

移動騒音源に対する適応アルゴリズムの振る舞い*

松井 徹, 尾本章, 藤原 恭司 (九州芸工大)

1. はじめに 最近の交通量の増加に伴って、道路周辺の騒音のパワーレベルが増加しており、それにつれて騒音制御に一般的に用いられている防音壁は、その高さを上げることで対処してきた。しかし、これには構造上に限界があり、また景観的にも好ましくない。そこで、防音壁の高さを上げずにその遮音性能を向上させるという研究が盛んになっている。本研究では、防音壁に能動制御システムを適用した場合の遮音性能向上について検討することを目的としている。

能動騒音制御に関する研究で、非定常な音場における適応アルゴリズムの振る舞いについてはいままでもあまり報告されていない。筆者らは自動車が走行していることを想定して、騒音源が移動する場合の適応アルゴリズムの振る舞いについて、数値シミュレーションによって検討を行っている。

これまでに報告してきた結果では、理想的な多チャネル Feedforward システムを構成した場合、また騒音源をピックアップするノイズセンサを必要としない Feedback システムを構成した場合に、音源信号がバイク音のようなノイズであっても制御効果が得られることがわかった^[1, 2]。また、実際に半無響室で1/3 模型の防音壁を立て、騒音源スピーカを移動させたときの音を録音し、また2次音源からエラーセンサまでのインパルスレスポンスを測定して数値計算に用いた場合も、有効な制御効果が得られることを報告した^[3]。今回は、以上の報告について簡単に紹介する。

2. 多チャネル ANC システム

2.1 Feedforward 系

FIG.1(a) に、移動騒音源に対する Feedforward 系の ANC システムのブロックダイアグラムを示す。ここで $d(n)$ はエラーセンサで観測される騒音源からの寄与であり、騒音源信号 $s(n)$ と、音源が移動するために変化するエラーセンサまでのインパルスレスポンス $H(n)$ との畳み込みによって得られる。 $x(n)$ は参照信号、 $e(n)$ はエラーセンサ出力、 $w(n)$ は適応フィルタ列、 G は2次音源、エラーセンサ間の音場を表す。また、 F は2次音源からノイズセンサへの音響的 Feedback パスを表す。 n は離散時間インデックスである。ここでは L 個のエラーセンサ、 M 個の2次音源、 K 個のノイズセンサを持つシステムを仮

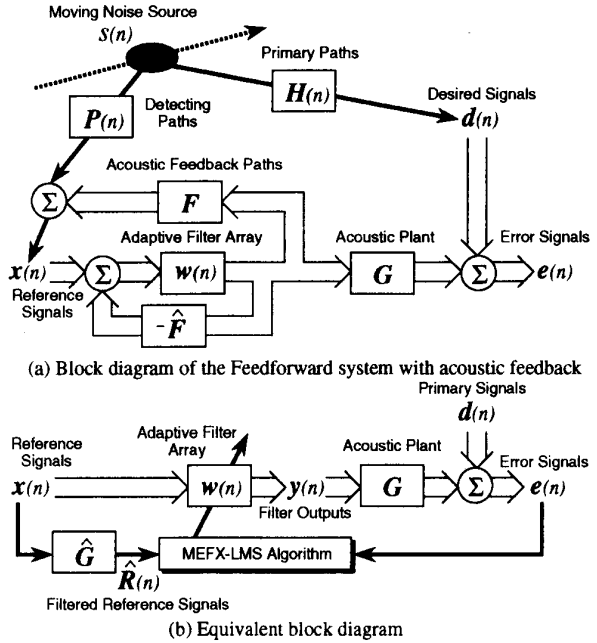


FIG.1. Block diagram of the feedforward active noise control system.

定する。

ここで音響的 Feedback パス F を推定したフィルタ \hat{F} を導入し、もしこの推定が正確であるとすれば、この出力を参照信号 $x(n)$ から差し引くことで等価的に純粋な Feedforward システムが構成できる。こうすることによって、アルゴリズムの潜在的な能力が解析ができる^[4]。FIG.1(b) にそのブロックダイアグラムを示す。

2.2 Feedback 系

FIG.2(a) に、移動騒音源に対する Feedback ANC システムのブロックダイアグラムを示す。ここで図中に示すとおり2次経路の音場 G を推定したフィルタ \hat{G} を導入し、もしこの推定が正確であるとすれば、この出力をエラー信号 $e(n)$ から差し引くことで、システムの入力信号が $d(n)$ となる。これはいわゆる IMC を用いた構成であり、等価的に FIG.2(b) のように入力信号が d である Feedforward システムとみなすことができる^[4]。

ここで用いる適応アルゴリズムは、次式で定義される MEFX-LMS アルゴリズムとする。

$$e(n) = d(n) + R(n)w \quad (1)$$

$$w(n+1) = w(n) - \alpha \hat{R}^T(n)e(n) \quad (2)$$

* The Behaviour of an Adaptive Algorithm with Moving Primary Source.

By Tohru Matsui, Akira Omoto and Kyoji Fujiwara (Kyushu Institute of Design).

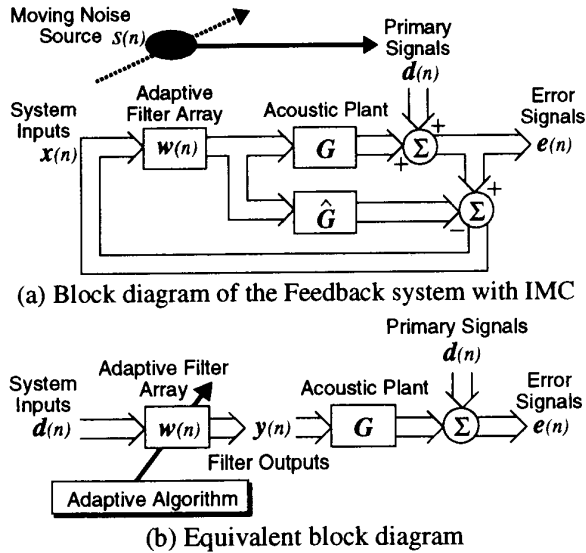


FIG.2. Block diagram of the feedback active noise control system implemented using IMC.

ここで \mathbf{R} と $\hat{\mathbf{R}}$ はそれぞれ、音場 \mathbf{G} とその推定行列 $\hat{\mathbf{G}}$ を通過した入力信号行列であり、入力信号は Feedforward システムでは $\mathbf{x}(n)$ 、Feedback システムでは $\mathbf{d}(n)$ となる。また肩文字 T は転置を表す。 α はステップサイズパラメータであり、システムの収束速度と安定性を決定するパラメータである。

このように等価的に完全な Feedforward システム、及び Feedback システムを構成し、騒音源が移動する場合の前述の適応アルゴリズムの振る舞いについて検討する。

3. 移動騒音源のモデルを用いた場合 ここでは簡単なモデルを用いて移動騒音源の信号をシミュレートし、それに対する適応アルゴリズムの振る舞いを数値計算によって解析した。

3.1 移動騒音源のモデル化

騒音源が移動することによって、1次経路のインパルスレスポンス $\mathbf{H}(n)$ が時間とともに変化する。簡単のため自由音場を仮定し、ここではインパルスレスポンスを FIG.3 のように時間遅延と距離減衰によって決まる1つの非零要素を持つものとモデル化する。

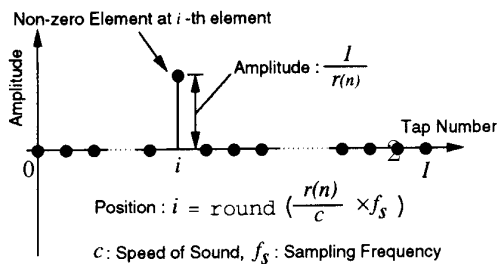


FIG.3. Model of the impulse response

ここで round は最も近い整数への丸めを意味し、

f_s はサンプリング周波数である。このように、フィルタ係数の更新毎に1次経路のインパルスレスポンス $\mathbf{H}(n)$ を求めて、騒音源信号 $s(n)$ と畳み込むことにより、騒音源が移動することによって変化する騒音源からの寄与 $\mathbf{d}(n)$ をモデル化する。参照信号 $\mathbf{x}(n)$ も同様の計算で与えられる。

3.2 解析モデル

$L = M = K = 3$ のシステムを仮定し、FIG.4 に示すように各音源、センサを配置する。騒音源信号 $s(n)$ には、回転数 2,500 rpm 程度のアイドル状態で録音、A/D 変換されたバイクの排気音を用いた。サンプリング周波数は 5 kHz である。

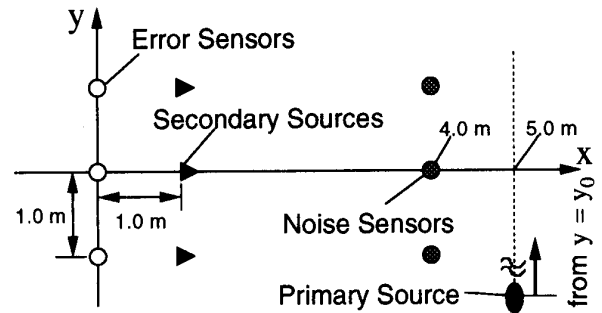


FIG.4. Arrangement of the primary source, the secondary sources, the noise sensors and the error sensors.

騒音源の動作は、

- $y = y_0$ m で制御開始後 T_s 秒間静止
- $(\sin t + 1)/2$, $(-\pi/2 < t < \pi/2)$ という関数に沿って T_a 秒間加速し、一定速度 V に到達
- その後は定速移動

と仮定した。

3.3 結果及び考察

FIG.5(a) に、 $V = 10$ km/h のときのエラーセンサ出力自乗和の変動の様子を示す。点線が Feedforward 系の、実線が Feedback 系のシステムを用いた場合の結果である。図は時定数 0.2 秒の RMS 値を dB 表示しており、縦軸は制御を行わない状態での最大値で基準化した相対レベルである。横軸は時間である。音源の初期位置は $y_0 = -10$ m、静止時間 $T_s = 1$ 秒、加速時間 $T_a = 2$ 秒と仮定した。

制御を行わない場合のエラーセンサ出力は、騒音源がシステムに近づくにつれて増加し、離れていくにしたがって減少する様子が現れている。これに対して制御を行った場合は、不規則に変動はするものの有効な減衰量が得られているのがわかる。また、Feedforward 系システムより Feedback 系システムの

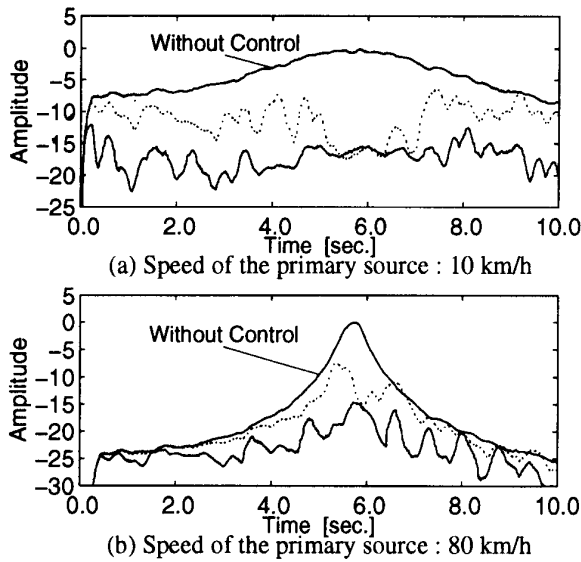


FIG.5. Changes in the sum of the squared output of the error sensors.

ほうが、より大きな減衰量が得られているのが明らかである。

この計算では、システムが発散せず、かつある程度の減衰量が得られるように、ステップサイズパラメータ α を Feedforward 系では 0.002 に、Feedback 系では 0.03 に固定して行った。この α による影響は大きく、値が大きい場合、特に騒音源がシステムに近づいた際に発散することがわかった。

FIG.5(b) に、 $V = 80 \text{ km/h}$ の場合の結果を示す。やや非現実的であるが、 $y_0 = -80\text{m}$ 、 $T_s = 0.5 \text{ 秒}$ 、 $T_a = 3 \text{ 秒}$ と仮定した。 α は Feedforward 系では 0.003 に、Feedback 系では 0.03 に固定して計算を行った。

制御を行うと音源がシステムに近づいたときに、より大きな減衰量が得られるが、Feedforward 系システムでは 6 秒を過ぎたあたりで音圧が増加している。音源の移動による 1 次音の変動に、システムが追従できないためと考えられる。Feedback 系では、制御を行った場合のエラーセンサ出力が非常に不規則な変動を示すが、やはり音源がシステムの直前を通過する際に最も大きな減衰量が得られている。

4. 測定データを用いた場合 制御前にあらかじめ測定される 2 次経路 (2 次音源からエラーセンサまでの経路) のインパルスレスポンスを、実際の 1/3 模型による音場で測定した。また、エラーセンサで観測される移動騒音源からの寄与も実際に音源を動かして測定する。これらのデータを用いて数値計算を行った。

4.1 各音源、センサの配置

$L = M = K = 3$ のシステムを仮定し、FIG.6 に示すように各音源、センサを配置する。上図が模型の全体図であり、下図が各音源、センサの配置図で

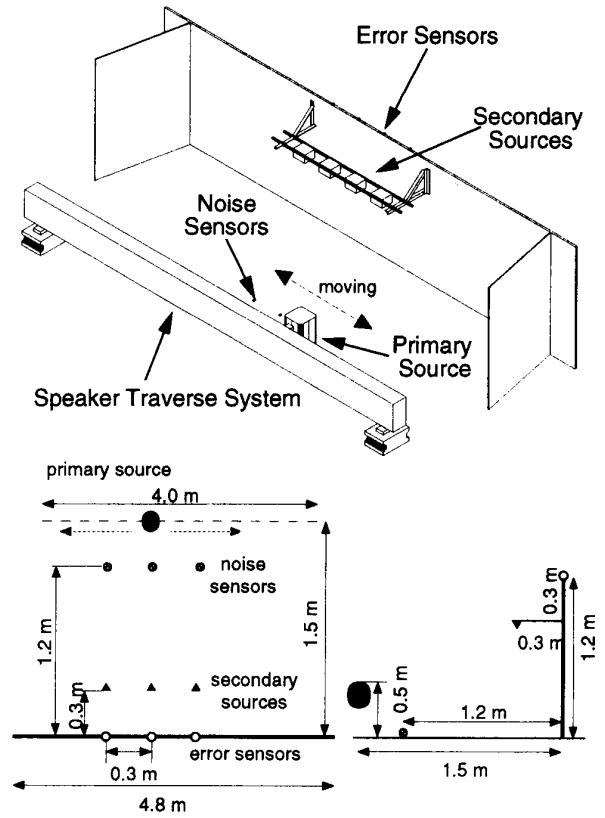


FIG.6. Arrangement of the primary source, the secondary sources, the noise sensors and the error sensors.

ある。エラーセンサ、2 次音源それぞれの間隔は 0.3 m とした。また Feedforward システム用のノイズセンサは、壁から 1.2 m 離れた地面上に壁と平行に設置した。測定は半無響室で行った。

4.2 2 次経路のインパルスレスポンス

FIG.7 に、実際の模型で測定した、ある 2 次音源から各エラーセンサまでのインパルスレスポンスを示す。計算では 1024 点で打ち切ったものを用いた。

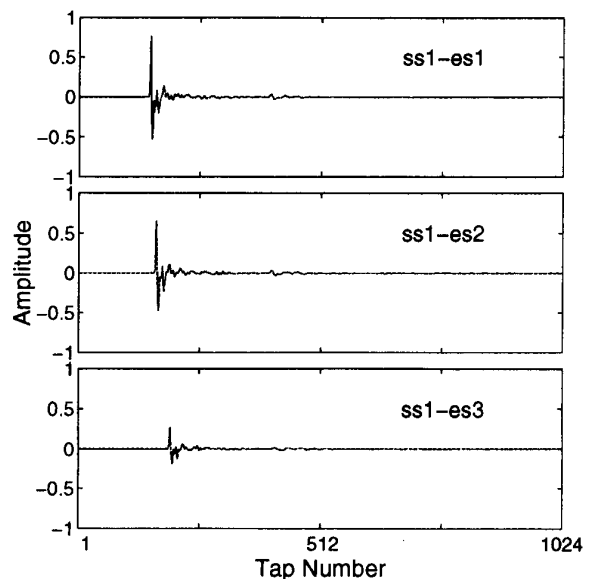


FIG.7. The impulse response of the secondary paths.

4.3 音源信号

音源信号には、バイクの後輪付近にマイクを設置し、実際に道路を走行した音を DAT で録音して用いた。FIG.8 に、音源スピーカをシステムの正面に静止させた場合と、移動させた場合のエラーセンサ出力波形を示す。

騒音源スピーカの動作は、障壁から 1.5 m のところに障壁と平行に設置された音源移動装置により、1 m/sec. の速度で 4 m の距離を往復させた。動作の周期はおよそ 11 秒である。

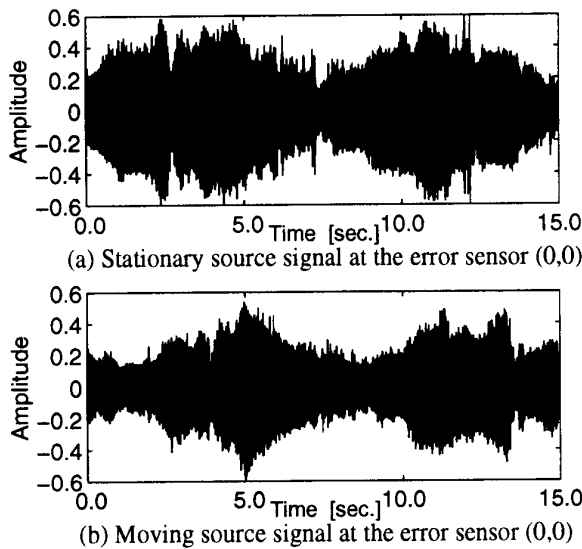


FIG.8. Outputs of the error sensor without control.

4.4 結果及び考察

FIG.9(a) に、234Hz の純音に対するエラーセンサ出力自乗和の変動の様子を示す。システムは Feedback 系システムを用いた。図は時定数 0.2 秒の RMS 値を dB 表示しており、縦軸は制御を行わない状態での最大値で基準化した相対レベルである。サンプリング周波数は 24kHz である。ステップサイズパラメータは、 $\alpha = 0.0001$ に固定して計算を行った。

非常に大きな減衰量が得られているが、音源が動き出すとその効果が変動しているのがわかる。

FIG.9(b) に、Feedforward 系、Feedback 系システムそれぞれについてのバイク音に対する制御結果を示す。点線が Feedforward 系、実線が Feedback 系システムを用いた場合の結果である。 α はシステムが発散せず、かつある程度の減衰量が得られるように、Feedforward 系システムでは $\alpha = 0.0001$ に、Feedback 系システムでは $\alpha = 0.001$ に固定して計算を行った。

結果をみると、変動する騒音源信号に対して制御を行った場合、それに追従して変動はするものの有効な減衰量が得られているのがわかる。また、3 節の

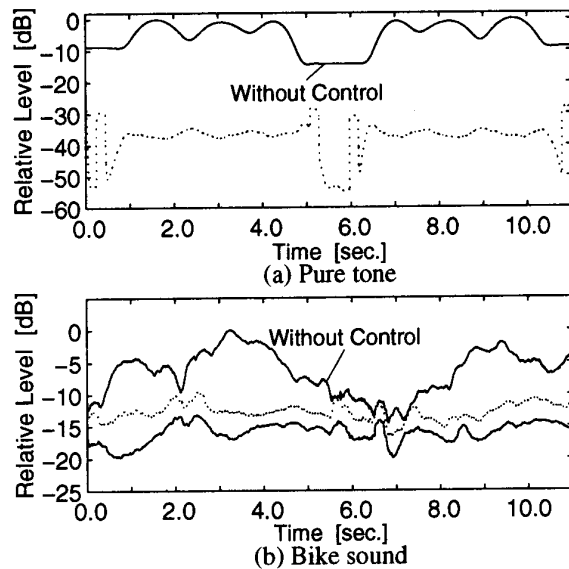


FIG.9. Changes in the sum of the squared output of the error sensors.

結果と同様に Feedforward 系システムより Feedback 系システムの方が、より制御効果が大きいのが明らかである。

5. まとめ 騒音源が移動する場合の、MEFX-LMS アルゴリズムの制御の振る舞いについて検討を行った。まず 3 節で、非常に簡単なモデルを用いて数値計算を行った。結果として、制御効果は不規則な変動をするものの有効な減衰が得られること、またその減衰量は音源がシステムの正面を通過するとき最大となることが明らかになった。さらに、Feedforward 系より Feedback 系システムの方が、より大きな減衰量が得られることがわかった。

次に 4 節では、あらかじめ測定される 2 次経路 G のインパルスレスポンスを実際の音場で測定し、また騒音源を移動させたときの音を録音して数値計算に用いた。その結果、制御を行うことによって有効な制御効果が得られることがわかった。また 3 節と同様に、Feedback 系システムの方がより大きな効果が得られることがわかった。これは移動騒音源など騒音源信号を認識するのが困難な場合に有効であり、防音壁と組み合わせた道路交通騒音の制御に応用できる可能性がある。引き続き、より現実的な状況を仮定した検討を進めている。

参考文献

- [1] 尾本, 松井, 藤原, 音講論集 1-4-14, pp. 501-502, 1997, 9.
- [2] 松井, 尾本, 藤原, 音講論集 1-4-15, pp. 503-504, 1997, 9.
- [3] 松井, 尾本, 藤原, 音講論集 1-4-15, pp. 537-538, 1998, 3.
- [4] S. J. Elliott, T. J. Sutton, IEEE Trans. Speech and Audio Process. Vol.4 No.3, pp.214-223, 1996