

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 3 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2013

課題番号：22700231

研究課題名(和文) 組合せ最適化問題に対する新しいメタ戦略の枠組み・逐次制約充足法の開発

研究課題名(英文) The development of iterative constraint satisfaction problem solving methods for combinatorial optimization problems

研究代表者

永田 裕一 (Nagata, Yuichi)

東京工業大学・情報生命博士教育院・特任准教授

研究者番号：70334795

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円、(間接経費) 870,000円

研究成果の概要(和文)：逐次制約充足法と名付けた新しいメタ戦略の枠組みを開発し、スケジューリングに関する代表的問題であるジョブショップスケジューリング問題に対する世界最高レベルの近似解法を構築し、主要ベンチマークの幾つかの問題でベストレコードを更新した。逐次制約充足法は局基本とするが、現在の解候補の評価値を改善する上でボトルネックとなっている箇所を列挙し、これまでにあまり解消したことのない箇所のボトルネックを優先的に解消することで効率的な探索を行う。GESの枠組みはさまざまな組合せ最適化問題へ適用することができ、車両配送問題や時間割作成問題の最適化においても非常に良い結果を得た。

研究成果の概要(英文)：In this research, I have developed a new local search-based search framework called guided ejection search (GES) and constructed a very powerful solution method for the job shop scheduling problem, which is one of the most studied scheduling problems in the OR community. The framework of GES is based on local search but has the following features; it efficiently enumerates bottlenecks of the current best solution in improving the quality and preferably resolves one that is not resolved recently. The basic idea of GES can be straightforwardly applied to other combinatorial optimization problems, and I have developed very powerful solution methods for the vehicle routing problem and timetabling problem.

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：メタ戦略

1. 研究開始当初の背景

メタ戦略とは現実的な計算時間内で最適解を求めることが困難な最適化問題(特に組合せ最適化問題)に対して、探索的な手法に基づいて短時間で高精度の近似解を求める近似最適化法の枠組みの総称である。例えば、シミュレーテッド・アニーリング、タブ探索、遺伝的アルゴリズムなどが代表的な枠組みとして知られる。現代社会においては解くべき問題の規模は益々拡大しており、メタ戦略を用いた近似最適化法の重要性も高まっている。

申請者は困難な組合せ最適化問題として知られる Vehicle routing problem with time windows (VRPTW) に対する非常に強力な車両数最小化ヒューリスティクスを考案した。VRPTW は物流最適化における代表的なベンチマーク問題で多くの近似解法が提案されているが、考案した方法は単純なアイデアで従来手法の全てを凌駕する探索性能を実現した。このアイデアをさまざまな組合せ最適化問題に適用可能であると考えられるが、どれだけ良い結果が得られるかは良く分かっていなかった。

以下に逐次制約充足法の基本的な枠組みを概説する。一般に組合せ最適化問題における解候補は解を構成する離散的な要素の順列(それに類似の構造)として表現されるが、いくつかの要素を抜出した(無視した)解を不完全解と呼ぶことにする。逐次制約充足法は貪欲アルゴリズムに類似した局所探索法であるが、現在の最良解 x^* の評価値を $F(x^*)$ (最小化問題)として、これを改善する解を発見するために不完全解を探索する。この探索では不完全解 x の仮想的な評価値(抜き出されている解要素を x に挿入して得られる解の評価値の下界)を $F(x)$ として、制約 $F(x) < F(x^*)$ の下で (F が整数なら制約を $F(x) \leq F(x^*) - 1$ としても同じ) 解遷移を繰り返す。解遷移は抜出されている解要素1つの挿入と、解要素の抜出し(挿入後に制約を充足できない場合にのみ、制約を充足させるように解要素を1~3個程度抜出す)で定義される。解遷移を繰り返すことで抜出されている解要素の数は増減するが、1つの解要素も抜出されていることなく制約 $F(x) < F(x^*)$ が充足された場合、 x^* を改善する解が得られる。そして x^* が更新され、新しい x^* に対して同様の手続きを繰り返すことで $F(x^*)$ が徐々に減少して最終的な近似解を得る。

2. 研究の目的

上述の VRPTW に対する車両数最小化ヒューリスティック解法のアイデアを整理して、多くの組合せ最適化問題へ適用可能な一般的な枠組み(これを逐次制約充足法と呼ぶ)に整備する。逐次制約充足法の考え方をさまざまな代表的組合せ最適化問題に対して適用し、それぞれの問題で既存手法の全てを超える近似解法を構成することでその有

効性を示す。これらの過程を通じて逐次制約充足法の洗練化と一般化を行い、新しいメタ戦略の枠組みとして整備する。逐次制約充足法を用いて広範囲の問題で優れた近似解法を構成するための基礎的技法を確立する。また、逐次制約充足法が有効に機能する組合せ最適化問題のクラスも明らかにする。

3. 研究の方法

逐次制約充足法の長所を活かした近似解法が構成できると予想される代表的組合せ最適化問題を5~6個程度選択し、これらの問題に対して本手法に基づく近似解法を開発する。特に、逐次制約充足法の核となる3つの設計項目のそれぞれについて、対象問題ごとに適切な方式を開発する。さらに、逐次制約充足法の基本的アイデアを拡張するいくつかの方式を開発する。研究のまとめとして、それらの組合せ最適化問題に対して開発した近似解法を3つの設計項目と拡張方法の観点で整理し、逐次制約充足法の一般的な枠組みとして整備する。

4. 研究成果

(1) 逐次制約充足法の考え方をを用いてスケジューリングに関する代表的問題であるジョブショップスケジューリング問題に対する世界最高レベルの近似解法を構築し、主要ベンチマークの幾つかの問題でベストレコードを更新した。逐次制約充足法は局基本とするが、現在の解候補の評価値を改善する上でボトルネックとなっている箇所を列挙し、これまでにあまり解消したことのない箇所のボトルネックを優先的に解消(それにより新たなボトルネックが発生する場合もある)することで効率的な探索を行う。ボトルネック箇所の列挙はある種の列挙問題となるが、動的計画法を用いた高速列挙アルゴリズムを考案したことも研究成果の一つである。

(2) 逐次制約充足法の考え方をを用いて Pickup and delivery problem with time window (PDPTW) と呼ばれる車両配送問題に対して車両数を最小化するための近似解法を構築し、主要ベンチマークの幾つかの問題でベストレコードを更新した。この研究においても、上述のボトルネックの列挙を効率的に行うアルゴリズムを考案した。

(3) 逐次制約充足法の考え方を(部分的に)用いて Timetabling problem (大学の時間割作成問題) に対して非常に優れた探索性能を持つ近似解法を考案した。主要ベンチマーク問題の全てで、ベストレコードを更新した。提案手法は計算時間と計算精度の両面で、これまでにこの問題に対して考案されていたあらゆる手法を圧倒する探索性能を実現した。

(4) PDPTW の対し走行距離を最小化するため

の近似解法を Memetic algorithm (MA) を用いて構築した。PDPTW は実行可能解に課される制約が比較的厳しい問題であるが、このような問題に対して効果的な交叉(MA のオペレータ)を設計することは一般に困難である。本研究ではそのような問題に対して効果的な交叉法を構築する手段として、交叉の手続きに簡単な局所探索を導入し、制約を考慮しながらうまく親の部分解を組合せて子個体を生成する方法を提案した。この交叉法を用いて MA を構成して実験を行った結果、PDPTW のベンチマークのほとんどの問題で既知最良解を更新した。

また、同様の考え方に基づいて巡回セールスマン問題(TSP)に対して申請者が先に考案した交叉方法 EAX を改良し、EAX を用いた遺伝的アルゴリズム(GA)の探索性能を改善した。この結果、数万~10万都市規模のTSPで既知最良解を更新する非常に強力な近似解法を構成できた。本研究で対案したGAはTSPの近似解法としては世界で最も優れた解法の一つとして紹介されている。例えば、Mona-Lisa TSP と呼ばれる10万都市問題は非常に有名なベンチマーク問題の一つであるが、本研究で提案したGAで現在の既知最良解を発見している。

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 2件)

Y. Nagata and S. Kobayashi: A Powerful Genetic Algorithm using Edge Assembling Crossover for the Traveling Salesman Problem, *Inform Journal on Computing*, 査読有, vol. 25, no.2, pp. 346-363, 2013.

Y. Nagata and D. Soler: A new genetic algorithm for the asymmetric traveling salesman problem, *Expert Systems with Applications*, 査読有, vol. 39, no. 10, pp. 8947-8953, 2012.

[学会発表](計 11件)

Y. Nagata and I. Ono: Random Partial Neighborhood Search for University Course Timetabling Problem, Proceedings of the 13th International Conference on Parallel Problem Solving from Nature (PPSN 2014), accepted, Ljubljana, Slovenia, 2014/9/ (発表予定)。

Y. Nagata and I. Ono: An Enhancement of Edge Assembly Crossover for the Capacitated Vehicle Routing Problem, Proceedings of the 10th Metaheuristics International Conference

(MIC 2013), pp. 243-245, Singapore, 2013/8/7.

K. Honda, Y. Nagata and I. Ono: A Parallel Genetic Algorithm with Edge Assembly Crossover for 100,000-City Scale TSPs, Proceedings of the 2013 Congress on Evolutionary Computation (CEC 2013), pp. 1278-1285, Cancun, Mexico, 2013/6/21.

Y. Nagata and I. Ono: High-Order Sequence Entropies for Measuring Population Diversity in the Traveling Salesman Problem, Proceedings of the 13th European Conference on Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization (EvoCOP 2013), LNCS 7832, pp. 179-190, Vienna, Austria, 2013/4/5.

本田和麻, 永田裕一, 小野功: 10万都市規模TSPのための交叉EAXに基づく並列GAモデルの提案, 進化計算学会 進化計算シンポジウム2012, 軽井沢, 2012/12/16。

永田裕一, 小野功: 高次の依存関係を考慮したエントロピーによる遺伝的アルゴリズムの多様性維持, 進化計算学会 進化計算シンポジウム2012, 軽井沢, 2012/12/15。

永田裕一: Guided ejection search の提案とジョブショップスケジューリング問題への適用, 電気学会 電子情報システム部門大会, 富山大学, 2011/9/8。

Y. Nagata, I. Ono and S. Kobayashi: Memetic Algorithm using Selective Route Exchange Crossover for the Capacitated Vehicle Routing Problem, Proceedings of the 9th Metaheuristics International Conference (MIC 2011), pp. 329-338, Udine, Italy, 2011/7/26.

Y. Nagata and S. Kobayashi: A Memetic Algorithm for the Pickup and Delivery Problem with Time Windows using Route Exchange Crossover, Proceedings of the 11th International Conference on Parallel Problem Solving from Nature (PPSN 2010), LNCS 6238, pp. 536-545, Kraków, Poland, 2010/9/15.

永田裕一, 小林重信: 選択的なルート交換交叉法を用いた Memetic Algorithm の Pickup and Delivery Problem with Time Windows への適用, 人工知能学会 第4回進化計算フロンティア研究会, 東京工業大学, 2010/6/4。

Y. Nagata and S. Kobayashi: Guided Ejection Search for the Pickup and Delivery Problem with Time Windows, Proceedings of the 10th European Conference on Evolutionary Computa-

tion in Combinatorial Optimization
(EvoCOP 2010), LNCS 6022, pp. 202-213,
Istanbul, Turkey, 2010/4/7.

〔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〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

永田 裕一 (NAGATA, Yuichi)

東京工業大学・情報生命博士教育院・特任准
教授

研究者番号：70334795