

機械故障を考慮したトランスファー・ラインの最適制御

甲南大 理	大野勝久 (Katsuhisa Ohno)
京大 エ	村瀬 薫 (Kaoru Murase)
京大 エ	三根 久 (Hisashi Mine)

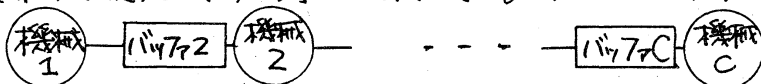
1. はじめに

近年、トランスファー・ラインの最適設計、及び最適制御問題に対する関心が増大している。トランスファー・ラインは直列に並んだ機械と機械間に置かれたバッファからなり、ラインの動きは同期している。このようなトランスファー・ライン・モデルは、生産工程、計算機、及び通信システムにおいて重要な役割を果たしている。

トランスファー・ラインの最適設計、すなわち最適な機械の順、バッファ配置に関しては多くの研究がなされて来た。Lev and Tsouf [4]は、バッファの数が1つ又は2つの場合に、最適なバッファ配置を論じた。Gershwin and Schick [3]は、2, 3段のトランスファー・ラインの動的な振舞いをマルコフ連鎖として定式化し、連鎖の定常状態確率を求めるアルゴリズム

ムを導いた。Shanthikumar and Tien [7]は、機械の故障時に仕掛り品の廃棄を考慮したシステムに対して、同様のアルゴリズムを導いた。トランスファー・ラインに関する過去の研究は、上記のものを含め、生産率や平均在庫レベルなどのシステムの性能評価規準と、機械の故障率と修復率、バッファの容量と配置などのシステムパラメータとの関係の解析に焦点が当てられていた。(Buzacott and Hanifin [1])

システムの性能はその制御政策によっても影響を受けるが、トランスファー・ラインの最適制御政策について論じたものは数少ない。Buzacott [2]は、2段のシステムに対して、故意に機械を停止させない政策がシステムの実産率を最大化することを示した。しかしながら、実際の多段システムに対する最適制御政策を解析的に求めることは困難である。このように、実際のシステムに対して期待利得を最大にするような最適制御政策を求める効率の良いアルゴリズムの開発が望まれるものである。(大野 [5]) さらに、この最適制御のもとでの最適設計は実際問題として重要な問題であろう。本報告では、C段トランスファー・ラインの最適制御問題をマルコフ決定過程として定式化し、その最適定常政策を求める修正政策反復法(大野 [6])によるアルゴリズムを提案する。



2. C段トランスファー・ラインの最適制御

機械の故障を考慮した有限容量バッファをもつC段トランスファー・ラインを考える。システムは、図のように直列に置かれたC個の機械と各機械間に置かれたバッファからなる。仕掛り品はシステムの外から最初の機械に入り処理される。その後仕掛り品は機械 i からバッファ $i+1$ へそして機械 $i+1$ へと移動し、最後の機械Cで処理されてシステム外へ去る。バッファは機械の故障がラインに及ぼす影響を軽減する目的で設けられている。バッファがなければ、一台の機械が故障するやいなや、すべての上流の機械が停止する。

i 番目のバッファの容量を N_i ($i=2, \dots, C$) とする。ある機械によって処理された仕掛り品が、次のバッファが満杯のため送られることができずその機械を占拠したとき、その機械はブロックされた (blocked) という。また、ある機械がその直前のバッファに仕掛り品がなく品切れで処理ができないとき、その機械はスターブされた (starved) という。機械のサービスレベルは通常、停止と稼働の0と1が考えられているが、本報告ではこれを一般化し、整数値をとるものとする。例えば、機械 i がブロック (スターブ) されているとき、機械 $i+1$ ($i-1$) のサービスレベルを上げる方が望ましく、機械 $i-1$ ($i+1$) のサービスレベルは下げる方がよからう。機械 i のサービスレベルは

集合 $\{0, 1, \dots, K_i\}$ の中から動的に選ばれ、レベル k で稼働中の機械は 1 期に k 個の仕掛り品を処理するものとする。レベル 0 の機械は休止中であるといい、レベル $k > 0$ で処理中の機械は稼働中であるという。

この最適制御問題を定式化するにあたり次の仮定をおく。

- (i) ラインは同期している。すなわち、すべての機械は等しく一定の処理時間をもち、同時にその処理を開始する。
- (ii) 機械は仕掛り品を処理中にのみ故障する。機械の故障は幾何分布に従う。すなわち、レベル k で稼働中の機械 i が t 期の t 期に故障する確率は $p_i(k)$ である。この機械が故障したとき k 個の未処理の仕掛り品を機械内に保持するものとする。
- (iii) 機械の修理は幾何分布に従う。すなわち、レベル k の機械 i が t 期の t 期に修理される確率は $r_i(k)$ である。この機械が修復されれば、機械内の k 個の仕掛り品の処理を開始する。
- (iv) 最初の機械は尽まることなく材料の供給を受け、最後の機械の下流には無限容量の出サバッファがある。すなわち、機械 1 は決してスタブされず、機械 C は決してブロックされない。
- (v) 期の始めにシステムの状態を見て、機械のサービスレベルが選択され、それに応じて各仕掛り品が次のバッファ、又は機械へ移される。仕掛り品の移動後は、故障中又はブロックされ

ている機械のサービスレベルは変更できないものとする。

(VI) その直後(直前)のバッファに k 個未満の空き(仕掛り品)しかないとき、処理を終えた(開始する)レベル k の機械は、 k 個(0個)の仕掛り品を保持したままブロック(スタブ)される。

このトランスファー・ライン制御問題の費用構造としては以下のものを考える。

- (i) 在庫費用 $h_i(l)$ (l 個の仕掛り品を 1 期、バッファ i 内に保持する費用)
- (ii) 稼働費用 $b_i(k)$ (機械 i をレベル k で 1 期稼働する費用)
- (iii) 休止、スタブ費用 $d_i(k)$ (機械 i をレベル k で 1 期休止、スタブする費用)
- (iv) ブロック費用 $c_i(k)$ (レベル k の機械 i を 1 期ブロックする費用)
- (v) 切り換え費用 $e_i(k, k')$ (機械 i のサービスレベルを k から k' に切り換える費用)
- (vi) 故障費用 $f_i(k)$ (レベル k の機械 i の故障修理に要する 1 期当りの費用)
- (vii) 利得 g (1 つの製品を完成して得られる利得)

問題は、一期当りの期待利得を最大にする最適制御政策を求めることである。この問題は、次節でマルコフ決定過程として定式化される。

3. 時間平均マルコフ決定過程

X_i ($i=2, \dots, C$, $X_i=0, 1, \dots, N_i$) をバッファ i 内の仕掛り品の数とする。 Y_i と Z_i ($i=1, \dots, C$) をそれぞれ次のように定義する。

$Y_i = k$ 機械 i のサービスレベルが k ($k=0, 1, \dots, K_i$)

$Z_i = \begin{cases} -1 & \text{機械 } i \text{ が故障中} \\ 0 & \text{" 休止中、リスタートされている。} \\ 1 & \text{" 稼働中} \\ 2 & \text{" ブロックされている} \end{cases}$

このとき、システムの状態 S は次のように $3C-1$ 次元ベクトルによって表わされる。

$$S = (X_2, \dots, X_C, Y_1, \dots, Y_C, Z_1, \dots, Z_C)$$

S を可能な状態の集合とする。期の始めにシステムが状態 S にはれば、決定 a が許容決定の集合 $A(S)$ の中から選ばれる。

決定は、機械 i の当期のサービスレベルを Y_i' とすれば

$$a = (Y_1', \dots, Y_C')$$

で表わされる。

状態 $S = (X_2, \dots, X_C, Y_1, \dots, Y_C, Z_1, \dots, Z_C)$ で決定 $a = (Y_1', \dots, Y_C')$ がとられると、 S と a に応じて仕掛り品の移動が行われ、システムの状態は、中間状態 $S' = (X_2', \dots, X_C', Y_1', \dots, Y_C', Z_1', \dots, Z_C')$ に遷移する。ここで X_i', Z_i' ($i=1, \dots, C$) は、補助変数 t_i ($i=2, \dots, C+1$) を用いて次のアルゴリズムによって逐次決定される変数であ

3.

1. $t_{c+1} = -1$ ($Z_c = -1$), $= 1$ ($Z_c = 0$ or 1) とおく.2. Z_i, t_i, X_i $\Sigma i = c, \dots, 2$ に対して逐次求める.

$$Z_i = \begin{cases} -1 & (t_{i+1} = -1) \\ 0 & (t_{i+1} = 1 \text{ かつ } (\gamma(Z_{i+1})Y_{i+1} + X_i < Y_i \text{ 又は } Y_i = 0)) \\ 1 & (t_{i+1} = 1 \text{ かつ } \gamma(Z_{i+1})Y_{i+1} + X_i \geq Y_i) \\ 2 & (t_{i+1} = 2) \end{cases}$$

$$t_i = \begin{cases} -1 & (Z_{i-1} = -1) \\ 1 & (Z_{i-1} = 0 \text{ 又は } \gamma(Z_{i-1})Y_{i-1} + X_i - \delta(Z_i)Y_i \leq N_i) \\ 2 & (Z_{i-1} = 1, 2 \text{ かつ } Y_{i-1} + X_i - \delta(Z_i)Y_i > N_i) \end{cases}$$

$$X_i = \begin{cases} \gamma(Z_{i-1})Y_{i-1} + X_i - \delta(Z_i)Y_i & (t_i = 1) \\ X_i - \delta(Z_i)Y_i & (t_i = -1, 2) \end{cases}$$

$$\delta(Z) = 1 \quad (Z=1), \quad = 0 \quad (Z \neq 1)$$

$$\gamma(Z) = 1 \quad (Z=1, 2), \quad = 0 \quad (Z \neq 1, 2)$$

である。

$$3. \quad Z_1 = \begin{cases} -1 & (t_2 = -1) \\ 0 & (t_2 = 1 \text{ かつ } Y_1 = 0) \\ 1 & (t_2 = 1 \text{ かつ } Y_1 > 0) \\ 2 & (t_2 = 2) \end{cases}$$

このアルゴリズムを用いれば、状態 S で決定 a が許容されるか否かも定められる。すなわち、許容される決定 a は、

$t_{i+1} = -1, 2$ とするすべての i に対して $Y_i' = Y_i$ を満たす。レベル Y_i をもつ状態 i の状態が、中間状態から次期の始めの状態 Z_i'' に遷移する確率を $q_i(Z_i, Y_i, Z_i'')$ で表わすことにする

$$q_i(Z_i, Y_i, Z_i'') = \begin{cases} 1 & (Z_i = Z_i'' = 0 \text{ 又は } Z_i = Z_i'' = 2) \\ p_i(Y_i) & (Z_i = 1 \text{ から } Z_i'' = -1) \\ 1 - p_i(Y_i) & (Z_i = Z_i'' = 1) \\ r_i(Y_i) & (Z_i = -1 \text{ から } Z_i'' = 1) \\ 1 - r_i(Y_i) & (Z_i = Z_i'' = -1) \\ 0 & (\text{その他}) \end{cases}$$

となる。したがって、状態 $s = (X_2, \dots, X_c, Y_1, \dots, Y_c, Z_1, \dots, Z_c)$ で決定 $a = (Y_1', \dots, Y_c')$ をとったとき、次期の始めに $s' = (X_2', \dots, X_c', Y_1'', \dots, Y_c'', Z_1'', \dots, Z_c'')$ に遷移する確率 $P(s, a, s')$ は、

$$P(s, a, s') = \prod_{i=1}^c q_i(Z_i, Y_i, Z_i'') \quad (1)$$

で与えられる。集合 I_j ($j = -1, 0, 1, 2$) を $I_j = \{i; Z_i = j\}$ で定義する。状態 s で決定 a をとったとき、一期当りの期待利得 $r(s, a)$ は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} r(s, a) = & \left\{ \delta(Z_i) (1 - p_i(Y_i')) + \delta(Z_i + 2) r_i(Y_i') \right\} q_i Y_i' \\ & - \sum_{i \in I_{-1}} \left\{ (1 - r_i(Y_i')) f_i(Y_i') + r_i(Y_i') b_i(Y_i') \right\} - \sum_{i \in I_0} d_i(Y_i') \\ & - \sum_{i \in I_1} \left\{ (1 - p_i(Y_i')) b_i(Y_i') + p_i(Y_i') f_i(Y_i') \right\} - \sum_{i \in I_2} c_i(Y_i') \\ & - \sum_{i=1}^c h_i(X_i) - \sum_{i=1}^c e_i(Y_i, Y_i') \end{aligned} \quad (2)$$

以上により、C段トランスファ・ラインの最適制御問題は

次の最適方程式を解くマルコフ決定過程として定式化される。

$$q_s^* = \max_{a \in A(s)} \sum_{s' \in S} p(s, a, s') q_{s'}^*$$

$$q_s^* + v_s^* = \max_{a \in L(s)} \left\{ r(s, a) + \sum_{s' \in S} p(s, a, s') v_{s'}^* \right\}$$

$$\text{すなわち } L(s) = \left\{ a \in A(s) ; \sum_{s' \in S} p(s, a, s') q_{s'}^* \text{ を最大にする } a \right\}$$

ゲイン q_s^* は、状態 s から始めたときの一期当りの最大利得を表わしている。 S 及び $A(s)$ ($s \in S$) は有限であるから、状態 s において上式右辺を最大にする決定をとる政策 f^* が求める最適定常政策である。

4. 修正政策反復法

マルコフ決定過程を扱う標準的な手法は政策反復法(PIM)である。PIMは政策改良と値決定のルーチンからなり、時間平均問題に対するPIMの収束は多重連鎖における相対値ベクトルの選択に依存する。現在までに提案されたPIMで最も進んだものがSpreen[1981]による政策反復アルゴリズム(PIA)である。しかし、このPIAにおいても少くとも状態数 $|S|=M$ の次元の連立一次方程式を解かねばならず、 M が大きくなると容易ではない。このような多状態問題に適した手法として修正政策反復法(MPIM)知られている。MPIMはPIMの値決定ルーチンにおいて有限回の逐次近似を用いる手法である。

前節で示したように、 C 段トランスファー・ラインの状態 s は $3C-1$ 次元のベクトルで表現される。しかし、 C が大きい

ときに、このような表現を用いることは適切ではなく、また
 9のすべての組み合わせが必ずしも可能な状態を表わすわけでは
 ないので、記憶領域がもたに用いられる。状態 s が可能か否
 かは、次の条件を用いて容易に調べられる。

$$Z_i = -1 \text{ ならば } Y_i > 0$$

$$Z_i = 0 \text{ ならば } Y_i = 0 \text{ 又は } X_i < Y_i$$

$$Z_i = 1 \text{ ならば } Y_i = 0$$

$$Z_i = 2 \text{ ならば } Y_i > 0 \text{ かつ } N_{i+1} - X_{i+1} < Y_i \quad (4)$$

この条件をみたす状態 $s = (X_2, \dots, X_c, Y_1, \dots, Y_c, Z_1, \dots, Z_c)$ は可能
 な状態である。そこで、可能な状態を順序づけ、配列 $T(j)$ を

$$T(j) = t(s)$$

と定義する。ここで s は j 番目の可能な状態であり、 t はそ
 の逆関数が容易に求められる整数値関数である。例えば、

$s = (X_2, \dots, X_c, Y_1, \dots, Y_c, Z_1, \dots, Z_c)$ に対して

$$t(s) = (Z_c + 1) + 4(Z_{c-1} + 1) + \dots + 4^{c-1}(Z_1 + 1)$$

$$+ 4^c Y_c + 4^c K_c Y_{c-1} + \dots + 4^c K_c \dots K_2 Y_1$$

$$+ 4^c K_c \dots K_1 X_c + 4^c K_c \dots K_1 N_c X_{c-1} + \dots + 4^c K_c \dots K_1 N_c \dots N_3 X_2$$

である。ここで K_i ($i=1, \dots, c$), N_i ($i=3, \dots, c$) はそれぞれ K_i ,
 N_i より大きい最小の2の中である。この逆関数は modulo 演
 算により容易に求められる。決定 $a = (Y_1, \dots, Y_c)$ に対しても、
 t と同様な整数値関数 $u(a)$ を用いることにする。すなわち、

$k = u(a)$ である。以下のMPIMでは次の2つのタイプの非最適決定の除去法を用いている。

- i) 最適政策 f_j^* になりえない決定 k を除去する永久的除去法。
- ii) 反復 n の政策改良ルーチンで得られる政策 f_j^{n+1} になりえない決定 k を除去する一時的除去法。

配列 $A(j, k)$ は上記除去法の結果を格納するために使用される。

$A(j, k) = -1$, k は j で許容されないか、または永久的除去法により非最適と判定された。

$= 0$, k は反復 $n-1$ で一時的除去法により除去されなかったか、または $k = f_j^n$ である。

$= n-r$, k は反復 $n-1$ の一時的除去法により除去され、かつ k が最後に評価されたのは反復 $r \geq n-R$ である。

$= R+1$, k は反復 $n-1$ の一時的除去法により除去され、かつ k が最後に評価されたのは反復 $r < n-R$ である。

さらに

$$A(j) = \{k; A(j, k) = 0\}$$

とおく。

修正政策反復アルゴリズム (MPIA)

1. $j=0$ とおく。今のすべての組み合わせについて次の手続きを実行する。Sが可能であるかどうかを条件(4)を用いて調べる。もしSが可能であれば $T(j) = t(s)$ とおき、さらに U のすべての組み合わせに対し、 A が許容されるか否かを調べ、

$$A(j, k) = 0 \quad , \quad \text{Sで } k = U(a) \text{ が許容される,}$$

$$= -1 \quad , \quad \quad \quad \text{許容されない}$$

とおく。 $J = j+1$ とする。

2. 式(1), (2) から $P_{JJ'}(k) \times r_j(k)$, $J, J' = 1, \dots, M$, $k \in A(j)$ を計算する。

$$P_{JJ'}(k) = p(t^{-1}(T(j)), u^{-1}(k), t^{-1}(T(j'))))$$

$$r_j(k) = r(t^{-1}(T(j)), u^{-1}(k))$$

非負整数 m 、適当な非負定数 ε, δ 、初期政策 f^0 , $f_j^0 \in A(j)$ を選ぶ。 $v_j^0 = u_j^0 = w_j^0 = 0$ ($j = 1, \dots, M$), $z = M, n = 0, \phi_0 = 0$, $\beta = \bar{L}$ とおく。 $\varepsilon = \delta$ ならば \bar{L} は十分大きな数である。

$$V(j, k) = \bar{L} \quad (j = 1, \dots, M, k \in A(j)), \quad w_j^{m+1} = L_j(f_j^0, w^m)$$

($j = 1, \dots, M$) とする。 $\varepsilon = \delta$ ならば $L_j(k, w^m)$ は

$$L_j(k, w^m) = r_j(k) + \sum_{j'=1}^M P_{jj'}(k) w_{j'}^m$$

で与えられる。

3. $\Phi_{n,r}(\max\{-1, n-R\} \leq r \leq n-2)$, Φ_n は次式により計算する。

$\Phi_{n,r} = \max_j \{v_j^n - v_j^r\}$, $\Phi_n = \max_j \{v_j^n - v_j^{n-1}\}$
 $j = 1, \dots, M$ に對して. $u = w_j^{m+1} - w_z^m$, $f = f_j^n$, $V(j, f) = u$ と
 おき. $A(j, k)$ であるような k ($\neq f_j^n$) に對し 次のサブステップ
 の 1) を実行する.

a) $A(j, k) = 0$ または 1 のとき, $t = V(j, k) + \Phi_n - P_{jj}(k) \{ \Phi_n - (v_j^n - v_j^{n-1}) \}$
 $t < u$ ならば, $A(j, k) = 2$. そうでなければ $u = L_j(k, v^n)$,

$V(j, k) = u$ とし $u > u$ ならば, $u = u$, $f = k$.

b) $A(j, k) = n - r$ ($< R$) のとき, $t = V(j, k) + \Phi_{n,r} - P_{jj}(k) \{ \Phi_{n,r} - (v_j^n - v_j^r) \}$
 $t < u$ ならば, $A(j, k) = A(j, k) + 1$. そうでなければ, $u = L_j(k, v^n)$,

$V(j, k) = u$, $A(j, k) = 1$. $u > u$ ならば, $u = u$, $f = k$.

c) $A(j, k) = R$ のとき, $t = V(j, k) + \Phi_{n,n-R} - P_{jj}(k) \{ \Phi_{n,n-R} - (v_j^n - v_j^{n-R}) \}$
 $t < u$ ならば, $A(j, k) = R + 1$. そうでなければ, $u = L_j(k, v^n)$,

$V(j, k) = u$, $A(j, k) = 1$, $u > u$ ならば, $u = u$, $f = k$.

d) $A(j, k) = R + 1$ のとき, $t = V(j, k) + \Phi_n - P_{jj}(k) \{ \Phi_n - (v_j^n - v_j^{n-1}) \}$
 $t < u$ ならば, $V(j, k) = t$. そうでなければ, $u = L_j(k, v^n)$,

$V(j, k) = u$, $A(j, k) = 1$, $u > u$ ならば, $u = u$, $f = k$

すべての k について上のサブステップを終えたと.

$x_j^{n+1} = u - v_j^n$, $f_j^{n+1} = f$, $A(j, k) = 0$

すべての j について上のループを終えたと.

$\sum_{j=1}^M \# \{ k; A(j, k) = 0 \} = M$ ならば, $CB = \text{true}$, そうでなければ,

$CB = \text{false}$ とする. ここで $\# \{ \cdot \}$ は 集合 $\{ \cdot \}$ の要素の数を

表わすものとする。5へ行く。

4. $j=1, \dots, M$ に対して, $u = w_j^{m+1} - w_j^m$, $f = f^m$ とおき,

$A(j, k) \geq 0$ であるような k ($\neq f_j^m$) に対して $v = L_j(k, v^m)$ し,

次のサブステップの1つを実行する。

a) $v > u$ ならば, $u = v$, $f = k$, $A(j, k) = 0$, $V(j, k) = v$.

b) $u \geq v > v_j^m + q_j^{m+1}$ ならば, $A(j, k) = 0$, $V(j, k) = v$.

c) $v < v_j^m + q_j^{m+1} - B$ ならば, $A(j, k) = -1$

d) $v_j^m + q_j^{m+1} \geq v \geq v_j^m + q_j^{m+1} - B$ ならば, $d = 1 - \sum_{j=1}^M \min(P_{jj}(k),$

$P_{jj}(f_j^m))$ を計算し, $v < v_j^m + q_j^{m+1} - dB$ ならば, $A(j, k) = -1$.

そうでなければ, $A(j, k) = 0$, $V(j, k) = v$

すべての k について上のサブステップを終えたあと

$$x_j^{m+1} = u - v_j^m, \quad f^{m+1} = f.$$

すべての j について上のループを終えたあと

$f^{m+1} \neq f^m$ ならば, $B = \bar{L}$, $CB = \text{false}$ とし,

$\sum_{j=1}^M \# \{k; A(j, k) = 0\} = M$ ならば 9へ行く。

5. $\Delta_{m+1} = \max_j x_j^{m+1}$, $\nabla_{m+1} = \min_j x_j^{m+1}$, $z = \text{arg} \{ \min_j x_j^{m+1} \}$ とし,

$\Delta_{m+1} - \nabla_{m+1} < \epsilon$ ならば 10へ行く。

6. $w^0 = v^m + x^{m+1}$, $q^0 = x^{m+1}$ とおき, $l=0, 1, \dots, m$ に対して,

逐次, $w^{l+1} = r(f) + P(f)w^l$, $q^{l+1} = w^{l+1} - w^l$ を計算する。

ここで $r(f) = (r_j(f_j))$, $P(f) = (P_{jj}(f_j))$ である。

$v^{m+1} = w^m - w_z^m e$, $\Delta = \max_j q_j^{m+1}$, $\nabla = \min_j q_j^{m+1}$ とおく。

ここで e はすべての成分が 1 である M 次元列ベクトルである。

7. $CB = \text{false}$ ならば、 $n = m+1$ とし 3へ行く

8. 次のサブステップにより上限 B を求める。

a) $|a_{m+1} - a_m| < \delta$ かつ $a_{m+1} < 1$ ならば、

$$B = (\max_j q_j^{m+1} - \min_j q_j^{m+1}) / (1 - a_{m+1})$$

$$= z'' a_l = (\max_j q_j^l - \min_j q_j^l) / (\max_j q_j^{l-1} - \min_j q_j^{l-1})$$

b) $|b_{m+1} - b_m| < \delta$ かつ $b_{m+1} < 1$ ならば、

$$B = \max \left\{ \max_j q_j^{m+1} - \min_j q_j^{m+1}, b_{m+1} (\max_j q_j^m - \min_j q_j^m) \right\}$$

$$/ (1 - b_{m+1})$$

$$= z'' b_l = \sqrt{(\max_j q_j^l - \min_j q_j^l) / (\max_j q_j^{l-2} - \min_j q_j^{l-2})}$$

そうしてなければ $CB = \text{false}$, $n = m+1$ とし 3へ行く。

$n = m+1$ とし、 $B < \Gamma$ ならば 4へ そうでなければ 3へ行く。

9. 政策 f^{m+1} は、唯一最適な政策 f^* である。 $\gamma_i = q^*$ と相対値 $v(f^*)$ はそれぞれ $q^* = (\Delta + \nabla) / 2$, $v_j(f^*) = w_j^{m+1} - w_M^{m+1}$ で近似され、誤差の上限はそれぞれ $(\Delta - \nabla) / 2$, B である。

10. 政策 f^{m+1} は $0 \leq q^* - q_j(f^{m+1}) \leq \varepsilon$ を満たす ε 最適な政策である。 $\gamma_i = q^*$ と相対値 $v(f^*)$ はそれぞれ $q^* = (\Delta_{m+1} + \nabla_{m+1}) / 2$, $v_j(f^*) = x_j^{m+1} + v_j^n - (x_M^{m+1} + v_M^n)$ で近似される。

MPIA は、有限回の反復で唯一最適、又は ε -最適な政策を

決定する。さらに問題が唯一最適政策 f^* をもてば、 $\varepsilon=0$ と
 LE MPIA は f^* を有限回の反復で決定することが示される。

5. 数値結果

1) 3段トランスファー・ラインの最適制御問題

a) バックアップなしの場合 ($M=72, K=\sum_{s \in S} A(s)=277$)

パラメータの値は以下のものとする。

$$C=3, N_2=N_3=0, K_1=K_2=K_3=1, b_1(1)=b_2(1)=b_3(1)=4,$$

$$d_1(k)=d_2(k)=d_3(k)=2k \quad (k=0,1), c_1(1)=c_2(1)=c_3(1)=7,$$

$$e_1(k,k')=e_2(k,k')=e_3(k,k')=|k-k'| \quad (k,k'=0,1)$$

$$f_1(1)=f_2(1)=f_3(1)=15, q=30, p_i(1)=0.002i \quad (i=1,2,3)$$

$$h_i(1)=0.6-0.1i \quad (i=1,2,3)$$

b) バックアップ 1個の場合 I ($M=117, K=474$)

$N_2=1, h_2(l)=2l \quad (l=0,1)$ 。他のパラメータの値は a) と同じである。

c) バックアップ 1個の場合 II ($M=117, K=512$)

$N_3=1, h_3(l)=2l \quad (l=0,1)$ 。他のパラメータの値は a) と同じである。

d) バックアップ 2個の場合 ($M=189, K=806$)

$N_2=N_3=1, h_2(l)=h_3(l)=2l \quad (l=0,1)$ 。他のパラメータの値は a) と同じである。

a) ~ d) に対して 3つの機械順を変えて計算を行った。機

概 A, B, C の特性値が表 1 に、数値計算の結果が表 2 に示されている。

2) 4段トランスファ・ラインの最適制御問題

e) バッファなしの場合 ($M=345, K=2019$)

$$C=4, N_4=0, K_4=1, b_4(l)=4, d_4(l)=2k \ (k=0,1), c_4(l)=7,$$

$$e_4(k, k')=|k-k'| \ (k, k'=0,1), f_4(l)=15, q=30,$$

$$p_4(l)=0.008, r_4(l)=0.2, \text{他のパラメータの値は}$$

1)-a) と同じである。

f) バッファ 1 個の場合 I ($M=561, K=3456$)

$$N_2=1, h_2(l)=2l \ (l=0,1), \text{他のパラメータの値は e) と}$$

同じである。

g) バッファ 1 個の場合 II ($M=570, K=3512$)

$$N_3=1, h_3(l)=2l \ (l=0,1), \text{他のパラメータの値は e) と}$$

同じである。

h) バッファ 1 個の場合 III ($M=561, K=3454$)

$$N_4=1, h_4(l)=2l \ (l=0,1), \text{他のパラメータの値は e) と}$$

同じである。

e)~h) に対しては、2通りの機械順 ABCD, DCBA について計算を行った。計算結果は表 3 に示されている。

1) は PIA と MPIA の両アルゴリズムを用いて、2) は MPIA を用いて解いた。また a)~h) に対し、制御を行わずに常に

機械を動したとき (no control) のゲインと生産率も計算した。

よく知られているように、生産率に関しては、システムの可逆性が成り立っている。しかし、各種費用を考慮した本稿の問題のゲインに関しては、当然ではあるが可逆性は成立せず、良い機械を後部におき、バッファをラインの中央におくことが有利であることがわかる。この結果は、一般に知られている経験則にも合致する。さらに、生産率に関しては可逆性の成立する ABC(D), (D)CBA のシステムが、それぞれの最小及び最大のゲインを与えることは興味深いものである。また、すべての例において、最適制御を用いたときのゲインは制御をしないときのそれよりかなり改善されている。さらに、最適制御を用いたときはバッファをつけることによりゲインが改善されるが、制御しない場合は在庫費用のためバッファをつけることによりむしろゲインが低下している。以上から、実際のトランスファー・ラインでは、各種費用を考慮して最適制御を行い、そのもとで最適設計を考えることが望ましいといえよう。

参考文献

- [1] Buzacott, J.A. and Hanifin, L.E. [1978] "Models of Automatic Transfer Lines with Inventory Banks - A Review and Comparison," AIIE Trans. 10, 197-207.

- [2] Buzacott, J.A. [1982] "Optimal Operating Rules for Automated Manufacturing Systems," IEEE Trans, Automat. Contr. AC-27, 80-86.
- [3] Gershwin, S.B. and Schick, I.C. [1983] "Modeling and Analysis of Three-Stage Transfer Lines with Unreliable Machines and Finite Buffers," Opns. Res. 31, 354-380.
- [4] Lev, B. and Toof, D.I. [1980] "The Role of Internal Storage Capacity in Fixed Cycle Production Scheduling," Nav. Res. Log. Quart. 27, 477-487.
- [5] 大野勝久 [1982] "待ち行列システムの最適制御に関する計算アルゴリズムについて," 数理解析研究所講究録 452, 1-19.
- [6] Ohno, K. [1984] "Modified Policy Iteration Algorithm with Nonoptimality Test for Undiscounted Markov Decision Processes," Working paper.
- [7] Shanthikumar, J.G. and Tien, C.C. [1983] "An Algorithmic Solution to Two-Stage Transfer Lines with Possible Scrapping of Units," Mgnt. Sci. 29, 1069-1086.
- [8] Spreen, D. [1981] "A Further Anticyclig Rules in Multichain Policy Iteration for Undiscounted Markov Renewal Programs," Z. Opns. Res. 25, 225-233.

表 1

機械	故障率	修復率
A	0.002	0.5
B	0.004	0.4
C	0.006	0.3
D	0.008	0.2

表 2

場合	機械の順	制御をしない		最適制御		
		ゲイン (生産率)		ゲイン	計算時間ms (反復回数)	
		PIA	MPIA			
a)	A, B, C	13.54 (0.9672)	13.59	1294(3)	183(7)	
	A, C, B	13.59 (0.9672)	13.67	1303(3)	163(7)	
	B, A, C	13.57 (0.9672)	13.64	1278(3)	160(7)	
	B, C, A	13.65 (0.9672)	13.75	1144(3)	172(7)	
	C, A, B	13.67 (0.9672)	13.78	1299(3)	195(8)	
	C, B, A	13.70 (0.9672)	13.83	952(3)	195(8)	
	b)	A, B, C	11.92 (0.9688)	13.76	5267(4)	559(10)
A, C, B		11.97 (0.9688)	13.83	5409(4)	546(10)	
B, A, C		12.31 (0.9697)	13.77	5392(4)	540(10)	
B, C, A		12.39 (0.9697)	13.89	5412(4)	540(10)	
C, A, B		12.76 (0.9701)	13.86	5448(4)	493(10)	
C, B, A		12.79 (0.9700)	13.90	5429(4)	553(9)	
c)		A, B, C	12.63 (0.9700)	13.72	4768(3)	442(8)
	A, C, B	13.01 (0.9697)	13.73	4792(3)	427(8)	
	B, A, C	12.66 (0.9701)	13.77	4891(3)	442(8)	
	B, C, A	13.38 (0.9688)	13.78	4215(3)	372(7)	
	C, A, B	13.09 (0.9697)	13.85	4905(3)	377(7)	
	C, B, A	13.42 (0.9688)	13.86	4816(3)	365(7)	
	d)	A, B, C	10.95 (0.9713)	13.87	25983(4)	1188(7)
A, C, B		11.37 (0.9711)	13.89	25739(4)	1400(8)	
B, A, C		11.34 (0.9721)	13.88	25754(4)	1201(7)	
B, C, A		12.12 (0.9711)	13.91	25707(4)	1341(8)	
C, A, B		12.21 (0.9721)	13.92	25851(4)	1362(8)	
C, B, A		12.55 (0.9713)	13.93	25717(4)	1206(7)	

表 3

場合	機械の順序	制御をしない	最適制御	
		ゲイン (生産率)	ゲイン	計算時間ms (反復)
e)	A, B, C, D	6.808 (0.9314)	6.942	26486(8)
	D, C, B, A	7.357 (0.9314)	7.746	26223(8)
f)	A, B, C, D	5.309 (0.9415)	7.229	113872(10)
	D, C, B, A	6.294 (0.9357)	7.924	107588(8)
g)	A, B, C, D	5.500 (0.9351)	7.339	109030(8)
	D, C, B, A	6.894 (0.9351)	7.869	92211(7)
h)	A, B, C, D	6.137 (0.9357)	7.252	76279(8)
	D, C, B, A	7.223 (0.9415)	7.794	85318(7)

注) MPIAのステップ3, 4において $P_{jj}(k)$ はメモリーにストアせず、必要に応じてその都度式(1)から計算された。