

令和 5 年 6 月 8 日現在

機関番号：24405

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2022

課題番号：18K04614

研究課題名（和文）不確実な生産環境下における遅延リスク回避のためのロバストスケジューリング法の開発

研究課題名（英文）A study on robust scheduling method to reduce delay risk under uncertainty

研究代表者

森澤 和子（Morizawa, Kazuko）

大阪公立大学・大学院工学研究科 ・教授

研究者番号：60220050

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,500,000円

研究成果の概要（和文）：ものづくりの現場では、生産の実施段階で発生する機械故障などの不確実事象への対処が大きな課題となっている。本研究課題では、生産期間内のスケジュールの変更は行わないことを前提に、機械故障の影響を受けにくいロバスト（頑健）なスケジュールを計画段階で策定するためのスケジューリング法の開発に取り組んだ。各ジョブの作業余裕に着目してスケジュールのロバスト性評価指標をフローショップを対象に提案し、これがジョブショップにも適用可能なものであることを確認した。提案指標を目的関数の一つとして用いた多目的スケジューリングによりロバスト性が高いスケジュールを選定できることを数値実験により示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

製造業はリードタイム短縮・短納期化を目指して非常にタイトなスケジュールの下でものづくりを行っている。このため、生産期間中に機械故障に代表される不確実事象が発生し、事前に綿密に計画されたスケジュールに即した生産が実施できない事態に陥ると、一転して大幅な加工遅延を起こしてしまう場合が多い。本研究課題は、生産性が高く、かつ不確実事象による加工遅延を引き起こしにくい頑健なスケジュールのもとで生産を行うことを推奨するロバストスケジューリングにおいて課題となっていた、スケジュールの頑健性をより正確に評価するための指標を提案したものである。

研究成果の概要（英文）： Unexpected events, such as machine breakdowns, occur on a daily basis in production plants and are perceived as inevitable. If a machine breakdown occurs while production operations are being implemented based on a carefully planned schedule, there is a high possibility that the resulting small work delay will propagate, increasing the risk of major delays.

In this research, assuming that rescheduling will not be performed even if an unexpected event occurs, we addressed the development of a scheduling method to obtain a robust schedule that is expected to be less affected by work delays at the planning stage. First, for flow-shop, we proposed an index to evaluate robustness of a schedule that focuses on the slack of each job, and then, extended it to be applicable to job-shop. Numerical experiments show that the proposed index is useful for generating robust schedules.

研究分野：経営工学

キーワード：スケジューリング 機械故障 遅延リスク ロバスト性

1. 研究開始当初の背景

(1) 生産スケジューリングに関する近年の研究では、生産の実施段階で発生する機械故障などの不確実事象への対処が課題の一つとなっている。これまでの研究における不確実事象への対処法は、機械故障などの事象が発生したときに条件に合わせて適時リスケジューリングを行うリアクティブスケジューリングと、そのような事象が発生しても可能な限りリスケジューリングは行わないという方針のもと、不確実事象による影響を受けにくいと期待されるロバストなスケジュールを計画段階で作成しておくロバストスケジューリングの2つに大別できる。機械故障が発生する都度リスケジューリングを行えば、状況に応じた効率的なスケジュールが得られる可能性は高い。しかし実際の生産現場で不確実事象が発生するたびに生産スケジュールを変更すると、それに伴う加工順序や加工経路の変更により現場が混乱してさらなる遅延を誘発する懸念があった。

(2) ロバストスケジューリングに関する研究は、1990年代半ばから盛んに行われてきた。それらは次の4通りに分類できる。(i)不確実事象の発生の有無に関していくつかのシナリオを事前に想定し、各シナリオの生起確率を考慮して求めた評価基準の期待値が最適となるスケジュールをロバストな解とみなすもの、(ii) 想定したいくつかのシナリオのもとで最大成分最小化の考えに基づき求めたスケジュールをロバストな解とするもの、(iii) さまざまな不確実事象を想定したシミュレーション実験を行い、各スケジュールの評価基準値を比較してロバストな解を求めるもの、(iv) ロバスト性評価指標の算定式を定義し、指標値が最も良いスケジュールをロバストな解とするもの、である。起こりうるすべての事象をシナリオとして事前に想定するのは困難であること、同様にシミュレーション実験もあらゆる場合に対して実施するのは膨大な時間と労力を要することから、本研究課題では(iv)の立場にたつてロバストスケジューリングに取り組むことにした。この立場でのロバストスケジューリングに関しても国内外で複数の研究が行われてきたが、各スケジュールがどの程度のロバスト性を有するのかを判定するための評価指標の確立が難しく、現場での必要性が高まる中で成果が待たれている状況であった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、不確実事象が発生しても原則としてリスケジューリングは行わないという方針のもと、さまざまな生産システムにおいて不確実事象による影響を受けにくいと期待される頑健(ロバスト)なスケジュールを計画段階で作成することができる汎用性の高いロバストスケジューリング法を開発することである。不確実事象として機械故障や資材の調達遅れのような計画実施に遅延をもたらす事象を想定し、計画対象ジョブの加工完了時刻の遅延に関してロバストなスケジュールをあらかじめ策定することを目指す。

3. 研究の方法

(1) 上記の目的を達成するために、まずスケジュールのロバスト性を適切に数値化するロバスト性評価指標を新たに定義する。従来の研究におけるロバスト性評価指標値は、各機械でのジョブ間遊休に着目し、各機械におけるジョブ間遊休の総和と生産システム全体における各機械の相対的負荷量を考慮して定めたものがほとんどであり、その精度は十分とはいえない。

本研究では、ジョブ間遊休を不確実事象による加工遅延の影響を吸収するためのバッファ(緩衝)としてとらえ、吸収可能な加工遅延時間(の期待値)の大きさをスケジュールのロバスト性を評価することにした。その際、遊休時間がいつ、どの工程で生じているかによって吸収可能な加工遅延の量が異なることに留意し、対象とする生産システムの特性を考慮して各遊休時間に対する評価値を正しく算定することが重要であると考えた。また、スケジューリングの計画期間は生産システムが安定し適切に保守作業も行われている偶発故障期であると仮定した。偶発故障期においては機械の故障率を一定とみなすことができ、故障発生からの平均修復時間を既知とすることも過去のデータを利用すれば可能であると考えられる。さらに、故障率が実用上十分に小さい値(たとえば3%未満)であった場合、複数の機械が同時に故障する確率は無視しうるほど小さい。このような信頼性工学の理論もふまえて、各遊休時間が吸収可能な加工遅延時間に着目したスケジュールのロバスト性評価指標値の算定式を導出し、その有効性を数値実験により検証した。

(2) 不確実事象に対するスケジュールのロバスト性と標準評価尺度(regular measure)と呼ばれる加工完了時刻ベースのスケジュールの評価基準が競合関係にあることは明らかであり、スケジュールの策定の際には両者のトレードオフについて考慮する必要がある。スケジュールのロバスト性とメイクスパンや納期遅れなどの生産性に関する評価基準の相対的重要度をどのように定めるべきかについて、多目的最適化の観点から検討し、両者を同時に考慮する2目的スケジューリング法を提案した。

4. 研究成果

(1) 作業遅延の原因となる機械故障などの不確実事象に対するスケジュールのロバスト性の評価値の算出式として、本研究の当初は式(1)を検討していた。

$$RM^{prev}(s) = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m \left(ft_{ji} \times \frac{i}{m} \times \frac{c_{ji}}{C_{max}} \times \frac{P_{ji}}{PT_i} \right), \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (1)$$

ここで、 ft_{ji} , $j = 1, 2, \dots, n$, $i = 1, 2, \dots, m$, はスケジュール s のジョブ j の第 i 工程における作業の加工完了直後の遊休時間、 c_{ji} , $j = 1, 2, \dots, n$, $i = 1, 2, \dots, m$, はジョブ j の第 i 工程における作業の加工完了時刻、 C_{max} はスケジュール s のメイクスパン、 P_{ji} , $j = 1, 2, \dots, n$, $i = 1, 2, \dots, m$, はスケジュール s においてジョブ j の前に順序づけられているジョブの第 i 工程での加工時間の和、 PT_i , $i = 1, 2, \dots, m$, は第 i 工程における総加工時間である。式(1)では、遊休時間 ft_{ji} に対して、不確実事象が発生した工程や発生時刻が遅いほど加工遅延の吸収効果が大いと考えて重み付けを行っている。

この指標の妥当性を検証するために、OR-Library (<http://people.brunel.ac.uk/~mastjjb/jeb/orlib/flowshopinfo.html>)内の $n/m/F/F_{max}$ のベンチマーク問題 60 問に対して故障発生シミュレーションを行った。その際、すべての機械の故障率は等しいと仮定し、故障時間(=平均修復期間: MTTR)はジョブの各機械での加工時間の平均値 p_{ave} 、およびその 2 倍の $2p_{ave}$ の 2 通りを設定した。故障発生時刻は、ロバスト性を考慮せずに F_{max} 最小化を評価基準として求めた近似スケジュールのメイクスパンの 20、40、60、80%の時点とし、工程 i , $i = 1, 2, \dots, m$, の機械がその 1 台のみ故障したときにスケジュール s のメイクスパンにどの程度の遅延が生じるかを調べた。式(1)の根拠となった考えが正しければ、機械故障の発生した工程や発生時刻が早ければ早いほど、故障による加工遅延はその後の遊休に吸収されやすくメイクスパンの遅延が起りにくいという結果が得られるはずだが、実験結果からはそのような傾向は見られなかった。このことから、個々のジョブ間遊休とその発生時点に着目した式(1)のロバスト性評価指標値によりスケジュールのロバスト性を適切に評価することはできないことがわかった。

(2) (1)の結果をふまえ、各ジョブのフリーフロートとスケジュールとしてのトータルフロートに着目した新たなロバスト性評価指標値を提案した。フロートとは、プロジェクトスケジューリングの分野で提唱されてきた概念で、トータルフロートはプロジェクト全体の完了日を遅らせることなく各アクティビティの開始を最早開始日から遅らせることのできる期間長さのことである。これは、アクティビティの持つ時間的余裕と言い換えることができる。一方、フリーフロートは、直後に続くアクティビティの最早開始日を遅らせることなく当該アクティビティの開始を遅らせることのできる期間長さのことである。生産スケジューリング問題では、プロジェクト全体の完了日はメイクスパン、アクティビティは各ジョブに相当し、フリーフロートが 0 となるジョブはクリティカルジョブとなる。クリティカルジョブの加工開始時刻が遅れるとメイクスパンは必ず悪化する。また、あるスケジュールにおいて、任意の機械でクリティカルジョブの加工がすべて完了した後にその機械にジョブ間遊休があっても、それらがシステム内のいずれかの機械で発生した故障による作業遅延を吸収するバッファとして機能することはない。これらのことから、ロバスト性評価指標値の算出において、ジョブ間遊休ではなくフロートに着目することが妥当であると考えた。以上の考察に基づき、フロートに着目した新たなロバスト性評価指標値として以下の式(2)を提案した。

$$RM(s) = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m (s'_{ji} - s_{ji}), \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

ここで、 s_{ji} と s'_{ji} , $j=1, 2, \dots, n$, $i=1, 2, \dots, m$, はそれぞれスケジュール s のジョブ j の第 i 工程における最早加工開始可能時刻と最遅加工開始可能時刻である。 s_{ji} はスケジューリングにより決定された各機械でのジョブ加工順序に従って各ジョブを時間軸の前方から左詰めで割り当てて作成したガントチャートにおける各ジョブの各工程での加工開始時刻を意味する。 s'_{ji} はその左詰めのスケジュールのジョブ加工順序はそのまま、最終ジョブの加工完了時刻が左詰めスケジュールのメイクスパンと等しくなるように各ジョブの各工程での加工開始を時間軸の後方に右詰めて作成したガントチャートにおける各ジョブの各工程での加工開始時刻である。 $s'_{ji} - s_{ji}$ が各ジョブのフリーフロートであり、 $RM(s)$ の値が大きいスケジュールほどロバスト性が高いと評価する。

式(1)の指標に対して行ったものと同様の故障発生シミュレーションを式(2)の指標についても実施した。図 1 は $n=50$, $m=10$ のベンチマーク問題について 100 回の故障発生シミュレーションを行ったときの各スケジュールのロバスト性評価指標値と遅延時間のメイクスパン比の関係を示したものである。両者の相関係数は-0.864 であり強い負の相関があることが示された。問題規模が $n=20, 50, 100$, $m = 5, 10, 20$ の各場合についても同様のシミュレーションを行ったところ、相関係数の値は-0.730 ~ -0.924 であった。これらの結果から、式(2)のロバスト性評価指標の妥当性が確認できた。なお、この指標はその特性から、フローショップ型の生産システムだけでなくジョブショップ型の生産システムにおけるスケジュールのロバスト性評価にもそのまま適用することができる。OR-Library 内の $n/m/J/F_{max}$ のベンチマーク問題のうち、 $n=15, m=15$ の

問題 10 問に対する故障発生シミュレーションでは、ロバスト性評価指標値と遅延時間のメイクスパン比の間の相関係数は-0.827 であった。ジョブショップにおける提案指標の有効性に関しては、今後、より大規模な問題例についても検証をおこなったうえで判断する必要がある。

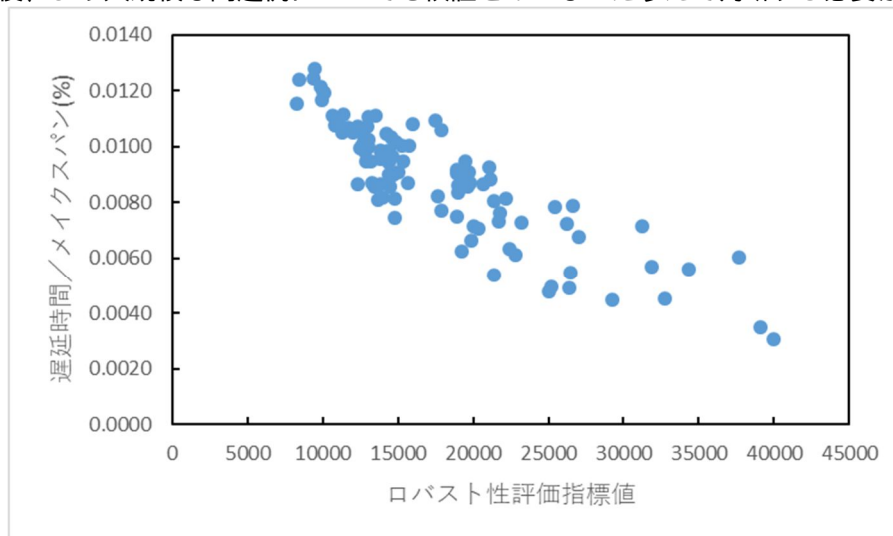


図 1 ロバスト性評価指標と故障による遅延時間のメイクスパン比の相関関係
(問題規模 $n = 50$, $m = 10$, $MTTR = \bar{p}$, 相関係数: -0.864)

(3) スケジュールのロバスト性と生産性は一般に競合関係にあり、不確実事象の発生が避けられない現状においては、両者のバランスが取れたスケジュールで生産を実施することが真の生産性向上につながると考えられる。そこで、ロバスト性評価指標とスケジューリングの標準評価尺度の代表例であるメイクスパンの最適化を同時に考慮した多目的ロバストスケジューリング法を提案した。提案法では、メタヒューリスティックの一つである Shuffled Frog Leaping アルゴリズム (SFL) を用いてメイクスパン最小化の単一目的スケジューリング問題とメイクスパン最小化とロバスト性評価指標の最大化の 2 目的スケジューリング問題に対する近似解を求める。SFL は群探索タイプのアルゴリズムであり、複数個の非劣解を求める必要がある多目的最適化に適していると考えた。本研究では、SFL の枠組みに各グループの最良解に対する挿入近傍操作を追加して探索の intensification(集中化)を高めることで一層効率よく近似解を生成することを目指した。その具体的な手順を以下に示す。

Step1: 解(スケジュール)をランダムに P 個生成し、各解の目的関数値を算出する

Step2: 生成した解を目的関数値の昇順に並べ替える

Step3: P 個の解を目的関数値が最小のものから順に M 個のグループに分ける

Step4: 各グループ内の最良解に対して挿入近傍操作を行い、より良い目的関数値をもつ解が見つかった場合はグループ内最良解をその解に更新する

Step5: グループごとの局所探索を行い、グループ内の最悪解よりも良い目的関数値をもつ解が見つかった場合は最悪解をその解により更新する。これによりグループ内の最悪解の改善を行う。(2 目的スケジューリングの場合は、生成された解が非劣解であれば非劣解集合に保存する)

Step6: グループ分けを解除し、 P 個の解を目的関数値の昇順に並べ替える

Step7: 終了条件を満たしていれば、Step8 へ。満たしていなければ Step3 に戻る

Step8: 現在の最良解 (または非劣解集合) を提案法による解とする

提案法では、まず上記の SFL アルゴリズムを用いてメイクスパン最小化の単一目的スケジューリング問題を解く。その過程で得られたメイクスパンの最良値と最悪値を BM と WM 、ロバスト性評価指標値の最良値と最悪値を BR と WR とする。次に、メイクスパン最小化とロバスト性指標値最大化の 2 目的問題の非劣解集合を、以下の式(3)を目的関数とする単一目的最小化問題を重み係数 α の値を変えて繰り返し解くことで求める。

$$EM(s) = \alpha \times \frac{M(s) - BM}{WM - BM} + (1 - \alpha) \times (-1) \times \frac{R(s) - BR}{WR - BR} \quad (3)$$

ここで、 $M(s)$ と $R(s)$ はスケジュール s のメイクスパンとロバスト性評価指標値である。数値実験では重み係数 α を $0 \leq \alpha \leq 1$ の範囲で 0.1 刻みで変化させた。

$n=50$, $m=10$ の $n/m/F/F_{\max}$ のベンチマーク問題を提案法で解いて得られた近似非劣解集合を図 2 に示す。図 2 より提案法は多様な(近似)非劣解を探索できていることがわかる。なお、生産現場において、不測の事態に備えてメイクスパンの値が最良値より大幅に悪いスケジュールを採用するとは考えにくいことから、メイクスパンの値が式(3)で $\alpha=1$ として得られた近似解の

メイクスパンの 1.2 倍以上のスケジュールは近似非劣解集合から除外することとした。

一般的なスケジューリング問題においては、メイクスパンの値が等しいスケジュールは複数存在するが、それらのなかでロバスト性評価指標値が最も大きいスケジュールが(近似)非劣解として求められている。現場の意思決定者は、これらの非劣解のなかから生産性(メイクスパン)と計画からの遅延リスク(ロバスト性)のトレードオフを考慮して、適切なメイクスパンとロバスト性指標値を持つスケジュールを選択することで、より円滑な生産活動を実施できると考えられる。

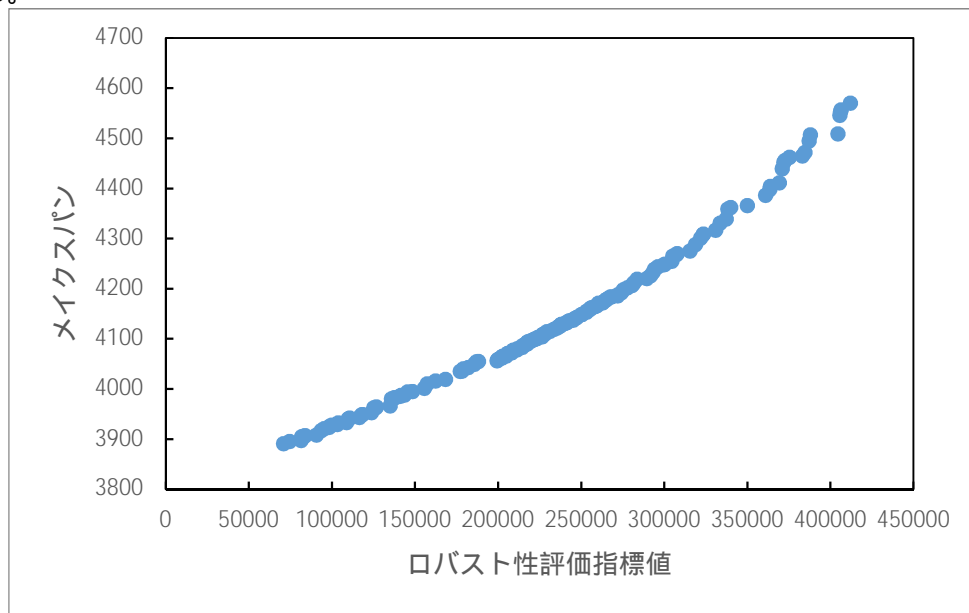


図2 ベンチマーク問題 ta060 に対して提案法で得られた近似非劣解集合

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 掛戸寛伸、森澤和子
2. 発表標題 Shuffled Frog Leapingを用いた メイクスパン最小化とロバスト性評価指標最大化の2目的スケジューリング
3. 学会等名 日本経営工学会2020年春季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kazuki Matsuo, Kazuko Morizawa, Naoki Hirabayashi
2. 発表標題 Heuristics for Minimizing Makespan in Machining-Assembly Flowshop with Flexible Flow Lines at a Machining Stage
3. 学会等名 19th Asia Pacific Industrial Engineering and Management Systems (国際学会)
4. 発表年 2018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
研究分担者	平林 直樹 (Hirabayashi Naoki) (80199091)	大阪公立大学・大学院情報学研究科 准教授 (24405)	

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
---------	---------