

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6月6日現在

機関番号：35302

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21500229

研究課題名（和文） 組合せ最適化問題に対する高性能 Memetic アルゴリズムの開発

研究課題名（英文） Developments of High Performance Memetic Algorithms
for Combinatorial Optimization Problems

研究代表者

片山 謙吾（KATAYAMA KENGO）

岡山理科大学・工学部・准教授

研究者番号：80309541

研究成果の概要（和文）：

組合せ最適化問題に対する高性能な Memetic アルゴリズムをはじめとするメタ戦略の開発を行った。対象問題として、最大クリーク問題(MCP)、2次割当問題(QAP)、通信・ネットワーク関連の問題であるノード配置問題(NPP)を扱った。特に QAP に対しては、可変深度探索にもとづく k-opt 局所探索法を遺伝的反復局所探索法の枠組みに導入したメタ戦略を示した。実験の結果、従来法の反復局所探索法に比べ平均的に良好な解を算出し、その有効性を示した。

研究成果の概要（英文）：

In our research, we developed high-performance metaheuristic algorithms called memetic algorithms for combinatorial optimization problems. As combinatorial optimization problems, we deal with the Maximum Clique Problem (MCP), Quadratic Assignment Problem (QAP), and Node Placement Problem (NPP), which are known to be NP-hard. Particularly, for the QAP, we show an effective metaheuristic algorithm called genetic iterated local search (GILS) incorporating k-opt local search based on the idea of variable depth search. Computational results showed that the GILS with KLS obtained good results on average in comparison to standard iterated local search metaheuristic algorithms for the QAP.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・感性情報学，ソフトコンピューティング

キーワード：組合せ最適化，メタ戦略，進化計算，局所探索，最大クリーク問題，ノード配置問題，2次割当問題

1. 研究開始当初の背景

組合せ最適化問題に対する Memetic アルゴリズムなどのメタ戦略アプローチは局所探索が基本となる。よって、局所探索法の性能を高めることは、そのメタ戦略アルゴリズムの探索性能を高めることに相当する。また、より洗練化された、局所最適解からの脱出法との組合せによって、さらに高性能なメタ戦略の設計が可能と考えられるだけでなく、対象問題の地形解析を通して、より適切なメタ戦略の設計を可能とすることがこれまでの我々の研究を通じて明らかになりつつある。このような観点から、より大きな近傍を効率的に探索可能とする可変深度探索にもとづく局所探索法、および対象問題に対して有効に働く局所最適解からの脱出方法の設計、加えて地形解析を通じたメタ戦略の基本設計を軸として、高性能なメタ戦略アルゴリズムの開発を目指した。

2. 研究の目的

上記の背景をもとに、組合せ最適化問題の代表例である 2 次割当問題 (QAP)、最大クリーク問題 (MCP)、ノード配置問題 (NPP) 等に対して、Memetic アルゴリズムをはじめとする、より高性能なメタ戦略の開発を試みた。以下では、主要な結果を得た QAP に対するメタ戦略アルゴリズムを中心に記述する。

3. 研究の方法

代表的な組合せ最適化問題の一つである 2 次割当問題 (QAP) に対する遺伝的反復局所探索法 (genetic iterated local search, GILS) を提案する。この GILS では、可変震度探索 (variable depth search, VDS) のアイデアにもとづく k-opt 局所探索法 (k-opt local search, KLS) を導入する。また、QAP の探索空間内の地形を KLS により算出された局所解を用いて解析した上で、その結果にもとづき、GILS を設計する。なお、KLS を導入した GILS を GIKLS、従来の 2-opt 局所探索法を導入した GILS を GI2LS と記す。

提案法 GIKLS の探索性能を評価するために、QAP のベンチマーク問題例集である QAPLIB から代表的な 16 例題を対象にして、QAP に対する最先端の反復局所探索法 (ILS) などの解法との比較実験を行った。

4. 研究成果

(1) 地形解析結果

GILS において探索対象とする解は主に局所解である。よって、探索空間における局所解の分布の形状 (地形) を考慮することは、GILS のようなメタ戦略を設計する上で重要と考えられる。

ある対象問題の探索空間内の形状 (地形) が真の最適解に向かって一つの大きな谷となるような構造は、一般に、大谷構造 (big valley structure) と呼ばれている。対象問題が大谷構造のような構造化された空間を持つならば、探索の集中化と多様化の相反する探索戦略をバランス良く有するメタ戦略によって最適解への接近が可能と考えられている。その観点から、組合せ最適化問題に対するメタ戦略の解法の多くでは、探索空間内の形状が大谷構造の仮定のもとで、アルゴリズムの設計がなされている場合が多い。しかしながら、我々の先行研究で行った最大クリーク問題 (MCP) の多くの問題例においては、局所探索法によって導かれる局所解群は、多くの場合、真の最適解との間に相関がないことを明らかにした。これは、局所解群が真の最適解に向かって分布する、いわゆる大谷構造とは異なる探索空間上の構造を示唆しており、このような探索空間内を最適解に向けて探索することは容易ではないことを確認した。

このたびの QAP に対する KLS にもとづく地形解析の結果、MCP と同様に探索空間が構造化されていない問題例が非常に多いことを確認している。最適解と局所解群との相関係数および局所解同士の相関係数の双方で強い正の相関を示した問題例は、検討した 16 例題のうちで約 5 例題のみであり、残りは、相関を示していない。加えて、最適解と局所解の距離および局所解同士の距離も、互いに離れており、解同士の関係があまりないことを確認している。したがって、QAP に対して GILS 等のメタ戦略を設計する上では、構造化された探索空間に有利となる操作や探索を取り入れるだけでなく、探索の多様性も十分に考慮する必要があると考えられる。

(2) 提案法 GILS

従来の反復局所探索法 (ILS) は、局所探索法 (LS) により得た一つの近似解に対して、突然変異 (または Kick とよぶ) を適用することで、局所解からの脱出を行い、再び LS を適用する処理を反復する。一方、遺伝的反復局所探索法 (GILS) は、従来の ILS のように一つの解ではなく、二つの解に含まれる情報を利用して局所解からの脱出を図る ILS である。よって GILS は、巡回セールスマン問題のように、大谷構造を有するような構造化された探索空間の問題に対して特に有効と考えられる。

一方、本研究で対象とする QAP (QAPLIB) の問題例の多くは、TSP の場合とは異なり、探索空間が構造化されていない場合が多い。こ

これは、他の研究者により行われた 2-opt 局所探索法にもとづく地形解析及び上述の KLS による解析の結果からも明らかである。そのような場合に有用とされる対応方法の一つは、突然変異などの操作を多用し、探索の多様性に配慮することである。このような観点から、QAP に対する GILS の設計方針として、LS によって得られた、二つの局所解に対して、交叉または Kick を探索の状況に応じて適応的に選択・適用し、局所解から脱出した解に移動する。その後、再び LS を適用する一連の処理を反復するが、探索の多様性をさらに維持するために、Restart 処理として通常の Kick よりもさらに大きな変異を解に与える。

これまで、我々は最大クリーク問題、ノード配置問題、バイナリー 2 次計画問題等に対して可変深度探索 (VDS) のアイデアにもとづく k-opt 局所探索法 (KLS) を示し、反復局所探索法などのメタ戦略に導入することで、極めて高品質な解の算出が可能であることを明らかにしている。したがって、GILS の局所探索過程の方法として、VDS にもとづく KLS を導入する。これは、比較的大きな近傍を効率的に探索する近傍探索であり、QAP に対して効率的に良好な結果を算出可能である。なお、これまでの QAP に対するメタ戦略では主に 2-opt 局所探索法が利用されており、QAP に対して VDS ベースの KLS を利用した高性能なメタ戦略の提案は、我々の知る限りでは初めての試みである。

交叉の方法として、本 GILS では周期交叉 (Cycle Crossover, CX) を採用する。CX は遺伝オペレータを用いる QAP 解法の多くで利用され、その有効性が報告されている。

突然変異 (Kick) の方法として、地形解析の結果にもとづき、局所解に与える変化の大きさ kick_size を問題サイズ n の 40% から 60% の範囲でランダムに決定する。次いで、kick_size 回の 2-opt 近傍解への移動処理をランダムに繰り返すことで、局所解から脱出した解を得る。

Restart 処理では、探索の停滞が生じた場合に、GILS で得られていた暫定的な最良解に対して、Kick で与える変化よりもさらに大きな変化を与える。これにより、現在の探索空間から離れた空間へ探索を移動させ、探索の多様性を維持する。Restart で解に与える変化は、地形解析及び予備実験の結果から、問題サイズ $n \times 80\%$ とし、その適用条件を暫定的な最良解が $n \times 3$ 回の繰り返して更新されなかった場合とする。

本 GILS では探索の効率化のために、探索の

状況に応じて交叉または Kick を適応的に決定する。これを実現するために次の処理を施す。まず、交叉と Kick の各オペレータ選択確率の和を 1 とし、それぞれの初期値を 0.5 とする。GILS における暫定最良解の更新に貢献する毎に貢献したオペレータの選択確率を 0.02 ずつ増加させる。なお、予備実験の結果から、各選択確率のそれぞれの最大値を 0.7、最小値を 0.3 とする。また、Restart 処理を行った場合は双方の選択確率をそれぞれ交換する。これは、Kick の貢献が探索序盤で高く、中盤から終盤は交叉の貢献が高いという、予備実験で得られた観測結果に寄与するものである。

(3) 実験結果

QAP に対する提案法 GILS (GIKLS) の探索性能を評価するために実験を行った。比較解法として、従来の 2-opt LS を有した ILS (I2LS)、I2LS の LS 処理を KLS にした ILS (IKLS)、2-opt LS を有した GILS (GI2LS) である。対象問題例は QAP のベンチマーク問題例集である QAPLIB より、代表的な 16 例題 (問題サイズ $n = 19 \sim 256$) を選択した。各アルゴリズムは、C によってコード化し、コンパイラは最適化オプション -O3 を付加した gcc (Ver. 4.1.1) である。すべての計算は、HP workstation xw4300 (CPU: Pentium4 3.4GHz, RAM: 4GB) 上で実行した。

以下に、ベンチマーク問題例の各 16 例題に対して、提案法 GIKLS と各比較解法との比較のもとで良好な (若しくは等しい) 結果となった例題数を示す。なお、Best は最良解、Avg は解評価値の平均値での双方の比較の結果を与えており、数字の大きい方が良好な結果となる。

■ GI2LS との比較結果

GIKLS		GI2LS	
Best	Avg	Best	Avg
16	13	8	8

■ IKLS との比較結果

GIKLS		IKLS	
Best	Avg	Best	Avg
14	15	12	6

■ I2LS との比較結果

GIKLS		I2LS	
Best	Avg	Best	Avg
16	13	9	6

上記の結果は、各アルゴリズムの試行回数を各問題例に対して 30 回としており、処理時間は全ての解法で同じ処理時間を設定することで公平な実験を行っている。以上の結果より、提案法 GIKLS は、他の解法に比べ、Best および Avg で良好な結果を算出していることがわかる

以下に、16 例題に対する Best 及び Avg の結果それぞれの平均値（解の質%）を示す。

■16 例題に対する GIKLS の平均結果

Best	Avg
0.14%	0.29%

■16 例題に対する GI2LS の平均結果

Best	Avg
0.23%	0.36%

■16 例題に対する IKLS の平均結果

Best	Avg
0.19%	0.39%

■16 例題に対する I2LS の平均結果

Best	Avg
0.25%	0.47%

この結果から、提案法 GIKLS は、平均的に優れた解を算出可能であり、その有効性をうかがうことができる。

提案法は、探索の多様性を維持する観点から、Restart 処理を導入している。その有効性を確認するために、Restart 処理を削除した GIKLS の計算実験を行った。上に示したように、Restart 有りの GIKLS の平均的な結果は Best: 0.14%, Avg: 0.29%であったのに対して、Restart 無しの結果は Best: 0.21%, Avg: 0.39%となったことから、Restart 処理の有効性を確認した。これは、QAP の多くの問題例で探索空間が構造化されないという地形解析の結果からも支持される結果と考えられる。

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)

①K. Katayama, A. Kohmura, K. Kohmoto, and H. Minamihara, Memetic Algorithm with Strategic Controller for the Maximum Clique Problem, Proc. of the 26th Annual ACM Symposium on Applied Computing (SAC-2011), vol. 2, pp. 1062--1069, 2011.

査読有

DOI:10.1145/1982185.1982419

②幸村明典, 片山謙吾, 南原英生, 最大クリーク問題に対する反復 k-opt 局所探索法の Kick 法におけるタイブレーク時の頂点選択方式の検討, 岡山理科大学紀要, 第 46 号 A, pp. 39--48, 2010. 査読無

<http://ci.nii.ac.jp/naid/110008658891>

③幸村明典, 片山謙吾, 南原英生, 成久洋之, 最大クリーク問題に対する反復 k-opt 局所探索法の Kick 法の性能比較, 岡山理科大学紀要, 第 45 号 A, pp. 53--62, 2009. 査読無

<http://ci.nii.ac.jp/naid/110007570706>

④北田雅享, 片山謙吾, 南原英生, 成久洋之, 2 次割当問題に対する反復 k-opt 局所探索法の Kick 法の検討, 岡山理科大学紀要, 第 45 号 A, pp. 63--70, 2009. 査読無

<http://ci.nii.ac.jp/naid/110007570707>

[学会発表] (計 13 件)

①渡邊好幸, 片山謙吾, 南原英生, 最大クリーク問題に対する局所探索法の頂点選択方式に関する基礎検討, 平成 23 年度電気・情報関連学会中国支部第 62 回連合大会講演論文集, p.157, 広島, Oct. 22, 2011.

②大倉慶一, 片山謙吾, 南原英生, 西原典孝, ノード配置問題に対する突然変異の検討, 平成 23 年度電気・情報関連学会中国支部第 62 回連合大会講演論文集, p.158, 広島, Oct. 22, 2011.

③大倉慶一, 片山謙吾, 南原英生, 西原典孝, ノード配置問題に対するアント最適化法, 第 10 回情報科学技術フォーラム (FIT2011)講演論文集, 函館大学, Sep. 7--9, A-025, 2011.

④幸村明典, 片山謙吾, 南原英生, 戦略的制御法による複数オペレータの適応的選択, 進化計算シンポジウム 2010 講演論文集, 福岡, pp. 123--130, Dec. 18--19, 2010.

⑤大倉慶一, 片山謙吾, 船曳信生, 南原英生, 西原典孝, ノード配置問題に対するアント最適化法, 電子情報通信学会技術研究報告, NS2010-134, pp. 173--178, 岡山大, Dec. 16--17, 2010.

⑥大倉慶一, 片山謙吾, 南原英生, 西原典孝, ノード配置問題に対する最良解集団を用いたアント最適化法, 平成 22 年度電気・

情報関連学会中国支部第 61 回連合大会講演論文集, p.458, 岡山, Oct. 23, 2010.

⑦幸村明典, 片山謙吾, 南原英生, メタ戦略に対する戦略的制御法, 平成 22 年度電気・情報関連学会中国支部第 61 回連合大会講演論文集, p.459, 岡山, Oct. 23, 2010.

⑧北田雅享, 片山謙吾, 南原英生, 成久洋之, 2 次割当問題に対する遺伝的反復局所探索法の検討, 第 3 回進化計算フロンティア研究会資料集, 岡山, pp. 81--89, Mar. 5--6, 2010.

⑨幸村明典, 片山謙吾, 南原英生, 成久洋之, 最大クリーク問題に対する戦略的反復局所探索法, 進化計算研究会 進化計算シンポジウム 2009 講演論文集, 沖縄, pp. 198--205, Dec. 19--20, 2009.

⑩北田雅享, 片山謙吾, 南原英生, 成久洋之, 2 次割当問題に対する遺伝的反復局所探索法, 進化計算研究会 進化計算シンポジウム 2009 講演論文集, 沖縄, pp. 206--210, Dec. 19--20, 2009.

⑪北田雅享, 片山謙吾, 南原英生, 成久洋之, 2 次割当問題に対する k-opt 局所探索法の有効性, 平成 21 年度電気・情報関連学会中国支部第 60 回連合大会講演論文集, p.529, 広島, Oct. 17, 2009.

⑫幸村明典, 片山謙吾, 南原英生, 成久洋之, 最大クリーク問題に対する反復局所探索法の局所解脱出法の検討, 平成 21 年度電気・情報関連学会中国支部第 60 回連合大会講演論文集, p.530, 広島, Oct. 17, 2009.

⑬大倉慶一, 北田雅享, 片山謙吾, 南原英生, 成久洋之, 双方向マンハッタンストリートネットワークにおけるノード配置問題に対するアント最適化法の検討, 平成 21 年度電気・情報関連学会中国支部第 60 回連合大会講演論文集, p.535, 広島, Oct. 17, 2009.

[図書] (計 1 件)

①片山謙吾, メメティックアルゴリズム, 進化技術ハンドブック 第 I 巻 基礎編, 電気学会 進化技術応用調査専門委員会 編, 近代科学社, vol. I, pp. 183--185, 2010.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

片山 謙吾 (KATAYAMA KENGO)

岡山理科大学・工学部・准教授

研究者番号: 80309541