

加速音質制御システムの開発

広島市立大学 大学院情報科学研究科 教授 石光 俊介



1. まえがき

車室内の騒音は人間にとって不快な音とされてきたため、様々な騒音対策が施されてきた。吸音材、遮音材、防振材、制振材を用いる、受動騒音制御 (PNC, Passive Noise Control) による対策も施されているが、この騒音対策ではコストの上昇や設置を必要とするスペース、重量増などの問題を招く。一方で、近年のデジタル技術の発展により、適応騒音制御 (ANC, Active Noise Control) による騒音対策も現実的な案として考えられるようになってきた。このような騒音対策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マスキングされることにより目立たなかったロードノイズや風切音などが相対的に大きく感じられる可能性がある。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面もあり、エンジン音の低下がそこから感じる「車を操る楽しさ」、「スポーツ感」といった走る喜びを減少させることになる。すると、その商品の個性や特徴、商品的価値を下げる要因となる。そこで、近年自動車の高品質化に伴い、エンジン音の騒音対策は、サウンドデザインへ推移している。エンジン音の音質を制御する研究も行われており、ANC を応用した適応音質制御 (ASQC, Active Sound Quality Control) 技術が提案されている。本研究では、ASQC 技術の一つとして、次数成分制御を行うアルゴリズムを提案し、心理音響学的見地から評価した。

2. 適応音質制御

ASQC のアルゴリズムの一つである C-FxLMS (Command-FxLMS) アルゴリズムを次数成分ごとに音質制御を行うアルゴリズムに拡張した。Fig.1 に1次成分を増幅し、2次成分を低減するアルゴリズムを示す。1次成分の増幅方法は、点火パルス信号から導出した1次成分を指令信号  $c_1(n)$  (添え字は次数) として入力し増幅する。また、2次数成分の低減は、2次成分の指令信号をゼロとすることすなわち、通常の ANC アルゴリズムを

適用することによって低減する。また、提案した手法では最適なステップサイズパラメータを各次数成分に対し個別に設定することで、最適な制御を行うことが可能である。ここで、 $x(n)$  は参照信号 (点火パルス信号から導出した正弦波)、 $y(n)$  は制御信号、 $d(n)$  は所望信号、 $r(n)$  は濾波参照信号、 $e(n)$  は誤差信号、 $W(n)$  は適応フィルタ、 $e'_1(n)$  は疑似誤差信号、 $c_1(n)$  は指令信号、 $G$  は二次経路特性である。指令信号  $c_1(n)$  は、増幅したい次数成分の正弦波を入力する。また、 $\hat{G}$  は二次経路特性の推定値を示す。なお、二次経路特性は適応フィルタの出力から誤差センサまでの伝達特性である。 $e'_1(n)$  は指令信号  $c_1(n)$  と誤差信号  $e(n)$  との和である。

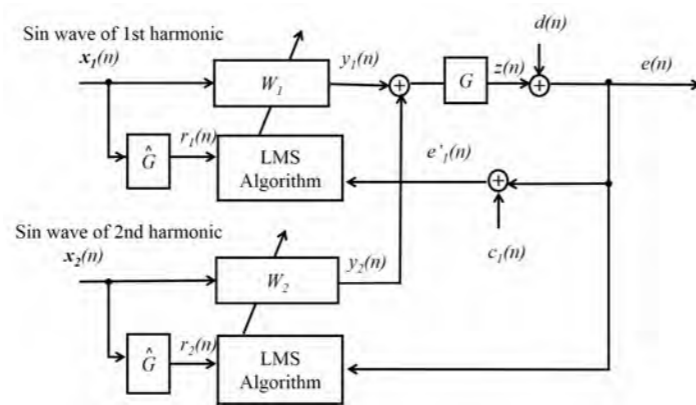


Fig.1: Block diagram of the proposed algorithm

これは1次成分、2次成分のみのブロック図であるが、1次成分、2次成分だけでなく、3次成分以降の次数成分も制御可能となる。実験には直列4気筒4ストロークエンジンのエンジン音を使用した。走行条件は3000-4500rpm の加速走行時とした。加速走行時に関しては、ゆっくり加速する緩加速走行 (50rpm/s) と急に加速する急加速走行 (187rpm/s) の二種類を対象とした。

2次成分、3次成分、4次成分を制御対象周波数とし、2次成分を増幅させ、3次成分、4次成分を低減するよ

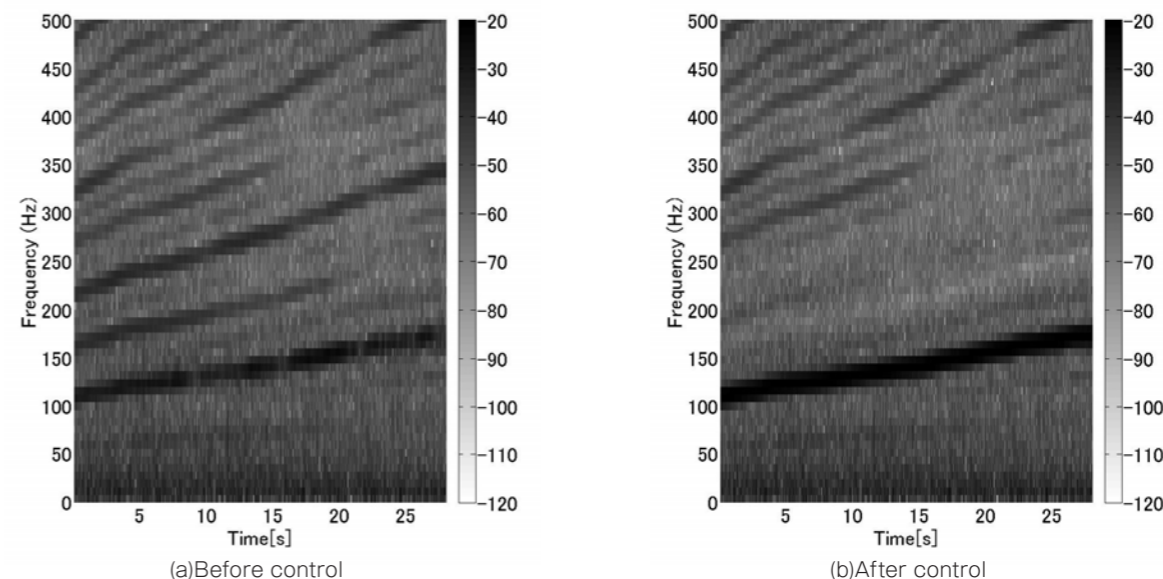


Fig.2: Simulation result of slow acceleration

うに ASQC を行った。その結果を Fig.2 に示す。

3. 心理的快適感の評価

1次成分、2次成分を対象を絞り、ASQC を施し、聴感実験を行った。聴感実験は聴覚健全者 10 名 (男性 7 名、女性 3 名、22-23 歳) を被験者とし、各刺激音に対する心理的尺度値をシェッフエの対比較法 (浦の変法) により求めた。

定常走行において、1次成分、2次成分のみをそれぞれ低減させた時は、被験者毎の「スポーツ感」に基づく快適さに顕著な差や傾向を確認するのが難しい結果となった。これは、音源の差がわずかであったため、識別困難であったものと考えられる。しかしながら、両次数成分を低減させた時は、快適となった。また、各成分の低減に伴い、快でなくなる被験者もあり、エンジン音の主要成分である次数成分を低減させたことで、スポーティ感や迫力感といったエンジン音らしさを失った可能性が考えられる。同様に増幅制御に伴い快になる被験者もいた。これは、エンジン音の主要成分である次数成分を増幅させたことで、よりエンジン音らしさを引き立たせた可能性が考えられる。

次に、加速音に対しても同様な制御処理を施し、刺激音を作成した。加速走行 3000-4000 rpm のエンジン音を用いているため、爆発1次成分は 100-133 Hz である。1次成分のみを 10 dB 低減させた時は、原音と同様の快適さとなった。これは、原音との差が顕著でなかったためであると考えられる。しかしながら、1次成分の

みを 20 dB 低減、2次成分のみと両次数成分を低減させた時は傾向が分かれた。音圧の低下が顕著になったため快適と感じたグループとエンジン音の主要成分である次数成分を低減させたことで、エンジン音らしさを失ったと感じたグループに分かれたと考えられる。各成分を増幅させた時は、増幅に伴い快適でなくなった。原音の最大音圧を 70 dBA としたため、元の音圧が十分に大きいと感じたためと考えられる。

4. おわりに

エンジン音の騒音対策はサウンドデザインへと推移しており、低騒音化から快音化へと変化している。そのため、本研究では ASQC 技術の一つとして、次数成分制御を行う方法を提案した。具体的には、エンジン特有の次数成分を増幅及び低減するアルゴリズムを提案した。そのアルゴリズムの有用性を確認するため、実装実験を行い、「スポーツ感」に基づく心理実験を行った。その結果、エンジン音に対する嗜好の違いや生活の中で自動車やバイクなどのエンジン音をどの程度意識して聞いているのが反映されている可能性がある。今後は自動車やバイクなどを日常的に利用する被験者で実験を行い、「スポーツ感」に基づく統計的な傾向も見ることがある。また、次数成分の増加などのシステムの拡張について検討する予定である。

**モデル誤差抑制補償に基づいた  
ロバストな車両運動制御系の構築**

熊本大学 大学院自然科学研究科 准教授 岡島 寛



1 研究の目的

乗用車などの移動手段において、その安全性や快適性の確保は重要な課題であり、高齢者ドライバーによる事故の増加も危惧されている。このような背景から、様々な運転支援システムが研究開発され、衝突防止ブレーキシステムなどは販売車両に導入されて浸透しつつある。さらに近年は、自動運転の実用化に向けた研究が多く推進されている。自動運転社会の実現に向けて重要な要素技術として経路追従制御が挙げられる。経路追従制御における目的は、目標とする経路に沿って走行するように制御入力に相当するハンドル角度およびアクセル・ブレーキを適切に時々刻々と定めることであり、それにより所望の目標経路との誤差がない状態で走行することが可能となる。制御用のコントローラは、対象のモデル(数値モデル、微分方程式)に基づいて設計されることが一般的であり、経路追従制御の先行研究においても、横滑りを考慮した自動車の2輪簡略化モデルに対してコントローラが設計されている。その一方、実用化への道筋を考えた場合、自動車は雨天や路面環境の変動、搭乗者数の変動など、様々な要因でモデルの動特性が変わりうるため、モデル化された制御対象に対してのみ有効なコントローラでは不十分であり、変動に対するロバストな制御系設計が必用不可欠となる。

本報告では、自動車の動特性変動に対してロバストな経路追従制御系となるよう、著者らの先行研究で提案しているモデル誤差抑制補償器を用いたシステムを構築した。モデル誤差抑制補償器は、制御対象の観測出力とモデルの出力との差がある場合に差を打ち消すように働くロバスト化補償器の一種であり、差が大きくなると補償入力が大きくなり誤差を抑制する。その一方、モデルとの誤差が小さいと補償器は働かず、元のコントローラのみが作用する。このような特徴から、既存の経路追従制御法との親和性が高い。また、この方法は非線形系にも適用しやすい構造を有しており、非線形システムの一つとして考えられることが多い車両運動制御系に対

しても適用が容易である。本報告では、先行研究のモデル誤差抑制補償器に基づいて新たなロバスト性の高い経路追従制御系を提案することがその目的であり、数値例を通じてその有効性を検証している。

2 研究内容

制御対象である車両を、横滑りを有する自動車モデルとして与え、車体すべり角およびヨー角速度を状態量として考えると、速度によってそれらの特性が変わる非線形システムとして表すことができる。これは、従来から多くの方法でモデル化がなされており、広く利用されている。車体の速度を一定と仮定した場合には、線形時不変システムとして状態方程式を求めることができる。

一方、車体と目標経路との関係に着目した場合、車体と目標経路上の最小距離となる点との差を小さくすることで、経路追従を達成することができ、三平ら(1993)の研究を発端として研究が進められており、フレネ座標系を用いることで簡単に経路と車体の関係もモデル化することができる。

このような目標経路と車体、車体と入力(ハンドル、アクセル・ブレーキ)との関係が状態方程式(微分方程式)の形でモデル化されれば、非線形システム制御の代表的な方法である“出力ゼロ化手法”を利用することで目標経路への追従、すなわち、自動運転を達成することができる。これが、従来から知られている方法である。

実際の車両では、搭乗者数や荷物の有無などにより動特性が変動する。従来手法では、モデルのすべてのパラメータが正確にわかっている前提で自動運転アルゴリズムが設計されているため、パラメータが実際と異なる場合には弱い。

図1に車両とヒト、荷物の配置例を示している。A1に運転者が搭乗することは基本であるが、A2、B2、B1は状況によってヒトが搭乗するか否かが異なるし、C1に荷物が積載されるか否かも時と場合による。このとき、

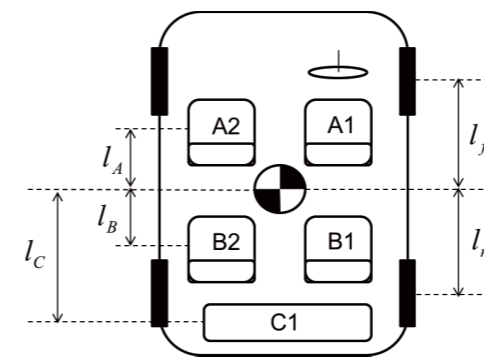


図1: 車両とヒト、荷物の配置

搭乗の有無で車両の動特性が大きく変動する。

さらに、タイヤの摩擦係数、摩擦係数も一定ではなく、雨天路や舗装路面か砂利路面の差など、路面環境によって発生できる横力も変化してしまう。このような変動を正確にモデル化することはできないため、モデル化の誤差に強い制御系の構築が必要不可欠になる。

図2に、上記の状況を踏まえて提案するロバストな自動運転制御系のブロック線図を示している。車両の規範モデルは、通常走行時の対象の動きを想定した数理モデルである。経路追従コントローラは、既存のアルゴリズムである“出力ゼロ化手法”に基づいた経路追従制御則が搭載されている。実車両は、実際の車両そのものであり、搭乗者数や積載量、雨天や走行路面の変化などで、その動特性が変動する。その変動はセンサにより計測するものと仮定する。

このとき、図2の制御系は、モデル化誤差がない場合にはKの補償器の信号はゼロ信号となり、補償は働かない。そのため、経路追従コントローラの作用によって目標経路に追従することができる。その一方、モデルと実車両との間にダイナミクスの誤差が生じた場合、観測信号と数理モデルである車両規範モデルとの出力差を観測し、それに応じたフィードバック信号 $\delta_c$ を生成して補償する。これによって、モデル化誤差が生じていてもその影響を補正するように制御が働くことになる。基本的なアイデアは先行研究で提案している“モデル誤差抑制補償器”に基づいたものであり、非線形システムの代表である車両運動制御系への適用を行ったものである。

3. 研究結果

図2で提案したロバスト経路追従制御システムを適用した数値シミュレーションによって、有効性を検証した。結果を見やすくするため、初期誤差がある状態から走行

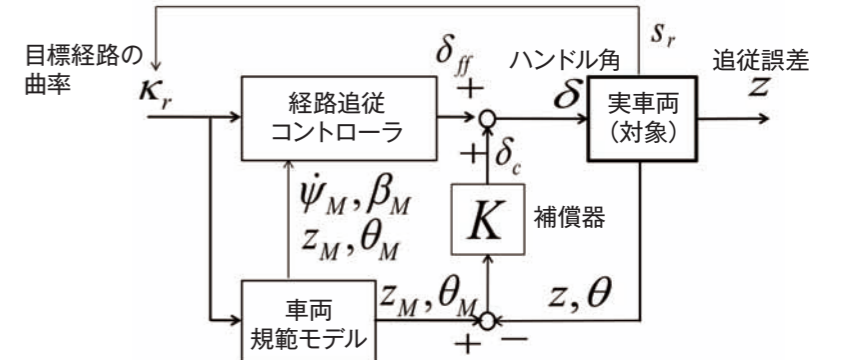


図2(右): 提案するロバスト経路追従制御システム

を開始している。

図3は従来手法であり、実車両が雨天路面を走行し、コーナリング係数(タイヤ摩擦係数)が前後輪ともに想定80%の場合の走行経路である。目標経路が一点鎖線であり、実線が既存手法による経路追従の結果である。特に旋回時に追従誤差が発生していることが見てとれる。

図4は提案したロバスト経路追従制御システムを用いた結果であり、同じく雨天を想定している。図3と比較して、目標経路との誤差がかなり低減されていることが確認できる。他の条件での数値シミュレーションでも同様に提案したロバスト経路追従制御システムによって経路誤差が低減されることは確認でき、有効であることを示せた。

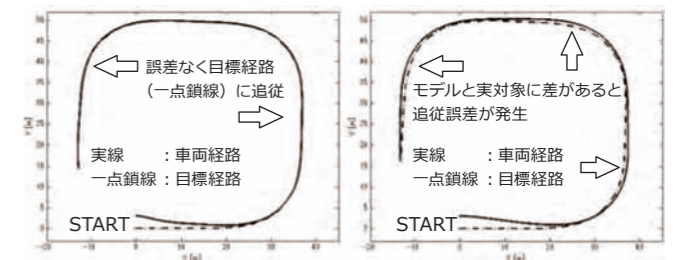


図3(左): 従来の経路追従結果、図4(右): 提案手法の経路追従結果

4. 期待される効果およびまとめ

ロバストな車両運動制御系として経路追従制御への適用を行ったことで、環境変動のある自動車において有用な結果が得られた。本報告では、センサ信号は正しく計測されるものとして研究を進めているが、科学技術研究助成に基づいた研究としてセンサノイズを含む系に対しても一定の成果を得ており、制御系のロバスト化を扱った本研究の枠組みは様々な制御系の構築やアルゴリズムの構築において有用であると考えられる。