

平成 21 年 4 月 20 日現在

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2007～2008

課題番号：19560450

研究課題名 (和文) モデリング機能・適応的進化機能を融合した統合型大域的最適化手法の開発

研究課題名 (英文) Development of Integrated Global Optimization Method Combining Adaptive Evolution Mechanism with Modeling Technique

研究代表者

安田 恵一郎 (YASUDA KEIICHIRO)

首都大学東京・理工学研究科・教授

研究者番号：30220148

研究成果の概要：モデリング・シミュレーション技術との融合・結合を前提とした新たな最適化アルゴリズムの開発と、最適化アルゴリズムとの融合・結合を前提とした新たなモデリング技術の開発を同時にかつ双方向・相補的に進め、これらを統合した新たな最適化の枠組みである統合型最適化の構築を行った。主要な研究成果の概要は以下の通りである。

- (1) Particle Swarm Optimization (PSO) のアルゴリズムに適応的なパラメータ更新規則を導入した新たな PSO を構築し、典型的なベンチマーク問題を用いた数値実験により、有用性を検証した。
- (2) PSO における探索の多様化・集中化を定量的に評価可能な「群の活性度」を新たに定義し、この活性度をフィードバック制御する新たな PSO を構築し、典型的なベンチマーク問題を用いた数値実験により、有用性を検証した。
- (3) 関数近似手法 (モデリング) として、RBF (Radial Basis Function) を用い、最適化手法として PSO (Particle Swarm Optimization) を用いる統合型最適化手法を構築し、ベンチマーク問題を用いた数値実験を行った。さらに、サンプル点配置および追加方法に関する検討を行った。
- (4) 統合型最適化手法を多目的最適化問題へ拡張し、RBF と PSO を用いた多目的統合型最適化手法を構築し、ベンチマーク問題を用いた数値実験を行った。
- (5) RBF と PSO を用いた統合型最適化手法と、有限要素法を用いた電磁界解析シミュレータを結合させることで、サーフェスマータの最適設計が実現できることを検証した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2008年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・制御工学

キーワード：システム最適化, モデリング, シミュレーション, メタヒューリスティクス

1. 研究開始当初の背景

人間の意思決定の普遍的本質を扱う「最適化」は、工学のみならず経済学・社会学等の幅広い分野にわたって存在し、その重要性は広く認識されている。さらに、近年、システムの設計・運用・解析・制御や工業製品の性能に対する要求は高度化し、「実用的な最適化」に対するニーズは近年急速に高まっている。しかしながら、最適化の実用化は、電力システムの運用・計画、VLSI レイアウト設計、画像情報処理、制御系設計など電気・電子・情報工学を中心とする限られた分野、言い換えればモデリングが比較的容易な良構造システムの分野に留まっているのが現状である。

最適化の実用化が十分に進展・普及していない主要な理由としては、

- ①「最適化」は実システムのモデルに対して行われるが、微分可能性・連続性など適用するアルゴリズムが規定する制約内でのモデリングが必要となる。その結果、モデルと実システムの乖離が大きくなり、得られた最適解が実システムにおいて実行可能性を持たないなどの問題が生ずる。
- ②最適化アルゴリズムの開発が必ずしもコンピュータパワーの飛躍的増大やモデリング・シミュレーション技術の進歩を最大限に活用することを前提に行われているとは言い難く、シミュレータやCAD・CAEなどの資源が「最適化」において十分には活用されていない。
- ③「最適化」は代表的な分野横断型学問体系でありながら、最適化理論・アルゴリズムに関しては応用数学・工学基礎・情報工学等の分野で、最適化応用に関しては工学の各分野で独立に研究されることが多く、学部・学科横断的組織による系統的な調査・研究が十分に行われていない。

ことを挙げるができる。従って、「実用的な最適化」に対する高いニーズに応えるためには、コンピュータパワーの飛躍的増大を踏まえつつ、最適化理論・最適化アルゴリズムとモデリング・シミュレーション技術を融合・結合した最適化の新たなパラダイムである「最適化工学」の構築を行うことが不可欠である。

とりわけ、モデリング・シミュレーション技術との融合・結合を前提とした新たな最適化アルゴリズムの開発と、最適化アルゴリズムとの融合・結合を前提とした新たなモデリング・シミュレーション技術の開発を同時に

かつ双方向・相補的に進め、最適化に関わる技術を発展的に再構築することが重要な課題となっている。

しかしながら、これまでの最適化に関する研究はほとんどの場合において、最適化問題として定式化された後のアルゴリズムの性能向上を目的としており、モデリング・シミュレーション技術との融合・結合を前提とした双方向・相補的な最適化に関する研究はほとんど行われていない。

2. 研究の目的

モデリング・シミュレーション技術との融合・結合を前提とした新たな最適化アルゴリズムの開発と、最適化アルゴリズムとの融合・結合を前提とした新たなモデリング・シミュレーション技術の開発を同時にかつ双方向・相補的に進め、最適化に関わる技術を発展的に再構築することを通じて、工学諸分野は勿論のこと、経済システムや社会システムにおいて最適化の普及を図ることを目的とする。

コンピュータパワーやモデリング・シミュレーション技術の大幅な進歩を踏まえた、モデリングと最適化を融合した新たな最適化システムが構築できれば、これまで数式的なモデリング表現が困難であった工学諸分野に存在する様々な対象を逐次的にモデリング・最適化することが可能となり、結果として種々の工業製品、工学諸分野のシステム、さらに経済システムや社会システムの一層の高効率化・高信頼化・高機能化の実現に寄与することができる

3. 研究の方法

本研究課題は、モデリングと最適化アルゴリズムを融合した統合型最適化アルゴリズムの構築と工学システムへの応用に関する研究を行うことを目的としており、以下の主要な課題から構成されている。

- ①モデリング技術との融合を前提とした多点探索型最適化アルゴリズムの構築
- ②多点探索型最適化アルゴリズムとの融合に適したモデリング手法の選定と評価
- ③モデリング技術と最適化アルゴリズムを融合した統合型最適化アルゴリズムの構築
- ④構築した統合型最適化アルゴリズムの工学システムへの応用

本研究で対象とする最適化問題は、決定変数の離散・連続の観点から、離散型最適化問題と連続型最適化問題の2つの分野に分類

できる。前者の離散型最適化問題を主として研究代表者の安田が、後者の連続型最適化問題を主として研究分担者の相吉が担当する。

また、それぞれの最適化アルゴリズムとモデリングとの融合・結合に関しては、生成された探索点履歴情報に基づいてモデリングおよび最適化アルゴリズムの双方のパラメータを逐次的に調整する機構構築が不可欠であり、この課題に関しては研究代表者と研究分担者が離散構造と連続構造の2つの切り口から密接な連携を取りつつ進めた。

4. 研究成果

モデリング・シミュレーション技術との融合・結合を前提とした新たな最適化アルゴリズムの開発と、最適化アルゴリズムとの融合・結合を前提とした新たなモデリング技術の開発を同時にかつ双方向・相補的に進め、これらを統合した新たな最適化の枠組みである統合型最適化の構築を行った。

主要な研究成果は以下の通りである。

(1) 適応型 PSO の構築

Particle Swarm Optimization (以下、PSO) はメタヒューリスティクス(発見的手法)の1つであり、最適化問題を解くための有力な手法の1つとして知られている。これまでに数多くの数値実験の結果から、連続型多峰性関数の大域的最適解を実用的な計算時間内に高い精度で求めることが可能なことが数値実験的に明らかにされてきた。

PSO は、目的関数の連続性や微分可能性を必要とせず、目的関数値情報のみを用いて多峰構造の最適化問題を解くことが可能であることから、工学分野において詳細に記述された多くの複雑な問題に対して適用できる可能性が高い。更には非常に簡易なアルゴリズムでありながら効率的な最適解探索を実現しており、アルゴリズムの構築および導入が極めて容易である。従って、将来機械・化学分野に代表されるような現在モデル化が極めて困難な工学分野に対しても非常に有益な手法となり得るであろう。

ところで、PSO を始めとするメタヒューリスティクスの多くは、アルゴリズム内に調整すべきいくつかのパラメータを有しており、これらのパラメータ設定の自由度により幅広い問題を効率的に解いている。しかしながら、PSO のパラメータ設定・調整戦略や高次元問題に対する探索能力の維持・向上が課題として指摘されてきている。

これまでの PSO に関する研究は、Constriction Method (CM), Random Inertia Weight Method (RIWM), Linearly Decreasing Inertia Weight Method (LDIWM), Linearly Decreasing Vmax Method (LDVM), Increasing Neighborhood

Size Method (INSM)などに代表されるように、一様なパラメータ値に対する解析・改良が主であり、多様なパラメータ値に対する研究はまだ十分に行われていないのが現状である。パラメータ値を多様に設定することにより、最適化手法のロバスト性を向上させることも報告されており、パラメータの多様性に対する検討が行われれば、一様な系を仮定した従来型の様々な手法に対して更なる探索性能の向上につながる可能性が高い。

本研究では、PSO における最良解の更新頻度とパラメータ設定における定性的関係を、ベンチマーク問題を用いた数値実験により明らかにした。そして、最良解更新頻度が高い Particle のパラメータ値に漸近するように個々の Particle のパラメータを適応的に調整する適応型 PSO を構築した。

典型的なベンチマーク問題(それぞれ 10 次元から 500 次元)を用いて提案する適応型 PSO と従来の PSO (パラメータ固定型 PSO とスケジューリング調整型 PSO)と比較した結果、最良解更新頻度で約 2 倍から 10 倍、最終的に得られた最良解も提案アルゴリズムが最も優れていることを検証した。

適応化を目指すにあたり、Particle の特徴を捉え、いかに個々の Particle を適応的に探索させるかといった視点が重要となると考えられる。提案アルゴリズムでは、Particle が予め持つ探索の指針に重点を置いており、Particle の特徴・知性に関しては、考慮すべき事項が非常に多く残されている。

マルチエージェントにおける強化学習等に代表されるように、探索の履歴を効率よく利用することにより、一層の探索効率改善が見込まれるであろう。これらについて検討し、より自律的・効率的なアルゴリズムを構築することが本研究の今後の重要な課題であるが、本研究により、PSO に基づいた適応型アルゴリズムの1つの形態が実現されたものとする。

(2) 活性度フィードバック PSO の構築

Particle Swarm Optimization (以下、PSO) は単純化された社会モデルのシミュレーションを通じて、1995 年に R. C. Eberhart らにより開発されたメタヒューリスティクスの一つであり、非線形最適化問題を解くための有力な手法の一つとして知られている。これまでの PSO に関する解析的・数値実験的研究を通じて、多峰性の大域的最適化問題の最適解もしくは準最適解を実用的な計算時間内に求めることが可能なことが明らかにされてきた。しかしながら、PSO のパラメータ設定・調整戦略や高次元問題に対する探索能力の維持・向上が課題となっており、これらの課題を解決するための研究が近年、精力的に行われている。

PSO の代表的な改良アルゴリズムは、いず

れも探索における適切な多様化・集中化の実現を目指している点で一致している。しかしながら、PSOの探索における多様化・集中化を定量的に評価可能な指標が無いため、これらのアルゴリズムにおいてどの程度多様化・集中化が実現されているのかの検証が行われていない。さらに、これらのアルゴリズムは問題構造の違いやParticleの初期値などの条件に対する適応的な能力が十分ではないことが知られている。

本研究では、「群の活性度」を新たに提案し、この活性度に基づいたPSOの数値的安定性解析手法を提案した。さらに、数値的安定性解析に基づく活性度フィードバックを用いたPSOを構築し、典型的なベンチマーク問題を用いた数値実験により、提案する活性度フィードバックPSOの汎用性と有用性を検証した。

本研究の成果を要約すれば、以下の通りである。

- ① Particleの2乗平均速度として定義される「群の活性度」を新たに定義した。この活性度によりPSOの探索における多様化・集中化を定量的に評価できることを示した。
- ② 活性度に基づく数値的安定性解析手法を新たに提案した。数値的安定性解析に基づき、これまでの代表的な手法のパラメータ設定・調整戦略をPSOの安定性の観点から論じ、これまでのPSOの改良の多くが探索の多様化と集中化の適切なバランスの実現を目指したものであることを明らかにした。
- ③ 数値的安定性解析に基づき、群の活性度をフィードバック制御する新たなPSO (Activity Feedback PSO: AFPSO) を提案した。10種類の典型的なベンチマーク問題を用いた数値実験を行い、提案手法の汎用性と有用性を検証した。

(3) 統合型最適化システムの構築

近年のシステムの大規模・複雑化、システム的设计・運用・解析・制御や工業製品の性能に対する要求の高度化に伴い、最適化分野は一層の高効率化・高信頼化・高機能化が求められており、「実用的な最適化」に対するニーズが高まっている。しかし、最適化の実用化は、電気・電子・情報工学を中心とする限られた分野、言い換えればモデリングが比較的容易な良構造システムの分野に留まっているのが現状である。

このようなニーズの高まりの背景としては、以下のようなことが挙げられる。

- ①一般的に、工学システムに対し最適化を行う際には、実際のシステムを最適化手法の適用可能なクラスまで近似したモデルに対し、最適化手法を適用することにより最適解を得る。しかし、この方法

では近年の実システムの大規模・複雑化により、モデルと実システムの乖離が大きくなることから、得られた最適解が実システムにおいて実行可能性を持たないなどの問題が生じてしまう。

- ②現状として、モデリングの困難な機械工学・応用化学分野では、問題の形状を設計変数に対し陽に表現することは不可能であり、解析や実験、シミュレータ等により初めて評価関数値が定められることが多い。このような問題に対しては、従来関数の感度(勾配)等を利用した手法は適用することが出来ないため、シミュレータ等から得られる評価値を利用して最適化を行うことになる。しかし、このような数値解析・シミュレーションには多大の計算時間やコストがかかる場合が多く、最適化手法の適用には膨大な時間を要してしまう。

以上のことを踏まえると、シミュレータへのアクセス回数や計測・実験回数を最小限に留めながら、いかに効率的に最適化を行うかは最適化の普及において重要な課題であると言える。今後も進むであろうシステムの大規模・複雑化を踏まえれば、上述の状況下においても最適化を効率的に行うことが可能な体系を構築出来れば、最適化の一層の実用化に繋がる。

本研究では、それぞれ各分野の精力的な研究により飛躍的向上している最適化手法、モデリング・シミュレーション手法、コンピュータパワー等の個別技術を最大限に利用した工学的最適化システムの構築を目指し、その一体系として最適化手法とシミュレータ・モデリング技術との結合を前提とした新たな枠組みである統合的最適化を提案し、汎用的な性能向上の検討を行った。本研究で得られた成果は以下の通りである。

- ①「実用的な最適化」を目指し、その枠組みのひとつとして最適化手法とモデリング手法の結合させた統合的最適化のコンセプトを示した。
- ②最適化手法としてPSO、モデリング手法としてRBFNを用い、シミュレータへのアクセス数を大幅に減少させつつ最適化を行うことを実現した。
- ③制約の取り扱いに関して新たなペナルティの付加方法を提案した。また、可能な限り少ないサンプル点で疎な領域を作らず、大域的最適解周辺を高い精度で近似することを目標とし、新たなサンプル点の追加方法を提案した。そして、典型的なベンチマーク問題を用いた数値実験を行うことで提案手法の有用性を示した。

(4) 多目的統合型最適化システムの構築

現実の多くの最適化問題は、多目的最適化

問題に定式化できる。統合的最適化を多目的最適化問題へ拡張し、単一目的最適化問題と同様、そのシミュレーション・計測回数を大幅に軽減させつつ、高い最適性を実現することができれば、工学的意義が大きい。本章では、工学的応用を目指し、統合的最適化の多目的最適化問題への拡張を検討した。

従来手法としては、多目的最適化においてベクトル値で表わされる目的関数値をいったんスカラー値に変換するスカラー化による方法が一般的だが、近年、連続設計問題において、多点探索によるメタヒューリスティクスを応用した多目的 GA や多目的 PSO の適用が検討され、高い性能を発揮することが報告されている。しかし、従来手法では、多数のパレート解を求めるという必要性から、単一目的以上にその評価回数の大きさが問題となっている。

単一目的最適化の時と同様に、近年のシミュレーション・計測技術の発展を考慮に入れた最適化を考えると、簡易なモデルに近似することなく、高精度の解を直接用いることのできる解直接探索型の手法でありながら、実用時間内に最適性の高い解を求められる手法であることが望ましい。さらに多目的最適化では、実行可能性、設計の容易さなどについて意思決定者の選択肢が重要であるという背景から、均一・広範囲の多くのパレート解が求められることが望ましい。

そのため、統合的最適化を多目的最適化問題に応用することで、単一目的最適化の時と同様に、高精度のシミュレーション・計測技術を用い、より有効性の高い解が求められることが出来ると同時に、少ないシミュレーション回数から均一・広範囲の多数のパレート解を求められることが出来れば、より設計の自由度・実用性を高められることが期待される。

以上のような背景から、単一目的最適化において、少ないシミュレーション回数から高い最適性を持つ解を求められることを確認した統合的最適化を、多目的最適化問題へ拡張することを検討した。特に本研究では、多目的最適化問題に対する統合的最適化の適用の検討と、サンプル点の追加方法、解の評価について検討を行った。

多目的最適化問題に対するアプローチとしては、前述したように、

- ①目的関数値ベクトルをスカラー値に変換して、単一目的最適化問題として扱う方法
- ②多点探索アルゴリズムを用いて、一回の実行で広範囲のパレート解を求める方法

の2つに分けられる。①は、最適化手法の適用が容易であり、意思決定者の目的設定によっては高精度の解が求められるが、多数の解を求めるためには多大な思考が必要である

と同時に、広範囲のパレート解を抽出するためのスカラー値変換は非常に困難であることが知られている。統合的最適化の適用を考えると、

- ①各目的関数に重みを付け、単一目的問題に置き換えた応答曲面において、PSOを用い、一つのパレート解を求める。重みを変えて PSO を実行することで複数のパレート解を求め、得られたパレート解付近に配置することで曲面の精度を向上させ、より良い解を求める。
- ②各目的関数の応答曲面を生成し、複数の応答曲面から多点探索メタヒューリスティクスを用いることで、応答曲面におけるパレート解集合を探索する。パレート解集合付近にサンプル点を追加することで、曲面の精度を向上させ、より良い解を求める。

統合的最適化においては、応答曲面の最適化にはシミュレーション・計測を必要としないため、最適化の探索時の評価回数が多くなってしまい、スカラー化を繰り返す方法も従来に比べ有効であろうと考えている。しかし前述したように、広範囲のパレート解を抽出するためのスカラー変換が非常に困難、また、どの範囲の解を探索するか決定が非常に煩雑であることを考慮し、本研究では②の多点探索メタヒューリスティクスを用いた適用を検討した。

本研究では PSO に基づいた多点探索メタヒューリスティクスである Multiple Objective Particle Swarm Optimization (MOPSO)を用いた。統合的最適化の対象問題として多目的最適化問題への拡張を検討した。そして、最適化手法として MOPSO を用い、混雑距離によるサンプル点追加方法を提案し、ベンチマーク問題による数値実験により、大幅に少ないシミュレーション回数で、従来と同程度の精度・広範囲のパレート解を求められることを示した。

(5) サーフェスマータの最適設計への適用

モータの設計においては、通常、いくつかの限られた設計パラメータに関して実験あるいはシミュレーションを用いて性能を評価した上で、経験や過去のデータに基づいて設計パラメータの決定が行われることが多い。しかしながら近年、シミュレーション技術やモデリング技術、さらには解直接探索型の最適化手法が急速に発展し、これまで困難とされてきたモータ設計の分野においても最適設計の実現が可能となりつつある。

静推力特性を向上させることは、サーフェスマータの動作性能の向上に直結する重要な課題であり、静推力特性はステータ鉄心の形状に大きく依存することが知られている。本研究では、ステータ鉄心の形状パラメータを決定変数とするサーフェスマータの最適

設計問題を考え、電磁界解析シミュレータを用いた統合的最適化を用いてステータ鉄心の形状最適化を行った。

ステータ鉄心の形状を軸対象とし、ステータ鉄心の形状を決定する9つのパラメータを決定変数として与え、サーフェスマータの静推力の評価値が最大となるように提案手法でこれらのパラメータを決定した。静推力は、2次元静磁界解析により計算した。なお、静推力特性は変位方向に対して分布した特性を持つため、任意の3つの変位点の推力を加重和した評価基準を設定し、最適化を行った。

従来の単純な形状の設計例および提案手法による設計例の静推力特性は、すべての変位において従来手法による設計例以上の性能を有していることを検証した。

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 10 件)

- ① 村田秀樹, 安田恵一郎, 相吉英太郎: 「非線形散逸項を有する Particle Swarm Optimization 法の提案」, 電気学会電子情報システム部門誌 Vol.127, No.5, pp.787-792 (2007-5) 【審査有】
- ② D. Niizuma, K. Yasuda and A. Ishigame: "Multi-Point Tabu Search Based on Proximate Optimality Principle - Application of Parts Concept -," IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, Vol.2, No.6, pp.635-642 (2007-11) 【審査有】
- ③ M. Higashitani, A. Ishigame, K. Yasuda: " Pursuit-Escape Particle Swarm Optimization," IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, Vol.3, No.1, pp.136-142 (2008-1) 【審査有】
- ④ 武居麻里, 安田恵一郎: 「外点ペナルティ関数と活性度を用いた有制約 Particle Swarm Optimization」, 電気学会 電子情報システム部門誌, Vol.128, No.3, pp.517-518 (2008-3) 【審査有】
- ⑤ M. Takei, K. Yasuda, and A. Ishigame: "Particle Swarm Optimization with Diverse Parameters," IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, Vol.3, No.4, pp.449-451 (2008-7) 【審査有】
- ⑥ 安田恵一郎: 「メタヒューリスティクスの現在と未来」, 計測と制御, Vol.47, No.6, pp.453-458 (2008-11) 【審査無】
- ⑦ 河原林雅, 安田恵一郎: 「Particle Swarm Optimization とモデリングを用いた統合的最適化」, 計測自動制御学会論文集,

Vol.44, No.11, pp.855-862 (2008-11) 【審査有】

- ⑧ K. Yasuda, N. Iwasaki, G. Ueno, and E. Aiyoshi: " Particle Swarm Optimization: A Numerical Stability Analysis and Parameter Adjustment Based on Swarm Activity," IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, Vol.3, No.5, pp.642-659 (2008-11) 【審査有】
- ⑨ N. Nakagawa, A. Ishigame, and K. Yasuda: " Particle Swarm Optimization with Velocity Control," IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, Vol.4, No.1, pp.130-132 (2009-1) 【審査有】

[学会発表] (計 25 件)

- ① N. Iwasaki, K. Yasuda, and G. Ueno: "Particle Swarm Optimization: Dynamic Parameter Adjustment Using Swarm Activity," Proceedings of 2008 IEEE International Conference on Systems, Man & Cybernetics, pp.2634-2639 (2008-10) 【審査有】
- ② 杉野弘和, 安田恵一郎, 相吉英太郎: 「適応型時変慣性系モデルによる Particle Swarm Optimization」, 計測自動制御学会 システム・情報部門学術講演会 SSI2008 (2008-10) 【審査無】

[図書] (計 1 件)

- ① 相吉英太郎, 安田恵一郎 編著: 「メタヒューリスティクスと応用」, 電気学会技術書, オーム社 (2007-10)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

安田 恵一郎 (YASUDA KEIICHIRO)
首都大学東京・理工学研究科・教授
研究者番号: 30220148

(2) 研究分担者

相吉 英太郎 (AIYOSHI EITARO)
慶應義塾大学・理工学部・教授
研究者番号: 90137985

(3) 連携研究者

なし