

# 自動車エンジン音改善のための 適応音質制御システムの構築

M2015SC003 服部雄斗

指導教員：大石泰章

## 1 はじめに

近年の自動車では、能動騒音制御などの消音手法により騒音レベルが下がる一方で、これまでエンジン音によりマスキングされていたロードノイズや風切り音が目立つようになり、走行時の快適性を損なうといった問題が指摘されている。また、自動車は運転する楽しみ、乗る楽しみといった趣味としての側面も存在するため、エンジン音を低減することで車を操縦する楽しみやスポーツ感といった「走る喜び」を減少させることとなり、自動車としての個性や特徴、商品的価値を下げる要因となっている。そこで近年の傾向では、エンジン音の制御方法は騒音対策からサウンドデザインへと推移してきている。すなわち、車内の低騒音化からエンジン音の快音化へと変化してきている。

従来のサウンドデザイン手法は、自動車部品であるエンジンパイプなどによってエンジン音の調律をするというものであった。この手法は誤差数ミリメートルの金属加工技術を駆使して、各パイプの長さを調整するもので、不協和音が生じないように各パイプの音の周波数を組み合わせる手探りの作業によって理想のエンジン音を実現している [1]。

一方で、自動車の走行状況やエンジンの回転数に応じて、あらかじめ用意したエンジン音を再生し、実際のエンジン音に重ねることで新たなエンジン音を生成する手法が考えられ、その手法について様々なシステムの提案がされてきた。様々な提案の中の一つが、能動騒音制御の技術を応用して構築された適応音質制御である [2]。

本研究では、伝達関数により理想的なエンジン音を生成し、その音を実現するための適応音質制御システムを提案する。従来から提案されている特定の周波数のサイン波を入力してエンジン音を生成する適応音質制御システムと比べ、実際のエンジン音を入力して伝達関数を通すことで理想的なエンジン音を定め、理想的なエンジン音と生成したエンジン音との差を小さくすることで理想的なエンジン音を生成することができる。また、理想的なエンジン音を実現しない場合にも伝達関数を試行錯誤により変化させることで、各々の目的に応じて理想なエンジン音を生成することができる。

この適応音質制御システムの有用性を確認するために、まず、システムのモデル化を行い、入力するエンジン音に対してスペクトログラムを用いることで取り扱うサンプリング周波数を定める。次に理想的なエンジン音を生成する伝達関数を設計し、シミュレーションを行うことでその性能を確認する。このとき、提案手法が生成したエンジン音

の振幅の変化に有効であり、生成したエンジン音とあらかじめ定めた理想的なエンジン音の周波数応答の差ができるだけ小さくなることを確認する。

## 2 適応音質制御システム

### 2.1 システムの概要

適応音質制御は図1のようなシステムで行い、マイク2付近でのエンジン音に所望の特性を与えることを目的とする。すなわち、エンジンから発生したエンジン音に対して、適切な音波を制御音源で生成し、これがマイク2付近でエンジン音に重なることで、理想的なエンジン音を実現する。制御音源で生成する音波は、エンジンに近い位置にあるマイク1でエンジン音を収集し、収集したエンジン音をFIRフィルタに通じたものとする。そのFIRフィルタ係数はLMSアルゴリズムによって逐次更新していく。LMSアルゴリズムはマイク2で収集したエンジン音で理想的なエンジン音の差を小さくするように計算を行うものとする。理想的なエンジン音は、マイク1より得たエンジン音をあらかじめ適切に定めた伝達関数に通すことで生成する。

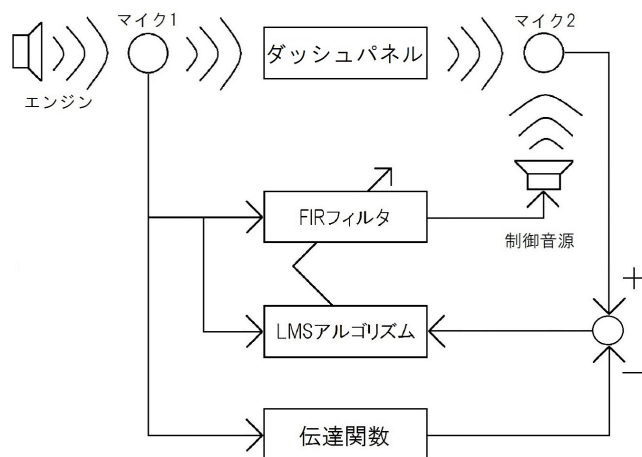


図1 適応音質制御システム

信号はすべて一定周期の離散時間信号であるとし、時刻を整数  $n$  で表す。図2に示すように、エンジンから発生したエンジン音をマイク1で測定したものを  $u(n)$ 、ダッシュパネルを通過して車内で聞こえるエンジン音をマイク2で収集したものを  $d(n)$  とする。ダッシュパネルはエンジン音を変化させるインパルス応答  $g(n)$  とする。  $u(n)$  を

FIR フィルタを通して生成された制御音を  $c(n)$  とし、マイク 2 付近で得られる制御音とエンジン音が重なった音を  $y(n) = d(n) + c(n)$  とする。  $u(n)$  を伝達関数を通して得られる理想的なエンジン音を  $r(n)$  とし、マイク 2 で集音した音と理想的なエンジン音の差を  $e(n) = y(n) - r(n)$  とする。 LMS アルゴリズムによって更新されていく FIR フィルタの次数を  $N$  とし、その  $k$  次の係数の時刻  $n$  における値を  $h(k, n) (k = 0, 1, \dots, N - 1)$  と書く。 このとき、制御音  $c(n)$  は

$$c(n) = \sum_{k=0}^{N-1} h(k, n)u(n - k) \quad (1)$$

で定められる。

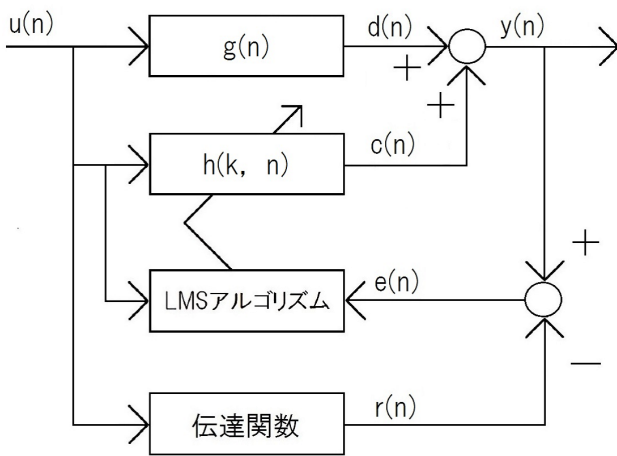


図 2 適応音質制御システムのブロック線図

## 2.2 ダウンサンプリング

音声データを取り扱うにあたり、サンプリング周波数があらかじめ定義される。一般にサンプリング周波数が高いほど、対応する周波数が高くなり、データとしての情報量も増加することで信号処理を行う際の計算量も増加する。一般に、音声データを取り扱うことのできる範囲において適当な周波数を選ぶことで、その周波数に対応したサンプリング周波数に変化させることをリサンプリングと呼び、特にサンプリング周波数を低くすることをダウンサンプリングと呼ぶ。

本研究では、あらかじめサンプリング周波数 44.1kHz で録音したエンジン音の音声データをスペクトログラムにより解析し、エンジン音の基音（ある周波数とその整数倍で構成される合成波で最も低い音）を含む、より低い周波数にダウンサンプリングする。図 3 はサンプリング周波数 44.1kHz のエンジン音の音声信号  $u(n)$  をスペクトログラムにて表したものである。

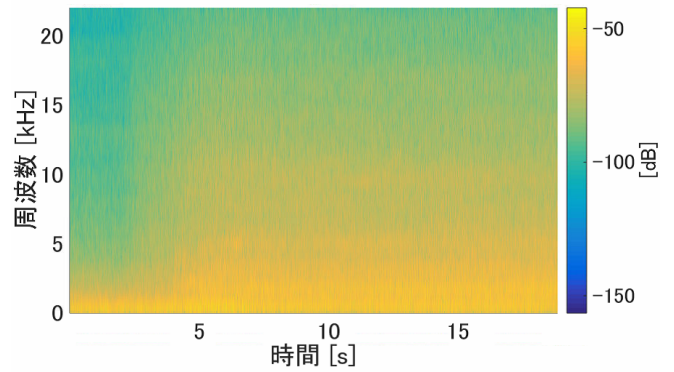


図 3  $u(n)$  のスペクトログラム

図 3 より、エンジン音の基音は 7kHz 以下に存在することがわかる。この周波数はナイキスト周波数で表現されており、標本化の際にナイキスト周波数の 2 倍以上のエイリアシングが発生しない周波数で行う必要があるため、サンプリング周波数を 14kHz としてダウンサンプリングする。この時、元のサンプリング周波数 44.1kHz のままで処理を行うよりも計算量を減少させることができる。

## 2.3 LMS アルゴリズム

LMS アルゴリズムは入力信号  $u(n)$  と誤差信号  $e(n)$  を用いることで、 $e(n)$  が小さくなるように FIR フィルタのフィルタ係数を逐次更新する。具体的には、 $u(n)$  とフィルタ係数  $h(k, n)$  をベクトル表示して

$$\mathbf{h}(n) = [h(0, n) \ h(1, n) \ \dots \ h(N - 1, n)]^T, \quad (2)$$

$$\mathbf{u}(n) = [u(n) \ \dots \ u(n - N + 1)]^T \quad (3)$$

と書くと、LMS アルゴリズムによる FIR フィルタ係数の更新式は

$$\mathbf{h}(n + 1) = \mathbf{h}(n) - \mu e(n) \mathbf{u}(n) \quad (4)$$

となる。ステップサイズパラメータ  $\mu$  は正の数であり、数値に応じて適応速度と適応精度が変化する。通常はステップサイズパラメータが小さいほど適応速度が遅く適応精度が高いが、対象とする周波数や用いる機器の性能により最適な値は異なるため、ここでは試行錯誤によって  $\mu$  の任意の数値を設定する。

## 2.4 伝達関数

図 1, 2 の伝達関数は理想的な周波数特性を持つエンジン音を生成するために設計する。特に理想的なエンジン音が現実存在する場合には、入力信号  $u(n)$  と理想的なエンジン音を  $z$  変換し、割り算をすることによって伝達関数を得ることができる。

本研究においては、理想的なエンジン音が現実存在しない場合、仮に伝達関数を図 4 のようにして、理想的なエ

エンジン音  $r(n)$  を生成する。すなわち、図 5 の応答を示すバンドパスフィルタに入力信号  $u(n)$  を通した信号と、入力信号  $u(n)$  自身との和を理想的なエンジン音  $r(n)$  とする。バンドパスフィルタは MATLAB の fdatool を用いて設計し、通過帯域を 1kHz から 2.6kHz とする。また、フィルタ次数を 8 とする。

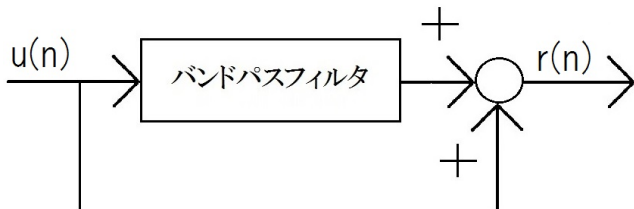


図 4 伝達関数の拡大図

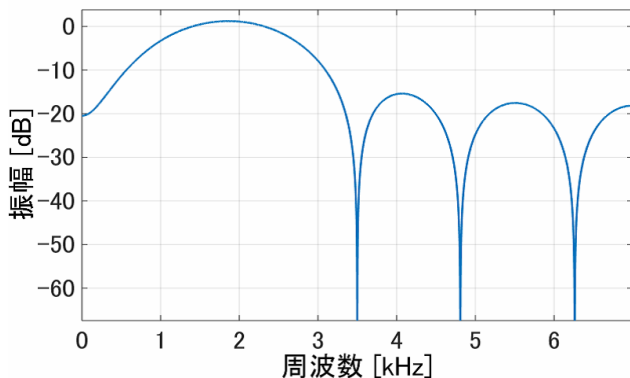


図 5 バンドパスフィルタの応答

### 3 シミュレーション

設計したシステムを用いてシミュレーションを行う。TASCAM DR-40 に Dayton Audio EMM-6 を接続しエンジン近傍で録音した音声信号を  $u(n)$ 、フロントドア取り付けのスピーカー近傍で録音したものを  $d(n)$  とする。この二つの音声信号  $u(n)$ 、 $d(n)$  の応答を図 6 に示す。

図 6 より、 $d(n)$  の 0.2kHz 以下の周波数は  $u(n)$  と比較してわずかに振幅が大きいことがわかる。これはエンジンからフロントドア近傍へエンジン音が進み車体を通る際に、エンジンの動作やエンジン音などにより車体へ与える刺激により発生した固有振動、すなわち共振により増幅されたと考えられる。一方で、0.2kHz より大きい周波数では振幅が小さくなっている。これは高周波成分が物体を通過する際に減衰し易く、低周波成分の減衰量が小さい特性を持つためと考えられる。

本研究では、ステップサイズパラメータは  $\mu = 0.002$  とする。この時、図 7 に制御対象信号  $d(n)$  とこれに制御信号

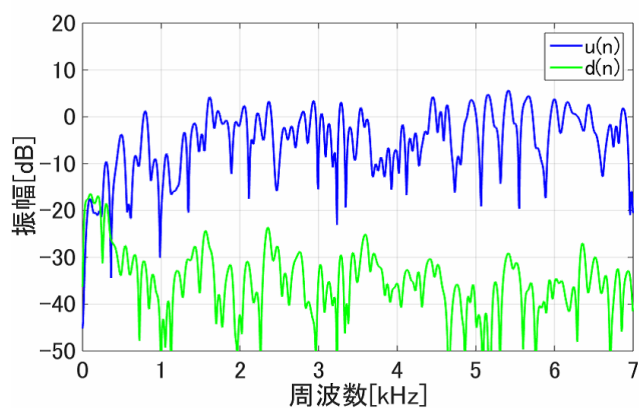


図 6 入力信号の周波数特性

$c(n)$  を重ねて生成されたエンジン音  $y(n)$  の応答を表し、生成されたエンジン音  $y(n)$  と理想的なエンジン音  $r(n)$  を比較する。

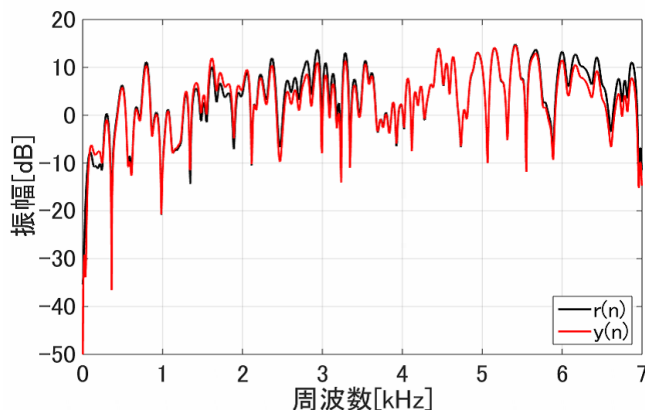


図 7 シミュレーション結果

図 7 の二つの周波数特性を比較すると、0.5kHz から 1.2kHz、3.5kHz から 5.5kHz において振幅がほぼ同じであることがわかる。一方で、一部の周波数において振幅が一致せず、0.36kHz 付近において  $-15\text{dB}$ 、2.5kHz から 3.3kHz、6kHz から 7kHz においては  $3\text{dB}$  の差がある。このことから、特定の周波数に対して適応音質制御システムの有用性が確認できるが、振幅が一致しないことの原因は、重ね合わせ時の位相差や伝達関数の設計などが考えられる。

次に本研究では、実機においてリアルタイム処理を行う必要性を考え、システム全体の計算量に着目し、取り扱う音声信号のサンプリング周波数を 14kHz より下げることで計算量を減少させ、制御信号  $c(n)$  をより早く生成することでシステム全体の高速化と改善を図る。

ダウンサンプリングしたサンプリング周波数を 10kHz または 6kHz としてシミュレーションを行う。このとき、通常バンドパスフィルタは用いる信号のサンプリング周波

数の1/2を取り扱うように設計するため、入力信号  $u(n)$  のサンプリング周波数ごとにバンドパスフィルタを図4の応答に近くなるように設計する。サンプリング周波数10kHzでのシミュレーション結果を図8、サンプリング周波数6kHzでのシミュレーション結果を図9に表し、図7と比較する。

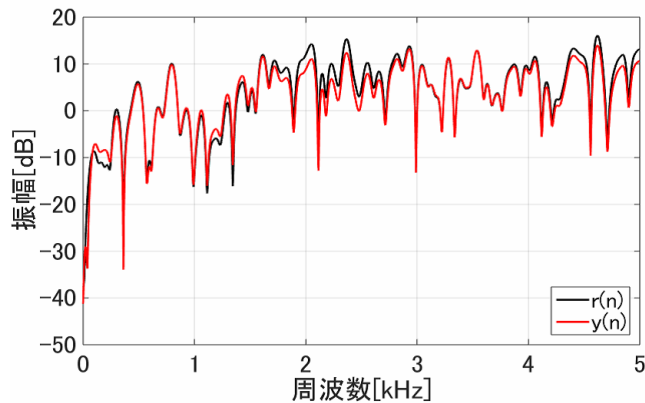


図8 サンプリング周波数10kHzの場合の結果

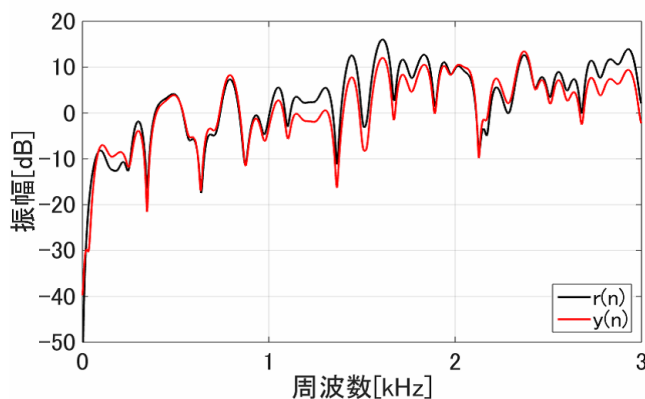


図9 サンプリング周波数6kHzの場合の結果

図8, 9のシミュレーション結果から、図7と同様に振幅が一致しない周波数が存在することがわかる。特に、14kHzよりさらにサンプリング周波数を下げることによって図7よりも振幅差が大きくなることから、各々のサンプリング周波数に適したステップサイズパラメータを設定する必要があると考えられる。また、ダウンサンプリングや伝達関数の変化により理想的なエンジン音である  $r(n)$  の周波数特性がサンプリング周波数によって異なることがわかる。この結果より、異なるサンプリング周波数の場合でも同等の周波数特性を持つ理想的なエンジン音  $r(n)$  を生成するためには、サンプリング周波数に変化しても等しい性能の伝達関数を設計する、あるいは従来のエンジン音と近い周波数特性となるような補正を行うことが必要だとわかる。

## 4 おわりに

本研究では、理想的なエンジン音を生成するための伝達関数を用いた適応音質制御システムを提案し、シミュレーションによりその有用性を確認した。また、サンプリング周波数を低くすることによりシステムの計算量の減少および改善を図り、サンプリング周波数を低くする前と比べて適応音質制御システムの性能が改善しないことを確認し、サンプリング周波数を低くすることで入力信号  $u(n)$  の周波数特性が変化することも確認した。

今後の課題は、理想的なエンジン音を生成する伝達関数を実際のエンジン音を用いて設計すること、ステップサイズパラメータの最適化を行うこと、サンプリング周波数に変化しても等しい性能の伝達関数を設計すること、ダウンサンプリングにより変化した入力信号  $u(n)$  の周波数特性を従来のエンジン音に近くなるように補正を行うことである。また実際には、生成されたエンジン音  $y(n)$  がマイク1で集音され、入力信号  $u(n)$  が変化することからマイク1とマイク2の間の伝達関数を設計する必要があることがわかる。最後に、エンジンの回転数の変化によりエンジン音に変化していくことから、エンジン音の変化に応じた加速走行時のシステムを検討することである。

## 5 参考文献

### 参考文献

- [1] 大島有美子：『響けエンジン音、「消す」から「奏でる」へ進化』。日経産業新聞，2014。
- [2] 佐川拓磨ほか：『加速走行時のエンジン音快音化のための適応音質制御システムの構築』。自動制御連合講演会公演論文集 第58回自動制御連合講演会，2015。
- [3] 西村正治・宇佐川毅・伊勢史郎：『アクティブノイズコントロール』。コロナ社，2006。