

平成 24 年度
学士学位論文

ロードノイズを対象とした雑音除去モデル

Denoising model for road noise

1130367 橋奥大樹

指導教員 福本 昌弘

2013 年 2 月 28 日

高知工科大学 情報学群

要 旨

ロードノイズを対象とした雑音除去モデル

橋奥大樹

自動車の走行時，エンジン音やタイヤと路面間の摩擦・衝突によって起こるロードノイズが騒音として車内に伝わり，車内にいる人間に不快感を与える．近年，エンジン音に対するアクティブ騒音制御の普及やエンジン音の比較的静かなハイブリッド車の普及によりエンジン音そのものを感じにくくなるといった背景から，これまで目立たなかったロードノイズが問題となっている．このような自動車の車内に伝わる騒音を制御する方式としてアクティブ騒音制御がある．従来，ロードノイズのような非周期性の騒音に対するアクティブ騒音制御では，LMS 法に基づく Multiple Error Filtered-X LMS アルゴリズムが広く用いられている．しかし，多数のセンサ，制御音源を必要とし，結果として演算量が高くなり，騒音の変化に対する追従性が低いという問題が指摘されている．また，入力信号が複数あるため，参照信号間で相関が発生することにより，収束速度が劣化してしまう．

そこで本研究では，ロードノイズを対象とし，雑音除去モデルの提案を行う．従来多く用いられていた 2 入力 4 点制御型に対して，処理を前席部分と後席部分に分け，1 入力 2 点制御型を 2 つ用いての制御を行うことで演算量の低減を図る．また，処理を 2 つに分散したことにより，従来の参照信号間の相関による収束速度の劣化を抑えることができる．演算量の比較を行うことにより，提案モデルが従来の多入力多点制御を用いたモデルよりも演算量が大幅に軽減されたことを確認している．提案したモデルを用いて，ロードノイズを軽減できることを計算機シミュレーションを通して確認している．

キーワード　ロードノイズ，アクティブ騒音制御，Multiple Error Filtered-X LMS

Abstract

Denoising model for road noise

HASHIOKU Hiroki

During driving of the car, the sound made by friction and collision between tire and ground is called as the road noise. The engine sound and the road noise are propagated to the inside of the car as noise. These noise bring displeasure to the person in the car. In recent years, the road noise has become a problem especially. As a background of this, the development of noise control system against the engine sound and the spread of hybrid car are mentioned. As a method of controlling the noise to be propagated to the car, the active noise control is proposed. Until now, the Multiple Error Filtered-X LMS algorithm based on the LMS method is widely used as a main algorithm for the road noise. However, the convergence speed for the MEFXLMS algorithm is decreased in the case of the non-periodic noise as the road noise. As a reason of the problem, the correlation between reference signals occurs because there are multiple input signal.

In this paper, we have proposed a model for removal to the road noise. The proposed model divides 2-input 4-control system into two parts which has one-input and two-control to reduce the amount of calculation. In distributed processing, the decreasing of the convergence speed by the reference signal is suppressed. We have confirmed that the calculation amount of the proposed model is reduced significantly. Moreover, we have showed that the road noise can be reduced using the proposed model by computer simulation.

key words road noise, active noise cotrol, Multiple Error Filtered-X LMS

目次

第 1 章	序論	1
1.1	本研究の目的と背景	1
1.2	本論文の構成	2
第 2 章	雑音除去技術	4
2.1	アクティブ騒音制御の原理	4
2.2	適応フィルタ	5
2.3	適応アルゴリズム	6
2.4	制御方式	6
2.4.1	フィードフォワード制御方式	6
2.4.2	フィードバック制御方式	7
2.5	マルチチャンネルアクティブ騒音制御	8
2.6	まとめ	9
第 3 章	ロードノイズを対象とした場合の雑音除去モデル	10
3.1	ロードノイズの特徴	10
3.2	MEFXLMS アルゴリズム	11
3.3	ロードノイズを対象としたモデルの検討	15
3.3.1	2 入力 4 点制御型	15
3.3.2	1 入力 2 点制御型	16
3.3.3	演算量の比較	17
3.4	シミュレーション条件	18
3.5	シミュレーション結果	20
3.6	考察	21

目次

3.7	まとめ	25
第 4 章	結論	26
4.1	本研究のまとめ	26
4.2	今後の課題	26
謝辞		28
参考文献		30

目次

2.1	適応フィルタ	5
2.2	フィードフォワード制御	7
2.3	フィードバック制御	8
3.1	粗路面走行時	11
3.2	比較的整備された路面走行時	11
3.3	マルチチャンネルアクティブ騒音制御のシステムモデル	12
3.4	1入力2点制御型	16
3.5	演算量の比較	18
3.6	約60kmで粗路面を走行した場合のロードノイズ	19
3.7	約80kmで定常走行した場合のロードノイズ	20
3.8	シミュレーション結果1	21
3.9	シミュレーション結果2	22
3.10	シミュレーション結果1の消去量	23
3.11	シミュレーション結果2の消去量	24

表目次

3.1 実時間で必要な演算量の比較	18
3.2 録音環境	19

第 1 章

序論

1.1 本研究の目的と背景

近年，エンジン音の比較的静かなハイブリット車の普及や車内で感じるエンジン音に対する騒音制御技術の発展により，エンジン音そのものを感じにくくなり，従来あまり問題とされなかったロードノイズが逆に目立って聞こえてしまうといった問題がある [1]．ロードノイズとは，路面とタイヤ間の摩擦で発生する非周期性の騒音 [2] のことであり，日常走行時の発生頻度が高く自動車の車内の人間に対して不快感を与える．また，近年自動車には，走行性能や快適性能の向上が求められていると同時に，燃費向上のための軽量化が求められている [3]．各自動車メーカーでは燃費向上のために，車体の軽量化や燃費向上技術の開発を加速させている．また，車室内の静寂性の確保には，エンジンマウントやサスペンション部材による振動低減対策や車体の剛性強化や防音部材の追加などパッシブな騒音対策技術が施されてきた．しかし，これらの燃費向上技術は騒音の増加を招く場合もあり，それに対し先に述べたようなパッシブな騒音対策は車体重量の増加などの面から，低燃費化と静寂性は両立が困難である [3]．

現在，車内で発生する騒音の対策として注目されているのが，逆位相の音を制御用のスピーカから出力して騒音と干渉させることにより騒音を軽減することのできるアクティブ騒音制御技術 [2] である．このアクティブ騒音制御技術は自動車にあらかじめ備えられているスピーカを用いてシステムの構築が可能であり，剛性部材や防音材などといったパッシブな騒音対策を必要としない車室内環境を構築することが可能になると同時に，従来のパッシブな騒音対策に置換することにより車体重量の軽量化を図ることができると期待されてい

1.2 本論文の構成

る．自動車の車室内で発生する非周期性騒音に対するアクティブ騒音制御では，LMS 法に基づく Multiple Error Filtered-X LMS アルゴリズムが用いられている [2]．この Multiple Error Filtered-X LMS は，多数のセンサ，制御音源を必要とし，結果として演算量が高くなり，騒音の変化に対する追従性が低いという問題が指摘されている [4]．実環境を考慮した場合には，自動車の速度，路面状態，積載重量，経年劣化等により騒音が様々変化することが知られている [2]．そのためロードノイズを対象としたアクティブ騒音制御では，騒音の変化に対する追従性は非常に重要な課題である．また，入力信号が複数あるため，参照信号間で相関が発生することにより，制御信号を合成する騒音制御フィルタの係数推定に影響を与え，収束速度が劣化してしまうことが指摘されている [4][5]．これらの問題からエンジン音などの周期成分の割合の多く比較的制御しやすい騒音に対してアクティブ騒音制御は普及しているが，非周期騒音であるロードノイズに対してのアクティブ騒音制御はあまり普及していないのが現状である．

そこで本研究では，ロードノイズを対象とし，従来のような多入力多点制御を用いた騒音制御システムに比べ，制御点数を抑えることで演算量を低減する．また，参照信号間で発生する相関の影響を抑えるために，従来 1 つのシステムで構成されていたのに対し，前席部分と後席部分にそれぞれ処理を分けた雑音除去モデルを提案することにより，従来指摘されていた問題の解決を図る．提案手法を用いてロードノイズを制御対象として計算機シミュレーションを行い，ロードノイズが軽減できることを確認する．

1.2 本論文の構成

本論文の構成について述べる．

第 2 章では，本研究に関連する雑音除去技術について述べ，雑音除去に用いられる適応フィルタ，適応アルゴリズムおよびその制御方式について触れ，最後に多点制御について述べる．

第 3 章では，ロードノイズの特徴について述べるとともに，Multiple Error Filtered-X

1.2 本論文の構成

LMS アルゴリズムの基本的な事柄について述べる．ロードノイズを対象とした従来の多入力多点制御を用いた制御手法の問題点をいくつか述べ，それらの問題を解決するための雑音除去モデルの提案を行い，それぞれの演算量を比較する．また，その提案モデルの有効性を確かめるために計算機シミュレーションを行い，ロードノイズが実際に軽減されたことを確認している．また，その結果から得られた考察を述べる．

第 4 章では，本論文の結論と今後の課題について述べる．

第 2 章

雑音除去技術

2.1 アクティブ騒音制御の原理

雑音除去の原理について具体例を示しながら述べる。雑音除去の物理的な原理は、騒音信号に対して同振幅、逆位相の信号を二次音源に用いることにより騒音信号を打ち消すことである。アクティブ騒音制御システムを構築する際には、実際に音場などその環境に適した制御方式を採用し、システムを構築する必要がある。この制御方式については、2.4 節において述べる。また、制御方式と同様に、対象となる騒音、音場に適した適応アルゴリズムの選定も必要である。

この雑音除去技術は様々な場面で適用されているが、一概にどのような音場にも適用的に用いることができるとはいえない。前述の通り位相干渉を利用しているため、対象騒音が球面伝搬している音場では、聞く場所によっては対象となる騒音と制御信号が同位相となり増音されてしまうといった短所がある。しかしパッシブな騒音制御手法と比べて、逆位相の音を発生させる機材だけで済むため、それほどスペースを必要としないなどといった長所もある。また、このアクティブ騒音制御は制御点に制御音源を近づけるほど、より広い周波数帯域での制御が可能であり、閉空間や局所空間に適しているといえる。これから先に述べた閉空間と局所空間の 2 つの音場での適用例を述べる。閉空間の一例として、一次音源のダクトの場合を考える。またダクトを伝搬する騒音は、平面波とする。このような音場があると仮定した場合、1 入力 1 点制御型を用いて騒音を制御したい場所で対象騒音となる逆位相の音を発生させることにより、雑音の除去が可能となる。また、局所空間の一例として、ヘッドホンやイヤホンに備えられているノイズキャンセリングという雑音除去手法があるが、これ

2.2 適応フィルタ

は周囲の雑音を本体内臓のマイクで参照し，逆位相の波を音楽信号に重ね合わせて出力することにより雑音除去を行っている．

2.2 適応フィルタ

適応フィルタとは，最適なフィルタ特性を自動的に計算し，実行するデジタルフィルタのことである．適応フィルタの具体的な動作を図 2.1 を用いて述べる．まず入力信号である $x(k)$ が与えられた時，目的信号である $d(k)$ に近似した出力信号 $y(k)$ を合成し，誤差信号 $e(k)$ のパワーを最小とするように適応フィルタ $w(k)$ を更新することによりアクティブ騒音制御を行っている．適応フィルタの代表的な応用例として，未知系の同定，逆フィルタの設計，予測フィルタの設計である．この適応フィルタは，アクティブ騒音制御にも用いられているとともに，適応フィルタの同定を利用した音響のエコーキャンセラにも用いられている．代表的な適応処理に用いられるフィルタとしては，FIR フィルタや IIR フィルタなどが挙げられる [8]．

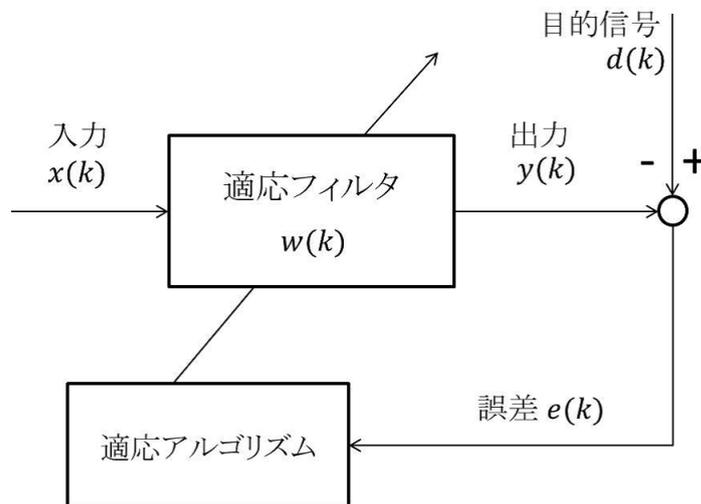


図 2.1 適応フィルタ

2.3 適応アルゴリズム

2.3 適応アルゴリズム

前節で適応フィルタについて述べたが，この適応フィルタの係数の更新手順を適応アルゴリズムという．適応アルゴリズムは多くの場合，図 2.1 より出力信号 $y(k)$ と目的の信号である $d(k)$ との 2 乗平均誤差が最小となるように更新される．適応アルゴリズムの代表的なものとして，LMS アルゴリズムがある．このアルゴリズムの特徴としては，2 乗平均誤差を最急降下法に基づいて更新するもので，安定感があり，比較的演算量が少ないという特徴から様々な場面で用いられることが多く，代表的なアルゴリズムとなっている．

2.4 制御方式

雑音の除去については，騒音信号と同振幅，逆位相の二次音源を用いて行っているが，その制御方式は大きく 3 つに分類される．まず 1 つ目にフィードフォワード制御方式，2 つ目としてフィードバック制御方式，最後にこの 2 つの制御方式を組み合わせたハイブリッド方式である [7]．これら 3 つの制御方式を用いてアクティブ騒音制御が行われている．いずれの制御方式も誤差マイクロフォンで観測される信号が最小になるようにフィルタを決定しているという点では共通である．次節において図を用いながらフィードフォワード制御方式，フィードバック制御方式のシステムについて述べる．

2.4.1 フィードフォワード制御方式

最も単純なシステム構成である 1 入力 1 出力のフィードフォワード制御方式について述べる．まず，フィードフォワード制御を実現する上での必要な要素としては，制御音を発生させる制御用スピーカ，制御点での誤差信号を観測する誤差マイクロフォン，騒音信号を観測する参照マイクロフォン，制御音の生成に必要な適応アルゴリズムを計算する制御器の 4 つである．この 4 つの要素で構成される制御モデルは，図 2.2 のように表現できる．これは制御スピーカから出力される制御信号が参照マイクロフォンで観測される参照信号に影響を与えないと仮定した場合である．このフィードフォワード制御を用いる利点は，フィ

2.4 制御方式

ルタ特性を自由に変更できる点である．これにより，環境によって変化する音響伝達特性に追従でき，高い制御効果の実現可能であるということである．フィードフォワード制御方式は比較的安定した音場に利用される傾向があり，ダクト内や車のエンジンこもり音など閉空間の騒音制御に用いられている．

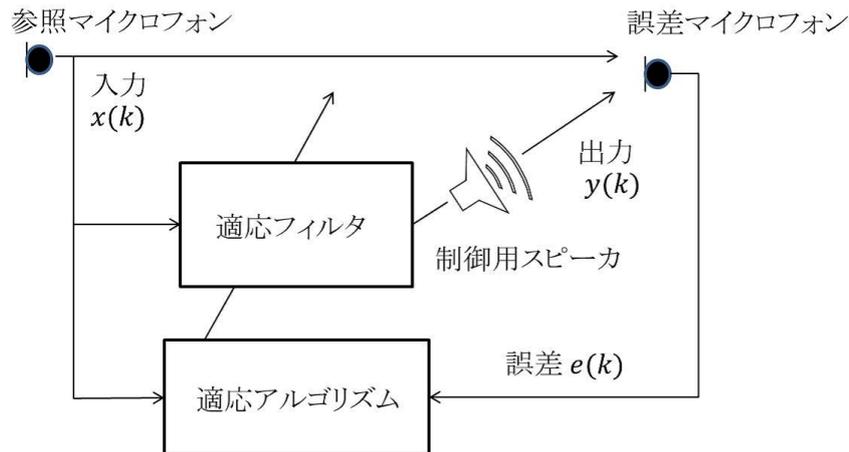


図 2.2 フィードフォワード制御

2.4.2 フィードバック制御方式

フィードバック制御方式も前節同様最も単純なシステム構成を用いて述べる．フィードバック制御方式は，前節で述べたフィードバック制御方式と異なり参照マイクロフォンを必要としないため，システムを前者と比べ簡略化できるという利点がある．この制御方式をブロック図で示すと図 2.3 のように表現できる．この制御方式は，対象とする騒音を定めず，誤差信号のみで制御を行うため誤差マイクロフォンで観測される全ての騒音に対して制御を行うことが可能となっている．また，騒音源から誤差マイクロフォンまでの経路に関係なく制御が可能であり，騒音源が移動する場合でも騒音の制御を行うことが出来る．しかし，誤差信号が観測されてから初めて制御を行うので制御反応が遅れてしまうこと，騒音源の参照を必要としないことで，制御器の設計が前者と比べて複雑になってしまうことがフィード

2.5 マルチチャンネルアクティブ騒音制御

バック制御方式の欠点といえる．フィードバック制御方式は，制御音源と制御点を近づけるほど，広い帯域での制御が可能になるという利点を生かし，イヤホンやヘッドフォンでの騒音制御に用いられている．

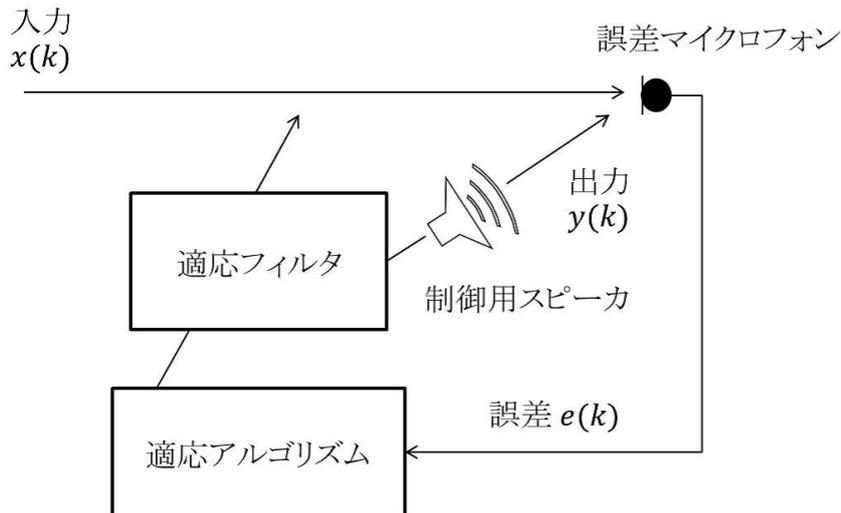


図 2.3 フィードバック制御

2.5 マルチチャンネルアクティブ騒音制御

アクティブ騒音制御は，往々にして広い空間での制御が求められる場合がある．車室内や大口径のダクトなどの広い空間での制御を行う場合には，複数のスピーカと多数のマイクロフォンを用いるマルチチャンネルアクティブ騒音制御の適用が必要になる．制御スピーカやマイクロフォンの数を増やすことにより，広い空間であっても高い精度での制御が可能になる．しかし，それに伴いシステムの肥大化やコスト高を招く場合がある．そのため，マルチチャンネルアクティブ騒音制御を行う場合は，適用する環境に適したシステム構成を考える必要があるといえる．代表的なマルチチャンネルアクティブ騒音制御の手法には，Multiple Error Filtered-X LMS アルゴリズムがある．これについては，次章にて述べる．今後，このマルチチャンネルアクティブ騒音制御の適用事例は，計算機の処理性能の向上などから増

2.6 まとめ

加すると考えられ、その実用化における検討は多方面で行われている。

2.6 まとめ

本章では、ロードノイズを軽減するアクティブ騒音制御に関する基本的な考え方および関連する事柄について述べた。次章では、ロードノイズの特徴について述べるとともに、Multiple Error Filtered-X LMS アルゴリズムの基本的な事柄について述べる。ロードノイズを対象とした従来の多入力多点制御における問題点を述べる。また、それらの問題を解決したロードノイズを対象とした雑音除去モデルの提案を行い、演算量の比較を行う。また、提案したモデルの有効性を確かめるために計算機シミュレーションを行う。

第3章

ロードノイズを対象とした場合の雑音除去モデル

3.1 ロードノイズの特徴

本節では、本研究の対象であるロードノイズについて述べる。車内の音を構成する代表的な音の要素としては、「エンジン音」「こもり音」「ロードノイズ」「風切り音」の4つがある [6]。ロードノイズは、自動車が走行中路面とタイヤの摩擦・衝突によって起こる騒音である。ロードノイズは、エンジン音のような周期性騒音と違い、車室内に非周期的に発生する低周波の騒音であり、車室の共鳴特性に起因して、所定の周波数で音圧レベルが高い共鳴音となる。この所定の周波数は、乗用車でおよそ 40Hz 前後であることが報告されている [2]。前述したエンジン騒音は、所定周波数を中心周波数とする狭帯域且つ周期的に発生する騒音であるため、比較的簡単に騒音の制御が可能となる [3]。これに対して、ロードノイズは車室の共鳴特性から定まる共鳴周波数を中心周波数とし且つ非周期的に発生する低周波騒音であるため、騒音の制御が非常に難しくなっている。また、ロードノイズは同じ速度で走行した場合でも、路面状態によって左右されやすいといった特徴がある。それぞれの波形の違いを図 3.1 と図 3.2 に示す。2 つのグラフから、粗路面走行時の方が振幅の変化が大きくなっていることが分かる。ロードノイズの制御を行う際は、路面環境の変化に追従するために、騒音制御フィルタの追従性が重要となる。また、ロードノイズを対象に騒音の制御を行う場合には、自動車の速度、路面状態、積載重量、経年劣化等も考慮しなければならない。これらを要因としたシステムの特長変化があるため、適応アルゴリズムを用いる必要がある。ロー

3.2 MEFXLMS アルゴリズム

ドノイズを対象としたアクティブ騒音制御における適用アルゴリズムとしては、演算量が比較的少ないという点から、LMS 法に基づく Multiple Error Filtered-X LMS が広く用いられている [2]。

これからロードノイズを対象とした雑音除去の基礎となる Multiple Error Filtered-X LMS について述べ、それに伴う従来手法の問題点を述べる。その問題を解決するロードノイズを対象とした雑音除去モデルを提案するとともに、従来手法との演算量の比較を行う。また、提案モデルを用いてロードノイズが特に目立つ走行状況として報告されている粗路面走行時と高速定常走行時 [6] に焦点を絞り、計算機シミュレーションで提案モデルの有効性について考察する。

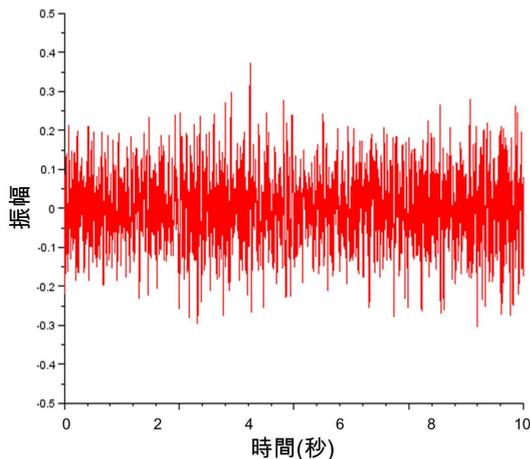


図 3.1 粗路面走行時

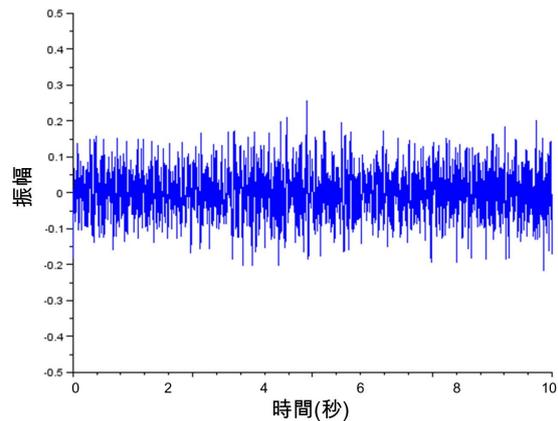


図 3.2 比較的整備された路面走行時

3.2 MEFXLMS アルゴリズム

Multiple-Error Filtered-X LMS アルゴリズムの基本的な考え方として、多数のエラー信号を扱えることが基礎となる。また、このアルゴリズムはアクティブ騒音制御において多く応用されている。これから Multiple-Error Filtered-X LMS の基本的な考え方を図を用いて述べる。騒音源が 1 つの場合のマルチチャンネルアクティブ騒音制御のシステムモデルは

3.2 MEFXLMS アルゴリズム

図 3.3 のようになる．このとき図 3.3 の C は，制御器から誤差信号参照マイクロフォンの間における伝達特性である．この図 3.3 において，参照マイクロフォンの数 K ，制御信号の数 M ，誤差マイクロフォンの数 L とする．この場合を $CASE(K,M,L)$ とする．

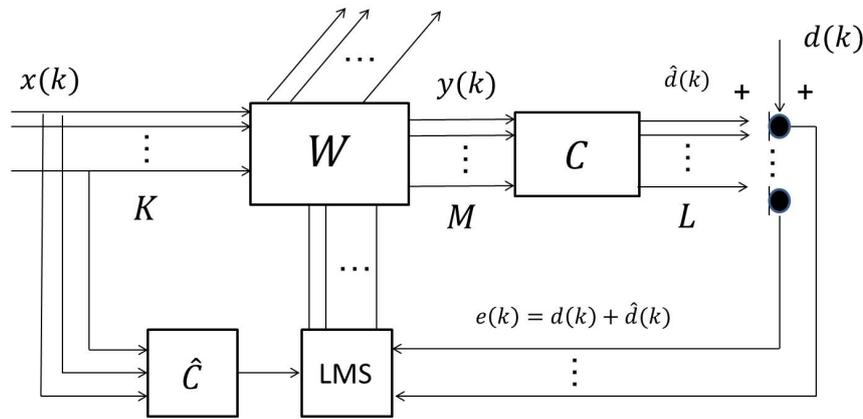


図 3.3 マルチチャンネルアクティブ騒音制御のシステムモデル

まず， m 番目の制御信号数列は，一定のフィルタ係数を有する FIR フィルタ w_{mi} に参照マイクロフォンから得られる信号 $x(k)$ を通すことで得ることができる．このとき，時刻 k における m 番目の制御信号は次のように表すことができる．

$$y_m(k) = \sum_{i=0}^{I-1} w_{mi} x(k-i) \quad (3.1)$$

次に， m 番目の制御信号から l 番目の誤差マイクロフォンに至る誤差経路特性 C のインパルス応答の j 番目の係数を c_{lmj} として表すものとする．また，この C の応答はすべて J 次の FIR フィルタとして表されるものとする．この場合の l 番目の誤差信号数列 $e_l(k)$ は次のようになる．

$$e_l(k) = d_l(k) + \sum_{m=1}^M \sum_{j=0}^{J-1} c_{lmj} y_{lm}(k-j) \quad (3.2)$$

このとき $d_l(k)$ は制御対象信号を表している．ここで，

3.2 MEFXLMS アルゴリズム

$$r_{lm}(k) = \sum_{j=0}^{J-1} c_{lmj} x(k-j) \quad (3.3)$$

とおく． r_{lm} は filtered reference signal または濾波参照信号と呼ばれる．ここで，式 (3.2) は式 (3.16) を用いて表すと次のようになる．

$$e_l(k) = d_l(k) + \sum_{m=1}^M \sum_{j=0}^{J-1} w_{mi} r_{lm}(k-j) \quad (3.4)$$

ここで表記の簡略化のために行列表現を用いて式 3.4 を表す．

$$\mathbf{e} = \mathbf{d} + \mathbf{R}\mathbf{W} \quad (3.5)$$

ここで，それぞれの行列を示す．

$$W_m^T = [w_{m0}, w_{m1}, \dots, w_{m(I-1)}] \quad (3.6)$$

$$\mathbf{W}^T = [W_1^T, W_2^T, \dots, W_M^T] \quad (3.7)$$

$$\mathbf{r}_{lm}^T = [\mathbf{r}_{lm}(k), \mathbf{r}_{lm}(k-1), \dots, \mathbf{r}_{lm}(k-I+1)] \quad (3.8)$$

$$\mathbf{r}_l^T = [\mathbf{r}_{l1}^T, \mathbf{r}_{l2}^T, \dots, \mathbf{r}_{lM}^T] \quad (3.9)$$

$$\mathbf{R}^T = [\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_L] \quad (3.10)$$

3.2 MEFXLMS アルゴリズム

$$\mathbf{e}^T = [e_1(k), e_2(k), \dots, e_L(n)] \quad (3.11)$$

$$\mathbf{d}^T = [d_1(k), d_2(k), \dots, d_L(n)] \quad (3.12)$$

評価関数 J を次式に示すエラー信号の自乗平均和とした場合,

$$J = E[\mathbf{e}^T \mathbf{e}] \quad (3.13)$$

$E[\]$ は期待値を表している評価関数 J を最小とする最低なフィルタ係数 w^* は次式で表すことができる。

$$\mathbf{W}^* = - [E[\mathbf{R}^T \mathbf{R}]]^{-1} [E[\mathbf{R}^T \mathbf{r}]] \quad (3.14)$$

ここでフィルタ係数 \mathbf{W} の更新式を表すと,

$$\mathbf{W}(k+1) = \mathbf{W}(k) - \mu \mathbf{R}^T(k) \mathbf{e}(k) \quad (3.15)$$

このとき μ はステップサイズパラメータである。この Multiple-Error Filtered-X LMS アルゴリズムは $\text{case}(K, M, L)$ の様々なパターンに対応することができる。しかし、式 3.15 を考察すると、 KML の増加するにつれて膨大な演算量が必要になる。この Multiple Error Filtered-X LMS アルゴリズムは、比較的少ない演算量で低減可能な応用分野に実用されている。

3.3 ロードノイズを対象としたモデルの検討

ロードノイズは 3.1 で述べたように，エンジン音などの周期性騒音と違い非周期性騒音である．非周期性騒音では，信号の変化が複雑であり，フィルタの収束速度に影響が出るとともに，演算量が周期性騒音と比較すると高くなる．結果として，車室内でロードノイズを低減する場合のフィルタの追従性の確保が難しくなる．これまでロードノイズに対してのアクティブ騒音制御の適用事例が少なかったのはこれが一因となっている．また，ロードノイズを対象としてアクティブ騒音制御を行う際には，自動車の速度，路面状態，積載重量，経年劣化等により変化する騒音に対しての追従性を確保しなければならない．そのためロードノイズを対象としたアクティブ騒音制御では，騒音の変化に対する追従性は非常に重要な課題である．ロードノイズを対象としたアクティブ騒音制御では，従来多入力多点制御が用いられてきたが，様々な問題が存在する．次節では，従来多くロードノイズを対象に用いられてきた 2 入力 4 点制御の問題点を述べる．

3.3.1 2 入力 4 点制御型

車室内全体でロードノイズの軽減を図る場合，最低でも 4 人乗りの普通自動車を前提にしなければならない．この場合において高い精度で騒音の制御を行うには，4 つの制御音源が必要である．また，ロードノイズは前席部分と後席部分でそれぞれ騒音を発生させる．そのため，騒音源が 2 つと考えられる．この場合において従来多く用いられていたシステム構成として参照マイクロフォンの数 2，制御信号の数 4，誤差マイクロフォンの数 4 の case(244) である．しかし，この多入力多点制御の雑音除去モデルを構築する際に問題となるのが，入力信号が 2 つあるため，参照信号に少なからず相関が生じてしまうということである．参照信号に相関が生じた場合でもアクティブ騒音制御が可能である．しかし，参照信号に他の信号の強い相関が生じてしまう場合，フィルタの収束速度が劣化してしまうということが報告されている [4][5]．これは，参照信号に他のチャンネルから信号が回り込むことにより，本来の信号の成分が低下してしまうことにより，制御信号を合成する騒音制御フィルタの係数

3.3 ロードノイズを対象としたモデルの検討

推定に影響を与えるためである．また，制御スピーカから誤差センサまでの間の経路も複雑となる．適応フィルタの係数更新には，制御スピーカから誤差センサまでの全てを用いた演算が必要であり，制御点数 n の増加に対し $O^2(n)$ で増加する．これではフィルタの追従性が確保できない可能性がある．また，演算量が増加することにより，処理性能の優れた演算処理装置が必要となり，コストが増加してしまうといった問題もある．このような問題を解決する雑音除去モデルを次節で提案する．

3.3.2 1 入力 2 点制御型

本研究で提案するシステムモデルは，1 入力 2 点制御型の case(122) \times 2 である．従来 1 つのシステムで構成されていたのに対して，前席部分を制御するシステムと後席部分を制御するシステムをそれぞれ分け，処理の分散を行うことでロードノイズに対して減音を図る．システムのモデルは図 3.4 である．

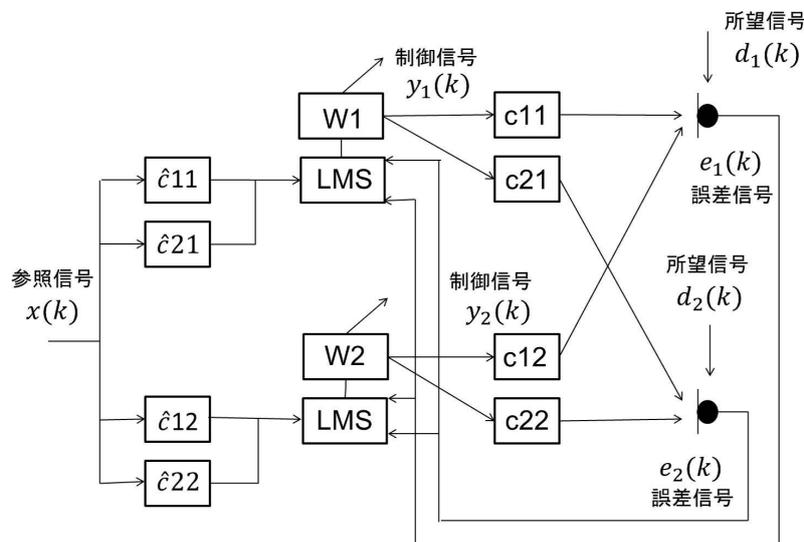


図 3.4 1 入力 2 点制御型

提案するモデルの利点として，制御点数を減らすことで考慮する経路も従来と比べ少なくなり，結果としてフィルタの更新に用いる経路が少なくなり，演算量を低減できるという点である．そのため，従来多く用いられていた 2 入力 4 点制御に比べ，騒音の変化に対する追

3.3 ロードノイズを対象としたモデルの検討

従性を確保できる．演算量を低減したことにより，従来手法より適応フィルタのタップ長を長く設定できるなどといった利点もある．また，制御を2つに分けたことにより，入力信号は1つとなる．そのため，他の騒音も観測されるが，考慮しなければならない信号は1つとなるため，従来のような収束速度の劣化を抑えることができる．また，ヘッドレストに制御用スピーカおよび誤差マイクロフォンを配置した場合は，制御する音場は頭部周辺で足り，局所空間とみなすことができるなどの利点もある．また，従来手法と比べ演算量を低減したことにより，比較的安価な処理装置でも実現可能である．演算量の低減のみを考えた場合，1入力1点制御型を並列化することが考えられるが，誤差センサから観測される情報が先に挙げた2つの制御手法に比べ少なくなり，高い精度での制御は期待できない．次節では，従来多く用いられていた2入力4点制御型と提案手法である1入力2点制御型の演算量を比較する．

3.3.3 演算量の比較

提案手法を1入力2点制御型とし，また，従来手法を2入力4点制御型として演算量の比較を行う．アルゴリズムの演算量は主として乗算回数に依存することを考慮して，フィルタのタップ長を N とした場合の $2N$ サンプル間に必要な乗算回数を比較する． N タップのフィルタに対する1回のフィルタ処理の乗算回数が N 回必要なので，タップ長 $2N$ では， $2N^2$ 回必要となる．フィルタ処理として，LMS法を用いる Multiple Error Filtered-X LMS では，騒音制御フィルタ，2次経路モデルのフィルタ処理を考慮し，それらのフィルタの個数と1回のフィルタ処理回数 $2N^2$ とを掛け合わせたものが乗算回数の合計となる．また，フィルタ処理における乗算回数と Multiple Error Filtered-X LMS における更新部で必要となる乗算回数と更新部で必要となる乗算回数を加えて演算量とする．以下の図 3.5 が提案手法と従来手法の演算量の比較である．

また，実時間での1サンプリング周期内に必要な乗算回数を表 3.1 に示す．乗算回数は，モデルごとの騒音制御フィルタと二次経路モデルにより求めている．また， N はフィルタのタップ長である．

3.4 シミュレーション条件

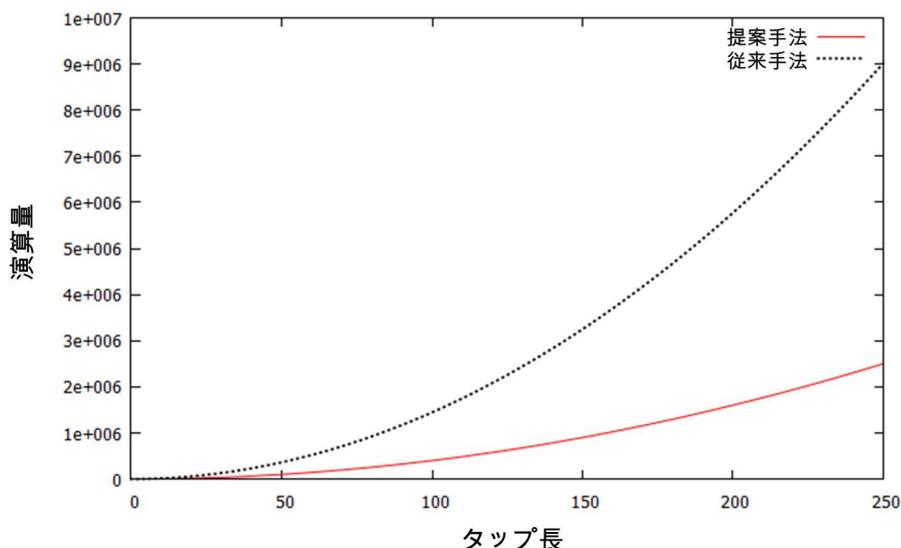


図 3.5 演算量の比較

表 3.1 実時間で必要な演算量の比較

1 入力 2 点制御	2 入力 4 点制御
$6N$	$36N$

これらの結果から提案手法では、従来の手法に比べ大幅に演算量が低減されたことが分かる。しかし、本提案手法では、従来の手法に比べ、考慮する経路を減らすことにより演算量の低減を図ったため、ロードノイズに対して十分な制御が行えない可能性がある。そのため、計算機シミュレーションを行うことにより、本提案手法がロードノイズに対して有効であることを次節で示す。

3.4 シミュレーション条件

本研究で提案したモデルがロードノイズに対して有効であることを確認するために、計算機シミュレーションを行う。対象としたロードノイズは、ロードノイズが特に目立つ走行状況である粗路面走行時と高速定常走行時の2つである。また、ロードノイズを録音した環境を表 3.2 に示す。

3.4 シミュレーション条件

表 3.2 録音環境

IC レコーダー	ICD-UX523
録音した自動車	プリウス
録音場所	運転座席下部

用意した 2 つのサンプルは、それぞれ約 60km で粗路面を走行した場合のロードノイズと約 80km で定常走行した場合のロードノイズの 2 つである。録音した環境では、対向車などがいない環境で録音をしている。2 つのサンプルの波形を時間軸を用いてそれぞれ図 3.6、図 3.7 に示す。計算機シミュレーションを行うにあたり、それぞれフィルタのタップ長を 256、ステップサイズパラメータを 0.007 に設定している。

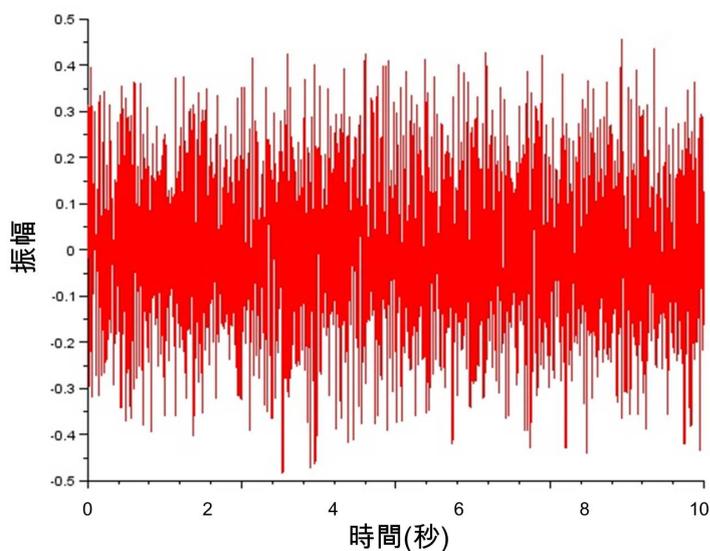


図 3.6 約 60km で粗路面を走行した場合のロードノイズ

3.5 シミュレーション結果

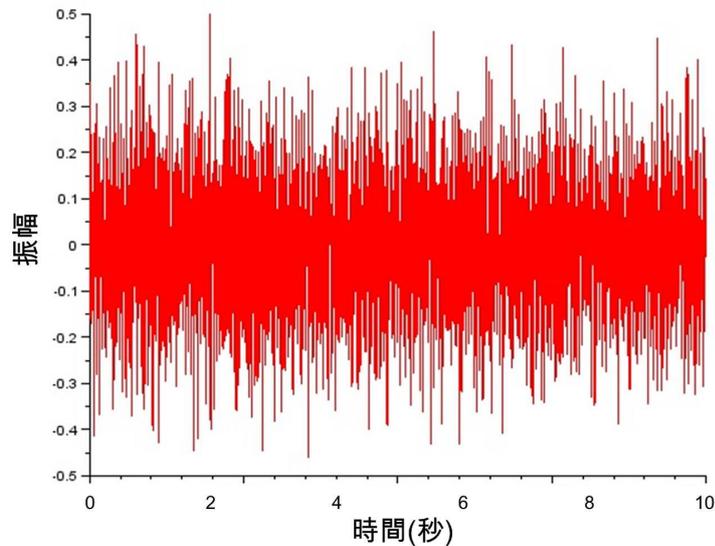


図 3.7 約 80km で定常走行した場合のロードノイズ

3.5 シミュレーション結果

これから 60km で粗路面を走行した場合のロードノイズのシミュレーション結果をシミュレーション結果 1 として図 3.8 に，約 80km で定常走行した場合のロードノイズのシミュレーション結果をシミュレーション結果 2 として図 3.9 に示す．縦軸は振幅，横軸は時間を表している．また，騒音に対する消去量を式 (3.16) によって求め，時間毎の結果を図 3.10，図 3.11 に示す．このとき I はサンプル数， d は所望信号， e は誤差信号である．この図 3.10 と図 3.11 は，ロードノイズがどれだけ軽減されたかを示し，縦軸が騒音に対しての消去量，横軸が時間を示している．消去量がマイナスになるほど，騒音が消えていることを表している．

$$\text{消去量} = 10 \log_{10} \frac{\sum_{i=1}^I e(i)^2}{\sum_{i=1}^I d(i)^2} \text{ [dB]} \quad (3.16)$$

3.5 シミュレーション結果

図 3.10, 図 3.11 より, 提案手法でも -3dB 程度のロードノイズの軽減ができていることを確認した。また, アクティブ騒音制御適用後のロードノイズを実際に聞き, ロードノイズが軽減されていることを確認した。今回フィルタのタップ長を 256, ステップサイズパラメータを 0.007 に設定した理由として, 予備実験をした結果最も消去量が安定したためである。また, フィルタのタップ長を 256 とした理由は, フィルタのタップ長を長く設定する分だけフィルタの性能は向上するが, その分発生する実時間での遅延を考慮した結果である。しかし, これらの制御パラメータの決定は, 本来であれば実車走行実験が必要である。

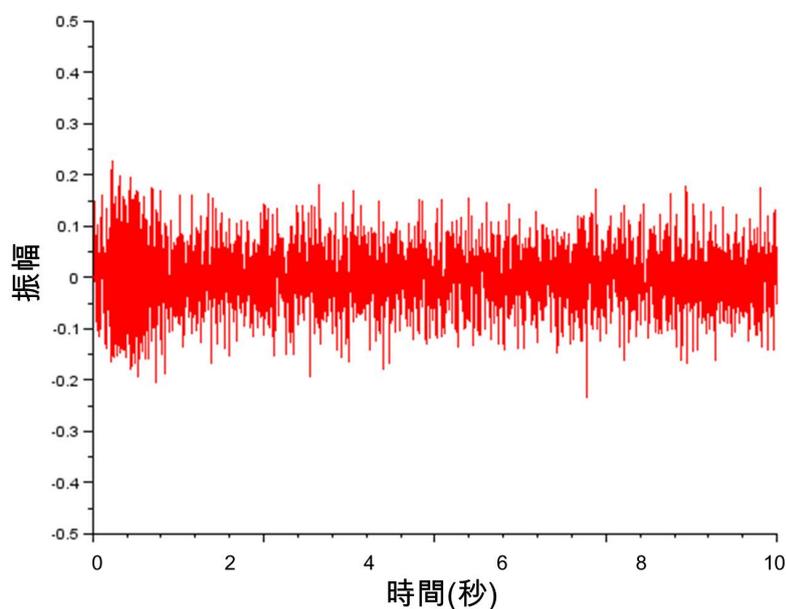


図 3.8 シミュレーション結果 1

3.5 シミュレーション結果

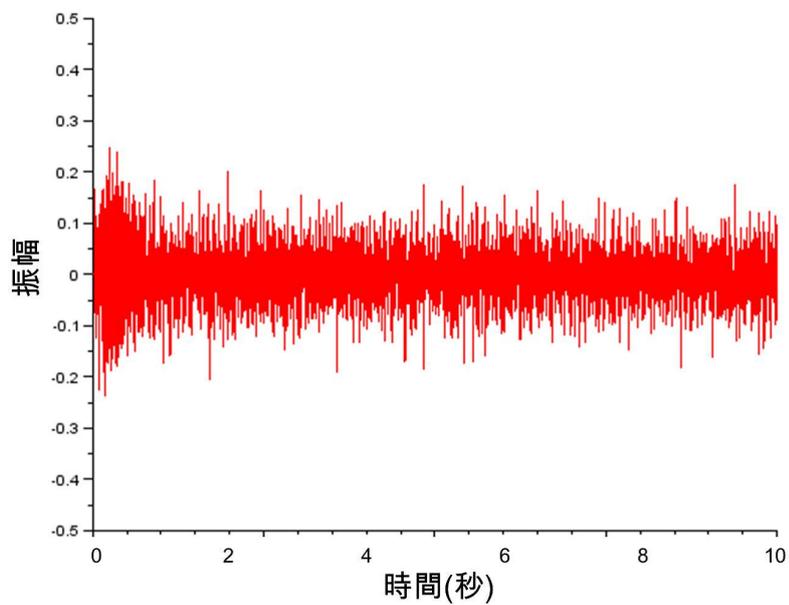


図 3.9 シミュレーション結果 2

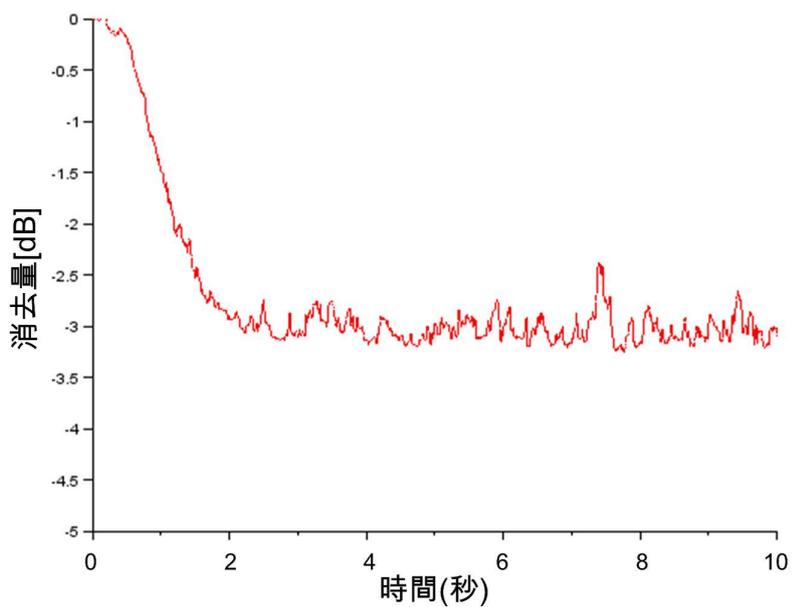


図 3.10 シミュレーション結果 1 の消去量

3.6 考察

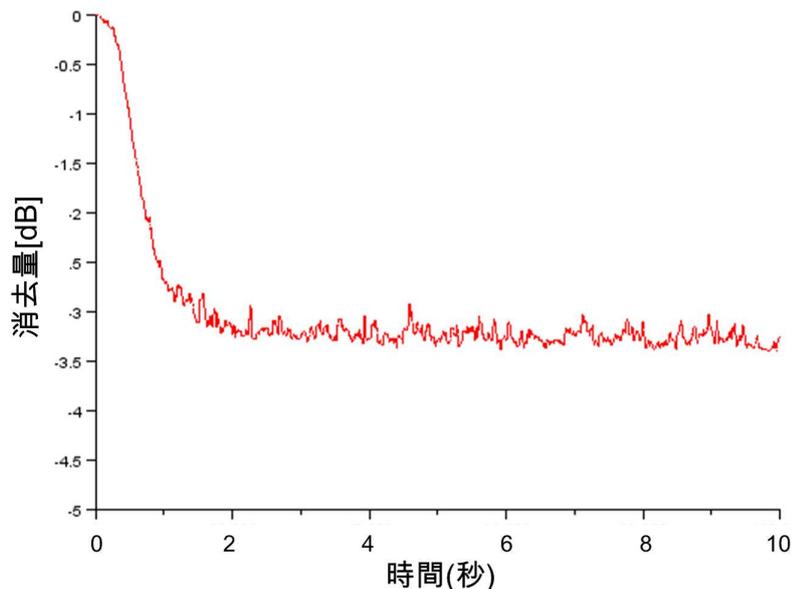


図 3.11 シミュレーション結果 2 の消去量

3.6 考察

消去量を 2 つのサンプルで比較した結果，2 つの結果から 80km 定常走行時はある程度安定しているが，粗路面を 60km での走行時に関しては，先に比べ消去量が安定していないことが確認できる．これは定常走行時と比べ，粗路面走行時は，振幅の変化が大きく十分な追従性を確保できなかったためと考えられる．また，どちらのサンプルでも，ロードノイズは 1 秒から 2 秒程度の短い時間で収束している．しかし，実環境で用いることを考慮した場合，乗員が実際にこの収束時間をどう感じるか十分な検証が必要であると言える．今回サンプルに用いたロードノイズは，粗路面走行時と高速定常走行時の 2 つである．本研究の対象にこの 2 つのサンプルを用いた理由は先も述べたようにロードノイズが特に目立つ状況とされているためである．実車での動作を考慮した場合，この 2 つの走行状況以外の速度や路面状況など様々な場合の検証も必要であり，急激な参照信号の変化やすれ違う車などからの外乱も考慮しなければならない．その場合の検証は今回の計算機シミュレーションでは行っていない

3.6 考察

いため、そのような場合に本提案のシステムがどのように動作するのか検証が必要である。また、今回ロードノイズのサンプルを録音した車種はプリウスである。車種によってロードノイズの聞こえ方は変わるため、他のセダンタイプやワゴンタイプでも同様に動作するかは保証することはできない。他の車種でも同じ制御方式が有効とは言えず、今後様々な車種での実車検証が必要であるといえる。また、実環境で本提案システムを用いることを考慮した場合、オーディオシステムとの統合化なども考慮する必要がある。その場合は、オーディオ信号が混入するセンサ信号から、オーディオ成分を差し引いて得られる信号をもとに制御信号を生成するなどといった処理を加える必要がある。

今回は、従来の2入力4点制御型についての収束速度や時間毎の消去量に関しては演算量が非常に多いため比較の対象としなかったが、演算量の比較の結果から従来用いられてきた2入力4点制御は、本提案手法と比べ、収束速度は遅くなるといえる。比較の結果、本提案手法では従来の2入力4点制御に比べ、タップ長が250の場合で演算量が約6割近く低減されており、同程度の性能をもつ処理装置を用いた場合の収束速度は、従来に比べ3倍ほど速くなると考えられる。しかし、2入力4点制御は、フィルタ処理をそれぞれ並列計算可能な処理装置で行うことで、演算量はあまり問題とされず、それに伴い収束速度が速くなるが、この場合の問題として、コストが高くなってしまふことである。また、従来の2入力4点制御の騒音に対する消去量に関しては、制御に用いる情報が本提案手法よりも多く高い精度での制御が可能である。しかし、ロードノイズを対象とした場合は、様々な要因で騒音が変化するため、高い精度で制御を行うことも重要であるが、騒音に対しての追従性の方が重要であり、追従性を確保することにより安定した動作を得られると考えられる。

本提案手法では、最小二乗法に基づくLMSアルゴリズムを適応アルゴリズムに用いているが、消去量に関しては十分とはいえない。しかし、本提案手法を用いることにより演算量の大幅な低減を可能とした。そのため、演算量が低減されたことにより、適応アルゴリズムの選択の幅が広がったため、他のアルゴリズムでの検証が必要である。一例として、演算量が高いが収束速度が最適な逐次最小二乗法に基づくRLSアルゴリズムを多入力多点制御に拡張したMultiple Error Filtered-X RLSアルゴリズムを用いるなどが考えられる。RLS

3.7 まとめ

法は LMS 法に比べ，入力信号間の相関性によって生じる悪条件の下でも RLS 法が LMS 法よりも収束が速いことが知られている [2]．RLS 法は LMS 法に比べ演算量は高いが，演算量低減化および高速化の研究も進められており，ロードノイズに対して検討も進められている．また，システムのスパース性などの先験的な情報を用いることなく結合量を調整し，収束特性の改善可能な DPAPNLMS アルゴリズムがある [9]．システムのスパース性とは，適応信号処理が対象とするシステム全体のインパルス応答に対し，振幅の大きい部分がどの程度集まっているかを表す．インパルス応答が 1 箇所集中している場合，そのシステムは高いスパース性を有する．車室内におけるインパルス応答も大きな値は短時間に集中し，その他は小さい値となり，スパース性を有していると考えられる．この DPAPNLMS アルゴリズムは，スパース性を考慮されたアルゴリズムであり，結合量を動的に算出することで，事前の情報を用いることなく結合量を設定可能であり，適応フィルタの推定値から係数ごとにその大きさに比例したステップサイズを設定することで，ロードノイズなどに対して十分な追従性を確保でき，安定した動作が期待できる．

3.7 まとめ

本章では，ロードノイズについてその特徴を述べた．ロードノイズを対象とした雑音除去モデルで従来多く用いられてきた 2 入力 4 点制御型の問題点である演算量の高さ，参照信号で発生する相関の影響により騒音への追従性が確保できないことについて述べた．これらの問題を解決する雑音除去モデルとして 1 入力 2 点制御型を用いる制御手法の利点を述べた．また，2 入力 4 点制御型従来手法とし，1 入力 2 点制御型を提案手法として演算量の比較を行い，演算量が低減された言を確認した．計算機シミュレーションを通して，ロードノイズの低減を確認し，提案モデルの有効性を確認した．

第 4 章

結論

4.1 本研究のまとめ

ロードノイズが様々な背景から近年問題となっていることについて述べた。このような自動車の車内に伝わる騒音を制御する方法として、アクティブ騒音制御があり、従来、非周期性の騒音に対するアクティブ騒音制御では、LMS 法に基づく Multiple Error Filtered-X LMS アルゴリズムが広く用いられていることについて述べた。しかし、多数のセンサ、制御音源を必要とすることで演算量が高くなり、騒音の変化に対する追従性が低いという問題を指摘した。また、従来多く用いられていたシステムでは、参照センサが複数あり、参照信号の相関による収束速度の劣化の問題を挙げた。そこで本研究では、ロードノイズを対象とし、従来の多点制御を用いた騒音制御システムに比べ、制御点数を抑え演算量を低減し、収束速度の劣化を抑えることが可能な雑音除去モデルの提案を行った。演算量の比較の結果、提案手法を用いることにより大幅に削減されていることを確認した。また、提案したモデルでシミュレーションを行い、提案手法で -3dB 程度の軽減を確認した。この結果から、本研究で提案した雑音除去モデルはロードノイズに対して有効であるといえる。

4.2 今後の課題

本研究ではロードノイズのみを対象にして、雑音除去モデルの提案を行った。本提案手法により演算量は低減できたことを確認したが、騒音の軽減はまだ十分ではない。そのため、演算量を低減したことにより適応アルゴリズムの選択の幅が広がったためロードノイズによ

4.2 今後の課題

り適した適応アルゴリズムの選定などを行う必要がある。今後の課題として、他の自動車からの外乱や参照信号の急な変化など、実環境で想定される状況を考慮しておらず、そのため実車での検証を行い、本提案手法が実環境でも有効であるか検証する必要がある。実用に際しては、車種によって車室内形状は様々であり、最適なスピーカおよびセンサ配置を考えなければならない。実環境では、自動車にあらかじめ搭載されているスピーカを用いての制御が考えられるために、オーディオ信号など他の信号との兼ね合いも考慮する必要がある。

謝辞

本研究を行うにあたり，ご指導して頂いた福本昌弘教授に感謝致します．本研究の副査をして頂いた坂本明雄学群長，吉田真一講師にも感謝致します．また，佐伯幸郎助教授，福富英次助手にも感謝致します．

福本先生には，計画性のない私をここまで導いて下さったことを感謝しています．福本先生の支えなくしては，ここまでこれなかったと思います．卒論や発表練習の忙しいかった時期に先生に差し入れて頂いたお菓子は，さながら受験生の気分を思い出させてくれました．因果応報の文字は今でも胸に刻まれています．また，カップラーメンはおいしいので栄養がなくてもやめられません．

文章力の乏しい私を夜遅くまで指導して頂いた佐伯幸郎助教にも心からお礼申し上げます．これからは，分かりやすい文章というものを心がけようと思います．また，コーヒーなど差し入れを頻繁にして頂いたこと感謝しています．あのコーヒーを差し入れして頂くたびに頑張ろうと思うことができました．しかし，トランプ 2 個を使った大富豪には，やはり無理があったかと思います．

最初，FreeBSD の知識のない私に優しく指導して頂いた福富英次助手にもお礼申し上げます．また，発表の前日の夜遅くまで，練習に協力してくださったこと，感謝しています．発表に関する質問など答えていただいたおかげで，本番では自信を持って発表にのぞむことができました．

共に研究に取り組んだ同学年方々にも感謝致します．隅田氏には，夜御飯などを食べに連れて頂いたり，とてもお世話になりました．自転車しかもっていない私に弁当などいつも買いにいていただきました．今度はつけ麺の本店の方にも行きたいです．本当に感謝しています．また，坂本研究室 4 年大倉氏にも感謝します．大倉氏は同じ県出身ということで，様々な場面でお世話になりました．今度お好み焼き村に一緒に行きましょう．また，何度も寝ている私を起こす役目を頼んで申し訳ありませんでした．本当に感謝しています．3 人で

謝辞

よく研究室で寝泊まりしたのは、今となってはいい思い出です。同研究室岩田氏、宮下氏には、研究発表会の準備など中心となって参加していただき、本当に助かりました。

大学生活を送るにあたり、両親には様々な場面で迷惑をかけてしまいました。この場を借りて感謝します。学生生活を影から4年間影支えて頂きありがとうございました。最後に、大学生活4年の間に関わり、心の支えになって頂いた全ての方々に感謝致します。

参考文献

- [1] 長谷川聡, “自動車用アクティブ・ノイズ・コントロール,” 日本造船学会誌 第 761 号, 1992 .
- [2] 佐野久, 足立修一, 粕谷英樹, “最小 2 乗法に基づく自動車のアクティブ騒音制御に関する研究,” 日本機械学会論文集 (C 編), 61 巻 第 581 号, 1995-1 .
- [3] 今野文靖, 大西将秀, 小手川和久, “エンジンこもり音を低減するアクティブ騒音制御システム,” Panasonic Technical Journal, Vol.54 No.4 , 2009 .
- [4] 陳国躍, 安倍正人, 曾根敏夫, “多入力多制御点の ANC システムにおける適応アルゴリズムの収束特性,” 電子情報通信学会論文誌 Vol.J82-A, No.6, pp.851-859, 1999 .
- [5] 前田大輝, 藤井健作, 棟安実治, “マルチチャンネル適応アルゴリズムの一提案とその解析,” 電子情報通信学会論文誌 Vol.J87-A, No.2, pp.180-189, 2004 .
- [6] 星野博之, 小沢義彦, “車内音を構成する音の要素とその評価,” 豊田中央研究所 R&D レビュー Vol.30, No.3, 1995 .
- [7] 辻井重男, “適応信号処理,” 昭晃堂, 1995 .
- [8] Simon Haykin(著), 鈴木 博 (翻訳主幹), “適応フィルタ理論,” 科学技術出版, 2001 .
- [9] 佐伯幸郎, 福本昌弘, “動的に結合量を調整する結合係数比例型 NLMS アルゴリズム,” 電子情報学会誌 A, Vol.193-A, No.10, pp.677-680, 2010 .