

令和 2 年 6 月 29 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K06046

研究課題名(和文) 離散構造と多目的性を考慮した統合型最適化システムの構築と電磁機器最適設計への応用

研究課題名(英文) Construction of integrated optimization system with discrete structure and Multi-Objective and optimal design of electromechanical devices

研究代表者

土屋 淳一 (Tsuchiya, Junichi)

首都大学東京・システムデザイン研究科・助教

研究者番号：70155406

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：単一目的・連続型最適化問題を対象として、シミュレーション・モデリング・発見的最適化を統合した新たな最適化の枠組みである「統合型最適化システム」の構築を行ってきたが、一層の汎用性・実用性の向上には決定変数の離散構造と目的関数の多目的性をも考慮した最適化システムに発展させることが重要であり、連続と離散、単一目的と多目的の間には最適化手法やモデリングやサンプル点配置戦略にも相違が存在するため、構築したシステムを再構築する必要がある。本研究では、統合的最適化システムの実用性と汎用性の向上を目的として、新たな統合的最適化システムの再構築と応用に関する研究を行ない、その有用性および実用性を検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

決定変数の離散構造と目的関数の多目的性をも考慮した最適化システムの構築が実現できれば、さまざまな分野に存在する最適化問題に対する汎用的かつ実用的な解法ツールを提供することが可能となる。結果として、既存の機器やシステムの性能向上や新たな機器やシステムの開発、さらに、その性能向上により、省エネルギーや環境保全にも貢献することができる。

研究成果の概要(英文)：The construction of "Integrated optimization system" that was a new frame for optimization that integrated the simulation modeling Metaheuristic was proposed for a single purpose and continuous type optimization problem. To the improvement of generality and the practicality, the development of the optimization system that considers the discrete structure of decision variables and the multi-objectiveness of the objective function is an important problem. In this research, for the purpose of improvement of the practicality and the generality, a study on the construction and application of a new "integrated optimization system" that considers the discrete structure of decision variables and the multi-objectiveness of objective function, the construction and application of a new "integrated optimization system" that considers the discrete structure of decision variables and the multipurpose of objective functions are researched, and, the usefulness and the practicality are verified.

研究分野：電気・電子工学

キーワード：最適設計 最適化 電磁界シミュレータ メタヒューリスティクス モデリング 統合的最適化

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

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亘って存在し、その重要性は広く認識されている。さらに、近年のシステムの大規模化・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、最適化への要求もますます高度化しているが、特に現実のさまざまな問題に適用可能な「実用的な最適化」の構築は重要な課題となっている。これまでの最適化技術は、最適化理論および最適化アルゴリズム、コンピュータの計算能力、実システムの大規模さ・複雑さ、システムのモデリング・シミュレーション技術、の4つの主要な要素が互いに強い影響を与えつつ、発展してきた。実システムを対象とした「実用的な最適化」は、上述の4つの要素の適切なバランスの上に実現されることが理想である。これまでもそれぞれの要素の進歩・発展が、最適化における4つの要素の新たなバランスやそれぞれの要素の新たな進歩・発展を促してきた。

システム的设计・解析・制御における最適化に対するニーズは極めて高いにも関わらず、最適化の実用化が十分に普及していない主要な理由としては、以下のことが挙げられる。

(1)最適化は一般に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手法が規定するクラス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、得られた解の実行可能性や最適性が十分では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・計測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、シミュレータなどの関連技術が最適化において十分には活用されていない。

一方、近年のコンピュータの計算能力向上により、実用的な時間内に計算できる量が飛躍的に向上すると同時に、有限要素法などのシミュレーション技術やモデリング技術が急速に発展し、様々な分野において複雑なシステムの詳細なシミュレーションが可能となるなど、最適化を取り巻く環境が急速に変わりつつある。例えば、数理計画法とモデリング技術を組み合わせた枠組みとしては、応答曲面法がよく知られている。この枠組みはモデリングと最適化の結合という点では魅力的なものであるが、通常は低次の解析関数を用いて応答曲面を構成した後に数理計画法を適用するため、得られる解の最適性や実行可能性が十分でないこともある。

これに対して近年、工学のさまざまな分野におけるシミュレーション技術や Radial Basis Function Network などの数値モデリング技術が急速に進歩している。このように拡大しつつある最適化周辺技術の一層の活用を実現するためには、応答曲面法をさらに拡張し、モデリング・シミュレーション技術との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。

### 2. 研究の目的

単一目的・連続型最適化問題を対象として、シミュレーション・モデリング・発見的最適化を統合した新たな最適化の枠組みである「統合型最適化システム」の一層の汎用性・実用性の向上には、決定変数の離散構造と目的関数の多目的性をも考慮した最適化システムに発展させることが重要な課題である。

連続と離散、単一目的と多目的の間には、最適化手法はもちろんのこと、モデリングやサンプル点配置戦略にも本質的な相違が存在するため、これまでに構築したシステムを抜本的に再構築する必要がある。

本研究では、決定変数の離散構造と目的関数の多目的性をも考慮した統合的最適化システムの構築と電磁機器最適設計への応用を目的としており、以下の課題の研究を行う。

- (1) 離散構造と多目的性を考慮した新たな統合的最適化システムの構築と検証
- (2) 統合的最適化システムの実用化と性能向上のためのサンプリング点追加戦略の検討
- (3) 構築した統合的最適化システムの電磁機器（モータ等）最適設計問題への適用

### 3. 研究の方法

(1) 離散構造と多目的性を考慮可能な Differential Evolution の開発と評価

Differential Evolution (DE) は、単一目的・連続型最適化問題を解くための手法として開発され、その探索性能は GA や PSO と同等以上の性能を有することが報告されている。申請者らは既に、DE の離散化と多目的化に関する基礎検討を終えており、この成果を踏まえ、DE の離散化と多目的化への拡張を行なう。

多目的最適化においては、パレートフロンティアにおける非劣解の選択とアーカイビングが、探索過程における探索性能と最終的に得られる解集合の最適性と一様性に大きな影響を与える。本研究では、進化型多目的最適化分野で最もよく用いられている手法の一つであり、NSGA-II において導入されている Crowding Tournament 選択を用いる。

(2) 最適化の過程における探索点履歴情報を活用した最適化とモデリングの融合

本研究における Radial Basis Function Network によるモデリングは、設計空間における平均的な精度を向上させることを目的とした通常モデリングとは異なり、「最適化にとって有用な

偏り構造を持ったモデリング」が必要となる。このような視点に立ち、既に、最適化アルゴリズムが最適化の過程で生成する偏り構造を持つデータ構造を補完するような新たなサンプル点配置手法に関する検討を進めてきた。この成果を踏まえ、探索点履歴情報を活用した離散構造と多目的性を考慮可能な、新たな最適化とモデリングの結合・融合のあり方を検討する。

(3) 離散構造と多目的性を考慮した新たな統合的最適化システムの基礎検討

離散化と多目的化に対する拡張を行なった Differential Evolution と Radial Basis Function Network によるモデリングを、最適化による探索履歴情報を利用して統合することで、離散構造と多目的性を考慮した新たな統合型最適化システムを構築し、典型的なベンチマーク問題を用いた数値実験を通じて、構築した統合型最適化システムの性能を詳細に検証し、問題点および課題を明らかにする。

(4) 離散構造と多目的性を考慮した新たな統合的最適化システムの構築と検証

決定変数の離散構造と目的関数の多目的性を考慮可能な Differential Evolution の更なる改良を進めると同時に、最適化により生成される探索点履歴情報を活用したサンプル点追加戦略に基づいて Differential Evolution と Radial Basis Function Network を、融合させることで、離散構造と多目的性を考慮した新たな統合的最適化システムを構築する。典型的なベンチマーク問題を用いて構築した最適化システムの性能を検証する。

(5) 構築した統合的最適化を用いたモータの最適設計、および試作と性能評価

モータ最適設計に基づき、モータを試作し、推力・推力リップル・鉄損などの諸性能が設計に近い状態で実現されているかを検証し、必要に応じて再モデリングやシステムの再構築を検討する。

4. 研究成果

近年、シミュレータを援用した設計はあらゆる機器の設計に用いられ、製品等の高性能化および高度化が図られている。しかし、シミュレータは、パラメータを与えると解析が出来るものの、所定の性能を得る為のパラメータを見出すという逆問題を解くことは困難である。一方、生物の行動や物理現象などから類推された最適化手法であるメタヒューリスティクスは、多峰構造の非線形最適化問題に対する近似手法として急速に発展し、種々の手法の開発されている。解直接探索型であるメタヒューリスティクスを用いた最適化手法では、評価値情報だけで最適化が可能であるため、シミュレータ等による計算結果のみを評価値として最適設計が可能である。しかし、設計の評価値を得るためにシミュレータを用いる場合、最適化を行うために膨大なシミュレーション回数を必要とし、そのため、膨大な時間がかかり、メタヒューリスティクスを用いた最適化技術が普及されていない。そこで著者らは、工学における様々な状況に適用できる最適化の枠組みとして、最適化手法、モデリング手法、シミュレーション技術を結合した統合的最適化という新たな枠組みを提案した。提案する統合的最適化は、シミュレータの計算結果より応答曲面を生成し、その上で最適化を行うことにより、シミュレータの呼び出し頻度を劇的に減少させ実用的な時間で最適解を得ること可能とした。(図1)

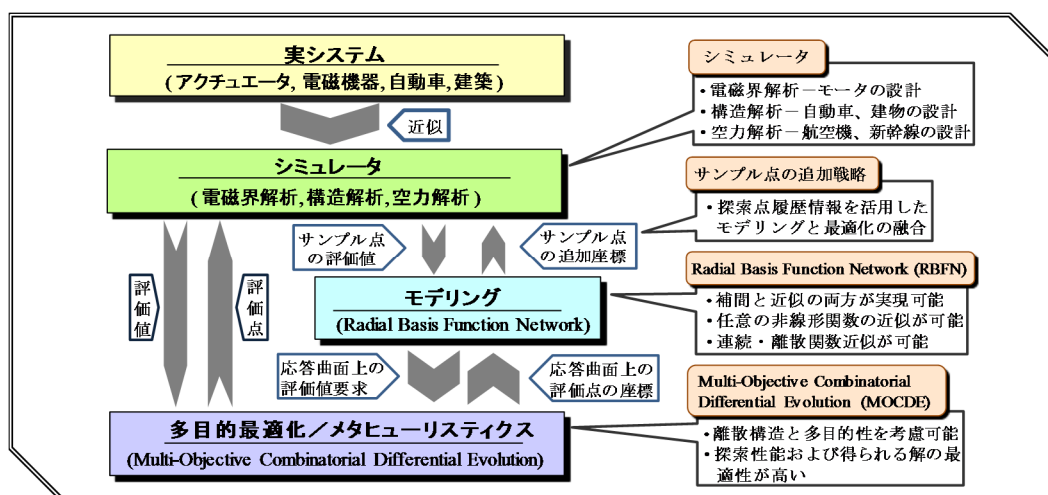


図1. 離散構造と多目的性を考慮した統合的最適化システム

(1) 最適化手法

最適化手法としては、Differential Evolution (DE)を用いた。DEは、実数値最適化問題を対象とした多点探索型のメタヒューリスティクスである。DEは、GAと同様に進化のプロセスを模擬して構築された進化論的計算手法の一つであり、突然変異、交叉、選択による3つの主な進化操作によって構成されている。

解空間の探索には多数の実数値ベクトルからなる解集団が用いられており、操作ベクトルに対

して、突然変異、交叉、選択の進化操作を適用し、世代更新を行う(図2)。DEの探索における有効な情報生成の役割を果たすのが突然変異である。突然変異の操作により、複数の探索点を用意し、それらの探索点間の差分情報を用いて解空間上の新しい情報を得る。解空間の探索として変異ベクトルを生成した後、解集合の多様性を得るために交叉の操作を行う。交叉では、操作ベクトルと先の変異ベクトルの持つ要素の置換を行う。最後に、突然変異・交叉を経て生成された試験ベクトルに対して選択の操作を行い、次世代の解ベクトルを決定する。優れた解個体を次世代のベクトルとして、解更新を行う。

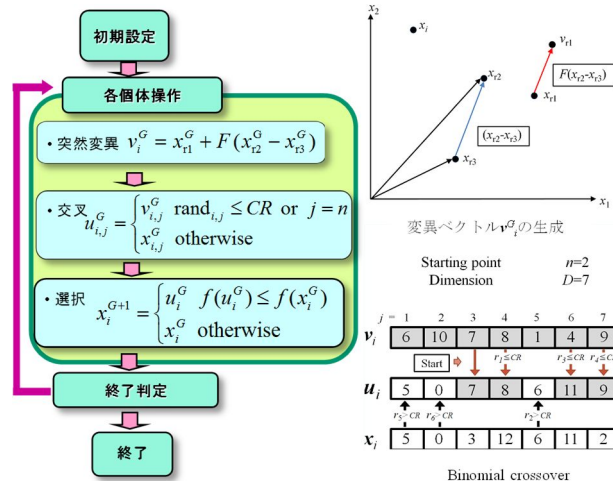


図2 Differential Evolution

(2) モデリング手法

シミュレータの計算負荷が重い場合、最適化手法の評価値計算は、応答曲面上で高速に求める。そのため、少ないシミュレーション回数で最適化可能であり、最適解が実用的な時間で得られる。モデリング手法として Radial Basis Function Network (RBFN) を用いた。RBFN は、ガウス関数の特徴から多峰性の複雑な応答曲面を近似できる。RBFN を用いて少ないサンプル点の評価値より応答曲面を生成し、最適化手法は応答曲面上で解を探索する。そのため、最適化の計算では、直接シミュレータを呼び出さず、応答曲面上で計算されるため、最適解は高速かつ実用的な時間で得られる。

(3) サンプル点配置の方法

統合的最適化において、サンプル点の配置方法は重要な要素である。統合的最適化では、最適化手法によって得られた解情報を次のサンプル点の追加に反映することにより、応答曲面の精度を適切に向上させる。少ない数のサンプル点で高い精度のモデリングを行うことが可能となれば、より少ない計算時間で最適化を行うことができ、実用的な最適化を可能とする。

(4) 最適設計例

モータ等の電磁アクチュエータの最適設計とは、種々の制約の下、目的・目標とする性能・形状を満足するような最適な設計変数を求めることである。評価値としては、トルク、推力、リプル、温度など種々のものがあり、変数としては、寸法、極数、電流・電圧などがあり、制約としては、サイズ、磁束密度、コストなどがある。

モデル化が容易で、評価値が数式で表せられる場合は数理計画法等により設計変数の最適化が容易であるが、多くの場合、評価値は有限要素法などによる電磁界解析シミュレータにより計算され、その最適化は困難である。多くの場合、設計変数の決定は熟練者の経験に依存したり、1ないし2変数のみを全範囲で変化させ、ある条件での最良値を最適値としたりすることが殆どである。従って多変数の同時最適化を人が行うことは非常に困難である。提案する電磁アクチュエータの適設計システムを用いて、新しい電磁アクチュエータであるサーフェスマータの設計へ応用した例を示す。

新しい多自由度アクチュエータであるサーフェスマータ(SFM)を設計対象とした。SFM はリアモータの一種であり、平面を1方向だけでなく全方向の直進駆動および回転駆動など平面上を自由に動作可能な多自由度アクチュエータである。電磁界解析シミュレータ(JMAG-Studio)と統合的最適化手法を用い、多数の設計変数を設定した SFM の磁極形状の同時最適設計を行う。ステータ・ムーバ磁極形状およびギャップ長を設計変数とし、各々の変数はステータの磁極形状の設計変数が7、ギャップ長の設計変数1、ムーバ磁極形状の設計変数6で、合計14変数である。設計目的はモータの性能向上であるので、駆動力である推力特性は正弦波状

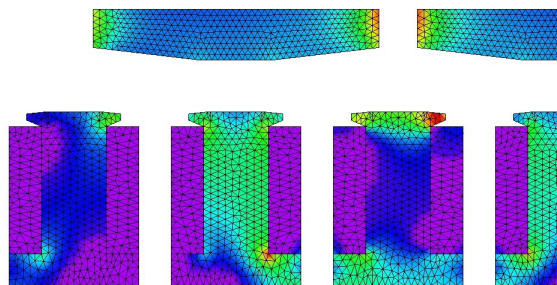


図3 最適磁極形状

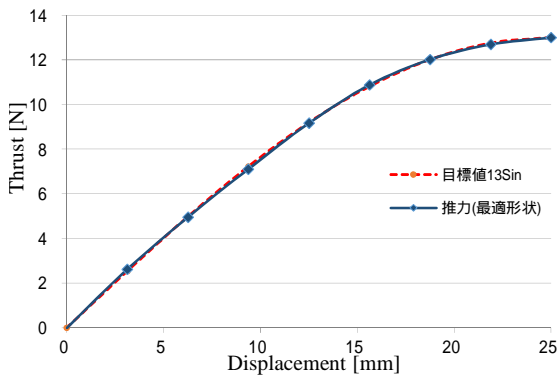


図4 最適形状の推力特性

(始動位置がピークで、停止位置でゼロとなる 1/4 区間)で大きく、摩擦に寄与し駆動妨げになる吸引力特性は小さいこと目標とする。推力の評価値は、計算された推力特性上の 8 点において、正弦波状の目標推力特性との距離の 2 乗和とし、最小化問題とした。推力特性の目標正弦波曲線の最大値を 13[N]に設定した場合の最適設計の結果を図 3 に示す。本最適設計では、多数の設計変数が設定出来たため、複雑で微妙な形状が作成出来、単純な直線形状では得られなかった正確で高い性能の推力特性曲線が、実用的な時間で得られた。計算時間はパソコン(cpu: i7-4.2GHz)で約 20 数時間であった。

電磁界解析シミュレーション、モデリング手法、最適化手法を結合した電磁アクチュエータの最適設計の新たな枠組みを用いて、電磁アクチュエータの最適設計を行い、設計変数が多い複雑な設計でも、実用的な計算時間で最適解が得られた。決定変数の離散構造と目的関数の多目的性をも考慮した最適化システムの構築が実現できれば、さまざまな分野に存在する最適化問題に対する汎用的かつ実用的な解法ツールを提供することが可能となる。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 H. Wang, K. Tamura, J. Tsuchiya, and K. Yasuda	4. 巻 Vol.13, No.12
2. 論文標題 Adaptive FA Based on Evaluation and Control of Search State for Superior Solution Set Search Problem	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering	6. 最初と最後の頁 1783-1794
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/tee.22741	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 R. Fukushima, H. Wang, K. Tamura, J. Tsuchiya, and K. Yasuda	4. 巻 Vol.14, No.12
2. 論文標題 Dominance Relation Based Genetic Algorithm for Superior Solution Set Search Problem	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering	6. 最初と最後の頁 1796-1804
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/tee.23006	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 大隅 竜太、王 鴻燃、田村 健一、安田 恵一郎	4. 巻 137
2. 論文標題 優良解集合探索問題のためのクラスタ構造を有するFirefly Algorithmの基礎検討	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 電気学会論文誌. C	6. 最初と最後の頁 1431~1432
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1541/ieejeiss.137.1431	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Hashimoto Masatoshi, Tamura Kenichi, Yasuda Keiichiro	4. 巻 12
2. 論文標題 Multipoint combinatorial optimization method with a search strategy in higher structure solution space	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering	6. 最初と最後の頁 S133~S134
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/tee.22560	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 熊谷 渉, 田村 健一, 土屋 淳一, 安田 恵一郎	4. 巻 Vol.136, No.11
2. 論文標題 探索状態の評価と制御に基づく適応型Cuckoo Search	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 電気学会 電子・情報・システム部門誌	6. 最初と最後の頁 1596-1609
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejeiss.136.1596	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計17件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 H. Wang, K. Tamura, J. Tsuchiya, and K. Yasuda
2. 発表標題 Adaptive Firefly Algorithm Based on Diversification and Intensification for Superior Solution Set Search,
3. 学会等名 2018 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 R. Fukushima, K. Tamura, J. Tsuchiya, and K. Yasuda
2. 発表標題 Fitness-Based Search Method for Superior Solution Set Search Problem
3. 学会等名 2018 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Wang, K. Tamura, J. Tsuchiya, and K. Yasuda
2. 発表標題 Superior Relation Based Firefly Algorithm in Superior Solution Set Search
3. 学会等名 10th International Conference on Soft Computing and Pattern Recognition (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 R. Fukushima, K. Tamura, J. Tsuchiya, and K. Yasuda
2. 発表標題 A Genetic Algorithm for Superior Solution Set Search Problem
3. 学会等名 10th International Conference on Soft Computing and Pattern Recognition (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 土屋淳一, 安田恵一郎
2. 発表標題 電磁界解析シミュレータと最適化手法を用いたアクチュエータの最適設計法
3. 学会等名 第30回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 土屋淳一, 安田恵一郎
2. 発表標題 複数の優良解を提案する最適設計システム
3. 学会等名 平成30年 電気学会 電子・情報・システム部門大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Hashimoto, K. Tamura, J. Tsuchiya, and K. Yasuda
2. 発表標題 Combinatorial Optimization Method with Search Strategy Based on Hierarchical Interpretation of Solution Space
3. 学会等名 2017 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (国際学会)
4. 発表年 2017年



1 . 発表者名 Y. Miyake, K. Tamura, J. Tsuchiya, and K. Yasuda
2 . 発表標題 Adaptive Cuckoo Search Based on Ranking of Search Point
3 . 学会等名 2017 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics ( 国際学会 )
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 H. Wang, K. Tamura, J. Tsuchiya, and K. Yasuda
2 . 発表標題 Firefly Algorithm Using Cluster Information for Superior Solution Set Search
3 . 学会等名 2017 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics ( 国際学会 )
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 M. Hashimoto, K. Tamura, J. Tsuchiya, and K. Yasuda
2 . 発表標題 Multi-point Combinatorial Optimization Method for Search in Higher Structure Solution Space
3 . 学会等名 2017 IEEJ Conference on Electronics, Information and Systems
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 Y. Miyake, K. Tamura, J. Tsuchiya, and K. Yasuda
2 . 発表標題 A Proposal for Adaptive Cuckoo Search Based on Search Point Ranking
3 . 学会等名 2017 IEEJ Conference on Electronics, Information and Systems
4 . 発表年 2017年

1. 発表者名 H. Wang, K. Tamura, J. Tsuchiya, and K. Yasuda
2. 発表標題 A Basic Study of Firefly Algorithm Utilizing Cluster Information for Superior Solution Set Search Problem
3. 学会等名 2017 IEEJ Conference on Electronics, Information and Systems
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 土屋淳一, 安田恵一郎
2. 発表標題 Differential Evolutionと電磁界解析シミュレータを用いたサーフェスモータの最適設計
3. 学会等名 平成30年電気学会全国大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 土屋淳一, 太田 智浩
2. 発表標題 新世代アクチュエータの性能評価とそれを活かす多自由度構成の提案 -横並び評価によって見えた各アクチュエータの位置づけと特徴-
3. 学会等名 平成30年電気学会全国大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Morita, K. Tamura, J. Tsuchiya, and K. Yasuda
2. 発表標題 A Multi-objective Optimization Method Based on Functional Specialization
3. 学会等名 2016 IEEJ Conference on Electronics, Information and Systems
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 土屋淳一, 安田恵一郎
2. 発表標題 最適化・モデリング・シミュレーションを結合した統合的最適化を用いたサーフェスマータの磁極形状の最適設計
3. 学会等名 進化計算シンポジウム2016
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 森田聖惇, 田村健一, 土屋淳一, 安田恵一郎
2. 発表標題 優良解集合探索問題の解析と優良解集合探索手法の基礎検討
3. 学会等名 進化計算シンポジウム2016
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 土屋 淳一 他	4. 発行年 2016年
2. 出版社 電気学会	5. 総ページ数 62
3. 書名 新世代アクチュエータの性能評価とそれを活かす多自由度構成の提案	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	安田 恵一郎  (Yasuda Keiichirou)  (30220148)	首都大学東京・システムデザイン研究科・教授   (22604)	