中間作業を伴う2機械フローショップ型ロボティク ユニットのシステム特性に関する研究*

軽野 義行^{*1}, 畑 祐介^{*2}, 木瀬 洋^{*1}

Empirical Analysis of Characteristics of a Two-Machine Robotic Flowshop with Intermediate Operations

Yoshiyuki KARUNO^{*3}, Yusuke HATA and Hiroshi KISE

^{*3} Department of Mechanical and System Engineering,
Faculty of Engineering and Design, Kyoto Institute of Technology,
Matsugasaki, Sakyo, Kyoto-shi, Kyoto, 606-8585 Japan

In this paper we deal with a two-machine robotic unit of flowshop type, in which each of n jobs is processed on the first machine and later on the second machine. Transportation of the jobs in this system is performed by robots. There is an intermediate station between the two machines for intermediate operations such as washing, chip disposal, cooling, drying and/or quenching. It is already known that the scheduling problem of minimizing the maximum completion time (i.e., the makespan) can be solved in $O(n^2)$ time if only permutation schedules are allowed. Minimizing the maximum completion time leads to increasing efficiency of the system, and permutation schedules may be more practical than non-permutation ones in industry. In this paper, we analyze the characteristics of the system in terms of the optimal permutation schedule, and report the numerical results. In particular, we examine the effect of transportation times of the robots to the efficiency, and the number of work-in-processes in the intermediate station.

Key Words: FMS, FMC, Scheduling, Efficiency, Systems Engineering

1. 序 論

数多くの柔軟生産システム(FMS)や柔軟生産セル(FMC)が世界中で導入されている。これらの多くは、コンピュータによって制御されるマシニングセンタ、ロボット、無人搬送車、自動搬入・搬出装置などを中心に構成され、生産の完全自動化を目指している。しかし、柔軟生産システムや柔軟生産セルをより効率的に運用するためには、システムの自動化のみならず、多くの計画問題に対応していかなければならない。処理すべきそれぞれのジョブをいつ、どの機械で加工するか、またそれらをどのように搬送するか、を決定するスケジューリングは、対応すべき計画問題の中の最重要課題のひとつである⁽¹⁾。そしてまた、スケジューリングの問題を考察することによって、システムの設計や運用に対する有益な情報が得られることが多い。

本論文では、典型的な柔軟生産セルである中間作業を伴う2機械フローショップ型ロボティクユニット(以

下、単にロボティク・フローショップと呼ぶ)を取り上げ、最適スケジューリングの見地から、そのシステム特性を検討する。ここで、システムがフローショップであるとは、処理をされるべき各すべてのジョブが、まず第一機械 M_1 で処理を受け、その後、第二機械 M_2 で処理を受けるということを意味する。

対象とするシステムには、古典的な2機械フローショップとは異なり⁽²⁾、第一機械 M_1 と第二機械 M_2 の間に中間ステーション IS が置かれ、これがジョブの洗浄、バリの除去、冷却、乾燥などの中間作業をおこなう。多くの工作機械は、切削加工の前後にこのような中間作業を必要としており、実際に、日本においても中間ステーションを持つ柔軟生産セルが多数存在している⁽³⁾。

また、システム内でのジョブの移動は4台のロボット R_1, R_2, TR_1 および TR_2 によっておこなわれるとする。古典的なスケジューリング問題を扱った文献では、しばしば搬送時間は無視できるほど小さいと仮定されるが⁽²⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾、ここでは、ロボットが搬送、搬入・搬出に要する時間を無視できないものとする。搬送システムの制約は、それぞれの生産システムの特有の性

* 原稿受付 2002年3月8日。

^{*1} 正員、京都工芸繊維大学工学学部(〒606-8585 京都市左京区松ヶ崎御所海道町)。

^{*2} 京都工芸繊維大学工学学部。

E-mail: karuno@ipc.kit.ac.jp

質になることがあるので、最近の文献では、それを考慮してモデルを作っていることが多い^{(6)~(8)}。

本論文の目的は、対象とするロボティク・フローショップのシステム特性を解析し、それを明らかにすることである。ここでは、特に、本システム特有の搬送ロボットと中間ステーションの機能について、最大完了時間最小化スケジューリング問題（すなわち、メイクスパン最小化問題）の見地から、計算実験による分析をおこなう。なお、後述するように、最適スケジューリング問題における最大完了時間最小化は、稼働率最大化と等価である。

本論文の構成は以下の通りである。第2章では、システムの挙動について説明する。第3章では、最適スケジューリング問題の定式化を与え、それに対してこれまでに得られている結果を簡潔にレビューする。第4章では、搬送ロボットの搬送時間が最大完了時間に及ぼす影響や、中間ステーションが保持する仕掛けジョブの個数について計算実験をおこない、その結果を報告する。最後に第5章で結論を述べる。

2. システムの記述

本論文で対象とするロボティク・フローショップは、2台の機械 M_1 , M_2 , 中間ステーション IS, 搬送ロボット TR_1 , TR_2 , 搬入ロボット R_1 , 搬出ロボット R_2 , 入力側保管装置 Input AS/RS, および、出力側保管装置 Output AS/RS から構成される。システムの概略図を Fig. 1 に示す。

Fig. 1 Two-Machine Robotic Flowshop with an Intermediate Station

各構成要素の働きとシステムの挙動は以下に設けられた仮定に従う：

- (1) 時刻 0 において、 n 個のジョブが Input AS/RS に保管されている。ジョブの流れはすべて一方向である。すなわち、各ジョブはまず機械 M_1 で処理を受け、次に中間ステーション IS で中間作業

がおこなわれ、最後に機械 M_2 で処理を受ける。

- (2) 機械 M_1 および機械 M_2 は一時にたかだか 1 ジョブしか処理できない。また、いったん開始したジョブの処理を途中で中断することはできない。
- (3) Input AS/RS はすべてのジョブを保管するのに十分な容量を持つ。
- (4) 搬入ロボット R_1 は、機械 M_1 が空になると直ちに Input AS/RS から M_1 へ新しいジョブを搬入する。この搬入に要する時間は無視できず、またジョブによって異なるものとする。
- (5) 搬入ロボット R_1 によるジョブの搬入作業が終わると、機械 M_1 は直ちにそのジョブの処理を開始する。その処理時間は無視できず、またジョブによって異なるものとする。
- (6) 搬送ロボット TR_1 が利用可能であるならば、機械 M_1 での処理が終わったジョブは TR_1 によって搬出される。 TR_1 が利用可能でないならば、それが M_1 に戻ってくるまでジョブは M_1 上で待機する。この TR_1 の搬出に要する時間は無視できず、その時間はジョブによって異なる。また、 TR_1 は一時にたかだか 1 ジョブしか扱えない。
- (7) 機械 M_1 からジョブを搬出した後、搬送ロボット TR_1 はそれを中間ステーション IS に搬送し、空となった状態で M_1 に戻る。 TR_1 が M_1 と IS の間を往復するために要する時間は無視できないが、ジョブによっては異なるものとする。
- (8) 各ジョブは、少なくとも指定された中間作業に要する時間は中間ステーション IS に滞在しなければならない。各ジョブに与えられた IS における中間作業時間はジョブによって異なるものとする。
- (9) 中間ステーション IS のジョブの保管容量は、機械 M_1 から搬送ロボット TR_1 によって運ばれてきたすべてのジョブ（中間作業中のジョブと中間作業が終了したジョブの両方を含む）を保持するために十分な容量を持つ。
- (10) 搬送ロボット TR_2 は、中間ステーション IS から機械 M_2 にジョブを搬送し、もし必要ならば機械 M_2 が空になるのを待ち、そのジョブを M_2 に搬入する。その後、空の状態では直ちに IS へ戻る。 TR_2 が IS と M_2 の間を往復するために要する時間は無視できないが、ジョブによっては異なるものとする。また、 TR_2 の M_2 へのジョブの搬入時間も無視できず、その時間はジョブによって異なる。さらに、 TR_2 は一時にたかだか 1 ジョブしか扱えないものとする。

- (11) 搬送ロボット TR_2 による機械 M_2 へのジョブの搬入作業が終わると, M_2 は直ちにそのジョブの処理を開始する. その処理時間は無視できず, ジョブによって異なるものとする.
- (12) 機械 M_2 においてあるジョブの処理が終わると, 搬出ロボット R_2 が直ちにそのジョブを Output AS/RS に搬出する. この R_2 の搬出に要する時間は無視できず, また, その時間はジョブによって異なるものとする.
- (13) Output AS/RS はすべてのジョブを保管するのに十分な容量を持つ.

このロボティク・フローショップでは, n 個すべてのジョブが搬出ロボット R_2 によって機械 M_2 から Output AS/RS への搬出を完了された時刻をもって, 最大完了時間とする. 数学的な定義は次章で与えられる.

3. 最適スケジューリング問題

3.1 問題の記述 以下の問題の入力はすべて既知であるとする:

- n : ジョブ数;
 - $J = \{j \mid j = 1, 2, \dots, n\}$: n 個のジョブの集合;
 - $l_1[j]$: ジョブ j を R_1 が M_1 に搬入するのに要する時間;
 - $p_1[j]$: M_1 におけるジョブ j の処理時間;
 - $u_1[j]$: ジョブ j を TR_1 が M_1 から搬出するのに要する時間;
 - $l_2[j]$: ジョブ j を TR_2 が M_2 に搬入するのに要する時間;
 - $p_2[j]$: M_2 におけるジョブ j の処理時間;
 - $u_2[j]$: ジョブ j を R_2 が M_2 から搬出するのに要する時間;
 - $w[j]$: ジョブ j の中間作業時間 (すなわち, ジョブ j が中間ステーション IS に滞在しなければならない最低限の時間);
 - t_1 : TR_1 による任意のジョブの M_1 から IS への搬送時間;
 - t'_1 : TR_1 が IS から M_1 へ空で戻るのに要する時間;
 - t_2 : TR_2 による任意のジョブの IS から M_2 への搬送時間;
 - t'_2 : TR_2 が M_2 から IS へ空で戻るのに要する時間.
- 他方, 出力は以下の通りである:
- $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$: M_1 におけるジョブの処理順序. ただし, λ_ℓ は ℓ 番目に処理されるジョブを表す;

- $\mu = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n)$: M_2 におけるジョブの処理順序. ただし, μ_ℓ は ℓ 番目に処理されるジョブを表す;

- $\pi = (\lambda; \mu)$: ジョブのスケジュール.

ここで, もし $\lambda = \mu$ (すなわち, すべての $\ell = 1, 2, \dots, n$ に対して $\lambda_\ell = \mu_\ell$) ならば, そのスケジュール $\pi = (\lambda; \mu)$ は順列スケジュールであるという. そうでないならば, π は非順列スケジュールである. 本論文では, ある順列スケジュールを $\pi = (j_1, j_2, \dots, j_n)$ (すなわち, すべての $\ell = 1, 2, \dots, n$ に対して $j_\ell = \lambda_\ell = \mu_\ell$) で表すことがある.

ジョブをスケジュール $\pi = (\lambda; \mu)$ にしたがって処理していくとき, 各ジョブに対して以下の時刻が決定する:

- $S_1[j]$: R_1 が Input AS/RS から M_1 にジョブ j の搬入を開始する時刻;
- $F_1[j]$: TR_1 がジョブ j の M_1 から IS への搬送を開始する時刻;
- $S_2[j]$: TR_2 がジョブ j の M_2 への搬入を開始する時刻;
- $F_2[j]$: R_2 がジョブ j の M_2 から Output AS/RS への搬出を終了する時刻. すなわち, ジョブ j の完了時刻.
- $F_{\max}(\pi)$: スケジュール π による最大完了時間. すなわち,

$$F_{\max}(\pi) = F_2[\mu_n]. \quad (1)$$

最適スケジューリング問題の目的は, 最大完了時間 $F_{\max}(\pi)$ を最小化する最適スケジュール $\pi = \pi^*$ を求めることであるが, ここではさらに, システムの効率を表す指標の一つとして, 稼働率 $E_f(\pi)$ を以下に定義する:

$$E_f(\pi) = \frac{\sum_{k=1}^2 \sum_{j=1}^n \{l_k[j] + p_k[j] + u_k[j]\}}{2 \cdot F_{\max}(\pi)}. \quad (2)$$

定義より明らかであるが, 稼働率は機械 M_1 と M_2 に対するものであり, この場合, 最大完了時間最小化と稼働率最大化は等価な問題である.

ジョブ数が $n = 3$ のある問題例に対して, スケジュールが $\pi = (\lambda; \mu) = ((1, 2, 3); (1, 3, 2))$ であるときのシステムの挙動を Fig. 2 に示す. なお, 図中において, 0 は搬送ロボットが空運行している様子を示している.

3.2 最適順列スケジューリング 本節では, 最適スケジューリング問題に対してすでに得られている理論的な結果を簡潔にレビューしておく^{(9) (10)}.

Fig. 2 Behavior of the Two-Machine Robotic Flowshop

各ジョブ $j \in J$ について、以下を定義する：

$$W[j] = t_1 + w[j] + t_2, \quad (3)$$

$$a'[j] = l_1[j] + p_1[j] + u_1[j], \quad (4)$$

$$b'[j] = l_2[j] + p_2[j] + u_2[j], \quad (5)$$

$$a[j] = \max\{l_1[j] + p_1[j], t_1 + t'_1\} + u_1[j], \quad (6)$$

$$b[j] = l_2[j] + \max\{p_2[j] + u_2[j], t'_2 + t_2\}, \quad (7)$$

$$A'[j] = a'[j] + W[j], \quad (8)$$

$$B'[j] = b'[j] + W[j], \quad (9)$$

$$A[j] = a[j] + W[j], \quad (10)$$

$$B[j] = b[j] + W[j]. \quad (11)$$

このとき、ある順列スケジュール $\pi = (j_1, j_2, \dots, j_n)$ に対する最大完了時間 $F_{\max}(\pi)$ は次式によって計算できる：

$$F_{\max}(\pi) = A'[j_1] + \max\left\{\sum_{k=2}^n A[j_k], \max_{2 \leq h \leq n-1} \left\{\sum_{k=2}^h A[j_k] + \sum_{k=h}^{n-1} B[j_k]\right\}, \sum_{k=1}^{n-1} B[j_k]\right\} + B'[j_n] - \sum_{k=1}^n W[j_k] \quad (12)$$

この式と古典的な2機械フローショップ問題に対するジョンソン規則⁽²⁾に基づいて、われわれは $O(n^2)$ 時間で最適な順列スケジュール（すなわち、順列スケジュールのうちで最大完了時間を最小にするもの）を計算することが出来る。さらに、非順列スケジュールを含めたときの最適スケジューリング問題はNP困難であるが⁽¹⁰⁾、最適順列スケジュールをそのときの近似解として用いることができる。このとき、最適順列スケジュールの最大完了時間は最悪の場合でも最適値のたかだか2倍である⁽¹⁰⁾。

一般的にフローショップ型システムにおいては、しばしば、順列スケジュールの方が非順列スケジュール

に比べてより实际的であると言われる⁽¹¹⁾。また、上述のことから分かるように、対象とするロボティク・フローショップにおいて最適順列スケジュールを用いることは、理論的な観点からも極めて妥当であると言える。次章では、最適順列スケジュールのもとでの最大完了時間を計算し、その見地からの搬送ロボットの搬送時間の適正值や、中間ステーションが保持する仕掛けジョブの個数について調べる。

4. 計算実験

本計算実験では、さまざまな中間作業の状況を作り出すために、中間作業需要率

$$\alpha = \frac{n'}{n} \times 100 [\%] \quad (13)$$

を入力パラメータとして追加導入した。ここで、 n' は中間作業を要求するジョブの数を表す（中間作業を要求しないジョブ j の中間作業時間は $w[j] = 0$ である）。使用計算機はEPSON DIRECT Endeavor/Pro-720L、プログラムはC言語で書かれ、Microsoft 社 Visual C++でコンパイルされた。

4.1 ロボット搬送時間の影響に関する分析 まず、搬送ロボット TR_1 , TR_2 の搬送時間の影響を調べる計算実験をおこなった。ジョブ数は $n = 100$ 、中間作業需要率は $\alpha = 10[\%]$ 、中間作業を要求する各ジョブ j の中間作業時間 $w[j]$ は区間 $[w_{\min} = 67, w_{\max} = 933]$ の整数型一様乱数、各ジョブ j に対するロボットの搬入時間と搬出時間 $l_1[j]$, $u_1[j]$, $l_2[j]$ および $u_2[j]$ は、それぞれの平均値を

$$\bar{p} = \bar{l}_1 = \bar{u}_1 = \bar{l}_2 = \bar{u}_2 \quad (14)$$

と定義し、 $\bar{p} = 10$ とした区間 $[\bar{p} - 5, \bar{p} + 5]$ の整数型一様乱数、各ジョブ j の機械 M_k ($k = 1, 2$) での処理時間 $p_k[j]$ は区間 $[(1 - \sqrt{3} \cdot CV) \times \bar{p}_k, (1 + \sqrt{3} \cdot CV) \times \bar{p}_k]$ の整数型一様乱数とした。ここで、 $\bar{p}_k$ は機械 M_k における

平均処理時間, CV は変動係数であり, それぞれ, $\bar{p}_1 \in \{100, 200, 300\}$, $\bar{p}_2 \in \{100\}$, $CV \in \{0.1, 0.3, 0.5\}$ の範囲で変化させた。

搬送ロボット TR_1 と TR_2 の搬送時間 t_1 , t'_1 , t_2 および t'_2 については, $t_1 = t'_1$, $t_2 = t'_2$ を仮定し, さらに,

$$\gamma_1 = \frac{t_1 + t'_1}{\bar{p}_1 + \bar{l}_1}, \quad (15)$$

$$\gamma_2 = \frac{t_2 + t'_2}{\bar{p}_2 + \bar{u}_2}, \quad (16)$$

$$R[TR] = \frac{t_1 + t'_1}{t_2 + t'_2}, \quad (17)$$

$$R[M] = \bar{p}_1 / \bar{p}_2 \quad (18)$$

を定義した。これらを変化させて最大完了時間への影響を調べた。結果のデータはすべて 50 例題の平均値である。なお, 最適順列スケジュールを得るために要した計算時間は, $n = 300$ で約 20[msec] 以下であった。

Fig. 3 は, 搬送ロボット TR_1 の搬送時間が最大完了時間に及ぼす影響を表している。 $R[TR] = 1.0$ なので, 同時に, 搬送ロボット TR_2 の搬送時間も変化する。この結果から, 搬送ロボット TR_1 の搬送時間が $\gamma_1 \leq 1.0$, すなわち, $t_1 + t'_1 \leq \bar{l}_1 + \bar{p}_1$ でないと (同様に, 搬送ロボット TR_2 の搬送時間は $\gamma_2 \leq 1.0$, すなわち, $t_2 + t'_2 \leq \bar{p}_2 + \bar{u}_2$ でないと), それがシステムのボトルネックになる可能性が高いと言える。これは, 式 (6), (7) からわかるように, 各ジョブが機械 M_1 に搬入されてから搬出を開始されるまでの実質的な時間が, 搬送時間が大きい場合, $l_1[j] + p_1[j]$ ではなく $t_1 + t'_1$ になってしまう (同様に, 機械 M_2 が処理を開始してから搬出が終了するまでの実質的な時間が, 搬送時間が大きい場合, $p_2[j] + u_2[j]$ ではなく $t_2 + t'_2$ になってしまう) からである。したがって, システムを設計する観点からは, 搬送ロボット TR_1 , TR_2 の搬送速度は, それぞれ, $\gamma_1 > 1.0$ および $\gamma_2 > 1.0$ とすべきではないと言える。なお, 同じ理由から, γ_1 と γ_2 が 1.0 に近づくと, 最大完了時間が処理時間のばらつき CV の影響を受け易いこともわかる。

Fig. 4 は, Fig. 3 の結果を稼働率の観点から表したものである。

Fig. 5 は, 2 台の機械 M_1 と M_2 の負荷は均等 (すなわち, $R[M] = \bar{p}_1 / \bar{p}_2 = 1.0$) とした上で, 2 台の搬送ロボット TR_1 と TR_2 の搬送時間の比 $R[TR]$ が変化したときの影響を表している。搬送ロボット TR_2 の搬送時間が $\gamma_2 = 1.0$ のとき, $R[TR]$ が 1.0 より小さければ, 搬送ロボット TR_1 の搬送時間は $\gamma_1 < 1.0$ なので, その範囲で最大完了時間に大きな変化はない。しかし, $R[TR]$ が 1.0 を越えると, 搬送ロボット TR_1

Fig. 3 Effect of Transportation Time to Makespan ($n = 100$, $\alpha = 10$, $w_{min} = 67$, $w_{max} = 933$, $\bar{p} = 10$, $\bar{p}_1 = \bar{p}_2 = 100$, $R[TR] = 1.0$)

Fig. 4 Effect of Transportation Time to Machine Efficiency ($n = 100$, $\alpha = 10$, $w_{min} = 67$, $w_{max} = 933$, $\bar{p} = 10$, $\bar{p}_1 = \bar{p}_2 = 100$, $R[TR] = 1.0$)

の搬送時間が $\gamma_1 > 1.0$ となるので, それ以降で最大完了時間は急激に増加している。搬送ロボット TR_2 の搬送時間が $\gamma_2 = 0.4$ のときは, $R[TR]$ が 2.0 であっても, 搬送ロボット TR_1 の搬送時間は $\gamma_1 = 0.8 < 1.0$ なので, 搬送時間の比が変化しても最大完了時間が大きく増加することはない。搬送ロボット TR_2 の搬送時間が $\gamma_2 = 1.6$ のときは, $R[TR] \leq 1.0$ であっても, すでに搬送ロボット TR_2 がボトルネックとなって最大完了時間が大きくなっている。さらに, $R[TR] > 1.0$ では, 逆に搬送ロボット TR_1 がボトルネックになり, 最大完了時間をより増加させている。

この結果から, システムの効率は搬送時間の大きい

Fig. 5 Effect of Ratio between Two Transportation Times to Makespan (1) ($n = 100$, $\alpha = 10$, $w_{min} = 67$, $w_{max} = 933$, $\bar{p} = 10$, $\bar{p}_1 = \bar{p}_2 = 100$, $CV = 0.1$)

Fig. 6 Effect of Ratio between Two Transportation Times to Makespan (2) ($n = 100$, $\alpha = 10$, $w_{min} = 67$, $w_{max} = 933$, $\bar{p} = 10$, $\bar{p}_2 = 100$, $CV = 0.1$, $\gamma_2 = 1.0$)

方の搬送ロボット TR_k により強い影響を受け (k は 1, あるいは 2), また, その搬送時間が $\gamma_k > 1.0$ かどうかによって決まっていることが分かる。

Fig. 6 は, 2 台の機械 M_1 と M_2 の負荷が均等でない (すなわち, $R[M] \neq 1.0$) 場合に, 2 台の搬送ロボット TR_1 と TR_2 の搬送時間の比が変化したときの最大完了時間への影響を表している。いずれの $R[M]$ の値に対しても, $R[TR] = R[M]$ を境にして, それ以上の $R[TR]$ の範囲では急速に最大完了時間が増加している。この結果も, 搬送ロボット TR_1 , TR_2 の搬送速度は, それぞれ, $\gamma_1 > 1.0$ および $\gamma_2 > 1.0$ とすべきではないことを示している。

4.2 中間ステーション仕掛けジョブ数に関する分析

次に, 中間ステーション IS では同時にどれくらいの仕掛けジョブを保持しているのかを調べる実験をおこなった。ジョブ数は $n \in \{50, 100, 150, 200, 250, 300\}$, 中間作業需要率は $\alpha \in \{10, 20, 50, 100\}$ の範囲で変化した。中間作業時間 $w[j]$ は, 区間 $[w_{min} = 1, w_{max}]$ の整数型一様乱数で与え, その最大値 w_{max} は 100 から 2000 まで変化した。搬入時間と搬出時間 $l_1[j]$, $u_1[j]$, $l_2[j]$ および $u_2[j]$, また, 処理時間 $p_1[j]$ および $p_2[j]$ は, 前節と同様の整数型一様乱数で与え, $\bar{l}_1 = \bar{u}_1 = \bar{l}_2 = \bar{u}_2 = \bar{p} = 10$, $\bar{p}_1 = \bar{p}_2 = 100$, $CV \in \{0.1, 0.5\}$ とした。搬送ロボット TR_1 と TR_2 の搬送時間は, $\gamma_1, \gamma_2 \in \{0.0, 0.5, 1.0\}$ で変化した。前節と同様, 結果のデータはすべて 50 例題の平均値である。

Table 1 は, ある時刻において中間ステーション IS に保持されている仕掛けジョブ数の最大値 (すなわち, 中間ステーション IS が必要としたバッファ容量。以

下, 最大保持ジョブ数 N_{max} と呼ぶ) を, ジョブ数 n と中間作業需要率 α を変化させて調べたものである。この結果から, $w_{max} = 1000$ では影響が見られないものの, $w_{max} = 100$ ではジョブ数 n が最大保持ジョブ数 N_{max} に影響を与えている。

そこで, 次に中間作業時間の最大値 w_{max} を変化したときの N_{max} を調べ, その結果を Fig. 7 に示す。これより, 中間ステーション IS における最大保持ジョブ数 N_{max} は, w_{max} を大きくしていくとある値を境に増加傾向が現れ, しかも, ジョブ数 n とは無関係に, $w_{max}/(\max\{\bar{l}_1 + \bar{p}_1, t_1 + t'_1\} + \bar{u}_1)$ に近い値を取っていることが観察される (ただし, これは機械 M_1 と M_2 の負荷がほぼ均等であるという前提のもとでの計算実験であるということに注意が必要である)。

Table 1 The Maximum of the Number of Jobs Held in IS at a Time, N_{max}

n	$\alpha = n'/n \times 100$ [%]			
	10	20	50	100
50	1.7/6.9	1.7/7.4	1.7/7.8	1.9/8.1
100	3.0/7.5	3.0/7.9	3.0/8.0	3.0/8.2
150	4.2/7.8	4.2/8.1	4.2/8.1	4.2/8.4
200	5.5/7.9	5.4/8.1	5.4/8.1	5.7/8.5
250	6.9/8.0	6.7/8.1	6.8/8.2	7.0/8.7
300	8.1/8.2	8.1/8.1	8.0/8.3	8.3/9.0

$w_{min} = 1, w_{max} = 100/1000$

$\bar{p} = 10, \bar{p}_1 = \bar{p}_2 = 100$

$CV = 0.1, \gamma_1 = \gamma_2 = 1.0$

Fig. 7 The Maximum of the Number of Jobs Held in IS at a Time (1) ($\alpha = 50, w_{min} = 1, \bar{p} = 10, \bar{p}_1 = \bar{p}_2 = 100, CV = 0.1, \gamma_1 = \gamma_2 = 1.0$)

一方, w_{max} が機械上での各処理時間 $p_1[j], p_2[j]$ に比べて極端に大きくないとき, N_{max} は w_{max} の変化に対して一定である。これは中間作業を要するジョブが存在しなくてもこのシステムが使用するバッファ数と言え, これはジョブ数 n に比例するだけでなく, Fig. 8 に示すように, 変動係数 CV や搬送時間 γ_1, γ_2 の影響を受ける。ここでも, CV と γ_1 の6通りの組み合わせのそれぞれについて50例題を調べた。白印は各例題の結果, 黒印は50例題の平均値を示している。

Fig. 8 The Maximum of the Number of Jobs Held in IS at a Time (2) ($n = 100, \alpha = 50, w_{min} = 1, w_{max} = 100, \bar{p} = 10, \bar{p}_1 = \bar{p}_2 = 100, R[TR] = 1.0$)

なお, Fig. 8 の結果から, 特に, 搬送時間が小さかつ処理時間のばらつきが大きいときは, 中間ステーションができるだけ多くの仕掛けジョブを保持するこ

とで最大完了時間を小さくしていると言える。したがって, 有限個の仕掛けジョブしか保持できない中間ステーションを有するシステムを考察することは, 實際上, 意義があると考えられる。

5. 結 論

本論文では, 典型的な柔軟生産セルの一つである中間作業を伴う2機械フローショップ型ロボティクユニットを対象として, そのシステム特性を計算実験によって検討した。まず, 最適順列スケジュールのもとでの最大完了時間を調べた結果, 第一機械側の搬送ロボットについては, その搬送時間がジョブの第一機械への搬入時間とその機械上での処理時間の和より大きくなるとき, また, 第二機械側の搬送ロボットについては, その搬送時間がジョブの第二機械での処理時間とその機械からの搬出時間の和より大きくなるとき, それらがシステムのボトルネックとなることが確認された。次に, 中間ステーションである時刻に保持される仕掛けジョブ数の最大値, すなわち, 最大保持ジョブ数を調べた結果, 中間作業時間の最大値が各ジョブの機械上での処理時間に比べて極端に大きいときは, それに比例して増加し, そうでないときは, ジョブ数や処理時間のばらつき, あるいはまた, 搬送時間に影響を受けることが観察された。

本論文のはじめで述べたように, 対象としたロボティクユニットは, 搬送時間と中間作業という生産システムにおける現実的な条件を考慮したものである。残された課題の一つとして, 有限個の仕掛けジョブしか保持できない中間ステーションを有するシステムの特性に強い興味を持たれるが, 今後も実存する生産システムの調査を継続し, 有益なシステム特性の解析がおこなえるようなモデリングとスケジューリング手法の開発に努めたいと考えている。

文 献

- (1) J. Blazewicz, K. Ecker, G. Schmidt, and J. Weglarz: *Scheduling in Computer and Manufacturing Systems*, Springer-Verlag, (1993)
- (2) S. M. Johnson: Optimal two- and three-stage production schedules with setup times included; *Naval Research Logistics Quarterly*, 1, (1954), pp. 61-68
- (3) 機械技術協会生産技術調査分科会 (編): 日本のFMS事例集; マシニスト出版, (1982)
- (4) M. Dell'Amico: Shop problems with two machines and time lags; *Operations Research*, 44, (1996), pp. 777-787
- (5) L. G. Mitten: Sequencing n jobs on two machines with arbitrary time lags; *Management Science*, 5, (1959), pp. 293-297

- (6) N. G. Hall, H. Kamoun and C. Sriskandarajah: Scheduling in robotic cells: classification, two and three machine cells; *Operations Research*, **45**, (1997), pp. 421-439
 - (7) E. Levner, K. Kogan and I. Levin: Scheduling a two-machine robotic cell: a solvable case; *Annals of Operations Research*, **57**, (1995), pp. 217-232
 - (8) S. P. Sethi, C. Sriskandarajah, G. Sorger, J. Blazewicz and W. Kubiak: Sequencing of parts and robot moves in a robotic cell; *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, **4**, (1992), pp. 331-358
 - (9) Y. Karuno, H. Kise, and K. Yamamoto: Approximate scheduling algorithms with performance guarantee for a two-machine robotic unit with an intermediate station; *Transactions of the Institute of Systems, Control and Information Engineers*, **15**, (2002), pp. 41-49
 - (10) H. Kise, Y. Karuno, and J.-L. Cheng: Optimal permutation and non-permutation scheduling for a two-machine robotic unit with an intermediate station; *Proceedings of the IASTED International Conference Robotics and Applications 2000*, (2000), pp. 241-247
 - (11) C. Rajendran and H. Ziegler: An efficient heuristic for scheduling in a flowshop to minimize total weighted flowtime of jobs; *European Journal of Operations Research*, **103**, (1997), pp. 129-138
-