

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 8 日現在

機関番号：15101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420388

研究課題名(和文) 能動騒音制御のためのPre-inverse適応フィルタの開発と実装

研究課題名(英文) Development and Implementation of pre-inverse adaptive filter for active noise control

研究代表者

伊藤 良生 (Itoh, Yoshio)

鳥取大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：70263481

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：騒音を音響空間において抑圧する手法として、騒音の逆位相の音を発生し抑圧するアクティブノイズコントロールが提案されている。従来手法として一般的なFiltered-X手法はシステムが発散する可能性があり実装を難しくしている。そこで本研究では、安定動作するアクティブノイズコントロール手法について提案を行った。計算機シミュレーション、また、実装により本手法の有効性が確認された。

研究成果の概要(英文)：Filtered-x algorithm is widely used for an active noise control (ANC). However, it has a possibility of making ANC unstable due to the modeling error of a secondary path. This is caused by using the input signal filtered by a secondary path modeling filter as a tap input signal. Therefore, we proposed a pre-inverse type ANC, which uses the delayed signal instead of the filtered input signal. However, since the conventional pre-inverse ANC uses a series adaptive filter to estimate the inverse transfer function of the secondary path, the noise reduction ability is degraded due to bias error. In order to solve the problem, we introduce a parallel structure into the estimation of the inverse transfer function of the secondary path in this research. From computer simulations and digital signal processor (DSP) implementation, we can see the proposed method improves the noise reduction ability while keeping stability.

研究分野：信号処理

キーワード：アクティブノイズコントロール 信号処理 適応フィルタ

1. 研究開始当初の背景

機械などから発生する騒音を抑圧する手法として、騒音の逆位相の音を発生して騒音を抑圧するアクティブノイズコントロール (Active Noise Control: ANC) が提案されており、ダクト内を伝搬してくる騒音、プロペラ機で発生する騒音やヘッドホンを使用する際の周囲騒音などの対策として実用化されている。昨今、生活をしていくためのより快適な環境実現が強く望まれており、今後も ANC に代表される音場制御技術の発展が欠かせない。

ANC システムでは、フィードフォワード型の適応アルゴリズムとして Filtered-x アルゴリズムがよく用いられている。Filtered-x アルゴリズムは2次音源スピーカから残差を検出するマイクロホンまでの2次経路の伝達関数を推定し、その特性を有するフィルタを、制御フィルタである ADF (Adaptive Digital Filter) の更新アルゴリズムの入力の前段に用いる。しかしながら、2次経路特性の変動により、モデル化誤差が生じることが想定される。このとき、ANC システムの制御性能の劣化を引き起こすだけでなく、安定性に大きな影響を与える。そこでモデル化誤差を軽減するため、2次経路の変動に追従する手法としてオンラインで2次経路推定を行う外部雑音注入法がある。外部雑音注入法は制御フィルタの出力信号に低レベルの広帯域信号を付加することにより制御動作中に2次経路の伝達関数の推定を行う。この方法は、2次経路のモデル化に適応フィルタを用いることにより、記憶領域および演算量を大幅に増加させることなく実現できる。しかしながら、この手法では2次経路が大きく変動した場合にモデル化誤差による ANC システムの不安定性を解消することは困難である。これがアクティブノイズコントロールの実装を難しいものとしていた。

2. 研究の目的

本研究では、従来手法における不安定性を解決する手法として我々の研究グループが提案を行ってきた Pre-inverse 型アクティブノイズコントロールの実機試作を最終目的とする。本研究期間内での開発項目及び範囲は下記2点とする。

- ・ Pre-inverse 型適応フィルタを基にするアクティブノイズコントロールをソフトウェア実装し、実環境モデルにより評価する。
- ・ Pre-inverse 型適応フィルタを実装した DSP を用いてアクティブノイズコントロールの実機試作、騒音抑圧性能を評価する。

3. 研究の方法

(1) 基本構成

Filtered-X ANC システムにおける不安定性の問題は、雑音制御フィルタの適応アルゴリ

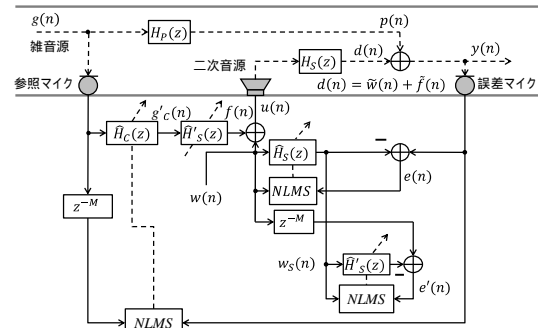


図1 Pre-inverse 型 ANC システム

ズムに用いる入力信号として、2次経路伝達関数を有するフィルタを用いることに原因がある。そこでこの問題を解決するため、Pre-inverse 型 ANC では、制御フィルタの後段に、2次経路の逆伝達関数を有するフィルタを挿入し、雑音制御フィルタの適応アルゴリズムに用いる入力信号には遅延を挿入する手法である。

図1に Pre-inverse 型 ANC の構成を示す。ここで、 $H_p(z)$ 、 $H_s(z)$  はそれぞれ1次経路と2次経路の伝達関数を表している。適応フィルタ  $\hat{H}_c(z)$  は  $-z^{-M}H_p(z)$  を推定する制御フィルタであり、 $\hat{H}_s(z)$  は補助フィルタであり2次経路の伝達関数を推定する。また、適応フィルタ  $\hat{H}'_s(z)$  は2次経路  $H_s(z)$  の逆伝達関数を推定する。各信号を以下に示す。

- $g(n)$  : 雑音
- $p(n)$  : 1次経路通過後の雑音
- $y(n)$  : 観測信号
- $w(n)$  : 補助雑音
- $f(n)$  : 制御信号
- $d(n)$  : 2次経路通過後の制御信号

なお、雑音  $g(n)$  及び、補助雑音  $w(n)$  は互いに独立無相関である。また、補助雑音  $w(n)$  は対象とする周波数領域で白色の信号である。 $e(n)$  と  $e'(n)$  は  $\hat{H}_s(z)$  と  $\hat{H}'_s(z)$  の適応アルゴリズムの更新に誤差信号として用いられる。各適応フィルタについて、制御フィルタ  $\hat{H}_c(z)$  は

$$\hat{H}_c(z) = \sum_{i=0}^{N_C} \hat{h}_{c,i}(n) z^{-i} \quad (1)$$

により与えられる。ここで、 $N_C$  は  $\hat{H}_c(z)$  のタップ数、 $\hat{h}_{c,i}(n)$  は  $\hat{H}_c(z)$  の  $i$  番目のタップ係数である。補助フィルタ  $\hat{H}'_s(z)$  は、

$$\hat{H}_S(z) = \sum_{i=0}^{N_S} \hat{h}_{S,i}(n) z^{-i} \quad (2)$$

により表され、 $\hat{h}_{S,i}(n)$ は*i*番目のタップ係数である。 $N_S$ はタップ数である。また、適応フィルタ $\hat{H}'_S(z)$ は、

$$\hat{H}'_S(z) = \sum_{i=0}^{N'_S} \hat{h}'_{S,i}(n) z^{-i} \quad (3)$$

により表される。ここで、 $N'_S$ は $\hat{H}'_S(z)$ のタップ数、 $\hat{h}'_{S,i}(n)$ は $\hat{H}'_S(z)$ の*i*番目のタップ係数である。また、すべての適応フィルタにおいてNLMS (Normalized Least Mean Square) アルゴリズムを用いており、各タップ係数は、

$$\hat{\mathbf{h}}_C(n+1) = \hat{\mathbf{h}}_C(n) + \mu_C \frac{y(n)\mathbf{g}(n)}{\mathbf{g}^T(n)\mathbf{g}(n)} \quad (4)$$

$$\hat{\mathbf{h}}_S(n+1) = \hat{\mathbf{h}}_S(n) + \mu_S \frac{e(n)\mathbf{w}(n)}{\mathbf{w}^T(n)\mathbf{w}(n)} \quad (5)$$

$$\hat{\mathbf{h}}'_S(n+1) = \hat{\mathbf{h}}'_S(n) + \mu'_S \frac{e'(n)\mathbf{w}_S(n)}{\mathbf{w}_S^T(n)\mathbf{w}_S(n)} \quad (6)$$

により更新される。ここで、 $\mu_C$ 、 $\mu_S$ と $\mu'_S$ はそれぞれの適応フィルタのステップサイズ、 $T$ は転置を表す。また、

$$\hat{\mathbf{h}}_C(n) = [\hat{h}_{C,0}(n), \hat{h}_{C,1}(n), \dots, \hat{h}_{C,N_C}(n)]^T \quad (7)$$

$$\mathbf{g}(n) = [g(n-M), g(n-M-1), \dots, g(n-M-N_C)]^T \quad (8)$$

$$\hat{\mathbf{h}}_S(n) = [\hat{h}_{S,0}(n), \hat{h}_{S,1}(n), \dots, \hat{h}_{S,N_S}(n)]^T \quad (9)$$

$$\hat{\mathbf{h}}'_S(n) = [\hat{h}'_{S,0}(n), \hat{h}'_{S,1}(n), \dots, \hat{h}'_{S,N'_S}(n)]^T \quad (10)$$

$$\mathbf{y}(n) = [y(n), y(n-1), \dots, y(n-N'_S)]^T \quad (11)$$

$$\mathbf{w}(n) = [w(n), w(n-1), \dots, w(n-N_S)]^T \quad (12)$$

$$\mathbf{w}_S(n) = [w_S(n), w_S(n-1), \dots, w_S(n-N'_S)]^T \quad (13)$$

である。

本システムでは、適応フィルタ $\hat{H}'_S(z)$ により推定した2次経路の逆伝達関数を制御フィルタ後段のフィルタ $\hat{H}'_S(z)$ にコピーする。これにより、2次経路 $H_S(z)$ を相殺する。2次経路を推定するために、2次経路 $H_S(z)$ に並列に適応フィルタ(補助フィルタ)を設置する。そして、2次経路の逆伝達関数を推定する適応フィルタを補助フィルタに継続に設置する。これにより、外乱 $p(n)$ 、 $\tilde{f}(n)$ が適応フィルタ $\hat{H}'_S(z)$ のタップ入力に混入しないため、2次経路の逆伝達関数を精度よく推定することが可能となる。

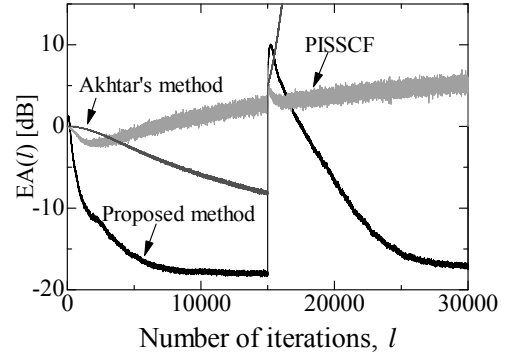


図2 ダクトモデルシミュレーション結果

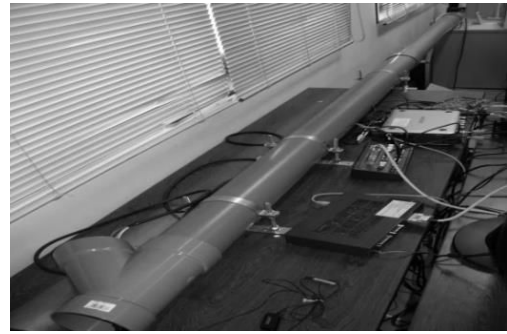


図3 実装風景

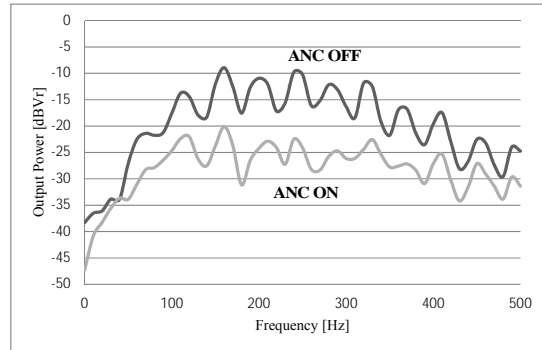


図4 実装結果

次に適応フィルタ $\hat{H}_C(z)$ の動作を考える。適応フィルタが十分収束したとき、

$$\hat{H}_S(z)\hat{H}'_S(z) = z^{-M} \quad (14)$$

となり。このときの適応フィルタ $\hat{H}'_S(z)$ は、

$$\hat{H}'_S(z) = z^{-M} H_S^{-1}(z) \quad (15)$$

により与えられる。一方、参照マイクから2次経路までの伝達関数は、

$$\hat{H}_C(z)\hat{H}'_S(z)H_S(z) = \hat{H}_C(z)z^{-M} \quad (16)$$

となる。それゆえ適応フィルタ  $\hat{H}_c(z)$  は  $-H_p(z)z^M$  を推定する。以上により雑音を打ち消すことが可能となる。これは制御フィルタの適応アルゴリズムのためのタップ入力として、定遅延を作用させた信号を用いることを示しており、これにより本回路構成は Filtered-X とは異なり、安定動作可能となる。

#### (2) ダクトモデルシミュレーション評価

図 2 に雑音対ディザ雑音電力比を 20dB としたときのシミュレーション結果を示す。なお、15,000 回のとき経路変動させている。結果より従来法である Akhtar らによる手法は、経路変動後にシステムが発散している。また、従来法である SSCF (Square sum of correlation function) アルゴリズムを用いる Pre-inverse 型 ANC (PISSCF) についても雑音が低減していないことが確認される。一方、提案手法は、ディザ雑音の電力が小さい環境においても雑音を低減することが可能であることが確認された。

#### (3) 実機試作結果

ダクトに対して ANC システムを実装した結果を評価した。図 3 に実装風景を示す。また、図 4 に ANC を動作させたときと、ANC を停止したときの騒音電力スペクトルを示す。実装結果より、20dB 程度騒音が打ち消されていることが確認される。

#### 4. 研究成果

本研究により得られた成果を以下にあげる。

- ・ Pre-inverse 型 ANC を提案、開発し、2 次経路が変動する環境でも安定動作する ANC が実現された。

- ・ 提案した Pre-inverse 型 ANC をダクトモデルに実装し、その有効性が確認された。これらの成果は、ANC システムの適用範囲を広げることに繋がり、我々の生活環境を改善する一助となり得る。

#### 5. 主な発表論文等

##### [雑誌論文](計3件)

大槻和志, 笹岡直人, 皆木亮祐, 伊藤良生, “補助フィルタによる 2 次経路逆伝達関数推定を用いる Pre-inverse 型 ANC システム,” Journal of Signal Processing, 査読有, Vol.21, No.1, pp.23-35, Jan. 2017, 10.2299/jsp.21.25.

Makoto Tsuchiya, Naoto Sasaoka, Yoshio Itoh, Kazuki Shiogai and Masaki Kobayashi, “Bias Free Adaptive Notch Filter Based on SSCF Algorithm with Decorrelation Parameter,” Proc. 2015 International Symposium on Communications and Information Technologies, 査読有, pp.21-24, Oct. 2015, 10.1109/ISCIT.2015.7458297.

Naoto Sasaoka, Kota Nakamura, Kazuki Otsuki, Yoshio Itoh and Masaki Kobayashi, “Pre-inverse Type Active Noise Control with Bias Free Structure,” Proc. 6th International Symposium on Communications, Control and Signal Processing, 査読有, pp.631-634, May 2014, 10.1109/ISCCSP.2014.6877944.

##### [学会発表](計4件)

岡野圭佑, 皆木亮祐, 大槻和志, 笹岡直人, 伊藤良生, “外部雑音を用いない Pre-inverse 型 ANC システムに関する研究,” 第 29 回 回路とシステムワークショップ, 2016 年 5 月 12 日 ~ 5 月 13 日, 北九州市国際会議場 (福岡県北九州市).  
皆木亮祐, 大槻和志, 笹岡直人, 伊藤良生, “パワースケジューリングを用いる Pre-inverse 型 ANC,” 電子情報通信学会 SIP 研究会, 2016 年 3 月 28 日 ~ 3 月 29 日, 別府国際コンベンションセンター (大分県別府市).

皆木亮祐, 大槻和志, 笹岡直人, 伊藤良生, “補助フィルタによるバイアスフリー Pre-inverse 型 ANC の実装,” 電子情報通信学会 SIS 研究会, 2015 年 6 月 8 日 ~ 6 月 9 日, アルカス SASEBO (長崎県佐世保市).

土屋信, 塩貝一樹, 笹岡直人, 伊藤良生, 小林正樹, “適応ノッチフィルタのための相関除去パラメータを有する SSCF アルゴリズムに関する一検討,” 電子情報通信学会 SIS 研究会, 2015 年 3 月 5 日 ~ 3 月 6 日, 明治大学中野キャンパス (東京都中野区).

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

伊藤 良生 (ITO, Yoshio)  
鳥取大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号: 7 0 2 6 3 4 8 1

##### (2) 研究分担者

笹岡 直人 (SASAOKA, Naoto)  
鳥取大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号: 8 0 4 3 2 6 0 7