

◎島内 末廣 牧野 昭二 (NTT ヒューマンインタフェース研究所)

1 はじめに

ステレオ音声による拡声通信システムにおいてエコー、ハウリングの生じない快適な通話環境を提供するために、ステレオ音声用の音響エコーキャンセラの実現が待たれている。そのためには、ステレオ受話信号の相互相関に起因する適応フィルタのエコー経路誤推定、真値への収束速度低下といった問題 [1][2][4][5] の解決が必要となる。本報告では、この問題に対してステレオ受話信号が左右入れ替わって再生された場合の未知の入出力関係を擬似的に利用する新しいアルゴリズムを検討し、計算機シミュレーションによりその効果を確認する。

2 ステレオ音響エコーキャンセラの問題

図 1 のように、2 チャンネルの集音・再生系では、2 個のスピーカと 2 本のマイクロホン間に 4 つのエコー経路 $h_1(k)$, $h_2(k)$, $h_3(k)$, $h_4(k)$ が存在し、それぞれのマイクロホンではエコーとして

$$y_1(k) = h_1^T(k)x_1(k) + h_2^T(k)x_2(k) \quad (1)$$

$$y_2(k) = h_3^T(k)x_1(k) + h_4^T(k)x_2(k) \quad (2)$$

が集音される。一方、ステレオ音響エコーキャンセラは、エコー経路模擬フィルタ $\hat{h}_1(k)$, $\hat{h}_2(k)$, $\hat{h}_3(k)$, $\hat{h}_4(k)$ により、擬似エコー

$$\hat{y}_1(k) = \hat{h}_1^T(k)x_1(k) + \hat{h}_2^T(k)x_2(k) \quad (3)$$

$$\hat{y}_2(k) = \hat{h}_3^T(k)x_1(k) + \hat{h}_4^T(k)x_2(k) \quad (4)$$

を生成し、エコーから差し引く。但し、 $x_1(k) = [x_1(k), x_1(k-1), \dots, x_1(k-L)]$, $x_2(k) = [x_2(k), x_2(k-1), \dots, x_2(k-L)]$ 、 L はタップ数である。ここで問題となるのは、収束値や収束速度が、ステレオ受話信号 $x_1(k)$, $x_2(k)$ の相互相関に依存することである。例えば、ステレオ受話信号 $x_1(k)$, $x_2(k)$ の相互相関が時刻 k によらず一定な場合には、式 (1), (3) について、 $y_1(k) = \hat{y}_1(k)$ を任意の k に対して満たす $\hat{h}_1(k)$, $\hat{h}_2(k)$ は不定となる [4][5]。

3 問題解決のための着眼点

前節の問題に対して、 $x_1(k)$, $x_2(k)$ に対する入出力関係の他に、相互相関の異なる $x'_1(k)$, $x'_2(k)$ に対する入出力関係が利用可能ならば、これらの関係を連立方程式として同時に解くことにより一意な解を得られることが知られている [3]。筆者らが先に提案したステレオ射影アルゴリズム (SPA) [4][5] は、2 次の

*Study on the stereo echo cancellation algorithm using imaginary input-output relationships.
By Suehiro Shimauchi and Shoji Makino (NTT Human Interface Laboratories)

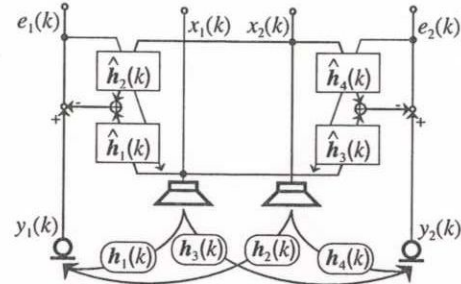


図 1: 2チャンネル集音・再生系

場合、 $x'_1(k) = x_1(k-1)$, $x'_2(k) = x_2(k-1)$ とおくことに相当し、相互相関が毎時刻変化している場合、受話信号の相互相関の異なる入出力関係の連立方程式を解くことに相当する。本報告では、 $x'_1(k) = x_2(k)$, $x'_2(k) = x_1(k)$, すなわちステレオ受話信号が左右入れ替わって再生された場合の入出力関係を利用することを考える。通常、この入出力関係は未知であるが、図 1 のようにスピーカ、マイクロホンが左右対称に配置され、仮に、 $h_1(k) \simeq h_4(k)$, $h_2(k) \simeq h_3(k)$ が成り立つとすると、式 (1), (2) より、

$$y_2(k) \simeq h_1^T(k)x_2(k) + h_2^T(k)x_1(k) \quad (5)$$

$$y_1(k) \simeq h_3^T(k)x_2(k) + h_4^T(k)x_1(k) \quad (6)$$

なる関係が得られることに着目する。

4 新しいアルゴリズム

実環境で前節の仮定を適用する場合、通常その誤差の影響は大きく、無視できないため、実際のアルゴリズムでは、誤差の影響を考慮する必要がある。そこで、 $h_1(k) - h_4(k) = f_1(k)$, $h_2(k) - h_3(k) = f_2(k)$ とおき、式 (1), (2) に対して、 $x_1(k)$, $x_2(k)$ を入れ替えたときの応答を $y'_2(k)$, $y'_1(k)$ とすると、

$$y'_2(k) = h_1^T(k)x_2(k) + h_2^T(k)x_1(k) \\ = y_2(k) + f_1^T(k)x_2(k) + f_2^T(k)x_1(k) \quad (7)$$

$$y'_1(k) = h_3^T(k)x_2(k) + h_4^T(k)x_1(k) \\ = y_1(k) - f_1^T(k)x_1(k) - f_2^T(k)x_2(k) \quad (8)$$

となる。また、 $y'_2(k)$, $y'_1(k)$ からその擬似エコー $\hat{y}'_2(k)$, $\hat{y}'_1(k)$ を差し引いた残差 $e'_2(k)$, $e'_1(k)$ は、

$$e'_2(k) = \Delta \hat{h}_1^T(k)x_2(k) + \Delta \hat{h}_2^T(k)x_1(k) \\ = e_2(k) + \Delta \hat{f}_1^T(k)x_2(k) + \Delta \hat{f}_2^T(k)x_1(k) \quad (9)$$

$$e'_1(k) = \Delta \hat{h}_3^T(k)x_2(k) + \Delta \hat{h}_4^T(k)x_1(k) \\ = e_1(k) - \Delta \hat{f}_1^T(k)x_1(k) - \Delta \hat{f}_2^T(k)x_2(k) \quad (10)$$

但し、 $\Delta \hat{h}_1(k)$, $\Delta \hat{h}_2(k)$, $\Delta \hat{h}_3(k)$, $\Delta \hat{h}_4(k)$ は $\hat{h}_1(k)$, $\hat{h}_2(k)$, $\hat{h}_3(k)$, $\hat{h}_4(k)$ と真値との誤差ベクトルであり、

$$e_1(k) = y_1(k) - \hat{y}_1(k) \quad (11)$$

$$e_2(k) = y_2(k) - \hat{y}_2(k) \quad (12)$$

$$\Delta \hat{f}_1(k) = f_1(k) - (\hat{h}_1(k) - \hat{h}_4(k)) \quad (13)$$

$$\Delta \hat{f}_2(k) = f_2(k) - (\hat{h}_2(k) - \hat{h}_3(k)) \quad (14)$$

である。式 (13), (14) より、 $\Delta \hat{f}_1(k)$, $\Delta \hat{f}_2(k)$ が未知の $f_1(k)$, $f_2(k)$ で表されているため、 $e'_2(k)$, $e'_1(k)$ を正確に知ることはできない。そこで、式 (9), (10) を既知の $e_2(k)$, $e_1(k)$ について解くと、

$$e_2(k) = \Delta \hat{h}_1^T(k) x_2(k) + \Delta \hat{h}_2^T(k) x_1(k) - \Delta \hat{f}_1^T(k) x_2(k) - \Delta \hat{f}_2^T(k) x_1(k) \quad (15)$$

$$e_1(k) = \Delta \hat{h}_3^T(k) x_2(k) + \Delta \hat{h}_4^T(k) x_1(k) + \Delta \hat{f}_1^T(k) x_1(k) + \Delta \hat{f}_2^T(k) x_2(k) \quad (16)$$

となる。一方、式 (1)~(4) の関係から、

$$e_1(k) = \Delta \hat{h}_1^T(k) x_1(k) + \Delta \hat{h}_2^T(k) x_2(k) \quad (17)$$

$$e_2(k) = \Delta \hat{h}_3^T(k) x_1(k) + \Delta \hat{h}_4^T(k) x_2(k) \quad (18)$$

であるから、修正ベクトルを得るためのアルゴリズムの基本式は、式 (15)~(18) より、

$$\begin{pmatrix} x_1^T(k) & x_2^T(k) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ x_2^T(k) & x_1^T(k) & 0 & 0 & -\gamma_1 x_2^T(k) & -\gamma_1 x_1^T(k) \\ 0 & 0 & x_1^T(k) & x_2^T(k) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & x_2^T(k) & x_1^T(k) & \gamma_2 x_1^T(k) & \gamma_2 x_2^T(k) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \hat{h}_1(k) \\ \Delta \hat{h}_2(k) \\ \Delta \hat{h}_3(k) \\ \Delta \hat{h}_4(k) \\ \Delta \hat{f}_1(k) \\ \Delta \hat{f}_2(k) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e_1(k) \\ \gamma_1 e_2(k) \\ e_2(k) \\ \gamma_2 e_1(k) \end{pmatrix}^T \quad (19)$$

となる。但し、 γ_1 , γ_2 はそれぞれ、式 (9), (10) の $e'_2(k)$, $e'_1(k)$ の評価を式 (17), (18) の $e_1(k)$, $e_2(k)$ に対して重み付けする係数である。また、 $\Delta \hat{f}_1(k)$, $\Delta \hat{f}_2(k)$ は、実際には求める必要はない。

5 計算機シミュレーション

残響時間 150ms の部屋で、2 個のスピーカと 2 本のマイクロホンをほぼ左右対称に配置して、真のインパルス応答 $h_1(k)$, $h_2(k)$, $h_3(k)$, $h_4(k)$ を、標準化周波数 8kHz で測定した。 $h_1(k)$ と $h_4(k)$, $h_2(k)$ と $h_3(k)$ とのそれぞれは、波形の概形は似ているが、誤差のエネルギー $\|h_1(k) - h_4(k)\|^2$ 及び $\|h_2(k) - h_3(k)\|^2$ は、対応する真のインパルス応答のエネルギーと同程度であった。模擬フィルタ $\hat{h}_1(k)$, $\hat{h}_2(k)$, $\hat{h}_3(k)$, $\hat{h}_4(k)$ は各 500 タップとした。入力信号は、実測音声を用いた。なお、評価は、 $\hat{h}_1(k)$, $\hat{h}_2(k)$ と真値 $h_1(k)$, $h_2(k)$ との係数誤差 (式 (20)) で行なった。

$$\frac{\|h_1(k) - \hat{h}_1(k)\|^2 + \|h_2(k) - \hat{h}_2(k)\|^2}{\|h_1(k)\|^2 + \|h_2(k)\|^2} \quad (20)$$

5.1 γ_1 , γ_2 の影響と統計的情報の利用

まず、 $\gamma_1 = \gamma_2 = 1.0$ (図 2(a))、 $\gamma_1 = \gamma_2 = 0.5$ (図 2(b)) の場合について比較すると、フィルタ係数の収束状態に応じて、適切な γ_1 , γ_2 の値が異なることが示唆される。そこで、エコー消去量によって γ_1 , γ_2 の値を変化 (消去量: 大 \rightarrow γ_1 , γ_2 : 小) させると、図 2(c) のように特性が改善された。さら

に、インパルス応答の指数減衰性に着目した ES アルゴリズム [6] を組み込み、図 2(d) を得た。これは、本提案手法が、式 (7), (8) に表される未知の入出力関係を近似的に利用しているため、インパルス応答の統計的性質の利用によって、この近似精度が改善されたためと考えられる。

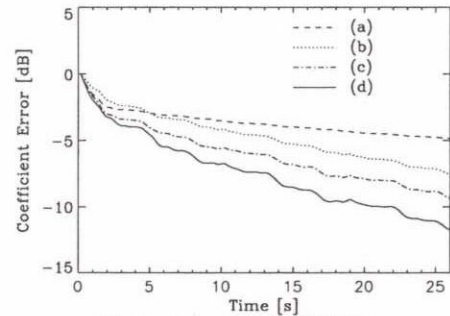


図 2: フィルタ係数誤差

5.2 ステレオ射影アルゴリズムとの結合

図 2(d) のように得られた改善効果は、ステレオ信号の相互相関の時間変化に着目した SPA による効果とは独立である。よって、提案手法に SPA (2 次) を組み合わせると、図 3(c) が得られる。なお、図 3(a) はステレオ NLMS アルゴリズム (従来法)、図 3(b) は SPA (2 次) である。

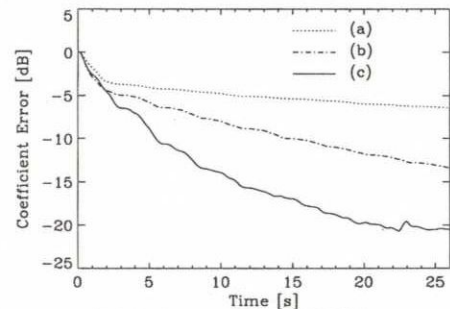


図 3: フィルタ係数誤差

6 まとめ

ステレオ受話信号が左右入れ替わって再生された場合の未知の入出力関係を擬似的に利用する方法について検討した。その結果、重み付けパラメータを収束状態に応じて時変とし、さらにインパルス応答の統計的情報や入力信号の時間変化情報を採り入れることにより、収束の速いステレオ音響 EC 用アルゴリズムが得られた。

謝辞 日頃御指導頂く、北脇音声情報研究部部长、小島 GL、金田主幹研究員に深謝する。

参考文献

- [1] J. Benesty, et al., *Proc. ICASSP95*, vol. 5, pp. 3099-3102 (1995).
- [2] 田川, 古川 他, 音講論集 (春), 1-9-4 (1994).
- [3] 齊藤, 曾根 他, 音講論集 (秋), 1-6-7 (1994).
- [4] 島内, 牧野, 音講論集 (秋), 2-6-17 (1994).
- [5] S. Shimauchi and S. Makino, *Proc. ICASSP95*, vol. 5, pp. 3059-3062 (1995).
- [6] S. Makino and Y. Kaneda, *IEICE Trans.*, Vol. E75-A, No. 11, pp. 1500-1508 (1992).