

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：12102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2014

課題番号：24656071

研究課題名(和文)局所探索法の機能ベース研究基盤の形成

研究課題名(英文)Creation of a function-based study on local search methods

研究代表者

長谷川 学 (HASEGAWA, Manabu)

筑波大学・システム情報系・准教授

研究者番号：10212143

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：緩和ダイナミクスに関するこれまでの知見から提起される問題を取りあげ、機能の観点から局所探索法を理解するアプローチについて検討した。いずれの検討結果も、このアプローチの有効性を認めるものであると同時に、そのいくつかは従来の理解を改めるものである。また、このアプローチにおける実験的解析のあり方について検討した。探索ダイナミクスにおいて認められる技法間の相似性を調べるとともに、個別技法の機能特性の明確化を図った。

研究成果の概要(英文)：A function-based understanding of optimization by local search was discussed by considering the problems arising from the previous findings on the relaxation dynamics. All the results confirmed the effectiveness of this approach and some of them made us revise our conventional procedure-based understanding. Experimental setups for the analysis of search methods were considered from the functionality point of view. Through these experiments, similarities in search dynamics were revealed among different combinations of problems and methods, and the functional characteristics were attempted to be clarified for each solution approach.

研究分野：システム工学，計算物理学

キーワード：局所探索法 メタヒューリスティクス 緩和ダイナミクス 可視化 組合せ最適化

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 近似最適化のパラダイムとして、メタ戦略(広義の局所探索法)が知られており、一連の技法の有効性が経験的に認められてきた。一方で、それらの成功要因の解明、理論の構築が求められている。汎用、頑健なる長所を持つ諸技法を広く有効に活用していくためには、伝統的な手続きベースのアルゴリズム研究にとどまらない、所与の計算時間における探索特性の理解に資するアプローチが必要と考える。

(2) 研究代表者は、ランダムな巡回セールスマン問題(TSP)の求解過程を対象とした、評価関数ならびに近傍関数がつくる景観上の探索ダイナミクスの観察を通して、アニリング法(SA)をはじめとする閾値アルゴリズムの有効性の由来について考察してきた[1-4]。そこでは、ガラス形成モデル物質のエネルギー景観上の振る舞いととの比較から物理的アナロジーの適正化を図り、この種の技法の最適化機能、すなわち良好なベイスン(局所最適解の引き込み領域)への一方向的な遷移過程として観察される緩和ダイナミクスの有効性を明らかにした。この知見は、景観上の探索ダイナミクスに注目した機能ベースの解析が、手続きの違いに囚われることなく、探索特性の理解、ひいては技法の成功要因の解明に資することを示すものである。

### 2. 研究の目的

(1) 本研究は、広義の局所探索法による最適化に対し、機能ベースのアプローチによる理論の構築を図っていくことを、全体構想として持つものである。課題遂行当初には、(a)探索にともなうベイスン間遷移過程の観察が行える可視化システムを併用した、実験的解析手法の構築を図ること、(b)機能の観点から最適化の機序を解明していくアプローチの有効性を検証し、機能ベースでの理論・方法にかかる研究の基盤形成を図ることを目的に掲げた。

(2) 研究の進展にともなって得られた知見をふまえ、課題遂行途上において、実施内容に以下の変更を加えた。(1)の(a)では、景観の意図的な変形が、有意な改善をもたらす効果的な戦術になり得ることをふまえ、当初想定されたはじめに景観ありきの可視化法に囚われず、景観、すなわち評価関数と近傍関数、ならびに(近傍内)移動ルールを、戦術を施す三極として対等に扱う実験的解析の枠組みについて、検討を進めていくこととした。また、(1)の(b)では、SAを起点とした異種技法の包括的理解の試みを、まずはExtremal optimization(EO)による求解を対象に広げていくこととした。後者の変更は、EOが、SAと一面で対照をなす技法であり、当初予定していた遺伝的アルゴリズム

(GA)やタブー探索法(TS)のような、手続き上の自由度が大きく、そのため効果的な運用条件、機能条件の明確化が容易でない技法よりも、知見の着実な積み上げが期待できることによる。当初計画には盛り込まれていないが、全体構想の下、いずれも先行実施が望ましいと判断される課題であり、これらの変更は、研究基盤の形成を図る目的から逸脱するものではない。

(3) 以下、主として、緩和ダイナミクスに関する既得知見から提起される、機能に注目するアプローチの有効性の検証にかかる課題と成果、そこで新たに得られた知見もふまえた、実験的解析のあり方にかかる検討について記述する。あわせて、可視化システムの構築にかかる検討、GAとTSに関連して行った検討、その他について報告する。

### 3. 研究の方法

(1) まず、緩和ダイナミクスに関する既得知見から提起される諸課題と方法について記述する。以下は、いずれも、二種類のランダムTSP(ランダムユークリッドTSP(RE-TSP)及びランダムな距離行列をもつTSP(RD-TSP))[5](都市数は数十から数千の範囲で選択)の求解が対象である。近傍には2-opt近傍を用いた。

#### SAにおける適応化のあり方

SAにおける適応的冷却スケジュールの設計においては、従来、各温度で擬平衡状態を達成しながら冷却を進めることが、念頭に置かれてきた。しかしながら、(平衡状態に至るまでの)緩和ダイナミクスの有効性をふまえると、これが効果的に機能する温度における探索の実現を念頭に置くのが合理的である。そこで、系を急冷後、徐々に加熱する際に起きるいわゆる安定化現象を利用して、緩和ダイナミクスが効果的に機能する温度が同定できることを予想した上で、実際の熱処理としての「焼きなまし」への適応化の実現性、有効性を調べた。

#### 探索空間平滑化法におけるメトロポリスアルゴリズムによる局所探索の有効性

探索空間平滑化法(SSS)は、景観を、大局的な構造を保ったまま平滑化された形状から元の形状へ段階的に変化させながら単純な局所探索を反復することで、探索が元の景観上の良好なベイスンへ誘導されることを期待する技法である。このため、局所探索にSAのようなストカスティックな技法を用いることは、この誘導機能を反故にしてしまう懸念から、効果的ではないとみられていた。しかしながら、SAにおける緩和ダイナミクスの有効性をふまえると、これが平滑化された景観上でも変わりなく機能するならば、SSSの誘導機能は、局所探索にメトロポリスアルゴリズム(MA)を用いること

で、むしろ促進されることが期待される。そこで、局所探索にMAを用いたSSS(MASSS)を導入し、その探索にかかる基本特性を調べる詳細な実験的解析を行った。あわせて、平滑度と同時に、MAの稼動温度も可変とする枠組みのもと、平滑度-温度スケジュールのパラメトリックスタディを行い、その最適化特性を調べた。

#### パラレルテンパリングの有効性の由来

パラレルテンパリング(PT)は、MAを複数の温度で並列実行し、詳細釣り合い条件を満たしつつ異なる温度の探索過程間で解を交換することで、低温での「遅い緩和」の緩和を見込むサンプリング手法である。しかしながら、SAにおける緩和ダイナミクスの有効性をふまえると、PTの最適化への応用(温度並列アニーリング法)においては、「遅い緩和」は必ずしも回避すべき特性ではない。PTの有効性が、低温の探索過程における平衡化の促進ではなく、ガラス様転移温度付近の温度サイクリングによる緩和の加速に由来するとみられる予備的知見をふまえ、これを検証する詳細な実験的解析を行った。あわせて、効果的な運用条件下での最適化性能を、上における平滑化法(温度、平滑度を固定したMASSS)とともに調べ、戦術を施す対象が対照をなすこれら二技法の間で、比較評価を行った。

#### SAの温度長さにかかる経験則の説明付け

SAの標準的な運用においては、温度長さ(各温度での探索ステップ数)を近傍サイズのオーダーに採ることが推奨されているが、その理由については、明快な説明が見当たらない。SAの運用において、下向きのベイスン間遷移が実現する冷却速度に限界が認められることをふまえ、その標準的な運用において、緩和ダイナミクスが適切に機能する条件に注目することにより、この経験則の説明付けを、機能の観点から図った。

#### 異なる戦術の機能特性に見出される相似性

閾値アルゴリズムの有効性が等しく緩和ダイナミクスに由来することから、機能の観点から次のシナリオが描かれる：一パラメータ(SAの場合は温度)で記述された手続き(SAの場合は近傍内の移動ルール)が、探索の広がりを変化させるものであるとき、中間のパラメータ領域において、緩和ダイナミクスの機能すなわち集中化が効果的に機能し、より良いベイスンへ探索が進行する。閾値アルゴリズムによる求解時に観られるこの振る舞いが、MASSSの運用時に、平滑度の減少による探索の広がりの縮小過程において同様に観察されることをふまえ、SAとMASSSの間の相似性を調べる実験的解析を行った。具体的には、先のSAに

かかる検討[1]に用いた三つの実験を、MASSSを対象に実施し、上述のシナリオを検証した。

(2)次に、機能ベースのアプローチにおける実験的解析のあり方にかかる検討について記述する。求解対象には、種々の景観特性が見込まれるJohnsonらがSAの評価に用いた問題、すなわち、ランダムTSP[5](都市数:100,316)に加えて、グラフ分割問題(GPP)[6](節点数:250,500)、数分割問題(NPP)[7](要素数:100,200)から、適宜選択した。また、近傍関数が戦術を施す対象にないとき、TSPの近傍は2-opt近傍、GPP、NPPの近傍は、それぞれ一節点、一要素の移動により得られる解の集合である。なお、ここで用いたGPPは疎なランダムグラフ[6]で、集中化の機能性を評価する際に、探索解を含むベイスンが解ごとに一意に定まるよう、問題の一般化を行っている(詳細は省略する)。

#### 種々の求解システムで実現される集中化機能の相似性

広義の局所探索法として括られる諸技法は、何らかの戦術により、探索を良好なベイスンへ進行させることを企図するものである。したがって、(1)におけるような相似性が、種々の求解システム(問題と解法の組み合わせ)において広く共通に認められるならば、各システムの良好な運用条件の見極めに、また(機能の観点から見た)公正な比較評価の実施に資することと考える。そこで、戦術、技法を拡大し、集中化の機能特性、特にその相似性に注目した実験的解析を、種々の求解システムを対象に行った。あわせて、集中化が効果的に機能する運用条件について考察した。具体的には、戦術を施す対象として、移動ルール、評価関数に加えて、可変近傍探索法(VNS)に倣ってパラメータ化された近傍関数を考慮し、先のSAにかかる検討[1]の中で用いた第二、第三の実験を、以下から構成されるシステムを対象に実施した：問題にはランダムTSP及びGPPを、解法にはMA、MASSS、MAVNS(MA+VNS)に加えてEOを、それぞれ選択した。

#### 種々の求解システムにおける機能条件の評価

緩和ダイナミクスの集中化機能の評価する際、これまで、複数の探索過程の振る舞いから、その平均性能を評価してきた。しかしながら、そこで得られる最大性能については、注目している集中化機能によるものか、あるいは並列化で実現される多様化機能によるものか、明確な判断がつかない。問題と解法の組み合わせにおいていずれの機能がより重要となるかなどの機能条件に関する知見は、求解システムの基本的理解に必要で

あり、また所与の計算時間における効果的な運用に役立つと考える。そこで、機能の観点から採るべき第一選択の診断を行うため、総探索時間一定の条件下、探索ステップ数と探索過程数の種々の組み合わせに対して最適化特性を評価する、実験的解析の枠組みを提案する。試みに、以下から構成されるシステムを対象に解析を行い、機能条件の明確化を図った：問題にはRE-TSP, GPP, 及びNPPを、解法にはMA, MASSS, MAVNSに加えてEOを、それぞれ選択した。

(3) 最後に、その他の計画課題と、これらに関連して行った検討について記述する。

#### 可視化システムの構築

緩和ダイナミクスの集中化機能は、コスト(評価関数値)の変化に基づき評価されたものであるが、景観上の探索ダイナミクスに対する理解をさらに進めていくには、解空間上の振る舞いの観察も必要であろう。そこで、この観察を支援する、探索空間及び探索ダイナミクスの描写方法について検討し、(複数のベイスンを持つ)小規模TSPの求解を例題として、可視化システムの雛形を試作した。さらに、規模の拡大にともなって必要となる改善について検討し、改良を加えた。

#### 異種技法の包括的理解のためのGA, TSの実験的解析

SAを起点に、機能の観点から異種技法の包括的理解を図っていくことを念頭に、GA及びTSの、各々基本的な構成を用いて、RE-TSP(都市数100)の求解を対象とした実験的解析を行い、ベイスン間遷移過程及びバックボーン(解集合ないし複数の探索過程において解群が共通に含む順路)の形成過程を観察した。いずれの技法も、Johnsonら[5]の詳細な検討報告に提示されているスキームに沿って構成、観察に供し、SAとの比較、考察を行った。近傍には2-opt近傍を用いた。

#### SAのNPPへの適用

Johnsonら[7]は、SAによるNPPの求解について、効果的な運用の実現が困難であることを報告しているが、そこでは、近傍関数に工夫の余地を残していた。そこで、予想される景観特性の変化をふまえ、値が隣接する要素の交換により得られる解を近傍解とする近傍関数を導入し、上記(2)の実験的解析により、その有効性を調べた。

#### 4. 研究成果

(1) 緩和ダイナミクスにかかる既得知見から提起される諸課題  
(以下(3)まで、記載のない計算条件、評価条件は、紙数の制約からここでは省略するものである。)

#### SAにおける適応化のあり方

クエンチ解を初期解として、系を徐々に加熱しながらMAによる探索を行い、探索解のコスト、ならびに探索解を含むベイスンのコスト(ベイスン内の局所最適解の評価関数値)の変化を調べた。その結果、いずれのコストも安定化にかかる減少と、その後の増加が観察され、緩和ダイナミクスが効果的に機能する温度を含んだ領域が適応的に検出されることがわかった。引き続き、この領域とその周辺でSA及びPTによる探索を行い、それぞれの最適化特性を調べた。その結果、効果的な温度付近の探索において、既知特性が再現されることがわかった。以上により、この合理的適応化の実現性、有効性を確認した。

#### SSSにおけるMAによる局所探索の有効性

予備実験により、各技法の運用条件を適切に定めた上で、これらの最適化性能、探索特性を詳細に調べた。主たる結果として、いずれの問題に対しても、緩和ダイナミクスは平滑化された景観上で良好に機能し、MAがSSSの誘導機能を促進すること、このメカニズムは、脱平滑化の過程で適応的に実現され、SSSはMAの効果的な温度範囲を拡大することがわかった。なお、平滑度と同時に、MAの稼動温度も可変とするMASSSの枠組みでは、平滑度、温度ともに一定とした運用において、元のMAからの主要な改善が図られる結果を得た。

#### PTの有効性の由来

従来重要とされてきた比熱のピーク温度、及び予備的知見で重要とみられたガラス様転移温度を含む主要な温度領域を横切るように、稼動温度区間、稼動温度数を種々変化させて、PTの最適化特性を調べた。その結果、PTの性能は、最低温度に強く依存し、それがガラス様転移温度と同じかわずかに下回るとき、良好な結果を得ることがわかった。また、稼動温度区間には、比熱のピーク温度よりもガラス様転移温度を含めることの方がより重要であり、PTの有効性が後者付近の緩和にかかる振る舞いに由来するとみられることを、改めて確認した。なお、平滑度、温度ともに一定のMASSSとの比較においては、MASSSの性能がPTのそれとほぼ同じ(RE-TSP)か、顕著に改善する(RD-TSP)結果が得られ、平滑化が、PTを凌ぐ戦術になり得る結果を得た。

#### SAの温度長さにかかる経験則の説明付け

標準的SAの枠組みにおいて、温度長さを都市数のオーダーにとる系列(系列1)と、都市数の二乗のオーダー(近傍サイズのオーダー)にとる系列(系列2)の二つを採り、各系列のスケラビリティテスト(都市数の

増大にともなう特性変化の有無を調べるテスト)を実施した。その結果、系列2では、緩和ダイナミクスは常に適切に機能し、都市数の増大にともない、総探索ステップ数が機能限界を表す直線にほぼ平行に増加する傾向を示すのに対し、系列1では、中間の都市数を境に緩和ダイナミクスの機能不全が起り、総探索ステップ数が異常な増大を示すことがわかった。これらのことから、温度長さにかかる経験則は、標準的SAのアルゴリズムが、緩和ダイナミクスの機能限界を超えることなくスケラビリティを維持するための最低要件として、説明できることがわかった。

異なる戦術の機能特性に見出される相似性

良好な性能が見込まれる温度に固定したMASSSを対象に、SAに対して先に行った三つの実験[1]を実施した。SAにおける温度をMASSSにおける平滑度に対応付けて行いたいずれの実験においても、SAに相似な振る舞いが観察され、3.項の(1)に記述したシナリオを、評価関数を対象とした戦術にも当てはめ得ることがわかった。以上、から の結果は、いずれも機能の観点から最適化の起序を明らかにしていくアプローチの有効性を強く認識させるものである。従来の理解が改められ、SAとその周辺技法の最適化特性が統一的に説明されることから、従来の認識に及ぼす影響は小さくなく、関連研究の再考が求められる。以下の(2)の検討も、これに動機付けられるものである。

(2) 機能ベースのアプローチにおける実験的解析のあり方にかかる検討  
(以下、MASSSの平滑度と温度、MAVNSの温度は、すべて一定である。)

種々の求解システムで実現される集中化機能の相似性

二種類のランダムTSPのEOによる求解(EOにおけるべき指数をSAにおける温度に対応付ける)、及びGPPのSAによる求解、MASSSによる求解(TSPのMASSSによる求解に準じて評価関数を1パラメータ化した)、MAVNSによる求解(節点の最大移動数をパラメータに採って探索の広がりを変化させる)を対象として、先の三つの実験[1]のうち第二の実験を、加えて最初の二対象について第三の実験を実施した。TSPのEOによる求解、GPPのSAによる求解においては、いずれも(1)と同様、TSPのSAによる求解に相似な振る舞いが観察され、3.項の(1)に記述したシナリオが、これらの求解システムにも当てはまることがわかった。これに対し、GPPのMASSSならびにMAVNSによる求解においては、パラメータの中間値におい

て緩和ダイナミクスの集中化機能が最大化するものの、その他の特徴的振る舞いにおいて、相似性の有無にあいまいな点が残った。GPPの求解では、Johnsonらと同様ペナルティ関数を用いているが、平滑化等にとまなうこの関数の取り扱いについてさらに検討した上での再検証が必要である。

種々の求解システムにおける機能条件の評価

RE-TSPのMA, MASSS, MAVNS(-opt近傍の をパラメータに採る)、及びEOによる求解、GPP及びNPPのMAによる求解を対象として、評価関数の総評価回数を一定( $2^{16}$ から $2^{26}$ の範囲で固定)とする条件下で実験を行った。この実験において、NPPを除くシステムについては、探索過程数よりも探索ステップ数を重視した運用において、パラメータの中間値において平均性能が最大化する(集中化を主要な機能とした運用が求められる)結果を得た。このとき、最大性能もおおむねこれに倣うが、両機能をバランスさせることが望ましいとみられる例(EOによる求解)、運用条件により傾向が変化するとみられる例(MAVNSによる求解における温度による違い)なども認められ、個別特性が区別されることを観た。(NPPに関する結果については、以下の(3)に記述する。)これらを通して、本評価が機能条件の明確化に資するとみられることを確認した。

以上の、の検討は、求解システムに対する基本的理解を与え、戦術の適切な選択や運用条件の見通しの良い設定に資するとともに、より複雑な機能構成をもつシステムを取り扱う際の、基礎に位置づけ得るものと考える。

(3) その他の計画課題と関連した検討

可視化システムの構築

まず、全解の枚挙が可能な小規模TSPを対象として、(a)サモンのマップ化の応用による全解の二次元領域への写像に、(b)探索解周辺の近傍ネットワーク上に記述した景観情報を併用することで、局所的な景観構造とその上の振る舞いが同時に観察できるシステムの雛形を試作した。続いて、ベイスン間の遷移ダイナミクスを、(a')二次元領域に写像された局所最適解間の遷移過程として表示する大域的な提示と、(b')探索解と周辺解のコスト、さらには探索解とその近傍解の各々を含むベイスンのコストを、一つのグラフにまとめて表示、時系列配置することによる、探索軌道に沿った局所的な提示、の二つを併用するシステムの雛形を試作した。これには、(a')による遷移ダイナミクスの観察が、(b')の提示に同調的に行えるよう、両提示の同期機能を、また、(a')の提示の際、観察者の観点に応じた任意の再写像がイ

インタラクティブに行えるよう、表示解の再配置機能を組み込んだ。例としたTSPの問題サイズは、数都市から十数都市にとどまるが、提示には、表示にかかるデータベースを構築した上で、これを参照するアプローチを採っており、規模の拡大にあっては、対象を探索軌道上の解ならびにその周辺解にとどめることで、適用が可能である。一方で、既知特性のグラフィカルな表示確認にとどまり、提示結果からの知識獲得までには至らず、可視化方法の妥当性に対する検証が、今後も必要である。

異種技法の包括的理解のためのGA, TSの実験的解析

GA及びTSの基本的な構成による, RE-TSP(都市数 100)の求解(GAの交叉には枝交換交叉を用いた)を対象に, ペイスン間遷移過程及びバックボーンの形成過程を観察し, SAの場合と比較した。実験の実施範囲において, 運用の自由度が大きいGA, TSから(緩和ダイナミクスを効果的に機能させた)SAに優る性能を得なかった一方で, GAに企図されているバックボーン形成の促進機能, 及びTSに企図されている未探索領域への一方向的な遷移機能が, SAの運用においては, 相関を持って同時に発現し, 手続き上の自由度が小さいにもかかわらず, これらの機能が良好に発揮されることがわかった。今後の課題として, (2)で行った検討をより複雑な機能構成をもつシステムを対象に進めていくことを念頭に, このことに資する知見獲得を図っていくことがあげられる。

SAのNPPへの適用

近傍として, 値の隣接する要素の交換により得られる解の集合を採り, Johnsonらが用いた, 一要素の移動により得られる解の集合を採った場合と比較評価した。両者は, 近傍の大きさのオーダーは同じであるが, 前者は, 探索解とその近傍解のコスト差を, おおむね一様に保つものであり, SAやMAの運用により適した景観を形成することが期待される。種々の温度のMAを用いて(2)の解析を行った(要素数: 100, 200)結果, 後者の近傍を用いた場合には, Johnsonらと同様の結果が再現され, 稼働温度が高いほど良好な性能が発揮されるなど, その性能が主として多様化に基づいているとみられるのに対し, 前者の近傍を用いた場合の結果は, 後者より二から三桁良好で, 平均性能において, Karmarkar-Karpのアルゴリズム以上の結果が, 中間以下の稼働温度で得られた。景観構造の変化により, SA(MA)本来の機能が回復しているとみられる。

<引用文献>

- [1] M.Hasegawa, Phys.Rev.E, **83** (2011) 036708 [12 pages].

- [2] M.Hasegawa, Comput.Phys.Commun., **182** (2011) 229-231.  
[3] M.Hasegawa, Phys.Rev.E, **85** (2012) 056704 [10 pages].  
[4] M.Hasegawa, J.Phys.Soc.Jpn., **81** (2012) 085001 [2 pages].  
[5] D.S.Johnson and L.A.McGeoch, in *Local Search in Combinatorial Optimization*, edited by E.H.L.Aarts and J.K.Lenstra, (Wiley, Chichester, 1997) 215-310.  
[6] D.S.Johnson et al., Oper.Res., **37** (1989) 865-892.  
[7] D.S.Johnson et al., Oper.Res., **39** (1991) 378-406.

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計4件)

M.Hasegawa and C.Kim, " Simulated Annealing in the Variable Landscape, " JPS Conf.Proc., **1** (2014) 019009 [5 pages]. (refereed)

DOI:10.7566/JPSCP.1.019009

M.Hasegawa and K.Hiramatsu, " Mutually beneficial relationship in optimization between search-space smoothing and stochastic search, " Physica A, **392** (2013) 4491-4501. (refereed)

DOI:10.1016/j.physa.2013.05.037

M.Hasegawa, " An Adaptive Approach to the Physical Annealing Strategy for Simulated Annealing, " AIP Conf.Proc., **1518** (2013) 733-736. (refereed)

DOI:10.1063/1.4794670

[学会発表](計7件)

M.Hasegawa, " Functionality limit of classical simulated annealing, " The 26th Conference on Computational Physics (CCP2014), 2014/8/11, Boston (USA).

M.Hasegawa, " A Function-Based Reconsideration of Stochastic Optimization Methods, " The 25th International Conference on Statistical Physics (STATPHYS25), 2013/7/26, Seoul (Republic of Korea).

長谷川 学, 平松 広太郎, " メトロポリスアルゴリズムとの併用による探索空間平滑化法の機能特性, " 第10回最適化シンポジウム 2012, 2012/12/7, 神戸市産業振興センター(兵庫県神戸市)。

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

長谷川 学 (HASEGAWA, Manabu)

筑波大学・システム情報系・准教授

研究者番号: 10212143