歩行時間を考慮したブロック生産システムのブロック分割と作業員割り当てについて

上智大学　＊今井智和　IMAI Tomokazu
01703040　東京都立大学　山下英明　YAMASHITA Hideaki
01008610　上智大学　石塚 陽　ISHIZUKA Yo

1　はじめに

製品の需要に柔軟に対応するために，少人数の多能工が複数の工程からなるブロックを担当する「ブロック生産方式」や各作業員が仕掛品を持ってすべての工程を順番に訪れて一人で完成まで仕上げる「一人一品生産方式」が試行され，効果をあげている．これらの生産方式は，そのシステムが単位時間あたりに生産する量をシステムの担当人数の増減によって調整できるので，需要の変動に柔軟である．また，この方式を採用すると，一人の作業員がかなり広範囲な工程を担当することになるので，作業員に働き甲斐を与える反面，多能工を養成する必要も生じる．

一般に，作業者が移動する生産システムに関する研究はまだ少なく，これらの生産システムの名称もまだ定着していない．本研究のモデルは，複数の作業者がある決まった機械のブロックに割り当てられる点と，加工途中で担当作業員が交替することができない点などで [6], [2], [1] で解析されたモデルと異なる．また，加工中は作業員が機械から離れられない点で，[4] などのモデルと本質的に異なる．[5] は，ブロック生産方式や一人一品生産方式を一般化した生産システムを待ち行列モデルによってモデル化し，サンプルパス最適化を用いて，スループットや平均仕掛品在庫を最適にする各ブロックの機械の構成や作業員の割り当てを求めた．本研究ではこの研究を発展させ，作業員の歩行時間を考慮して，図 1 のように連続していない機械が同一ブロックに属することを許した場合の最適なブロック分割と作業員割り当てを求める．

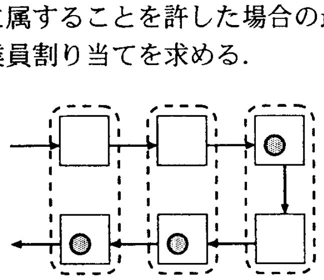

図 1: ブロック分割例

2　モデルと定式化

本研究では，m 台の加工機械と w 人の作業員からなる生産システムで，すべての仕掛品が機械 1 から順に加工を受け，最後に機械 m で加工を受けた後直ちにシステムから退去する場合を考える．機械 1 には十分な原材料が存在するものとする．

1. すべての機械を n 個のブロックに分割し，ブロック $i, (i = 1, \cdots, n)$ に属する機械の数を m_i とする $(m_1 + \cdots + m_n = m)$．また，ブロック i の j 番目の機械を $h_{i,j}$ とする．ただし，$h_{1,1} = 1 < h_{2,1} < \cdots < h_{n,1}$．

2. ブロック i を担当する作業員数を w_i とする $(w_1 + \cdots + w_n = w)$．機械 $k (= h_{i,j})$ で加工を終了した作業員は，その仕掛品を機械 $k+1$ に運搬する．このとき，機械 $k+1$ が他の作業者に使用されている場合は，機械 k で待機しなければならない．機械 $k+1$ が同一ブロックに属するとき，引き続き機械 $k+1$ で加工を行うが，同一ブロックに属さないときは機械 $h_{i,j+1}$ に移動し加工を行う．機械 k から機械 l までの作業員の歩行時間を $L_{k,l}$ とする．

3. 機械 k と機械 $k+1$ が異なるブロックに属する場合，機械 $k+1$ にはバッファが設置され，その容量を機械自身の容量も含めて B_{k+1} とする (機械 k と機械 $k+1$ が同一のブロックに属する場合には，$B_{k+1} = 1$ とする)．機械 k で加工が終了した仕掛品は，機械 $k+1$ が空いている場合はここに移動される．さもなければ，それまでバッファ B_{k+1} に一時的に保管されるか，バッファにも空きがなければ機械 k に留まる．機械 $k+1$ の仕掛品はこのブロックに手隙の作業員が発生し次第，加工を受けることができる．

4. 機械 k と機械 $k+1$ が異なるブロックに属する場合，機械 $k+1$ には初期在庫 q_{k+1} を置くことができる．ただし，$q_1 = 0$ とする．

5. 機械 k で，j 番目に処理される仕掛品の加工時間は任意の分布に従うものとし，$S_{k,j}$ で表す．$S_{k,j}(j = 1, 2, \cdots)$ は独立で同一な分布である必要はないので，たとえば，作業員に能力差によって同じ仕掛品でも加工時間に差が出る場合や，複数の種類の製品をある決まったスケジュールで混合して生産する場合なども，このモデルによって表現できる．

このモデルにおいて，$D_{k,j}$ を機械 k から j 番目の仕掛品が退去する時刻と定義すると，以下の関係が成り立つ．

$$
D_{h_{(i,k)},j} = \begin{cases} \max\{D_{h_{i,1}-1,j} + L_{h_{i,1}-1,h_{i,1}} + S_{h_{i,1},j}, \\ \quad D_{h_{i,m_i},j-(Q_{h_{i,m_i}}-Q_{h_{i,1}})-w_i} \\ \quad +L_{h_{i,m_i},h_{i,m\_i}+1} \\ \quad +L_{h_{i,m_i}+1,h_{i,1}} + S_{h_{i,1},j}, \\ \quad D_{h_{i,1}+1,j-B_{h_{i,1}+1}}\} \quad (k=1) \\ \max\{D_{h_{i,k}-1,j} + L_{h_{i,k}-1,h_{i,k}} + S_{h_{i,k},j}, \\ \quad D_{h_{i,k-1},j-(Q_{h_{i,k}}-Q_{h_{i,k-1}})-w_i} \\ \quad +L_{h_{i,k-1},h_{i,k-1}+1} \\ \quad +L_{h_{i,k-1}+1,h_{i,k}} + S_{h_{i,k},j}, \\ \quad D_{h_{i,k}+1,j-B_{h_{i,k}+1}}\} \quad (k \geq 2) \end{cases} \tag{1}
$$

ただし、$L_{01} = L_{i,i} = L_{m,m+1} = 0, D_{0,j} = D_{m+1,j} = 0$ とする．また，このシステムのスループットおよび平均仕掛品在庫量も，これらの退去時刻を用いて，以下のように表現できる．

$$
\begin{aligned} THP &= \lim_{N\to\infty} \frac{N}{D_{n,N}} \\ WIP &= \lim_{N\to\infty} \frac{1}{D_{n,N}} \sum_{j=1}^{N} \Big(D_{n,j} - \\ &\qquad \max\left\{ D_{1,j-1}, D_{h_{1,m_1},j-w_1} + L_{h_{1,m_1},1} \right\} \Big) \end{aligned} \tag{2}
$$

3 サンプルパス最適化

前節のモデルにおいて，システムのスループットおよび平均仕掛品在庫量の厳密値をマルコフ解析によって数値的に求めることは，ごく小規模なモデルにおいて，さらに加工時間が独立で同一の分布に従う相型分布であることを仮定した場合にだけ可能であり，実際のシステムの規模のモデルには適応できない．そこで，本研究では，これらの性能指標の値を「固定されたサンプルのもとでのシミュレーション」の結果で近似し，その近似した性能指標値を最適化するという「サンプルパス最適化」のアプローチ (たとえば，[3]) を採用する．具体的には，独立な $[0,1]$ 上の一様乱数のサンプルを用いて $S_{k,j}$ の実現値 $\bar{S}_{k,j}$ を定め，$S_{k,j}$ の代わりにこれを (1) に代入することによって退去時刻の実現値 $\bar{D}_{k,j}$ を求める．さらに，$\bar{D}_{k,j}$ を $D_{k,j}$ の代わりに (2) に代入し、スループットと平均仕掛品在庫の近似解とする．

4 最適化問題

本研究では，スループットと仕掛品在庫のトレードオフを考慮した最適化問題をまとめて取り扱うために，スループットと仕掛品在庫の同時最適化を以下のような 2 目的問題として定式化し，パレート最適解を求める．ここで，決定変数はブロック数 n, ブロックサイズ $\boldsymbol{m} = (m_1\ m_2\ \cdots m_n)$, 作業員割り当て $\boldsymbol{w} = (w_1\ w_2\ \cdots w_n)$, および初期在庫 $\boldsymbol{q} = (q_2\ \cdots q_m)$ である．

$$
\begin{cases} \max & TH(n, \boldsymbol{m}, \boldsymbol{w}, \boldsymbol{q}) \\ \min & WIP(n, \boldsymbol{m}, \boldsymbol{w}, \boldsymbol{q}) \\ \text{subject to} & 1 \leq n \leq m \\ & 1 \leq m_i,\ i = 1, \cdots, n \\ & \sum_{i=1}^{n} m_i = m \\ & 1 \leq w_i \leq m_i,\ i = 1, \cdots, n \\ & 0 \leq q_k,\ k = 2, \cdots, m \end{cases}
$$

数値例は，講演時に発表する．

参考文献

[1] J. J. Bartholdi and D. D. Eisenstein, A Production line that balances itself, Operations Research, 44 (1996) 21–34.

[2] D. P. Bischak, Performance of a manufacturing module with moving workers, IIE Transactions, 28 (1996) 723–733.

[3] 石塚，山下サンプルパス最適化の確率的離散事象システムへの適用，オペレーションズ・リサーチ, 46 (2001) 195–201.

[4] K. Nakade and K. Ohno, Reversibility and dependence in a U-shaped production line, Queueing Systems, 21 (1995) 183–197.

[5] 山下，石塚, ブロック生産システムのモデル化と解析，待ち行列理論とその応用：未来への展望, 134–140.

[6] E. Zavadlav, J. O. McClain and L. J. Thomas, Self-buffering, self balancing, self-flushing production lines, Management Science, 42 (1996) 1151–1164.