

令和 2 年 7 月 3 日現在

機関番号：13904

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06077

研究課題名(和文) 異環境適応型アプローチによる設計と計画の多目的最適化

研究課題名(英文) Multi-Objective Optimization of Design and Planning by Environmental Adaptive Approach

研究代表者

阪口 龍彦 (Sakaguchi, Tatsuhiko)

豊橋技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：00403303

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：精密板金加工の生産システムにおいては、原材料である金属板の廃棄物の削減と、納期を順守した高効率生産を同時に実現することが求められる。廃棄物削減には金属板の加工レイアウトの最適化と、納期遵守生産にはスケジュールの最適化が不可欠となる。本研究では、これら2つの異なる最適化問題に対し、意思決定者が多目的環境下で所望の解を効率よく得られるよう、共進化型遺伝的アルゴリズムおよびそれを応用した異環境適応型遺伝的アルゴリズムを提案した。また、意思決定者が適切な最適化手法を選択できるように、多目的解の精度および多様性の観点から各最適化手法の特性分析を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

精密板金加工のネスティング問題およびスケジューリング問題のように、解くべき対象は異なるが関連性がある複数の問題を同時に求解することで全体最適化が可能となる。また、生産システムの意思決定者は、意思決定の際、多様な解の中から解を選択したい場合や、特定の領域で解を選択したい場合など、個々の選択基準のもとで解を算出しなければならない。これに対し、本研究で提案した共進化遺伝的アルゴリズムおよび異環境適応型遺伝的アルゴリズムでは、手法の使い分けや適切な初期解を与えることで、複数問題の多目的最適化において、解の探索領域を制御することができる。これは意思決定の効率化に寄与するものである。

研究成果の概要(英文)：In the sheet metal processing, it is required to reduce the waste of the metal-sheet and to satisfy the due-date of final products. To reduce waste, it is essential to optimize the processing layout of the metal sheets. On the other hand, the scheduling is necessary to satisfy the due-date of products. The optimization of cutting layout, i.e. nesting and scheduling is closely related with each other. Therefore, they should be considered simultaneously. In this study, to solve these two different optimization problems, we propose a co-evolutionary genetic algorithm based nesting scheduling method and an environment-adaptive genetic algorithm based method. We also analyzed the characteristics of each optimization method from the viewpoint of accuracy and diversity of multi-objective solutions so that the decision maker can select an appropriate optimization method.

研究分野：生産システム工学

キーワード：多目的最適化 スケジューリング ネスティング 遺伝的アルゴリズム

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年、持続可能社会の実現に向けた環境負荷低減への取り組みが益々加速している。一方で、消費者の製品に対するニーズの多様化も著しく、製造企業においては多種多様な製品をごく短納期で投入し続ける必要がある。このように、環境負荷低減と高効率生産の同時実現は、多くの企業にとって重要な課題の一つとなっている。精密板金加工生産システムもその一つとして挙げられる。精密板金加工は、原材料である金属板から部品を切り出し、曲げや溶接、表面処理、塗装などの工程を経て最終製品が完成する。一枚の金属板から複数の部品を切り出すと、切り出した後の端材は廃棄されるため、材料のムダを削減するためには、切り出す際の金属板内の部品の配置を最適化する必要がある。一方で、切り出された部品は複数の工程を経て最終製品となるが、製品ごとに納期や必要な工程が異なるため、適切にスケジューリングを行わなければ納期遅れが生じる。

金属板から部品を切り出す際のレイアウトを決定する作業はネスティングと呼ばれ、後工程の作業の処理順序を決定する作業をスケジューリングと呼ぶが、ネスティング、スケジューリングともに、部品の数が増えるにつれて組合せ数が爆発的に増大する求解困難な最適化問題である。さらに、精密板金加工のネスティング・スケジューリングでは、部品がどの金属板から切り出されるかはネスティングに依存し、切り出された部品がどう処理されるかはスケジューリングに依存するため、ネスティングとスケジューリングは密接に関係し、時にトレードオフ関係になる。そのため、原材料の無駄の削減をしつつ納期遵守生産を行うためには、ネスティングとスケジューリングを同時に考慮する必要がある。ところが、ともに求解困難な最適化問題であるがゆえ、これらを同時に考慮した研究例はほとんどない。このように、互いに関連しあう異なる二つの問題を一つの枠組みの中で解決し、全体最適化を図る手法やフレームワークを開発することが求められている。

### 2. 研究の目的

本研究の先行研究では、精密板金加工におけるネスティング・スケジューリング問題に対し、進化型手法の一つである共進化遺伝的アルゴリズムを用いた手法を提案した(文献1)。この手法では、ネスティングおよびスケジューリングの解をそれぞれ個体とみなして、それらが互いに影響を与えながら進化することで最適化していく。個体同士が影響を与え合うメカニズムを実現するために、現実には実行不可能となるような解は淘汰される仕組みを用いた。これにより解の進化の効率が悪化するという問題が生じた。また、本来ネスティングとスケジューリングは異なる最適化問題であるが、これらを統一した枠組みの中で取り扱うために、最適化の目的関数の単一化を試みた。すなわち、ネスティングコスト、スケジューリングコストを定義し、それらの重み付け和を最小化することを目的とした。両者の間にはトレードオフ関係が成立する場合があるため、そのような場合には、パレート解を得ることが困難になるという問題も生じた。

本研究では、これらの課題を解決するために、先行研究の共進化遺伝的アルゴリズムの拡張および島モデルの分散遺伝的アルゴリズムに発想を得た異環境適応型遺伝的アルゴリズムを新たに提案する。また、精密板金加工のネスティング・スケジューリングは問題設定に大きく依存することが分かっている。どのような問題にも網羅的に有効な手法を確立することは難しく、問題に応じて適切な手法を選択する必要性が生じる。そこで、我々がこれまで提案してきた手法を含む、種々の多目的最適化手法について、その求解性能評価するための評価指標を検討し、問題設定に適した手法の選択の指針を与えることを目的とする。

### 3. 研究の方法

#### (1) 共進化遺伝的アルゴリズムの拡張

先行研究では、ネスティングとスケジューリングの個体が互いに影響を与え合うメカニズムを実現するために、それぞれの個体を、他方の個体の遺伝子配列を並び替えることで生成していた。しかし、この方法では、並び替え方によって実行不可能な解が生じるため、並び替え操作を限定することで実行不可能解の発生を回避していた。そのことで、解の探索領域が狭まることとなり、十分に探索が進まない問題が生じていた。さらに、この手法では、ネスティングとスケジューリングを交互に進化させながら解を探索していくため、両者がトレードオフ関係にある場合、パレート解を得ることが困難であるという問題もあった。そこで、これを解決するために、各個体の遺伝子表現はそのままに、互いに独立して個体を生成するように変更した。これに伴い、ネスティングとスケジューリングがそれぞれ同時に個体を持つことになり、互いが独立して進化していくことで、多様な探索が行えるようになる。一方で、互いが独立して進化することで、関連性を考慮することが困難になる。精密板金加工のネスティング・スケジューリング問題では、ネスティングの解とスケジューリングの解のペアにより総合評価値が計算されるため、ペアをどう作るかで解の良し悪しが変わってくる。そのため、このペアの作成法を工夫することで、互いの関連性を考慮した求解が可能になる。本研究では、スケジューリングおよびネスティングの各個体の評価値を基準とした複数のペア生成法を提案した。

#### (2) 異環境適応型遺伝的アルゴリズムの提案

異環境適応型遺伝的アルゴリズムでは、先行研究の共進化遺伝的アルゴリズムの考え方を応用し、ネスティングやスケジューリングを環境とみなし、個体集団が各環境下で進化すると同時

に、一定間隔で各環境間を行き来することで互いに影響を与え合う様を模擬した遺伝的アルゴリズムを提案した。提案する異環境適応型遺伝的アルゴリズムでは、あらかじめディスパッチングルールや BL 法(文献 2)により作成したスケジューリングの評価値の高い解とネスティングの評価値の高い解をもとに、2 つの異なる初期個体群を作成し、それぞれスケジューリング環境、ネスティング環境とした。そしてスケジューリング環境下では、評価値であるコストのうち、スケジューリングに係るコストに対する重みを大きく、ネスティング環境下ではネスティングに係るコストに対する重みを大きくして、各環境下で個体を進化させるようにした。ただしこのままでは、パレート解の両端付近の解しか探索できないため、一定世代ごとに各個体群内の一部の個体を交換することとした。これにより他方の評価値も考慮した解が探索されるようになり、多様な解を探索することが可能になる。さらに、パレート解中央付近での探索を効率よく行うために、従来の共進化遺伝的アルゴリズムを用いて求めた解をもとに作成した初期個体群を用意し、これを中間環境とみなして、ネスティング、スケジューリング、中間の 3 環境間で、同様の手順で探索を行うよう手法を拡張した。これにより、より精度の高いパレート解集合を求めることができるようになる。

### (3) 最適化手法の選択指針の確立

最適化手法の選択指針の確立では、これまで提案してきたネスティング・スケジューリングの同時最適化のための手法について、問題設定に応じた適切な手法の選択のために、手法の評価法について検討した。精密板金加工のネスティング・スケジューリング問題は、最終製品の種類やその部品構成、部品の大きさ、製造する数量、納期などが毎回異なるため、最適な部品の切り出し方、加工順序が毎回変わる。また、切り出し方と加工順序の関係がトレードオフになる場合もあれば、両方の評価値を共に良くすることができる場合もある。精密板金加工生産システムの意思決定者は、ネスティングとスケジューリングを最適化しようとする場合、例えば多様な解候補の中から解を選択したいこともある。過去の決定案に近い解を望むこともある。このように決定の考え方が異なる意思決定者が、どの最適化手法を使用すべきか選択の指針を示す必要がある。そこで本研究では、ネスティング・スケジューリング問題の解について、解の精度および解の多様性の観点から、我々が提案した共進化遺伝的アルゴリズム、異環境適応型遺伝的アルゴリズム、多目的最適化の代表的な手法である NSGA- について、解の幅広さ(文献 3)と HyperVolume(文献 4)を比較評価した。

## 4. 研究成果

### (1) 共進化遺伝的アルゴリズムの拡張の成果

共進化遺伝的アルゴリズムにおいて、精密板金加工のネスティング・スケジューリングの評価を行う際、スケジューリングの個体とネスティングの個体のペアを生成する必要があり、本研究では複数のペア生成法を提案した。それらの手法について、オブジェクト指向言語 Smalltalk を用いて開発したネスティング・スケジューリング問題のための共進化遺伝的アルゴリズムのプロトタイプシステムを用いて、数値実験を行った。結果の一例を図 1 に示す。共に高評価値同士のペアの場合、解の精度は高いが非常に狭い範囲でパレート解集合が得られた(図 1(b)参照)のに対し、高評価値と低評価値のペアの場合、幅広いパレート解を得ることができた(図 1(a)参照)。

### (2) 異環境適応型遺伝的アルゴリズムの成果

異環境適応型遺伝的アルゴリズムでは、複数環境下で個別に個体が進化するメカニズムを実現した。この効果を検証するために、スケジューリングおよびネスティングに優れた初期個体群を生成し進化させる実験を行った。さらに、両者の中間的な特性を持つ初期個体を導入し、2 つの環境で個々に進化させる実験も行った。結果を図 2 に示す。図より、各環境下で評価値をよくする方向に探索が進んでいるため、2 環境の場合(図 2(a)参照)パレート解集合の両端部付近に解が集まり、3 環境ではパレート解集合中央付近にも精度の高い解が求められていることがわかる(図 2(b)参照)。

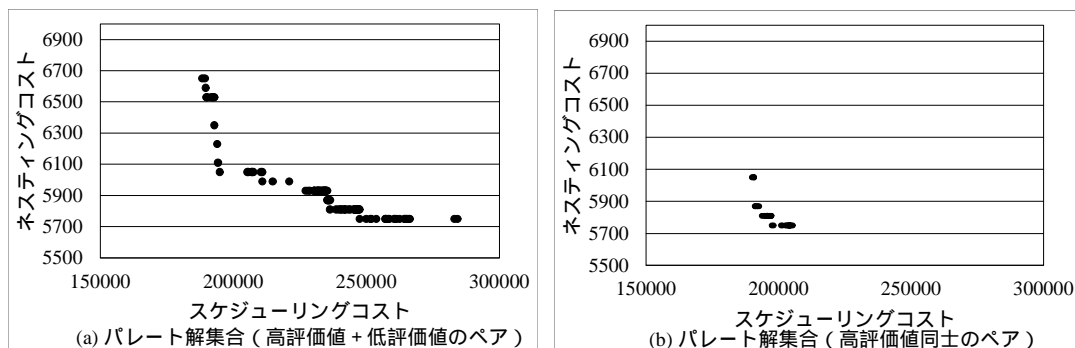
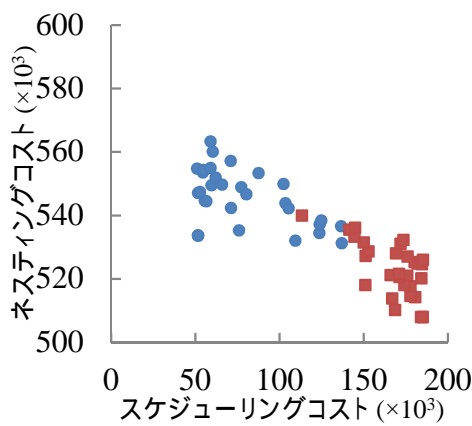
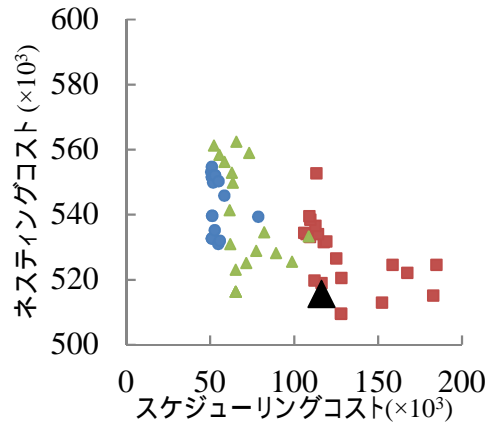


図 1 ペア生成法の違いによる結果の比較



(a) 2環境の実験結果



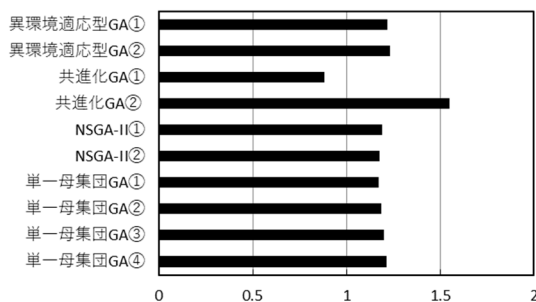
(b) 3環境の実験結果

図2 異環境適応型遺伝的アルゴリズムによる求解結果

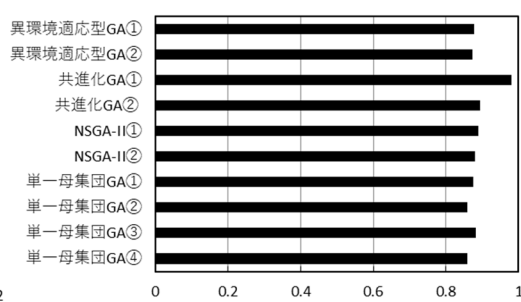
(各プロットの色の違いは、環境の違いを表す)

(3) 最適化手法の選択指針の確立の成果

本研究では、精密板金加工のネスティング・スケジューリング問題について、ネスティングコストおよびスケジューリングコストの最小化問題として取り扱った。コストが小さいほど精度が高い解が得られたといえ、パレート解集合が広範囲に広がっているほど多様な解が得られたことになる。これら进行评估するために、HyperVolumeと幅広さという評価指標の下で、共進化遺伝的アルゴリズム、異環境適応型遺伝的アルゴリズム、NSGA-II、単一母集団の遺伝的アルゴリズムを比較した。結果を図3に示す。この図より、手法ごとに得られるパレート解が異なることが分かる。図1や図2に示したパレート解集合の分布や、図3の幅広さ(図3(a)参照)およびHyperVolume(図3(b)参照)より、多様な解が欲しい場合には幅広さの値が大きい手法を、特定の領域で解が欲しい場合には幅広さが小さくHyperVolumeの大きい手法を選択すればよいことがわかる。このことより、意思決定者の選考基準のもと、適切な手法を選択することで、解の探索領域を制御できることが示唆された。



(a) 幅広さ



(b) HyperVolume

図3 幅広さおよびHyperVolumeの比較

< 引用文献 >

阪口龍彦, 松本昂樹, 清水良明, 内山直樹, 精密板金加工のための共進化遺伝的アルゴリズムを用いたネスティング・スケジューリングの研究, 日本機械学会生産システム部門研究発表講演会 2016 講演論文集, pp.61-62, 2016.

Baker, B. S., Coffman, Jr E. G. and Rivest, R. L., Orthogonal packing in two dimensions, SIAM Journal on Computing, No. 9, pp.846-855, 1980.

廣安知之, 三木光範, 西岡雅史, 多目的遺伝的アルゴリズムのための分散協力型スキームの検討, 情報処理学会研究報告数理モデル化と問題解決(MPS), 63, pp.101-104, 2007.

塚本実孝, 坂根悠治, 能島裕介, 石淵久生, Indicatorに基づく進化型多目的最適化アルゴリズムへの HyperVolume 近似手法の適用, システム制御情報学会論文誌, 23(8), pp. 165-177, 2010.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Sakaguchi Tatsuhiko, Matsumoto Kohki, Uchiyama Naoki	4. 巻 12
2. 論文標題 Nesting Scheduling in Sheet Metal Processing Based on Coevolutionary Genetic Algorithm in Different Environments	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal of Automation Technology	6. 最初と最後の頁 730 ~ 738
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20965/ijat.2018.p0730	査読の有無 有
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 Sakaguchi Tatsuhiko, Ishii Ryo, Shirasuna Miyori, Uchiyama Naoki	4. 巻 33
2. 論文標題 Environment-Adaptive Genetic Algorithm-based Nesting Scheduling for Sheet-Metal Processing	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Transactions of the Institute of Systems, Control and Information Engineers	6. 最初と最後の頁 39 ~ 48
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5687/iscie.33.39	査読の有無 有
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4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Tatsuhiko Sakaguchi, Ryo Ishii, Naoki Uchiyama
2. 発表標題 Environment-adaptive GA based Nesting Scheduling for Sheet Metal Processing
3. 学会等名 2018 International Symposium on Flexible Autometaion (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 守屋光崇, 阪口龍彦, 内山直樹
2. 発表標題 矩形平板積上問題に対するヒューリスティック解法の研究
3. 学会等名 日本機械学会2018年度年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tatsuhiko Sakaguchi, Kohki Matsumoto, Naoki Uchiyama
2. 発表標題 Coevolutionary Genetic Algorithm Based Nesting Scheduling for Sheet Metal Processing
3. 学会等名 The 9th Leading Edge Manufacturing in 21st Century (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Tatsuhiko Sakaguchi, Takuto Sugawara, Miyori Shirasuna, Naoki Uchiyama
2. 発表標題 Multi-Objective Optimization for Nesting Scheduling Problem in Sheet Metal Processing through Coevolutionary Genetic Algorithm
3. 学会等名 International Conference on Design and Concurrent Engineering 2019 & Manufacturing Systems Conference 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019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