

令和 6 年 6 月 7 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19K04105

研究課題名（和文）固有知識と汎用的解法の融合による高性能スケジューリング法の開発

研究課題名（英文）Development of high-performance scheduling methods by integrating domain-specific knowledge and generalized solutions methods

研究代表者

江口 透（Eguchi, Toru）

広島大学・先進理工系科学研究科（工）・准教授

研究者番号：80253566

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、多品種少量生産を行う生産システムを対象とし、効率よく生産を行うためのスケジューリング法の開発を行った。このような生産スケジューリング問題は生産対象部品数や加工機械台数が増えるとその組み合わせ数は膨大になり、現実規模の問題で最適解を求めることは容易ではない。本研究では、まず効率的な最適化のためにスケジューリングに有効な知識をニューラルネットワークを用いて自動学習させた。さらに、これを組み込んだ最適化法を開発することによって高性能なスケジューリングを行う方法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

製造業においては顧客ニーズの多様化により効率的な多品種少量生産が求められている。そのような生産を行う工場では生産工程は複雑になり、適切な生産順序指示が重要であるが、この問題はNP困難と言われ、最適化が非常に難しい問題である。本研究はこの問題に取り組み、効率的に高性能なスケジュールを作成する方法を提案した。特に、近年の労働者不足により、作業者スケジューリングも含めたより効率的な生産スケジューリングが求められており、その実現の社会的意義は大きい。

研究成果の概要（英文）：This research developed a scheduling method to enhance the efficiency of systems engaged in high-mix, low-volume manufacturing. As the number of parts and processing machines increases, the complexity of production scheduling problems grows exponentially, making it impractical to find optimal solutions on a practical scale. In this study, neural networks are employed to automatically learn effective scheduling strategies for efficient optimization. By integrating this learned knowledge with an optimization method, we developed a high-performance scheduling approach.

研究分野：生産システム

キーワード：スケジューリング ジョブショップ 遺伝的アルゴリズム 優先規則

### 1. 研究開始当初の背景

近年の製造業においては、顧客ニーズの多様化により、多品種少量生産が求められている。一方、IoT技術の発展により生産現場の状況をリアルタイムに把握し、将来の生産情報を合わせて高性能な生産計画、スケジューリング法の実現が可能な環境が整いつつある。しかし、生産スケジューリングはNP困難な問題であり、実用規模の問題に対する最適化は難しく、限られた計算時間での高性能な生産スケジューリングの作成法が求められている。

### 2. 研究の目的

本研究では、多品種少量生産を行う生産システムを対象とし、効率よく生産を行うためのスケジューリング法の開発を行う。このような生産スケジューリング問題は生産対象部品数や加工機械台数が増えるとその組み合わせ数は膨大になり、現実規模の問題で最適解を求めることは容易ではない。本研究では、まず効率的な最適化のためにスケジューリングに有効な知識をニューラルネットワークを用いて自動的に学習する。さらに、これを組み込んだ最適化法を開発することによって高性能なスケジューリングを実現することを目的としている。

### 3. 研究の方法

本研究では、多品種少量生産を行うジョブショップ型の生産システムを対象とする。この生産システムに対するスケジューリング問題はジョブショップスケジューリング問題であり、NP困難なクラスに属する。NP困難な問題に対しては最適解を与える多項式時間アルゴリズムは存在しないと予想されている。実際、分枝限定法などの厳密解法は機械台数10台、ジョブ数十数個程度の規模までが適用限界であるのが実情であり、実用規模の問題に対してはメタヒューリスティック解法や優先規則（ディスパッチングルール）などを用いた解法が適用される。

メタヒューリスティック解法とは、遺伝的アルゴリズムやシミュレーテッドアニーリング法などの厳密な最適解が得られる保証はないものの適用可能な計算時間でできるだけ良い性能の解を出力できる探索法である。メタとはより高次と言う意味があり、汎用性の高い方法である。しかし、汎用性の高い方法はそれぞれ特徴を持つ問題に対する性能は必ずしも良くなく、改善の余地が大きい方法である。また、実用規模の問題に対してある程度良い性能のスケジュールを得るためにはある程度の計算時間が必要であり、生産現場で生じる様々な不確実事象に対応する必要があるジョブショップでは計算時間の観点から適用が難しい場合も多い。

一方、高速なスケジュール作成法として従来からディスパッチングルール（差立て規則）と呼ばれる優先規則が利用されている。これは、次に処理するジョブを選択するための優先度を何らかの比較的簡単な関数で与え、優先度によってジョブの処理順序を決めていく方法である。メタヒューリスティック解法よりも計算時間をかけない分、性能は劣るが、不確実な事象が多い生産現場でも実用可能な高速な方法である。有効な優先規則は評価関数や制約条件などによって異なり、人が試行錯誤的なシミュレーション実験によって開発している。これは対象とする問題に有効な規則を個別に開発するもので汎用性は低い。

本研究ではこれらを踏まえ、まず、対象とする問題に有効な優先規則を自動的に学習する方法を検討する。そのため、ジョブが選択される時点の情報を入力とし、そのジョブの選択優先度を出力とする関数をニューラルネットワークで表現する。このニューラルネットワークを小規模問題の最適スケジュールにおけるジョブ選択場面の状況から教師事例を収集し学習させる。これによって試行錯誤ではなく、自動的に高性能な優先規則を学習させる。ただし、この優先規則のみを利用することで最適解を作成できるような多項式時間アルゴリズムは存在しないと予想されているからである。数多くの最適スケジュールから教師事例を収集してそれをもとに学習しても、ジョブショップスケジューリング問題の多くの問題例（インスタンス）に対して平均的に良い性能を与える優先規則しか学習は出来ない。しかし、試行錯誤的に開発する方法に比べて自動的に優先規則を作成できる意義は大きい。

本研究ではこのようにして学習されたニューラルネットワークによる優先規則を、汎用的最適化法であるメタヒューリスティック解法の一つである遺伝的アルゴリズムに組み込んでその性能向上を目指す。優先規則はその問題の評価関数や制約条件などに応じて自動的に学習される。遺伝的アルゴリズムでは、ジョブの選択優先度を遺伝子としてコーディングする。この遺伝子の値を基準に与えられたスケジューリング問題におけるジョブの処理順序を定めていくことでスケジュールを作成することが出来る。これをデコーディングという。優先規則による優先度をこのアルゴリズムに組み込むため、このデコーディングを遺伝子のみではなく、遺伝子と用いる優先規則が与える優先度の積を利用してスケジュールを作成する。前述の通りメタヒューリスティック解法は汎用的解法であり、個々の問題に対する領域固有の知識を組み込むことで性能が向上することが知られている。本研究が対象とするジョブショップスケジューリング問題において問題固有の領域知識、すなわち良いスケジュールを作成できる知識が優先規則に相当する。遺伝子は世代交代で与えられた評価値が良くなるように進化していくが、つねにその問題

の領域知識である優先規則が組み込まれていることで、高速に良い解を得ることができる。

#### 4. 研究成果

- (1) 本研究では、遺伝的アルゴリズムと優先規則の融合による高性能なジョブショップスケジューリング法を提案している。この方法の性能を確認するため、評価関数として最も基礎的であり重要性が高い重み付き総納期遅れ時間を採用して検討した。このスケジューリング問題に対して知られている有効な規則は ATC ルールであるが、このルールは二つのパラメータを持っており、事前にその調整が必要である。適切に調整することでその問題に応じた有効な優先規則となり得る。これらを遺伝的アルゴリズムに組み込んで探索を行う方法の有効性を検証した。ベンチマーク問題を用いた性能比較を行い、この問題に対して高い性能を有するとされる EGEASP 法と比べて、本研究が対象とする規模が大きい問題に対して提案法が有効であることを確認した。
- (2) さらに、現実の様々な生産条件を想定したスケジューリング法への適用を考え、納期遵守と残業時間最小化を目的としたスケジューリング問題を取り上げ、作業者の共同作業を考慮した場合に有効な優先規則を考案し、それを遺伝的アルゴリズムに組み込んだ探索法を提案した。この有効性を数値実験によって確認した。
- (3) 上記の方法では、有効な優先規則は試行錯誤的に考案されたものである。これをニューラルネットワークによって自動的に学習した。まず、学習用の問題例を用意してその準最適解を求め、その解からニューラルネットワークの結合荷重を学習するための教師事例を収集して学習する。学習用問題の準最適解は遺伝的アルゴリズムを用いて求めた。その結果、学習事例数を十分に増やすことでこの教師あり学習が有効であることが分かった。また、ニューラルネットワークの規模（中間総数やユニット数）はある程度大きい必要があるが、それ以上増やしても性能向上の効果は小さいことも確認した。これによって、ある程度の規模のニューラルネットワークを用いることで、従来よりも高性能な優先規則を学習することが出来ることが確認された。
- (4) さらに性能を向上させる方法として、ジョブショップスケジューリング問題を整数計画法で定式化し、小規模問題の最適解を整数計画ソルバーを用いて求め、そこから教師事例を収集して学習した。この方法は教師事例を収集した問題と同規模の小規模問題に対しては有効であったが、より規模の大きな問題へ適用するとその性能は劣化した。そこで、いったん学習したニューラルネットワークによる優先規則と遺伝的アルゴリズムを融合することでより規模の大きな問題に対する準最適解を効率良く求め、そこから収集された教師事例によってさらに高性能な優先規則を求めるという手順を繰り返して学習する方法を提案した。その結果、より大規模な問題に対しても高性能な優先規則を得ることが出来ることを確認した。また、より実用的な問題として、能力差の異なる作業者を考慮し納期遅れ時間を評価関数としたジョブショップスケジューリングに対して本研究の手法を適用し、既存の優先規則よりも高性能な優先規則を作成した。この優先規則と遺伝的アルゴリズムを融合した探索法によって、さらに高性能なスケジュールを作成できることを確認した。
- (5) 本研究においては、遺伝的アルゴリズム自体の性能向上も重要である。遺伝的アルゴリズムの交叉オペレータに探索時の適応度を反映させる方法を提案し、大規模問題における性能が向上することを確認した。
- (6) また、ニューラルネットワークによる優先規則の性能自体を向上させることも重要である。そこで、さらにより高性能な優先規則を作成するため、マルチパススケジューリング法を提案した。これは、優先規則が多項式時間アルゴリズムである以上、NP 困難なジョブショップスケジューリング問題に対して一度の解作成で良い解を得ることには限界があるため、比較的少数の複数回の優先規則の適用で高性能なスケジュールを作成する方法である。メイクスパンと重み付き納期遅れ時間最小化問題に対して、2 回のスケジュールでより高性能なスケジュールを作成できることを確認した。
- (7) これまでの研究成果を踏まえて、能力差を持つ複数の作業者を考慮したジョブショップスケジューリング問題において、納期遵守とそのための残業時間最小化など多目的な評価指標を考慮したスケジューリング問題へ適用した。学習後の優先規則はそのまま単独で利用することも可能であるし、遺伝的アルゴリズムに組み込んだスケジュール探索法として利用することも可能である。この方法によって、従来の優先規則を用いるよりも高性能なスケジュール作成が可能であることを確認した。

以上のように、本研究では、汎用的メタヒューリスティック解法である遺伝的アルゴリズムに問題固有の知識である優先規則を組み込んだ高性能なスケジュール作成法を提案した。遺伝的アルゴリズム自体の性能向上、ニューラルネットワークによる高性能な優先規則の自動学習、多目的な優先規則やマルチパス法による性能向上も提案した。より実用に近い環境を想定し、作業者の共同作業や能力差を考慮し、最も重要なスケジュール評価指標である納期遵守を目的とし、残業などの能力調整も考慮したスケジューリング問題に対してその有効性を数値実験によって示した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 渡辺浩一郎, 江口 透, 村山 長	4. 巻 1
2. 論文標題 遺伝的アルゴリズムを用いた納期遅れ時間最小化スケジューリング ジョブの納期ずれに基づく交叉法	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本設計工学会中国支部2022年度研究発表講演会・講演論文集No.38	6. 最初と最後の頁 20-22
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 無
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 -

1. 著者名 江口 透, 片岡拓巳, 村山 長	4. 巻 1
2. 論文標題 ニューラルネットワークを用いたマルチバススケジューリング法	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 日本機械学会生産システム部門研究発表講演会2023講演論文集	6. 最初と最後の頁 105
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 無
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 -

1. 著者名 江口 透, 林 英哲, 村山 長	4. 巻 1
2. 論文標題 ニューラルネットワークを用いた重み付き納期遅れ時間最小化スケジューリング	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本機械学会2021年度年次大会講演論文集	6. 最初と最後の頁 S144-05
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/jsmemecj.2021.S144-05	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 江口 透, 渋下 真人, 竹村 哲平, 村山 長	4. 巻 1
2. 論文標題 遺伝的アルゴリズムによる作業者の能力差を考慮したジョブショップスケジューリング	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本機械学会2021年度年次大会講演論文集	6. 最初と最後の頁 S144-03
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/jsmemecj.2021.S144-03	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Toru Eguchi, Eitetsu Hayashi, Takeshi Murayama	4. 巻 1
2. 論文標題 Learning Priority Rule using Neural Network for Job Shop Scheduling with regard to Weighted Tardiness	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the 10th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (LEM21)	6. 最初と最後の頁 566-568
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 該当する

1. 著者名 江口 透, 林 英哲, 村山 長	4. 巻 1
2. 論文標題 遺伝的アルゴリズムと優先規則を融合したジョブショップスケジューリング ニューラルネットワークによる優先規則の学習	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本機械学会2020年度年次大会講演論文集	6. 最初と最後の頁 S14205
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/jsmemecj.2020.S14205	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 江口 透, 西岡 大嬉, 村山 長	4. 巻 1
2. 論文標題 遺伝的アルゴリズムと優先規則の融合によるジョブショップスケジューリング EGRASP との性能比較実験	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本機械学会2019年度年次大会講演論文集	6. 最初と最後の頁 S14211P
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/jsmemecj.2019.S14211P	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 山下 智史, 江口 透, 村山 長	4. 巻 1
2. 論文標題 能力調整を伴うジョブショップスケジューリング 複数作業者による共同作業を考慮した最適化 (第2報)	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本機械学会2019年度年次大会講演論文集	6. 最初と最後の頁 S14212P
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/jsmemecj.2019.S14212P	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 山下 智史, 江口 透, 村山 長	4. 巻 1
2. 論文標題 作業者の共同作業と残業を考慮したジョブショップスケジューリング	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本機械学会生産システム部門研究発表講演会2019講演論文集	6. 最初と最後の頁 45-46
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 無
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 -

1. 著者名 金丸 幸平, 江口 透, 村山 長	4. 巻 1
2. 論文標題 納期に関する多目的評価を考慮したジョブショップスケジューリングルールの学習	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 日本機械学会2023年度年次大会講演論文集	6. 最初と最後の頁 S141p-01
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/jsmemecj.2023.S141p-01	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 吉田拓未, 江口 透, 村山 長	4. 巻 1
2. 論文標題 作業者を考慮したジョブショップスケジューリング (ニューラルネットワークを用いた優先規則の学習)	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 日本機械学会2023年度年次大会講演論文集	6. 最初と最後の頁 S141p-02
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/jsmemecj.2023.S141p-01	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔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
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------