

低周波音低減のための統合 ANC 技術の開発

Integrated Active Noise Control System for Low-frequency Noise in Automobiles

井上 敏郎*

Toshio INOUE

坂本 浩介*

Kosuke SAKAMOTO

高橋 彰*

Akira TAKAHASHI

小林 康統*

Yasunori KOBAYASHI

要 旨

Honda では二つの Active Noise Control (ANC) 技術を開発し、多くの商品に標準仕様として適用してきた。一つはフィードバック制御を応用したドラミング低減技術、もう一つはエンジン回転信号を参照信号とするフィードフォワード制御を応用したエンジンこもり音低減技術である。これらの技術は、制御システム間で互いに干渉するという課題やフィードバック制御の安定性確保という課題があるために統合したシステムとして実現していない。本研究では、これらの課題を解決可能な新しいドラミング制御技術を構築し統合 ANC システムを開発した。本研究にて開発した新 ANC システムは、いくつかの商品に適用した。

ABSTRACT

Honda has developed two Active Noise Control (ANC) technologies, and has employed them as standard in a large number of vehicles. One of these technologies is a drumming reduction technology that employs feedback control, and the other is an engine booming noise control technology that employs feed forward control, which uses the engine speed signal as a reference signal. These technologies have previously not been combined to produce an integrated system due to issues of mutual interference between the control systems and stability in the feedback control. The research discussed in this paper created a new drumming control technology that resolved these issues, and developed an integrated ANC system. The new ANC system developed in the research has been employed in a number of vehicles.

1. はじめに

近年、地球環境保護の観点から自動車の環境性能や燃費性能向上に対する要求はますます高くなり、車輛の軽量化技術と合わせパワートレインの燃費向上技術が盛んに商品適用されている。一方、商品競争力の一つである振動騒音性能向上の要求も高くなっている。しかし、車輛の振動騒音対策、特に低周波事象の対策は、車輛の重量増加を伴うことから先の燃費性能向上という要求と相反することが多い。相反する理由としては、一般的にパワートレインの燃費改善技術は従来に比較して低いエンジン回転数領域を頻度高く使用する技術が多い。そのため、低周波数領域の吸排気音やエンジン振動の増加を伴うことが多い。この振動騒音増加の対策のために従来からのパッシブ技術である吸排気システムの消音ボリュームの拡大、車体への剛性部材やダンピング部材の追加、また、特定周波数の振動低減のためのダイナミックダンパの追加などを施すことは車輛の重量増加を伴うことが多いためである。そこで、重量増加

の少ない低周波数領域の振動騒音対策技術が求められている。Honda では、燃費性能と振動騒音性能の両立のために 2 種類の ANC 技術の開発に取り組み、開発した技術を多くの商品に標準仕様として適用してきた。一つ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技術⁽¹⁾⁻⁽³⁾、もう一つはエンジンこもり音を低減する技術⁽³⁾⁻⁽⁵⁾である。Fig. 1 はうねりのある路面を 50 km/h 一定で走行したときの室内音のスペクトラムを表している。ドラミングとエンジンこもり音は車室内に同時に発生する事象である。そのため、同時に制御可能な制御技術の構築が求められてきた。また、システムコストを最小限に抑えるために制御システムの統合化が望まれてきた。しかし、これら二つの ANC システムを統合する場合、それぞれの制御手法の違いから制御器間の干渉や安定性の課題があり、これまで一体化した ANC システムとすることができなかった。本稿では、これらの技術課題を解決する新しいドラミング ANC 技術とそれをこもり音制御技術と統合化した統合 ANC 技術の概要について示す。

*四輪 R&D センター

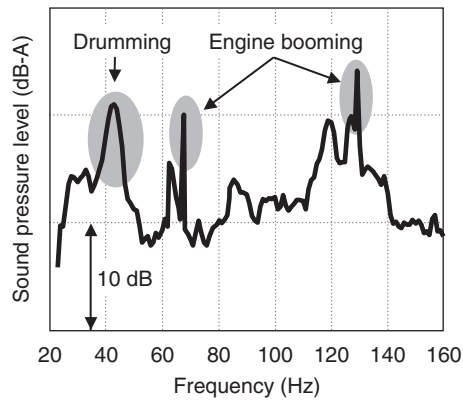


Fig. 1 Frequency characteristic for drumming and engine booming noise

2. 従来技術概要

2.1. ドラミング ANC

2.1.1. ドラミングの特徴

Fig. 2 は車室内音場を有限要素法によりモデル化し固有値解析をすることにより得られる音響固有モードである。走行中に路面からの入力が入力サスペンションを介して車体に伝わり、この音響固有モードが励起されることでドラミングは発生する。この現象はキャビン長が音の波長の 1/2 となる周波数で起こるもので、乗用車においてはおよそ 40 Hz となる。Fig. 3 に荒れた路面を走行中の前席付近の音圧スペクトラムを示す。ドラミングは周波数幅が 8 Hz から 10 Hz 程度の帯域幅を持つ狭帯域事象であることがわかる。

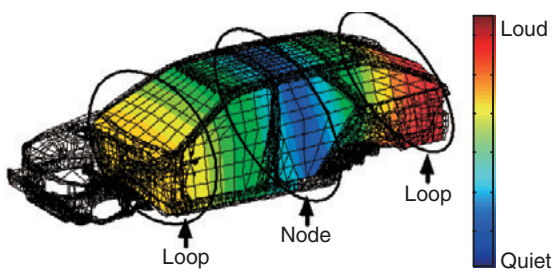


Fig. 2 Acoustic modes of station wagon

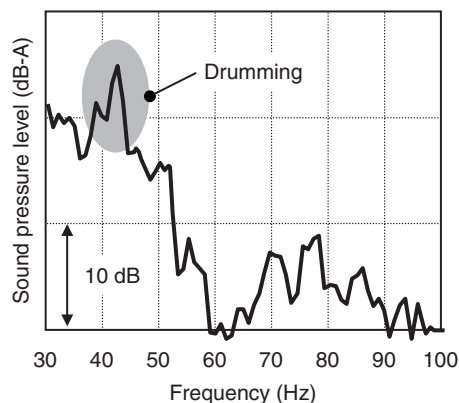


Fig. 3 Frequency characteristic for drumming

2.1.2. 従来ドラミング ANC システム

ドラミング ANC のシステム構成を Fig. 4 に示す。図に示すとおり、コントロールユニット (Electronic Control Unit: ECU) は運転席シート下に配置した。制御手法は、車室内の音を基に制御信号を出力するフィードバック制御を用いている。すなわち、ECU はいくつかのアナログ回路を組み合わせたドラミング制御フィルタとスピーカ駆動用のアンプおよびマイクロホンで構成され、マイクロホンで検出した室内音信号はドラミング制御フィルタを通過することでドラミングを打ち消す制御信号に変換されアンプで増幅しスピーカを介して車室内に発せられる。

2.1.3. 従来ドラミング ANC の制御技術

Fig. 5 にドラミングを制御するためのマイクロホンと制御フィルタおよびオーディオと共用するスピーカによるフィードバック (以下 FB) 制御のブロック線図を示す。FB-ANC は制御工学における外乱抑圧制御に相当する。すなわちスピーカからマイクロホンへの伝達関数である車室内音場をプラント C としてその出力に外乱である騒音 d が加わったとき、コントローラ G によってこれを低減することが制御目的である。制御結果の残信号を e としたとき e/d を感度関数 S と呼ぶ。 S が 1 以下となることは騒音を低減できることと等価である。 S は式 (1) のように表せる。 S を小さくするために、制御対象周波数 ω において一巡伝達関数 $L(j\omega) = C(j\omega)G(j\omega)$ のゲインをできるだけ大きく位相が 0° になるようにコントローラ G を調整する。例えば、 $|L(j\omega)| = 1$, $\angle L(j\omega) = 0^\circ$ のとき S は式 (1) より 1/2 となり、騒音を 6 dB 低減できることになる。

$$S = \frac{1}{1 + C \cdot G} \quad (1)$$

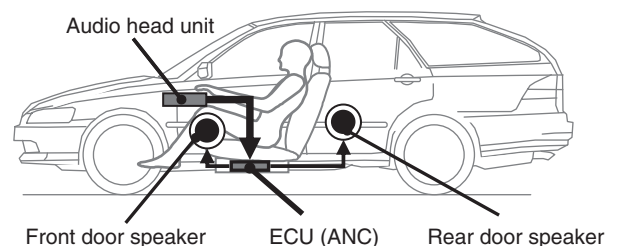


Fig. 4 On-board system configuration of drumming ANC

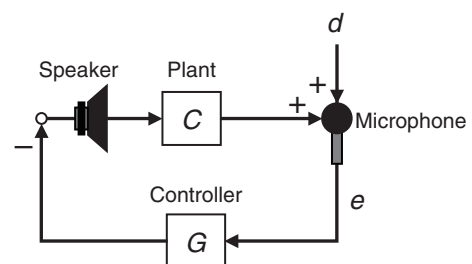


Fig. 5 Block diagram of feedback ANC

コントローラ G は、マイクロホン信号が全周波数成分の信号を含むことから、制御対象帯域において一巡伝達関数 L のゲインをできるだけ大きく位相を 0° に調整すると同時に、安定性を確保するために高域を低減させる、つまり、ローパスな特性となるように調整する。一巡伝達関数の整形結果の一例を Fig. 6 に示す。制御対象帯域である 40 Hz 付近が約 6 dB となっていることから式 (1) より約 10 dB 程度のドラミングを低減する効果が期待できると同時に、位相余裕が約 90° 、ゲイン余裕が約 12 dB であることから安定性が確保されていることがわかる。

2.2. エンジンこもり音 ANC

2.2.1. エンジンこもり音の特徴

Fig. 7 は車両が加速走行している時の室内音を示している。図において、色が濃いほど騒音が大きい。図中央の騒音の高い部分がエンジンこもり音である。この図からエンジンこもり音成分は、エンジン回転に同期して周波数が高くなると同時に、単一周波数の騒音であることが確認できる。つまり、こもり音は正弦波に近い騒音波形となるため、これを低減するための打ち消し音も騒音と逆位相の正弦波に近い波形となることがわかる。

2.2.2. エンジンこもり音 ANC システム概要

Fig. 8 にシステム構成を示す。本システムは ECU、ループの前と後に配置されたマイクロホンユニット、ECU か

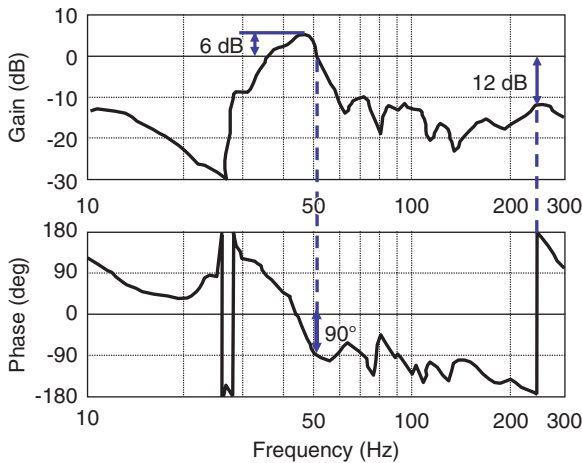


Fig. 6 Bode plot of open loop transfer function

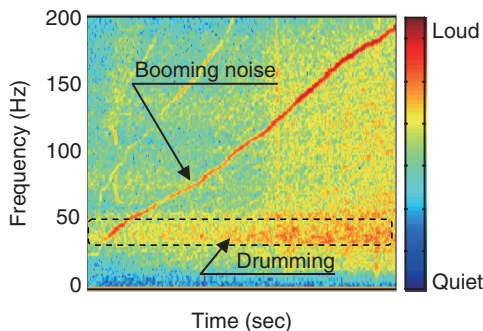


Fig. 7 Contour map of noise inside cabin

らの制御音信号の入力端子を設けたオーディオユニット、オーディオと共用使用するスピーカから構成される。ループの前に配置したマイクロホンユニットは、ハンズフリーテレホンやナビゲーションシステムの音声認識機能のためのマイクロホンと機能統合されている。制御手法はエンジン回転信号を参照信号とするフィードフォワード制御を用いている。すなわち、ECU への入力信号は、エンジン燃焼状態を制御する ENG-ECU からのエンジン回転パルス信号 Number of Engine Pulse (NEP) と車室内騒音を検出するためのマイクロホン信号である。出力信号はオーディオシステムと共用使用するアンプを介してスピーカを駆動するための制御信号である。

2.2.3. エンジンこもり音制御技術

こもり音は単一周波数の事象であるため Fig. 9 に示すように複素平面上に表せる。図より、実軸と虚軸に相当する基準信号、すなわち R_X 信号と R_Y 信号を用いれば、打ち消し音信号は R_X 信号の振幅 A と R_Y 信号の振幅 B を用いて作り出せることがわかる。本手法は直交した基準信号を内部生成しその振幅に相当する適応ノッチフィルタ A, B を適応動作させる Single-frequency Adaptive Notch (SAN)⁽⁶⁾ 制御を Filtered-x SAN に拡張し、エンジン回転数変化に高速に追従してこもり音を低減する。本手法では、音響特性 $\hat{c}$ (インパルス応答) を式 (2) のように周波数分解し $\hat{C}$ として周波数に対するテーブルとして保持し制御周波数に応じた値を読み出して演算に用いる。 j は虚数単位とする。

$$\hat{C}(f) = C_R(f) + j \cdot C_I(f) \quad (2)$$

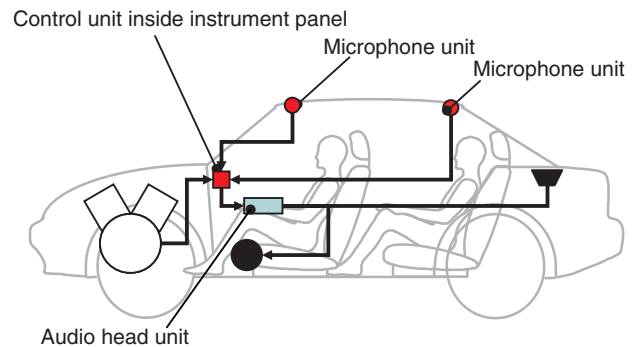


Fig. 8 On-board system configuration of engine booming ANC

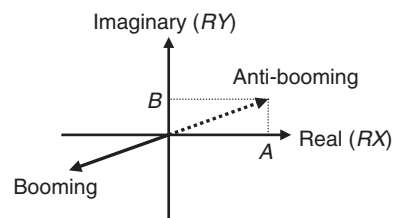


Fig. 9 Polar coordinates of booming noise

参照信号 RX に対する Filtered- x 部の演算は式 (3) のように表せる。

$$\hat{C}(f) \cdot RX = C_R(f) \cdot RX + C_I(f) \cdot RY \quad (3)$$

式 (3) では、 RY は RX に対して 90° 位相が進んだ信号であることから、 $j \cdot RX = RY$ となることを利用している。同じように、参照信号 RY に対しては式 (4) となる。

$$\hat{C}(f) \cdot RY = C_R(f) \cdot RY - C_I(f) \cdot RX \quad (4)$$

式 (3)、(4) を用いて実現させたこもり音制御ブロック線図を Fig. 10 に示す。この手法の特徴は、計算量の多い畳み込み (ベクトル) 演算を用いずスカラー演算のみで実現させた点であり、これにより現在では安価となったマイコンでの実現を可能にした。

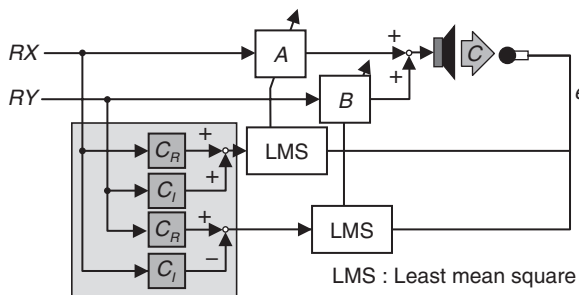


Fig. 10 Block diagram of frequency-filtered reference SAN algorithm

3. 低周波音統合制御技術

3.1. 二つの制御技術を統合するための課題

エンジンこもり音制御技術は安価なマイコンによるデジタル処理技術を利用している。よって、複数の車輻への適用に際してはメモリの制御パラメータを書き換えることで対応することができ、それによりハードウェアを共通化することで生産コストを低く抑えることが可能となる。一方、従来のドラミング制御技術はアナログ回路での実現のため複数の車輻への適用に際しては機種ごとに回路構成を見直す必要が発生するためハードウェアの共通化は困難であった。そこで、ドラミング制御技術をデジタル制御化しパラメータ調整のみによる開発に置き換えると同時にこもり音制御技術と統合化する技術を新たに構築した。

3.1.1. ドラミング制御のデジタル化に関する課題

ドラミング制御 ANC は従来技術概要でも示したようにフィードバック制御を用いている。フィードバック制御は Fig. 5 のように一巡伝達関数 $L (=CG)$ を級数とする等比級数と等価である。つまり、一巡伝達関数が 0° 付近の周波数帯では騒音を低減できるものの 180° 付近の周波数帯では増音することになる。制御対象となる車室音場はスピーカとマイクロホンを同一点に配置できないため必ず位相遅れ

を持つ特性となることから、ドラミング周波数帯域で 0° に調整しても高域では必ず 180° となる帯域が発生する。これにより Fig. 11 に示すように制御周波数から周波数が離れることで効果帯域と増音帯域を繰り返すウォータベッド効果が発生する。そこでフィードバック ANC においては、増音抑制のためにバンドパスフィルタや高域の低減のためのローパスフィルタを用いてウォータベッド効果の影響が小さくなるように制御フィルタを設定し安定化を図る。この制御フィルタをデジタルフィルタで実現させる場合の課題を示す。

(1) Finite Impulse Response (FIR) フィルタを用いる場合の課題 エンジンこもり音 ANC はエンジン回転数変化に高速で追従するために制御するこもり音の周波数に対し高いサンプリング周波数で動作させる。高いサンプリング周波数を維持しつつ周期の長い低周波を制御するフィルタを FIR で実現する場合、フィルタ長が長くなる (フィルタ係数の要素数が増える)。FIR フィルタによるフィルタリング処理は、フィルタ係数ベクトルと入力信号ベクトルの内積をサンプルごとに実行するためフィルタ長が長くなると計算量が増加する。そのため安価なマイコンでの実現が困難となる。

(2) Infinite Impulse Response (IIR) フィルタを用いた場合の課題 高いサンプリング周波数を維持しつつ低周波の調整をするフィルタを IIR フィルタで実現する場合、フィルタ係数値が小さくなる。そのため固定小数点演算を基本とする安価なマイコンでは計算精度の点で実現性が困難になる。

これらデジタルフィルタの課題より、従来のドラミング ANC の制御フィルタを単純にデジタルフィルタ化することは困難であった。

3.1.2. 二つの制御器が干渉するという課題

(1) ウォータベッド効果のこもり音への影響 エンジンこもり音はエンジン回転数の変化に同期して周波数が変化する。よって、ドラミング ANC によるウォータベッド効果の増音帯域にこもり音の周波数が重なるときこもり音が増音する。

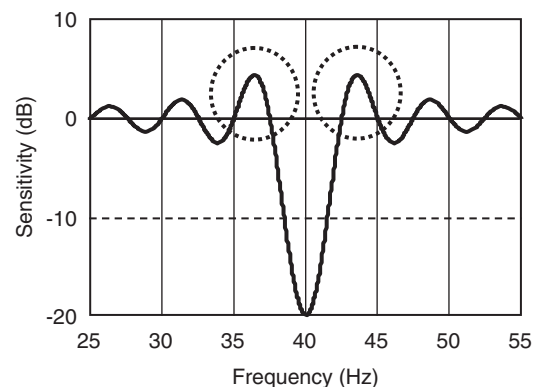


Fig. 11 Waterbed effect

(2) こもり音制御器から見た音場特性の変化 ドラミング ANC もエンジンこもり音 ANC もスピーカからマイクロホン（正確にはマイコンの出力から入力）までの伝達特性をデータとして保持し制御に用いる。よって、統合化する際には互いの制御器から見た伝達特性の変化を加味しなければならない。

これら制御器が干渉するという課題のため、従来の二つの ANC 技術を単純に統合化することは困難であった。

3.2. 新ドラミング制御技術

ドラミング制御技術をデジタル制御化する手法を示す。フィードバック制御を用いる場合、3.1.1. 項で示したようにウォータベッド効果の影響を考慮して安定性を確保するためにローパスフィルタやバンドパスフィルタを組み合わせた制御フィルタを構築することが一般的である。この手法の場合、こもり音制御との統合化という点で課題がある。そこで、固定フィルタをデジタル化する方法を用いるのではなく、Fig. 12 に示すようにマイクロホン信号からドラミングのみを抽出し、その信号を一定のゲインと位相特性で調整し出力する新しいドラミング制御手法を提案する。マイクロホン信号からドラミングを抽出するために、エンジンこもり音制御でも用いている SAN 制御を応用する。ドラミングとエンジンこもり音との違いはその帯域の広さである。つまり、エンジンこもり音は単一周波数信号として扱えるのに対し、ドラミングは 8 Hz から 10 Hz 程度の狭帯域ではあるが帯域を持つ事象であるということである。そこで、SAN の制御帯域を広げる手法を考える。Fig. 13 に示す SAN の制御ブロック線図において、出力信号は式 (5) となる。ここで ϕ は Fig. 13 の振幅 A と B の大きさにより決まる位相特性を表している。

$$Out = \sqrt{A^2 + B^2} \cos(\omega \cdot t + \phi) \quad (5)$$

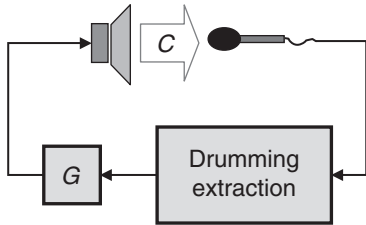


Fig. 12 Block diagram of drumming ANC

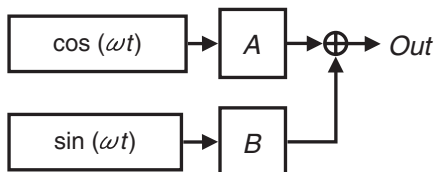


Fig. 13 Block diagram of SAN

なお、適応フィルタ A, B の更新式は式 (6), (7) となる。

$$A_{n+1} = A_n - \mu \cdot \cos(\omega t) \cdot e \quad (6)$$

$$B_{n+1} = B_n - \mu \cdot \sin(\omega t) \cdot e \quad (7)$$

ここで μ はステップサイズパラメータを表す。式 (5) において、 A, B が一定値の時、出力信号 Out は基準周波数 ω の信号となる。しかし、 A, B が式 (8), (9) に示すように ω_a で振動しているとき、出力信号は式 (10) で表せる。

$$A = Q \cdot \cos(\omega_a t) \quad (8)$$

$$B = Q \cdot \sin(\omega_a t) \quad (9)$$

$$Out = Q \cdot \cos\{(\omega - \omega_a) \cdot t\} \quad (10)$$

式 (10) より出力信号 Out は $\omega - \omega_a$ の周波数の信号となる。つまり、 A, B が 1 Hz で振動すれば SAN を動かす基準信号 ω に対して 1 Hz ずれた信号を出力することができる。 ω_a は Fig. 14 に示す極座標において時計回りに A, B が回るときはプラスの値を、反時計回りのときはマイナスの値となる。適応フィルタ A, B を振動させるために式 (6), (7) に示す μ を調整する。Fig. 15 に示す信号処理シミュレーションにより得られる出力信号の周波数特性を Fig. 16 に示す。図より、 μ が小さいほど周波数幅が狭く、 μ が大きいほど周波数幅が広くなることがわかる。ここに示した SAN を応用したドラミング ANC のブロック線図を Fig. 17 に示す。図の ω はドラミングの中心周波数に相当する。また、 ϕ_a はドラミングを制御するための位相を示してお

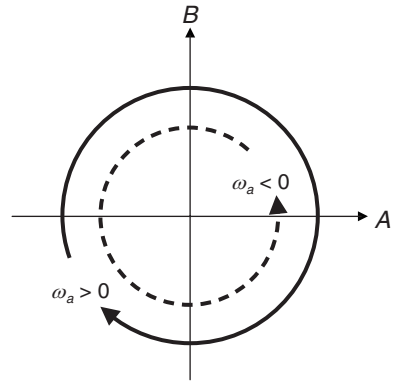


Fig. 14 Polar coordinates of gain coefficient

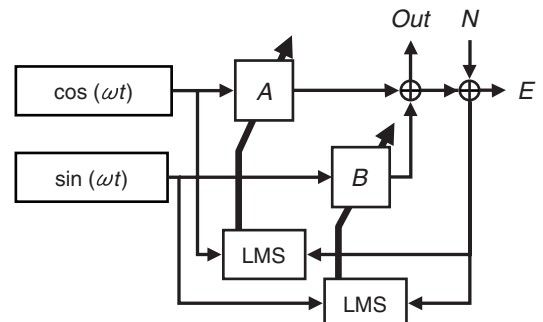


Fig. 15 Block diagram of signal extraction

り、この位相はスピーカからマイクへの伝達特性において信号がマイクロホンに到達したときに 180° となる位相に相当する。 G_d はドラミングを制御するためのゲインを示しており、低減目標量に応じて調整するパラメータである。例えば、 ω におけるスピーカからマイクロホンへの伝達特性と掛け合わせたときに 0 dB となる G_d を選べば、式 (1) に従い 6 dB の低減が期待できる。

3.3. こもり音制御技術の統合化

3.3.1. エンジンこもり音の増音の除去

新ドラミング ANC は SAN を応用した狭帯域のバンドパスフィルタを利用する。中心周波数 ω ではドラミングと

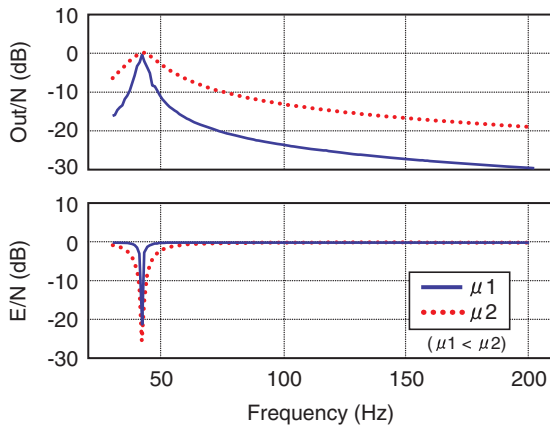


Fig. 16 Effect of signal extraction

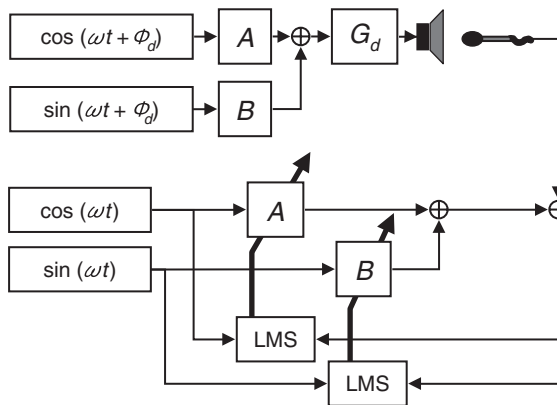


Fig. 17 Block diagram of drumming ANC using SAN

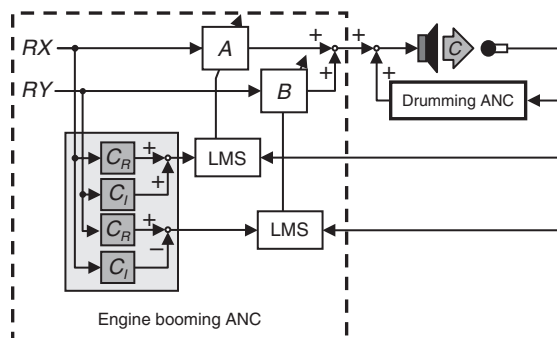


Fig. 18 Block diagram of integrated ANC

の位相差は 0° となるが、その上下の周波数域では大きく位相が変化する。そのため、ウォータベッド効果の影響を受ける。このウォータベッド効果による増音周波数帯域にエンジンこもり音周波数が重なるときこもり音を増加させてしまう。このエンジンこもり音のウォータベッド効果の影響を除去するために SAN を応用してマイクロホン信号から信号処理上でこもり音成分を除去する。この除去の効果は Fig. 15 に示すブロック線図のノイズ N に対する E として表すことができ Fig. 16 の下段に相当する。

3.3.2. ドラミング ANC による $\hat{C}$ 変化の設定

Fig. 18 に示すようにエンジンこもり音 ANC とドラミング ANC を統合する。エンジンこもり音 ANC はその制御アルゴリズムから見た出力と入力との伝達関数を $\hat{C}$ として制御パラメータとして保持するためドラミング ANC による $\hat{C}$ の影響分を加味した設定が必要となる。

4. 低周波音の統合制御システム

Fig. 19 にシステム構成を示す。エンジンこもり音 ANC ではエンジン回転数により動作と非動作を切り替える。また、ドアが開いている状態では閉じている状態と比較しスピーカとマイクロホンの距離が変わることで $\hat{C}$ が変化するため動作を停止させる仕様となっている。同じようにドラミング ANC ではフィードバック制御を用いているので停車している状態では市場での安定性向上の観点で動作を停止させる仕様とした。さらに、ドアの開閉のみならずトランクの開閉にも連動して動作状態を切り替える必要がある。なぜなら、音場の特性変化の影響によりドラミングの中心周波数が変化するためである。このように動作状態の切り替えのための制御信号が増える場合、Fig. 8 のようなこれまでのアナログ信号での通信では信号の数に応じてハーネス数や ECU のカプラサイズ変更の必要性が発生する。そのため機種間のハードウェアを共通化することが困難となる。そこで本システムでは車輦側情報を Control Area Network (CAN) からデジタル通信で ECU に取り込むこととした。新たに構築した統合 ANC システムの制御

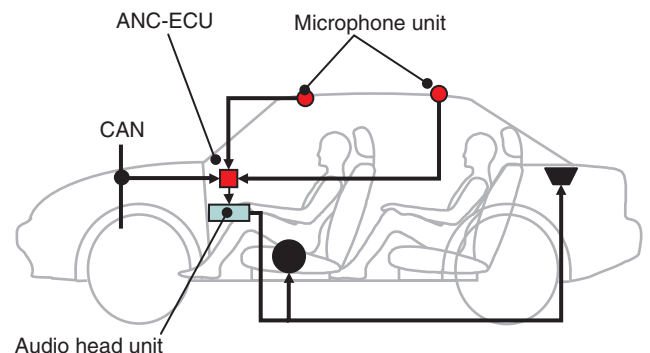


Fig. 19 On-board system configuration of integrated ANC

ブロック線図を Fig. 20 に示す. ここに示す制御システムに加え CAN 通信で得られる走行中のパワートレインの状態や車速など車輛の状態に関する情報を用いて加速中の車室内加速サウンドコントロール機能⁽⁷⁾⁻⁽⁹⁾をギヤ段ごとに調整する機能向上および AWD 車や FR 車のリヤのデフレレンシャルのアンバランスに起因するこもり音をプロペラシャフトの回転次数音として同時に低減する新機能を構築し搭載した.

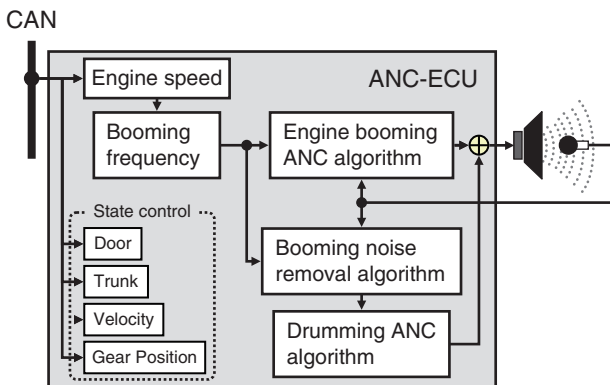


Fig. 20 Block diagram of on-board system for integrated ANC

5. 適用効果

5.1. 新ドラミング ANC の制御効果

Fig. 21 および Fig. 22 に荒れた路面を走行したときの新ドラミング ANC の制御効果を示す. Fig. 21 は数秒間の時間平均の周波数スペクトラムである. 図より約 6 dB の低減効果がある. また, Fig. 22 は高速道路などにある路面の継ぎ目を乗り越す時に路面から受けるインパルス入力により発生する室内音の時系列信号の制御効果を示している. 図から新ドラミング制御技術はインパルスの入力による室内音に対してもドラミング成分の音を低減できることから充分な追従性能を有していることがわかる.

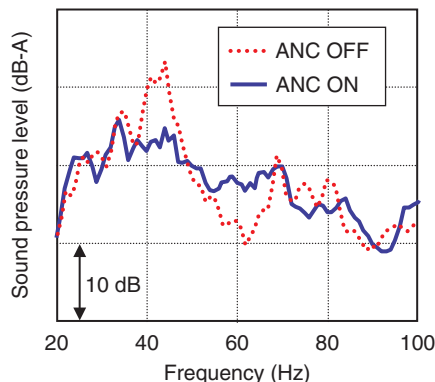


Fig. 21 Drumming reduction effect of developed drumming ANC

5.2. 統合 ANC システムの制御効果

Fig. 23 にエンジンこもり音制御効果を示す. 従来システムと同様, ねらいとする次数成分を約 10 dB 程度低減できる. また, Fig. 24 に, 車速 50 km/h, エンジン回転数 2300 rpm でうねりのある路面を走行したときの制御効果を示す. 図より, ドラミングとエンジンこもり音が同時に低減できることが確認でき, 今回新たに構築した統合 ANC 技術が良好であることがわかる.

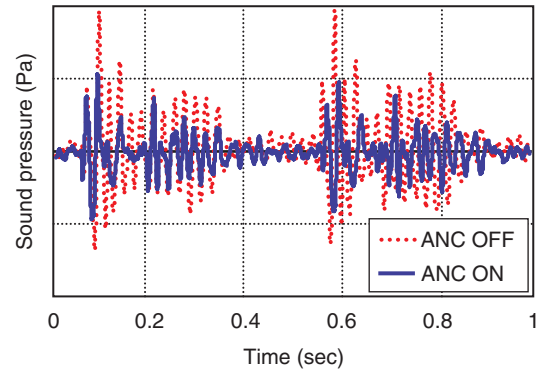


Fig. 22 Noise reduction effect of developed drumming ANC when receiving impulse input from road surface

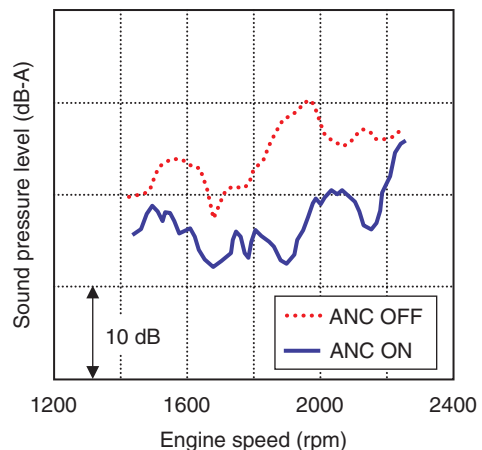


Fig. 23 Engine booming noise reduction effect of developed ANC

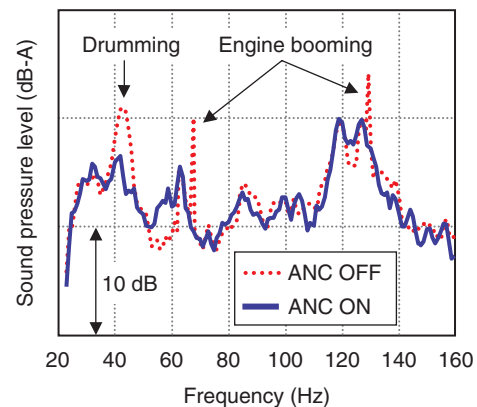


Fig. 24 Low-frequency noise reduction effect of developed integrated ANC

6. まとめ

計算量の少ないSAN制御を応用してデジタルフィードバック制御による新ドラミング ANC 技術を構築した。この新ドラミング ANC 技術は制御器間の干渉問題を解決する新技術を適用することで従来のフィードフォワード制御を用いたエンジンこもり音 ANC 技術と統合することが可能となった。これにより、ドラミングとエンジンこもり音を同時に低減することが可能な ANC システムが構築できた。本論文で示した新統合 ANC システムは新商品に適用された。このシステムの適用により、従来からのパッシブ技術による低周波音対策ではなく、打ち消し音をスピーカから車室内に発することで低周波音を低減するという対策をおこなうことで、車輻の重量を増加することなく振動騒音性能を大幅に改善することが可能となり、燃費性能との両立を実現させることができた。

参考文献

- (1) 佐野久, 井上敏郎, 高橋彰: 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: 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(20005554), p.13-16(2000)
- (3) 井上敏郎: 車輻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 (環境と振動騒音との両立), No.08-10, p.26-31(2010)
- (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, 佐野久: 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(20035578), p.1-4(2003)
- (6) Widrow, B., Stearns, S. D.: Adaptive Signal Processing, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey(1985)
- (7) 小林康統, 井上敏郎, 高橋彰, 坂本浩介: アクティブサウンドコントロールシステムの開発, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.128-08(20085849), p.17-20(2008)
- (8) 井上敏郎, 高橋彰, 小林彰, 坂本浩介: アクティブサウンドコントロール技術, 自動車技術, Vol.63, p.77-82(2009)
- (9) 井上敏郎: 自動車への標準適用を実現した車室内音の騒音制御技術, 騒音制御, Vol.34, No.5, 2010.10, p.336-341(2010)

■ 著 者 ■



井上 敏 郎



高 橋 彰



坂 本 浩 介



小 林 康 統