

平成 21 年 5 月 19 日現在

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18510127
 研究課題名（和文） 複雑システム最適化問題に対する生物群最適化に基づく
 ソフトソリューション技術の開発
 研究課題名（英文） Development of soft solution techniques based on particle
 swarm optimization for complex systems optimization problems
 研究代表者
 加藤 浩介（KATO KOSUKE）
 広島大学・大学院工学研究科・准教授
 研究者番号：00263731

研究成果の概要：本研究では、ますます複雑化・多様化する現代社会におけるシステム最適化問題に対して、近年注目されている生物群最適化に基づいて、高速性、正確性および頑健性をあわせもつソフトソリューション技術の開発を行った。具体的には、従来の生物群最適化手法の改良を行うとともに、多目的計画問題や離散最適化問題への拡張を行った。さらに、ロボットの最大跳躍問題や現実の空調プラントの運転計画問題への応用も行った。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	700,000	0	700,000
2007年度	500,000	150,000	650,000
2008年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	1,900,000	360,000	2,260,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学・社会システム工学・安全システムA

キーワード：生物群最適化，非線形計画，多目的計画，離散最適化

1. 研究開始当初の背景

生産計画問題，構造最適化問題，最短経路問題または配置問題などに代表される，与えられた制約条件のもとで，ある一つの目的関数を最小にするような解を求めるという数理計画問題の中で，実行可能領域が凸集合であるとともに目的関数が凸関数であるような問題は凸計画問題と呼ばれる。凸計画問題には，線形計画問題や2次計画問題などが含まれ，シンプレックス法，逐次2次計画法や一般縮小勾配法などの有効な最適化手法が提案されてきている。ところで，現実の最適化の事例を見ると，現代社会の複雑化・ネッ

トワーク化などの理由から，対象とする問題も複雑化・大規模化してきており，実行可能領域および目的関数が凸でない非凸非線形計画問題として定式化されることがしばしば見受けられる。このような非凸非線形計画問題は，前に述べた凸計画問題とは違って理論的に取り扱いにくいいため，有効な汎用的な最適化手法はいまだ確立されていない。ところで，できる限り詳しく問題を分析し，できる限り正確に解くという従来の「かたい」計算（ハードコンピューティング）においては，精確性や確実性を前提としており，問題解決のために高価な計測器や計算機あるいは多

大な労力と時間を必要としたり、不確かなデータの取り扱いが困難であるため、このように複雑性、多様性、不確実性が増大している現代社会の実用において、費用や時間および柔軟性が問題となる場合がある。このようなハードコンピューティングにおける高コスト・低柔軟性という問題点に対処するために、高い精度や確実性を要求しないで

現実世界に広く存在する「あいまいさ」や「不確かさ」を巧みに取り込むことにより、頑健かつ安上がりな計算を目指して様々な方法が近年提案されており、「やわらかな」計算（ソフトコンピューティング）と総称されている。従来の正確性を追求するハードコンピューティングに対して、ソフトコンピューティングではあいまいさや不確かさを巧みに取り込む必要があるため、常に「あいまい」または「不確か」な状況下での判断を求められる人間や生物を含む自然界における思考や計算原理に基づく手法が多い。実際、生物の脳における神経細胞からなる大規模ネットワークの高度情報処理能力に着目したニューラルネットワーク手法や自然界の生物進化のメカニズムを模倣するモデルとして提唱された遺伝的アルゴリズム、熱した金属などを徐々に冷却すると最終的に秩序のある安定した状態になることをモデル化したシミュレーテッドアニーリング（模擬徐冷）法、および、人間の脳における短期／中期／長期記憶に基づくタブー探索法などが提案されてきており、このようなソフトコンピューティング手法に基づく最適化手法への関心が高まってきている。特に、最近、鳥や魚などの生物の群れにおける個体が自身の情報だけでなく群れの情報も用いて行動していることに注目し、その振る舞いを模倣した最適化手法である生物群最適化（PSO: Particle Swarm Optimization）手法が提案された。これは、生物群における個体の動きを、「各個体が現在の進行方向と群れの中の最良点への方向を考慮して、次の進行方向を決定することにより、群れをなしながら集団としてよりよい場所を探るように振る舞う」というようにモデル化した最適化手法であり、従来の最適化手法より高速で高精度な手法として有望視されている。しかし、従来の生物群最適化手法には、局所解に停留しやすい、制約のある問題に対しては直接適用できない、あるいは、離散変数を含む問題への直接の適用も困難であるという問題点がある。

2. 研究の目的

このような状況の下で、本研究では、従来の生物群最適化手法のこれらの問題点を解消することにより、連続および離散変数を決定変数とする非凸非線形計画問題に対する汎用的かつ高速・高精度な解法を提案するこ

とを目的とした。具体的には、制約のある非線形計画問題に対して生物群最適化手法を適用可能とするために、初期個体群の生成方法の検討と実行不可能個体の修正方法の考察を行った。また、生物群最適化手法の局所解に停留しやすいという問題点に対して、個体の移動方法および個体の評価関数の変更についての検討を行った。さらに、離散決定変数への対処のために、初期個体群の生成方法および個体の移動方法の修正を行った。その後、提案手法の有効性を示すために、規模と非線形性の度合いが異なるさまざまな数値例に対して提案手法を適用し、従来の生物群最適化手法と遺伝的アルゴリズムなどの他手法との比較を行った。さらに、提案手法の実用性を示すために、現実の空調プラントの運転計画問題やロボットの最大跳躍問題などへも適用した。ここまでは、単一目的の非凸非線形計画問題を考察の対象としたが、昨今の社会規範の多様化を考慮すれば、例えば、生産現場において利潤最大化だけではなく環境汚染最小化を目指すことが要求される、あるいは、コスト最小化のみならず信頼性最大化をも求められるという状況がしばしば見受けられ、相競合する複数の目的をもつ多目的非凸非線形計画問題に対する生物群最適化手法の適用についての考察も重要である。そこで、本研究では、多目的計画問題の特徴を採り入れた新たな生物群最適化手法の提案を行うとともに、現実の空調プラントの多目的運転計画問題に対する適用により、提案手法の有用性を検証した。

3. 研究の方法

(1) 単一目的の非凸非線形計画問題に焦点をあて、制約条件をもつ一般的な非凸非線形計画問題に対して、生物群最適化に基づく高速・高精度・高可用的な解法の提案を目的とした。

①一般的な非凸非線形計画問題の定式化：現実社会で見受けられるシステムの最適化の局面において、現代システムの複雑性／多様性／不確実性に起因する非線形性を考慮することにより、最適化問題を非凸非線形計画問題として定式化した。

②従来の生物群最適化手法の改良：これまでに提案されている生物群最適化手法の非凸非線形計画問題への適用において指摘されている、Ⅰ) 制約条件のある問題に対して直接適用できない、Ⅱ) 局所最適解に停留しやすい、という問題点の解決を試みた。より具体的には、問題点Ⅰに対しては、制約を満たした実行可能個体を初期個体とするような初期個体群の生成方法の検討を行うとともに探索中に個体の実行不能となる場合に対処するために実行不可能個体の修正方法についても考察した。一方で、問題点Ⅱに対

しては、個体が局所最適解に停留をしないように、すべての個体が、群れの中心に集中しないような個体の移動方法を考えるとともに局所最適解付近の評価値を下げるといったような個体の評価関数の変更について検討した。

③改良された生物群最適化手法のコード化：上記の②で考案された改良型生物群最適化手法のアルゴリズムを電子計算機で実行可能となるように C 言語を用いてコード化されたプログラムを作成した。

④数値例を用いたシミュレーションによる有効性の検討：本研究で考案された新しい生物群最適化手法を、さまざまなタイプの非凸非線形計画問題の数値例に適用し、有効性およびその問題点について検討した。特に、プラントの運転計画問題やロボットの跳躍最大化問題などのような現実の最適化問題の特性を考慮した数値例を作成し、提案手法を適用することにより、その実用性についても検討した。

⑤検討結果のフィードバック：上記の④での実験の結果から、提案手法の問題点が示唆された場合には、その問題点が②における改良が原因かどうかについて考察し、改良が原因と推察される場合には②に戻って改良を見直すものとし、そうでなければ、新たな問題点として、その解決を試みた。

(2) 決定変数が離散値をとる非線形整数計画問題に焦点をあて、決定変数の整数性を考慮した生物群最適化に基づく高速・高精度・高可用的な解法の提案を目的とした。

①非線形整数計画問題の定式化：現実社会で見受けられるシステムの最適化の局面において、決定変数が離散値をとる状況は数多く見受けられるため、これらの状況の最適化問題の数学モデルとして、非線形整数計画問題を定式化した。

②生物群最適化手法の改良：(1)の研究によって、決定変数が連続値をとる非凸非線形計画問題に対して有効な生物群最適化手法がすでに存在するので、ここでは、決定変数の離散性を考慮した生物群最適化手法を提案した。初期個体群の生成方法および個体の移動方法の検討により対処可能と考えられるが、変数の整数化による誤差の影響が大きい 0-1 計画問題に対しても有効となるように改良を行った。また、問題点Ⅱに対しては、個体の移動方法および個体の評価関数の変更について検討した。

③改良された生物群最適化手法のコード化：②で考案された改良型生物群最適化手法のアルゴリズムを電子計算機で実行可能となるように C 言語を用いてコード化されたプログラムを作成した。

④数値例を用いたシミュレーションによる有効性の検討：本研究で考案された新しい

生物群最適化手法を、さまざまなタイプの非凸非線形整数計画問題の数値例に適用し、有効性・問題点を検討した。

⑤検討結果のフィードバック：④での実験の結果から、提案手法の問題点が示唆された場合には、その問題点が②における改良が原因かどうかについて考察し、改良が原因と推察される場合には②に戻って改良を見直すものとし、そうでなければ、新たな問題点として、その解決を試みた。

(3) 複数の目的関数が存在する多目的非凸非線形計画問題に焦点をあて、最適化関数の多目的性を考慮した生物群最適化に基づく高速・高精度・高可用的な解法の提案を目的とした。

①多目的非線形計画問題の定式化：現実社会で見受けられるシステムの最適化の局面において、相競合する複数の目的関数が存在する状況は数多く見受けられるため、これらの状況の最適化問題の数学モデルとして、多目的非線形計画問題を定式化した。

②生物群最適化手法の改良：(1)の研究によって、単一目的の非凸非線形計画問題に対して有効な生物群最適化手法がすでに存在するので、ここでは、最適化関数の多目的性を考慮した生物群最適化手法を提案した。多目的計画への適用においては、すべての目的関数が同時に最適となる完全最適解は一般に存在しないので、ある目的関数を改善すると少なくとも一つの他の目的関数が改悪されるというパレート最適解が合理的な解と考えられる。このようなパレート最適解を求めるための移動方法および個体の評価関数の変更について検討した。

③改良された生物群最適化手法のコード化：②で考案された改良型生物群最適化手法のアルゴリズムを電子計算機で実行可能となるように C 言語を用いてコード化されたプログラムを作成した。

④数値例を用いたシミュレーションによる有効性の検討：本研究で考案された新しい生物群最適化手法を、さまざまなタイプの多目的非線形計画問題の数値例に適用し、有効性および問題点について検討する。特に、運転費用最小化とエネルギー使用量最小化を同時に目指すプラントの多目的運転計画問題などのような現実の最適化問題の特性を考慮した数値例を作成し、提案手法を適用することにより、その実用性についても検討した。

⑤検討結果のフィードバック：④での実験の結果から、提案手法の問題点が示唆された場合には、その問題点が②における改良が原因かどうかについて考察し、改良が原因と推察される場合には②に戻って改良を見直すものとし、そうでなければ、新たな問題点として、その解決を試みた。

4. 研究成果

(1) 研究の対象となる問題の定式化および生物群最適化手法の改良

①対象とする非凸非線形計画問題の定式化：現実社会のシステム最適化の例として，ロボットの跳躍高最大化問題（図1）を取り上げ，非凸非線形計画問題として定式化した．

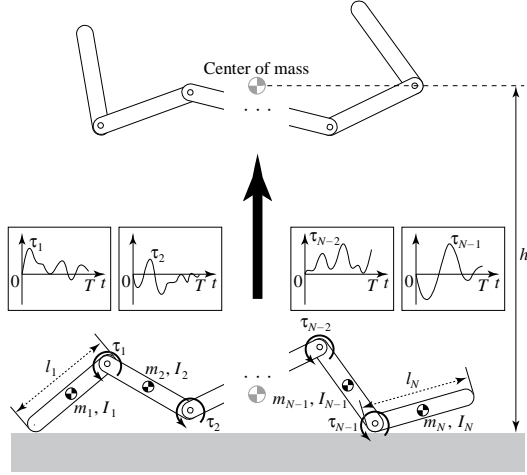


図1：ロボットの跳躍高最大化問題

②従来の生物群最適化手法の改良：これまでに提案されている生物群最適化手法の非凸非線形計画問題への適用において指摘されている，Ⅰ) 制約条件のある問題に対して直接適用できない，Ⅱ) 局所的最適解に停留しやすい，という問題点に対して，新しい個体の修正方法（図2），新しい初期個体群の生成方法（図3），移動方法の改良（図4，図5），離脱行動（図6）の導入，多重 Stretching 技法（図7），という解決法を提案し，これらの解決法をとり入れた改良型生物群最適化手法を提案した．

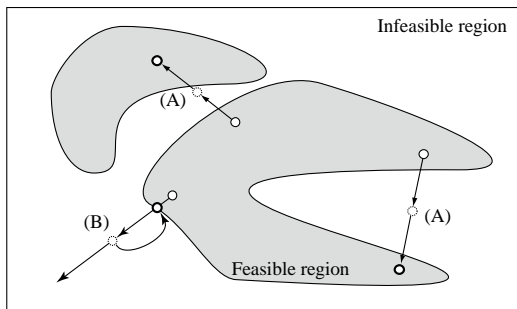


図2：新しい個体の修正方法

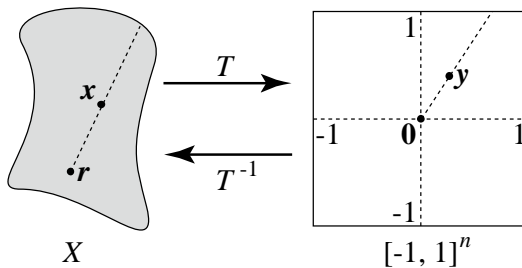


図3：新しい初期個体群の生成方法

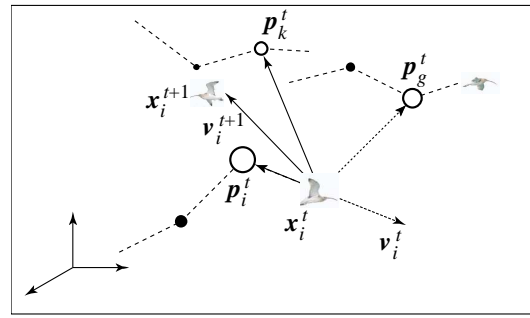


図4：移動方法の改良

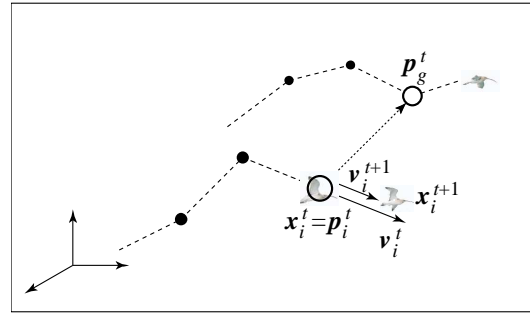
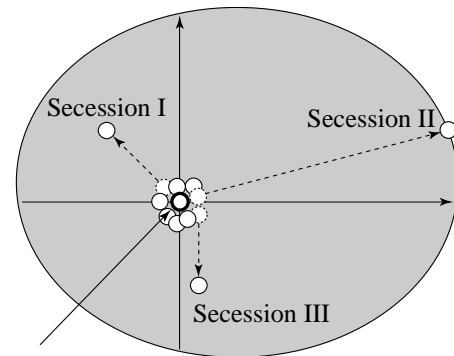


図5：移動方法の改良



The best search point of the swarm

図6：離脱行動

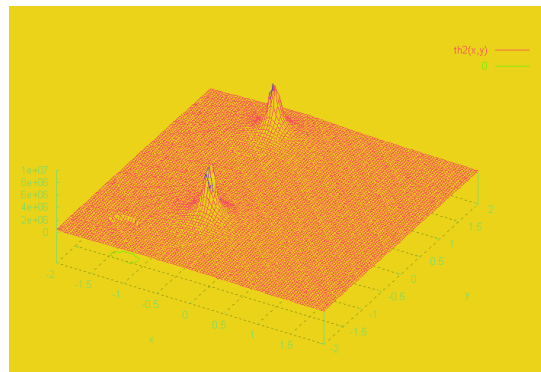


図7：多重 Stretching 技法

③改良された生物群最適化手法のコード化：上記の2. で考案された改良型生物群最適化手法のアルゴリズムをコード化した．

④数値例を用いたシミュレーションによる有効性の検討：本研究で考案された新しい生

生物群最適化手法を、さまざまなタイプの非凸非線形計画問題の数値例に適用し、有効性を検証した。特に、ロボットの跳躍高最大化問題などのような現実の最適化問題の特性を考慮した数値例に対して提案手法を適用し、その実用性についても検証した。

(2) 多目的非凸非線形計画問題及び非線形整数計画問題に対する生物群最適化手法の開発

①対象とする多目的非凸非線形計画問題及び非線形整数計画問題の定式化：現実社会のシステム最適化の例として、地域冷暖房プラントの運転計画問題を取り上げ、多目的非凸非線形計画問題として定式化した。

②単一目的計画問題及び整数計画問題に対する改良型生物群最適化手法の改良：(1)で提案した単一目的計画問題に対する改良型生物群最適化手法を多目的計画問題に直接適用した場合、求解精度の低下が確認されたため、(近似)パレート最適解情報を利用した新しい個体の移動方法(図8)や閾値の導入により、求解精度の改善を図った。また、離散最適化問題への拡張に関して考察を行った。

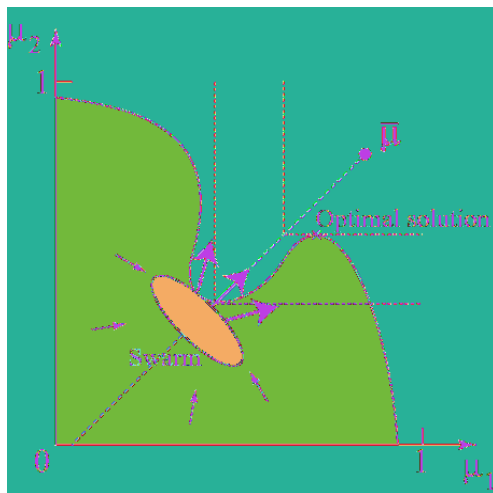


図8：新しい個体の移動方法

③多目的計画問題及び整数計画問題に対する改良型生物群最適化手法のコード化：②で提案した新しい改良型生物群最適化手法のアルゴリズムをコード化した。

④数値例を用いたシミュレーションによる有効性の検討：本研究で考案された新しい生物群最適化手法を、さまざまなタイプの多目的非凸非線形計画問題及び非線形整数計画問題の数値例に適用し、有効性・問題点を検討した。特に、地域冷暖房プラントの運転計画問題などのような現実の最適化問題の特性を考慮した数値例を作成し、提案手法を適用することにより、その実用性についても検討した。

(3) 非線形 0-1 計画問題に対する生物群最適化手法の開発

①生物群最適化手法の改良：決定変数が強い離散性をもつ 0-1 計画問題に焦点をあてた。0-1 計画問題では、すべての解が境界上にあるため、生物群最適化手法の各手順において次のような考察が必要となった。I) 決定変数が 0-1 の場合においても、効率的に実行可能な初期個体を生成できる方法を検討し、新しい初期個体の生成方法を提案した。II) 0-1 計画問題では、すべての解が境界上にあるため、通常の移動では解が停留しやすい。そこで、停留を防ぐために、局所探索に基づく解の移動について検討し、新しい解の移動方法を提案した。III) 0-1 計画問題では、局所探索に基づく解の移動を導入した場合、大域的探索能力の低下がみられたため、解の定在頻度などに基づく多様化技術を導入した。

②改良された生物群最適化手法のコード化：①で考案された改良型生物群最適化手法のアルゴリズムを電子計算機上で実行可能となるようにコード化した。

③数値例を用いたシミュレーションによる有効性の検討：本研究で考案された新しい生物群最適化手法を、さまざまなタイプの非線形 0-1 計画問題の数値例に適用し、有効性・問題点について考察した。

本研究では、これまでに一般的な解法が確立されてきていない(多目的)非凸非線形計画問題に対して、さまざまな改良を含む生物群最適化手法に基づく汎用的かつ実用的な解法を提案し、実用的な時間とコストで高精度の高い解を導出することを可能にしており、今後の実社会への応用が期待される。

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 4 件)

1. Takeshi Matsui, Masatoshi Sakawa, Kosuke Kato, Takeshi Uno, Koichi Tamada, Particle swarm optimization for interactive fuzzy multiobjective nonlinear programming, *Scientiae Mathematicae Japonicae*, 査読有, 68, 2008, 1-13.

2. 加藤浩介, 松井猛, 坂和正敏, 森原憲治, 非線形計画問題に対する Particle Swarm Optimization に基づく近似解法, *知能と情報* (日本知能情報ファジィ学会誌), 査読有, 20, 2008, 399-409.

3. 松井猛, 加藤浩介, 坂和正敏, 宇野剛史, 東森充, 金子真, 生物群最適化に基づくシリアルリンクロボットの跳躍高最大化, *日本ロボット学会誌*, 査読有, 26, 2008, 41-48.

4. Takeshi Matsui, Masatoshi Sakawa, Takeshi Uno, Kosuke Kato, Mitsuru Higashimori, Makoto Kaneko, Particle swarm optimization for

jump height maximization of a serial link robot, Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, 査読有, 11, 2007, 956-963.

〔学会発表〕(計 12 件)

1. Takeshi Matsui et al., Particle swarm optimization combining diversification and intensification for nonlinear integer programming problems, 4th International Workshop on Computational Intelligence & Applications (IWCI2008), 2008 年 12 月 10 日, 広島大学 (東広島市) .
2. Takeshi Matsui et al., Particle swarm optimization for nonlinear 0-1 programming problems, 2008 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC 2008), 2008 年 10 月 13 日, Suntec Singapore International Convention and Exhibition Centre (Singapore).
3. Takeshi Matsui et al., An interactive fuzzy satisficing method through multiobjective particle swarm optimization with external archives, Joint 4th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 9th International Symposium on advanced Intelligent Systems, 2008 年 9 月 19 日, 名古屋大学 (名古屋市) .
4. Takeshi Matsui et al., Particle swarm optimization using memory structures for nonlinear 0-1 programming problems, 11th Czech-Japan Seminar on Data Analysis and Decision Making under Uncertainty, 2008 年 9 月 16 日, 東北大学 (仙台市) .
5. 松井猛 他, 生物群最適化に基づく非線形 0-1 計画法, 第 24 回ファジィシステムシンポジウム 2008, 2008 年 9 月 4 日, 阪南大学 (松原市) .
6. Takeshi Matsui et al., Particle swarm optimization for nonlinear integer programming problems, International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2008, 2008 年 3 月 21 日, Regal Kowloon Hotel (Hong Kong).
7. Takeshi Matsui et al., An interactive fuzzy satisficing method for multiobjective operation planning in district heating and cooling plants through particle swarm optimization, 13th Asia Pacific Management Conference, 2007 年 11 月 19 日, Monash University (Melbourne).
8. Takeshi Matsui et al., An interactive fuzzy satisficing method through particle swarm optimization with Pareto based approaches to multiobjective nonlinear programming problems, 10th Czech-Japan Seminar on Data Analysis and Decision Making under Uncertainty, 2007 年 9 月 17 日, University of Ostrava (Czech Republic).
9. 松井猛 他, 生物群最適化に基づく非線形

整数計画法, 第 23 回ファジィシステムシンポジウム 2007, 2007 年 8 月 29 日, 名城大学 (名古屋市) .

10. Takeshi Matsui et al., An interactive fuzzy satisficing method through particle swarm optimization for multiobjective nonlinear programming problems, 2007 IEEE Symposium on Computational Intelligence in Multicriteria Decision Making, 2007 年 4 月 2 日, Hilton Hawaiian Village, Honolulu (USA).
11. Takeshi Matsui et al., Particle swarm optimization based heuristics for nonlinear programming problems, International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2007, 2007 年 3 月 21 日, Regal Kowloon Hotel (Hong Kong).
12. Takeshi Matsui et al., Jumping pattern optimization for a serial link robot through soft computing technique, Joint 3rd International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 7th International Symposium on advanced Intelligent Systems, 2006 年 9 月 22 日, 東京工業大学 (東京都)

〔図書〕(計 2 件)

1. Takeshi Matsui et al., InTech Education and Publishing, Particle Swarm Optimization, 2009, 363-372.
2. Takeshi Matsui et al., Springer, Advances in Industrial Engineering and Operations Research, 2008, 173-183.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

加藤 浩介 (KATO KOSUKE)
広島大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号 : 00263731

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

(4) 研究協力者

松井 猛 (MATSUI TAKESHI)
広島大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号 : 50512505