

令和 5 年 10 月 31 日現在

機関番号：22604
研究種目：基盤研究(C) (一般)
研究期間：2019～2022
課題番号：19K04143
研究課題名(和文) 優良解集合探索手法に基づく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

研究課題名(英文) Construction of Integrated Optimization System Based on Superior Solution Set Search Method and Application to Optimal Design of Electromagnetic Actuators

研究代表者
土屋 淳一 (Tsuchiya, Junichi)
東京都立大学・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) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、統合的最適設計システムの一層の汎用性・実用性の向上のため、優良解集合探索手法に基づく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、以下の課題を検討した。
(1) 優良解集合の概念と優良解集合探索手法に基づく統合的最適化システムの構築、(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ル点追加戦略の検討、(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。
その結果、より実用的な複数最良解を得られる統合型最適設計システムを構築し、電磁機器の最適設計へ応用し、複数の最適設計解を得ることを目的とする。

研究成果の学術的意義や社会的意義
優良解集合の概念と決定変数の離散構造を考慮した統合的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、新たな機器やシステムの開発、さらには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 purpose of this study is to construct an integrated optimization system based on the excellent solution set search method and apply it to the optimal design of electromagnetic equipment, in order to improve the versatility and practicality of the integrated optimal design system. Consider the following issues.
(1) Construction of an integrated optimization system based on the concept of the superior solution set and the superior solution set search method, (2) Investigation of sample point addition strategy for practical application and performance improvement of integrated optimization system, (3) Apply the integrated optimization system to the optimal design problem of electromagnetic equipment (motors, etc.).
As a result, the purpose of this study is to construct an integrated optimal design system that can obtain more practical multiple best solutions, apply it to the optimal design of electromagnetic equipment, and obtain multiple optimal design solutions.

研究分野：電気電子システム工学

キーワード：最適設計 優良解集合探索 電磁界解析シミュレータ アクチュエータ 統合型最適化 モデリング

1. 研究開始当初の背景

従来の最適化問題は、評価基準が客観的かつ定量的に評価可能であることを基礎とし、唯一の評価基準（スカラー目的関数）に対する唯一の最適解を求める単一目的最適化問題と、複数の評価基準（ベクトル目的関数）に対して互いに劣っていない複数の解（非劣解集合）を求める多目的最適化問題に大別できる。しかしながら、現実の最適化においては、例えば工業デザインに見られるように、客観的・定量的評価が可能な目的（製品性能など）と主観的評価をせざるを得ないような目的（デザインなど）、即ち性質の異なる複数の目的を有する最適化問題が存在する。

本研究者は、このような状況では、設計者のニーズに合致した複数の多様な解候補（評価値が一定以上優れ、かつ解相互の距離が一定以上離れた解集合）を提示することが有用であることを指摘し、この条件を満たす解を「優良解」と名付け、従来の単一目的最適化問題や多目的最適化問題の枠組みとは異なる「優良解集合探索問題」を着想・提案した。

単一目的最適化問題と多目的最適化問題の間に位置付けられる新たな最適化問題である優良解集合探索問題を解くための最適化手法を開発し、モデリングやシミュレーションを統合した統合的最適化システムの構築ができれば工学的価値が高いと判断し、本研究を構想した。

2. 研究の目的

本研究は、統合的最適設計システムの一層の汎用性・実用性の向上のため、優良解集合探索手法に基づく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、以下の課題を検討した。(1) 優良解集合の概念と優良解集合探索手法に基づく統合的最適化システムの構築、(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ル点追加戦略の検討、(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。その結果、より実用的な複数最良解を得られる統合型最適設計システムを構築し、電磁機器の最適設計へ応用し、複数の最適設計解を得ることを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 研究代表者の土屋は、これまでモータを中心とした電磁機器の解析・設計およびシミュレーション・モデリング・発見的最適化を統合した統合的最適化システムの構築を行っており、新たな最適化問題として評価値が一定以上優れかつ解相互の距離が一定以上離れた多様な解集合を探索する優良解集合探索問題の基礎的検討を行ってきた。この成果に基づく優良解集合の概念を考慮した新たな統合的最適化システムの構築と実用的な電磁機器設計の最適設計への応用を実装し、本研究の目的を実現する。

(2) 研究分担者の安田は、これまで探索点間の相互作用と近接最適性原理の観点から発見的最適化手法の汎用解析・設計論の体系化を進めて来ており、新たな最適化問題として、優良解集合探索問題を提案し、基礎的検討を行ってきた。この成果に基づく連続及び離散最適化のアルゴリズムの構築を行い、優良解集合の概念と決定変数の離散構造を考慮した新たなアルゴリズムを構築し統合的最適化システムを実装し、さらに深化・発展させつつ、有機的に連携・活用することで本研究の目的を実現する。

4. 研究成果

(1) はじめに

本研究では、上記2の目的のため、最適解を含む複数の優良解を得られる優良解集合探索手法を開発し、得られた手法と電磁界解析シミュレータを用いた、複数の最良解が得られる最適設計システムを構築し、実用的な成果を得た。

(2) 優良解集合探索問題

① 優良解集合探索問題 最適化の実応用では不測の事態を考慮した代替案の提示や定式化・客観的評価が困難な目的の考慮などを要求される場合があるが、従来の最適化によるアプローチではこれらを十分に考慮することが困難であった。そのような要求を満たすためには、使用者の希求水準を満たし、かつ多様な解の集合を求めることが有効な手段であると考えられる。ここで、このような解集合を、「優良解集合」と呼ぶこととする。筆者らは、評価値が一定以上優れ、かつ解相互の距離が一定以上離れた多様な解集合を探索する優良解集合探索問題について提案している⁽²⁾。優良解集合に属する解は意思決定者の希求水準を満たし、解相互の性質が大きく異なる。これは優良解集合から意思決定者の選好

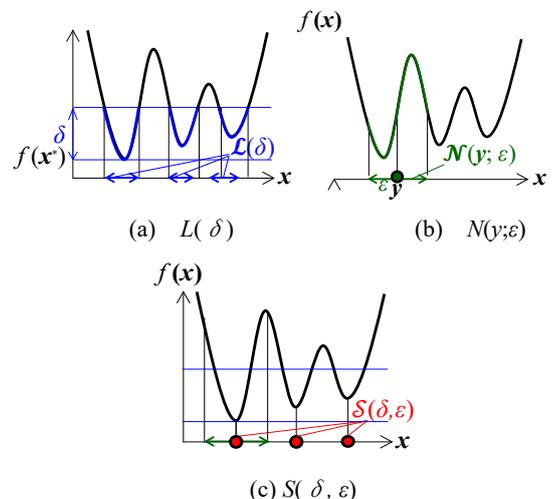


図1 優良解集合

Fig.1 superior solution set search

に応じた解の選択を可能にするため、定式化が困難な目的に対しても有効であり、工学的な価値が高いと考える。

② 優良解集合探索問題の定義 設計者の希求水準を満たし、かつ解相互の性質が大きく異なる多様な解から構成される優良解集合の探索を目標とした優良解集合探索問題を提案し、ここで定式化を示す。最適化における希求水準は目的関数値が一定以上優れることであり、解の性質の違いは決定変数の相違の程度（解空間における距離）で評価できる。

優良解集合の定義を以下に示す。ただし、本論文では目的関数 $f(x)$ の最小化問題を扱う。まず、目的関数値を考慮した解集合 $L(\delta)$ を定義する。大域的最適解の目的関数値 $f(x^*)$ を基準とする目的関数値の制約 $\delta \geq 0$ を満たす解 X のレベル集合 $L(\delta) \subseteq X$ を次式で定義する。ここで X は実行可能領域を表す。(図 1 (a)参照)

$$L(\delta) = \{x \in X \mid f(x) \leq f(x^*) + \delta\} \quad (1)$$

さらに、 y に対する ε -近傍(距離を考慮した)の解集合 $N(y;\varepsilon)$ を次式で定義する。(図 1 (b)参照)

$$N(y;\varepsilon) = \{x \in \mathbb{R}^n \mid \|x - y\| < \varepsilon\} \quad (2)$$

最後に $L(\delta)$ と $N(y;\varepsilon)$ より、優良解集合 $S(\delta, \varepsilon)$ を次式で定義する。(図 1 (c)参照)

$$S(\delta, \varepsilon) = \{y \in L(\delta) \mid f(y) \leq f(x) (\forall x \in L(\delta) \cap N(y;\varepsilon))\} \quad (3)$$

優良解集合 $S(\delta, \varepsilon)$ は、評価値が同程度に良く、かつ解相互の距離が離れた局所解の集合となる。優良解集合 $S(\delta, \varepsilon)$ を発見することを目的とした問題を、優良解集合探索問題と定義する。

(3) 複数解探索型 PSO

① 複数解探索型 PSO 優良解集合を得るとは、大域的最適解とその他の局所解を同時に獲得することである。そのため、最適化手法には PSO を改良し、優良解の定義に含まれる決定変数空間上の距離に着目し、求められる優良解の距離条件を考慮して探索範囲を制限しながら並行して複数解探索を行い、最適解を含む、複数の優良解を得る新たな最適化手法を提案する。

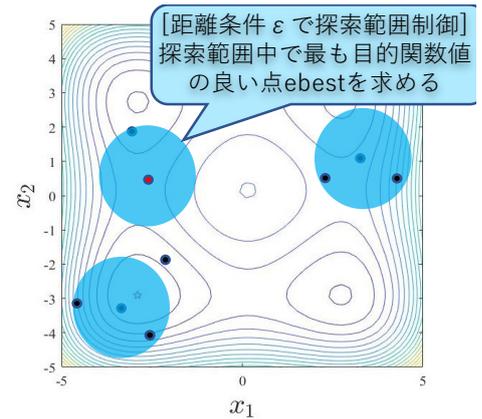
従来の PSO は、探索空間の全体の中で最も良い評価値の持つ探索点を $gbest$ とし、その 1 点に向かうように探索が行われ、最終的に 1 つの最適解を得るが、提案手法では、制限された探索範囲内で探索を行い、それぞれの範囲内の最良点を $ebest$ とし、最終的に探索範囲以上離れた複数の最良解を得ることが出来る(図 2(a)参照)。

提案手法では、実行者が探索範囲 ε と相互作用探索点数 D 、目的関数の評価値の差 δ という 3 つの定数を与える。探索範囲 ε は、決定変数空間上の距離による探索範囲の制限を直接行う定数である。相互作用探索点数 D は、この制限によって相互作用が起こりにくくなることで探索が悪化することを防ぐため、相互作用を起こす探索点の最低数を決める定数である。提案手法ではこの 2 つの定数を用いて、以下のような機構で探索を行う。探索の際、各探索点はまず、自身を中心に少なくとも相互作用探索点数 D だけの探索点を含む範囲を算出する。次に、算出した範囲と、実行者が与えた探索範囲 ε を比べ、大きい方を実用探索範囲とする(図 2(b)参照)。そして、それぞれの実用探索範囲の内部において最も目的関数の評価値の良い探索点 $ebest$ を目標として移動を実行し、その結果、複数の最良解が得られる。その中で目的関数の評価値の差 δ 以内の解を選定することにより、最適解を含む複数の優良解を得られる。

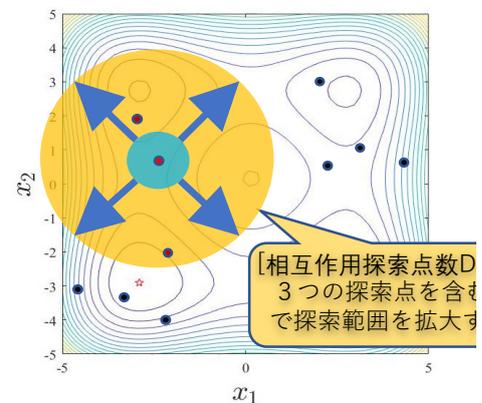
② 複数解探索型 PSO のアルゴリズム

Step 0: [準備]

探索点数(パーティクル数)を m 、重み係数を w 、 c_1 、 c_2 、最大反復回数 T_{max} 、相互作用探索点数 D 、および優良解の決定変数距離条件 ε 、目的関数値条



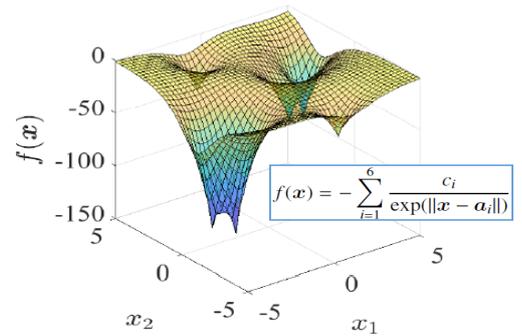
(a) 探索範囲を制限することで複数の解を獲得



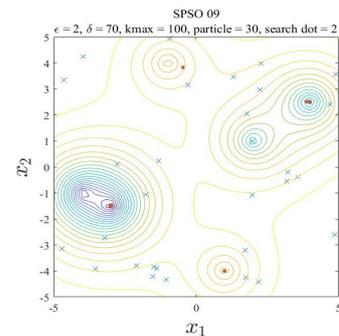
(b) ε 内に十分な探索点がない場合、探索点数 D となる迄で範囲を拡大

図 2 複数解探索型 PSO

FIG. 2 Multiple-Point PSO



(a) ベンチマーク関数



(b) 提案手法による探索結果

図 3 ベンチマーク問題

件 δ を与え、 $T := 0$ とする。

Step 1:[初期化]

各探索点の初期位置 と初期速度 を乱数によって与える。そして、 $pbest_i^0 := x_i^0$ とおく。

Step 2:[相互距離計算]

各探索点 x_i^T は自身を含んで D 番目に近い距離にある探索点との距離を R_i^T とする。

Step 3:[探索範囲制御]

各探索点 x_i^T, \dots, m は R_i^T と ϵ を比べ、大きい方を実用探索範囲とする。

Step 4:[移動目標設定]

各探各探索点 x_i^T は探索範囲内の最も目的関数値の良い探索点を移動目標 $pbest_i^T$ に設定する。

Step 5:[移動]

各探索点の初期位置 x_i と初期速度 v_i を次式で更新する。

$$v_i := w \cdot v_i + c_1 \cdot \text{rand} \cdot (pbest_{ij}^T - x_i^T) + c_2 \cdot \text{rand} \cdot (ebest_i^T - x_i^T)$$

$$x_i^{T+1} := x_i^T + v_i$$

Step 6:[更新]

各探索点 x_i^T は $f(x_i^{T+1}) < f(pbest_i^T)$ ならば、 $pbest_i^{T+1} := x_i^{cluster}$ とする。

Step 7:[終了判定]

$T = T_{max}$ をならば Step8 へ。

さもなければ $T := T+1$ として Step 2 へ行く。

Step 8:[優良解選定]

各探索点 x_i^{Tmax} の中で $f(x_i^{Tmax}) < \delta$ かつ他の探索点との距離が ϵ 以上である条件を満たす複数の探索点を選定し、優良解として終了。

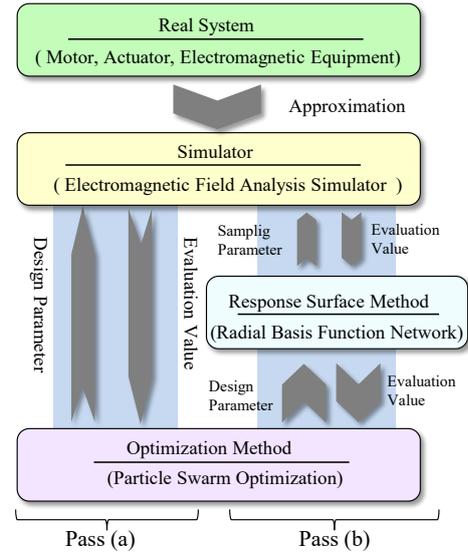


図4 シミュレータとモデリングおよび最適化手法を統合した最適設計システム

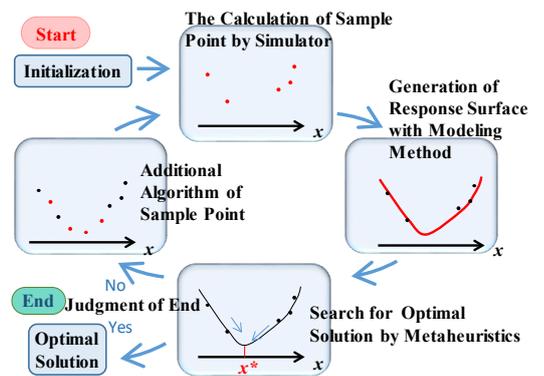


図5 統合型最適化のフロー

③ ベンチマーク問題による数値実験 図3(a)のベンチマーク関数を用いて数値実験を行い、提案手法の性能を検証した。結果は図3(b)に示される通り、探索距離 ϵ 以上離れた大域的最適解と複数の局所優良解を同時に探索出来、有用性を検証できた。また10次元の関数でも解を得られた。

(4) 統合的最適化

設計パラメータが多く、シミュレータの計算負荷が重い場合、シミュレータの計算時間が膨大になり実用的な時間内で解を得ることは困難となる。そこで、筆者らは、シミュレータの計算負荷が重い場合、シミュレータとモデリングおよび発見的最適化を統合した汎用的な最適設計システムの枠組みを提案した。(図4参照)

① シミュレータとモデリング手法と最適化手法を結合させた最適設計

実際の多くの設計においては、大規模もしくは高精度のシミュレーションで計算機の負荷が大きい場合は、シミュレータと最適化手法を直結すると計算時間が膨大になり、解を得ることが困難である。そこで、シミュレータへのアクセスの数を最小限に抑えつつ、実用的な時間で最適化が行える新しい枠組みが図4のPass(b)である。

その概要は、図4の右側に示されるように、最適化手法は、シミュレータから得られる計算値を直接用いるのではなく、その計算値をサンプル値とした数値モデル(応答曲面)を構築し、その数値モデルに最適化手法を適用して、最適値を得るものである。

レータによりサンプル点の計算値を得、次にその計算値からRBFNにより応答曲面を生成する。この応答曲面上で適応型PSOは最適解を探索する。そこで、最大サンプル数に達していなければ、新たなサンプル点を追加生成し、シミュレータによりサンプル点の計算値を得、応答曲面を生成する。それを最大サンプル数に達する迄繰り返す。最大サンプル数に達したら計算を終了し、そのときの最良解を最適解とする。(図5参照)

(5) 実設計への応用例 [サーフェスマータの磁極形状の最適設計]

多数の設計パラメータを持つ実際の電磁アクチュエータの最適設計に応用した例を示し、本手法の有用性および実用性を示す。シミュレータの計算負荷が重い場合の例にサーフェスマータの磁極形状の最適設計を示す。筆者らが提案した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⁽¹²⁾。(図6参照) SFMは平面を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アクチュエータであり、新しいモータであるので、すべて新規に設計するため大変困難である。

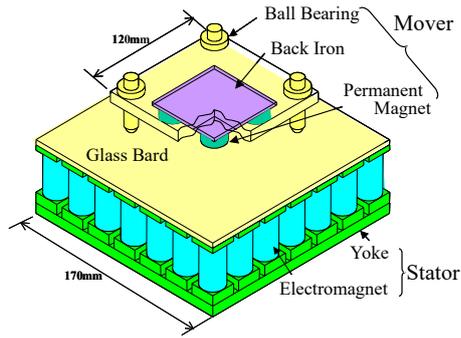


図 6 MM-type サーフェスマータ

Fig.6 The Structure of the MM-type Surface Motor

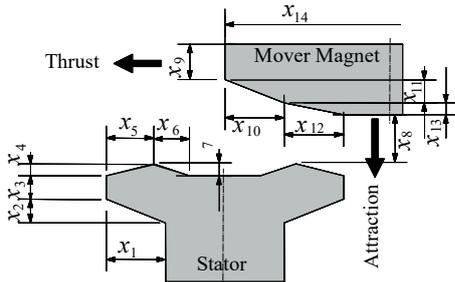


図 7 サーフェスマータの磁極形状の設計変数

① 目的／評価値および求める解の数 設計目的はモータの推力向上であり、推力特性は、始動位置が最大で、停止位置でゼロとなる正弦波状(1/4 区間)とする(図 7 の理想曲線)。今回の評価値は、目標特性になるように、8 点の目標推力特性と計算された推力特性の差の 2 乗和とし、最小化問題とした。求める解の個数は 3 個とした。

② 変数の設定 磁極形状と設計パラメータは、図 7 に示されるように、ステータの磁極形状は (x_1, \dots, x_7) 、ギャップ長は (x_8) 、ムーバ磁極形状は (x_9, \dots, x_{14}) の合計 14 変数である。各パラメータは上限および下限を設定し、実現不可能な形状の生成を制限している。

③ 最適設計 統合的最適化手法を用い、最適設計を行なった。電磁界解析シミュレータは、JMAG を用いた。サンプル点の初期値は乱数により生成するが、一部、設計者が予想する形状の値も初期値として設定した。

④ 磁極形状の最適設計例 提案手法を用い、3 つの優良解を得た例を示す。磁極形状の設計結果を図 8 に示し、それぞれの推力特性を図 9 に示す。それぞれの推力特性は、ほぼ目標の特性曲線とほぼ一致しており、3 つとも良好な特性である。3 つの優良解の各磁極形状は、図 8 に示すとおり、それぞれ異なっているが、評価値は良好で、目標とする理想曲線から約 1~1.5% 程度の誤差に収まっている。また、解同士の距離も十分離れている。確認のため、その中間の距離の形状で特性をシミュレーションすると評価値は悪くなっており、解空間は多峰性である。

複数の良好な解が得られたが、ユーザは評価値に入れられなかった条件、例えば、デザイン性、制作の容易さ等を考慮して選択することが可能となるなど、設計に多様性が出て、選択の幅が広がる。また、提案最適設計システムでは、多数の設計パラメータが設定できたため、複雑な形状が作成でき、その結果、単純な形状では得られなかった高性能な推力特性が実用的な時間で得られるなど、有用性は高い。ただし、3 つの解を得るための計算時間は、1 つの場合の 3 倍かかる。

(6) まとめ

電磁界解析シミュレータ、モデリング、発見的最適化手法を統合した統合的最適化を用いた最適設計システムに、優良解集合探索問題に対応した最適化手法を適用し、複数の最適解もしくは優良解を得られる新たな最適設計システムを構築した。今回、単一目的最適化である PSO に、決定変数距離条件に応じて探索範囲を制限する機構を組み込むことで、最適解を含む複数の優良解探索に適応した新たな手法を提案し、実用的な最適設計システムを実現するという成果を得た。

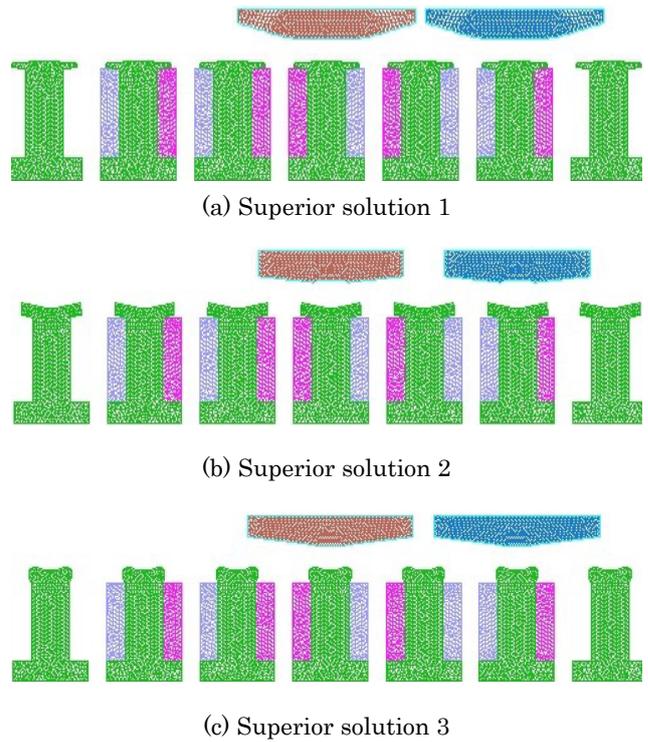


図 8 磁極形状の最適設計例 (3 優良解)

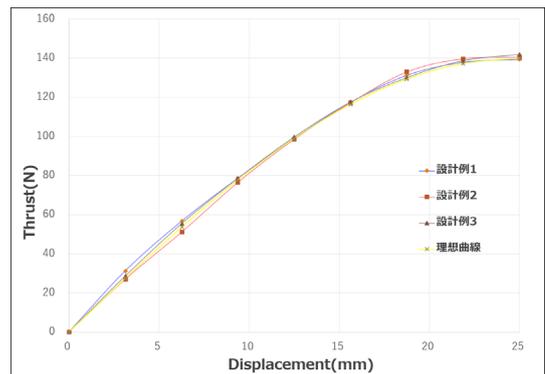


図 9 各優良解の推力特性例

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4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 川島僚雄, 熊谷渉, 田村健一, 安田恵一郎	4. 巻 Vol.141, No.9
2. 論文標題 複数局所的最適解探索のための距離情報を考慮した適合度に基づくParticle Swarm Optimization	5. 発行年 2021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 pp.1057-1058
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejeiss.141.1057	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 安田雄佑, 熊谷渉, 田村健一, 安田恵一郎	4. 巻 Vol.142, No.1
2. 論文標題 MOEA/Dの有制約最適化への拡張と適応的加重調整に関する基礎検討	5. 発行年 2022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 pp.108-109
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejeiss.142.108	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 吉野惇, 田村健一, 安田恵一郎	4. 巻 Vol.142, No.6
2. 論文標題 縮退改善機能を有する解空間の階層構造に基づく組合せ最適化手法	5. 発行年 2022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 629-630
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejeiss.142.629	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 H. Wang, R. Fukushima, K. Tamura, J. Tsuchiya, and K. Yasuda	4. 巻 Vol.14, No.12
2. 論文標題 Superior Relation-Based Firefly 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 -

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 土屋淳一, 安田恵一郎
2. 発表標題 優良解集合探索を用いたサーフェスマータの最適設計
3. 学会等名 電気学会 研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 陳洋, 田村健一, 土屋淳一, 安田恵一郎
2. 発表標題 複数局所的最適解探索のためのWolf Search Algorithmの基礎検討
3. 学会等名 電気学会 電子・情報・システム部門大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 安田雄佑, 熊谷涉, 田村健一, 安田恵一郎
2. 発表標題 有制約最適化問題のためのMOEA/Dに基づく制約対処法のパラメータ解析
3. 学会等名 電気学会 電子・情報・システム部門大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 安田雄佑, 熊谷涉, 田村健一, 安田恵一郎
2. 発表標題 適応的加重調整を用いたMOEA/Dによる有制約最適化
3. 学会等名 計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 関井大輔, 田村健一, 安田恵一郎
2. 発表標題 解空間の階層構造に基づく組合せ最適化手法における探索点の縮退の解析
3. 学会等名 計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉野惇, 田村健一, 安田恵一郎
2. 発表標題 解空間の階層構造に基づく組合せ最適化手法の多様化・集中化制御
3. 学会等名 計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 安田雄佑, 熊谷涉, 田村健一, 安田恵一郎
2. 発表標題 メタヒューリスティクスのための加重和に基づく制約対処法の基礎検討
3. 学会等名 計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 H. Wang, K. Tamura, J. Tsuchiya, and K. Yasuda
2. 発表標題 Superior Relation Based on Firefly Algorithm in Superior Solution Set Search
3. 学会等名 2019 IEEJ Conference on Electronics, Information and Systems
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 土屋淳一, 安田恵一郎
2. 発表標題 優良解集合探索問題を適用した電磁アクチュエータの最適設計システム
3. 学会等名 2019年電気学会研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 王鴻燃, 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における優越関係に基づくFirefly Algorithm
3. 学会等名 第32回 回路とシステムワークショップ
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 土屋淳一, 安田恵一郎
2. 発表標題 電磁界シミュレータを用いたアクチュエータの最適設計のための優良解集合探索手法
3. 学会等名 2022年電気学会研究会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔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)	東京都立大学・システムデザイン研究科・教授 (22604)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------