

生体電気信号中の交流雑音除去における適応フィルタ係数の平滑化に関する研究

深見 祐太 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(所望信号)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、所望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] は高頻度刺激に対する ERG 記録の場合について、所望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ついても検討を行い、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、実際の測定状況下では交流雑音の振幅や周波数は定常ではなく変動している。このことから草間 [3] は周波数が、長谷川 [4] は振幅が変動する非定常な交流雑音に対して係数平滑化のフィルタ係数に対する影響を調査し、真のフィルタ係数に対して推定したフィルタ係数に位相のズレが発生していることを指摘した。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、未来の値を用いることで位相のズレが発生しない移動平均を用いて新たな平滑化方式を提案し、非定常条件下における平滑化が抱える問題を解消した。

ところが、この平滑化方式は FIR フィルタで構成されているために計算コストがかかるという問題点を抱えている。

そこで本研究では、周波数変動する非定常な交流雑音が混入する状況での移動平均による平滑化方式(以下従来法)のフィルタ長に起因する計算コストの問題を指摘する。そして、オフライン処理の特性を利用し、データ遅延点数を設けて IIR フィルタで構成することで問題を解決する新たな手法を提案する。

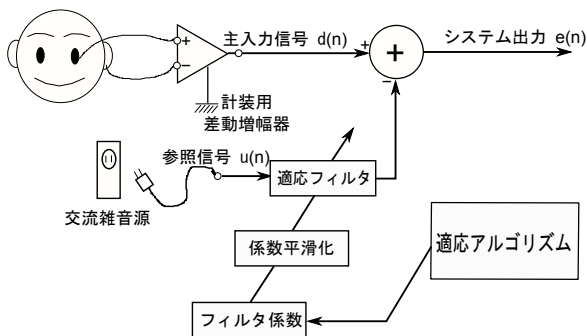


図 1 適応フィルタ係数平滑化による交流雑音除去

2 従来法と最適フィルタ長

図 2 は従来法で用いられたフィルタの構造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。従来法における平滑化には、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未来の適応フィルタ係数 $w(n+1), \dots, w(n+q)$ を用いた平滑化を施すことで位相の遅延を発生させず真のフィルタ係数への追従を可能にした。

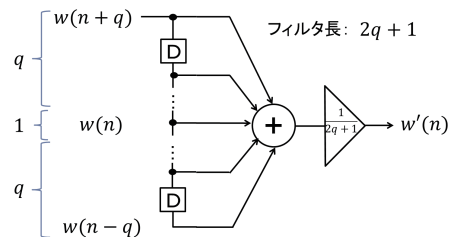


図 2 移動平均を用いた非因果的係数平滑化フィルタ(従来法)

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 $e(n)$ は

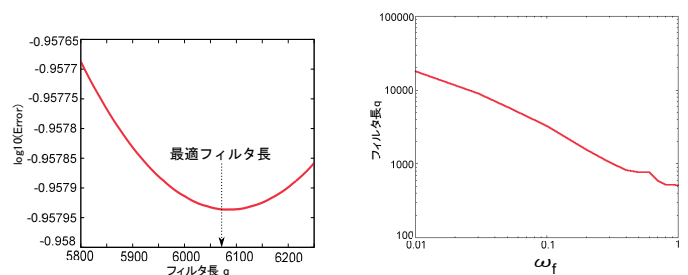
$$e(n) = d(n) - \sum_{k=0}^M w'(k)u(n-k) \quad (1)$$

として求められる。

ここで真である所望信号 $s(n)$ との二乗誤差 $Error$ を、

$$Error = \sqrt{\sum_{n=0}^{N-1} (s(n) - e(n))^2} / \sqrt{\sum_{n=0}^{N-1} s^2(n)} \quad (2)$$

で定義する。図 3(a) は正弦波状に振幅変動をする交流雑音が加わる状況下において、従来法を用いて雑音除去処理した結果であり、フィルタ長 q に対する $Error$ を示している。また、図 3(b) は横軸に正弦波状に振幅変動する周期 ω_f 、縦軸にそのときの最適フィルタ長として、非定常性の大きさと最適フィルタ長の関係を示したものである。このように、 $Error$ を最小化するような最適なフィルタ長が存在し、非定常性が小さくなるにつれて最適なフィルタ長は大きくなることが明らかとされている。



(a) フィルタ長による二乗誤差の推移 (b) 非定常性の大きさによる最適フィルタ長の推移

図 3 最適フィルタ長

3 従来法の問題

図 4 は縦軸を雑音除去システムに入力が入ってから出力されるまでの計算時間、横軸をフィルタ長としてフィルタ長による計算時間の大きさの推移を表したグラフである。フィルタ長の大きさに比例して計算時間が増加していることがわかる。特に非定常性が小さいときにはより多くのフィルタ長を必要とするため非常に時間がかかる。

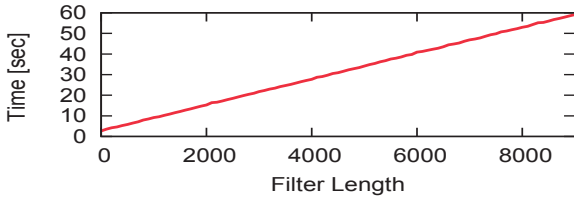


図 4 フィルタ長と計算時間

4 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)を従来法同様に積極的に利用する。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 i 段多段化した IIR で構成された平滑化を施し、それに伴う位相の遅延を考慮した上でデータ遅延点数を設ける(つまり、平滑化による位相の遅延点数を q とすると現在のフィルタ係数 $w(n)=w'(n+q)$ とする)ことで追従させることが可能になると考えられる。図 5 はその概略を示したものである。

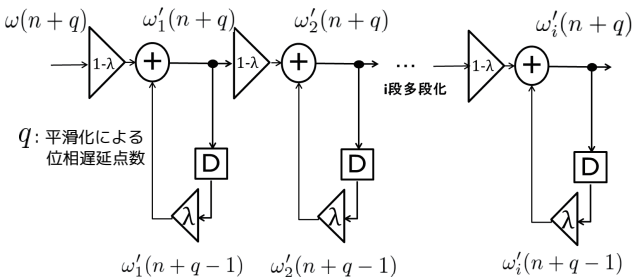


図 5 データ遅延点数を用いた非因果的係数平滑化フィルタ

5 提案手法のパラメータ最適化

平滑化と適応フィルタに用いている忘却係数を ζ として統一し、全探索により非因果的な係数平滑化の精度評価(式(2))を行い、多段化次数、忘却係数 ζ 、データ遅延点数のそれぞれが最適なものを探索する。

まず、各多段化次数においてパラメータ ζ を 0.99 から

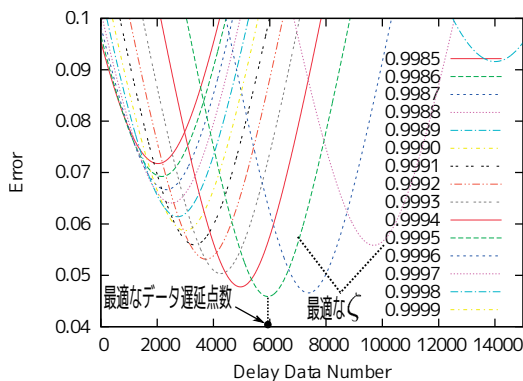


図 6 パラメータの最適化

1.0×10^{-4} 刻みで 0.9999 まで増やしていき、各 ζ においてデータ遅延点数を 0 から 3.0×10^4 点まで 10 点刻みで増やして最適なデータ遅延点数を探索する。図 6 は 2 次の多段化した際の縦軸 $Error$ 、横軸をデータ遅延点数とし各 ζ における $Error$ の推移を示したものである。ここから多段化次数、忘却係数 ζ 、遅延データ点数のそれぞれが最適となった $Error$ をプロットしていき多段化することにより $Error$ が減少していくことを示したのが図 7 である。提案手法の IIR フィルタにより得られた最適パラメータでのインパルス応答を FIR フィルタの係数に設定し、同程度の精度 ($Error$ 差が 0.1 % 以内) に落ち着くまでに必要なフィルタ次数を用いて計算させ比較した結果が表 1 である。

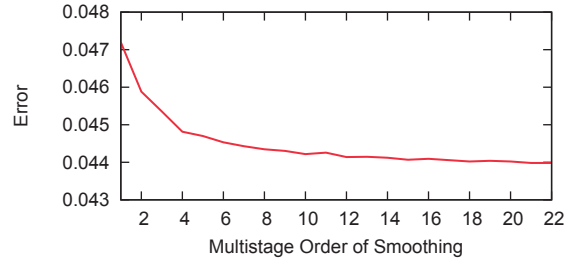


図 7 多段化次数による誤差の推移

表 1 IIR と FIR の計算時間の比較

多段化次数	IIR の計算時間 [sec]	FIR の計算時間 [sec]
1	2.710	163.666
2	2.740	166.811
3	2.785	198.412
4	2.804	189.037
5	2.816	181.323
6	2.854	199.988
7	2.866	190.599
8	2.916	206.689

6 まとめ

周波数変動する交流雑音に加わる状況下においても、IIR フィルタで多段化した非因果的平滑化を導入することにより誤差を低減することができ、多段化することで誤差の減少を確認した。また、従来法に比べ計算コストが約 60 分の 1 以下に抑えられ、より実用的な雑音除去に繋がることが期待できる。

参考文献

- 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”，電子情報通信学会論文誌 D Vol.J94-D No.10 pp.1685-1695 ,2011.
- 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,pp47-50
- 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
- 長谷川雅之：“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”