

氏名	阿部 正 英
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成11年3月25日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程)電気・通信工学専攻
学位論文題目	進化論的計算手法による適応デジタルフィルタに関する研究
指導教官	東北大学教授 川又 政征
論文審査委員	主査 東北大学教授 川又 政征 東北大学教授 樋口 龍雄 東北大学教授 阿部 健一

論文内容要旨

第1章 緒言

未知システムの入力信号と出力信号からシステムのパラメータを逐次的に推定するフィルタである適応フィルタは、環境の変化に適応して信号処理を行う技術において重要なフィルタである。近年、LSI 技術を基板とするデジタル信号処理技術の発展によって、適応的な処理を高精度で行うことが可能となっている。しかし、適応デジタルフィルタを IIR フィルタで構成した場合、従来の適応アルゴリズムでは、多峰性の2乗平均誤差曲面において極小値に収束し、最小値を探索できない場合がある。

この従来の適応アルゴリズムで用いている解析的・代数的手法は、これまでのほとんどの科学技術の分野において用いられている。この手法は、「かたいシステム」を分析・設計する場合には、都合のよい方法である。一方、最近では、生命や生物の特質をモデルとして「やわらかいシステム」を分析・設計する手法が提案されている。このような手法として、例えば、ニューラルネットワーク、人工生命、遺伝的アルゴリズムなどの研究があげられる。

「やわらかいシステム」として生物集団の動作をみると、これまでの人工的な単一の「かたいシステム」にはない特質がある。ここでは、例として、ハチの場合を見てみる。個々のハチは、「シンプルなルール」により行動し、「8の字ダンス」などによる簡単な情報伝達のみを行い、全体を統括するような立場のハチはいない。それでも、ハニカム構造の巣を作り、えさを集め、分業して巣を維持している。このように、個々の生物の能力はそれほど高くなく、また、その生物の構造は単純なもので、生物集団の動作を見ると、環境にすばやく適応する能力や、自然な並列処理能力、自己組織化能力などすぐれた特質を持つ。このような特質は、適応デジタル信号処理において要求される基本的な特質である。

生物集団の進化・適応をモデルとしたアルゴリズムは、一般に計算量が多くなってしまふ。このため、以前は、これらの手法を実時間処理を必要とする適応信号処理に応用することは困難であった。しかし、近年のコンピュータ技術の発展によって、計算機上で高速に実行できるようになってきている。

そこで、本論文では、新しい適応信号処理の実現を目指して、進化論的計算手法による適応デジタルフィルタとして進化論的デジタルフィルタ (EDF: Evolutionary Digital Filter) を提案している。

第2章 適応信号処理に関する基礎的考察

本章では、適応信号処理の基礎的考察を行った。

まず、代表的な適応アルゴリズムである LMS (least-mean-square) アルゴリズムと RPE (recursive prediction error) アルゴリズムについて述べた。これらの適応アルゴリズムは、最急降下法に基づく適応アルゴリズムで、誤差関数の勾配を推定して探索を行う。

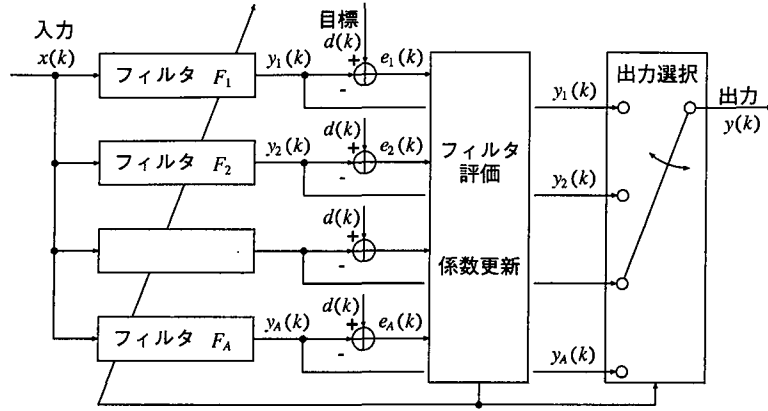


図 1: EDF の構成

次に、誤差関数の勾配に基づかない適応アルゴリズムを用いた適応デジタルフィルタに関して概説した。ここでは、linear random search, genetic algorithm, new learning adaptive algorithm, Darwinian design について述べた。

第 3 章 進化論的デジタルフィルタ

本章では、EDF の提案を行った。

まず、EDF のフィルタ構成を示した。図 1 は、EDF の構成を示している。EDF の各内部フィルタ F_i は同一の信号 $x(k)$ を入力とする線形フィルタであり、各出力を $y_i(k)$ とする。 $e_i(k) = d(k) - y_i(k)$ は、目標信号 $d(k)$ と各内部フィルタ出力 $y_i(k)$ との誤差である。この誤差によって各内部フィルタのそれぞれの評価値が決定される。各内部フィルタの評価値は、誤差 $e_i(k)$ の瞬時値、またはある期間の誤差 $e_i(k)$ の統計量を用いて決定される。EDF 全体の出力 $y(k)$ として、最も評価値の高い内部フィルタの出力を用いる。ここで、EDF におけるデジタルフィルタの適応動作と生物の進化戦略のモデルの対応関係を示す。EDF では、1つの内部フィルタ F_i を 1匹の生物 F_i に対応させる。この内部フィルタ F_i の係数ベクトル W_i を生物 F_i の遺伝子とした。

次に、EDF の適応アルゴリズムについて示した。提案する EDF では、適応フィルタの係数更新（適応動作）を実現するために、次のような生殖手法により生物を進化させている。EDF では、生物が、自らの適応度に応じて 2つの生殖戦略（無性生殖と有性生殖）を選択するものとする。この EDF の適応アルゴリズムについて、生殖手法の選択法と係数更新法を概説する。ここで、 P は生物の集団、 N は生物の数を表す。また、添字 a と s はそれぞれ無性生殖と有性生殖を、添字 p と c はそれぞれ親と子孫を示すこととする。

EDF では、適応度の高い生物が無性生殖を行う。適応度の高い N_{ap} 匹の親 P_{ap} は、それぞれ、無性生殖を行うことで適応度の高い N_{ac} 匹の子孫 P_{ac} を生成することができる。これにより、選択されやすい子孫を残していくことができる。一方、適応度が低い生物は有性生殖を行う。適応度の低い親は、無性生殖を行っても適応度の低い子孫しか生成できない。この適応度の低い子孫は淘汰される可能性が高い。そこで、適応度の低い N_{sp} 匹の親 P_{sp} は、適応度が高い子孫が生成される可能性を増やし、子孫を残そうとする。EDF では、このための戦略として有性生殖を行い、異種の遺伝子を取り込み、多様な子孫 P_{sc} を生成する。

以上の考え方に基づき、EDF における無性生殖と有性生殖は、それぞれ以下の式により実現する。

$$W_{ac,i,j} = W_{ap,i} + r \cdot n_{i,j} \quad (1)$$

$$W_{sc,m} = \frac{1}{2}(W_{sp,k(m)} + W_{sp,l(m)}) + s \cdot n_m \quad (2)$$

ここで、 $k(m)$ と $l(m)$ は、 $\{1, 2, \dots, N_{sp}\}$ の中から重複なく選択されるものとし、 $i = 1, 2, \dots, N_{ap}$, $j = 1, 2, \dots, N_{ac}$, $m = 1, 2, \dots, N_{sp}/2$ とする。EDF の生殖においては、実際の生物の遺伝子が転写ミスを起こ

すのと同様に、各生物の遺伝子も転写ミスを起こすものとした。この転写ミスを、遺伝子にそれぞれ $r \cdot n_{i,j}$ と $s \cdot n_m$ を加えることで実現する。ここで、 r と s は転写ミスの大きさを表すパラメータで、 $n_{i,j}$ と n_m は平均 0、分散 1 のガウス雑音ベクトルである。

以上より、EDF では、無性生殖手法と有性生殖手法という、それぞれ近傍探索手法と大域探索手法に対応する手法を持つ適応アルゴリズムを提案している。このように、多点探索であり、近傍探索と大域探索の両方を行う手法は、多峰性の誤差曲面を持つ問題に対して極小値にとらわれにくく最小値を探索できるという利点を持つ。

最後に、最急降下法に基づく 1 点探索手法である LMS アルゴリズムや RPE アルゴリズムなどの適応アルゴリズムや、従来の誤差関数の勾配に基づかない多点探索手法である適応アルゴリズムと EDF の適応アルゴリズムの相違点を示し、多峰性の誤差曲面における EDF の有効性について述べた。

第 4 章 進化論的デジタルフィルタの性能評価

本章では、EDF の有効性を示すために、システム同定と干渉キャンセリングを行った。比較対象の適応アルゴリズムは、LMS アルゴリズムを用いた適応デジタルフィルタ (adaptive digital filter based on the least-mean-square algorithm: LMS-ADF) と単純遺伝的アルゴリズムを用いた適応デジタルフィルタ (adaptive digital filter based on the simple genetic algorithm: SGA-ADF) とした。

システム同定では、LMS-ADF と SGA-ADF による適応信号処理と比較して、以下にあげる EDF の特徴点を示した。

- 多峰性の 2 乗平均誤差曲面上での探索でも極小値にとらわれることなく最小値を探索できる。
- 2 乗平均誤差以外の任意の誤差関数を使うことができる。
- EDF の適応アルゴリズムは、安定性の判別を特別に行わなくても適応信号処理を実現できる。

また、干渉キャンセリングでは、心電図に重畳した電源雑音の除去を行い、LMS-ADF と比較して、EDF の方が定常状態の誤差が小さいことを示した。

第 5 章 進化論的デジタルフィルタの並列 DSP 上での実現

本章では、並列 DSP 上で並列 EDF を実現し、EDF の処理時間の削減について検討した。まず、LMS-ADF と EDF で計算量の比較を行い、EDF において内部フィルタの数が増加したことにより、計算量が増加していることを示した。

その上で、EDF の並列化を行った。本論文では、DSP 上で実現することを考慮して、並列 EDF の構造と適応アルゴリズムを提案した。EDF の適応アルゴリズムの並列化においては、効率の高い並列化を実現するために、プロセッサ間の通信量を少なくすることを目的とした。このため、プロセッサ間の通信が少ない分割遺伝的アルゴリズム (partitioned genetic algorithm: PGA) をモデルとして EDF の適応アルゴリズムの並列化を行った。

最後に、並列 DSP 上で並列 EDF が実現可能であることを示した上で、4 並列の DSP 上で実現することにより、単一 DSP 上での実現と比べて 1/3.97 の処理時間で実現できることを示した。

第 6 章 結言

以上のように、本論文では、進化論的計算手法による適応デジタルフィルタとして EDF を提案し、IIR フィルタを用いた場合に従来の適応アルゴリズムと比較して性能が向上することを実験的に検証した。

審査結果の要旨

未知システムの入力信号と出力信号から、そのパラメータを逐次的に推定する適応デジタルフィルタは、信号の時間的変化に適応して信号処理を行う技術として極めて重要である。適応デジタルフィルタを IIR フィルタで構成した場合、従来の適応アルゴリズムでは多峰性の2乗平均誤差曲面においてパラメータが極小値に収束し、最小値を探索できない場合があることなどに問題点があった。本論文では、これらの問題点を解決するために進化論的計算手法による新しい適応デジタルフィルタを提案し、従来の手法と比較して提案手法が有効であることを実験的に検証した。本論文は、これらの成果を取りまとめたもので、全文6章よりなる。

第1章は緒言である。第2章では、適応信号処理の原理について述べ、代表的な適応アルゴリズムの基礎的性質を示している。

第3章では、進化論的計算手法による適応デジタルフィルタとして進化論的デジタルフィルタを提案している。フィルタの構造と適応アルゴリズムについて述べ、従来の適応アルゴリズムとの相違点について考察している。

第4章では、進化論的デジタルフィルタの動作を確認するとともに、その有効性を示すためにシステム同定と干渉キャンセリングを行っている。システム同定では、従来の手法と比較して進化論的デジタルフィルタの次の3つの特長を明らかとしている。(1)多峰性の2乗平均誤差曲面上において極小値にとらわれることなく最小値を探索できること。(2)2乗平均誤差以外の任意の誤差関数を使うことができること。(3)フィルタの安定性の判別を特別に行わなくても適応信号処理を実現できること。また、干渉キャンセリングでは、心電波形に重畳した電源雑音の除去を行い、従来の手法と比較して進化論的デジタルフィルタの方が定常状態の誤差の分散が小さいことを示している。これらは極めて重要な知見である。

第5章では、並列化した進化論的デジタルフィルタを並列 DSP 上で実現し、進化論的デジタルフィルタの処理時間の削減について検討している。DSP 上で実現することを考慮して、並列化した進化論的デジタルフィルタの構造と適応アルゴリズムを提案している。実験では、並列化した進化論的デジタルフィルタが並列 DSP 上で実現可能であることを示した上で、4並列の DSP 上で実現した場合には単一 DSP 上での実現と比べて、理論限界の1/4に極めて近い処理時間で実現できることを示している。これは実用上すぐれた成果である。

第6章は、結言である。

以上要するに本論文は、進化論的計算手法による新しい適応デジタルフィルタとして進化論的デジタルフィルタを提案し、その有効性を実験的に明らかにするとともに、応用における有用性を示したもので、電子通信工学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)の学位論文と合格と認める。