

博士論文

生産システムの自己組織的構成法  
に関する研究



藤井信忠

## 概要

本論文は、生産システムの自己組織的構成法を提案し、計算機実験によりその有効性の確認を行う。

生産システムをとりまく外的・内的環境は複雑化しており、生産者はそのような環境の複雑化にうまく適応しながら、市場の要求に合致した製品を迅速に生産し、供給していくために、変種変量生産の実現が必要である。集中管理型のシステム構造を持つ既存の統合型 CIM を採用していたのでは、システムの「堅さ」のために生産環境の複雑さに十分に適応することが困難であり、生産システムを自律分散システムとして捉える研究が多くなされている。しかし、従来の自律要素間における分散型問題解決手法は多くはなく、分散人工知能の一つである契約方式によるものがほとんどである。これらの手法は問題をボトムアップ的に処理し、部分から全体へとシステムの秩序形成を行う自律分散システムが本来有すべき特徴を十分に備えているとはいえず、新たな手法の確立が必要である。

本研究では、自律分散型の生産システムを構築する一手法として、生産システムの自己組織的構成法を提案する。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、自己組織化とは、「生産機械と製品の相互作用により、製造フロアにおける秩序または構造が創発する過程」と定義する。本研究では、自己組織的構成法構築のために、生産要素間の相互作用にポテンシャル場を用いることを提案している。提案手法では、場の相互作用を用いていることから空間的計画と時間的計画を同時に扱うことが可能となるという特徴がある。

自己組織的構成法の適用例として、まず、自己組織化によるスケジューリング手法を提案している。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と捉えることができる。多層プリント基板への穴あけ工程に提案手法を適用し、計算機実験を行い、自律的に生産が進む様子を観察するとともに、機械の故障に適應する様子を観察している。また、既存のリアルタイムスケジューリング手法との比較実験を行った結果、同程度以上の生産性を有することを確認している。さらには、自己組織化における自律要素として人間がシステムに参入することもできることを示すために、自己組織化と仮想空間を統合する方法について述べている。構築したシステムにおいて、システムにエンジニアが参入し、

人間とシステムとの相互作用が可能となることを示している。

次に、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ている。組合せ最適化問題としてレイアウト計画を行うのが困難な半導体生産システムを対象に、製品を流しながらレイアウト計画を行うものである。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台数等のシステム構成に従い、設備が同心円状に配置されることを確認している。また、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においても、提案手法の有効性を確認している。最後に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を明らかにしている。

さらに、自己組織的構成法を利用したスケジューリングおよび設備レイアウト計画手法を発展させ、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ている。ラインレス生産方式が実現すると多品種生産の実現、設備故障等の環境変化への適応性などが実現可能であるという特徴を明らかにしている。自動車溶接工程を対象とし、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ている。また、ライン型生産システムとの比較実験の結果、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を示している。

最後に、自己組織的構成法において利用している構成要素の行動ルール自体を自己組織化するために、自己組織的構成法に強化学習を導入し、手法の拡張を行うことを提案している。強化学習を導入することで、局所情報のみを利用していたのでは達成が困難な生産システムの目的を達成することができることが期待できる。段取りを考慮したスループット最大化問題を対象とし、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ている。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、役割分担の再構成がおこり、結果として再び最大スループットを獲得できることを明らかにしている。

以上より、本研究で提案および構築している生産システムの自己組織的構成法は、今後ますます増大すると予想できる生産環境の複雑さに適応できる生産システムの構成法となり得ると考えられる。

# 目次

<b>第1章 緒論</b>	<b>1</b>
1.1 研究の背景	2
1.2 関連研究	6
1.2.1 生産システムにおける自律分散システムアプローチ	6
1.2.2 生物指向型生産システム	11
1.3 研究の目的	14
1.4 本論文の構成	15
<b>第2章 生産システムの自己組織的構成法</b>	<b>17</b>
2.1 緒言	18
2.2 生産システムの自己組織的構成	19
2.2.1 対象とする生産システムの範囲	19
2.2.2 自己組織的構成法とは	19
2.2.3 自己組織化の定義	20
2.2.4 生産システムにおける自己組織化	21
2.3 自己組織化のモデリング手法	24
2.3.1 ポテンシャル場を用いた自己組織化	24
2.3.2 生産システムへの適用	27
2.4 提案手法のモデル化	29
2.4.1 ポテンシャル場	29
2.4.2 生産機械	30
2.4.3 製品	32
2.4.4 AGV	32
2.5 時間的計画と空間的計画の統合	35
2.6 結言	37
<b>第3章 自己組織的構成法による生産スケジューリング</b>	<b>39</b>
3.1 緒言	40
3.2 スケジューリング問題への自己組織化の適用	42

3.2.1	生産スケジューリング研究の動向 . . . . .	42
3.2.2	自己組織化を用いた自律分散型リアルタイムスケ ジューリング . . . . .	45
3.3	多層プリント基板製造工程への適用 . . . . .	47
3.3.1	多層プリント基板製造工程 . . . . .	47
3.3.2	生産要素のモデル化 . . . . .	47
3.3.3	生産要求と生産能力の優先関係 . . . . .	49
3.3.4	実験設定 . . . . .	50
3.3.5	実験結果と考察 . . . . .	52
3.4	自己組織化過程への人の参入 . . . . .	60
3.4.1	インタラクティブ生産システム . . . . .	61
3.4.2	仮想空間と BMS の統合アプローチ . . . . .	61
3.4.3	インタラクティブ自己組織生産システム . . . . .	64
3.4.4	実験結果と考察 . . . . .	67
3.5	結言 . . . . .	74
<b>第 4 章</b>	<b>自己組織的構成法による設備レイアウト計画</b>	<b>75</b>
4.1	緒言 . . . . .	76
4.2	設備レイアウトへの自己組織化の適用 . . . . .	77
4.2.1	設備レイアウト計画手法の動向 . . . . .	77
4.2.2	設備レイアウトの自己組織的構成法 . . . . .	78
4.3	半導体生産システムにおけるレイアウトの自己組織化 . . . . .	82
4.3.1	半導体生産システムの複雑さ . . . . .	82
4.3.2	生産要素のモデル化 . . . . .	83
4.4	単品種半導体生産システムにおける実験結果と考察 . . . . .	86
4.4.1	実験設定 . . . . .	86
4.4.2	レイアウトの自己組織化過程 . . . . .	88
4.4.3	熟練者による設備レイアウトとの比較 . . . . .	89
4.4.4	レイアウトへの初期値の影響度検証 . . . . .	92
4.5	多品種半導体生産システムにおける実験結果と考察 . . . . .	94
4.5.1	実験設定 . . . . .	94
4.5.2	レイアウトの自己組織化過程 . . . . .	94
4.5.3	熟練者による設備レイアウトとの比較実験 . . . . .	96
4.6	比較実験に関する考察 . . . . .	99
4.7	結言 . . . . .	100

<b>第5章</b>	<b>自己組織的構成法によるラインレス生産システム</b>	<b>101</b>
5.1	緒言	102
5.2	ラインレス生産システム	103
5.2.1	生産方式の動向	103
5.2.2	ラインレス生産方式	105
5.3	ラインレス自動車溶接工程のモデル化	108
5.3.1	自動車溶接工程への適用	108
5.3.2	生産要素のモデル化	109
5.4	実験結果と考察	114
5.4.1	実験設定	114
5.4.2	実験結果	114
5.4.3	環境変動への適応過程	117
5.5	ライン型システムとの比較実験	123
5.5.1	生産性に関する比較	124
5.5.2	環境変動への適応性に関する比較	126
5.5.3	コストに関する比較	126
5.5.4	ラインレス生産システムの有効範囲	127
5.6	結言	131
<b>第6章</b>	<b>強化学習を用いた自己組織的構成法</b>	<b>133</b>
6.1	緒言	134
6.2	自己組織的構成法への強化学習の導入	135
6.2.1	生産システムの目的分類	136
6.2.2	強化学習の利用	137
6.2.3	強化学習による行動ルールの獲得	139
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	141
6.3.1	問題設定	141
6.3.2	要素のモデル化	141
6.4	実験結果と考察	147
6.4.1	実験設定	147
6.4.2	スループット最大化過程	147
6.4.3	環境変動への適応過程	149
6.5	結言	156
<b>第7章</b>	<b>結論</b>	<b>157</b>

vi

謝辭	165
參考文獻	167
研究業績	177

# 第1章

## 緒論



# 第1章

## 緒論

### 1.1 研究の背景

生産システムをとりまく環境が複雑化していると言われて久しい。消費者の嗜好が変化し、その活動様式はグローバル化し、さらには文化は多様化してきている。これらが生産システムをとりまく環境の複雑さ、ダイナミクスなど、予測困難な変動を引き起こす要因となっている。

生産環境の複雑さとは、大きく分けて生産システム外部環境の複雑さと、内部環境の複雑さに分類ができる。Wiendahlらは、生産要求の多様化に対応するため、企業が生産する製品の部品点数が上昇していると報告している [1]。例えば、ドイツの自動車製造業における1975年と1990年の比較調査の結果、製品の部品点数は400%にも達していると報告している。また逆に、50%以上の部品が、5%に満たない製品でしか利用されておらず、製品間で共通利用される部品点数が非常に少なくなっていることを報告しており、生産品種の増大を示している。これらは生産システムへの外部環境の変動による影響を表している。

また、消費者の要求に合致したカスタム製品を設計、製造するため、製造リードタイムの60%を製品設計と生産計画に費やしており、作業者の75%は素材から製品を製造する物理的過程ではなく、生産に関連した情報に関する部門での仕事をしているとも報告しており、外部環境の複雑

さに対応するために生産システム内部の複雑さが増大している一例であると考えられる。

また、Hon は [2] の中で製造品種の増大に起因する生産システムの複雑さを 6 つに分類している。

- 製造プロセス：部品毎の工具交換やプログラム変更等の複雑さ。
- 製品：製品の欠陥の程度や頻度に関する複雑さ。
- 搬送：ジョブショップ型フロアにおける製品搬送に関する複雑さ。
- プロダクトミックス：多品種生産の場合の品種間の優先関係に関する複雑さ。
- サプライチェーン：部品供給に関する計画や出荷タイミングに関する複雑さ。
- システム：生産計画と生産管理システムに関する複雑さ。

これより調達，設計，製造という生産のあらゆる場面における複雑さが増大していることが分かる。

以上のように，これからの生産システムは，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適切に対応するために，従来の少品種多量生産から，多品種少量生産，さらには変種変量生産を実現し，市場の要求に応じた製品を，迅速に設計・生産し，供給していく必要がある。

現在までの生産システムは，情報技術，計算機科学の発達に支えられ，Ford の大量生産システムから，FMS (Flexible Manufacturing System)，そして CIM (Computer Integrated Manufacturing system) へと発展してきた。

CIM は，情報処理技術がもつデータベースやデータ通信機能を最大限に使用し，生産情報を統合的に扱う枠組みのことである [3]。生産の各段階における生産情報を統合的に扱うことで，生産の効率化や多品種生産の実現を目指していたが，CIM において採用される集中管理型のシステム様式には限界があり，以下の様な問題点があると上田は指摘している [4]。

- システムに対する生産要求が変動した際、製品設計・生産スケジュールの変更に柔軟性を欠いている。
- 生産要求が変動した際、迅速な生産設備の更新が困難である。
- 生産設備の故障や保全の際の適応能力に欠ける。
- 労働者の安全性など、ヒューマンファクターの考慮に欠けている。
- リサイクルや自然環境など、人工物をそのライフサイクル全体から捉える視点を欠いている。

結果としてこれらの問題点のために、上述のいわゆる統合型のCIMでは近年の環境の変動に適応することが困難となり、新たな生産システムの開発が必要となっている。

統合型CIMの限界を打破し、生産環境のグローバル化への対応、変種変量生産システムを実現するために、従来のように一か所に集中した大規模工場を統一的な考え方で運用するのではなく、適切な規模で分散された工場や機能ごとに適した場所で、適した時間に、適した使用で運用することが求められており、分散システムとしてシステムを構築するCIMが提案されてきている [5, 6].

また、分散システムの考え方をさらに進め、生産システムを自律分散システムの1つとして捉え、構成するアプローチがある。自律分散システムは、「自律性を持った構成要素（個）がいくつか集まり、相互に協調することによって全体としての秩序とそれにもなう機能を生成するシステム」である [7].

生産システムを自律分散システムとして構成することの利点は、大規模なシステムを比較的小さなサブシステムへと分割することで、扱う問題の規模を小さくできることにある。また、自律分散システムでは、「システムは不稼働なサブシステムを含みうる」との前提があり、いかなるサブシステムが不稼働となっても、残りのサブシステムがそれぞれ生存するために制御でき（自律可制御性）、かつ互いに協調できる（自律可協調性）システムを目標としている。以上の様な特徴は、自律分散システ

ムが生物の持つ特徴をアナロジーとして提案され工学的に定義された [8] システムであるからである。

本研究においても、自律分散システムにおける自律分散性、自律可協調性、自律可制御性が生産システムにおいて実現できれば、現代の生産環境の複雑化に適切に対応可能であると考え、自律分散システムアプローチを採用する。

## 1.2 関連研究

### 1.2.1 生産システムにおける自律分散システムアプローチ

現在の生産システムを取り巻く環境の複雑さを取り扱うことを目指した新しい生産システムの研究は多く行われている。Wiendahlは、[1]において新しい生産システムの動向および研究を概説している。本研究の背景で引用したように、生産環境の複雑さについて述べた後、複雑さに対する産業界での生産部門の再構築、および企業組織のとりくみにおける現状を説明している。また、研究の動向として、エージェントアプローチ、ニューラルネットワーク等の人工知能を利用した手法などを紹介している。また、Bakerは、生産システムを自律分散システムの1つであるマルチエージェントシステムとして捉えることの有効性を挙げ、マルチエージェントシステムにおいて利用できる、ディスパッチングアルゴリズム、スケジューリングアルゴリズム、そしてPull型生産方式に関する手法を概説している[9]。

Peklenikは、現在の生産システムを取り巻く環境の複雑さに対応するためには、Taylor以来のトップダウンアプローチではなく、生産システムをボトムアップアプローチで構成することの有効性について、両手法について対比的に述べている。ボトムアップアプローチによる生産システムの1つとして、自律要素から構成されるEWS (Elementary Work System)を提案している[10]。また、Reinhartらは現在の市場の状態を、乱気流(turbulent)の状態にあるとし、それらに対応するために生産システムは即応性(responsiveness)が必要であると述べている。ETA (Environment Turbulence Analyses)とよばれる環境の分析を通じて、即応性を実現するためには、ネットワーク環境下での企業間協調、各部門協調による創造性、各部門の透明性、企業の経験と情報の管理の向上が必要であるとしている[11]。また、Westkamperは、次世代の生産システムで利用できるであろう、製造プロセス、生産管理手法に関する技術革新について述べている。それらのシステムがネットワークで結合され、生産者と消費者の距離が近づき、営業マンが現在の生産状況と、注文が入った場合の納期等の情報をリアルタイムで消費者に提示しながら消費者との交渉を行うことが可能となる次世代生産システムの姿を予測している[12]。

以上の報告から、生産システム研究の多くが生産環境の複雑さに対応することを目指しており、そのために自律分散システムによるアプローチが有効であるとの認識が研究者の間にも広がってきている様子がわかる。

先端的な製造技術分野で国際共同研究を実施するIMS (Intelligent Manufacturing System) プログラム [13] においても、次世代の生産システムの研究及び開発が行われている。

IMS のプロジェクトの一つでもあるホロニック生産システム (Holon Manufacturing Systems: HMS) は、ホロン (holons) と呼ばれる自律的かつ協調的な要素でシステムを構成する自律分散型のシステムであり、ホロンはその階層構造であるホラーキー (holarchy) を通じて互いに協調する事が可能である [14, 15].

HMS は種々の生産計画問題に用いられており、杉村 [16, 17] や Markus [18], Monostori [19] は、分散人工知能の手法である契約方式 [20] を用いてホロン間の交渉を実現し、HMS スケジューリングシステムを構築している。中でも [18] では、要求のコンフリクトをホロン間の交渉により解決する過程が観察されている。また、杉村らは [21] において、HMS 工程設計システムの基本構成とその実現のための加工フィーチャの生成を行っている。新井ら [22] および藤田 [23] は、マニピュレータを利用したホロニック組立システムを提案している。[24] では、3台の実機マニピュレータを用いて組立システムの動的再構成過程である“Plug & Produce”を実現している。

もう一つのIMSプロジェクトである次世代生産システム (Next Generation Manufacturing Systems: NGMS) では、4つの新しい生産システムコンセプトを中心概念において研究が進められた [25, 26]。Agile 生産 (Agile Manufacturing Systems), Fractal 生産 (Fractal Companies), 自律分散型生産 (Autonomous Distributed Manufacturing Systems: ADMS), 生物指向型生産 (Biological Manufacturing Systems: BMS) である。

Agile 生産では、変動する消費者の要求を迅速に満たすために、システムの敏捷性 (agility) に着目する。消費者と生産者が製品のライフサイクル全体に渡り関係を保ち、共同で設計された Agile 製品を作り出すことにより Agility の実現を目指すというコンセプトである。Dean らは Agile 生産

における製品そのものの複雑さと、市場の不確実性により4つに分類している [27]. 生産者は、製品の複雑さと市場の不確実性がともに低い大量生産による製品から、それらがともに高い生産による製品へと進化させていると述べ、各製品を製造する際の戦略について対比的に解説している. Hon は、Agile 生産を実現するためには、プロセス、オペレータ、製品、システム、企業組織の5つの階層における柔軟性を高める必要があると述べており、それを実現するために進化、適応、学習等の複雑系に基づくアイデアが非常に有用であろうと指摘している [2]. また、Holmstedt は Agile 生産は、JIT 生産方式を突き詰めていけば実現できると述べている. そのために、システムのモジュール性、標準化を実現し、それらを利用する新しいコンセプトを構築する必要があると主張している [28].

Warnecke [29] により提唱された Fractal 生産は、fractal と呼ばれる自己相似型の独立した要素により動的に構成される組織構造をその中心概念に置く. 従来のトップダウン型生産システムに見られる堅い階層構造に基づいた組織構造では無く、より水平な組織構造とし、対象とする問題の範囲に応じて動的に組織構造を変更することで、生産環境の変動に対して適応できる. その組織構造は6つのレベルに分割して考慮されるが、各組織構造は階層を超えて相互に結合される. すなわち、1. 企業文化レベル、2. 戦略レベル、3. 社会心理レベル、4. 財政レベル、5. 情報レベル (情報の流れ)、6. 技術レベルである [30]. Sihn は [31] 中で、フラクタル生産の適用により、工具生産過程において、生産性が45%上昇したことや、在庫が80%減少したこと、リードタイムが50%短縮した等の事例を報告している. また、Westkamper は Fractal 生産のコンセプトを基に、情報技術を利用したネットワーク環境下において Agent ベースの自律分散型のシステムを構築し、“Manufacturing on Demand” を実現することを提案している [32].

ADMS は、生産システムの自律分散化を知能化により実現する. 生産システム要素が、単位毎に自律協調的に機能し、各単位は仮想的な製造システムにより統合化される [26]. 宮本らは、自律分散システムをペトリネットを利用してモデル化している. また、マニピュレータ2台から構成される生産システムをエージェントネットにより構成した例が紹介されている [33].

上記の次世代生産コンセプトの研究グループには属さないが、同様に自律分散型生産システムの構築を目指している研究がある。自律分散型生産システムの構築のために利用される手法のひとつが、システム内で意思決定を行う要素を自律エージェントとしてモデル化するエージェントベースアプローチである。自律エージェントを用いることにより、自律性、柔軟性、頑健性が実現可能となる [34]。ここでは、契約方式 [20] などの分散人工知能 [35] の研究分野で発展した手法が主に用いられるが、近年の情報技術の発展により多くの生産要素が計算機を用いた情報処理機能を持ち、それらがネットワークを介して結合されるようになるにつれて、実システムでの運用を目指した研究が増えてきている。Tonshoffらは、エージェントに階層構造を持たせ、工程設計とスケジューリングをエージェント間の交渉過程によって統合的に解決しようという IntaPS を提案している [36]。Tetiらは、工作機械の工具管理問題に対してエージェントベースアプローチを用いている [37]。また、Wiendahlらは、エージェントを計算機上のソフトウェアエージェントに限らず、人とソフトウェアエージェントが混在した環境で実験を行い、その効果を検証している [38]。

以上の様に、これまで自律分散型の生産システムは数多く提案され、研究されてきている。しかし、コンセプトレベルでは自律分散システムを目指しているものが多いが、実際の研究の多くは大規模システムをより小さな部分システムへと分割し、処理部への負荷を軽減しているだけに終わっている研究が多く、自律分散システム本来の長所を実現できていないものも見受けられる。これは、制御対象となる生産システムのような人工システムが、その規模の拡大に起因し、システムが複雑化している問題を解決するため、問題を細分化して解決する手法の一つとして自律分散システムが考え出されたということが一因であると考えられる。

これまでに構築されてきた自律要素間における分散型問題解決手法は多くはなく、各研究においてそのコンセプトを実現するため利用されるのは、多くは従来からの人工知能に根付いた分散人工知能の手法である黑板方式と契約方式である。特に契約方式 [20] は良く用いられる。契約方式は、タスクをアナウンスする管理者エージェント (Manager) と、処理を引き受ける請負エージェント (Contractor) から構成される。管理者



からアナウンスされるタスクを処理可能な請負エージェントが入札を行い、入札額に基づいて仕事が落札されることで問題解決を逐次処理的に行っていくものである。契約方式を用いれば、分散的に各タスクを処理できるが、要素間の直接通信を基本としており、しばしば問題となる。すべての情報がある特定の中央コンピュータ（管理者）から受け取るのでは、管理が集中した現在のシステムと同じであって、中央コンピュータの負担がきわめて大きくなる。またすべての要素がシステム全体に対してブロードキャストすることも考えられるが、通信処理の負担が極めて大きくなるという問題もある [39]。

自律分散型の生産システムを構築するために、契約方式のような分散人工知能を用いるアプローチにおいては、分散処理は実現可能であるが、タスクを分割して小規模問題として扱うのを目的としているものがほとんどであり、「トップダウン的」に問題を分割して問題解決を分散的に行っており、「全体から部分へ」「逐次処理」的に問題解決が行われているものが多い。つまり、自律分散システムが本来有する「ボトムアップ的」に問題を「並列処理」し、「部分から全体へ」とシステムの秩序形成を行う視点を欠いており、モデルベースなどの伝統的な決定論的人工知能アプローチから脱することができていないと考える。そこで、自律分散システムが本来持つ特徴を備えた新たな生産システムの構成法が必要である。

そのような新しい方法論に基づく生産システムの一つがBMSである。BMSは、生物が典型的な自律分散システムであり、自律分散システムが持つべき優れた特徴を生来備えていると考え、生物の優れた特徴を生産システムに取り入れて、現代の生産環境の複雑さに適応しようとする生産システムである [40]。そして、自己組織化、進化、適応などの生物の優れた特徴は、生物が示す創発現象に関係していると考え、創発的方法論に基づき生産システムを構成する。そのためBMSにおいては、問題が「ボトムアップ的」に「並列処理」されることによって「部分から全体へ」と秩序が創発することとなる。

本研究ではBMSのアプローチによる生産システム構築が、自律分散型生産システムを構築する手段の一つとして有効であると考え、採用する。以下にBMSについて、より詳細に述べる。

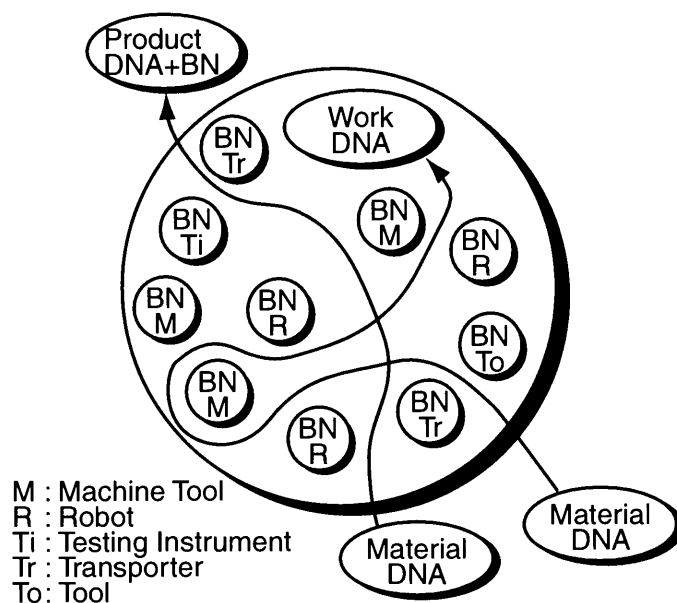


Fig. 1.1: 製造フロアレベルの BMS の概念図

### 1.2.2 生物指向型生産システム

生物は自己認識，自己成長，自己組織化，自己修復，進化といった優れた特徴により，環境変動に対して適応する能力を生来優れて有している．これらの機能は，生物が先天的に有している遺伝型情報（Deoxyribo Nucleic Acid type information: DNA 型情報）と，生存期間中の経験を通じて獲得する知識型情報（Brain and Nueron type information : BN 型情報）という二つの生物的情報の作用によって発現する．これら二つの情報を統合させることにより，生物システムは適応能力を有している [40]．上田によって提唱された生物指向型生産システム (Biological Manufacturing Systems: BMS) [40, 4] は，このような生物の優れた特徴を生産システムへと取り込み，現在の生産システムの持つ限界を打破しようとする生産システムコンセプトである．Fig. 1.1 は，製品が生産情報である DNA 型情報を持ち，一方機械は BN 型情報を持ち，素材を製品へと育てるという製造フロアレベルの BMS の概要を表している．

DNA 型情報と BN 型情報の発現による生物のもつ優れた特徴は，創発現象と深い関係があると考えられている．創発とはシステムを構成する

要素間の相互作用により大域的な秩序が生成し、その大域的な秩序が次に構成要素への制約として働くという双方向の作用の結果として、システム全体の秩序が生成する過程のことを言う [41, 42]. すなわちシステムを構成する個の問題が「ボトムアップ的」に「並列処理」されることによって「部分から全体へ」と秩序が生成するのである.

このような創発現象を計算機上で模倣した新しい計算手法である創発的計算論が提案されている. **BMS** の研究フレームにおいては、これら創発的計算論を利用して生産システムを初めとする人工物システムのモデル化及びその検証が行われてきているが、創発的計算論の中でも特に進化型計算 [43, 44] と強化学習 [45] がよく用いられてきた. [46] では、進化型計算を用いて生産システムレイアウトの再構成を行っている. また、[47] では、遺伝的アルゴリズム (**Genetic Algorithm: GA**) を中立突然変異説に基づき拡張した中立突然変異型 **GA** を用いて、ジョブショップ・スケジューリング問題を解き、その有効性が示されている. さらに [48] では、強化学習法の1つであるクラシファイアシステムを拡張した **Instance-Based Classifier Generator (IBCG)** を提案し、自律移動ロボットの行動獲得問題においてその有効性が確認されている. これらは生産システムの要素の構成方法としても有効であると考えられる.

以上のように、これまで **BMS** においては進化型計算、強化学習という創発的計算論に基づいた研究が行われてきた. しかし、進化型計算は基本的に組合せ最適化問題を対象としたメタヒューリスティクス [49] の一手法であり、大規模かつ複雑な最適化問題を効率よく解けるという利点があるが、世代間の進化を経て準最適解を得るという手法の特徴から原理的に比較的長い計算時間が必要となるため生産システムにおける時間的および空間的な動的変動への適応性を備えているとは言い難い. また、現在の自律移動ロボットの研究分野において行われているように、強化学習を用いて前進・回転・後退等のプリミティブな行動の組合せとして知的な振る舞いを獲得させるという手法は、本研究で対象とする生産システムにすぐに適用できるものではなく、さらなる学習効率の良いアルゴリズムの開発を待たなければならない.

本研究では、**BMS** を構築する一つのアプローチとして自己組織化に着目する. 本研究における自己組織化とは、生産システムの構成要素間の

相互作用の結果としてシステム全体の秩序や構造が生成する過程である。構成要素個々の行動を司る行動のルールは、システムを構築する際にシステム設計者が設計を行うが、自己組織化する秩序や構造は、各自律要素の行動の結果として生成されるものであるため決定論的ではない。また、進化型計算のように計算コストがかからないため、生産システムにおける変動に対して迅速に適応できる可能性がある。

自己組織化を用いて生産システムを構成すると、「ボトムアップ的」「並列処理」「部分から全体へ」といったキーワードが実現すると考えられる。つまり、自己組織的に構成された生産システムは、大規模なシステム全体の問題を部分問題の解決の結果として解くことが可能となり、また、その並列性により生産要求が変動した場合や、機械やAGVの故障などの環境変動へも、再組織性によって適応可能となると考えられる。自己組織化を利用した生産システムの構成法は有効であると考えられる。

### 1.3 研究の目的

従来の統合的 CIM の持つ問題点は、自律分散システムアプローチをとることで解決できるものと考え、本研究においても自律分散システムアプローチを採用する。自律分散型生産システムは数多く提案されているが、分散人工知能に則した構築方法は不十分であると考え、本研究では BMS のアプローチを採用する。BMS による生産システム構築が、自律分散型生産システムを構築する手段の一つとして有効であると考えられる。

本研究では、BMS に根ざした自律分散型生産システムを構築するために、

- 生産システムを自己組織的に構成する方法の提案および構築を行う。

具体的には、

- ポテンシャル場を用いた自己組織化手法の構築を行う。
- 生産スケジューリング、設備レイアウト計画などの問題に適用して計算機実験を行い、その有効性および有効範囲を確認する。

以上が、本研究の目的である。

## 1.4 本論文の構成

本論文の構成は以下の通りである (Fig. 1.2 に図示する).

第2章では、生産システムの自己組織的構成法について定義した後、自己組織化のコンセプトについて述べる。次に生産システムにおける自己組織化手法をどのように構築するかについて述べる。また、自己組織的構成法における構成要素のモデル化を行う。

第3章では、第2章で述べた自己組織的構成法を生産スケジューリング問題へと適用し、計算機実験によりその有効性を確認する。さらに、自己組織化の過程に人間の参入を許し、人間を含んだシステム全体でいかに自己組織化を実現するかについて述べる。

第4章では、第2章で述べた自己組織的構成法を設備レイアウト計画手法として利用する方法について述べる。半導体生産システムレイアウト計画を対象に計算機実験を行い、その有効性を確認する。

第5章では、第2章と第3章で述べた計画手法を発展させ、自己組織的構成法を用いた新しい生産方式として、すべての生産に関わる要素が移動しながら生産を行うラインレス生産方式を提案する。自動車車体への増し打ち溶接工程へと適用し、その有効性を確認する。

第6章では、第5章までに有効性を確認してきた自己組織的構成法における要素間の行動ルールを、自律的に獲得するように自己組織的構成法に強化学習を導入する。それにより、自己組織的構成法によりさらに複雑な問題の解決を目指す。提案手法を段取りを考慮したスループット最大化問題という生産スケジューリング問題へと適用し、計算機実験によりその有効性を確認する。

最後に第7章で本研究の結論を述べる。

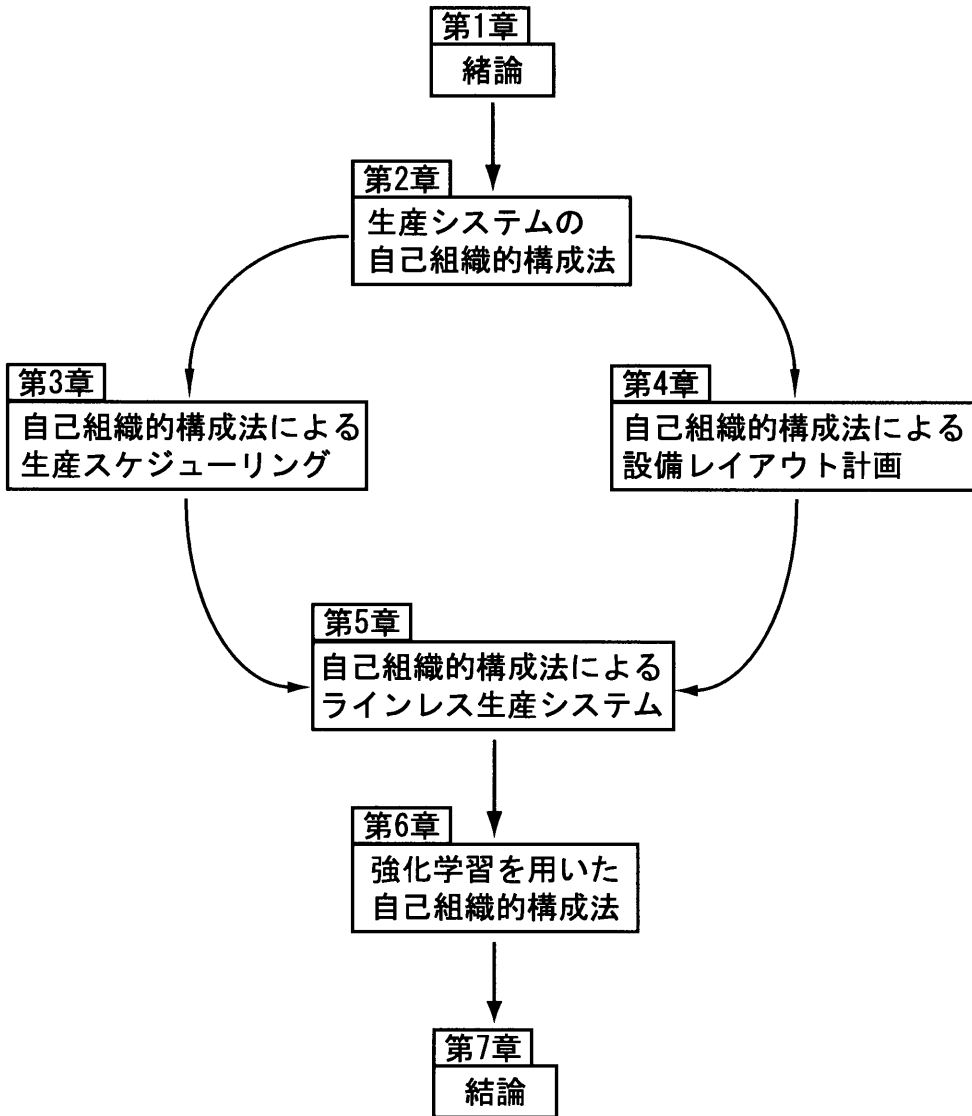


Fig. 1.2: 本論文の各章の関係

## 第2章

# 生産システムの自己組織的構成法



## 第2章

# 生産システムの自己組織的構成法

### 2.1 緒言

本章では，本研究で提案する生産システムの自己組織的構成法について述べる．

2.2節では，本研究で提案する生産システムの自己組織的構成法の問題フレームについて述べる．その後，本研究における自己組織的構成法について述べた後，自己組織的構成法において用いる自己組織化について定義し，それを生産システムに適用する際の定義とその利点に関して述べる．

2.3節では，自己組織化のモデリング手法として採用するポテンシャル場を利用する方法について説明する．

2.4節では，2.3節で述べた手法を生産システムに適用する方法を述べ，生産システム内の構成要素のモデル化を行う．

2.5節では，時間的計画と空間的計画を同時に扱うことのできる提案手法の特徴により，従来別々に行われてきた計画問題が同時に解決できることを示す．

最後に2.6節で本章をまとめる．

## 2.2 生産システムの自己組織的構成

### 2.2.1 対象とする生産システムの範囲

近年の生産システムの研究フレームは、製品の設計・生産から消費や廃棄など、製品のライフサイクル全体を覆うようになってきているが、本研究で取り扱う生産システムは、素材から製品ができあがるまでのいわゆる製造過程を対象とする。すなわち、素材  $P_0$  を入力に持ち、 $m$  工程を経て製品  $P_m$  を出力するシステム  $MS$  であるとする。すなわち、生産システム  $MS$  は、

$$\lambda : P_0 \longrightarrow P_m, \quad (2.1)$$

なる変換  $\lambda$  を行うシステムである。ここで、生産システム  $MS$  は、複数の製造フロアから構成されているのが通常であるから、構成フロア数を  $n$  とすると、

$$MS = \{MF_1, MF_2, \dots, MF_n\}, \quad (2.2)$$

となる。ここで、 $MF_j$  ( $1 \leq j \leq n$ ) は  $j$  番目の製造フロアを表す。本研究では、生産システム  $MS$  の中でも、構成要素の一つである製造フロアレベルの生産システム  $MF_j$  を対象とする。

### 2.2.2 自己組織的構成法とは

変換  $\lambda$  は、生産の工程数  $m$  を利用すると  $m$  のサブ変換に分割できるため、それらの集合

$$\lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m\}, \quad (2.3)$$

と表される。素材  $P_0$  から製品  $P_i$  への変換が  $i$  工程を経て達成されるとすると各サブ変換  $\lambda_i$  は、

$$\lambda_i : P_{i-1} \longrightarrow P_i \quad (1 \leq i \leq m), \quad (2.4)$$

となる。

ここで、生産システムにおいて製品に施される変換  $\lambda$  を実現するためには、大まかに分類すると、製品設計  $DN$ 、工程計画  $PP$ 、設備配置計画  $LP$ 、生産計画  $SC$ 、そして実際の製造工程  $PR$  が必要となる。ここである工程における変換  $\lambda_i$  は、 $DN, PP_i, LP_i, SC_i, PR_i$  を利用して、

$$\lambda_i = \langle DN, PP_i, LP_i, SC_i, PR_i \rangle, \quad (2.5)$$

の5項組として表すことができる。

本研究で扱う製造フロアレベルの生産システムにおいては、製品設計  $DN$  および工程  $i$  における工程計画  $PP_i$  は既に終了しているものとし、設備配置計画  $LP_i$ 、生産計画  $SC_i$ 、製造工程  $PR_i$  の自己組織的構成法を構築することが、本研究の扱う範囲となる。

本研究における自己組織的構成法を、

「生産システムを自己組織化により構成する方法」

であると定義すると、生産システムの自己組織的構成法は、製造フロア  $MF_j$  で  $i$  番目の工程が処理されるものとすれば、

「製造フロア  $MF_j$  における自己組織化による  $LP_i, SC_i, PR_i$  の構成法」と表すことができる。

### 2.2.3 自己組織化の定義

生産システムの自己組織的構成法で用いる自己組織化という言葉は様々な研究分野で用いられ、各研究分野で種々の自己組織化現象が観察されている。自己組織化に関する理論・現象を年代を追って代表的なものを挙げると、ウィナーのサイバネティクス（脳神経系を対象とする）、フェルスターのエントロピーによる解釈、アイゲンの分子進化のハイパーサイクル、プリゴジンの散逸構造などがある。[50].

ハーケンのシナジェティクスも自己組織化を取り扱った分野としてよく知られている [51]. シナジェティクスでは研究範囲を生物・物理学のみに限定せず、流体パターンの生成やレーザー発振等の物理系、生体器官の組織化等の生物系、さらには人間社会の形成といった社会システムまで

も対象としている。例えば、プロプストは企業組織のマネジメントにおいて、企業はほかの社会制度や社会組織と同じように、自己変革的、自己進化的、自己組織的なシステムであり、既存のマネジメント部門によるトップダウン的マネジメントではなく、ボトムアップ的な進化的マネジメントの導入の可能性を議論している [52]。

また、クルーグマンは、[53]において空間経済学の都市規模分布における空間的自己組織化や、景気循環論における時間的自己組織化を例に、経済学においても自己組織化が観測される例を報告している。

シナジェティクスにおいては自己組織化を示すシステムは、すべて同じ原理に支配され、統一概念により統合できるという立場であるが [50]、現在までのところ統一概念、あるいは汎用的な数理モデルが確立されたわけではない。そこで、本研究では生産システムにおける自己組織化を提案するが、その自己組織化の定義を以下のように定義する。

「自己組織化とは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」

とする。ここで、自己組織化するシステム全体の秩序や構造は、空間的なものだけでなく、時間的秩序または構造も含むものとする。

#### 2.2.4 生産システムにおける自己組織化

本研究では、前節で述べたように生産システムの中でも特に製造フロアレベルの生産システムを対象とする。製造フロアレベルの生産システムにおける構成要素とは、種々の作業工程を担当する生産機械、作業工程を要求する製品、製品を搬送する搬送車 (Automated Guided Vehicle: AGV など)、あるいは搬送作業や機械のセットアップを行う作業員等であると考えられる。

生産行為を行うために、製造フロアにおいて為される計画で最も基本的なことは、製品を機械へと分配していくことである。そこで自己組織化に関与する構成要素を機械と製品に限定すると、前節において述べた本研究における自己組織化の定義より、製造フロアレベルの生産システムにおける自己組織化は、

「自己組織化とは生産機械と製品の相互作用により、製造フロアにおける秩序または構造が創発する過程」

と定義できる。ここで、製造フロアレベルの生産システムにおいて自己組織化する構造にも空間的構造と時間的構造がある。例えば、空間的構造とは製造フロアレイアウト等であり、時間的構造とは生産スケジューリング等が相当し、それらの構造が大域的な制御機構無しに自律的に組織化する過程のことを指す。

さらに、本研究では生物指向型生産システムのコンセプトに則し、機械と製品が自律要素であると仮定する。つまり、機械は自身がどのような作業工程を行うことができるかという生産能力をDNA情報として有しており、一方製品は自身がどのような作業を行ってほしいかという生産要求をDNA情報として持っているものとする。そうすると、機械と製品の局所的相互作用は、機械の生産能力と製品の生産要求の適合過程であると捉え直すことが可能であり、自己組織化過程は、

「自己組織化とは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」

と捉えることが可能である。自己組織化を機械の生産能力と製品の生産要求の適合過程の結果生成する過程であると捉えた場合の自己組織化の概念図を Fig. 2.1 に示す。

生産システムにおける自己組織化過程を以上のように定義すると、「ボトムアップ的」「並列处理的」「部分から全体へ」という自律分散システムが本来備えるべき性質を備えていることとなる。つまり、生産システムの自己組織的構成法が実現すると、

- 複雑な生産システムへの適用が可能

生産活動がシステム全体を統括する大域的機構によらず、機械と製品の局所的適合の結果として行われるため、システム全体の振る舞いを統括する大域的ルールが必要ない。大域的ルールを利用すると、対象とするシステムの規模が大きくなるにつれて、考慮しなければならない要因が増加するためルールの設計が困難となる。それに対して自己組織的構成法を利用すれば、対象とする問題の規模の影響

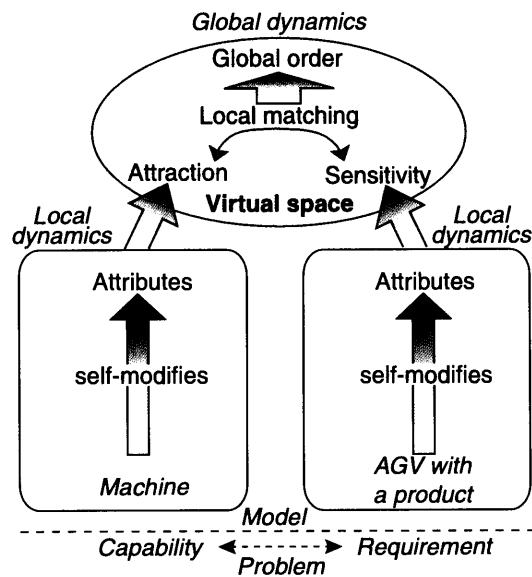


Fig. 2.1: 生産能力と生産要求の適合結果としての自己組織化

度が低くなり、様々な規模のシステムにおいて利用可能であるといえる。特に、大域的ルール的设计が困難となる大規模かつ複雑な製造フロアにおいてその有効性が露わとなることが期待できる。

- 環境変動への適応が可能

生産要求の変動や、システム内部の故障など、生産環境の変動への適応が可能となる。ある生産環境条件下で大域的な秩序や構造が自己組織化した後に、生産要求の変動等の環境変動が生じた場合、要素間の相互作用に変化が生じる。この相互作用の変化の結果として起こる自己再組織化の過程によって新たな秩序が生成する。自己組織的構成法を利用すると、上記の様な自己再組織化過程により、環境の変動に対して適応することが可能となる。

という特徴を有した生産システムの構成法が実現すると考えられる。

## 2.3 自己組織化のモデリング手法

前節までに述べた生産システムの自己組織的構成法を構築するためには、自己組織化を引き起こす原動力ともなる要素間の相互作用を、製造フロア内でいかに実現するかが重要となる。

本研究では、システムを構成する要素が、空間内に生成している場の情報を介した相互作用を用いる手法を提案する。これは、Vaarioにより計算機内において、細胞からなる生物の構造の自己組織化過程をモデル化するために、人工生命 [41] の研究分野で提唱されたものである [54, 55, 56]。自己組織化手法を生産システムへと用いることで生産システムにおける自己組織的構成法の構築を行う。

以下では、ポテンシャル場を用いた自己組織化手法の概略と、それを生産システムへと適用する方法および利点、そして本研究の手法のモデル化を行う。

### 2.3.1 ポテンシャル場を用いた自己組織化

生物構造の動的な創発過程である自己組織化を計算機上で実現するための手法は、環境からの力を感じることができる自律要素にもとづいている。各要素は互いに独立した要素であり、各々の動作ルールを有しているものとする。その基本要素がある共通の環境下で、各々自身の動作ルールを実行することによって発生する要素間の局所的相互作用の結果として、基本要素の相互作用ネットワークが構築され、全体的な振る舞いが組織化されるというものである。

#### 基本要素

自己組織化手法における基本要素とは自身の内部と外部である周囲環境の状態に応じて、要素自身を変化させることが可能である。これらの動作ルールは、基本要素の受動的な要素のみを変更することが可能であり、その変化がいくつかの行動をいかに引き起こすかというのは、その基本要素が存在する環境に依存する。

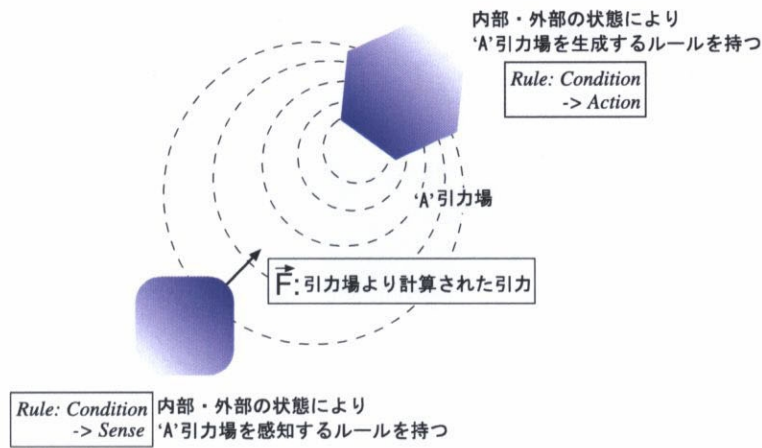


Fig. 2.2: ポテンシャル場を介した基本要素間の相互作用

環境とは自律要素が受けるポテンシャル場による環境からの力であるとし、それが場を感知できる要素に動作を引き起こす。

Fig. 2.2は、一方の要素が場を生成し、もう一方の要素が発した場を感知することによって、場を用いた環境が基本要素に動作を引き起こす相互作用の過程を示している。

基本要素間の相互作用を実現するための要素の動作ルールは、以下の様な単純なプロダクションルールとしてモデル化する。

$$\text{if...then activate attraction field 'A'} \quad (2.6)$$

$$\text{if...then be sensitive to attraction field 'A'} \quad (2.7)$$

これは、ある状態が満足されると、一方の要素が'A'フィールドを生成するとともに、同様に、ある状態が満足されると、もう一方の要素がこの'A'フィールドを感知し、結果としてルールに基づいて動作が生成されることを表している。

以上のように、ある環境下に複数の基本要素が存在すると、基本要素による相互作用のネットワークが生成される。そして一方の要素がフィールドを生成し、そのフィールドをもう一方の要素が感知するという、基本要素間の相互作用の結果として、ある構造が創発することとなる。



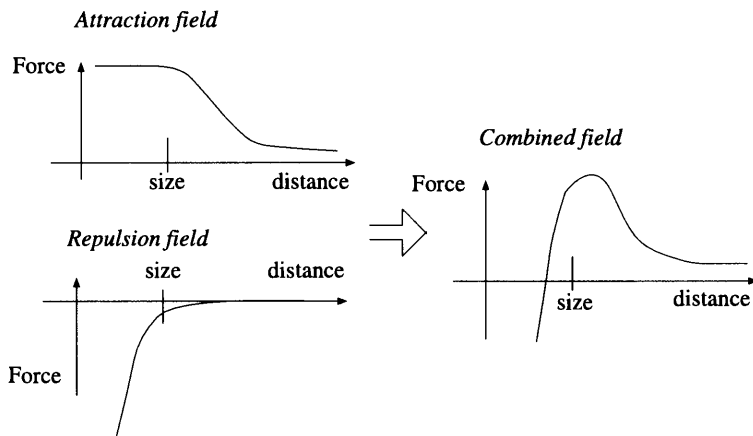


Fig. 2.3: ポテンシャル場：引力場と斥力場からなる

生成された構造は、単純な局所的相互作用を用いた自己組織化の第1レベルの結果である。ある環境下にこれらの第一段階の構造がいくつか存在すると、新たなポテンシャルフィールドの生成と感知にもとづいた同様の相互作用の結果として第2レベル、さらに上のレベルの相互作用が起こり、より複雑な構造が創発することが可能となる。

### 環境のモデル

環境は基本要素の属性によって、それらを動作させる様な力を表現する必要がある。その属性は、それらの状態と周囲環境に従って基本要素自身によって変更される。これらの力は、要素間の距離の関数となるようなポテンシャル場を利用し、ポテンシャル場の勾配を求めることにより要素間に作用する力が求まる。

ポテンシャル場は、場の勾配の形状により引力場 (attraction field) と斥力場 (repulsion field) に分類することが可能である。引力場は他の要素を引き寄せるために用いられ、一方斥力場は仮想空間内において要素が物理的な空間を占めるために用いられる。Fig. 2.3 にポテンシャル場の勾配の概要図を示したものであり、size は要素の大きさを表している。

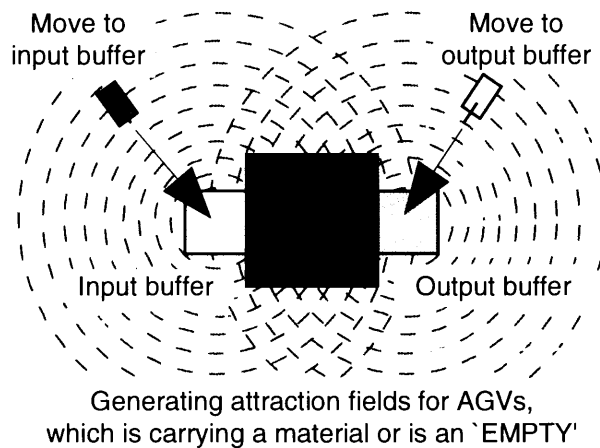


Fig. 2.4: 引力場を介した機械と AGV の相互作用

### 2.3.2 生産システムへの適用

前節で述べたように、自己組織化を生産機械と製品の相互作用により製造フロア上の構造が創発する過程とする。その際の機械と製品の相互作用に先に述べたポテンシャル場による方法を用いる。提案手法における機械と製品の相互作用は以下のように行われる。

機械は自身の生産能力を認識している自律要素とし、生産能力に対応した引力場を生成する。一方、製品も自身の生産要求を認識している自律要素であるとするが、製品自身は製造フロア上を移動することができないので、AGV を利用する。AGV は搭載した製品から生産要求を受け取り、その生産要求に対応した引力場を感知し、AGV は感知した引力場の生成源へと移動する。AGV は搬送中の製品を処理可能な機械からの場をすべて感知するが、最終的に AGV は引力場の生成源である一つの機械へと到達し、搭載している製品を渡し生産が進捗する。また、斥力場を要素間の衝突回避に用いている。Fig. 2.4 は、機械と AGV 間のポテンシャル場を介した相互作用の様子を示している。

生産システムにおいて場を介した相互作用を利用することには、以下の様な特徴がある。

- 各生産要素を統一的な方法で制御が可能

生産機械の種類や生産品種が多数あったとしても、その違いを場の種類の違いとしてモデル化可能であり、システムの多様性を容易に表現可能である。また、機械の能力や製品の納期などに関する種々の優先関係も場の強さとして違いをモデル化することにより、容易に表現可能である。

- 通信コストが低い

自律分散型生産システムを実現する最も一般的な手法は、Simthによる契約方式 [20] であると述べた。しかし、契約方式は要素間による直接通信によるものが通常であり、要素数の増大によりその通信コストが急激に増大し、しばしば問題となる [57]。一方、場を生成する機械は AGV がどこに何台いるのかという情報を知っている訳ではなく、また AGV も場が生成していることは感知するが、それがどこに存在するどの機械から生成しているかを認識する必要がない。つまり相互作用を実現するための通信コストを押さえることが可能である。

- 時間的計画と空間的計画の同時性

製造フロアという空間に分布した要素による場の生成と消滅は、そのタイミングが時間的作用を表すのと同時に、空間的作用を含んでいる。つまり、時間的計画を作成するときに空間的制約を加味することが可能であるし、逆に空間的計画を作成する際に時間的制約を加味することが可能となる。

以上の様な特徴から、生産システムの構成法として自己組織化を用いることには利点があるものと考えられる。次節ではまず、生産システムの自己組織的構成法において用いる各要素のモデル化を行う。

## 2.4 提案手法のモデル化

本研究で対象とする製造フロアレベルの生産システム  $MF_j$  は、生産の対象となる製品  $P_i$ 、各製造工程を担当する機械  $M_k$ 、製品が自身で製造フロア上を移動できないため、それを搬送する AGV (Automated Guided Vehicle)  $AGV_l$  から構成されるので、

$$MF_j = \{P_i, M_k, AGV_l\}, \quad (2.8)$$

と表すことができる。

以下では、生産システムの自己組織化過程を実現するために、本研究で利用するポテンシャル場および機械、製品、AGV のモデル化および要素の行動ルールの定式化を行った。各モデルに関して以下で説明する。

### 2.4.1 ポテンシャル場

本研究におけるポテンシャル場は、要素間の距離の関数として記述されるポテンシャル関数  $U$  として記述する。ポテンシャル場の中に存在するある要素に働く力は、ポテンシャル関数を微分した関数  $F$  で求まる。すなわち、

$$\mathbf{F} = -\nabla U, \quad (2.9)$$

となる。本研究では関数  $F$  を

$$\mathbf{F} = -f(dist) * \mathbf{u}, \quad (2.10)$$

$$f(dist) = \frac{a}{b + (c * dist)^p} + d \quad (dist \geq 0), \quad (2.11)$$

として表現する。ここで  $f(dist)$  は要素間に作用する力の大きさであり、 $\mathbf{u}$  は要素の位置ベクトル  $\mathbf{x}_{pos}$  とポテンシャル場の生成源を表す位置ベクトル  $\mathbf{x}_{source}$  との差  $(\mathbf{x}_{pos} - \mathbf{x}_{source})$  なるベクトルの単位ベクトルである。また、 $dist$  は要素間の距離、 $a, b, c, d, p$  はそれぞれ定数を表しており、定数  $a$  の正負により要素間に作用する力の正負が変更でき、引力場と斥力場を

実現できる．引力場は要素を引き寄せるために，斥力場は要素を遠ざけるために利用する．

要素に引力  $\mathbf{F}_{attr}$  と斥力  $\mathbf{F}_{repl}$  が同時に作用しているとすると，要素に作用する力  $\mathbf{F}$  は，

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_{attr} + \mathbf{F}_{repl}, \quad (2.12)$$

となる．今，ある要素に作用する引力場が  $\alpha$  個の他の要素から生成されているとし，一方斥力場も  $\beta$  個の他の要素から生成されているとすれば，要素に作用する力はすべての力の重ね合わせとして計算し，

$$\mathbf{F} = \sum_{\alpha} \mathbf{F}_{attr} + \sum_{\beta} \mathbf{F}_{repl}, \quad (2.13)$$

と表すことができる．各自律要素は力  $\mathbf{F}$  をもとに行動を行う．

## 2.4.2 生産機械

生産機械  $M_i$  は，入力バッファ，処理部，出力バッファから構成され，入力バッファから素材をのせた AGV を引き寄せる引力場を生成する．また，加工が修理した製品を排出するため，空の AGV を引き寄せる引力場を出力バッファから生成する．さらに，衝突回避を行うため，自身の中心から斥力場を生成する．Fig. 2.5 に，生産機械の概要を示す．

本研究では，ある生産機械  $M_i$  は場の生成ルール  $F_i^m$  を持ち，場の生成ルールは引力場生成ルールと斥力場生成ルールの2項組として，以下のように定式化する．

$$F_i^m = \langle A_i^m, R_i^m \rangle, \quad (2.14)$$

$A_i^m$  は，if - then 形式のルールとして，以下のように記述される．

$$A_i^m : \text{if } C_i^m(c_1, c_2, \dots, c_p) \text{ and } I_i^m(s_1, s_2, \dots, s_q) \text{ then } G_i^m, \quad (2.15)$$

ただし， $C_i^m(c_1, c_2, \dots, c_p), (p > 0)$  は，工作機械が  $p$  種類の処理能力を有しているとした場合の，処理能力に関する変数  $c_1, c_2, \dots, c_p$  を引数とす

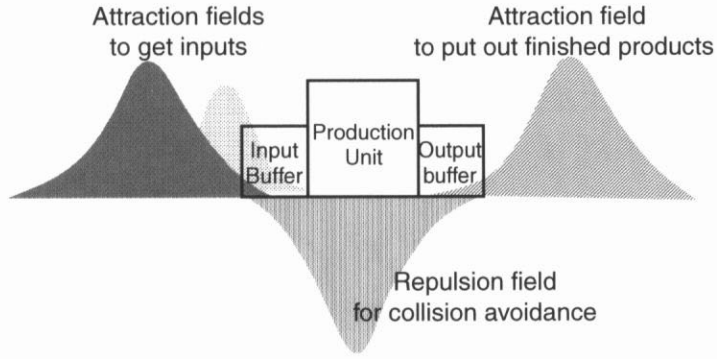


Fig. 2.5: 引力場と斥力場を生成する機械

る述語であり,  $I_i^m(s_1, s_2, \dots, s_q)$ , ( $q > 0$ ) は, 生産機械の  $q$  種類の内部状態  $s_1, s_2, \dots, s_q$  を引数とする述語を表すものとする. また, 後件部  $G_i^m$  は, 前件部が成立した場合の引力場生成の行動を表し,

$$G_i^m = \langle L_i^m, H^{c_k}, a_i^m \rangle \quad (0 < k \leq p) \quad (2.16)$$

と表現する. ここで,  $L_i^m \in \{In\_buff, Out\_buff\}$  は, 場生成の位置, すなわち入力バッファ(*In\_buff*)と出力バッファ(*Out\_buff*)のどちらから場を生成すべきかを示す.  $L_i^m$  が前節における引力場計算の  $\mathbf{x}_{source}$  となる.  $H^{c_p}$  は, 生産機械の能力, すなわち可能な処理  $c_p$  に対応する場の種類を表し, 機械は  $c_p$  の数だけ引力場が生成可能である, また,  $a_i^m = \{on, off\}$  は, 場を発生させるか (*on*) 否か (*off*) を示すものとする.

一方, 斥力場生成ルール  $T_i^m$  は, 以下のように定式化する.

$$T_i^m : \text{if } S_i^m(u_i^m) \text{ then } E_i^m \quad (2.17)$$

ただし,  $S_i^m(u_i^m)$  は, 生産機械  $i$  のサイズ  $u_i^m$  を引数とする述語であり,  $E_i^m$  は, 斥力場生成の行動を示し,

$$E_i^m = \langle L_i^m, a_i^m \rangle \quad (2.18)$$

と表現するものとする.  $L_i^m \in \{Center\}$  は斥力場を生成する位置, すなわち装置の中心を表し, 前節の斥力計算の際の  $\mathbf{x}_{source}$  に相当する. また,  $a_i^m = \{on, off\}$  は, 引力場と同様, 場を発生させるか (*on*) 否か (*off*) という行動を示すものとする.

### 2.4.3 製品

製品  $P_i$  は自身の生産要求を認識しているとする.  $P_i$  の  $m$  個の作業順序からなる生産要求  $R_m^P$  は

$$R_m^P = \{K_1^P, K_2^P, \dots, K_m^P\}, \quad (2.19)$$

の様に表される. ここで,  $K_m^P$  は  $p$  種類ある生産要求の集合であり,  $K_m^P = \{r_1, r_2, \dots, r_p\}$  である.  $r_i$  は,  $q$  種類ある生産要求のうちの1つであり  $r_i \in \{s_1, s_2, \dots, s_q\}$  となる.  $K_m^P$  は例えば,  $K_m^P = \{\text{加工精度, 大きさ, } \dots, \text{重さ}\}$  等であり,  $r_i$  は,  $r_i = \{100\text{cm}^2, 125\text{cm}^2, \dots, 150\text{cm}^2\}$  等を表す.

どの生産要求を活性化するかに関しては, 生産要求活性化ルール  $I^P$  を利用する.

$$I^P : \text{if } \text{finish}(K_n^P) \text{ then } \text{activate}(K_{n+1}^P), \quad (2.20)$$

ただし,  $n < m$  である. ここで,  $\text{finish}(x)$  は, 生産要求  $x$  の処理が完了した場合に真となる述語であり,  $\text{activate}(y)$  は, 生産要求  $y$  を活性化するという述語である.

### 2.4.4 AGV

製品を搭載しているAGVである  $AGV_i$  は, 引力場を感知するか否かを決定するため, 以下に示すルール  $D_i^a$  を持つ.

$$D_i^a : \text{if } \text{enable}(K^{P^a}, h_l) \text{ then } V_i^a. \quad (2.21)$$

ただし,  $K^{P^a}$  は搬送中の製品  $P_i^a$  の現在活性化している生産要求,  $h_l$  は, それぞれAGV  $i$  が現在搭載している製品の種類, 製品  $J_i^a$  に対応する生産要求の部分集合, および生産機械  $l$  から受信している場の種類を示す.  $\text{enable}(x, y)$  は, 生産要求  $x$  が, 場  $y$  に対応する工作機械の能力で処理可能な場合に真となる述語である. また, AGV  $i$  が, 製品を搭載していない場合は, 前件部は成立しないものとする. 後件部  $V_i^a$  は, AGV  $i$  の感知している場に対する行動を表し,

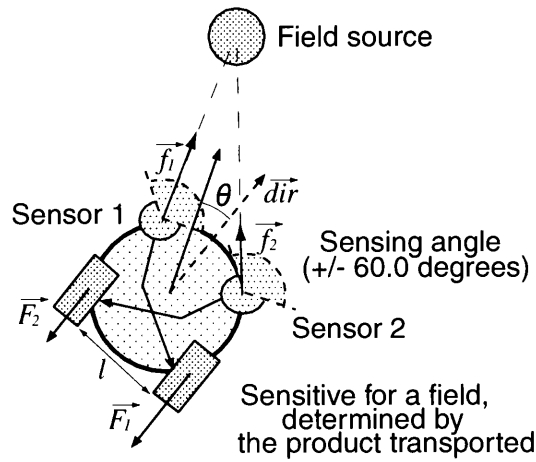


Fig. 2.6: フィールドを感知して移動する AGV

$$V_i^a = \langle b_i^a \rangle, \quad (2.22)$$

で表現するものとする。ただし、 $b_i^a = \{\text{Activate}, \text{Not\_activate}\}$  は、場を感知する (*Activate*) か、否か (*Not\_activate*) を示す。AGV は、複数の生産機械からの場を感知可能であり、最終的な行動は各引力場に関する  $V_i^a$  の重ね合わせとなる。

製品を搭載していない AGV  $i$  は、空の AGV を引き寄せる必要のある生産機械からの引力場を感知するルールを持つ。本ルールは、生産要求が 'EMPTY' になった場合であり、式 (2.21) において、 $K^{P_i} = \text{EMPTY}$  という特別な場合であるとみなせる。

また、AGV は斥力場を生成しており、(2.17) 式と同様に大きさに基づいた生成ルールを有する。

以上の行動ルールを持つ AGV は Braitenberg の Vehicle [58] をもとに、Fig. 2.6 のように構成した。

AGV の行動  $V_i^a$  は、感知した場によって決定される。AGV は、場を感知するセンサを 2 つ有し、それぞれが右と左のモータに交差して接続され、センサの計測範囲は前方 120 度である。このように場を感知するセンサ、すなわち 2.4.1 節における  $(x)_{pos}$  を前方 2 箇所に設定することで、AGV の前方等距離にに等しい強さの引力場が 2 つ存在する場合にでも、2 つのセ



ンサ情報を利用することでデッドロックに陥ることを防ぐことができるという利点がある。また、システムの構造が用意であり、計算量も小さく、複雑な行動を発生させることが可能であることから採用した。

時刻  $t$  における AGV の方向ベクトルを  $\vec{dir}$  とし、その大きさだけ前方に進むとすれば、その回転角  $\theta$  が分かれば時刻  $t+1$  における AGV の位置と方向が決定できる。回転角  $\theta$  は以下の様にして求める。

$$\theta = \begin{cases} \tan^{-1}\left(\frac{|a*\vec{F}_1|-|a*\vec{F}_2|}{p*l}\right) \\ -30^\circ \end{cases} \quad (2.23)$$

ここで  $l$  は車輪間隔、 $p$  は定数、 $a$  は場の優先度を表す定数である。また、 $\vec{F}_1$ 、 $\vec{F}_2$  は、Fig. 2.6 中の様に進行方向に対して逆向きの方向を持つ駆動力を表すベクトルであり、その大きさはセンサ入力  $|\vec{f}_2|$ 、 $|\vec{f}_1|$  に等しい。

式 2.23 上部は、 $(|\vec{F}_1| \neq |\vec{F}_2| \text{ かつ } |\vec{F}_1| = |\vec{F}_2| \neq 0)$  の条件を満たす場合であり、 $\theta$  だけ回転した  $\vec{dir}$  方向に、AGV の移動速度で進む。下部はそれ以外の場合であり、この場合は  $|\vec{dir}| = 0$  とし、AGV はその場で回転するものとする。

$|\vec{F}_1| = |\vec{F}_2|$  の場合に回転することにより、ポテンシャル場を用いた場合の懸案であるデッドロックの解消が期待できる。また、 $|\vec{F}_1| = |\vec{F}_2| = 0$  の際にも回転することで、特定の場を感知不可能な場合に別の場の生成源を探索できる。

## 2.5 時間的計画と空間的計画の統合

2.3節で述べたように、本研究で提案する生産システムの自己組織化手法を利用する上での特徴の1つに、時間的計画と空間的計画の同時性があると述べた。この特徴を利用すれば複数の計画問題が同時に扱うことが可能となる。

生産システムにおけるさまざまな計画問題は、本来同時に計画されたり、制約や前提条件として陽に考慮された方が良いが、別々に計画されている問題が多くある。対象とする計画問題の規模が大きくなり、従来の計画手法にとっては複雑になりすぎるために、どちらかを無視する場合や極端に簡素化して計画問題にたたき込む場合などが通常である。

例えば、生産スケジューリング（特に日程計画）を行う場合には、機械の配置、搬送系路も考慮した方が望ましい。考慮せずに求解したとしても、対象とするフロアの規模によっては求めた解が利用できない場合もある。しかし、実際のスケジューリングの場合には搬送は考慮されないか、考慮される場合でもおおよその搬送時間を見積もって機械の処理時間として導入されるのが通常である。

提案手法をスケジューリング問題へと適用した場合、ポテンシャル場の相互作用の結果として、製品が移動しながらリアルタイムに処理を行う機械を決定する。すなわち、搬送行為が無ければ製品が機械へと配分されず、スケジューリング問題と搬送計画の問題が統合されているため、搬送系路を考慮した計画の立案が可能となる。また、搬送能力の制約条件も同様に考慮可能であり、搬送能力を考慮にいったスケジューリングを計画することが可能となる。

また、設備レイアウト計画の場合、レイアウトは製品の流れに大きな影響を受ける。そのためレイアウト計画と、製品の流れを決定づけるスケジューリングは同時に行われるべきであるが、現在は切り離されて考えられる場合が多い。例えば、レイアウトの評価指標として製品が移動する動線を用いる場合、代替機械が複数台ある時には、どの機械において作業が行われるかによって動線距離は変わってしまうが、実際には特定の機械を代表させたり確率的に複数台の機械を通った場合の平均値等を利用したりするため、考慮できているとはいえない。

提案手法を設備レイアウト計画問題へと適用した場合は、スケジューリング問題の場合と同様製品が製造フロア内を移動し、さらに機械も移動することでレイアウト計画が行われる。つまり、スケジューリングを行いながらレイアウト計画を行うことになる。製品が流れながらレイアウトが決定されるため、レイアウトにスケジューリング上の制約や、動的に時間変化する装置負荷を考慮することが可能となるという利点がある。

以上の様な自己組織的構成法の特徴を利用して、本論文の以下の章では、

- 生産スケジューリング (3章)

製品の搬送先を AGV が移動しながら決定する。

- 設備レイアウト計画 (4章)

製品を流しながら機械が移動することでレイアウトを作成する。

- ラインレス生産システム (5章)

2章と3章をさらに発展させて、すべての要素が移動しながら生産を行う。

という3つの問題に対して提案手法を適用し、その有効性を確認する。そしてさらに、

- 強化学習による自己組織化 (6章)

提案手法に強化学習を導入し、自律要素が行動ルールを動的に獲得する。

のように提案手法に強化学習を導入し、より複雑なシステムの秩序や構造を生成できるように自己組織的構成法の拡張を図る。

## 2.6 結言

本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。それを生産システムに用いる場合、生産情報の観点から「生産能力と生産要求の相互作用により、システム全体の秩序または構造が創発する過程」となることを示した。

次に自己組織化を引き起こす駆動力となる相互作用を、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に関して述べた。

各生産要素の行動を規定する行動ルールに関してモデル化および定式化を行うとともに、最後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、従来別々に行われてい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

# 自己組織的構成法による生産スケ ジューリング

## 第3章

# 自己組織的構成法による生産スケジューリング

### 3.1 緒言

本章では、2章で述べた生産システムの自己組織的構成法を、生産スケジューリング問題へと適用する方法に関して述べる。

3.2節では、まず初めに生産スケジューリング研究の現在の動向についてまとめた後、その問題点について述べる。次に自己組織化をスケジューリング問題において利用することの利点について述べる。

3.3節では、電子回路のプリント基板 (Printed Circuit Boards: PCBs) への穴空け工程を対象として、自己組織化手法を利用する際のフロアのモデル化と行う。その後、提案モデルを用いて計算機実験を行い、生産過程の自己組織化を観察するとともに、環境の変動に対する適応過程、既存のスケジューリング手法との比較実験を行い、提案手法の有効性を確認する。

3.4節では、本研究で提案する生産過程の自己組織化の実現は、生産現場からの人間の排除を意味するのではなく、自己組織化を実現する生産要素の一つとしてシステムに介入させることが可能であると考えている。そこで、自己組織化過程に対しての人間の介入を許し、人間とシステムの相互作用を実現するため、仮想空間を用いたインターフェースを構築

する。計算機実験において、仮想空間のインターフェースを通じて、人間の介入が自己組織化過程に対してどのような影響を与えるかを観察する。最後に 3.5 節で本章をまとめる。

## 3.2 スケジューリング問題への自己組織化の適用

### 3.2.1 生産スケジューリング研究の動向

スケジューリングは現在、生産、プロジェクト、物流、交通、コンピュータ、サービスなど、効率的運用が求められるあらゆる組織における最も重要な計画行為の1つである [59]。対象を生産システムに限定しても、スケジューリングは時間的あるいは規模的にも様々なレベルの計画問題を解決する行為である。その中でも、本研究が対象とするのは製造フロアにおける日程計画問題、いわゆる生産スケジューリング問題であり、製造フロアに到着したジョブを機械装置にいかにより効率よく時間的に配分するかという問題である。中でもスケジューリング問題において最も複雑といえるジョブショップスケジューリング問題が広く対象として研究されている [60]。

スケジューリング問題の解法が発展を遂げたのは、OR (Operations Research) 手法の発達により、スケジューリング問題が組み合わせ最適化問題としてとらえられ、数理的解法が試みられるようになってからである。しかしながら従来に厳密解を求める典型的な OR 手法では、実工場レベルの大規模なスケジューリング問題において解を求めることが困難になるため、近年は近似解法を利用した求解がされるようになってきている [61]。

近似解法の中でも特に、SA (Simulated Annealing) [62]、TS (Tabu Search)、GA (Genetic Algorithm) [43] 等に代表されるメタヒューリスティクス [49] は、大規模な最適化問題を実時間で効率良く解を求める手法であり、情報技術の発達により計算機実験が可能となるに従い利用されることが多くなっている。その中でも GA はジョブショップスケジューリング問題等の組み合わせ最適化問題において効率よく解を求めることが可能であると報告されており [63]、スケジューリング問題における有効性が広く認知され、生産スケジューリング研究においても盛んに研究されている。

以上のようなメタヒューリスティクスを用いたスケジューリング手法は、本来大規模なスケジューリング問題を組み合わせ最適化問題として解くための近似解法として提案、研究されてきたものである。しかしながら、提案される手法の実験や検証に用いられる研究モデルには、



- 研究モデルのジョブショップは静的でかつ確定的である。
- 研究モデルにおける制約は比較的単純でその数も多くない。
- 研究モデルのコスト関数は線形を仮定している。
- 研究モデルは単一目的のものが多い。

という点で、実問題のスケジューリング問題との乖離が存在するケースが多いという指摘があり [61]、実問題において使用できるまでの実用化が進んでいないケースが多い。

例えば、実工場において解かなければならないスケジューリング問題においては、スケジュール作成時に、投入されるジョブの到着が正確に予測できない場合や、機械や搬送車に関しても故障やメンテナンス等に関して情報が不完全な場合がある。さらに、これら不完全な生産情報を、ある範囲を持った予測値で代替してスケジューリング問題を解いたとしても、事前に想定されていたジョブが製造フロアに届かなかつたり、予測の範囲を超えて機械の故障が発生し事前のスケジュール通り生産が行えないこともある。

生産現場において、生産に関する事前情報の不完全性や生産過程における動的な変動は、生産環境の複雑化に起因して今後ますます増大するであろうことが予測できる。それらの事前に予測困難な変動や、事前生産情報の不完全性をうまく取り扱うためには、事前計画がそのままでは利用できなくなった時点で再スケジューリングを行うリアクティブスケジューリングや、そもそも事前計画を作成せずに生産の進捗にあわせて場当たりにスケジューリングを行うリアルタイムスケジューリングが有効となる。

リアルタイムスケジューリングを実現する方法の1つとして、ディスパッチングルールを利用したリアルタイムスケジューリングがある。これは、機械でどのジョブを作業すべきかを、あらかじめ決められたルールを用いてリアルタイムで解決する方法である。一般的に、平均滞留時間を短くするためには加工時間を考慮したルールである SPT (Shortest Processing Time: 最早処理時間順) ルール等がパフォーマンスが良いとされる。ま

た、納期遅れに重点をおくなら、EDD (Earliest Due Date: 納期余裕最小順) ルールや SLACK (SLACK 時間順) ルールがパフォーマンスが良いとされる [64]. しかし、ディスパッチングルールは問題の目的依存が大きく、一つの問題に対して有効なルールが一つではなく複数存在するなど、汎用的な方法とは言い難い.

近年の情報技術の発展により、自律エージェントを用いた自律分散型スケジューリングが注目を集めている [16]. 自律分散型スケジューリングは、スケジューリング問題を要素レベルの部分問題に落とし込み、システムを構成する要素間の通信を実現して自律的に、かつリアルタイムでスケジューリング問題の解決を図るものである. 自律分散型スケジューリングは大規模な問題を取り扱うことが可能であり、また、生産環境の変動に対する適応性に優れている.

しかし現在までのところ、自律分散型の生産スケジューリングを構築する方法は多くなく、具体的な手法としては、分散人工知能 [35] の手法の1つである契約方式 [20] を利用するのが通常である [18, 36, 38].

契約方式を用いれば分散的に各タスクを処理できるが、以下の点が問題となる [39].

- タスクの告示から入札、落札までのプロセスは要素間の直接通信を基本としており、各要素が他の要素の存在を認識する必要がある.
- すべての情報がある特定の管理者から受け取るのでは、管理が集中した現在のシステムと同じで、中央コンピュータの負担が大きくなる.
- すべての要素がシステム全体に対してブロードキャストすることも考えられるが、通信処理の負担が極めて大きくなる.

また、ディスパッチングルールを用いたリアルタイムスケジューリングも、エージェントベースアプローチも、スケジュール作成時点の情報のみを用いて計画を立てるために、環境変動に対してロバストな手法であるといえる.

生産スケジューリングの枠組みにおいては、搬送システムまで考慮に入れてスケジューリングを行う場合は少ない。つまり、あるジョブを作業する機械が決定した場合、ジョブを機械まで搬送するための別の搬送計画が必要となる場合が多い。搬送計画まで考慮される場合であっても、簡単な制約として導入されるか加工時間へとたたき込むことがあるのみであり、十分ではない。

さらに、ジョブの搬送先が決定したとしても、搬送中に機械が故障した場合にはその時点で搬送先が無くなるため、作成したスケジュールが実行不可能となり、改めて再スケジューリングが必要となるなどの問題もある。すなわち、スケジューリングが行われてから搬送計画が作成されるというように、2つの計画が逐次的に進められているために、スケジューリングと搬送計画の乖離が見受けられ問題となる。生産スケジューリングを行う場合、搬送システムの搬送計画を別途扱うのではなく、両方を同時に計画するような手法の開発が必要となる。

以上より、生産環境の変動に適応可能なスケジューリング手法である自律分散型スケジューリングを構築するため、契約方式に代わる新しい手法が必要である。また、その手法は、搬送システムのスケジューリングや軌道計画を同時に解決できるスケジューリング方法であることが望ましい。本研究では、第2章で述べた生産システムの自己組織化手法を利用することで、搬送過程を考慮したリアルタイムスケジューリング過程を実現することを提案する。

### 3.2.2 自己組織化を用いた自律分散型リアルタイムスケジューリング

本研究では、第2章で述べた自己組織化をスケジューリング問題に適用する。すなわち、機械の加工能力と、製品の加工要求の場を介した局所的かつ自律的な適合により生産が進む手法の構築を行う。そのために、以下のような利点が考えられる。

- 搬送系を含んだスケジューリングが可能

相互作用に場を利用しているため、製品が移動しながら搬送先が決定する。すなわち、搬送行為と搬送先の決定、すなわちスケジューリングが同時に行われることになり、従来のスケジューリング手法のように、スケジューリング後に新たに搬送経路の計画を作成する必要がなくなり、スケジュール自体に搬送系の制約が含まれることとなる。

- 通信コストが削減可能

提案手法では、機械と製品の局所的適合に場を介した相互作用を利用している。機械は場を生成しているが、それを感知している他の要素がいるのか認識する必要がない。また、AGVは引力場を感知して移動するが、その場がどの機械から生成されているのかを認識する必要がない。一方、契約方式で利用される直接通信では、機械と製品（あるいは製品を乗せたAGV）が、通信を行うためにそれぞれ相手の存在を知る必要がある。

- 環境変動に適応可能

移動途中に機械故障が発生した場合も、ポテンシャル場の生成源が1つ消失するだけで、その時点で代替機械製造フロア上に存在するならば、代替機械へと移動することが可能となる。また、新たな機械が製造フロアに追加されたとしても、ポテンシャル場の生成源が1つ増えるだけであり、他の機械やAGVへとその存在を知らせる必要がない。これらの特徴は2番目の利点とも関連している。

以上より、本研究で提案する自己組織化を用いたスケジューリング手法は、前節で述べた生産スケジューリング手法の枠組みで捉えると、「自律分散型」の「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「搬送系の制約を考慮した」スケジューリング手法であると位置づけることが可能となる。

提案手法のこれらの特徴は、自己組織化の実現のために場を介した相互作用を利用していることに起因し、製品をどの機械へと搬送するかという時間的計画と、どのような経路を通して搬送するかという空間的計画を同時に行っているからである。

### 3.3 多層プリント基板製造工程への適用

自己組織化を利用したスケジューリング手法の有効性を確認するため、多層プリント基板製造工程に対して提案手法を適用する。対象とした製造フロアのデータは実工場から得たものを利用した。

以下の節では各生産要素のモデル化を行った後、計算機実験をおこない、その有効性を確認する。

#### 3.3.1 多層プリント基板製造工程

本例において対象とする生産過程は、多層プリント基板（multilayer Printed Circuit Boards: PCBs）の製造工程である。一般的に、PCBsの製造工程には8つのサブ工程が存在するが、本例ではそのサブ工程の中の、PCBsへの穴空け工程に焦点を当てる。

対象とする穴空け工程は、製造フロアに到着したジョブが各NC機械に分配されていく並列機械問題である。製造フロアに到着したPCBsは、その加工精度やボードの数などの加工要求にもとづいて、効果的に穴空け機械に振り分けられて行かなければならない。本工程は多品種、小ロットサイズ生産であり、さらに前工程からの製品の脱落があるなど、既存の生産スケジューリング手法によって生産計画を立案するのが困難となっている。そのため、実工場におけるこの振り分け過程は、人手によって経験的に行なわれているのが現状であり、リアルタイムにスケジュール計画を立てる必要が生じている。

#### 3.3.2 生産要素のモデル化

PCBs穴あけ工程に対して自己組織化を適用するため、各生産要素のモデル化を行った。製造フロアは製品、NC機械、AGV、製品搬入口、製品搬出口からなる。以下に各モデルについて述べる。

### 製品モデル

1つの製品は数枚の同種類のPCBボードから構成されており、このボードの種類が製品毎の生産要求を決定する。本適用例では、加工要求精度とボードサイズの2つを加工要求として用いる。

すなわち、前節において定式化した生産要求を表す式(2.19)のうち、作業順序 $R_m^p$ において $m = 1$ となる。また、生産要求は2つからなるため、 $p = 2$ であり、 $r_1$ :加工精度、 $r_2$ :ボードサイズを表す。

加工精度には、 $r_1 = \{A, B\}$ の2種類あり、‘A’精度の方が‘B’精度よりも要求精度が高いことを表す。

一方、ボードサイズには、 $r_2 = \{255, 300, 400, 510, 610\}(\text{mm})$ という5種類のサイズがある。

製品は以上のような生産要求を自身で認識しているとし、これらの生産要求は式(2.20)を用いて活性化されるが、本適用例の場合は $m = n = 1$ であるため、1つの作業工程が終了すれば製造フロアから排出される。

製品は自身で穴空け工程フロア上を移動することができないために、AGVに乗せられて各NC機械へと搬送される。

### NC機械モデル

各NC機械は、2種類の加工能力を有している。製品と同様に加工精度と、加工時にボードをのせるテーブルサイズである。すなわち、式(2.15)中の $C_i^m$ において $m = 2$ 、 $c_1$ :加工精度、 $c_2$ :テーブルサイズとする。

加工精度には $c_1 = \{A, B\}$ の2種類あり、‘A’精度の機械では‘A’、‘B’両方の加工要求を持った製品を処理できるが、‘B’精度の能力を持った機械では‘B’精度の加工要求しか処理することができない。

一方テーブルサイズには、 $c_2 = \{340, 400, 610, 800\}(\text{mm})$ の4種類があり、テーブルサイズよりも小さいサイズのボードで構成される製品しか、加工できない。例えば、加工精度‘B’でテーブルサイズが400の穴空け機械は、加工要求精度‘B’で、ボードサイズが255、340、400の製品を加工することが出来るものとする。

以上のNC機械は、式(2.15)の行動ルールにより、その内部状態にもとづいて引力場の生成を行う。

### AGV モデル

AGV は前章において構築したモデルを用いる。すなわち、搭載した製品よりその生産要求を受け取り、式(2.21)にもとづいて生産要求に対応した引力場を感知し、場の生成源へと移動する。

最終的には到達した機械へ搭載している製品を受け渡すことで生産が進捗する。

### 製品投入口・搬出口モデル

製品は一日毎に製品投入口へと到着する。製品投入量と時間は実工場の実績データを利用して作成し、モデル化している。

### 3.3.3 生産要求と生産能力の優先関係

本実験において、生産能力と生産要求の組合せの好ましさは、

1. ボードのサイズと同じテーブルサイズを持った機械で加工。
2. ボードの加工要求精度と同じ加工精度の能力を持った機械で加工。

というルールをもとに構成した。

Fig. 3.1 は、適合可能な生産能力と生産要求の組み合わせとその優先度を示している。実線矢印が優先度の高い適合を表し、破線矢印が優先度の低い適合を表している。優先度が高い組み合わせは、式(2.11)の  $a$  を 4 倍としてモデル化している。

上記 1. により大きなテーブルを持った機械が、小さなボードで占拠されることを防ぐことができる。また、2. により、加工精度の高い機械が加工要求精度の低いボードで占拠されるのを回避可能となる。

例えば、加工精度 'A' の機械は、両加工要求精度を有した製品を加工できるべきである。しかしながら、'A' の加工精度を持った機械は、同じ加工要求精度を持った製品を最も強く引き寄せ、同様に、430 のテーブルサイズを持った機械は、自身のテーブルサイズよりも小さなボードで構成される製品を加工することは出来るべきである。しかしながら、その

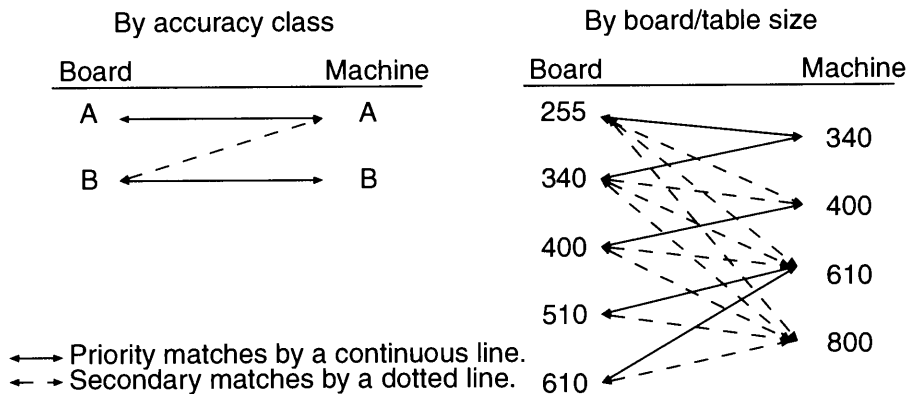


Fig. 3.1: 加工精度，ボードサイズに関する適合組合わせ

機械は，自身と同じ430のサイズのボードで構成される製品を優先的に処理を行うべきである。

これらの優先度を，引力場の強さに反映させてモデル化する．つまり，機械は優先度の大きさに従って数種類の場合を生成し，優先度が高いもの（Fig. 3.1 中の実線部分）は場合を大きくモデル化する．このモデル化により，フロアに到着した製品が引力場を用いて適した穴空け機械へと振り分けられて行く．

### 3.3.4 実験設定

対象とする製造フロアの配置は Fig. 3.2 の通りであり，フロアサイズは，77.8(m) × 49.4(m) である。

フロア上に機械は44台存在し，図のとおり配置されている．‘A’精度の機械が12台あり，残りは32台は‘B’精度の機械である．AGVは5台存在し，すべて同質なものである。

フロア中央には，製品投入口があり，製品を一時的に保存するためのキューがある．つまり各製品は，前工程から運ばれてくると，製品投入口にあるキューにスプールされる。

製品投入口から生成された引力場を感知した空のAGVが近づくとキューから製品が一つ取り出され，AGVへと搭載されフロア上に投入される。



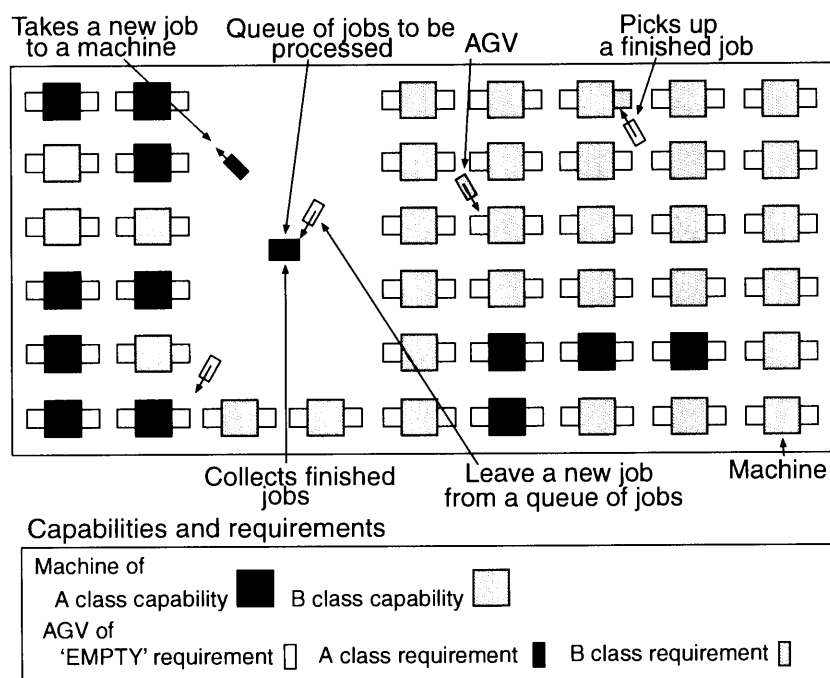


Fig. 3.2: PCB ボード穴あけ工程の製造フロア概要

フロアに投入された製品は、ポテンシャル場を介した相互作用にもとづき、各機械へと配分されていく。穴あけ工程が終了した製品は、製品投入口と同じ場所に設置された製品排出口にあるキューにスプールされ、後工程に送られる。

PCB 穴あけ NC 機械と AGV の局所的相互作用の媒介となるポテンシャル場の形状は、(2.11)式における各係数を表 3.1 の様な組み合わせで使用し、 $dist$  の単位は m である。

Table 3.1: 実験に使用したパラメータ

Field	a	b	c	d	p
Attraction	1.0	1.0	0.02	1.0	4.0
Repulsion	-5.0	1.0	1.0	0.0	4.0

### 3.3.5 実験結果と考察

#### リアルタイムスケジューリング過程

前節のモデルを用いて計算機実験を行った。

Fig. 3.3 に計算機実験のスナップショットを示す。図中の白線は AGV の動作軌跡を表しており、各 AGV が自律的に移動している様子が観察できる。

AGV は機械から生成する引力場を感知し、製品を搬送する。1 つの AGV を追跡すると、

1. 製品投入口から新しい製品を取得 (Fig. 3.3(a))
2. 他の機械を避けながら引力場生成源へと移動
3. 製品を機械へロード (Fig. 3.3(b))
4. 再び新しい製品を取得するために製品投入口へ移動 (Fig. 3.3(c))

という AGV の製品搬送過程が確認できる。

AGV は加工が終了した製品を機械から製品搬出口へと搬送する。Fig. 3.4 に機械から製品搬出口への AGV の搬送過程を示す。1 つの AGV の動きを追跡すると、

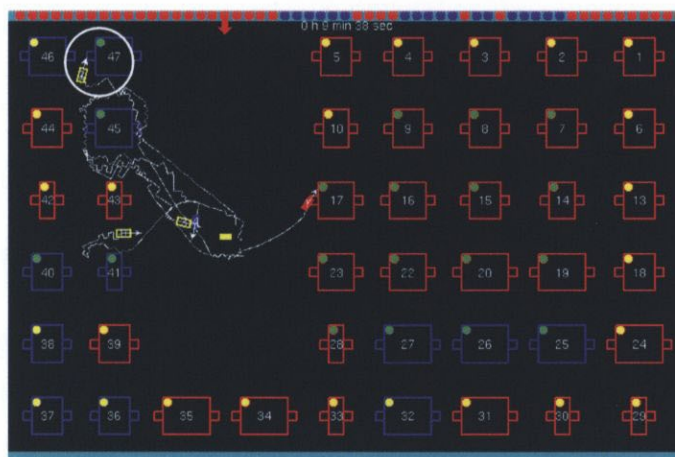
1. 加工が終了した機械からの引力場を感知して移動 (Fig. 3.4(a))
2. 製品を機械からアンロード (Fig. 3.4(b))
3. 製品搬出口へ搬送 (Fig. 3.4(c))

という AGV の製品搬送過程を確認した。

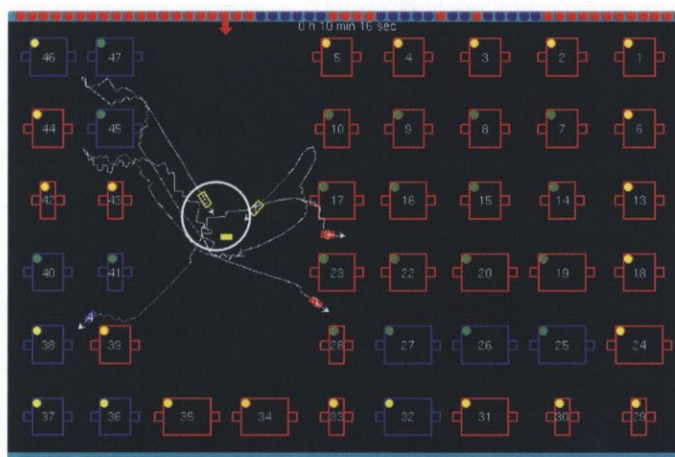
先述したように対象となる PCBs への穴あけ工程においては、フロア上のいかなる設備もどのような種類の製品がどのようなタイミングで到着するかという情報は、予め知ることが困難である。そのため、設備と素材の先見的な情報を必要とする既存のスケジューリング手法においては、この種の問題を解決するのは困難である。



(a) AGV が製品投入口から受け取る。

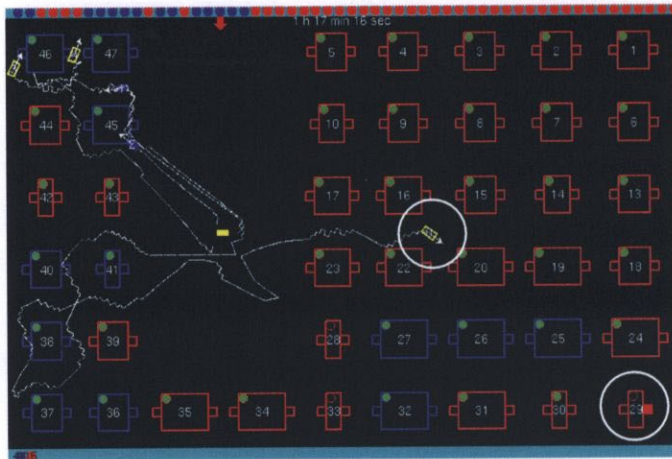


(b) AGV が機械へと到着。

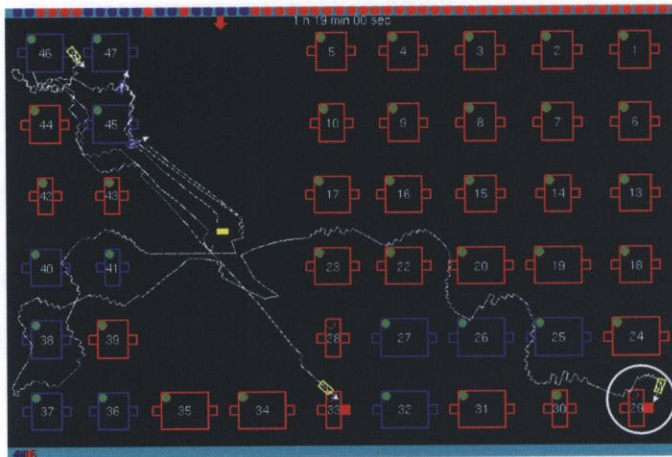


(c) AGV が製品投入口へ移動。

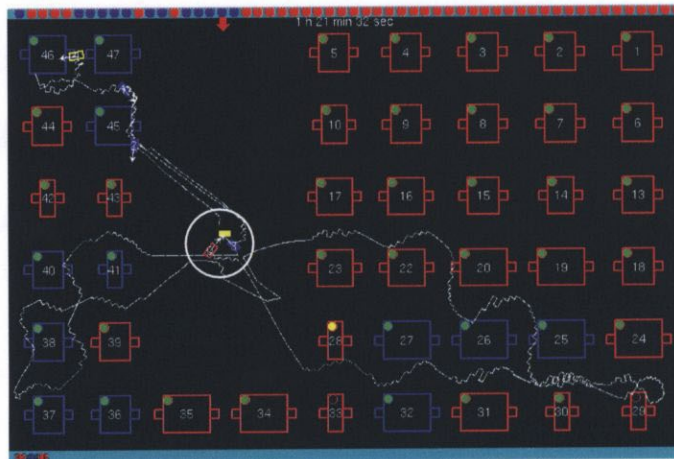
Fig. 3.3: 製品投入口から機械への製品搬送過程



(a) 加工が終了した機械へと移動.



(b) AGV が機械へと到着し製品を取り出す.



(c) AGV が製品搬出口へ移動.

Fig. 3.4: 機械から製品搬出口への製品搬送過程

提案手法である自己組織化にもとづいたシステムにおいては、どの種の製品がどのようなタイミングでフロアに到着するかどうかということを見越して知る必要がない。ポテンシャル場を介した局所的な相互作用の結果として、各製品がAGVに搭載され、移動中にその時点で適した機械へと配分されていく。

### 環境変動への適応

自己組織化スケジューリング手法の環境変動への適応性を調べるために、フロア内の機械に故障が発生した場合のシステムの挙動を観察した。

Fig. 3.5は、AGVの搬送途中に搬送先の機械に故障が発生した場合の計算機実験のスナップショットであり、AGVの行動を追跡すると、

1. 搬送中に搬送予定の機械に故障が発生 (Fig. 3.5(a))
2. 搬送中の製品に適合する引力場を探索
3. 代替機へと搬送 (Fig. 3.4(b))

という過程を観察できた。

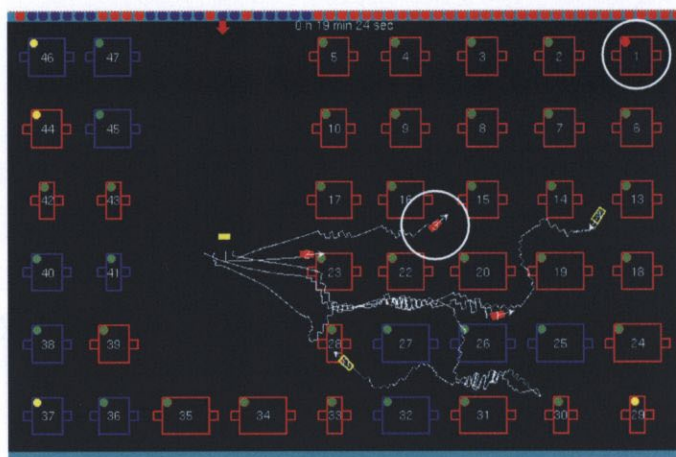
また、計算機実験において稼働率の高い上位3台を選び、それぞれシミュレーション内時間において開始後3時間の時点で故障を発生させる実験を行った。各機械の故障の復旧には等しく3時間かかるものとした。

表3.2は、1日分の注文である217の製品をフロアに投入した際の、最後に投入された製品が機械へと搬送された時間の比較である。

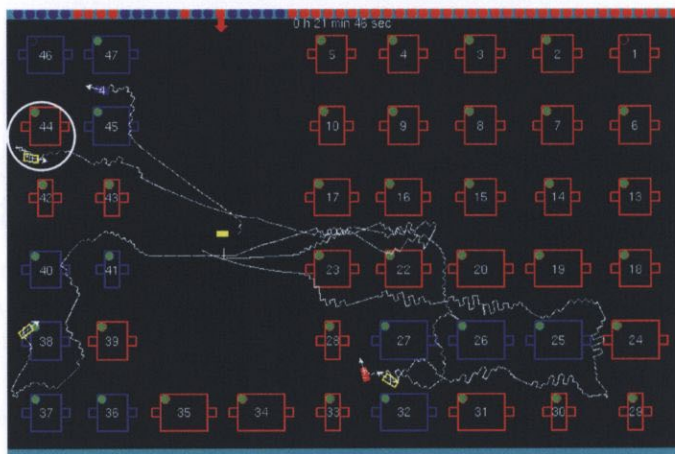
故障が発生した場合は、故障が発生しない場合に比べ、最終製品の割り当て時間が16分程度遅くなっているが、これは3台の機械が故障し、フロアの生産能力が下がった影響であると考えられる。

既存のスケジューリング手法を用いると、再スケジューリングを行わない限り機械の故障と同程度の時間だけ生産に遅延が生じるが、提案手法では再スケジューリングすることなしに16分の遅れに留まっている。

これは、A機械に故障が発生した場合、故障した機械が引力場を生成しなくなるようにモデル化しているために起こる。機械の故障はAGVに



(a) AGV が搬送中に機械に故障が発生



(b) 引力場を感知して代替機へと搬送

Fig. 3.5: 機械に故障が発生した場合の適応過程

とって引力場が感知できなくなることを意味し、搬送途中に感知していた引力場が無くなれば、他の引力場を感知して代替機へと搬送をやり直すこととなる。つまり、故障が生じた機械の作業を他の機械へと分配することにより、システム全体として環境変動に適応している過程であるとみなすことができる。

Table 3.2: 設備故障の影響

	time
Normal	22:50:10
Malfunctioned	23:05:58

このような環境変動への適応過程は、ポテンシャル場を用いた相互作用によって搬送中に搬送先を決定するという提案手法の特徴を良く表している。

### 既存手法との比較

生産性評価のために、提案手法 (Self-Organization Simulation: SOS) と、最早処理時間割り当てルール (Shortest Processing Time: SPT) を用いたリアルタイムスケジューリングとの比較を行った。

比較を行う既存の手法として SPT を採用したのは、すべての問題に適用できる万能なディスパッチングルールは無いが、スケジューリング対象とする PCBs 穴あけ工程のように納期遅れよりも平均滞留時間を重視している場合、加工時間を考慮したディスパッチングルールがよいことが知られている [64] ためである。

対象とする製造フロアは Fig. 3.2 と同様であり、1 日分の注文である 217 のジョブを製造フロアに投入した。投入されたジョブは、FIFO (First In First Out) に従い、ジョブのキューから AGV へと搭載されていく。

SPT を用いた計算機実験においては、ジョブの割り当ての決定と、ジョブを当該機械への搬送という 2 段階の手順を踏む。すなわち、キューから払い出されたジョブを SPT のアルゴリズムを用いてどの機械によって

Table 3.3: SOS と SPT の生産性に関する比較

	time	availability	standard deviation of availability
SOS	22:50:10	96.6%	0.001477
SPT	23:18:24	94.9%	0.001761

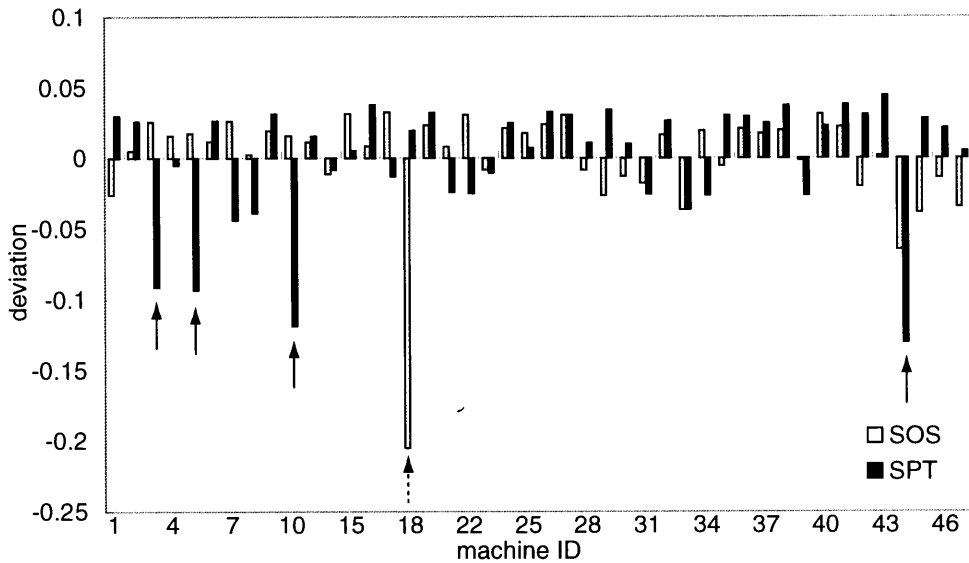


Fig. 3.6: 機械の平均稼働率との差に関する比較

処理するかを決定する。その後、該当する機械がジョブを引っ張るようなポテンシャル場を生成し、ジョブを引き寄せるという手順で構築した。

両手法を用いた計算機実験を行い、投入した最後のジョブが機械に割り振られた時刻、およびその時点での全機械の平均稼働率について比較を行った。ただし、今回は問題を単純化するために、各機械の段取りの時間は考慮に入れていない。

Table 3.3 は、両手法の比較の結果を表している。最終製品が割り当てられた時間では、自己組織化手法が SPT に比べて約 28 分早い。また、各機械の平均稼働率についても、自己組織化手法の方が SPT に比べて約 2% 高いという結果となった。提案手法である自己組織化手法は、生産性という点においては、SPT を上回る性能を達成している。



Table 3.3 右端は、各実験における各機械の稼働率の平均との差を示している。SPT に比べて自己組織化手法は分散値が小さくなっており、各機械の稼働率のばらつきが小さく、製品を各機械にほぼ等しく効率的に配分できていることがわかる。

また、Fig. 3.6 は各機械の稼働率の標準偏差を示している。実線の矢印がついた機械は、SPT において平均からの負の偏差が大きいものであり、これらは 'B' 精度の機械である。これは、'A' 精度の機械を 'B' 精度のジョブで処理することが多いために、'B' 精度の機械の稼働率が下がっていることを示していると考えられる。また、破線の矢印がついているのは自己組織化手法において平均の稼働率よりも約 0.2 低くなっている 'A' 精度の機械である。これは、SPT の様に 'B' 精度のジョブを 'A' 精度の機械で加工する機会が少ないために、'A' 精度の機械が必要以上に稼働率が上がらないということを示している。

これらの結果は 3.3.3 節において示した機械の生産能力と製品の生産要求の適合に関する優先関係を良く表した結果である。すなわち、場の優先度を適切に設定することで、自己組織化される時間的構造、つまりスケジューリングが変化し、より良いスケジュールが得られる可能性を示唆している。従来のディスパッチングルールのように、配分優先度の基準が 1 つの評価指標だけではない、という利点を示している。

また、生産要求が変動し特急ジョブが発生した場合でも、現在動作中の機械を停止する必要がない限り、次に投入される製品の適合優先度を変化させ、場の優先度を引き上げるだけで対応可能となると考えられる。

### 3.4 自己組織化過程への人の参入

現在までの情報技術の発達により、生産現場において自動化が進み、人の関与する作業は以前に比べて減少している。しかしながら、生産システムの自動化が過度に進むと、システムに関与する人を排除してしまう結果となり、その結果、システムの柔軟性がかえって失われ、期待通りにシステムが動作しないという問題を抱える場合がある。つまり、生産における自動化が進む現在も、人は依然として生産過程において重要な役割を果たしており、無視する事はできない。

これは、現在までのところ、自動化が進んだ機械やAGVなどのいかなる生産設備と比較したとしても、人がほとんどすべての作業を、より柔軟に行うことができるからである。例えば、製品の搬送や装置へのセットアップ、多種類の装置のオペレーション、装置の故障対応を一人でこなす場合もある。作業者の振る舞いの是非が生産性に直結することもある。

以上のように、生産システムにおいて人の存在は排除するべきではなく、むしろ積極的に参入を許し、システムと人との相互作用を実現することが望ましい。

生産システムに対して人をシステムの構成要素として積極的に導入を試みる生産方式の1つがセル生産システムである [65, 66]。セル生産システムは、複数の工程を一人の作業者が受け持つ多能工を、システムの構成要素の中心に据え、人の柔軟性を利用してシステムの柔軟性を挙げることを試みるシステムである。これまで、セル生産システムは家電の組立ラインなどで採用されその成果をあげているが、まだその適用対象は限定的である。

そこで、人と人工物システムの相互作用をいかに実現するのか、という手法の開発が必要である。

本節では、生産スケジューリングにおける自己組織化過程に対して人の参入を実現する方法について述べる。具体的には、自己組織化手法と人工現実感と統合する。この統合によって、自己組織化シミュレーションは3次元表示による現実感を得るだけでなく、人との相互作用のインターフェースを備えることとなる。

以下では、始めに生物指向型生産システムをもとにしたインタラクティブ生産システムについてその概要について短く述べた後、自己組織化と人工現実感との統合手法に関して述べる。

### 3.4.1 インタラクティブ生産システム

現在までの生産プロセスは、設計・生産・消費という一方向の線形的な形態をとられることが通常である。各段階を担う設計者・生産者・消費者間の相互作用はあまり無いが、あったとしても限定的である。しかしながら、近年の人々の生活の個性化等に起因する生産環境の動的な変動に対して適応し、適切な生産を行うためには、生産の各段階において、他の段階からの情報を上手く取り込むことが必要となると考えられる。すなわち、次世代の生産システムでは、生産のプロセスは非線形で並列的になるべきであると考えられる。

並列的な生産様式が実現すると、設計者、生産者、消費者そして生産の対象物である人工物は、その人工物のライフサイクルを通じて互いに相互作用しあうことが可能となる。そうすることで、各要素が互いに相互作用的に発展していくことが期待できる。例えば、設計段階において消費者の希望や生産者の意見を取り入れた設計が可能となるであろうし、製品が消費者の手に渡ったとしても、設計や生産者からのサポートを受けることが可能となるであろう。

以上のように、生産の各段階の相互作用をもとにした生産システムは、生物指向型生産システムコンセプトをもとに、インタラクティブ生産システムとして提案されている。Fig. 3.7にこのインタラクティブ生産システムの概念図を示す。

### 3.4.2 仮想空間とBMSの統合アプローチ

インタラクティブ生産システムのように、生産の各段階間の相互作用を実現したシステムを構築しようとする際には、2つの課題を解決しなければいけない。

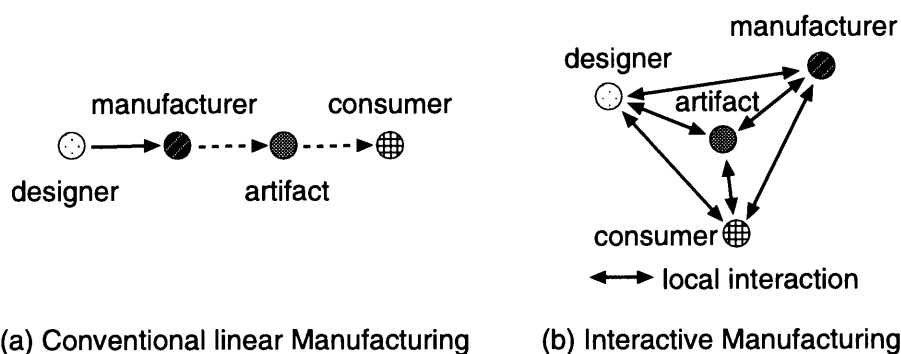


Fig. 3.7: 既存生産システムとインタラクティブ生産システム

- システムを構成する人と人工物の相互作用をいかにして実現できるか。
- 人と相互作用できる人工物システムをいかに構築するか。

といった問題である。

前者は、人と人工物の間の相互作用を実現するために、相互作用を行うインターフェースを構築する必要がある。本研究では人工現実感の3次元グラフィクスを利用して仮想空間を構築し、人と人工物の相互作用を実現する事を提案する。

次に、インターフェースを構築して相互作用を実現しても、人工物が人からの作用に反応したり、人へ人工物が作用を及ぼすことができないと人と人工物の相互作用を実現したとはいえない。そこで本研究では、人と相互作用可能な人工物システムとして生物指向型生産システムを使用することを提案する。具体的には本論文で提案している自己組織化手法を利用する。

以上のように仮想空間と自己組織化手法を組み合わせる利用することの利点は以下の通りである。

- 人と人工物の間の相互作用を実現できる。
- システムに対して人そのものを取り込むことが可能である。
- 人の作用に反応する人工物システムを構築できる。

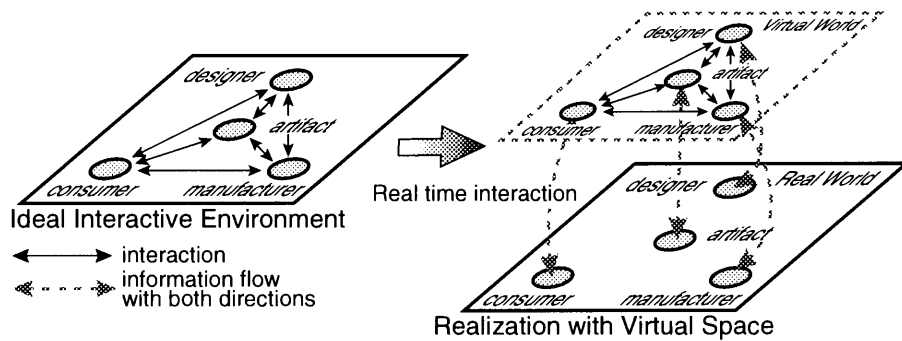


Fig. 3.8: 仮想空間の利用によるインタラクティブ生産システムの構築

- 生物的な情報を人工物に対して容易に付与できる。

仮想空間を利用することで、人と人工物が相互作用するインターフェースを提供するだけでなく、現在の技術では実現が困難な、生物指向型生産システムを構築することができる。例えば、生物指向型生産システムの基本コンセプトとなる遺伝子型情報としての設計情報を、人工物に対して容易に付与することが可能となる。

さらに、仮想空間では現実空間において不足した情報を付与することもできる。例えば、機械設備を使用する際に、通常では設備に付属する多数の解説を読まなければ使用できないような場面であっても、仮想空間で生産設備に関する情報を容易に取り出すことが可能となるような仕組みを取り入れれば、その機械設備を容易に利用することが可能となると考えられる。すなわち、仮想空間が現実世界のモデルとしての一方方向のマッピングにとどまらず、現実世界を拡張し、現実空間との双方向の相互作用を実現することで、仮想空間を現実世界のコントローラとして利用することが可能となることが期待できる。

Fig. 3.8 は、仮想空間を利用したインタラクティブ生産システムの構築方法の概要を表している。

### 3.4.3 インタラクティブ自己組織生産システム

#### 提案手法の特徴

本節では、インタラクティブ生産システム構築の一例として、生産システムの自己組織化手法と仮想空間を結合する手法に関して述べる。その中でも、以下では先述のPCBs穴明け工程の自己組織化シミュレーションを仮想空間と結合する方法について述べる。

生産スケジューリングにおける自己組織化手法は、変動の著しい生産環境における適応過程を実現可能である。計算機上で構築された自己組織化手法は、生産システムに適応的な振る舞いを提供するだけでなく、生産過程の2次元グラフィクスによる表示も提供している。しかしながら、2次元のグラフィクス表示は現実感に欠けるのみならず、人との相互作用という視点を欠いており、人がシステム内に参入することはできない。

一方、バーチャルファクトリーにおいて構築されるように [67]、人工現実感を用いたファクトリーアニメーションが利用される場合の主な目的は、工場設計の際のプロトタイプングとしての利用などであり、対象とする工場のより現実的な表現にある。つまり、現在までのバーチャルファクトリーで構築される仮想空間には、相互作用のためのインターフェース機能はあるが、仮想空間内での要素の動きはアニメーションにとどまる場合が多い。すなわち、そのコントロール手法は静的で、あらかじめ定められたシーケンスによるものがほとんどであり、人工物システムと人との十分な相互作用が実現したとはいえない。

このような現状のもとで、生産スケジューリングの自己組織化手法と仮想空間を結合することは、人工現実感を利用した仮想空間にとってはシステム内の要素の動きを実現するエンジンを得ることになり、一方、自己組織化手法にとっては人とシステムのインターフェースを得ることになるという利点もある。

以上のようなインタラクティブ自己組織生産システムが実現すると、製品の設計者、生産エンジニア、生産管理者、セールスエンジニアが同じ仮想空間内で働くことが可能となる。彼らは人工現実感のインターフェースを用いて、お互いに相互作用し合いながら協調的に作業を行なう。こ

のような相互作用をともなった作業は、互いに理解し、学習し合い、あるいは観察し合うということを可能にする。つまり、このような相互作用をともなった作業方法は、生産に対する新しいアイデアを、人を含むシステムの振る舞いの結果として創発するようなシステムとなると期待できる。

#### 自己組織化と仮想空間の結合方法

自己組織化手法と仮想空間の結合は、両機能を含んだ1つの大きなシステムを構築するのではなく、分散的な方法を用いる。すなわち、両方を独立したソフトウェアとして動作させ、その間をコミュニケーションソフトウェア (Message Passing Interface standard, MPI) を用いて双方向に通信をしながらシミュレーションを進めて行くという方法である。

このように分散型のシステムとして構築することには以下のような利点がある。

- 各ソフトウェアは独立して開発・更新が可能であり、その過程も比較的容易である。
- 比較的性能の低い計算機においても良いパフォーマンスが得られる。
- 通信を用いて異なったプラットフォーム同士でもソフトウェアが実行できる。

構築したシステムの概要を Fig. 3.9 に示す。機械や AGV 等の工場内の生産要素の行動は、自己組織化シミュレーション (Self-Organization Simulation: SOS) 上の機械と AGV の相互作用の結果として実現される。一方、仮想空間を提供する人工現実感 (Virtual Reality: VR) は、3次元グラフィクスによるシステムの状態の可視化と、人とシステムの相互作用のためのインターフェースを提供する。このような自己組織化シミュレーションと仮想空間の結合の結果として、人がシステム内部へと入り込み、システムとの相互作用を行えるようになる。

自己組織化シミュレーションと仮想空間の両ソフトウェア間で通信を用いて交換される情報は Fig. 3.10 の通りである。

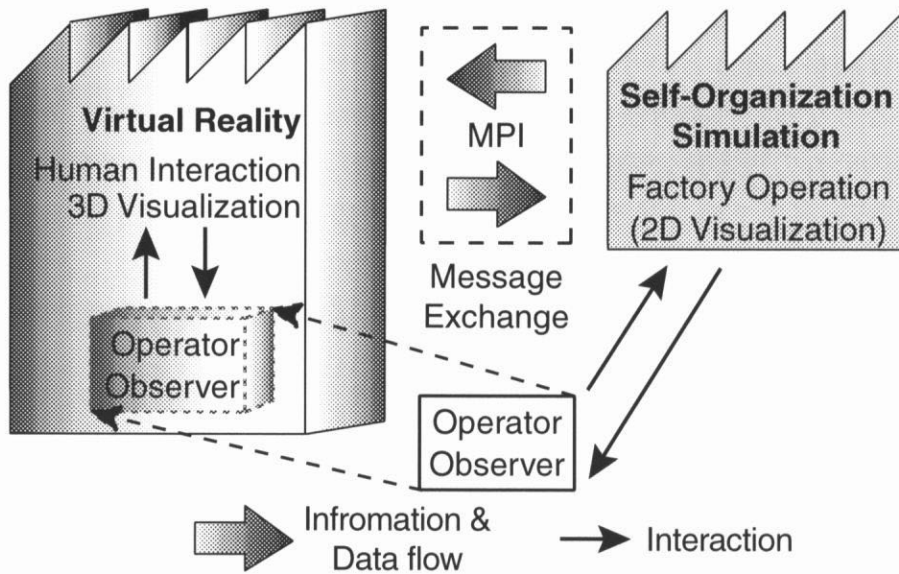


Fig. 3.9: 自己組織化シミュレーションと仮想空間の結合

情報の交換は初期交換部分と連続交換部分に分類が可能である。前者はシミュレーションの初期化時点で用いられ、自己組織化シミュレーションから仮想空間へは、フロアサイズや製品投入口・搬出口といった製造フロアに関する情報、機械の初期位置・状態、AGVの初期位置・状態がある。一方仮想空間からはシステムに参入する人の初期位置・向きが送られる。

後者はシミュレーションの間に、自己組織化シミュレーションと仮想空間の間で連続的に行なわれる通信である。自己組織化シミュレーションからは自己組織化の結果として生成される機械とAGV、製品の位置とそれぞれの状態に関する情報が送られる。一方、機械やAGVを停止・再始動したりするなど、仮想空間内で人が何らかの動作を起こした時は、その動作に関する情報が仮想空間から自己組織化シミュレーションへと送られ、その人の作用に対する影響を加味した機械やAGVの位置、状態が再び自己組織化シミュレーションによって変更される。



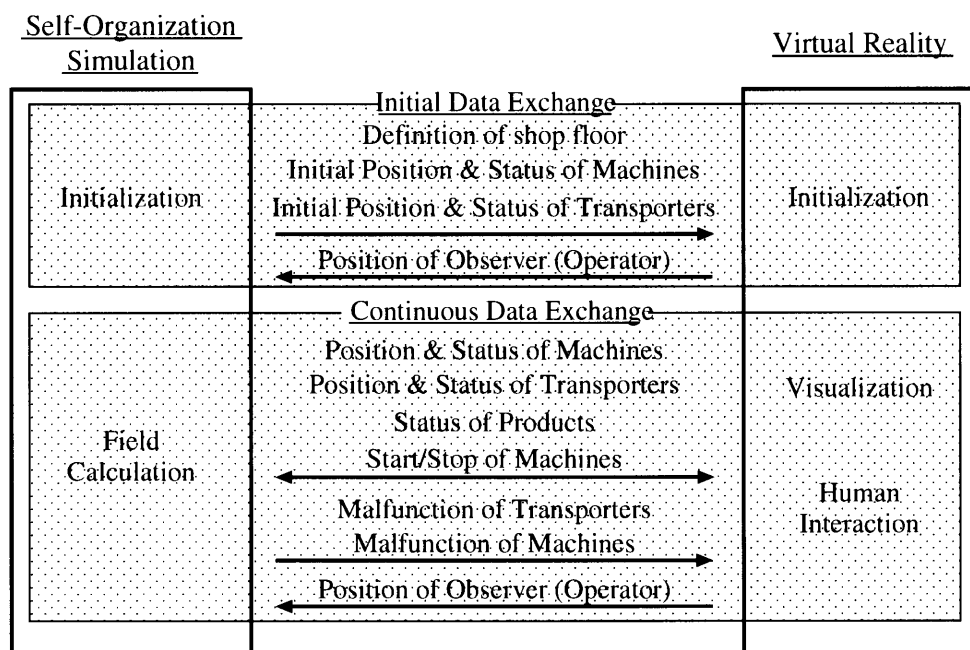


Fig. 3.10: 自己組織化シミュレーションと仮想空間の間で交換される情報

### 3.4.4 実験結果と考察

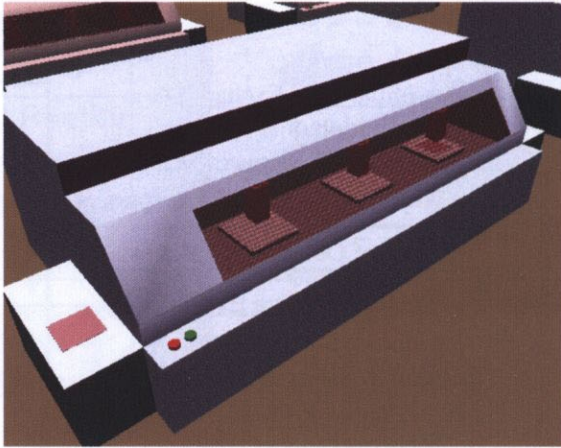
前節までのシステム構成を用いてインタラクティブ自己組織生産システムを構築し、計算機実験を行った。以下では、まず仮想空間内の各生産要素のモデルおよび仮想空間内の人のモデルについて述べる。

構築したモデルを利用したインタラクティブ自己組織生産過程について述べた後、仮想工場内における人とシステムの相互作用の過程について述べる。

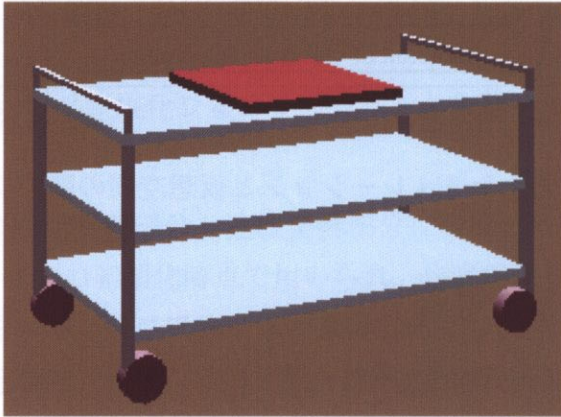
#### 仮想空間内の各要素のモデル化

**生産要素のモデル化** 本例で仮想空間と結合する生産スケジューリングの自己組織化シミュレーションは、先述したPCBs穴空け工程とする。

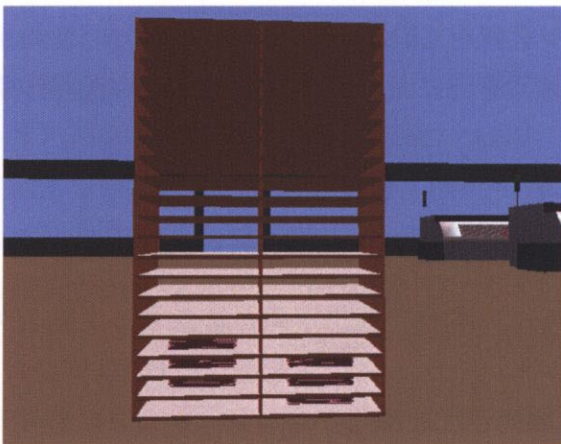
PCBs穴あけ工程の自己組織化シミュレーションにおけるフロア上の各要素のモデルは、前節において述べたものと同じであり、機械、AGV、製品、さらには製品投入口・搬出口のモデルを利用している。



(a) PCBs 穴あけ機械



(b) AGV



(a) 製品投入口の製品スプール用棚

Fig. 3.11: 仮想空間内における各生産要素モデル.

一方、仮想空間においては、PCBs 穴空け機械や AGV、製品といった製造フロア上のすべての生産要素が、3次元オブジェクトで表現される。Fig. 3.11 にそれらの各オブジェクトを示す。

穴空け機械は Fig. 3.11(a) のようにモデル化し、先述したように、その加工精度とテーブルサイズによって数種類に分類が可能である。そのため、仮想空間内では、加工精度はオブジェクトの色の違いで表現され、またサイズもそれぞれモデル化されている。さらには、機械のスピンドルの動きもモデル化した。

AGV は単純な台車としてモデル化している。また、PCBs が数枚含まれた製品も、PCB ボードが積み重なったものとしてモデル化している。Fig. 3.11(b) は、製品を乗せた AGV を表している。

製品投入口および搬出口に設置された、製品を一時的にスプールしておくキューも、単純な棚のようなモデルとして Fig. 3.11(c) のようにモデル化されている。

**人のモデル化** システムに参入する人は一人であるものとし、製造フロア上の人のモデル化を行った。

自己組織化シミュレーションにおいては、機械や AGV と同様に人の位置座標中心より斥力場を生成して、各生産要素との衝突回避に利用するものとした。

また、システムに介入する人は一人であるものとしているため、仮想空間で人の描画はされない。仮想空間内を身長 170cm の人として見渡すことができる視点のモデル化を行った。また、マウスインターフェースを利用して仮想空間内を自由に移動することが可能である。

本実験においては、インタラクティブ生産システムのコンセプトのうち、特に生産者と人工物の間の相互作用に着目し、システムに参入する人は生産エンジニアであるものとした。生産エンジニアは、システム内の機械や AGV とは以下のような相互作用が可能であるとした。

- AGV にとっての移動する障害物としての存在(システム観察者やオペレータ)。

- 仮想空間内における機械の配置変更(リアルタイムのフロアレイアウト変更),
- 機械やAGVのストップ/スタート(リアルタイムオペレーション).

### インタラクティブ自己組織化生産

**実験設定** 実験対象とした製造フロアの概要は、Fig. 3.2の通りである。総機械台数は44台で、‘A’精度の機械が12台、残りは32台が‘B’精度の機械である。また、AGVは5台である。

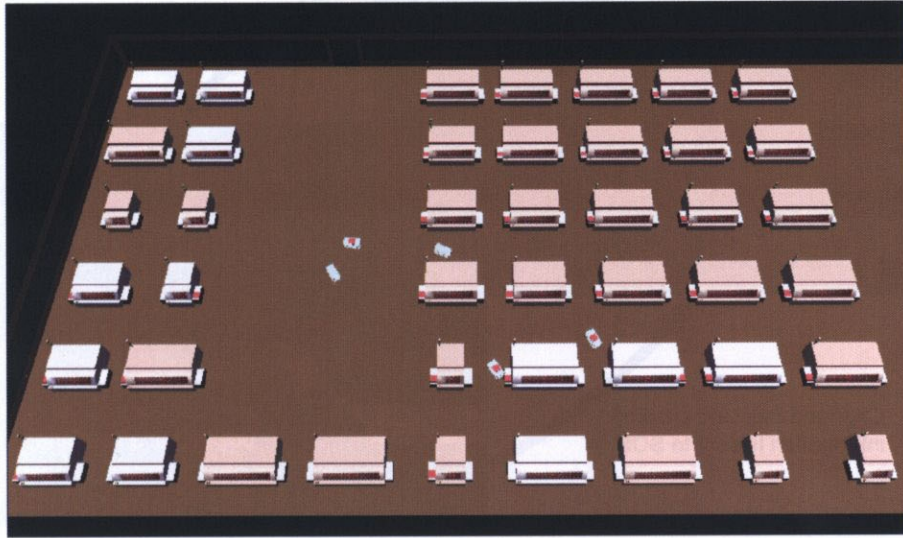
フロア中央には、製品投入口および製品排出口があり、製品を一時的に保存するためのキューがあるのも同様である。

**自己組織化生産過程** 構築した仮想空間の概要をFig. 3.12に示す。Fig. 3.12(a)は製造フロア全体の鳥瞰図であり、Fig. 3.2とよく対応していることがわかる。

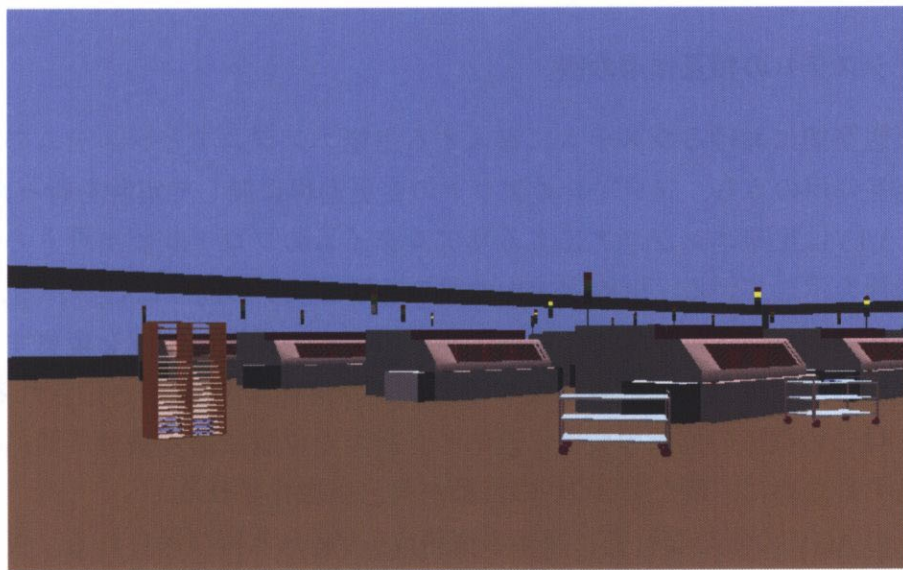
実験を開始すると、自己組織化シミュレーション(SOS)と人工現実感(VR)を利用した仮想空間の間で以下の様な通信を行って情報交換を行い、生産が進捗する状況を確認した。

SOSとVRの両ソフトウェアの初期化の後、SOSは各要素の位置にもとづいてポテンシャル場を計算し、生産要素のすべての行動をコントロールする。そして各オブジェクトの位置と状態のメッセージをVRへと送る。SOSがVRからメッセージを受け取った時は、フィールド計算が再び行なわれ、再び計算結果に基づいた新たなオブジェクトの位置と状態のメッセージをVRの方へと再送する。

一方、VRはSOSから受け取ったメッセージに基づいてすべてのオブジェクトを仮想フロア内に可視化する。人とシステムの相互作用が起こり、その結果としてシステムの状態が変化すると、SOSの方へとメッセージが送られ、再びSOSから更新されたメッセージを受け取る。



(a) 仮想工場内の PCBs 製造フロア



(b) フロア上の人の視点から見た仮想工場

Fig. 3.12: 仮想空間内の PCBs 製造フロアの概要

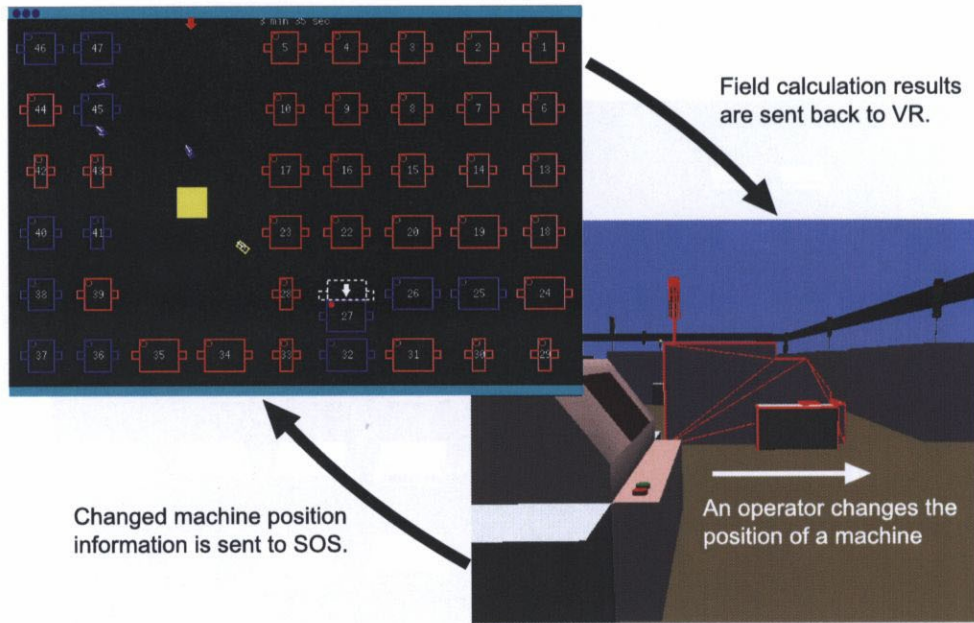


Fig. 3.13: 生産エンジニアによる相互作用

### 人とシステムの相互作用の例

仮想空間におけるシステムに参入する生産エンジニアとシステムとの相互作用のうち、フロアレイアウトの変更過程に関して実験を行った。Fig. 3.13 は生産エンジニアによるリアルタイムのフロアレイアウトの変更過程を示している。SOS と VR の間の通信は以下の通りに行われる。

生産エンジニアは、仮想工場内で生産の途中で機械の位置を変更することが可能であり、その新たなレイアウトの情報は SOS へと送られる。SOS はこの機械の位置の変更に適応し、新たな位置にある機械に製品を搬送するために、新たな AGV の行動が自己組織化される。

この AGV の新たな行動に関する情報は、VR へと再び送られる。仮想工場内において、人とシステムの相互作用の結果として、新たな機械の位置へと追いかけるような行動が観察された。

以上の結果より、生産エンジニアとシステムとの相互作用の過程においては、仮想工場内での生産エンジニアの行動が自己組織化シミュレーションへと影響を与えていることを確認した。一方、自己組織化シミュ

レーションにおいても機械の移動によって変化したフロア上の状態に適応し、新たな秩序を自己組織化し、その結果が仮想空間へと影響を与えていることを確認した。つまり、システムと人との相互作用が実現していることを確認した。

現在までのところ構築したシステムにおいて可能な相互作用は非常に単純なものであるが、インタラクティブ生産システムにおける生産者と人工物との相互作用が実現可能であることを示し、提案手法の有効が確認できた。

### 3.5 結言

本章では、複雑化する生産環境に適応可能なスケジューリング手法として、設備の生産能力と、製品の生産要求を動的かつ局所的に適合させることにより生産を進める自己組織化を利用し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「搬送系の制約を考慮した」スケジューリング手法の1つと位置づけられた。

PCBs ボードへの穴あけ工程へと提案手法を適用し、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 との比較実験を行った結果、同程度以上の生産性を有することを確認した。

さらには、設計者、生産者、消費者という生産の各段階に関与する人間が、人工物のライフサイクル全体を通して相互作用し続けるというインタラクティブ生産システムについて述べた。インタラクティブ生産の一例として自己組織化シミュレーションと仮想空間を統合することについて述べ、そのシミュレーション結果についても述べた。

現在までのところ構築したシステムにおいて可能な相互作用は非常に単純なものであるが、提案手法の有効性は確認できた。このインタラクティブ工場において、オペレータのような人間は、システムとの相互作用を通じ、自身も環境変動の一部としてシステムに取り込まれ、人と工場との相互作用が可能となることを示した。