

平成 22 年 5 月 28 日現在

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2007～2009

課題番号：19710138

研究課題名（和文）

問題解決システムのための組合せ最適化アルゴリズムに関する研究

研究課題名（英文）

Combinatorial Optimization Algorithms for Problem Solving Systems

研究代表者

野々部 宏司 (NONOBE KOJI)

法政大学・デザイン工学部・准教授

研究者番号：40324678

研究成果の概要（和文）：現実社会のさまざまな状況において「最適化」が求められている。本研究の目的は、問題解決のツールとして、高性能かつ汎用的な組合せ最適化アルゴリズムを開発することである。本研究では、従来の研究成果をもとに、アルゴリズムの性能を高めるための手法について検討するとともに、より広範な問題を扱うことができるようモデルの拡張を行った。また、時間割作成問題、ナース・スケジューリング問題、資源制約スケジューリング問題などに対する計算実験を行い、提案手法の有用性を確認した。

研究成果の概要（英文）：In various real situations, it is often required to achieve optimization. The objective of this study is to develop powerful and general-purpose combinatorial optimization algorithms as problem-solving tools. In this study, based on previous works, we considered some techniques for improving the performance of algorithms, and proposed extended models that can handle a wider range of problems. In order to demonstrate the usefulness of our algorithms, we conducted computational experiments for timetabling, nurse scheduling, resource-constrained scheduling and other problems.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,100,000円	0円	1,100,000円
2008年度	900,000円	270,000円	1,170,000円
2009年度	900,000円	270,000円	1,170,000円
年度			
年度			
総計	2,900,000円	540,000円	3,440,000円

研究分野：オペレーションズ・リサーチ

科研費の分科・細目：「社会・安全システム科学」・「社会システム工学・安全システム」

キーワード：問題解決システム、組合せ最適化、アルゴリズム、近似解法、制約最適化問題、スケジューリング

1. 研究開始当初の背景

現実社会においては、さまざまな状況で何らかの意味での「最適化」が求められており、高度情報化社会の現代では、これら最適化問題はより大規模化・複雑化する傾向にある。そのため、人の経験と勘のみに頼った最適化

が困難になるとともに、コンピュータを活用した数理的アプローチが不可欠となっている。数理的アプローチについては、従来からオペレーションズ・リサーチ (OR) などの分野で活発に研究されており、そこでの基本的な手順は、「解決すべき問題を数学的に記述

し、それを適当なアルゴリズムを用いて解く」というものである。本研究ではとくに離散的な構造をもつ最適化問題（組合せ最適化問題）を対象とする。

組合せ最適化問題に対するアルゴリズム研究は、OR や情報科学、人工知能などの分野で国内外の研究者により精力的に行われ、計算理論の発展や計算機性能の飛躍的な向上に伴い、目覚ましい発展を遂げてきた。その一方で、これらの研究成果が必ずしも現実問題の解決に寄与しているとは限らず、「学術研究と実務の乖離」が絶えず指摘されてきた。その理由としては幾つか考えられるが、主なものとして以下の2つが挙げられる。

〔限定された適用範囲〕従来のアルゴリズム研究においては、理論的解析や高性能アルゴリズムを実現するため、数学的に扱いやすい構造をもつ比較的単純な最適化問題を対象とすることが多く、その結果として、複雑な構造や付加的な制約をもつ現実問題に対してはアルゴリズムの適用が容易ではなかった。

〔計算時間の爆発〕現実に現れる組合せ最適化問題の多くはNP 困難であるため、厳密な意味での最適化を行おうとすると、問題例の規模に対して計算時間が指数関数的に増加し、実用的に解ける問題規模が制限されていた。

これらの指摘を受け、近年、現実問題への適用を念頭においたアルゴリズム研究が注目を浴び、汎用性と高性能性を兼ね備えた問題解決システムを構築しようとする試みがなされている。本研究代表者も、これまでに、広範な問題を扱うことのできる汎用性の高い組合せ最適化問題を対象に、近似最適解を実用的な計算時間で求めることができるアルゴリズムの開発を行い、一定の成果を得てきた。

2. 研究の目的

本研究では、汎用的、かつ高性能な組合せ最適化アルゴリズムの実現を目指し、機能の充実を図りながら、これをユーザにとってより使いやすい形に発展させることを目的とする。具体的な研究項目は以下の通りである。

(1) 複雑な実システムに対しては、最適化の評価基準を陽に記述できるとは限らず、記述できたとしても、それを効率よく計算できるとは限らない。そこで、厳密な解の評価を必ずしも必要としない、最適化アルゴリズムのより柔軟な枠組みの設計・開発を行う。

(2) 最適化アルゴリズムを利用した問題解決を行うには、適切な最適化モデルと適切なデータが必要となる。しかし、多くの場合、それらを用意することは容易ではなく、通常、

「最適化」、「モデル、データの修正」、「再最適化」を繰り返し行う必要がある。本研究では、モデルの修正作業にかかる手間を軽減するための方策について検討する。

(3) 大規模な線形計画問題（あるいは整数計画問題）を解くために使われる手法として、列生成法がよく知られている。本研究では、さまざまなタイプの割当て問題を包括した汎用的な最適化問題を対象に、列生成法を利用したアルゴリズムの有効性について検討する。

3. 研究の方法

上述の3項目のそれぞれについて、以下の通り研究を実施する。いずれも、アルゴリズムを実装した上で、計算実験による性能評価を行う。

(1) 解の評価を高速に行うことが困難な組合せ最適化問題を対象とする。最適化アルゴリズムの枠組みとして、局所探索法、およびその拡張であるメタヒューリスティクスを想定し、解の評価方法として、正確な評価値を計算する厳密評価と、少ない計算時間で近似評価値を計算する簡易評価の2種類を併用する手法について、その有効性を確かめる。

(2) 本研究代表者がこれまでに開発してきた制約最適化ソルバーについて、より広範な問題を扱うことができるよう、モデルの拡張を行う。

(3) 具体的な問題を対象に列生成法を利用したアルゴリズムの開発を行う。その結果をもとに、より一般的な割当て問題を対象としたアルゴリズムの設計を試みる。

4. 研究成果

各研究項目の成果概要は以下の通りである。

(1) 納期を必ず守ることを前提としたジョブショップ・スケジューリングを考える。ここで、各工程の作業時間は人員など資源の追加により短縮可能で、作業時間短縮にかかるコストを最小化することが目的である。この問題においては、各機械における工程の処理順序だけでなく、各工程の処理時間（短縮時間）も決定する必要がある。しかし、工程の処理順序を固定すれば、各工程の最適処理時間は多項式時間で計算することができる。そこで、この問題に対する近似解法として、工程の処理順序を解とし、最適処理順序を局所探索法により決定する方法の設計・開発を行った。

局所探索法では、近傍解の評価を繰り返し行う必要があるため、解の評価を高速に行う

ことが重要である。しかし、この問題では、解の評価に（多項式時間ではあるが）時間がかかるため、大規模な問題例に対しては効率的な探索が困難となることが予想される。そのため本研究では、近傍探索において、解の評価を常に厳密に行うのではなく、まず簡易評価により近傍解の評価を行い、その評価値が高い近傍解に対してのみ厳密評価を行うこととした。なお、厳密評価を行うか否かの判定のためにプログラム・パラメータを導入しているが、アルゴリズムの性能と利便性を高めるために、その値を探索中動的に変化させる仕組みを加えている。

提案アルゴリズムの性能を評価するために、ランダムに生成した問題例を用いて計算実験を行った。計算結果の一例として、ジョブ数 32、機械数 40 の問題例に対する結果を図 1 に示す。横軸は計算時間（秒）を、縦軸は解のコスト（小さいほうが好ましい）を表し、探索で得られた最良解のコストが、時間の経過とともにどのように推移するかが示されている。これより、簡易評価を併用することで、最終的な解の精度を低下させることなく、探索の高速化が実現されていることが確認できる。

局所探索法において複数の評価方法を使い分ける手法は、例えば、不確実性を伴う問題において、解の評価にシミュレーションを用いる場合にも応用できると考えられる。

(2) 制約最適化問題は、与えられた複数の制約について、それらの違反ペナルティが最小となるように変数に値を割当てて問題であり、さまざまなタイプの割当て問題を包括する汎用的な問題である。本研究代表者はこれまでにメタヒューリスティクスに基づく制約最適化ソルバーの開発を行い、一定の成果を得ている。このソルバーでは、線形や 2 次の不等式制約・等式制約、all-different 制約が利用可能であり、さらに、ユーザが問

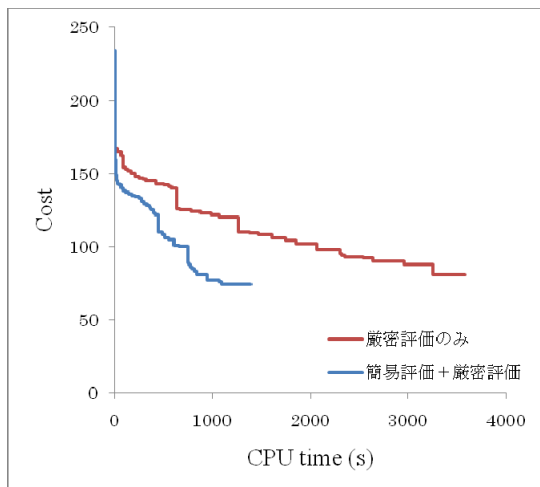


図 1：簡易評価併用の効果

題固有の制約を新たに定義することも可能である。しかし、ユーザ定義制約を追加するには、アルゴリズムの性能を高めるため、いくつかのルーチンをユーザが実装する必要があった。そこで本研究では、ユーザ定義制約の追加に要する手間を軽減するために、ユーザが実装すべきルーチンの数を減らし、さらに、ユーザ定義制約の記述に他の制約の違反ペナルティを用いることができるよう改良を加えた。これにより、「違反制約数を一定数以下に抑える」、「違反ペナルティの最大値を最小化する」といった制約や目的関数を容易に扱うことが可能となる。

今回の改良は、問題解決のプロセスにおいてモデルの作成・修正にかかる作業手間を軽減する効果がある。その事例としてナース・スケジューリングを挙げておく。ナース・スケジューリング問題は、種々の制約条件のもと、ナースの勤務表を作成する問題であり、多くの場合、ユーザが定めた条件や要望をすべて満たすことが目標であり、目的関数を明示的に定めることは多くない。そのため、満たすべき条件や要望を制約として列挙する形で問題を記述することが自然であり、制約最適化ソルバーを用いるのに適した問題であるといえる。勤務表作成において考慮すべき条件は状況によって異なるが、とくに日本では、各シフトに適切な人数、および適切なスキルレベルのナースを確保することのみならず、個々のナースの特性や希望を考慮することが求められ、すべての制約条件を満たすことは不可能、あるいは非常に困難である場合が多い。このような場合の解の評価基準として、制約違反度の総和、もしくは加重和を用いる方法が代表的であるが、この評価基準が、現実において勤務表の修正のしやすさや公平性などの観点から必ずしも適切であるとは限らない。そのため、解の評価基準の設定や制約条件を変更しながら繰り返し勤務表作成を行うことによって、適切なモデルを構築するプロセスが必要となる。このプロセスにおいて、ユーザ定義制約の追加が必要となることも多く、この場合、今回の改良による手間の軽減が期待される。

例えば、「休み希望など、ナースの要望を受け入れる」、「望ましくないシフトの並びを避ける」といった個々のナースに関する制約をすべて満たすことが困難であると判明した場合に、ある特定のナースに制約違反が集中しないよう制約の追加が必要になることがある。この制約はユーザ定義制約により記述することが可能であり、実際にこの制約を追加して問題を解いたところ、制約違反が複数のナースに分散する勤務表を作成することに成功した。

(3) 時間割作成国際コンペティション (International Timetabling Competition 2007) で用いられた大学の時間割作成問題に対し、列生成法に基づくアルゴリズムの設計・開発を行った。この問題は、与えられた科目のそれぞれを、どの時間帯にどの教室で実施するか決定する問題であり、教室の設備や大きさ、学生の履修状況、教員の都合などに関する制約条件を考慮しなくてはならない。

ここで、同一時間帯に実施することのできる科目の組合せを1つのパターンとして考えると、この問題は、各時間帯に適当なパターンを1つずつ割当てると捉えることができ、時間帯とパターンの組のそれぞれに0-1変数を導入することで、整数計画問題となる。しかし、考慮すべきパターンの数が膨大であるため、この問題を直接解くことは困難である。そこで、この問題の線形緩和問題を、列生成法を用いて解き、その過程で得られたパターンを候補として、各時間帯へのパターンの割当てを行うこととする。本研究では、近似最適解を求めることを目的として、パターン生成の際の列生成子問題、およびパターンの候補が得られた後、各時間帯にパターンを割当てると問題については、厳密性を重視せず、近似解法によって解くことを考えた。

アルゴリズムを実装し、予備実験を行ったところ、現段階では国際コンペティション上位入賞グループによるアルゴリズムには及ばず、解の質、計算時間の両面において課題が見つかった。しかし、問題例によっては良好の結果が得られており、パターン生成の方法を改善することで性能を向上させることができず、引き続き検討していく予定である。とくに、個々の問題構造に強く依存しない、汎用的に適用可能な手法の開発を進めていきたいと考えている。

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3件)

1. Shunji Umetani, Mutsunori Yagiura, Shinji Imahori, Takashi Imamichi, Koji Nonobe, Toshihide Ibaraki, Solving the irregular strip packing problem via guided local search for overlap minimization, International Transactions in Operational Research, Vol. 16, pp. 661-683 (2009) (査読有).
2. Hideki Hashimoto, Youichi Ezaki, Mutsunori Yagiura, Koji Nonobe, Toshihide Ibaraki, Arne Lokketangen,

A set covering approach for the pickup and delivery problem with general constraints on each route, Pacific Journal of Optimization, Vol. 5, pp. 185-202 (2009) (査読有).

3. Mutsunori Yagiura, Akira Komiya, Kenya Kojima, Koji Nonobe, Hiroshi Nagamochi, Toshihide Ibaraki, Fred Glover, A path relinking approach for the multi-resource generalized assignment problem, Proc. Engineering Stochastic Local Search Algorithms: Designing, Implementing and Analyzing Effective Heuristics (SLS2007), LNCS 4638, pp. 121-135 (2007) (査読有).

[学会発表] (計5件)

1. 野々部 宏司, ユーザ定義制約の追加を考慮したメタヒューリスティクスに基づく制約最適化ソルバー, 日本オペレーションズ・リサーチ学会 2010 年度春季研究発表会, 2010 年 3 月 5 日 (首都大学東京).
2. 坂本 利仁, 野々部 宏司, 処理時間が調整可能な納期つきジョブショップ・スケジューリング問題に対する発見的解法, スケジューリング・シンポジウム 2009, 2009 年 9 月 18 日 (岡山大学).
3. 野々部 宏司, 池上 敦子, ナーススケジューリング問題における解の評価方法について, スケジューリング・シンポジウム 2009, 2009 年 9 月 17 日 (岡山大学).
4. Rihito Sakamoto, Koji Nonobe, A local search approach for the jobshop scheduling problem with dealines and controllable processing times, International Symposium on Scheduling 2009, 2009 年 7 月 4 日 (名古屋工業大学).
5. 野々部 宏司, スケジューリングと列生成法, スケジューリング・シンポジウム 2007, 2007 年 9 月 30 日 (京都大学).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

野々部 宏司 (NONOBE KOJI)
法政大学・デザイン工学部・准教授
研究者番号: 40324678