

無限音階のコンセプトを利用した電動化車両向け アクティブサウンドコントロール技術

Active Sound Control Technology for Electrified Vehicles Based on Concept of Shepard Tones

王 循¹
Xun WANG

前 坂 拓 摩²
Takuma MAESAKA

井 上 敏 郎²
Toshio INOUE

要 旨

モータによる電動走行の特徴であるシームレスな加速にマッチした車内音を実現するために、電動化車両向けのアクティブサウンドコントロール技術を開発した。本技術は、無限音階の考え方に基づいたサウンドを、車速に同期して生成することを基本とする。無限音階理論をもとに生成したメイントーンに、あらかじめ設定した周波数比で複数のサブトーンを重ね合わせることで、更に自由度の高い加速サウンドを実現できる。本技術によってエンジンサウンドとは異なる、電動化車両にマッチした音色を有する加速サウンドを実現した。

ABSTRACT

Active Sound Control technology for electrified vehicles was developed in order to realize vehicle interior sound levels matching the seamless acceleration that is characteristic of driving under electric motor power. This technology takes the fundamental approach of generating sound based on the conceptual approach of Shepard tones and synchronizing it with the vehicle velocity. The main tones generated according to the theory of Shepard tones are superimposed with multiple sub-tones at preset frequency ratios. This approach can produce acceleration sounds with further increased freedom. An acceleration sound that differs from engine sound and has sounds matched to the electrified vehicle has been realized by means of this technology.

1. まえがき

地球温暖化などの環境問題の対策の一つとして、ハイブリッド車、燃料電池車やバッテリー電気自動車を含む電動化車両 (x Electrified Vehicle: xEV) の開発と普及が進んでいる。一方、パワープラントの電動化は、車両室内音のデザインに新たなチャレンジをもたらしている。モータによる EV 走行時に内燃機関 (エンジン) が発生する音が無くなることで車室が静かになる反面、車両加速中に乗員が音から感じる加速感が低下する⁽¹⁾。更に、加速サウンドという車両のアイデンティティを形成する一つの要素も失う。

従来のエンジンによる室内音は、騒音として感じられることも多いが、車両の加減速を乗員に認知させる機能だけでなく、自動車メーカーごとの個性を表現できる要素でもあり、各社がブランド性を含めて加速サウンドを構築してきた^{(2),(3)}。著者らはこれまでに、エンジン車に対し

加速感の向上とブランド性を有するサウンドの構築を狙いとしたアクティブサウンドコントロール (Active Sound Control: ASC) 技術を構築し、多くの車種に量産適用してきた⁽²⁾。

Fig. 1 はそのシステム構成を示す。この技術は、コントローラエリアネットワーク (Controller Area Network: CAN) から取得したエンジン回転数に同期したエンジン次数音成分を生成する。ASC-ECU (Electronic Control Unit) で生成された音源信号はオーディオと共用したスピーカから車室内に発せられ、室内音と合わせて加速サウンドとなる。

xEV は、EV 走行時にモータによる音が比較的小さいため、走りだしから高速までシームレスに加速していくという特徴に適した加速サウンドを生成できる新しい ASC 技術が必要であると考えた。

本稿は、新たに開発した xEV-ASC 技術のコンセプト、システム概要および車両適用事例について述べる。

¹ 先進技術研究所, 博士 (工学)

² 先進技術研究所

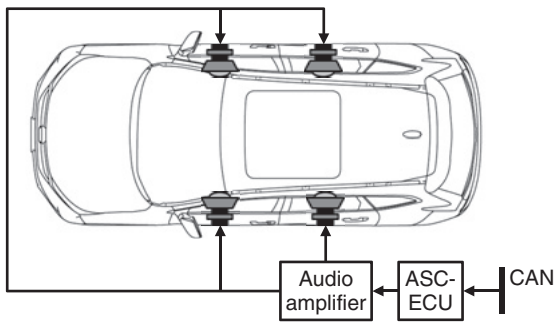


Fig. 1 ASC system configuration

2. xEV-ASC のコンセプト

xEV-ASC を検討するにあたり、以下 3 点を狙いとした。

- (1) 車速や加速に同期した音色変化の実現
- (2) EV 走行らしい加速感を表現できる音色の実現
- (3) 自由度の高い音色調整

2.1. 車速との同期

モータによる EV 走行時には、車両の加速を表現するために、車速変化そのものに同期したサウンドの音色変化が望ましい。また、EV 走行時の動力源であるモータの回転数も車速に比例する。そこで、xEV-ASC は、車速をリファレンス信号とした加速サウンドを生成する。

加速サウンドの周波数と車速の関係を式(1)に示す.

$$f(v) = R \times v + F0. \quad (1)$$

ここで、 v は車速、 R は周波数変化率、 $F0$ は周波数軸の切片を表す。Fig. 2 は式 (1) による加速サウンドの周波数設定例を示す。周波数変化率は加速感に影響する要因の一つであるため⁽⁴⁾、Fig. 2 の Ex.1 に示す車速変化に対して周波数変化が緩やかな場合、加速感を感じにくい。一方、周波数変化率を大きくした Ex.2 では高車速で高周波の音となり、耳障りとなる。そこで、Ex.3 のようにステップ状に周波数を上昇させていく設定にすると、高い周波数変化率を維持しながら耳障りにならない周波数帯域で演出することが可能であるが、ギアチェンジのある AT/MT 車のような音となり、モータによる走りだしから高速までシームレスに加速していく EV 走行らしい加速感を表現することが難しい。

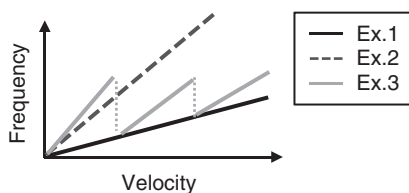


Fig. 2 Typical sound settings according to Eq. (1)

このように車速に同期した ASC において、加速サウンドを耳障りにならない周波数範囲に保ちながらシームレスな加速感を表現することが技術課題となる。

2.2. 無限音階の応用による xEV サウンドの音色実現

上記の技術課題を解決するために、音楽や映画の効果音でも用いられている無限音階⁽⁵⁾の応用を考えた。

無限音階とは R. N. Shepard により考案されたオクターブ単位で隔てられた正弦波を重ね合わせた音^{(5),(6)}であり、この音を繰り返して再生すると、聴覚上の錯覚が引き起こされ、音程が上がり続けるように感じられる。

Fig. 3 は一般的な音階と無限音階を鍵盤上で示したものである。Fig. 3(a) のように一般的な音階では紙面右方向に進むにつれ、音高が半音ずつ高くなっていき、ド (C) から 12 個分進むと、1 オクターブ高い C となる。一方、無限音階は Fig. 3(b) に示すようにオクターブ違いの複数の音で構成されている。これらの音を同期させて再生し、連続的に 1 オクターブ上げると、単音の場合は 1 オクターブ上がって感じられるが、無限音階では元の音に戻ったように感じられる。つまり、無限音階の音列を連続再生すると、音が上がり続けているように錯覚するのである。

この現象を理解するため、無限音階の模式図を Fig. 4(a) に示す。高さ方向は周波数の高さ、円周方向は音階上の高さを表す。赤棒は無限音階の C の和音であり、他の音階は

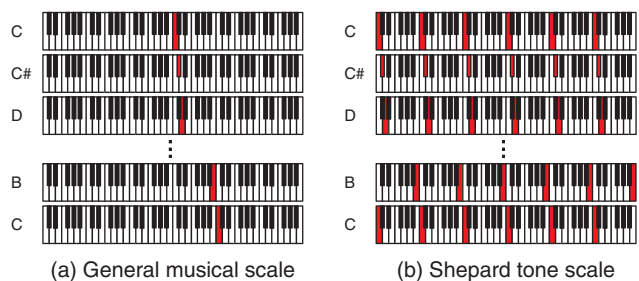


Fig. 3 Musical scale on keyboard for piano

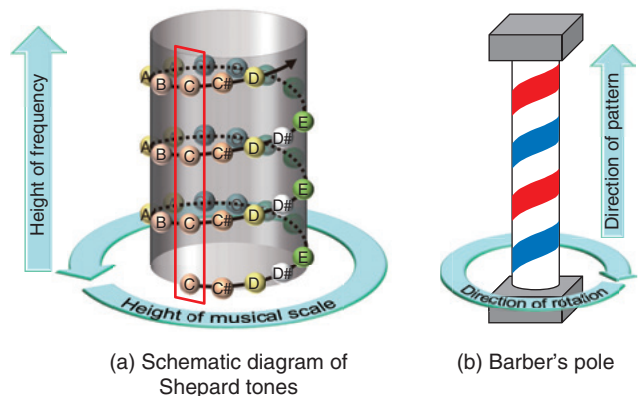


Fig. 4 Shepard tones and barber's pole

円周方向に並んでいる。反時計回りに各音階を連続再生することで、図中らせん状の矢印のように音が上がり続けるように感じる錯覚が引き起こされる。類似の錯覚を利用したものとして、Fig. 4(b)に示す理髪店などの看板で広く用いられているサインポールがある。こちらは回転することで赤と青の線が上がり続けているような視覚上の錯覚を引き起こすものである。

この無限音階が2.1.節の課題解決に利用できると考え、車速に同期しつつ無限音階を応用した加速サウンドを生成するxEV-ASC技術の開発をおこなった。

2.3. トーンの設定によるxEVサウンドの音色調整

無限音階は、オクターブ違いの音の重ね合わせ⁽⁵⁾であるため、実現できる音色が限られている。そのため、それぞれの車両のアイデンティティを表現するために、従来の無限音階による音色だけでは不十分と考えた。

音色調整の自由度を向上するために、無限音階の特徴を有しながら、音楽理論にある和音の構成方法を加速サウンドの生成に応用することを考えた。本来の無限音階であるオクターブ関係にある正弦波のセットをまずメイントーンとして定義する。このメイントーンに対し、一定の周波数比を持った音をサブトーンと定義する。メイントーンに加えて複数のサブトーンを生成することで、豊富な音色を実現することを考えた。

3. xEV-ASC システム

Fig. 5はxEV-ASCシステムのブロック図を示す。本システムは、車両状態取得、音色生成、車室内音場補正、音量調整、の四つのモジュールで構成されている。音色生成モジュールには、新たに開発した無限音階を応用した音色を

車速に同期して生成するASC技術を用いる。

3.1. 車両状態取得

車両状態取得モジュールはFig. 5に示すように、CANより加速サウンドを生成するために必要な車速、アクセルペダル (Accelerator Pedal: AP) 開度、ノーマルやスポーツなどの車両走行モード情報を取得する。また、車速をもとに車両の加速度を内部で計算する。

3.2. 音色生成

加速サウンドの音色は、その構成周波数と各周波数成分の大きさにより決まる。音色生成モジュールはFig. 5のように、無限音階に基づいた構成周波数の算出、各周波数の正弦信号の生成、正弦信号の振幅調整、の三つのプロセスでメイントーンとサブトーンを生成して音色を構成する。

3.2.1. メイントーンの生成

メイントーンの生成について、基本周波数 f_0 は式(2)から式(5)に示されるように算出される。

$$f_0(n) = F_{\min} \times a^{\left(\frac{v(n) - V(n)}{k}\right)}, \quad (2)$$

$$\text{If } f_0(n) \geq F_{\max}, V(n) = v(n), \quad (3)$$

$$\text{Else if } f_0(n) < F_{\min}, V(n) = v(n) - \Delta V(n), \quad (4)$$

$$\text{Else, } V(n) = V(n - 1). \quad (5)$$

ここで、 n は離散時間、 $F_{\min}$ と $F_{\max}$ はそれぞれ下限周波数と上限周波数、 a は車速 v の指数関数の底、 V は基本周波数 f_0 が上限周波数になった時の車速、 k は周波数変化率調整係数を表す。これらの中で、 $k, a, F_{\min}, F_{\max}$ が制御パラメータである。以上から、基本周波数 f_0 は車速に応じて、 $F_{\min}$ と $F_{\max}$ の間に指数的に変化することがわかる。加速に伴い、 f_0

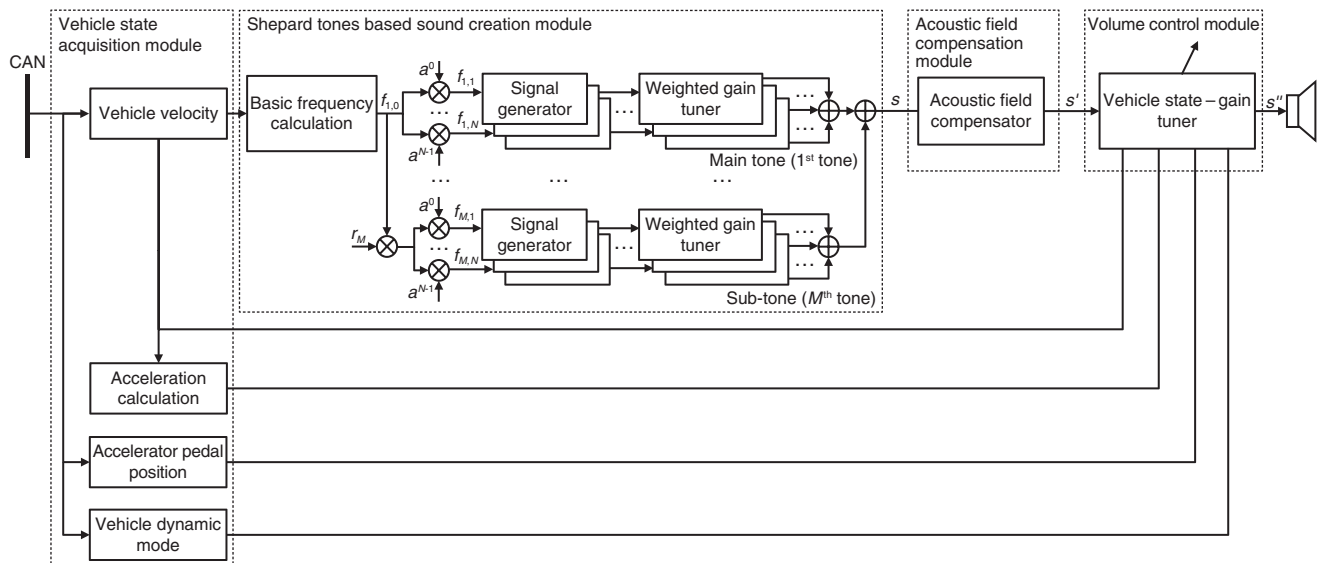


Fig. 5 Block diagram of xEV-ASC system

が $F_{\max}$ を上回る場合、式 (3) により、 V に $f_0 = F_{\max}$ 時の車速 v を設定することで f_0 を $F_{\min}$ に戻す。減速時に、 f_0 が $F_{\min}$ を下回る場合、 f_0 を $F_{\max}$ にするために、 V に $v - \Delta V$ を設定する。ここで、 ΔV は f_0 が $F_{\min}$ から $F_{\max}$ まで上昇した時の車速変化量を表し、式 (6) に示すように算出できる。

$$\Delta V = k \log_a \frac{F_{\max}}{F_{\min}}. \quad (6)$$

ΔV は、 k , a , $F_{\min}$, $F_{\max}$ を用いて算出し、制御パラメータとして事前に決定する。

メイントーンの N 個目の構成周波数は、 f_0 に基づき、式 (7) と式 (8) に示すように算出される。

$$f_N(n) = f_0 \times a^{N-1}, \quad (7)$$

$$\text{If } f_N(n) \geq F_{\max}, f_N(n) = f_N(n) \times \frac{F_{\min}}{F_{\max}}. \quad (8)$$

必要な構成周波数の数 $N_{\max}$ は、 a , $F_{\min}$, $F_{\max}$ より決まる。

$$N_{\max} = \log_a \frac{F_{\max}}{F_{\min}}. \quad (9)$$

式 (7) と式 (8) により、任意の隣接する二つの構成周波数の比は常に定数 a となる。 $a = 2$ の場合、加速サウンドの構成周波数は本来の無限音階であり、常にオクターブの関係を保ち、調和な音になる。Fig. 6 は、式 (2) から式 (8) によって計算された六つの成分を含む無限音階の周波数構成例を示す。

各周波数成分の正弦信号 s_N は、それぞれの周波数に基づき信号発生部によって生成され、Fig. 7 に示す二つの重み付きゲインを調整することで、それぞれの正弦波の大きさを決定する。

$G_S(f)$ は、 $F_{\min}$ と $F_{\max}$ の範囲内で低周波数と高周波数の音をスムーズにフェードイン、フェードアウトさせることで、無限音階による聴覚上の錯覚を引き起こすための重み付きゲインであり、Fig. 8 にその設定例を示す。 $G_S(f)$ と式 (2) から式 (8) を用いることで、Fig. 9 に示す無限音階の特徴を有する加速サウンドを車速に同期して生成できる。

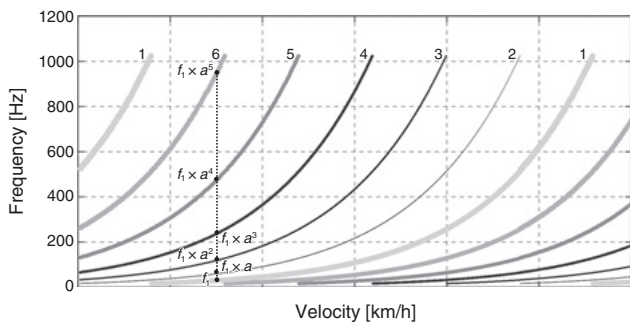


Fig. 6 Example of calculated frequencies

$G_N(v)$ は、車速に基づく各周波数成分の重み付きゲインである。Fig. 10 に示す設定例のように、車速に応じて周波数成分の大きさの比例を変えることで、音色を調整できる。

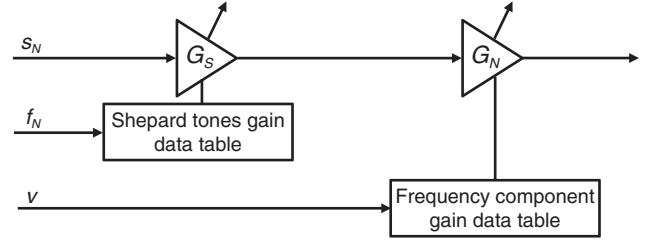


Fig. 7 Block diagram of weighted gain tuner

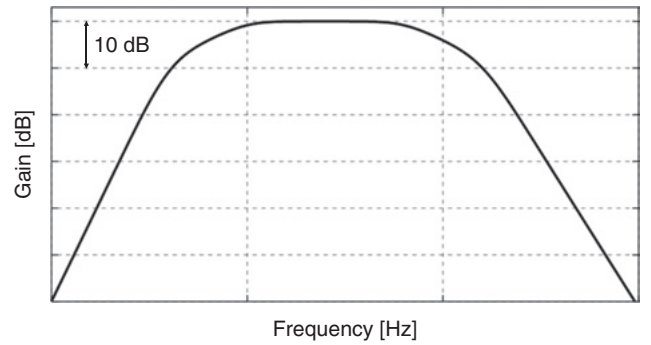


Fig. 8 Example of Shepard tones gain $G_S(f)$

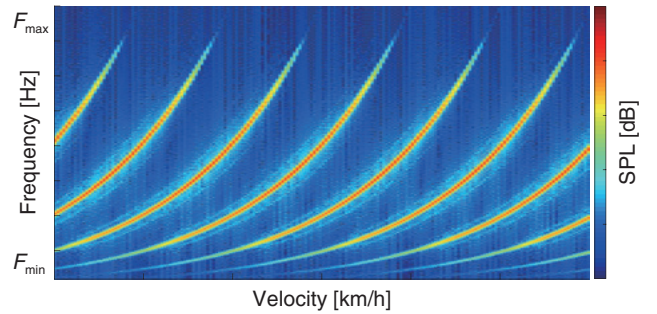


Fig. 9 Example of Shepard tones based acceleration sound

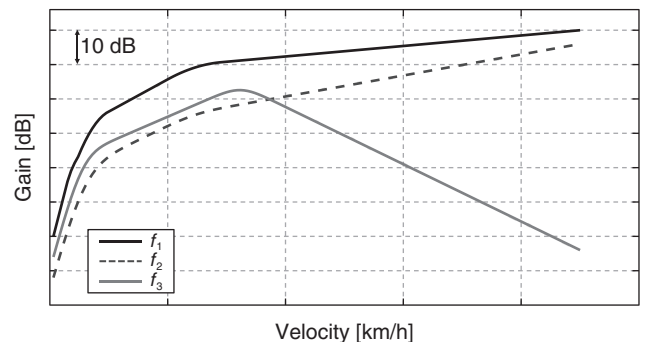


Fig. 10 Example of frequency component gain $G_N(v)$

Table 1 Typical triads and impressions of triads

Chord type	Frequency ratio	Impression
Major	1:1.25:1.5	Bright/Pleasant
Minor	1:1.2:1.5	Dark/Sad
Suspended	1:1.33:1.5	Fantastic
Diminished	1:1.2:1.42	Unstable/Transient
Augmented	1:1.25:1.6	Unstable/Transient

3.2.2. サブトーンの生成

サブトーンの生成では、 M 個目のサブトーンとメイントーンの基本周波数の比を r_M とすると、その構成周波数 $f_{M,N}$ は、式 (10) に示すように算出される。

$$f_{M,N}(n) = r_M \times f_{1,0}(n) \times a^{N-1}. \quad (10)$$

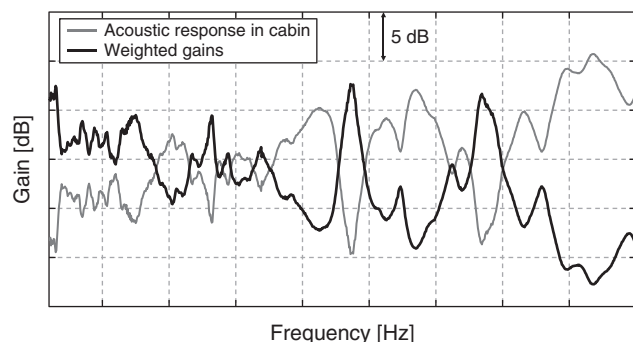
r_M は、例えば、音楽理論⁽⁷⁾に基づき設定できる。Table 1 は、基本的な和音である三つの音で構成される三和音（トライアド）とそのトライアドで表現する音の印象⁽⁸⁾を示す。メジャーとマイナートライアドは音の明暗を表現でき、サスペンデッドは神秘的な印象を与えられているとされており、車両の特徴に応じてこれらの設定を利用できる。ディミニッシュは、不安定な音とされており、注意を促す場合などでの利用が考えられる。例えば、明るい印象を与えるメジャートライアドをもとに三つのトーンでサウンドを構成する場合、メイントーンと二つのサブトーンの周波数比 $r_1:r_2:r_3$ を 1:1.25:1.5 と設定すれば良い。

音色生成モジュールの出力信号 s は、式 (11) のように各トーンの各周波数成分信号を足し合わせて算出される。このように、任意の周波数比を持った複数の音を付与できる。

$$s(n) = \sum_{M=1}^{ALL} \sum_{N=1}^{ALL} G_N(v(n)) \times G_S(f_{M,N}(n)) \times G_C(f_{M,N}(n)) \times s_{M,N}(n). \quad (11)$$

3.3. 車室内音場補正

Fig. 11 のグレー線に示すように、車室内音場の影響でスピーカから乗員頭部までの音響応答のゲイン特性に山谷が生じている。乗員に伝達した加速サウンドは、周波数によってその成分の大きさが変わり、事前に設定した音色の保証ができなくなる。そこで、乗員位置において設定通りの加速サウンドの音色を実現するために、Fig. 11 の黒線に

Fig. 11 Example of acoustic compensation gain $G_C(f)$

示す車室内音響応答のゲイン特性の逆特性 $G_C(f)$ を用いて各周波数成分の大きさを補正する。

3.4. 音量調整

クルーズ走行時の静粛性と加速時の加速感とのバランス、また、車両の挙動と乗員の操作に連動した加速サウンドを実現するために、車両の速度、加速度、AP 開度に応じて加速サウンドの全体音量を調整する手段を設ける。更に、乗員が選択するノーマルやスポーツなどの車両走行モードごとに加速サウンドの音量を設定できるようにすることで、車両走行モードによって静粛性重視、または、加速感重視の室内音設定の間で切り替えられる。

Fig. 12 から Fig. 14 はそれぞれ、車速ゲイン $G_V(v)$ 、加速度ゲイン $G_{Acc}(\Delta v)$ 、および AP 開度ゲイン $G_{AP}(p)$ の設定例を示す。車両の速度と加速度の増加、AP の踏み込みに伴

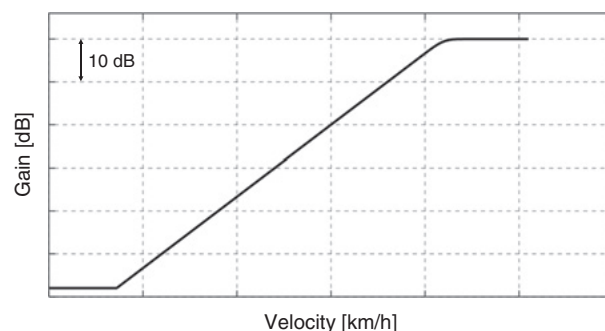
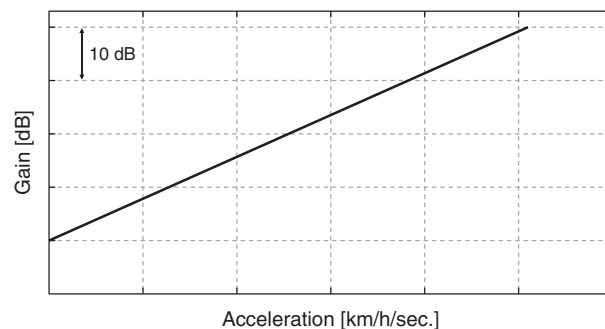
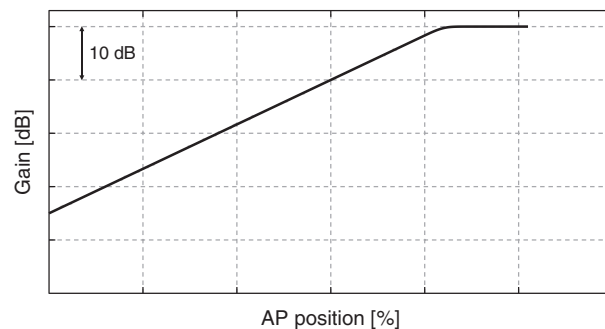
Fig. 12 Example of velocity gain $G_V(v)$ Fig. 13 Example of acceleration gain $G_{Acc}(\Delta v)$ Fig. 14 Example of accelerator pedal position gain $G_{AP}(p)$

Table 2 Example of vehicle dynamic mode gain

Vehicle dynamic mode	Dynamic mode gain $G_M(m)$
Comfort	-90 dB
Normal	0 dB
Sport	+6 dB
...	...

い、音量が大きくなるように設定できる。Table 2 は、車両走行モードゲイン $G_M(m)$ の設定例を示す。コンフォートモードで音を出力せず、スポーツモードで音量を大きく設定して加速感を強調するように設定できる。

加速サウンド信号 s'' は、音場補正した信号 s' に対して式 (12) に示すように音量調整してからスピーカから出力する。

$$s''(n) = s'(n) \times G_M(m(n)) \times [\alpha \times G_A(\Delta v(n)) + (1 - \alpha) \times G_V(v(n)) \times G_{AP}(p(n))]. \quad (12)$$

ここで、 α は加速度ゲインと AP 開度ゲインの比率を調整するパラメータであり、 $0 \leq \alpha \leq 1$ が満たされる。

4. 車両適用事例

本システムを 2021 年に発売予定の中国市場向け SUV Plug-in Hybrid EV (PHEV) 車に適用した事例を紹介する。システムは、Fig. 2 と同様な構成となっており、ASC-ECU は CAN から取得した車両情報に基づき加速サウンド信号を生成し、オーディオと共用したスピーカから車室内に発されることで、対象車両が EV 走行した時の加速感の向上を図る。

4.1. システム設定

まず、サブトーンをどのように設定するかを検討した。Table 1 にあるトライアドをもとにいくつかの設定を試したが、最終的に明るい音色を持つメジャートライアドの構成を採用した。3.2.2. 項で述べたように、 $r_1:r_2:r_3 = 1:1.25:1.5$ と設定し、明るい加速サウンドを狙った。このサウンドを前提として、音色と音量を調整するためのパラメータチューニングは、実車テストを繰り返しておこなった。

次に、周波数範囲について検討した。上限周波数は、EV 走行の軽快さを表現するために、ある程度高くすべきと考えた。従来のエンジン車における ASC チューニングの経験より、4 気筒 4 サイクルエンジンの 8 次音程度の高さが必要と考えた。その 8 次音は 6000 rpm で 800 Hz であることから、上限周波数 $F_{\max} = 800$ Hz と設定した。スピーカの再生可能な周波数下限から、下限周波数 $F_{\min} = 50$ Hz とした。この結果、パラメータ a 、 $F_{\min}$ 、 $F_{\max}$ と式 (9) より、同じ

車速で発生するメイントーンは 4 本となる。

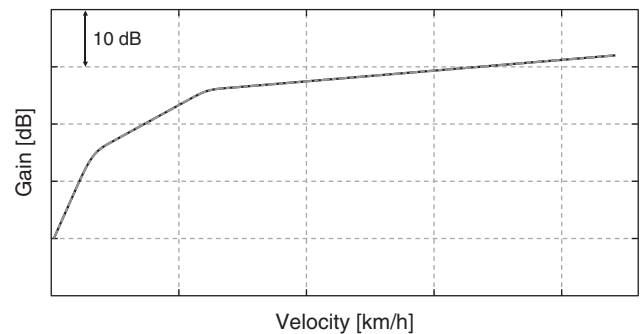
また、周波数変化率を調整するためのパラメータ k と a は、対象車両の加速性能にマッチするようにチューニングをおこない、 $k = 25$ km/h、 $a = 2$ とした。式 (6) から、一つの正弦波の周波数は $\Delta V = 100$ km/h 間隔で $F_{\min}$ と $F_{\max}$ の間に繰り返して生成されることがわかる。また、一つのトーンは四つの正弦波で構成されるため、トーンの周波数構成は、25 km/h ごとに繰り返されることになる。

それぞれの周波数成分をスムーズにフェードイン、フェードアウトさせるために、ゲイン $G_S(f)$ は、Fig. 8 に示す設定を利用した。各周波数成分のゲイン $G_N(v)$ は、Fig. 15 に示すように、加速サウンドのリニアリティを重視し、各周波数成分のゲインを同じ値にした上で、車速の増加に伴い大きくなる設定とした。

音量調整は、加速サウンドの音量を車両の加速度と乗員の AP 操作に連動させるようにした。車速ゲイン $G_V(v)$ を全車速域で 0 dB に設定し、加速度ゲイン $G_{Acc}(\Delta v)$ と AP 開度ゲイン $G_{AP}(p)$ を Fig. 13 と Fig. 14 に示すように、加速度が増大するほど、または、乗員が AP を踏みこむほど、音量が大きくなる設定にした。ノーマルモード走行時には静粛性を重視しながら、スポーツモードでは加速時に加速感を強く感じるように、車両走行モードゲイン $G_M(m)$ は、スポーツモード走行時に加速サウンドを感じられるよう設定した。

4.2. xEV-ASC の制御効果

Fig. 16 は、xEV-ASC システム有り、無しの室内音のスペクトログラムを示す。xEV-ASC システム無しの時には車速の増加に伴い周波数が変化する音成分が少ないのに対し、xEV-ASC システム有りの時には、 $F_{\min}$ と $F_{\max}$ の間で 25 km/h ごとに繰り返されるという無限音階の特徴を有する加速サウンドが車速に同期して生成されている。社内で xEV-ASC システム搭載車の試乗会をおこなった。結果、車両の EV 走行による加速時に乗員が感じられる加速感を向上できることが確認できた。xEV-ASC システムは、

Fig. 15 Frequency component gain $G_N(v)$ for test car

シームレスな加速感を得られる EV 走行の特徴にマッチした音色を有する加速サウンドを生成でき、xEV に特有な加速サウンドの創出に活用できることを確認できた。

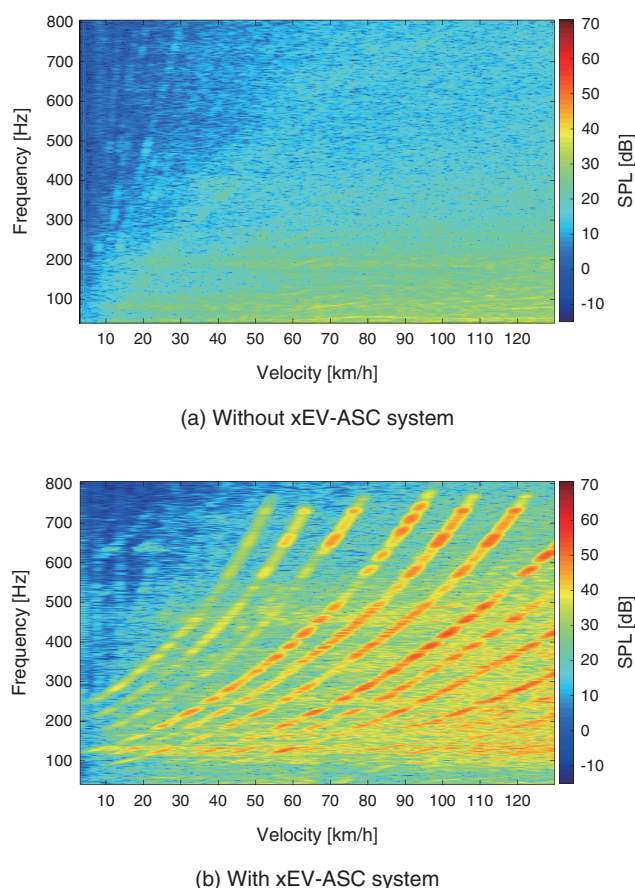


Fig. 16 Interior sound spectrogram of test car

5. まとめ

本稿では、新たに開発した xEV-ASC 技術について報告した。本技術は、無限音階のコンセプトを利用した加速サウンドを車速に同期して生成することで、モータによる EV 走行時のシームレスな加速感を表現できる音色を実現した。更に、メイントーンとサブトーンを設定することによって自由度の高い音色調整を実現した。また、本技術を 2021 年に発売予定の中国市場向け SUV PHEV に適用し、その効果を確認した。

本技術は、今後の xEV に対し、車両のアイデンティティを形成するための重要な要素技術となり得ると考える。

参考文献

- (1) Gwak, D. Y., Yoon, K., Seong, Y., Lee, S.: Application of subharmonics for active sound design of electric

vehicles, The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 136, Issue 6, EL391, (2014)

- (2) Kobayashi, Y., Inoue, T., Sano, H., Takahashi, A., Sakamoto, K.: Active sound control in automobiles, Proceedings of Inter-Noise 2008, p. 390-398, (2008)
- (3) 林毅: アクティブ制御を用いたエンジンサウンドのデザイン - 車両の運動と音源知覚に基づく音色と定位の音響デザイン -, 自動車技術会論文集, Vol. 47, No. 6, p. 1355-1359, (2016)
- (4) 加茂川隆至, 有光哲彦, 木澤千城, 郡司通晴, 戸井武司: 自動車加速音の変化による加速区間毎の加速感の印象評価, 自動車技術会論文集, Vol. 47, No. 6, p. 1381-1386, (2016)
- (5) Shepard, R. N.: Circularity in judgments of relative pitch, The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 36, Issue 12, p. 2346-2353, (1964)
- (6) Shimizu, Y., Umeda, M., Mano, H., Aoki, I., Higuchi, T., Tanaka, C.: Neuronal response to Shepard's tones. An auditory fMRI study using multifractal analysis, Brain Research, Vol. 1186, p. 113-123, (2007)
- (7) 石桁真礼生, 末吉保雄, 丸田昭三, 飯田隆, 金光威和雄, 飯沼信義: 楽典 - 理論と実習, 音楽之友社, 240p., (1965)
- (8) Aiba, E., Tobitani, K., Shimotomai, T., Tani, M., Nagata, N., Fujisawa, T.: Chord Character Evaluation Model Based on Harmoniousness: Application to Music Mood Visualization Interface, Proceedings of SCIS-ISIS 2012, p. 131-135, (2012)

著者



王 循



前坂 拓摩



井上 敏郎