

氏名（本籍）	CHEN 陳	GUO 國	YUE 躍	（中国）
学位の種類	博士（情報科学）			
学位記番号	情博第28号			
学位授与年月日	平成8年3月26日			
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当			
研究科，専攻	東北大学大学院情報科学研究科（博士課程）システム情報科学専攻			
学位論文題目	複数騒音源による騒音場の能動制御に関する研究			
論文審査委員	(主査)			
	東北大学教授	曾根 敏夫	東北大学教授	根元 義章
	東北大学教授	阿部 健一 (工学研究科)	東北大学助教授	鈴木 陽一
	東北大学助教授	安部 正人		

論文内容要旨

第1章 序 論

騒音が人間に与える精神的，身体的影響は大きく，騒音を制御する必要のある場合が少なくない，そのため，様々な騒音制御法が研究されているが，その方法には，大きく分けて，受動制御と能動制御がある。騒音の受動制御の代表的な方法は，遮音と吸音を組合せたものであるが，この方法で低い周波数成分をもつ騒音を制御しようとする，かなり厚くて固い遮へい物を用意しなければならず，現実的ではない。また，騒音源が大きい場合には，その周囲を完全に覆うことは困難である。更に，自動車や列車の走行音のように，騒音源を囲むことができない場合もある。

騒音の能動制御（Active Noise Control：ANC）は，このような受動制御の弱点を補うために開発されてきたもので，ある観測点において騒音が消去されるように，騒音と逆位相の音を放射することによって行われる。騒音の能動制御は，低周波数で良好な結果が得られるが，膨大な計算量を必要であるという問題もある。しかし，近年，計算機の進歩に伴って発達してきたデジタル信号処理装置（Digital Signal Processor：DSP）により，高速で，より複雑なデータ処理が可能になったこと，また，このDSP上に効率的に適応フィルタを構成するためのアルゴリズムが開発されたことにより，騒音の能動制御の研究が，盛んに行われるようになってきている。しかし，騒音源が複数存在する場合や，広い空間を制御するための研究は十分には行われていない。

そこで，本論文では，現実の系への応用を考え，図1に示すように，適応LMS型アルゴリズムを用いたフィードフォワード制御により，騒音源が複数存在する，より一般的な場合の多点制御（多チャンネルANC）システムに関して，騒音減衰量，収束特性を理論的に検討し，収束特性を改善する方法を提案し，シミュレーション及び実験により，騒音打ち消しの効果を向上させることができることを明らかにした。

第2章 騒音の能動制御のための適応アルゴリズムに関する従来の研究とその問題点

温度変化や人の出入りに伴う音の伝搬経路の変動を避けるため，現在のANCシステムの多くは，適応フィルタを用いたフィードフォワード制御システムとして実現されている。すなわち，適応アルゴリズムにより適応フィルタの係数を更新して，制御点で得られる残留信号を最小にするように制御される。そのため，適応アルゴリズムは，ANCの実用化によって極めて重要なものであるといえる。適応アルゴリズムとしては，LMS，NLMS，射影，RLSなどのア

ルゴリズムが開発されており、一般的に収束速度が速いと計算が複雑で、計算量も多いという特徴をもつ。そこで、本研究では、実用的な ANC システムを目指し、現在の DSP で実現可能な、構造が簡単で、計算量が少なく、安定性が高い LMS 型適応アルゴリズムを対象とすることとした。そして、この実用的な LMS 型の適応アルゴリズムを基にして、収束特性の良好な RLS アルゴリズムに匹敵する収束特性をもつ ANC システムを実現するための研究を行う。すなわち、Filtered-x LMS アルゴリズムと MEFX LMS を用いた、フィードフォワード制御 ANC システムを対象として、収束速度が劣化する原因を克服して、実用的な演算量の範囲内で、収束速度を向上させた ANC システムを開発することを目的とする。

第 3 章 時間領域で動作する適応アルゴリズムの周波数領域での評価

本章では、ANC システムの性能解析及び改善方法の発見を容易にするために、時間領域で動作する適応アルゴリズムを周波数領域において評価するためのアルゴリズムを導出した。その結果、適応アルゴリズムの収束特性は、騒音信号のパワースペクトル $|X|^2$ 、2 次音源から制御点までの伝達関数 C 、及び騒音源から参照センサまでの伝達関数 B を独立に解析することにより、評価できることを述べた。その結果、伝達関数 C のパワーゲイン $|C|^2$ 及び伝達関数 B のパワーゲイン $|B|^2$ の値が小さい周波数では、適応フィルタの収束速度が遅くなることが明らかとなった。更に、シミュレーション及び実験により提案する評価法の有効性を確認した。図 2 に示す伝達関数 C を用いたときのエラーセンサで得られた残響信号のパワースペクトルを図 3 に示す。図 2 と図 3 を比較すると、理論検討から予想されるように、伝達関数 C のパワーゲインが小さい周波数では、収束速度が遅くなり、計算誤差が大きくなるため、打ち消し量が小さくなっている。

第 4 章 打ち消し音伝搬系のカップリングに起因する ANC の性能劣化とその改善手法

多数の 2 次音源を用いた多点制御の ANC システムに関しては、従来は、2 次音源及びエラーセンサの位置と騒音減衰量に関して実験的検討が行われているのみで、その適切な配置等に関しては、理論的に検討されていない。

そこで、本章では、3 章で導出した周波数領域での評価法を基にして、複数の 2 次音源からエラーセンサまでの伝達特性が多チャンネル ANC システムに与える影響について、詳細に検討した。すなわち、多チャンネル ANC システムにおいては、複数スピーカから放射された打ち消し音が、空間で混じり合うこと（カップリング）により、適応フィルタの収束速度が遅くなることを明らかにしている。その結果、多数の伝達関数 C から構成される行列 C の、 $|C^H C|$ の値が小さい周波数では、適応フィルタの収束特性が劣化することを、理論及びシミュレーションにより明らかにした。

また、フィードフォワード制御による ANC では、打ち消しを行なう前に、伝達関数 C を測定する必要がある。ことを逆に言えば、測定した伝達関数 C の特性から、事前に、ANC システムの性能を評価できるということである。以上の検討の結果を踏まえ、 $|C^H C|$ の値の周波数変動ができるだけ小さくなるようにするための 3 つの改善法について検討した。すなわち、(1) 2 次音源とエラーセンサの位置の調整、(2) 2 次音源数の増加、(3) Inversed-c アルゴリズム利用の 3 つで、それぞれ理論的検討、シミュレーション及び実験により、適応フィルタの収束速度が速くなることを検証した。

図 4 に 2 次音源数を増加することにより、収束速度を向上させる方法の有効性を検証した実験の結果を示す。

第 5 章 参照信号間に相関がある場合の ANC の性能劣化とその改善手法

騒音源が多数存在する場合、従来のほとんどの研究では、参照信号として騒音源の信号がそのまま得られ、参照センサ出力間に相関がないという場合についてのみ検討が行われている。しかし、実際には、騒音源からの信号を独立に得ることは不可能な場合が多く、参照センサの出力においては、各騒音源からの信号を独立に得ることは不可能な場合が多く、参照センサの出力においては、各騒音源からの騒音の影響が混じっている場合がほとんどである。

本章では、3 章で提案した解析法を基にして、多チャンネル ANC システムの性能に影響を与えるもう 1 つの要因として、騒音源から参照センサまでの伝達関数行列 B について詳細に検討した。その結果、各参照センサの出力における、参照信号間の相関が大きいくほど、 $|BB^H|$ の値が小さくなり、適応フィルタの収束速度が遅くなり、計算誤差が生じ、打ち消し量が小さくなることが分かった。そこで、この結果を基にして、参照信号の相関をなくす手法（相関除去

フィルタ, decorrelator) を提案し, 収束速度を向上させることができることを, 理論的に明らかにし, 図5に示すシミュレーションにより検証した。

第6章 結論

本章では, 本研究によって得られた結論を総括した。

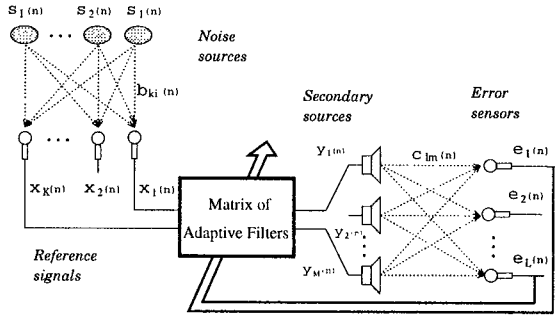


図1: 騒音源が複数存在する場合の多点制御システム (多チャンネル ANC システム)

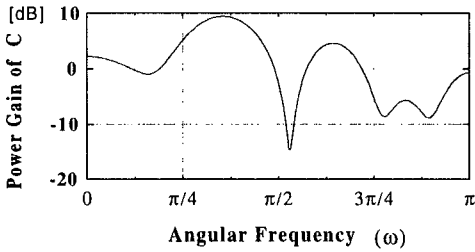


図2: 残響のある部屋で実際に測定した伝達関数 C のパワーゲイン

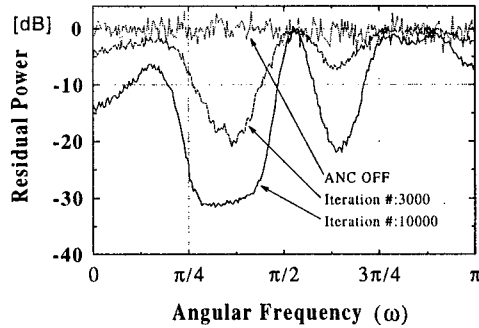


図3: 図2に示す伝達関数 C を用い, シミュレーションにより得られた結果。点線は ANC が行う前のパワースペクトルであり, 破線及び実線は適応フィルタを 3000 及び 10000 回更新した後に, 残差信号のパワースペクトル。

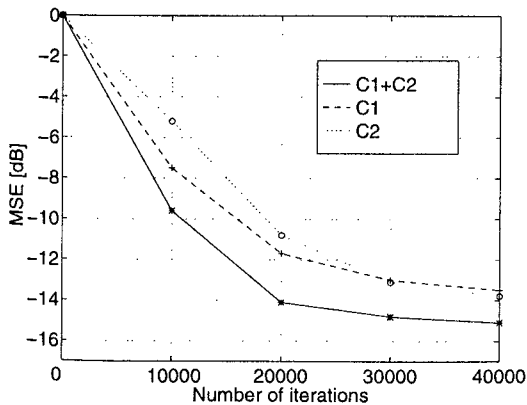


図4: 2次音源を1つ (C1の場合: 鎖線, C2の場合: 点線) 用いた場合と2つ (C1とC2を同時に使う場合: 実線) 用いた場合の適応フィルタの収束図

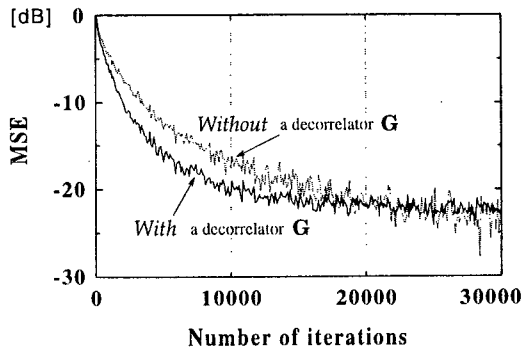


図5: 残響のある部屋で実際に測定したインパルスレスポンスを用いた場合のシミュレーション結果, 点線は, フィルタ G を入れていない場合, 実線は, 相関除去フィルタ G 入れた場合の適応フィルタの収束速度である。

審査結果の要旨

能動騒音制御によれば、ダクト内の一次元音場や、狭い制御領域での有効な減音が期待できるが、騒音源が複数個存在する場合や、広い空間を制御するために用いられる多チャンネル能動騒音制御システムに関しては、まだ殆ど研究が行われていない。本論文は、多チャンネル能動騒音制御に関して、高い性能を実現するために行った研究の成果をまとめたもので、全編6章からなる。

第1章は、序論である。

第2章では、能動騒音制御で使われる、時間領域で動作するLMS適応アルゴリズムを用いたフィードフォワード制御に着目し、伝達系が変動する場合の問題点を考察している。

第3章では、時間領域で動作する適応アルゴリズムの収束特性の、周波数領域における評価を可能にするアルゴリズムを導出している。これによれば、多チャンネル能動騒音制御システムの場合、騒音のパワースペクトル、2次音源から制御点までの伝達関数、および騒音源から参照センサまでの伝達関数を独立に解析することにより、適応アルゴリズムの収束特性を評価できることを明らかにしている。これは、重要な知見である。

第4章では、上の評価法を基にして、2次音源からエラーセンサまでの伝達関数が適応フィルタの収束特性に及ぼす影響について、詳細に検討した結果、伝達関数行列式の値が小さいほど収束速度は遅くなり、計算誤差が生じ、打ち消し量が小さくなることを明らかにしている。さらに、収束特性を改善するための3つの方法を提案して詳細に検討し、シミュレーションおよび実験によって、その有効性を検証している。これは、高く評価される成果である。

第5章では、第3章で提案した評価法に基づいて、騒音源から参照センサまでの伝達関数が適応フィルタの収束特性に及ぼす影響を詳細に検討している。その結果、一般に、各参照センサの出力には、各騒音源からの信号が混じり合っており、参照信号間に相関が生じるため、収束速度が遅くなり、計算誤差が生じ、打ち消し量が小さくなることを明らかにしている。さらに、騒音源から参照センサまでの伝達関数は、一般に未知であるため、第4章の改善法が使えないことから、参照センサ出力間の相関を除去することにより、能動騒音制御システムの収束特性を改善する方法を提案し、シミュレーションおよび実験によって、その有効性を立証している。これは、優れた着想であり、高く評価できる。

第6章は、結論である。

以上要するに、本論文は、実用的なLMS型適応アルゴリズムを基に、複数騒音源による騒音場で用いるための、多点能動騒音制御システムの収束特性の改善を可能にする種々の手法を与え、その有用性を実証したもので、システム情報科学および騒音制御工学の進展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（情報科学）の学位論文として合格と認める。