

MFB スピーカを用いた active noise control のための適応フィードバックフィルタ*

小松和彦 古賀則行 鯨島俊哉 (九州芸工大)

1. はじめに

我々は Olson らが提案した”Electronic Sound Absorber”¹⁾について、現代制御理論の立場から再定式化し、それに基づいた新たな制御システムとして Motional Feedback(MFB) スピーカを用いた帰還用のマイクロホンを必要としない制御システムを提案してきている。これまでの研究において、スピーカの共振周波数以下を含めたある程度の周波数範囲において、スピーカ振動面を外から見た音響インピーダンス密度が調整できることを確認している。また、提案したシステムの応用例としてダクト内 Active Noise Control(ANC) への適用を試みた結果、計算機シミュレーションでは十分な結果が得られている。

本報告では、その制御器を適応フィルタとして実現する手法を提案し、実験的検討を行った結果を示す。

2. 適応フィルタの導入

Fig.1は動電型スピーカの等価回路であり、その動作方程式は次式で表される。

$$\begin{cases} E = E_0 - Z_{e0}I = Z_{ed}I - Av \\ F = F_0 - Z_{m0}v = Z_{md}v + Z_a v + AI \end{cases} \quad (1)$$

ただし、 E_0 は電気端子の電圧、 I は電流、 A は力係数、 v は振動板の振動速度、 F_0 は振動源の起振力、 Z_{e0} は電源の内部電気インピーダンス、 Z_{ed} は線輪の電気インピーダンス、 Z_{m0} は輻射インピーダンス、 Z_{md} は音源の機械インピーダンス、 Z_a はキャビネットの呈する音響インピーダンスである。

Fig.2は、動電型スピーカの動作方程式(1)をブロック線図で表したものであり、これをブロック線図上の等価操作によって整理するとFig.3となる。図より次式が成り立つことがわかる。

$$F = \left(Z_{md} + Z_a + \frac{A^2}{Z_{e0} + Z_{ed}} \right) v + \frac{A}{Z_{e0} + Z_{ed}} E_0 \quad (2)$$

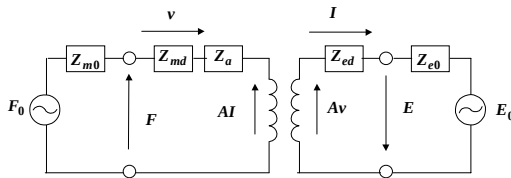


Fig. 1 動電型スピーカの等価回路

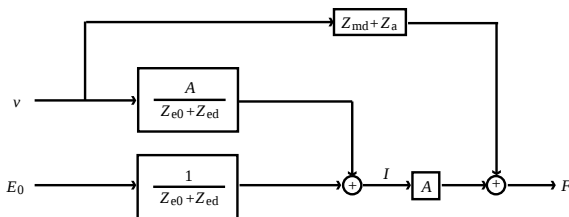


Fig. 2 動電型スピーカの ブロック線図

ここで、今回は音響インピーダンス制御の一例として、スピーカ振動面を外から見た音響インピーダンスを0にするような制御システムを提案する。そこで、スピーカ振動面上にかかる力 F を0にすることで、スピーカ振動面を外から見た音響インピーダンスを0にするを考える。振動板面上の力 $F=0$ とするためには、 E_0 と v の関係として次式が成立すれば良い。

$$E_0 = \left(-\frac{(Z_{e0} + Z_{ed})(Z_{md} + Z_a)}{A} - A \right) v \quad (3)$$

すなわち、スピーカの電気系インピーダンスと機械系インピーダンスの定数を完全に把握できれば、厳密に振動板面近傍の音圧を0にすることができる。

しかしながら、機械系インピーダンスの定数が周波数や温度、湿度により多少変化すること、電気系インピーダンスも温度の影響を受けることなどから、制御器を適応動作させることは重要である。 E_0 として v に制御用フィルタ H を掛けたものを与えるとするれば、動電型スピーカのブロック線図は Fig.4 のようになる。ただし、 $P = Z_{md} + Z_a + A^2/(Z_{e0} + Z_{ed})$ 、 $C = A/(Z_{e0} + Z_{ed})$ とおいた。制御用フィルタ H を例えば Filtered-X LMS アルゴリズムを用いて決定するとすれば、制御システムのブロック線図は Fig.5 のようになる。誤差信号として振動板面上の力 F が必要なため、適応収束時にはマイクロホンによってそれを検出しなければならない。制御システムの構成は Fig.6 のようになる。

Olson らの提案した制御システムを基礎としてそれに適応フィルタを導入した手法が幾つか提案されているが、それらに対する本手法の特徴として、(1) 前もって測定しておくべき特性は電気音響変換器の電気系インピーダンスのみであり、外界の音場とは無関係に制御フィルタを設計できることと、(2) 制御フィルタへの入力振動板の振動速度であることにより、スピーカからマイクロホンまでの伝達関数を用いたハウリングキャンセラが不必要なことが挙げられる。

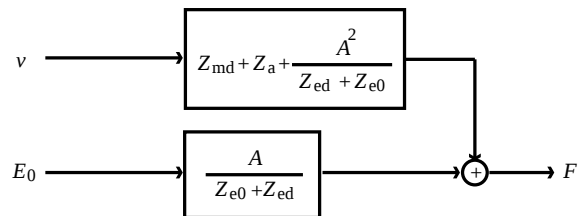


Fig. 3

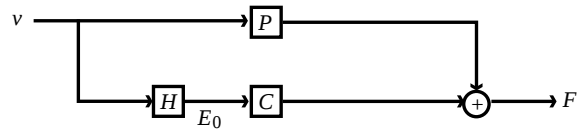


Fig. 4 制御システムのブロック線図

* Adaptive feedback filter for broad-band active noise control using an MFB loudspeaker

By Kazuhiko Komatsu Noriyuki Koga and Toshiya Samejima (Kyushu Institute of Design)

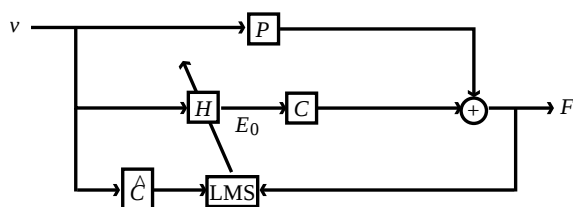


Fig. 5 適応フィルタを導入した制御システム

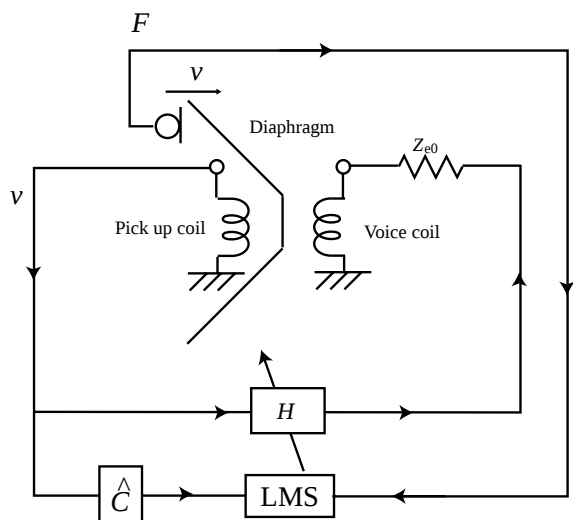


Fig. 6 Filtered-X LMS アルゴリズムを用いたシステム構成

3. 実験

前述の制御システムを Fig.7のように無響室内に配置し、実験を行った。制御フィルタは Filtered-X LMS アルゴリズムを用いて適応させた。Filtered-X のフィルタ $\hat{C}$ は、前節で述べたようにスピーカの電気インピーダンスのみに依存しており、音場には依存していない。よって、予め定電圧法によりスピーカの自由インピーダンスを測定し、その結果よりスピーカの電気インピーダンスをもとめた。その電気インピーダンスからフィルタ $\hat{C}$ を作成した。

制御システムのサンプリング周波数を 24kHz とし、一次音源信号としては各周波数の純音を用いて実験を行った。

4. 結果

実験結果を Fig.8に示す。グラフの縦軸は各周波数において制御を施した時のエラーマイクロホン位置での減衰量である。

制御効果は 100 ~ 150Hz でのみ得られた。この周波数範囲というのはスピーカ共振周波数付近である。

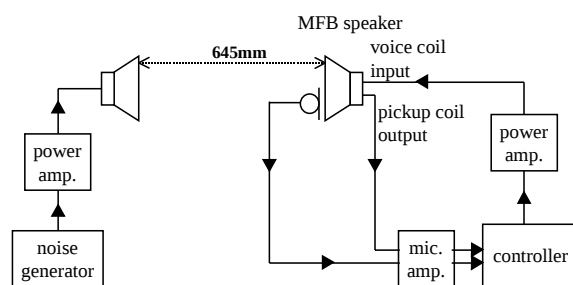


Fig. 7 実験システムの配置

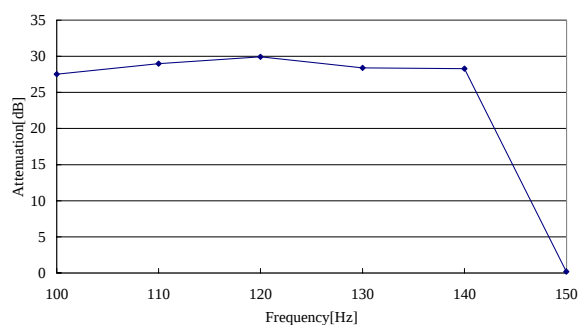


Fig. 8 実験結果

5. 考察

今回の実験では純音に関してはある周波数帯域では十分な制御効果は得られたが、その制御効果の得られる帯域は 100 ~ 150Hz と非常に狭かった。スピーカ共振周波数付近、つまり抵抗制御領域のみで制御効果が得られている。これは、ピックアップして帰還しているのがスピーカ振動面の振動速度であるために、振動速度に比例する抵抗制御領域のみで制御効果が得られたと考えられる。

他の周波数領域で効果が得られなかった理由としては、制御システムの遅延が考えられる。従来の適応制御ではシステム同定を行い、その段階で遅延を含めて同定される。今回の実験では、測定したスピーカの電気インピーダンスを基に、 $\hat{C}$ を計算機上で作成した。そのため、システムの遅延が考慮されないために広帯域での制御効果が得られなかったものと考えられる。

6. まとめ

これまでに我々が提案してきた制御システムへ適応フィルタを導入した制御システムを提案し、実験的検討を行った。騒音源が純音の場合はある限定された周波数帯域において制御効果が得られたが、制御効果が得られる周波数帯域は非常に狭いという問題があった。しかしながら、従来のマイクロホン-スピーカ系を用いた ANC システムに対して、温度や湿度などの使用環境への耐久性の向上が望めるといった利点が挙げられる。今後、制御効果の広帯域化を目指したシステムの設計を行う所存である。

参考文献

- 1) H.F.Olson and E.G.May, "Electronic sound absorber," J.Acoust.Soc.Am.25(6),1130-1136(1953).
- 2) H.F.Olson, "Electronic control of noise,vibration,and reverberation," J.Acoust.Soc.Am.28,966-972(1956).
- 3) M.Nishimura,K.Ohnishi,W.P.Patrick and A.C.Zander, "Development of active acoustic treatment phase 1:Basic concept and development of AAT-cell", ACTIVE97,319-330(1997).
- 4) T.Yagi,A.Imai and M.Konishi, "Variable sound absorption system using velocity and pressure feedback loudspeaker", Proc.Int.Symp.Active Control of Sound and Vibration,433-438(1991).
- 5) J.Okda,T.Nishimura,Y.Nishimura,T.Usagawa and M.Ebata, "Active noise controlsystem using motional feedback loudspeaker", J.Acoust.Soc.Jpn.(E)12,291-297(1991).