

○ 牧野 昭二 金田 豊 (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、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)は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] と ES 射影法 [2] を既に提案した。一方、収束速度が早いことで知られる適応アルゴリズムとして、RLS(逐次最小2乗)法 [3] がある。しかし、RLS 法において、音響エコー経路のインパルス応答の変動特性は考慮されていない。本報告では、RLS 法の物理的意味付けを与えるカルマンフィルタに立ち返って検討することにより、音響エコー経路の変動特性を反映させた新しい ES-RLS 法を提案する。本手法により、従来の RLS 法に比べて、収束速度を約 2 倍に改善できることを計算機シミュレーションにより確認する。

2. カルマンフィルタと RLS アルゴリズム

音響エコーキャンセラの構成を図 1 に示す。ここで、音響エコー経路の変動を考慮するため、時刻  $k$  から時刻  $k+1$  へ真のインパルス応答が  $\Delta h(k)$  変化し

$$h(k+1) = h(k) + \Delta h(k) \quad (1)$$

と表わされるものとする。この時、カルマンフィルタ [4] を適応フィルタとして用いれば、フィルタ係数ベクトル  $\hat{h}(k)$  の逐次修正式は次のようになる。

$$\hat{h}(k+1) = \hat{h}(k) + k(k)e(k) \quad (2)$$

$$k(k) = \frac{\dot{P}(k)x(k)}{R(k) + x(k)^T \dot{P}(k)x(k)} \quad (3)$$

$$\dot{P}(k+1) = \dot{P}(k) - k(k)x(k)^T \dot{P}(k) + Q(k) \quad (4)$$

$$e(k) = y(k) - \hat{h}(k)^T x(k) + n(k) \quad (5)$$

ただし、 $R(k)$  は近端雑音  $n(k)$  のパワー  $E[n(k)n(k)]$ 、 $Q(k)$  はインパルス応答の変化の共分散行列  $E[\Delta h(k)\Delta h(k)^T]$  を表わす。

現実的には、 $R(k)$  や  $Q(k)$  を知ることは困難である。そこで、

$$Q(k) = (\nu^{-1} - 1)[\dot{P}(k) - k(k)x(k)^T \dot{P}(k)] \quad (6)$$

と仮定し、さらに近端雑音  $n(k)$  の定常性 ( $R(k) \equiv R$ ) を仮定して

$$\dot{P}(k) = \nu^{-1} R \dot{P}(k) \quad (7)$$

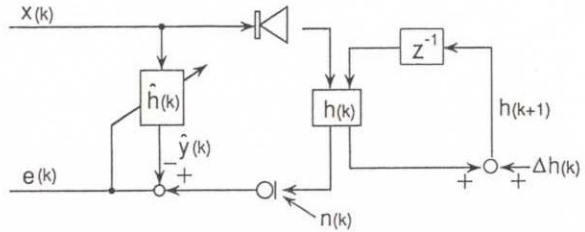


図 1 音響エコーキャンセラの構成

とおけば、RLS(recursive least-squares)法 [3] による  $\hat{h}(k)$  の逐次修正式が (2)(5) 式および次式のように導ける。

$$k(k) = \frac{\nu^{-1} \dot{P}(k)x(k)}{1 + \nu^{-1} x(k)^T \dot{P}(k)x(k)} \quad (8)$$

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

3. ES-RLS アルゴリズム

音響エコー経路のインパルス応答の変動量は、インパルス応答と同じ減衰率で指数減衰する [1]。この性質をカルマンフィルタに反映させるために、(4) 式において、 $Q(k)$  の代わりに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  $A$ (対角行列) を用いることを考える。さらに  $R(k) \equiv R$  を仮定して

$$\dot{P}(k) = R P(k) \quad (10)$$

とおけば (3)(4) 式は

$$k(k) = \frac{P(k)x(k)}{1 + x(k)^T P(k)x(k)} \quad (11)$$

$$P(k+1) = P(k) - k(k)x(k)^T P(k) + A \quad (12)$$

ただし、

$$A = \text{diag}[\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_L]$$

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

$\gamma$ : 音響エコー経路のインパルス応答の指数減衰率

$$(0 < \gamma < 1)$$

となる。(2)(11)(12)(5) 式が今回提案する ES-RLS 法である。(4) 式では、インパルス応答が変化したときのみ  $Q(k)$  が加えられるのに対して、(12) 式では、常時、行列  $A$  が加えられている。また、忘却係数  $\nu$  は使用しない。

$A = 0$  のときには、本手法は従来の RLS 法 ( $\nu = 1$ ) と一致する。一方、

$$P(k+1) = P(k) = A \quad (13)$$

のとき (2)(11) 式は、

$$\hat{h}(k+1) = \hat{h}(k) + \frac{Ax(k)}{1 + x(k)^T Ax(k)} e(k) \quad (14)$$

\*ES-RLS (Exponentially Weighted Step-Size RLS) Algorithm Based on the Statistics of a Room Impulse Response. By Shoji Makino and Yutaka Kaneda (NTT Human Interface Laboratories)

となる。(14)式は、1を加え、 $\mathbf{x}(k)^T \mathbf{x}(k)$ の代わりに $\mathbf{x}(k)^T \mathbf{A} \mathbf{x}(k)$ を用いた正規化ES-NLMS法となる。

#### 4. 計算機シミュレーション

指数減衰するインパルス応答(64タップ)を計算機で作成して、収束特性の計算機シミュレーションを行った。エコー信号には定常エコー消去量 $\approx 30\text{dB}$ となるように近端雑音を加えた。インパルス応答は時刻 $k=1000$ で変化させた。収束曲線は50回の試行の平均値である。

カルマンフィルタを用いた場合のエコー消去量(ERLE)の収束特性を図2に示す。受話入力には白色雑音を用いた。音響エコー経路の変動の時刻と変動の期待値 $Q(k)$ が既知であると仮定するカルマンフィルタでは、定常エコー消去量が大きく、インパルス応答の変化にも素早く追従することが分かる。

平均ステップサイズ

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \alpha_i = \frac{\alpha_0}{L} \frac{1 - \gamma^L}{1 - \gamma} \quad (15)$$

を変化させた場合のエコー消去量(ERLE)の収束特性を図3に示す。受話入力には白色雑音を用いた。 $\bar{\alpha}$ が小さいときには収束速度が遅く、定常エコー消去量が大きいのに対して、 $\bar{\alpha}$ が大きくなるに従い、収束速度が早く、定常エコー消去量が小さくなることが分かる。このように $\bar{\alpha}$ は、収束速度と定常エコー消去量のトレードオフの関係を制御する。

本手法を従来のRLS法と比較した場合のエコー消去量(ERLE)の収束特性を図4に示す。ここでは、定常エコー消去量 $\approx 30\text{dB}$ となるように、RLS法の忘却係数 $\nu=0.9984375$ を設定した。本手法では、従来法と定常エコー消去量が等しくなるように、平均ステップサイズ $\bar{\alpha}$ を設定した。入力信号として白色雑音を用いた場合[図4(a)]には、エコー消去量10dBに達する収束速度はRLS法の約2.6倍、20dBに達する収束速度は約2.2倍になることがわかる。また、入力信号として音声信号を用いた場合[図4(b)]には、エコー消去量10dBに達する収束速度はRLS法の約3.4倍、20dBに達する収束速度は約1.7倍になることがわかる。

#### 5. あとがき

音響エコー経路の変動特性を反映させたES-RLSアルゴリズムを提案した。指数減衰するインパルス応答を用いた計算機シミュレーションを行い、従来のRLSアルゴリズムに比べて、収束速度を約2倍にできることを明らかにした。

#### 参考文献

- [1] S. Makino, Y. Kaneda, ICASSP90, pp.1133-1136 (1990.4).
- [2] 牧野, 金田, 信学全大, SA-7-11, p.1-472 (1992.3).
- [3] S. Haykin, *Adaptive Filter Theory*, 2nd. ed. Prentice-Hall, 1991.
- [4] 片山, *応用カルマンフィルタ*. 朝倉書店, 1989.

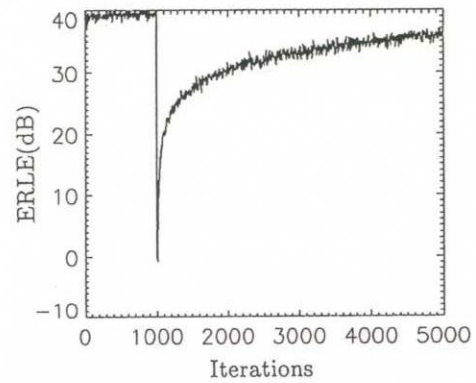


図2 カルマンフィルタの収束特性

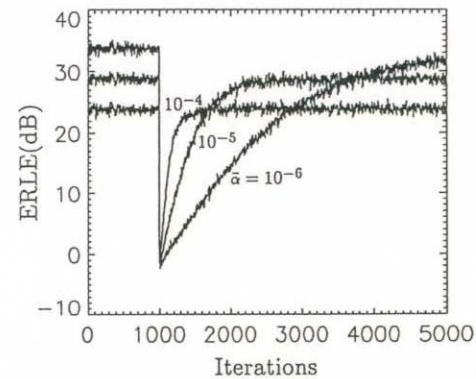
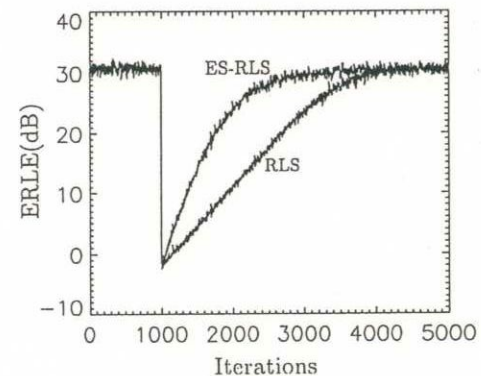
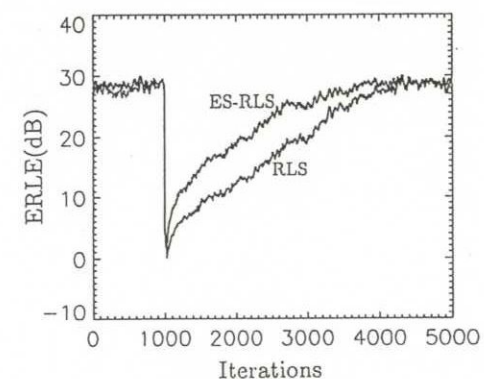


図3 提案手法の収束特性

(平均ステップサイズを変化させた場合)



(a) 白色雑音入力



(b) 音声入力

図4 提案手法と従来のRLS法との収束特性の比較