

令和 5 年 6 月 25 日現在

機関番号：34406

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K13815

研究課題名（和文）不確実性を含む生産システムに対する研究

研究課題名（英文）Research on production systems with uncertainty

研究代表者

杉川 智（SUGIKAWA, Satoshi）

大阪工業大学・情報科学部・講師

研究者番号：70710094

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,100,000円

研究成果の概要（和文）：不確実性を含む生産システムに対して静的な条件下において、形式的に記述することは可能となった。すなわち、事象の発生時間に注目して発生時間よりスケジューリング可能であると考えたとスケジュールに対する割当問題として考えることができる。これらのアイデアをまとめて形式的に記述することができた。

また不確実性を含む生産システムに対しても新しい解法を提案することができた。これも不確定事象の発生に注目して、そのときにスケジューリングを行うべきかどうかの判断を行うモデルとすることで実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

不確実性を含む生産システムの形式化は、その学術的意義は高い。形式化することで静的ではあるが、不確定事象を含む生産システムの最適解と最適値を求めることができる。最適解からどうすればよくなったのかを知ることができ、新しい解法につながる可能性がある。

またこれまでの解法に対しても、解を比べることでどうすれば改善することができるのかを指し示すことができる。さらには最適値より、それらの解法を評価することが可能となる。以上のことから本研究は高い学術的な価値があるといえる。

研究成果の概要（英文）：It is now possible to formally describe a production system with uncertainty under static conditions. In other words, if we focus on the occurrence time of an event and consider that the event can be scheduled from the occurrence time, we can think of the problem as an allocation problem for the schedule. These ideas can now be formally described.

We were also able to propose a new solution method for production systems with uncertainties. This was also realized by using a model that pays attention to the occurrence of uncertain events and makes a decision on whether or not scheduling should be performed at that time.

研究分野：システム工学

キーワード：経営 生産システム

1. 研究開始当初の背景

近年の労働者人口の低下、そのため生産の現場では、より革新的なスケジューリングが求められている。情報技術の発達により生産現場での情報がリアルタイムで把握することが可能となりつつあり、ドイツでは、「インダストリー4.0」として国家が挙げて製造業技術の革新に取り組んでいる。我が国においては、サイバー空間とフィジカル（現実）空間を高度に融合させたシステムにより、経済発展と社会的課題の解決を両立することを旨とする「Society5.0」が提唱させている。

このように生産システムに対する期待も年々高まっている。生産システムにおいて最大の課題の一つは、スケジュール作成時点ではわからない不確実な事象である。この不確実な事象に対して様々な研究が成されているが未だすべての生産システムに対する汎用的なモデルはない。

2. 研究の目的

日々の生産プロセスにおいては、計画段階で立案した当初のスケジュールどおりに進捗することは少なく、特急オーダー（ジョブ）や納期変更、さらには生産設備のトラブルといった不確定な事象に対して、即応的かつ柔軟に対応することが必要となる。このような状況下でのスケジューリングはダイナミックスケジューリングと呼ばれる。

ダイナミックスケジューリングに対する代表的な方法に、リアルタイムスケジューリング、リアクティブスケジューリング、プロアクティブスケジューリングがある。リアクティブスケジューリングは不確定事象の発生した事後に対するスケジューリング方法である。リアルタイムスケジューリングは、ディスパッチングルールを連続的に適用するスケジューリング方法であり、適用が難しい生産環境も存在する。プロアクティブスケジューリングは、事前に対応することに主眼をおいたスケジューリング方法であるが、すべての事象に対して事前に対応することは難しく、事後に対応することも多い。以上のことから生産現場においてリアクティブスケジューリングが最も現実的な方法であることがわかる。

リアクティブスケジューリングに関して、これまでに様々なアプローチで研究がされている。しかしながら、リアクティブスケジューリングの研究は、限定的あるいは個別な状況の下でスケジュール生成についての手続き的な話題がほとんどであり、より汎用的な研究が少ない。このことは、リアクティブスケジューリングはより生産現場より現実的なスケジューリング方法であることが大きく影響している。そのため、本申請では、リアクティブスケジューリングに対する、より汎用的なリアクティブスケジューリングのモデルの構築を目的とする。

3. 研究の方法

数理モデルを構築して、そのモデルが最適解を示していることを確認する。基本的な考え方としては、不確定な事象はある計画を立てる段階においては不確定なだけであり、発生時刻以後は確定した事象として扱うことが可能となる。また、発生した事象は、その事象の発生時刻よりスケジューリングを行うことが可能となる。

仕事を J としてスケジュールを π としたときの基本的なアイデアを図1に示す。リアクティブスケジューリング全体を最適化することからこの提案モデルを本研究では、全体最適化モデルと呼ぶ。

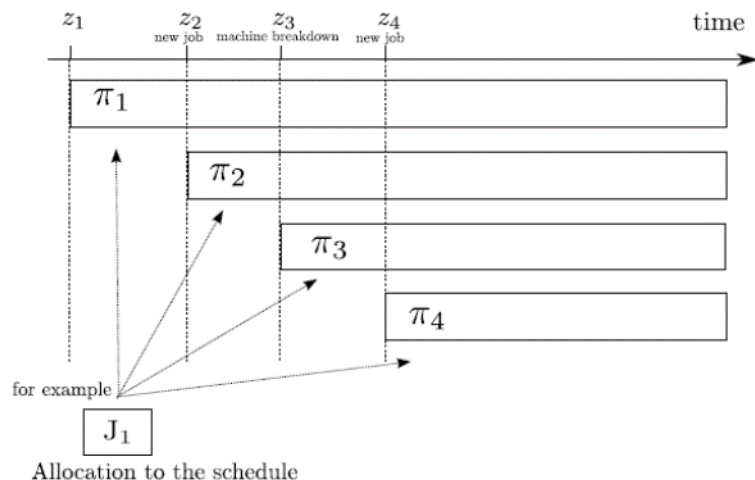


図 1 基本的なアイデア

4. 研究成果

基本的な考え方に基づいて、具体的にリアクティブスケジューリングの全体最適化モデルを定義する。\$N^M\$ 台の機械 \$M_i\$ (\$i = 1, \dots, N^M\$) 上で処理（あるいは対処）する機械故障や仕事をまとめて仕事とし、\$N^0\$ 個の仕事 \$J_j\$ (\$j = 1, \dots, N^0\$) とする。最大の再スケジューリングを \$N^S\$ とする \$s\$ 回目に生成されたスケジュールを \$\pi_s\$ (\$s = 1, \dots, N^S\$) とする。仕事は発生時刻（到着時刻）(\$a_k\$), 処理時間 (\$p_k\$) といった従来のスケジューリング問題の仕事と同じの基本属性を加えて、観測時刻 (\$z_k\$) という基本属性を持ち、スケジュールは開始可能時間 (\$v_s\$) といった属性を持つ。

以下に制約条件と決定変数を図 1 - 5 にそれぞれの数式を示す。

- 仕事の処理開始時刻: \$c_k (\ge 0)\$
- 機械への割り当て: \$x_{ki}\$

$$x_{ki} = \begin{cases} 1 & (O_k \text{ を } M_i \text{ に割り当てる}) \\ 0 & (\text{それ以外}) \end{cases}$$

- 仕事の順序: \$u_{kk'}

$$u_{kk'} = \begin{cases} 1 & (O_k \text{ が } O_{k'} \text{ に先行する}) \\ 0 & (O_{k'} \text{ が } O_k \text{ に先行する}) \end{cases}$$

- スケジュールへの割り当て: \$y_{ks}\$

$$y_{ks} = \begin{cases} 1 & (O_k \text{ を } \pi_s \text{ に割り当てる}) \\ 0 & (\text{それ以外}) \end{cases}$$

図 2 決定変数

仕事

スケジュールの実行可能性と仕事間に存在する処理の先行関係を保障するために、

$$c_k \leq e_{k'} + M(3 - u_{kk'} - x_{ki} - x_{k'i}) \\ (k \neq k'; k, k' = 1, 2, \dots, N^0; \\ i = 1, 2, \dots, N^M)$$

$$u_{kk'} + u_{k'k} = 1 \\ (k \neq k'; k, k' = 1, 2, \dots, N^0)$$

$$a_k \leq e_k \quad (k = 1, 2, \dots, N^0)$$

$$c_k \leq e_{k'} \\ (k \neq k'; k = 1, 2, \dots, N^0; k' \in \tilde{O}_k)$$

を満足する必要がある。ただし、\$\tilde{O}_k\$ は \$O_k\$ の先に処理すべき仕事の集合を表し、\$M\$ は十分に大きい正の定数とする。生起後ただちに処理を開始せねばならない仕事（機械故障）がある場合、それらの集合を \$\mathcal{O}^b\$ とし、

$$c_k = a_k \quad (k \in \mathcal{O}^b)$$

なる制約を付加する。

図 4 仕事に関する制約

全体最適化モデルでは、評価関数はコストとする。コストは従来のスケジューリングモデルの枠組みで用いられる評価関数 \$f_1\$ に加え、スケジューリング修正の総和 \$f_2\$ とする。\$f_2\$ は以下の式で表現されるものである。

$$f_2(y_{ks}) = \sum_s \max_K (y_{ks})$$

全体最適化モデルの評価関数 \$f\$ は、重みパラメータ \$w_1, w_2\$ を用いた、\$f_1, f_2\$ の加重和

$$f = w_1 f_1(c_k) + w_2 f_2(y_{ks}) \quad (w_1, w_2 > 0)$$

で表すこととする。以上の数式をまとめることで、静的なスケジューリング問題として捉えることが可能となる。

簡単な例題を用いて全体最適化モデルの妥当性と有効性を確認する。評価関数 \$f\$ の \$f_1\$ を完了

機械

事象 \$O_k\$ を処理可能な機械の集合を \$\mathcal{M}_k\$ とする。\$O_k\$ は \$\mathcal{M}_k\$ 内のいずれか一つの機械で必ず処理されるとする。すなわち、

$$c_k = e_k + p_k \quad (k = 1, 2, \dots, N^0)$$

$$x_{ki} = 0 \quad (k = 1, 2, \dots, N^0; i \notin \mathcal{M}_k)$$

$$\sum_i x_{ki} = 1 \\ (k = 1, 2, \dots, N^0; i = 1, 2, \dots, N^M)$$

である。ただし、\$e_k\$ は \$O_k\$ の処理完了時刻を表す。

図 3 機械制約

スケジュール割り当て

スケジュール割り当てに関する制約条件を以下に示す。

$$\sum_s y_{ks} = 1 \\ (k = 1, 2, \dots, N^0; s = 1, 2, \dots, N^S)$$

$$z_k \leq v_s + M(1 - y_{ks}) \\ (k = 1, 2, \dots, N^0; s = 1, 2, \dots, N^S)$$

$$v_s \leq e_k + M(1 - y_{ks}) \\ (k = 1, 2, \dots, N^0; s = 1, 2, \dots, N^S)$$

$$e_k < e_{k'} + M(2 - y_{ks} - y_{k's'}) \\ (k \neq k', k, k' = 1, 2, \dots, N^0; \\ s = 1, 2, \dots, N^S - 1, s' = s + 1)$$

各事象は、自身の観測時刻以降に存在する一つのスケジュールに属さなければならない。これに相当する制約式が (2) 式である。上の (2)、(2) および (2) 式は、スケジュール割り当て上での仕事の開始時刻に関する制約を表す。なお、\$M\$ は十分に大きい正の定数である。

図 5 スケジュール割当に関する制約

時間軸、 f_2 をスケジューリング頻度とし、不確定的事象として、スケジュール実行過程での新規仕事の到着と機械故障を考える。

まずモデルの特徴を確認するために静的な最適解と $f_2 = 0$ とした場合を比較する。それぞれの比較を図6に示す。2つのモデルの解が一致していることがわかる。このことはこのモデルが最適解を導出する可能性を示している。

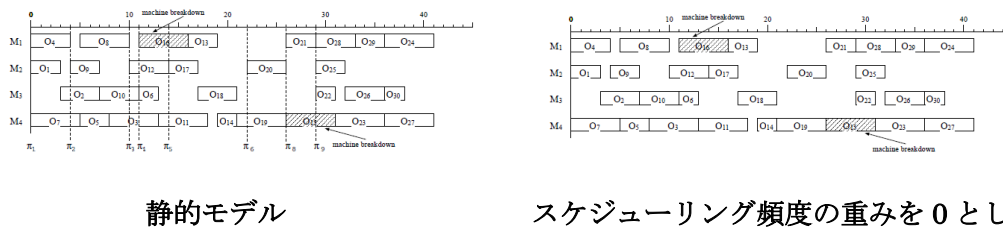


図6 静的モデルとスケジューリング頻度に対する重みを0にした場合の比較

次にモデル有用性を比べるためにスケジューリングのタイミングに注目して定期駆動形と事象駆動の2種類と比べるものとする。また定期駆動するタイミングと事象駆動するタイミングもそれぞれ変えてシミュレーションを行う。結果を表1にまとめる。左の計算例は、仕事の数を14とし例Aとする、右の計算例は仕事の数を30とし例Bとする。

表1 提案モデルの妥当性の確認

| | | 例A | | 例B | | | |
|--------|--|------------|--------------------|-----|------------------------|-----------|----------|
| | | 最適化 | 定期駆動 | 最適化 | 定期駆動 | 事象駆動 | |
| | | - | $\Delta t = 10$ 20 | - | $\Delta t = 5, 10, 15$ | QS = 1, 2 | |
| | | $w_2 = 5$ | | | | | |
| f | | 339 | 363 373 | 683 | 746 748 | 744 | 712 727 |
| Gap(%) | | - | 7.1 10.0 | - | 9.2 9.5 | 8.9 | 4.2 6.4 |
| f_1 | | 279 | 303 333 | 643 | 701 718 | 719 | 667 697 |
| f_2 | | 3 | 2 4 | 8 | 9 6 | 5 | 9 6 |
| | | $w_2 = 20$ | | | | | |
| f | | 377 | 423 413 | 795 | 881 838 | 819 | 847 817 |
| Gap(%) | | - | 12.2 9.5 | - | 10.8 5.4 | 3.0 | 6.5 2.8 |
| f_1 | | 317 | 303 333 | 655 | 701 718 | 719 | 667 697 |
| f_2 | | 2 | 2 4 | 7 | 9 6 | 5 | 9 6 |
| | | $w_2 = 30$ | | | | | |
| f | | 377 | 423 413 | 850 | 971 898 | 869 | 937 877 |
| Gap(%) | | - | 12.2 9.5 | - | 14.2 5.6 | 2.2 | 10.2 3.2 |
| f_1 | | 317 | 303 333 | 700 | 701 718 | 719 | 667 697 |
| f_2 | | 2 | 2 4 | 5 | 9 6 | 5 | 9 6 |

この例A, 例B の解を評価すると w_2 が小さい場合は事象駆動型が定期型に比べて全体最適化モデルからのGap が相対的に小さい。特に例A において事象駆動型が有効であり $w_2 = 20$ においては $QS = 4$ が最適解を導出したことがわかる。このことは、例A は不確定要因が新規仕事の到着のみである小規模な例題であり、そのため QS を契機とする事象駆動型が有効であったと思われる。しかしながら、より規模の大きい例B では事象駆動型は例B においてはGap が大きくなり、改善の余地が残っていることがわかる。また w_2 の値が大きくなると二つの解法差は小さくなり、むしろ定期型の方が良い場合もある。

以上のことから提案したモデルが最適解であることと、それらがある程度学術的に有用であることが確認できた。またこれらの成果の発表は遅れており、2023年のThe SICE Annual Conference 2023で発表する。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計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 S. Sugikawa, Y. Inoue, |
| 2. 発表標題 Modeling of Reactive Scheduling Considering Schedule Change Cost, |
| 3. 学会等名 SICE Annual Conference 2019 (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---------------------------------------|
| 1. 発表者名 杉川 智, 井上雄紀 |
| 2. 発表標題 ダイナミックスケジューリング形式化のための基礎的研究 |
| 3. 学会等名 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会2019 |
| 4. 発表年 2019年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

| |
|---|
| Satoshi Sugikawa, "Fundamental Study of Mathematical Models for Reactive Scheduling", The SICE Annual Conference 2023. にて発表予定である. |
|---|

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 |
|---------|---------|
|---------|---------|