

氏名	まきのしょうじ 牧野昭二
授与学位	博士（工学）
学位授与年月日	平成5年3月18日
学位授与の根拠法規	学位規則第5条第2項
最終学歴	昭和56年3月 東北大学大学院工学研究科機械工学専攻 前期2年の課程修了
学位論文題目	音響エコーキャンセラのための適応信号処理の研究
論文審査委員	東北大学教授 曾根 敏夫      東北大学教授 竹田 宏 東北大学教授 中村 僖良      東北大学助教授 鈴木 陽一 東北大学助教授 安倍 正人

## 論 文 内 容 要 旨

通信の高度化に伴い、臨場感あふれる高品質拡声通話系の実現が強く望まれている。音響エコーキャンセラは、テレビ会議システムをはじめとした拡声通話系において、ハウリングやエコーを防止し、自然な通話を実現することを目的として、近年、各国で研究開発が進められている。音響エコーキャンセラは、スピーカ・マイクロホン間のインパルス応答を適応フィルタにより推定して、擬似エコーを作成し、真のエコーから差し引いて消去するものである（図1）。この適応フィルタは、8 kHzサンプリング時には数千次に及ぶため、演算量の多い従来の適応アルゴリズムを用いた場合には、最新のデジタル信号処理LSIをもってしても実時間で動作できない。一方、演算量の少ない従来の適応アルゴリズムを用いた場合には、収束速度が遅く、人の移動などによる音響エコー経路の変化に迅速に追従できないため、エコーやハウリングを完全に防止できないという問題があった。

本論文はこのような背景のもとに、適応追随性に優れた音響エコーキャンセラを実現するために、実時間で動作し、安定で、収束特性に優れた適応アルゴリズムを開発することを目指して行なった研究の成果をまとめたものである。

本研究では、従来の適応アルゴリズムには利用されていなかった音響エコー経路の特性に関する知識を、適応アルゴリズムに反映させて、音響エコーキャンセラの収束特性の改善を図ることを基本的な考え方としている。そして、この考えに基づいて4つの新しい適応アルゴリズムの提案を行

なっている。

第2章では、まず、人や物の移動によりインパルス応答が変化する場合に、その変化分（2つのインパルス応答波形の差）の期待値は、インパルス応答と同じ減衰率で指数減衰し（図2）、トランスバーサル形FIRフィルタの係数誤差もまた、インパルス応答と同じ減衰率で指数減衰することを明らかにした。そして、誤差の大きな係数は大きなステップで、誤差の小さな係数は小さなステップで修正するという本研究の基本的な考え方を導いた。

次に、この音響エコー経路の変動特性を、NLMSアルゴリズム（学習同定法）に反映させた。そして、従来のNLMSアルゴリズムと同等の演算量と記憶容量で、収束速度が約2倍の、新しい適応アルゴリズムを提案した。ESアルゴリズムと名付けたこの適応アルゴリズムでは、トランスバーサル形FIRフィルタのそれぞれの係数を、異なる値のステップサイズで修正している。これらのステップサイズは時不変で、インパルス応答の変化分の期待値に比例して指数的に重み付けられている。本手法により、誤差の大きな係数は大きなステップで、誤差の小さな係数は小さなステップで修正される。

次に、本手法の収束過程を定式化することにより、係数誤差の2乗期待値の変化を明らかにした。また、平均ステップサイズで、収束条件、収束速度、過剰平均2乗誤差を制御できることを明らかにした。

さらに、複数のデジタル信号処理プロセッサ（DSP）チップを用いて構成する実際のシステムにおいては、指数減衰曲線を階段状に近似し、ステップサイズを各DSPチップごとに一つの定数として与えることにより、従来のNLMSアルゴリズムと同等の演算量と記憶容量で、本手法を実現できることを示した。

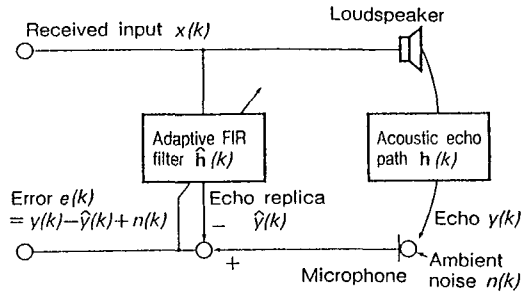
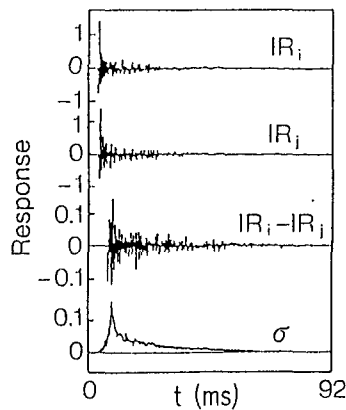
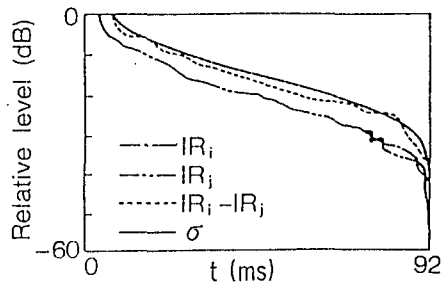


図1 音響エコーキャンセラの原理



(a) Impulse responses and their variation



(b) Reverberant energy decay curves

図2 音響エコー経路のインパルス応答の変動特性

最後に、本手法を複数の DSP で構成された商用の音響エコーキャンセラに採用し、実際の室内で実時間評価実験を行なった。その結果、本手法は従来の NLMS アルゴリズムに比べて、白色雑音入力に対して約 3 倍、音声入力に対して約 2 倍の収束速度を有することを明らかにした (図 3)。

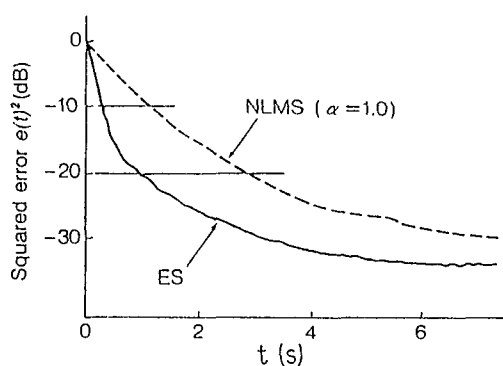


図 3 ES アルゴリズムの収束特性の実時間評価結果

第 3 章では、音響エコー経路の変動特性を (アフィン) 射影アルゴリズムに反映させた。そして、従来の NLMS アルゴリズムと同程度の演算量と記憶容量で、音声入力に対して収束速度が約 4 倍の、新しい適応アルゴリズムを提案した。ES 射影アルゴリズムと名付

けたこの適応アルゴリズムでは、音響エコー経路のインパルス応答の変動特性を活用し、さらに、音声のような有色信号の白色化を行っている。本手法では、トランスバーサル形 FIR フィルタのそれぞれの係数を、異なる値のステップサイズで修正している。これらのステップサイズは時不変で、インパルス応答の変化分 (2つのインパルス応答波形の差) の期待値に比例して指数的に重み付けられている。これにより、誤差の大きな係数は大きなステップで、誤差の小さな係数は小さなステップで修正される。さらに、本手法では、隣合う入力信号ベクトル間の相関を取り除いている。これにより、音声入力に対する収束速度を改善することができる。

次に、本手法を定式化するとともに、幾何学的解釈を与えた。併せて、本手法の収束条件が、平均ステップサイズにより与えられることを証明した。

さらに、演算量を削減するために高速算法を導入し、複数の DSP チップを用いて構成する実際のシステムにおいては、指数減衰曲線を階段状に近似し、ステップサイズを各 DSP チップごとに一つの定数として与えることにより、従来の NLMS アルゴリズムと同程度 (約 2 L) の演算量と記憶容量で、本手法を実現できることを示した。

最後に、本手法を複数の DSP で構成された音響エコーキャンセラに適用し、実際の室内で実時間評価実験を行なった。その結果、本手法は従来の NLMS アルゴリズムに比べて、白色雑音入力に対して約 2 倍、音声入力に対して約 4 倍の収束速度を有することを明らかにした。

第 4 章では、音響エコー経路の変動特性を RLS アルゴリズム (逐次最小 2 乗法) に反映させた。そして、従来の RLS アルゴリズムに比べて収束速度が約 2 倍の、新しい適応アルゴリズムを提案した。ES-RLS アルゴリズムと名付けたこの適応アルゴリズムでは、係数誤差共分散行列に対角行列 (ステップサイズ行列) を加算している。このステップサイズ行列は時不変で、その対角成分は、インパルス応答の変化分 (2つのインパルス応答波形の差) の期待値に比例して指数的に重み付け

られている。本手法は、RLSアルゴリズムに物理的意味付けを与えるカルマンフィルタに立ち返って、インパルス応答の変化に伴う係数誤差共分散行列の性質について検討した結果得られたものである。

次に、本手法を定式化し、本手法により、誤差の大きな係数は大きなステップで、誤差の小さな係数は小さなステップで修正されることを示した。また、ステップサイズ行列の大きさ（平均ステップサイズ）で、収束速度と定常エコー消去量のトレードオフの関係を制御できることを明らかにした。

さらに、収束特性の計算機シミュレーションを行い、本手法は従来のRLSアルゴリズムに比べて、白色雑音入力に対して約2倍、音声入力に対しても約2倍の収束速度を有することを明らかにした。

第5章では、インパルス応答の変化の大きな部分は大きく修正し、変化の小さな部分は小さく修正するという考え方を、周波数領域にまで発展させた。そして、受話入力信号とエコー信号を複数の周波数帯域に分割し、それぞれの周波数帯域で独立にエコーを消去するサブバンドエコーキャンセラに適用した。ポリフェーズフィルタバンクを用いたサブバンドエコーキャンセラにおいては、多くの周波数帯域の信号が複素数になるため、従来の複素NLMSアルゴリズムに、第2章で提案したESアルゴリズムの考え方を適用して、新しい適応アルゴリズムを提案した。

サブバンドESアルゴリズムと名付けたこの適応アルゴリズムでは、音響エコー経路のインパルス応答を帯域フィルタに通した出力の指数減衰率と変化の大きさが、各周波数帯域で異なることに着目している。そして、インパルス応答を幾つかの周波数帯域に分割し、各周波数帯域における音響エコー経路の変動特性[指数減衰率（傾き）および変化量（大きさ）]を、その周波数帯域におけるステップサイズ行列の指数減衰率および平均ステップサイズに反映させている。その結果、各周波数帯域における音響エコー経路の変動特性の違いを適応アルゴリズムに反映させ、収束特性を改善することができる。

室内音場のインパルス応答データを用いた計算機シミュレーションを行ない、本手法により白色雑音に対する収束速度を、複素NLMSアルゴリズムを用いた従来のサブバンドエコーキャンセラに比べて2倍以上に、さらに、第2章で提案したESアルゴリズムに比べて約1.5倍に改善できることを明らかにした。

以上の研究により、音響エコーキャンセラの収束速度は向上し、人の移動や周囲環境の変化にも素早く追従できるようになった。本研究の成果により、ハウリングやエコーのない高品質拡声通話系の実現へ向けて、大きく前進したものと考えている。

## 論文審査の要旨

テレビ会議システムに代表される拡声通話系では、スピーカからマイクロホンへの帰還による音響エコーが発生するが、これは電気回路で発生するエコーに比べてインパルス応答が長く、また、人の移動などで変化するため、従来の適応アルゴリズムをそのまま用いてエコーキャンセラを実現することは困難であった。著者は、このような系に対する音響エコーキャンセラを実現するため、音響経路の特性に関する知識を反映した高速適応アルゴリズムの研究を行ってきた。本論文はそ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、人や物の移動によるインパルス応答の変化量の期待値がインパルス応答と同じ減衰率で指数減衰し、適応フィルタの係数誤差もまた同じ減衰率で指数減衰することに着目し、この知識を基に、適応フィルタの係数の期待値に従って係数更新ステップを変化させるという本研究の基本的な考え方を導いている。次に、この性質を学習同定法（NLMSアルゴリズム）に反映させて、従来の学習同定法と同等の演算量と記憶容量で収束速度が約2倍の、新しい適応アルゴリズムを提案している。これはすぐれた着想に基づく有用な成果である。

第3章では、音声のような有色信号における相関を取り除くことによってフィルタ係数の収束速度を改善する射影アルゴリズムに、音響経路の変動特性を反映させる方法を提案し、収束速度を大幅に改善できることを示している。

第4章では、適応フィルタをカルマンフィルタとして取扱うことにより、音響経路のインパルス応答の変化分が指数減衰する性質を修正逐次最小2乗（RLS）アルゴリズムに取入れ、元来高速な同アルゴリズムの収束速度を更に約2倍に改善できることをシミュレーションにより示している。この手法は、将来の高精度エコーキャンセラの実現に有効な手段を与えるものである。

第5章では、音響経路のエコー減衰特性が周波数に依存することから、入力信号を多くの帯域に分割し、複素NLMSアルゴリズムに各帯域における減衰特性を反映させてフィルタ係数の収束速度を改善する応用範囲の広い適応アルゴリズムを提案している。これは、現存のLSIを用いても実時間で動作可能な音響エコーキャンセラを実現できる手法であり、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、これまで実現が困難であった音響エコーキャンセラを実現するための、新しい適応フィルタのアルゴリズムについて詳細に研究したもので、情報通信工学ならびに電気音響工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって本論文は、博士（工学）の学位論文として合格と認める。