並列遺伝的プログラミングによる フィルタ回路設計

学生員 矢野 雄一* 正員 加藤 利次*
正員 井上 馨* 非会員 三木 光範**

Filter Circuit Design by Parallel Genetic Programming

Yuichi Yano*, Student Member, Toshiji Kato*, Member, Kaoru Inoue*, Member,
Mitsunori Miki**, Non-member

Genetic Programming (GP) is an extension of Genetic Algorithm (GA) to handle more structural problems. In this paper, an approach to filter circuit design by GP is proposed. By designing a gene which includes not only the parameters of consisting elements, but also the structural information of the circuit, it becomes possible to apply the proposed approach to various types of filter circuits. GP depends much on trial and error due to its probabilistic nature. To decrease this uncertainty and ensure the progress of the evolution, Parallel GP with multiple populations with the island model is also proposed. An MPI-based cluster system is used for realization of this parallel computing where each island corresponds to each node. A lowpass and an asymmetric bandpass filters are designed. One hundred times of trials for multiple populations with and without migrations are tested in the design of lowpass filter to confirm the validity of the proposed method. In the asymmetric bandpass filter design, the results are compared with those of the circuit designed by hand to confirm the effectiveness of the proposed method. The proposed approach is applicable to various types of filter circuits. It can contribute to an automated design procedure, where it would require a experienced designer if done by hand. It is also possible to obtain a new circuit design which would not be possible if done by hand.

キーワード：遺伝的プログラミング, 遺伝的アルゴリズム, 島モデル, フィルタ回路, CAD, SPICE

Keywords: genetic programming, genetic algorithm, island model, filter design, CAD, SPICE

1. はじめに

遺伝的アルゴリズム (GA) は生命の進化過程を工学的にモデリングした最適化手法であり、遺伝的プログラミング (GP)⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾ は、これをより構造的な問題を扱えるように拡張した手法である。そのため、回路素子のパラメータだけでなく、回路構造の情報を含む遺伝子を設計し進化させることが可能である。遺伝的プログラミングは様々な工学分野に応用され、電気工学分野では制御系やアナログ回路の設計に応用されている。

本論文では GP を用いたフィルタ回路の設計法を提案する。これに関してすでに、Koza 氏らにより、様々なフィル

タ回路の設計が行われている。これは初期の胚細胞に対する回路を基に徐々に進化させて所望の特性を持つ回路へと進化させていくものである。本論文の手法はこれとは異なり、初期集団の回路をランダムに合成し、それらを基に簡単なトポロジー修正および素子生成操作により所望の特性を持つ回路へと進化させていくものである。しかもトポロジー修正操作は、直列・並列・左接地・右接地・結合の5種類の操作だけで行う簡潔なものである。

また本論文ではこのフィルタ設計において、島モデル⁽⁵⁾による多集団並列化を行っている。これは多集団化に伴う多様性をできるだけ残した方法で局所解に陥る可能性を抑えたものである。これは MPI クラスタコンピュータシステム⁽⁶⁾に実装して1つの島すなわち集団を1つのCPUに割り当てるようにして実現している。

その応用例として、SPICE シミュレータによる⁽⁷⁾ローパスフィルタおよび非対称バンドパスフィルタの設計を行う。前者の設計では、多集団で移住のある場合と移住のな

* 同志社大学 工学部 電気工学科
〒610-0321 京田辺市多々羅都谷 1-3
Dept. of Electrical Engineering, Doshisha University
Kyotanabe, Kyoto, 610-0321, Japan

** 同志社大学 工学部 知識工学科
Dept. of Knowledge Engineering, Doshisha University

い場合においてそれぞれ 100 回試行の比較を行い、島モデルによる移住のある提案手法の妥当性を確認する。後者の設計では、手動で設計された Nielsen の回路^{(4)~(8)}をベンチマークとして比較を行い、提案手法の有効性を確認する。提案手法は簡潔なものであり、設計仕様が多岐に渡るフィルタ回路設計に柔軟に対応可能である⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。

2. 遺伝的プログラミングによる電気回路設計

2.1 遺伝的プログラミング 本論文において、遺伝的プログラミング (GP) により、構造的な問題を扱うために遺伝子を木構造を用いて表現する。GP のアルゴリズムは、遺伝子が木構造で表現される点と、交叉・単一交叉・突然変異等の遺伝的オペレータが木構造を操作するものであるという点を除いては通常の GA と同様である。それらの遺伝的オペレータを適用することにより、木構造が少しずつ変化し、選択淘汰により適合度に合わせて最適な木構造を検索し進化する。以下に示す 4 つの基本要素、すなわち木構造の設計、適合度計算、選択方法、GP 各パラメータ (交叉率、突然変異率、集団サイズなど) を設計することにより、GP は様々な最適解探索問題への適用が可能になる。

2.2 木構造の設計 GP では、設計対象とするフィルタ回路の構造の生成規則を符号化した木構造で表す^{(9), (10)}。本論文ではこの木構造の分岐点および端点をノードと呼び、回路の接続点を節点と呼びわけることにする。この木構造の初期状態は、入力および出力の二つの節点のみであるが、これに次の各種回路素子および接続に遺伝的オペレータが適用され、回路が生成される。その生成回路に入出力抵抗と電源部分が付加されてフィルタ特性評価回路が構成され、後述する適合度計算が行われる。木構造を構成するノードとして、トポロジー修正ノード、素子生成ノード、パラメータ算出ノードの 3 種類を定義した。

2.2.1 トポロジー修正ノード 接続情報に関するトポロジー修正ノードは直列 (SER)・並列 (PAR)・左節点接地 (GND1)・右節点接地 (GND2)・結合 (CON) の 5 種類のみを定義し、それらを図 1 に示す。これらは二つの節点を引数にとり、節点間に新たな節点や枝をつくる。子ノードにはトポロジー修正ノードまたは素子生成ノードが接続可能であり、これらの組み合わせにより生成される回路の形が決定する。

- **SER**: 節点 i と j を引き数に取り、その間に新しい節点 k を生成し、左側の子ノードに i と k を、右側の子ノードに k と j を引き数として渡す。その結果、 i と j の間に直列な枝が追加される。
- **PAR**: 節点 i と j を引き数に取り、左右それぞれの子ノードに i と j を渡す。その結果、 i と j の間に並列な枝が追加される。
- **GND1**: 節点 i と j を引き数に取り、左側の子ノードに i と j を、右側の子ノードに i と gnd を引き数として渡す。その結果、 i と gnd の間に枝が追加される。
- **GND2**: 節点 i と j を引き数に取り、左側の子ノード

図 1 トポロジー修正ノード

Fig. 1. Topology modification trees.

- に i と j を、右側の子ノードに j と gnd を引き数として渡す。その結果、 j と gnd の間に枝が追加される。
- **CON**: 節点 i と j を引き数に取り、左側の子ノードに i と j を、右側の子ノードに i と新たな節点 k を引き数として渡す。なお、CON は単独では意味を持たず、二つ以上の CON が木構造内に存在する場合のみ意味を持つ。同木構造内に別の CON が存在し節点 m と n を引き数に取る場合、左側の子ノードに m と n を、右側の子ノードに m と k を引き数として渡す。その結果、 i と m の間に新たな枝が追加される。これにより、SER や PAR だけでは生成されない枝が生成可能となる。

図2 素子生成およびパラメータ算出ノード

Fig. 2. Element generation and parameter evaluation trees.

2・2・2 素子生成ノード 素子生成ノードは、図2に示すように二つの節点 i, j を引数に取り、その節点間にインダクタ、キャパシタなどの回路素子生成する。子ノードには素子生成ノードにより生成される回路素子のパラメータを決定するパラメータノードが接続される。

2・2・3 パラメータ算出ノード パラメータ算出ノードは親ノードである素子生成ノードが生成する素子のパラメータを決定し、子ノードは持たない。したがってパラメータ算出ノードは木構造の終端ノードとなる。素子生成ノードの図2に示すように、パラメータ算出ノードは親ノードである素子生成ノードに対して左右に $parameter_1$ と $parameter_2$ に分かれる。親ノードが生成する素子の値は $parameter = parameter_1 \times parameter_2$ により決定され、それらは次の値からランダムに選ばれる。

$parameter_1 =$
 $\{1.0, 1.2, 1.5, 1.8, 2.2, 2.7, 3.3, 3.9, 4.7, 5.6, 6.8, 8.2\}$
 $parameter_2 =$
 $\{10^{-9}, 10^{-8}, 10^{-7}, 10^{-6}, 10^{-5}, 10^{-4}, 10^{-3}, 10^{-2}, 10^{-1}\}$
 木構造とそれにより設計される回路の例を図3に示す。

2・3 適合度計算

2・3・1 周波数特性 周波数特性は、木構造により表現される回路を SPICE⁽⁷⁾ に対応するネットリストに変換し AC 解析を行うことにより得る。フィルタ回路設計の目標は仕様を十分に満足する周波数特性を持つ回路を設計することにある。そこで適合度計算を以下のように定義する。

$$Fitness_1 = \sum_{i=1}^n (|f_i - F_i| \times W_f) \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 n は周波数サンプル数、 f_i, F_i はそれぞれサンプル周波数点 i に観測および理想ゲインである。 W_f は重み関数であり、例えば周波数サンプル点 i においてゲインが理想的であれば $W_f = 0$ 、許容範囲内であれば $W_f = 1$ 、許容範囲外であれば $W_f = 10$ とする。ただし W_f の値は周波数特性のどの部分に重点を置くかによって適当に定める。上式は個体の持つ木構造が生成する回路の周波数特性の理想特性からの距離を表している。なお、SPICE により解析

図3 ローパスフィルタ回路の例

Fig. 3. Lowpass filter circuit design example.

不能である場合は最悪の適合度として 10^6 を与えた。

2・3・2 ブロート問題 集団が世代を重ね個体が交叉を繰り返していきることにより、個体の木構造の大きさが爆発的に増大する現象が起こることが知られている。この現象はブロートと呼ばれている⁽¹⁾。本論文においてブロート問題は設計される回路の規模と直結している。フィルタ設計において、周波数特性が理想的であっても回路規模が大きすぎると理想的な回路とは言えない。ブロート問題からの回避策として、本論文では個体の木構造により生成される回路の素子数を適合度計算に加える手法をとった。

ある個体の木構造により生成される回路の素子数が N であったとする。この時、以下の式で適合度を計算する。

$$Fitness_2 = k_1 N^{k_2} \dots\dots\dots (2)$$

ここで k_1, k_2 は係数である。最終的に得られる適合度は (1) と合わせて下式で得る。

$$Fitness = Fitness_1 + Fitness_2 \dots\dots\dots (3)$$

$Fitness_1$ の値は W_f の値の決め方などからあらかじめ予想できるので、(2) の k_1, k_2 は $Fitness_1$ の値がある程度理想値に近づいてきた時点で、 $Fitness$ に対して効果を持つように調整する。

定数 k_1, k_2 決定の指標の一例を上げると、周波数特性が全てのサンプル周波数点において許容範囲の境界線にあったとする。この場合の (1) の値が f_1 で、素子数を n 個以下にしたいとする。この時、 $k_1 = \frac{f_1}{n}$ と定める。これは一例

であり、素子数よりも周波数特性に重点を置く場合は、 k_1 の値はさらに小さく設定すると良い。 k_2 については 1 ~ 2 の範囲で決定するのが適当である。

2.4 選択方法 選択は適合度の良い個体ほど選択されやすくなるようにする。本論文ではルーレット方式を用いる。これは適合度に比例した割合で個体が選択される手法であり、各個体の適合度を $f_i (i = 1, 2, \dots, n)$ とすると、個体 j が選択される確率 p_j は次式となる。

$$p_j = \frac{f_j}{\sum_{i=1}^n f_i} \dots\dots\dots (4)$$

3. 多集団並列化

3.1 島モデル GP では、世代が進むにつれて同種の遺伝子情報を持つ個体が増え、集団内に多様性が失われ、局所解に陥ることがある。これを回避するためには、GP のアルゴリズムの各ステップにおける様々なパラメータの工夫が必要である。しかしながら最適なパラメータを得るには試行錯誤が必要であり、また最適なパラメータが存在しない場合もある。本論文では、より確実に局所解を回避し、進化を促進するため島モデルによる多集団並列化を考える。

島モデルでは図 4 に示すように複数の集団を作り、一つの島はそれ独自の初期集団を持ち独自に進化する。それぞれの島は同時に進化し、ある一定の頻度で個体を他の島へ移住させる。他の島から移住して来た個体が集団に加わることで、集団が刺激され、集団内に多様性が生まれる。移住の方法は、どの個体を移住させるか、どの島へ移住させるかにより様々な方法が考えられる。本論文では一定の移住頻度毎に集団内の最良個体を他の全島へ移住させる方法をとった。

3.2 計算機環境 計算機環境には MPI(Message Passing Interface)⁽⁶⁾ を実装した PC クラスタを用いる。PC クラスタとは、ネットワークにより接続された複数の PC が、それぞれ同時に処理を行う分散メモリ型並列計算機である。このような計算機を島モデルに用いる利点は二つある。一つは、PC の数だけ島を作成しそれぞれの PC に一

図 4 島モデル

Fig. 4. Island model.

つの島を割り当て処理することにより、単一集団の場合と変わらない処理時間で実行できる点である。二つ目は、PC 間の通信頻度である。ネットワークを介した通信は CPU の処理速度と比べ非常に遅く、また必要な通信が終わるまで処理を続行できないため、これは PC クラスタにおいて性能のボトルネックとなる。島モデルでは移住の際だけに通信が必要であり、その他の処理は各島で独立しているため、PC クラスタに適している。

4. ローパスフィルタ回路設計例

4.1 設計仕様 本論文において提案 GP を 2 種類のフィルタ回路について適用するが、まずはじめにローパスフィルタ回路の例を示す。その設計仕様としてまず遮断周波数は 1kHz とする。通過領域における理想ゲインは 0dB であり、遮断領域では遮断周波数 1kHz から -30dB/oct 以下とする。設計仕様の様子を図 5 の破線に示す。許容範囲は通過領域では ± 1 dB 以内、遮断領域では +3dB 以内とする。

4.2 適合度計算 SPICE により AC 解析を行い周波数特性を得る際は、木構造により設計される回路を $R_{in} = 1k\Omega$, $R_{out} = 1k\Omega$ の入出力抵抗を付加して解析を行う。(1) より計算する周波数特性に関する適合度はサンプル周波数点を 1 ~ 100kHz を等比的に 100 点とり計算する。 W_f は全周波数領域において理想ゲインであれば $W_f = 0$, 許容範囲内であれば $W_f = 1$, 許容範囲外であれば $W_f = 10$ とした。係数 k_1, k_2 はそれぞれ $k_1 = 0.1, k_2 = 1.5$ とした。

4.3 結果 まず各集団の個体数は 200 とし、集団数は 16 とした。世代数は 100 とし、これをもって終了条件とした。島モデルにおける移住頻度は 5 世代毎とし、交叉率は 95 %、そのうち単一交叉する個体が 10 %、突然変異率は 10 % とした。初期個体の木構造はランダムに生成するが、最初から大きな個体を作っても効果的ではないので最大で深さ 6 という制限を設けた。初期集団で必要なのは、その後の進化する個体を作り上げる木構造の部品である。

図 5 設計回路の周波数特性

Fig. 5. Frequency characteristic of the synthesized circuit.

図 6 各世代の最良適合度

Fig. 6. The best fitness for each generation.

図 7 多集団 (移住なし)100 回試行の最終適合度

Fig. 7. The final fitness values for one hundred times trials by multiple populations without migration.

図 6 に各世代の最良適合度を示すが、世代を経る毎に適合度が理想値 0 に近づき、進化している。最終世代目で得られた最良個体の木構造、それより設計される回路、および評価回路に埋め込まれた際の周波数特性に図 3 および 5 にすでに示した通りである。

また提案手法において多様性の保存と進化に対するバランスした島モデルによる効果を確認するため、多数 (16) 集団で移住がない場合とそれのある提案手法の場合で、両者同一の初期集団で 100 回の互いに異なる試行を行った。従っていずれの場合も個体数は 1 世代あたり $200 \times 16 = 3200$ である。図 7 に移住がない場合の 100 回の試行の各試行で得られた最良個体の適合度を示す。この試行中最も進化が進んだ場合と、最も進化が進まなかった場合の各世代における最良個体の適合度をプロットしたものを図 8 に示す。また同様に移住あり場合の結果をそれぞれ図 9 および 10 に示す。両者いずれの場合も最良個体の適合度は 1.71 で同一である。しかし基本的に移住操作により進化が早く進んでいる。そのため早く多様性が失われる場合もあるが、全体的には最終適合度は移住ありの場合のほうがより進化がす

図 8 多集団 (移住なし) 最良試行および最悪試行の各世代最良適合度

Fig. 8. The best and worst fitness values for each generation by multiple populations without migration.

図 9 多集団 (移住あり)100 回試行の最終適合度

Fig. 9. The final fitness values for one hundred times trials by multiple populations with migration.

図 10 多集団 (移住あり) 最良試行および最悪試行の各世代最良適合度

Fig. 10. The best and worst fitness values for each generation by multiple populations with migration.

すでに良好で、100 回平均の移住ありの場合の適合度の平均は 2.20 で移住なしの場合の 2.35 より 1.71 を基準にとると 24%改善している。従って全般的には提案手法が進化に伴う選択と島モデルによる多様性の保存のバランスが取れている。

5. 非対称バンドパスフィルタ回路設計例

5・1 設計仕様 非対称バンドパスフィルターの設計は、要求される規格の厳密性と非対称性から困難であるとされている。これは例えばモデムアプリケーションのために特定の帯域を取りだすフィルタ等の用途がある。設計仕様は Nielsen⁽⁸⁾ が設計した非対称バンドパスフィルター

図 11 非対称バンドパスフィルタ設計仕様

Fig. 11. Design specification for the asymmetrical bandpass filter .

図 12 Nielsen による回路⁽⁸⁾

Fig.12. The synthesized circuit by Nielsen.

と同様に定める。この回路は Koza 氏らも文献⁽³⁾も設計しており、これをベンチマークとした。理想的な特性の通過帯域は 31.2kHz から 45.6kHz で、その中での理想ゲインは 0dB である。その他の帯域では -120dB 以下である。設計仕様を図 11 に示す。これにより Nielsen は図 12 のような回路を設計している。

5・2 適合度計算 周波数特性の計算はローパスフィルタの場合と同様に，入出力抵抗を付加して SPICE により解析する。適合度はサンプル周波数点を $10\text{kHz} \sim 200\text{kHz}$ を等比的に 100 点とり計算する。 W_f は通過帯域においては許容範囲内で $W_f = 1$ ，許容範囲外で $W_f = 100$ とし，その他の帯域では許容範囲内で $W_f = 1$ ，許容範囲外で $W_f = 10$ とした。係数 k_1, k_2 はそれぞれ $k_1 = 10, k_2 = 1.5$ とした。

5・3 結 果 各集団の個体数は 500, 集団数 16, 世代数 500 とした。その他個体の移住方式, 交叉率, 単一交叉率, 突然変異率, 移住頻度などはローパスフィルタの場合と同様である。最終世代の最良個体の回路図を図 13 に示す。その周波数特性および Nielsen が設計した回路の周波数特性を図 14 に示す。提案手法により設計された非対称バンドパスフィルターは, 設計仕様を十分満たすだけでなく, Nielsen が設計した回路よりも全ての帯域において劣らない。特に遮断領域においては Nielsen の回路よりも優れ

図 14 非対称バンドパスフィルタ周波数特性比較

Fig.14. Comparison of frequency characteristics of the asymmetrical bandpass filter circuits.

図 13 非対称バンドパスフィルタ設計結果

Fig. 13. Asymmetrical bandpass filter circuit synthesized by the proposed method.

ている。提案手法で設計された回路は、適合度が 4010 であり、Nielsen がの回路の 5780 よりも優れていた。また入出力抵抗の設定が異なるものの Koza 氏らの設計回路とほぼ同等の特性が、提案手法により少ない遺伝操作で得られている⁽⁴⁾。

6. むすび

本論文では遺伝的アルゴリズムを構造的に拡張した遺伝的プログラミングによるフィルタ回路の設計を提案した。回路素子のパラメータだけではなく、回路構造の情報を含む遺伝子を設計することにより、様々なフィルタ回路設計への適用が可能となった。また多集団並列化による並列遺伝的プログラミングを用いることにより確実な進化を実現できている。

ローパスフィルタ設計の例では島モデルによる多集団並列化の有用性を示し、提案手法の妥当性を示した。非対称バンドパスフィルタの例では、手動設計による回路と比較し、提案手法によりそれと劣らないまたは優れている回路を設計することができ、提案手法の有効性を示した。提案手法は、個体の強さを決定する適合度の計算を変更することにより、設計仕様が多岐にわたるフィルタ回路設計に柔軟に対応可能である。また、提案手法はフィルタ回路設計の自動化に対して有用である。このことにより、手動設計では得られないような回路構造を提案手法により得ることも可能である。

なお本論文は同志社大学 RCAST 研究助成費によった。
(平成 16 年 2 月 23 日受付, 平成 16 年 7 月 15 日再受付)

文 献

- (1) W. Banzhaf, P. Nordin, R.E. Keller, and F.D. Francone: Genetic Programming- An Introduction, Morgan Kaufmann Publishers, Inc., (1998)
- (2) 伊庭育志:「遺伝的プログラミング入門」, 東京大学出版会, (2001)
- (3) J.R. Koza, M.A. Keane, M.J. Streeter, W. Mydlowec, J. Yu, and G. Lanza: Genetic Programming IV; Routine Human-Competitive Machine Intelligence, Kluwer Academic Publishers, (2003)
- (4) J.R. Koza, F.H. Bennett III, D. Andre, and M.A. Keane: Genetic Programming III; Darwinian Invention and Problem Solving, Morgan Kaufmann Publishers, Inc., (1999)
- (5) R. Tanase: "Distributed genetic algorithms", Proc. 3rd International Conference on Genetic Algorithms, pp.434-439, (1989)
- (6) M. Snir, S.W. Otto, S. Huss-Lederman, D.W. Walker, and J. Dongarra: MPI: The Complete Reference, The MIT Press, (1996)
- (7) L.W. Nagel: "SPICE2, A computer program to simulate semiconductor circuits", Memo UCB / ERL M520, Univ. Cal., Berkeley, (1975)
- (8) I.R. Nielsen: "A C-T filter compiler - From specification to layout", Analog Integrated Circuits and Signal Processing, 7(1):21-23, (1995)
- (9) 矢野雄一・加藤利次:「遺伝的プログラミングによる回路最適設計」, 平 14 電気関係学会関西支部連合大会, No.G11-23. (2002)
- (10) 矢野雄一・井上 馨・加藤利次・三木光範:「遺伝的プログラミングによるアクティブフィルタ回路設計」, 平 15 電気関係学会関西支部連合大会, No.G10-2. (2003)

矢野 雄 一 (学生員) 1979 年 2 月 9 日生。2002 年 3 月同志社大学工学部電気工学科卒業。2004 年 3 月同志社大学大学院工学研究科電気工学専攻修了。現在、日本電気株式会社勤務。並列処理による遺伝的アルゴリズムおよび遺伝的プログラミングに関する研究に従事。

加藤 利 次 (正員) 1957 年 3 月 26 日生。1979 年 3 月同志社大学工学部電子工学科卒業。1981 年 3 月同大学大学院博士課程前期電気工学専攻修了。同年 4 月助手。1986 年 3 月工学博士。同年 4 月講師。1989 年 4 月助教授, 1998 年 4 月教授。1990 年 4 月～8 月 IREQ 客員研究員。同年 9 月～1992 年 3 月 MIT LEES 客員研究員。現在、電力変換器の解析, 回路現象に関する各種波形解析法の開発に従事。IEEE, CIGRE 会員。

井 上 馨 (正員) 1973 年 8 月 7 日生。2001 年大阪大学大学院基礎工学研究科博士後期課程修了。日本学術振興会特別研究員 PD を経て, 2001 年 10 月同志社大学工学部電気工学科助手に着任し, 現在に至る。回転機に生じる非線形現象の解析や時変システムの安定性についての研究に従事。大阪大学博士 (工学)。1999 年度システム制御情報学会奨励賞受賞。電子情報通信学会, IEEE などの会員。

三 木 光 範 (非会員) 昭和 25 年 2 月 16 日生。1978 年大阪市立大学大学院工学研究科博士課程修了。工学博士。大阪市立工業研究所研究員, 金沢工業大学助教授を経て 1987 年大阪府立大学工学部航空宇宙工学科助教授, 1994 年同志社大学工学部教授。進化的計算手法とその並列化, および知的なシステムの設計に関する研究に従事。著書は「工学問題を解決する適応化・知能化・最適化法」(技法堂出版)等多数。IEEE, 米国航空宇宙学会, 情報処理学会, 人工知能学会, システム制御情報学会等会員。超並列計算研究会代表。