能動音響制御手法を用いた遮音壁

○学 王 循(九大院), 正 雉本 信哉(九大), 正 木庭 洋介(九大)

A Noise Barrier Using Active Noise Control Technique

Xun WANG, Shinya KIJIMOTO and Yosuke KOBAYASHI

Kyushu Univ. Dept. of Mechanical Engineering
Motooka 744, Nishi-ku, Fukuoka, 819-0395 Japan

In this paper, a kind of active noise barrier (ANB) using active noise control (ANC) technique to improve noise insulation performance in low frequencies is proposed. The ANB consists of an ordinary noise barrier, three active noise control units (ANCU) and a DSP (TMS 320C6713 DSK). Feedback ANC system is used in the ANCUs. In order to achieve higher noise attenuation, fast transversal filter (FTF) adaptive algorithm is introduced into the feedback ANC system. Then, numerical and experimental study on an active noise barrier is conducted. As a result, the active noise barrier shows better noise insulation performance in low frequencies. Moreover, in this paper, basic concept of a new type hybrid ANC system which is a combination of the feedforward and feedback control structures is proposed. The feedback controller provides active noise insulation, and the feedforward controller whose reference signal is synthesized in the feedback controller cancels noise at a specific position where its error microphone is. Effectiveness of the hybrid ANC system is verified by experiment. The result shows that the hybrid ANC system can reduce noise better than single feedforward or feedback ANC systems.

Key Words : Active Noise Control, Active Noise Barrier, Adaptive feedback control, Hybrid Active Noise Control System, Boundary element method

1. 緒 言

我々の身の回りには道路騒音や工事現場などの様々な騒音源が存在する。騒音防止手法として、遮音壁による受動的騒音制御がよく用いられる。しかし、従来の遮音壁は高周波騒音に対する受動的遮音効果が高いが、低周波騒音に対する遮音効果は不十分である。一方、能動的騒音制御 (Active noise control, ANC) は音波の干渉を利用し、騒音をキャンセルする技術で、低周波騒音制御に有効な手段である。そこで、能動的騒音制御技術を遮音壁に適用すれば、遮音壁の低周波音遮音効果が向上することが期待できる。実際、様々なタイプの能動遮音壁^{(1), (2)}が提案されている。文献(1)では、フィードフォワード ANC システムとパーティションを組み合わせた能動遮音壁を用い、広い周波数帯域で高い制御効果を得ている。文献(2)では、フィードバック ANC システムを用い、遮音壁の先端に音圧が常に最小となる音響的ソフト境界を生成することで、壁の回折音を低減し、600Hz 以下の周波数帯域での遮音効果を向上させている。

本研究では、パーティションの低周波音遮音性能の向上を目的として、能動音響制御ユニット (Active noise control unit, ANCU) をパーティションの先端に付加し、能動遮音壁を構築する。ANCU が生成した音響的ソフト境界により、壁を回折した騒音が低減される。ANCU にはフィードバック ANC システムが用いられる。フィードバック ANC システムの制御効果を高めるため、高速トランスバーサルフィルタ (Fast transversal filter, FTF) 適応アルゴリズム^{(3), (4)}を導入する。また、境界要素法 (Boundary element method, BEM) を用いた数値計算と実験で能動遮音壁のアクティブ遮音効果の評価を行う。

音響境界を制御することで、広い範囲内でアクティブ遮音効果が得られるが、減音量は十分ではない。一方、誤差マイク位置を直接に消音する場合は、マイク付近の減音量は高いが、制御範囲が狭くなる。そこで、音響境界制御と特定の場所を消音する制御が同時にできるハイブリッド ANC システムを提案する。このシステムはフ

フィードフォワードコントローラとフィードバックコントローラで構成されており、フィードフォワード部分の参照信号がフィードバックコントローラの内部で作成される。フィードバックコントローラは音響的ソフト境界を生成し、広い範囲内でアクティブ遮音効果を提供する。フィードフォワードコントローラは人間の耳元付近を更に消音する。

2. フィードバック ANC システム

2・1 Inter Model Control 型フィードバック ANC システム

図 1(a)に示すフィードバック ANC システムは制御音源と誤差マイクのみで構成されており、コンパクトな制御システムを構築する場合に適するため、ANCU に用いられる。また、図 1(b)に示す Internal Model Control (IMC)⁽⁵⁾手法でフィードバック ANC システムの内部をフィードフォワード型に置き換え、適応アルゴリズムを用いてフィードバック制御を実現することができる。 G が二次経路特性、 $\hat{G}$ が事前に同定する G の推定値を表す。 C は適応フィルタである。

誤差信号 e と所望信号 d 間の伝達関数を求めると、次式のようにになる。

$$\frac{E}{D} = \frac{1 - \hat{G}C}{1 + (G - \hat{G})C} \quad (1)$$

E と D はそれぞれ e と d の周波数特性を表す。 G と $\hat{G}$ が完全に一致する場合には、式(1)が次式のようにになる。

$$\frac{E}{D} = 1 - \hat{G}C \quad (2)$$

この場合に適応フィルタ C は $1/G$ に収束する。但し、 G に時間遅れが存在するため、 $1/G$ が不安定となる。そのため、フィードバック ANC システムで制御可能な周波数帯域が制限され、本研究では、制御対象周波数を 300Hz から 1KHz までとする。

Fig.1 Feedback ANC system

2・2 適応アルゴリズムとシミュレーション

フィードバック ANC システムの制御効果を高めるため、FTF 適応アルゴリズムを導入する。FTF は前向き、後向き予測フィルタ及びカルマンゲインフィルタを用い、入力データの時間推移普遍性を利用することにより、再帰形最小二乗問題を解決している。FTF は収束特性が優れている上、計算量がフィルタ長に比例するため、ANC のような実時間制御への適用が可能である。しかし、FTF は有限精度環境では、数値的不安定性を有する。これに対し、幾つかの解決法^{(3),(4)}が提案されている。本論文でフィードバック ANC システムに導入する FTF は文献(3)に提案された解決法を用いる。

FTF アルゴリズムの後向き予測フィルタの事前推定誤差 e_b は次式で計算する。

$$\begin{aligned} e_{b1} &= r(n-L) - B^T(n-1)r(n) \\ e_{b2} &= \lambda\beta(n-1)K_{L+1}^{L+1}(n) \\ e_{b3} &= \lambda^{-L}\gamma_{L+1}(n-1)\alpha(n)K_{L+1}^{L+1}(n) \end{aligned} \quad (3)$$

式の中、 L がフィルタ長、 r が入力信号、 B が後向き予測フィルタ、 λ が忘却係数、 α と β が前向きと後向き予測の二乗誤差、 γ が変換係数、 K_{L+1}^{L+1} は $L+1$ 次カルマンゲインフィルタの最後の要素である。無限精度環境では、三つの計算式の結果は同一になるが、有限精度環境では、計算結果が異なる。各式の計算結果の差は FTF アルゴリ

ズムの量子化誤差伝播システムの出力信号と見なすことができ、この差を e_b の計算に帰還することで、FTF アルゴリズムを安定化させることができる。安定な FTF アルゴリズムの e_b は以下のように計算される。

$$e_b = e_{b1} + \xi(n) \quad (4)$$

$$\xi(n) = e_{b1} - [(1 - \varepsilon)e_{b2} + \varepsilon e_{b3}] \quad (5)$$

ξ はコントロール変数(Control Variable)と呼び、 e_b の誤差伝播過程をコントロールする量である。 ε は ξ の各成分を調整する係数であり、本研究では 0.85 とする。図 2 に従来型 FTF とコントロール変数を用いた FTF アルゴリズムのシミュレーション結果を示す。従来型 FTF の発散に対し、後者は安定に収束していく傾向が見られる。

FTF を用いたフィードバック ANC システム (FB-FTF) と FB-LMS⁽⁶⁾ の制御効果はシミュレーションで確認する。計算条件はサンプリング周波数を 20KHz、適応フィルタ長を 256 とする。騒音信号として、1KHz までのランダムノイズを用いる。制御音源から誤差マイクまでの距離を 30mm と想定する。制御効果の評価量として、次式で表される周波数帯域減音量(Attenuation, ATT)を用いる。

$$ATT = \frac{1}{n_2 - n_1 + 1} \sum_{f_i=n_1}^{n_2} \{ \text{Gain}(f_i)_{\text{Control off}} - \text{Gain}(f_i)_{\text{Control on}} \} \quad (3)$$

図 3 に FB-FTF と FB-LMS の制御効果を比較している。結果から、300Hz~1KHz 帯域で FB-FTF は FB-LMS に比べ、制御効果が 11.23dB 高いことを示している。

Fig.2 Stability of FTF algorithm

Fig.3 Comparing FB-FTF with FB-LMS

3. 能動音響制御手法を用いた遮音壁

本研究の能動遮音壁はパーティション (1150×1000×30mm)、三つの能動音響制御ユニットと DSP で構成される。壁のアクティブ遮音効果を評価するため、数値計算と実験で制御開始前後の測定面における音圧分布を求める。音圧の結果に 1/3 オクターブバンド分析を行い、中心周波数が 315Hz、400Hz、500Hz、630Hz、800Hz、1KHz である。各周波数帯域において、制御前後の音圧レベルの差を用い、遮音効果を評価する。解析環境と実験配置は図 4 に示す。数値計算の音響境界条件はスピーカ、壁を完全反射、床を完全吸収とし、騒音源に点音源として 1Pa を与え、三つの誤差マイク位置における音圧が 0Pa になるように各制御音源の音圧を与える。実験では、制

御アルゴリズムとしてFB-FTFを用いる。サンプリング周波数を 20KHz、適応フィルタの長さを 128 とする。騒音信号として 1KHz までのランダムノイズを用いる。

実験で求めた、三つの誤差マイク位置における各周波数帯域の *ATT* を表 1 と図 5 に示す。結果から、全ての周波数帯域で制御効果が得られており、壁の先端に音響的ソフト境界が生成されていることがわかる。

数値計算と実験で得た測定面内アクティブ遮音効果分布を図 6 に示す。制御により、315Hz 帯域では全ての測定点において、正のアクティブ遮音効果が得られている。但し、400Hz 以上の帯域では負の効果が現れる測定点が存在する。各周波数帯域において、アクティブ遮音効果が正となっている測定点の比率及びアクティブ遮音効果の最大値と平均値を表 2 に示す。結果から、制御で負の効果となっている部分もあるが、正の効果を得られている範囲が広いことが分かる。アクティブ遮音効果は平均で 1dB 程度、500Hz と 800Hz 帯域において、最大で 6dB を得られている。

Fig.4 Configuration for measuring sound pressure

Fig.5 Noise attenuation in error microphones

Table 1 *ATT* [dB] in error microphones

	315Hz	400Hz	500Hz	630Hz	800Hz	1KHz
Error Mic.1	6.74	3.29	6.11	12.45	9.13	10.33
Error Mic.2	1.48	3.59	7.94	9.98	12.19	12.20
Error Mic.3	3.53	5.17	5.41	11.34	10.34	13.28

Table 2 Average and maximum *ATT* [dB] and ratio of measuring points with positive control effect

		315Hz	400Hz	500Hz	630Hz	800Hz	1KHz
Computation	Avg <i>ATT</i>	1.32	0.71	1.86	1.96	2.56	1.23
	Ratio	100%	96%	97%	84%	78%	81%
Experiment	Avg <i>ATT</i>	1.05	0.58	1.05	1.35	1.50	1.01
	Max <i>ATT</i>	2.95	4.18	6.05	3.25	6.23	3.54
	Ratio	100%	84%	82%	91%	72%	89%

Fig.6 Noise attenuation distribution

4. ハイブリッド ANC システム

4・1 ハイブリッド ANC システムの基本コンセプト

前章で紹介した能動遮音壁はフィードバック ANC システムを用いて壁の先端に音響的ソフト境界を生成し、回折音を低減することで、低周波騒音に対しても、広い範囲内においてある程度の遮音効果が得られた。一方、フィードフォワード ANC システムを用いる場合には、誤差マイク位置付近において、高い制御効果が得られる。そこで、音響境界制御と特定の場所を消音する制御を同時に行うことができるハイブリッド ANC システムを提案する。フィードバックコントローラは遮音壁の先端において、音響的ソフト境界を生成し、広い範囲内にアクティブ遮音効果を提供する。フィードフォワードコントローラは人間の耳元付近を消音する。フィードフォワードコントローラの消音目標範囲内において、消音効果とアクティブ遮音効果が積み重なり、単独 ANC システムより高い制御効果が期待できる。目標範囲外においても、アクティブ遮音効果がある。

図 7 にハイブリッド ANC システムの構造とブロック図を示す。このシステムは二つの制御音源と二つの誤差マイクで構成される。フィードフォワードコントローラは参照信号がフィードバックコントローラの内部で生成され、参照マイクを必要としない。図 7(b)に、 W_F と G_F がフィードフォワードコントローラの一次特性と二次特性、 W_B と G_B がフィードバックコントローラの一次特性と二次特性、 G_{BF} がフィードバックコントローラの制御音源からフィードフォワードコントローラの誤差マイクまでの音響特性である。フィルタ $\hat{G}_F$ と $\hat{G}_B$ が事前に同定する G_F と G_B の推定値を表す。 C_F 、 C_B が各コントローラ内の適応フィルタである。フィードバックコントローラを動作させず、その誤差マイクで取った信号を直接にフィードフォワードコントローラに渡す場合に、フィードバックコントローラ誤差マイクをフィードフォワードコントローラの参照マイクと見なすことができる。そのため、フィードフォワードコントローラの参照信号として、フィードバックコントローラ所望信号の推定値 $\hat{d}_B$ を用いる。

Fig.7 Hybrid ANC system

4・2 実験によるハイブリッド ANC システムの検証

騒音制御実験により、ハイブリッド ANC システムの有効性を検証する。実験配置を図 8 に示す。制御対象騒音が音響的ソフト境界を回り込むことを避けるため、フィードバックコントローラを騒音源の近傍に配置する。二つの測定マイクをフィードフォワードコントローラの誤差マイクの横に配置し、誤差マイク以外の位置におけ

る制御効果を測定する。実験では、制御アルゴリズムとして、フィードバックコントローラに FB-FTF、フィードフォワードコントローラに Filtered-x LMS を用いる。サンプリング周波数を 20KHz、適応フィルタの長さを 128 とする。騒音信号として 1KHz までのランダムノイズを用いる。

各マイク位置の制御効果を図 9 に示す。結果から、以下のことが分かる。

- (1) 二つのコントローラの誤差マイクの位置において、ハイブリッド ANC システムは単独 ANC システムとほぼ同じ制御効果を得られている。
- (2) ハイブリッド ANC システムで制御することで、二つの測定マイクの位置において、フィードバックコントローラが生成した音響的ソフト境界のアクティブ遮音効果とフィードフォワードコントローラの消音効果が積み重なり、単独 ANC システムより高い減音量が得られている。

以上の結果により、提案システムの有効性が示された。

Fig.8 Experiment configuration

Fig.9 Noise attenuation in error microphones and measuring microphones

5. 結 語

本研究では、居室環境の静穏化を目的とし、低周波騒音に対しても遮音効果のある能動遮音壁を構築した。この遮音壁は先端部分にフィードバック ANC システムを用いた能動音響制御ユニットを付加し、音響的ソフト境界を生成することで、回折音を低減する。

まず、フィードバック ANC システムの制御効果を高めるため、FTF 適応アルゴリズムを導入した。シミュレーション結果から、300Hz~1kHz 帯域で FTF 用いたフィードバック ANC システムは LMS に比べ、制御効果が 11.23dB 高いことが分かった。

次に、数値計算と実験により、能動音響制御ユニットを付加した能動遮音壁の遮音効果を評価した。結果、制御を行うことで、315Hz から 1kHz までの 1/3 オクターブバンドにおいて、平均で 1dB 程度のアクティブ遮音効果を得られた。そして、500Hz と 800Hz 1/3 オクターブバンドにおいて、最大で 6dB のアクティブ遮音効果を得られた。

また、音響境界制御と特定の場所を消音する制御を同時に行うことができるハイブリッド ANC システムの提案を行った。このシステムはフィードフォワードコントローラとフィードバックコントローラの組み合わせであり、フィードフォワードコントローラの参照信号をフィードバックコントローラの内部で生成する。実験により、提案システムの有効性を検証した。結果から、ハイブリッド ANC システムで制御することで、二つのコントローラの制御効果が積み重なり、単独 ANC システムより高い制御効果を得られたことが分かった。

文 献

- (1) S. Kijimoto, I. Ikeda, and Y. Koba, "Noise Reduction with Active Noise Shielding System," Proc. ACTIVE 2009(CD-ROM), No.744 (2009)
- (2) 大西慶三, 寺西進, 西村正治, 他, "アクティブソフトエッジ遮音壁の基本コンセプトと無響室内実験による減音効果", 日本音響学会誌 57 巻 2 号(2001), pp. 129-138.
- (3) F. Ykhlef and M. Arezki, "Adaptive Noise Reduction Using Numerically Stable FRLS," *Int. J. Adapt. Control signal Process* 21 (2007), pp. 354-374.
- (4) D. Slock and T. Kailath, "Numerically Stable Fast Transversal Filters for Recursive Least Squares Adaptive Filtering," *IEEE Trans, Signal Processing*.39 (1991), pp. 92-113.
- (5) M. Kuo and R. Morgan, *Active Noise Control System: Algorithm and DSP Implementations*, John Wiley&Sons, Inc (1996), pp.195-200.
- (6) M. Nishimura, K. Fujita, "Active Adaptive Feedback Control of Sound Field", *JSME International Journal Series C* vol.37, No.3 (1994), pp. 607-611.