

マルチチャネル型能動騒音制御アルゴリズム

Direct Adaptive Algorithm for Multichannel Active Noise Control

80221753 太田悠介 (Yuhsuke Ohta) Supervisor 佐野 昭 (Akira Sano)

1 まえがき

マルチチャネル能動騒音制御において，すべての伝播経路が未知の場合に，経路の同定を行うことなく，直接適応コントローラを調整することにより，キャンセリング誤差を低減できるアルゴリズムを提案する．提案法は同定を行わないので，従来からの間接法のように可同定性を確保するための信号の PE 性やディザ信号が不要である利点をもつ．

2 提案法の原理

図 1 に提案法の構成を示す．

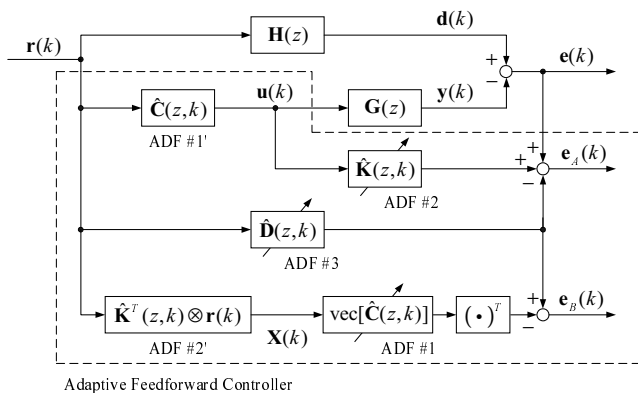


図 1: 提案法の構成

目的は，不確かな経路特性 $H(z)$, $G(z)$ に対して，測定可能な参照信号 $r(k)$ ，制御音 $u(k)$ ，キャンセリング誤差 $e(k)$ を用いて， $e(k)$ をキャンセルする適応コントローラを設計することである．

提案法は，コントローラ内に人工的に 2 種類の仮想誤差ベクトル $e_A(k)$, $e_B(k)$ を生成し，これらをゼロにするように 3 種類の適応フィルタ行列 $\hat{C}(z, k)$, $\hat{K}(z, k)$, $\hat{D}(z, k)$ を調整する．その結果， $k \rightarrow \infty$ で， $e_A(k)$, $e_B(k)$ がゼロに収束し，かつ $\hat{C}(z, k)$, $\hat{K}(z, k)$, $\hat{D}(z, k)$ のすべての多項式係数が一定値に収束すれば，結果として実際のキャンセリング誤差 $e(k)$ をゼロにできるという特徴がある．その原理を示すために，仮想誤差 $e_A(k)$ と $e_B(k)$ の和に注目する．

$$e_A(k) + e_B(k)$$

$$= e(k) + \hat{K}(z, k)u(k) - \left[\text{vec}[\hat{C}(z, k)]\mathbf{X}(k) \right]^T \quad (1)$$

さらに，2 チャネルの場合を例にとり，式 (1) の右辺第二項，第三項を要素ごとに記述する．

$$\begin{aligned} \hat{K}(z, k)u(k) &= \hat{K}(z, k)\hat{C}(z, k)r(k) \\ &= \begin{bmatrix} \hat{K}_{11}(z) & \hat{K}_{12}(z) \\ \hat{K}_{21}(z) & \hat{K}_{22}(z) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{C}_{11}(z) & \hat{C}_{12}(z) \\ \hat{C}_{21}(z) & \hat{C}_{22}(z) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1(k) \\ r_2(k) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} (\hat{K}_{11}(z)\hat{C}_{11}(z) + \hat{K}_{12}(z)\hat{C}_{21}(z))r_1(k) \\ (\hat{K}_{21}(z)\hat{C}_{11}(z) + \hat{K}_{22}(z)\hat{C}_{21}(z))r_1(k) \\ (\hat{K}_{11}(z)\hat{C}_{12}(z) + \hat{K}_{12}(z)\hat{C}_{22}(z))r_2(k) \\ (\hat{K}_{21}(z)\hat{C}_{12}(z) + \hat{K}_{22}(z)\hat{C}_{22}(z))r_2(k) \end{bmatrix} \quad (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \left[\text{vec}[\hat{C}(z, k)]\mathbf{X}(k) \right]^T &= \left[\text{vec}[\hat{C}(z, k)]\hat{K}^T(k) \otimes r(k) \right]^T \\ &= \begin{bmatrix} \hat{C}_{11}(z) & \hat{C}_{12}(z) & \hat{C}_{21}(z) & \hat{C}_{22}(z) \end{bmatrix} \\ &\quad \begin{bmatrix} \hat{K}_{11}(z)r_1(k) & \hat{K}_{21}(z)r_1(k) \\ \hat{K}_{11}(z)r_2(k) & \hat{K}_{21}(z)r_2(k) \\ \hat{K}_{12}(z)r_1(k) & \hat{K}_{22}(z)r_1(k) \\ \hat{K}_{12}(z)r_2(k) & \hat{K}_{22}(z)r_2(k) \end{bmatrix}^T \\ &= \begin{bmatrix} (\hat{C}_{11}(z)\hat{K}_{11}(z) + \hat{C}_{21}(z)\hat{K}_{12}(z))r_1(k) \\ (\hat{C}_{11}(z)\hat{K}_{21}(z) + \hat{C}_{21}(z)\hat{K}_{22}(z))r_1(k) \\ (\hat{C}_{12}(z)\hat{K}_{11}(z) + \hat{C}_{22}(z)\hat{K}_{12}(z))r_2(k) \\ (\hat{C}_{12}(z)\hat{K}_{21}(z) + \hat{C}_{22}(z)\hat{K}_{22}(z))r_2(k) \end{bmatrix} \quad (3) \end{aligned}$$

スカラーの時不変多項式の積は可換なので，各適応フィルタの係数が一定値に収束すれば，式 (2), (3) より，式 (4) が成り立つ．

$$\hat{K}(z, k)u(k) = \left[\text{vec}[\hat{C}(z, k)]\mathbf{X}(k) \right]^T \quad (4)$$

したがって，式 (1), (4) より， $k \rightarrow \infty$ で， $e_A(k)$, $e_B(k)$ がゼロに収束し，かつ各適応フィルタの多項式係数が一定値に収束した場合， $e_A(k) + e_B(k) = e(k) \rightarrow 0$ が達成されることがわかる．

提案法はこの性質を利用して，実際のキャンセリング誤差 $e(k)$ ではなく，仮想誤差 $e_A(k)$ と $e_B(k)$ のみに注目するため，図 1 に示す制御系の構成上，経路 $H(z)$ と $G(z)$ を未知としたままで，コントローラを駆動することができる．

3 数値計算例

制御系を2チャンネル, サンプル周波数を1kHzとして2種類の数値シミュレーションを行う.

[経路が変動する場合]

主騒音を cut-off 周波数 400Hz のローパスフィルタを通した白色雑音とし, 20 秒後に経路 $H(z)$, $G(z)$ を1ステップ分ずつ進め, 40 秒後にそこから共に2ステップ分ずつ遅らせることで経路を変動させる. 制御結果を図2に示す.

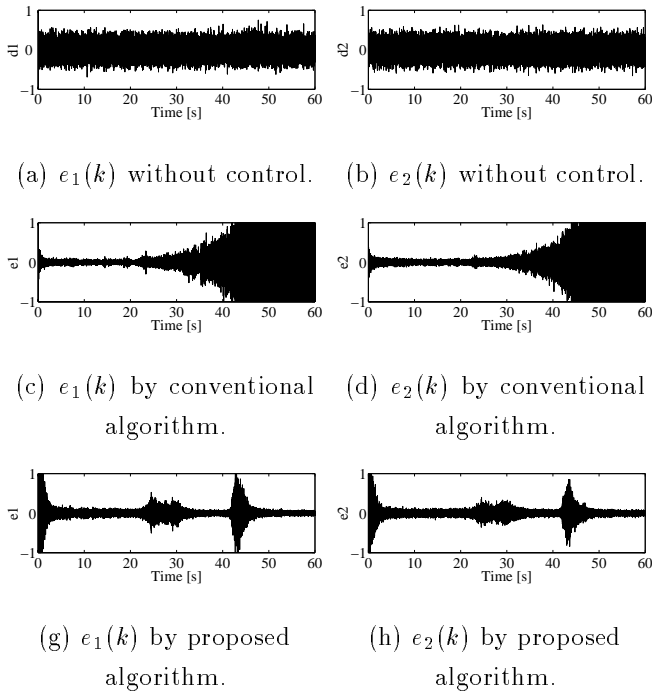


図 2: 経路が変動する場合の制御結果

図2より, 経路特性を必要とする従来法は, 経路の変動後に新たな経路特性を入手できないため, 発散してしまうことがわかる. 一方, 提案法はすべての経路を未知として扱うことができるため, 経路の変動に対してロバストであることが示された.

[主騒音が PE 性を満たさない場合]

次に, 主騒音が PE 性を満たさない場合のシミュレーションとして, 主騒音を 0~20 秒まで 150Hz と 250Hz の sin 波, 20~40 秒まで 400Hz までの白色雑音, 40~60 秒まで 100Hz の sin 波とする. 制御結果および適応フィルタの係数の変動を図3に示す. (e)~(h)では各適応フィルタの係数の変動を実線で, 対応する真値を点線で表している.

0~20 秒までの制御結果に注目する. この間, 主騒音は sin 波であり, PE 性を満たさないので, 適応フィルタ $\hat{K}(z, k)$, $\hat{D}(z, k)$ の係数はそれぞれ対応する経路 $G(z)$,

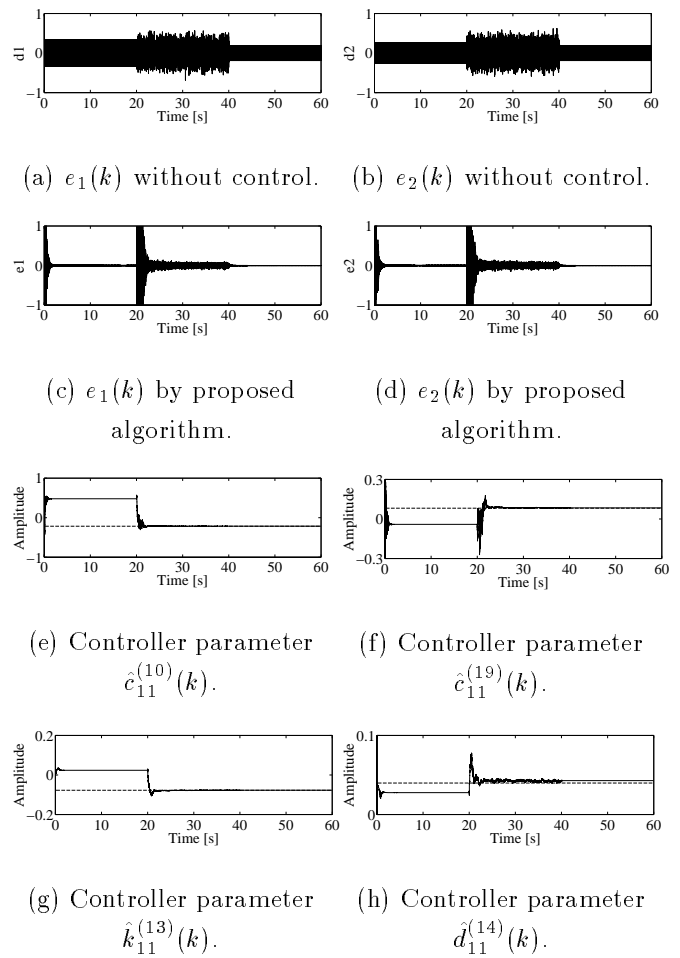


図 3: 主騒音が PE 性を満たさない場合の制御結果

$H(z)$ に収束せず, したがって $\hat{C}(z, k)$ も真値に収束しない ((e)~(h)). しかし, (c), (d) より明らかなように完全な消音が実現されている. これは, 提案法が主騒音のパワースペクトルに応じて適応フィルタ行列を調整し, 消音を実現できることを示しており, 主騒音の PE 性が不要であることがわかる.

4 結論

マルチチャンネル能動騒音制御において, すべての経路が未知の場合でもこれらを同定することなく, 直接コントローラの係数を調整するマルチチャンネル型直接適応アルゴリズムを提案した. 数値シミュレーションにより, 提案法は主騒音の PE 性を必要とせず, したがってディザ信号の付加も不要であるという利点をもつことを示した.

また提案法は, マルチチャンネル能動騒音制御システムと同様の制御系で記述できることが知られているマルチチャンネル音場再生システムに対しても応用が可能であると考えられる. その場合, リスニングルームの同定を経ずに, 直接コントローラをチューニングすることができる.