2305 フレキシブル・フローショップを対象とした 分散協調型スケジューリング手法による ロット編成とスケジューリングの同時最適化

Optimization of Lotsizing and Scheduling for Flexible Flowshop with Distributed Cooperative Approach

貝原俊也・神戸大学
Toshiya Kaihara, Kobe University

藤井信忠・神戸大学
Nobutada Fujii, Kobe University

○西林聡・神戸大学
Satoshi Nishibayashi, Kobe University

藤井進・上智大学
Susumu Fujii, Sophia University

梅田豊裕・(株) 神戸製鋼所
Toyohiro Umeda, KOBE STEEL Ltd.

論文要旨

In our study, we propose a distributed cooperative approach for flexible flowshop scheduling. This method breaks up the system into sub-schedulers, and they integrate as a single system. Since each scheduler needs only local information, it is effective to apply the large production system. Our target model includes lot formation problem, so we apply the method that each sub-scheduler optimizes not only own local schedule but lotsizing to the model. We compare our method with conventional distributed cooperative method, and show the effectiveness of the proposed concept.

Key Words: distributed cooperative scheduling method, lotsizing and scheduling, flexible flowshop problems

1. はじめに

近年の製造業において企業は多様な顧客のニーズに迅速に対応する必要があり、そのため生産システムは大規模化かつ複雑化している。生産スケジューリング問題を考える上で、そのようなシステムにおいてすべての情報を一元管理して最適化を行うのは非常に困難かつ非効率である。そこで有効な手法が分散型のスケジューリング手法であり、その一つがラグランジュ分解・調整法である。この手法では原問題を複数の部分問題に分解し、それらの解の導出と調整を行うことによって準最適な実行可能解を高速に導出する方法である。本研究はこの手法をバッチ処理によるロット編成問題を有するフレキシブル・フローショップ問題に適用し、部分問題の求解ごとにロット編成を含めて最適化する手法を提案し、有効性を検証する。

2. 対象モデル

本研究で対象とするモデルはバッチ処理を有するフレキシブル・フローショップ型の生産システムであり、工程数が K で各工程には M_k 台の機械が存在するモデルである。また機械ごとに処理できるロット編成ジョブ数の上限が異なるため、各工程では機械への配分を考慮しながらロット編成を行う必要がある。またモデルの特徴を以下に示す。

- ・各工程間には無限のバッファが存在する
- ・各工程の前のバッファでロット編成が行われる
- ・同じ品種を1つのロットに編成する
- ・各工程には複数の機械が存在する
- ・各機械は同時に1つのロットを処理できる
- ・各機械は1つのロットに編成できるジョブ数が異なる

3. 定式化

3-1 原問題

本研究では前章で説明したモデルを対象に、ワーク数を J 、工程数を K 、ワーク j の納期を D_j 、納期遅れを T_j として総納期遅れ最小化問題 P0 を以下のように定式化する。

$$\text{P0: } \min \sum_j T_j \quad (1)$$

$$\text{where: } T_j = \max \left\{ 0, (s_j^K + \sum_i PT_j^K - D_j) \right\} \quad (2)$$

$$\text{s.t. } s_j^{k+1} \geq s_j^k + PT_j^k \quad (3)$$

$$s_j^k \geq 0 \quad (4)$$

ここで s_j^k はワーク j の工程 k における処理開始時間、 PT_j^k は処理時間を示している。また(2)式は納期遅れ、(3)式は工程間の作業の先行関係制約、(4)式は処理開始時間非負制約である。本来はこの他にもロット編成の制約式が存在するが、紙面の制約上詳細は省く。

3-2 部分問題への分割

問題 P0 を工程ごとの部分問題に分割するため、ワーク j に対して工程ごとの仮納期にあたる最遅開始時間 d_j^k を以下の通り定める[1]。

$$d_j^k = D_j - \sum_{k'=k} PT_j^{k'} \quad (5)$$

さらに d_j^k からの遅れを T_j^k (納期遅れペナルティ) とする。

$$T_j^k = \max \{ 0, (s_j^k - d_j^k) \} \quad (6)$$

よって T_j^k を用いて原問題 P0 を以下の問題 P1 で近似する。

$$\text{P1: } \min \sum_k \sum_j T_j^k \quad (7)$$

$$\text{s.t. } (3), (4)$$

これにより目的関数は工程ごとに加法的になり、(3)式の先行関係制約をラグランジュ緩和すると以下の緩和問題 RP1 が生成される。

$$\text{RP1: } \min \sum_k \sum_j T_j^k + \sum_{k=1}^{K-1} \sum_j \{ \lambda_j^k (s_j^k + PT_j^k - s_j^{k+1}) \} \quad (8)$$

$$\text{s.t. } (4)$$

また $k=0, K$ において $\lambda_j^k=0$ とすると上記の緩和問題 RP1 の目的関数(8)式は以下のように工程 k ごとの目的関数に分解できる。

$$\min \sum_j T_j^k + \sum_j \{ (\lambda_j^k - \lambda_j^{k-1}) s_j^k + PT_j^k \} \quad (9)$$

また各工程において機械は並列に存在するので、工程ごとの納期は以下のように工程における機械ごとの納期遅れの和である。

$$\sum_j T_j^k = \sum_j \sum_{m_k} T_{j,m_k}^k \quad (10)$$

したがって各工程で解くべき問題 RP1-k は以下のように示される。

$$\text{RP1-k: } \min \sum_j \sum_{m_k} T_{j,m_k}^k + \sum_j \{(\lambda_j^k - \lambda_j^{k-1})s_j^k + PT_j^k\} \quad (11)$$

s.t. (4)

実際には上記の双対問題を解くこととなるので、ラグランジュ乗数 λ_j^k を固定した時の(11)式の最小化とラグランジュ乗数の調整を繰り返せばよいこととなる。ただし上記の問題をそのまま解いた場合、 $(\lambda_j^k - \lambda_j^{k-1})$ の値に解が依存することにより解が振動することが報告されており、その対策として近似ラグランジュ緩和法[1]を適用する。この場合目的関数に解を収束させるペナルティ項を加える。よって式(11)の目的関数は以下の形となる。

$$\begin{aligned} \text{RP1'-k: } \min \sum_j \sum_{m_k} T_{j,m_k}^k + \sum_j \{(\lambda_j^k - \lambda_j^{k-1})s_j^k + PT_j^k\} \\ + \sum_j \max\{0, \rho_j^k(s_j^k + PT_j^k - s_j^{k+1})\} \\ + \sum_j \max\{0, \rho_j^{k-1}(s_j^{k-1} + PT_j^{k-1} - s_j^k)\} \end{aligned} \quad (12)$$

また決定すべきことはジョブのロットへの編成、ロットの機械への割り当て、そしてロットの処理開始時間に基づいて決まるジョブの処理開始時間である。続いて各部分問題の解法と、 λ 、 ρ の更新方法を説明する。

4. 最適化アルゴリズム

最適化アルゴリズムはすでに提案されているSA(Simulated Annealing)法を用いた手法[2]を適用した。本研究においては開始時間の決定にDP(Dynamic Programming)法を用いた点異なる。アルゴリズムの流れは以下の通りである。

STEP1 ロット編成アルゴリズム(a)を用いたSA法による部分問題の最適化手法(b)で各工程の解を導出

STEP2 各工程の解に基づいて λ 、 ρ を更新(c)

STEP3 実行可能解が導出するまで **STEP1**～**STEP2** を繰り返す

また以下に(a), (b), (c)の詳細を示す。

ロット編成・再編成アルゴリズム(a)

処理機械を処理時間が平準化する形で決定する。続いてワークの順序列に対して、同じ種類のジョブが連続するか、機械のロットサイズの上限に達するまで、同じロットにジョブを編成する。ジョブの種類が異なるか、機械上限を超えた場合、そのジョブからは新たなロットとしてすべてのジョブがロットに編成されるまで上記を繰り返す。

SA法による部分問題の最適化(b)

STEP1 ロット編成法(a)により初期ロットを決定

STEP2 近傍操作 1 および 2 をランダムで行う

近傍操作 1…ジョブ順序列を挿入近傍により新たな順序列を決定し、それに対してロット編成法(a)を適用

近傍操作 2…ランダムで機械を選択し、機械のロット順序列を挿入近傍により新たな順序列を決定

STEP3 DP法に基づいてロットの処理開始時間を決定

STEP4 SA法の基準に基づいて解の採否を決定する。

STEP5 規定回数 **STEP2**～**STEP4** を繰り返す

なお **STEP4** 解の受け入れ基準は以下の式に基づく。

$$\begin{aligned} x = \text{初期解あるいは暫定解}, y = N(x) \text{ (xの近傍)}, \\ \delta = f(y) - f(x); \text{のとき} \end{aligned}$$

$$\text{if } \exp\left(\frac{-\delta}{T}\right) \geq \text{random}[0,1) \text{ then } x := y;$$

なお x は初期解または暫定解を示し、 y は x から作られる近傍を示している。また δ は暫定解の x と近傍の y の値の差を表しており、それを基に(12)式の判定を行う。実験では受け入れ確率、つまり $\exp(-\delta/T)$ の値が初期温度において 0.8 程度になるよう T の値を決定した。

各パラメータの更新法(c)

ラグランジュ乗数 λ の更新は劣勾配法に基づく。またペナルティ関数の重みである ρ の更新は単調非減少とする。

5. 数値実験と考察

ジョブ数 25, 計画対象期間 2 日, λ , ρ の更新幅は 0.005, 協調終了回数 30 回として実験を行った。比較に用いた手法は本研究においてこれまで提案してきた階層型手法である[3]。この場合ロット編成アルゴリズム(a)に基づいて編成したロットを固定としてラグランジュ分解・調整法を適用する。Fig.2 に先行関係制約違反数。Table.1 に目的関数値および計算時間の 10 データの平均値による比較を示す。

Fig.2: Transition of Violation

Table.1: Value of Objective Function

Method	Ave.	Min.	Max.	S.D	CPU time (sec.)
Conventional Method	9120	6366	10965	1688	199
Proposed Method	6018	4973	7812	1313	6730

Fig.2 の結果から提案手法においてラグランジュ乗数による調整が働き、実行可能解に収束していることがわかる。また Table.1 の結果から提案手法が階層型の手法よりも目的関数値において良い計算結果を示している。計算時間に関して提案手法が階層型の手法に比べて大きいのは、部分問題最適化においてイタレーション毎にロット編成の探索と DP 法を行っているからで、それによって探索空間が広まり DP 法と SA 法の計算コストがかかることからである。

6. まとめ

今回の実験においてはこれまで提案してきた階層型の手法と比べて計算コストがかかるものの、毎イタレーションごとにロット編成を考慮し、また DP 法で部分問題の最適解を導出しているため良い解が得られた。今後さらに集中型など他の手法との比較実験を行うことが課題である。

参考文献

- [1] 西竜志, 長谷部伸治, 橋本伊織: 近似ラグランジュ緩和法を用いた装置を要素とするスケジューリング法, スケジューリング・シンポジウム'99 講演論文集, pp. 29-34, (1999)
- [2] 深山隆幸, 西竜志, 小西正躬: アルミ工場を対象とした自律分散型スケジューリング手法によるロット編成とスケジュールの最適化, 電気学会論文誌 C, Vol. 126, No. 6, (2006)
- [3] 貝原俊也, 藤井信忠, 西林聡, 藤井進, 梅田豊裕: フローショップを対象とする近似ラグランジュ緩和法を用いた分散協調型のスケジューリング手法の一提案, 計測自動制御学会学術講演会, (2008)