

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 4 月 4 日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560432

研究課題名（和文）多機能弾性波デバイスの電極構造解析と同時最適設計に関する研究

研究課題名（英文）Simultaneous Optimal Design of Multifunctional Acoustic Wave Device through Structural Analysis of Electrodes

研究代表者

田川 聖治（TAGAWA KIYOHARU）

近畿大学・理工学部・教授

研究者番号：50252789

研究成果の概要（和文）：弾性波デバイスは携帯電話機などの移動体通信機器の RF 部に広く使用されている。本研究では、RF 部の電子部品の数を削減するため、多機能弾性波デバイスの最適設計法を考案した。本研究の成果は以下の 3 点に要約できる。1) 表面弾性波（SAW）フィルタの設計において、最適設計手法の有効性を確認した。まず、SAW フィルタの設計問題を 3 目的の最適化問題に定式化し、最新の進化計算である DE を拡張した進化型多目的最適化手法（MOEA）を適用した。次に、MOEA で得られた解集合の主成分分析を行い、SAW フィルタの電極構造と機能の関係を解析した。2) Hypervolume の高速近似手法を解の評価指標とした新たな MOEA を提案し、4 目的以上の最適化問題に対しても有効であることを確認した。3) マルチコア CPU を弾性波デバイスの最適設計に活用するため、DE の並行プログラムを開発した。

研究成果の概要（英文）：Surface Acoustic Wave (SAW) devices have been used widely in Radio Frequency (RF) circuits of mobile communication equipments such as cellular phones. In this study, an optimal design technique of multifunctional SAW devices is developed for reducing the number of electronic parts used in RF circuits. The results of this study can be summarized by the following three points. 1) The structural design of a SAW filter is formulated as a three-objective optimization problem. Then a Multi-Objective Evolutionary Algorithm (MOEA) based on the latest EA, i.e., Differential Evolution (DE), is applied to the optimization problem. In order to analyze the relationship between the structure of electrodes and the device function, a set of solutions obtained by MOEA is evaluated statistically by using the principal component analysis. 2) A new MOEA is proposed for solving the multi-objective optimization problems which have more than four objectives. A fast approximation algorithm for the exclusive hypervolume is used by the new MOEA as the criterion of solutions. 3) In order to utilize multi-core CPUs for the design of multifunctional SAW devices, a concurrent program of DE is developed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	700,000	210,000	910,000
2010 年度	600,000	180,000	780,000
2011 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	1,900,000	570,000	2,470,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・システム工学

キーワード：生産システム工学

1. 研究開始当初の背景

弾性波デバイスとは、圧電体の表面近くを伝搬する波動を信号処理に利用したエレクトロメカトロニクス機能素子である。弾性波デバイスは圧電体基板の表面に電極を配置した構造を持ち、電気信号に比べて波動が低速であるため小型・軽量化が図れ、調整が不要で信頼性も高い。また、弾性波デバイスはその電極構造を工夫することで、フィルタや共振子など、様々な回路素子の機能を発揮する。このため、弾性波デバイスは移動体通信機器のキーデバイスとして、携帯電話機やモバイルPCなどのRF部に多用されている。

今後、新たな弾性波デバイスの研究動向として、個々の素子機能を高性能化するとともに、移動体通信機器の小型化に対応するため、単体の弾性波デバイスにより複数の機能を同時に実現することが挙げられる。すなわち、多機能弾性波デバイスの開発である。1つの小さな弾性波デバイスが複数の回路素子の機能を発揮するならば、RF部の部品点数を削減できるため、移動体通信機器の更なる小型化、信頼性の向上、生産コストの削減、資源の節約などが図れるものと期待される。

2. 研究の目的

本研究の目的は、複数の回路素子の機能を同時に発揮する弾性波デバイスの最適設計法を構築することである。ここで、弾性波デバイスの電気的特性（機能）は、圧電体基板や電極の材質のみならず、波動を励起・反射・吸収する電極構造に大きく依存する。このため、多機能弾性波デバイスを実現するには、電気的特性と電極構造の関係を明らかにする必要がある。そこで、弾性波デバイスの電極構造の設計問題を、複数の機能を目的関数とした多目的最適化問題に定式化した後、そのパレート最適解集合を求めて統計学的に解析することで、電極構造と機能との因果関係や同時に実現可能な機能、逆にトレードオフの関係にある機能など、多機能弾性波デバイスの開発に有益な知識を抽出する。

3. 研究の方法

本研究は、計算機シミュレーション、最適化、データ解析の3つの技術を統合したシステム工学のアプローチによって、多機能弾性波デバイスの実現に挑むものである。そこで、前述の研究目的を達成するため、下記の各項目を目標に掲げ、それぞれに取り組んだ。

(1) シミュレータの実装

様々な電極構造を有する弾性波デバイスの電気的特性（周波数応答）を計算機シミュレーションにより評価するため、分布定数回路理論に基づくシミュレータを実装する。

弾性波デバイスのシミュレータの実装に

不可欠な数式モデルの概要と構築方法について説明する。はじめに、弾性波デバイスの電極の基本構造である楕円電極の等価回路モデルを図1に示す。端子aと端子bは音響端子であり、端子cは電気端子である。

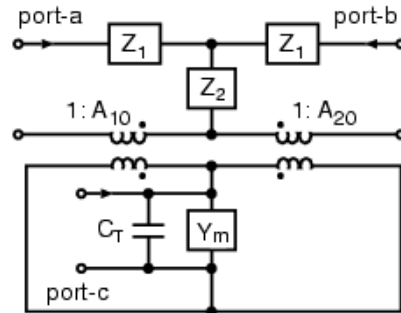


図1：楕円電極の等価回路モデル

次に、楕円電極の配置に合わせて図1の等価回路モデルの音響端子を繋ぐことで、弾性波デバイスの電極構造全体の等価回路モデルを導出する。最後に、弾性波デバイスの入出力インピーダンスを考慮し、集中定数回路理論による等価回路モデルを分布定数回路理論のネットワーク・モデルに変換する。

(2) 多目的最適化手法の実装

弾性波デバイスの電気的特性と電極構造の関係を解析するためには、弾性波デバイスの設計問題を多目的最適化問題に定式化した後、そのパレート最適解集合を求める必要がある。本研究では、多様なパレート最適解の集合を一度に求められる進化型多目的最適化手法（Multi-Objective Evolutionary Algorithm: MOEA）を採用する。また、最新の進化計算である差分進化（Differential Evolution: DE）を多目的最適化に拡張した下記の3種類のMOEAを採用して比較する。

- MODE: Multi-Objective DE
- NSDE: Non-dominated Sorting DE
- GDE3: Generalized DE3

既存のMOEAや上記のDEを拡張したMOEAは、3目的までの最適化問題には有効である。しかし、4目的以上の最適化問題に対しては、良質なパレート最適解集合が得られない。そこで、本研究では4目的以上の最適化問題の解集合を求めるため、従来のMOEAにおけるパレート優越関係に基づく解の評価に加え、Hypervolumeと呼ばれる解の評価指標を併用する独自のMOEAの開発にも取り組む。

(3) パレート最適解集合の解析

弾性波デバイスの多目的最適化問題に対して、MOEAにより求めたパレート最適解集合を統計学的に解析することで、電極構造と機能との因果関係や同時に実現可能な機能、逆

にトレードオフの関係にある機能などを調べる。まず、多目的最適化問題の目的関数は弾性波デバイスに求められる複数の機能であり、多目的最適化問題の決定変数は電極の構造を決める設計パラメータである。そこで、パレート最適解集合の解析手法として、2つの目的関数同士の組合せのほか、各目的関数と決定変数の組合せについて分布図を解析するとともに、目的関数と決定変数の相関係数から因果関係を判定する。また、目的関数空間と解空間において主成分分析を実施し、パレート最適解の主成分を明らかにする。

(4) 設計支援システムの開発

本研究で考案した多機能弾性波デバイスの最適設計法の有効性を確認するため、弾性波デバイスのシミュレータ、MOEAに基づく多目的最適化手法、統計学的なデータ解析手法を統合した設計支援システムを開発する。MOEAの実装にはJava言語を使用する。また、シミュレータの実装とデータ解析には科学計算ソフトウェアのMATLABを使用する。

(5) 多機能弾性波デバイスの設計

上記の設計支援システムの有効性を評価するため、携帯電話機のRF部に広く使用されている平衡型表面弾性波(SAW)フィルタの電極構造設計を行い、SAWフィルタの多機能化を試みる。まず、RF部の幾つかの回路素子の機能とフィルタに望まれる周波数特性を目的関数とし、SAWフィルタの設計を多目的最適化問題に定式化する。次に、MOEAによりパレート最適解集合を求めて解析することで、同時に実現可能な機能を検討する。

4. 研究成果

(1) 設計支援システムの開発

研究方法で述べた通り、多機能弾性波デバイスの設計支援システムを開発した。また、設計支援システムの有効性を検証するため、平衡型SAWフィルタの最適設計を実施した。対象とした平衡型SAWフィルタの基本構造を図2に示す。圧電体基板上に複数の楕形電極(IDT)と反射器(SMSA)が配置されている。図2の入力端子(端子1)に加えられた電気信号は送波器(IDT-T)の圧電逆効果により波動に変換され、基板上を左右に伝搬する。次に、両端の反射器で反射して特定の周波数で共振した波動が、受波器(IDT-R)の圧電効果により電気信号に戻され、平衡型の出力端子(端子2・3)から取り出される。

図1の等価回路モデルに基づき、図2の平衡型SAWフィルタのネットワーク・モデルを図3のように構築した。次に、平衡型SAWフィルタの設計問題を6つの不等式制約条件付きの3目的最適化問題に定式化した。3つの目的関数はフィルタ特性であり、6つの制約条件は平衡端子でのバランス特性である。最適化問題の決定変数は計11個とした。

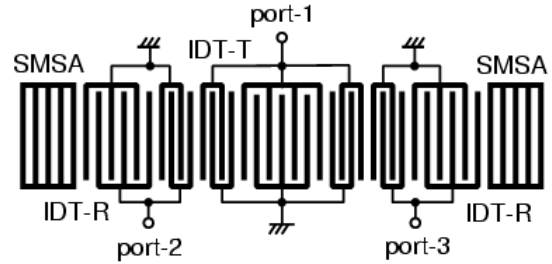


図2：平衡型 SAW フィルタ

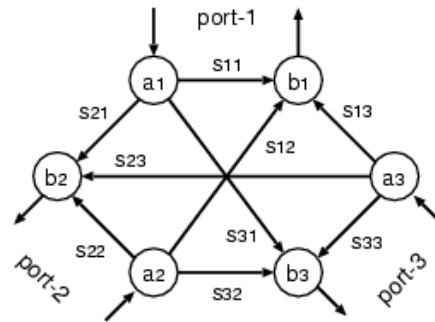


図3：ネットワーク・モデル

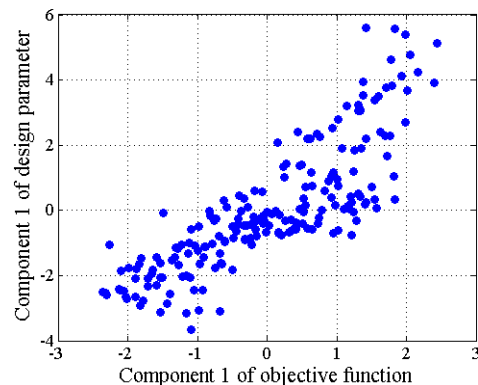


図4：機能と電極構造による分布図

上記の多目的最適化問題に対して DE を拡張した3種類のMOEA (MODE、NSDE、GDE3) を適用したところ、GDE3により最良の結果が得られた。次に、GDE3で得られたパレート最適解集合の主成分分析を行った。目的関数の主成分と決定変数の主成分を軸とした分布図を図4に示す。図4から平衡型SAWフィルタの機能と電極構造の明瞭な因果関係が読み取れる。また、図4の両端に位置する2つの解の減衰特性を図5で比較する。さらに、パレート最適解集合を詳細に解析したところ、図2の平衡型SAWフィルタの設計では、電極構造を最適化することで、フィルタ機能と伴

に平衡型端子でのインピーダンス変換の機能も同時に実現できることが確認できた。

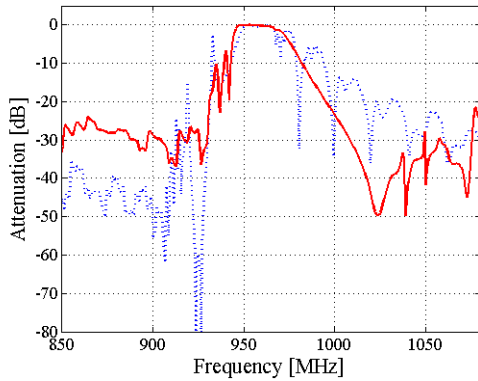


図 5 : 平衡型 SAW フィルタの減衰特性

(2) 多目的最適化手法の開発

既存の多目的最適化手法である GDE3 は、3 目的の平衡型 SAW フィルタの設計問題には有効であった。しかし、多目的最適化問題のパレート最適解の分布は目的数の増加に伴い拡大するため、4 目的以上の最適化問題に対しては、GDE3 により良質なパレート最適解集合が得られることは期待できない。そこで、従来の集団内における個体間の混雑度距離に代えて、Hypervolume を評価指標とする独自の MOEA を開発した。新たに開発した MOEA を Indicator-Based DE (IBDE) と呼ぶ。

個体の評価指標に Hypervolume を使用する MOEA は既に報告されており、4 目的以上の最適化問題に対する有効性も報告されている。しかしながら、Hypervolume の計算量は指数オーダーとなるため、それらの MOEA を現実的な規模の多目的最適化問題に適用することは困難であった。本研究では、1 つの解を非劣解集合から除いたときの Hypervolume の減少量を多項式オーダーで近似する評価指標を考案することで、現実的な規模の多目的最適化問題にも有効な IBDE を開発した。

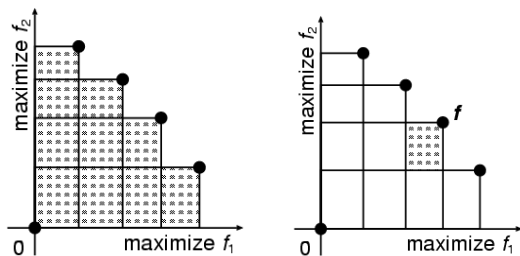


図 6 : Hypervolume (左) と EH (右)

本研究で考案した非劣解の評価指標について説明する。図 6 左に 4 つの非劣解 (●印) から形成された Hypervolume のイメージを示

す。灰色の領域の面積が Hypervolume である。また、図 6 右に非劣解集合から 1 つの非劣解 (●) を除いたときの Hypervolume の減少量 (Exclusive Hypervolume : EH) を示す。

EH は非劣解の評価指標として優れているが、Hypervolume と同様に多項式オーダーの計算量では求められない。そこで、本研究では EH の近似法 (Pairwise EH : PEH) を提案し、非劣解の新たな評価指標とする。PEH は 2 つの非劣解で EH を評価し、すべての組合せに対して得られた EH の最小値を非劣解の評価指標とする。前述のように本研究で開発した IBDE は PEH を評価指標としている。

提案した PEH は EH の上限値となることを理論的に証明した。さらに、数値実験と仮説検定の結果から、PEH による EH の近似精度は実用的に十分であることが確認できた。

(3) マルチコア CPU における実装

近年、複数のプロセッサ (コア) を搭載したマルチコア CPU が市販のパソコンにも広く採用されている。そこで、多機能弾性波デバイスの設計支援システムの実装においてもマルチコア CPU を有効に活用するため、Java 言語による DE の並行プログラムを開発した。前述のように DE は GDE3 や IBDE における最適化の基礎となるアルゴリズムである。DE の並行プログラムを Concurrent DE (CDE) と呼ぶ。提案した CDE は複数のサブ・プログラム (スレッド) から構成され、それらのスレッドを異なるコアに割り当てて並列に処理することで、DE の実行時間が短縮できる。

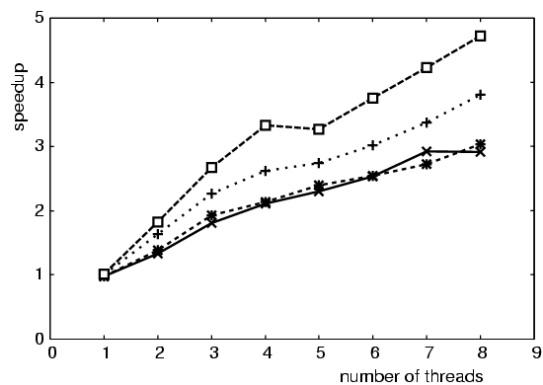


図 7 : CDE の高速化率

並行プログラムの高速化率 (Speedup) とは、1 つのスレッドを使用した場合の実行時間と、複数のスレッドを使用した場合の実行時間の比である。図 7 に 4 種類のテスト問題で評価した CDE の高速化率を示す。テスト問題の種類により CDE の高速化率は異なるが、すべてのテスト問題において、スレッド数に比例した高速化率の上昇が確認できた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 20 件)

- ① 田川聖治: A statistical study of concurrent differential evolution on multi-core CPU, Proc. of Italian Workshop on Artificial Life and Evolutionary Computation, 査読有, 2012, pp. 1-12.
- ② 田川聖治, 石水隆: Concurrent differential evolution for uncertain optimization problems, Proc. of International Conference on Advanced Engineering Computing and Applications in Sciences, 査読有, 2011, pp. 48-53.
- ③ 石水隆, 田川聖治: Experimental study of a structured differential evolution with mixed strategies, Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, 査読有, 15巻2号, 2011, pp. 1310-1319.
- ④ 田川聖治, 石水隆: Alternative implementation techniques of parallelized differential evolution for multi-core processors, Proc. of International Conference on Uncertainty and Knowledge Engineering, 査読有, 2011, pp. 1-4.
- ⑤ 田川聖治, 清水英仁, 中村弘幸: Indicator-based differential evolution using exclusive hypervolume approximation and parallelization for multi-core processors, Proc. of Genetic and Evolutionary Computation Conference, 査読有, 2011, pp. 657-664.
- ⑥ 石水隆, 田川聖治: A structured differential evolutions for various network topologies, International Journal of Computers and Communications, 査読有, 1巻4号, 2010, pp. 1-8.
- ⑦ 田川聖治, 佐々木幸紀, 中村弘幸: Optimum design of balanced SAW filters using multi-objective differential evolution, Simulated Evolution and Learning, Lecture Note in Computer Science Springer, 査読有, 6457号, 2010, pp. 466-457.
- ⑧ 田川聖治, 高橋佑輔, 加藤暢: 時間オートマトンによるフェースディスプレイの上位設計と形式的検証, 情報処理学会論文誌・数理モデル化と応用, 査読有, 3巻3号, 2010, pp. 44-53.
- ⑨ 田川聖治, 佐々木幸紀, 中村弘幸: Differential EvolutionによるSAWフィルタの多目的最適設計, 電気学会論文誌C, 電子・情報・システム部門誌, 査読有, 130巻7号, 2010, pp. 1238-1246.
- ⑩ 田川聖治: 距離に基づく生存選択を用いたDifferential Evolutionの構成法, 電気学会論文誌C, 電子・情報・システム部門誌, 査読有, 130巻5号, 2010, pp. 782-789.
- ⑪ 田川聖治, 石水隆: Concurrent differential evolution based on MapReduce, International Journal of Computers, 査読有, 4巻4号, 2010, pp. 161-168.
- ⑫ 石水隆, 田川聖治: Experiment study of structured differential evolution with mixed strategies, Proc. of the World Congress on Nature and Biological Inspired Computing, 査読有, 2010, pp. 598-603.
- ⑬ 石水隆, 田川聖治: A comparative study of structured differential evolution, Proc. of WSEAS International Conference on Applied Computation Science, 査読有, 2010, pp. 321-326.
- ⑭ 田川聖治, 石水隆: A comparative study of distance dependent survival selections for sequential DE, Proc. of IEEE International Conference on System, Man, and Cybernetics, 査読有, 2010, pp. 3493-3500.
- ⑮ 田川聖治, 石水隆: Concurrent implementation of differential evolution, Proc. of WSEAS International Conference on New Aspects of Systems Theory and Scientific Computation, 査読有, 2010, pp. 65-70.
- ⑯ 田川聖治, 高田浩成: Comparative study of extended sequential differential evolution, Proc. of the 19th WSEAS International Conference on Applications of Computer Engineering, 査読有, 2010, pp. 52-57.
- ⑰ 田川聖治: 連続世代モデルに基づく微分進化法の分散分析による比較研究, 情報処理学会論文誌・数理モデル化と応用, 査読有, 2巻3号, 2009, pp. 1-13.
- ⑱ 田川聖治: Multi-objective design of balanced SAW filters using generalized differential evolution, WSEAS Transactions on Systems, 査読有, 8巻8号, 2009, pp. 923-932.
- ⑲ 田川聖治: Optimum design of balanced SAW filters using evolutionary multi-objective optimization, Proc. of the 19th WSEAS International Conference

e on Applied Informatics and Communication, 査読有, 2009, pp. 88-93.

- ⑳ 田川聖治: A statistical study of the differential evolution based on continuous generation model, Proc. of IEEE Congress on Evolutionary Computation, 査読有, 2009, pp. 2614-2621.

[学会発表] (計 13 件)

- ① 田川聖治: マルチコアCPUにおける差分進化の精度評価, 電気学会全国大会, 2012年3月23日, 広島工業大学.
- ② 田川聖治: マルチコアCPUを活かす並行型差分進化, 第39回知能システムシンポジウム, 2012年3月16日, 千葉大学.
- ③ 田川聖治: マルチコアCPUにおける並行型差分進化のノンパラメトリック検定を用いた比較研究, 情報処理学会・第87回数理モデル化と問題解決研究会, 2012年3月2日, 指宿市民会館.
- ④ 田川聖治: ロバスト最適化問題に対するDifferential Evolutionの適用, 進化計算シンポジウム2011, 2011年12月17日, モンタナリゾート岩沼.
- ⑤ 田川聖治: Concurrent Differential Evolutionの不確実性下の最適化問題に対する適用, 電気学会・システム研究会, 2011年12月3日, 山口大学.
- ⑥ 田川聖治: マルチコアCPUにおける差分進化の実装と評価, 電気学会・電子・情報・システム部門大会, 2011年9月8日, 富山大学.
- ⑦ 石水隆, 田川聖治: 並列差分進化計算の比較研究, 情報処理学会・第82回数理モデル化と問題解決研究会, 2011年3月8日, 青島パームビーチホテル.
- ⑧ 田川聖治, 清水英仁, 中村弘幸: Indicator-Based Differential Evolution (IBDE) のマルチコア・プロセッサにおける並列化, 進化計算シンポジウム2010, 2010年12月19日, レイクサイドホテル久山.
- ⑨ 田川聖治, 石水隆: マルチコア・プロセッサにおけるDifferential Evolutionの実装, 計測自動制御学会・中部支部シンポジウム, 2010年10月29日, 信州大学.
- ⑩ 田川聖治: Transversal Differential Evolutionにおける制御パラメータの実験に基づく検討, 電気学会・電子・情報・システム部門大会, 2010年9月3日, 熊本大学.
- ⑪ 田川聖治: 制約条件付き多目的最適化問題に対するIBDEの提案, 進化計算シンポジウム2009, 2009年12月20日, 那覇レクセンター.
- ⑫ 田川聖治: A differential evolution u

sing distance dependent survival selections, 第19回インテリジェント・システム・シンポジウム, 2009年9月17日, 会津大学.

- ⑬ 田川聖治, 佐々木幸紀, 中村弘幸: Differential EvolutionによるSAWフィルタの多目的最適設計, 電気学会・電子・情報・システム部門大会, 2009年9月4日, 徳島大学.

[図書] (計 2 件)

- ① 田川聖治, 川上浩司 (編): 近代科学社, 差分進化, 進化技術ハンドブック第I巻・基礎編, 2010, pp. 160-162.
- ② 田川聖治, Wellington Pinheiro dos Santos (編): IN-TECH publisher, Optimum design of balanced surface acoustic wave filters using evolutionary computation, Evolutionary Computation, 2009, pp. 341-358.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田川 聖治 (TAGAWA KIYOHARU)
近畿大学・理工学部・教授
研究者番号: 50252789