

LMS アルゴリズムを用いた適応ノイズキャンセラにおける係数平滑化

情報科学研究科 新家 上翔

指導教員：戸田 尚宏

1 研究背景と目的

脳波等の微小な生体電気信号には、商用交流電源由来の交流雑音が多く混入しており、大きな障害となっている。これに対して、適応フィルタによる適応ノイズキャンセラが実用化されている [1]。しかし見かけ上の相関によって交流雑音除去に悪影響を及ぼす自己除去成分によってフィルタ係数が振動する [1]。先行研究 [2] により平滑化する方法は提案されているが、Wiener-Hopf 方程式の求解によるアルゴリズムでのみ行われてきた。平滑化の応用範囲を空間静音化などへ広げるために、本研究では LMS アルゴリズム [3][4] を用いて、ニューラルネットワークの学習で用いられる慣性項の導入を試みる。通常の LMS アルゴリズムでは、ステップサイズ μ を小さくすると自己除去成分の発生は抑えられるが、追従が遅くなってしまふ。そこで 慣性項を導入することで、自己除去成分を抑え、追従を速くさせることを目的とする。平滑化の具体方策として、通常の LMS アルゴリズムに、過去の係数更新ベクトル成分 (慣性項) を加える方法を提案する。慣性項は一次点過去のみの検証をふまえ、さらに高次の過去の値による慣性項導入も検討する。

2 LMS アルゴリズムへの慣性項導入

フィルタ係数 h_k の LMS アルゴリズムによる更新式は

$$h_i(k+1) = h_i(k) + \mu u(k-i)e(k) \quad (i = 0, 1, \dots, q-1) \quad (1)$$

で表される。ここで、 k は時刻、 μ はステップサイズパラメータ、 $u(k-i)$ はフィルタ入力、 $e(k)$ はシステム出力である。これに対し本研究では、慣性項の導入を考える。システム出力 $e(k) = d(k) - \sum_{i=0}^{M-1} h_i(k)u(k-i)$ とし、式を以下のように定める。

$$g(k) = \mu e(k)u(k-i) + \alpha g(k-1) \quad (2)$$

$$h_i(k+1) = h_i(k) + g(k) \quad (3)$$

M は高調波の数、右辺第 2 項 $\alpha g(k-1)$ が一次点前の修正量であり、これが慣性項である。 α は $|\alpha| < 1$ とする慣性係数である。

3 数値実験

数値実験においては、参照信号を

$$u(k) = \sum_{k=0}^M \sin(2\pi f \frac{k}{f_s}) \quad (4)$$

とする。ここで、 M は正弦波 (高調波) の数、 f は基本周波数、 f_s はサンプリング周波数。また位相と振幅が変化した交流雑音は

$$n_{ac}(k) = \sum_{k=0}^M A_k \sin(2\pi f \frac{k}{f_s} + \frac{\phi_k}{180} \pi) \quad (5)$$

A_k は振幅、 ϕ_k は位相である。さらにこの交流雑音に振幅変動が加わっていると想定し、測定信号を以下のようにする。

$$d(k) = s(k) + \left(1 + amp \times \sin\left(2\pi \frac{f_f}{f_s} k\right)\right) n_{ac}(k) \quad (6)$$

f_f と amp は、振幅変動の周波数と振動で、大きいほど変動も大きくなる。 $s(k)$ は平均 0、標準偏差 1 の正規白色雑音である。

数値実験では、 $M=4$, $f=60\text{Hz}$, $f_s=660\text{Hz}$, $amp = 0.3$ と、 f_f を変化させ、慣性項を導入していない LMS アルゴリズム (従来法) と、慣性項を導入している LMS アルゴリズム (提案法) の平均二乗誤差を比べた。平均二乗誤差 err は

$$err = \frac{1}{N-n} \sum_{k=n}^N (s(k) - e(k))^2 \quad (7)$$

とする。提案法、従来法いずれにおいても、 μ, α を $(0 \leq \mu \leq 50)$, 0.00001 刻み、 $(-0.99 \leq \alpha \leq -0.99)$, 0.01 刻みの範囲で探索し、最小となった err の値で比較する。

3.1 提案法におけるフィルタ係数の推移

慣性項における追従性能を確かめるために、 $amp = 0.3$, $f_f = 0.2$ 固定し、フィルタ係数の推移を比較した。

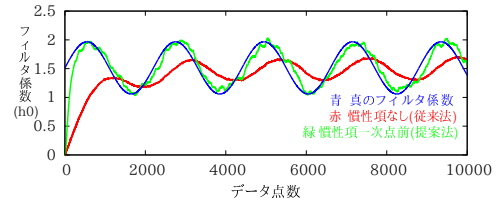


図 1 フィルタ係数の推移

図 1 に示したように、提案法は真のフィルタ係数をよく追従していることがわかる。また、図 2 では提案法と同程度の追従を示す従来法による係数の推移も重ねて示している。

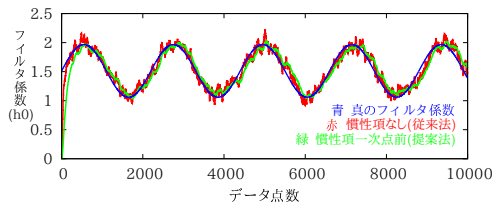


図 2 フィルタ係数の推移

図 2 の結果から提案法は、自己除去成分による振動を従来法より抑え、追従を速くする性能があるとわかる。

3.2 誤差比較

平均二乗誤差を使用し、変動の周波数 f_f を変化させ誤差を比較したものを図 3 に示す。

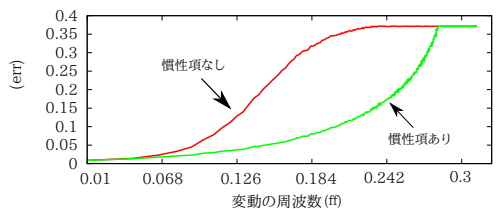


図 3 慣性項有無における二乗誤差

図 3 からわかるように、慣性項を導入した場合のほうが誤差が抑えられている周波数が存在 (0.06~0.25) していることがわかる。

4 高次の過去の慣性項導入

本研究では前節での検証をふまえ、より高次の過去の慣性項を導入する方式へとアルゴリズムを拡張することで、より複雑な信号に対して、これらの慣性項が機能しているのか確かめる。システム出力を $e(k) = d(k) - \sum_{i=0}^{2M-1} h_i(k)u(k-i)$ とし、式 (8) に示すように二次点前、三次点前の慣性項を考え、誤差の比較も行う。

$$g(k) = \mu e(k)u(k-i) + \alpha g(k-1) + \beta g(k-2) + \gamma g(k-3) \quad (8)$$

$0 \leq \mu \leq 50$, $|\alpha| < 1$, $|\beta| < 1$, $|\gamma| < 1$ を範囲として式 (7) で与えられる err が最小となるように探索し、提案法と従来法を比較する。

5 数値実験

実験条件において、式 (4)(5)(7)、またそれぞれの数値も同様に用いる。3 で述べた一次点過去のみの慣性項の実験では、振幅変動として 1 つの正弦波のみを加えた。二次点前、三次点前における実験条件では、より複雑な信号に適応させる為に、測定信号における振幅変動を以下のような 2 つの正弦波の和信号とした。

$$d(k) = s(k) + \left(1 + \text{amp} \times \left(\sin\left(2\pi \frac{f_f}{f_s} k\right) + \cos\left(2\pi \frac{f_f}{f_s} 1.5k\right) \right) \right) n_{ac}(k) \quad (9)$$

5.1 提案法におけるフィルタ係数の追従性能

より複雑な信号におけるフィルタ係数の推移を示す。 $f_f = 0.2$, $\text{amp} = 0.3$, μ , α , β , γ はそれぞれの最適値において行った。

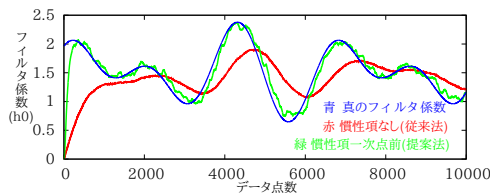


図 4 フィルタ係数の推移 (一次点前重ね合わせ)

図 4 から一次点過去のみの慣性項を加えると、式 (9) のより複雑な信号においても、フィルタ係数の推定値は真値に非常に近く、追従性能が上がっていることがわかる。

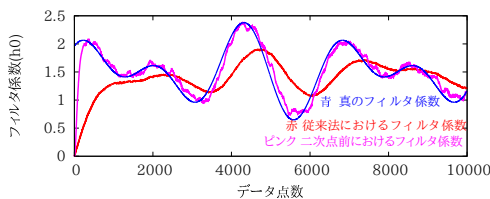


図 5 フィルタ係数の推移 (三次点前重ね合わせ)

図 5 において、二次点、三次点と慣性項を増やすことで、従来法と比べて一次点のみの場合と比べて性能はそれほど変化しな

い。そこで式 (7) の誤差 err による定量的な評価を行う。

5.2 誤差比較

式 (9) の信号を用い、慣性項を増やした場合の誤差を比較する。

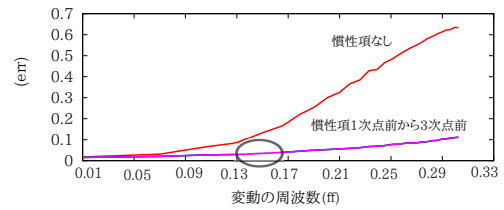


図 6 慣性項増減による誤差比較

従来の慣性項のない場合と比べて、複雑な信号に対しても雑音除去性能は劣化していないことがわかる。しかし一次点前から三次点前のグラフが重なっているため図 6 の ○ 付近を拡大したものを図 7 に示す。

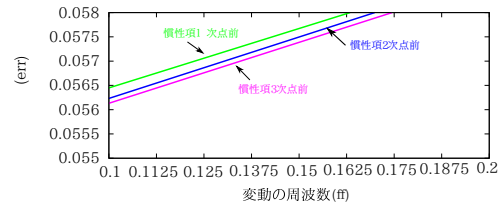


図 7 慣性項増減による誤差比較

慣性項の係数を増やすことで微小ではあるが誤差を小さくできることがわかる。

6 おわりに

LMS アルゴリズムに対して、慣性項を導入することで、大きく変動するフィルタ係数に対して、小さな値のステップサイズでも自己除去成分を抑え、かつ追従ができていくことがわかる。また慣性項は 1 項のみ導入すれば、その効果は大きく、高次の項の導入は不要であることも判った。これらの点は実用上有用である。今後の課題として、LMS アルゴリズムはシステム出力 $e(k)$ からフィルタ係数を決定する為、システム出力のみしか取り出せない場面での、応用を視野にいれ、精度をより高めていきたい。さらに入力の大きさを自動的に調整する NLMS への導入も考えられる。

参考文献

- [1] 戸田尚宏, 信学論 D, Vol.J94-D, No.10, pp.1685-1695, 2011.
- [2] Y. Matsubara Adaptive Cancelling for Frequency-Fluctuating Periodic Interference, IEICE Trans. Inf. & Syst., E100-D, No.2, 2017-2
- [3] B. Widrow J.R. Glover Jr. J.M. McCool J. Kaunitz C.S. Williams R.H. Hearn J.R. Zeidler E. Dong Jr. and R.C. Goodlin, "Adaptive noise cancelling: principles and applications", "Proc.IEEE", "63", pp. "1692-1716" (1975).
- [4] "J.R. Glover Jr.", "Adaptive noise canceling applied to sinusoidal interferences", "IEEE Trans. Acoust., Speech and Signal Process.", "25", "No.6", "484-491", (1977).