

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 6 日現在

機関番号：32638

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21700173

研究課題名（和文） 制約充足問題の自己適応型メタヒューリスティクスに関する研究

研究課題名（英文） A Study on Self-Adaptive Meta-Heuristics for Constraint Satisfaction Problems

研究代表者

水野 一徳（MIZUNO KAZUNORI）

拓殖大学・工学部・准教授

研究者番号：20439524

研究成果の概要（和文）：本研究課題の主な成果は、(1)制約充足問題を解決するための方法として、個々の問題や問題解決過程に応じて自動的に制御パラメータを調整することができる空間並列型の自己適応型問題解決方式の提案と評価、(2)解決するのに非常に計算手間を要する制約充足問題の組織的生成法の提案と評価、(3)応用システムとして、自律的区画変化を起こす仮想都市の生成システムの開発である。

研究成果の概要（英文）：The main results of our study are : (1) Proposal and evaluation of a self-adaptive and spatial parallel problem solving method, which can adjust control parameters for individual problem instances or problem solving processes, for solving constraint satisfaction problems, (2) Proposal and evaluation of a constructive method for systematically generating constraint satisfaction instances that are very hard to solve, and (3) Development of a system for generating virtual city spaces where urban blocks are autonomously varied.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・知能情報学

キーワード：探索・論理・推論アルゴリズム，制約充足問題，メタヒューリスティクス，相転移，NP完全，グラフ彩色問題，エージェント

1. 研究開始当初の背景

近年、人工知能などの知識処理やパターン処理の分野において、「制約」という知識表現の重要性が認識されつつある。「制約樹即パラダイム」とは、解くべき問題を制約条件の集合として捉え、それらすべての制約を充足させる解を探索することによって問題を解決しようとする新しい問題解決方式であ

る。これは、まず、現実問題をそれと等価な制約充足問題（CSP）に変換し、続いてその得られたCSPを汎用の解決器（制約ソルバ）を用いて解を得るというアプローチである。

したがって、制約充足パラダイムにおいては、(1)現実問題をCSPに変換すること、および(2)CSPを解くための高速な解探索アルゴリズムを開発すること、が独立に研究開発

を行なうことができるという利点を持ち、それぞれが重要な研究課題となる。現在、パターン処理や計画問題への応用など、人工知能・知識処理分野の基盤技術として世界各地で研究開発が勧められている。また、今後の新しいプログラミング方法論としてもその重要性が認識されつつある。

2. 研究の目的

CSP は、一般に解決するのに非常に手間のかかる問題のクラス、つまり NP 完全問題として知られており、なるべく効率よく解決するアルゴリズムが強く望まれている。これに関しては、近年、反復改良型の確率的解探索アルゴリズムに関する研究が目覚ましい。なかでも特に、確率的解法におけるメタヒューリスティクスの研究では、問題によっては非常によい結果が得られている。しかし、一般的に指摘されている解品質と計三時間のトレードオフの問題や、種々の制御パラメータのチューニングの困難さなど課題も多く残されている。

本研究の第一の目的は、CSP の解探索において、個々の問題や解探索途中の状況に応じて動的にそれら設定の困難なパラメータが適応していくメタヒューリスティクスを開発することである。

一方、CSP のような NP 完全問題に対して、近年、「相転移」と呼ばれる興味深い現象が発生することが報告されている。これは、(NP 完全という意味で) 真に計算時間が膨大となる具体的問題 (インスタンス) は、問題空間のごく一部の領域にのみ局所的に存在するというものである。CSP に対して、このような現象が存在することは確かであるが、その発生原理やメカニズムは完全に明らかになっていない。これを明らかにすることは、アルゴリズムの計算複雑さの理論および組合せ探索・組合せ最適化手法の今後の発展に大きく寄与することになると思われる。加えて、有用な問題解決パラダイムである制約充足パラダイムの実用化が促進されることも期待できる。CSP の相転移については、これまでその性質や発生原理に関する理論的な考察がなされてきている。

本研究の第二の目的は、これまで考察されてきた理論に基づき、CSP の相転移現象、つまり組合せの複雑さを持つインスタンスの構造的解析を行なうことである。また、上記の第一の目的で開発するメタヒューリスティクスの相転移領域のインスタンスへの適用可能性を明らかにする。

3. 研究の方法

上記の目的を達成するために、本研究で実施した研究項目は大きく以下の 4 つである。なかでも特に、(2)、(3)は上記であげた 2 つ

の目的それぞれを達成するための最重要項目である。

(1) 汎用問題解決ライブラリの開発と整備
(2) で開発する新たなメタヒューリスティクスを評価するために、既存の問題解決アルゴリズムのライブラリ化を行なった。

(2) 自己適応型のメタヒューリスティクスの開発と評価

新たなメタヒューリスティクスとして、候補 (すべての変数に何らかの値が割り当てられた状態) を生成する主体 (エージェント) を複数導入し、それらのエージェントが協調しながら並列的に問題解決を実行する方法を開発した。また、これらのエージェントを異なる制御パラメータを持つ複数の集団に割り振り、問題解決の途中で、集団間でのエージェントの入れ替えを行なうことにより、より問題や問題解決状況に適したパラメータを持つ集団が進化していくような適応処理を導入した。

(3) 解決するのに非常に計算手間のかかる具体的問題 (インスタンス) の組織的生成法の考案

CSP の相転移現象の構造的解析として、従来より行なわれてきた、ランダムに生成したインスタンスに対して相転移の発生原因を解析するというアプローチではなく、本研究は、相転移に属するような組合せの複雑さをもつインスタンスを組織的・意図的に生成することを通して明らかにするというアプローチである。具体的には、CSP の代表的な例題であるグラフ彩色問題を対象として、これまで報告されてきた発生原因を分類・整理して、インスタンスを難しくさせている性質・特徴をもった局所的構造を提案した。また、これらの構造を、その性質を保ったまま問題サイズを任意に大きくする方法の考案を行なった。

(4) 応用システムの開発

本研究課題の応用研究として、エージェントの相互作用 (協調) により、仮想空間内の都市の区画利用が自律的に変化していく方法を開発した。また、この方法を 3 次元 CG として仮想都市の建物配置が変化していくシステムへ実装・組込みを行なった。

4. 研究成果

ここでは、3. 研究の方法に記述したもののうち、本研究における最重要実施項目である、(2)、(3)を中心に本研究の成果を述べる。

(1) 自己適応型のメタヒューリスティクスの開発と評価の成果について

本研究で考案したメタヒューリスティクスを Ant Colony Optimization (ACO) と呼ばれるメタヒューリスティクスに導入を試みた。ACO は蟻の群れの採餌行動を模したものであり、様々な問題に対して比較的よい結果が得られているが、種々の制御パラメータの設定が困難であるという問題がある。また、蟻をエージェントとして問題解決を進めるため、本メタヒューリスティクスを適用しやすい。

ここで提案したアルゴリズムを図 1 に示す。図 1 における「集団の再編成（特に配分処理）」が本研究における独創的、かつ自己適応型のモデルになっている。

図 1 のアルゴリズムを実装し、難しい問題が集中している相転移領域の CSP をランダムに生成して、それらの問題群に対して実験を行なった結果を図 2、図 3 に示す。それぞれ図 2 は本研究で提案したアルゴリズムの、図 3 は従来手法の探索成功率（問題解決を実行した問題のうち解をみつけることができた割合）である。図 2、3 を比較すると、特に難しい問題が集中している領域において、本アルゴリズムが優れていることが分かる。この結果を含む本研究の成果により、提案したメタヒューリスティクスは、従来のものより制御パラメータの設定が容易になったこと、および高い問題解決性能を有している（特に相転移領域の難しい問題に対しても頑健であること）ことなど意義のある成果が得られた。

(2) 解決するのに非常に計算手間のかかる具体的問題（インスタンス）の組織的生成法の考案の成果について

我々の先行研究で考案していた組織的なインスタンス生成方法に対して、生成の種となる主構造のさらなる導出および、問題サイズを任意に大きくする方法の拡張を行なった。

具体的な成果としては、前者は、先行研究で提案していた構造（先行研究では 7 つの構造を導出）を、新たに 2,000 個以上導出することに成功した（図 4 はその一例）。これは、生成されるインスタンスの多様性を高めることができたという意味で大きな意義がある。また、後者は、グラフの連結度に注目して、先行研究の方法よりも高連結度を維持したままに問題サイズ（グラフサイズ）を任意に大きくする方法を提案した。図 5 にそのアルゴリズムを示す。これにより、より安定的なインスタンス生成方法を提案することができた。また、本生成方法によってグラフ彩色インスタンスを生成し、計算機実験を行なった結果を図 6 に示す。図 6 より、本生成方法によるインスタンスを解く計算量が問題サイズのほぼ指数オーダーであること（これは

```

begin
  Initialization (Generate initial groups);
  while maxRearrangeCycle reached do
    for j ∈ 1..nbGrps do
      Ant-Solver(maxcyclej, nbAntsj, αj, βj, ρj);
      Calculate Gj's evaluation value, eval(Gj);
    end for
    RearrangeGroups(); ← 集団の再編成処理
  end while
end
procedure RearrangeGroups()
  Calculate the average evaluation value;
  Divide the groups into two classes, GH and GL;
  for each G ∈ GL do
    Migrate the proper number of ants; ← 配分処理
  end for
end procedure

```

図 1 本研究で提案したアルゴリズム

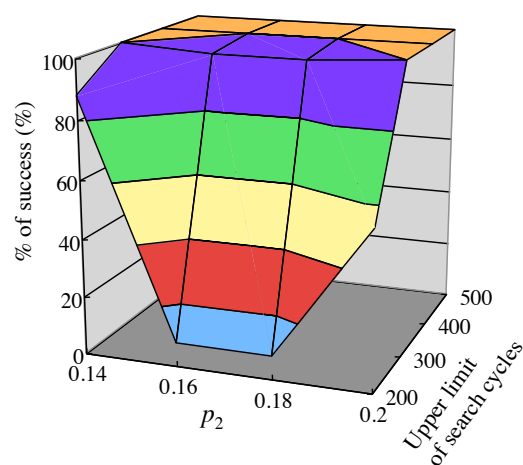


図 2 本アルゴリズムの探索成功率

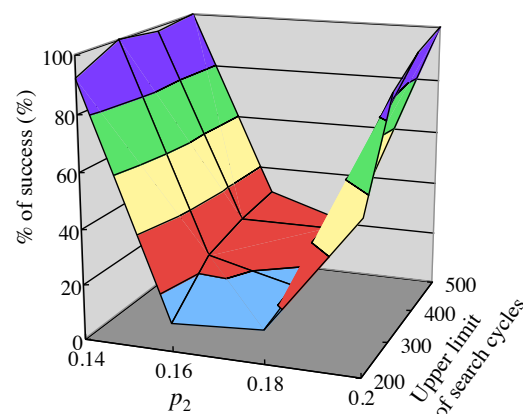


図 3 従来手法の探索成功率

ランダム生成したものよりも難しい）、およびそのような計算量をもつインスタンスが安定的に生成できていることが分かる。これにより意図的に難しい問題を生成することを通して、CSP の相転移現象に対する一考察が行なえたこと、種々の問題解決アルゴリズムに対しての性能評価用問題の提供が行なえるようになったという意味で、アル

ゴリズムの計算複雑さの理論および組合せ探索の発展に寄与できる成果があげられたといえる。

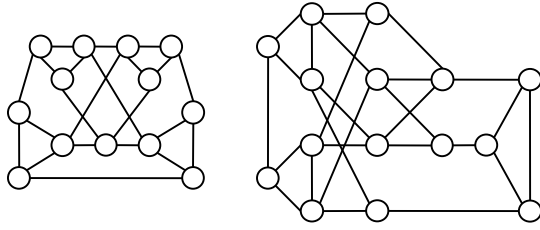


図4 本研究で導出した構造の一例

```

procedure graph-3con-generator(h)
begin
  input an initial graph,  $G_{init}$ ;
   $G := G_{init}$ ;
  for count := 1 to h do
    choose three vertices,  $i, j$  and  $k \in V(G)$ , where  $\deg(i)=3$ ,
    (each of which is an element of the same  $K_3$  in  $G$ );
    choose randomly  $MUG_{n-m-t}$ ;
    embed-3con-MUG( $n, m, t, i, j, k$ );
  end for
end procedure

```

```

procedure embed-3con-MUG( $n, m, t, i, j, k$ )
begin
  repeat
    choose randomly an edge  $(w, x) \in E(MUG_{n-m-t})$ 
    where  $\deg(w) \leq 3$ ;
    choose randomly an edge  $(w, y) \in E(MUG_{n-m-t})$ 
    where  $x \neq y$ ;
    choose randomly an edge  $(w, z) \in E(MUG_{n-m-t})$ 
    where  $y \neq z$ ;
  until  $\deg(y)+\deg(j) \leq 8$  and  $\deg(z)+\deg(k) \leq 8$ 
  remove edges  $(i, j), (j, k)$  and  $(i, k)$ ;
  remove edges  $(w, x), (w, y)$  and  $(w, z)$  and the vertex  $w$ ;
  merge  $x, y$  and  $z$  with  $i, j$  and  $k$ , respectively;
end procedure

```

図5 本研究で提案した生成アルゴリズム

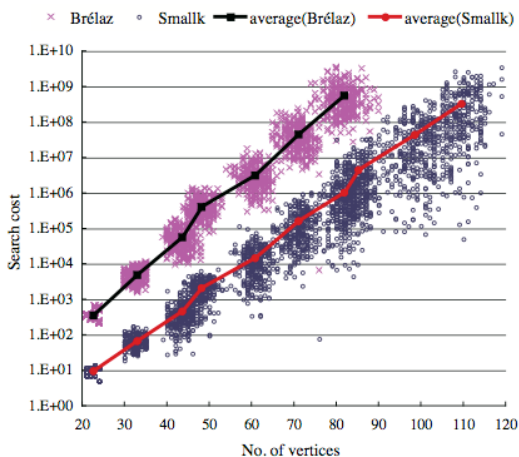


図6 本生成方法によるインスタンスを解く計算量

(3) 応用システムの成果について

3. 研究の方法で述べたようにエージェントの相互作用(協調)により、仮想空間内の都市の区画利用が自律的に変化していく方法を開発した。図7に実際の都市の道路データに本方法を適用した実行例を示す。また、

この方法を3次元CGとして仮想都市の建物配置が変化していく実行例を図8に示す。

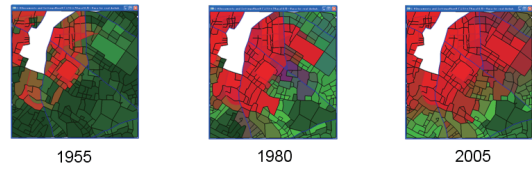


図7 区画利用変化の実行例

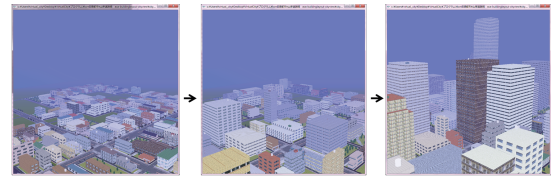


図8 仮想都市の3次元CGシステムの実行例

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23件)

- ① Toguchi, A., Wakiuchi, H., Sasaki, H., Sumiyoshi, T., Mizuno, K.: Development of a Foods Information Service System for Parent of a Childhood Cancer Patient, The 2012 Bangkok International Academic Conference, 2012, 査読あり.
- ② 古田尚之, 水野一徳 他3名: セルの相互作用による仮想都市の区画変化シミュレーション, 芸術科学会論文誌, Vol. 10, No. 4, pp. 241-250, 2011, 査読あり.
- ③ Mizuno, K., Hayakawa, D., Sasaki, H., and Nishihara, S.: Solving Constraint Satisfaction Problems by ACO with Cunning Ants, The 2011 International Conference on Technologies and Applications of Artificial Intelligence (TAAI2011), pp. 155-160, 2011, 査読あり.
- ④ Hayakawa D., Mizuno, K., Sasaki, H., and Nishihara, S.: Improving Search Efficiency Adopting Hill-Climbing to Ant Colony Optimization for Constraint Satisfaction Problems, The 3rd International Conference on Knowledge and Systems Engineering (KSE2011), pp. 200-204, 2011, 査読あり.
- ⑤ Hayakawa, D., Mizuno, K., Sasaki, H., and Nishihara, S.: On the Efficiency of Ant Colony Optimization with Cunning Ants for Binary Constraint

- Satisfaction Problems, The 8th International Conference on Cybernetics and Information Technologies, Systems and Applications (CITSA 2011), 2011, 査読あり.
- ⑥ 古田尚之, 水野一徳, 西原清一, 福井幸男, 佐々木整: 仮想都市における建物の建築過程形状の自動生成, NICOGRAPH Spring Festival in TAF 予稿集, CD-ROM, 2011, 査読あり.
- ⑦ Mizuno, K., Nagasawa, Y., Sasaki, H., and Nishihara, S.: Ant Population Meta-Heuristics for Binary Constraint Satisfaction Problems, The 2010 Conference on Technologies and Applications of Artificial Intelligence (TAAI2010), pp. 314-321, 2010. 査読あり.
- ⑧ 水野一徳: 知的仮想空間設計とボトムアップ型のシミュレーション, 日本デザイン学会誌 (デザイン学特集号), 特集「シミュレーションとプロトタイプ」, Vol. 17, No. 3, pp. 14-17, 2010, 査読なし.
- ⑨ Nagasawa, Y., Mizuno, K., Sasaki, H., and Nishihara, S.: Constructive Generation of 3-COL Instances Focusing on Vertex Connectivity of Minimal Unsolvable Structures, The 2nd International Conference on Knowledge and Systems Engineering (KSE2010), pp. 113-118, 2010, 査読あり.
- ⑩ Mizuno, K., Nishihara, S., Fukui, Y., and Sasaki, H.: Land-Use Change Simulation by Cellular Automata to Generate Time-Varying Virtual Cities, NICOGRAPH International 2010, CD-ROM, 2010, 査読あり.
- ⑪ 古田尚之, 水野一徳, 他 4 名: セルの相互作用による仮想都市の区画変化シミュレーション, 第 26 回 NICOGRAPH 論文コンテスト 2010, 査読あり.
- ⑫ Sang, B., Mizuno, K., 他 2 名: Introducing Recognition Ratios for Urban Traffic Flow Simulation in Virtual Cities, The 8th ACM SIGGRAPH International Conference on Virtual Reality Continuum and its Applications in Industry (VRCAI2009), pp. 267-270, 2009, 査読あり.
- ⑬ Nagasawa, Y., Mizuno, K., Sasaki, H., Miki, Y., Nishihara, S.: Constructive Generation of 3COL Instances by Embedding Minimal Unsolvable Structures, The 1st International Conference on Knowledge and Systems Engineering (KSE2009), pp. 100-105, 2009, 査読あり.
- ⑭ Ono S., Miyamoto, R., Nakayama, S., and Mizuno, K.: Difficulty Estimation of Number Place Puzzle and Its Problem Generation Support, ICCAS-SICE International Joint Conference 2009, 2009, 査読あり.
- ⑮ Mizuno, K., 他 4 名: Urban Traffic Flow Simulation with Traffic Accidents in Virtual City Spaces, NICOGRAPH International 2009, CD-ROM, 2009, 査読あり.
- [学会発表] (計 30 件)
- ① 浅見友彦, 水野一徳, 早川大貴: 携帯端末を利用した視覚障害者用ナビゲーションシステムの開発, 情報処理学会第 74 回全国大会, 3ZD-7, 名古屋工業大学, 2012 年 3 月 6~8 日.
- ② 水野一徳, 西原清一, 佐々木整: グラフ彩色問題の組織的生成のための GA による極小非可解構造の導出, 進化計算シンポジウム 2011, S2-10, pp. 140-145, モンタナリゾート岩沼, 2011 年 12 月 17 日~18 日.
- ③ 水野一徳, 早川大貴, 佐々木整, 西原清一: グラフ彩色インスタンス生成のための GA に基づく極小非可解構造の導出, 第 10 回情報科学技術フォーラム (FIT2011), 1H-1, 函館大学, 2011 年 9 月 7~9 日.
- ④ 早川大貴, 水野一徳, 他 4 名: 部分的形質遺伝に基づく ACO による制約充足問題の解法, 人工知能学会第 25 回全国大会, 2I2-2, アイーナいわて県民情報交流センター, 2011 年 6 月 1~3 日.
- ⑤ 早川大貴, 水野一徳, 他 4 名: 制約充足型 ACO における部分的形質遺伝に基づく解候補育成, 進化計算シンポジウム 2010, 3-05, pp. 221-226, レイクサイドホテル久山, 2010 年 12 月 18~19 日.
- ⑥ 早川大貴, 水野一徳, 他 4 名: 制約充足問題のためのランク付け機能を有する ACO の局所探索による解候補育成, 第 9 回情報科学技術フォーラム (FIT2010), F-023, 九州大学, 2010 年 9 月 7~9 日.
- ⑦ 水野一徳, 西原清一, 今佐和子, 福井幸男: 仮想都市生成のためのセルオートマトンによる土地利用変化シミュレーション, 第 4 回進化計算フロンティア研究会 (SIG-ECF), pp. 42-45, 人工知能学会, 東京工業大学, 2010 年 6 月 4~5 日.
- ⑧ 水野一徳, 長澤圭孝, 仲健次, 佐々木整, 西原清一: 極小非可解構造に基づく連結度を考慮した 3COL インスタンスの組織的生成, 第 77 回人工知能基本問題研究会 (SIG-FPAI), 人工知能学会, pp.

- 67-72, 北海道大学, 2010年3月17~18日.
- ⑨ 水野一徳, 小野 智司, 西原 清一, 佐々木整: 制約充足型 Ant System における局所探索による解候補育成の効果, 進化計算シンポジウム 2009, 3-05, 沖縄かんばんの宿那覇レクセンター, 2009年12月19~20日.
 - ⑩ 水野一徳: 計算機によるボトムアップ型シミュレーション ~仮想都市空間の知的設計とシミュレーション~, 日本デザイン学会平成21年度秋季企画大会(招待講演), 2009年11月15日.
 - ⑪ 仲健次, 長澤圭孝, 水野一徳, 西原清一: 点連結度に注目した難しい 3COL インスタンスの組織的生成, 第75回人工知能基本問題研究会 (SIG-FPAI), 人工知能学会, pp. 83-88, 電気通信大学, 2009年11月13~14日.
 - ⑫ 水野一徳, 小野智司, 西原清一: 多集団型 Ant System による制約充足問題の解法, 第2回進化計算フロンティア研究会 (SIG-ECF), pp. 35-40, 人工知能学会, 東京大学, 2009年10月2~3日.
 - ⑬ 長澤圭孝, 水野一徳, 西原清一: 極小非可解構造の埋め込みによる難しい 3 COL インスタンスの組織的生成, 第74回人工知能基本問題研究会 (SIG-FPAI), 人工知能学会, pp. 51-56, 広島市立大学, 2009年9月14~15日.

[図書] (計1件)

- ① 岡田正, 駒谷昇一, 西原清一, 水野一徳: 情報ネットワーク, オーム社, 第3章, 2010.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

水野 一徳 (MIZUNO KAZUNORI)
拓殖大学・工学部・准教授
研究者番号: 20439524