

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2007～2010

課題番号：19760273

研究課題名(和文) 加法的コストを持つ生産スケジューリング問題に対する汎用最適解法の研究

研究課題名(英文) A study on exact algorithms for general scheduling problems with additive costs

研究代表者

田中 俊二(TANAKA SHUNJI)

京都大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：90324657

研究成果の概要(和文): 本研究では, 仕事に関する加法的コストを持つ一般的な生産スケジューリング問題に対して最適解法を提案した. なかでも, 遊休時間禁止・および遊休時間を許した1機械スケジューリング問題, 先行制約のある1機械スケジューリング問題に対する最適解法は, 現時点でもっとも効率のよい解法となっている. これら解法のプログラムはオープンソースのソフトウェアとして公開する.

研究成果の概要(英文): In this study exact algorithms for general scheduling problems with additive job costs were proposed. Among them, the algorithms for single-machine scheduling with/without idle time and that with precedence constraints are so far the most efficient ones. These algorithms will be released as an open source soft.

交付決定額

(金額単位: 円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	600,000	180,000	780,000
2008年度	600,000	180,000	780,000
2009年度	600,000	180,000	780,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
年度			
総計	2,400,000	720,000	3,120,000

研究分野: 工学

科研費の分科・細目: 電気電子工学・システム工学

キーワード: システム最適化, 組合せ最適化, 生産スケジューリング, 最適解法, Lagrange 緩和, オープンソース

1. 研究当初の背景

工場などの生産工程で, 機械や人員などを無駄なく利用した効率のよい生産計画を策定する問題は生産スケジューリング問題と呼ばれ, 現在まで盛んに研究が行われてきた. 生産スケジューリング問題は一般に NP 困難な組合せ最適化問題であり, 問題の規模が大きくなると求解が(計算時間上)困難となる. しかし近年, 計算機の処理速度の向上や最適化技法の発展により, これまで求解困難と考えられてきた規模の組合せ最適化問題でも, 効率よく最適解が求まるアルゴリズムが開発されてきている. とところが, 生産スケジューリング問題に対しては, 最適解法の研究がそれほど進んではおらず, これまで近似解法

の研究が中心であった. また, 既存の最適解法も, 対象とする問題の性質に強く依存するものがほとんどで, 少しでも問題の性質が変化すると適用できなくなってしまう. さらに, 既存の最適解法は, コンピュータプログラムが公開されておらず, 他の研究者や実務者がこれらの解法を利用する際には, コンピュータ上に自ら実装する必要があった. この点が最適解法研究の発展の大きな妨げになっていると思われた.

一方, 研究代表者らはすでに, 仕事に関する加法的コストという一般的な目的関数を持つ1機械スケジューリング問題(機械台数が1台の生産スケジューリング問題)に対し, 遊休時間(機械がいずれの仕事も処理してい

ない時間)禁止という制約のもとで最適解を求める効率のよい解法を提案していた。この解法は問題に特化した既存解法よりも効率的で、200 仕事程度の規模の問題にも適用可能であった。しかし、遊休時間禁止という制約が限定的であることや、仕事間に先行制約がある問題や多機械問題への拡張が望ましい、といった課題があった。

2. 研究の目的

以上をふまえ、本研究では、仕事に関する加法的コストを持つ生産スケジューリング問題に対し、高速な汎用最適解法を構成することを目的とする。具体的には、研究代表者らがすでに提案している解法の枠組をもとに、より広範な生産スケジューリング問題に適用可能な汎用最適解法の構成を目指し、

- (1)機械に遊休時間が存在する場合、
- (2)仕事間に処理順序の先行制約が存在する場合、
- (3)複数の機械が並列されている場合(等価並列機械型問題)、

を扱える解法を構成する。そして、研究成果を、ソースコードの閲覧が可能なオープンソースのソフトウェアとして公開することを最終目標とする。

3. 研究の方法

基本的には、研究代表者らによる解法の枠組を拡張していくことになる。この解法は、SSDP(Successive Sublimation Dynamic Programming)法に基づく方法であり、

- (1)原問題の Lagrange 緩和問題を生成し、動的計画法で解いて最適目的関数値の下界値を得る
- (2)不要な動的計画法の状態を削減する
- (3)Lagrange 緩和問題に制約を付加し下界値の改善をはかる。(1)へ戻る

という手順を下界値と上界値が一致するまで繰り返す、というものである。ただし、上界値は近似解法により求めることになる。よって、上述の拡張は、Lagrange 緩和問題の生成法およびその解法・上界値の計算方法の拡張を行うことで達成できる。そこで、これらの拡張を試みるとともに、解法の基本的な枠組自体の改善も行う。

4. 研究成果

まず、遊休時間を許した問題に対する拡張について述べる。下界値計算方法に関しては、遊休時間に対応するコスト 0 の仮想的な仕事を導入することで拡張を行った。また、上界値計算方法については、動的計画法に基づく効率のよい局所探索法である dynasearch(を遊休時間を許した問題へ拡張したものを)を採用した。そして、重み付き納期ずれ和最小化問題や、最早開始可能時刻に制限のある重み

付き完了時刻和最小化問題・重み付き納期遅れ和最小化問題に対する数値実験を行った。その結果、既存の各問題に特化した最適解法よりはるかに高速に最適解を求められることが示された。具体的には、まず 1 機械重み付き納期ずれ和最小化問題については、既存の最適解法では 60 仕事問題が求解可能な上限であったが、提案解法では 200 仕事問題も求解可能となった。また、重み付き完了時刻和最小化問題については、既存解法では 200 仕事問題を解くのに最長 4 日近くかかっていたのに対し、提案解法では 1 時間以内に解くことができた。さらに、重み付き納期遅れ和最小化問題については、既存解法で 30 仕事問題が上限であったが、提案解法では 80 仕事問題まで解くことができた。

つぎに、仕事間に先行制約のある 1 機械問題については、まず、先行制約を Lagrange 緩和することで下界値を計算する方法を示した。つぎに、いったん緩和した先行制約の一部を Lagrange 緩和問題に戻した問題が、動的計画法により比較的容易に解けることを示した。それに基づき、緩和した先行制約を徐々に戻していくことで、最終的に制約を満足する解を求めるという解法を構成した。そして、数値実験により、重み付き納期遅れ和最小化問題については 100 仕事程度まで、重み付き納期ずれ和最小化問題については、50 仕事程度までの問題に対し、最適解を求められることを示した。先行制約のある 1 機械問題に対する最適解法の研究では、これまで重み付き完了時刻和最小化しか扱われておらず、これら問題に対する最適解法は存在しなかったため、単純な比較はできないものの、先行制約のない重み付き納期遅れ和最小化問題(一般に先行制約のある問題よりも簡単)に対する既存解法では 100 仕事問題が求解可能な限界であったことから、十分な結果であるといえる。

最後に、等価並列機械型問題については、2008 年に海外の研究グループが効率的な解法を提案しているため、この解法の改善を試みた。その結果、従来の解法では解くことができなかった問題に対して、最適解を求めることに成功した。しかし、その後同グループが 2010 年にさらなる解法の効率改善に成功しており、残念ながらこの解法を上回ることができなかった。とはいえ、この解法においても、本研究と同様の緩和問題を用いて下界値の計算を行っているため、本研究の枠組の有効性が、間接的にはあるが示されたと考えている。

また、解法の基本的な枠組の改善も同時に行った。当初は Lagrange 乗数の調整に劣勾配法を用いていたが、共役劣勾配法を適用することでより高速に調整を行うことが可能となった。また、Lagrange 緩和問題に制約を

付加していく順序を最適化する，制約伝播の考え方をういて動的計画法の状態を削減する，状態を圧縮して記憶することでメモリ使用量を削減する，などの改善を行った．これにより，解法の大規模な高速化・効率化に成功した．具体的には，求解速度が約二倍となるとともに，求解可能な仕事数の上限が，1 機械重み付き納期遅れ和最小化問題については 200 仕事から 400 仕事へ，1 機械重み付き納期ずれ和最小化問題に対しては，150 仕事から 300 仕事へ，それぞれ増加した．

既存解法と提案解法の比較結果を表 1 にまとめる．

表 1: 既存解法と提案解法の比較

問題の種類	既存解法	提案解法
重み付き納期遅れ和最小化	100 仕事	400 仕事
重み付き納期ずれ和最小化 (遊休時間禁止)	50 仕事	300 仕事
重み付き納期ずれ和最小化	50 仕事	150 仕事
処理開始時刻に制限のある重み付き納期ずれ和最小化	60 仕事	200 仕事
処理開始時刻に制限のある重み付き完了時刻和最小化	200 仕事 (4 日)	200 仕事 (1 時間)
処理開始時刻に制限のある重み付き納期遅れ和最小化	30 仕事	80 仕事
先行制約のある重み付き納期遅れ和最小化		< 100 仕事
先行制約のある重み付き納期ずれ和最小化 (遊休時間禁止)		50 仕事
等価並列機械型重み付き納期遅れ和最小化	50 仕事	50 仕事

以上の成果について国際・国内会議で発表を行うとともに，英文論文誌に論文を投稿した．現時点で 1 編が掲載済みであり，もう 1 編の掲載が決定している．また，ベンチマーク問題や計算結果など，本研究で得られた成果をホームページで公開している．

さらに，研究成果の中核となる，遊休時間禁止および遊休時間を許した 1 機械スケジューリング問題に対する解法プログラム (ソルバ) を，オープンソースのソフトウェアとして公開予定である．このために，これまでに作成したプログラムを C 言語のライブラリ形式に書き直すとともに，ドキュメント類の整

備を行った．すでに公開準備は完了しており，当該論文が掲載され次第公開する予定である．このソルバ公開により，スケジューリング分野の研究者や実務者が，解法に関する詳細な知識なしに，また実装の手間をかけることなく，現時点で最も効率のよい汎用解法を利用することが可能となる．よって，当該分野の研究や教育の発展に大きく貢献するものと期待される．さらには，他分野への応用も促進されるものと考えられる．

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 2 件)

- (1) Shunji Tanaka, Shuji Fujikuma, A dynamic-programming-based exact algorithm for general single-machine scheduling with machine idle time, *Journal of Scheduling*, 掲載予定, 2011, 査読有
- (2) Shunji Tanaka, Shuji Fujikuma, Mituhiko Araki, An exact algorithm for single-machine scheduling without machine idle time, *Journal of Scheduling*, Vol. 12, No. 6, pp. 575-593, 2009, 査読有

[学会発表](計 10 件)

- (1) 田中 俊二, 1 機械スケジューリング問題ソルバの開発, スケジューリング・シンポジウム 2010, pp. 105-110, 2010/9/10, 東京
- (2) 田中 俊二, 等価並列機械型重み付き納期遅れ和最小化問題に対する厳密解法に関する一考察, 第 54 回システム制御情報学会研究発表講演会, pp. 350-351, 2010/5/20, 京都
- (3) Shunji Tanaka, Shun Sato, An exact algorithm for the precedence-constrained single-machine scheduling problem, 4th Multidisciplinary International Scheduling Conference: Theory & Applications (MISTA 2009), pp. 216-226, 2009/8/10, ダブリン(アイルランド)
- (4) 佐藤 俊, 田中 俊二, 先行制約を考慮した 1 機械スケジューリング問題に対する厳密解法の改善, 第 53 回システム制御情報学会研究発表講演会, pp. 243-244, 2009/5/21, 兵庫
- (5) 佐藤 俊, 田中 俊二, 先行制約を考慮した 1 機械スケジューリング問題に対する厳密解法, スケジューリング・シンポジウム 2008, pp. 101-106, 2008/9/19, 東京

- (6) Shunji Tanaka, Shuji Fujikuma, An efficient exact algorithm for general single-machine scheduling with machine idle time, 4th IEEE Conference on Automation Science and Engineering, pp. 371-376, 2008/8/25, ワシントン DC. (アメリカ合衆国)
- (7) 田中 俊二, 藤熊 修司, 遊休時間を考慮した1機械スケジューリング問題に対する厳密解法, 第 52 回システム制御情報学会研究発表講演会, pp. 93-94, 2008/5/16, 京都
- (8) 藤熊 修司, 田中 俊二, 上界値計算の効率化による遊休時間を考慮した1機械重み付き納期ずれ和最小化問題に対する厳密解法の改善, 計測自動制御学会関西支部 若手研究発表会, pp. 101-104, 2008/1/16, 大阪
- (9) 藤熊 修司, 田中 俊二, 遊休時間を考慮した1機械重み付き納期ずれ和最小化問題に対する厳密解法, スケジューリング・シンポジウム 2007, pp. 255-260, 2007/9/30, 京都
- (10) Shunji Tanaka, An exact algorithm for single-machine scheduling without idle time, 3rd Multidisciplinary International Scheduling Conference: Theory and Applications (MISTA 2007), pp. 314-317, 2007/8/28, パリ(フランス)

〔その他〕

ホームページ等

<http://turbine.kuee.kyoto-u.ac.jp/~tanaka/SiPS/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

田中 俊二 (TANAKA SHUNJI)

京都大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：90324657