

細胞型機械における自己組織化

近藤 伸亮

1998 年度博士論文

細胞型機械における  
自己組織化

指導教官 富山哲男 教授



東京大学大学院工学系研究科

精密機械工学専攻

博士課程 67081

近藤 伸亮

## 概要

細胞型機械とは、システム全体を自律的な知能要素により構成する自律分散型機械システムの一つである。

本論文では、細胞型機械における自己組織化に焦点をあて、細胞型生産システムを例題として、自己組織化の手法を検討し、これを実装して自己組織化能力を持った細胞型生産システムの有効性を検証することを目的とする。

本論文では、細胞型生産システムのハードウェアを作成して、細胞型生産システムの実現可能性を確認する。次いで、計算機シミュレーションにより、細胞型生産システムが自己組織的に種々の生産要求、生産条件に適応可能であることを示し、あわせて、細胞型生産システムが獲得した適応構造の一般の生産システム設計に適用可能であることを示し、細胞型生産システムのプロトタイプングツールとしての有用性を検証する。

## 目次

1 序論	1
1.1 背景	2
1.2 本論文の目的	3
1.3 本論文の構成	3
2 細胞型機械	4
2.1 やわらかい機械への要求と既存の研究	5
2.1.1 やわらかい機械へ向けて	5
2.1.2 自律分散システムに関する研究	7
2.2 細胞型機械	11
2.2.1 細胞型機械の定義	11
2.2.2 細胞型機械の特徴	12
2.2.3 細胞型機械研究における本研究の位置づけ	13
2.3 細胞型機械における自己組織化	14
2.3.1 自己組織化の定義	14
2.3.2 自己組織化のための既存の手法	15

2.3.3	細胞型機械における自己組織化手法	18
2.4	本論文の位置付け	19
3	細胞型生産システム	20
3.1	現代生産システムの特徴	22
3.1.1	生産システムの構造	23
3.2	次世代生産システムへの要請	26
3.2.1	新しい生産システム構築方法論の必要性	27
3.3	自律分散型生産システムに関する既存の研究	30
3.3.1	生物指向型生産システム	31
3.3.2	ホロニック生産システム	31
3.4	細胞型生産システム	32
3.4.1	情報の流れに関する要求項目	32
3.4.2	物の流れに関する要求項目	34
4	細胞型生産システムの開発	36
4.1	細胞型生産システムの設計方針	37
4.1.1	全体機能の細胞への分割	37
4.1.2	細胞型生産システムの構成手法	41
4.2	細胞型生産システムのハードウェア設計	41
4.2.1	細胞型生産システムの要求機能	41
4.2.2	細胞型生産システムの構成	42

4.2.3	倉庫細胞	43
4.2.4	バレット	44
4.2.5	マニピュレータ細胞	44
4.3	細胞型生産システムの動作アルゴリズム設計	47
4.3.1	細胞型生産システムにおける分散型制御手法の検討	47
4.3.2	タスク情報細胞の設計	49
4.3.3	タスク情報細胞の動作	55
4.3.4	細胞型生産システムの動作アルゴリズム	57
4.4	ハードウェアを用いた動作実験	64
4.5	考察	65
4.6	第4章のまとめ	70
5	細胞型生産システムにおける自己組織化シミュレーション	72
5.1	シミュレーションの目的	74
5.2	細胞型生産システムのモデル	75
5.2.1	細胞型生産システムの要求機能	75
5.2.2	細胞型生産システムの構成	75
5.2.3	細胞型生産システムの動作	77
5.3	細胞型生産システムの自己組織化手法	79
5.3.1	システム動作の評価基準の選定	79
5.3.2	構造に関する分析	79
5.3.3	自己組織化アルゴリズムの検討	81

5.4	計算機シミュレーション	88
5.4.1	計算機シミュレーションの方法	88
5.4.2	細胞型生産システムのパラメータ決定	91
5.4.3	少種多量生産環境の計算機シミュレーション	95
5.4.4	中種中量生産の計算機シミュレーション	112
5.4.5	多種少量生産の計算機シミュレーション	119
5.4.6	変種変量生産の計算機シミュレーション	135
5.4.7	考察	138
5.5	実際の生産システムへの適用	149
5.5.1	ハードディスク書き込み工程	149
5.5.2	HDD 書き込み工場	150
5.5.3	HDD 書き込みラインの計算機モデル	151
5.5.4	本システムの改善事例	156
5.5.5	考察	163
5.6	第5章のまとめ	166
6	考察	168
6.1	やわらかい機械としての位置付け	169
6.2	生産システムの戦略設計方法論としての位置付け	169
6.2.1	細胞型生産システムの位置づけ	169
6.2.2	既存研究との比較	171
6.3	細胞型機械の設計方法論としての位置付け	172

6.4 創発型設計手法についての考察	173
7 結論	174
7.1 結論	175
7.2 展望	176
謝辞	176
参考文献	179
発表論文	183
付録	186
I 少種多量生産	187
(1) A-4	187
(2) A-6	189
(3) A-7	191
(4) A-8	193
(5) A-9	195
II 中種中量生産	197
(1) B-4	197
(2) B-5	199
(3) B-6	201
(4) B-7	203

(5)	B-8 . . . . .	205
(6)	B-9 . . . . .	207
III	多種多量生産 . . . . .	209
(1)	C-2a . . . . .	209
(2)	C-2b . . . . .	211
(3)	C-3a . . . . .	213
(4)	C-3b . . . . .	215
(5)	C-4b . . . . .	217
(6)	C-5a . . . . .	219
(7)	C-5b . . . . .	221
(8)	C-6a . . . . .	223
(9)	C-6b . . . . .	225
(10)	C-7a . . . . .	227
(11)	C-7b . . . . .	229
(12)	C-8a . . . . .	231
(13)	C-8b . . . . .	233
(14)	C-9a . . . . .	235
(15)	C-9b . . . . .	237
IV	変種変量生産 . . . . .	239
(1)	D-2 . . . . .	239
(2)	D-4 . . . . .	241

(3)	D-5 . . . . .	243
(4)	D-6 . . . . .	245
(5)	D-7 . . . . .	247
(6)	D-8 . . . . .	249
(7)	D-9 . . . . .	251

本書は、日本の経済発展の歴史を、戦前・戦中・戦後と分けて、その経済政策の経緯を明らかにし、その結果を分析する。戦前・戦中は、日本が経済的・政治的に孤立した状況下で、自給自足の経済政策を推し進めた。戦後は、日本が経済的・政治的に開放された状況下で、自由貿易政策を推し進めた。本書は、日本の経済発展の歴史を、戦前・戦中・戦後と分けて、その経済政策の経緯を明らかにし、その結果を分析する。

## 第 1 章

## 序論

## 1.1 背景

産業革命以降、急速に進んだ機械化の流れは、人間の筋肉労働を機械で置き換えるものであった。20 世紀の中頃から発展したコンピュータにより、機械は人間の単純な筋肉労働を代替するものから、人間の高度な頭脳労働までも代替しうるものへと変化する可能性が示されつつある。

しかし、このような機械システムの発展のなかで、人間らしい仕事は機械に次々と置き換えられ、人間は少しばかり器用な機械としての役割が押しつけられてきた。そして現在のコンピュータによる集中制御型のシステムにおいては、人間はコンピュータの指令のもとに働くようになっている。これは、人間の尊厳を甚だしく傷つけるものであるが、何よりも問題なのは、このコンピュータが出す指令がしばしば適切でないことが多いことである。しかしながら、人間が機械にあわせるような機械システムが横行しつつあるのが現状である。

何故、機械システムの発展は、このように人間から人間らしさを奪う方向へと進んでいるのであろうか。

それは、現在製造され、運用されている機械が、本質的に自然の環境や人間社会の動的に変化する環境に柔軟に対応することができないからである。現在の機械システムはそれを運用するのに適切な環境を人工的に作らなければならないのである。したがって人間と機械の双方が存在する工場内においては、人間は機械の機嫌を損ねないように、細心の注意を払わなければならないのである。

我々は今、21 世紀を迎えるにあたり、これまでの機械システムのあり方について、問い直すべき時に達している。こう慢な機械システムから、「人にやさしい機械システム」へのパラダイムシフトが求められているのである。

「人にやさしい機械システム」とは、人間社会や、自然社会に調和して機能する機械システムである。このような機械システムを指向する概念として、「やわらかい機械」[Tomiyama92a, Tomiyama92b]という概念がある。本研究は、「やわらかい機械」を実現するうえで最も有望なアーキテクチャである自律分散システムについて考察するものである。

## 1.2 本論文の目的

本論文の目的は、「細胞型機械」と呼称する自律分散型のシステムにおいて、システム全体を含目的的に構成し、制御するための自己組織化の手法を検討し、細胞型機械の一例として細胞型生産システムを開発し、これに自己組織化の手法を適用し、その有効性を検討することである。

## 1.3 本論文の構成

本論文は全7章からなる。

第2章では、「やわらかい」機械への要求と、その実現のために最も有効だと考えられる自律分散型システムに関する既存の研究を概観し、本研究が対象とする細胞型機械について説明する。次いで、細胞型機械における自己組織化の必要性について言及し、自己組織化のための既存の手法を概観する。

第3章では、本研究で対象とする生産システムについて、まず既存の生産システムの課題について述べ、これらを解決するための生産システムとして検討されている自律分散型生産システムに関する既存の研究を概観する。ついで、本研究で扱う細胞型生産システムについて述べる。

第4章では、細胞型生産システムのハードウェアを開発し、これを自律分散的に制御する手法について検討し、製品製造実験を通じて細胞型生産システムの自律分散的制御の実現可能性を確認する。

第5章では、細胞型生産システムにおける自己組織化の手法について考察し、計算機シミュレーションにより自己組織化の手法の有効性を検証する。具体的には、様々な生産条件、生産要求のもとでの計算機シミュレーションを通して、細胞型生産システムがどのような構造を獲得するかを調べ、その結果が一般の生産システム設計へ適用可能か否かを検討する。

第6章では、本論文で作成した細胞型生産システムについて考察を行なう。

第7章では、本論文の結論と展望を述べる。

## 第 2 章

# 細胞型機械

## 2.1 やわらかい機械への要求と既存の研究

### 2.1.1 やわらかい機械へ向けて

地球環境の有限性が議論される今日では、機械設計は単に運用効率を最大化するように機械システムを設計することのみならず、製造した機械が、その設計から運用、保全、改良、廃棄、リサイクルにいたるまで、ライフサイクル全体にわたる全ての局面を視野に収めた上での設計の必要がますます高まりつつある。

機械の有用性をライフサイクル全体の視野から捉えるとき、現在の機械に欠けているものはなんだろうか？

それは、運用、保全段階以降のライフサイクルへの考慮である。有限の地球環境への負荷を最小に抑えるためには、ライフサイクル全体を通じて消費されるエネルギー量を抑え、機械がその寿命を終えた時に廃棄される物質の量を最小に、可能ならばゼロに抑えることが必要である。そして機械がライフサイクルを通して消費するエネルギー量と、消費された機械から排出される廃棄物量を極小化するための有望な方法は、機械の長寿命化をはかることである。あるいは、役目を終えた機械から可能な限りの部品を再利用して新規生産のエネルギー消費を抑えること、あるいは逆に旧式の機械に部品の交換や追加などを行なうことで新規製造された機械に匹敵する機能を発揮せしめることである。機械の長寿命化とは、単に長い運用期間、大きな運用回数によって壊れないということのみを意味するわけではない。ユーザの嗜好や要求の変化に応じてきめ細かく機能を調整、向上させていくことが求められるのである。

しかし機械の長寿命化を念頭におくとき、現在の機械システムは大きな問題点を抱えていることに気づく。

- 耐故障性の欠如

現在の機械システムでは、一部の部品の故障がシステム全体の故障を招くことが多い。

- 融通性の欠如

機械の構成部品を、同一形状や同一機能以外の他の部品と取り替えるのが困難

である。部分を取り替えるにも全体の再設計、またメカトロニクス製品では制御ソフトウェアの再作成が必要となる。すなわち、機械の一部を交換することによって、容易に機械の機能をアップグレード、またはダウングレードすることが出来ない。

- 柔軟性の欠如

機械の運用環境は時々刻々変化するが、これらの変化に追従することが出来ない。

- 新規設計の困難性

現在の機械システムでは、設計段階において想定する、運用環境や運用条件において効率良く機能を実現可能な構造を決定しなければならない。しかし、運用環境や運用条件はかならずしも明確であるとは限らない。与えられた環境や条件において最適なシステムの構造を決定することも必ずしも容易ではない。このことが、機械システムの設計の困難性を増しており、同時に機械システムを計画してから、実際に運用を始めるまでの所要時間を大きなものとしている。

すなわち、現在の機械システムは きわめて「かたい」システムなのである。

では、この現行の機械システムの「かたさ」は何に由来するのであるか？それは、機械システムが設計時にその構造を決定されていることに由来しているといえる。現行の機械システムでは、設計時に部品の役割と相互依存関係が明確に規定され、一つの部品は他のいくつかの部品の正常な動作を前提として動作している。このため、一部の部品の異常は、それに依存する他の部品の異常を生じ、故障が他の部品へ波及しやすい。また、一部の部品を交換するためには、その部品と依存関係のある全ての部品の制御プログラムを変更しなければならない。つまり、設計時に規定された部品の相互依存関係を、システム運用時に容易に変更することができないという事実が、現行の機械システムのかたさを招いているのである。

では、故障などの内的環境および、ユーザーのニーズなどの外的環境の変化に柔軟に適應できる「やわらかい」機械 [Tomiyama92a] は、どのようなアプローチで実現可能なのであろうか？現行の機械システムの「かたさ」の原因が運用時の部品間の相互

依存関係が変更不可であることにあったのであれば、運用時に部品間の相互依存関係を変更可能なシステムを作れば「やわらかさ」が実現出来るのではないだろうか？

更に部品間の依存関係を自由に変更可能にするには、一般に用いられる集中制御部を持ったシステムではなく、システムを構成する個々の要素が互いに独立に自律的かつ協調して動作することで全体の要求機能を実現するシステムであることが望ましいと考えられる。

このような考えから「自律分散システム」の概念が唱えられ、現在盛んに研究が行なわれている(例えば [Itoh95],[Osada95] など)。ここでは自律分散システムに関する既存の研究を挙げる。

### 2.1.2 自律分散システムに関する研究

伊藤 [Itoh95] によると、自律分散システムは以下のように定義される。

自律分散システムとは、システム全体を統合する管理機構を持たず、システムを構成する各要素(個・サブシステム)が自律的に行動しながら、協調・競合的に相互作用しあい、全体として任務を達成する(秩序を形成または維持する)システムである。

自律分散システムの代表的な例として、福田らによる“CEBOT”と称する分散型のロボットシステムが挙げられる [Fukuda94]。CEBOT では“cell”と呼ぶ複数種類の機械モジュールを組み合わせて様々な機械システムを構築することを試みている。CEBOT の一例として四つの cell を用いて構築したマニピュレータを図 2.1 に示す。

村田らは同一ユニットから構成される「自己組立て機械」の研究を行っている [Murata95]。これは、2次元平面上に置かれた正六角形のユニットで構成される機械システムで、全体として形成すべき目標形状を各ユニットに与えると、各ユニットがローカル通信・ローカル情報を基に接続関係を変更することで、全体が目標形状に到達する機能を持っている。図 2.2 に3つのユニットが結合した状態のハードウェアを示す。

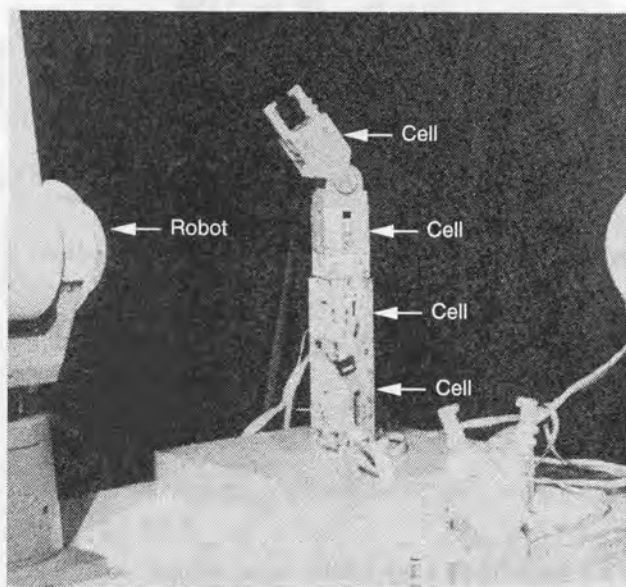


図 2.1: 自己組織化マニピュレータ ([福田 95] から加筆の上掲載)

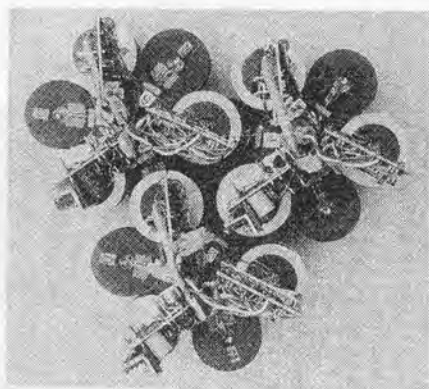


図 2.2: 村田らの自己組み立て機械のハードウェア ([小鍛冶 95] より掲載)

Luntz ら [Luntz97] は、2つのローラを組み合わせて2次元の自在搬送が可能なアクチュエータを作成し、これらを装備するユニットを多数結合した搬送システムを構築し、分散制御、集中制御を使い分けて制御することを試みている。図 2.3に Luntz らの構築した搬送システムを示す。

マイクロマシンは、極めて多数の均質な機械要素が全体として機能を発現することを目指す機械システムである。

藤田 藤田 [96] は、多数の同一のマイクロアクチュエータから構成されるマイクロ搬送システムを開発している。2次元セルラーオートマトン (CA) を拡張した、制御則を導入し、マイクロアクチュエータ全体の制御を分散的に行なう手法を提案している [三田 97]。

複数の移動ロボットをサブシステムとする、自律分散システムの研究も盛んに行なわれている。浅間 浅間 [Asama89] は、数台のロボットからなる複数移動ロボットシステム "ACTRESS" を開発し、2台のロボットが協調して1個の荷物を押すなどの協調動作を実現した。また、Intelligent Data Carrier と称する、ランドマークを介して複数

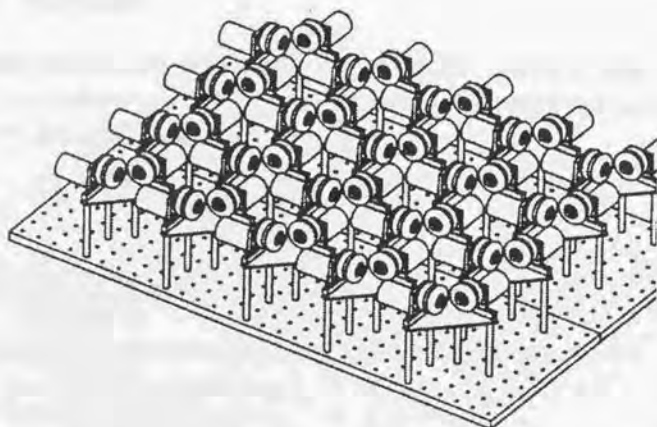


図 2.3: Luntz らの搬送システム ([Luntz97] から掲載)

ロボット間で地図情報を交換、共有する手法なども研究されている [Arai96]。

社会性昆虫の採餌行動のアナロジーから、ロボット群の協調行動を論じる研究もなされている。

Deneubourg らは、ランダムに動き回るロボットに餌を拾い上げる／落すの確率的な操作を行なわせることにより、餌をクラスター状に集める群行動が形成されることを示している [Deneubourg90]。

吉村らは、複数のロボットによる多数物体の繰り返し搬送作業に、漸進的戦略形成手法と称する強化学習的なアルゴリズムを搭載することで、複数のロボット群の協調的搬送形態を獲得することを示している [吉村 98]。

## 2.2 細胞型機械

細胞型機械 [Sakao97] とは、機械システム全体を自律的な要素 (以下、細胞) で構成し、これらの細胞がシステム運用時に自己組織的に相互の依存関係を形成することで、システム全体の機能を発現することを目指す機械である。

以下、細胞型機械の定義について述べ、細胞型機械がどのような特徴をもつかを説明する。

### 2.2.1 細胞型機械の定義

細胞型機械とは、以下の性質を持つ部品で構成する機械であると定義する。

- 均質性

細胞型機械は少種類の部品から構成される。この部品を「細胞」と呼ぶ。細胞型機械は、「やわらかさ」実現のためには多数の同種類の細胞によって構成されることが望ましい。

- 自律性

各細胞は知的判断部を持ち自律的に行動する。

- 情報、制御の分散性

細胞型機械においては、情報を集中的に管理、処理する部分は存在せず、情報は、システムを構成する複数の細胞へと分散され、局所的に処理されることでタスクが実行される。

- 自己組織化能力

システム全体に与えられた機能は、個々の細胞が勝手に動作するだけでは実現できない。個々の細胞と他の細胞との間のタスクや機能の依存関係を動的に生成すること、すなわち自己組織化能力を搭載する必要がある。

## 2.2.2 細胞型機械の特徴

細胞型機械は、その定義から以下の特徴を持つものと考えられる。

- 耐故障性が高い

細胞型機械の均質性から、機械システムの部品の一つとしての細胞が壊れても、その機能を他の同種類の細胞により補完することが可能である。この意味で耐故障性の高いシステムである。

- 再構成性に富む

細胞型機械では、システムの設計時に細胞同士のタスクや依存関係といった全体構造を決定せず、機能を発現する構造を運用時に動的に獲得する。この自己組織化能力によって、運用中にシステムの一部を除去したり、あるいはシステムを構成する細胞を置換しても、これらの変化に適応してシステム全体に要求された機能を実現し続けることが可能である。

- 新規設計の容易さ

一般に、機械システムの新規設計にあたっては、目標機能を効率的に実現可能な構造を設計段階で決定する必要がある。しかし、機械システムの運用環境や、運用条件は、かならずしも設計段階で明確なわけではなく、与えられた運用環境、運用条件のなかで効率良く機能を発現する構造を設計段階で見つけるのは困難なことが多い。細胞型機械では、運用を通しての自己組織化により、様々な運用環境、運用状況に適応可能な構造を自動生成することから、新規設計の困難性を抑えることが可能である。

すなわち、新規に機械システムの設計を行なう場合のプロトタイピングのツールとして、細胞型機械は有効であるといえる。

細胞型機械は、既存の自律分散システムの研究の中で以下のような位置付けをしめている。

- 任意の全体形状の生成 (例えば [Murata95]) や、複数機械の協調による搬送の実現 (例えば [三田 97]) 等のように、全体として単一の機能を発現を対象とするの

ではなく、加工、搬送、保管といった複数の機能を持つメカトロニクス機械を対象としていること。

- 少数の高機能なロボットで構成されるシステム (例えば [Asama89]) ではなく、比較的単機能、低能力の細胞を多数用いてシステムを構成

### 2.2.3 細胞型機械研究における本研究の位置づけ

坂尾 [Sakao96] は、細胞型機械の例題として、細胞型自動倉庫を開発し、実機および計算機シミュレーションにより、細胞型機械の耐故障性、再構成性を確認している。さらに、細胞型機械の設計方法論を提案し、細胞型機械設計支援ツールを開発し、細胞型自動倉庫を例に、設計支援ツールの有効性を検証している [Sakao97]。

坂尾は、完全に均質な、全て同一種類の細胞からなる細胞型機械を対象として、「機能の縮退可能性」という概念を用いて、細胞型生産システムの設計手法の構築を試みた。ここで機能の縮退可能性とは、全体を同一機能を持つ部分に分割可能、かつ各部分の機能を全体の機能とは独立に記述可能であるという性質のことである。

坂尾は、細胞型機械が、全体構造を持たずに、機械システム全体の目標機能を実現出来ることを示した

一般に、ある目的機能に対する実現構造は、常に明らかであるとは限らない。特に、複雑な要求項目を同時に満たすことが求められる場合には、これらの要求項目を十分に満足するような実現構造を見つけることは難しい。

細胞型機械は、構造がなくとも動作することが可能である。したがって、細胞型機械はこのような、複雑な要求項目を同時に満たすことが求められるような条件下でも動作が可能である。ここに細胞型機械が設計ツールとして有効なものとなりうる可能性が潜んでいる。

すなわち、細胞型機械に自己組織化能力を導入することで、目標機能を実現する構造を発見するのが難しい設計問題において、適切な実現構造を発見できるのではないかと期待できるのである。

このような観点から、本研究では、細胞型機械に自己組織化アルゴリズムを導入し、

その有効性を検討することに焦点をあてる。

## 2.3 細胞型機械における自己組織化

細胞型機械の実現には、自己組織化能力の実装方法が重要となる。本節では、自己組織化過程に関する研究を概観し、ついで自己組織化の定義を行ない、代表的な自己組織化の手法を説明する。

### 2.3.1 自己組織化の定義

本節では、これまで行なわれてきた多くの自己組織化に関する研究を概観し、細胞型機械における自己組織化の概念を定義する。

ブリゴジンは、物理学的に単純な現象から複雑性が発生するメカニズムについて考察し、「散逸構造」という概念を提唱した [G.Nicolis93]。ベナール対流と呼ばれる現象を例に説明する。液体、例えば水の層が2枚の板の間にあるものとする。平行板の大きさは、液体の層の厚さよりも十分大きいものとする。この系をこのまま放置すると、流体は速やかに均質な状態へと移行し、統計的にみて同一の状態、すなわち体積運動も温度差もない平衡状態になる。系内のある一点で、温度が高くなるなどの摂動が生じても、摂動は急速に消滅し系は再び安定な平衡状態へと移行する。今、この系のガラスの下面を連続的に熱することで、すなわち外的拘束を与えることで、系を平衡状態から遊離させることができる。このとき、下面に与える熱を一定以上の大きさにすると組織的な体積運動が観測される。この体積運動をベナール対流と呼ぶ。すなわち、平衡から速く離れたところでは、系はいくつかの異なる方法で環境へ適応することが可能となるのである。このように平衡から離れた領域で安定に維持される構造をブリゴジンは散逸構造と呼んだ。散逸構造を特徴づけるものは、対称性の破れ、多重選択、巨視的範囲にわたる相関であり、パターンの自然的形成の原理であると説明した。

一方ハーケンらは、分岐、不安定性という観点から自己組織化現象の一般現象を探ろうとする「シナジェスティックス」なる学問領域を提唱した [H.Haken78]。「自己組

組織化する系は、外からの特別な下渉がなくても構造や機能を獲得する」として、生物界、非生物界の両方において、構造および機能の自己組織的形成を支配している一般原理を探ることを目標としている。シナジスティックスでは、自己組織化過程を決定づけるものは「集団的な“モード”の成長（または減衰）速度」であるとし、系の巨視的振舞いを秩序パラメータを用いて特徴づけ、隷従原理と名付けられた断熱近似により系の振舞いを簡略化して扱う。シナジスティックスは極めて広い領域を対象とする学問分野で、レーザーなどの物理現象から、生体における発生現象や、社会モデルなど多くの分野に適用されているが、熱平衡から遠く離れた解放系におけるパターン形成を扱う点では散逸構造と共通しているといえる。

工学的な観点から、自己組織化現象にメスを入れた人物としては、フォン・ノイマンがあげられる。彼は、セルラモデルで、「機械は増殖可能である」ことを示している[Neumann66]。彼は、セルラモデル上にまず万能チューリング機械が作れることを示し、ついで平面上の任意のセルを任意の状態に変えることのできる万能製作機械をセル上に構成し、この2つを組み合わせることで自己増殖が可能な機械が作成可能であるとした。

さらにラングトン<sup>1)</sup>は、コンウェイのライフゲームを用いて、自己増殖するセルラーオートマトンを考案している[Langton86]。

以上、自己組織化とは決して新しい言葉ではなく、古くから様々な研究されてきた概念であることを確認した。本研究では、工学的に簡略化した定義として中野[中野 96]に従い、以下のように「自己組織化」を定義する。

「外界との接触によって合目的システムが自然に出来てくること」

ここで外界とは、機械システムにとってのユーザの要求や、運用環境である。合目的システムとは、工学的には、「ある機能を持ったシステム」と解釈する。

### 2.3.2 自己組織化のための既存の手法

マルチエージェント系における自己組織化の手法としては、Genetic Algorithm(GA)などに代表される進化的プログラミングと、各エージェント毎の強化学習などが一般的である。

## (1) 進化的計算手法

進化的計算手法とは、生物の進化のプロセスをモデルとした自律的、創発的な最適化手法である。遺伝的アルゴリズム (GA) [Holland75a] や、進化戦略 (ES) [T.93] が代表的な手法である。GA は、自然界における生物の進化 (集団遺伝) モデル、すなわち世代を形成している個体の集合群の中で、環境への適応度が高い個体が次世代により多く生き残り、遺伝子の交叉や突然変異を起こしながら次の世代を形成していく過程を模した最適化手法である。最適化問題の目的関数を適応度に、解の候補をそれぞれ個体に対応させ、最適問題に広く応用されている (例えば [北野93] や [OR93])。

ES は、GA 同様に生物の進化モデルを模した計算手法であり、ある世代の集団 (個体数  $\mu$ ) において、遺伝的変異を加えながら  $\mu$  個の個体を生成し、適応度の順に  $\mu$  個の個体を選択することを繰り返し、適応度の高い解を求める手法である。遺伝子の交叉操作を行わないところが GA と最も異なり、定量的研究が GA に比べて困難ではないことから突然変異率の効果などが数理的に解析されている。

## (2) 強化学習

強化学習とは、報酬という特別な入力から、環境に適応した行動や戦略を獲得する教師なし学習である。強化学習では、ある環境状態において実行された行動の評価として与えられる報酬を最大化するような行動を探索する。したがって、目標状態だけを与え、試行錯誤的に目標状態へと到達する行動系列を自律的に獲得させることが原理的には可能である。このことから、モデル構築が困難な複雑な環境下での行動、戦略獲得手法として強化学習手法が広く用いられている。

強化学習では、接近の指向性として最適解の探索を優先するか、効率を優先するかの2つのアプローチがある。最適性を優先するアプローチとは、出来るだけ大きな報酬を最終的に得るために未探索の空間を探索する環境同定型のアプローチである。Q 学習は、代表的な環境同定型のアプローチである [Watkins92]。

Q 学習では、状態認識機はルールベースであり、各ルールは Q 値と呼ばれる重みを持っている、この Q 値に基づいて、次のステップでの行動を選択するが、この行動の結果に基づき Q 値を更新することで学習を行なう。今、状態  $x$  で行動  $a$  をとり状態  $y$

に遷移し報酬  $r$  を得たとする。このとき、式 (2.1) に従い  $Q$  値を更新する。

$$Q(x, a) = (1 - \alpha)Q(x, a) + \alpha(r + \gamma \max_b Q(y, b)) \quad (2.1)$$

ここで  $\gamma$  は割引引き率、 $\alpha$  は学習率である。 $\gamma$  が大きいほど、未来において現在行なった行動の影響が大きくなる。 $Q$  学習では、環境がマルコフ的であれば、最適政策の獲得が保証されるという利点がある。しかし、学習途中段階での  $Q$  値は近似解として意味がなく、学習収束を待たねばならないこと、また非マルコフ的環境では学習動作が保証されないことなどの欠点がある。

一方、効率性を優先するアプローチとは、学習途中、すなわち最適解に到達する前でも出来るだけ報酬を得るため、有効であった行動を繰り返し強化する経験強化型のアプローチである。Bucket Brigade [Holland86] と Profit Sharing [Holland75b] が経験強化型のアプローチの代表的な例である。

### (3) 生体システムに学んだ手法

動物の骨は荷重に応じた構造をとるように成長することが知られている [須田 85]。また、血液循環系が酸素輸送効率を最大にする最適システムになっている [Kamiya80]。このように、生体システムは様々な自己組織化現象を示している。

これら生体に見られる自己組織化現象を工学的に応用する手法が試みられている。梅谷らは、骨の適応生長をモデルとして構造材の最適形状の決定を行なう生長変形法を提案した [梅谷 76]。生長変形法は、以下のプロセスで構造材の最適形状を求める。

1. 構造材として任意の一つの素原形を与える。
2. 荷重を加える
3. 構造材に誘起する主応力を計算する。
4. 主応力の大きさと分布を評価する。

評価方法としては、最大主応力を平均化させる方法と、最大主応力を目標値に揃える方法を用いる。

5. 評価に対応させて生長変形させる。

生長変形の手法としては、骨の外形変化に相当する表面変化法と骨のち密さの変化に対応する等価剛性変化法を用いる。

6. 手順(2)に戻る。

以上の手法を適用し、Γ形曲がり梁の先端に静荷重がかかったときの最適形状が大たい骨大転子に似た構造になることなどを示した。

また、伊能らは、生長変形法の手順を変更し、セルラーオートマトンと組み合わせることで様々な力学構造物の自己組織化を試みている [伊能 95a][伊能 95b]。

### 2.3.3 細胞型機械における自己組織化手法

細胞型機械では、情報は可能な限り分散され、局所的に処理を行なうことをその設計の方針としている。このことから、細胞型機械に導入する自己組織化のアルゴリズムは、可能な限り局所的な情報処理で実現可能なものであることが望ましい。この観点から、各細胞単位で自己組織化のアルゴリズムが実装可能である手法を用いるのが良い。

本研究では、各細胞が独立に学習することで集団としての適切な全体構造の獲得を目指すというアプローチを採用する。このようなアプローチは、マルチエージェント環境での強化学習問題として扱うことが出来るが、このような環境では、個々の細胞から見て環境は非マルコフ的なものとなり、広く用いられているQ学習を適用するのは必ずしも妥当ではない。

以上から、本研究では、各細胞が、過去の経験に基づき、出来るだけ有効度の高い行動を繰り返し選択しながら、システム全体としての適切な構造の獲得を目指す学習方式を採用するものとする。

## 2.4 本論文の位置付け

本論文では、細胞型機械における自己組織化に焦点をあて、細胞型生産システムを例題として、自己組織化の手法を検討し、これを実装して細胞型生産システムの開発を行なうことにより、自己組織化能力を持つ細胞型機械の有効性を検討することを目的としている。

具体的には、細胞型機械の手法により細胞型生産システムのハードウェアを作成し、動作実験を行なうことにより細胞型生産システムの実現可能性を検証し、さらに、細胞型生産システムの計算機シミュレーションを通して、種々の生産条件、生産要求下における細胞型生産システムの自己組織化能力を検証し、あわせてその結果の実際の生産システム設計への適用可能性を検討することで、プロトタイプングツールとしての細胞型生産システムの有効性を検討する。

生産システムは、その運用環境および運用条件、すなわち需要見込みを設計段階で見積もることは容易ではなく、また、運用条件の変化、すなわち生産要求の変化に柔軟に対応することが求められるシステムであり、現在もっとも「やわらかさ」を要求されている機械システムである。実際、これらの要求に応えるべく、生産システムを自律分散型で構成する試みが様々になされている（第3.3節参照）。

本研究では、生産システムの設計に細胞型機械という自律分散の手法を適用し、細胞型機械の特徴である自己組織化機能を用いることで、様々な生産環境、生産要求に適応した生産システムの構造を導き出す。つまり、本研究は生産システムの設計手法の一つとして位置付けることが出来る。この設計手法は、単に本研究で開発する細胞型生産システムのみならず、広く他の生産システムにも適用可能であると考えられる。

また、本研究では細胞型生産システムの開発を通して細胞型機械の自己組織化手法を検討し、自己組織化能力を持つ細胞型機械システムの有効性を検討するのを目的としている。本研究で例題として扱う細胞型生産システムは、複数種類の要素から構成される自律分散システムであり、また、生産という機能を同システム上で実現するためには、複数の細胞の協調動作を設計することが必要となる。すなわち、本研究は、自律分散システムにおける協調動作の実現方法の研究と位置付けることが出来る。

### 第 3 章

## 細胞型生産システム

細胞型機械における自己組織化のメカニズムを探るための例題として、本研究では生産システムを採用する。生産システムは、近年の消費者のニーズや価値観の多様化にともない、変種変量生産の必要性が高まるとともに、最も柔軟なシステム構築が望まれている分野である。

本章では最初にこれまでの生産システムの特徴とその課題、およびそれらを解決する次世代の生産システムとして盛んに研究されている自律分散型の生産システムに関する既存の研究について概観し、ついで細胞型生産システムについて説明し、細胞型生産システム実現に必要な要素技術を検討し、細胞型生産システム開発のロードマップを明らかにする。

### 3.1 現代生産システムの特徴

人見[人見 90]によると、生産は「生産要素(投入物)を有形・無形の経済材(産出物)に変換し、これによって価値を増殖し、効用を生成する機能」と定義される。

生産システムを構築、運用するにあたっては、工学的には「物の流れ」と「情報の流れ」を適切に決定し、制御することが、合目的な生産のために重要である。生産システムにおける「物の流れ」には、生産要素の変換、運搬、貯蔵が含まれ、生産の変換過程をどのように構成し、それらの工程をどのように生産設備に割り当てるか、すなわち生産システムの構造を決定する。以下、生産システムにおける「物の流れ」を、生産システムの構造と呼ぶ。

一方、「情報の流れ」は、生産体が生産する製品を設計し、それを製作するための手続きを決める技術情報の流れ(技術情報処理)と、素材を製品へ変換する生産活動を計画して運用し、それに基づく生産結果に応じて統制を行なう一連の管理情報の流れ(管理情報処理)に大別できる。

ここで管理情報の流れ、即ち管理情報処理は、技術情報処理に影響を及ぼす。たとえば、生産計画の結果が、製品の設計変更や、新製品、部品の開発、あるいは生産システムのレイアウト設計を促し、逆に工程設計の結果が、日程情報に影響を及ぼす。

これらの情報処理を、コンピュータを用いて統合的に実行し、生産システムを管理、運用するのがコンピュータ統括生産(CIM)である。

生産システムは、様々な生産対象、様々な生産要求、様々な生産状況により、種々の形態、構造、様式をとる。生産システムの様式は、たとえば次のような観点から分類することが可能である。

- 注文生産・見込み生産

注文を受けてから生産を行なうか、あるいは予め注文を受ける前に生産を行ない、製品在庫により注文に応じるかによる分類。注文生産では、製品仕様が不確実なため生産計画をたてるのが困難であり、受注から納品までの納入リードタイムを短縮するのが難しい。

- 個別生産・間欠生産・連続生産

規定の期間における予想販売量ないし、需要の大小による分類。予想販売量が極めて小さい場合は、個別生産が行なわれ、逆に非常に大きい場合は、連続（大量、多量）生産が経済的である。両者の中間として、ある一定数量ずつ生産をまとめて、これを1ロットとし、各ロットの生産を繰り返し実行するのが間欠生産である。

- 組み立て生産・プロセス生産・分解生産

生産システムの対象による分類であり、自動車などの機械製品などは、いくつかの部品から構成され、これらを組み立てることにより製品が完成するのに対し、製鉄、板金、化学製品などのように分解が不可能な生産形態や、原油精製過程などのように1つの原料が様々な製品や半製品へと分解されていく生産形態などが存在する。

これらの、様々な生産形態に応じて、それぞれに適した構造の生産システムが用いられている。以下、加工、組み立て生産を対象に、様々な生産要求に対してどのような生産システムが用いられているか概観する。

### 3.1.1 生産システムの構造

図3.1に、種々の生産要求に対して、現在どのような生産システムが一般的に用いられているかを示す。

- トランスファライン型構造（以下、ライン型と省略）

ライン型構造とは、可能な限り、単一の加工機械では単一の作業のみを実行し、それぞれ単一の作業を行なう複数の加工機械を、素材が順番に巡回することで製品加工を完了する形態である。通常、素材から製品への変換の生産プロセスにしたがって直線上にそれぞれの工程に専門化した生産設備を配置するレイアウトが用いられる。ライン型構造は、部品を安く、速く加工することを目標に、加工対象を特定した上で高度に自動化されるため、高い生産能力を持つが、柔

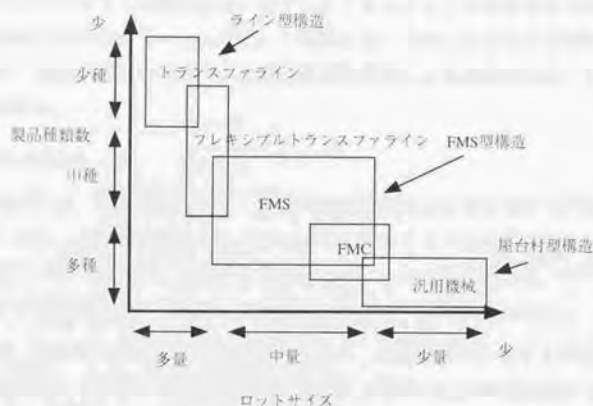


図 3.1: 生産要求に対する生産形態の分布

軟性に乏しい。たとえば、機械が一台でも故障すると、その影響がライン全体に及び、対象製品が少しでも変更されるとライン全体を再構築する必要がある。

- 屋台村型構造

個別生産などの多品種少量生産環境では、それぞれの品種のそれぞれの工程に必要な専門設備を用意することは難しく、汎用的な加工能力を持つ機械を適当台数配置して生産システムを構築することが一般的である。

屋台村型構造とは、このような汎用機械を用い、単一の加工機械で複数種類の加工を行なう生産システムである。ライン型構造に比べて、素材加工が完了するまでに巡回する加工機械の数が少ないのが特徴である。ライン型構造と異なり、柔軟性が高いが、機械の稼働率や、総仕掛かり時間などの点で、効率が低く、生産量を増大させるのが困難である。

屋台村型構造は、多品種少量生産、特に人手による組み立て工程などに用いられるが、屋台村型構造の生産システムは、人間の働きがいなどの要素も加味し

て導入されてきた経緯があり、必ずしも生産システムの最適性のみの観点から論じることが出来ない。しかし、一般的には、人間による組立て工程などのように、複数の作業の切替えが比較的容易に行なえる生産環境に適していると考えられる。

#### ● FMS 型構造

一般的には、加工機械は、同一種類の加工を連続して行なうほうが効率が良いことから、少品種多量生産などの生産環境にはライン型生産システムが適しているとされているが、多種少量生産などのような生産要求には、ライン切替えなどの段取り換えの手間からライン型生産システムは適していない。

一方、人手による組立て作業などのように、複数の作業の切替えが極めて容易な環境のもとで用いられる屋台村型構造は、段取り換えの時間が極めて小さく、複数種類の製品が一度に生産される多品種少量生産のような生産要求に適していると考えられている。しかし、ライン型構造および屋台村型構造は両極端な生産要求や生産条件に適した構造であり、通常の生産要求や生産条件はこれらの中間的なものであると考えることが出来る。

広く導入されている FMS(Flexible Manufacturing System) 型の生産システムは、この中間的な生産条件、生産環境に対応した構造であると考え、このような中間的構造を本研究では FMS 型構造と呼ぶこととする。

FMS とは、マシニングセンタと呼ばれる汎用工作機械に自動マテリアルハンドリング設備を結合して構成される生産システムである。マシニングセンタは、大抵の加工がこなせる万能機械であり、NC 工作機械などを用いて構成することで、ソフトウェアの変更のみで、あらゆる加工に対処することを目指したものである。FMS では、このようなマシニングセンタに、自動的に部品を着脱する装置を結合し、部品倉庫や、製品倉庫間を結んで柔軟に移動可能な無人搬送車を用いることで、ソフトウェアの変更のみで生産ラインの様々な条件の変更に対処することを目指している。FMS は中種中量生産分野を中心に導入が始まり、次第にその適用範囲を広げつつある。

なお、FTL(Flexible Transfer Line)とは、ライン状に配置されている機械群に汎用性をもたせることで柔軟性を持たせたFMSであり、FMC(Flexible Manufacturing Cell)とは、1台ないしは2台の万能工作機械で構成される小規模のFMSである。

### 3.2 次世代生産システムへの要請

大量生産、大量消費を前提とする社会では、生産システムに要求されるのは、同種の製品をより安く、より大量に、より素早く生産することであった。しかし、人件費や資材調達費等の安い海外への工場の移転による空洞化によって、作業者に単純な労働を強いる既存の大量生産型の生産システムは、国内では存在し得なくなっており、高付加価値の生産システムが求められている。

このような現状の中で次世代の生産システムは、以下のような特徴を持つことが求められている。

#### 1. 生産条件などの変更に対する柔軟性

具体的には、以下の要求項目があげられる。

- 多種少量、変種変量生産への対応

ライフスタイル、価値観の多様化による消費者ニーズの多様化から、製品の需要予測が困難となることが予想され、生産システムは、見込み生産による少種多量生産、中種中量生産から、受注生産型の多種少量、変種変量生産への対応をより強く迫られるようになりつつある。このような状況では、多種多様な部品や工具の手配、生産スケジューリング、場合によっては、生産設備のレイアウトの頻繁な変更が求められる。

- 新製品出荷のリードタイムの短縮

基本的な耐久消費材の普及率が飽和状態にある中で、消費者のニーズや価値観は多様化すると共に、景気の後退による消費全体の落ち込みのために、生産を実行する企業の競争力の中心は、次第に価格から新しい市場のニ-

ズに合致した製品を如何に素早く市場に投入できるかへと移行しつつある。即ち、生産の立ち上げへの所要時間が小さいことが求められている。

- 一部の生産機械の故障等によるシステム全体の停止、いわゆる「チョコ停」の発生を避け、システム全体としての高い稼働率を実現すること

## 2. 製品ライフサイクル全体の考慮

資源を効果的に運用し、生産活動による地球環境への負荷を小さくすること。このためには、生産された製品を開発、製造、運用、廃棄、再利用にいたるライフサイクル全ての観点から、その環境負荷と有用性を考慮することが必要となる。

以下、生産システム設計、運用の現状について概観し、これらの要求を実現するために必要となる方法論について検討を行なう。

### 3.2.1 新しい生産システム構築方法論の必要性

#### (1) 多種少量、変種変量生産への対応

多種少量生産においては、一般的に屋台村型構造の生産システムが用いられるが、屋台村型構造においては、生産能率の向上をはかるのが難しく、また、部品在庫や仕掛かり在庫が大きく、生産システムの無駄が大きいことが課題となる。そこで、柔軟性とある程度の生産能率を併せ持つ生産システムとしてFMSが提案され、主として中種中量生産分野で広く用いられている。FMSは、多少の無駄を忍びつつ柔軟性を持たしたハードウェア構成を採用することで、ソフトウェアの変更のみで生産条件の変化に対処しようとしたシステムであったが、生産条件の変更に応じたソフトウェアの変更は、必ずしも容易ではない。例えば、FMSに導入されるNC(Numerical Control)機械は、確かに優れた汎用性を有するが、この機械の動作を新しい動作に変更するにはかなりの作業量が必要となる。また、CIMの名のもとに集中的に管理されているこれらのシステムでは、システム構成要素のほんの一部の変更や変化(故障など)が、システム全体の再構築を必要とし、新しい機械を追加したり、あるいは機械を置換したりするのに極めて大きな作業量を必要とするのである。つまり、FMSは、ハー

ドウェアとして柔軟ではあっても、ソフトウェアは十分に柔軟ではなく、大規模機械システムが抱える問題をFMSもまた抱えているのである。

一方、自動車などの生産分野では、ライン型生産システムを用いたJIT(Just In Time)方式と呼ばれる混合流ライン型構造を用いて、多種少量生産への対応をはかっている。

JIT方式では、後工程が必要な物を前工程に取りに行き、前工程は引き取られた分だけを生産することにより、部品の作り過ぎによる部品在庫、仕掛かり品在庫を極力減少させることを目指す。しかし、JIT方式は根本的には、トランスファーライン型の従来型生産システムであり、変種変量、特に繰り返し性の少ない、多種極少量生産に適応するには、以下の点で困難である。

- 同期の困難性

JIT方式では、そのワークフローを構成する全ての加工設備で同期をとらなければならないが、これは変動の多い生産条件のもとでは一般的に困難である。

- 末端前工程の負担増大

後工程からの要求にしたがって、前工程の生産量が決定するため、末端前工程にいくほど作業の平準化が困難となり、末端前工程の負担が増大する。

- 多品種混合流生産の困難性

繰り返し性の低い多品種混流生産では、多数の工具、ジグのつけかえが発生し、段取り時間が増大する。

すなわち、生産システム内における物の流れが複雑で、変動に富む変種変量生産環境においては、生産要求に応じて複雑に変化し、適応可能であるような生産システムを用いることが肝要であり、以上の問題をかかえるJIT方式で、これらの課題に対処するのは困難である。以上から、変種変量生産に効果的に対応するためには、既存の手法を用いるだけでは困難であり、新しい生産システムの方法論が求められているといえる。

## (2) 生産の立ち上げ所要時間の短縮へ向けて

一般に、生産システムの設計、運用における情報の流れは、図3.2に示すような構造となる。



図 3.2: 生産システムにおける情報の流れ

最初に、生産すべき製品の計画が行なわれ、それに基づいて製品が設計される。その設計に基づき、該当製品を如何に生産するかについて、その加工工程、作業設計、レイアウト設計などの技術情報処理と、いつまでにどの製品をどのくらい作成するかを基準に日程計画を立て、スケジューリングを行なう管理情報処理がなされ、これらを受けて生産システムが運用される。基本的に、これらの情報処理の流れは、トップダウン的、一方向的であり、生産システム運用時において、機械故障などのトラブルにより運用計画の変更が必要となった時に、それらは上流過程まで戻って全体的な情報処理の再実行を必要とする。このことが、生産現場や市場からのフィードバックに適応して、素早く生産システムのスケジューリングやレイアウトの変更、あるいは製品そのものを変更することを困難にしている。

これらの問題点は、設計、計画段階で生成されたスケジューリングなどによって、システム全体を集中的に制御し、加工や組立て作業を効率化することで、大量生産を実現する現行の生産システムのあり方に由来している。

物の流れの柔軟性のみならず、情報の流れの柔軟性が強く求められているのである。

### (3) 製品のライフサイクルの考慮

ライフサイクル全体を通して、製品の有用性や環境負荷などを検討して、製品の設計や生産を行なう場合、必然的に生産システムは、ただ単に製品を素材から製造するだけの役割を担うのみならず、製品をメンテナンスし、あるいは分解して製品の一部のリユースやリサイクルをはかるなど、極めて複雑かつ多種多様の役割が求められるようになることが予想される。

このような状況下での生産システム内での物の流れは極めて複雑かつ予測困難なものとなり、従来の集中管理的な生産システムの構築、運用の方法論では対応がますます困難なものとなる。

### 3.3 自律分散型生産システムに関する既存の研究

以上見てきたように、次世代生産システムに要求される機能を満足する生産システムを構築するためには、従来の集中管理型の方法論から脱却し、新しい方法論を模索することが必要となる。

このような背景から、現在、自律分散型の生産システム構築方法論が、次世代の生産システム構築方法論として期待を集めている。

自律分散型の生産システム構築、運用の方法論は、システム全体を複数の知能を持ったユニットで構成し、運用時にこれらの知能ユニット間の関係を自己組織的に獲得し、システム内外の様々な生産環境の変動に適応する。このため、新規製品の生産の立ち上げや、生産量、生産品目数の変更に伴う、システム全体の再スケジューリングや、生産設備の再配置が容易であり、極めて柔軟かつ適応力に富む生産システムの構築、運用が可能となると期待されているのである。

以下、自律分散型生産システムに関する既存研究について概観する。

### 3.3.1 生物指向型生産システム

上田 [Ueda94, NGM97] らは、生物における情報処理方式を模した生物型生産システム (BMS) を提案している。

BMS とは「生物に学び、生物と共生する生産システム」である。BMS では、システム内に存在する全ての構成要素を、生体に擬し、生体の持つ優れた機能、自己認識、自己成長、自己修復、進化、適応などを人工物に導入し、人間と人工物の間の相互作用を考え、さらにはマクロ生態系のなかでの人工システムを捉えることにより、現代社会における生産活動の複雑さやダイナミクスを解決することを目指している。

BMS では、生体になぞらえ、生産システム内の構成要素が持つ情報を遺伝子型 (DNA) 情報と知識型 (BN) 情報に分類する。工作物には、製品形態情報をすべて明示的に DNA 情報として与え、工作物はこの情報に従いながら、生産システム内の加工セルを順次たどり、製品へと形態変換をうける。生産設備要素は、主に BN 情報により、相互に協調し、工作物を製品に成長させるアプローチをとっている。

BMS の各要素では、以下のことを規定している、

1. 工作物は製品に成長するための形態変換に関する DNA 情報を持つ。
2. 加工セルは自身の機能に関する BN 情報を持つ。
3. 工作物は加工セルの情報を知らない。
4. 加工セルは工作物の情報を知らない。
5. 生産システムは生産要求に関する情報を大域情報として与えられる。

以上の BMS のモデルを用いて、計算機実験により生産設備の故障への適応例を示して BMS の適応力を検証している [大倉 96]。

### 3.3.2 ホロニック生産システム

ホロニック生産システム (HMS) とは、A.Koestler によって生物や社会のシステムモデルとして提案されたホロニックシステムの概念を生産システムへと応用する生産

システムである [HMS97]。

HMS は、自律機能を持ち、お互い協調できるホロンと呼ぶモジュールから構成されている。ホロンは、生産装置、装置を構成する要素、セルコントローラ、特定の機能を持つソフトウェア、ワークや部品などがあり、これらのホロンが他のホロンとの交渉によって作業の割り当てを決定し、割り当てられた機能をさらに展開し、最終的にホラーキーと称する階層構造型の作業割り当て構造を自律分散的に構成して、タスクを実行する。タスク終了後、タスクに参加した要素は解散し、次の作業にそなえる。

相山らは、ホロニック生産システムの一具体例としてホロニックロボットシステム (HRS) を開発している [相山 98]。

実行時にシステムの構造を作成することから、HMS は、システムの要素への追加や削除が容易であり極めて柔軟な生産システムを構成可能であるといえる。

### 3.4 細胞型生産システム

以上の議論をふまえて、本研究では、細胞型機械の例題として生産システムを採用し、細胞型生産システムの開発を行なう。細胞型生産システムの要求項目は、以下のよう整理される。

#### 3.4.1 情報の流れに関する要求項目

変動する生産環境に柔軟に適應できる細胞型生産システムにおいて、情報の流れ、即ち、管理情報と、技術情報処理は以下の項目を満たさなくてはならない。

1. 短時間、低コストで、可能であればオンライン、リアルタイムで、管理情報処理が実行可能であること
2. 短時間、低コストで、可能であればオンライン、リアルタイムでの技術情報処理が実行可能であること

前者は、具体的には、需給の変動に応じて、柔軟に生産すべき製品品目とその個数などを変更可能なように、素早く生産システムのスケジューリングや資材手配を実

行することであり、後者は、ユーザのニーズに合わせた製品仕様の変更や、生産現場での生産実績等をうけた生産システムの設備レイアウト変更などを意味している。

これらの情報処理は、相互に密接に関係しており、細胞型生産システムでは、これらの情報の変更に伴う他の部分の情報変更を可能な限り小さな範囲に収めることが必要となる。そのためには、従来のトップダウン的、一方向的な情報の流れから、生産システムをコントロールするあり方から、多方向的、ボトムアップ的な情報の流れから生産システムをコントロールする方法論が求められる。

本研究では、これらの生産システムの情報処理のうち以下の項目を対象とする。

- 生産システムの戦略的構造決定

生産システムの戦略的構造決定とは、ある生産環境、生産要求のもとでは、3.1.1節で述べた種々の生産システムの構造のうち、どのような構造が適切であるかを決定することである。

通常、これらの生産システムの構造の決定は、熟練技術者の勘や、種々のヒューリスティック手法に基づいて決定されているが、本研究では、構造決定問題を細胞型機械の自己組織化手法を用いて解く手法を検討し、細胞型生産システムの計算機シミュレーションによりその有効性を検証する。

- 生産システムの変動環境に対応した運用

細胞型生産システムでは、変動する生産環境、生産条件のもとで、これらの変化に適切に対処可能な生産システムの構築を目指す。本研究では、様々な生産条件、生産要求に対して自己組織的に、適切なスケジューリングを獲得する手法を検討し、細胞型生産システムの計算機シミュレーションを用いてその有効性を検証する。また、変動する生産要求に対して、柔軟にジョブを実行可能にするための、自律分散型の生産管理情報処理の手法について検討し、細胞型生産システムの実機を用いた動作実験により、細胞型生産システムの自律分散型生産管理の実現可能性を検証する。

### 3.4.2 物の流れに関する要求項目

細胞型生産システムにおいては、柔軟な物の流れを実現することが必要である。ここで、物の流れとは、素材、半製品、製品や、工具などの流れである。物の流れは、製品の工程と、生産システムの設備レイアウトに大きく依存するが、細胞型生産システムでは、製品の工程や、生産システムのレイアウトは、生産環境、生産要求の変化に応じて柔軟に変更可能でなければならない。したがって、細胞型生産システムのハードウェア実現にあたっては、以下の要求を満たさなければならない。

- 生産システム全体のモジュール化

細胞型生産システムでは、生産設備の位置は、自由に変更可能でなければならない。このためには、生産システムを構成する全ての機器、例えば搬送機器や、ユーザによる入力端末などと接続が可能であることが必要である。すなわち、生産システム構成要素をモジュール化し、それらを相互に接続し、動作させるためのインタフェースを実現することが必要である。本研究では、坂尾ら [Sakao97] が開発した細胞型自動倉庫を、細胞型生産システムの搬送機器として採用し、これに結合可能な加工細胞を作成することで、細胞型生産システムの実機を作成し、その実現可能性を検証する。

- 生産システム全体の分散制御

変動する生産要求などの様々な状況に適応可能な柔軟な生産システムを実現するためには、システム全体をモジュール化するだけでは不十分であり、システム全体を自律分散的に制御することが必要となる。本研究では、管理情報処理に基づき、自律分散的に細胞型生産システムを動作させるためのアルゴリズムについて考察し、実機を用いて、その実現可能性を検証する。

図 3.3 に、細胞型生産システム実現へ向けてのロードマップを示す。

本研究では、細胞型生産システムをどのように設計し、それをどのように制御するべきかについて検討し、最小構成のハードウェアを作成することで、生産システムの最も基本的な機能である製品の製造という機能を、細胞型機械の方法論で実現可能であることを確認する。

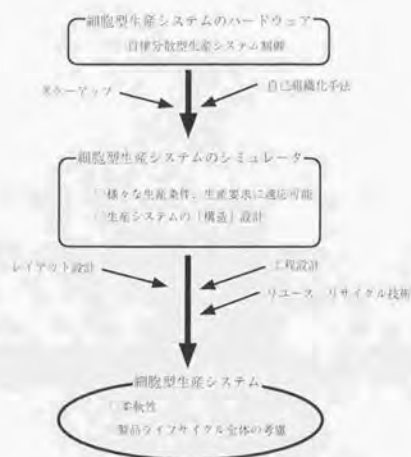


図 3.3: 細胞型生産システムのロードマップ

次いで、作成した細胞型生産システムをスケールアップし、計算機シミュレーションにより、複数の加工機械を持つ生産システムを対象に、自律分散システムにおける自己組織化手法を適用することで、様々な生産条件、生産要求に適応して、柔軟に細胞型生産システムを構築し、運用する方法を検討する。

具体的には、生産システムにおいて、ジョブをどのように各加工設備に割り当てるかという、生産システムの構造決定問題に細胞型生産システム内を自律的に動作するパレット集団の加工設備巡回順序からアプローチし、様々な生産条件、生産環境に応じて自己組織的に、生産システムの構造を獲得する手法を提案し、その有効性を検証する。

実際の生産現場で、細胞型生産システムを運用するためには、工程設計などの製品設計よりの情報処理などを、自律分散的に実行する技術など他にも様々な要素が必要となるが、これらは本研究の範囲に含めない。

## 第 4 章

# 細胞型生産システムの開発

本章では、細胞型生産システムのハードウェアを開発し、細胞型生産システムを自律分散的に制御して、製品製造タスクを実行するための手法を提案し、ハードウェアを用いた実験を通して、その有効性を確認する、

## 4.1 細胞型生産システムの設計方針

### 4.1.1 全体機能の細胞への分割

細胞型生産システム設計の最初のステップは、全体機能を複数の細胞に分割することである。ここで、細胞型生産システムの要求機能は、「ユーザの要求により、適当な場所から搬入した原材料から、製品を必要個数製造し、適当な場所へと出庫すること」である。この要求機能を実現するためには、大別して以下の3つの要素を実現する必要がある。

#### 1. 物の流れ

- マテリアルハンドリング  
システム内での荷物搬送、およびそのバッファリング
- 加工・組み立て  
搬入された原材料への加工、および部品組み立て

#### 2. 情報の流れ

生産要求情報や、製品製造タスク実行管理情報などの情報の管理および処理

### (1) マテリアルハンドリング系の設計

生産システムの物流システムの実現方法としては、以下の方法を採用するのが一般的である。

#### 1. コンベヤ系

コンベヤを用いた物流システムは、連続的な搬送が出来るため、大量の荷物を低コストで搬送できるが、レイアウト変更時の自由度が低いという特徴がある。

ベルト式、ローラ式、チェーン式、ボールスクリュウ式などがある。

## 2. 台車系

連続搬送系であるコンベアに比べて、制御性と運用の柔軟性に優れるが高コストである。軌道台車と無軌道台車があるが、軌道台車は、無軌道台車に比べ、制御の自律性、柔軟性で劣る。

### ● 無軌道式

無軌道なため、レイアウト計画、変更の自由度が高い。しかし、無軌道自動搬送車の場合、搬送車には、衝突回避などのための高度なステアリングアルゴリズムを搭載する必要がある、また、搬送車間の衝突をさけるため、十分に広い搬送車の行動空間を用意する必要がある。

### ● 軌道式

モノレール、リニアモーター台車などの形式がある。軌道式台車は、自走式と駆動式のものがあるが、台車側に駆動源を持つ前者は、後者に比べて制御性が良い。軌道台車は、無軌道台車に比べ、制御、レイアウトの自律性、柔軟性で一步譲るが、比較的小さな空間内に効率良く敷設することが可能である。

細胞型生産システム実現のためには、制御、スケジューリング、レイアウト変更に対して柔軟な搬送系を採用することが不可欠であるから、もっとも柔軟性に優れる無軌道式自走台車を採用するのが適切である。しかしながら、空間的な効率が悪くなること、ならびに軌道生成、衝突回避などのおおがかりなプログラミングが必要となることから、本研究では、「ミニコンベア形式」を採用する。

ミニコンベア形式とは、荷物を積載するパレットとほぼ同サイズ程度の小さなコンベアを多数敷き詰めることで、小距離の軌道移動を多数実行することにより、目的地まで荷物を搬送する形式である。図4.1にミニコンベア形式の概念図を示す。

ミニコンベア一つが占有する空間をセルと称することとすると、ミニコンベアが隣接する全てのセルに対して、自己の積載するパレットを搬送する能力を持たせることで、二次元平面内での自在搬送を実現することができる。また、各ミニコンベアが、

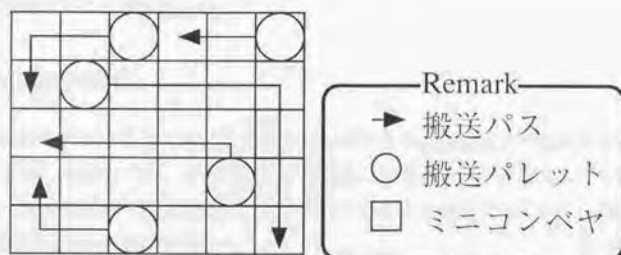


図 4.1: ミニコンベヤ形式の概念図

それぞれの搬送動作を自律的な判断に基づいて実行するなら、レイアウト、制御の面でも大きな柔軟性を有する。

この形式では、自在搬送の能力は、セルサイズ以上の単位に限定されるものの、十分な柔軟性を有しており、台車、すなわちパレット側ではなく、コンベヤ側が駆動するため、台車に電源を確保する必要がなく、駆動電源の確保が容易である。また、パレットは、実質的には、駆動コンベヤのガイドにそって移動することから無軌道式自動台車のように、自由に平面を移動する場合に比して、複数のパレットが回避動作を行なうために必要な空間を小さくおさえることが出来る。

なお、具体的にミニコンベヤをどのように実現するかは、4.2.3節でさらに検討を加える。

本研究では、ミニコンベヤ形式のセルを一つの自律した行動主体として搬送系を作成する。以下、ミニコンベヤにおけるセルを倉庫細胞と呼ぶこととする。倉庫細胞の機能は、自己に隣接する倉庫細胞へ、自己に積載されているパレットを搬送することである。

倉庫細胞は細胞型機械の定義に従い、可能な限り局所的な情報交換、情報処理で荷物の搬送を行なうことを目指す。したがって、倉庫細胞全体を統括、コントロールする部分は設けず、倉庫細胞は隣接する倉庫細胞との情報交換を通じてのみパレットの搬送方向を決定し、これらの局所的な処理に基づく搬送の総和として目的地へ必要な

荷物を搬送することとする。

## (2) 加工細胞の設計

加工細胞の持つべき能力は、システムがどのような生産要求下で使用されるかに依存している。本研究では、どのような生産要求、生産条件下で、どのような構造が有効であるかを運用時の自己組織化により獲得することを目指すことから、加工細胞は万能加工機械でなければならない。

## (3) 情報管理系の設計

製品製造タスクは、複数の搬送細胞、加工細胞が協調して行なう必要があるため、これら複数細胞に跨った情報交換、情報処理、タスク実行状態管理などを実行する必要がある。細胞型機械では、2.2.1節の定義から、各細胞の局所的な通信、情報処理により全体システムの制御を行ない、局所的な通信能力しか持たないため、細胞型機械にこれらの情報管理機構を実装するのには工夫を要する。

本研究では、製造タスクの実行管理のための情報をシステム内を搬送されるパレットと、タスク実行を管理するソフトウェアエージェントとして動作する情報細胞を用いて製造タスクの実行管理を行なうこととする。

これは、パレットおよび情報細胞は、倉庫細胞によってシステム内の任意の場所へと移動することが可能であり、局所的な通信しか行なえない細胞型生産システムにおいても移動することによってシステム内の任意の細胞と通信することが可能となるためである。

パレットは、積載している荷物とともにその荷物に関する一切の情報を管理する。たとえば、積載している原材料にどのような加工を施すべきで、どのような加工が既に施されているのかなどの情報を管理する。

製品製造には、複数部品の加工とそれらの組み立てが必要となるが、製品製造のためには、複数のパレットが、並列してこれらのタスクを実行することが必要となる。このように複数パレットを利用する時、製品情報を分解して複数パレットに割り当て

るための枠組として情報細胞を導入する。

#### 4.1.2 細胞型生産システムの構成手法

以上の議論をまとめる。本研究では細胞型生産システムを以下のように実現するものとする。

- 搬送系  
ミニコンベア形式の倉庫細胞
- 加工・組み立て  
万能加工機械を使用
- 情報管理系  
パレット、および情報細胞により管理

以下、具体的な、細胞型生産システムの実現方法、自律分散的制御手法について検討していく。

### 4.2 細胞型生産システムのハードウェア設計

#### 4.2.1 細胞型生産システムの要求機能

細胞型生産システムの要求機能は「ユーザの要求にしたがい、適当な場所から搬入した原材料から、製品を製造し、適当な場所へ出庫すること」である。

本研究では、製造タスクを以下のように簡略化して扱うものとする。

- 対象とする加工タスクは穴空け加工のみとする。
- 素材は、その形状および材質を規格化してシンボルとして扱い、システム内では、幾何情報の演算などの操作は行なわない。

#### 4.2.2 細胞型生産システムの構成

図4.2に細胞型生産システムの全体の構成を示す。細胞型生産システムは、以下の要素から構成する。

- 倉庫細胞
- パレット
- マニピュレータ細胞
- 情報細胞
- 素材
- マニピュレータ細胞用アタッチメントツール

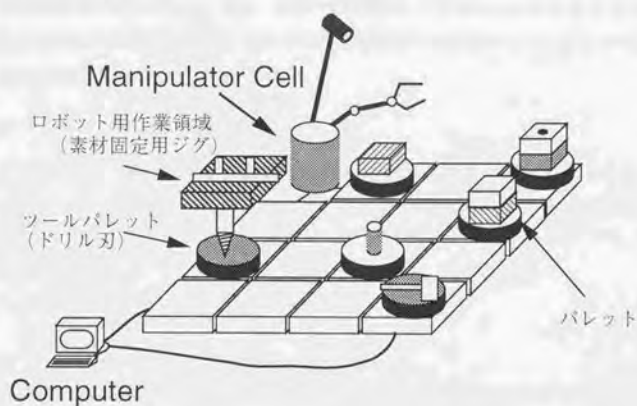


図 4.2: 細胞型生産システム

#### 4.2.3 倉庫細胞

倉庫細胞は、隣接する4個の倉庫細胞、および自己が積載するパレット細胞と双方向の通信能力を持ち、自己が積載するパレット細胞を隣接するいずれかの倉庫細胞へ搬送する機能を持つ。

以上の機能を実現するため、倉庫細胞は以下の機器を搭載する。

- RS-232C シリアルインタフェース

隣接する倉庫細胞との通信用に4回線、入口、および出口に指定した際のユーザとの通信用に1回線、計5回線搭載する。

- IrDA 赤外線通信インターフェース

パレットと倉庫細胞間の双方向通信は、パレットが移動することから無線で実現しなければならない。

無線通信の実現方法としては、電波や超音波などを用いることも考えられるが、通信距離がたかだか10cm程度であり、混信の可能性が小さいことから、赤外線通信を採用する。

- ターンテーブルおよびローラ

倉庫細胞は、隣接する4方向の倉庫細胞に自己の積載するパレットを搬送しなければならない。この機能を実現する手法としては次のようなものが考えられる。

- 駆動ローラコンベヤによる方法

- 磁気浮上

磁気浮上は、優れた搬送機構であり、2次元の自在搬送システムでは有用である（例えば[福田98]）。しかし、価格が高く、可搬重量も小さいことから、本研究では、駆動ローラコンベヤによる手法を採用した。

図4.3に、倉庫細胞の電気系、図4.4全体写真をそれぞれ示す。

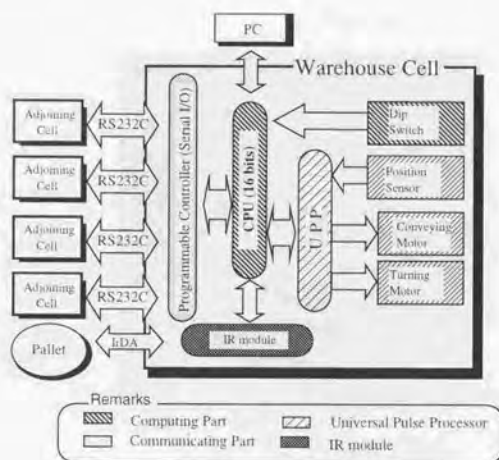


図 4.3: 倉庫細胞の電気系

#### 4.2.4 パレット

パレットは、システム内を必要に応じて搬送される 素材や部品、部組品、製品、さらにはマニピュレータ細胞が加工などの作業にあたって用いる各種アタッチメントツール類を積載し、その積載物の情報を保持し、情報細胞を介して倉庫細胞と共同して荷物の搬送を行なう。

図 4.5にパレットの電気系を示す。

#### 4.2.5 マニピュレータ細胞

マニピュレータ細胞は、パレットに積載されて搬送される素材や部品、部組品から製品の製造を行なう細胞である。本研究で作成する細胞型生産システムでは、マニピュレータ細胞は1台のみとする。本研究では、マニピュレータ細胞に加工ツールを把持

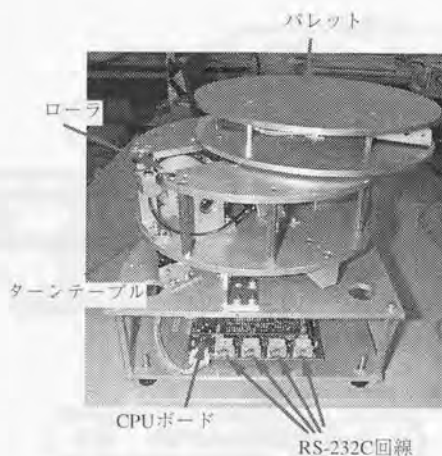


図 4.4: 倉庫細胞

させて加工を行なうものとする。図 4.6 にマニピュレータ細胞の構成を示す。

マニピュレータ細胞は、隣接する 2 つの倉庫細胞、およびマニピュレータ本体、ビジョンシステムとの通信回線を装備する。マニピュレータ細胞は、2 つの倉庫細胞と RS-232C インターフェースを用いて相互に通信を行ない、これらの倉庫細胞をマニピュレータ細胞の作業領域として指定する。

組み立て作業は、作業領域に指定されている倉庫細胞のパレット上で行なう。このとき、荷物を取り出す方の倉庫細胞を「ドナー細胞」、荷物を積み上げる方の倉庫細胞を「レシビエント細胞」と呼ぶこととする。

#### ● マニピュレータ

マニピュレータとして、市販のマニピュレータを採用する。組み立て作業時には、手でワークを把持し、加工作業時には加工ツールを把持するものとする。

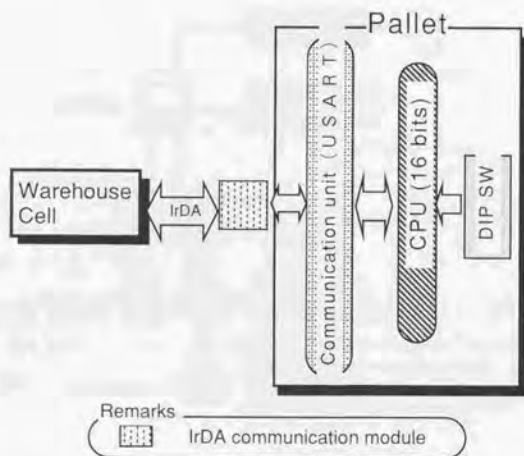


図 4.5: パレットの電気系

- ビジョンシステム

市販の画像認識システムを採用し、システム上方から、ワークおよびマニピュレータ細胞用ツールの形状と位置を認識する。

- 制御用コンピュータ

マニピュレータおよび、ビジョンシステムの制御は市販のパーソナルコンピュータで行ない、RS-232C 回線で2つの倉庫細胞と双方向通信を行なう。

- 作業台

マニピュレータ細胞のタスクは、素材の加工と部品の組み立てである。素材を加工するためには、素材を固定する必要がある。このため、素材を固定するための作業台を接続する。作業台とは、電気的には接続しない。マニピュレータ細胞は、作業台にワークを置き、作業台に設置されているスイッチをマニピュレータが物理的に操作することでワークの固定を行なうものとする。

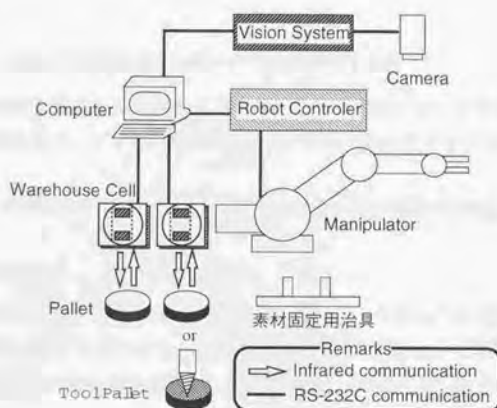


図 4.6: マニピュレータ細胞の構成

### 4.3 細胞型生産システムの動作アルゴリズム設計

細胞型生産システムでは、ある製品を出庫するという1タスクを実行するためには部品加工から製品組み立てにいたるまで、多くの工程からなるタスクを複数の細胞間で協調しながら実行することが必要となる。

#### 4.3.1 細胞型生産システムにおける分散型制御手法の検討

一般に、自律分散システムにおいて、複数の構成要素が協調作業を実現するためには、以下の項目を満足させなければならない。

- 協調を要する作業に参加する構成要素の決定

製品加工作業を実行するためには、複数の倉庫細胞、加工細胞などが協調して一連のタスクを実行する必要がある。この時、どの細胞をどのような順序、タイミングで使用してタスクを実行するかを分散的、非集中的に決定しなければ

ならない。

- 協調して動作する各構成要素間での作業情報の共有化

複数の細胞が協調して一つのタスクを実行するためには、そのタスク実行に参加する細胞間で、タスクの進行状況などの情報を共有できなければならない。

以上の要素を実現する手法としては、以下の手法を用いることが考えられる。

- 黒板モデル方式

システムを構成する、全細胞が、記入、読み込み可能な「黒板」を設け、各細胞が黒板を参照することで、各細胞が全体情報を共有し、その全体情報に基づき、各細胞が適切な行動を選択し、全体タスクを実行していく方式である。

- 契約ネット方式

タスクを与えられた細胞は、自らが実行できないタスクの実行を他の細胞に対して公募し、この公募を受けた該当タスク実行能力を持つ他の細胞が、タスク実行可能の旨をタスク依頼細胞に通知（入札）し、タスク依頼細胞は適当な入札細胞に対して該当タスクを依頼（落札）する。このような入札、落札を繰り返すことでシステムに与えられたタスクを、複数の細胞に分散し、実行するのが契約ネット方式である。

- タスク情報細胞方式

あるタスクを実行するためのタスク要求情報と、そのタスクがどこまで実行されたかを管理する管理情報を一括して保持するタスク情報細胞を導入し、これらタスク情報細胞の入れ子構造としてシステムが実行するべきタスクを構成する。タスク情報細胞は、システムに入力後、適当な方法でシステム内に分散され、自身のなかに他のタスク情報細胞を含まない、最も下位のタスク情報細胞まで分解され、これら下位のタスク情報細胞が、システム内を能動的に移動しながら、自己のタスクを実行可能な細胞を探索し、タスク実行可能な細胞に結合することでタスクが実行される。

黒板モデル方式では、黒板という形で各細胞が共有情報を持つのが特徴であり、集中的に情報を管理する黒板を導入するため、この黒板に対する通信や情報処理の負荷が増大すること、また黒板の故障がシステム全体の機能停止に繋がることなど、細胞型機械の目指す「やわらかさ」の低下に繋がる。

一方、契約ネット方式、タスク情報細胞方式では、黒板モデルと異なり、共有情報を用いることなく相互のメッセージ通信のみで実現することが可能であり、黒板方式に比べて「やわらかさ」の点で優れている。

タスク情報細胞方式では、タスクは独立したタスクに分解可能であることを仮定している。各タスク情報細胞は、自己のタスクに関する情報と、それがどこまで実行されたかの管理情報を常に保持し、それらのタスク情報細胞がそれぞれ独立であることから、契約ネット方式のようにタスクの依頼者とその作業者という関係がかならずしも必要ではない。つまり、ある2つのタスクが、それぞれ同じ下位のタスクを持つ場合、契約ネット方式では、下位タスクの実行結果は、必ずそれを依頼した細胞によってのみ利用され、実行結果が同じであっても利用する下位タスクの結果を2つの依頼細胞が交換することは出来ないのに対し、タスク情報細胞方式では、それらのタスクが誰から依頼されたかには問題なく、同一の実行結果であれば交換が可能である。このことから、タスク情報細胞方式は、契約ネット方式に比べて、より柔軟なタスク分割が可能であると考えられる。

本システムで対象とする、生産システムでは、それぞれの実行順序に制約はあるものの、加工、組み立てタスクは、相互に独立に実行可能なタスクに分解可能である。以上の議論から、本システムでは、もっとも柔軟なタスク分割が可能なタスク情報細胞方式をこれらの細胞間での協調作業を実現する枠組として導入する。

#### 4.3.2 タスク情報細胞の設計

##### (1) タスク情報細胞の役割

細胞型生産システムにおける、目標機能は、ユーザに与えられた製品の製造情報から、製品を作成し、出庫することである。製造タスクは、一般に複数の工程から構成されており、これらの工程を、システム内に存在する加工細胞に割り当て、その実行

を管理するための機構を搭載することが必要となる。

入庫から出庫まで一括して情報を管理可能なのはパレットであることから、パレットが、これらの管理を行なうのが妥当であるが、本章で作成する生産システムでは、製造タスクには、部品の加工のみならず部品からの製品の組み立ても含まれるため、一つの製品の完成のためには複数のパレットを用いる必要がある。

そこで、製造タスクを、複数の相互に独立なタスクに分割し、これらをそれぞれパレットへと配分することが必要となる。本研究ではこれをタスク情報細胞と称するソフトウェアエージェントを用いて実現する。

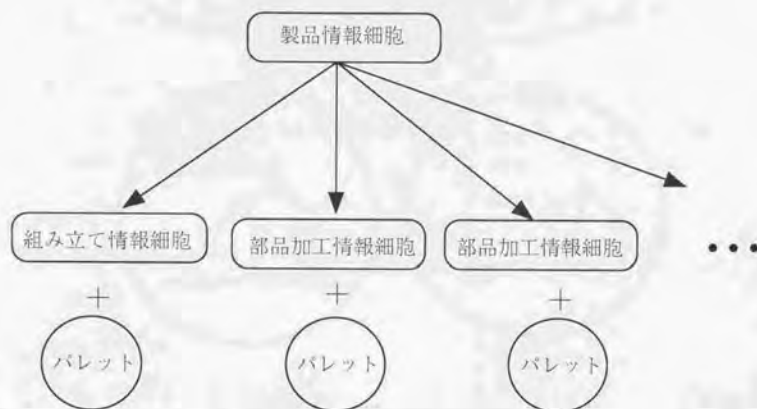


図 4.7: 製品工程の分割

一般に製品製造タスクは、全構成部品の加工とそれらからの製品の組み立ての2種類のタスクから構成されている。そこで、図 4.7に示すように、部品加工情報細胞と組み立て情報細胞の2種類のタスク情報細胞を用いて製造タスクのパレットへの割り付けを行なう。

## (2) タスク情報細胞の構成

細胞型生産システムにおけるタスクは、部品の加工と、製品の組み立てであるから、工程情報は具体的には加工工程グラフ、あるいは部品接続グラフである。したがって、ユーザの製品要求情報からは、製品の部品からの組み立てを管理するタスク情報細胞、各部品の加工を管理するタスク情報細胞が生成され、これら複数個のタスク情報細胞が集まったものが製品情報細胞を構成するものとする。

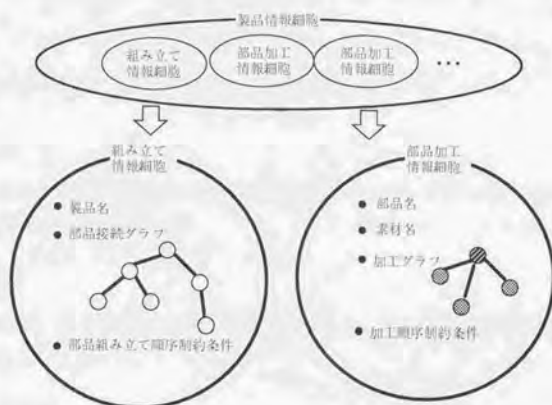


図 4.8: 製品情報細胞の構成

組み立て情報細胞は図 4.8 に示すような組み立て情報を持つ。

### ● 製品名

製品名は、製品を特定するための名前である。通常は、使用する部品名を一定順序で並べたものを使用する。

### ● 部品接続グラフ

部品の結合関係を表す表現としては、部品接続グラフが一般的である。部品接

続グラフのノードが部品、アークが部品の結合関係に対応する。組み立ての際に必要な様々なパラメータはアークに記述する。

- 部品接続グラフの各アーク間での実行順序制約条件

一般に、部品接続グラフに記述されている情報から幾何的な拘束条件を導き出すことで、組み立て手順、すなわち部品接続グラフの各アーク間での実行順序制約条件を求めることは可能であるが、本システムでは、簡単のため、設計データである部品接続グラフとともに組み立て順序制約条件もユーザが与えるものとする。

部品加工情報細胞は、図 4.8 に示すような加工情報を持つ。

- 部品名

部品名は、部品を特定するための情報であり、本システムでは英小文字の 1 字を名前として用いる。

- 素材名

素材名は、素材を特定するための情報であり、本システムでは英大文字の 1 字を名前として用いる。

- 加工グラフ

部品の加工は、盲穴などの加工フィーチャと使用素材の接続グラフとして記述する。加工グラフのノードが加工フィーチャ、アークが接続関係を表し、アークに加工のパラメータを記述する。

- 加工グラフの各アーク間での実行順序制約条件

一般に、加工グラフに記述されている情報から幾何的な拘束条件を導き出すことで、加工手順、すなわち加工グラフの各アーク間での実行順序制約条件を求めることは可能であるが、本システムでは、簡単のため、部品の設計データである加工グラフとともに加工順序制約条件もユーザが与えるものとする。

図 4.9 にタスク情報細胞の BNF 表記を示す。本研究で作成する生産システムでは、対象とする加工は穴空けのみである。また、穴空け加工に用いる工具としては、径 10mm のドリル刃のみを用い、加工名と工具は 1 対 1 に対応するものとしている。

加工位置としては、簡単のため上面の中央のみを対象としている。

動作実験で作成する製品 ab (第 4.4 節参照) は以下のように記述される。

$ab(a-b)\{TOP\ CENTER\}\square/aA(A-HOLE)\{TOP\ CENTER\ HOLE10\ 30\}\square/bB\square$

これは、全体の組み立て情報  $ab(a-b)\{TOP\ CENTER\}\square$ 、部品 a の加工情報  $aA(A-HOLE)\{TOP\ CENTER\ HOLE10\ 30\}\square$ 、および部品 b の加工情報  $bB\square$  の 3 つの情報細胞から構成されている。部品 b についての加工情報がないのは、部品 b は、素材 B を加工せずそのまま用いるためである。

これは、「製品 ab は、部品 a の上面の中央に部品 b を組み付けて、作成されるものであり、部品 a は、素材 A に穴空け加工を施したものであり、その加工は素材 A の上面の中央に径 10mm の穴空け加工を深さ 30mm 施したものである。部品 b は、素材 B をそのまま用いる。」という製造情報を表している。

```

<製品情報> ::= <製品情報> <部品加工情報>
               | <組み立て情報> <部品加工情報>

<部品加工情報> ::= <部品名> <使用素材名> <加工グラフ> | <加工グラフのアーチ間の制約条件> |
<組み立て情報> ::= <製品名> <部品接続グラフ> | <部品接続グラフのアーチ間の制約条件> |
<部品名> ::= <英小文字>
<使用素材名> ::= <英大文字>
<部品名> ::= <英小文字>
<加工グラフ> ::= <加工グラフアーチ>
               | <加工グラフ> <加工グラフアーチ>
<加工グラフアーチ> ::= <使用素材名> <加工グラフノード> | <加工バリエータ>
               | <空>
<加工グラフノード> ::= <加工ファイチャ>
<加工ファイチャ名> ::= HOLE
<加工バリエータ> ::= <加工面> <加工位置> <加工名> <加工寸法>
<加工面> ::= TOP
           | BOTTOM
           | SIDE1
           | SIDE2
           | SIDE3
           | SIDE4
<加工位置> ::= CENTER
<加工名> ::= HOLE10
<加工寸法> ::= <数値>
<加工グラフアーチ間の制約条件> ::= <加工制約>
               | <加工グラフアーチ間の制約条件> <加工制約>
<加工制約> ::= <使用素材名> <加工グラフノード> > <使用素材名> <加工グラフノード>
               | <空>
<部品接続グラフ> ::= <部品接続グラフアーチ>
               | <部品接続グラフ> <部品接続グラフアーチ>
<部品接続グラフアーチ> ::= <部品名> > <部品名> | <組み立てバリエータ>
<組み立てバリエータ> ::= <加工面> <加工位置>
<部品接続グラフアーチ間の制約条件> ::= <組み立て制約>
               | <部品接続グラフアーチ間の制約条件> <組み立て制約>
<組み立て制約> ::= <部品名> > <部品名> | > <部品名> > <部品名>
               | <空>
<英小文字> ::= a|b|c|d|e|f|g|h|i|j|k|l|m|n|o|p|q|r|s|t|u|v|w|x|y|z
<英大文字> ::= A|B|C|D|E|F|G|H|I|J|K|L|M|N|O|P|Q|R|S|T|U|V|W|X|Y|Z
<英小文字列> ::= <英小文字>*
<数値列> ::= <数値>*
<数値> ::= 0|1|2|3|4|5|6|7|8|9

```

図 4.9: タスク情報細胞のBNF表記

#### 4.3.3 タスク情報細胞の動作

タスク情報細胞は、タスクの実行管理がその役割である。したがって、タスク情報細胞は、加工、組み立てなどのタスクが実行されている素材とともに行動しなければならない。そのためには、各タスク情報細胞が、自己のタスクを実行する対象となる素材を積載するパレットをシステム内から探索して、これに結合することが必要となる。

タスク情報細胞方式では、複数の互いに独立なタスク情報細胞が集まって一つの製品製造タスク、製品情報を構成しているが、これらのタスク情報細胞が、適切な素材を積載するパレットに結合し、動作するためには、システム内でなんらかのタイミングで、製品情報細胞から各タスク情報細胞が放出、分散されなければならない。

タスク情報細胞分散の手法として、最も単純な手法は、製品情報細胞が入庫されるや否や、システム全体に、この製品情報細胞を含むタスク情報細胞を放出するという方法である。この手法では、全てのタスク、即ち部品加工、全体組み立てが同時並行的に開始されるが、本章で構築するように加工、組み立てのためのマニピュレータ細胞が一台しか存在しない環境では、不都合が生じる。

たとえば、組み立てを実行するためには、組み立てに使用する部品が、システム内のどこかに存在することが前提となるが、1台しかないマニピュレータ細胞に先に組み立てタスク情報細胞が仕事を依頼してしまうと、いつまでたっても必要な部品加工が実行できないという事態に陥る。これを回避するためには、各タスク情報細胞のタスク依頼に際して、優先順位を導入し、マニピュレータ細胞のタスク実行が割り込み可能であるように作らなければならない。

以上のような繁雑さを避けるため、本研究では、タスク情報細胞が生産システム内を移動し、順次マニピュレータ細胞で、部品加工情報細胞、組み立て情報細胞を放出し、適切な荷物を積載したパレットに結合し、タスク実行を管理するというアプローチをとる。

システム内に複数マニピュレータ細胞が存在する場合には、タスク情報細胞が結合したパレットがどのような順序でマニピュレータ細胞を選択し、それぞれのタスクを実行していくかがシステム全体の効率に大きな影響を与えるものと考えられるが、本

章で作成する細胞型生産システムには、マニピュレータ細胞は1台しか存在しないため、マニピュレータ細胞を選択するためのアルゴリズムは搭載しない。このような複数マニピュレータ細胞存在下での、マニピュレータ細胞選択手法については、第5章の計算機シミュレーションであらためて検討する。

図4.10、図4.11、図4.12に製品情報細胞から、タスク情報細胞が放出され分配されていく手順を示す。

タスク情報細胞は、以下のように動作する。

#### 1. 生成

ユーザの要求に従い、製品情報細胞を生成する。

#### 2. 移動

生成された製品情報細胞は、自己に記述されている要求タスクを実行するため、マニピュレータ細胞へと移動する。

#### 3. タスク情報細胞の分配

マニピュレータ細胞に到着した製品情報細胞から、部品加工タスク情報細胞、組み立てタスク情報細胞の順で、タスク情報細胞を放出する。全てのタスク情報細胞を放出した時点で、タスクの分配は終了し、製品情報細胞は消去される(図4.10参照)。

#### 4. タスク情報細胞のパレットへの結合

製品情報細胞から放出されたタスク情報細胞は、マニピュレータ細胞によって適当なパレットに結合される。

加工情報細胞を受け取ったマニピュレータ細胞は、部品加工情報細胞の情報を参照して部品加工に必要な素材を積載しているパレットをレシピエント側の倉庫細胞へ要求し、このパレットに部品加工情報細胞を結合する(図4.11参照)。

組み立てタスク情報細胞を受け取ったマニピュレータ細胞は、組み立てタスク情報細胞の組み立てタスク実行順序制約を参照し、最初に実行すべき組み立てタスクを決定し、これに必要な部品で、組み立てタスク実行時に下側に来る

部品を積載しているパレットをレシビエント側の倉庫細胞へ要求し、このパレットに組み立てタスク情報細胞を結合する (図 4.12 参照)。

#### 5. タスク情報細胞のタスク実行

パレットに結合したタスク情報細胞は、以後、パレットの積載物の加工、組み立てが終了するまで、積載物に対する加工、組み立てを管理する。図 4.11、図 4.12 に示すように、パレットに結合したタスク情報細胞は、記述されている加工タスク、組み立てタスクが終了するまでマニピュレータ細胞で加工、組み立てを行ない、タスク終了後、タスク情報細胞を消去する。

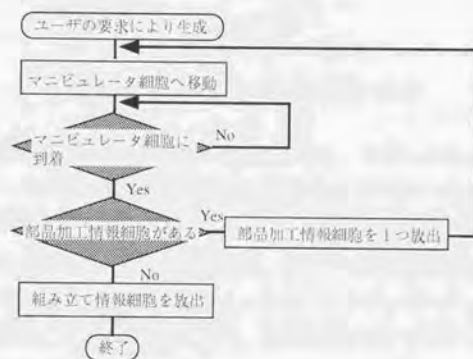


図 4.10: タスク情報細胞の分配手順

#### 4.3.4 細胞型生産システムの動作アルゴリズム

細胞型生産システムは以下の手順で動作する。

##### 1. 初期化

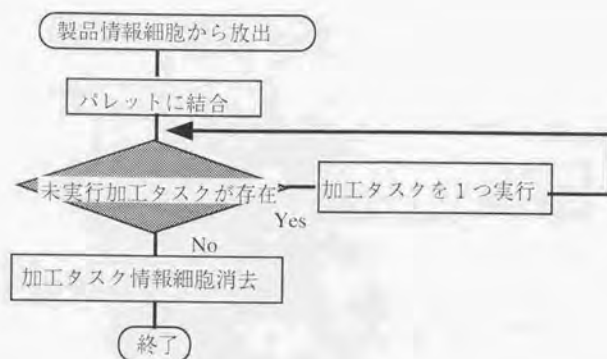


図 4.11: 部品加工タスク情報細胞の動作

倉庫細胞、マニピュレータ細胞を相互に結合し、配置した後、システム内に存在するマニピュレータ細胞の方向を各倉庫細胞に通知するため初期化を行なう。初期化の様子を図 4.13 に示す。

この初期化操作により、各倉庫細胞は、システム内の存在するマニピュレータ細胞までの距離を知ることが出来る。また、マニピュレータまでの距離を隣接する倉庫細胞に問い合わせることで、倉庫細胞はマニピュレータ細胞の存在する方向を知ることが出来る。

## 2. パレット入庫

パレットに素材、部品、マニピュレータ用ツールなどを積載し、パレットをシステム内の任意の倉庫細胞へ入庫する。このとき、ユーザは、パレットに積載した荷物に関する情報をパレットへ入力する。入庫後、パレットの情報はただちに、倉庫細胞へと伝達される。

## 3. 生産要求

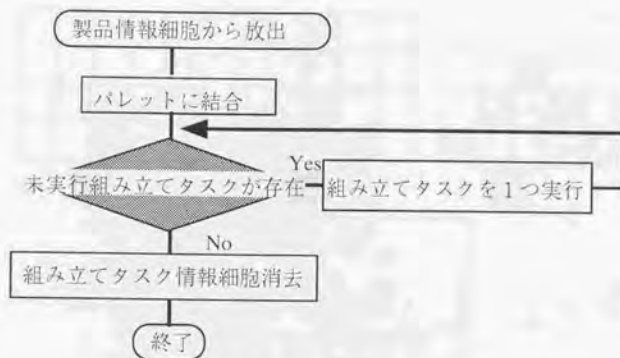


図 4.12: 組み立てタスク情報細胞の動作

ユーザは出口細胞から生産要求を入力する。ユーザが入力した生産要求から、ただちに製造情報細胞が生成され、マニピュレータ細胞へ向かって移動する。また、出口細胞からは、該当する製品の出庫要求が発行され、初期化操作の時と同様に在庫要求メッセージがシステム全体へと伝達される。

以下、システムを構成する各要素の動作アルゴリズムについて説明する。

#### (1) マニピュレータ細胞の動作アルゴリズム

マニピュレータ細胞の動作を図 4.14、図 4.15、図 4.16 に示す。

マニピュレータ細胞は、タスク情報細胞の要求を受けて、各加工タスクの実行を開始する。製品情報細胞を受けとった時の動作手順を図 4.14 にしめす。マニピュレータ細胞は、製品情報細胞から部品加工情報細胞、組み立てタスク情報細胞のいずれかを受けとる。マニピュレータ細胞はこれらのタスク情報細胞を受けとると、これらのタスク情報細胞を結合させるためのバレットをレスピエント側の倉庫細胞に要求する。

製品情報細胞から、加工情報細胞を受けとった場合、受けとった加工情報細胞に記

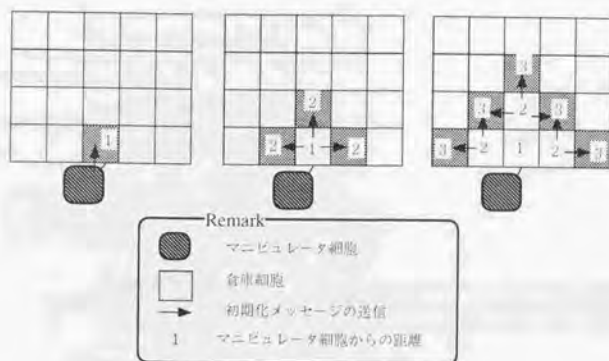


図 4.13: マニピュレータ細胞の初期化

述されている素材を積載しているパレットをレシビエント側の倉庫細胞に要求する (図 4.15 参照)。素材到着後、マニピュレータ細胞は素材を作業台に固定し、加工情報細胞に記述されている加工タスクのなかから加工情報細胞に記述されている加工順序制約条件を参照して最初に行うべき加工タスクを選択し、選択した加工タスクに必要なツールをドナー側倉庫細胞へ要求する。なお、加工タスクの選択において、マニピュレータ細胞は部品加工情報細胞に記述されている加工順序制約情報を参照して実行すべき加工タスクを決定するが、加工順序制約条件により選択可能な加工タスクが複数存在する場合は、加工情報で先に記述されているタスクから実行する。ツールが到着すると加工を実行し、実行結果を素材を積載しているパレットに記述する。このとき、パレットに結合している部品加工情報から、該当するタスクを削除する。さらに、加工完了した素材を作業台から、パレットへ再び積載し、加工タスクは終了する。

パレットに結合している加工情報細胞に、未実行な加工タスクが存在している場合は、パレットおよび部品加工タスク情報細胞は、引き続きマニピュレータ細胞で加工を実行する。

製品情報細胞から、組み立て情報細胞を受けとった場合、受け取った組み立て情報

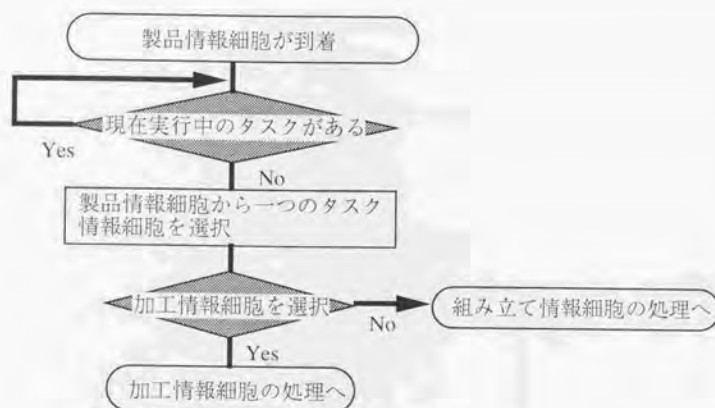


図 4.14: マニピュレータ細胞の動作 1

細胞の組み立て順序制約条件を参照し、最初に行うしなければならない組み立てタスクの一つを選択し、組み立て時に下側に来るべき部品、すなわち組み付けられる側の部品をレシピエント側、組み付ける側の部品をドナー側の倉庫細胞にそれぞれ要求する(図 4.16 参照)。部品到着後、レシピエント側のパレットに対して、組み立てタスク情報細胞を結合し、組み立てタスクを実行する。組み立て終了後、完成した部組品をレシピエント側のパレットへ積載し、実行結果をレシピエント側のパレットに記述する。このとき、レシピエント側のパレットに結合している組み立てタスク情報細胞から該当タスクを削除する。

パレットに結合している組み立てタスク情報細胞に、未実行な組み立てタスクが存在している場合は、引き続きマニピュレータ細胞で組み立てを実行する。

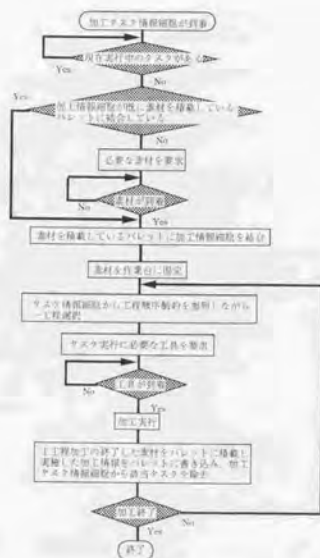


図 4.15: マニピュレータ細胞の動作 2

## (2) 倉庫細胞およびパレットの動作アルゴリズム

パレットは、自ら駆動力を持たないことから荷物の移動は倉庫細胞により行なわれる。倉庫細胞の動作を図 4.17、図 4.18、図 4.19、図 4.20 に示す。

倉庫細胞によるパレットの移動は、以下の時に発生する。

- 積載しているパレットにタスク情報細胞が結合している
- 積載しているパレットが他の倉庫細胞から要求されている
- 隣接する倉庫細胞によりパレットの搬送先として選択され、かつ自己に他のパレットが積載されているとき、隣接する倉庫細胞は荷物を除去するように搬送

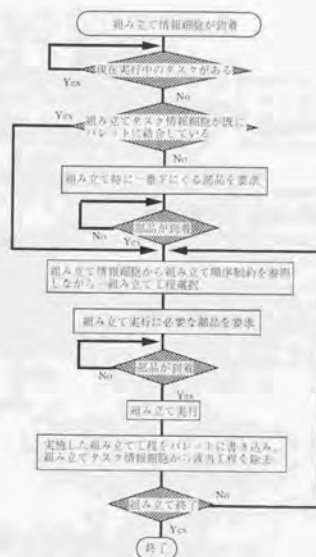


図 4.16: マニピュレータ細胞の動作 3

先の倉庫細胞に要求するが、隣接倉庫細胞から荷物除去依頼を受けている (図 4.21 参照)

積載しているパレットにタスク情報細胞が結合している場合、マニピュレータ細胞の方向へと移動する。倉庫細胞は、マニピュレータ細胞への距離を隣接する倉庫細胞へ問い合わせ、マニピュレータ細胞が近い方向へパレットを搬送する (図 4.18 参照)。

積載しているパレットにタスク情報細胞が結合していない場合、倉庫細胞は自己が積載しているパレットがマニピュレータ細胞、あるいは出口細胞から呼ばれているかどうかを調べる。いずれかの細胞から要求されている場合、倉庫細胞は積載パレットを要求している細胞への距離を隣接細胞に問い合わせ、パレット要求細胞へ近い方向

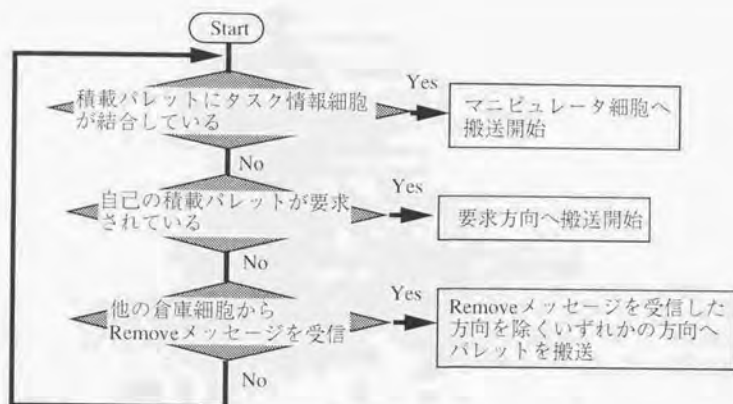


図 4.17: 倉庫細胞の動作 I

へパレットを搬送する (図 4.19 参照)。

以上の搬送動作において、搬送決定した搬送先の倉庫細胞に既に他のパレットが存在していた場合、搬送先倉庫細胞に対してパレットの除去依頼を送る。除去依頼を受信した倉庫細胞は、除去依頼を受信した方向を除くいずれかの方向へと積載しているパレットを搬送する (図 4.20、図 4.21 参照)。

#### 4.4 ハードウェアを用いた動作実験

以上に基づいて作成したハードウェアを図 4.22 に示す。このハードウェアを用いて、図 4.23 に示す条件のもと、動作実験を行なう。右上隅の出口細胞で図 4.24 に示す製品 ab を要求した。その結果、5 分 30 秒後に、素材 A からドリルツールを用いて部品 a が作成され、部品 a と部品 b から製品 ab が組み立てられ出庫することを確認した。

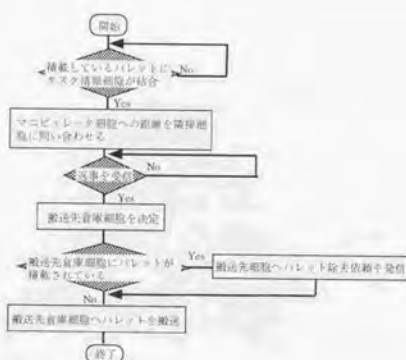


図 4.18: 倉庫細胞の動作 2

## 4.5 考察

本章では、第 3.4 節の設計方針に従い、細胞型生産システムのハードウェアを開発した。

また、細胞型生産システムにおける生産タスクを管理するために、情報細胞およびパレットを用い、これらを用い局所的な情報通信のみの基づいて生産タスクを実行するアルゴリズムを開発し、動作実験を通して以下のことを確認した。

### ● 細胞型生産システムの開発

本章では、細胞型生産システムの実機を開発することで、細胞型生産システムの実現可能性を検討することを目指した。細胞型生産システム実現のためには、ハードウェア面では、再構成が容易なモジュール化構造で、生産システムを実現することが必要であり、このことを考慮しながら細胞型生産システムを構築している。

本章では、明示的に実験を行なわなかったが、倉庫細胞の配置変更や、接続変更、システム全体形状の変更に対して本システムは、特に個々の倉庫細胞や、

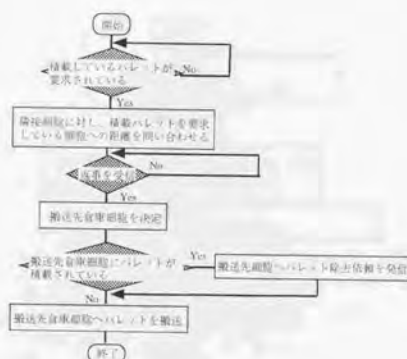


図 4.19: 倉庫細胞の動作 3

マニピュレータ細胞の制御プログラムを変更することなく、電源を再投入して起動するだけで動作可能であることを確認している。

しかし、本研究で作成した倉庫細胞は、単にその四方の辺を他の倉庫細胞の辺に接触させて配置している。隙間なく、倉庫細胞を敷き詰めた場合、内側の倉庫細胞を取り替えるためには、生産システムの上方からアクセスしなければならず、細胞型生産システムの規模が拡大すればするほど、内側細胞のメンテナンスや置換が困難になる。

また、本章で開発したマニピュレータ細胞は、そのシステム自体が極めて大きく容易に動かすことが出来ない。マニピュレータを用いた種々の加工、組み立て作業を実現するためには、マニピュレータ細胞構成要素、すなわちマニピュレータ本体と、素材加工用作業台、およびマニピュレータ細胞に接続され、マニピュレータ細胞にとって、荷物の受渡しステーションとして機能する2つの倉庫細胞を配置後、それらのマニピュレータからみた絶対座標をマニピュレータ細胞に入力するなどの手間が必要であり、このことが、マニピュレータ細胞の再配置等に伴う作業量を増大させている。

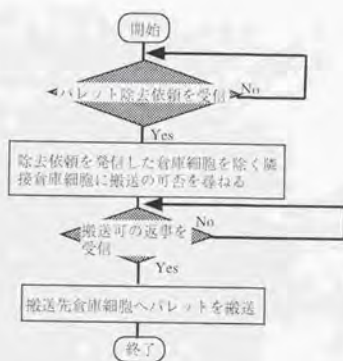


図 4.20: 倉庫細胞の動作 4

つまり、作成したマニピュレータ細胞は、細胞型生産システムを構成する加工細胞としては、十分な柔軟性を持っていない。

以上をまとめる。ハードウェアとしての細胞型生産システムは、その運用に要する作業量が必ずしも小さくはないが、それらは、主として細胞型生産システムを構成する各細胞の物理的な構造によるものである。

細胞型機械のような自律分散型の機械システム設計では、システムの再構成を柔軟に行ないうるための物理的接続、電気的接続などの、細胞間のインターフェースをどのように設計するかが、真にやわらかい機械システム構築に極めて重要であるといえる。

- 細胞型生産システムの自律分散的制御の実現可能性

本章では、細胞型生産システムを自律分散的に制御するための手法について検討し、生産タスクを相互に独立な複数のタスクに分割して構成し、それぞれのタスクがソフトウェアエージェントとして、自律的に行動することにより、システムに入力された生産タスクを実行するタスク情報細胞方式を提案し、2部品からなる製品 ab の組み立てタスク実行実験を通して、同手法が実現可能であ

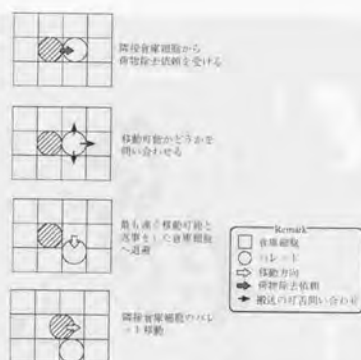


図 4.21: バレットの回避動作

ることを示した。

本章で採用した手法では、製品の製造情報を記号化して表現したこと、また、生産対象として選択した製品が単純な構造だったことから、細胞型生産システム内の通信負荷は、それほど大きなものとはならなかった。また、本手法では、製品情報は、ブロードキャストされるのではなく、荷物などと同様にタスク情報細胞によって運搬されること、さらにこれらが適切なバレットに結合した後は、バレットと共に移動することから、製品情報が大きなものとなっても、生産システム内の通信負荷は比較的小さく抑えることができるものとする。

また、本章での動作実験では、本章で開発した細胞型生産システムの制御手法で、製品製造タスクが実行可能であることを示したに留まっている。細胞型生産システムを実際に運用するためには、製品製造過程で発生した、切り屑を除去し、積載部品が使用され、積載物を失った空バレットをどのように処理するかなどについて考慮し、本システムが連続的に動作可能であるようにしなければならない。これは今後の課題である。

本章で作成した細胞型生産システムでは、マニピュレータ細胞が一台しか存在しな

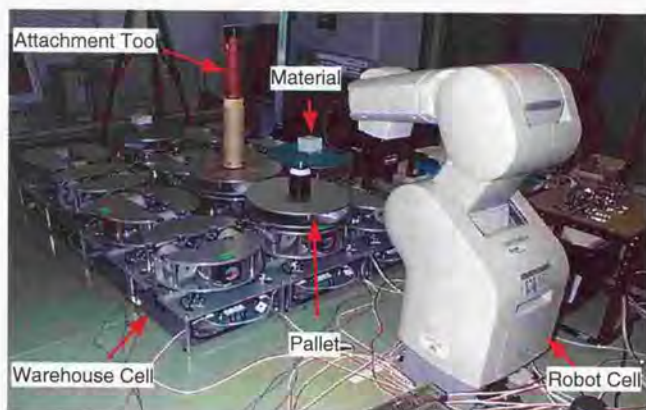


図 4.22: 作成したハードウェア

かったが、一般の生産システムは、複数の加工機械から構成されており、これらの加工機械に各生産タスクをどのように配分するかが生産システム全体の効率に大きな影響を及ぼす。複数加工機械存在下での、加工機械への生産タスク配分手法については、第5章で検討を加えるものとする。

また、本研究では工作物の情報を規格化し、細胞型生産システム内では幾何情報の処理を行なわなかった。この結果、加工工程や組み立て工程を設計情報のみから実行時に導出することが不可能となったため、本システムでは、システムに対する生産要求入力である製品情報細胞には、設計情報に加えて工程情報を加工、あるいは組み立て順序制約条件として予め与えている。このため、製造工程は、ある程度まで事前に決定されているが、やわらかい機械実現のためには、製品の製造工程も自動的に実行時に導出されるシステムであることが望ましいが、これは今後の課題である。

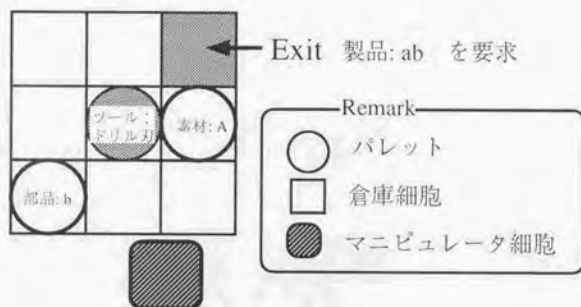


図 4.23: ハードウェアを用いた動作実験

#### 4.6 第4章のまとめ

本章では、細胞型生産システムの分散的制御手法について検討し、タスク情報細胞方式を用いた細胞型生産システム制御アルゴリズムを構築し、最小構成のハードウェア、およびその制御ソフトウェアを実際に作成し、2部品からなる製品の製造を例題とした動作実験を行なった。このことから、細胞型生産システムの自律分散的制御の実現可能性を確認した。

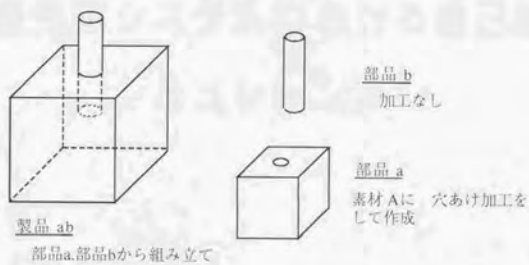


図 4.24: 製品 ab

また、細胞型生産システムにおける自己組織化シミュレーションの重要性は、従来の細胞型生産システムでは、細胞の増殖と分化の過程をモデル化することが困難であった。しかし、自己組織化シミュレーションを用いることで、細胞の増殖と分化の過程をモデル化することが可能となった。また、自己組織化シミュレーションを用いることで、細胞の増殖と分化の過程をモデル化することが可能となった。また、自己組織化シミュレーションを用いることで、細胞の増殖と分化の過程をモデル化することが可能となった。

## 第 5 章

# 細胞型生産システムにおける自己組織化 シミュレーション

本章では、細胞型生産システムに適用する自己組織化のアルゴリズムについて検討する。様々な生産条件、生産要求のもとで細胞型生産システムの計算機シミュレーションを行い、細胞型生産システムがこれらの変化に柔軟に適応して、適切な全体構造を獲得することを確認する。あわせて、自己組織化シミュレーションを通して獲得された細胞型生産システムの全体構造を一般の生産システムに適用可能か否かを検討し、生産システムのプロトタイプングツールとしての細胞型生産システムの有効性について考察する。

## 5.1 シミュレーションの目的

本章では、細胞型生産システムのシミュレーションを行なう。シミュレーションの目的は、以下の3点である。

- 細胞型生産システムの動作の検証

第4章で構築した細胞型生産システムは、加工細胞1台と、倉庫細胞16台からなる、最小構成のシステムであった。本章では、細胞の台数を増やし、特に複数加工細胞存在下での、細胞型生産システムの動作について検討する。

- 自己組織化能力の検証

本章では、細胞型生産システムに自己組織化能力を付与する手法について検討し、その実現手法に基づいて、細胞型生産システムが、様々な生産条件、生産要求に対して適切な構造を獲得しうることを確認する。具体的には、第3.1.1節で述べた生産システムの構造、すなわちライン型構造、屋台村型構造、FMS型構造が、種々の生産条件、生産要求に応じて獲得されるかどうかを検討し、採用した自己組織化手法の有効性を検証する。

- 生産システム設計への適用可能性の検討

自己組織化能力を持つ細胞型生産システムの、生産システムの戦略的設計ツールとしての適用可能性を検討する。具体的には、種々の生産条件、生産要求に適した生産システムの構造を、細胞型生産システムの自己組織化シミュレーションにより導出する。また、実際の生産システム事例への適用可能性を検討する。

本章では、まず細胞型生産システムの計算機モデルについて説明し、ついで細胞型生産システムにおける自己組織化手法について検討し、種々の生産条件、生産要求のもとで細胞型生産システムがどのような構造を獲得するかを調べる。さらに、細胞型生産システムを実際の生産システム例に適用することで、細胞型生産システムの生産システム設計への適用可能性を検討する。

## 5.2 細胞型生産システムのモデル

以下、細胞型生産システムのシミュレーションモデルについて説明する。

### 5.2.1 細胞型生産システムの要求機能

細胞型生産システムの要求機能は、「ユーザの要求に従い、適当な場所から搬入した材料から製品を必要なだけ製造し、適当な場所へ出庫すること」である。

### 5.2.2 細胞型生産システムの構成

第3.4節に従い、細胞型生産システムをを図5.1に示すように構成する。

各細胞は、局所的な情報のみに基づいて自律的に行動し、生産システム全体を統括する部分は、システム内に存在しない。

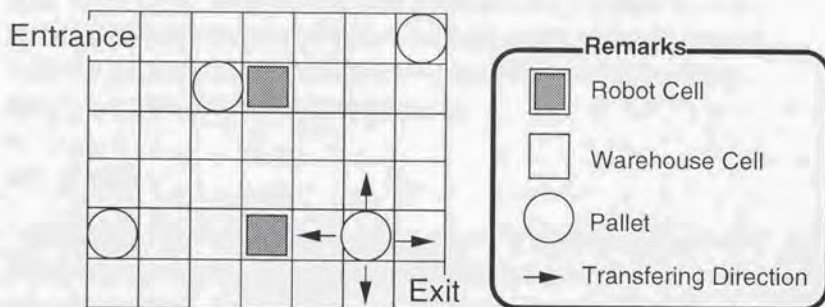


図 5.1: 細胞型生産システム概念図

以下、細胞型生産システムの各構成要素について説明する。

## (1) バレット

バレットは材料や完成品を積載する。各バレットは、積載している荷物に関する情報を持ち、入口で材料とその材料に施すべき加工情報を与えられ、加工細胞を自律的に決定して材料への加工を行う。加工終了後は出口に移動し、加工完了した製品を出庫し、再び入口へと移動して材料とその材料に施す加工情報を受けとる。これをシステム内の各バレットが独立に繰り返すことで、生産システムに発生した生産要求が実行されるものとする。

本章では、製造タスクとして加工タスクのみを対象とし、組み立てタスクは扱わない。加工タスクでは、1加工タスク毎に1つの被加工物のみを搬送すれば良いので、被加工物を積載するバレットだけで、加工情報、および加工タスクがどこまで実行されたかなどの加工タスク管理情報を管理することが可能である。従って、第4章で用いた情報細胞は導入しない。

バレットはそれ自体は移動能力を持たず、バレットを積載している倉庫細胞に移動目標、すなわち入口、出口あるいは加工細胞を逐次指示することで移動する。バレットが加工細胞を決定するアルゴリズムについては後述する(第5.3.3節参照)。個々のバレットは、自己の行動履歴と、入口で与えられる加工タスクのみに基づいて動作し、他のバレットに関しての情報は持たないものとする。

## (2) 倉庫細胞

倉庫細胞は、バレットを実際に搬送する細胞であり、自己の上にあるバレットからの要求に従い、バレットを隣接する倉庫細胞へと搬送する。個々の倉庫細胞は、隣接する4個の倉庫細胞、または加工細胞、そして自己が積載しているバレットとのみ通信を行なうことが可能である。隣接する倉庫細胞同士が局所的な情報交換に基づいて、加工細胞や入口、出口細胞といったバレットの指示する目的地に、バケツリレー式にバレットを搬送する。

倉庫細胞は、システム内に存在する加工細胞、および出口、入口の方向のみを知ることが出来るものとし、この方向情報と、隣接する倉庫細胞との情報交換によりバレットを搬送する。倉庫細胞は、目標となる出口、入口、加工細胞の方向と、隣接する倉

庫細胞の情報のみを用い、システム内の他のパレットがどのように搬送されているかに考慮を払わないことから、複数のパレットが互いに搬送経路を妨げあう状態に陥る。このような場合には、少なくとも一方のパレットが回避動作を行なわなければならない。回避動作に当たっては、パレットは回避要求を搬送先の倉庫細胞へ発行するが、先に相手に回避要求を受けとったパレットが回避動作を行なうものとする。

### (3) 加工細胞

加工細胞は、パレットによって運ばれる材料に対して加工を行なう加工機械である。加工細胞は、荷物受渡し用ステーションとして、一つの倉庫細胞と接続され、接続された倉庫細胞と通信を行なうことが出来る。加工細胞は、システム内の他の加工細胞についての情報を持たず、自己の加工能力についての知識のみを持ち、パレットが到着し、パレットからの加工要求を受けると、該当する加工作業に必要な工具を装備し、パレットに積載されているワークをジグに固定し、パレットに記述されている加工タスクを実行する。

加工細胞は、万能加工機械であると仮定し、全ての加工作業を実行するのに必要な工具を予め保有しているものとする。

また、本シミュレーションでは、特に断らない限り加工細胞の加工能力は全て同一であるとする。

また、多種少量生産および変種変量生産環境における計算機シミュレーションでは、各戦略の割合の収束を確認することが出来なかった。より長時間にわたる計算機シミュレーションを実行し、これらの収束を確認する必要があると考える。

### 5.2.3 細胞型生産システムの動作

細胞型生産システムは、以下のように動作するものとする。

### (1) 倉庫細胞およびパレットの動作

パレットは、入口から投入されるさい、入口で材料と、その材料への加工タスクを受けとり、適切な加工細胞を選んでシステム内を移動し、積載している材料に加工を行なう。製品が完成すると、出口へと移動し、出口で製品を出庫し、入口へ移動して次の加工タスクと材料を受けとる。

パレットは、 $T_{pm}$  ステップに1マス、隣接する上下左右の4方向の倉庫細胞へと移動することが出来るものとし、入口、出口、加工細胞、それぞれの目的地の方向を知ることが出来るものとする。パレットは目的地の方向情報を参照して、可能な限り最短距離を移動するものとする。4方向に移動可能なパレットが最短距離を移動する場合、移動先としては複数の倉庫細胞が候補となりうる。第4章で作成した細胞型生産システムでは、このような場合、先に搬送許可の通知をした倉庫細胞の方向へとパレットが搬送されるが、どの方向の倉庫細胞が最も速く搬送許可の返事を返すかを予測することは出来ない。そこで、本シミュレーションでは、複数候補の中からランダムに選択するものとする。つまり、全く同様の加工細胞巡回順序であっても、実際にパレットが通過するパスは異なるものとする。

また、倉庫細胞は、一度に一つのパレットしか積載できないものとし、パレットが移動しようとしている搬送先にすでに他のパレットが存在する場合、または他のパレットによって搬送先として指定されている場合は、パレットは必要に応じて回避動作を行なうものとする。

### (2) 加工細胞の動作

加工細胞は、隣接する倉庫細胞の一つを専用の荷物受けとりのステーションとして確保し、このステーションに到着したパレットから、 $T_{rf}$  ステップを要して、荷物を作業用のジグに固定し、加工作業を行なう。加工細胞は、一度に一つの加工用ツールを装備することが出来るが、パレットから要求された加工タスクが、現在装備している加工用ツールとは異なるツールを必要とする場合は、一定時間  $T_{rt}$  ステップを要してツールを交換し、加工を行なうものとする。また、各加工作業は、 $T_{rm}$  ステップを要するものとする。

### 5.3 細胞型生産システムの自己組織化手法

環境に応じてシステムの動作を効率化し、適応させるためには、自己組織化のアルゴリズムを搭載することが必要である。以下、自己組織化アルゴリズムの搭載手法について検討を行なう。まず、どのような評価基準に基づき、細胞型生産システムを自己組織化するかについて述べ、この評価基準のもとでの細胞型生産システムの構造について検討し、自己組織化手法を決定する。

#### 5.3.1 システム動作の評価基準の選定

自己組織化のアルゴリズムを検討するに際しては、まずシステム全体の動作をどのような評価軸から見て効率化、最適化するかを決定しなければならない。生産システムの最適化の評価軸としては、一般的には生産コストの最小化をはかることであるが、生産コストに影響を与えるものとして次の項目を上げることが出来る。

- ジョブの滞留時間の最小化
- 製品の納期遅れペナルティ最小化
- 加工機械の稼働率最大化

本研究では、問題を単純にするため、ジョブごとの納期設定は行わず、ジョブがシステム内で、システム内の設備を実際に使用している実働所要時間を評価軸として採用する。つまり、システム内のワークの総実働所要時間を最小にする生産システムの構造を探索するものとする。

#### 5.3.2 構造に関する分析

ついで、ジョブのシステム内総滞留時間の最小化という観点から、3.1.1節で見た生産システムの構造、すなわちライン型構造、屋台村型構造、FMS型構造を分析する。

ジョブの作業所要時間を最小化するためには以下の所要時間を最小化することが必要となる。

- ワーク、すなわちパレットの実働搬送所要時間
- 加工細胞における加工所要時間
- 加工細胞における段取り時間

加工細胞における段取り時間とは、ワークの固定時間および加工細胞のツール交換所要時間である。

本研究では、加工細胞の特に断りのない限りは、加工能力は全て同一であると仮定する。このとき、実働所要時間最小化のためには、ワークの移動時間と加工細胞の段取り時間を最小化することを考慮すれば良い。

一般的に、ライン型構造、屋台村型構造、FMS型構造では、上記の所要時間について以下のことが言える。

#### ● ライン型構造

ライン型構造では、ジョブはそれぞれの加工工程に専門化した加工細胞群をジョブの工程順序に従って移動する。加工細胞が、ある特定の工程に専門化することから、加工細胞における段取り時間のうち、異なる工程を処理するための段取り時間、つまりツール交換時間を小さくすることが可能である。一方、ジョブは、加工工程ごとに異なる加工細胞で処理されることから、各工程毎にワークを加工細胞へ取り付け、取り外す作業が必要となり、ワークの固定時間が増大する。また、各工程毎に異なる加工細胞を用いることから、一般的に搬送所要時間が増大する。

#### ● 屋台村型構造

屋台村型構造では、各ジョブは、それぞれ単一の万能加工細胞によって処理される。ジョブが複数の、相異なる工程から構成されている場合、それぞれの加工細胞で、各工程毎に異なる工程を実行するための段取り時間が必要となる。つまりツール交換時間が増大する。一方、ジョブは、単一の加工細胞で処理されることから、ワークの取り付け、取り外し時間を軽減することが可能であり、単一の加工細胞を用いることから、ワークの搬送距離を短くすることが可能であり、搬送所要時間を小さく抑えることができる。

#### ● FMS 型構造

ライン型構造では、各ジョブについて、ツール交換に伴う段取り時間を小さくすることが可能であり、屋台村型構造では、逆にワークの加工細胞への取り付け、取り外し時間、および搬送所要時間を小さくすることが可能であることを見た。

ワークの移動時間最小化のためには、入口から出口までの加工細胞巡回順路を最短にすることが必要となるが、このためには、経路しなければならない加工細胞数が1台である屋台村型構造が有利となる。しかし、屋台村型構造では、加工細胞でのツール交換が頻繁に発生するため、この点では不利となる。

このようにワークに移動所要時間と、ツール交換時間および、ワーク固定時間の間にはトレードオフの関係があり、様々な生産条件、生産要求に応じて、ワークの移動所要時間、ツール交換時間、ワーク固定時間のどの項目が、ジョブのシステム内滞留時間に最も影響を与えるかが変化する。

このようなトレードオフの関係から、ジョブの各工程のうち、ある部分は、屋台村型構造で、他の部分はライン型構造で実行するというような、ライン型構造、屋台村型構造の中間的な構造が生じうる。これが、FMS 型構造であると考えられる。

以上、ジョブのシステム内滞留時間から、生産システムの構造について分析した。ワークをどの加工細胞へ搬送し、どの加工細胞で、どの加工工程を実行するかを決定することが、すなわち各ワークを搬送するパレットの加工細胞巡回、加工実行順序が、ジョブの実行所要時間の短縮に重要であり、これが生産システムの構造を決定する。この観点から、実働所要時間最小化のための自己組織化アルゴリズムをパレットに実装することとする。

#### 5.3.3 自己組織化アルゴリズムの検討

パレットがどのように加工細胞を巡回するかが、細胞型生産システムの構造を決定する。したがって、パレット群の加工細胞巡回順路の獲得が自己組織化の目標となる。

以下、各バレットの加工細胞巡回順序をそのバレットの「戦略」と呼ぶこととし、各バレットの戦略獲得のためのアルゴリズムについて検討する。

一般的な自己組織化手法として以下の手法を考えることが出来る。

- 遺伝的アルゴリズム (GA)

組み合わせ最適化問題として定式化される問題は、一般的には NP 困難であり、全ての組み合わせを列挙することで最適解を求めるのは事実上不可能であることが多い。このような問題で、準最適解を効率的に求める手法として、GA が広く用いられる。GA は、適応度の高い個体ほど生存確率が高いという、確率的探索手法の側面をもつことから、問題構造が十分に分析されていない場合にも広く適用可能な汎用的な手法であり、また、十分に問題構造が分析されている場合には、経験的な知識を、遺伝子の符合化において組み込んで経験的探索を行なうことが可能であるという長所を持つ。しかし、制御パラメータにより、探索効率が大きく影響を受けること、交叉操作の意味を十分に考慮して問題を符合化しないと探索効率が向上しないこと、また評価値計算が頻繁に行なわれることから、評価値計算が複雑な最適化問題には不向きであることなどの短所を持つ。

細胞型生産システムにおける自己組織化では、各バレットがどのように加工細胞を巡回するかを決定する。各バレットは、目的地となる加工細胞、あるいは出口、入口に対して最短距離を進むが、バレットが相互に干渉し、回避動作を行なうこと、また、選択された加工細胞が既に他のバレットによって占有されていることなどが起こりうることから、各バレット巡回順序の評価は計算機シミュレーションによらなければならない。したがって、評価値計算が複雑であり、GA を用いた自己組織化は、本例題の場合困難である。

- 強化学習

問題の定式化が容易であり、各構成要素（ここではバレット）が、試行した結果に基づき、漸近的に適切な加工細胞巡回順序を獲得していくことから、オンラインでの自己組織化が可能である。

以上の議論から、細胞型生産システムの自己組織化手法としては、主として強化学習を採用し、強化学習による代表的な獲得構造例についてのみ、比較、評価のためにGAを用いるものとする。

### (1) 強化学習による構造獲得アルゴリズム

各バレットの観点から見ると環境は以下のような特徴を持つ。

- バレットの移動では、他のバレットと干渉するが、他のバレットの移動は予測不能である。
- バレットは加工細胞で加工を実行することで加工細胞の工具を変更し、環境に影響を残すが、他のバレットの加工実行による加工細胞の工具変更は予測不能である。

つまり、他のバレットの挙動は、自己に大きな影響を与えるにもかかわらず、これを認識できないことから、広く用いられるQ学習などの強化学習手法をそのまま適用するのは不適切である。

このような予測不可能性が高いマルチエージェント環境では、最適性を指向する学習法よりも、過去に行なった経験から出来るだけ有効度の高い戦略を繰り返し強化する学習方式がより適していると考えられる。

そこで、バレットが、試行を行ない、行なった試行に対してなんらかの報酬を受けとることでバレットの戦略を最適なものへと近づけていくというアプローチを採用する。

まず以下のように設定する。

- バレットは、複数の製品加工タスクのそれぞれについて過去  $N$  回の行動履歴を記憶するものとする。ここで行動履歴とは、過去に選択、実行した戦略とその戦略を採用した結果受け取った報酬の組である。過去  $N$  回にわたっての行動履歴が存在しない場合、例えば生産システム内に新規加工タスクが投入された場

合などは、ランダムに加工細胞を選択して加工工程を実行し、製品出庫時にその時選択した加工細胞巡回順序、即ち戦略に対して報酬を受け取るものとする。

- 行動履歴のうち、高い報酬を獲得した上位  $R_1\%$  の戦略を「戦略集団」と定義し、この戦略集団から次の同一製品加工タスクを実行する際の戦略を決定する。戦略集団中のある戦略  $i$  が選択される確率  $p_i$  は、(5.1) 式で与えられるものとする。

$$p_i = \frac{r_i}{\sum_{k=1}^n r_k} \quad (5.1)$$

ただし、

$$n = \frac{NR_1}{100} \quad (5.2)$$

である。

戦略集団は過去の行動履歴から形成されるため、同一戦略のものが複数含まれるが、同一戦略でも区別して扱うものとする。つまり、戦略集団中に同一戦略のものが複数存在する場合、それぞれの戦略の報酬に応じてこれらの戦略が独立に選択されるため、この戦略が選ばれる確率が、結果的に上昇する。すなわち、過去  $N$  回の試行で繰り返し選択され、高い報酬を受け取る戦略が強化されていくことを意味している。

- バレットは各戦略実行後には、戦略の良否を判定する反応、即ち報酬  $r$  を受け取るものとする。本研究では、システム全体での各ワークの実働所要時間を最小にするような構造を探索することを目標とすることから、入口で素材を受けとり、出口に加工終了物を出庫するまでの実働所要時間  $t$ 、すなわち、移動所要時間、加工所要時間、および加工段取り時間の和が小さいほど得られる報酬を大きく設定する。

報酬  $r$  は (5.3) 式で与えるものとする。

$$r = \frac{1}{t} \quad (5.3)$$

なお、バレットは、移動方向に他のバレットが存在していると、自己または、もう一方のいずれかのバレットが回避動作を行わなければならないが、相手バレットが回避動作を行なう場合、バレットはそのステップでは移動を行わない。このような待ち時間は、 $t$ に含まないものとする。

本研究で採用する学習アルゴリズムは以下の手順からなり、バレットは、この手順を繰り返して適切な戦略の獲得を目指すものとする。

### 1. 新しい戦略の獲得

動的に変化する環境を対象とすることを考えると、バレットは常に戦略を能動的に獲得することが望ましい。

そこで、バレットは常に新しい戦略獲得のための欲求を持つものとし、 $R_2\%$ の確率で、ランダムに加工細胞を巡回する順序を決定し、出口でその時の加工細胞巡回順路、すなわち戦略に応じた報酬 $r$ を獲得するものとする。この時の戦略に対する報酬が、行動履歴中の上位  $R_1\%$  以内に入った場合、戦略集団に新しい戦略が加えられることになる。

### 2. 戦略選択と評価

新しい戦略獲得を行わない場合、現在存在する戦略集団のなかから戦略を1つ選択し実行し、選択された戦略と報酬の組を行動履歴に加え、最も古い行動履歴の組を忘却する。すなわち、選択した戦略の示す通りに加工細胞を巡回し、出口で報酬 $r$ を受けとり、行動履歴を更新し、新しい原材料と加工タスクを受けとるために入口へと移動する。

### 3. 戦略選択確率の更新

更新された行動履歴から、上位  $R_1\%$  を選択し、戦略集団を更新する。

図5.2にバレットの動作手順を示す。

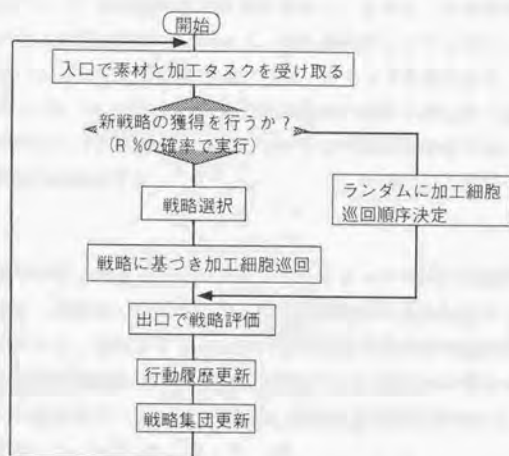


図 5.2: パレットの動作手順

## (2) GA による構造獲得のアルゴリズム

GA を用いた構造獲得は、以下のように行なう。強化学習方式と同様、生産システムの構造を決定するのは、パレットの加工細胞巡回順序路であることから、各パレットの加工細胞巡回順序路を遺伝子としてコーディングし、これら繋いで全パレットについての加工細胞巡回順序路を 1 つの個体としてコーディングする。この個体集合に対して、以下に示す操作を行ない、各生産条件、生産要求下での適切な生産システムの構造を検討する。

### 1. 初期個体集合作成

各パレットごとにランダムに加工細胞を選択して、全パレットについての加工細胞巡回順序路を作成し、これらを世代サイズ数  $M$  個体作成する。

### 2. 評価

各個体について、その適応度の評価を行なう。評価は、各個体が表現する全バレットの加工細胞巡回順序に従って、細胞型生産システムのシミュレータを用いて、各バレットを一定個数  $N$  個ずつ同一のジョブを処理させ、全バレット、全加工ジョブについての実行所要時間の総和の逆数を適応度と定義する。すなわち、全バレット、全加工ジョブについての平均所要時間が短いものほど高い適応度を持つものとする。

### 3. 選択

全個体について、細胞型生産システムのシミュレーションを用いて適応度の評価を行ない、適応度に基づき、次世代の個体集合の選択を行なう。先に適応度は、全バレット、全加工ジョブについての実行所要時間の総和の逆数と定義したが、各個体の適応度の差が小さく、計算に大きな時間を必要とする。そこで、適応度にベキ乗スケーリングを適用し、適応度比例選択を行ない、 $M$  個の個体を選択する。

ここでは、適応度を 10 乗してスケーリングすることとする。以上を以下にまとめる。

各個体  $X$  の適応度  $g(X)$  は、各個体の全ジョブ実行所要時間の和  $T_s(X)$  を用いて、(5.4) 式のように表される。

$$g(X) = \frac{1}{T_s(X)} \quad (5.4)$$

このとき、個体  $X$  の選択確率  $S(X)$  は、(5.5) 式で与えられる。

$$S(X) = \frac{g(k)^{10}}{\sum_{k=1}^M g(k)^{10}} \quad (5.5)$$

ここに  $g(k)$  は、 $k$  番目の個体の適応度である。

### 4. 交叉

選択した個体から、確率  $P_c$  でランダムに交叉を行なう。交叉は、一点交叉とする。各個体の遺伝子は、全バレットの加工細胞巡回順序を含んでいるが、これらのうち各バレットごとの加工細胞巡回順序をひとまとまりの遺伝子ブロック

として抜うのが妥当である。そこで、各バレットについての加工細胞巡回順序毎に、交叉点を設定し、これらをランダムに選択して交叉を行なう。

#### 5. 突然変異

交叉を実行した個体について、確率  $P_m$  で、ランダムに遺伝子座を選び、その遺伝子座に記述されている加工細胞をランダムに変更する。

#### 6. 判定

予め定められたステップ数  $T$  以上、上記の処理を繰り返したら終了するものとする。

### 5.4 計算機シミュレーション

本節では、表 5.1 に示す各条件のもとで、第 5.3 節の自己組織化アルゴリズムを適用して計算機シミュレーションを実行し、細胞型生産システムの自己組織化能力を検証し、それぞれの条件のもとで獲得された全体構造について検討し、生産システム設計への適用可能性を検討する。

#### 5.4.1 計算機シミュレーションの方法

本章では、生産システムにおいて各製品が、入庫から加工完了、出庫までの全所要実働時間を最小化することを目標として計算機シミュレーションを行なう。ここで、全実働所要時間とは、製品の加工所要時間、加工段取り所要時間、搬送所要時間の和であるとし、加工段取り時間は、加工機械におけるツール交換時間とワークの固定時間の和であるとする。

本研究では、生産環境を以下の 3 種類に分類する。

- 加工機械の段取り時間がワークの加工完了までの所要時間に大きな割合を占める場合

- ワークの搬送時間がワークの加工完了までの所要時間に大きな割合を占める場合
- 加工機械の加工時間がワークの加工完了までに所要時間に大きな割合を占める場合

さらに、加工機械の段取り時間について、以下の3種類に分類する。

- 加工機械におけるツール交換の所要時間が全段取り時間で大きな割合を占める場合
- 加工機械におけるツール交換の所要時間とワーク固定の所要時間が同程度の割合を占める場合占める場合
- 加工機械におけるワーク固定の所要時間が全段取り時間で大きな割合を占める場合

以上の組合わせ、合計9種類の生産環境について、計算機シミュレーションを行ない、獲得される構造について検討を加える。第5.3.2節で見たように、ワークの加工完了、出庫までの所要時間を最小化するためには、段取り時間およびワーク搬送時間をそれぞれ最小化することが必要となるが、これらの間にはトレードオフの関係が存在するため、上述の生産環境の変化に対して、複数の構造が現れるものと考えることが出来る。

第3.1.1節での分類に従い、細胞型生産システムにおける構造を以下のように定義する。

まず、各バレットの加工細胞巡回順序、すなわち、戦略について、同一加工細胞で全ての加工を実行するバレットの戦略を屋台村型戦略と呼び、全工程を異なる加工細胞を用いて実行するバレットの戦略をライン型戦略とよび、両者の組み合わせとなる戦略、たとえば、ある工程については同一加工細胞で連続して行なうが他の加工は、それぞれ1台ずつの加工細胞で行なうなどの戦略を混合型戦略と呼ぶことにする。

バレットは独立に学習するため、必ずしもシステム全体で、全てのバレットが同一の構造を獲得するとは限らず、バレット集団が複数の戦略を選択していることがあり

うる。以下では、全てのパレットがほぼ同一種類の戦略を採用しているときに、それぞれライン型構造、屋台村型構造、混合型構造と呼ぶこととし、各パレットが異なる戦略を採用し、システム全体として、ライン型戦略、混合型戦略、屋台村型戦略などが混在している構造をFMS型構造と呼ぶこととする。なお、FMS型構造については、どのような戦略の組み合わせであるかを示すため「ライン型+混合型」のように記述するものとする。

生産要求は、ロットサイズ、製品品目数により、多種少量生産、中種中量生産、少種多量生産、変種変量生産などの生産要求に類型化できる。

本章では、ロットサイズが50000個のものを少種多量生産、1000個のものを中種中量生産とみなし、それぞれ2種類の製品を交互に200000個要求して、細胞型生産システムの獲得構造を検討する。

多種少量生産は、極めて小さなロットサイズの製品を扱う生産形態であり、このような生産要求下では、複数種類の製品が同時に生産システム内で生産されしかし、段取り時間最小化のためにはワークの固定時間とツール交換時間の和を最小化することが必要となる。

パレットの実働移動時間最小化のためには、入口から出口まで最短経路で結ぶことが可能な順序で加工細胞を巡回することが必要である。しかし、このような最短経路に複数のパレットが集中すると、混雑によりパレットは、多数の回避動作を余儀なくされ、実働移動時間が増大する。つまり、パレットの移動経路は混雑具合とのトレードオフの関係にある。

ワーク固定は、加工細胞を巡回する毎に発生するため、ワーク固定時間を最小化するためには、可能な限り巡回する加工細胞数を小さくすることが望ましい。この極限として、1台の加工細胞で全ての加工作業を実行する屋台村型構造が存在していると考えられる。

しかし、同一加工細胞で複数種類の加工を連続して行なうためには、加工細胞のツール交換が必要であり、ワーク固定時間最小化とツール交換時間最小化の間にはトレードオフが存在している。

一方、ツール交換回数を少なくするためには、パレットに積載されているワークの

次の加工工程に必要な工具を装備している加工細胞を選択して移動することが望ましい。ツール交換は、パレットが加工細胞で加工を行なうことで発生するため、システム内のパレットが協調して特定の加工細胞のみで特定の加工を行なうという戦略を採用することで、システム全体としてのツール交換回数を減らすことが可能となる。

そこで、多種少量生産要求として、同時に2種類の製品を要求するものと、同時に5種類の製品を要求するものの2種類を考え、それぞれについて獲得構造を検討するものとする。

変種変量生産は、ロットサイズ、製品種類が大きく変動する生産要求である。本章では、ロットサイズを1から2000までランダムに変化させ、同じく5種類の製品をランダムに選択して要求するものを変種変量生産のモデルとして採用する。

表5.1に実行する計算機シミュレーションをまとめる。

表5.1の最初の3セットのパラメータは、全作業時間のなかで、ツール交換および、ワーク固定が大きな比率を占めるケースである。次の3セットでは、全作業時間中、移動時間が大きな比率を占めるものである。最後の3セットは、全作業時間中、ロボットでの加工作業が大きな比率を占めるものである。それぞれの条件下で、ロボットのツール交換時間とワーク固定時間の比率を変化させて、4種類の生産要求に対してどのような構造が獲得されるかを調べるものとする。

但し、 $T_{pm}$  はパレットの1マス移動所要時間、 $T_{rm}$  はロボットの1加工実行時間、 $T_{rf}$  はロボットのワーク固定所要時間、 $T_{rt}$  はロボットのツール交換所要時間とする。

#### 5.4.2 細胞型生産システムのパラメータ決定

##### (1) 細胞型生産システムが対象とするジョブの工程数

本シミュレーションでは、細胞型生産システムが、様々な生産条件、生産要求に応じて、自己組織的に様々な構造を獲得することを確認することを目指している。生産システムの構造は、ジョブの各工程がどのように加工細胞に割り当てられるかという観点から、ライン型、屋台村型、FMS型構造に分類できる。このような生産システムの構造の分化を確認するためには、各ジョブは、複数工程、それぞれ異なるツー

表 5.1: 計算機シミュレーション

$T_{pm}$	$T_{cm}$	$T_{if}$	$T_{rt}$	少種多量生産	中種中量生産	多種多量生産	変種変量生産
1	1	10	50	A-1	B-1	C-1	D-1
1	1	30	30	A-2	B-2	C-2	D-2
1	1	50	10	A-3	B-3	C-3	D-3
20	1	10	50	A-4	B-4	C-4	D-4
20	1	30	30	A-5	B-5	C-5	D-5
20	1	50	10	A-6	B-6	C-6	D-6
1	100	10	50	A-7	B-7	C-7	D-7
1	100	30	30	A-8	B-8	C-8	D-8
1	100	50	10	A-9	B-9	C-9	D-9

ルを用いる、少なくとも3つ以上の工程から構成されていなければならない。

しかし、各ジョブの工程数が増大すると、各ジョブの工程と加工細胞の割り当て問題は、急速に探索空間が大きくなり、計算が困難になる。そこでまず、各ジョブは、必要最小限の工程数である、3工程から構成するものとしてモデル化を行ない、計算機シミュレーションにより、様々な生産条件、生産要求での獲得構造の検討を行なう。

また、各ジョブは、相異なるツールを用いる3加工工程から構成されているものとし、異なる製品間で用いる加工ツールには共通性がないものとする。

したがって、同一加工細胞で3工程の加工を連続して行なう戦略が屋台村型戦略、2工程を連続して行なう戦略が混合型戦略、全て異なる加工細胞で加工を行なう戦略がライン型戦略であるといえる。以下、システム全体での屋台村型戦略の発生回数を混合型戦略の発生回数を mix、ライン型構造の発生回数を line と記述することとし、これらの3つの戦略の比率がどのようになったかで生産システムの獲得構造を分類することとする。

## (2) 細胞型生産システムの全体配置

生産システムには、大小様々なものが存在する。小は、町工場など各種加工機械が一台ずつで合計数台の加工機械から構成されるもの（これらの工場を下請けとして用いる工場からみれば、このような町工場はFMCに相当する）、FMCのように一台の万能加工細胞で構成されるものなどから、数十台、数百台の加工細胞を用いる自動車工場などの例まで多岐にわたる。本シミュレーションの目的は、生産条件、生産要求に応じた、生産システムの構造を分岐を確認することであるから、3工程からなるジョブを処理する場合、少なくとも3台以上の加工細胞が必要である。さらに、構造獲得の手法として、強化学習という確率的手法を用いることを考慮すると、加工細胞台数は、より多いことが望ましい。以上の点を考慮して、自己組織化の対象とする細胞型生産システムは、加工細胞10台と、加工細胞間をデッドロック等に陥らずに余裕を持ってパレットが動作できるだけの倉庫細胞数から構成するものとする。

図5.3に細胞型生産システムの構成を示す。システムは、縦20個、横20個に渡り、倉庫細胞を敷き詰め、加工細胞10台、および入口、出口を図のように配置する。パレットは、10台用意し、各加工細胞の荷物受渡しステーションとして加工細胞の左隣の倉庫細胞が確保されるものとする。

# 5.3 細胞型生産システムの配置

本論文では、細胞型生産システムの配置問題を、ロボットが原料を入口から受け取り、各加工ステーションを巡回し、最終的に出口まで運搬する問題としてモデル化する。図5.3に細胞型生産システムの配置を示す。図中のグリッドは、加工ステーションと通路を示す。入口(1,1)は原料を受け渡し、ロボットはここから出発する。加工ステーションはグリッド上の特定のセルに配置されている。ロボットは各加工ステーションを巡回し、最終的に出口(20,20)で完成品を受取る。図中の「Agent Path」は、ロボットの移動経路を示す。

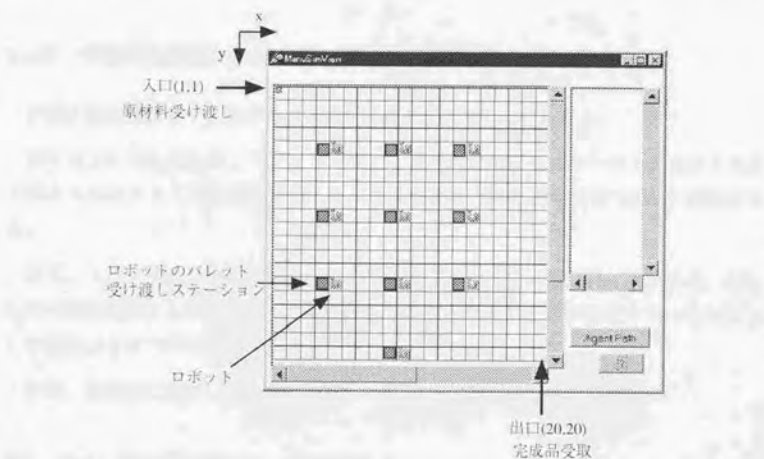


図 5.3: 細胞型生産システムの配置

### (3) 学習のパラメータ

$N$  は、各パレットが過去どの程度の期間にわたっての行動を記憶しているかを決定するパラメータである。本シミュレーションでは、 $N = 100$  として計算を行なう。 $R_1$  が小さいと学習の鋭敏さが大きくなるが、環境変化へのロバストネスが低下する。細胞型生産システムでは、各パレットがそれぞれ独立に学習を行なうことから、 $R_1 = 10\%$  とする。 $R_2$  は、探索の範囲を決定する因子である。本研究では、一律に  $R_2 = 10\%$  とする。

#### 5.4.3 少種多量生産環境の計算機シミュレーション

少種多量生産として、以下のような生産要求を入力として与える。

加工完了にそれぞれ  $T_{rm}$  ステップを要し、それぞれ相異なるツールを必要とする 3 工程からなるタスクを 2 種類用意し、これを交互に 50000 個ずつ計 200000 個要求する。

以下、ライン型と屋台村型構造の両典型的構造として、実験 A-1、実験 A-3、それらの中間的構造として実験 A-2、加工段取り時間の割合が小さい場合についての例として実験 A-5 について説明する。

なお、本文中に収録しない他の実験データについては、付録に収録する。

#### (1) ライン型構造が獲得された例 (実験 A-1)

$T_{rm} = 1, T_{pm} = 1, T_{rt} = 50, T_{rf} = 10$ 、すなわち、ワークの加工には、それぞれ 1 ステップを要し、パレットの 1 マス移動所要時間を 1 ステップ、ロボットのツール交換所要時間を 50 ステップ、ワークの固定時間を 10 ステップとする。

少種多量生産要求のもとでの実働所要時間の変化、ツール交換回数の変化、各構造の割合の 1000 個出庫する毎の変化をそれぞれ図 5.4、図 5.5、図 5.6 に示す。また、図 5.7 に各加工細胞での加工実行回数の分布を示す。

図 5.6 において、実線よりも下側がライン型戦略を採用している割合であり、実線

と破線に囲まれた領域が混合型戦略を採用している領域であり、破線の上側が屋台村型戦略を採用している割合である。以下、他の構造の割合変化図についても同様である。

図 5.6 には、製品の出庫数が 0 個付近と 50000 個付近の 2 つのピークが現れているが、これは製品要求の切り変わりに対応するものである。50000 個ごとに製品要求が変化することから、100000 個出庫、150000 個出庫時にもピークが現れるはずだが、1 巡目の学習結果が 2 巡目でも利用されるため目立ったピークは現れていない。

図 5.6 でも、同様に 2 つのピークが見てとれる。また、出庫数の増加に伴い、ライン型構造が獲得されていることがわかる。

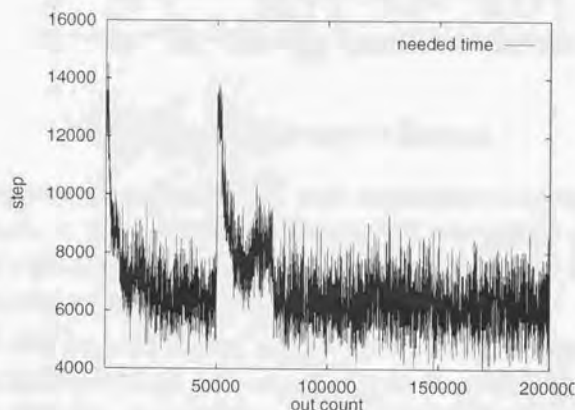


図 5.4: 50 個毎の移動所要時間+加工所要時間 No.A-1

全ワークの平均所要時間は 135.8 ステップであった。

学習が収束した最終 1000 個については、 $line : mix : island = 982 : 18 : 0$ であった。本手法では、10% の確率で、パレットはランダムに加工細胞を選択するため、100% 単一各戦略のみになることはありえない。ランダムに加工細胞を選択する場合、加工細胞が 10 台で、3 工程であることから屋台村型戦略が選択される確率は

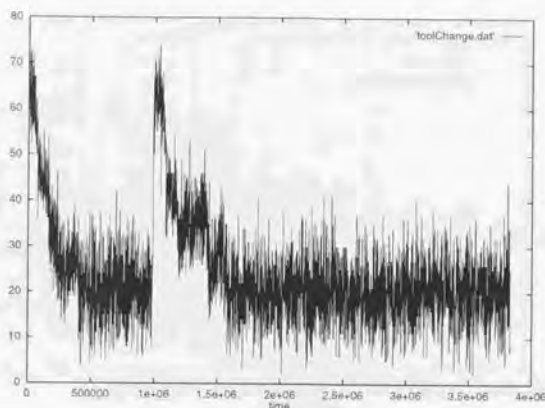


図 5.5: 1000 ステップ毎のツール交換回数 No.A-I

1%、混合型戦略が選択される確率は18%、ライン型構造が選択される確率は81%である。したがって、完全に屋台村型戦略が選択されている場合の最高比率は90.1%、完全にライン型構造が選択されている場合の最高比率は98.1%、完全に混合型戦略が選択されている場合の最高比率は91.8%となる。

バレットが10台であることを考え、かつ各バレットは十分時間学習後にはほぼ単一の戦略を選択していると考え、10台のうち9台が同一戦略を採用している場合のそれぞれの比率は、屋台村型構造で、81%、ライン型構造で88%、混合型構造では、83%となる。

以上の議論から、10台のバレット中、9台以上が確実に同一戦略を継続的に採用している場合として、全比率中以下の割合以上で単一戦略が優勢である場合に、それらの戦略が支配的であると結論づけるものとする。

- 屋台村型構造では、その比率が85%以上
- ライン型構造では、90%以上

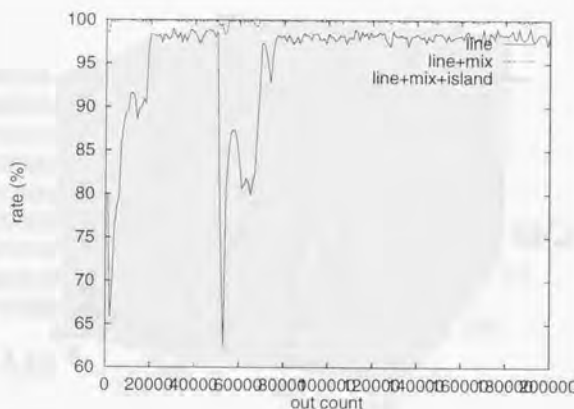


図 5.6: 1000 個毎の各構造の割合 No.A-1

- 混合型構造では、85% 以上

本実験では、ライン型構造が獲得された。

また、20 万個のワーク加工に対して、全ツール交換回数は 94577 回、1 ワークあたり 0.47 回であった。

加工細胞で最も多くの加工タスクを実行したのは、(5,5) の位置にある加工細胞で、3 種類の工程全てを合わせて延べ 82818 工程の加工タスクを実行した。最も加工実行回数が少ない加工細胞は、(15,5) の位置にある加工細胞で、実行回数は 37079 回であった。図 5.7 から、同条件下では、全般的な傾向として、入口、出口に近い加工機械で多く加工が行なわれている様子が見てとれる。

また、図 5.5 は、ツール交換の回数を減らすことで、所要ステップ数の短縮がはかられていることを示唆している。

2 種類の生産要求に対して、それぞれの 1～3 の加工工程は、特定のロボットに偏在して実行された。図 5.8、図 5.9 に、それぞれの加工工程が、どのロボットで主に実

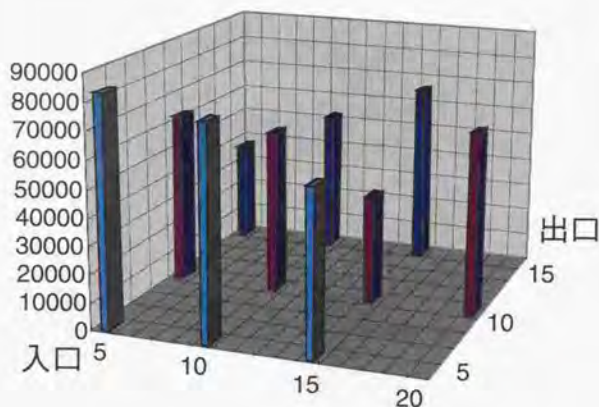


図 5.7: ロボットの全加工実行回数 No.A-1

行されていたかを示す。

入口から出口方向へ、加工工程の順にロボットがそれぞれの作業に専門化していることがわかる。

また、2つの製品について、加工工程の分配が異なるが、これはバレットの学習アルゴリズムが、確率的な振舞いをするためである。すなわち、バレットの最適経路は複数存在し、どの経路が選択されるかは、どの最適経路を一番速く獲得するかに依存する。図 5.8、図 5.9 に示す加工工程の分布は、それぞれ独立に学習するバレットの振舞いの重ね合わせであることから、違いが生じているものと考えられる。

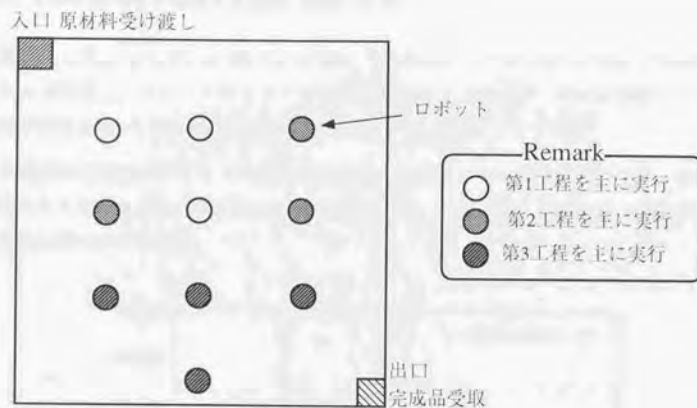


図 5.8: 作業工程の分布 No.A-1(製品 1)

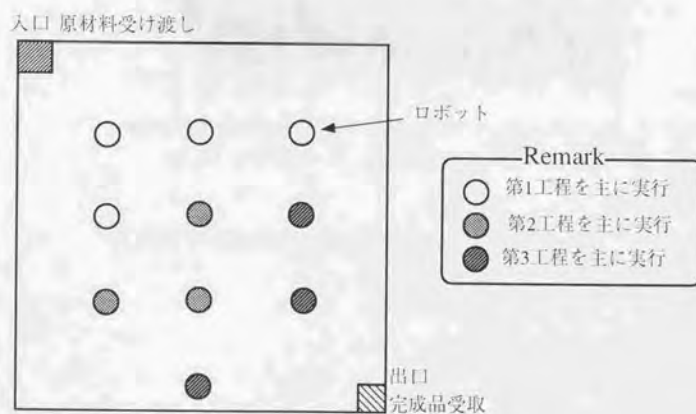


図 5.9: 作業工程の分布 No.A-1(製品 2)

## (2) FMS 型構造が獲得された例 (実験 A-2)

$T_{rm} = 1, T_{pm} = 1, T_{rt} = 30, T_{rf} = 30$ 、すなわち、ワークの加工には、それぞれ 1 ステップを要し、パレットの 1 マス移動所要時間を 1 ステップ、ロボットのツール交換所要時間を 30 ステップ、ワークの固定時間を 30 ステップとする。

少種多量生産要求のもとでの実働所要時間の変化、ツール交換回数の変化、各構造の割合をそれぞれ図 5.10、図 5.11、図 5.12 に示す。また、図 5.13 に各加工細胞での加工実行回数の分布を示す。

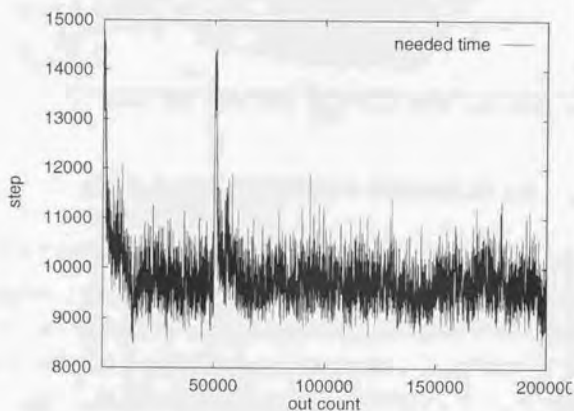


図 5.10: 50 個毎の移動所要時間+加工所要時間 No.A-2

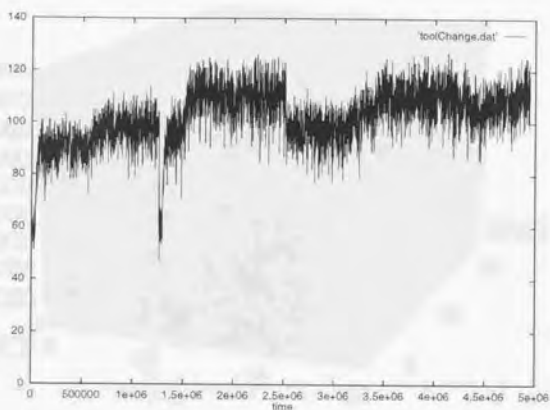


図 5.11: 1000 ステップ毎のツール交換回数 No.A-2

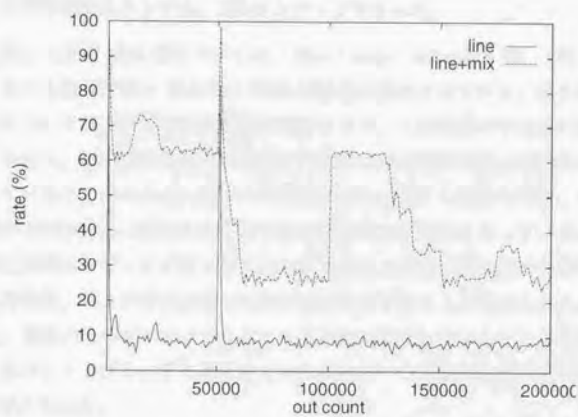


図 5.12: 1000 出庫毎の戦略比率の変化 No.A-2

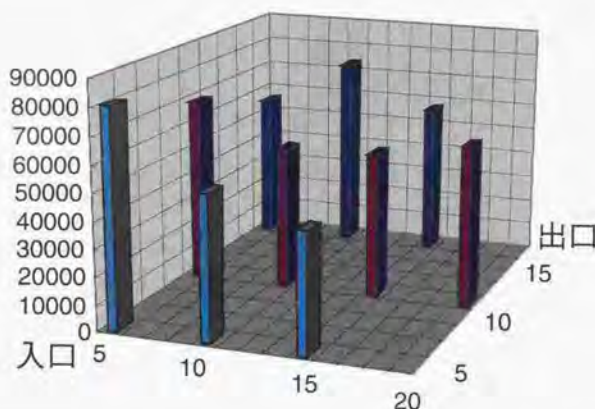


図 5.13: ロボットの全加工実行回数 No.A-2

全ワークの平均所要ステップは、195.9 ステップであった。

学習が収束した最終 1000 個については、 $line : mix : island = 94 : 188 : 718$  となった。すなわち屋台村型 + 混合型の FMS 型構造が獲得されている。図 5.12 では、最初の製品については、まず混合型戦略が優勢となり、この製品が 2 回目に要求されるとき、すなわち、製品出庫数が 100000 から 150000 個の範囲で屋台村型戦略へと急激に移行していることがわかる。2 つめの製品については、1 回目の学習、すなわち製品出庫数が 50000 から 100000 の範囲で屋台村型戦略が優勢となっている。これらの構造変化に対応するピークが図 5.10 に見られないことから、同実験の条件下では、安定となる混合型、および屋台村型の比率が複数存在することが考えられる。また、図 5.12 では、戦略の比率がフラットなところと急激に変化しているところが見られるが、これは各バレットがそれぞれ選択している戦略が一つに絞られていることを意味していると考えられる。

加工細胞で最も多くの加工タスクを実行したのは、(5,5) の位置にある加工細胞で、3 種類の工程全てを合わせて延べ 80577 工程の加工タスクを実行した。最も加工実行

回数が少ない加工細胞は、(5,15)の位置にある加工細胞で、実行回数は44190回であった。図5.13では、目立った規則性はみとれない。

### (3) 屋台村型構造が獲得された例 (実験 A-3)

$T_{rm} = 1, T_{pm} = 1, T_{rf} = 10, T_{ff} = 50$ 、すなわち、ワークの加工には、それぞれ1ステップを要し、パレットの1マス移動所要時間を1ステップ、ロボットのツール交換所要時間を10ステップ、ワークの固定時間を50ステップとする。

少種多量生産要求のもとでの実働所要時間の変化、ツール交換回数の変化、各構造の割合の変化をそれぞれ図5.14、図5.15、図5.16に示す。また、図5.17に各加工細胞での加工実行回数の分布を示す。

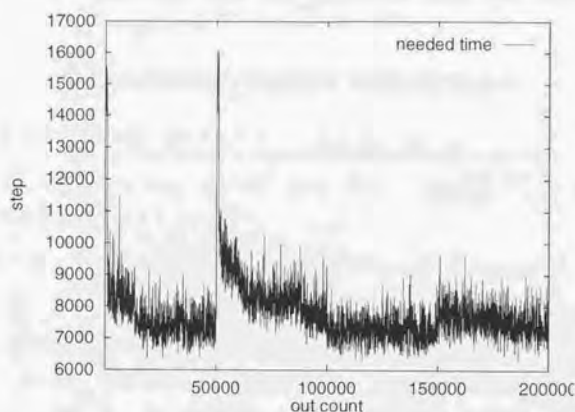


図 5.14: 50 個毎の移動所要時間+加工所要時間 No.A-3

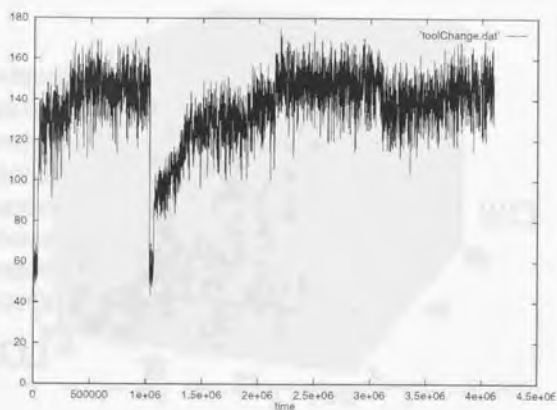


図 5.15: 1000 ステップ毎のツール交換回数 No.A-3

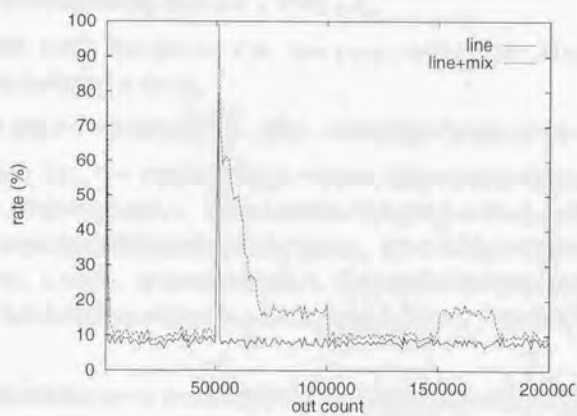


図 5.16: 1000 出庫毎の戦略比率の変化 No.A-3

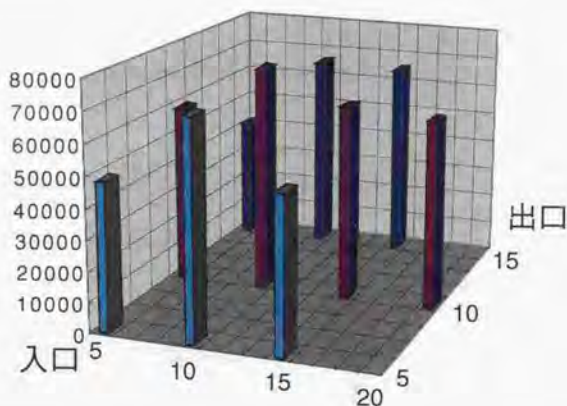


図 5.17: ロボットの全加工実行回数 No.A-3

全ワークの平均所要時間は 156.0 ステップであった。

学習が収束した最終 1000 個については、*line : mix : island* = 84 : 21 : 895 であり、屋台村構造が獲得されている。

また、20 万個のワーク加工に対して、全ツール交換回数は 558552 回であった。

同条件下のように、ワーク固定時間が大きい場合は、屋台村型戦略が優勢となるが、図 5.16 では、学習の進展に伴い、まず混合型戦略が先に獲得されている。パレットの学習では、新規に加工細胞巡回順序を探索する時に、ランダムに加工細胞の巡回順序を選んでいる。このため、屋台村型戦略に比べ、混合型戦略の方が確率的に獲得が容易であり、先に混合型戦略が強化されるためこのような学習パターンになるものと考えられる。

また、最初の製品に比べて 2 つ目の製品のほうが学習効率が悪いことが図 5.14、図 5.16 からわかる。これは、2 つ目の製品が投入される時には最初の製品がまだシステム内で加工されており、これが学習の初期段階に影響を与えているためだと考えられる。

加工細胞で最も多くの加工タスクを実行したのは、(10,10)の位置にある加工細胞で、3種類の工程全てを合わせて延べ74125工程の加工タスクを実行した。最も加工実行回数が少ない加工細胞は、(15,5)の位置にある加工細胞で、実行回数は44190回であった。

#### (4) 搬送所要時間の比率が大きい場合の例 (実験 A-5)

$T_{rm} = 1, T_{pm} = 20, T_{rt} = 30, T_{rf} = 30$ 、すなわち、ワークの加工には、それぞれ1ステップを要し、パレットの1マス移動所要時間を20ステップ、ロボットのツール交換所要時間を30ステップ、ワークの固定時間を30ステップとする。

少種多量生産要求のもとでの実働所要時間の変化、ツール交換回数の変化、各構造の割合の変化をそれぞれ図5.18、図5.19、図5.20に示す。また、図5.21に各加工細胞での加工実行回数の分布を示す。

図5.18では、多くのピークが見られるが、これはパレット同士が相互に干渉してデッドロック状態などに陥っているためである。同実験条件下では、移動所要時間が全作業時間で大きな比率を占めるため、この影響が実験A-1、A-2、A-3などの実験条件に比べ大きく現れている。

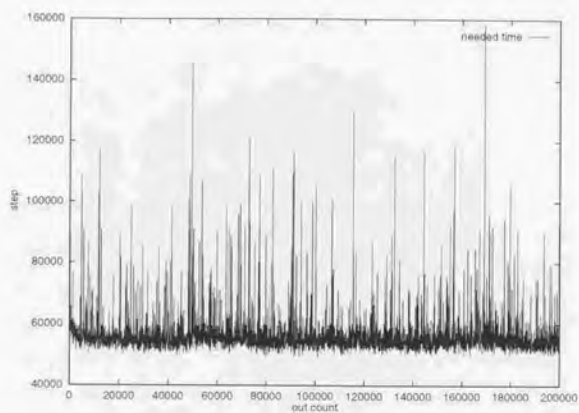


図 5.18: 50 個毎の移動所要時間+加工所要時間 No.A-5

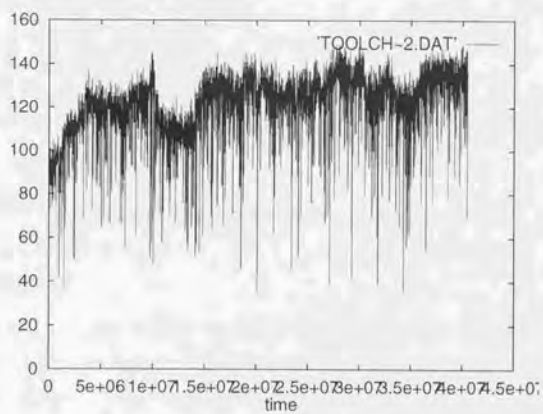


図 5.19: 10000 ステップ毎のツール交換回数 No.A-5

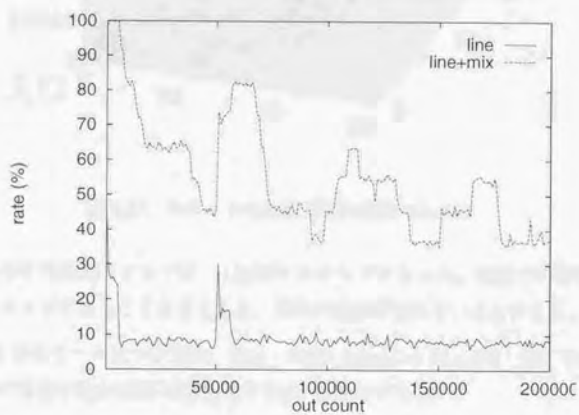


図 5.20: 1000 出庫毎の戦略比率の変化 No.A-5

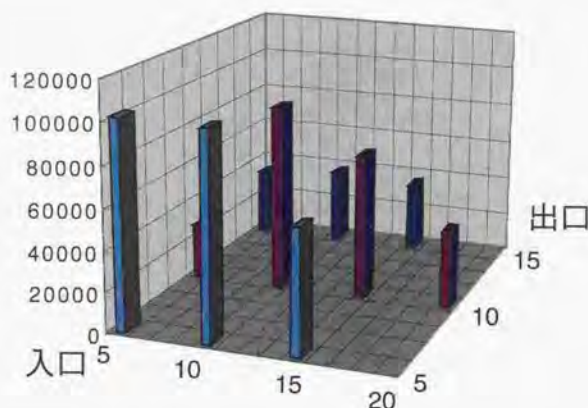


図 5.21: ロボットの全加工実行回数 No.A-5

全ワークの平均所要ステップは、1187.77 ステップであった。最短での移動所要時間は 780 ステップであることを考えると、学習の効果が現れているといえる。

最終 1000 個のワークについては、 $line : mix : island = 81 : 291 : 628$  であり、屋台村型戦略が優勢な屋台村型 + 混合型の FMS 型構造である。

また、図 5.20 では、実験 A-2、実験 A-3 と同様、製品切替え後、学習が始まる時に、最初に混合型構造が獲得されることを示している。

また、20 万個のワーク加工に対して、全ツール交換回数は 581130 回、1 ワーク平均 2.90565 回であった。

加工細胞で最も多くの加工タスクを実行したのは、(5,5) の位置にある加工細胞で、3 種類の工程全てを合わせて延べ 102062 工程の加工タスクを実行した。最も加工実行回数が少ない加工細胞は、(15,5) の位置にある加工細胞で、実行回数は 33357 回であった。図 5.21 から、全体的に入口付近の加工細胞で多くのタスクが実行されていることがわかる。

表 5.2: 少種多量生産における獲得構造

	$T_{pm}$	$T_{rm}$	$T_{rf}$	$T_{rt}$	獲得構造	平均所要ステップ
A-1	1	1	10	50	ライン型	135.8
A-2	1	1	30	30	混合型 + 屋台村型	195.9
A-3	1	1	50	10	屋台村型	156.0
A-4	20	1	10	50	ライン型 + 混合型	1129.29
A-5	20	1	30	30	混合型 + 屋台村型	1187.77
A-6	20	1	50	10	屋台村型	1096.99
A-7	1	100	10	50	ライン型 + 混合型	542.226
A-8	1	100	30	30	混合型 + 屋台村型	575.278
A-9	1	100	50	10	屋台村型	535.587

## (5) 少種多量生産での結果と考察

加工セルの各パラメータセットに対して、表 5.2 に示す結果を得た。

まず、ライン型構造の獲得条件について考察する。

ライン型戦略が完全に支配的であったのは、実験 A-1 の条件だけであるが、実験 A-7 でもライン型戦略を選択しているバレットの比率は高かった。実験 A-4、実験 A-7 では、加工の段取り時間の全所要時間に対する割合が低く、このことからライン型戦略が獲得されにくかったものと予想される。

実験 A-4 では、バレットの移動所要時間が、全所要時間中大きな割合を占めるため、バレットが混雑した場合の影響を大きく受けると考えられる。実際、全所要時間には多くのピークが見られ、混雑の影響を大きく受けていることがわかる。

実験 A-7 では、ほぼ完全にライン型になってから、混合型構造をとるバレットが現れているが、これは、実験 A-1 の条件に比べ、実験 A-7 では加工所要時間が大きいいため、バレットから見て加工細胞が混雑しているためだと思われる。つまり、バレットが加工細胞を訪れた時に、既にその加工細胞が他のバレットによって占有されている可能性が高くなり、加工待ちのバレットにより、加工細胞回りのトラフィックが混雑し、その結果、他の戦略へ移行するバレットが現れたものと考えられる。

このことから、ライン型構造が有利な条件は、ツール交換時間がワーク固定時間に比べて十分大きく、段取り時間が移動時間、加工時間に比べて大きな割合を占めていることであるといえる。

ついで、屋台村型構造について考察する。

屋台村型構造が支配的であったのは、実験 A-3、A-6、A-9 であり、段取り時間の全所要時間に占める割合が減少する実験 A-6、実験 A-9 の環境下でも等しく有効であることが示されている。これは、屋台村型構造が、経路生成の自由度が高いことに由来していると考えられる。すなわち、屋台村型戦略では、加工細胞 1 台のみを経由すればよいことから、本実験の条件では、どの加工細胞を選択しても移動に関しては最短パスをとりうる。したがって、ライン型構造に比べて、各パレットが選択する加工細胞を分散させることが可能であり、このことが屋台村型戦略を有利な戦略たらしめていると考えられる。

したがって、屋台村型構造が有利な条件は、段取り時間において、ワークの固定所要時間が大きな割合を占める場合であると考えることが出来る。

ライン型構造、屋台村型構造のそれぞれ両極端な例以外では、混合型構造と屋台村型、ライン型の複合構造が現れた。図 5.12、図 5.20 では、混合型戦略と屋台村型戦略の 2 つが選択されていることを見た。これらの比率の変化はパレット台数が少ないために階段上の変化をしめしているが、パレット台数が多い状況ではより連続的に推移し、一定値をとりうるものと考えられる。つまり、混合型戦略と他の戦略の複合構造は、学習途中のものというよりも、これら混合型戦略と、他の戦略が一定の比率になることが、効率的な状態であると考えることが出来る。

つまり、既存の FMS などの生産システムが対象としている両極端な戦略の中間とはこのような状態であると考えることが出来る。

#### 5.4.4 中種中量生産の計算機シミュレーション

中種中量生産として、以下のような生産要求を入力として与える。

加工完了にそれぞれ  $T_{pm}$  ステップを要し、それぞれ相異なるツールを必要とする 3

工程からなるタスクを2種類用意し、これを交互に1000個ずつ要求する。

以上の要求を繰り返し、合計200000個の製品を要求する。

以下、ライン型構造、FMS型の構造、屋台村型構造がそれぞれ獲得された、実験B-1、実験B-2、実験B-3について検討する。

#### (1) ライン型構造が獲得された例 (実験 B-1)

$T_{rm} = 1, T_{pm} = 1, T_{rt} = 50, T_{rf} = 10$ 、すなわち、ワークの加工には、それぞれ1ステップを要し、パレットの1マス移動所要時間を1ステップ、ロボットのツール交換所要時間を50ステップ、ワークの固定時間を10ステップとする。

中種中量生産要求のもとでの実働所要時間の変化、ツール交換回数の変化、各構造の割合の変化をそれぞれ図5.22、図5.23、図5.24に示す。また、図5.25に各加工細胞での加工実行回数の分布を示す。

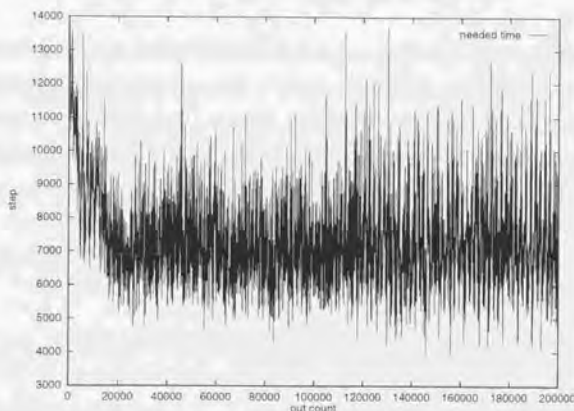


図 5.22: 50 個毎の移動所要時間+加工所要時間 No.B-1

図5.24から、学習の進展にともない、ライン型戦略が優勢になっていることがわか

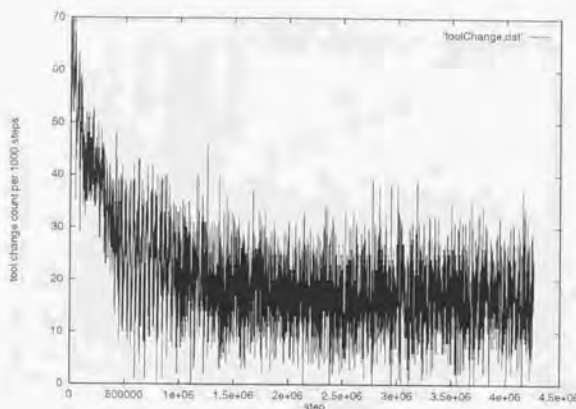


図 5.23: 1000 ステップ毎のツール交換回数 No.B-1

る。図 5.24 では、ライン型戦略の割合がとところどころで大きく落ちこんでいるが、これは 2 種類の製品の切り替わりに対応している。すなわち、2 種類の製品に対してパレットが異なった学習の仕方をしており、それぞれの製品に対して各パレットが獲得している戦略が異なることを意味している。図 5.22 において出庫数が 45000 個あたりの位置にピークが見られるのが図 5.24 でのライン型構造の落ち込みは、ほぼこれに対応している。つまり、パレットの混雑等による移動所要時間が増大して、ライン型構造から混合型へ戦略を切替えるパレットが存在したことを表していると考えることが出来る。

図 5.22 では、学習後、全所要時間が大きく振れている。これは、ライン型構造獲得にあたり、特定の加工細胞に加工タスクが集中し、加工細胞周辺の混雑が増大したためだと考えることができる。

全ワークの平均所要ステップ数は、156.1 ステップであった。

最終 100 個のワークについては、 $line : mix : island = 976 : 20 : 4$  であり、ライン型構造が獲得されている。また、20 万個のワーク加工に対して、全ツール交換

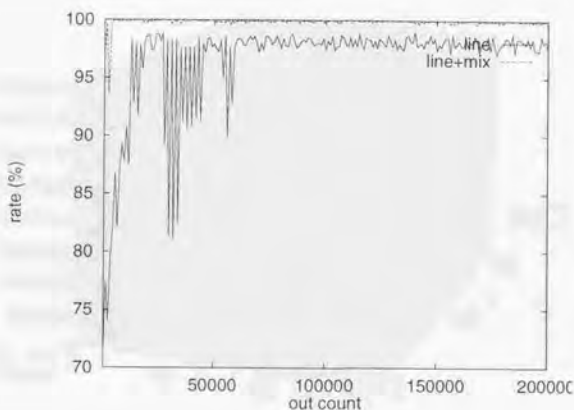


図 5.24: 1000 出庫毎の戦略比率の変化 No.B-1

回数は 87261 回であった。

加工細胞で最も多くの加工タスクを実行したのは、(5,5) の位置にある加工細胞で、3 種類の工程全てを合わせて延べ 152476 工程の加工タスクを実行した。最も加工実行回数が少ない加工細胞は、(15,5) の位置にある加工細胞で、実行回数は 17261 回であった。

加工タスクが特定の加工細胞に集中していることがわかる。図 5.22 におけるふれの理由として加工細胞周辺の混雑を予想したがそれを示唆しているといえる。

## (2) FMS 型構造が獲得された例 (実験 B-2)

$T_{rm} = 1, T_{pm} = 1, T_{rf} = 30, T_{rf} = 10$ 、すなわち、ワークの加工には、それぞれ 1 ステップを要し、パレットの 1 マス移動所要時間を 1 ステップ、ロボットのツール交換所要時間を 30 ステップ、ワークの固定時間を 30 ステップとする。

中種中量生産要求のもとでの実働所要時間の変化、ツール交換回数の変化、各構造

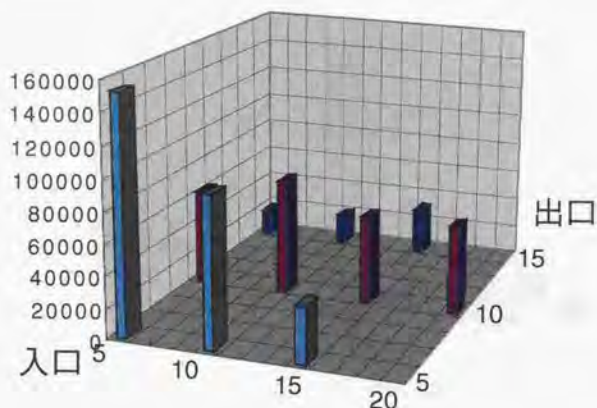


図 5.25: ロボットの全加工実行回数 No.B-1

の割合の変化をそれぞれ図 5.30、図 5.31、図 5.32 に示す。また、図 5.33 に各加工細胞での加工実行回数の分布を示す。

全ワークの平均所要ステップ数は、202.7 ステップであった。

最終 1000 個のワークについては、 $line : mix : island = 72 : 348 : 580$  であり、屋台村型構造が優勢であることがわかる。また、20 万個のワーク加工に対して、全ツール交換回数は 488018 回であった。

図 5.26 では、いくつかのピークが観察され、また、図 5.28 でも、複雑な挙動を示しており、それぞれの戦略の比率が 1000 出庫ごとに振れることから、パレットが 2 種類の製品に対して異なる種類の戦略を採用していることがわかる。

加工細胞で最も多くの加工タスクを実行したのは、(5,5) の位置にある加工細胞で、3 種類の工程全てを合わせて延べ 89618 工程の加工タスクを実行した。最も加工実行回数が少ない加工細胞は、(10,20) の位置にある加工細胞で、実行回数は 27841 回であった。

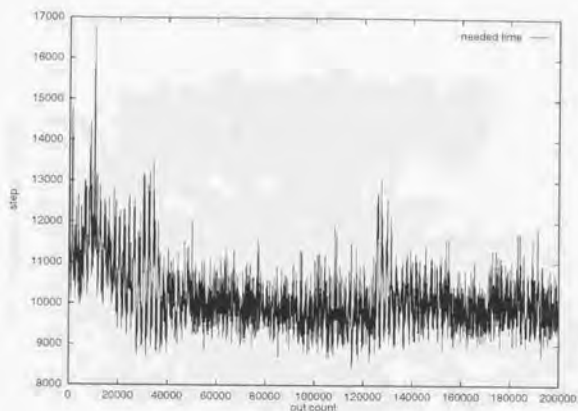


図 5.26: 50 個毎の移動所要時間+加工所要時間 No.B-2

### (3) 屋台村型構造が獲得された例 (実験 B-3)

$T_{rm} = 1, T_{pm} = 1, T_{rt} = 10, T_{rf} = 50$ 、すなわち、ワークの加工には、それぞれ1ステップを要し、パレットの1マス移動所要時間を1ステップ、ロボットのツール交換所要時間を10ステップ、ワークの固定時間を50ステップとする。

中種中量生産要求のもとでの実働所要時間の変化、ツール交換回数の変化、各戦略の割合の変化をそれぞれ図 5.30、図 5.31、図 5.32 に示す。また、図 5.7 に各加工細胞での加工実行回数の分布を示す。

全ワークの平均所要ステップ数は158.6ステップであった。

最終1000個については、 $line : mix : island = 90 : 17 : 893$ であり、屋台村型構造が優勢であることがわかる。また、20万個のワーク加工に対して、全ツール交換回数は556023回であった。

図 5.32 から、学習の進行に伴い、2種類どちらの製品についても完全に屋台村型戦略へと移行していることがわかる。

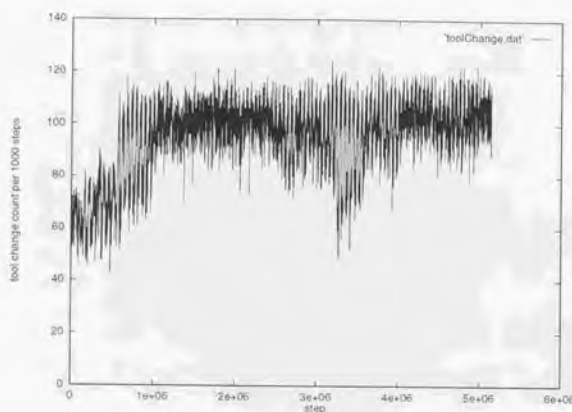


図 5.27: 1000 ステップ毎のツール交換回数 No.B-2

加工細胞で最も多くの加工タスクを実行したのは、(15,10)の位置にある加工細胞で、3種類の工程全てを合わせて延べ85610工程の加工タスクを実行した。最も加工実行回数が少ない加工細胞は、(5,15)の位置にある加工細胞で、実行回数は23113回であった。

#### (4) 中種中量生産の考察

表5.3に、各生産条件での獲得構造を示す。

概ね、少種多量生産の実験結果に準じた結果であり、パレットに搭載した自己組織化アルゴリズムは、パレット台数、即ち一度に実行される加工タスク数に比べてロットサイズが有意に大きい場合は、特に影響を受けることなく学習が可能であり、適切な構造を獲得しているといえる。

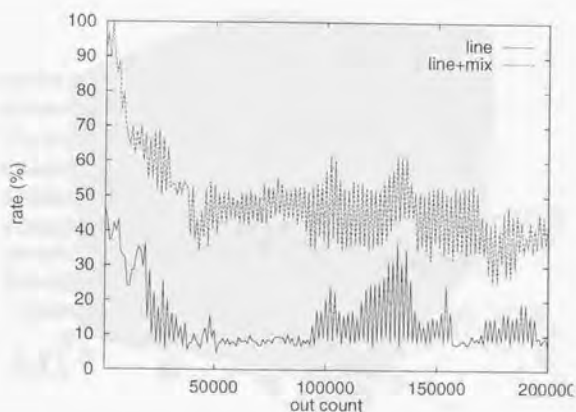


図 5.28: 1000 出庫毎の戦略比率の変化 No.B-2

#### 5.4.5 多種少量生産の計算機シミュレーション

本章では、多種少量生産をロットサイズがパレット数に比較して小さい生産要求、すなわち複数種類製品の混流要求であると考ええる。

このとき、システム内に存在する加工機械数に比べて、必要となるツール種類数が多いか少ないかで生産システムの構造が変化すると予想される。

したがって、以下の2通りの生産要求に対して計算機シミュレーションを行なう。

##### 1. 生産要求 a

加工完了にそれぞれ  $T_{rm}$  ステップを要し、それぞれ相異なるツールを必要とする3工程からなるタスクを2種類用意し、パレットはこれらのタスクから一つランダムに選んで実行し、合計 200000 個の製品を作成する。

##### 2. 生産要求 b

加工完了にそれぞれ  $T_{rm}$  ステップを要し、それぞれ相異なるツールを必要とす

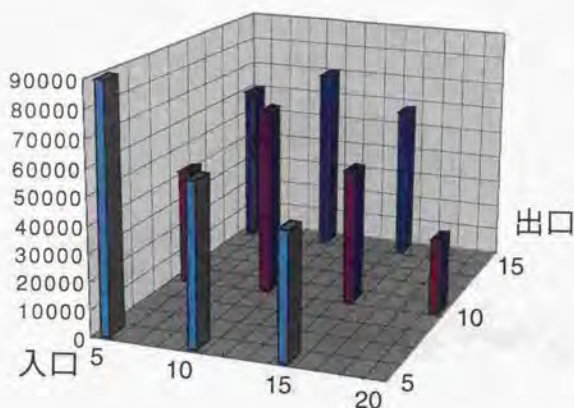


図 5.29: ロボットの全加工実行回数 No.B-2

る3工程からなるタスクを5種類用意し、パレットはこれらのタスクから一つランダムに選んで実行し、合計500000個の製品を作成する。

以下、唯一ライン型構造が獲得された実験C-1について検討する。

#### (1) ライン型構造が獲得された例(実験C-1a)

$T_{rm} = 1, T_{pm} = 1, T_{rt} = 50, T_{rf} = 10$ 、すなわち、ワークの加工には、それぞれ1ステップを要し、パレットの1マス移動所要時間を1ステップ、ロボットのツール交換所要時間を50ステップ、ワークの固定時間を10ステップとする。

生産要求aのもとでの実働所要時間の変化、ツール交換回数の変化、屋台村モードの発生回数をそれぞれ図5.34、図5.35、図5.36に示す。また、図5.37に各加工細胞での加工実行回数の分布を示す。

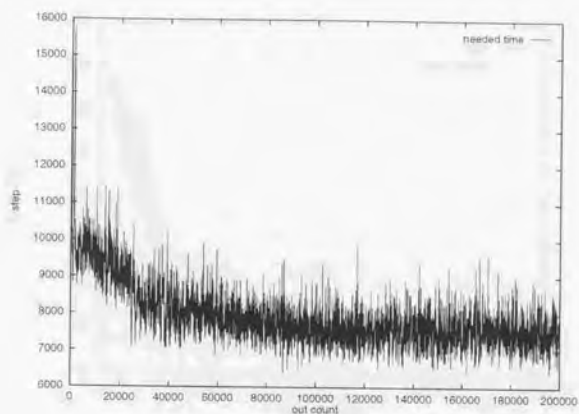


図 5.30: 50 個毎の移動所要時間+加工所要時間 No.B-3

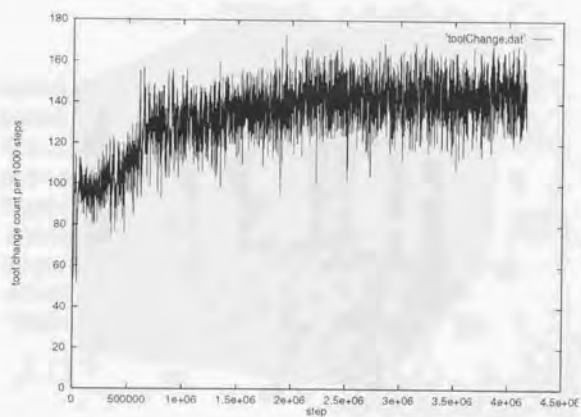


図 5.31: 10000 ステップ毎のツール交換回数 No.B-3

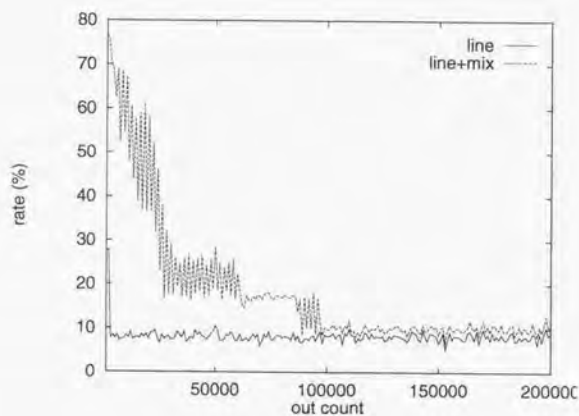


図 5.32: 1000 出庫毎の戦略比率の変化 No.B-3

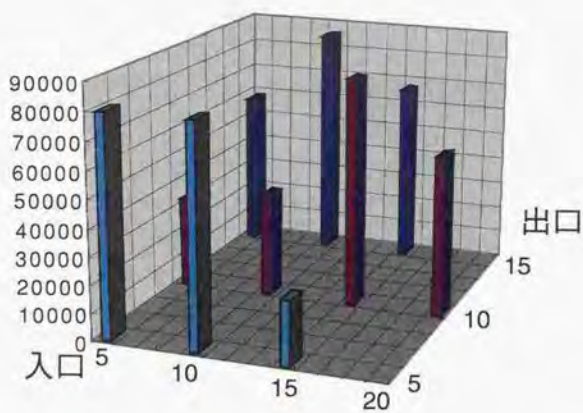


図 5.33: ロボットの全加工実行回数 No.B-3

表 5.3: 中種中量生産での獲得構造

	$T_{pm}$	$T_{rm}$	$T_{rf}$	$T_{rt}$	獲得構造	平均所要ステップ
B-1	1	1	10	50	ライン型	156.1
B-2	1	1	30	30	混合型 + 屋台村型	202.7
B-3	1	1	50	10	屋台村型	158.6
B-4	20	1	10	50	ライン型 + 混合型	1115.0
B-5	20	1	30	30	屋台村型 + 混合型	1187.8
B-6	20	1	50	10	屋台村型	1092.0
B-7	1	100	10	50	ライン型 + 混合型	572.7
B-8	1	100	30	30	屋台村型 + 混合型	574.3
B-9	1	100	50	10	屋台村型	538.1

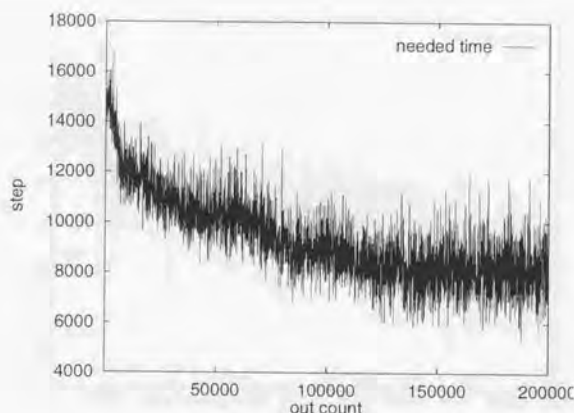


図 5.34: 50 個毎の移動所要時間+加工所要時間 No.C-1a

全ワークの平均所要ステップ数は、187.3 ステップであった。

学習が収束した最終 1000 個については、 $line : mix : island = 928 : 71 : 1$  となった。また、20 万個のワーク加工に対して、全ツール交換回数は 214039 回であった。また、加工工程の特定のロボットに対する顕著な偏在が見られた。図 5.38 に、2 種類の製品をそれぞれ a、b とし、加工工程が各ロボットにどのように偏在して実行されたかを示す。

ロボットは、顕著に 2 つの製品のそれぞれの加工工程に専門化し、システム内に 2 つのライン型構造が形成されているのが確認できる。実験 A-1 で確認された図 5.8、図 5.9 のライン型構造に比べると、各加工工程の加工細胞への割り当ては、かならずしも空間的に最短経路となるように行われていない。これは、システム内に 2 つの製品加工の流れが発生し、それらが相互に干渉したためであると考えられる。

加工細胞で最も多くの加工タスクを実行したのは、(5,5) の位置にある加工細胞で、3 種類の工程全てを合わせて延べ 92720 工程の加工タスクを実行した。最も加工実行回数が少ない加工細胞は、(10,15) の位置にある加工細胞で、実行回数は 43347 回で

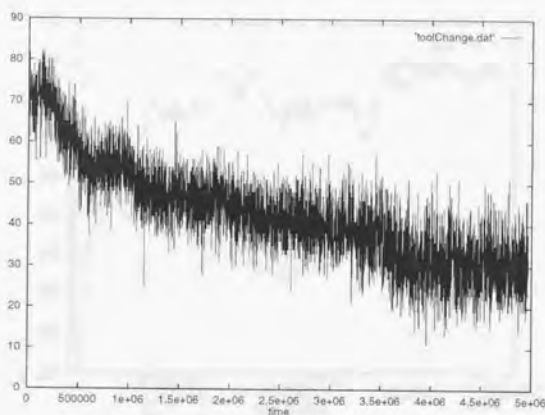


図 5.35: 1000 ステップ毎のツール交換回数 No.C-1a

あった。

## (2) FMS 型構造が獲得された例 (実験 C-1b)

生産要求  $b$  のもとでの実働所要時間の変化、各戦略の比率の変化をそれぞれ図 5.39、図 5.40 に示す。また、図 5.41 に各加工細胞での加工実行回数の分布を示す。

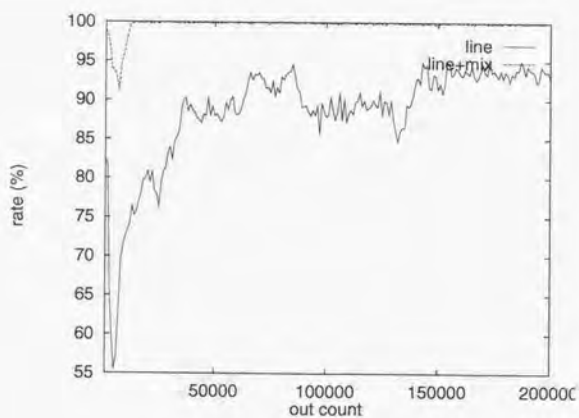


図 5.36: 1000 出庫毎の戦略比率の変化 No.C-1a

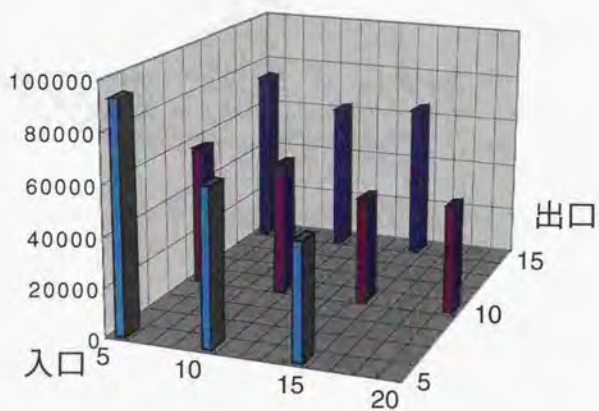
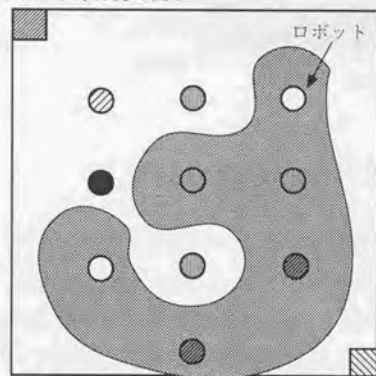


図 5.37: ロボットの全加工実行回数 No.C-1a

入口 原材料受け渡し



出口  
完成品受取

# Remark

- 製品aの第1工程を主に実行
- 製品aの第2工程を主に実行
- 製品aの第3工程を主に実行
- 製品bの第1工程を主に実行
- 製品bの第2工程を主に実行
- 製品bの第3工程を主に実行
- 製品aを主に作成

図 5.38: 作業工程の分布 No.C-1a

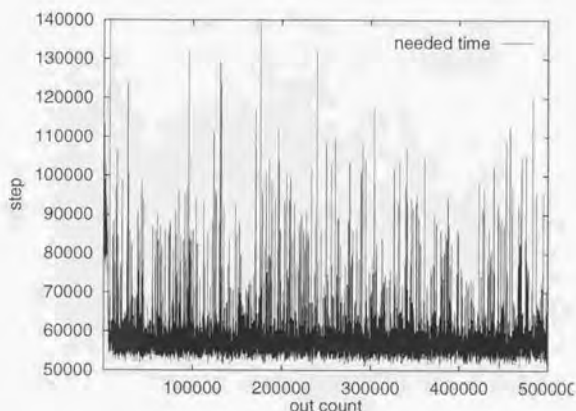


図 5.39: 50 個毎の移動所要時間+加工所要時間 No.C-1b

全ワークの平均所要ステップ数は、116 ステップであった。

最終 1000 個のワークについては、 $line : mix : island = 70 : 356 : 574$  となった。  
また、図 5.40 から、屋台村型戦略と、混合型戦略が一定比率となっていることがわかる。つまり、FMS 型構造が獲得されている。

また、50 万個のワーク加工に対して、全ツール交換回数は 1378981 回であった。

加工細胞で最も多くの加工タスクを実行したのは、(5,15) の位置にある加工細胞で、3 種類の工程全てを合わせて延べ 275532 工程の加工タスクを実行した。最も加工実行回数が少ない加工細胞は、(15,15) の位置にある加工細胞で、実行回数は 67364 回であった。

### (3) 構造の収束しない例 (実験 C-4a)

$T_{rm} = 1, T_{pm} = 20, T_{rt} = 50, T_{rf} = 10$ 、すなわち、ワークの加工には、それぞれ 1 ステップを要し、パレットの 1 マス移動所要時間を 20 ステップ、ロボットのツール

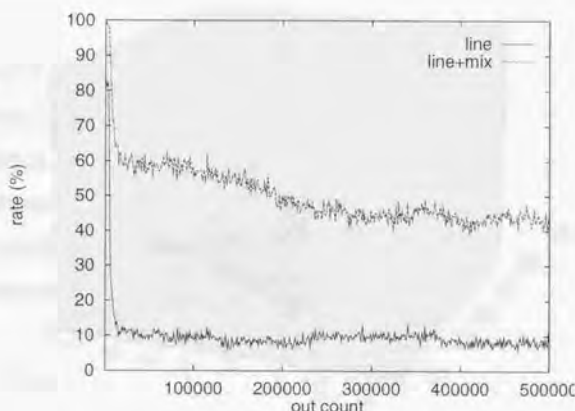


図 5.40: 1000 出庫毎の戦略比率の変化 No.C-1b

交換所要時間を 50 ステップ、ワークの固定時間を 10 ステップとする。

生産要求  $b$  のもとでの実働所要時間の変化、ツール交換回数の変化、各戦略の比率の変化をそれぞれ図 5.42、図 5.43、図 5.44 に示す。なお、図 5.43 では、製品出庫までの時間スケールが大きくなっているためシミュレーション時間 10000 ステップ毎でツール交換回数をカウントしている。

また、図 5.45 に各加工細胞での加工実行回数の分布を示す。

全ワークの平均所要ステップ数は、1154 ステップであった。

最終 1000 個のワークについては、 $line : mix : island = 216 : 580 : 203$  となった。図 5.44 では、各戦略の比率は複雑に推移し、獲得構造は収束していないことがわかる。図 5.42 では、多くのピークが見られるが、これは同実験の条件下では、移動所要時間が大きい、トラフィックが混雑するとその影響が大きく現れるためであると考えられる。間欠的に現れる大きな効率の低下により、獲得戦略の比率が不安定に推移しているものと考えられる。

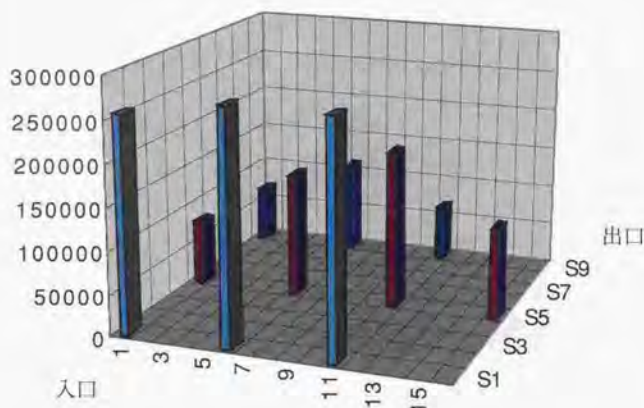


図 5.41: ロボットの全加工実行回数 No.C-1b

また、20 万個のワーク加工に対して、全ツール交換回数は 441918 回であった。加工細胞で最も多くの加工タスクを実行したのは、(5,5) の位置にある加工細胞で、3 種類の工程全てを合わせて延べ 107615 工程の加工タスクを実行した。最も加工実行回数が少ない加工細胞は、(5,15) の位置にある加工細胞で、実行回数は 19373 回であった。

#### (4) 多種少量生産の結果と考察

表 5.4 に生産要求 a のもとでの各条件での獲得構造を示す。

まず、ライン型構造の獲得条件について検討する。

生産要求 a では、1 度に要求される製品は 2 種類であることから、1 度に必要とされる加工ツールは 6 種類であり、これはシステム内に存在するロボット台数よりも少ない。このため、少種多量生産、中種中量生産と同様に、ツール交換時間がワークの固定時間よりも大きい場合には、ライン型構造を形成可能であると予測される。実験

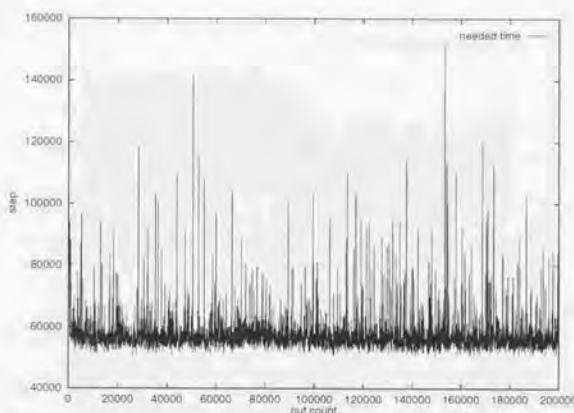


図 5.42: 50 個毎の移動所要時間+加工所要時間 No.C-4a

C-1a では、2つの製品がそれぞれほぼ独立のライン型構造を獲得することが確認されたが、同じくツール交換時間の大きい実験 C-4a、C-7a では、構造の収束を確認することが出来なかった。1つの理由としては、少種多量生産環境の時と同様に、実験 C-4、実験 C-7 では、段取り時間の全加工所要時間に占める割合が減少することが考えられる。さらに、2種類の製品要求が存在することから少種多量生産に比べて、システム内の加工細胞が、装備している加工ツールの種類数が多いことから、加工細胞が特定の加工に専門化した場合、少種多量生産に比べて1加工ツールあたりの加工細胞台数が少なくなる。このため、ライン型戦略では、少ない加工細胞にパレットが集中することから、加工細胞周辺の混雑が増す。実験 C-4a では、パレットの移動所要時間が大きいと、有利であるはずのライン型戦略が維持できなくなっているものと思われる。同様に、実験 C-7a では、加工所要時間が大きいと、加工細胞が仕事をしている割合、即ち稼働率が実験 C-4a に比べて大きく、パレットが加工細胞に到着した時に、加工細胞が他のパレットの加工タスクを実行している可能性が高くなる。すなわち、パレットから見て、見かけ上加工細胞周辺が混雑することが、構造の獲得が

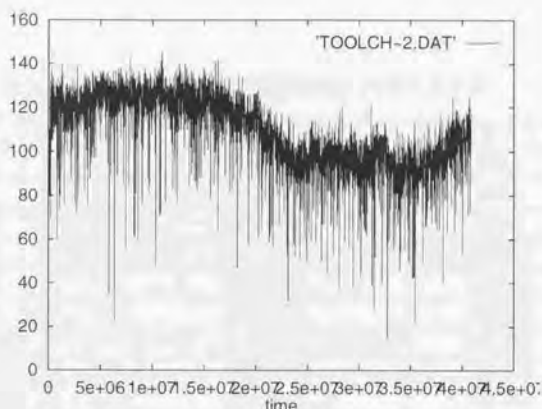


図 5.43: 10000 ステップ毎のツール交換回数 No.C-4a

進みにくかった理由であると考えられる。

ついで、屋台村型構造の獲得条件を検討する。

同生産要求下では、C-1a、C-4a、C-7a 以外の全ての条件で屋台村型構造が獲得された。少種多量生産の結果に比べると、同生産要求下でのほうが屋台村型構造が有効であることを意味しているが、これは、ライン型構造の獲得が困難であったのと同様に、システム内に存在する加工ツール数が多いことから、パレットから見てツール交換をしなければならない確率が上昇したためであると考えてよい。

また、この結果は少種多量生産環境での結果にほぼ準じているといえる。

生産要求 b のもとでの、各生産条件での獲得構造を表 5.5 に示す。

生産要求 b では、1 度に要求される製品の種類は 5 種類であり、1 度に必要とされる加工ツール種類数は 15 種類であり、これはシステム内のロボット台数よりも大きい。このため、ツール交換時間がワーク固定時間に比べて大きくてもライン型構造は有利にならないと予想できる。生産要求 a に比べ、全体的な傾向として屋台村型戦略

表 5.4: 多種少量生産環境での獲得構造 (生産タスク a)

$T_{pm}$	$T_{rm}$	$T_{rf}$	$T_{rt}$	獲得モード	平均所要ステップ
1	1	10	50	ライン型	187.3
1	1	30	30	屋台村型	210.6
1	1	50	10	屋台村型	160.5
20	1	10	50	混合型 + ライン型 + 屋台村型	1153.96
20	1	30	30	屋台村型	1127.66
20	1	50	10	屋台村型	1095.37
1	100	10	50	混合型 + ライン型 + 屋台村型	662.101
1	100	30	30	屋台村型	625.817
1	100	50	10	屋台村型	601.478

表 5.5: 多種少量生産環境での獲得構造 (生産タスク b)

パラメータ	獲得モード	平均所要ステップ
$T_{pm} = 1, T_{rm} = 1, T_{rf} = 10, T_{rt} = 50$	屋台村型 + 混合型	166
$T_{pm} = 1, T_{rm} = 1, T_{rf} = 30, T_{rt} = 30$	屋台村型	224
$T_{pm} = 1, T_{rm} = 1, T_{rf} = 50, T_{rt} = 10$	屋台村型	174
$T_{pm} = 20, T_{rm} = 1, T_{rf} = 10, T_{rt} = 50$	混合型 + 屋台村型	1169
$T_{pm} = 20, T_{rm} = 1, T_{rf} = 30, T_{rt} = 30$	屋台村型	1130
$T_{pm} = 20, T_{rm} = 1, T_{rf} = 50, T_{rt} = 10$	屋台村型	1100
$T_{pm} = 1, T_{rm} = 100, T_{rf} = 10, T_{rt} = 50$	屋台村型 + 混合型	709
$T_{pm} = 1, T_{rm} = 100, T_{rf} = 30, T_{rt} = 30$	屋台村型	672
$T_{pm} = 1, T_{rm} = 100, T_{rf} = 50, T_{rt} = 10$	屋台村型	615

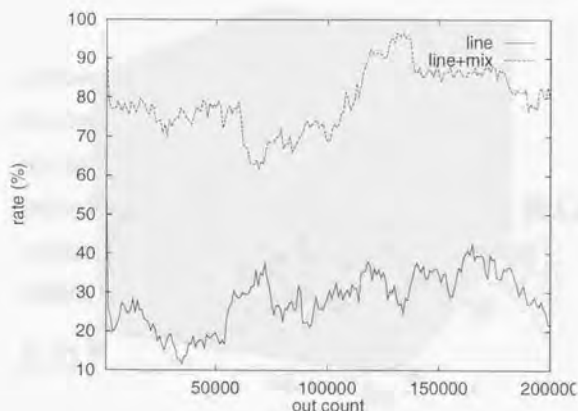


図 5.44: 1000 出庫毎の戦略比率の変化 No.C-4a

の割合が増大していることが観察された。

以上の結果をまとめる。

多種少量生産環境では、生産システム内の加工細胞数が、全製品の加工に必要な加工ツールの種類数よりも大きいとき、かつ段取り時間が全所要時間に対して大きな比率を占め、段取り時間のなかで特にツール交換時間が大きいときには、ライン型構造が有利となる。

屋台村型構造は、以下の条件の時に有利である。

生産システム内の加工細胞数が、全製品の加工に必要な加工ツール数よりも大きい時、かつ段取り時間のうちワーク固定時間の比率がツール交換時間に比べて小さくない時は、屋台村型構造が有利である。

生産システム内の加工細胞数を上回る種類数の加工ツールを必要とする多品種の製品が要求された時は、屋台村型戦略の割合が上昇することから、屋台村型構造が有利であると予測できる。

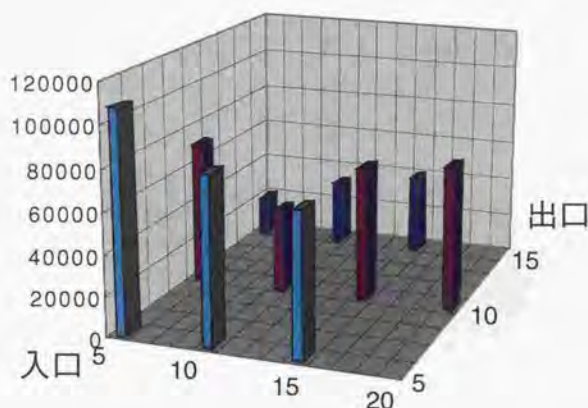


図 5.45: ロボットの全加工実行回数 No.C-4a

#### 5.4.6 変種変量生産の計算機シミュレーション

変種変量生産として、以下の生産タスクを入力とする。

1 ～ 2000 まで、ランダムに変化するロットサイズで、全 5 種類のそれぞれ相異なるツールを使用する 3 工程からなる製品をランダムに、計 500 回要求する。以下、ライン型構造を獲得した実験 D-1、屋台村型構造を獲得した実験 D-3 について検討する。

##### (1) ライン型構造が獲得された例 (実験 D-1)

$T_{rm} = 1, T_{pm} = 1, T_{rt} = 50, T_{rf} = 10$ 、すなわち、ワークの加工には、それぞれ 1 ステップを要し、パレットの 1 マス移動所要時間を 1 ステップ、ロボットのツール交換所要時間を 50 ステップ、ワークの固定時間を 10 ステップとする。

少種多量生産要求のもとでの実働所要時間の変化、各構造の割合の変化をそれぞれ図 5.46、図 5.47 に示す。また、図 5.48 に各加工細胞での加工実行回数の分布を示す。

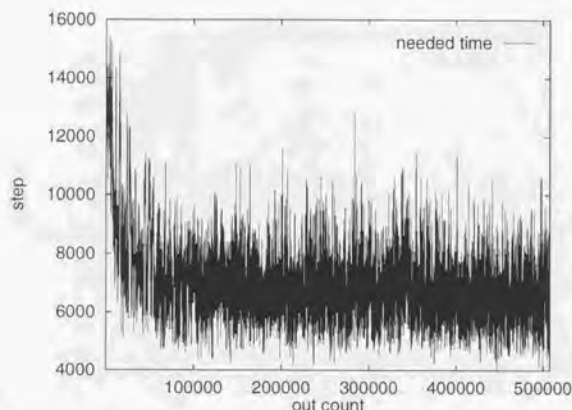


図 5.46: 50 個毎の移動所要時間+加工所要時間 No.D-1

全ワークの平均所要ステップ数は、142 ステップであった。

最終 1000 個については、 $line : mix : island = 970 : 30 : 0$  であった。図 5.46 に、多くのピークが存在するが、全体として所要時間の減少傾向を示しており、図 5.47 では、全体としてライン型戦略が優勢になりつつある傾向が窺える。

加工細胞で最も多くの加工タスクを実行したのは、(5,5) の位置にある加工細胞で、3 種類の工程全てを合わせて延べ 221999 工程の加工タスクを実行した。最も加工実行回数が少ない加工細胞は、(15,5) の位置にある加工細胞で、実行回数は 63845 回であった。

## (2) 屋台村型構造を獲得した例 (実験 D-3)

$T_{rm} = 1, T_{pm} = 1, T_H = 10, T_f = 50$ 、すなわち、ワークの加工には、それぞれ 1 ステップを要し、パレットの 1 マス移動所要時間を 1 ステップ、ロボットのツール交換所要時間を 10 ステップ、ワークの固定時間を 50 ステップとする。

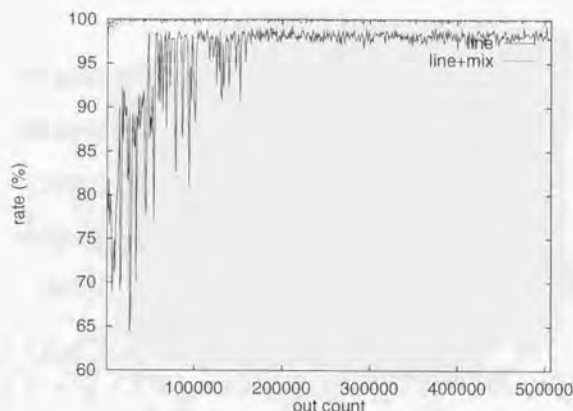


図 5.47: 1000 出庫毎の戦略比率の変化 No.D-1

変種変量生産要求のもとでの実働所要時間の変化、各構造の割合の変化をそれぞれ図 5.62、図 5.63 に示す。また、図 5.51 に各加工細胞での加工実行回数の分布を示す。

全ワークの平均所要ステップ数は、160 ステップであった。

最終 1000 個については、 $line : mix : island = 88 : 21 : 897$  となった。図 5.63 から、屋台村型戦略が獲得されていることが窺える。

加工細胞で最も多くの加工タスクを実行したのは、(5,5) の位置にある加工細胞で、3 種類の工程全てを合わせて延べ 250581 工程の加工タスクを実行した。最も加工実行回数が少ない加工細胞は、(15,5) の位置にある加工細胞で、実行回数は 67431 回であった。

### (3) 変種変量生産の結果と考察

表 5.6 に、各生産条件での獲得構造を示す。

変種変量生産では、ロットサイズに変動がある生産環境での自己組織化を試みた。

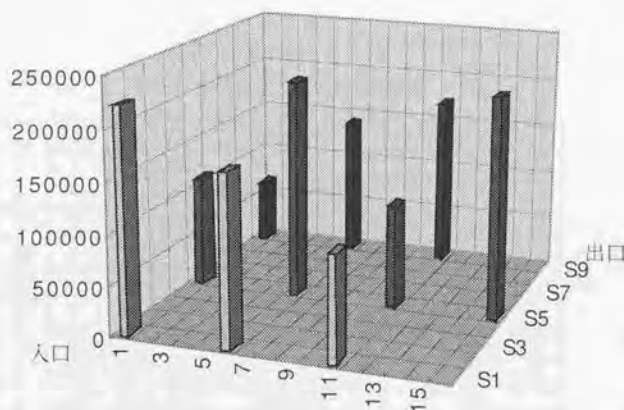


図 5.48: ロボットの全加工実行回数 No.D-1

ロットサイズ、生産品種の変動に伴い、各ワークの所要ステップ数は大きく変動するものの、時間の経過に伴い、少種多量生産環境での結果にほぼ合致する生産システムの構造へと推移している傾向が見てとれる。細胞型生産システムの適応性を示しているものといえる。

#### 5.4.7 考察

##### (1) シミュレーション結果

表 5.7、表 5.8 に、本章の計算機シミュレーションにより獲得された構造をまとめる。

9 種類の生産条件に対して、少種多量生産、中種中量生産、多種少量生産、変種変量生産の 4 種類の生産環境について、細胞型生産システムのシミュレーションを実行し、得られた構造を検討した。

ライン型構造が獲得されたのは、実験 A-1、B-1、実験 C-1a、実験 D-1 の 4 条件の

表 5.6: 変種変量生産での獲得構造

$T_{pm}$	$T_{rm}$	$T_{rf}$	$T_{rt}$	獲得モード	平均所要ステップ
1	1	10	50	ライン型	142
1	1	30	30	混合型 + 屋台村型	196
1	1	50	10	屋台村型	160
20	1	10	50	ライン型 + 混合型	1075
20	1	30	30	混合型 + 屋台村型	1105
20	1	50	10	屋台村型	1101
1	100	10	50	ライン型 + 混合型	555
1	100	30	30	混合型 + 屋台村型	590
1	100	50	10	屋台村型	551

表 5.7: 各条件下での獲得構造 (1)

$T_{pm}$	$T_{rm}$	$T_{rf}$	$T_{rt}$	少種多量生産	中種中量生産
1	1	10	50	ライン型	ライン型
1	1	30	30	屋台村型 + 混合型	混合型 + 屋台村型
1	1	50	10	屋台村型	屋台村型
20	1	10	50	ライン型 + 混合型	ライン型 + 混合型
20	1	30	30	混合型 + 屋台村型	屋台村型 + 混合型
20	1	50	10	屋台村型	屋台村型
1	100	10	50	ライン型 + 混合型	ライン型 + 混合型
1	100	30	30	屋台村型 + 混合型	屋台村型 + 混合型
1	100	50	10	屋台村型	屋台村型

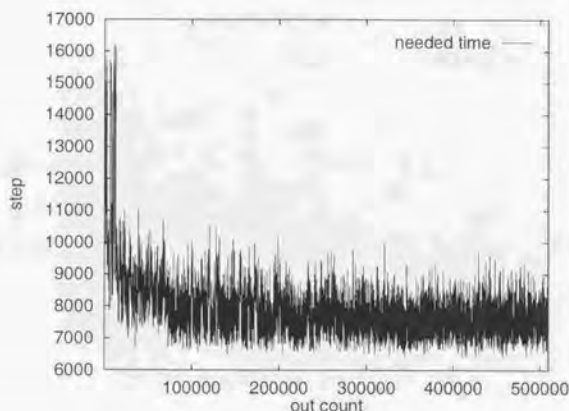


図 5.49: 50 個毎の移動所要時間+加工所要時間 No.D-3

もとであった。

結果、以下のとおり結論づける。

ライン型構造は、ワークの全作業所要時間のうちで、加工細胞のツール交換時間が占める割合が大きい場合に有利な構造となる。中種中量以上のロットサイズでは、ライン型構造での生産が可能であるが、多種少量、すなわち多品種の混流生産要求のもとでは、ライン型構造を維持するのが難しく、屋台村型構造へと移行する。

屋台村型構造が獲得されたのは、実験 A-3、実験 A-6、実験 A-9、実験 B-3、実験 B-6、実験 B-9、実験 C-2a、実験 C-3a、実験 C-5a、実験 C-6a、実験 C-8a、実験 C-9a、実験 C-2b、実験 C-3b、実験 C-5b、実験 C-8b、実験 C-9b、実験 D-3、実験 D-6、実験 D-9 であった。

以下のとおり結論づける。

屋台村型構造は、ワークの全作業時間に占める加工細胞でのワーク固定時間の割合が大きい場合に有利な構造となる。少種多量生産要求から多種少量生産要求へ移行す

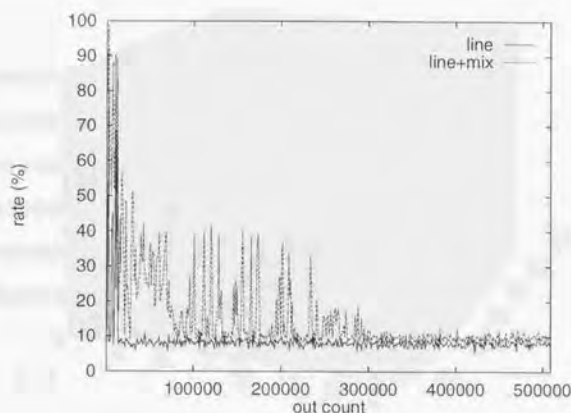


図 5.50: 1000 出庫毎の戦略比率の変化 No.D-3

るにつれ、ワークの全作業時間に占めるワーク固定時間の割合がやや低下しても屋台村型構造が有利となる。

ライン型、屋台村型の両極端な構造が現れる中間的な条件のもとでは、それぞれの戦略と混合戦略からなる FMS 型構造が現れ、それぞれの戦略が一定の比率で安定となるものと予想されるが、本計算機シミュレーションでは、パレット台数が少ないことから、1 台のパレットの戦略変更の影響が大きく、安定な比率を見出すことは出来なかった。

## (2) シミュレーション結果の考察

本章で行なったシミュレーションでは、加工細胞の台数が少ないことから、明確に空間的な構造、たとえば、獲得された種々の全体構造の下では、どの位置の加工細胞に加工タスクが集中するかなどについての明確な傾向を確認することが出来なかった。

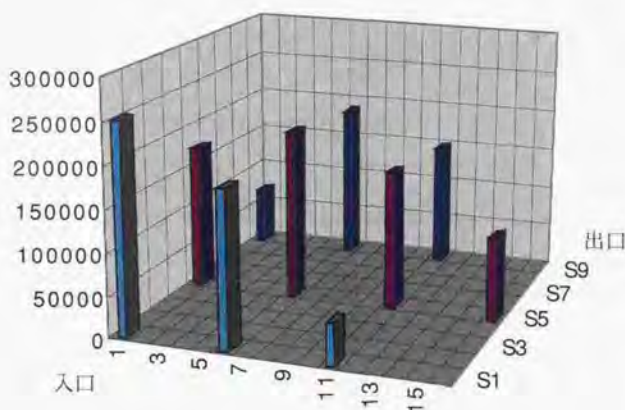


図 5.51: ロボットの全加工実行回数 No.D-3

### (3) GA による計算例

強化学習により獲得された、生産システムの構造が妥当であるかどうかを評価し、比較するために GA を用いて、各ジョブの割り当て計算する。

強化学習を用いた自己組織化シミュレーションでは、混流生産様式となった、多種少量生産環境を除くと、中種中量生産、変種変量生産環境でも、十分時間経過後には、少種多量生産環境にほぼ準ずる構造が獲得された。

GA を用いて、ジョブの種類を 1 種類とした大量生産環境における獲得構造を計算する。生産条件としては、ライン型構造、FMS 型構造、屋台村型構造が、それぞれ獲得された典型例である、実験 A-1、実験 A-2、実験 A-3 を採用する。

表 5.9 に、生産条件を示す。

GA のパラメータは、個体数を 100 として、10 台のバレットが、それぞれ 5 回ずつタスクを実行し、合計 50 個のジョブについての総処理時間の和の逆数を適応度として用いる。交叉率は 0.5、突然変移率は 0.03、として 350 世代計算を行なう。

表 5.8: 各条件下での獲得構造 (2)

$T_{pm}$	$T_{rm}$	$T_{rf}$	$T_{rt}$	多種少量生産 a	多種少量生産 b	変種変量生産
1	1	10	50	ライン型	屋台村型 + 混合型	ライン型
1	1	30	30	屋台村型	屋台村型	混合型 + 屋台村型
1	1	50	10	屋台村型	屋台村型	屋台村型
20	1	10	50	ライン型 + 混合型 + 屋台村型	屋台村型 + 混合型	ライン型 + 混合型
20	1	30	30	屋台村型	屋台村型	混合型 + 屋台村型
20	1	50	10	屋台村型	屋台村型	屋台村型
1	100	10	50	ライン型 + 混合型 + 屋台村型	屋台村型 + 混合型	ライン型 + 混合型
1	100	30	30	屋台村型	屋台村型	混合型 + 屋台村型
1	100	50	10	屋台村型	屋台村型	屋台村型

表 5.9: GA による獲得構造

実験番号	$T_{pm}$	$T_{rm}$	$T_{rf}$	$T_{rt}$
GA-1	1	1	50	10
GA-2	1	1	30	30
GA-3	1	1	10	50

表 5.10: GA による獲得構造

実験番号	line:mix:island	50 個出庫所要時間	獲得構造
GA-1	5:4:1	8757	ライン型 + 混合型 + 屋台村型
GA-2	0:5:5	9294	屋台村型 + 混合型
GA-3	2:8:0	7270	ライン型 + 混合型

図 5.52、図 5.53、図 5.54に、それぞれ実験 A-1、実験 A-2、実験 A-3 と同一条件での計算結果を示す。これらの図では、横軸が世代数、縦軸が、50 個のジョブの総処理時間の和である。

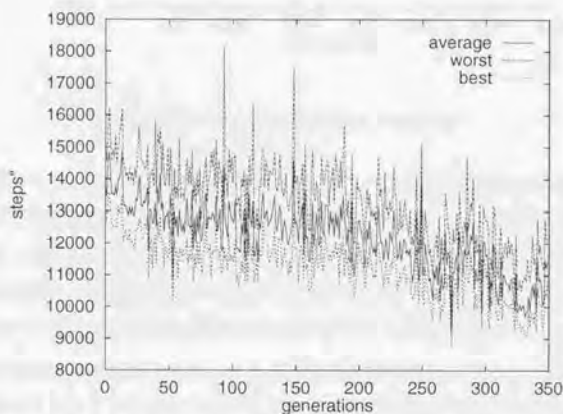


図 5.52: GA による構造獲得 No.GA-1

獲得された構造は、それぞれのようになった。表 5.10に、350 世代までに獲得された最良構造を示す。また、表 5.11に、ほぼ該当する条件での強化学習による獲得構造を示す。

強化学習を用いた手法の方がより良い成績を獲得していることがみてとれる。

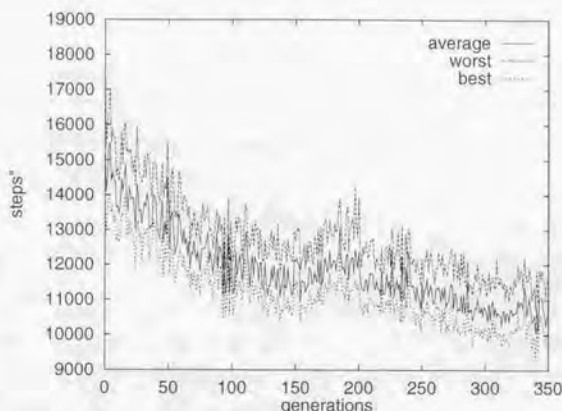


図 5.53: GA による構造獲得 No.GA-2

また、GA を用いた計算例と強化学習では、実験 GA-1 と実験 A-1、実験 GA-3 と実験 A-3 で、獲得構造が異なることがわかる。実験 GA-1 は、十分に収束していないといえるが、実験 GA-3 は、ほぼ収束しており、かつ強化学習により得られた構造と異なる構造を獲得している。これは、GA を用いた計算手法と、強化学習を用いた計算手法でのシミュレータの動作が違うことによるものと考えられる。

強化学習方式では、バレットは、それぞれ独立に学習することから、成績の良いバレットは他のバレットよりも多くのジョブをこなすのに対し、GA を用いた計算

表 5.11: 強化学習による獲得構造

実験番号	line:mix:island	50 個出庫所要時間	獲得構造
A-1	982:18:0	5000 ~ 7500	ライン型
A-2	94:188:718	8500 ~ 10500	屋台村型 + 混合型
A-3	84:21:895	6500 ~ 8000	屋台村型

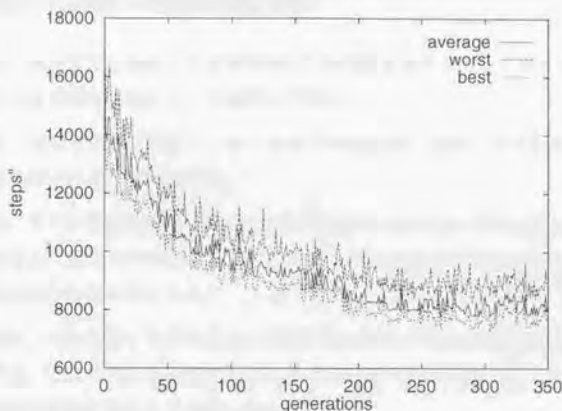


図 5.54: GA による構造獲得 No.GA-3

では、各バレットの間の仕事量に差がないからであり、このことが獲得された構造の差に繋がったものであると考えられる。

GA を用いた計算例では、解がほぼ収束していると判断できるのは、実験 GA-3 だけである。GA での解の収束は、交叉率や、コーディング手法などに敏感であり、また数千世代以上にわたって計算を実行するのが普通であることから、この例のみをもって、GA での計算能力を評価することはできないが、本計算例では、350 世代まで計算を行っており、1 世代 100 個体で、1 個体が 50 個のジョブ出庫のシミュレーションに対応することから、この計算例では、5017500 個（強化学習では、1 ジョブあたり 100000 回の試行）のジョブを処理するのに相当する計算機シミュレーションを行っている。計算量的に GA を用いるのが必ずしも適当ではないことがうかがえる。

#### (4) 生産システム設計への適用可能性の検討

本章では、様々な生産条件と生産環境のもとでの計算機シミュレーションを通して、生産システムの適切な構造について検討してきた。

以下では、本章での計算機シミュレーションの結果が、生産システムの設計にどのような適用可能であるかを検討する。

本章では、ライン型構造、および屋台村型構造のそれぞれがどのような生産要求、生産条件のもとで有利であるかを検討し、ライン型構造および屋台村型構造がそれぞれ有利となる条件を明らかにした。

この結果は、生産条件、すなわち加工機械の能力および搬送の能力が既知である生産システムで、与えられた生産要求に対してどのようなスケジューリングの戦略が有効であるかの決定に寄与すると考えられる。

実験 A-1 など、ライン型構造が獲得されたケースでは、以下の知見を設計にフィードバックすることが可能である。

このとき図 5.8 のように、入口方向から出口方向への経路上に加工工程の順番で加工セルに工具を分配する構造が有効である。

これは、直観的に自明な結論であるが、細胞型生産システムのモデルを用いた計算機シミュレーションから、この結論が得られたことから、分岐や合流などを含む複雑な加工プロセスを持つ製品の生産システムの設計に対しても、同様に寄与しうると期待できる。

また、本章で行なった計算機シミュレーションでは、加工細胞の配置は固定であったが、加工細胞の配置問題にも細胞型生産システムのシミュレーションは使用可能であると考えられる。即ち、シミュレーションを通して、各加工細胞での加工タスク実行頻度を調べることで、不適切な位置に配置されている加工細胞を発見することが可能である。

例えば、実験 A-1 では、(15,5) に存在する加工細胞の実行加工回数が少ないことがわかる。本シミュレーションでは、加工細胞の台数が少ないこと、およびパレットが相互に移動干渉することから幾何的に、どの位置の加工細胞が実行加工回数が少

ないかを明確にすることが出来なかったが、加工細胞数を増やすことで、加工細胞の最適配置問題についての知見を得ることが可能となると考えられる。

## 5.5 実際の生産システムへの適用

本節では、細胞型生産システムのモデルを実際の実生産システムに適用し、細胞型生産システムのシミュレーションモデルの妥当性を検証する。また、細胞型生産システムのシミュレーションを用いることで、生産システムの改良設計支援を行ない、細胞型生産システムの実生産システムの設計ツールとしての有効性を検討する。

適用対象としては、以下の条件を満たすものを選定する必要がある。

- 複数工程を含むジョブから構成されること。
- 設備数、工程数が、計算機シミュレーション実行可能な程度に小さいこと
- ライン型、屋台村型、混合型等の分岐条件が確認される程度の工程数、設備数、ジョブ種類数を持つこと

以上の条件を満たす適用対象として、パソコンや、ワークステーション用のハードディスクの書き込み工程を採用する。

ハードディスクの書き込み工程は、工程数が少なく、システム内の設備数も小さいながら、様々な品目のハードディスクを対象とした多種生産工程であり、受注生産である場合は、その生産要求は、多種少量、多種中量生産へと移行することから、複数種類の生産システムの構造を確認することが可能であると考えられる。

以下、ハードディスク書き込み工程の詳細について説明する。

### 5.5.1 ハードディスク書き込み工程

ハードディスク書き込み工程とは、種々のハードディスクメーカーから納品されたハードディスクを、それぞれの使用目的に応じて、フォーマットし、ディスクサイズや、クラスタサイズなどの調整を行なう工程であり、以下の工程からなる。

- ダウンロード（以下DLと略記）

ハードディスクのハードウェアを制御するためのプログラムをハードディスク内に書き込む工程である。

表 5.12: 各機械の処理能力

機種	バッチサイズ	所要時間
DL 専用機	8	15
FMT・DL 兼用機	6	20
ON 検機	8	1200
監査機 (人)	16	5

- フォーマット (以下 FMT と略記)

ハードディスクの物理フォーマットを行なう。

- リード・ライト試験 (以下 ON 検と表記)

フォーマット済みのハードディスクに対して、リード・ライト試験を行なう。

- 外観検査

外観を検査し、検査完了、製品出庫を記帳する。

以下、現在稼働中の工場を細胞型生産システムとしてモデル化し、計算機シミュレーションにより、適切な生産システムの構造を検討し、稼働中の生産システムと比較し評価を行なう。

### 5.5.2 HDD 書き込み工場

モデリングの対象とした工場は、月産 2000 ～ 3000 個、製品種類数 45 種類の受注生産形態の工場である。工場フロアは、2 人の作業用人員が配置され、ダウンロード専用機が 2 台、フォーマット・ダウンロード兼用機が 4 台、リード・ライト試験専用機が 16 台、監査用機械が 1 台で構成されている (5.56 参照)。各機械は、一度に複数個のワークを扱うことが可能である。各機械の処理能力、および所要時間を表 5.12 に示す。

図 5.56 に、同工場の機械配置を示す。



図 5.55: 対象製品

フロアは、3 種類の出荷先に対応して 3 本の生産ラインとして構成されており、荷物の搬送は、専用台車を用いて人力で行なう。

製品のロットサイズは、最小 1 個からの多種少量生産であり、同工場では、最大ロットサイズを 16 個としてのロット生産方式（間欠生産）を採用している。

### 5.5.3 HDD 書き込みラインの計算機モデル

対象工場は 16 個の製品ロットを基準として運用されていることから、1 ロットを 1 ジョブとしてモデルを作成する。ロットサイズ 16 個を基準とすると、同フロアに存在する機械は、表 5.12 に示した処理能力から DL 専用機、FMT・DL 兼用機、監査用機械がそれぞれ 1 台、ON 検機が 16 台の計 19 台の機械が存在する。これらが出荷先別に 3 グループに分けられていることから、1 出荷先ごとの機械数を 6 台としてモデル化する。また、生産システムの構造を検討する見地から、各機械は、万能機械であると仮定し、前節で述べた自己組織化シミュレーションを行ない、どのような生産構造が適しているかを検討するものとする。

各工程での作業時間を表 5.13 に示す。このときシステム全体を図 5.57 に示すように

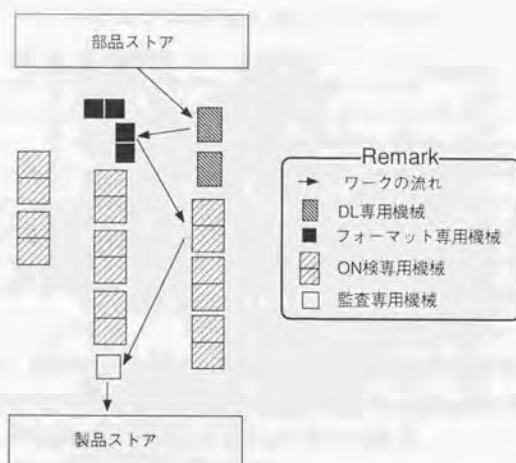


図 5.56: HDD 書き込み工場レイアウト

構成する。

製品種類は 45 種類に登るが、基本的には全ての製品について、取り付け具は同一であり、加工システムとは異なり、ツール等の交換時間は存在しない。しかし、製品に応じて機械操作員がそれぞれの製品に応じたパラメータを各機械に入力しなければならないため、機械の起動毎に必ず一定の時間を必要とする。したがって、段取り時間は、素材の機械への取り付け、および取り外し時間と、機械の操作パラメータ入力時間の和と考えられる。これらの時間は、製品の種類を問わず一定であるので（正確には、ロットサイズによって素材の取り付け、取り外し時間が変動する）、素材取り付け、取り外し所要時間を 8 ステップ、機械操作時間を 1 ステップとして、連続して 100000 ロットの生産を行なわせ、獲得構造について検討を加える。なお、同生産システムは、多種類の製品を作成しているが、どの種類の製品も段取り時間、作業時間が等しいので、多種類の製品を単一製品として扱ってシミュレーションを行なう。

表 5.13: HDD 書き込み工程の所要時間

工程順序	工程内容	所要時間 (分)
1	ダウンロード	15
2	フォーマット	20
3	ON 検	1200
4	監査	5
ジョブ固定時間	ワークの取り付け、取り外し	8
ツール交換時間	機械のパラメータ設定	1
搬送時間	搬送、開梱	30

表 5.13 から、素材の搬入から出庫までの全所要時間は、およそ 30 分である。各パレットの移動時間がおおよそ同程度のオーダーになるように、図 5.57 に示すように機械を配置し、1 マス移動の所要時間を 1 分としてモデル化する。

なお、機械の加工能力に比べて多量のパレットを投入することは、いわゆる仕掛かり在庫の増大、工程間停滞の増大に繋がり、これらのパレットにより生産システム内の物流が妨げられ、システム全体の効率の低下を来す。本事例では、工程 3 が極めて大きな所要時間を持ち、全所要時間に対する素材の移動時間は極めて小さいことから、機械台数に比べて大きな台数のパレットを投入することに意味はない。以上から、パレット台数は 6 台とする。

図 5.58、図 5.59 に、所要時間の変化、各構造の割合の変化をそれぞれ示す。図 5.58 において、line、mix1、mix2 は以下の意味である。

- line

4 工程全てについて、一度も連続して同一機械で工程を実行しない割合

- mix1

4 工程について、一つの加工細胞で連続して 2 つの工程を実行した割合

- mix2

4 工程について、一つの加工細胞で連続して 3 つの工程を実行した割合

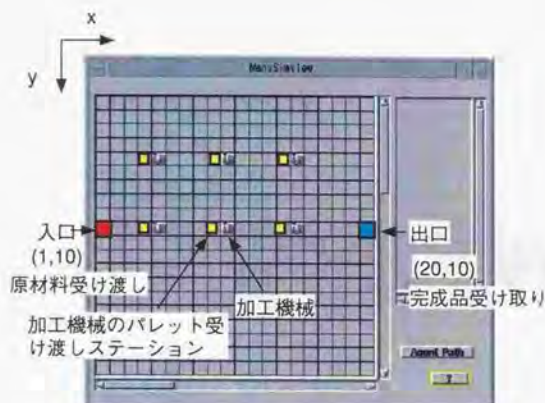


図 5.57: HDD 書き込み工場の細胞型生産システムモデル

したがって、図 5.58において、実線の下側が、ライン型構造の割合を、一番上側の領域が屋台村型構造の割合をそれぞれ表している。

図 5.59から、屋台村型構造が優勢であることがわかる。6 台のパレットについて各パレットの獲得パスは、図 5.60に示すようになった。

なお、100000 個出庫には、30034357 ステップを要した。

6 台中、5 台のパレットが屋台村型戦略をとり、相互に干渉しないように異なる加工細胞を用いていることがわかる。1 台のパレットは、混合型戦略をとり、他のパレットと共通する加工細胞を選択している。本条件では、第 3 工程が、全所要時間中極めて大きく、パレットから見て、第 3 工程を実行する加工細胞が他のパレットによって既に占有されている場合は、大きな待ち時間が発生する。このことから、少なくとも第 3 工程は、他のパレットと異なる加工細胞を選択することが有利である。パレット 1 台が、屋台村型戦略ではなく、混合型戦略をとっているのは、強化学習による自己組織化が本質的に確率的探索手法であり、かならず 10% との確率で各パレットがランダムに巡回順序を決定することが影響しているものと考えられる。

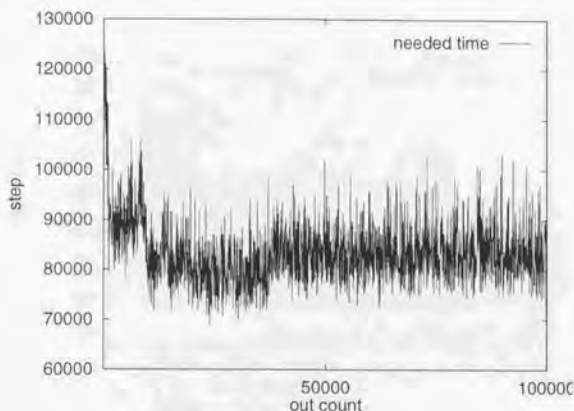


図 5.58: 50 個毎の移動所要時間+加工所要時間

細胞型生産システムの計算機シミュレーションの結果、同工程は、屋台村型構造として運用するのが適しているとの結論が出たが、これは図 5.56 に示した同工場の現在の配置と異なる。この差異は、以上の計算機シミュレーションモデルが均質な能力を持つ万能加工細胞から構成されていたことによる。全作業時間 1240 分のうち、第 3 工程が 1200 分と極めて大きな割合をしめることから、6 台全ての機械で第 3 工程を実行する方が、6 台のうち一部の機械を他の工程を専門に実行する機械とするよりも明らかに有利であるからである。

そこで、以下、加工細胞にある特定の加工工程、ここでは第 3 工程に対して特に処理能力の高い特殊化された機械（つまり専門機械にほぼ相当）を導入することを検討する。

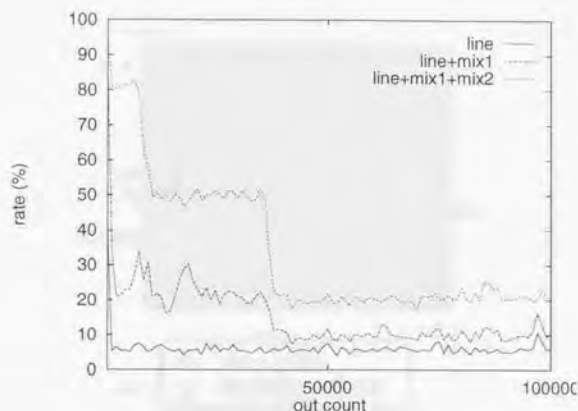


図 5.59: 1000 出庫毎の戦略比率の変化

#### 5.5.4 本システムの改善事例

本生産システムの生産能力の向上を例として改善設計支援を行なう。本生産システムの生産能力を向上するためには、下記の方法が考えられる。

##### 1. 機械能力の向上

生産システムを構成する各機械の能力を向上させることにより、生産能力の向上をはかる。具体的には、各機械における同時加工可能な部品数の増大をはかる、すなわちロットサイズの増大をはかることが考えられる。

##### 2. 機械台数の増大

機械台数を増大させることで、生産能力の向上をはかる。最も単純な方法であるが、機械の運転用員、設置スペースの確保、および新規に機械を追加導入するコストなどの課題が発生する。

##### 3. 機械編成の変更

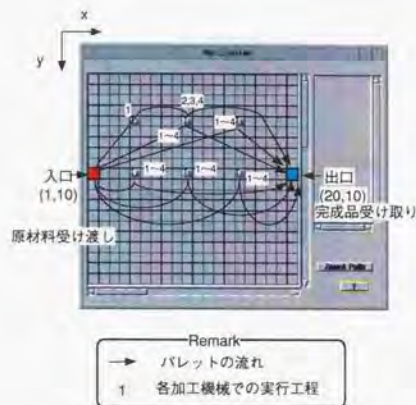


図 5.60: バレットの獲得パス

一般に、万能機械は、専用機械に比べて単一種類あたりの加工コストで劣る。特定の機械について、特定の工程処理能力を増大させることで、生産能力の増大をはかることが可能となる。

ロットサイズ増大による機能向上は、ロットを一まとまりとして扱う本シミュレーションでは、先のシミュレーション結果と基本的に相違はない。以下、機械台数の増大、および機械編成の変更をシミュレートし、どの程度の生産能力の向上が可能かを検討する。

#### (1) 機械台数増大による生産能力向

図 5.61 に示すように、汎用機械 3 台を加えて 9 台とし、10 台のバレットを投入して 200000 個、生産を実施する。

図 5.58、図 5.59 に、所要時間の変化、各構造の割合の変化をそれぞれ示す。

100000 個出庫には、20983552 ステップを要した。

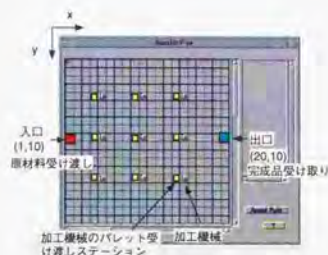


図 5.61: 機械台数増大による生産能力向上

## (2) 機械編成の変更による生産能力向上

HDD 書き込み工程で、最も大きな作業時間を占めているのは、第3工程である。図 5.64 に示すように、6 台の機械中、2 台の機械の第3工程の作業能力を増大させる、すなわち、汎用機械から専用機械化させることで、生産能力の向上をはかる。

図 5.65、図 5.66、図 5.67、図 5.68、図 5.69、図 5.70 に、該当機械の第3工程処理能力をそれぞれ 1.1 倍、10 倍、100 倍に変化させたときの、所要時間の変化と、生産システムの構造の変化を示す。

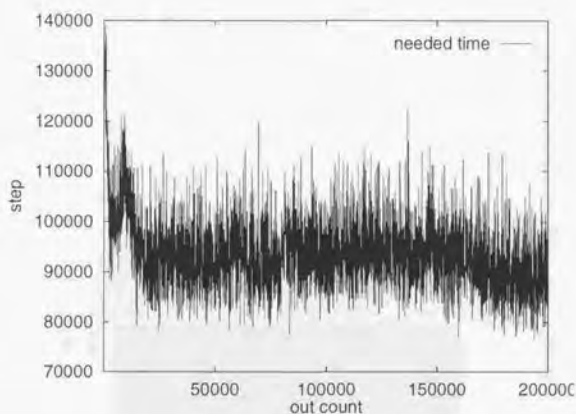


図 5.62: 50 個毎の移動所要時間+加工所要時間 (機械台数増) No.H-2

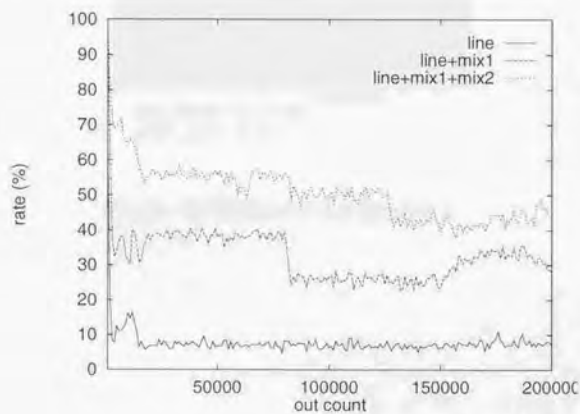


図 5.63: 1000 出庫毎の戦略比率の変化 (機械台数増) No.H-2

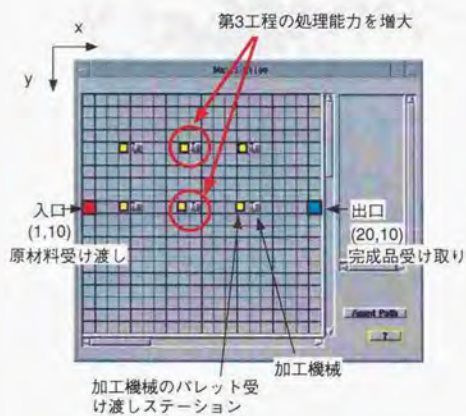


図 5.64: 専門機械化による生産能力向上

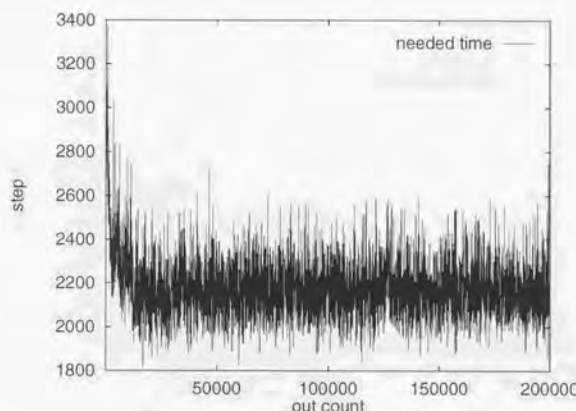


図 5.65: 50 個毎の移動所要時間+加工所要時間 (1.1 倍の能力向上) No.H-3

### (3) 改善手法の比較

表 5.14 に、改善手法の結果を示す。なお表中、混合型 (2 工程) との記述は、4 工程のうち 2 工程を連続して同一の加工細胞で実行する戦略を意味するものとする。

加工細胞数を増やすと、システム全体としての生産能力が向上している。本実験で、

表 5.14: 改善手法の比較

改善手法	平均所要時間	10 万個出庫所要時間	主要な獲得戦略
改善前	1770	30034857	屋台村型
加工細胞数増	1874	20983552	屋台村型
工程 3 処理能力 1.1 倍	2180	25044222	屋台村型
工程 3 処理能力 10 倍	663	8506250	混合型 (2 工程)
工程 3 処理能力 100 倍	397	5378976	混合型 (3 工程)

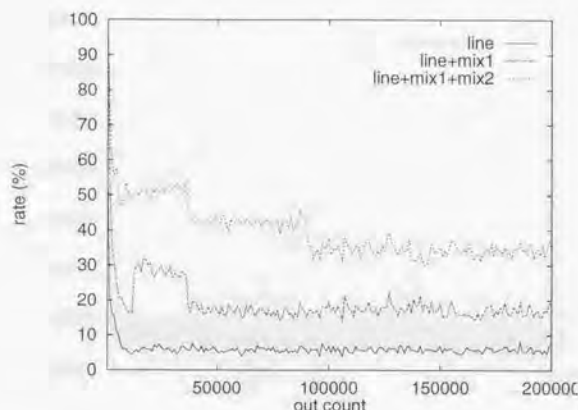


図 5.66: 1000 出庫毎の戦略比率の変化 (1.1 倍の能力向上) No.H-3

1 ジョブあたりの平均所要時間が、加工細胞数を増やした場合のほうがより大きいのは、加工細胞数 9 台に対して、パレットを 10 台投入しているためである。すなわち、各パレットの待ち時間がより増えた結果である。

次いで、一部の加工細胞の処理能力を向上させた場合について検討する。第 3 工程の加工能力が、1.1 倍と極めてわずかに増大した場合、屋台村型戦略の割合が依然として大きく、生産システムの構造変更にあまり大きな影響を与えていない。しかし、処理能力を 10 倍に向上させると、他の実験例に比べて明らかに混合型 (2 工程) 戦略の割合が増大しており、また、100 倍に向上させると、混合型 (3 工程) 戦略の割合が増大している。つまり、これらのケースでは、第 3 工程の処理能力が向上した加工細胞に、第 3 工程処理が集中し、その結果、屋台村型戦略が排除されたとみることが出来る。

10 万個出庫所要時間も、第 3 工程処理能力を 10 倍、100 倍に強化したものの成績が有意に勝っている。この結果は、同生産タスクのように工程中に顕著なボトルネックとなる工程が存在する場合は、その工程の処理能力を高めた専門化機械を導入する

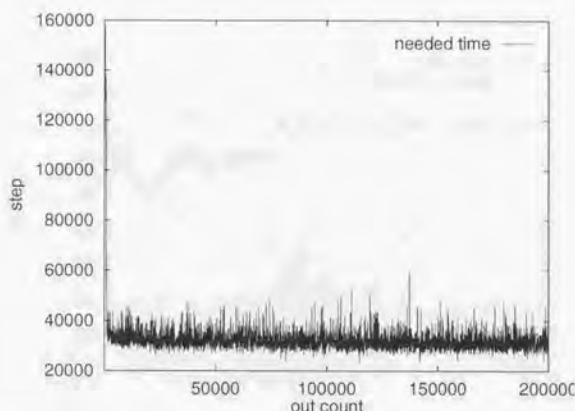


図 5.67: 50 個毎の移動所要時間+加工所要時間 (10 倍の能力向上) No.H-4

ことで、生産能力を効果的に向上させうることを示唆している。

本節で対象とした HDD 書き込み工場は、実際には、図 5.56 に示したようにボトルネックとなる工程 3 に専門化した加工機械が最も多く、第 1 工程や第 2 工程については、共用機械を設けることで、工程 3 を処理する加工機械の割合を最も高めた構成となっているが、本項での計算結果は、この事実と一致しているといえる。

#### 5.5.5 考察

本節では、実際の生産システムの適用例として、ハードディスク装置の書き込み工程を対象としてとりあげ、細胞型生産システムの自己組織化シミュレーションにより、該当工場の適切な構造の検討を行ない、さらに生産能力を向上させるためには、どのような方策が効果的であるかを検討した。

##### ● HDD 書き込み工程の構造

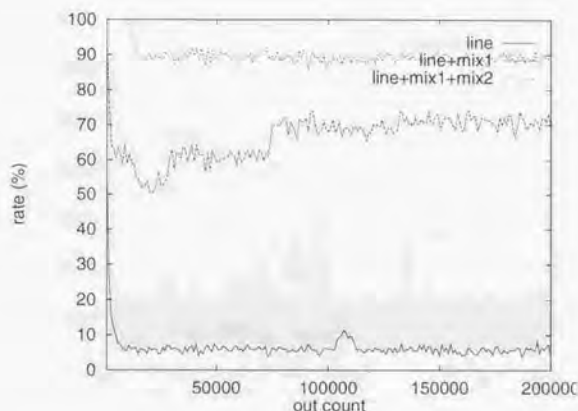


図 5.68: 1000 出庫毎の戦略比率の変化 (10 倍の能力向上) No.H-4

計算機シミュレーションでは、HDD 書き込み工程では、屋台村型構造が有利であるとの結果を得た。これは、実際の該工場の結果とは異なるが、この差異は、実際の工場が専門機械により構成されているのに対し、細胞型生産システムの計算機モデルでは、全ての機械が、全く同一の能力を持つ万能機械として構成されているためであり、ボトルネックとなる工程について、高い処理能力を持つ、いわば専門化加工細胞を導入した計算機結果は、実際の HDD 書き込み工程の構成が有利となる条件が存在することを示しており、本章で構築した細胞型生産システムの自己組織化シミュレーションの適用可能性を示している。

- 設計ツールとしての有用性

本節では、均質な汎用万能機械から構成される場合には、屋台村型構造の生産システムが有効であることをまず示した。ついで、生産能力を向上させるための手法として、汎用万能機械の台数を増やすこと、および、ボトルネックとなっている加工工程の処理能力を高めた専門化機械を導入することの 2 案について、比較検討を行なった。実際にどの案を採用するかは、細胞型生産システムのシ

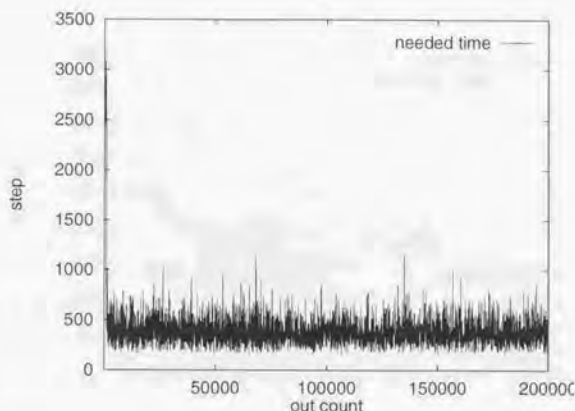


図 5.69: 1 ジョブあたりの平均所要時間 (100 倍の能力向上) No.H-5

ミュレータを用いた計算結果と、それらの案を採用するのに要するコストなどの他の要求とを複合して決定されることになるが、本シミュレーションを用いることで、具体的にどの程度の加工能力向上や、加工細胞数増がどの程度、生産能力を向上させるうるかを評価することが可能である。以上の点から細胞型生産システムのシミュレータは生産システムの設計ツールとして、有用であると考えられる。

本計算例では、ボトルネックとなる工程が明らかであったが、複雑な条件が絡む一般の生産システムでは、このようなボトルネック工程を見出すことが一つの目標となる。また、本計算例では、生産システムに投入するパレットの台数についての検討をおこなっていないが、生産システムに投入するパレット台数は、生産システムの能力を十分に見積もった上で決定することが必要であり、システム全体の処理能力以上のパレットを投入すると、生産システム内での仕掛かり在庫の増大に繋がり、これらが生産システムの運用効率を低下させる。また逆に、生産システムの能力に比べて少ないパレットを投入した場合には、

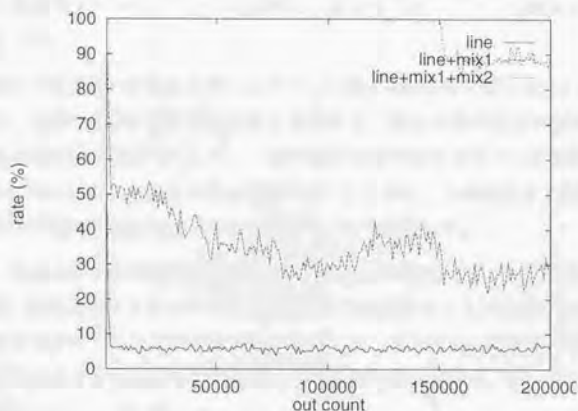


図 5.70: 1000 出庫毎の戦略比率の変化 (100 倍の能力向上) No.H-5

生産システムの稼働率を十分に向上させることができない。

つまり、投入するパレット台数の決定問題は、重要であり、細胞型生産システムにおいて、投入する適性パレット台数を決定する手法を検討する必要がある。

## 5.6 第 5 章のまとめ

本章では、細胞型生産システムのモデルを作成し、様々な環境、生産要求のもとでの計算機シミュレーションを通して、それらの条件のなかではどのような生産システムの構造が有効であるかを検討した。

その結果、構築した細胞型生産システムは、生産要求の変化に適切に対応し、自己組織化を通じて適切な全体構造を獲得しうることを示した。

さらに、シミュレーションの結果、得られた全体構造の、一般的な生産システムへの適用の可能性について考察し、HDD の書き込み工場を例として、細胞型生産シス

テムの自己組織化シミュレーションを適用し、適切な生産システムの構造についての検討を行なった。

加工機械を万能で均一な能力を持つものとして扱った細胞型生産システムシミュレーションでは、実際の HDD 書き込み工場とは異なり、屋台村型の構造が獲得された。しかし、同工場の改良設計案として、一部の機械を専門化するモデルを採用することで、効果的に同工場の生産能力を向上させうることを示し、この結果が、実際の HDD 書き込み工場の機械配置に相当するものであることを確認した。

一般に、生産システムの設計においては、加工機械の配置問題、加工機械への工具の配分問題、搬送系のスケジューリング問題などを検討することが必要である。通常、システムのスケジューリング問題を検討する時には、加工機械に配置や、工具の配分などは既知であるとして設計を行なうが、これらの問題は同時的、統一的に解決されることが望ましい。

細胞型生産システムでは、これらの問題を同時に扱うことから、生産システムのプロトタイピングツールとしても有用であると考ええる。

この章では、これまでの議論を踏まえ、本論文の目的達成に向けて、具体的な考察を行う。まず、第1節では、本論文の目的達成に向けて、具体的な考察を行う。次に、第2節では、本論文の目的達成に向けて、具体的な考察を行う。最後に、第3節では、本論文の目的達成に向けて、具体的な考察を行う。

## 第 6 章

### 考察

この章では、これまでの議論を踏まえ、本論文の目的達成に向けて、具体的な考察を行う。まず、第1節では、本論文の目的達成に向けて、具体的な考察を行う。次に、第2節では、本論文の目的達成に向けて、具体的な考察を行う。最後に、第3節では、本論文の目的達成に向けて、具体的な考察を行う。

## 6.1 やわらかい機械としての位置付け

本研究では、やわらかい機械の一例として細胞型生産システムを作成した。まず、実際に細胞型生産システムのハードウェアを開発し、動作実験を行なうことで最小構成の細胞型生産システムの分散的制御の実現可能性を検証し、ついで計算機シミュレーションにより、本研究で提案した細胞型生産システムが、変動する生産条件、生産要求に柔軟に適應して、全体としての機能を実現することを確認した。

本研究で作成したハードウェアは、集中制御部を設けない分散制御でコントロールされていることから、ソフトウェア的には、再構成性が高く、やわらかい機械としての要求を満たしうるものと考えられる。

## 6.2 生産システムの戦略設計方法論としての位置付け

### 6.2.1 細胞型生産システムの位置づけ

生産システムの設計においては、生産設備をどのように配置し、これらの設備にどのように生産タスクを割り振るかを決定することは、生産システムの効率をきめる重要な課題である。変動する生産要求や、生産環境に対応しうる柔軟な生産システムの構造を解析的に設計段階で決定するのは一般に困難であり、計算機シミュレーションを用いることが一般的である。

しかし、従来の研究では、既存のFMSなどの生産設備を対象とし、特定の加工機械の配置のもとでの加工機械への工具割り当て問題や、AGVの運行スケジューリングなどを計算するものが多く（たとえば、[長沢 89][古川 96] など）、生産システムの構造を抜くことが出来なかった。すなわち、ある生産条件、生産要求には、屋台村型構造が良いのか、それともライン型構造、FMS型構造が良いのかという戦略的な生産システムの構造決定は、熟練技術者の勘に委ねられ、これらの決定を解析的に行なう方法論や、あるいは計算機を用いて支援するシミュレーションツールなどは開発されてこなかった。このような観点から、本研究で作成した細胞型生産システムのシミュレータは、生産システムの戦略的な設計支援ツールとして有効なツールであると考え

る。

また、たとえばFMSなどの生産システムにおいて、工具配分や、AGVの運行スケジューリング、加工機械の種類やレイアウトなどは本来、同時に解決することが望ましいが、本研究で作成した細胞型生産システムを用いた自己組織化シミュレーションでは、これらを同時に扱うことが可能である。第5章において、FMSにおけるAGVに相当するパレットの自律的な学習により、生産システム全体の構造が獲得されることを示したが、これは単にパレットの運行スケジューリングを決定しただけではなく、各加工機械がどのような機能、能力を持つべきであるかとの問いに対しても同様に解答を与えているものと考えることができる。

本研究では、細胞型生産システムを構成するパレットに自己組織化のアルゴリズムを搭載することで、生産システムの戦略的な構造決定や、パレットの流れ、すなわち生産システムのスケジューリングを実行することを対象としたが、さらにシミュレーションを進め、本手法の適用範囲を広めることも可能である。例えば、各加工細胞について、稼働率の高い加工細胞の能力を少しずつ上昇させ、稼働率の低い加工細胞は、その配置場所を変更するなどのルールを設けて、細胞型生産システムのシミュレーションを実行することで、生産システムにおける生産設備のレイアウト問題をも、自己組織化の適応範囲に含めることが出来ると考えられる。

また、一般に生産システムを実現する要素としては、搬送、加工、組み立て、情報処理があげられるが、通常これらの要素は、搬送はコンベアやAGVで、加工、組み立ては専用加工機械や、人手で、情報処理はLANや、IDタグ、看板などで実現されている。細胞型生産システムでは、搬送を倉庫細胞という形で、加工および組み立てをマニピュレータと工具で、情報処理をパレットおよび情報細胞という形で実現したが、この実現形態は、生産システムとしての一般性を失うものではない。

したがって、本研究で作成した細胞型生産システムは、一般の生産システムの設計においても有用なツールとなりうるものと考ええる。

また、本研究で作成した細胞型生産システムのモデルは、生産要求の変化に柔軟に対応可能であり、次世代の生産システムに必要とされる「やわらかさ」を持った生産システム構成の実現可能性を計算機シミュレーションにより示した。

## 6.2.2 既存研究との比較

### (1) 生物型生産システムとの比較

生物型生産システム(BMS)同様、細胞型生産システムにおいても、システム内に存在する加工物の情報は、パレットによって管理されている。つまり、システム内に存在する全ての荷物は、それらがどのような素材に、どのような操作を施したのかが明に記述されている。これは、BMSにおいて工作物の情報がDNA情報として記述されているのに類似している。しかし、細胞型生産システムでは、物体としての素材、部品、製品、パレットと製造情報としての情報細胞が明確に分離されており、必要に応じて合体するという特徴を持つ。

したがって、BMSとは異なり、細胞型生産システムにおいては、素材や部品は、必ずある一つの製造タスクのみ使用されるのではなく、必要に応じて他の製造タスクに流用可能であり、状況に応じて、素材や部品を自由に利用することが出来、より高い柔軟性を実現していると考ええる。

### (2) ホロニック生産システムとの比較

ホロニック生産システムとの最大の相違は、システム内各要素にどのくらい全体性の実現されているかである。ホロニック生産システムの一具体化例であるホロニックロボットシステムでは、システム構成要素はLANで結ばれ、LANを介して実行時にタスク分散の階層構造を生成するが、ホラーキを生成する上位ホロンは細胞型生産システムに比べてより全体性の強い情報を利用可能であり、効率的なタスク分散の階層構造を決定することが出来る。

一方、細胞型生産システムにおいては、各細胞は、直接的には隣接する細胞のみとしか通信せず、各細胞は入口や、出口、マニピュレータ細胞といった特殊細胞への距離を知るだけであり、極めて限られた全体情報しか利用しない。これは、細胞型生産システムでは、細胞の接続、再構成の自由度を上げ、可能な限り柔軟性を上げるべく設計されているためである。

このことから、各細胞は、直接的には効率的なシステム内加工設備への製品製造タ

スクの割り当て、すなわち、マニピュレータ細胞の巡回順序の選択を決定することは出来ない。

しかし、第5章で示した自己組織化のアルゴリズムを搭載することにより、極めて限られた全体情報しか持たない細胞型生産システムにおいても効率的なシステムの全体構造を獲得することを確認している。

一般的に、通信の全体性、通信の同時性を大規模なシステム全体にわたって実現することは難しいが、細胞型生産システムでは、通信の全体性を必要最小限に抑えることが可能であり、様々なシステムへと適用可能であると考ええる。

### 6.3 細胞型機械の設計方法論としての位置付け

細胞型機械は、各細胞間の機能間に最小限の関係を与えたのみで動作可能な、機械システムであり、自己組織化能力がなくとも動作自体は可能な機械システムである。

しかし、一般的に均質な細胞型機械システムは効率が悪く、状況に応じて運用効率を向上させるためには、細胞型機械システム運用時にシステムを環境に適応させるためには、自己組織化能力を導入することが重要となる。

本論文では、細胞型機械の各機械要素、細胞に学習能力を付与することでシステム全体としての自己組織化能力を実現するアプローチを採用した。ここで、細胞型機械の自己組織化手法として、遺伝的アルゴリズムを用いる手法と、各細胞の経験強化型の強化学習により大域的な秩序、構造を獲得する方法の2通りを検討した。本研究では、生産システムを例として、本手法は、坂尾が提案した細胞型機械の設計方法論 [Sakao97] に、そのまま適用することが可能であり、本手法により細胞型機械の設計方法論を拡張することが出来たと考える。

また、一般に機械システムの設計では、目標とする機能を実現する構造を事前に知っていなければならないが、目標機能を実現する構造が常に明確であるわけではない。生産システムのような、柔軟な運用が求められる複雑な機械システムでは、設計において最適化の目標とするべき項目が多数存在し、これらが複雑なトレードオフの関係を持つことから、目標機能を実現する構造を見出すことは容易ではない。自己組織

化能力を持つ細胞型機械システムは、このような設計問題においても運用を通じて自己組織化を行なうことで、目的となる機能を実現する構造を自動的に獲得することが期待できる。第5章では、本研究で扱った自己組織化能力を持つ細胞型生産システムの計算機シミュレーションを通して、このような複雑な環境下で、細胞型生産システムが自己組織的に適切な構造を獲得しうることを示した。

つまり細胞型機械は、目標機能を実現する構造を発見することが可能であるという点で、有効な設計ツールとなりうる可能性があるといえる。

#### 6.4 創発型設計手法についての考察

本論文では、細胞型機械の自己組織化手法として、経験強化型の強化学習を採用した。一般に、自律分散システムの自己組織化においては、目標機能を最も効率的に実現可能なシステム全体の構造を、解析的に設計時に得ることが難しいことから、強化学習や、GA、ESなどのように、ゴールとして機能を与え、これを実現する手法を探索するという方法論が多く用いられる。

しかしながら、このような手法では探索空間の増大とともに、学習所要時間が急速に増大することから、大規模な問題に適用するには様々な工夫が必要となる。一つのアプローチとしては、目標機能をいくつかのサブ機能に分割し、それらのサブ機能を順次実現するような漸近的学習を試みることで、計算時間を短縮することが可能であろう。このようなアプローチをとるためには、ゴールとして与えられている機能をどのようなサブゴールへ分割するかという方法論を確立することが望まれる。これは、すなわち自律分散システムにおける、全体機能をどのような構造として表現するかという問いであり、今後さらなる研究が必要となると思われる。

第 7 章

## 結論

## 結論

## 7.1 結論

本研究では、細胞型機械における自己組織化と題して、細胞型機械における自己組織化の手法について検討し、細胞型生産システムの開発を通して自己組織化能力を持つ細胞型機械を用いた機械システム設計の有効性を検討することを目的とした。

この目的を実現するため本論文では以下のことを行なった。まず、第2章で、「やわらかい」機械への要求へ応える機械システムとして、自己組織化能力を持つ細胞型機械が必要であることを述べた。

第3章で、現行の生産システムの特徴と、次世代生産システムへの要請について述べ、やわらかさが今後ますます必要となる生産システムを例題として選択し、細胞型生産システム実現のロードマップを示した。

第4章では、細胞型生産システムの最小構成のハードウェアを作成し、細胞型生産システムを集中部なしに分散的に制御する手法を提案し、その実現可能性を確認した。

第5章では、計算機シミュレーションにより、細胞型生産システムの自己組織化能力を確認した。また、生産システムの構造をライン型構造、屋台村型構造、FMS型構造に分類し、計算機シミュレーションによる自己組織化を通して、それらの構造が以下の条件で有利であることを確認した。

- ライン型構造は、ワークの全所要作業時間中、加工細胞の占める割合が大きい場合に有利な構造となり、中種中量生産以上のロットサイズにおいて有効である。
- 屋台村型構造は、多種少量生産において有利であり、全作業時間に占める加工機械の工具交換時間の比率が小さい場合に有利である。
- FMS型構造は、ライン型、屋台村型構造が獲得される条件の中間的条件で有利となる。

また、実際の生産システム事例として、HDD書き込み工場をとりあげ、HDD書き込み工場の改良設計に細胞型生産システムシミュレータを用いることで、生産システムの戦略的設計支援ツールとしての細胞型生産システムの有効性を明らかにした。

以上により、本論文では自己組織化能力を持つ細胞型生産システムは、生産機能の合目的的实现構造が不明な場合において、設計ツールとして有効であることを確認したと結論づける。

## 7.2 展望

本論文では、細胞型機械における自己組織化の手法として、各細胞の独立した学習により全体として合目的的構造を獲得する手法を採用した。一般に学習では、探索空間の増大とともに、急速に計算時間が大きくなるため、目的とする探索空間を如何に小さく作るのが鍵となる。

このためのアプローチとしては、学習のゴールを何段階かに分割することで、一つ一つのゴールへ到達するための学習時間を短くし、全体としての学習時間を短縮する手法がまず考えられる。

もう一つのアプローチとしては、学習のようにゴールとして、なんらかの機能要素を与えるのではなく、システム全体の構造のトポロジーを与えるというものである。本論文では、生産システムが、ある生産要求、生産条件のもとでは、ライン型構造を、別の生産条件のもとでは屋台村型構造を獲得するのを見た。このように、システム全体の合目的的構造が判明した場合、学習により、それらの構造を間接的に獲得するのではなく、直接的に合目的的構造を形成する手法を搭載することが有利となる。

散逸構造や、シナジェスティックスなどに代表される、非平衡系における様々な現象の空間的、時間的構造の生成原理を探る試みでは、ミクロな相互作用から、マクロな構造が生成する多くのモデルを構築している。

このようなミクロな相互作用からマクロな構造を形成するモデルと、細胞型機械において、ある目的機能を発現するための全体構造のマッピングが可能となったとき、細胞型機械システムは、さらに適用範囲の広いシステムへと成長すると期待できる。

## 謝辞

指導教官であられる富山哲男教授には、大学院に進学して以来5年間の長きに亙り、日々のご多忙にも関わらず丁寧な御指導を頂きました。他専攻から進学して機械のことなど右も左も皆目わからない私を辛抱強く教え導いて頂きました。ここに深く感謝致します。

本論文を査読していただきました、東京大学大学院工学系研究科機械情報工学専攻の下山勲教授、東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻の保坂寛助教授、鈴木宏正助教授、太田順助教授には、本論文をまとめるうえで大変有益なコメントをいただきました。ここに厚く感謝いたします。

梅田靖講師には、研究内容全般にわたって貴重な助言を頂きました。ここに深く感謝致します。

富山研究室のOBである坂尾知彦氏には、研究内容はもとより、博士課程における研究活動全般にわたって、様々な面から貴重な助言を頂きました。ここに深く感謝致します。

三田工業株式会社知的制御システム開発室の方々には、共同会議等で活発な議論を提供して頂き、本研究を進めるうえで大変役立ちました。ここに深く感謝いたします。

日本電気茨城工場の方々には、年も押し詰まった忙しいなか、ハードディスクの書き込み工程を中心に様々なデータを提供していただきました。これらのデータは本研究をまとめる上で大変役立ちました。ここに深く感謝致します。

富山研究室のOBである南都寛君、芦沢賢治君、そして修士課程の佐藤ロベルト清君とは、細胞型機械のハードウェアの製作、改良を協力して行なってきました。特に、芦沢君は、卒業後もしばしば、ハードウェアの製作、改良にあたり相談にのって頂き、ハードウェア作成に関しては全くの素人であった私に貴重な助言をしていただきました。彼らの能力と努力なくしては、ハードウェアの開発は達成し得なかったものです。ここに深く感謝致します。

富山研究室のOBの吉岡真治氏には、研究に対する助言からプログラミングの指導まで、様々な面から普段の研究活動を支えて頂きました。ここに深く感謝致します。

博士課程の関谷貴之君には、研究に関する助言はもとより、プログラミングの指導にいたるまで様々な面で研究活動を支えて頂きました。本研究における計算機シミュレーションツールは、彼の助力なしには作成できなかったものです。ここに深く感謝の意を表します。

修士課程の野間口大君には、計算機の管理など様々な面から研究活動を支えて頂きました。ここに深く感謝いたします。

秘書の野萱和子さん、辻口るみさん、立入菜生子さん、尾藤知香さん、片桐淳子さん、横山ルミ子さん、小笠原由紀さんには研究室における生活全般にわたって大変お世話になりました。ここに深く感謝致します。

東京大学人工物工学研究センターの皆さんとは、1年間ではありますが、同じ建物、同じフロア、同じ計算機ネットワークを共有して研究を行なってきました。必ずしも研究分野を同じくしない彼達との議論は、私の研究に大きく役立ちました。ここに深く感謝いたします。

最後にこの論文を書く上でお世話になった、富山研究室の諸先輩を始めとする全ての皆様に深く感謝致します。

## 参考文献

- [Arai96] Y. Arai, T. Fujii, H. Asama, T. Fujita, H. Kaetsu, and I. Endo: Self-Localization of Autonomous Mobile Robots Using Intelligent Data Carrier, In H. Asama, T. Fukuda, T. Arai, and I. Endo(eds.): *Distributed Autonomous Robotic Systems 2*, Springer (1996).
- [Asama89] 浅間一: 保全用マニピュレータ構成論, Ph.D. thesis, 東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻 (1989).
- [Deneubourg90] J. L. Deneubourget al.: The dynamics of collective sorting robot-like ants and ant-like robots, In *in From Animals to Animals: International Conference on simulation of Adaptive Behavior*, pp. 356-363, MIT Press (1990).
- [Fukuda94] 福田敏男, 入谷剛, 新井史人, 植山剛, 杉浦恒彦, 酒井彰, 上杉武弘: 動的再構成可能ロボットシステムに関する研究 - 第 70 報: 意志協調による群行動の発生と進化, 第 11 回日本ロボット学会学術講演会論文集, pp. 431-432 (1994).
- [G.Nicolis93] G.Nicolis and I.Prigogine: 複雑性の探求, みすず書房 (1993).
- [H.Haken78] H.Haken: 協同現象の数理, 東海大学出版会 (1978).
- [HMS97] : 「ホロニック生産システム: 自律形モジュールとその分散制御のシステム構成要素技術」に関する研究成果報告書, (財) 国際ロボット・エフ・エー技術センター IMS センター (1997).

- [Holland75a] J. H. Holland: *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, Univ. of Michigan Press (1975).
- [Holland75b] J. H. Holland and J. S. Reightman: *Cognitive Systemes Based on Adaptive Algorithms*, Academic Press (1975).
- [Holland86] J. H. Holland: Escaping brittleness. In R. S. Michalski, J. G. Carbonell, and T. M. Mitchell(eds.): *Machine Learning, an artificial intelligence approach, Volume 2*, Academic Press (1986).
- [Itoh95] 伊藤正美ほか: 自律分散宣言, オーム社 (1995).
- [Kamiya80] A. Kamiya and T. Togawa: Adaptive regulation of wall shear stress to flow change in the canine carotid artery, *Am. J. Physiol* (1980).
- [Langton86] C. Langton: Studying Artificial Life with Cellular Automata, *Physica D*, Vol. 22, pp.120 (1986).
- [Luntz97] J. E. Luntz and W. Messner: A Distributed Control System for Flexible Materials Handling, *IEEE Control Systems*, pp. 22-28(February 1997).
- [Murata95] 村田智, ほか: 自己修復する機械 — 分散ユニット構成による自己組み立て —, 計測自動制御学会論文集, No. 2, pp.254-262 (1995).
- [Neumann66] J. Neumann: *Theory of Self-reproducing Automata*, University of Illinois Press (1966).
- [NGM97] : 次世代生産システム (NGMS) のモデリングとシミュレーションに関する研究成果報告書, (財) 国際ロボット・エフ・エー技術センター IMS センター (1997).
- [OR93] 特集: 遺伝的アルゴリズム, オペレーション・リサーチ, Vol. 32, No. 1, (1993).
- [Osada95] 長田正: 自律分散を目指すロボットシステム, オーム社 (1995).

- [Sakao96] T. Sakao, S. Kondoh, Y. Umeda, and T. Tomiyama: The Development of a Cellular Automatic Warehouse, In *Proceedings IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems '96 (IROS '96)*, pp. 324-331 (1996).
- [Sakao97] 坂尾知彦: 細胞型機械の設計方法論, Ph.D. thesis, 東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻 (1997).
- [T.93] B. T. and S. H-P.: An Overview of Evolutionary Algorithms for Parameter Optimization, *Evolutionary Computation*, Vol. 1, No. 1, (1993).
- [Tomiyama92a] 富山哲男: IMS の技術コンセプト「やわらかさ」, In *RACE Discussion Paper*, number RA-DP2, pp. 1-23, 東京大学人工物工学研究センター (1992).
- [Tomiyama92b] 富山哲男: 人工物工学とは何か, 第1回人工物工学シンポジウム論文集, pp. 29-34, 東京大学人工物工学研究センター (1992).
- [Ueda94] 上田完次: 生物指向型生産システム, 工業調査会 (1994).
- [Watkins92] C. Watkins and D. P.: Q-learning, *Machine Learning*, Vol. 8, No. 3, pp.279-292 (1992).
- [伊能 95a] 伊能教夫, 下平真子, 小林弘樹: 力学構造物を自己組織化するセル・オートマトン (ローカルルールによって生じるシステム全体の挙動), 日本機械学会論文集 (A 編), Vol. 61, No. 586, pp.1416-1422 (1995).
- [伊能 95b] 伊能教夫, 上杉武文: 力学構造物を自己組織化するセル・オートマトン (さまざまな位相構造の生成とその形態比較), 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 61, No. 585, pp.1109-1114 (1995).

- [吉村 98] 吉村裕司, 太田順, 井上康介, 平野智一, 倉林大輔, 新井民夫: 群ロボットによる多数ロボットの繰返し搬送計画, 日本ロボット学会誌, Vol. 16, No. 4, (1998).
- [古川 96] 古川正志, 渡辺美知子, 嘉数有昇: 確率的学習オートマトンによる複数AGVの自律的運行, 精密工学会誌, Vol. 62, No. 2, (1996).
- [三田 97] 三田吉郎, 小西聡, 藤田博之: 自律分散型マイクロ搬送システムの実現, SICE 第7回自律分散システムシンポジウム, pp. 15-19, SICE (1997).
- [小鍛冶 95] 小鍛冶繁: 協調するアクチュエータ群, 長田正 (編): 自律分散を目指すロボットシステム, オーム社 (1995).
- [人見 90] 人見勝人: 生産システム工学, 共立出版 (1990).
- [須田 85] 須田, 小澤, 高橋: 骨の科学, 医歯薬出版 (1985).
- [相山 98] 相山康道, 原田智和, 杉正夫, 新井民夫: ホロンの概念を用いた柔軟なロボット群管理システム—第4報: Plug Produce コンセプトの提案—, 1998年度精密工学会秋季大会講演論文集, pp. 558-559, 精密工学会 (1998).
- [大倉 96] 大倉和博, 上田完次: 生物指向型生産システムにおける簡単なモデルを使った生産スケジューリング問題の一解法, 日本機械学会論文集 (C編), Vol. 62, No. 595, (1996).
- [中野 96] 中野繁: 人工物における自己組織化, 北森俊之, 北村新三 (編): 自己組織化の科学, オーム社 (1996).
- [長沢 89] 長沢啓行, 永野克己, 平林直樹, 西山徳幸: 2機械フローショップ型FMSにおける工具配分法, 日本機械学会論文集 (C編), Vol. 55, No. 512, (1989).
- [藤田 96] 藤田博之: マイクロマシンの複雑な振舞い—制御の観点—, 精密工学会誌, Vol. 62, No. 8, (1996).

- [梅谷 76] 梅谷陽二, 平井成興: 生長変形法による構造材の適応的最適形状の決定, 日本機械学会論文集 (第 1 部), Vol. 42, No. 364, pp.3754-3762 (1976).
- [福田 95] 福田敏男, 川内陽志生: 自律分散ロボットを自己組織化システムとしてとらえると, 長田正 (編): 自律分散を目指すロボットシステム, オーム社 (1995).
- [福田 98] 福田敏男, ほか: 21 世紀を指向したグローバル生産のための企業統合研究 (Globeman 21)- 自律分散型生産システム研究部会 プロジェクト PLANARIA-, 平成 10 年度 IMS 研究成果講演論文集, pp. 87-98, IMS センター (1998).
- [北野 93] 北野宏明 (編): 遺伝的アルゴリズム, 産業図書 (1993).

## 発表論文

### 投稿論文他 (査読付)

- [1] T. Sakao, S. Kondoh, Y. Umeda, and T. Tomiyama: The Development of a Cellular Automatic Warehouse. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems '96 (IROS '96)*, pp. 324-331, 1996.
- [2] S. Kondoh, K. Ashizawa, T. Sakao, Y. Umeda, and T. Tomiyama: Cooperative Behavior of the Cellular Automatic Warehouse. *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics '97 (AIM '97)*, (CD-ROM), 1997.
- [3] S. Kondoh, Y. Umeda, and H. Yoshikawa: Development of Upgradable Cellular Machines for Environmentally Conscious Products. *Annals of College International pour L'etude scientifique des Techniques de Production Mechanique '98 (CIRP '98)*, Vol. 47/1, pp. 381-384, 1998.

### 講演論文他

- [1] 近藤 伸亮, 坂尾知彦, 梅田靖, 富山哲男: 細胞型機械の構築 (第7報) - 神経系概念の導入 -. 1995年度精密工学会春季大会. 2. 1995年3月.
- [2] 坂尾知彦, 南都寛, 近藤伸亮, 梅田靖, 富山哲男: 細胞型機械システムにおける細胞の行動規範の研究. 1995年度人工知能学会全国大会. 学習院大. 1995年7月.

- [3] 近藤伸亮, 坂尾知彦, 梅田靖, 富山哲男: 細胞型機械システムへの神経系導入の試み, 日本機械学会設計工学・システム部門講演会, 早大, 1995年7月.
- [4] 坂尾知彦, 南都寛, 近藤伸亮, 梅田靖, 富山哲男: 細胞型機械システムの設計, 日本機械学会設計工学・システム部門講演会, 早大, 1995年7月.
- [5] 坂尾知彦, 近藤伸亮, 梅田靖, 富山哲男: 細胞型自動倉庫の開発, 計測自動制御学会自律分散システム・シンポジウム, 東工大, 1996年1月.
- [6] 坂尾知彦, 近藤伸亮, 梅田靖, 富山哲男: 細胞型機械の構築(第8報) - 運用中のデッドロック回避 -, 1996年度精密工学会春季大会, 武蔵工業大, 1996年3月.
- [7] 近藤伸亮, 芦沢賢治, 坂尾知彦, 梅田靖, 富山哲男: 細胞型機械の構築(第9報) - 細胞型自動倉庫へのポテンシャル場および強調動作の実装 -, 1996年度精密工学会春季大会, 武蔵工業大, 1996年3月.
- [8] 近藤伸亮, 坂尾知彦, 梅田靖, 富山哲男: 細胞型機械システムのための通信・制御手法の比較, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 宇部市, 1996年6月.
- [9] 近藤伸亮, 芦沢賢治, 坂尾知彦, 梅田靖, 富山哲男: 細胞型機械システムにおける協調動作の実現, 日本機械学会設計工学・システム部門講演会, 早大, 1996年10月.
- [10] 近藤伸亮, 佐藤ロベルト清, 坂尾知彦, 梅田靖, 富山哲男: 細胞型機械の構築(第10報) - 異種細胞の付加による細胞型機械のアップグレードビリティの検証 -, 1997年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 神戸大, 1997年3月.
- [11] 近藤伸亮, 佐藤ロベルト清, 坂尾知彦, 梅田靖, 富山哲男: 細胞型機械の構築(第11報) - 細胞型機械の制御方法論の提案 -, 1997年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, 神戸大, 1997年10月.
- [12] 佐藤ロベルト清, 近藤伸亮, 坂尾知彦, 梅田靖, 富山哲男: 細胞型機械の構築(第12報) - 細胞型自動組立システムの実現 -, 1997年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, 神戸大, 1997年10月.

- [13] 坂尾知彦, 近藤伸亮, 下村芳樹, 梅田靖, 富山哲男: 細胞型機械の構築(第13報) - 細胞型機械の制御ソフトウェア自動生成 -, 1997年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp. 325, 神戸大, 1997年10月.
- [14] 近藤伸亮, 佐藤ロベルト清, 坂尾知彦, 梅田靖, 富山哲男: 細胞型組み立てシステムの開発. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会. 仙台市, 1998年6月.
- [15] 佐藤ロベルト清, 近藤伸亮, 梅田靖, 富山哲男: 細胞型機械の構築(第13報) - 細胞型生産システムの開発 -, 1998年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp. 614, 北海道大, 1998年10月.

本研究で行ったシミュレーション(表5.1参照)のうち、本文中で取り上げなかった条件での実験結果を付録として以下に掲載する。

## I 少種多量生産

### (1) A-4

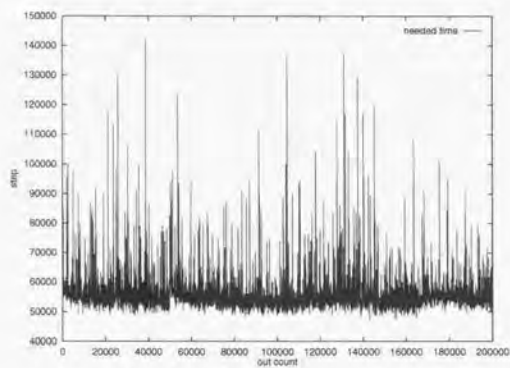


図 I-1: 50 個毎の移動所要時間+加工所要時間 No.A-4

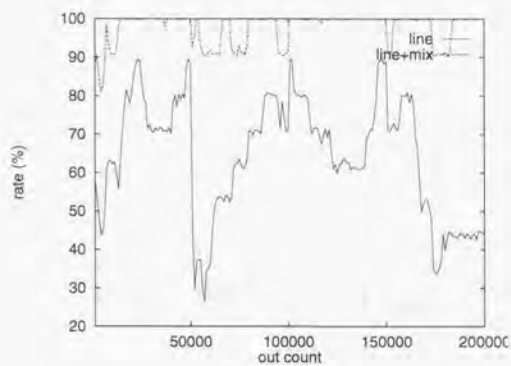


図 I-2: 10000 出庫毎の戦略比率の変化 No.A-4

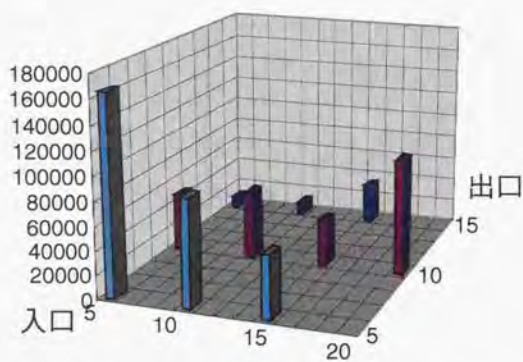


図 I-3: ロボットの全加工実行回数 No.A-4

(2) A-6

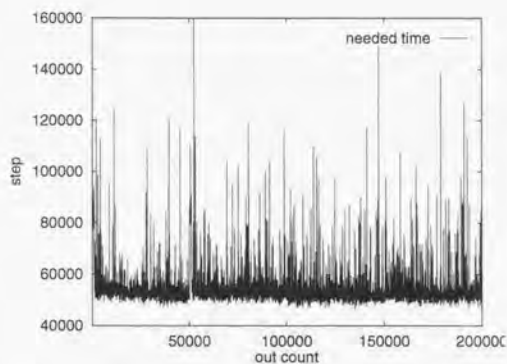


図 I-4: 50 個毎の移動所要時間+加工所要時間 No.A-6

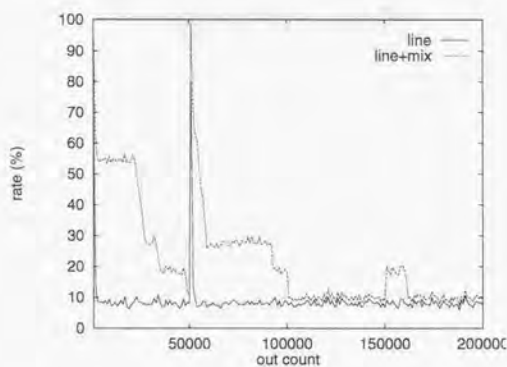


図 I-5: 10000 出庫毎の戦略比率の変化 No.A-6

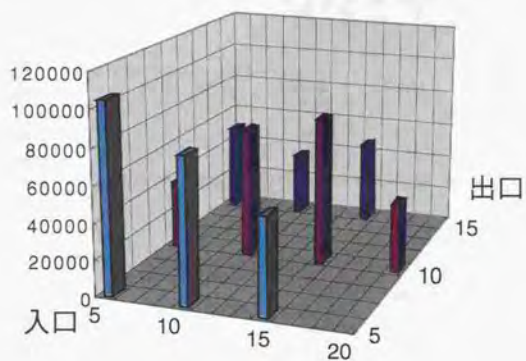


図 I-6: ロボットの全加工実行回数 No.A-6

(3) A-7

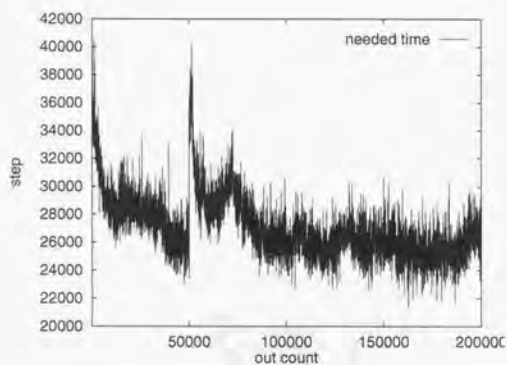


図 I-7: 50 個毎の移動所要時間+加工所要時間 No.A-7

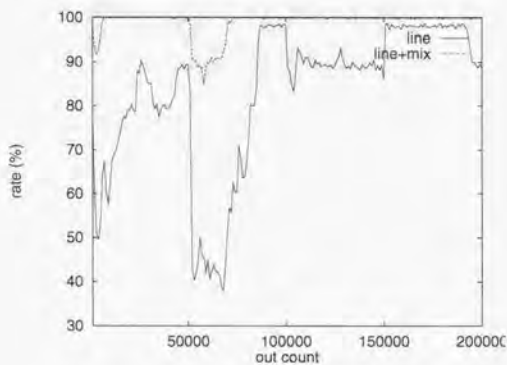


図 I-8: 10000 出庫毎の戦略比率の変化 No.A-7

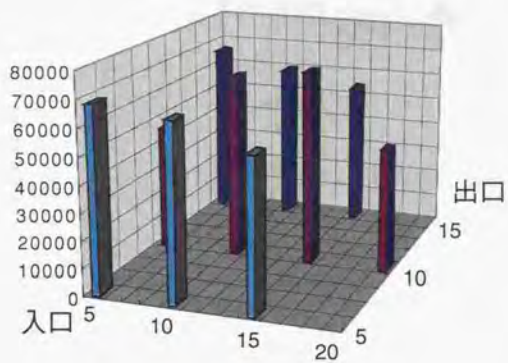


図 I-9: ロボットの全加工実行回数 No.A-7

(4) A-8

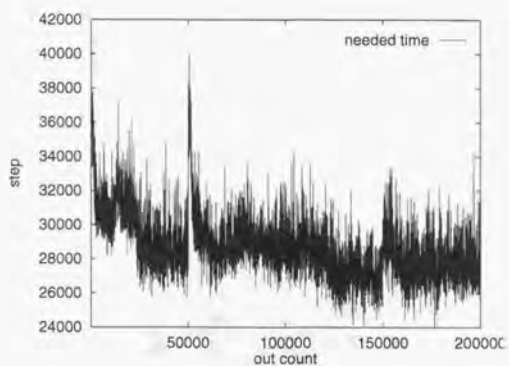


図 I-10: 50 個毎の移動所要時間+加工所要時間 No.A-8

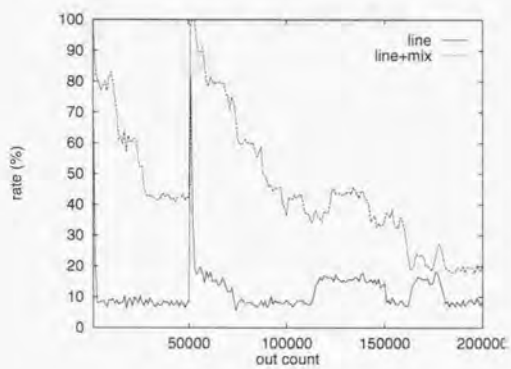


図 I-11: 10000 出庫毎の戦略比率の変化 No.A-8

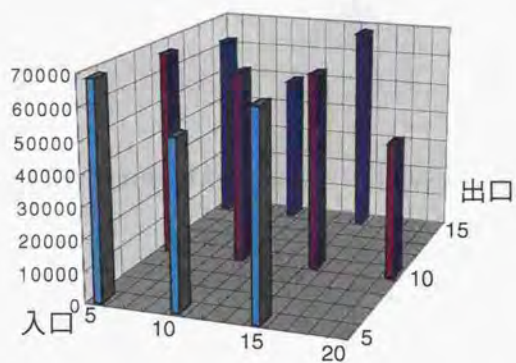


図 I-12: ロボットの全加工実行回数 No.A-8

(5) A-9

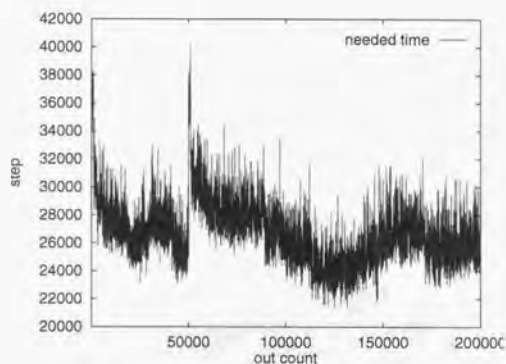


図 I-13: 50 個毎の移動所要時間+加工所要時間 No.A-9

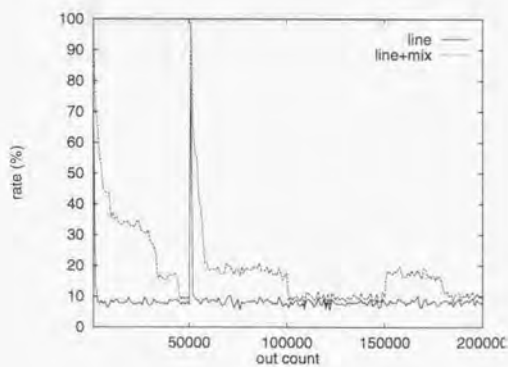


図 I-14: 1000 出庫毎の戦略比率の変化 No.A-9

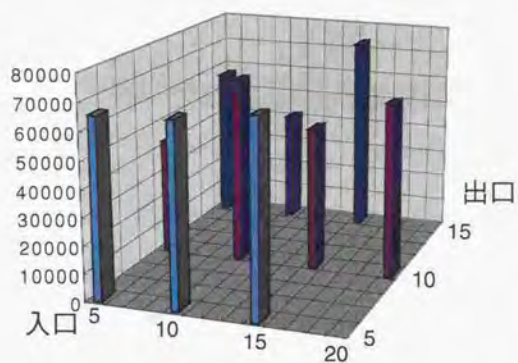


図 I-15: ロボットの全加工実行回数 No.A-9

## II 中種中量生産

### (1) B-4

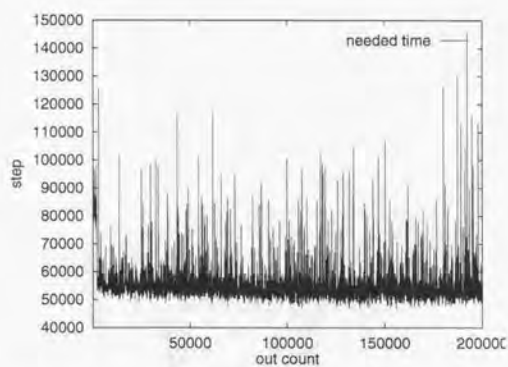


図 II-16: 50 個毎の移動所要時間+加工所要時間 No.B-4

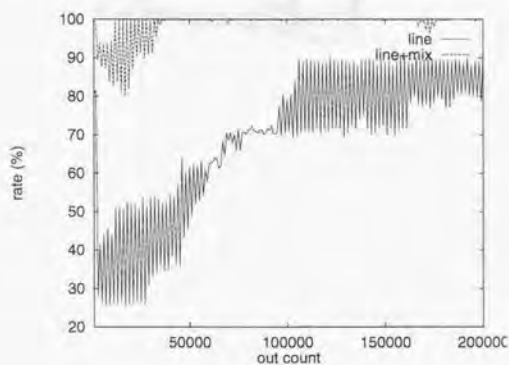


図 II-17: 10000 出庫毎の戦略比率の変化 No.B-4

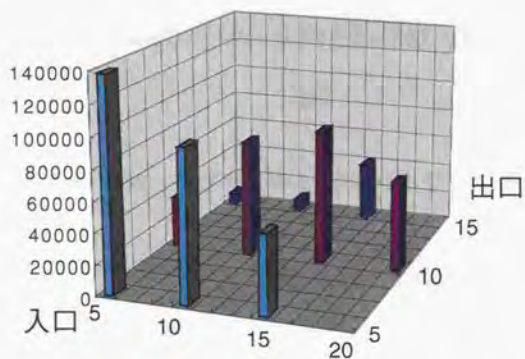


図 II-18: ロボットの全加工実行回数 No.B-4

(2) B-5

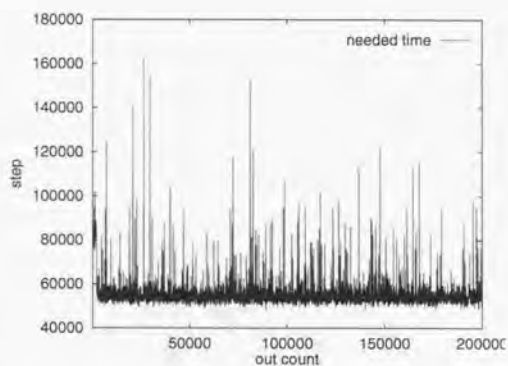


図 II-19: 50 個毎の移動所要時間+加工所要時間 No.B-5

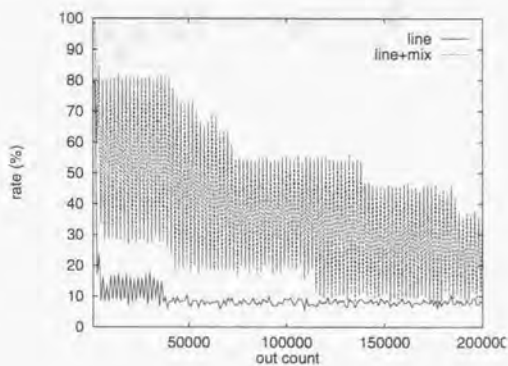


図 II-20: 1000 出庫毎の戦略比率の変化 No.B-5

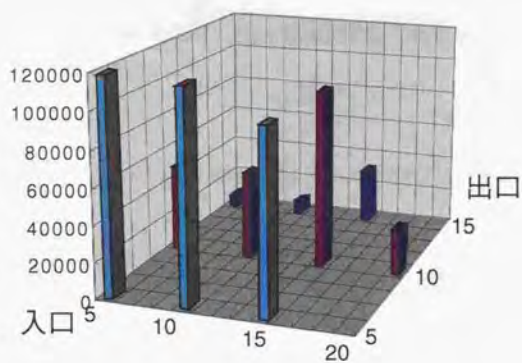


図 II-21: ロボットの全加工実行回数 No.B-5

(3) B-6

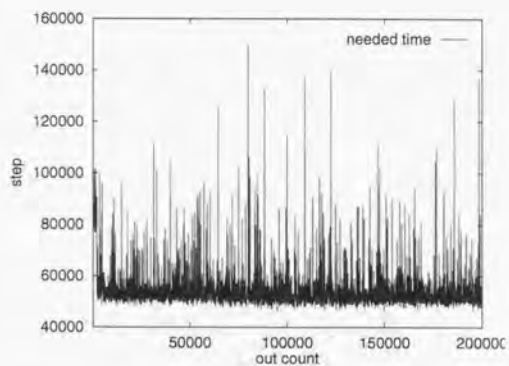


図 II-22: 50 個毎の移動所要時間+加工所要時間 No.B-6

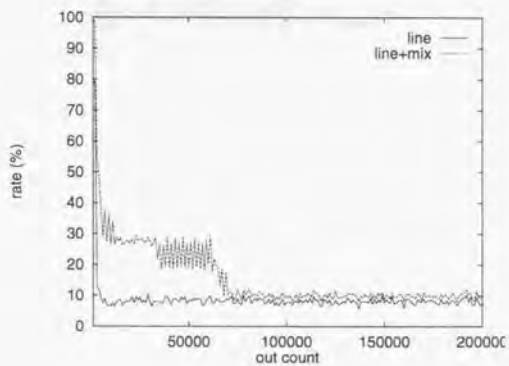


図 II-23: 1000 出庫毎の戦略比率の変化 No.B-6

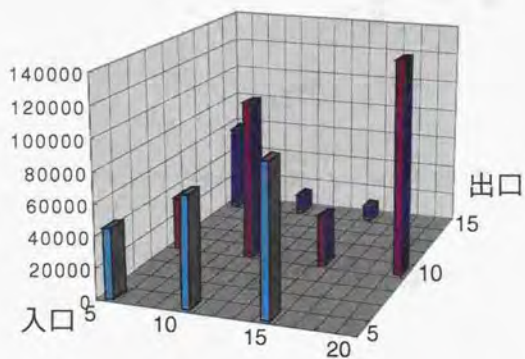


図 II-24: ロボットの全加工実行回数 No.B-6

(4) B-7

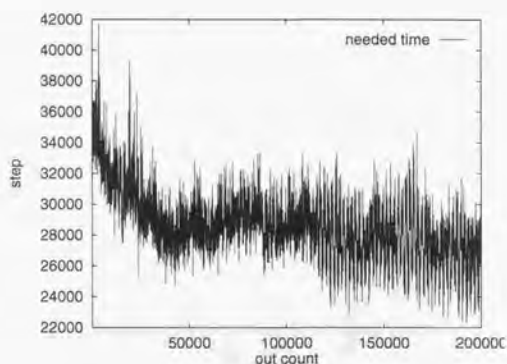


図 II-25: 50 個毎の移動所要時間+加工所要時間 No.B-7

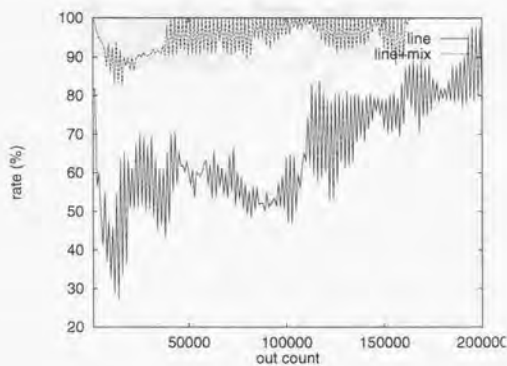


図 II-26: 10000 出庫毎の戦略比率の変化 No.B-7

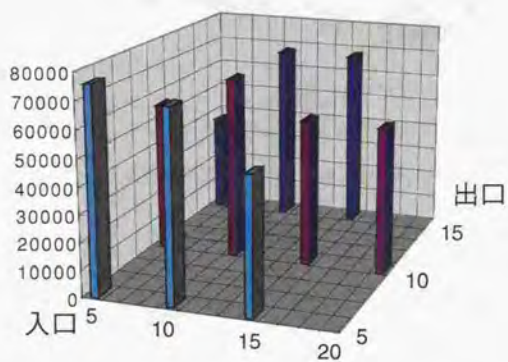


図 II-27: ロボットの全加工実行回数 No.B-7

(5) B-8

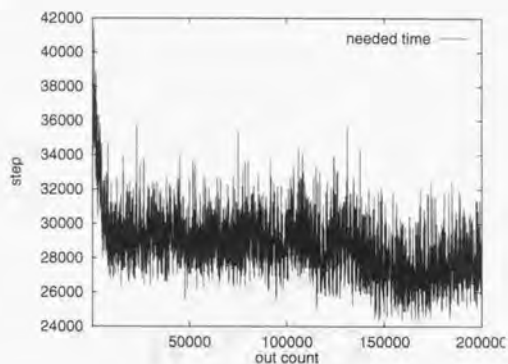


図 II-28: 50 個毎の移動所要時間+加工所要時間 No.B-8

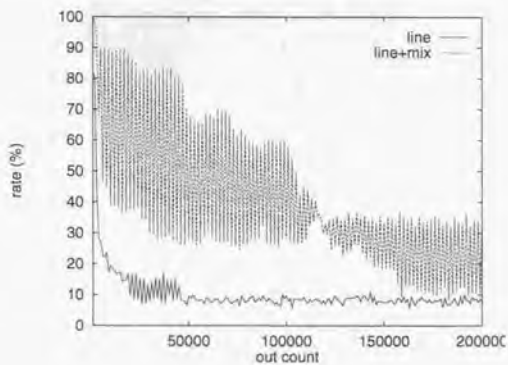


図 II-29: 1000 出庫毎の戦略比率の変化 No.B-8

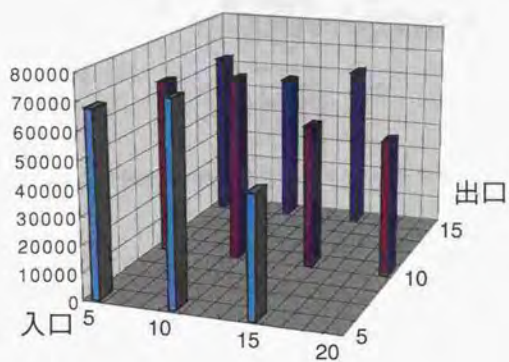


図 II-30: ロボットの全加工実行回数 No.B-8

(6) B-9

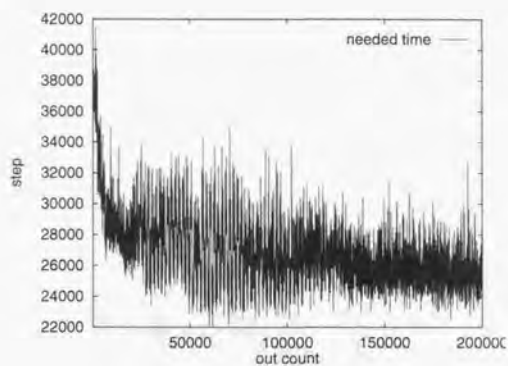


図 II-31: 50 個毎の移動所要時間+加工所要時間 No.B-9

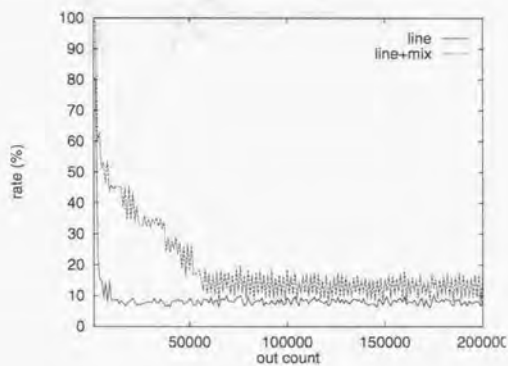


図 II-32: 1000 出庫毎の戦略比率の変化 No.B-9

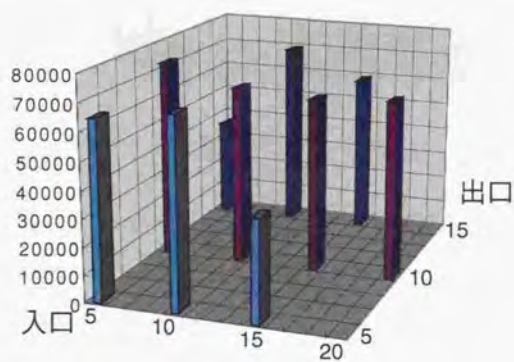


図 II-33: ロボットの全加工実行回数 No.B-9

### III 多種多量生産

#### (1) C-2a

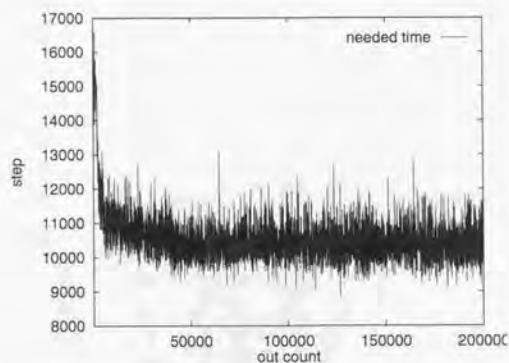


図 III-34: 50 個毎の移動所要時間+加工所要時間 No.C-2a

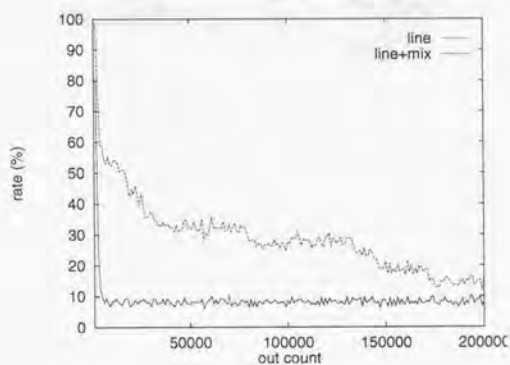


図 III-35: 1000 出庫毎の戦略比率の変化 No.C-2a

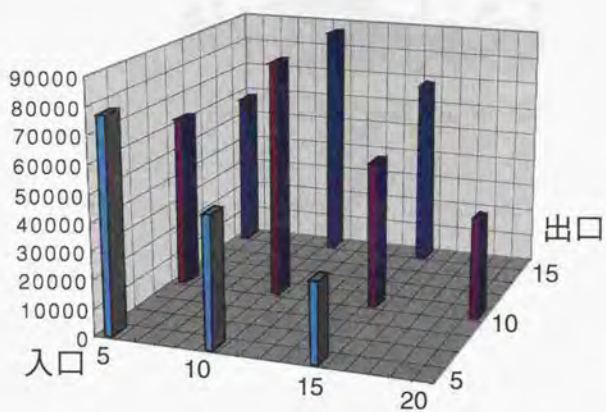


図 III-36: ロボットの全加工実行回数 No.C-2a

(2) C-2b

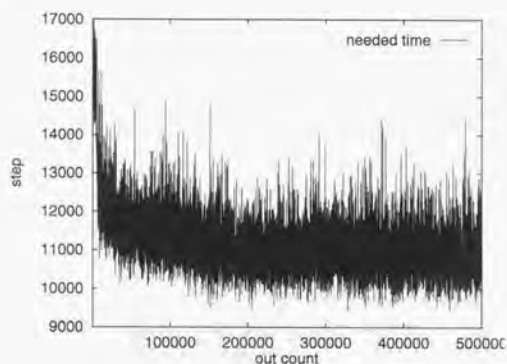


図 III-37: 50 個毎の移動所要時間+加工所要時間 No.C-2b

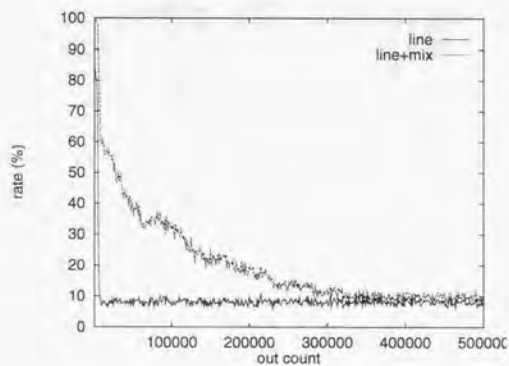


図 III-38: 1000 出庫毎の戦略比率の変化 No.C-2b

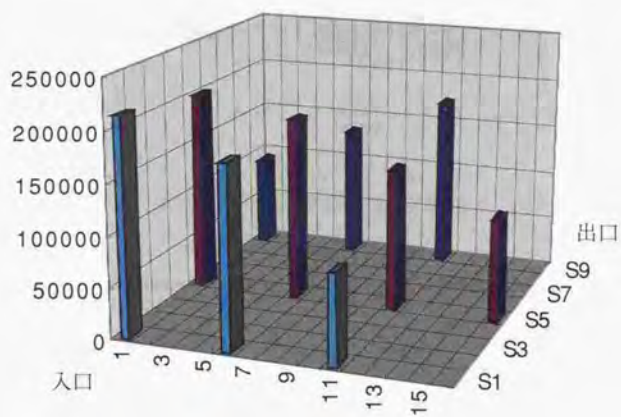


図 III-39: ロボットの全加工実行回数 No.C-2b

(3) C-3a

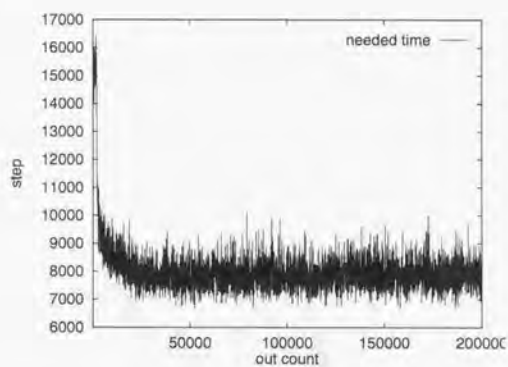


図 III-40: 50 個毎の移動所要時間+加工所要時間 No.C-3a

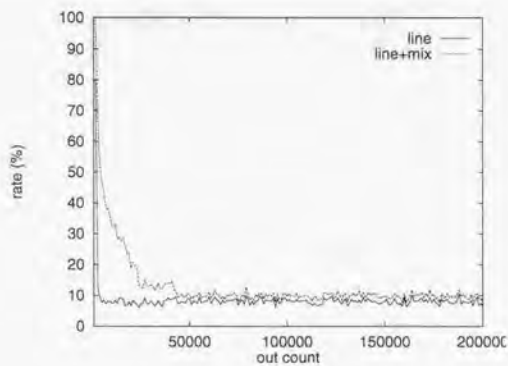


図 III-41: 1000 出庫毎の戦略比率の変化 No.C-3a

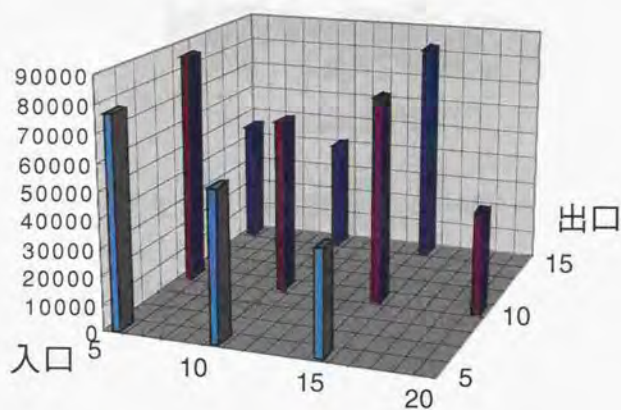


図 III-42: ロボットの全加工実行回数 No.C-3a

(4) C-3b

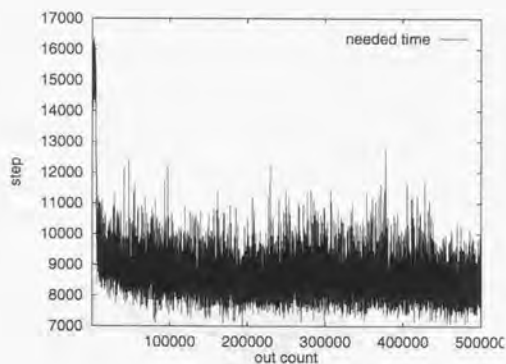


図 III-43: 50 個毎の移動所要時間+加工所要時間 No.C-3b

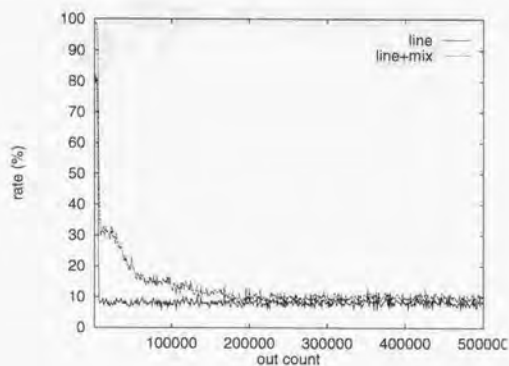


図 III-44: 1000 出庫毎の戦略比率の変化 No.C-3b

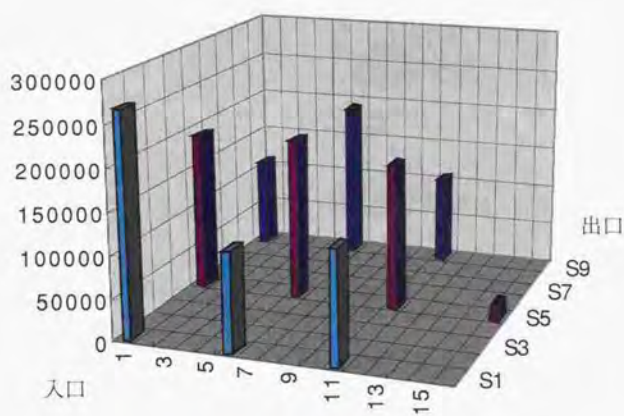


図 III-45: ロボットの全加工実行回数 No.C-3b

(5) C-4b

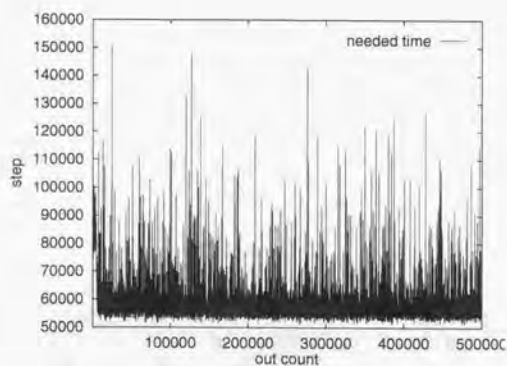


図 III-46: 50 個毎の移動所要時間+加工所要時間 No.C-4b

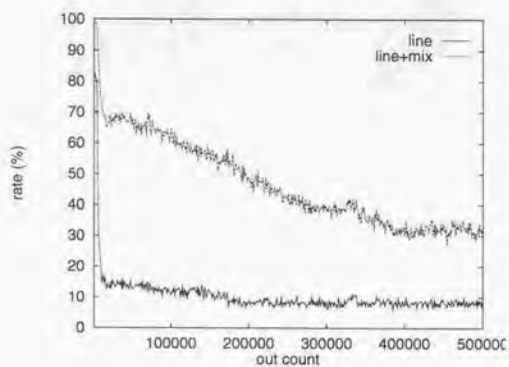


図 III-47: 10000 出庫毎の戦略比率の変化 No.C-4b

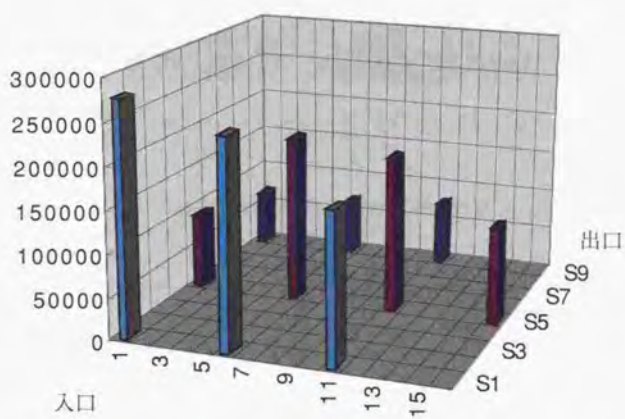


図 III-48: ロボットの全加工実行回数 No.C-4b

(6) C-5a

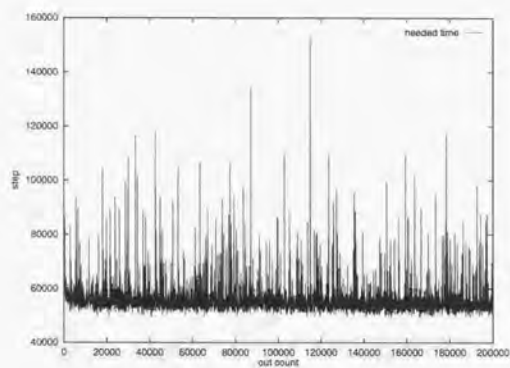


図 III-49: 50 個毎の移動所要時間+加工所要時間 No.C-5a

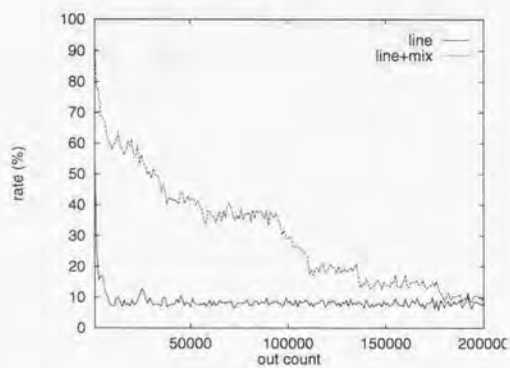


図 III-50: 10000 出庫毎の戦略比率の変化 No.C-5a

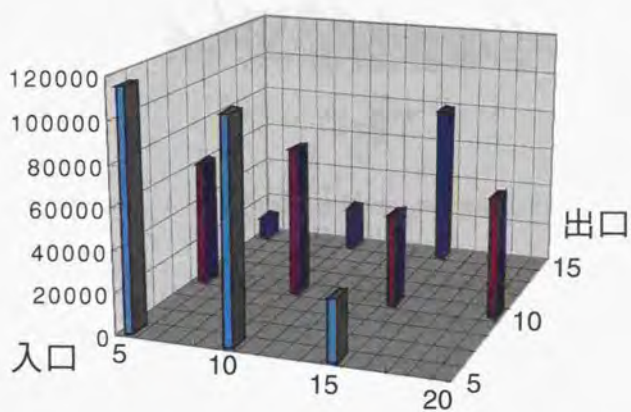


図 III-51: ロボットの全加工実行回数 No.C-5a

(7) C-5b

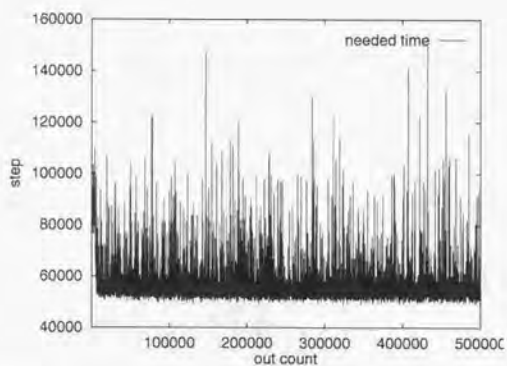


図 III-52: 50 個毎の移動所要時間+加工所要時間 No.C-5b

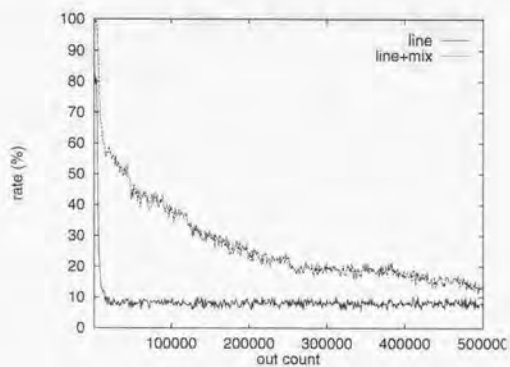


図 III-53: 10000 出庫毎の戦略比率の変化 No.C-5b

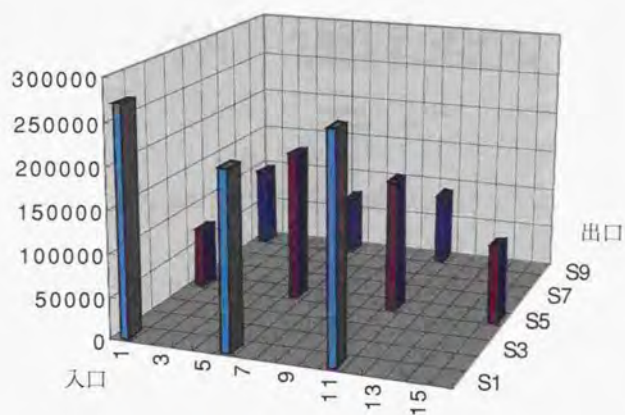


図 III-54: ロボットの全加工実行回数 No.C-5b

(8) C-6a

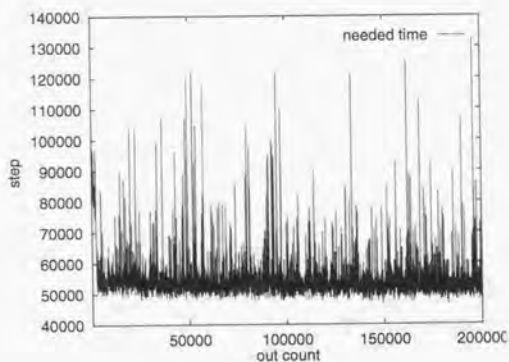


図 III-55: 50 個毎の移動所要時間+加工所要時間 No.C-6a

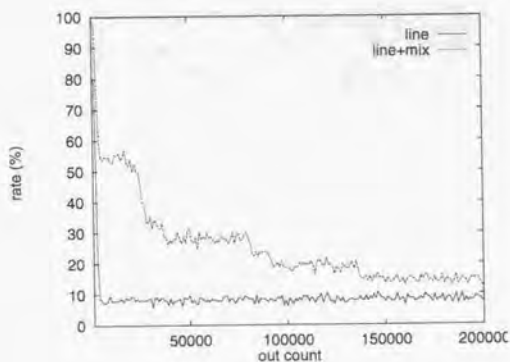


図 III-56: 10000 出庫毎の戦略比率の変化 No.C-6a

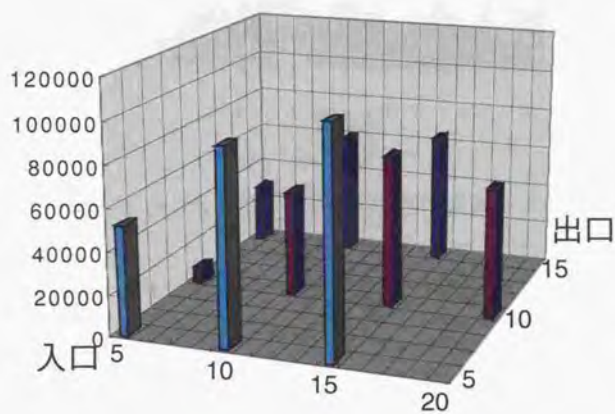


図 III-57: ロボットの全加工実行回数 No.C-6a

(9) C-6b

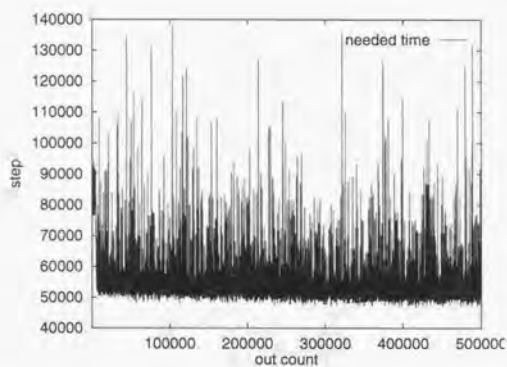


図 III-58: 50 個毎の移動所要時間+加工所要時間 No.C-6b

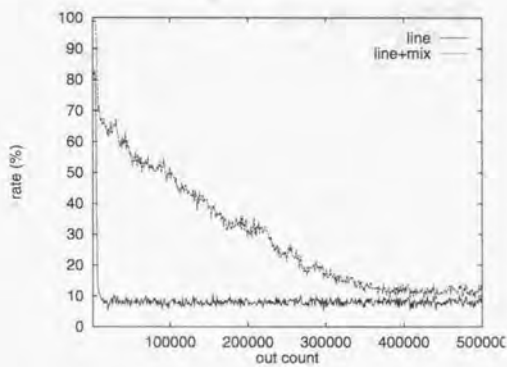


図 III-59: 1000 出庫毎の戦略比率の変化 No.C-6b

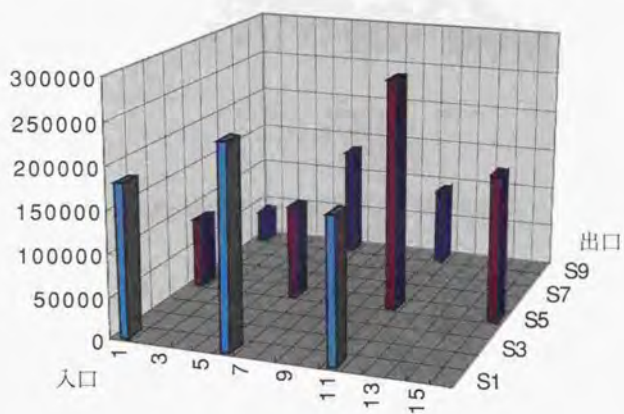


図 III-60: ロボットの全加工実行回数 No.C-6b

(10) C-7a

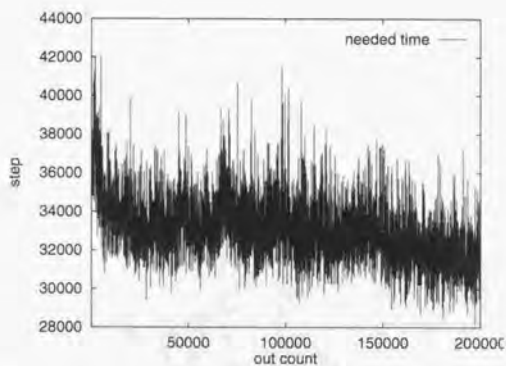


図 III-61: 50 個毎の移動所要時間+加工所要時間 No.C-7a

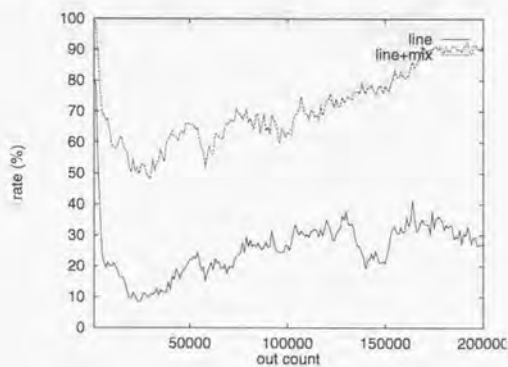


図 III-62: 1000 出庫毎の戦略比率の変化 No.C-7a

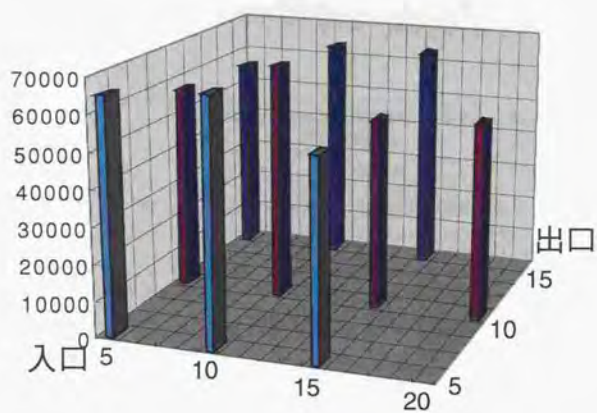


図 III-63: ロボットの全加工実行回数 No.C-7a

(11) C-7b

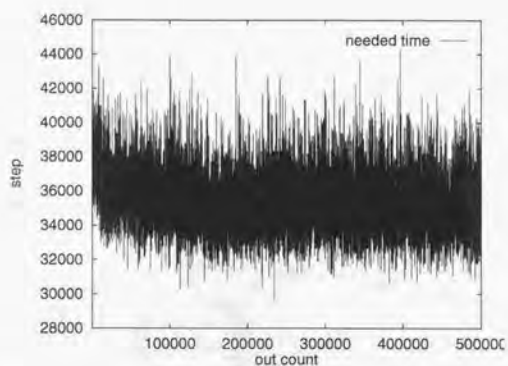


図 III-64: 50 個毎の移動所要時間+加工所要時間 No.C-7b

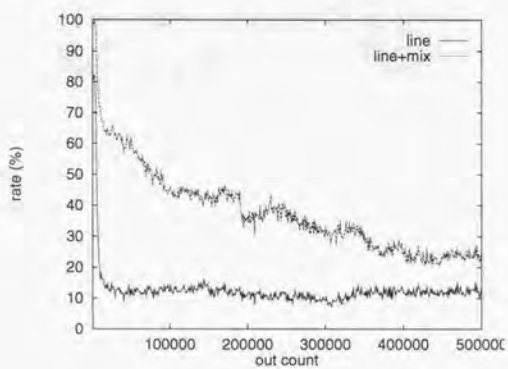


図 III-65: 10000 出庫毎の戦略比率の変化 No.C-7b

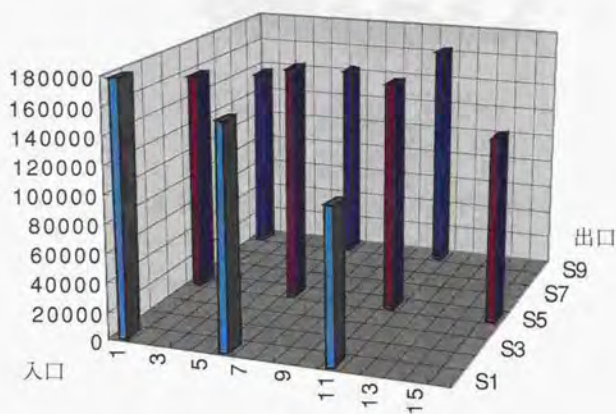


図 III-66: ロボットの全加工実行回数 No.C-7b

(12) C-8a

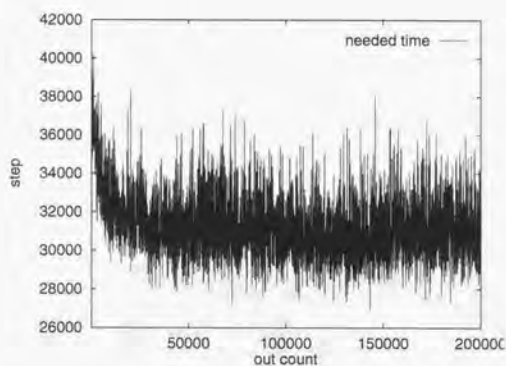


図 III-67: 50 個毎の移動所要時間+加工所要時間 No.C-8a

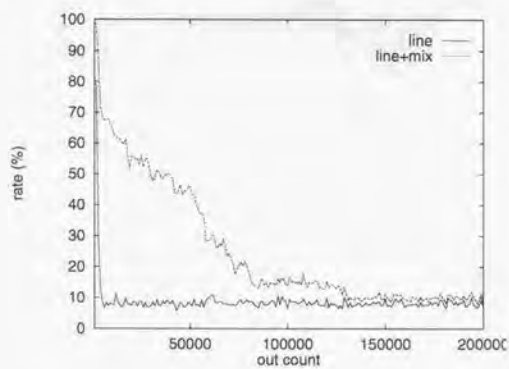


図 III-68: 10000 出庫毎の戦略比率の変化 No.C-8a

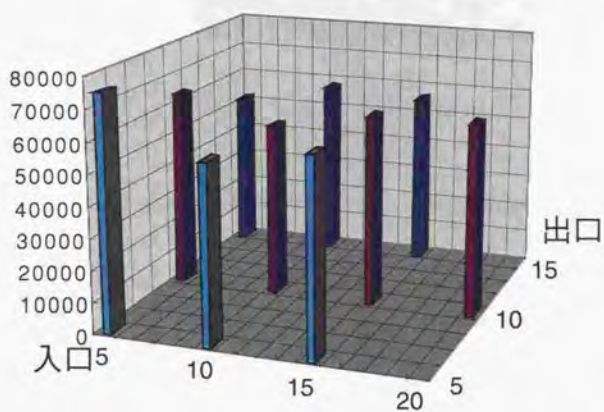


図 III-69: ロボットの全加工実行回数 No.C-8a

(13) C-8b

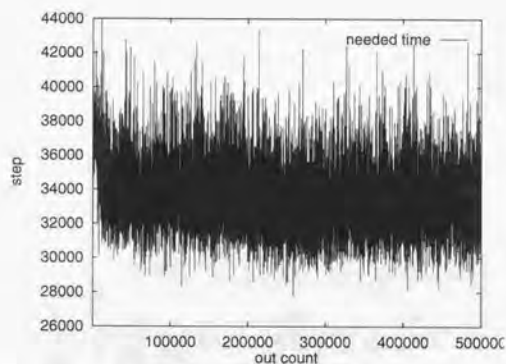


図 III-70: 50 個毎の移動所要時間+加工所要時間 No.C-8b

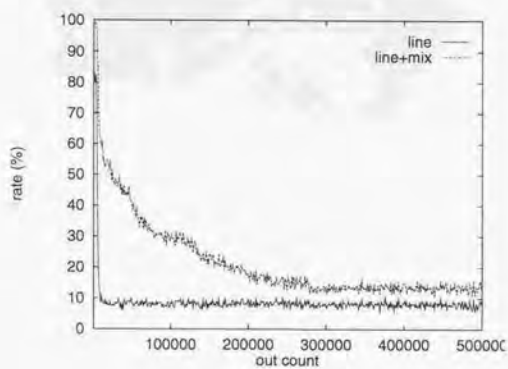


図 III-71: 1000 出庫毎の戦略比率の変化 No.C-8b

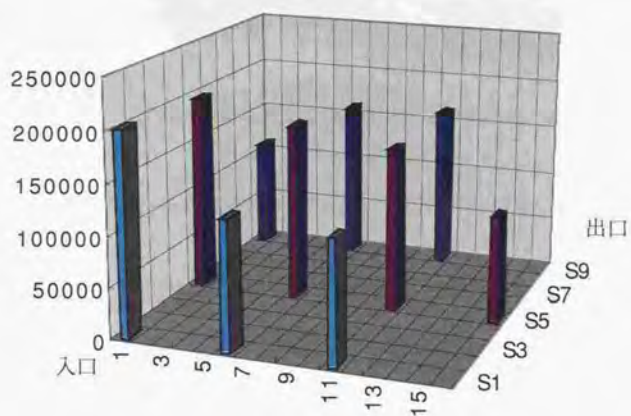


図 III-72: ロボットの全加工実行回数 No.C-8b

(14) C-9a

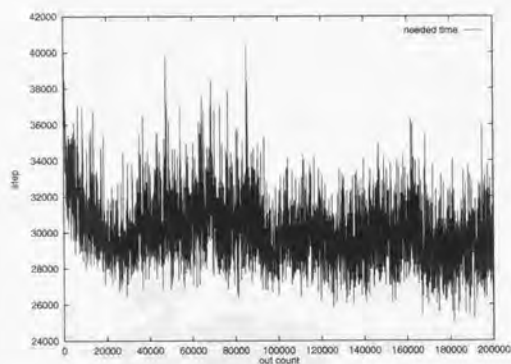


図 III-73: 50 個毎の移動所要時間+加工所要時間 No.C-9a

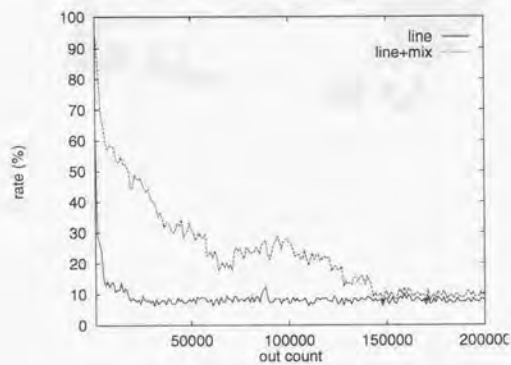


図 III-74: 1000 出庫毎の戦略比率の変化 No.C-9a

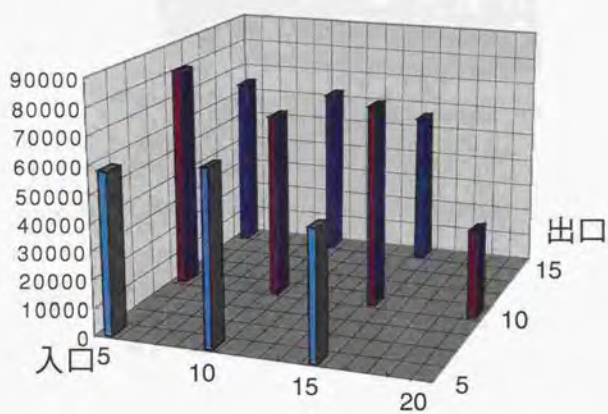


図 III-75: ロボットの全加工実行回数 No.C-9a

(15) C-9b

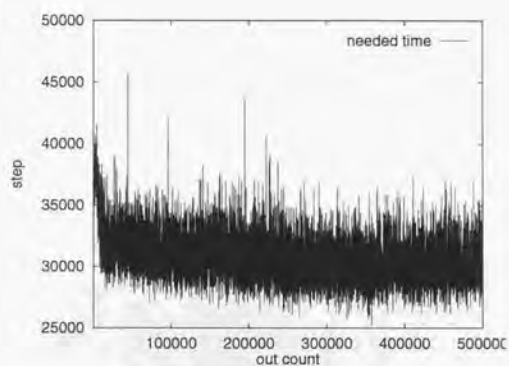


図 III-76: 50 個毎の移動所要時間+加工所要時間 No.C-9b

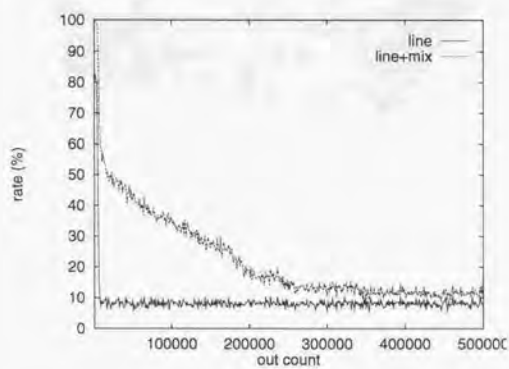


図 III-77: 10000 出庫毎の戦略比率の変化 No.C-9b

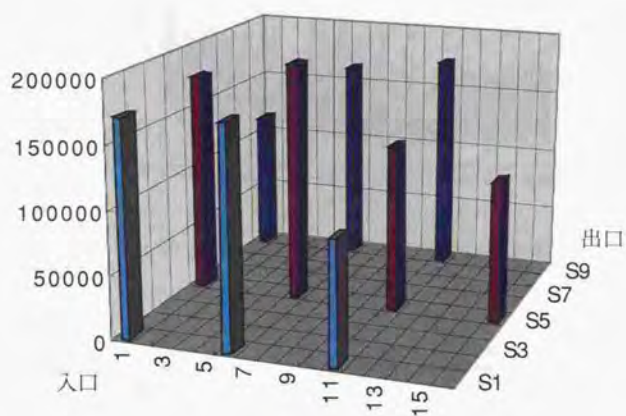


図 III-78: ロボットの全加工実行回数 No.C-9b

# IV 変種変量生産

## (1) D-2

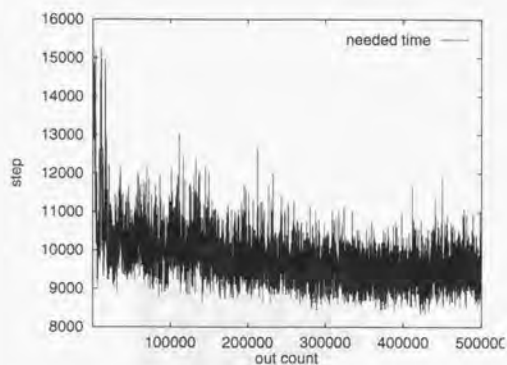


図 IV-79: 50 個毎の移動所要時間+加工所要時間 No.D-2

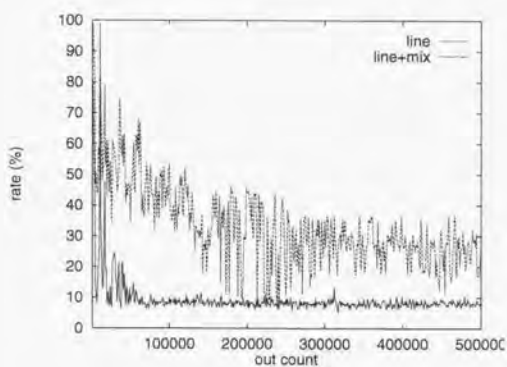


図 IV-80: 1000 出庫毎の戦略比率の変化 No.D-2

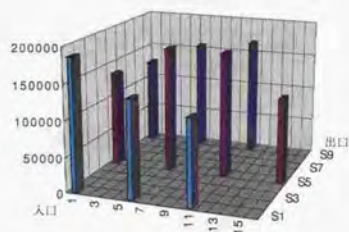


図 IV-81: ロボットの全加工実行回数 No.D-2

(2) D-4

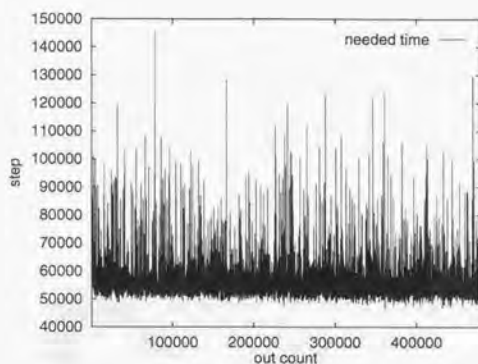


図 IV-82: 50 個毎の移動所要時間 + 加工所要時間 No.D-4

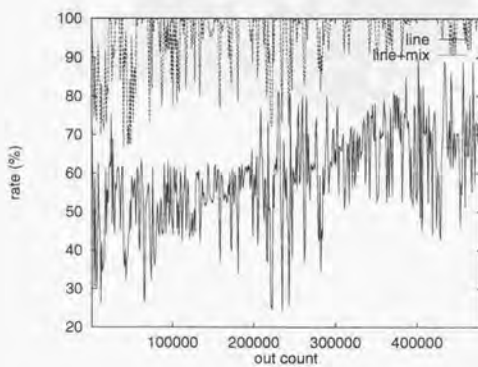


図 IV-83: 10000 出庫毎の戦略比率の変化 No.D-4

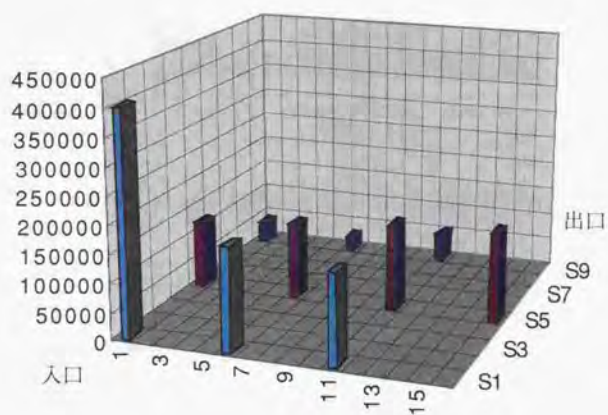


図 IV-84: ロボットの全加工実行回数 No.D-4

(3) D-5

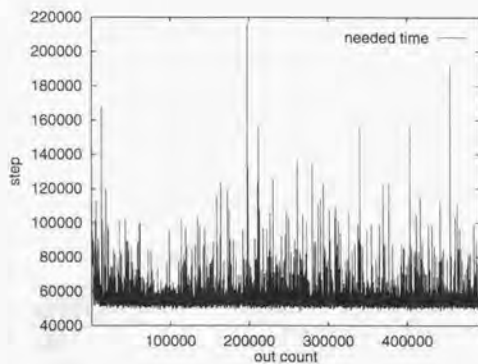


図 IV-85: 50 個毎の移動所要時間+加工所要時間 No.D-5

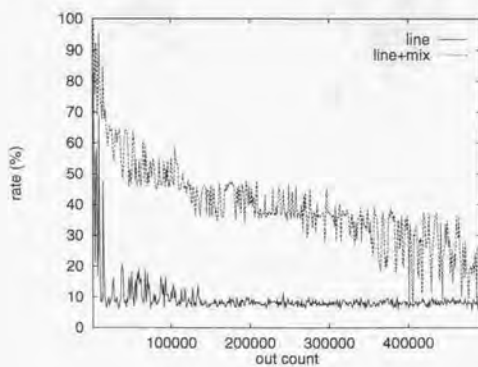


図 IV-86: 1000 出庫毎の戦略比率の変化 No.D-5

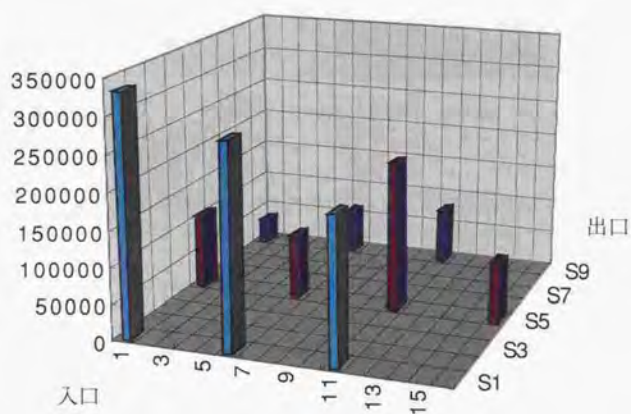


図 IV-87: ロボットの全加工実行回数 No.D-5

(4) D-6

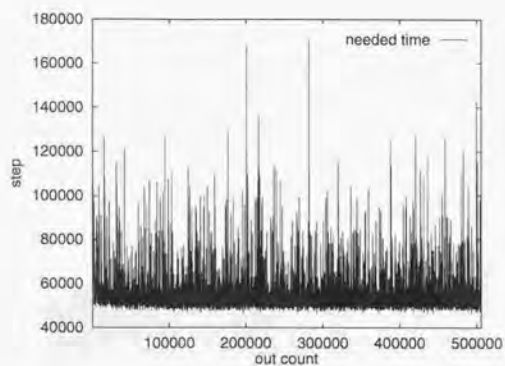


図 IV-88: 50 個毎の移動所要時間+加工所要時間 No.D-6

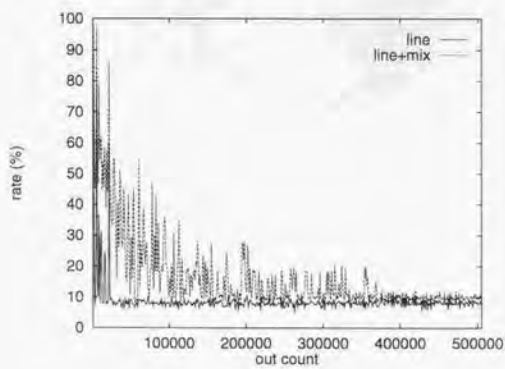


図 IV-89: 10000 出庫毎の戦略比率の変化 No.D-6

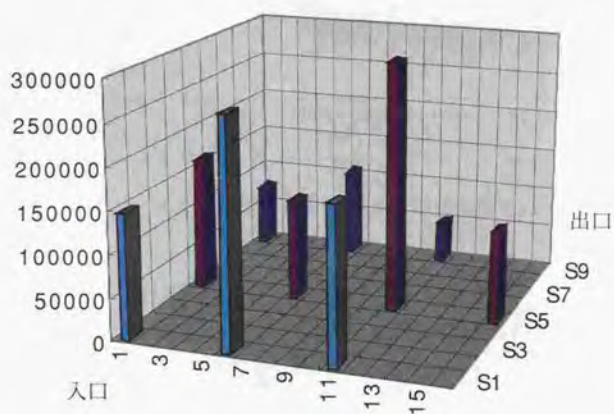


図 IV-90: ロボットの全加工実行回数 No.D-6

(5) D-7

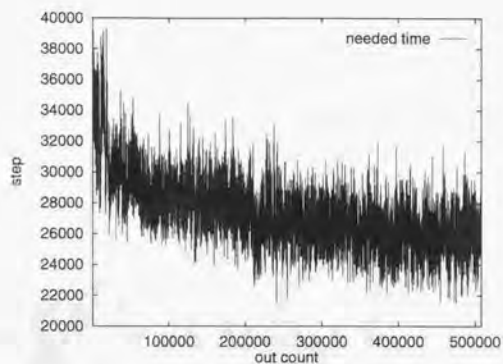


図 IV-91: 50 個毎の移動所要時間+加工所要時間 No.D-7

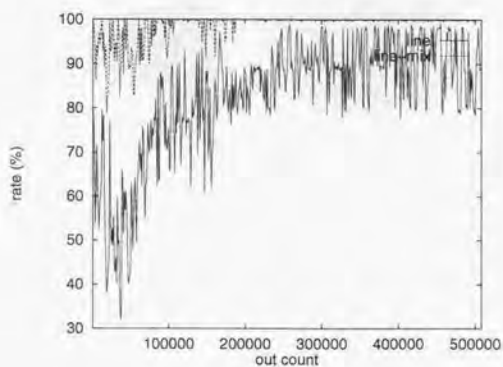


図 IV-92: 1000 出庫毎の戦略比率の変化 No.D-7

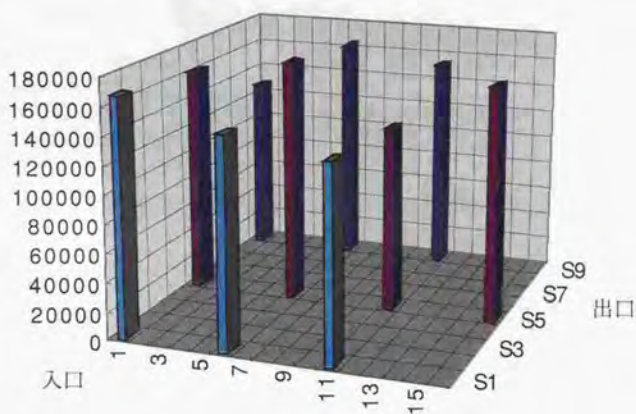


図 IV-93: ロボットの全加工実行回数 No.D-7

(6) D-8

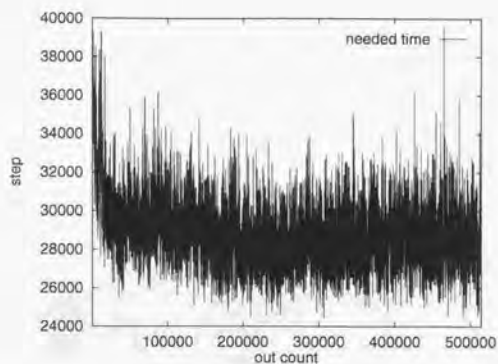


図 IV-94: 50 個毎の移動所要時間+加工所要時間 No.D-8

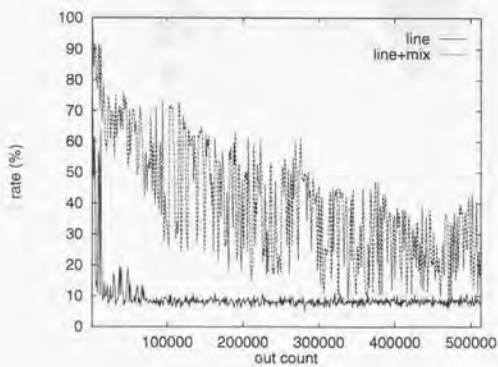


図 IV-95: 1000 出庫毎の戦略比率の変化 No.D-8

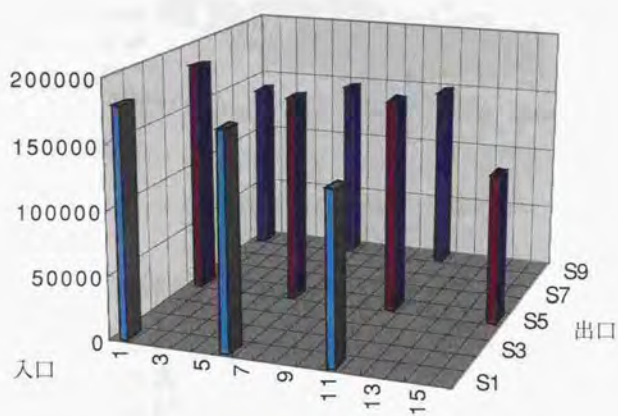


図 IV-96: ロボットの全加工実行回数 No.D-8

(7) D-9

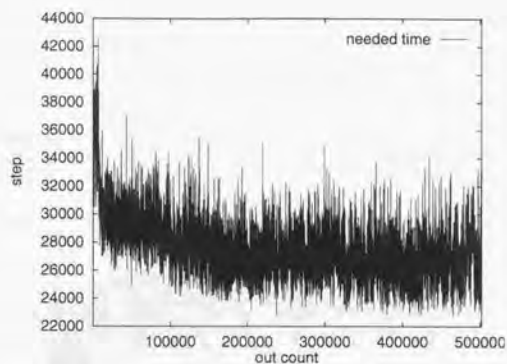


図 IV-97: 50 個毎の移動所要時間+加工所要時間 No.D-9

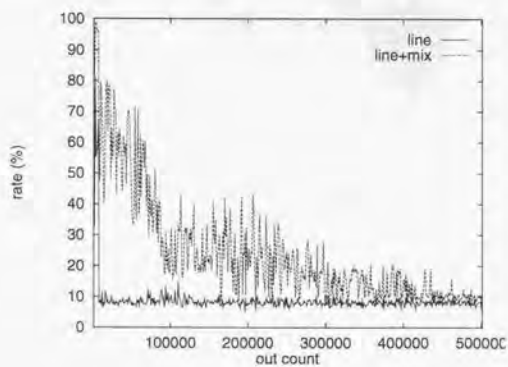


図 IV-98: 1000 出庫毎の戦略比率の変化 No.D-9

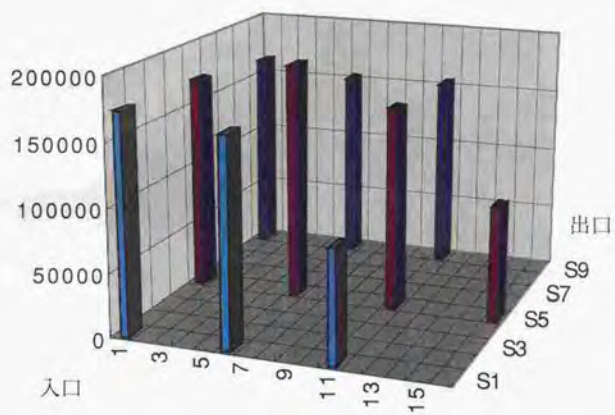
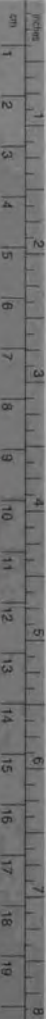


図 IV-99: ロボットの全加工実行回数 No.D-9





## Kodak Color Control Patches

© Kodak, 2007 TM Kodak

Blue Cyan Green Yellow Red Magenta White 3/Color Black



## Kodak Gray Scale



© Kodak, 2007 TM Kodak

A 1 2 3 4 5 6 M 8 9 10 11 12 13 14 15 B 17 18 19

