

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 9 日現在

機関番号：13904

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K17950

研究課題名(和文) 精密板金加工のための共進化的アプローチによる設計と計画の同時最適化

研究課題名(英文) Co-evolutionary optimization of operation planning and scheduling for sheet metal processing

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) 1,600,000円

研究成果の概要(和文)：精密板金加工生産システムを対象に、作業設計である金属板の加工レイアウトの最適化と、スケジュールの最適化を同時に行うために、共進化遺伝的アルゴリズムによる同時最適化アルゴリズムを構築した。まずスケジュールリングの精度を向上させるために部品構成を考慮した適応度の設計、加工工程ごとに適したスケジュールリング法を融合させるハイブリッド解法を提案した。次に作業設計とスケジュールリングを統合的に扱うためにコストによる評価関数を設計し、効率よい共進化プロセスのための遺伝子のグループ化に基づく共進化アルゴリズムを提案した。アルゴリズムの有効性を数値実験により検証し、コスト削減が期待できることを示した。

研究成果の概要(英文)：We propose an integrated method of nesting and scheduling based on the coevolutionary genetic algorithm for sheet metal processing. First of all, we improve our previous scheduling method by applying the new fitness function which consider the construction of parts and total flow time. Moreover, we propose a hybrid scheduling method by using the genetic algorithm and dispatching rule. Finally, we develop a coevolutionary genetic algorithm. In this algorithm, individuals are evaluated by the cost function, and the genetic operations are conducted based on the grouped gene. We validated the effectiveness of our algorithm by the computational experiments.

研究分野：生産スケジュールリング

キーワード：共進化遺伝的アルゴリズム ネスティング スケジュールリング 精密板金加工

### 1. 研究開始当初の背景

近年の製造業では、持続可能社会実現に向けた環境負荷低減と同時に、製品ライフサイクルの短縮化に対応した迅速生産が求められている。素材加工型産業においては、これを実現するために、原材料の無駄を削減することで環境に配慮しながら、適切な生産マネジメントを行うことで納期遵守生産を行う等の取り組みが不可欠となる。本研究が対象とする精密板金加工生産システムを例にとると、原材料の無駄を削減するためには、作業設計において加工レイアウトを最適化する、納期遵守生産を行うためには、適切なスケジューリングを行う、などが必要となる。しかし、加工レイアウトの最適化やスケジュールの最適化は、本来その対象も目的も異なるため、異なる部門で個別に行われるのが一般的である。ところが、加工レイアウトとその後の加工工程の間には関連性があり、かつそれらがトレードオフ関係となる場合もあるため、総合的な観点からものづくりの最適化を行うためには、両者を同時に考慮していく必要がある。

精密板金加工生産システムにおいては、加工レイアウトの最適化もスケジュールの最適化も、組合せ最適化問題の一つであり、国内外で多くの研究例がある。しかし、両者を同時に扱った場合は、組合せ数が膨大となるため最適化が困難となり、繊維産業を対象とした研究例(文献1)があるものの数少ない。研究代表者らは、精密板金加工生産システムを対象に、作業設計段階でスケジューリングの評価指標を組み込み加工レイアウトを決定する手法(文献2)や、作業設計より前に生産スケジューリングを実施し、その結果を作業設計にフィードバックする手法(文献3)を提案してきた。しかしこれらの手法は各々の最適化の結果をフィードバックするものであり、直列的な最適化であったため、互いに与え合う影響を考慮しながら全体最適化を行うという観点からは不十分であった。これを解決するためには、両者を同時・並行に扱える並列的な最適化手法が必要である。

### 2. 研究の目的

本研究が対象とする精密板金加工生産システムでは、作業設計として、原材料である金属板の最適な加工レイアウトを決定する必要がある。その良し悪しにより原材料の無駄をどれだけ削減できるかが左右される。この加工レイアウトの決定は、切出し・詰込み問題の一種であり、国内外で数多くの研究例がある。しかし作業設計単独の最適化では、一枚の金属板に複数の異なる製品が割り付けられることで大量の中間在庫が発生し生産効率が悪化するなどの問題が生じる。一方で、スケジュールの最適化もOR分野をはじめとして数多くの研究例があるが、スケジュール単独の最適化では、同じ原材料を使用する製品が複数枚に分けて割り付けられるこ

とで資源効率が悪化するなどの問題が生じる。従って「少ない原材料」で「短納期化」を実現するには作業設計とスケジューリングを同時・並行に実施する必要があるが、どちらも組合せ数が膨大で実用的な時間内に最適解を求めることが難しい組合せ最適化問題であり、これらを同時に考慮した研究例は少ない。そこで本研究では、これを解決するために、研究代表者の先行研究で提案した直列的な手法を発展させ、作業設計とスケジューリングを、共進化遺伝的アルゴリズム(以下、共進化GAと呼ぶ)を用いて同時・並行に最適化する手法を提案することを目的とする。

### 3. 研究の方法

本研究の最大の特徴は作業設計とスケジューリングを同時・並行に最適化することであり、その手段として共進化GAを用いるが、これを実現するためには、以下の2つの項目を達成する必要がある。

精密板金加工生産システムのスケジューリング問題の解法の改良  
共進化GAのアルゴリズムの提案と実装

のスケジューリング問題の解法の改良に対して、二通りのアプローチを試みた。一つは、精密板金加工生産システムの工程の特徴を考慮して、遺伝的アルゴリズムにおける適応度計算を工夫する方法である。もう一つは、抜き工程のスケジュールを考慮したハイブリッド解法である。先行研究では問題の単純化のため、精密板金加工の第1工程である抜き工程の処理順序は固定していたが、現実的条件下でスケジューリングを行うために、抜き工程とそれ以降の工程に適した解法を融合するものである。まず前者について詳細を以下に説明する。

精密板金加工の生産工程は一般的に、抜き、曲げ、溶接、組立で構成されており、すべての部品が同一の工程順序で処理される。抜き工程では一枚の金属板から複数の製品の部品が同時に切り出されるが、続く曲げ工程では、部品一つ一つに対して処理が行われる。その後の溶接、組立工程では、複数の部品を組み合わせて処理を行うため、必要な部品がすべて揃わなければ処理を開始できない。そのため、部品を一つ一つ扱う曲げ工程の前後で部品の滞留が生じやすい。従って精密板金加工生産システムのスケジューリング問題を効率よく解くためには、製品を構成する部品の組み合わせを考慮した上で部品の滞留時間をコントロールする必要がある。特に、スケジューリングの目的が総納期遅れ最小化である場合、溶接・組立工程での待ち時間を減らすことが重要となる。研究代表者の先行研究ではGAを用いてスケジューリングを行っていたが、その適応度は総納期遅れのみを考えていた。そこで本研究では、部品の構

成や滞留時間を考慮した新たな適応度を設計した。具体的には、以下に示す3つの評価値に従い適応度を計算する方法を提案した。

(i) 遺伝子間距離

GAにおける遺伝子間の距離はスケジュールにおける作業順序と対応するため、同一製品の部品間の距離を算出したものを適応度とする方法。

(ii) 部品滞留時間

部品ごとの滞留時間を適応度とする方法。

(iii) 製品滞留時間

製品単位での滞留時間を適応度とする方法。

これらの各評価値と総納期遅れを正規化して足し合わせた値を適応度とするGAを実装した。

次に、後者のハイブリッド解法について説明する。精密板金加工の第1工程である抜き工程は、金属板から部品を切り出す処理を行うが、一枚の金属板に複数の部品が配置されており、その配置は加工レイアウト設計により決定される。先行研究では原則として部品の加工順に加工レイアウトを決定していた。従って、抜き工程における金属板の加工も、加工レイアウトが決まった順に行うのが合理的である。しかし、材料歩留まりの向上のため加工順の遅い部品でも早く金属板に配置することがあった。この場合、加工レイアウトが決まった順に金属板を処理するのが必ずしも最適ではない。そこで、本研究では、最初にルールにより部品の加工順序を決定した後、それに従い加工レイアウトを決定し、次にGAを用いて抜き工程の加工順序を最適化し、最後にもう一度ルールにより後工程のスケジュールを調整するハイブリッド解法を提案した。

一方、もう一つの達成目標である共進化GAのアルゴリズムの提案と実装に対しては、作業設計とスケジューリングの評価関数をコストにより統一化した後、加工レイアウトを表す個体とスケジュールを表す個体が共進化する際にスムーズな継承が可能となるように、遺伝子のグループ化に基づく求解アルゴリズムを提案した。

作業設計およびスケジューリングに共進化GAを適用する場合、各々の個体が互いに影響を与え合いながら進化することが重要である。本研究では、両者で共通の遺伝子表現を用いる(部品名を遺伝子とする)ことで互いの結果をフィードバックできるよう工夫した。しかし、加工レイアウトの個体は金属板に対する部品の割り付け順位を、スケジューリングの個体は部品の加工順序を表しており、これらの間にはトレードオフが存在するため、遺伝的操作により遺伝子配列が大きく変化した場合、致死遺伝子となったり、それまでの進化を阻害したりする可能性がある。そこで本研究では、遺伝子配列を複数

のグループに分け、グループを基にスケジューリングから加工レイアウト、加工レイアウトからスケジューリングへの移行を行うよう工夫した。図1は加工レイアウトとスケジュールの関係を示している。図1のように、1枚の金属板に割り付けられた部品(図のNesting results)は、抜き工程においてまとめて処理される。その後、曲げ工程では部品が別々に処理される。ネ스팅遺伝子に遺伝的操作を行う場合、例えば部品1の一部が2枚目の金属板に割り付けられるように変更されると、曲げ工程の処理では開始時刻が遅れるため、スケジュールが悪化する。同様に、スケジューリング遺伝子に対して遺伝的操作を行う場合、ネ스팅結果を悪化させる恐れがある。これを回避するために、スケジューリング結果に基づきネ스팅GAを行う際には、抜き工程の個々の処理の加工時間内に曲げ工程を開始する部品を一つのグループとする。一方、ネ스팅結果に基づきスケジューリングGAを行う際には、同じ板材に割り付けられている部品を一つのグループとする。スケジューリングからネ스팅、あるいはネ스팅からスケジューリングに移行する際は、このグループ内の遺伝子をランダムに並び替えることで、致死遺伝子が発生せず、かつそれまでの進化を阻害しない。

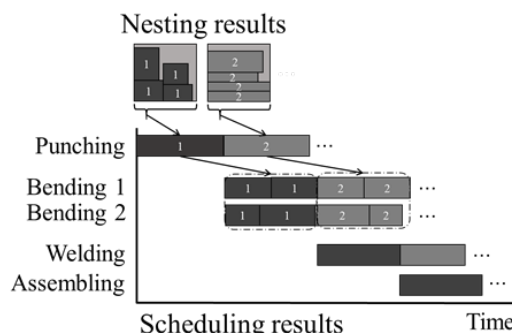


図1 加工レイアウトとスケジュールの関係

#### 4. 研究成果

提案した手法の有効性を検証するために、オブジェクト指向プログラミング言語Smalltalkを用いて精密板金加工生産システム用作業設計・スケジューリング統合化システムのプロトタイプを開発し、計算機による数値実験を行った。計算機実験は、研究の方法で説明した精密板金加工生産システムのスケジューリング問題の解法の改良、および共進化GAのアルゴリズムの提案と実装の各々に対して、実際の精密板金加工生産システムの加工工程を参考に複数のケーススタディを作成して行った。

スケジューリング問題の解法の改良における、部品の構成や滞留時間を考慮した新たな適応度の効果を検証するために、総納期遅れ最小化をスケジューリングの目的関数とする比較実験を行った。提案する適応度と、総納期遅れを適応度とした従来法を比較した。

表1の通り，従来の適応度よりも，提案した評価値を加えた新しい適応度の方が，総納期遅れを短縮できたケースが3ケースあった．しかし，多くの場合，従来法と提案法は同等の結果となり，悪化するケースもあることから，問題の特徴に応じて適応度を適切に選択する必要があるといえる．ただし，適応度を変更するという比較的簡便に適用可能な方法でも効果が表れたため，相対的に有効であるといえる．

次に，ハイブリッド解法の有効性を検証した．抜き工程のスケジュールを固定する従来法と，抜き工程のスケジュールをGAで最適化する提案法，GAによる抜き工程のスケジュールに加えてルールによる再スケジュールリングも行う提案法の総納期遅れを比較した．結果を図2に示す．結果より，この問題においても提案法は従来法より総納期遅れを平均で7.2%短縮することができた．

最後に，共進化GAによる最適化の効果を検証した．ルールを用いてスケジュールリングを行う従来法と提案法との間で総コストを比較した．結果を図3に示す．先行手法により得られたコストを100%とした場合，提案手法ではネ스팅コストを2.2~11.9%，スケジュールリングコストを2.1~3.6%，総コストを2.6~3.9%改善できた．

以上のように，本研究では，精密板金加工生産システムにおいて作業設計とスケジュールリングを同時最適化する統合化システムの開発を行い，以下の成果を得た．

- (1) 精密板金加工生産システムの生産工程において，溶接および組立工程ではまとめて部品を処理しなければいけない多段工程スケジュールリング問題であることに着目し，部品構成および滞留時間に基づく適応度を設計，遺伝的アルゴリズムに実装した．その結果，わずかながら目的関数値の向上が見られた．
- (2) 先行研究では考慮していなかった，第1工程である抜き工程の加工順序の最適化を行うために，ルールと遺伝的アルゴリズムを融合したハイブリッド解法を提案した．その結果，目的関数値である総納期遅れを約7%改善することができた．
- (3) 共進化遺伝的アルゴリズムを用いて作業設計とスケジュールリングを同時・並行に最適化する手法を提案した．作業設計とスケジュールリングをコストにより評価することで評価関数を統一化した上で，効率的に共進化させるために遺伝子をグループ化するアルゴリズムを構築した．その結果，総コストを約3%改善できた．

表1 提案した適応度の効果の検証結果

適応度	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5
従来	26281	34005	26458	18112	40800
距離	27701	40765	<b>24573</b>	18737	44318
滞留 (部品)	<b>24785</b>	<b>32182</b>	28240	18122	45126
滞留 (製品)	<b>25769</b>	34506	29633	20334	42821

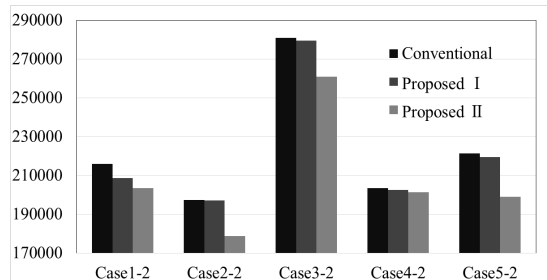


図2 ハイブリッド解法の効果の検証結果 (総納期遅れについて従来法と比較)

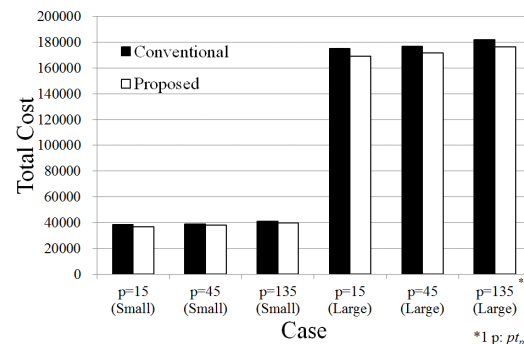


図3 共進化GAの効果の検証 (総コストについて従来法と比較)

< 引用文献 >

Chryssolouris, G., Papakostas, N., Mourtzis, D., "A decision-making approach for nesting scheduling: a textile case", International Journal of Production Research, Vol. 38, No. 17, pp.4555-4564, (2000).

Sakaguchi, T., Ohtani, H., Shimizu, Y., "Genetic Algorithm Based Nesting Method with Considering Schedule for Sheet Metal Processing", Proc. Of 2014 ISCI/ASME International Symposium on Flexible Automation, #2014-29L, (2014).

Sakaguchi, T., Murakami, T., Shimizu, Y., "Integrated Operation Planning and Scheduling System for Sheet Metal Processing", Proc. of Asia Pacific Industrial Engineering and Management System, #1009, (2013).

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 1 件)

- (1) 阪口龍彦, 田中達也, 清水良明, 内山直樹, 精密板金加工のスケジューリング問題のためのハイブリッド解法, 日本機械学会論文集, Vol.83, No.848, p.16-00333 (2017-4). 査読有, DOI: 10.1299/transjsme.16-00333

〔学会発表〕(計 6 件)

- (1) 阪口龍彦, 守屋光崇, 内山直樹, “精密板金加工のためのハイブリッド型スケジューリング手法の研究”, 日本機械学会生産システム部門研究発表講演会 2017 講演論文集, pp.55-56, (2017 年 3 月 16 日, さいたま市 埼玉大学).
- (2) 石井涼, 阪口龍彦, 内山直樹, “精密板金加工のための部品構成を考慮した遺伝的アルゴリズムによるスケジューリング”, スケジューリング・シンポジウム 2016, pp.105-108, (2016 年 9 月 25 日, 大阪市 大阪府立大学 I-site なんば).
- (3) Tatsuhiko Sakaguchi, Tatsuya Tanaka, Yoshiaki Shimizu, Naoki Uchiyama, “A Scheduling Method Using Genetic Algorithm and Dispatching Rule for Sheet Metal Processing”, Proc. of 2016 International Symposium on Flexible Automation, pp.198-201 (Aug. 1-3, 2016, Cleveland USA). DOI: 10.1109/ISFA.2016.7790160
- (4) 阪口龍彦, 田中達也, 清水良明, 内山直樹, “精密板金加工のためのディスパッチングルールと遺伝的アルゴリズムを用いたスケジューリング手法の研究”, 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.59-60, (2016 年 3 月 14 日, 野田市 東京理科大学).
- (5) 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 年 3 月 14 日, 野田市 東京理科大学).
- (6) 阪口龍彦, 田中達也, 清水良明, 内山直樹, “精密板金加工生産システムのためのディスパッチングルールを用いたスケジューリング手法の研究”, 第 58 回自動制御連合講演会講演論文集, 1E2-4, CD-ROM, (2015 年 11 月 14 日, 神戸市 神戸大学).

〔図書〕(計 1 件)

- (1) Tatsuhiko Sakaguchi, Hayato Ohtani, Yoshiaki Shimizu, “A Heuristic Approach for Integrated Nesting and

Scheduling in Sheet Metal Processing”, Advances in Production Management Systems: Innovative Production Management Towards Sustainable Growth (Ed. By Shigeki Umeda, Masaru Nakano, Hajime Mizuyama, Hironori Hibino, Dimitris Kiristsis, Gregor von Cieminski), Part I, Springer, pp.226-234 (2015).

〔その他〕

ホームページ等

<https://www.tut.ac.jp/university/faculty/me/638.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

阪口 龍彦 (SAKAGUCHI, Tatsuhiko)

豊橋技術科学大学・工学研究科・准教授

研究者番号: 00403303