

第6章

強化学習を用いた自己組織的構成法

第6章

強化学習を用いた自己組織的構成法

6.1 緒言

本章では，第5章までに有効性を確認してきたポテンシャル場を用いた自己組織的構成法に対し強化学習を導入する．

6.2節では，まず生産システムの目的の分類を行い，複雑なシステム全体の目的を達成するために，自己組織化に対して強化学習を適用する方法を提案する．

6.3節では，提案手法を，段取りを考慮したスループット最大化問題へと適用する際の問題設定，各生産要素のモデル化について述べる．

6.4節では，6.3節で構築したモデルを利用して計算機実験を行い，強化学習を用いた自己組織的構成法の拡張の有効性を確認する．

6.5節で本章をまとめる．

6.2 自己組織的構成法への強化学習の導入

5章までに、ポテンシャル場を用いた自己組織的構成法を提案し、リアルタイムスケジューリング、設備レイアウト計画、ラインレス生産システムにおいてその有効性を確認してきた。提案手法では、システム全体の秩序は決定論的に与えるのではなく、局所情報のみを利用する自律要素が行動し、要素間の相互作用の結果として自己組織化する。自律要素の行動は、機械における式(2.14)やAGVにおける式(2.21)のように行動を規定するプロダクションルールとして与えられるが、これらのルールは自己組織化過程中は変化することはない。

本研究では、自律要素の行動ルール自体を自己組織化するメタルールを与え、環境に適した行動ルールを獲得することができれば、自己組織的構成法の環境適応能力が向上すると考える。行動ルールの自律的獲得による自律要素間の協調や役割分担が生成することが期待できるからである。そこで、本章では強化学習を、自己組織的構成法における要素の行動ルールの自己組織化を起こすためのメタルールとして導入する。

強化学習を利用することで、システム全体の情報を構成要素にフィードバックし、システムの構成要素の個々の行動の評価を行うことが可能となる。この評価をもとに行動ルールを自己組織化する事で、より複雑な生産システムの目的の達成を試みる。

Fig. 6.1は、Fig. 2.1中の自律要素である機械とAGVがそれぞれ学習器を持ち、学習によって獲得した行動ルールに従った行動をすることで、システム全体の秩序または構造が自己組織化する過程を表している。すなわち、各要素の行動ルールと、システム全体の秩序または構造の2段階で自己組織化が生じていると考えることができる。

以下の節では、まず生産システムにおける目的をそのレベルに関して分類し、その後、生産システムの目的と情報の部分と全体の観点から、自己組織的構成法に対して強化学習を導入することで、より複雑なシステム全体の目的を達成することが可能となることを示す。

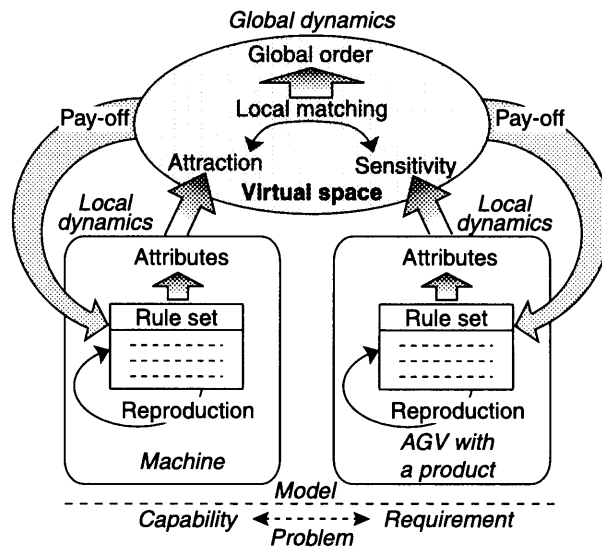


Fig. 6.1: 自己組織化への強化学習の導入：要素の行動ルールとシステム全体の秩序が自己組織化する

6.2.1 生産システムの目的分類

生産システムを設計，運用する場合の評価基準となるシステムの目的は，生産対象やシステムの構築手法によっても様々であるが，本研究においては，大きく分けて

1. 局所的目的 (local objective)
2. 大域的目的 (global objective)

に分類可能とする [82].

局所的目的とは，システムの各構成要素に与えられる目的であり，設備個々の稼働率やスループットなどの情報のように，自身で得ることができる局所的情報を利用することで，評価および達成が可能な目的のことである。

一方，大域的目的とは，対象とするシステム全体の目的のことで，例えば設備の平均稼働率やシステム全体のスループットなどの情報のように，システム全体の情報を用いて評価される目的である。大域的目的はさらに，

1. 局所的情報のみを用いて達成可能なシステム全体の目的 (L-type global objective)
2. 局所的情報のみではなくシステム全体の情報を用いて達成可能なシステム全体の目的 (G-type global objective)

に分類可能であるとする。

L-type のシステム全体の目的は、システム全体の目的がシステムの構成要素の目的の和になっているような場合であり、局所的目的の達成を重ね合わせることで達成が可能となる。

G-type のシステム全体の目的とは、システム全体の目的がシステムの構成要素の目的の和にならない場合であり、その達成のためにシステム全体の情報が必要な場合であるものとする。

6.2.2 強化学習の利用

局所的目的、および L-type のシステム全体の目的は、本研究で提案している自己組織的構成法によって比較的容易に達成可能である。しかし、G-type のシステム全体の目的は、自己組織的構成法による達成を保証できない。それは、自己組織化が、生産要求と生産能力を担う要素のポテンシャル場を介した局所的相互作用を行った結果として、生産能力と生産要求が局所的に適合することで生産を進める手法であり、すべての要素の行動が局所的情報のみに基づいて決定されているためである。そこで、G-type のシステム全体の目的を達成するためには、システム全体の情報を用いてシステム要素の局所的行動を評価・規定するような機構が必要となる。

しかしながら、システムを構成する要素の情報をすべて利用するのは、情報を収集するコストが大きくなりすぎるほか、集中管理のシステムと差異が小さくなり望ましくない。完全なシステム全体の情報ではなく、比較的容易に獲得できる部分的なシステム全体の情報を利用することで、G-type のシステム全体の目的を達成できるような手法の利用が必要である。

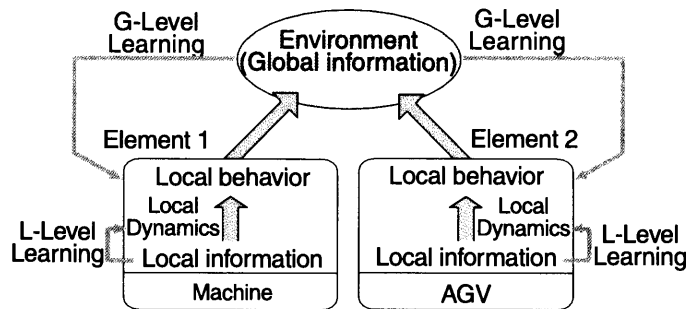


Fig. 6.2: L-level 学習と G-level 学習の概要

本研究では、自己組織的構成法に強化学習を導入し、G-type のシステム全体の目的を達成する方法を提案する。強化学習は、ゴール状態で得られる報酬にもとづき試行錯誤を通じてシステム要素の行動ルールを獲得し、環境に適応する学習制御の枠組みである [45], [83]。強化学習を利用すると、システム全体の目的が達成できたかどうかを評価して報酬か罰を与えるのみであるため、システムの構成要素の状態を明確に知る必要がないという利点がある。

学習器をもった学習エージェントが環境との相互作用を通じて獲得する報酬を決定するのに使用する情報の種類によって、学習は二つに分類可能である [82]。

1. 学習エージェントが自身の状態から報酬を与えられる場合 (L-level learning)
2. システム全体の状態から各学習エージェントに報酬を与えられる場合 (G-level learning)

L-level 学習とは、局所的情報を用いて局所的な目的を達成する学習であり、G-level 学習とは、システム全体の情報を用いてシステム全体の目的を達成する学習である。Fig. 6.2 に L-level 学習と G-level 学習の概要を示す。

6.2.3 強化学習による行動ルールの獲得

強化学習は報酬の与え方により、G-level 学習を行うことが可能であり、生産システムにおける複雑な目的、すなわち G-type のシステム全体の目的を達成するのに利用すれば有効であると考えられる。

そこで本研究では、ポテンシャル場を用いた自己組織的構成法に強化学習を導入する。具体的には、自己組織化における基本要素である各生産機械にそれぞれメタルールとして強化学習器を持たせ、

- ポテンシャル場の生成タイミング
- ポテンシャル場の種類

という行動ルールを学習過程を通して自律的に獲得していくというものである。ポテンシャル場生成に関する行動ルールを獲得することで、自己組織化手法の基本となる要素間の相互作用を、自身および環境の状態に適するように変化させることが可能となり、結果としてシステム全体の目的を達成できるものと期待できる。G-type のシステム全体の目的関数を達成する G-level 学習を実現するために、局所的な機械自身の情報による評価と、システム全体の情報による評価を行う。

現在まで種々の強化学習法が提案されているが、本研究ではクラシファイアシステム [84, 43, 85] を利用する。クラシファイアシステムはルールの探索に遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm: GA) を用いた経験強化型の強化学習法であり、Q-Learning [45] に代表される Dynamic Programming を起源にもつ環境同定型の学習法とは違い、非マルコフ的な環境においても比較的効率よく学習ができるといわれる [86]。

本研究では、生産システムを自律エージェントから構成されるマルチエージェントシステムとしてモデル化しているため、たとえ環境変動が起こらずシステム全体の目的が学習期間を通じて一定であったとしても、各エージェントの行動の評価が他のエージェントの行動に左右される場合があり、マルコフ性の仮定をおくことは困難である。

また、クラシファイアシステムでは、知識を *if-then* の形式のプロダクションルールとして持つので、既存のポテンシャル場を生成するルー

ル（本研究の場合は式 (2.14) で利用するプロダクションルール）として利用することが容易であり，さらに入力情報に左右されないドントケアシンボル（#）を用いることでルールが汎化できるという特徴もある．

以上の理由から，自己組織的に構成される生産システムにおいて利用するのに適切であると判断し，本研究ではクラシファイアシステムを採用する．

6.3 段取りを考慮したスループット最大化問題への適用

6.3.1 問題設定

本研究では局所的情報のみを用いては達成が困難なシステム全体の目的として、段取りを考慮したスループット最大化問題を取り上げる。強化学習を自己組織化生産システムを構成する各機械に組み込み、局所的情報を用いた評価と、システム全体の情報を用いた評価を同時に与えることで、各構成要素の局所的な振る舞いを通じてシステム全体の目的を達成することを目指している。

段取りを考慮したスループット最大化問題では、各機械において処理の種類を変更する際に一定時間の段取りが必要であるとする。この仮定のために、機械がマシニングセンタのような汎用機械であったとしても、多くの段取り替えを行っていたのでは効率的な生産を行うことが困難となる。すなわち、システム全体のスループット最大化のためには、段取り回数を最小化する必要がある。各機械が任意の種類加工を担っているだけでは最大化を達成できず、各機械がある特定の役割を果たすようになる、役割分担が生じることで効率的な生産が可能となる問題である。

6.3.2 要素のモデル化

製品

製造フロアに投入する製品は、ATYPE, BTYPE, CTYPE という3種類の加工要求がある製品とした。また、各製品はどの機械で処理されても良いものとする。

加工機械

各加工機械は、ATYPE, BTYPE, CTYPE の3種類すべての加工が可能な汎用機械であり、どの種類の加工を行っても加工時間は等しく12分であるとする。加工の種類を変更する段取り時間は10分であるとする。

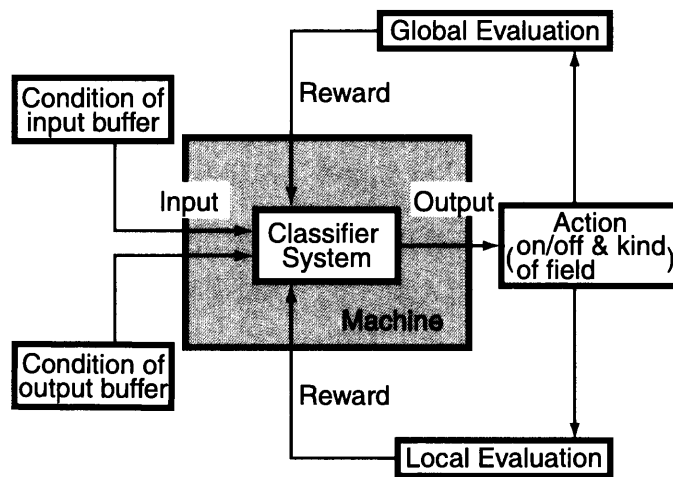


Fig. 6.3: 学習器の入力-出力と評価方法

すなわち、段取りが行われずに各機械が特定の加工を受け持ち生産を行えば、素材の移動時間を考えると1時間あたり4のスループットが達成できるはずである。

各機械は強化学習の1つであるクラシファイアシステムをもち、ポテンシャル場生成のタイミングとその種類を学習する。

学習器への入力、機械の持つインプットバッファとアウトプットバッファの状態、すなわちバッファが空いているかどうかを用いる。学習器の出力は、引力場の on/off のタイミングとその種類である。行動の評価は、機械の状態による局所的评价とシステム全体の状態による大域的评价に基づき報酬が与えられる。Fig. 6.3 に各機械が持つ学習器の入出力関係を示す。

機械が持つ学習器に利用するクラシファイアシステムは、大きく分けて実行システム、報酬分配システム、ルール発見システムの3つに分類可能である。以下では、各システムの設定に関して詳細に述べる。

実行システム 実行システムはクラシファイアシステムの核となる部分であり、*if/then* 形式の $k+l$ bit のクラシファイアと呼ばれる bit ストリングで表現されたプロダクションルールの集合である。クラシファイア C_i は

$$\text{classifier } C_i = \langle c_i^k / m_i^l \mid \text{strength}_i \rangle \quad (6.1)$$

と表現できる．ここで， c_i^k は入力部分を表すビットストリングであり， $\{0, 1, \#\}^k$ である． m_i^l は，出力部分を表すビットストリングであり， $\{0, 1\}$ である．状態ストリングに含まれる # は dont care 記号と呼ばれ，0, 1 どちらの状態にも適合する． strength_i はクラシファイアの強度である．

今回の適用例では， $k = 2$ ， $l = 3$ であり，各ビットの表す意味は以下の通りである．

$$c_1 : \text{input buffer} : \{1 : \text{onestock}, 0 : \text{empty}\} \quad (6.2)$$

$$c_2 : \text{output buffer} : \{1 : \text{onestock}, 0 : \text{empty}\} \quad (6.3)$$

$$\begin{aligned} m_1 \& m_2 : \text{field from input buffer} : \{1, 0 : \\ & \text{ATYPE}, 0, 1 : B, 1, 1 : C, 0, 0 : \text{stop}\} \end{aligned} \quad (6.4)$$

$$\begin{aligned} m_3 : \text{field from output buffer} : \\ \{1 : \text{generate}, 0 : \text{stop}\} \end{aligned} \quad (6.5)$$

各クラシファイアの初期強度は 100，クラシファイアの数 は 100 とした．
 計算機実験は時間単位 1 秒を 1 ステップとして進むが，各機械は，状態をシミュレーション内の時間単位で 1 秒毎に観測し， $\min(t_{im}, t_{max})$ の時間間隔で行動を生成する．ここで， t_{im} は前回行動を起こした時点から現在までの時間であり， t_{max} は最大待ち時間を表す定数であり，本実験では 10 分とした．

報酬分配システム 強化学習では、行動の結果は環境から報酬としてクラシファイアシステムに与えられる。行動の結果が正しければ正の報酬が、行動が間違っていれば罰（負の報酬）が与えられる。

具体的には、各機械は素材を AGV から得た時、および加工終了した素材を AGV に排出した時に局所的評価として報酬を受け取る。それ以外のタイミングで AGV を引き寄せる行動をすると罰を受ける。また、大域的评价として、1時間毎の生産量が最大生産量を上回っていれば報酬、過去1時間の生産量を下回っていれば罰を与える。

環境から得た報酬または罰は、クラシファイアシステム内の各クラシファイアへと分配される必要があるが、局所的評価では Bucket Brigade Algorithm (BBA) を利用し、大域的评价に関しては、大域的评价では Profit Sharing Plan (PSP) を用いた [87]。

BBA は以下のような式をもとに報酬を分配する。

$$S_i(t+1) = S_i(t) - C_{bid}S_i(t) - C_{tax}S_i(t) + C_{bid}S_j(t+1) + R_L(t), \quad (6.6)$$

ここで、 $S_i(t)$ は時刻 t におけるクラシファイア C_i の強度であり、 C_{bid} は賭け値率で C_{tax} は税率である。各パラメータは初期値として、100, 0.1, 0.01 に設定した。 R_L は環境から得た報酬である。

大域的评价で得た報酬は以下のような PSP で分配する。

$$S_i(\tau+1) = S_i(\tau) + f(n)R_G(\tau), \quad (6.7)$$

$$f(n) = \frac{1}{2^n} \quad (6.8)$$

ここで、 τ はエピソードと呼ばれる学習の試行時間間隔であり、今回は大域的评价を行う時間間隔 T と同じであるとした。 n は前回ルールが発火してからの時間間隔である。 $R_G(\tau)$ は報酬を表す。

ルール発見システム クラシファイアシステムは、環境に適合した強度の高いルールを残していくべきである。さらにクラシファイアシステムの中のルールの多様性を維持しつつも、局所的最適解からの脱出のために新たなルールを生成していかなければならない。クラシファイアシステムでは、このようなルール発見システムの原理として遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm:GA) を用いる。クラシファイアシステムで利用される GA の遺伝的操作は、一点交差および 1 つの遺伝子座に対して突然変異を与える点は Simple GA と同様であるが、Crowding 法と Generation Gap を導入してルールの多様性を維持させている [43]。

Crowding 法とは、ルールの入れ替えをする際に、入れ替えの対象となるルールの集団の中から Crowding サイズの数だけルールを抜き取り、抜き取ったルールの中で新たに投入するルールに最もよく似たルールを削除するというものである。削除されなかったルールは再びルールの集団の中に戻される。このような過程は、大きな強度を持ったルールによく似たルールが、集団内に急速に広がってしまいルールの多様性が失われるのを防ぎ、クラシファイアシステムのルール集団の多様性を維持するために用いられる。

また、Generation Gap とは、親ルールの集団から子ルールの集団を生成する時に、集団すべてのルール入れ替えてしまうのではなく、Generation Gap の比率だけを入れ替えるものである。このように Generation Gap を導入すると、学習過程において獲得したルールが、遺伝的操作によって破壊されにくくなり、ルールの集団の変化が急激に起こらないようにする効果がある。

以上のような GA の遺伝的操作は 1 時間毎に行い、交差率、突然変異率、Generation Gap 率、Crowding サイズはそれぞれ {0.9, 0.01, 0.2, 3} と設定した。

AGV

AGV は ATYPE, BTYPE, CTYPE すべての製品を同時に 1 つだけ搬送することが可能であるとする。製品を搬送中でない場合は製品投入口と、機械が生成する引力場を感知し、場の生成源へと移動する。製品を搬送中

の場合は、機械か製品回収口が生成する引力場を感知して移動する。これらポテンシャル場を感知して移動する行動ルールは、2章のモデルと同様である。

製品投入・排出口

前工程から到着した製品は、製品投入口から製造フロアに投入される。一方、加工が終了した製品は製品搬出口から次工程へと送られる。製品投入口・製品搬出口のモデルは2章と同様のモデルを用いている。

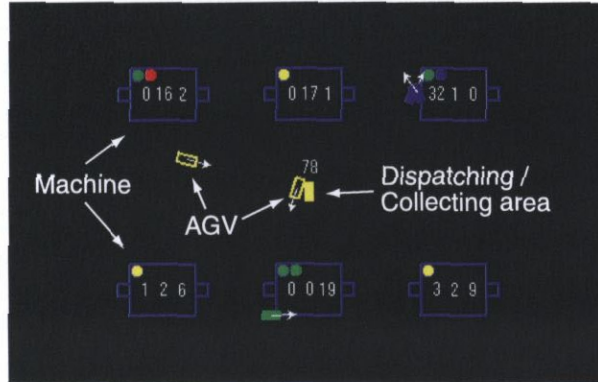


Fig. 6.4: 製造フロアの概要

6.4 実験結果と考察

前節において述べた，製品，加工機械，AGV，製品投入口，製品排出口のモデルを用いて計算機実験を行った．以下に結果について述べる．

6.4.1 実験設定

Fig. 6.4 は実験対象とした製造フロアの概要を表している．

製造フロアには6台の加工機械（IDをそれぞれ‘0’～‘5’とする），5台のAGVがある．すなわち，すべての機械で段取りが行われずに各機械が特定の加工を受け持ち生産を行えば，素材の移動時間を考えると1時間あたり最大24のスループットが達成できるはずである．

6.4.2 スループット最大化過程

Fig. 6.5 のグラフは，実験開始後100時間におけるフロア全体のスループットの遷移を表している．実験初期の段階では各機械が学習を始めたばかりではほぼランダムに引力場の on/off を行い，役割分担も行われていない．そのため段取りの仮定のためにフロア全体のスループットは15個前後しか達成していない．

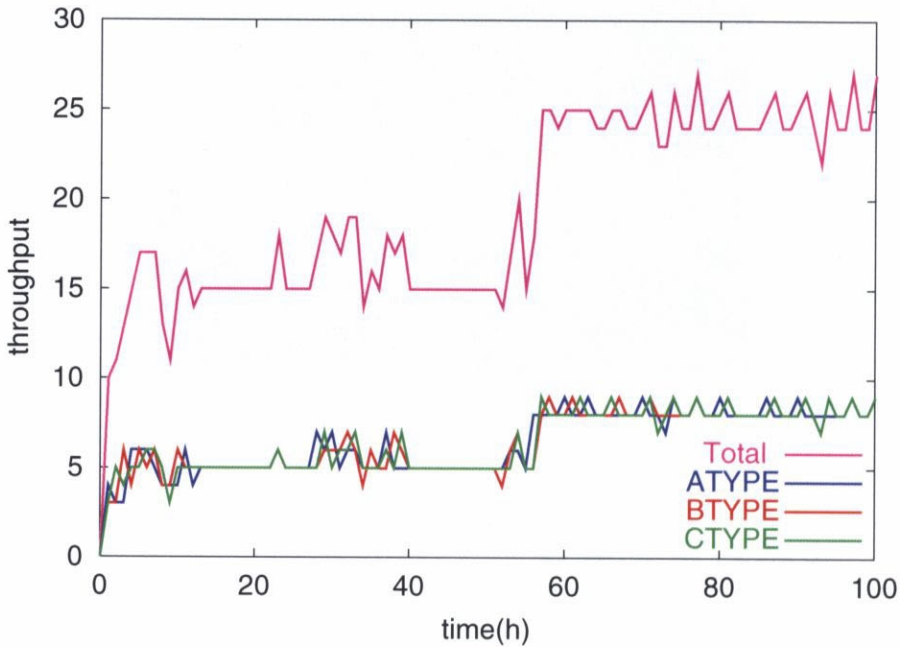


Fig. 6.5: システム全体のスループットの変遷

実験が進み各機械の学習が行われることにより、実験開始後約60時間後には最大スループットである24個を達成し、その後ほぼ収束している様子が観察できる

．各加工TYPE別に見ても2台で作業を行った場合の最大スループット8を達成している．収束後は、加工機械‘0’、‘2’がATYPEを、‘1’、‘5’がBTYPEを、残りの2機械がCTYPEを加工するという役割分担が確認できた．

Fig. 6.6, Fig. 6.7は、各機械のスループットの推移を示している．システム全体のスループットがほぼ収束した実験開始後約60時間以降は、各機械が特定の作業を担当している様子が観察できる．

Fig. 6.6(a)より、加工機械‘0’は実験開始後しばらくはATYPE, BTYPEという2つの作業を行っているが、しばらくするとATYPE専用機となり最終的にもATYPE担当で収束している．

Fig. 6.7(b), Fig. 6.7(c)より、加工機械‘4’加工機械‘5’は、ほぼ初期状態からそれぞれCTYPE, BTYPEを作業する機械となっており、最終的にも両担当で収束している．

Fig. 6.7(a) より，加工機械‘3’は，実験開始約 50 時間後までほぼどの作業もしていなかったが，開始後 50 時間前後になると CTYPE を処理するルールを獲得し，その後は CTYPE の担当で収束している様子が観察できる。

Fig. 6.6(c) より，加工機械‘2’は実験開始後しばらくは ATYPE，BTYPE という 2 つの作業を交代で行っているが，しばらくすると ATYPE 専用機となり最終的にも ATYPE 担当で収束している。

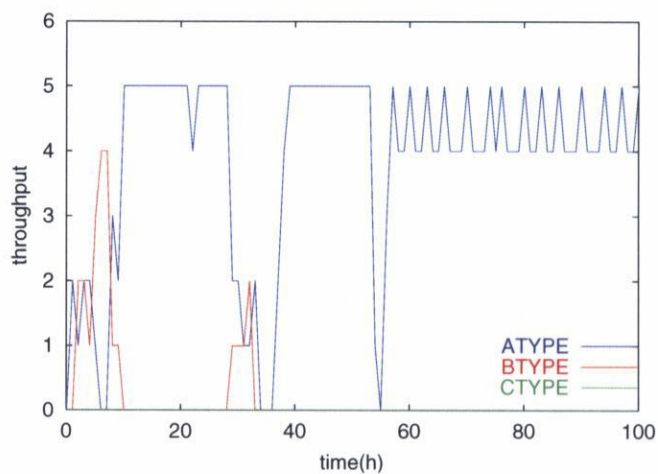
Fig. 6.6(b) の加工機械‘1’は，実験開始後しばらくの間は，BTYPE も少し作業しているものの，CTYPE の作業を主に行っていた。実験開始後約 50 時間後には，BTYPE を作業する割合が増え始め，最終的には BTYPE 専用の機械となり，加工機械一台当たりの最大スループットである 4 を達成している過程が観察できる。

加工機械‘1’のこのような振る舞いは，実験開始後しばらくは機械‘1’とシステム全体の目的が上手く適合していなかったためと考えられる。その後，局所的評価だけではなく，大域的評価において環境から罰が与えられることにより，その行動を CTYPE の製品を呼び寄せる引力場から，BTYPE の製品を呼び寄せる引力場へと変更していったものと推測できる。その結果として，システム全体の目的であるスループットの最大化が達成できたものと考えられる。

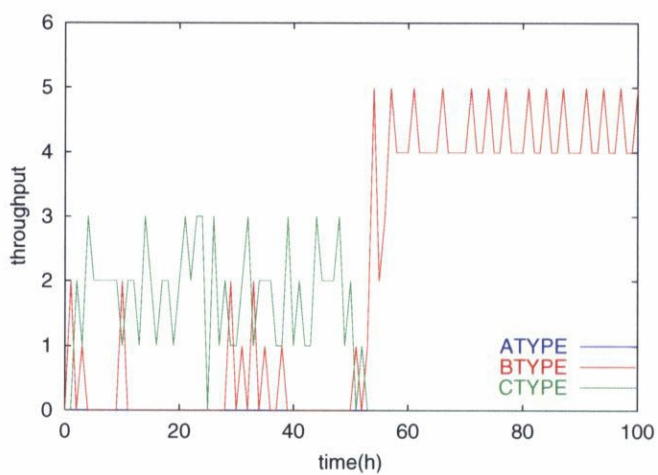
6.4.3 環境変動への適応過程

強化学習を用いた自己組織化手法の環境変動への適応性を確認するために，注文内容を実験途中で変更する計算機実験を行った。具体的には，実験初期では注文内容が前節と同様に ATYPE，BTYPE，CTYPE それぞれ同量であったが，実験開始後 100 時間後に注文内容が ATYPE，BTYPE のみに変更されるとして，実験を行った。その他の実験設定は前節の実験と同様である。

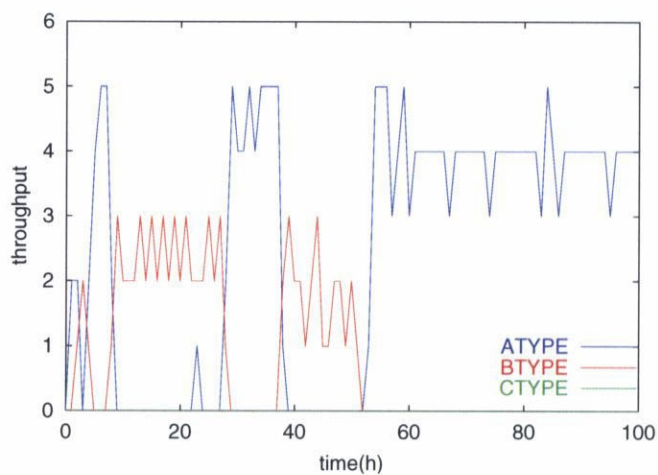
Fig. 6.8 は，実験開始後 200 時間のシステム全体のスループットの変遷を表している。実験開始 100 時間後の注文内容の変動前までは，システム全体の最大スループットである 24 を達成しているのが分かる。各加工



(a) 機械 '0'

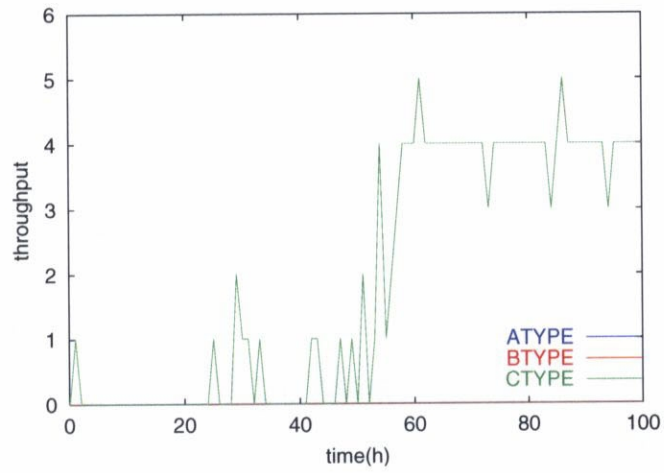


(b) 機械 '1'

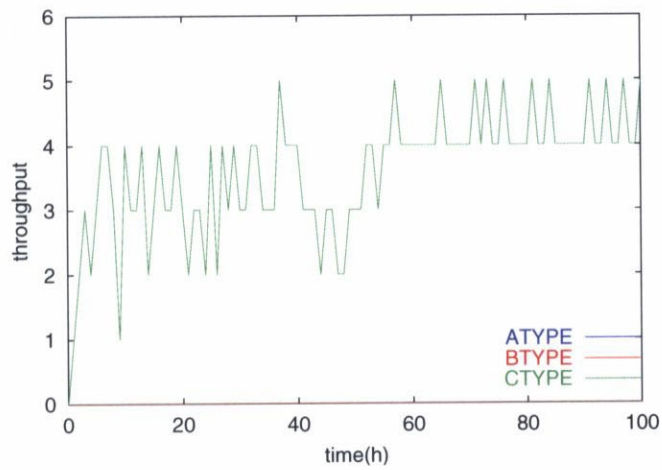


(c) 機械 '2'

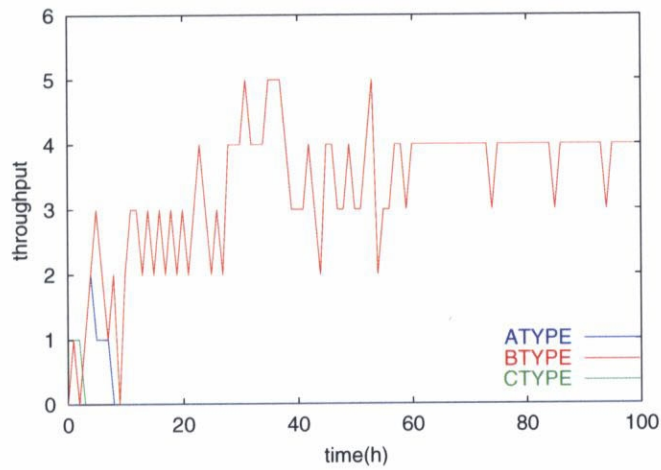
Fig. 6.6: 機械 '0', '1', '2' のスループットの変遷.



(a) 機械 '3'



(b) 機械 '4'



(c) 機械 '5'

Fig. 6.7: 機械 '3', '4', '5' のスループットの変遷.

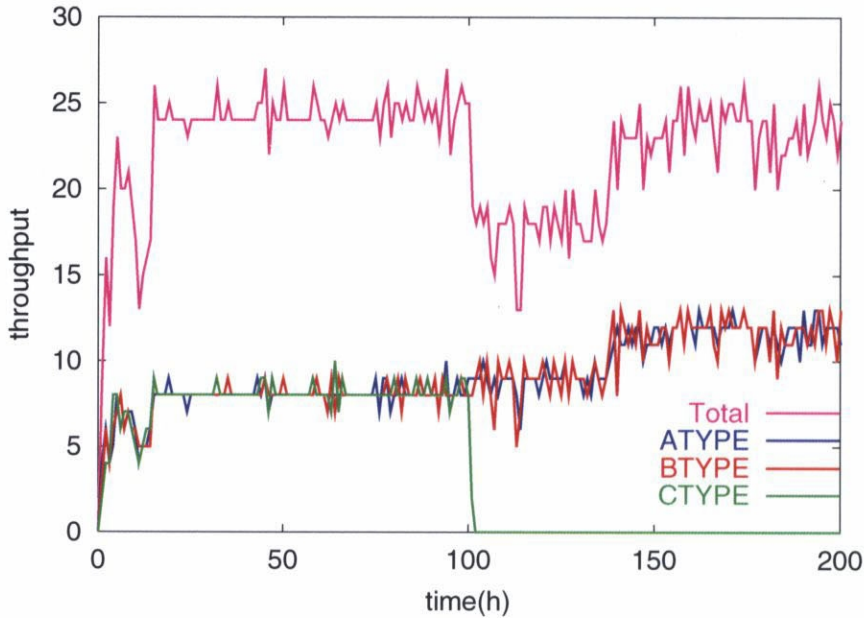


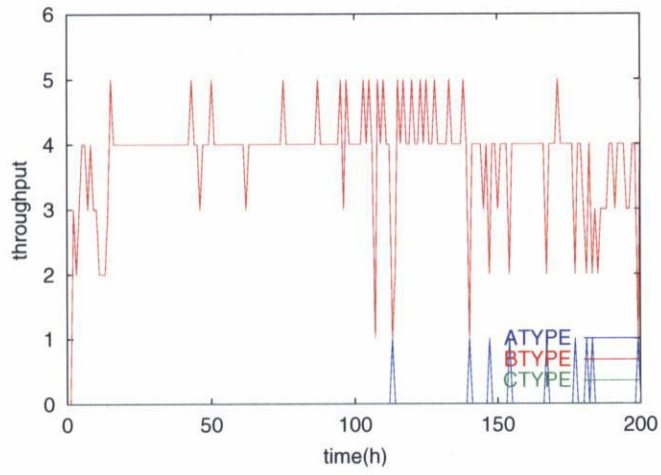
Fig. 6.8: システム全体のスループットの变遷：実験開始後 100 時間の時点で注文内容が变化.

TYPE 別に見ても、それぞれ機械 2 台での最大スループットである 8 を獲得している。この時の各機械の役割分担は、加工機械 '1'、'2' が ATYPE を、加工機械 '0'、'4' が BTYPE を、加工機械 '3'、'5' が CTYPE 専用の機械となっているというものであった。

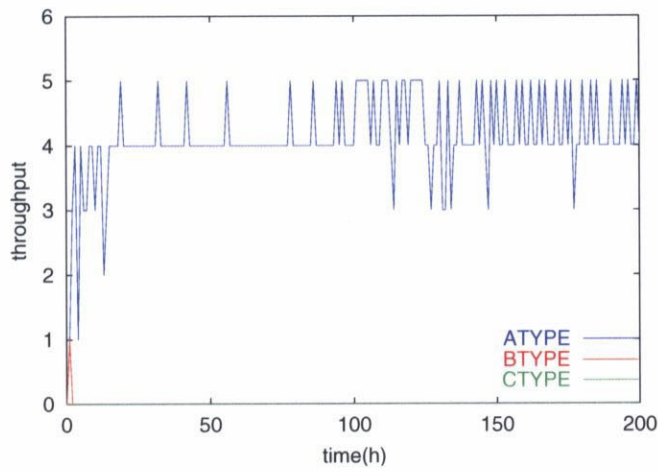
実験開始 100 時間後の注文内容の変更後は、CTYPE の製品投入が無くなった分、しばらくの間スループットが低い状態が続いている。しかし、約 150 時間後には再びシステム全体の最大スループット 24 にほぼ到達している。ATYPE、BTYPE のスループットを見ても、6 台の加工機械のうち 3 台ずつで作業を行った場合の最大スループット 12 を達成していることがわかる。

Fig. 6.9, Fig. 6.10 は、環境変動前後の各機械のスループットの変遷を表している。図より、加工機械 '0'、'1'、'2'、'4' は環境変動前後で担当は変わらずに、それぞれ BTYPE、ATYPE、ATYPE、BTYPE を処理している。

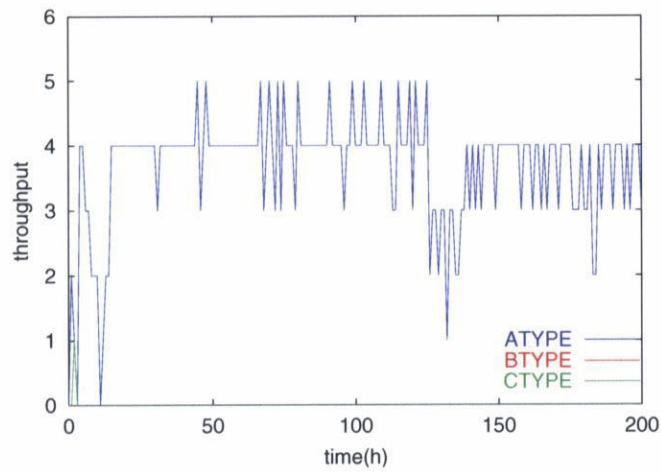
一方、CTYPE の加工を行っていた加工機械 '3'、'5' は、注文内容の変



(a) 機械 '0'

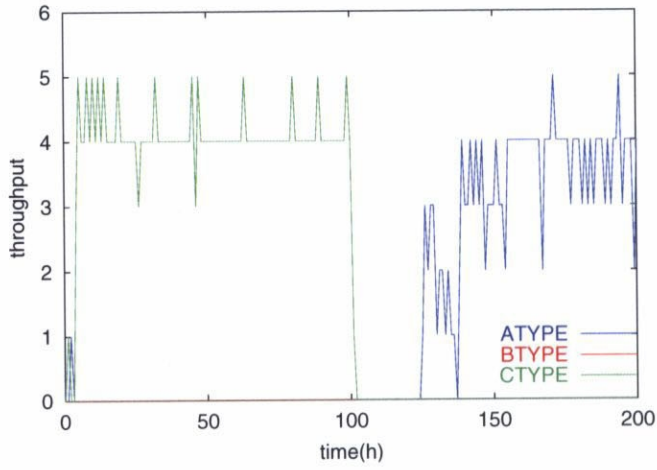


(b) 機械 '1'

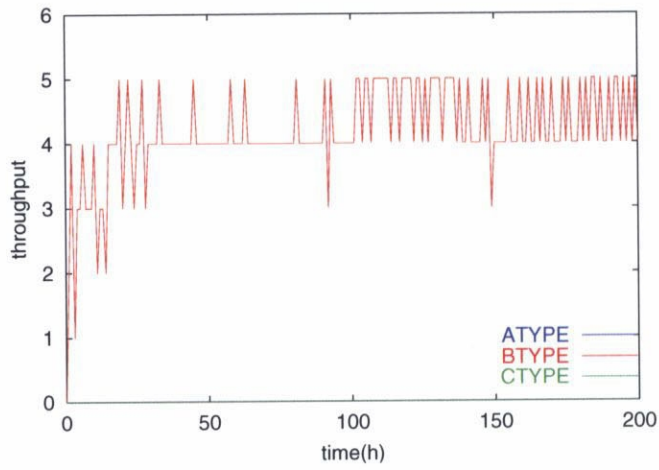


(c) 機械 '2'

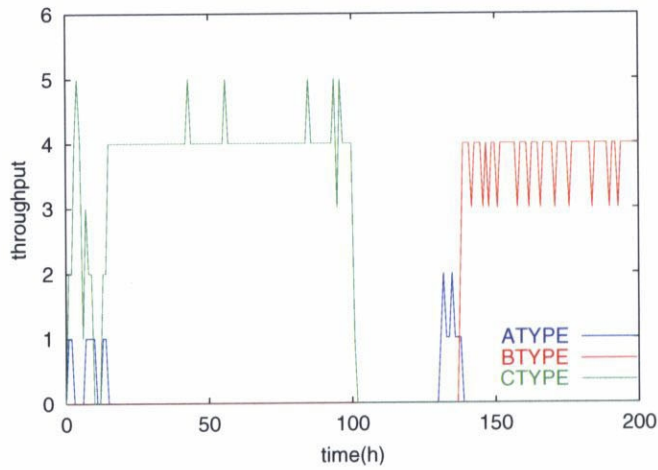
Fig. 6.9: 環境変動前後の機械 '0', '1', '2' のスループットの変遷.



(a) 機械'3'



(b) 機械'4'



(c) 機械'5'

Fig. 6.10: 環境変動前後の機械'3', '4', '5'のスループットの変遷.

更前までは、両機械とも順調に CTYPE の加工を行い、機械 1 台あたりの最大スループットである 4 を獲得している。しかし、注文内容が変化し、CTYPE の製品の投入が行われなくなると、両機械ともに加工を停止してしまっている。これは、両機械のクラシファイアリストの中に、ATYPE または BTYPE の製品を引き寄せるルールが無かったためであると考えられる。

加工機械 '3', '5' は環境変動後に再び学習を行い、実験開始後約 125 時間の時点で両機械とも ATYPE の加工を担当しだしている。しかし、これでは 4 台の機械で 3 台分の仕事を分けることになり、最大スループットまでは到達しない。さらに実験開始後約 175 時間ほど経過すると、加工機械 '5' が BTYPE を担当し始めることで機械 '3', '5' とともに 1 台あたりの最大スループットである 4 を獲得するに至っている。

機械 '3', '5' の以上のような振る舞いにより、ATYPE 担当機械が '1', '2', '5', BTYPE 担当機械が '0', '3', '4' という新たな役割分担が生じることで、システム全体の最大スループットに再び到達する事を観察し、環境変動への適応過程を確認した。

6.5 結言

本章では、生産システムにおける自己組織化手法に強化学習を導入し、拡張する手法を提案した。

生産システムの目的を、目的の範囲とそれを達成するのに必要な情報の範囲の観点から分類した。そして、システム全体の目的が構成要素の目的達成の重ね合わせとならない複雑な問題に対して、強化学習を利用する手法を提案した。クラシファイアシステムを自己組織化手法に導入する手法について述べた。

システム全体の情報を利用しなければ達成が困難なシステム全体の目的の一例として、段取りを考慮したスループット最大化問題を取り上げ計算機実験を行ったところ、各機械の役割分担およびスループット最大化の達成を観察した。また、実験途中で生産システムの外部環境の変動にあたる注文内容を変更したところ、役割分担の再組織化が発生し、結果として再び最大スループットを獲得する過程を観察した。

以上の結果より、自己組織化に対して強化学習を導入し、手法の拡張を行う提案手法の有効性を確認した。

次章では、本研究の結論を述べる。

第7章

結論

第7章

結論

本論文の各章は、以下のとおりにまとめることができる。

第1章では、本研究の背景と目的を明らかにした。これからの生産システムは、生産システムを取り巻くシステム外部の環境の複雑化と、それに起因するシステム内部の複雑化に上手く適応しながら、市場の要求に応じた製品を、迅速に生産し供給していく必要がある。これらの要件を満たすためには、変種変量生産を行う必要があるが、現在製造業において主流となっている統合型CIMを用いた生産システムでは、そのシステム構造が持つ「堅さ」のために、市場の変化に対して適応が困難であるため、新しい生産システムの開発が必要となる。本研究では、生産システムを自律分散システムとして構築するアプローチを採用し、その中でも最も環境への適応能力が優れていると考えられる生物の優れた特徴を積極的に取り入れる生物指向型生産システムのコンセプトに基づき、生産システムの自己組織的構成法を提案した。

第2章では生産システムの自己組織的構成法に関して述べた。本研究における生産システムの自己組織的構成法とは「生産システムを自己組織化を用いて構成する方法」であり、自己組織化を「システムを構成する要素間の相互作用により、システム全体の秩序または構造が創発する過程」と定義した。ここで、システム全体の秩序または構造とは、時間的構造または空間的構造であると考えることができる。それを生産システムに用いる場合、「生産能力と生産要求が局所的に適合した結果、生産システ

ムにおける秩序または構造が創発する過程」と考えられることを示した。次に自己組織化を引き起こす原動力となる要素間の相互作用を、ポテンシャル場によって実現する自己組織化のモデル化手法に関して述べた後、それを生産システムに対して適用する方法を述べた。つまり、機械が生産能力に対応した引力場を生成し、一方 AGV が搬送中の製品の生産要求に対応した引力場を感知し、生成源へと移動する。最終的には AGV が機械へと辿り着き生産が行われるというものである。提案手法のモデル化を行うとともに、提案手法の特徴である時間的計画と空間的計画の同時性により、従来個別に行われてきた計画問題が同時に扱えるという特徴に関して述べた。

第3章では、複雑化する生産環境に適応可能な生産スケジューリング手法として、自己組織的構成法を用いたスケジューリング手法を提案した。提案手法は、「自律分散型」かつ「リアルタイムスケジューリング」手法の1つであり、さらに「搬送システムを考慮した」スケジューリング手法であることを示した。多層プリント基板穴あけ工程に提案手法を適用し、計算機実験を行ったところ、自律的に生産が進む様子を観察するとともに、機械の故障という環境変動に適応する様子を観察した。また、既存のリアルタイムスケジューリング手法の一つである SPT (Sortest Processing Time) ディスパッチングルールとの比較実験を行った結果、同等以上の生産性を有することを確認した。さらには、自己組織化における自律要素として人間を含むことができる示すために、自己組織化と仮想空間を統合する方法について述べた。計算機内に構築した仮想空間内においてエンジニアがシステムの一部として取り込まれ、人と工場とのリアルタイムの相互作用が可能となることを示した。

第4章では、自己組織的構成法を用いた設備レイアウト計画手法を提案した。組合せ最適化問題としてレイアウト計画を行うことの困難さを指摘し、リアルタイムでスケジュールを立案し、製品を流しながらレイアウト計画を行う提案手法について述べた。単品種および多品種半導体生産システムを対象に行った計算機実験では、自己組織化により得られるレイアウトが、製品のプロセスフローと設備の設定を良く反映し、設備が同心円状に配置されることを確認した。また、獲得したレイアウトは、

フロア内における制約条件もよく反映した物であることがわかった。さらに、熟練者により設計された既存のレイアウトとの比較実験では、動線長さにおいて提案手法が良い、TAT (Turn Around Time), スループット, WIP (Work In Process) 数に関しても提案手法は同等以上の性能を有することが分かった。そして、提案手法はレイアウト設計における工数およびコストの削減にも有効であることが分かった。

第5章では、第3章と4章をより発展させ、複雑化する生産環境に適応可能な生産様式の1つとして、製造フロア内の全ての生産要素が移動しながら生産が進捗するラインレス生産システムを提案し、多品種生産の実現、設備故障等の環境変化への適応性などの特徴を明らかにした。ラインレス生産システムを構築するため、自己組織的構成法を用いて自動車溶接工程のモデル化を行った。提案モデルにもとづき計算機実験を行った結果、すべての要素が移動しながら生産が進捗する過程を確認した。また、計算機実験によりライン型生産システムとの比較を行った結果、多品種生産環境下での生産性、設備故障への適応性に関して有効性があることが分かった。さらに、ラインレス生産システムを実現するための必要フロア面積、コスト評価に関しても有効であると考えられる。さらに、製造対象となる製品の品種数と溶接ロボットの平均稼働率および総生産台数に関しての比較を行った結果、4品種を越えるような多品種生産の場合、ラインレス生産システムの有効性が確認できた。

第6章では、自己組織的構成法において利用する局所要素の行動ルール自体を自己組織化するメタルールとして強化学習を導入した。そうすることで、より複雑な、達成が困難なシステム全体の目的を達成することが可能となる。まず、生産システムにおける生産の目的を、システムの構成要素における局所的目的と、システム全体の目的に分類し、システム全体の目的を達成するためには、システム全体の状態をシステムの構成要素へとフィードバックすることが必要であると述べた。そして、強化学習を導入することにより、システム全体の目的が構成要素の目的達成の重ね合わせとならない複雑な問題への適用を可能とする手法を提案した。提案手法を段取りを考慮したスループット最大化問題へと適用し、計算機実験を行ったところ、各機械の役割分担およびスループット最大

化の達成を確認した。また、実験途中で生産システムの外部環境の変動に当たる注文内容を変更したところ、役割分担の再構成がおり、結果として再び最大スループットを獲得する過程を確認した。

本論文中の各章の位置づけを以下にまとめる。

第1章において、本研究の背景として生産環境の複雑化に適應できる新しい生産システムの構成法が必要であることを述べ、新しい生産システムの構成法の一つとして自己組織的構成法の提案と構築を行うことが本研究の目的であるとした。続く第2章で自己組織的構成法に用いる自己組織化の定義とそのモデル化を行った。

第3章、第4章、第5章では、第2章でモデル化を行った自己組織的構成法を用いて、生産スケジューリング手法、設備レイアウト計画手法、そしてラインレス生産システムを構築し、自己組織的構成法の有効性を確認した。生産スケジューリングでは時間的構造が、設備レイアウトでは空間的構造、そしてラインレス生産システムでは、時間的構造と空間的構造の両方が自己組織化するシステム全体の大域的構造と考えられる。これらの結果より、場の相互作用を用いる自己組織的構成法が、対象とする生産システムの時間的計画および空間的計画を同時に扱うことができるという特徴を有することを示し、その有効性を確認した。

第6章では自己組織的構成法における要素間の相互作用を引き起こす要素の行動ルールの自己組織化を、強化学習を用いることで実現した。自己組織的構成法では、システム全体の構造はトップダウン的にあらかじめ設計するのではなく、自律要素が何らかの行動をすることで要素間に相互作用が生じ、その結果としてシステム全体の構造がボトムアップ的に創発する。自律要素の行動は、各要素の持つ行動ルールによって規定されているが、行動ルールはあらかじめ設計され、プロダクションルールの形で埋め込まれている。つまり要素の行動ルール自体は自己組織化過程において不変である。自己組織化の過渡状態において要素の行動はシステム全体の状態に拘束はされるが、各要素の行動ルールは変化せず、行動ルール自体へのフィードバックは存在しなかったことになる。これに対し、第6章では要素の行動ルールレベルではなく、行動ルールを獲得するためのメタルールのレベルで要素の行動の設計を行った。そして、

システム全体の情報を積極的に各要素へとフィードバックすることで、環境の状態に適した各自律要素の行動ルールの獲得を試みている。つまり、メタルールの相互作用によって行動ルールが自己組織化し、自己組織化した行動ルールに従って要素が行動することでシステム全体の秩序や構造が自己組織化する、という2段階で自己組織化が起こっているとみなすことができる。そうすることで役割分担など、より複雑な要素の協調的行動の獲得が期待できる。つまり、要素の行動ルールに多様性を持たせることで、場を介した相互作用の結果自己組織化するシステム全体の構造も、より多様なものとするのが可能となるのが期待できる。本研究ではメタルールとして強化学習を用い、要素の役割分担の結果として複雑なシステム全体の目的が達成できることを確認している。すなわち、第6章は、第2章の自己組織的構成法のより発展的な内容を含んだ章であると位置づけることが可能であり、第5章までの成果を否定するものではなく、自己組織的構成法の問題フレーム内での議論であるとみなすことができる。

以上より、本研究の成果は以下の通りにまとめられる。

- 生産システムを自律分散システムとして構成する手法の一つとして、自己組織的構成法を提案した。自己組織的構成法は、システム全体を制御する機構を設計するのではなく、各要素の局所的行動ルールを設計し、システム全体の時間的あるいは空間的秩序や構造は、自己組織化過程によって創発するという方法である。
- 自己組織的構成法では、自己組織化を引き起こすために利用する相互作用にポテンシャル場を利用している。場の相互作用を利用することで、システム全体の時間的構造、空間的構造の生成が同時に行うことが可能であるため、生産システムにおける時間的計画問題および空間的計画問題を統合的に取り扱うことが可能であることを示した。
- 生産システムにおける時間的計画の例はスケジューリングであり、空間的計画の例はレイアウト計画である。本研究では、自己組織的

構成法をそれらの問題に適用し、その有効性を確認した。さらに時間的計画と空間的計画を同時に解決しながら実現する新たな生産様式であるラインレス生産を提案し、その有効性を確認した。

- 自己組織化を引き起こす局所的行動ルールを規定するメタルールとして、強化学習を導入した。要素間の役割分担が自律的に生成することで、自己組織的構成法により創発する構造が、役割分担などを含んだより多様なものとなることを示し、その結果より複雑なシステム全体の目的達成が可能となることを確認した。

以上の成果より、今後ますます増大すると考えられる生産環境の複雑さに対応できる生産システムの構成法として、提案手法である自己組織的構成法は有効となることが期待できる。

謝辞

本研究を進めるにあたり，多くの方々にご指導・ご協力を頂きました。

まず，著者の指導教官である

東京大学 人工物工学研究センター 教授

東京大学 大学院工学系研究科 精密機械工学専攻 教授 上田完次先生に深く感謝申し上げます。上田先生には，学部4年生で神戸大学工学部機械工学科上田研究室に配属されて以来，9年間に渡りご指導を頂きました。著者が次世代の生産システムに関して興味を抱くようになったきっかけは，先生の講義を拝聴したことでありました。また，神戸大学大学院自然科学研究科博士後期課程3年の際，研究者としての道を歩み出すきっかけも作っていただき，さらに2002年5月には東京大学人工物工学研究センターへと異動させて頂きました。研究内容に関してだけでなく，人生の先輩として普段はやさしく，時には厳しく，いつも親身になって有効なアドバイスを多々頂戴致しました。心より感謝申し上げます。

本論文をまとめるにあたり，副査をお引き受け下さいました

東京大学 大学院工学系研究科 精密機械工学専攻 教授

東京大学 人工物工学研究センター長

新井民夫先生

東京大学 大学院工学系研究科 精密機械工学専攻 教授 高増 潔先生

東京大学 人工物工学研究センター

助教授 下村芳樹先生

東京大学 大学院工学系研究科 環境海洋工学専攻 助教授 青山和浩先生

には，論文全体に亘って貴重なご教示を多々頂きました。ここに慎んで感謝の意を表します。

また，Nokia China Investment Co. Ltd, CTO Jari Vaario 先生には，奈良女子大学教授にご所属の際，著者が4年生の時から共同研究をさせて頂き，自己組織化の理論からプログラム作成や計算機管理方法まで，大変親切にご指導頂きました。ここに深く感謝申し上げます。

著者の所属である人工物工学研究センター長 新井民夫先生をはじめ、教授 藤田豊久先生、教授 浅間一先生、助教授 白山晋先生、助教授 高橋浩之先生、助教授 下村芳樹先生、助教授 奥田洋司先生、助教授 黒田あゆみ先生、には遅々として進まぬ本論文の作成にあたり叱咤激励を頂きました。ここに深く感謝申し上げます。

神戸大学教授 鳩野逸生先生、神戸大学助教授 大倉和博先生、福山大学助教授 真鍋圭司先生、神戸大学助教授 長坂一郎先生、滋賀大学講師 右田正夫先生、理化学研究所 Mikhail Svinin 先生、Hungarian Academy of Science 教授 Adndras Markus 先生には、神戸大学在籍時代より大変お世話になりました。特に鳩野先生には、共同研究者としてお世話になり、生産システムの基礎から計算機管理に至るまで親切にご指導頂きました。心より感謝致します。

本研究の一部は、IMS/NGMS プロジェクトの BMS グループの成果を含んでおり、メンバの皆様と多くの有効な議論をさせて頂きました。特に、今西裕一郎氏、ソニー（株）小林元宏氏、ホンダエンジニアリング（株）渡辺寿也氏には大変お世話になりました。心より感謝致します。

研究室の PD 研究員竹中毅氏、西野成昭氏には公私に渡り大変お世話になりました。特に西野氏には学生時代より 6 年間もの長きに亘り、お世話になりました。深く感謝致します。

研究室秘書羽生彩子さん、庄司有希さん、人工物工学研究センター事務岡崎若菜さん、田隅麻里子さん、研究支援推進員安藤実希さんほか、センターの皆様にも様々な形でお世話になりました。深く感謝致します。

著者と共同研究して来ていただいた神戸大学上田研卒業生の岩本羽生氏、角田 真規氏、佐藤修一氏、植木真治氏、細井智明氏、吉村悠紀氏、Zlatan Car 氏、Attila Lengyel 氏、大学院生 小林正明氏、東京大学上田研の鬼頭朋美さん、山口涼氏、高洲良平氏、倉岡寛氏ほか、上田研究室の学生の皆さんに心より感謝致します。

最後になりましたが、現在まで著者が好きな道を歩むことを許し、支えてくれた両親、兄家族、そして親戚の皆さんに感謝致します。そして、著者を励まし今日まで支えてくれた妻の可奈に心から感謝します。

平成 16 年 8 月

藤井 信忠

参考文献

- [1] H. P. Wiendahl and P. Scholtissek. Management and Control of Complexity in Manufacturing. *Annals of the CIRP*, Vol. 43, No. 2, pp. 533–540, 1994.
- [2] K. K. B. Hon. Complexity and Agility in Manufacturing. In *The 7th International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, Guangzhou, China, November 28-30 2000.
- [3] 瀬領浩一, 渡部弘. CIM アーキテクチャー CIM を支える情報技術体系－. *情報処理*, Vol. 33, No. 3, pp. 213–221, 1992.
- [4] 上田完次. 生物指向型生産システム. 工業調査会, 1994.
- [5] 藤本英雄. 変わる生産のしくみ. オーム社, 1994.
- [6] 福田好朗. 生産システムの軌跡 多量生産システムから高付加価値生産システムへ. *精密工学会誌*, Vol. 65, No. 1, pp. 13–18, 1999.
- [7] 森欣司, 宮本捷二, 井原廣一. 自律分散概念の提案. *電気学会論文誌 C*, Vol. 104, No. 12, pp. 303–311, 1984.
- [8] 河野克己. 自律分散システム. *情報処理*, Vol. 36, No. 11, pp. 1054–1061, 1995.
- [9] A. D. Baker. A Survey of Factory Control Algorithms That Can Be Implemented in a Multi-Agent Heterarchy: Dipatching, Scheduling and Pull. *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 17, No. 4, pp. 297–320, 1998.

- [10] J. Peklenik. Structural and Operational Complexity of Future Manufacturing Systems. In *Proceedings of 29th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems*, pp. 1–7, 1997.
- [11] G. Reinhart and A. Hirschberg. Changeability in Production Systems. In *Proceedings of the 33rd CIRP International Seminar on Manufacturing Systems*, pp. 263–267, 2000.
- [12] E. Westkamper. Intelligent Manufacturing Systems for The Next Century. *Manufacturing Systems*, Vol. 29, No. 1, pp. 73–77, 1999.
- [13] 荒井栄司, 田中利穂, 田村利夫. IMS プログラムについて. *人工知能学会誌*, Vol. 18, No. 2, pp. 108–113, 2003.
- [14] H. K. Tonshoff, M. Winkler, and M. Ehrmann. Holonic Manufacturing - The Route to Autonomous and Cooperative Manufacturing Systems. In *Proceedings of 9th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing*, France, 1997.
- [15] HMS コンソーシアム (編). ホロニック生産システム—人・機械・システムが柔軟に「協調」する次世代のモノづくり. 日本プラントメンテナンス協会, 2004.
- [16] 杉村延広. 分散型生産システムの動向—スケジューリングの観点から. *システム/制御/情報*, Vol. 46, No. 5, pp. 269–275, 2002.
- [17] N. Sugimura, Y. Tanimizu, and T. Yoshioka. A study on object oriented modeling of holonic manufacturing system. In *Proceedings of 29th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems*, pp. 215–220, 1997.
- [18] A. Markus, T. K. Vancza, and L. Monostori. A Market Approach to Holonic Manufacturing. *Annals of the CIRP*, Vol. 45, No. 1, pp. 415–420, 1996.
- [19] L. Monostori and B. Kadar and J. Hornyak. Approaches to Managing Changes and Uncertainties in Manufacturing. *Annals of the CIRP*, Vol. 47, No. 1, pp. 365–368, 1998.

- [20] R. G. Smith. The Contract Net Protocol: High-Level Communication and Control in a Distributed Problem Solver. *IEEE Transactions on Computers*, Vol. C-29, No. 12, pp. 1104–1113, 1980.
- [21] 杉村延広, スヨト, 田中毅. ホロニック生産のための工程設計システムに関する研究. 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 65, No. 633, pp. 395–400, 1999.
- [22] T. Arai, Y. Aiyama, and Y. Sasaki. Holonic Storage: An Assembly and Storage Cell by Manipulation Using Environment. In *Proceedings of 29th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems*, pp. 221–226, 1997.
- [23] 藤田信幸. ホロニック組立てシステム. 日本ロボット学会誌, Vol. 15, No. 6, pp. 827–829, 1997.
- [24] T. Arai, Y. Aiyama, Y. Maeda, M. Sugi, and J. Ota. Agile Assembly System by Plug and Produce. *Annals of the CIRP*, Vol. 49, No. 1, pp. 1–4, 2000.
- [25] K. Okabe, P. Bunce, and R. Limoges. Next Generation Manufacturing Systems (NGMS) in the IMS program. *Advance in Production Management Systems - Perspectives and Future Challenges*, Chapman & Hall, pp. 43–54, 1998.
- [26] 佐々木信夫, 渡辺寿也, 長谷部伸治, 青山和浩, 宮本俊幸. NGMS: 次世代生産システム—分散型生産・ビジネスモデルの協調的統合—. 人工知能学会誌, Vol. 18, No. 2, pp. 124–130, 2003.
- [27] I. Dean and A. S. Carrie. Future Enterprise Types and Strategies for Agile Manufacture. *Advance in Production Management Systems - Perspectives and Future Challenges*, Chapman & Hall, pp. 115–126, 1998.
- [28] P. Holmstedt. A Vision of The Future Manufacturing System, in An Agile Perspective. In *Proceedings of 29th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems*, pp. 28–32, 1997.

- [29] H. J. Warnecke. *The Fractal Company A Revolution in Corporate Culture*. Springer-Verlag, 1993.
- [30] W. Sihn. Paradigm shift in the corporation: the fractal factory. In *Proceedings of Advanced Production Management Systems (APMS'96)*, pp. 305–308, 1996.
- [31] W. Sihn. Experiences with The Fractal Company Value Shift. In *Proceedings of 29th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems*, pp. 305–308, 1997.
- [32] E. Westkamper. Manufacturing on Demand in Production Networks. *Annals of the CIRP*, Vol. 46, No. 1, pp. 329–334, 1997.
- [33] 宮本俊幸, 熊谷貞俊. エージェントネットによる自律分散型生産システムのモデル化と制御. *日本ロボット学会誌*, Vol. 15, No. 6, pp. 823–826, 1997.
- [34] 本位田真一, 飯島正, 大須賀昭彦. エージェント技術. 共立出版, 1999.
- [35] 石田亨, 片桐恭弘, 桑原和宏. 分散人工知能. コロナ社, 1996.
- [36] H. K. Tonshoff, P.-O. Woelk, I. J. Timm, and O. Herzog. Flexible Process Planning and Production Control Using Co-operative Agent Systems. In *Proceedings of International Conference on Competitive Manufacturing Systems*, 2001.
- [37] R. Teti and D. D'Addona. Agent-Based Multiple Supplier Tool Management System. In *Proceedings of 36th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems*, pp. 39–45, 2003.
- [38] H. P. Wiendahl and V. Ahrens. Agent-Based Control of Self-Organized Production Systems. *Annals of the CIRP*, Vol. 46, No. 1, pp. 373–376, 1997.
- [39] 伊藤正美, 市川惇信, 須田信英 (編). 自律分散宣言—明日を拓くシステムパラダイム—. オーム社, 1995.

- [40] 上田完次. 生物指向型生産システムに関する研究－機能発現の分析と基本概念の提案－. 1991年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp. 623–624, 1991.
- [41] C. G. Langton. *Artificial Life*. Addison-Wesley Publishing Company, 1989.
- [42] K. Ueda. Emergent Synthesis. *Artificial Intelligence in Engineering*, Vol. 15, No. 4, pp. 319–320, 2001.
- [43] D. E. Goldberg. *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Addison-Wesley, 1989.
- [44] J. H. Holland (嘉数侑昇監訳). Induction - process of interface, learning and discovery (遺伝アルゴリズムの理論－自然・人工システムにおける適応－). The MIT Press (森北出版), 1992 (1999).
- [45] R.S. Sutton, A.G. Barto (三上貞芳, 皆川 雅章共訳). Reinforcement Learning An Introduction (邦訳 強化学習). The MIT Press (森北出版), 1998 (2000).
- [46] 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. 日本機械学会論文誌 (C編), Vol. 62, No. 595, pp. 1239–1245, 1996.
- [47] 大倉和博, 郷東末和, 上田完次. 中立突然変異型 GA によるジョブショップ・スケジューリング問題の解法. 日本機械学会論文誌 (C編), Vol. 63, No. 614, pp. 224–231, 1997.
- [48] 中村陽一郎, 黒山和宏, 山田和明, 大倉和博, 上田完次. Instance-Based Classifier Generator による自律移動ロボットの行動獲得. 日本ロボット学会誌, Vol. 17, No. 3, pp. 371–379, 1999.
- [49] C.R.Reeves (横山隆一他訳). Modern Heuristics Techniques for Combinatorial Problems (モダンヒューリスティクス－組合せ最適化の先端手法). Blackwell Scientific Publications (日刊工業新聞社), 1993 (1997).

- [50] 北森俊行, 北村新三 (編) . 自己組織化の科学. オーム社, 1996.
- [51] H.Haken (斎藤信彦, 小森尚志, 長島知正訳) . *Advanced Synergetics* (シナジェティクスの基礎—不安定性の階層=システムとデバイスの自己組織化) . Springer Verlag (東海大学出版会) , 1983 (1986) .
- [52] H. Ulrich, G.J.B. Probst (徳安彰訳) . *Self-Organization and Management of Social Systems* (自己組織化とマネジメント) . Springer-Verlag GmbH & Co. KG (東海大学出版会) , 1984 (1992) .
- [53] P. Krugman (北村行伸, 妹尾美起訳) . *The Self-Organizing Economy* (自己組織化の経済学—経済秩序はいかに創発するか) . Blackwell Publishers (東洋経済新聞社) , 1996 (1997) .
- [54] J. Vaario. Modeling adaptive self-organization. In R. Brooks and P. Maes, editor, *Artificial Life IV*, pp. 313–318. The MIT Press, 1994.
- [55] ヤリ・ワーリオ, 溝口潤一, 下原勝憲. 創発と進化. シミュレーション, Vol. 13, No. 4, pp. 302–310, 1994.
- [56] J. Vaario and K. Shimohara. On Formation of Structures. *Advances in Artificial Life*, pp. 421–435, 1995.
- [57] 石田亨. 分散人工知能の技術と応用. 人工知能学会誌, Vol. 5, No. 4, pp. 441–448, 1990.
- [58] V. Braitenberg. *Vehicles - Experiments in Synthetic Psychology*. The MIT Press, 1984.
- [59] 木瀬洋. 生産スケジューリングの現状と課題. システム/制御/情報, Vol. 41, pp. 92–99, 1997.
- [60] 木瀬洋. ジョブショップスケジューリング問題. 情報処理, Vol. 39, No. 11, pp. 1150–1153, 1998.
- [61] 木瀬洋. スケジューリング研究の過去・現在・未来. スケジューリング・シンポジウム 2000 講演論文集, pp. 3–10, 2000.

- [62] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt, and Jr. M. P. Vecchi. Optimization by Simulated Annealing. *SCIENCE*, Vol. 220, No. 4598, pp. 671–680, 1998.
- [63] 電気学会 GA 等組合わせ最適化手法・応用調査専門委員会（編）. 遺伝アルゴリズムとニューラルネット. コロナ社, 1998.
- [64] 田中克己, 石井信明. スケジューリングとシミュレーション. コロナ社, 1995.
- [65] K. Isa and T. Tsuru. Cell Production and Workplate Innovation in Japan: Toward a New Model for Japanese Manufacturing? *Industrial Relations*, Vol. 41, No. 4, pp. 548–578, 2002.
- [66] 都留康. 生産システムの革新と進化—日本企業におけるセル生産方式の浸透—. 日本評論社, 2001.
- [67] 仲町英治（編著）（編）. バーチャルファクトリー—未来工場への挑戦. 工業調査会, 1994.
- [68] 人見勝人. 入門編 生産システム工学（新訂2版）. 共立出版, 1995.
- [69] R. Muther. *Systematic Layout Planning, 2nd ed.* Cahners Books, 1973.
- [70] 高橋輝男, 久保章. プラント・レイアウト—工場設計の理論と実際—. 建帛社, 1973.
- [71] C. M. L. Castell, R. Lakshmanan, and J. M. Skilling. Optimisation of Process Plant Layout Using Genetic Algorithms. *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 22, pp. 993–996, 1998.
- [72] J. S. Kochhar, B. T. Foster, and S. S. Heragu. A Genetic Algorithm for the Unequal Area Facility Layout Problem. *Computers and Operations Research*, Vol. 25, No. 7, pp. 583–594, 1998.
- [73] Y. X. Su, C. H. Zheng, and B. Y. Duan. An optimal layout methodology for cold forming rectangular parts using genetic algorithms. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 17, pp. 429–433, 2001.

- [74] J. Balakrishnan and C.H. Cheng. Dynamic Layout Algorithms: a State-of-the-art Survey. *International Journal of Management Science*, Vol. 26, No. 4, pp. 507–521, 1998.
- [75] J. Balakrishnan and C.H. Cheng. Genetic Search and Dynamic Layout Problem. *Computers & Operatinos Research*, Vol. 27, pp. 587–593, 2000.
- [76] J. S. Kochhar and S. S. Heragu. Facility Layout Design in A Changing Environment. *International Journal of Production Research*, Vol. 37, No. 11, pp. 2429–2446, 1999.
- [77] NEDEK 研究会（編著），岩田一明（監修）（編）. 生産工学入門. 森北出版, 1997.
- [78] 人見勝人. 生産システム工学（第2版）. 共立出版, 1990.
- [79] 社団法人日本自動車工業会. 自動車データベース.
- [80] 岩室宏. セル生産システム. 日刊工業新聞社, 2002.
- [81] 花井嶺郎, 土屋総二郎, 日比均, 中斎龍美, 寺田宏幸. 市場の不確実性に順応する生産システム（APS）の開発. 精密工学会誌, Vol. 65, No. 8, pp. 1087–1091, 1999.
- [82] K. Ueda, I. Hatono, N. Fujii, and J. Vaario. Reinforcement Learning Approaches to Biological Manufacturing System. *Annals of the CIRP*, Vol. 49, No. 1, pp. 343–346, 2000.
- [83] 木村元, 宮崎和光, 小林重信. 強化学習システムの設計指針. 計測と制御, Vol. 38, No. 10, pp. 618–623, 1998.
- [84] J. H. Holland, K. J. Holyoak, R. E. Nisbett, and P. R. Thagard. *Induction - process of interface, learning and discovery*. The MIT Press, 1985.
- [85] J. H. Holland. *Hidden Order: how adaptatio builds complexity*. Addison Wesley Longman Pubslishing Co., Inc., 1996.

- [86] 高玉圭樹. マルチエージェント学習 —相互作用の謎に迫る—. コロナ社, 2003.
- [87] J.J. Grefenstette. Credit assignment in rule discovery systems based on genetic algorithms. In *Machine Learning*, Vol. 3, pp. 524–534, 1988.

研究業績

本論文に関連するもの

査読あり学術論文

1. N. Fujii, I. Hatono and K. Ueda: “Reinforcement learning approach to self-organization in a biological manufacturing system framework”, *Journal of Engineering Manufacture Part B*, 218, pp. 667–673, 2004.
2. 藤井信忠, 鳩野逸生, ヤリワーリオ, 上田完次: “自己組織化を用いたラインレス生産システム構築に関する研究”, *精密工学会誌*, 69(6), pp. 820–824, 2003.
3. K. Ueda, N. Fujii, I. Hatono and M. Kobayashi: “Facility Layout Planning Using Self-Organization Method”, *Annals of the CIRP*, 51(1), pp. 399–402, 2002.
4. K. Ueda, I. Hatono, N. Fujii and J. Vaario: “Line-Less Production System Using Self-Organization: A Case Study for BMS”, *Annals of the CIRP*, 50(1), pp. 319–322, 2001.
5. K. Ueda, I. Hatono, N. Fujii and J. Vaario: “Reinforcement Learning Approaches to Biological Manufacturing Systems”, *Annals of the CIRP*, 49(1), pp. 343–346, 2000.
6. K. Ueda, J. Vaario and N. Fujii: “Interactive Manufacturing: Human Aspects for Biological Manufacturing Systems”, *Annals of the CIRP*, 47(1), pp. 389–392, 1998.

査読あり講演論文

1. N. Fujii, M. Kobayashi, M. Kobayashi, T. Makita, I. Hatono, K. Ueda: “Self-organization Based Planning System in Multi-Product Semiconductor Manufacturing Systems”, Proc. of The 4th CIRP International Seminar on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering (ICME2004), 30 June - 2 July 2004, Sorrento, Italy, pp. 9–14, 2004.
2. N. Fujii, M. Kobayashi, T. Makita, I. Hatono, K. Ueda: “Integration of Facility Planning and Layout Planning Using Self-organization in Semiconductor Manufacturing”, Proc. of 37th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems, 19-21 May 2004, Budapest, Hungary, pp. 175-180, 2004.
3. M. Kobayashi, N. Fujii, M. Kobayashi, T. Makita, I. Hatono, K. Ueda, T. Taura: “Area Assignment Problems of Operators in Self-organization Based Facility Layout”, Proc. of the 5th International Workshop on Emergent Synthesis, 25-26 May 2004, Budapest, Hungary, pp. 67-72, 2004.
4. K. Ueda, N. Fujii, M. Kobayashi, T. Makita, I. Hatono: “A Self-Organization Approach to Facility Layout Planning in Semiconductor Manufacturing”, Proc. of 36th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems, 03-05 June 2003, Saarbruecken, Germany, pp. 21-26, 2003.
5. N. Fujii, I. Hatono and K. Ueda: “Self-organization using Reinforcement Learning in Biological Manufacturing Systems”, Proc of The 3rd CIRP International Seminar on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering (ICME2002), 3-5 July 2002, Ischia, Italy, pp. 3-8, 2002.
6. T. Hosoi, N. Fujii, I. Hatono and K. Ueda: “Lineless Assembling System Using Self-Organization”, Proc. of 2002 JAPAN-U.S.A. Symposium on Flexible Automation, 15-17 July 2002, Hiroshima, Japan, 1, pp. 545-548, 2002.

7. N. Fujii, T. Hosoi, I. Hatono and K. Ueda: "Reinforcement Learning Approach to Lineless Assembling System", Proc of The 4th International Workshop on Emergent Synthesis (IWES'02), 9-10 May 2002, Kobe, Japan, pp. 121-126, 2002.
8. I. Hatono, S. Ueki, N. Fujii and K. Ueda: "Self-Organization Control of Manufacturing Systems Based on Extended Potential Field with Reinforcement Learning", Proc. of International Workshop on Emergent Synthesis (IWES'99), pp.145-150, 1999.
9. J. Vaario, N. Fujii, M. Sumida, I. Hatono and K. Ueda: "Adaptive Real-Time Scheduling with Self-organization Method", Proc. of International Workshop on Emergent Synthesis (IWES'99), pp.87-92, 1999.
10. N. Fujii, I. Hatono and K. Ueda: "Self-Organization Process in Interactive Manufacturing Environment", Proc. of the 4th International Symposium on Artificial Life and Robotics (AROB 4th'99), pp. 166-169, 1999.
11. K. Ueda, N. Fujii and J. Vaario: "Animation of Biological Manufacturing System", Proc. of the 8th International DAAAM Symposium, pp. 339-340, 1997.
12. J. Vaario, N. Fujii, D. Scheffter, M. Mezger and K. Ueda: "Factory Animation by Self-Organization Principles", Proc. of International Conference on Virtual Systems and MultiMedita (VSMM'97), IEEE Computer Society, pp. 235-242, 1997.
13. N. Fujii, J. Vaario and K. Ueda: "Potential Field Based Simulation of Self-Organization in Biological Manufacturing Systems", Proc. of Manufacturing System Design'97 Congress (MSD'97), paper 5, 1997.

国内講演会

1. 藤井信忠, 小林正明, 小林元宏, 牧田俊之, 鳩野逸生, 上田完次: “多品種半導体生産の自己組織化シミュレーション手法”, 2004年度精密工学会春季大会講演論文集, 2004年3月16-18日, 東京大学, pp. 403-404, 2004.
2. 高洲良平, 藤井信忠, 小林元宏, 牧田俊之, 上田完次: “半導体生産における強化学習を用いた適応的ロット投入計画”, 2004年度精密工学会春季大会講演論文集, 2004年3月16-18日, 東京大学, pp. 405-406, 2004.
3. 藤井信忠, 小林元宏, 牧田敏之, 鳩野逸生, 上田完次: “自己組織化を用いた設備計画とレイアウト計画の統合”, 日本機械学会 第13回設計工学・システム部門講演会講演論文集, 2003年10月30日-11月1日, 金沢読売会館, pp. 19-20, 2003.
4. 小林正明, 藤井信忠, 小林元宏, 牧田俊之, 鳩野逸生, 上田完次, 田浦俊春: “自己組織化に基づく作業者を考慮した設備配置計画に関する研究”, 2003年度精密工学会秋季大会講演論文集, 2003年10月1-4日, 富山大学, p. 51(B-02), 2003.
5. 藤井信忠, 小林元宏, 牧田敏之, 鳩野逸生, 上田完次: “半導体生産における共創的設備配置計画手法”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'03講演論文集, 2003年5月23-25日, 公立はこだて未来大学, p2A1-3F-C7, 2003.
6. 小林正明, 上田完次, 藤井信忠, 小林元宏, 牧田俊之, 鳩野逸生: “自己組織化に基づく作業者を考慮した設備配置計画に関する基礎的研究”, 第10回「精密工学会学生会員卒業研究発表講演会論文集」, 2003年3月26日, 東京農工大学, p. 37(O-13), 2003.
7. 吉村悠紀, 藤井信忠, 小林元宏, 牧田俊之, 鳩野逸生, 上田完次: “自己組織化を用いた半導体生産システムの設備計画に関する研究”, 2003年度精密工学会春季大会講演論文集, 2003年3月26-28日, 東京農工大学, p. 37, 2003.

8. 藤井信忠, 小林元宏, 牧田敏之, 鳩野逸生, 上田完次: “人工物工学の方法論 第22報 (半導体生産システムレイアウトの自己組織的構成)”, 日本機械学会 第12回設計工学・システム部門講演会講演論文集, pp. 275-276, 2002.
9. 吉村悠紀, 藤井信忠, 鳩野逸生, 上田完次, 牧田俊之, 小林元宏: “半導体生産における自己組織化を用いた設備配置計画に関する研究”, 2002年度精密工学会春季大会講演論文集, 2002年3月28-30日, 東京工業大学, p. 173, 2002.
10. 細井智明, 藤井信忠, 鳩野逸生, 上田完次: “組立工程におけるラインレス生産システムの制御に関する研究”, 2002年度精密工学会春季大会講演論文集, 2002年3月28-30日, 東京工業大学, p. 172, 2002.
11. 細井智明, 藤井信忠, 鳩野逸生, 上田完次: “組立工程におけるラインレス生産システムの構築”, 2001年度精密工学会秋季大会講演論文集, p. 21, 2001.
12. 藤井信忠, 鳩野逸生, 上田完次: “強化学習を用いた生産システムの自己組織化に関する研究”, 2001年度精密工学会秋季大会講演論文集, p. 17, 2001.
13. 藤井信忠, 佐藤修一, 鳩野逸生, 上田完次: “インタラクティブ生産における仮想空間の構築に関する研究”, 計測自動制御学会関西支部シンポジウム講演論文集, pp. 71-74, 2000.
14. 鳩野逸生, 植木真治, 藤井信忠, 上田完次: “納期に注目した生産システムのポテンシャルフィールドによる制御”, スケジューリングシンポジウム 2000 講演論文集, pp. 120-125, 2000.
15. 佐藤修一, 藤井信忠, 鳩野逸生, 上田完次: “インタラクティブ生産環境における仮想空間の構築に関する研究”, 日本機械学会関西支部第75期定時総会講演会, pp. 39-40, 2000.

16. 岩本羽生, 藤井信忠, ヤリ・ワーリオ, 鳩野逸生, 上田完次: “ラインレス生産システムの実現に関する研究”, 日本機械学会関西支部第75期定時総会講演会, pp. 29-30. 2000.
17. 角田真規, 藤井信忠, 鳩野逸生, ヤリ・ワーリオ, 上田完次: “自己組織化を用いた分散型リアルタイムスケジューリング”, 平成11年度電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集, pp.353-356, 1999.
18. 角田真規, 藤井信忠, 鳩野逸生, ヤリ・ワーリオ, 上田完次: “自己組織化を用いたリアルタイムスケジューリングに関する研究”, 1999年精密工学会春季大会学術会講演論文集, p.312, 1999.
19. 藤井信忠, 鳩野逸生, 上田完次: “インタラクティブ生産環境構築に関する研究”, 日本機械学会第8回設計工学・システム部門講演会講演論文集, pp. 180-183, 1998.
20. 岩本羽生, 藤井信忠, ヤリ・ワーリオ, 上田完次: “自己組織的手法によるラインレス生産システムの構築に関する研究”, 1998年度精密工学会秋期大会学術講演会講演論文集, p.148, 1998.
21. 岩本羽生, 藤井信忠, 上田完次: “生物指向型生産システムにおける自己組織化に関する基礎的研究ーポテンシャルフィールドの適用手法の開発ー”, 日本機械学会関西学生会平成9年度卒業研究発表講演会, 1998.
22. 藤井信忠, ヤリ・ワーリオ, 上田完次: “自己組織型生産システムの三次元シミュレーション”, 1997年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, p. 535, 1997.
23. N. Fujii, J. Vaario and K. Ueda: “Adaptive Manufacturing Systems”, 第36回計測自動制御学会学術講演会予稿集, pp. 103-104, 1997.
24. 藤井信忠, ヤリ・ワーリオ, 上田完次: “ポテンシャルフィールドを用いた生産システムの自己組織化シミュレーション”, 1997年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp. 581-582, 1997.

25. 藤井信忠, ヤリ・ワーリオ, 上田完次: “生物指向型生産システムの自己組織化に関する一考察”, 精密工学会 1996 年度関西地方定期学術講演会講演論文集, p. 81, 1996.

報告等

1. K. Ueda and N. Fujii: “Emergent Manufacturing System”, IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2000.

本論文に直接関連しないもの

著書

1. Z. Car, N. Fujii, I. Hatono, K. Ueda: “Adaptive reconfiguration of shop floor layout based on concept of Biological Manufacturing Systems”, DAAAM Scientific Book 2002, Intelligent Manufacturing & Automation: Focus on Precision Engineering ”, International Vienna, pp. 063–073, 2002.

国内講演会

1. 上田完次, 藤井信忠, 竹中毅: “「共創の工学」序説 - その枠組みと方法論 - ”, 計測自動制御学会 第3回システムインテグレーション部門講演会講演論文集, pp. 245–246, 2002.
2. 鳩野逸生, 黒谷憲一, 村上賢哉, 藤井信忠, 上田完次: “デマンドチェーンシミュレーションを用いた企業戦略決定支援”, 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2002 講演論文集, pp. 325–330, 2002.

報告等

1. 藤井信忠：“人工社会—複雑系とマルチエージェント・シミュレーション（書評）”，システム／制御／情報，45(9)，p. 547，2001.