エコーキャンセラの収束解析と安定かつ高速な学習アルゴリズム

氏　　　　名	平　野　晃　宏
生　年　月　日	
本　　　　籍	京都府
学　位　の　種　類	博士（工学）
学　位　記　番　号	博乙第225号
学位授与の日付	平成12年9月29日
学位授与の要件	論文博士（学位規則第4条第2項）
学位授与の題目	エコーキャンセラの収束解析と安定かつ高速な学習アルゴリズム
論文審査委員(主査)	船田　哲男（工学部・教授）
論文審査委員(副査)	橋本　秀雄（工学部・教授）西川　　清（工学部・教授）
	堀田　英輔（工学部・講師）松浦　弘毅（工学部・教授）

学 位 論 文 要 旨

ABSTRACT

This dissertation investigates convergence characteristics of echo cancellers and proposes robust and fast learning algorithms. Chapter 1 briefly reviews topics on echo cancellation followed by the introduction to adaptive filters and echo cancellers.

Chapter 3 proposes a new noise-robust adaptive FIR filtering algorithm with an adaptive step-size based on the reference input signal power and the estimated noise power. Computer simulations show that the proposed algorithm improves echo reduction performance by more than 10 dB.

A modified normalized least mean squares (NLMS) algorithm based on a long-term and a short-term averages of the reference input signal power is proposed in Chapter 4. A new power estimator guarantees stability and enhances robustness against the additive noise. Simulation results show that the convergence speed and the echo reduction performance are superior to some previously proposed adaptive-step algorithms.

Chapter 5 proposes a new compact multi-channel echo canceller with N adaptive filters for N-channel case, while conventional ones requires N^2 filters. Fast-tracking algorithm for talker change is also proposed which utilizes multiple sets of filter coefficients. The proposed echo canceller has been implemented by using multiple signal processors. Experimental results and subjective tests show a satisfactory

performance.

Chapter 6 focuses on stereophonic echo cancellers with pre-processing. Convergence of the averaged filter coefficients is analyzed followed by uniqueness analysis in the frequency domain. A design criterion for a pre-processor is derived from the analysis. A new second-order pre-processor from the criterion improves the convergence speed.

要旨

通信システムにおいて、送信側が送り出した信号が時間遅れを伴って送信側に戻ってきたものをエコーという。このようなエコーは会話の妨げになり、また、全二重データ通信では通信に重大な障害となる。このようなエコーを除去するために、エコーキャンセラが広く用いられている。

エコーキャンセラにおいては、収束速度を高速化すること、演算量を削減すること、非線型なエコーの除去方法、妨害信号への耐性を高めること、多チャンネルに対応させることなどが技術的課題となっている。本研究では、エコーキャンセラの諸問題のうち、妨害信号への耐性と多チャンネル化を検討する。第1章ではエコーキャンセラの技術的課題を示し、続く第2章で適応フィルタおよびエコーキャンセラの概要を述べる。

第3章では、走行中の自動車内のように雑音が混入した環境下でも学習が可能な適応フィルタの学習アルゴリズムを提案する。まず、正規化LMSアルゴリズムが雑音に弱い理由を考察する。考察結果に基づいて、勾配型アルゴリズムにおいて参照入力信号パワーと雑音パワーに応じてステップサイズを制御するアルゴリズムを提案する。車内で収録した音声データを用いたシミュレーション結果によって、本アルゴリズムの有効性を示す。また、本アルゴリズムをDSPを用いて実現し、ハードウエアによる評価実験で、雑音の混入した環境下でのエコー除去が可能であることを示す。

第4章では、妨害信号に強く、かつ、高速に収束する正規化LMSアルゴリズムを提案する。まず、参照入力信号パワーの推定法が正規化LMSアルゴリズムの収束特性に与える影響を解析する。長時間平均パワーを用いると雑音への耐性は増すが、不安定になる場合がある。解析結果より、参照入力信号の長時間平均パワーと短時

間平均パワーを用いて、安定でかつ高速に収束する正規化LMSアルゴリズムを導出する。短時間平均パワーを用いてパワーの下限を設定することにより、長時間平均を用いても安定に動作できる。自動車内で録音したエコーと雑音を用いた計算機シミュレーションの結果を図1に示す。エコー除去性能ERLEの最大値は3章で提案した耐雑音可変ステップサイズアルゴリズム(AS/RNP)の方が高く、収束速度は本アルゴリズム(M-NLMS)の方が速い。これらのアルゴリズムは、用途に応じて使い分ける。

第5章では、1チャンネル1個の適応フィルタで構成される多チャンネルエコーキャンセラを提案する。音声会議において最も一般的である同時には話者が一人しか発言しない場合のエコー生成モデルを用いて1チャンネル1個の適応フィルタでエコーを消去できることを示し、この原理に基づく多チャンネルエコーキャンセラ(図refFIG-STEC-CSW) を提案する。Nチャンネルの場合に演算量を従来法の$1/N$に削減できる。また、複数のフィルタ係数を切り替えることにより話者交代に高速に追従できる。部屋の音響特性の実測値を用いた解析、計算機シミュレーション、マルチDSPシステムを用いたハードウェア評価により、提案アルゴリズムが少ない演算量で高速に収束することを示す。図3に示す2人の話者が交互に発言する場合のエコー除去性能より、提案法 (1AF-CSW) は2人の話者が1回ずつ発言を終えた1000サンプル以降にはエコー除去量ERLEの低下が見られないことがわかる。また、図4に示す試作装置による評価も行っている。

第6章では、図5に示す前処理を用いたステレオエコーキャンセラの収束特性を解析し、解析結果に基づいて最適値に高速に収束する前処理方法を提案する。フィルタ係数誤差期待値の収束特性と周波数領域における解の一意性を解析し、フィルタ係数が最適値に収束するための必要条件を導出する。前処理フィルタの特性や前処理フィルタの特性変化と部屋の伝達関数との関係が収束特性に大きな影響を持つ。これらの解析により前処理フィルタが備えるべき特性を示し、2次オールパスフィルタを用いた前処理を提案する。図6に示すシミュレーション結果より、提案法(Proposed)の収束速度は他の前処理フィルタ ($F(z) = z^{-1}$, 1-APF(z)) より高速であることがわかる。

本論文では、付加雑音に強い学習アルゴリズムと、多チャンネルエコーキャンセラの学習アルゴリズムを提案した。付加雑音に強い学習アルゴリズムを多チャンネ

ルエコーキャンセラと組み合わせることにより、耐雑音性に優れ、かつ、臨場感あふれる通信システムの構築が可能になる。

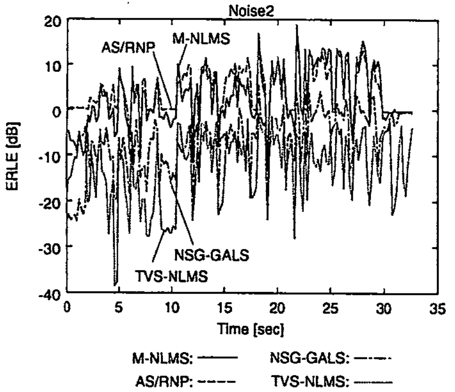

図 1: 雑音混入時のエコー消去量ERLE

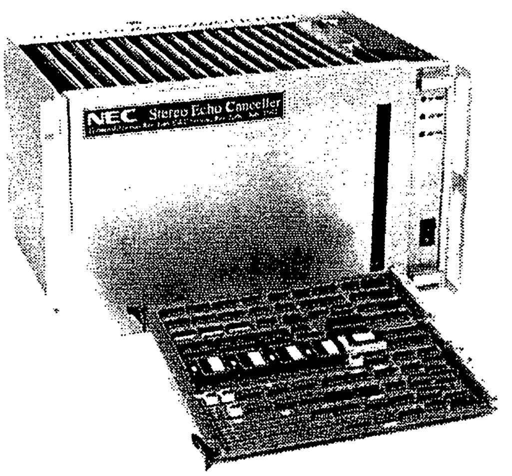

図 4: ステレオエコーキャンセラの外観

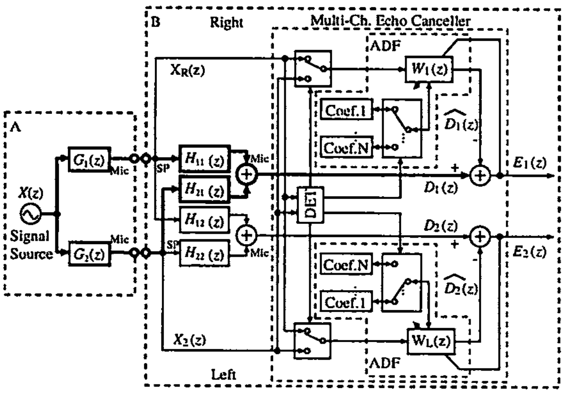

図 2: フィルタ係数切り替え型ステレオエコーキャンセラ

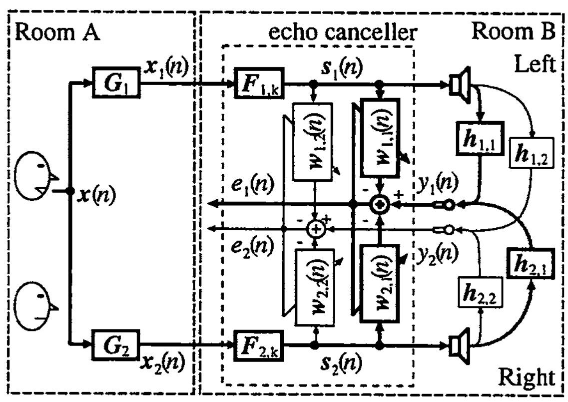

図 5: 前処理を用いたステレオエコーキャンセラ

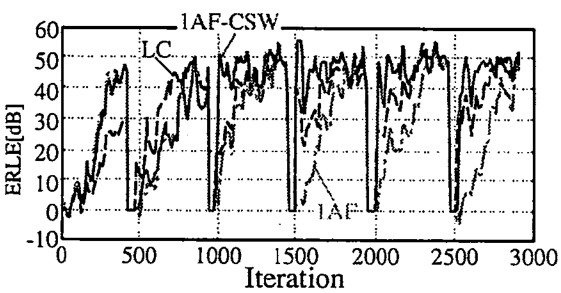

図 3: 話者交代に対する追従特性

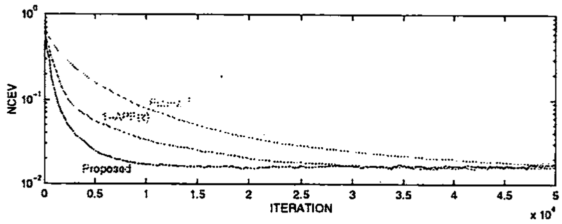

図 6: 前処理方式の比較

学位論文審査結果の要旨

平成12年8月1日に開催された第1回学位論文審査委員会，及び平成12年8月4日に行われた口頭発表と第2回学位論文審査委員会で慎重審査した結果，以下の通り判定した。

通信システムでは，種々の要因によりエコーが発生し通信品質の劣化を招いている。このために用いられる適応形エコーキャンセラでは，高速学習，少ない演算量，悪条件下での安定動作，並びに多チャンネル化が重要なポイントである。

本論文では，まず，妨害信号が影響する状況で，参照入力信号の長時間平均電力と短時間平均電力を用いてパラメータの修正量を制御することにより，安定かつ高速な正規化LMSアルゴリズムを提案している。次に，遠隔会議システムで，話者が常に一人である条件でエコーキャンセラの収束性を解析し，Nチャンネル通信において，演算量を従来法の1/Nに低減できる多チャンネルエコーキャンセラを提案している。さらに，ステレオエコーキャンセラにおいて，フィルタ係数の収束特性と解の一意性を解析し，フィルタ係数が最適値に収束するための必要条件を導いている。学習を安定化する方法として，時変の前処理フィルタを用いる方法がある。この時変フィルタの特性と会議室の音響特性の相互関係が収束特性に及ぼす影響を解析し，良好な音質と高速学習の両立を可能とする時変フィルタが備えるべき特性を明らかにした。

以上の研究成果は，エコーキャンセラに関する理論的な解析とそれに基づく方法論の提案という点で学術的に高く評価できる。同時に，将来の臨場感あふれる通信システムの実現にとって重要な基盤技術を提案しており，本論文は博士(工学)論文に値するものと判定する。