

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 10 日現在

機関番号：12612

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26730129

研究課題名(和文) マルチレベルのロバスト解探索による進化型多目的設計探索

研究課題名(英文) Multi-level robust solution search for evolutionary multi-objective design optimization

研究代表者

佐藤 寛之 (Sato, Hiroyuki)

電気通信大学・情報理工学(系)研究科・助教

研究者番号：60550978

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：工学設計の最適化では、解(設計)の評価値を改悪しても、ノイズの影響が小さいロバストな解を採用したい場合がある。本研究では、ノイズが生じる多目的最適化問題に対して、最終的な解を選ぶ意思決定者が、評価値のみならずノイズの影響の受けやすさも考慮できる進化計算による最適化法の構築に取り組んだ。まず、複数の目的とそれらの評価値に生じるノイズの間に存在する最適なトレードオフを近似する方法を構築した。次に、考慮する目的の増加に伴って最小化すべきノイズも増加するため、多数の目的を同時に最適化できる方法を構築した。さらに、複数の評価値とノイズからなる多次元ベクトルを意思決定者に効果的に提示する方法を構築した。

研究成果の概要(英文)：In engineering design optimization, robust solutions (designs) with a small influence of noises are often employed even if their evaluation values are slightly worse than other candidate solutions. For noisy multi-objective optimization problems, this work designed an evolutionary optimization framework which the decision maker can consider not only evaluation values of each solution but its noise levels to select the final solution from the obtained solution set. First, this work proposed a method to approximate the optimal trade-off among multiple objectives and their noise levels. Next, since the number of noises should be minimized is increased with increasing the number of objectives, this work also proposed evolutionary many-objective optimization techniques. Furthermore, a decision making support user interface to effectively show high-dimensional vectors involving multiple objective values and their noises was proposed.

研究分野：進化計算

キーワード：多目的最適化 ロバスト最適化 進化計算

### 1. 研究開始当初の背景

品質とコストのように相反する複数の目的を同時に最適化することを多目的最適化という。生物の遺伝と進化を基礎とする進化計算は、解集団を用いて多点探索するため、複数の目的の間に存在する最適なトレードオフ(パレートフロント)を形成するパレート最適解集合を解集団から一括して獲得できる点で、多目的最適化に有効な手段である。現在、進化計算による多目的最適化は、産業界における新しい設計手法として盛んに利用されはじめている。特に工学設計の最適化では、未知の要素がノイズとして解(設計)の評価結果に影響を与えることがあり、最適化と最終的な解の取捨選択を困難にする。今後、工学設計の最適化における進化計算の利用をさらに拡大させるためには、ノイズ環境下での多目的最適化法の確立が必要になる。

### 2. 研究の目的

工学設計の最適化では、解(設計)の評価値を多少改悪しても、ノイズの影響を受けにくいロバストな解を採用したい場合がある。従来の進化計算では、ノイズの影響の受けやすさが異なる解集合を一括獲得することは困難なため、最終的な解を決定する意思決定者が、ノイズの影響の受けやすさを考慮して解を取捨選択することはできなかった。この問題を解決し、工学設計における進化計算の適用可能範囲を拡大するため、本研究では、ノイズの影響の受けやすさが異なるマルチレベルのロバスト解集合を進化計算によって効果的に一括獲得し、意思決定者が解のロバスト性を考慮して最終的な解を選択できる多目的設計最適化のフレームワークを構築することを目的とする。具体的には、解の評価値のみならずノイズの影響をも最小化し、評価値とノイズの間に存在するパレートフロントを近似する解集合を獲得できるようにする。また、複数のノイズの影響を同時に最小化することから、考慮する目的数が増加した場合にも十分に最適化できる方法を構築する。さらに、獲得した解が有する複数の評価値と複数のノイズの大きさを意思決定者に効果的に提示し、ノイズの影響の受けやすさも考慮した円滑な解の取捨選択を実現できるようにする。

### 3. 研究の方法

進化計算によるノイズ環境での多目的最適化を実現するための基礎として、(1) マルチレベルのロバスト解集合の探索法を構築する。まず、複数の評価値に生じるノイズをスカラー値に集約し、各目的とスカラー値化したノイズの間に存在する最適なトレードオフを近似するため、一次元化ノイズに対するマルチレベルのロバスト解集合の探索法を構築する。次に、複数のノイズの間にトレードオフの関係が生じるケースに対して、複数の目的と複数のノイズの間に存在す

る最適なトレードオフを近似し、それぞれのノイズの影響の大きさを考慮して解を取捨選択できるようにするため、多次元ノイズに対するマルチレベルのロバスト解集合の探索法を構築する。このように、複数の目的のみならず複数のノイズも同時に最小化しようとすることで、一度に取り扱う評価値の数が増加すると、従来の進化計算では十分に最適化できない場合がある。これを解決するため、(2)多数の目的の同時最適化法を構築する。まず、多数次元のパレートフロントを広域かつ一様に近似できるようにする Inverted PBI スカラー化関数を構築する。さらに、本研究で基礎アルゴリズムとして採用する MOEA/D の潜在的な問題を解決して効果的な解探索を促進する 解の連鎖更新法を構築する。最後に、(3)獲得した解集合の多数次元の評価値ベクトルを意思決定者に提示して選好情報を取り出し、それを解探索に反映させる方法を構築する。本研究で提案する方法の効果は、離散問題の多目的ナップザック問題、連続問題の WFG、DTLZ 問題、これらをノイズが生じる問題に拡張したテスト問題を用いて検証する。

### 4. 研究成果

#### (1) マルチレベルのロバスト解集合探索

##### 一次元化ノイズの最小化法

本研究では、各目的の評価値ごとにノイズが生じる多目的最適化問題を扱う。そのなかで、本研究項目では、解がパレートフロントに近づくに従って、そのそれぞれの評価値に生じるノイズが共に増加するケースを想定する。ノイズベクトルを単一のスカラー値に集約し、各目的とスカラー値化したノイズの間に存在する最適なトレードオフを解集合によって近似する進化計算法を構築した。提案法は、従来の MOEA/D[1]をベースとし、ノイズ環境における二段階の意思決定を実現可能な方法に設計した。第一段階において、意思決定者は、各目的間の評価値のバランスを決定する。第二段階では、第一段階で決定した評価値のバランスを維持したまま、ノイズの影響の大きさを考慮して最終的な解を選択する。

提案法の効果を検証するため、離散問題の多目的ナップザック問題と連続問題の DTLZ2 問題を、ノイズが生じる問題へ拡張して用いた。ノイズが生じる DTLZ2 問題における結果を図 1 に示す。横軸と縦軸は、ともに最小化すべき目的関数を示している。獲得すべき解集合は、灰色の領域に分布する解集合である。円の大きさは、解に生じるノイズの大きさを示している。ノイズは、両方の評価値が改善(減少)すると大きくなる。逆に、両方の評価値が改悪(増加)すると、ノイズは小さくなり、ロバストな解になる。この図では、2つの目的関数の最適なトレードオフとなる解集合を青色で示した。さらに、そのうち、3つの評価値のバランスについて、ノイズの

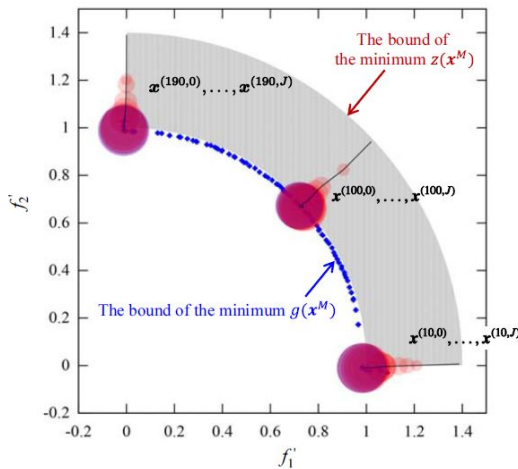


図 1: マルチレベルのロバスト解集合[2]

大きさが異なる解集合を示した．このように，提案法では，目的関数間のトレードオフのみならず，2つ評価値とノイズの間に存在する最適なトレードオフをも解集合によって近似できるようになる．これにより，意思決定者は，解が受けるノイズの影響の大きさも考慮して最終的な解を選択できるようになる．

#### 多次元ノイズの最小化法

上記では，解がパレートフロントに近づくに従って，そのそれぞれの評価値に生じるノイズが共に増加するケースについて検討した．これに対して，本研究項目では，それぞれのノイズの大きさが相反の関係になる問題に対処する方法を構築した．すなわち，ある目的の評価値に生じるノイズを最小化すると，別の目的の評価値に生じるノイズが増加する問題を取り扱う．そのため，本研究項目では，各目的間の評価値の最適なトレードオフのみならず各ノイズ間の最適なトレードオフをも近似する解集合を獲得する． $m$ 種類の目的が存在する場合，そのそれぞれにノイズが生じるため， $2m$ 目的最適化になる．提案法により，複数の評価値と複数のノイズの影響の大きさを別々に考慮して最終的な解を選択できるようになる．

MOEA/D[1]を基礎としてアルゴリズムを構築した．MOEA/Dは，本来，ノイズの無い多目的最適化問題のために構築された方法である．MOEA/Dは，評価値ベクトルをスカラー化した値に基づいて解を比較しながら最適化する．本研究項目では，ノイズが生じる多目的最適化におけるスカラー値に基づいた解の比較方法について検討した．その結果，ひとつの解を評価してスカラー値を算出することを繰り返し，その平均スカラー値に基づいて解を比較する方法が，良好な解探索性能を示すことが明らかになった．さらに，解集団中に保持される解に対して，解探索中に評価回数を徐々に増やし，その期待評価値とノイズの大きさの精度を高めることにより，さらに最適化性能が高まることが明らかにな

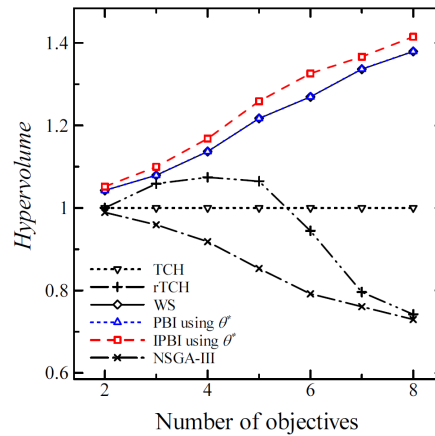


図 2: ナップザック問題における性能[3]

った．

#### (2)多数の目的関数の同時最適化法

上記(1)で検討したように，最適化する  $m$ 種類の目的のそれぞれにノイズが生じる場合， $2m$ 種類の目的を同時に最適化する必要がある．すなわち，目的数の増加に対して，その2倍の評価値を同時に取り扱う必要がある．しかし，従来の多目的最適化のための進化計算法は，目的数の増加に伴って解探索性能が低下する問題がある．これに対処するため，最適化アルゴリズムを改良した．

#### Inverted PBI スカラー化関数

MOEA/Dの最適化性能は，評価値ベクトルをスカラー化する方法によって変化する．最適化する目的数が多い場合，Weighted sum スカラー化関数を用いる MOEA/D が高い最適化性能を示すことが報告されている．しかし，Weighted sum スカラー化関数によって獲得される解集合は，パレートフロントを広域に近似できない点と，パレートフロントの形状によって，その全域を近似できないことがある点に課題がある．これらの課題を解決し，多数目的最適化問題における最適化性能を高めるために，既存の PBI スカラー化関数[1]を拡張した Inverted PBI スカラー化関数を提案した．

提案法の解探索効果を検証するため，従来の Weighted Tchebycheff (TCH), Reciprocal TCH (rTCH), Weighted sum (WS), PBI, 提案する Inverted PBI (IPBI) スカラー化関数を用いる MOEA/D の解探索性能を比較した．テスト問題として，離散問題の多数目的ナップザック問題，連続問題の WFG4 問題を用い，目的数は 2~8 に設定した．ナップザック問題における結果を図 2 に示す．横軸は問題の目的数，縦軸は Hypervolume であり，値が高いほど最適化性能が高いと判断する．この図には，最新アルゴリズムである NSGA-III の結果も含まれている．この結果から，提案する Inverted PBI を用いる MOEA/D は，2~8 目

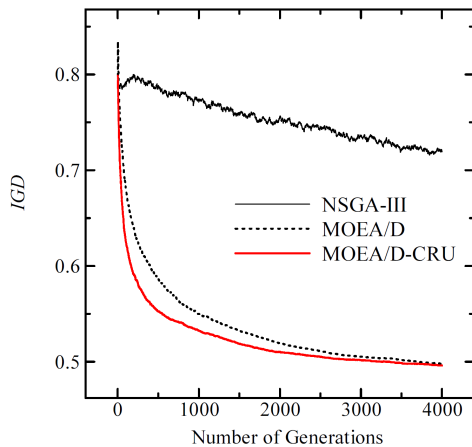


図 3: WFG 問題における性能[4]

の問題において、最も高い最適化性能を示し、従来の TCH を用いる MOEA/D との性能差は、目的数の増加に伴って拡大することがわかった。WFG4 問題においても、提案する Inverted PBI を用いる MOEA/D は高い最適化性能を示し、特にパレートフロント全域を広域に近似することが困難な問題において有効であることが明らかになった。

#### 解の連鎖更新法

スカラー化関数を活用してパレートフロントの近似を試みる MOEA/D は、多数の目的の同時最適化に適しているが、従来の MOEA/D のアルゴリズムフレームワークには、潜在的な課題がある。第 1 の課題は、設計変数が等しい解を解集団中に複数保持できる仕組みがあることで、解集団中の変数多様性が低下し、最適化が停滞することである。第 2 の課題は、新たに生成された解の存在位置が考慮されないため、解集団中の適切な解を更新できず、最適化が非効率化することである。第 3 の課題は、新たに生成された解によって解集団中の既存解が更新される場合、その既存解がパレートフロントの他の部位の近似に有効であっても単に削除されるため、解の評価時間が無駄になることである。これら 3 つの課題を解決し、MOEA/D の解探索性能をさらに高めるために、本研究項目では、解の連鎖更新法を提案した。提案法では、新たに生成された解が更新できる既存解は 1 つに制限され、その存在位置によって更新を試みる既存解が決まる。さらに、更新された既存解を、解集団中の他の既存解の代替として再活用することを試みる。

連続問題の WFG4 問題と離散問題の多数目的ナップザック問題を用いて、提案法の最適化性能を検証した。8 目的の WFG4 問題における最適化性能の比較結果を図 3 に示す。NSGA-III と MOEA/D は従来法、MOEA/D-CRU が提案法である。横軸は時間、縦軸は IGD であり、値が小さいほど良好な最適化性能と判断する。MOEA/D と MOEA/D-CRU は、ともに

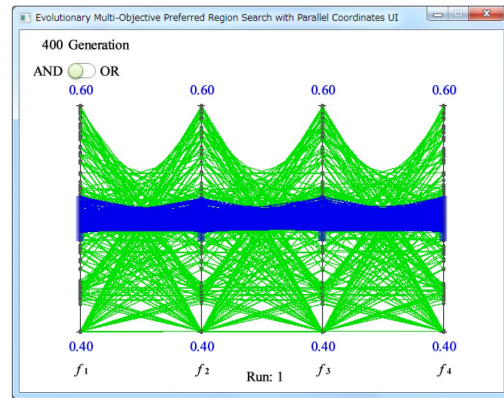


図 4: 平行座標インターフェース[5]

Inverted PBI スカラー化関数と組み合わせた場合の結果を示した。この結果から、提案法により、特に解探索初期の最適化性能が高まることがわかった。また、多数目的ナップザック問題においても、提案法が従来法より高い解探索性能を示すことが明らかになった。

#### (3) 獲得した解の表示法

上記(1)、(2)の方法で獲得される解は、複数の評価値とそれらに生じる複数のノイズ量を有する。意思決定者が、複数の評価値と複数のノイズを考慮して最終的な解を選択する場合、多次元のベクトルを効果的に提示する必要がある。そこで、本研究項目では、進化計算による多数の目的の同時最適化において、獲得したそれぞれの解が有する多数次元の評価値ベクトルを平行座標ユーザインターフェースに表示し、さらに、意思決定者の選好情報を活用して、獲得したい解の最適性をさらに高める方法を構築した。提案法は、まず、多数次元のパレートフロント全体を解集合によって粗く近似し、それを平行座標プロットによって意思決定者に提示する。これにより、パレートフロントの全体像を意思決定者に伝える。次に、平行座標ユーザインターフェースによって、意思決定者の選好を各評価値の最大値と最小値を用いて指定する。次に、意思決定者が指定した選好領域のみを集中的に解探索し、そのパレートフロントの領域の近似精度を高める。さらに獲得した解集合の提示と選好領域の指定を繰り返すことによって、意思決定者の選好の明確化を促すとともに、真に獲得したい解の最適性を高めていく。構築した平行座標ユーザインターフェースを図 4 に示す。この図では 4 つの評価値を取り扱う例を示している。ひとつの解は、各  $f$  軸上の 1 点で表され、それらが折れ線で結ばれることによって表現される。緑色の線は、パレートフロント全体を粗く近似した解集合を示す。各  $f$  軸上の青色の長方形は、意思決定者の選好領域を示し、青色の線は、選考探索して得られた解集合を示している。青色の解集合の分布密度が高く、意思決定者の選好にあった解が多数獲得さ

れる例を示している。

連続問題の DTLZ2 問題(2~6 目的)を用い、提案法の効果を検証した。その結果、提案法によって指定した選好領域の解の最適性が高まることが確認された。また、意思決定者の選好が徐々に明らかになり、選好探索と平行座標インターフェースでの解集合の提示を繰り返す方法においても、提案システムが機能することを確かめられた。

#### <引用文献>

- [1] Q. Zhang and H. Li, "MOEA/D: A Multi-objective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition," IEEE Trans. on Evolutionary Computation, Vol. 11, No. 6, pp. 712-731, 2007.
- [2] Hiroyuki Sato and Tomohisa Hashimoto "Evolutionary Multi-Level Robust Solution Search for Noisy Multi-Objective Optimization Problems with Different Noise Levels," International Journal of Automation and Logistics (IJAL), Vol. 2, Issue 1-2, pp. 4-25, 2016.
- [3] Hiroyuki Sato, "Analysis of Inverted PBI and Comparison with Other Scalarizing Functions in Decomposition Based MOEAs," Journal of Heuristics, Springer, Vol. 21, Issue 6, pp. 819-849, 2015.
- [4] Hiroyuki Sato, "Chain-Reaction Solution Update in MOEA/D and Its Effects on Multi and Many-Objective Optimization," Soft Computing, Springer, pp. 1-18, 2016. (First Online)
- [5] Hiroyuki Sato, Kouhei Tomita and Minami Miyakawa, "Preferred Region Based Evolutionary Multi-Objective Optimization Using Parallel Coordinates Interface," Proc. of the 3rd International Symposium on Computational and Business Intelligence (ISCBI 2015), pp. 89-94, 2015.

#### 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 3件)

Hiroyuki Sato, "Chain-Reaction Solution Update in MOEA/D and Its Effects on Multi and Many-Objective Optimization," Soft Computing, Springer, 査読あり, pp. 1-18, DOI: 10.1007/s00500-016-2092-3, 2016. (First Online)  
Hiroyuki Sato and Tomohisa Hashimoto

"Evolutionary Multi-Level Robust Solution Search for Noisy Multi-Objective Optimization Problems with Different Noise Levels," International Journal of Automation and Logistics (IJAL), 査読あり, Vol. 2, Issue 1-2, pp. 4-25, DOI: 10.1504/IJAL.2016.074906, 2016.  
Hiroyuki Sato, "Analysis of Inverted PBI and Comparison with Other Scalarizing Functions in Decomposition Based MOEAs," Journal of Heuristics, Springer, 査読あり, Vol. 21, Issue 6, pp. 819-849, DOI: 10.1007/s10732-015-9301-6, 2015.

#### [学会発表](計 16件)

Hiroyuki Sato, Satoshi Nakagawa, Minami Miyakawa and Keiki Takadama, "Enhanced Decomposition-Based Many-Objective Optimization Using Supplemental Weight Vectors," 2016 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC2016), 2016年7月27日,バンクーバー(カナダ)(発表予定).  
Tomohisa Hashimoto, Minami Miyakawa, Keiki Takadama, Hiroyuki Sato, "A Study on Evolutionary Multi-level Robust Solution Search for Multi-objective Optimization Involving Multi-dimensional Noise," The 2016 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP2016), 2016年3月7日,ホノルル(ハワイ).  
Hiroyuki Sato, "Evolutionary Many-objective Optimization," Next Generation Transport Aircraft Workshop 2016, 2016年2月22日,ホノルル(ハワイ).  
中川智,宮川みなみ,高玉圭樹,佐藤寛之, "補助重みベクトル群による多数目的最適化の促進に関する一検討," 進化計算学会 進化計算シンポジウム 2015, 2015年12月20日,グリーンホテル三ヶ根(愛知県・西尾市).  
佐藤寛之, "MOEA/Dにおける解の連鎖更新法に関する一検討," 進化計算学会 進化計算シンポジウム 2015, 2015年12月20日,グリーンホテル三ヶ根(愛知県・西尾市).  
橋本知尚,宮川みなみ,高玉圭樹,佐藤寛之, "多次元ノイズを含む多目的最適化におけるスカラー化関数に基づくロバスト解探索," 進化計算学会 進化計算シンポジウム 2015, 2015年12月20日,グリーンホテル三ヶ根(愛知県・西尾市).  
Hiroyuki Sato, Kouhei Tomita and Minami Miyakawa, "Preferred Region

Based Evolutionary Multi-Objective Optimization Using Parallel Coordinates Interface,” The 3rd International Symposium on Computational and Business Intelligence (ISCBI 2015), 2015年12月8日, パリ(インドネシア).

Hiroyuki Sato, Minami Miyakawa, Elizabeth Perez-Cortes, “A Parallel MOEA/D Generating Solutions in Minimum Overlapped Update Ranges of Solutions,” Late-Breaking Abstracts at 2014 Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO 2015), 2015年7月11日, マドリード(スペイン).

Hiroyuki Sato, “MOEA/D Using Constant-Distance Based Neighbors Designed for Many-Objective Optimization,” 2015 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC2015), 2015年5月28日, 仙台国際センター(宮城県・仙台市).

Tomohisa Hashimoto, Hiroyuki Sato, Minami Miyakawa, “A Study on Gradual Enhancement of the Approximation Granularity of Pareto Front in Evolutionary Many-Objective Optimization,” Workshop on Evolutionary Multi-Objective Optimization at 2015 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC2015), 2015年5月26日, 仙台国際センター(宮城県・仙台市).

Hiroyuki Sato, “Evolutionary Many-Objective Optimization: Difficulties and Approaches,” Workshop on Evolutionary Multi-Objective Optimization at 2015 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC2015), 2015年5月26日, 仙台国際センター(宮城県・仙台市).

佐藤寛之, 富田浩平, 宮川みなみ, “平行座標ユーザインターフェースを用いた多数目的選好解集合探索に関する一検討,” 第8回進化計算学会研究会, 2015年3月6日, 拓殖大学(東京都・八王子市).

佐藤寛之, “進化計算による多数目的最適化,” 第8回進化計算学会研究会 2015年3月6日, 拓殖大学(東京都・八王子市).

橋本知尚, 宮川みなみ, 佐藤寛之, “ノイズを有する多目的最適化問題におけるマルチレベルのロバスト選好解探索法の検討,” 進化計算学会 進化計算シンポジウム2014, 2014年12月20日, 安芸グランドホテル(広島県・廿日市).

Tomohisa Hashimoto and Hiroyuki Sato, “A Study on Multi-Level Robust

Solution Search for Noisy Multi-Objective Optimization Problems,” The 18th Asia Pacific Symposium on Intelligent and Evolutionary Systems, 2014年11月11日, シンガポール.

Hiroyuki Sato, “Inverted PBI in MOEA/D and its Impact on the Search Performance on Multi and Many-Objective Optimization,” 2014 Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO 2014), 2014年7月15日, バンクーバー(カナダ).

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕  
出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

〔その他〕  
受賞

ISCBI2015 (3rd International Symposium on Computational and Business Intelligence) Best Oral Presentation Award, 2015.

GECCO2014 (Genetic and Evolutionary Computation Conference) Best paper award, 2014.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

佐藤 寛之 (Sato, Hiroyuki)

電気通信大学大学院・情報理工学研究科・助教

研究者番号: 60550978