

# 適応フィルタにおけるブロック形 重み付けステップサイズの制御法

A Method of Controlling Block Weighting Step-Size for Adaptive Filter

堂ヶ平 厚†      平野 晃宏‡      中山 謙二‡  
Atsushi Dougahira      Akihiro Hirano      Kenji Nakayama

†金沢大学大学院 自然科学研究科 電子情報システム専攻  
Graduate School of Nature Science & Technology, Kanazawa Univ.

‡金沢大学 工学部 情報システム工学科  
Dept. of Information and Systems Eng., Faculty of Eng., Kanazawa Univ.  
E-mail: hirano@t.kanazawa-u.ac.jp

## あらまし

適応フィルタにおける指数重み付けステップサイズ (ES) アルゴリズムは FIR 形適応フィルタのフィルタ係数、すなわちインパルス応答の変化量の期待値が最適なインパルス応答と同じ減衰率で指数減衰するという性質に基づいている。しかしインパルス応答は本来は未知であるため、指数減衰の形状を前もって知ることは難しい。[1]

本稿では適応フィルタの勾配法による学習において、ステップサイズをフィルタ係数に対して可変とする方法を対象として、ブロック的に可変とする方法を提案する。また ES アルゴリズムと射影アルゴリズムのそれぞれの利点を生かした ES 射影アルゴリズム [2] がすでに提案されているが、これをもとに射影アルゴリズムにもブロック形重み付けステップサイズを適用し、シミュレーションにより有効性を確認した。時変する室内音響特性に対して、提案方法は SNR において数 dB の改善が得られた。

## Abstract

An exponentially weighted stepsize (ES) algorithm is based on the property, adjustment of FIR adaptive filter coefficients are proportional to the envelop of the optimum impulse response [1]. However, it is difficult to estimate the optimum impulse response in advance. In this paper, a block size ES algorithm is proposed for adaptive filters, trained by a gradient method. Furthermore, this method is applied to an ES projection algorithm [2]. Through computer simulations, the proposed method can improve SNR by several dB.

## 1 まえがき

現代のビジネス社会や私生活において、遠隔会議や TV 電話などの音声伝達システムは必要不可欠なものとなっている。TV 会議などの音声伝達システムにおいて、ハウリングやエコーを防止し自然な通話を実現するために適応フィルタを用いた音響エコーキャンセラが広く使用されている。

現在、エコーキャンセラに適用できる適応アルゴリズムがすでに多く提案されている。その中の ES アルゴリズムでは、インパルス応答の変化量の期待値がインパルス応答と同じ減衰率で指数減衰するという性質に基づいている。しかしインパルス応答は本来は未知であることに加え、何らかの要因で変化した場合に最適な指数減衰の形状を知ることは難しい。[1]

そこで、本稿ではステップサイズをフィルタ係数に対して可変とする方法を対象として、ブロック的に可変とする方法を提案する。また射影アルゴリズム [2] にこのブロック形重み付けステップサイズ制御を適用した方法を検討する。

## 2 音響エコーキャンセラ

音響エコーキャンセラが用いられる例として図 1 のような遠隔会議システムを考える。

Room1 の遠端話者 A から送られた音声が入るマイクを伝わり Room2 に伝わる時、壁の反響などによりエコーが発生する。このエコーがマイクに入ると遠端話者 A は自分が発した音声を少し遅れて聞くことになる。この現象は自分が音声を発しながら自分の音声を聞くことになるので不快に感じられる。このような問題を解決する方

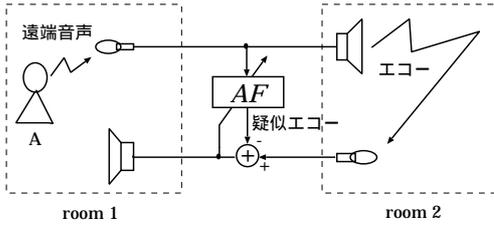


図 1: 遠隔会議システムにおける音響エコーキャンセラ

法の 1 つとして適応フィルタを用いる方法がある。

図 1 のように室内音響 (エコーパス) をシミュレートする適応フィルタ  $AF$  (Adaptive Filter) を挿入することにより、遠端音声を通して疑似エコーを生成し、減算によって実際のエコーを除去することを目的としている。これは適応フィルタによりエコーパス推定が可能であるため実現できる手法である。理想的には適応フィルタの伝達関数がエコーパスの伝達関数と一致すれば、エコーが完全に除去できる。

### 3 従来の適応アルゴリズム

#### 3.1 係数更新アルゴリズム

適応アルゴリズムでは、図 2 のような回路を用いてフィルタの係数ベクトルを指定した初期値から出発して、望みの応答と信号ベクトルの新しいサンプル値を受け取る時刻ごとに更新していく。この適応は係数ベクトルが最適なウィナー解に十分近づくまで続けられる。以下にいくつかの適応アルゴリズムを示す。

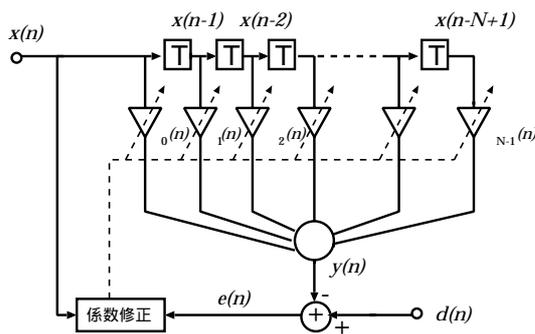


図 2: 適応 FIR フィルタ

#### 3.2 NLMS アルゴリズム

NLMS (Normalized Least Means Square) アルゴリズムではフィルタ係数を次のように更新する。

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) + \mu e(n) \frac{\mathbf{x}(n)}{\mathbf{x}(n)^T \mathbf{x}(n)} \quad (1)$$

ただし

$$\begin{aligned} e(n) &= d(n) - \mathbf{w}^T(n) \mathbf{x}(n) \\ \mathbf{w}(n) &= [w_0(n), w_1(n), \dots, w_{(N-1)}(n)]^T \\ \mathbf{x}(n) &= [x(n-1), x(n-2), \dots, x(n-N+1)]^T \end{aligned}$$

NLMS アルゴリズムは、入力信号を正規化してフィルタ係数を更新するので、信号のレベル変動が大きい場合にフィルタ係数の更新が不安定になるのを防ぐことができる。

#### 3.3 射影アルゴリズム

射影 (Projection) アルゴリズムのフィルタ係数更新式は次のようになる。

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) + \mu [\beta_1(n) \mathbf{x}(n) + \beta_2(n) \mathbf{x}(n-1)] \quad (2)$$

$$\beta_1(n) = \frac{e(n) \phi_{11} - (1 - \mu) e(n-1) \phi_{01}}{\phi_{11} \phi_{00} - \phi_{01}^2}$$

$$\beta_2(n) = \frac{-e(n) \phi_{01} + (1 - \mu) e(n-1) \phi_{00}}{\phi_{11} \phi_{00} - \phi_{01}^2}$$

$$\phi_{ij} = \mathbf{x}(n-i)^T \mathbf{x}(n-j) \quad (i = 0, 1, j = 0, 1)$$

射影アルゴリズムでは隣り合う入力信号ベクトルの相関を取り除いている。そのため音声のような有色信号に対しても効果的にフィルタ係数を更新できる。

#### 3.4 ES アルゴリズム

ES (Exponentially Step-Size) アルゴリズムのフィルタ係数の更新式を示す。

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) + \mathbf{A} \frac{e(n)}{\mathbf{x}(n)^T \mathbf{x}(n)} \mathbf{x}(n) \quad (3)$$

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \alpha_1 & & & 0 \\ & \alpha_2 & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & \alpha_N \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\alpha_i = \alpha_0 \gamma^{i-1} \quad |\gamma| < 1 \quad (i = 1 \dots N) \quad (5)$$

ES アルゴリズムは、インパルス応答の変化量の期待値がインパルス応答と同じ減衰率で指数減衰するという性質に基づいている。ここで指数減衰率  $\gamma$  はあらかじめ使用用途や場所が分かっている場合にはその室内の音響条件やインパルス応答を測定することによって求めることができる。

しかし実際にはあらかじめ指数減衰率  $\gamma$  を知ることは難しい。また ES アルゴリズムでは  $\gamma$  は固定されるので、

前もって室内の $\gamma$ が分かっている場合でも、変化した場合にはその変化に追従できず収束に悪影響を及ぼす可能性がある。

### 3.5 ES 射影アルゴリズム

3.3と3.4で示したアルゴリズムを結合させたものとして、ES 射影 (Exponentially Step-Size Projection) アルゴリズムが既に提案されている [2]。これはインパルス応答の変化量の統計的性質に着目した ES アルゴリズムと、入力信号の白色化に着目した射影アルゴリズムを、それぞれ独立したものとして考え、結合させたものである。更新式を以下に示す。

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) + \mu \mathbf{A}[\beta_1(n)\mathbf{x}(n) + \beta_2(n)\mathbf{x}(n-1)] \quad (6)$$

$$\beta_1(n) = \frac{e(n)\phi_{11} - (1-\mu)e(n-1)\phi_{01}}{\phi_{11}\phi_{00} - \phi_{01}^2}$$

$$\beta_2(n) = \frac{-e(n)\phi_{01} + (1-\mu)e(n-1)\phi_{00}}{\phi_{11}\phi_{00} - \phi_{01}^2}$$

$$\phi_{ij} = \mathbf{x}(n-i)^T \mathbf{A} \mathbf{x}(n-j) \quad (i=0, 1, j=0, 1)$$

## 4 提案アルゴリズム

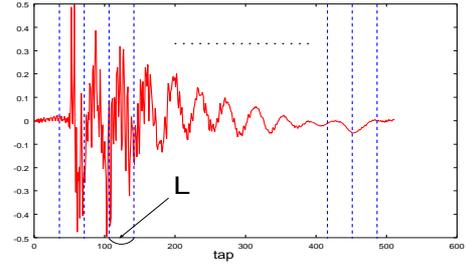
### 4.1 ブロック形重み付けステップサイズ制御

3.4でも述べたように、ES アルゴリズムでは、用いる指数減衰率 $\gamma$ をあらかじめ知ることが難しく、また室内の音響条件が何らかの要因で変化した場合に、その変化に追従することができない。

そのための改善法として $\gamma$ を可変にすることを考える。ES アルゴリズムでは室内のインパルス応答を測定してそこから $\gamma$ を求める。それに対して可変ステップサイズでは、学習中のフィルタ係数を用いることでステップサイズを可変にする。このことによって音響条件の変化にも追従できるようになる。しかしこの場合、フィルタ係数自体の推定がずれた場合に更新が不安定になる可能性がある。そこでステップサイズをブロック的に推定することによって、フィルタ係数の推定がずれた場合でもその影響を最小限にとどめることができる。また、ブロック化することで計算量も低減されるという利点もある。以下に可変ブロックステップサイズの推定方法および制御方法を示す。

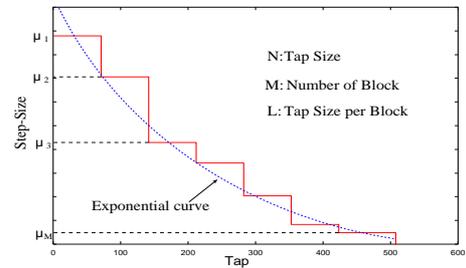
#### 4.1.1 ブロックステップサイズの推定方法

1. 推定したフィルタ係数を  $L$  タップごとのブロックに分けてブロックごとの絶対値和  $S_i$  と全体の和  $\sum_m S_m$  をとる。



2. 第  $i$  ブロックのステップサイズは  $S_i$  により決まるが、全体の平均値が  $\mu_0$  になるように正規化する。これを次式に示す。 $\mu_0$  は収束条件を満たすように決める。

$$\mu_i = \frac{S_i}{\sum_m S_m} M \mu_0 \quad (i = 1, \dots, M) \quad (7)$$



このような操作を何サンプル毎かに行い、逐次的にブロックステップサイズを推定することで、室内の音響特性が変化した場合にも変化に追従してフィルタ係数を更新できる。

#### 4.1.2 ブロックステップサイズの制御法

4.1.1で示した方法でステップサイズを可変としてフィルタ係数を更新した場合の最終的なブロックステップサイズを図3に示す。

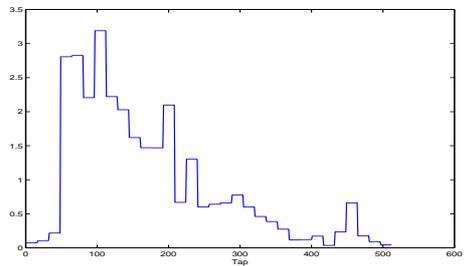


図 3: 学習後のブロックステップサイズ

図3から、フィルタの後半部分でのブロックステップサイズが 0.1 程度の小さな値になっていることが分かる。このことがフィルタ係数の学習に悪影響を与えている可能性があるため、1つの制御方法としてブロックステップサイズに下限 $\mu_L$ を設けることを考える。

制御法 1 ブロックステップサイズ $\mu_i$ がある下限 $\mu_L$ を下まわった場合、ブロック毎の絶対値和  $S_i$  を減らしもう一度 $\mu_i$ を計算する。

制限法 1 では、計算後、ブロックステップサイズを下限 $\mu_L$ を下まわっていないかチェックし、下まわっていた場合にはまた計算し直す手法なので、計算量が増大してしまう恐れがある。そこで制限法 2 を提案する。

制御法 2 ブロックステップサイズ $\mu_i$ がある下限 $\mu_L$ を下まわった場合、 $\mu_i$ を下限 $\mu_L$ とする。

制御法 2 は、制御法 1 を簡易的にしたもので、この場合、平均ステップサイズは $\mu_0$ にはならないがフィルタ係数の学習には影響はほとんどない。図 4からも分かるように、2 つの制御法の違いによる差はほとんど見られない。

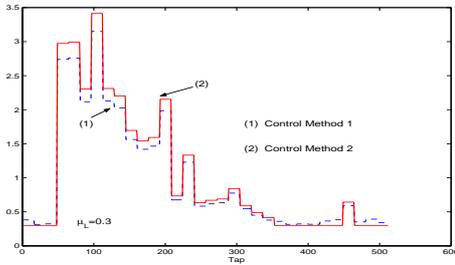


図 4: 制御法 1 と制御法 2 の比較

## 4.2 射影アルゴリズムへの適用

ここでは 4.1 節で述べたブロック形重み付けステップサイズを射影アルゴリズムに適用することを考える。

ブロック形重み付けステップサイズと射影アルゴリズムを結合させる場合、更新式は 3.5 節の式 (6) の ES 射影アルゴリズムと同じ形になる。しかし、ブロック形重み付けステップサイズ制御の方で計算が簡略化される。

4.1.1 節の 2. では、収束条件を満たすためにブロックステップサイズを平均 $\mu_0$ にするために全体にある定数を乗算する計算を行なっている。しかし、射影アルゴリズムに適用する際にはブロックステップサイズは平均化される必要はない。このことを式で示す。

今、 $A$  と比べて  $m$  倍の  $mA$  で更新したとすると式 (6) の右辺第 2 項は

$$\mu(mA)[\beta_1(n)x(n) + \beta_2(n)x(n-1)] \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \beta_1(n) &= \frac{e(n)(m\phi_{11}) - (1-\mu)e(n-1)(m\phi_{01})}{m^2(\phi_{11}\phi_{00} - \phi_{01}^2)} \\ &= \frac{e(n)\phi_{11} - (1-\mu)e(n-1)\phi_{01}}{m(\phi_{11}\phi_{00} - \phi_{01}^2)} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \beta_2(n) &= \frac{-e(n)(m\phi_{01}) + (1-\mu)e(n-1)(m\phi_{00})}{m^2(\phi_{11}\phi_{00} - \phi_{01}^2)} \\ &= \frac{-e(n)\phi_{01} + (1-\mu)e(n-1)\phi_{00}}{m(\phi_{11}\phi_{00} - \phi_{01}^2)} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\phi_{ij} = \mathbf{x}(n-i)^T \mathbf{A} \mathbf{x}(n-j) \quad (i=0, 1, j=0, 1)$$

式 (8)、式 (9)、式 (10) より、分母・分子に  $m$  があるので、打ち消される。したがって、ブロック形重み付けステップサイズと射影アルゴリズムを結合させる場合には、4.1.1 節の 2. で述べたような計算をする必要はない。

## 5 シミュレーション

部屋の音響条件が急激に変化する状態と、常に変化している状態の 2 つの条件でシミュレーションを行った。

入力信号として音声、性能評価には適応フィルタの所望出力信号と出力誤差の SNR を用いた。性能評価の式を式 (11) に示す。

$$\begin{aligned} \text{SNR} &= 10 \log \frac{\sum_{i=0}^M e(n-i)^2}{\sum_{i=0}^M d(n-i)^2} \\ &= 10 \log \frac{\sum_{i=0}^M \{d(n-i) - y(n-i)\}^2}{\sum_{i=0}^M d(n-i)^2} \end{aligned} \quad (11)$$

また図 5 と図 6 に今回のシミュレーションで用いた室内の音響特性、すなわちスピーカからマイクまでの伝達特性のインパルス応答を示す。

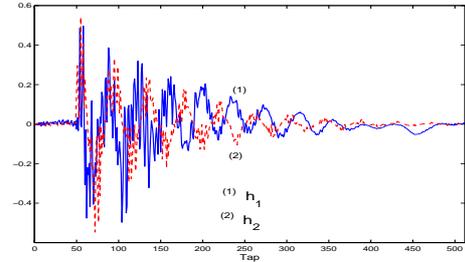


図 5: 2 種類の室内音響特性のインパルス応答

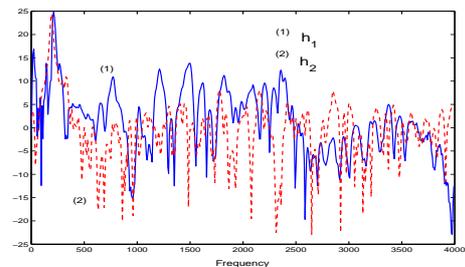


図 6: 室内音響特性の周波数特性

### 5.1 部屋の音響特性が急激に変化する場合

特性として、0~60000 サンプルまでは  $h_1(n)$ 、60001~140000 サンプルまでは  $h_2(n)$ 、140001~200000 サンプルまでは  $h_1(n)$  と変化させた。

また ES 射影アルゴリズムの指数減衰率  $\gamma$  は  $h_1(n)$  に対して理想的な値を用いた。図 7 に提案法と ES 射影アルゴリズムの SNR の比較を示す。また図 8 にステップサイズ行列  $A$  の時間変化、図 9 に 18 万サンプル時点でのステップサイズ行列  $A$  の比較を示す。

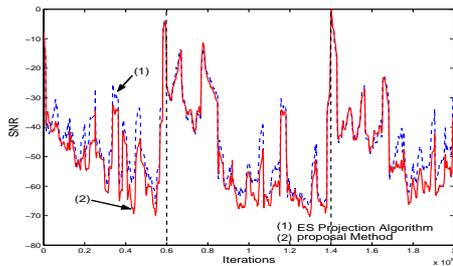


図 7: 提案法と ES 射影アルゴリズムの比較

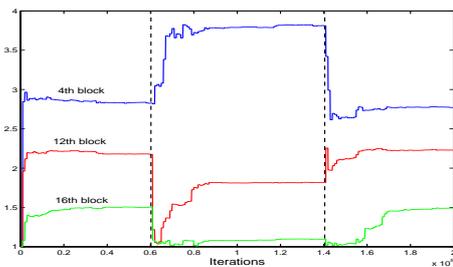


図 8: ステップサイズ行列  $A$  の時間変化

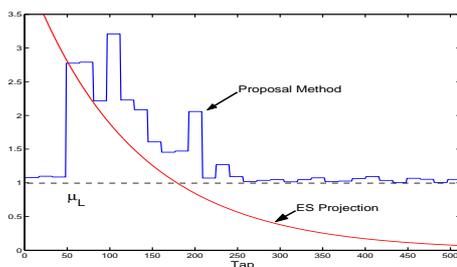


図 9: 18 万サンプル時点でのステップサイズ行列  $A$

図 7 より、提案法が従来の ES 射影アルゴリズムと比較して、 $5dB$  程度特性が良くなっていることが分かる。また図 8 から、特性が変化した場合に、従来法ではステップサイズ行列  $A$  は固定されているが、提案法は変化に追従できていることが確認できる。

### 5.2 音響条件が常に変化している場合

音響条件として、式 (12) で示すような図 5 の 2 つのインパルス応答を周期が約 8 秒で時間的に変化する重みで足し合わせたものを使用した。ES 射影アルゴリズムの指数減衰率  $\gamma$  は  $h_1(n)$  に対して理想的な値を用いた。

$$h(n) = (1 - \sin(2\pi n/N))h_1(n) + \sin(2\pi n/N)h_2(n) \quad (12)$$

$N$  は 8 秒間のサンプル数

図 10 に提案法と ES 射影アルゴリズムの SNR の比較を、また図 11 にステップサイズ行列  $A$  の時間変化を示す。

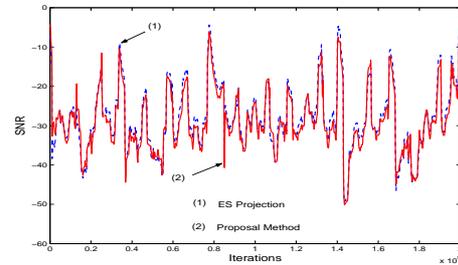


図 10: 提案法と ES 射影アルゴリズムの比較

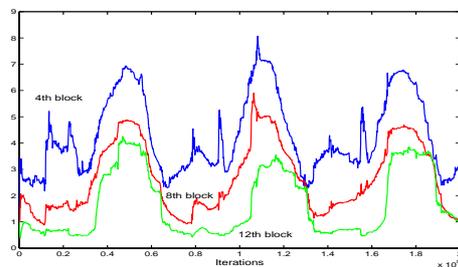


図 11: ステップサイズ行列  $A$  の時間変化

図 10 より、この場合も提案法が従来法に比べて数  $dB$  程度特性が改善されていることがわかる。

## 6 むすび

適応フィルタの勾配法による学習において、ステップサイズをフィルタ係数に対して可変とする方法を提案し、その際にステップサイズをブロック化することで、安定化を計るとともに、計算量を低減させた。

またこのブロック形重み付けステップサイズ制御を射影アルゴリズムに適用し、従来の ES 射影アルゴリズムと比較して、提案法が有効であることを確認した。

## 参考文献

- [1] S.Makino, Y.Kaneda, N.Koizumi, "Exponentially weighted stepsize NLMS adaptive filter based on the statistics of a room impulse response", IEEE Trans. Speech and Audio Processing, vol.1, no.1, pp.101-108, Jan. 1993.
- [2] 牧野 昭二, 金田 豊: "音響エコーキャンセラ用 ES 射影アルゴリズム", 信学技報, pp.41~52, 1992-11.