

牧野 昭二 (NTT ヒューマンインタフェース研究所)

1. まえがき

筆者らは、音響エコーキャンセラ用適応アルゴリズムとして、人や物の移動によりインパルス応答が変動する場合に、その変動量(インパルス応答の差)がインパルス応答と同じ減衰率で指数減衰することに着目し、ES(Exponentially Weighted Step-Size NLMS)法 [1], ES 射影法 [2], ES-RLS 法 [3] を既に提案した。これらの手法により、収束速度をそれぞれ従来の約2倍にできた。ここでは、これらの適応アルゴリズムおよび従来の適応アルゴリズムの関係について整理する。そして、ES-RLS 法が、NLMS 法、ES-NLMS 法、射影法、ES 射影法を包含する適応アルゴリズムであることを示す。

2. 従来の適応アルゴリズムの分類

音響エコーキャンセラの構成を図1に示す。従来の適応アルゴリズムは、フィルタ係数ベクトル $\hat{\mathbf{h}}(k+1) = [\hat{h}_1(k+1), \hat{h}_2(k+1), \dots, \hat{h}_L(k+1)]^T$ を求めるために、どの程度までさかのぼって過去の入力信号ベクトル $\mathbf{x}(i) = [x(i), x(i-1), \dots, x(i-L+1)]^T$ と出力 $y(i)$ の関係 ($i = 0, \dots, k$) を利用するかという点から分類できる。式(1)は、 $x(k)$ を入力した時、係数 $\hat{\mathbf{h}}(k+1)$ を持つフィルタは正しい出力 $y(k)$ を出力するという関係を表しており、式(2)~(4)についても同様である。

$$\hat{\mathbf{h}}(k+1)^T \mathbf{x}(k) = y(k) \quad (1)$$

$$\hat{\mathbf{h}}(k+1)^T \mathbf{x}(k-1) = y(k-1) \quad (2)$$

...

$$\hat{\mathbf{h}}(k+1)^T \mathbf{x}(k-p+1) = y(k-p+1) \quad (3)$$

...

$$\hat{\mathbf{h}}(k+1)^T \mathbf{x}(0) = y(0) \quad (4)$$

(a) NLMS 法 (学習同定法)

*On the relationship between the ES-RLS (Exponentially Weighted Step-Size RLS) Algorithm and conventional adaptive algorithms.
By Shoji Makino (NTT Human Interface Laboratories)

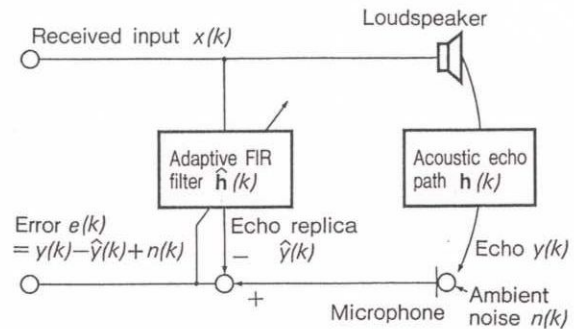


図1 音響エコーキャンセラの構成

式(1)のみを満足するような係数 $\hat{\mathbf{h}}(k+1)$ を求める手法が、NLMS (normalized least-mean-squares) 法 (学習同定法) である [4]。NLMS 法は、安定で演算量が少なく ($2L$ 回の積和演算)、収束速度が入力信号の大きさに依存しない。NLMS 法では、入力信号が音声信号である場合には、白色雑音入力のと看比べて、約5倍程度収束速度が遅くなる [1]。

(b) (アフィン) 射影法

式(1)~(3) ($p < L$) を満足するような係数 $\hat{\mathbf{h}}(k+1)$ を求める手法が、 p 次の (アフィン) 射影法である [5]。射影法では、入力信号は射影の次数に応じて白色化されている。2次の射影法により、NLMS 法に比べて、音声入力に対する収束速度を約2倍に改善することができる [6]。

(c) RLS 法 (逐次最小2乗法)

過去の全入出力関係式(1)~(4)を、最小2乗誤差で近似するような係数 $\hat{\mathbf{h}}(k+1)$ を求める手法が、RLS (recursive least-squares) 法 (逐次最小2乗法) である [7]。RLS 法では、入力信号は完全に白色化されている。そのため、RLS 法は、収束特性が入力信号の性質に依存せず、全ての入力信号に対して白色雑音と同程度の早い収束速度を持つ。一方、RLS 法は演算量が多く、 $O(L^2)$ の積和演算を必要とする。

3. ES-RLS 法

音響エコー経路のインパルス応答の変動特性を

RLS法に反映させたものがES-RLS法である[3]. ES-RLS法では、インパルス応答の変動の期待値を表わすステップサイズ行列 \mathbf{A} (対角行列) を行列 $\mathbf{P}_{ES}(k)$ に加算する.

$$\hat{\mathbf{h}}(k+1) = \hat{\mathbf{h}}(k) + \mathbf{k}(k)e(k) \quad (5)$$

$$\mathbf{k}(k) = \frac{\mathbf{P}_{ES}(k)\mathbf{x}(k)}{1 + \mathbf{x}(k)^T\mathbf{P}_{ES}(k)\mathbf{x}(k)} \quad (6)$$

$$\mathbf{P}_{ES}(k+1) = \mathbf{P}_{ES}(k) - \mathbf{k}(k)\mathbf{x}(k)^T\mathbf{P}_{ES}(k) + \frac{\mathbf{A}}{R} \quad (7)$$

$$e(k) = y(k) - \hat{\mathbf{h}}(k)^T\mathbf{x}(k) + n(k) \quad (8)$$

ただし,

$\mathbf{P}_{ES}(k)$: $L \times L$ 行列,

$\mathbf{A} = \text{diag}[\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_L]$: ステップサイズ行列,

$\alpha_i = \alpha_0\gamma^{i-1}$ ($i = 1, 2, \dots, L$),

γ : 音響エコー経路のインパルス応答の指数減衰率 ($0 < \gamma < 1$),

R : 周囲騒音 $n(k)$ のパワー.

4. 従来の適応アルゴリズムとの関係

$\mathbf{A} = 0$ のときには、ES-RLS法は従来のRLS法

$$\mathbf{k}(k) = \frac{\nu^{-1}\mathbf{P}(k)\mathbf{x}(k)}{1 + \nu^{-1}\mathbf{x}(k)^T\mathbf{P}(k)\mathbf{x}(k)} \quad (9)$$

$$\mathbf{P}(k+1) = \nu^{-1}\mathbf{P}(k) - \nu^{-1}\mathbf{k}(k)\mathbf{x}(k)^T\mathbf{P}(k) \quad (10)$$

において忘却係数 ν を 1 と置いたものとなる.

次に, $c(k)$ を

$$c(k) = \frac{\mathbf{x}(k-1)^T\mathbf{x}(k)}{\mathbf{x}(k-1)^T\mathbf{x}(k-1)} \quad (11)$$

と定義する. さらに $\mathbf{u}(k)$ を

$$\begin{aligned} \mathbf{u}(k) &= \mathbf{x}(k) - c(k)\mathbf{x}(k-1) \\ &= \left[\mathbf{I} - \frac{\mathbf{x}(k-1)\mathbf{x}(k-1)^T}{\mathbf{x}(k-1)^T\mathbf{x}(k-1)} \right] \mathbf{x}(k) \end{aligned} \quad (12)$$

と定義する. ここで, \mathbf{I} は単位行列である. 式(12)の第2項は, $\mathbf{x}(k)$ の $\mathbf{x}(k-1)$ への射影を表している. したがって, $\mathbf{x}(k)$ のうち $\mathbf{x}(k-1)$ と相関のある成分は取り除かれている. その結果, $\mathbf{u}(k)$ は $\mathbf{x}(k-1)$ に直交している. ここで,

$$\mathbf{P}_{ES}(k) = \frac{\mathbf{A}}{R} \left[\mathbf{I} - \frac{\mathbf{x}(k-1)\mathbf{x}(k-1)^T}{\mathbf{x}(k-1)^T\mathbf{x}(k-1)} \right] \quad (13)$$

の場合には, 式(6), (12), (13)を式(5)に代入して,

$$\hat{\mathbf{h}}(k+1) = \hat{\mathbf{h}}(k) + \frac{\mathbf{A}\mathbf{u}(k)}{R + \mathbf{x}(k)^T\mathbf{A}\mathbf{u}(k)}e(k) \quad (14)$$

となる. 式(14)は, 文献[2]で提案した2次のES射影法の修正式において, 定数 μ を 1 とし, 右辺第2項の分母に R を加えたものになる. さらに, $\mathbf{A} = \mathbf{I}$ とすれば, 従来の射影法が得られる.

次に, 射影法の次数が1次の場合には,

$$\mathbf{u}(k) = \mathbf{x}(k) \quad (15)$$

となる. このとき式(14)は,

$$\hat{\mathbf{h}}(k+1) = \hat{\mathbf{h}}(k) + \frac{\mathbf{A}\mathbf{x}(k)}{R + \mathbf{x}(k)^T\mathbf{A}\mathbf{x}(k)}e(k) \quad (16)$$

となる. 式(16)は, 文献[1]で提案したES法の修正式において, 右辺第2項の分母に R を加え, $\|\mathbf{x}(k)\|^2 = \mathbf{x}(k)^T\mathbf{x}(k)$ の代わりに $\mathbf{x}(k)^T\mathbf{A}\mathbf{x}(k)$ を用いた正規化ES-NLMS法[3][8]になる. また, 式(16)は, 式(5), (6)において, $\mathbf{P}_{ES}(k) = \mathbf{A}/R$ と置いても得ることができる. さらに, $\mathbf{A}(k) = \mathbf{I}$ とすれば, 従来のNLMS法が得られる.

5. あとがき

ES-RLS法と従来の適応アルゴリズムの関係について整理した. そして, NLMS法, ES-NLMS法, 射影法およびES射影法は, ES-RLS法を簡略化したものであるともみなすことができることを示した.

参考文献

- [1] S. Makino, Y. Kaneda, and N. Koizumi, *IEEE Trans. SA*, vol. 1, no. 1, pp. 101-108, Jan. 1993.
- [2] S. Makino and Y. Kaneda, *Trans. IEICE Japan*, vol. E75-A, no. 11, pp. 1500-1508, Nov. 1992.
- [3] 牧野, 金田, 音講論集 2-4-19, pp. 547-548 (1992.10).
- [4] 野田, 南雲, 計測と制御, vol. 7, no. 9, pp. 597-605 (1968).
- [5] 尾関, 梅田, 信学論(A), vol. J67-A, no. 2, pp. 126-132 (1984.2).
- [6] 田中, 牧野, 金田, 音講論集 1-4-14, pp. 489-490 (1992.10).
- [7] S. Haykin, "Adaptive Filter Theory," 2nd ed., Prentice-Hall, 1991.
- [8] 丸山, 信学全大, B-557, p. 3-263 (1989.3).