

単一周波数適応ノッチ型フィルタの多重化による複数の狭帯域周波数騒音フィードバック型 ANC 技術の構築

Development of Feedback Active Noise Control Technology for Noise in Multiple Narrow Frequency Bands by Multiplexing of Single-frequency Adaptive Notch Filters

坂本 浩介*

Kosuke SAKAMOTO

井上 敏郎*

Toshio INOUE

要 旨

自動車走行時に車室内には路面入力に起因する複数の狭帯域周波数騒音を成分としてもつ騒音が発生する。これは低周波ロードノイズなどと呼ばれ、快適性向上のため、低減が求められている騒音である。本研究では、フィードバック型制御技術をベースとし、複数の狭帯域周波数騒音を同時に低減可能とするアクティブノイズコントロール技術を構築した。適応フィルタの一種である単一周波数適応ノッチ型フィルタを複数用いて、その組み合わせ手法を検討した。その結果、フィルタを複数組み合わせることによって、コントローラ伝達特性において発生する相互影響を低減可能となる組み合わせ手法を考案した。これにより、複数の周波数帯域にて設計どおりの振幅と位相特性をもつコントローラを実現することができ、目標の騒音低減特性を得ることができた。

ABSTRACT

When vehicles are in motion, noise made up of noise in multiple narrow frequency bands, originating in input from the road surface, is generated in the cabin. This type of noise is termed low-frequency-band road noise, and it is desirable to reduce it in order to increase occupant comfort. The research discussed in this paper used feedback control technology as a base in the development of an active noise control technology able to simultaneously reduce noise in multiple narrow frequency bands. Methods of connecting multiple single-frequency adaptive notch filters, a type of adaptive filter, were studied. Based on the results, a method of connecting multiple filters that would mitigate mutual interference between controller transfer characteristics was proposed. This method made it possible to realize controllers with amplitude and phase characteristics in multiple narrow frequency bands corresponding to design values, and to obtain the target noise-reduction characteristic.

1. はじめに

自動車走行時に車室内にはさまざまな周波数成分で構成される騒音が発生する。Fig. 1 に 2 種類の荒れたコンクリート路面を一定速度で走行したときの室内音 (Sound Pressure Level: SPL) のスペクトラムを示す。路面入力に起因する 200 Hz 以下の騒音は低周波ロードノイズと呼ばれ、複数の狭帯域周波数騒音で構成される。圧迫感を伴う不快な騒音であることから、いずれの周波数帯も同時に低減することが求められている。一方で、アクティブノイズコントロール (Active Noise Control: ANC) 技術は大きな

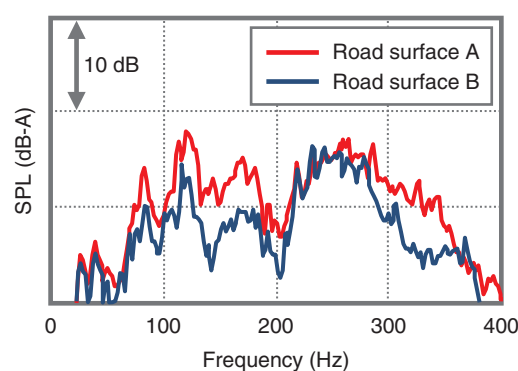


Fig. 1 Characteristics of interior noise

*四輪 R&D センター

質量増を伴わずに騒音を低減できる技術として、注目が集まっている。技術提案がなされ、すでに商品適用されている技術としては、低周波ロードノイズの一種であるドラミングを低減する ANC 技術⁽¹⁾⁻⁽³⁾、エンジンの燃焼に伴って発生するエンジンこもり音を低減する ANC 技術⁽⁴⁾⁻⁽⁷⁾、さらに、ドラミングとエンジンこもり音を同時に低減する統合化 ANC 技術⁽⁸⁾などが挙げられる。この統合化 ANC 技術は、適応フィルタの一種である単一周波数適応ノッチ型フィルタ (Single Frequency Adaptive Notch Filter: SAN 型フィルタ) をフィードバック制御に応用し、一つの狭帯域周波数騒音に対して目標の低減性能を得られるコントローラを実現している。フィードバック制御を用いることで、騒音源の信号を必要とするフィードフォワード型制御に比べ、少ないセンサで騒音低減を実現している。しかし、フィードバック制御にて複数の狭帯域周波数騒音を同時に低減する制御器を設計した例は少ない。そこで、SAN 型フィルタを応用し、複数の狭帯域周波数騒音を同時に低減可能なフィードバック型 ANC 技術を新たに構築し、次期モデルの車両に適用したのでその技術について示す。

2. 制御方式

2.1. フィードバック型 ANC の基本原理

Fig. 2 に一般的に用いられるフィードバック型 ANC のブロック図を示す。フィードバック型 ANC は制御工学における外乱抑制制御に相当する。これはスピーカ出力からマイクロホンまでの伝達関数をプラント C 、ベース騒音を外乱 d 、マイクロホンで検出される残留騒音を誤差信号 e として扱い、目標値 r をゼロと置くことでコントローラ G を設計する。これらの関係は以下の式で表現できる。

$$\frac{e}{d} = \frac{1}{1 + C(j\omega) \cdot G(j\omega)} \quad (1)$$

式 (1) は感度関数と呼ばれ、外乱抑制の周波数特性を表すものである。ここで ω は角速度であり、周波数 f を用いて、 $\omega = 2\pi f$ で表される。一例として、式 (1) の右辺の分母に注目して、 $C(j\omega) \cdot G(j\omega)$ が 1 となるような $G(j\omega)$ を設定したとき、感度は式 (2) に示され、

$$\frac{e}{d} = \frac{1}{2} \quad (2)$$

これは周波数 f において騒音を 6 dB 低減することを示す。逆に、 $C(j\omega) \cdot G(j\omega)$ が -1 に近づいた場合は、分母が 0 に近づくため、式 (3) に示すように、

$$\frac{e}{d} \rightarrow \infty \quad (3)$$

これは無限に騒音を増幅していることと同義であり、制御発散である。一般的に、 $C(j\omega)$ 、 $G(j\omega)$ はそれぞれ周波数 f に応じて変化するが、分母である $1 + C(j\omega) \cdot G(j\omega)$ がゼロ点に近づかないように $G(j\omega)$ を設定することが望ましい。

車両の音響特性をプラントとしたフィードバック制御のコントローラ設計について考察する。ここで車両における音響特性は、スピーカの出力特性とマイクロホンの検出特性、スピーカからマイクロホンまでの音響特性を含む。ここで、スピーカからマイクロホンまでの距離に起因する遅延時間であるむだ時間を含み、スピーカの構造に起因する共振特性、車室内が閉空間であることに起因する残響を持つことから、車室内の音響特性は一般的にむだ時間を含む高次数のプラントとなる。Fig. 3 に車両ドアに配置されたオーディオ用スピーカを入力、ルーフに配置された制御用マイクロホンを出力とする音響特性の一例を示す。振幅特性の山谷は高次数であることを表し、周波数が上がるにつれて変化する特性はむだ時間による遅延が表れている。フィードバック制御のコントローラ設計法としてはループ整形法、スミス法、 H_∞ 制御などが挙げられる⁽⁹⁾⁻⁽¹¹⁾。しかし、これらの手法は低次数のプラントに対する、低次数のコントローラ設計を基本としている。これらの報告では、制御対象の周波数帯にのみ着目して低次数のモデルでプラ

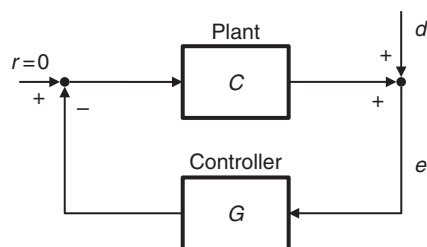


Fig. 2 Block diagram of feedback control

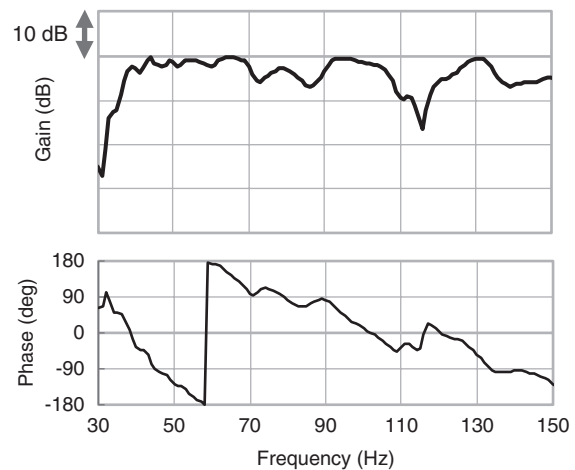


Fig. 3 Acoustic characteristic of automobile audio speaker

ントを近似して、これらのコントローラ設計法と組み合わせて制御効果を検討している。シミュレーション上にて、着目した特定周波数帯における制御効果を得られる見通しを得ている一方、実機ではこのモデル化誤差に起因する、外乱抑制特性の低下、外乱の増幅が発生しており、課題として報告されている。その上でこれを拡張し、複数の狭帯域周波数に対して同時に設計どおりの周波数特性となるコントローラを実現することは困難であると考えられる。

2.2. SAN 型フィルタによるフィードバック型 ANC

特定の狭帯域周波数の騒音を低減するため、SAN 型フィルタを応用したフィードバック型 ANC が提案されている⁽⁸⁾。これは特定の狭帯域周波数の信号を中心に抽出する信号抽出器と、振幅と位相を調整した基準信号発生器と、信号抽出器で得られた適応フィルタ係数と調整基準信号を掛け合わせて出力する調整器で構成される。Fig. 4 にそのブロック図を示す。

ここで、 A 、 B は信号抽出のための適応フィルタ係数、 ω は着目する周波数の角速度、 Φ_g は位相調整特性、 K_g は振幅調整器として示す。

また適応フィルタ A 、 B の更新式は以下で表される。

$$A_{n+1} = A_n - \mu \cdot e \cdot \cos(\omega t) \quad (4)$$

$$B_{n+1} = B_n - \mu \cdot e \cdot \sin(\omega t) \quad (5)$$

ここで、 μ はステップサイズパラメータと呼ばれ、適応フィルタの更新量を調整する係数である。この方式の特徴は、抽出する対象周波数の設定、位相および振幅の調整処理を容易に実現し、これらの処理を低演算負荷、低遅延で実現できることである。Fig. 5 に、この方式によるコントローラの周波数特性を示す。この図に示されるように、 μ を変更することで信号抽出における通過周波数の幅を調整できる。コントローラの設計は、 μ により通過周波数の幅を、 Φ_g により位相特性を、 K_g により振幅特性を独立に調整しておこない、 Φ_g と K_g は式 (1) と音響特性、目標低減量から一意に求められる。

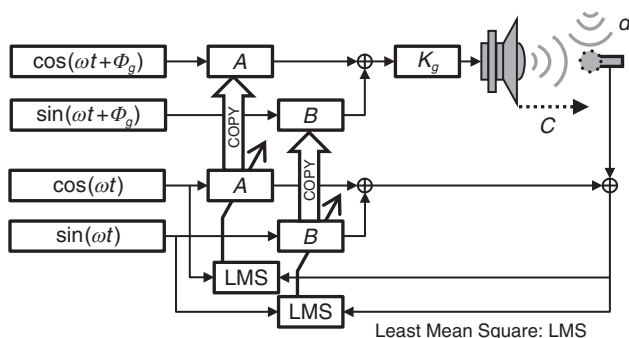


Fig. 4 Block diagram of SAN feedback control

2.3. SAN 型フィルタによるフィードバック型 ANC の周波数多重化

本研究は、SAN 型フィルタによるフィードバック型 ANC を応用して、複数の狭帯域周波数に同時に対応するための手法を検討した。SAN 型フィルタの信号抽出器と振幅位相調整器の二つを、単純に並列に接続することが第一に考えられる。簡略化のため、信号抽出をおこなう適応フィルタ係数を W 、基準信号を x 、位相調整量を Φ_g 、振幅調整量を K_g 、 Φ_g にて位相調整された補正基準信号を x' とする。Fig. 6 にそのブロック図を示す。

また、Fig. 4 のブロック図における変数との関係は以下で表現される。

$$W = A + j \cdot B \quad (6)$$

$$x = \cos(\omega t) - j \cdot \sin(\omega t) = e^{-j\omega t} \quad (7)$$

$$x' = \cos(\omega t + \Phi_g) - j \cdot \sin(\omega t + \Phi_g) = e^{-j\omega t - \Phi_g} \quad (8)$$

この方式は二つの SAN 型フィルタによるフィードバック型 ANC のコントローラ特性を足し合わせたものが全体のコントローラ特性となるため、容易に計算が可能であ

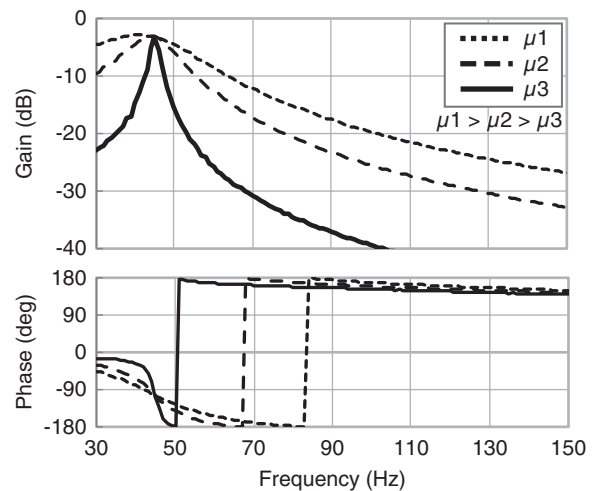


Fig. 5 Frequency response of SAN feedback controller

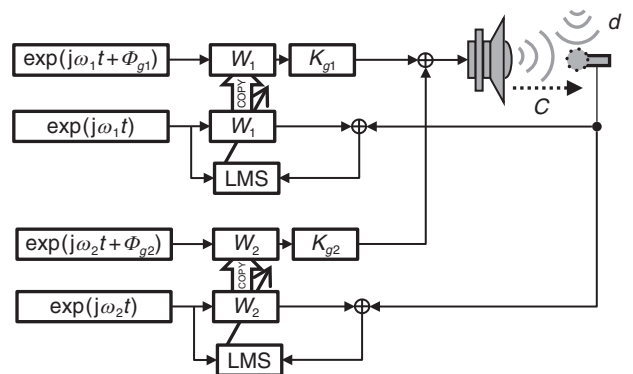


Fig. 6 Block diagram of parallel SAN feedback control

る。中心周波数を 45 Hz 帯と 125 Hz 帯とし、それぞれの中心周波数での低減目標を -4 dB として、コントローラ的设计をおこない、そのコントローラの周波数応答特性を計算により求めた。Fig. 7 にその特性を示す。45 Hz 帯の制御器のみの特性、125 Hz 帯の制御器のみの特性、それらを並列に接続したときの特性、の 3 種類である。

図より、単独の制御器で得られる周波数応答特性と、並列に接続したものの特性には差異が発生していることがわかる。これは、45 Hz 帯の制御器の 125 Hz での特性が、125 Hz 帯の制御器の特性に加わるためである。同様に、125 Hz 帯の制御器は 45 Hz 帯でのコントローラ特性を変化させる。これは設計どおりの周波数特性をもつコントローラを得られず、結果的に目標の低減量が得られないことを意味する。よって、一方の周波数帯の制御器が他方の周波数帯の特性に与える影響を緩和するロジックが必要である。SAN 型フィルタの信号抽出器としての特性を制御器間の干渉緩和に応用した 2 種類の方式を考案した。先述の並列接続に加えた 3 種類の制御方式について特性と効果を比較検討した。以下にその特徴を示す。

- (1) SAN 型フィルタによるコントローラを二つ並列に接続した方式をパラレル接続方式とした。コントローラ特性は二つのコントローラ特性の足し合わせで求めることができ、簡易な構造である。
- (2) 一方の SAN 型フィルタの抽出処理の残留信号を他方の SAN 型フィルタに対する入力として用いる方式をカスケード接続方式とした。一方の SAN 型フィルタの抽出処理の結果が一方に伝搬するため、SAN 型フィルタの抽出処理の相互干渉が発生する可能性が小さく、一方の周波数帯の制御器特性が他方の特性に与える影響の緩和を見込める。
- (3) 二つの SAN 型フィルタの信号抽出処理を統合した方式をコモン接続方式とした。SAN 型フィルタの抽出

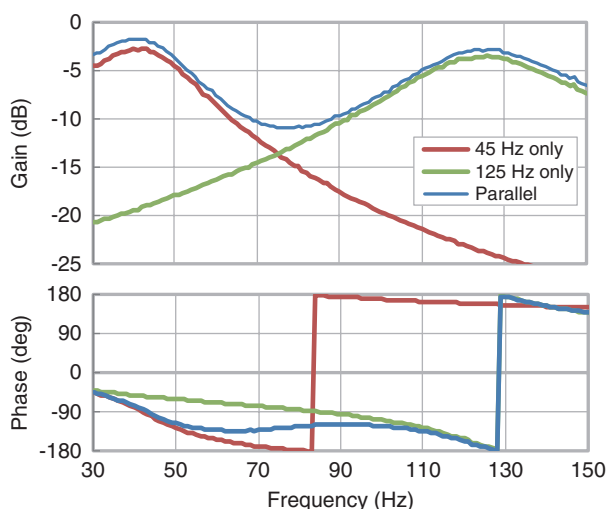


Fig. 7 Frequency response of parallel SAN feedback controllers

処理の相互干渉の可能性はあるが、双方の周波数帯の制御器特性の干渉の緩和を見込める。

Fig. 8 にカスケード接続方式、Fig. 9 にコモン接続方式のブロック図を示す。

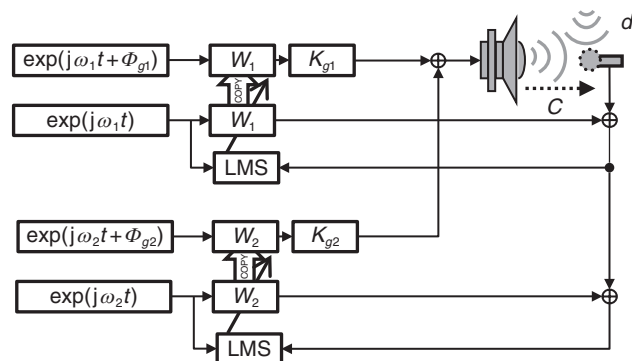


Fig. 8 Block diagram of cascade SAN feedback control

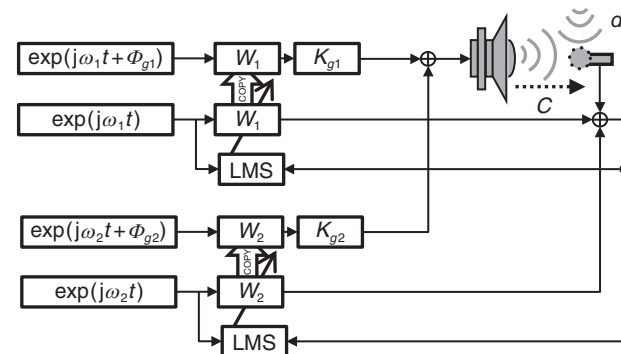


Fig. 9 Block diagram of common SAN feedback control

3. コントローラ特性の検証

3.1. コントローラシミュレーション

二つの周波数帯の制御器を組み合わせることによって発生する変化量の目標を ± 0.1 dB 以内とし、2 章において検討した三つの接続方式のフィードバック ANC について、2 章と同様の設計値でコントローラ的设计をおこない、設計値である振幅特そのコントローラ特性を計算により求めて検証をおこなった。Fig. 10 に示す。

このように、パラレル接続方式、カスケード接続方式ではコントローラ特性の設計値に対して、ずれが生じてしまう。一方、コモン接続方式では 45 Hz 帯、125 Hz 帯ともに設計どおりの特性を得ることができた。カスケード接続方式は 45 Hz 帯において設計どおりの特性が得られるものの、125 Hz 帯についてはずれが生じている。この結果から複数の SAN 型フィルタを組み合わせる際、コモン接続方式で抽出器を組み合わせることで、設計どおりのコントローラ特性を得られることがわかった。

3.2. コモン接続方式の詳細解析

コモン接続方式の妥当性を検証するため、Fig. 9 の図中に示されるコントローラゲイン K_{g1} , K_{g2} をそれぞれ 0 とおき、シミュレーションを用いて、45 Hz 帯の制御器のコントローラ特性と、125 Hz 帯の制御器のコントローラ特性を分解して求めた。これらと 45 Hz 帯と 125 Hz 帯の同時制御をおこなうコモン接続方式のコントローラ特性と比較した。Fig. 11 にその結果を示す。

125 Hz 帯における 45 Hz 帯の制御器のコントローラ特性と 125 Hz 帯のコントローラ特性を比較すると、振幅特性が 40 dB 以上減衰しており、差異は 1% 以下となっている。つまりコントローラ特性の設計値に対する差異としては ± 0.1 dB 以内に抑えることができています。平行接続方式では 20 dB 程度の減衰であり、コントローラ特性を足し合わせると 10% 程度のずれが発生していた。コモン接続方式は、それぞれの周波数帯での特性に対する相互影響を低減した上でコントローラ特性を足し合わせることと同様の効果があり、設計どおりのコントローラ特性を得ることができたと考察する。

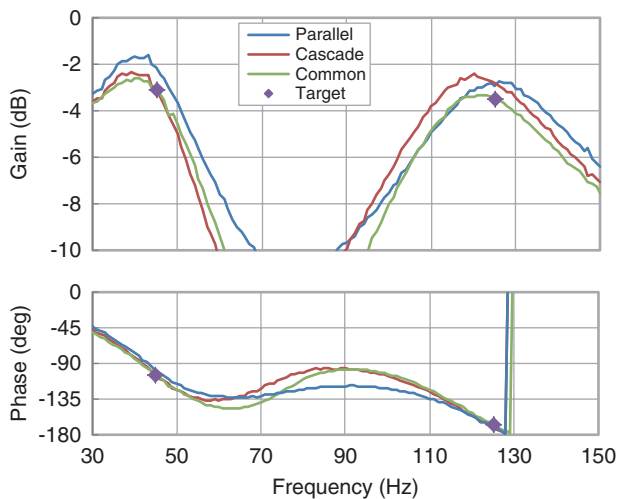


Fig. 10 Frequency response of three connection types

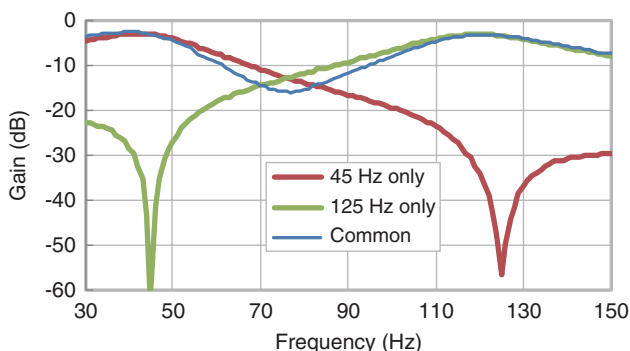


Fig. 11 Frequency response of decomposed common error-type SAN feedback controller

3.3. 従来手法による実現性の検証

一般的に用いられるデジタルフィルタである Finite Impulse Response (FIR) 型フィルタと Infinite Impulse Response (IIR) 型フィルタでの実現性の確認のため、SAN 型フィルタの置き換えを検討した。各係数は、コモン接続方式によるコントローラ特性を 20 Hz から 200 Hz までの重み付けによる最小二乗法を用いて求めた。Fig. 12 にその結果を示す。800 タップのフィルタ長となる FIR 型フィルタを適用しても、図で示されるような特性となり、IIR 型フィルタでは安定となるフィルタ係数を得ることができなかった。よって、SAN 型フィルタを二つ組み合わせる本方式は少ない演算で設計どおりのコントローラ特性を得ることができ、従来手法に対して優位性があると考えられる。

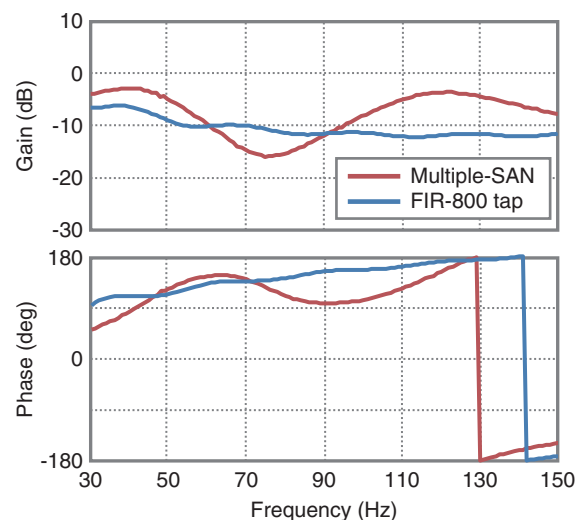


Fig. 12 Frequency response of multiple SAN filters and FIR filter

4. 制御性能

本技術を車両に適用したときの制御性能を確認した。騒音低減目標を 45 Hz 帯においては -4.5 dB、125 Hz 帯においては -3 dB とし、Fig. 3 に示される音響特性に対して、フィードバック制御のコントローラを設計した。Fig. 13 にシミュレーションにより求めた開ループ特性を示す。図よりゲイン余裕が確保できていることから、このコントローラは安定であることがわかる。また、Fig. 14 に感度関数を示す。45 Hz 帯と 125 Hz 帯にて目標となる低減特性を実現している。制御設計によって得られたコントローラを車両に適用し、制御性能を確認した。Fig. 15 に荒れたコンクリート路を 60 km/h にて走行した際の騒音計測結果を示し、Fig. 16 に荒れたアスファルト路を 40 km/h にて走行した際の騒音計測結果を示す。この結果から、本提案手法は 45 Hz 帯と 125 Hz 帯の狭帯域周波数騒音を同時に低減

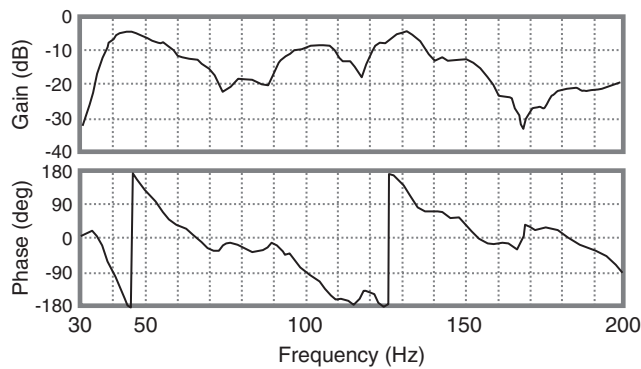


Fig. 13 Open loop function of common error-type SAN feedback controller

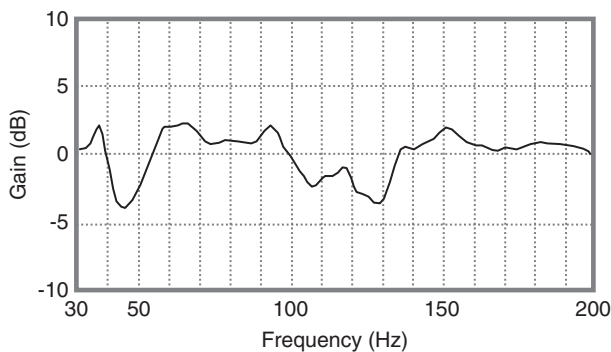


Fig. 14 Sensitivity function of common error-type SAN feedback controller

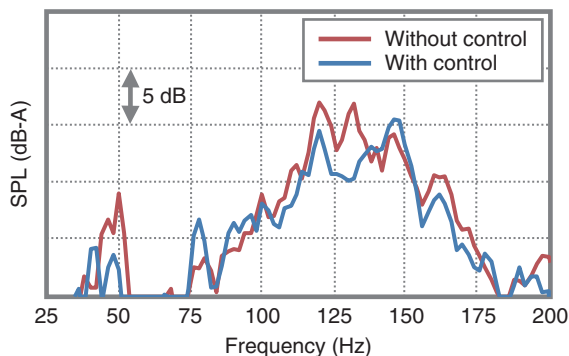


Fig. 15 Control performance 1 of common error-type SAN feedback controller on rough concrete surface

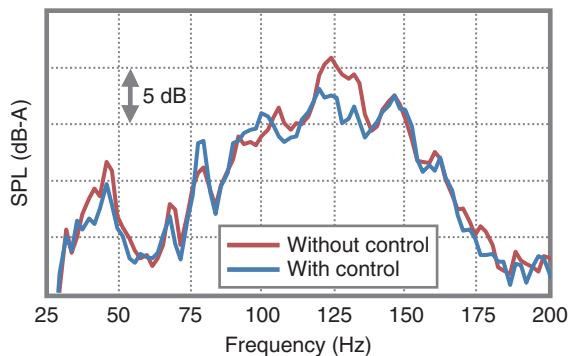


Fig. 16 Control performance 2 of common error-type SAN feedback controller on rough asphalt surface

しており、また感度関数と同等の制御性能が得られていることが確認できた。

5. まとめ

SAN 型フィルタによるフィードバック ANC を応用して、複数の狭帯域周波数の騒音を同時に低減可能な技術を構築した。車両によって異なる騒音の周波数特性と音響特性にあわせてコントローラ特性を調整することが容易であり、目標の制御特性を安定的に得ることが可能となった。本稿では二つの SAN 型フィルタを組み合わせた検討結果を示したが、三つ、またはそれ以上の SAN 型フィルタをコモン接続方式で組み合わせることで、三つ以上の狭帯域周波数騒音低減も対応可能である。

参考文献

- (1) 佐野久, 井上敏郎, 高橋彰, 石原大, 山下剛, 寺井賢一: オーディオシステムと結合した低周波ロードノイズのアクティブ制御システムの開発, HONDA R&D Technical Review, Vol.12, No.2, p.71-80
- (2) 井上敏郎, 佐野久, 高橋彰, 山下剛, 石原大, 中村光勇, 寺井賢一, 中村由男: 低周波ロードノイズのアクティブ制御システムの開発, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.111-00, p.13-16(2000)
- (3) Sano, H., Inoue, T., Takahashi, A., Terai, K., Nakamura, Y.: Active control system for low-frequency road noise combined with an audio system, Speech and Audio Processing, IEEE Transactions on, Vol. 9, Issue 7, p. 755-763(2001)
- (4) 井上敏郎, 高橋彰, 箕輪聡, 佐野久: エンジンこもり音低減のためのアクティブ騒音制御システムの開発, Honda R&D Technical Review, Vol.15, No.2, p.201-208
- (5) 井上敏郎, 高橋彰, 箕輪聡, 佐野久, 大西将秀, 中村由男: 適応ノッチフィルタを応用したアクティブこもり音制御システムの開発, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.84-03, p.1-4(2003)
- (6) 井上敏郎: 車両のアクティブ騒音制御技術について, 自動車技術会シンポジウムテキスト (環境と振動騒音との両立), No.08-10, p.26-31(2010)
- (7) 井上敏郎: 自動車への標準適用を実現した車室内音のアクティブ制御技術, 騒音制御, vol.34, No.5, p.336-341(2010)
- (8) 井上敏郎, 高橋彰, 坂本浩介, 小林康統: 低周波音低減のための統合 ANC 技術の開発, Honda R&D Technical Review, Vol.23, No.2, p.113-120
- (9) Widrow, B., Stearns, S. D.: Adaptive Signal Processing, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey(1985)

- (10) Adachi, S., Sano, H.: Modeling, control and experiment of a feedback active noise control system for free sound fields, JSME International Journal, Series C, 45-2, p. 409-416(2002)
- (11) Nishida, T., Sakamoto, K., Inoue, T., Adachi, S.: A comparative study of feedback active noise control for low frequency noise, The SICE Annual Conference(2013)

■ 著 者 ■



坂本 浩介



井上 敏郎