

令和 2 年 6 月 4 日現在

機関番号：12201

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K00333

研究課題名（和文）超巨大解空間を構成する組合せ最適化問題に対する革新的アルゴリズムの開発とその応用

研究課題名（英文）Development of an Innovative Algorithm for Huge Scale Combinatorial Optimization Problems and Its Application

研究代表者

外山 史 (Toyama, Fubito)

宇都宮大学・工学部・准教授

研究者番号：60323317

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、従来の研究で取り扱うことができなかった超巨大解空間を構成する超大規模組合せ最適化問題に対して、超大規模空間の探索に特化したアルゴリズムを開発することである。本研究期間において、超大規模問題に対する新しいアルゴリズムを開発した。開発したアルゴリズムを超大規模な2次割当問題および超大規模な最大多様性問題に適用し、従来手法との比較を行うことにより、提案手法の有効性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

社会に現れる現実問題の多くが組合せ最適化問題として定式化できるため、本研究における社会的意義は大きい。これまでに、組合せ最適化問題に対する数多くの従来手法が提案されているが、本研究で対象としているような、超巨大解空間を構成するような問題に対する適用例はほとんどない。したがって、これまでに検討されていない挑戦的な問題に挑むことは、学術的な意義も大きいと考えられる。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to develop a new algorithm for huge scale combinatorial optimization problems. In our research, a new algorithm specialized for huge scale combinatorial optimization problems was proposed. The proposed algorithm was applied to Quadratic Assignment Problem (QAP) and Maximum Diversity Problem (MDP). In our experiments, the computational results showed that the proposed method outperformed previous methods for huge scale QAP and MDP.

研究分野：ソフトコンピューティング

キーワード：メタ戦略 組合せ最適化

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

組合せ最適化問題には、ネットワーク設計問題、配送計画問題、施設配置問題、スケジューリング問題などがあり、社会に現れる現実問題の多くが組合せ最適化問題として定式化できる。また、組合せ最適化問題は単にアルゴリズム理論の分野だけではなく、機械設計、ネットワーク設計、人工知能、画像処理、バイオインフォマティクスなど様々な分野に存在する非常に重要な問題である。これら組合せ最適化問題の多くは、問題の規模が大きい場合に厳密に最適解を求めることが極めて困難である NP 困難な問題として、計算の複雑さの理論により明らかにされてきた。このような NP 困難な問題に対して、現実的な時間内にできるだけよい近似解を求めることを目的とした、遺伝的アルゴリズム、タブー探索法などに代表されるメタ戦略を用いた手法が数多く提案されている。

一方、近年、計算機性能の進化やインターネットの発展など、情報技術の急速な発展や、ビッグデータに代表される解析データサイズの巨大化等に伴い、組合せ最適化問題における応用上重要な問題はますます大規模化・複雑化してきている。大規模な組合せ最適化問題に対応した、進化計算を用いた様々なメタ戦略アルゴリズムは数多く提案されているが、これら従来手法のほとんどが、従来扱われてきた問題サイズ(要素数)の数倍程度の大きさしか扱っておらず、数十倍から数百倍ものサイズを取り扱っている研究はほとんどない。このような超巨大解空間を持つ問題を扱っていない主な理由は、探索する解空間が莫大すぎて、局所探索を数百から数千回以上繰り返すことができるような探索空間を対象として開発された従来のメタ戦略が一切通用しなくなってしまうためである。したがって、従来のメタ戦略にとらわれない新しいアルゴリズムの開発が必要となる。

### 2. 研究の目的

本研究では、1. で述べた背景の下、従来扱われなかった(従来手法では扱うことができない)超巨大解空間を構成する組合せ最適化問題に対する新しいアルゴリズムを開発し、様々な問題に適用することを目的とする。本研究で対象とした組合せ最適化問題は、2 次割当問題および最大多様性問題である。

2 次割当問題は、 $n \times n$  のフロー行列と  $n \times n$  の距離行列が与えられたときに、これらの行列から決定される評価値が最小となるように、 $n$  個の要素を  $n$  ヶ所の場所に配置する問題として定義され、施設配置問題や VLSI のセル配置問題など、応用範囲の広い問題として知られている。これまでに数多くのメタ戦略を用いた手法が提案されているが、これらの手法では、QAPLIB と呼ばれるベンチマーク問題にある問題サイズ(最大  $n=256$ )のみを対象としている。本研究ではこれらのサイズを大きく超える最大で  $n=10000$  の問題に対して検討を行う。

最大多様性問題は、与えられた  $n$  個の要素から  $m$  個の要素を選ぶとき、できるだけ多様性を有するように要素を選択する組み合わせ最適化問題であり、ネットワーク設計や VLSI 設計など応用範囲の広い問題として知られている。2 次割当問題と同様に、これまでに数多くのメタ戦略を用いた手法が提案されているが、ベンチマーク問題 (OR-Library) の規模(最大で  $n=2500$ )を大きく超える超大規模な問題に対する検討はほとんど行われていない。本研究ではこれらのサイズを大きく超える最大で  $n=200000$  の問題に対して検討を行う。

### 3. 研究の方法

#### (1) 超大規模な 2 次割当問題に対する提案手法

2 次割当問題においては、最良な近傍に移動するために、現在解と近傍解の評価値の差のリストである差分リストを作成する必要がある。2 次割当問題における近傍解には、現在解において 2 つの要素を入れ替える 2-opt 近傍が用いられる。しかし、超大規模問題においては、近傍解の数も莫大となるため、差分リストの作成に多くの計算コストが必要となる。本手法では、この差分リスト作成の際に、序盤では、比較的現在解より良い解を見つけやすいため、近傍空間を狭くして探索を行い、後半では、現在解より良い解を見つけにくくなるため、広い近傍空間を探索することにより、効率的に近傍解を探索しながら差分リストを作成する手法を提案した。実験では、最大で  $n=10000$  となる超大規模な 2 次割当問題に対して、提案手法と、従来の最良移動戦略、即時移動戦略による手法および Simulated Annealing (SA) との比較を行った。

#### (2) 超大規模な最大多様性問題に対する提案手法

最大多様性問題も 2 次割当問題と同様に現在解と近傍解の評価値の差であるゲインをすべてのビットに対して計算する必要がある。そこで、2 次割当問題で提案した手法と同様に、解の探索を行うと同時にゲインを計算する効率的に近傍解探索法を提案した。ここで、2 次割当問題の解は順列で表されるのに対し、最大多様性問題は、ビット配列で表現され、さらに 1 のビットの数に制約があるため、そのまま 2 次割当問題の手法を適用することはできない。提案手法では最大多様性問題の制約を満たすように 2 つのビットを操作する 2-flip 近傍とゲインの計算を同時に行うことにより効率的な近傍探索を実現した。実験では、最大で  $n=200000$  となる超大規模な MDP に対して、提案手法と、従来の最良移動戦略、即時移動戦略による手法との比較を行った。

#### 4. 研究成果

##### (1) 超大規模な 2 次割当問題に対する研究成果

超大規模な 2 次割当問題に対する提案手法の有効性を確認するために実験を行った。実験に用いた問題は、 $n=5000, 7500, 10000$  の超大規模問題とし、Taillard によって公開されている問題を参考に作成した。比較対象となる局所探索法は、最良な 2-opt 近傍解へ移動する最良移動戦略(2optB)、ランダムに 1 つの 2-opt 近傍を選び、現在解より評価値が良ければ解の遷移を行う即時移動戦略(2optF) および Simulated Annealing(SA) とした。SA は従来手法で用いられているパラメータを用いた SA (SA1) と超大規模問題向けに解の収束が速くなるようパラメータを調整した SA (SA2) との比較を行った。試行回数は各問題に対して各手法 10 回ずつとし、試行ごとの終了条件は  $n/2000$  時間が経過するまでとした。実験はすべて同じ計算機上(CPU: Intel Xeon X5650 2.67GHz, メモリ: 64GB) で行った。

他手法との比較結果を表 1 に示す。表 1 において、問題名は、問題サイズと問題番号をハイフンでつないだ表記となっている。最良評価値はすべての手法で得られた解の中で最良の評価値を示す。また、評価値の差は、最良評価値から各手法で得られた評価値の平均を引いた値であり、0 に近いほど優良な解が得られていることを示す。表 1 より、すべての問題サイズで提案手法が最も良い結果を示している。また、これまで用いられてきたメタ戦略の一つである SA と比較するとその差が非常に大きいことから超大規模問題へのメタ戦略の適用は困難であると言える。

次に、5000-1 の問題での各手法の処理時間に対する最良解の評価値の推移を図 1 に示す。グラフの縦軸は評価値、横軸は探索時間を表しており、値は 10 回行った試行の平均値である。評価値の値が小さいほど良い結果が得られていることを示している。図 1 より、探索の序盤では即時移動を用いた 2optF が良い解が得られているが、その後は、提案手法が最も良い評価値が得られていることがわかる。以上の結果より、超大規模な 2 次割当問題に対する提案手法の有効性が確認された。

表 1 他手法との比較結果

問題名	最良評価値 ( $\times 10^5$ )	評価値の差 ( $\times 10^5$ )				
		提案手法	2optB	2optF	SA1	SA2
5000-1	601381	<b>47</b>	2520	641	8660	1710
5000-2	601385	<b>96</b>	2511	675	8651	1744
5000-3	601393	<b>68</b>	2398	715	8737	1739
7500-1	1358461	<b>185</b>	18993	1100	19358	2528
7500-2	1358452	<b>113</b>	17588	1007	19348	2578
7500-3	1358562	<b>127</b>	17424	1359	19393	2572
10000-1	2420404	<b>169</b>	29835	1347	29286	3296
10000-2	2420611	<b>160</b>	29911	1363	29291	3308
10000-3	2420534	<b>349</b>	29805	1433	29280	3283

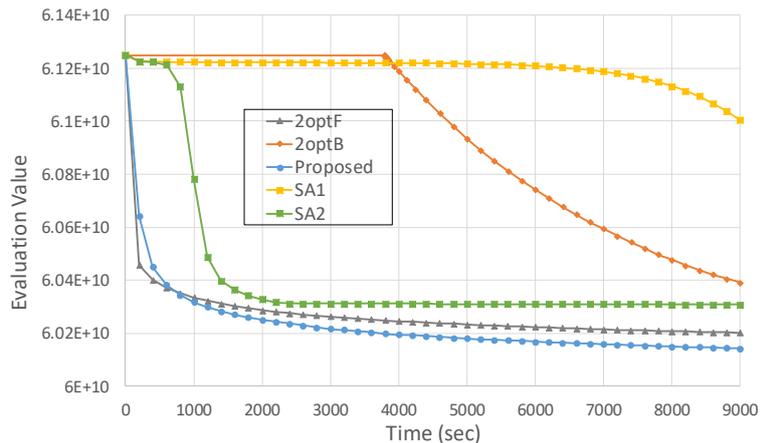


図 1  $n=5000$  の問題での最良解の推移

##### (2) 超大規模な最大多様性問題に対する研究成果

超大規模な最大多様性問題に対する提案手法の有効性を確認するために実験を行った。実験に使用した問題は、 $n=100000, 200000$  という既存研究には存在しない超大規模な問題であり、それぞれの問題サイズに対して 3 種類の密度の問題を作成した。ここで密度とは、各問題の行列の 0 でない要素の割合であり、実験ではこの密度が 1%, 50%, 100% の問題を作成した。これらの問題は、Palubeckis によって作成された問題例を参考にしている。比較手法は、最良移動戦略のみの手法、即時移動戦略のみの手法とした。すべての実験は、CPU: Intel (R) Xeon (R) CPU E5-2660 v3 @ 2.60GHz, メモリ: 512GB の環境で行った。 $n=100000$  の問題に対しては 500 秒、 $n=200000$  の問題に対しては 2000 秒を上限として実験を行った。なお、探索中に局所解へ到達した場合は、その時点で探索を終了している。各手法に対する最良評価値の推移の比較結果を図 2 から図 5 に示す。図 2 は  $n=100000$ 、密度 1% の問題、図 3 は  $n=100000$ 、密度 50% の問題、図 4 は  $n=100000$ 、密度 100% の問題、図 5 は  $n=200000$ 、密度 50% の問題に対して実験を行ったグラフである。各グラフにおいて、最良評価値が大きいほど良い結果が得られていることを示している。 $n=200000$  で密度が 1% と 100% の結果は、図 5 の 50% の場合と同様の傾向であったため割愛する。図 2 から図 5 より、すべての問題において提案手法の評価値が最も高い値を算出しており、有効な探索を行っていることがわかる。

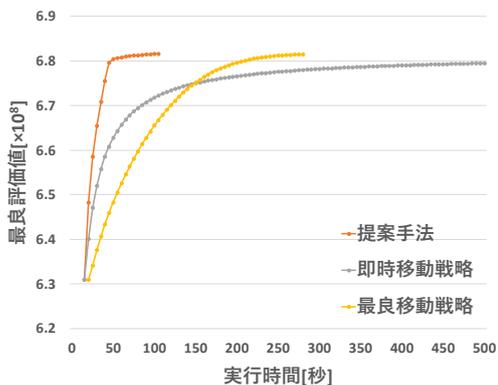


図2 n=10000, 密度 1%の最良評価値の推移

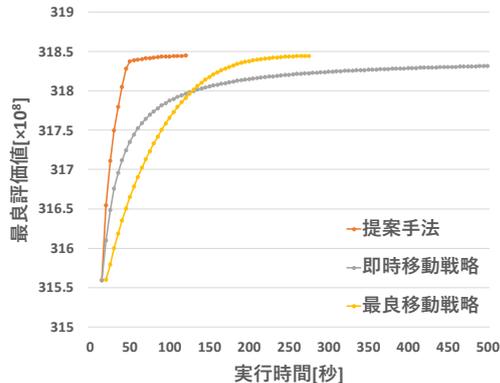


図3 n=10000, 密度 50%の最良評価値の推移

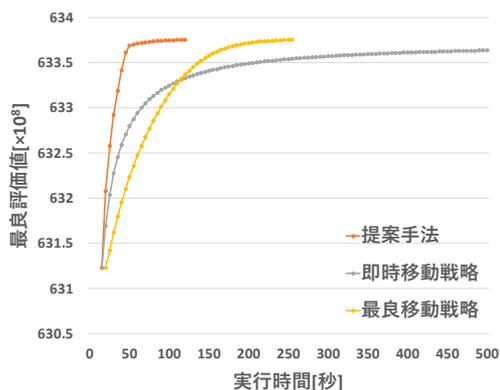


図4 n=10000, 密度 100%の最良評価値の推移

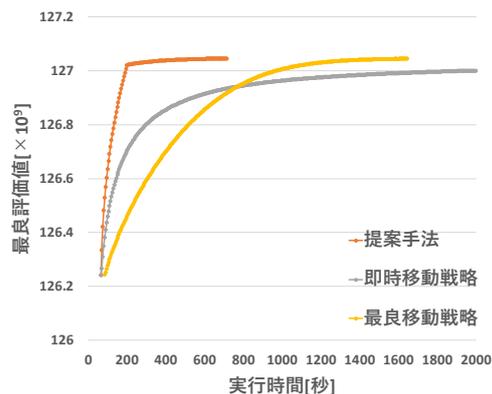


図5 n=20000, 密度 50%の最良評価値の推移

さらに、局所解へ到達するまでにかかる時間も、提案手法が最も短くなっており、効率的に探索を行っていることがわかる。また、密度の違いによる各手法の最良評価値の推移に大きな違いはなかった。以上の結果より、超大規模な最大多様性問題に対する提案手法の有効性が確認された。

以上、(1), (2)の結果より、超大規模な組合せ最適化問題に対して、提案手法が最も良い結果が得られたことから、超大規模問題に対する提案手法の有効性が確認された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 外山史, 森博志, 東海林健二	4. 巻 J103-A
2. 論文標題 超大規模な2次割当問題に対する初期近傍探索法の検討	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌A	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計16件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 田邊俊貴, 森博志, 外山史
2. 発表標題 大規模な2次割当問題に対する初期近傍探索法の性能評価
3. 学会等名 第17回進化計算学会研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小林美穂, 森博志, 外山史
2. 発表標題 バイナリー2次計画問題に対するOpposition-Based Memetic Algorithm
3. 学会等名 第17回進化計算学会研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 布袋田公志, 西垣陽平, 森博志, 外山史
2. 発表標題 超大規模な最大多様性問題に対する近傍探索効率化の検討
3. 学会等名 第17回進化計算学会研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 上長根蒼輝, 森博志, 外山史
2. 発表標題 大規模なバイナリー2次計画問題に対する初期近傍探索法の性能評価
3. 学会等名 第17回進化計算学会研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 齋藤雅文, 森博志, 外山史
2. 発表標題 2次割当問題に対する Solution-based tabu search
3. 学会等名 情報処理学会第82回全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 加賀谷夏輝, 森博志, 石川智治, 佐々木和也, 阿山みよし, 外山史
2. 発表標題 身体寸法に基づいた形状最適化によるCG着物モデルの生成
3. 学会等名 情報処理学会第82回全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 白石健人, 外山史, 森博志, 東海林健二
2. 発表標題 大規模な最大多様性問題に対するBreakout Local Search
3. 学会等名 第15回進化計算学会研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 和田智優, 外山史, 森博志, 東海林健二
2. 発表標題 大規模な2次割当問題に対する局所探索法の検討
3. 学会等名 第15回進化計算学会研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤井章汰, 外山史, 森博志, 東海林健二
2. 発表標題 大規模なバイナリー-2 次計画問題に対するBreakout k-opt Local Search
3. 学会等名 第15回進化計算学会研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 齋藤雅文, 外山史, 森博志, 東海林健二
2. 発表標題 2次割当問題に対するBreakout k-opt Local Search
3. 学会等名 第15回進化計算学会研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 谷口侑平, 外山史, 森博志, 東海林健二
2. 発表標題 欠落ピースを含む方形ピースジグソーパズルの組み立て
3. 学会等名 情報処理学会第81回全国大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 脇坂猛虎, 外山史, 森博志, 東海林健二
2. 発表標題 大規模なバイナリー2次計画問題に対するMemetic algorithm
3. 学会等名 第16回情報科学技術フォーラム(FIT2017)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 真野将吾, 外山史, 森博志, 東海林健二
2. 発表標題 ジグソーパズル組み立てにおけるピース間評価値の検討
3. 学会等名 映像メディア学会メディア工学研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 加藤美奈, 外山史, 森博志, 東海林健二
2. 発表標題 大規模なバイナリー2次計画問題に対するBreakout Local Search
3. 学会等名 第14回進化計算学会研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 西垣陽平, 外山史, 森博志, 東海林健二
2. 発表標題 超大規模な最大多様性問題に対する初期近傍探索法の検討
3. 学会等名 第14回進化計算学会研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐々木悠哉, 外山史, 森博志, 東海林健二
2. 発表標題 大規模な2次割当問題に対する近傍探索効率化の検討
3. 学会等名 第14回進化計算学会研究会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----