィルタ係数, 通常の適応フィルタによる交流雑音除去時のフィルタ係数, 及び従来の因果的平滑化法によって平滑化されたフィルタ係数の時間変化の例をそれぞれ示したものである。(イ) の細かい振動は所望信号が与えている影響であり, 交流雑音の周波数成分を持っているために適応アルゴリズムが所望信号自体を部分的に除去してしまう成分 [1](自己除去成分) を発生させる。一方, 非定常性の影響によりフィルタ係数の正弦波状の振動が確認できる。従来の因果的ローパスフィルタを用いた平滑化方式では, フィルタの追従に遅れが生じるため (ウ) のように位相がずれてしまい, 誤差の低減に限界がある。

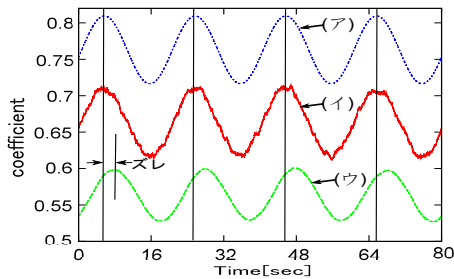


図 5 正弦波状の振幅変動

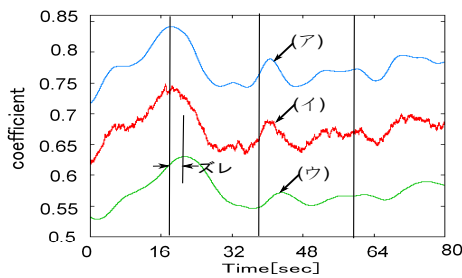


図 6 ランダムな振幅変動

5 提案手法の導入

本研究では電話や実況放送通信等のオンラインでの信号測定ではなく, 測定の遅れがある程度許されるという医療検査の特性 (オフライン処理が使える状況) を積極的に利用する。すなわち, 非因果的平滑化フィルタを導入することにより, メモリ上に保存した適応フィルタ係数に対して平滑化を施すことで追従を向上させることが可能になると考えられる。図 7 はその概略を示したものである。平滑化フィルタ係数を w' 適応フィルタ係数を w , データ点を n とした。

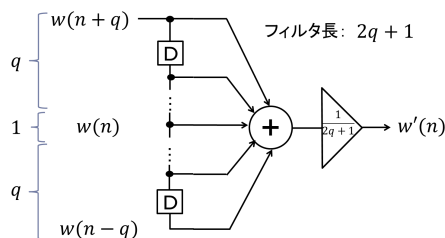


図 7 非因果的フィルタ

これにより求めた平滑化フィルタ係数系列 $w'(n)$ と主入力信号 $d(n)$, 参照信号 $u(n)$ によりシステム出力は

$$e(n) = d(n) - \sum_{k=0}^M w'(k)u(n-k) \quad (1)$$

として求められる。今二乗誤差を, $Error = \sqrt{\sum_{n=0}^{N-1} (s(n) - e(n))^2} / \sqrt{\sum_{n=0}^{N-1} s^2(n)}$ で定義する。正弦波状に振幅変動する交流雑音除去時, 忘却係数 $\zeta=0.998878$ で二乗誤差の最小値 $\log_{10}(Error) = -0.84465582$ となった。これに対して, 提案手法を用いた除去後の出力信号との二乗誤差を横軸をフィルタ長とし, 図 8(a) に示す。提案手法を用いた結果では平滑化点数 6079 点において誤差の最小値が $\log_{10}(Error) = -0.95793633$ となった。同様に, ランダムに振幅変動する交流雑音除去時, 忘却係数 $\zeta=0.9976752$ で二乗誤差の最小値 $\log_{10}(Error) = -0.7923510$ となった。提案手法を用いた結果では平滑化点数 3101 点において誤差の最小値が $\log_{10}(Error) = -0.95618724$ となった。

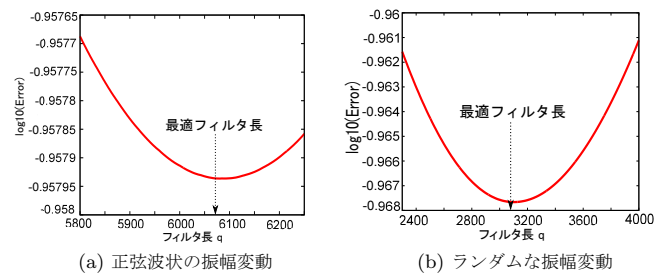


図 8 フィルタ長による誤差の推移

また, これらの結果を因果的な平滑化フィルタと通常の適応フィルタ適用時との二乗誤差結果と比較して示す。図から明らかな誤差の低減が確認でき, 提案手法が有効であることが確認できる。

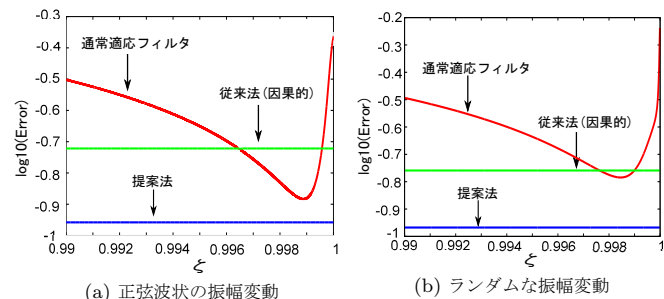


図 9 フィルタ長による誤差の推移

6 まとめ

振幅変動する交流雑音に加わる状況下においても, 非因果的フィルタを導入することにより自己除去成分の影響を減少させることができ, 雑音除去性能の精度向上に繋がることを確認した。

参考文献

- [1] 戸田尚宏: “パルス状信号に混入する交流雑音の適応フィルタによる除去法とそのフラッシュ光網膜電位図への適用”, 愛知県立大学, 電子情報通信学会論文誌 D Vol.J94-D No.10 pp.1685-1695, 2011.
- [2] 村松慎也: “ERG フリッカー検査における適応フィルタ係数平滑化による交流雑音除去” ME とバイオサイバネティクス研究会 (MBE), 2013-3, pp.47-50
- [3] 草間康平: “周波数変動状況下における適応交流ノイズキャンセラのスペクトルに現れる特徴”, 愛知県立大学大学院情報科学研究科修士論文, 2014