

第5章

自己組織的構成法によるラインレス生産システム

第5章

自己組織的構成法によるラインレス生産システム

5.1 緒言

本章では，第2章，3章で述べたスケジューリングおよび設備レイアウト計画を発展させ，生産現場でよく利用されているライン型生産方式に代わる，ラインレス生産方式を提案する．

5.2節では，まずライン型生産方式から現在までの生産方式の変遷，および関連研究に関して述べた後，それらの限界を克服する新しい生産方式として，ラインレス生産方式を提案し，その特徴に関して述べる．

5.3節では，ラインレス生産システムにおいて，生産システムの自己組織的構成法を利用する手法について述べ，その有効性を確認するために，自動車車体への増し打ち溶接工程を対象を選び，ラインレス生産システムのモデル化を行う．

5.4節では，5.3節において構築したモデルを利用し計算機実験を行い，ラインレス生産過程の構築を確認する．

5.5節では，ラインレス生産システムの妥当性の評価のために，ライン型生産システムと生産性，故障に関する適応性，コストに関して比較を行う．

最後に5.6節で本章をまとめる．

5.2 ラインレス生産システム

5.2.1 生産方式の動向

1909年のT型フォードの自動車のコンベヤによる大量生産が実現して以来、製造業における主たる生産様式はコンベヤを用いたライン型生産方式である [77]。ライン型生産システムは標準化 (standardization)、単純化 (simplification)、専門化 (specialization) を特色とし、スケールメリット (規模の経済性) をその原理としているため [78], [68]、大量の製品を低コストで製造するのに適しており、現代産業の発展を支えた。

ライン型生産方式は低コストで高い生産性を実現可能であるが、コンベヤラインを利用するために各工程が密接に連結されているので、効率的な生産を行うには作業ステーション間の作業量の平準化が必要不可欠となる。生産環境が複雑化を遂げ、多品種生産の実現が必要とされる現在、生産ラインにおける平準化を行うには多くの工数が必要となる。また、ライン型生産ではそのシステム様式のため、一つの作業ステーションにおける故障や生産遅れといったシステムの部分の問題が、ライン停止といったシステム全体へと波及し、システム全体の問題となる場合もある。このようにライン型生産方式ではシステムの外部・内部環境の変動に柔軟に適応するのは困難である。

今後の生産環境はますます複雑化すると考えられ、上記の様な特徴を持つライン型生産方式に代わる新しい生産方式が必要となる。自動車業界を例に挙げると、社団法人日本自動車工業会の統計データのデータによれば、国内の自動車生産台数は1990年をピークに減少傾向にある [79]。一方品種数は増加傾向にある。即ち、今後の自動車業界では、生産品種数の増加に関わらず生産量が確保できない様な状況がますます発生するものと思われる。つまり、生産システムにおいては、1つの製造フロアにおける製造品種数がますます増加するものと考えられる。

自動化技術や情報技術の発展により、FMS (Flexible Manufacturing System) や CIM (Computer Integrated Manufacturing) が普及し、多品種生産を実現するために複数の機械により構成される小規模な生産ラインをバッファを介して連結することで、システム全体を構成するフレキシブルト

ランスファーライン (Flexible Transfer Line: FTL) が実用化されている。生産ライン間のバッファを利用することにより、工程間のばらつきを吸収させ、ラインの柔軟性を向上させることが可能となる [78]。しかし、システムの柔軟性を向上させようとするするとバッファサイズが大きくなり、中間在庫のコストが上昇するだけでなく、モジュール内では機械は互いに連結されており、バッファで連結されたライン間では平準化が必要となるなど、ライン型生産の欠点を本質的に解決しているとは言い難い。

また近年、人の持つ柔軟性に着目したセル生産方式 [66], [80], [65] が注目を集め、家電製品分野を中心に実用化されている。セル生産方式では、一連の複数作業を一まとめにした生産セルがシステムを構成する基本要素となり、各セルにおける複数の作業工程を一人ないし数人で担当する多能工を配置する。各セル内部の作業員数を変更したり、セルそのものの数を変更したりすることで変動に強い生産の実現を図るものである。しかし、例えば自動車製造工程のように既に自動化が進み、一定期間にある程度の生産量が確保可能な分野においては、経済性の観点から導入される例はまだ多くない [81]。

また、市場の不確実性に適応できる生産方式として APS (Adaptive Production System) が提案されている。APS は、ランスファーラインに自律的に移動可能な組み立てロボットを導入し、生産要求にあわせて生産途中で設備台数を変更することで、ランスファーラインの高生産性とシステムの柔軟性の両立を図ったシステムである [81]。しかし、APS においてもシステムの基本様式はライン型を踏襲しており、イレギュラーな故障や特急品のイベントが発生した場合には有効であるが、通常生産では工程間の平準化は依然必要となる等、ライン型方式と同様の特性は有したままであるという問題がある。

以上のように、既存のシステムにおいては依然ライン型生産方式を踏襲したものが多く、根本的な問題の解決には至っておらず、新たな生産方式が必要となると考えられる。

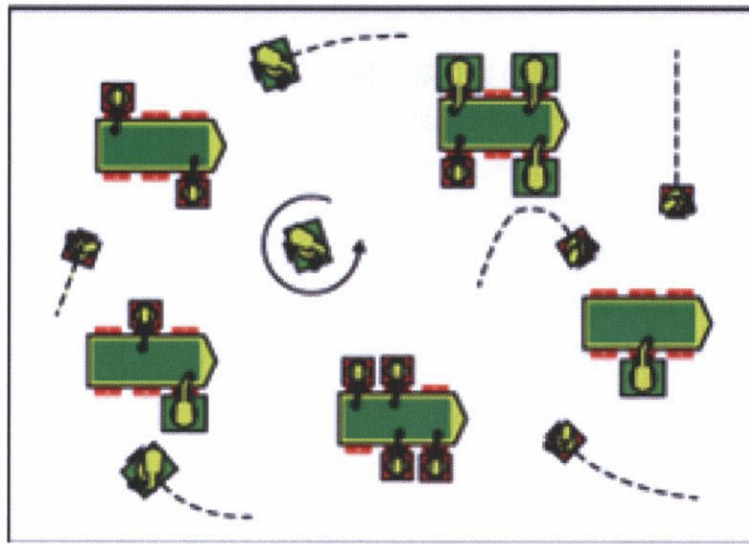


Fig. 5.1: ラインレス生産方式

5.2.2 ラインレス生産方式

製品ライフサイクルの短縮に起因する生産要求の変動等，生産システムを取り巻く外部環境の複雑化，それに起因するシステム内部構造の複雑化や設備故障等の内部環境の複雑化に直面した現在，従来からのライン型生産方式に根ざした生産方式ではそれらの複雑化や変動に適応することが困難であり，それに代わる新たな手法の開発が必要である。

本研究では，既存の生産方式に代わり，生産システム外部・内部の環境変動に対して柔軟に適応できる生産方式の一つとして，ラインレス生産方式を提案する．ここで，ラインレス生産方式とは

「生産システムを構成する要素が無軌道かつ非同期で移動しながら生産を行う生産方式」

と定義する．Fig. 5.1 にその概念図を示す．

ラインレス生産方式が実現すると，すべての要素が移動しながら生産が行われるという特徴のために，以下のような利点が期待できる．

- 多品種生産が実現可能
ライン型生産方式のように一定のタクトタイムでラインが動作する

必要が無い場合、工程間の作業時間を平準化する必要がない。この特徴により加工時間の異なる品種を同時に製造フロアに投入可能となり、多品種の生産が実現可能となる。

- 高い故障適応性を持つ

全ての生産要素が独立で動作するために、システムのある部分で発生した故障の影響が他の要素へと及ぶ可能性が小さい。また、故障発生時にラインを停止する必要がなく、故障が発生した要素のみに修理作業を行うことが可能である。

- システム更新が容易

新製品を製造フロアへと投入する際に、システム全体の更新が不要で、新たに必要となった設備を製造フロアへと投入し、個別に教示するだけで良い。

以上より、今後の複雑化する生産環境で必要となるであろう、変種変量生産の実現にとって備えるべき特徴を持っていることがわかる。

一方、ラインレス生産方式では、以下のような点が問題となる可能性がある。

- 広い製造フロアが必要

全ての生産要素がフロア上を移動するために、ライン型生産方式を採用したシステムに比べると広い製造フロアが必要となることが予想される。

- 導入コストの増大

移動しながら作業可能な設備を新規に導入しなければならないために、より多くの初期投資が必要となる。また、移動する機械の電力を供給しなければならないため、エネルギー費用も多くかかることが予想される。

ただし、製造フロア面積に関しては、ラインレス生産方式を採用するシステムの生産性が、ライン型生産に比べて高い状況があるとすれば、ラインレス生産方式の方が生産設備台数を減らすことができると考えられ

る。結果として、設備 1 台あたりの必要面積が増加したとしても、全体の面積への影響があまり無く、問題とならないかもしれない。

また、導入コストが増大するとしても、ライン型生産において品種の切り替えの際に必要な生産ラインの敷設換えが不要となることが予測されるなど、ランニングコストやメンテナンスコストに関しては節約できることが考えられるため、問題とはならない可能性もある。

5.3 ラインレス自動車溶接工程のモデル化

前節において述べた特徴を持つラインレス生産方式を利用したラインレス生産システムを構築しようとする、全ての設備が製造フロア上を移動するため、制御対象となるシステムの自由度が非常に大きくなる。そのため、スケジューリング等の時間的計画とフロア内での移動に関する空間的計画が困難となり、既存の集中管理的手法で制御することは困難である。また、多品種生産を実現することから、システム内部には事前に予測不可能な変動が起こる可能性も高く、それらに柔軟に適応可能な手法が必要となる。

そこで、本研究ではラインレス生産システムの構築のためには、自律分散システムアプローチが有効であると考え、2章で述べた自己組織化手法を用いて、時間的計画と空間的計画を場の相互作用を利用して同時に解決し、すべての要素が移動しながら生産を行うラインレス生産システムの構築を行う。

以下の節では、自己組織化を用いたラインレス生産システムのモデル化を行い、次節で構築したモデルを利用した計算機実験を行う。

5.3.1 自動車溶接工程への適用

自動車の製造過程は、製造対象となる製品種類が多く、かつ生産量も多いため、多品種生産および高生産性の両立が必要であり、ラインレス生産方式の検証に適切であると考えられる。本研究ではラインレス生産システムの適用例として、自動車の車体への増し打ち溶接工程を取り上げた。自動車の増し打ち溶接工程とは、車体を構成するフレームを溶接により取り付けた後、補強として車体に対し追加の溶接を施す工程である。すなわち、通常の溶接工程のように多入力一出力のいわゆる組立工程とは異なり、加工工程と同様一入力一出力の工程である。

対象となる増し打ち溶接工程のフロア内には、溶接の対象となる車体を搭載したAGVと、AGVに取り付けて溶接を行う溶接ロボットが存在する。AGVは搭載している車体の溶接に関する生産要求を認識し、溶接

ロボットは自身の生産能力を認識しているとする。そして、それら生産要求と生産能力の適合に自己組織化を用いる。

ただし、2章で述べた Fig. 2.4 のような要素間の相互作用とは異なり、本モデルでは生産要求を持つ AGV が引力場を生成し、生産能力を持つ溶接ロボットが引力場を感知する。すなわち、AGV が生産要求に応じて引力場を生成する一方、溶接ロボットは生産能力に応じて AGV の生成する引力場を感知、場の生成源へと移動し、AGV に取り付き溶接を行うというものである。

以上の様な空間的な相互作用を繰り返し、一連の動作を AGV の移動中に行うことで、ラインレス生産システムを構築する。以下では実工場のデータをもとに構築した各生産要素モデルに関して述べる。

5.3.2 生産要素のモデル化

製品

ライン型生産方式を採用している既存の製造フロアにおいては、作業量の平準化のために一つのラインには数車種のみを投入するのが一般的である。しかしながら、提案手法であるラインレス生産においては、前節で述べた特徴のために作業量に関する制約をほとんど受けないため、平準化が必要にならない。そこで、本研究の自動車増し打ち溶接工程では、生産対象全 20 車種をフロアに投入することとする。

投入される車体はそれぞれ溶接の種類ごとに必要な溶接打点数を持つ。これが本適用例における生産要求となる。総打点数は全 20 車種でそれぞれ 450 打点～840 打点あり、車種によって異なるが溶接部位を 6 箇所に分けて作業を行うものとする。また、溶接箇所の打点径によって {ATYPE, BTYPE} の 2 種類の要求を持ち、ATYPE が小径、BTYPE が大径の溶接をあらわすものとした。

すなわち、2章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 $m = 6$ となるが、作業に優先順位は無いため作業順序は順不同でよい。また、生産要求は 2 つからなり、 $p = 2$ であり、 r_1 : 溶接打点数、 r_2 : 溶接打点径を表す。

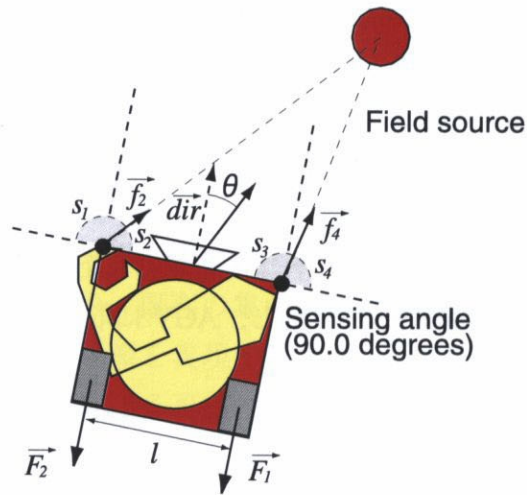


Fig. 5.2: 溶接ロボットモデル

溶接ロボット

溶接ロボットには、生産要求に対応したATYPEとBTYPEの2種類の溶接が可能なロボットが存在するとした。ATYPEロボットは小型で小径の溶接スポットを受け持ち、溶接スピードは2sec/spotである。一方、BTYPEロボットはATYPEロボットと比較して大型であり、大径の溶接スポットを受け持ち、溶接スピードは4sec/spotである。すなわち、式(2.15)中の C_i^m において $m = 1$ 、 c_1 :溶接ガンサイズとなる。

各ロボットの移動速度に関しては、ATYPEロボットが2.16km/h、BTYPEロボットは1.44km/hに設定した。これは現有設備で移動しながら溶接が可能なロボットが無い場合、現場エンジニアが見積もった値を用いた。

溶接ロボットは、2章のAGVと同じくBraitenbergのVehicle [58]のように構成したセンサとモータを結合した移動ロボットとしてモデル化した。2章のモデルよりは若干センサ数を増やして複雑な環境での移動行動を実現している。(Fig. 5.2に概要を示す)。

溶接ロボットには、ポテンシャル場を感知するためのセンサが左右2つずつ、計4つ存在する。各センサのセンシング範囲は90度としており(s_1 から s_4)、各センサからの入力を \vec{f}_i ($1 \leq i \leq 4$)とする。ロボットは自身の

方向ベクトル \vec{dir} を有しており、その回転方向が分かれば次の時刻での位置を決定できる。ロボットの回転角 θ を求める為に次式を利用する。

$$\theta = \begin{cases} \tan^{-1}\left(\frac{|\vec{F}_1| - |\vec{F}_2|}{(|\vec{F}_1| + |\vec{F}_2|)/2.0}\right) / p & (|\vec{F}_1| \neq |\vec{F}_2|), \\ -30^\circ & (|\vec{F}_1| = |\vec{F}_2|). \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 p は回転角の大きさを左右する定数であり、予備実験によって決定した。また、 \vec{F}_1 , \vec{F}_2 は、Fig. 5.2 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、

$$|\vec{F}_1| = |\vec{f}_1| + |\vec{f}_2| - 0.8 \times |\vec{f}_4|, \quad (5.2)$$

$$|\vec{F}_2| = |\vec{f}_3| + |\vec{f}_4| - 0.8 \times |\vec{f}_1|, \quad (5.3)$$

を満たす。ただし Fig. 5.2 では、 $|\vec{f}_1| = |\vec{f}_3| = 0$ である。

また、溶接ロボットは、要素間の衝突を回避するためにその中心から斥力場も生成する。

AGV

車体を搭載した AGV は、Fig. 5.3 の様に構成される。車体の溶接に関する生産要求は、溶接部位に従い図中の通り 6 つに分割される。各部分に溶接ロボットのための結合部が存在し、溶接ロボットは結合した部分の溶接を行う。

AGV は、分割された各溶接部分から、搭載した車体の生産要求を反映した引力場を生成し、溶接ロボットを引き寄せる。本例では、車体の溶接に関する生産要求は、{ATYPE, BTYPE} の 2 種類存在するため、それぞれに関する引力場を各結合部分から生成する。その行動ルールは基本的に 2 章の機械と同様であり、式 (2.15) 中の C_i^m において $m = 1$, c_1 : 溶接打点サイズとする。また、式 (2.16) 中の L_i^m は場生成の位置を表すため、 $L_i^m \in \{\text{FrontRight}, \text{CenterRight}, \text{BackRight}, \text{FrontLeft}, \text{CenterLeft}, \text{BackLeft}\}$ となり、AGV モデルにおいては 6 つの結合ポイントいずれから場を生成するかを表す。

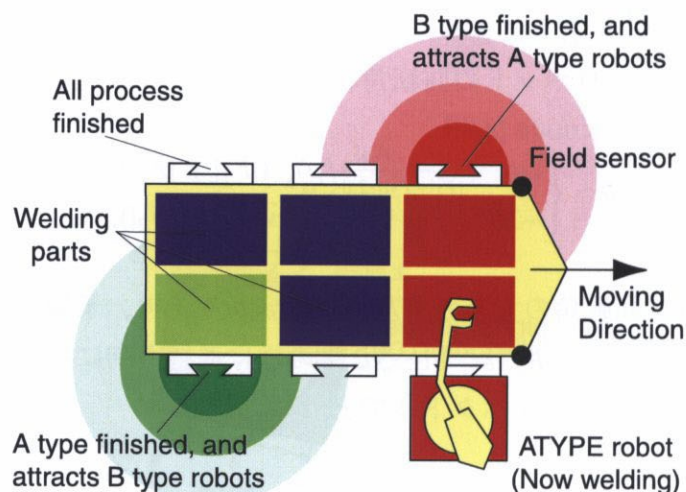


Fig. 5.3: AGV モデル

ただし、BTYPE ロボットは大型のため、BTYPE ロボットが取り付いた部分に隣接する溶接部には、他のロボットが取りつけないという制約が存在する。そのため、BTYPE の溶接ロボットが取り付いている部分に隣接する結合部からは、引力場の生成は行わない。また、同様の制約のため、ATYPE ロボットの結合した部分に隣接する部分からも、BTYPE の引力場の生成は行わない。

AGV も場に対するセンサが前方に4つ存在し、前節の溶接ロボットと同様の方法で、速度0.27km/hで移動する。全ての加工要求が満たされるまで、フロア左側壁から発生する斥力場によってフロア上をフロア右方に移動し、全ての溶接作業が完了し、製品の生産要求が満たされると製品回収口から生成される引力場を感知し、回収口に向かって移動する。

製品投入口・製品回収口

対象とする溶接工程の製造フロアと前後工程のインターフェースとなる製品投入口および製品回収口もモデル化している。

製品投入口は、待機中のAGVがある場合、特定の時間間隔で製品をAGVに乗せて製造フロアに投入する。一方、製品回収口は、すべての溶接工程が終了した製品をのせたAGVを引き寄せる引力場を生成する。全

での工程が終了した AGV はこの引力場を感知して回収口から回収され、フロアの外側を通り再び製品投入口付近にて待機する。モデルおよび行動ルールは 2 章と同様である。

ポテンシャル場

本研究において利用するポテンシャル場は、(2.11) 式における各係数を Table 5.1 の様な組み合わせで使用し、 $dist$ の単位は m である。また、 $size(m)$ は要素の大きさを表す代表値である。なお、場の形状に関する各パラメータは、予備実験の結果にもとづいて求めた。

Table 5.1: ポテンシャル場を使用したパラメータ

Field	a	b	c	d	p
Attraction	13.0	1.0	0.012	1.0	1.0
Repulsion	-20.0	1.0	$1 / size$	0.0	6.0

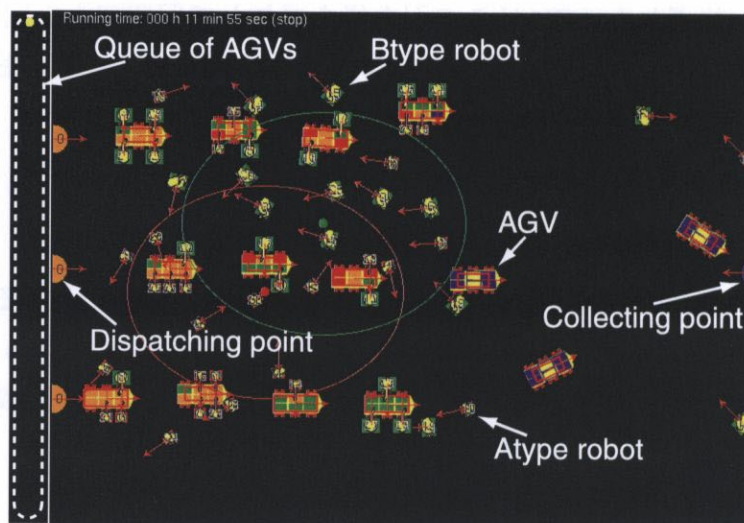


Fig. 5.4: ラインレス自動車溶接フロア

5.4 実験結果と考察

前節のモデルを利用して計算機実験を行った。以下ではその結果について述べる。

5.4.1 実験設定

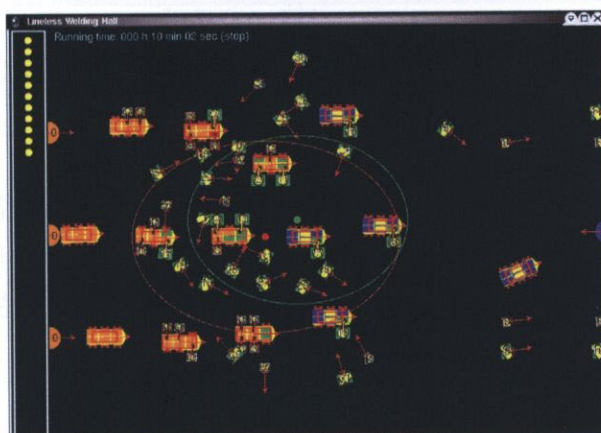
今回対象とした製造フロアの大きさは75m×50mであり、溶接ロボットATYPE 26台、BTYPE 32台、AGV 25台で構成される。これらの設定は予備実験で、一日あたりの目標生産台数である20品種1000台が達成可能な最小の溶接ロボット台数およびAGV台数としたものである。製品は実工場との整合性をとるため、全20車種の内1車種5台ずつを45秒間隔で投入する。Fig. 5.4は、構築した製造フロアの概要を表している。

5.4.2 実験結果

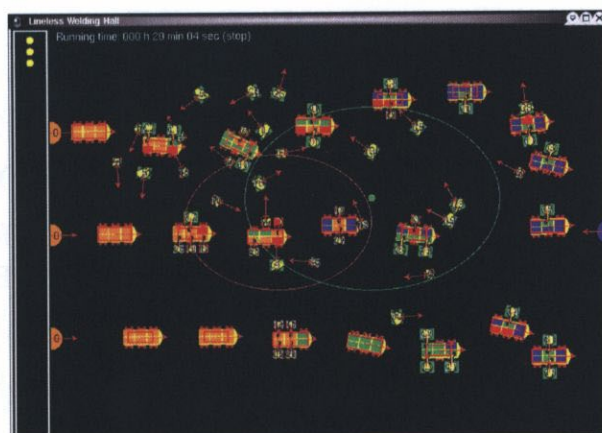
Fig. 5.5は実験開始後20分までフロアの様子であり、溶接ロボットおよびAGVが移動しながら生産が進捗するラインレス溶接過程が観察できる。



(a) 5 分後



(b) 10 分後



(c) 20 分後

Fig. 5.5: ラインレス溶接過程 (実験開始後 20 分間)

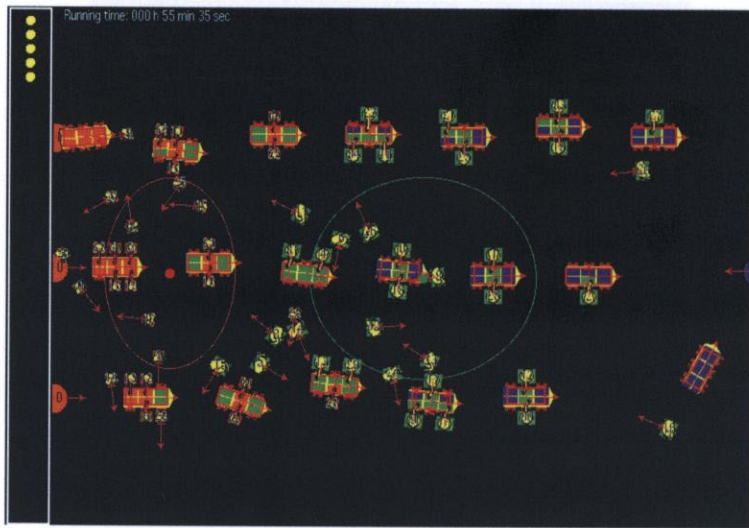


Fig. 5.6: ATYPE, BTYPE ロボットの座標重心位置

図からわかるように開始後 20 分後には 3 本のラインのような秩序が形成されているのが観察された。これはシステムの設計者が設計したラインでは無く、システムの構成要素が条件に応じて秩序を形成した結果である。条件の一つである製品投入口が 3 つから 2 つに変更された場合は、ライン状の秩序も 2 本となる傾向があることを観察している。また、ラインレス生産においては、環境変動が無い場合は効率の高くなるライン型のシステムのような秩序が生成することが本結果から分かる。

Fig. 5.6 は実験開始約 1 時間後のフロアの様子である。フロア左に見える赤く塗りつぶされた円は ATYPE ロボットの位置の重心を、その周りの楕円は位置の標準偏差を表している。また、緑に塗りつぶされた円とその周りの楕円は、BTYPE のものである。このことから、安定的な生産が行われているときは ATYPE ロボットはフロア左側に、BTYPE ロボットはフロア右側に分散していることがわかる。

より詳細にみると、Fig. 5.7 のグラフはは実験中の ATYPE, BTYPE 各ロボットの座標の重心位置の変遷を表している。(a) はフロア横方向すなわち左側壁からの距離を、(b) は縦方向すなわち下側壁からの距離を示している。縦方向の重心の変化は実験期間を通じてほぼ変化しないが、横方向は特徴的な動きを示している。すなわち初期状態では各ロボットは規

則的に配置されているために、ATYPE, BTYPEの重心位置は接近している。しかし実験が進むに従い、ATYPEロボットの重心が左側壁から15m付近に留まるのに対し、BTYPEロボットの重心は35m付近へと変化している。これは、ATYPEロボットがフロア左側、BTYPEロボットがフロア右側に主に分布するというエリアの分離が生じたことを示している。

この様な秩序が形成された要因として、

1. BTYPEロボットの溶接スピード

ATYPEロボットと比較して溶接スピードが遅いため、BTYPEの溶接が後にされる場合が多くなる傾向がある。

2. BTYPEロボットの大きさの制約

大きさの制約のために、BTYPEの溶接は最大で同時に4つの場所で行えない。その為BTYPEの溶接が後にまわる傾向がある。

などが挙げられ、ATYPEを先に処理した後にBTYPEを処理するという秩序形成に到ったと考えられる。以上のような振る舞いは、システムを構成する生産要素の仮定や能力に応じて、自己組織的にシステム全体の秩序が形成される過程と捉えることができる。

5.4.3 環境変動への適応過程

ラインレス生産システムの環境変動への適応能力を検証するため、計算機実験において仮想的に環境変動を引き起こし、システムの挙動を観察した。利用した環境変動は、ある時点でAGVに故障が発生し、フロア上のある地点に停止するというシステム内部環境の変動である。故障のAGVは移動機能の故障のみ発生しているとし、処理中あるいは未処理の溶接はすべて完了することができるものとする。その他の実験設定は前節とすべて同様である。

Fig. 5.8, Fig. 5.9は計算機実験のスナップショットを示している。時間を追ってシステムの振る舞いを述べると、

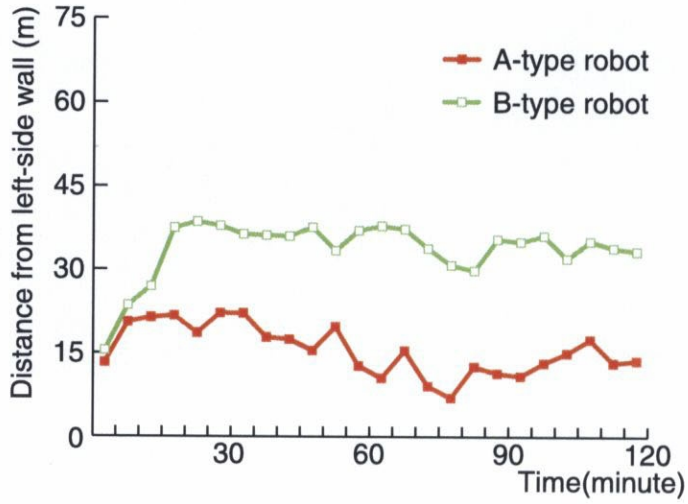
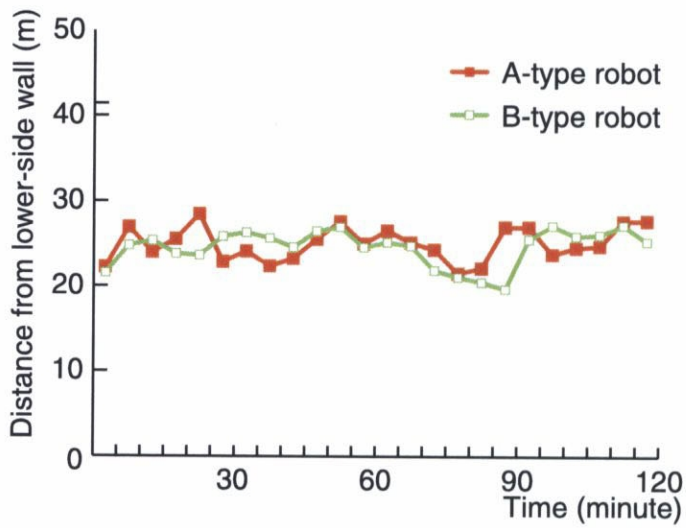
(a) x 軸方向(b) y 軸方向

Fig. 5.7: ロボット座標重心位置の変遷

1. 正常稼働状態では、投入口の数に対応した3つのライン状の秩序が形成している (Fig. 5.8(a)).
2. 真中のライン状秩序を形成している AGV の1台に故障が発生、フロア状で停止 (Fig. 5.8(b)).
3. 後続の AGV が、停止している AGV との間の斥力場を感知することにより回避行動を行う (Fig. 5.8(c)).
4. さらに後続の AGV も同様に、停止した AGV を回避する行動を行う (Fig. 5.9(a)).
5. 真中のライン状秩序が停止した AGV を境にラインの位置が変化するという新たな秩序を獲得 (Fig. 5.9(b)).
6. 停止した AGV の復旧後、停止していた AGV が再度移動し生産を再開.
7. 3つのライン状の秩序を再獲得 (Fig. 5.9(c)).

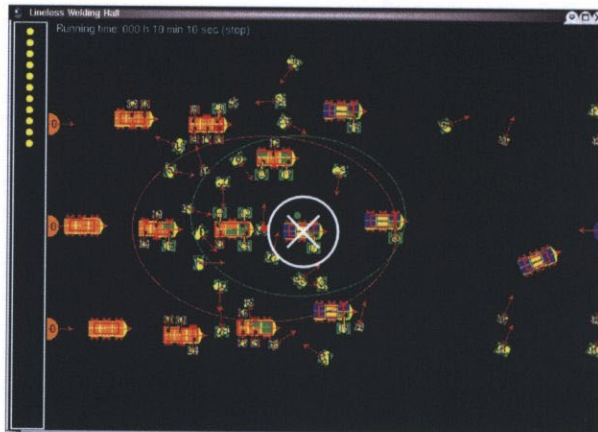
となっていることを観察した。

以上の結果は、5.2.2 節において述べたラインレス生産システムの利点の一つである環境変動への適応性をよく示している。ライン型生産システムでは、車体を搬送する台車に故障が発生した場合、ライン全体を止めて修理する必要があるが、本研究で提案するラインレス生産システムの場合、自律的に移動する AGV が停止した AGV を回避することにより、システム全体が停止することなく、生産が進むことが観察されている。

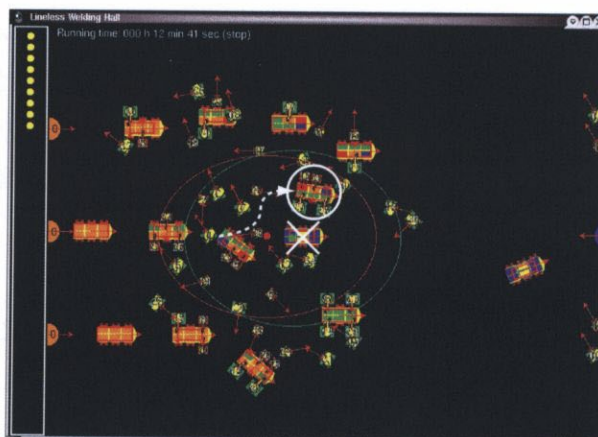
また、上記の環境変動への適応過程は、システムが形成する秩序に着目するとラインレス生産システムの特徴が明らかになり興味深い。つまり、AGV の故障のような環境変動が無い安定した状態続く限り、ラインレス生産システムにおいてもライン型の様な、仮想ラインとでもいえるべき秩序が形成される (Fig. 5.8(a))。これは、安定的な状態においては、ライン型生産システムの様な状態が生産効率が良いためであり、ラインレス生産システムにおいても同様に振る舞うのはそのためであると考えられる。



(a) 正常稼働状態

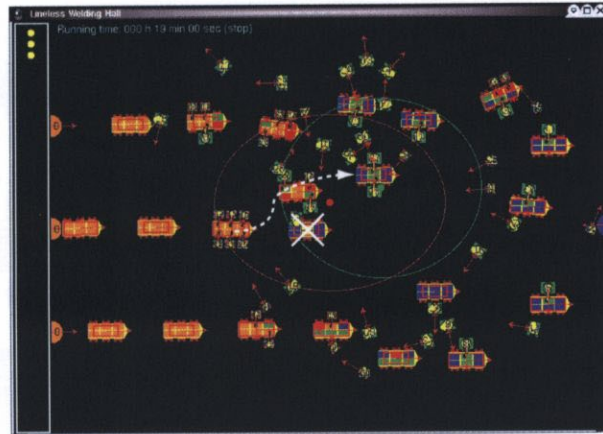


(b) AGV に故障が発生

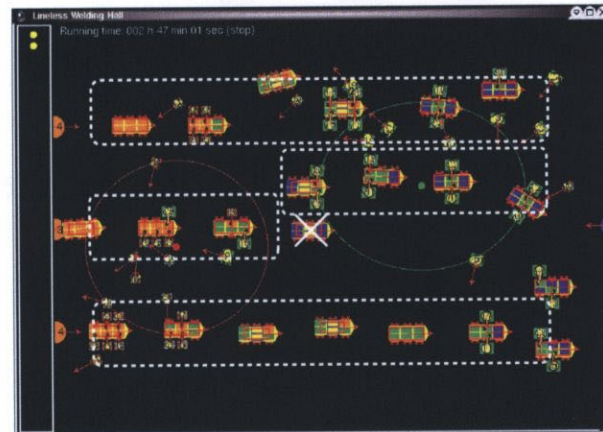


(c) 後続の AGV の回避行動

Fig. 5.8: 環境変動への適応過程 (故障発生から適応過程まで)



(a) 後続の AGV の回避行動



(b) 新たな秩序形成



(c) 復旧後の正常稼働状態

Fig. 5.9: 環境変動への適応過程（新たな秩序形成から復旧まで）

しかし、ひとたび環境変動が発生するとそれまで形成された秩序が、Fig. 5.8(c)のように崩壊する。そして、環境変動が発生した状態で新たな秩序を形成し、生産を維持する(5.9(b))。新たに形成された秩序も、停止したAGVの近くでは複雑な移動が行われるが、それ以外の部分では効率の良いライン型生産システムのような秩序となっていることがわかる。

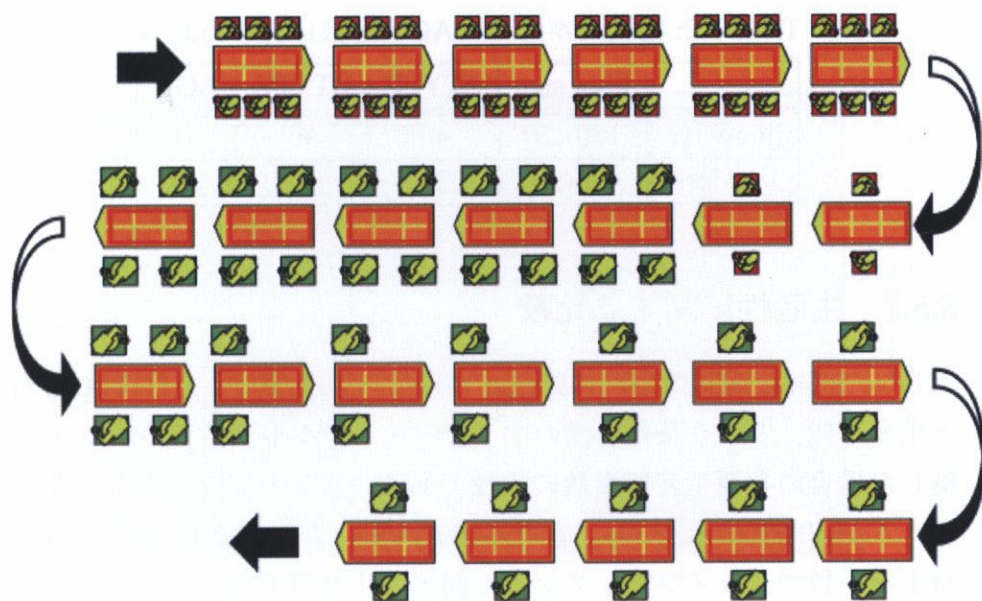


Fig. 5.10: 比較対照としたライン型生産システムモデル

5.5 ライン型システムとの比較実験

ラインレス生産システムの特徴を明確にするため、生産性、故障への適応性、コストの3項目に関してライン型生産システムとの比較を行った。比較する両システムには、実工場のデータを参考に、全20車種を1つのシステムで処理可能、かつ1日における生産台数が1000台以上、タクトタイムを45秒という条件を課した。

ただし、既存のライン型生産システムでは20車種を1つのラインで生産しているシステムは存在しないため、比較対象とするシステムは、実働データを基に実験用に設計された仮想溶接ラインである。ライン型生産システムで20品種の生産を行うために、ロボット台数などは冗長な構成となっている。Fig. 5.10にその外観を示す。

Table 5.2: 溶接ロボット・AGV 台数に関する比較

	floor size	ATYPE	BTYPE	AGV
line-wise	150×20	40	46	31
line-less	75×50	26	32	25

5.5.1 生産性に関する比較

Table 5.2 は、製造フロアの面積は同じとし、20 車種を一日に 1000 台以上生産可能、という条件を満たすライン・ラインレス生産システムを構築した場合の必要生産要素数の比較である。表より、ラインレス生産システムが ATYPE ロボットで 14 台、BTYPE ロボットで 14 台、AGV が 6 台少ない数で、ライン型システムと同等の生産性を獲得していることが分かる。

また、Fig. 5.11 は、総生産量とロボットの稼働率の比較を示している。Table 5.2 の結果より、同等の生産量を達成する場合、ラインレス生産システムの方がロボット台数を減らすことができるため、ラインレス生産の方がロボットの平均稼働率も高くなっていることがわかる。

また、ライン型生産においては、搬送車の移動中に作業ができない為、溶接ロボットの稼働率の上限は搬送車の移動時間とロボットの移動時間で決定される。それに対してラインレス生産では全ての作業は AGV の移動中に行われるために、溶接ロボットの稼働率は、ロボットの移動時間に影響を受けるだけである。このような要因で、稼働率の差が発生したと考えられる。

以上より、ライン型と同等の生産性を得るためにはロボット台数を減らせることがわかる。結果として、今回比較としたラインレスのシステムとライン型のシステムは同等の製造フロア面積を利用しており、ロボットが自由に移動するラインレス生産システムにおいても、製造フロア面積がライン型生産システムと同等の広さで実現の可能性があることが確認できた。

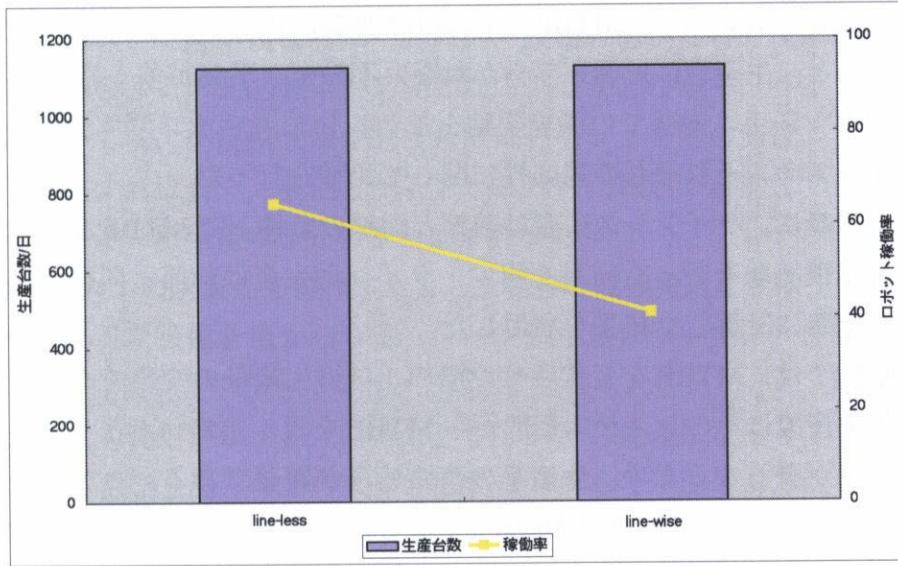


Fig. 5.11: 生産性に関する比較

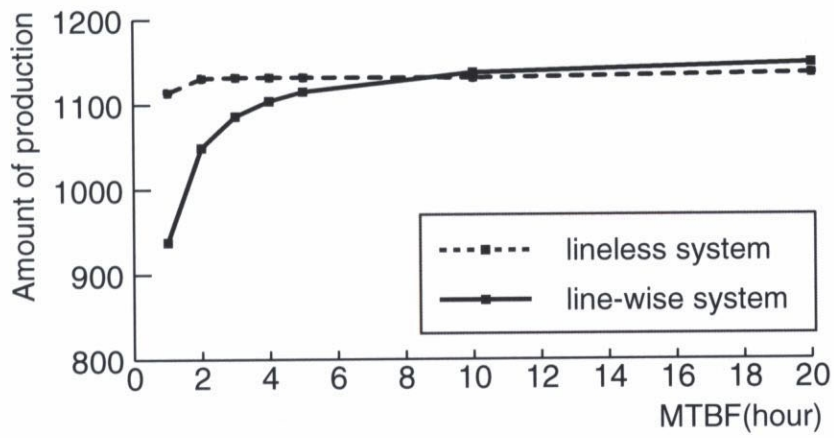


Fig. 5.12: MTBF の変化に対する適応性に関する比較

5.5.2 環境変動への適応性に関する比較

生産過程においては、MTBF（平均故障間隔）が短い小規模な故障や、段取りなど、生産性に影響を与えかねない不確定な事象が多く発生する。この様なシステム内部での環境変動をモデル化し、ライン型・ラインレス生産システムそれぞれの適応性に関して比較を行った。

比較の為に、ラインレス生産は前節と同様の条件下でMTBFを変化させて計算機実験を行った結果を用い、ライン型生産は前節と同様、実働データを基に計算した結果を利用した。

Fig. 5.12 は、MTBF を変化させた際の1日の生産量の変化である。ライン型生産ではそのシステム形態からMTBFを短くしていくとラインの停止時間が長くなるため、生産量の落ち込みが顕著である。一方、ラインレス生産においては、MTBFが短くなるにも関わらず生産量の落ち込みが小さい。故障設備が発生した場合、その影響が他の設備へと影響を与えることが少ないというラインレス生産の特徴を示している。

5.5.3 コストに関する比較

コスト面での評価として、システム導入時の初期コスト、運用事のランニングコスト、1年に4つの新しい製品を投入する場合の設備更新コストの3点について比較を行った。ライン型生産システムには、現有設備のデータを利用して20車種を製造できるラインの計算コストを用いた。一方、ラインレス生産における設備のコスト計算は現時点では困難であるため、現場エンジニアの現有設備からの見積りを参考にしたコストを用いた。

ラインレス生産の初期導入コストとして、移動しながら溶接可能なロボットの開発費用として現有設備の2倍、コンベヤの代わりにAGVを導入する費用として現有設備の3.3倍が必要と見積もった。また、ラインレス生産では全ての要素が移動する必要があるため、そのための給電装置が必要となり、そのコストを考慮した。

一方、ランニングコストは設備維持費と人件費から構成される。ラインレス生産においては、全ての要素が移動可能であるため、設備の保守・

点検費用，ならびに給電費用がライン型生産に対して大きくなると予測され，ライン型生産の2倍と見積もった．また，ライン型生産においては，ライン中での小規模故障への対応，設備の矯正などの役割が必要となるための多くの人的費用が必要となる．しかしながら，ラインレス生産においては，小規模故障が起った際はロボットを別の修復エリアに移動し修復すれば良く，矯正もラインから外れた状態で自動化できるとみなし，ライン型生産の5分の1と見積もった．

1年に4つの新製品を製作するとした場合の設備更新費用は，人的費用ならびに更新設備費用からなる．ライン型生産については，作業量平準化作業，設備レイアウト，ロボット教示，設備入れ替えなどの工事作業に多大な人的費用がかかる．しかし，ラインレス生産になると，ライン型生産で必要な上記の作業の大半が必要なくなると予測されるため，人的費用ならびに設備費は非常に小さく見積もることが可能である．

Table 5.3 は，以上を考慮した比較結果を表している．生産に要するコスト全体のうち，既存のライン型生産においては設備更新の際のコストが一番大きな比率を占める．一方，ラインレス生産においては，ライン型生産に比べて初期投資が大きくなるものの，上述の見積もりのように設備更新のコストが大幅に削減可能と判断できる．そのため，ラインレス生産は全体コストとしてはライン型生産に対して小さくなり，コスト面においてもラインレス生産の優位性があると考えられる．

5.5.4 ラインレス生産システムの有効範囲

前節までの実験結果より，ラインレス生産システムは20品種という多品種生産を実現可能であることがわかった．また，20品種生産を行う場合，ラインレス生産システムが環境変動への適応性のみではなく，生産性，コストに関しても有効性を確認した．本節では，製品の品種数の変化がライン型生産システムとラインレス生産システムにどのような影響を及ぼすかを比較し，ラインレス生産システムを利用する有効範囲の同定を行う．

両システムに投入する製品の品種数の違いは，20製品投入時の各製品における平均作業量をほぼ同等（溶接620打点）とし，作業量の標準偏

Table 5.3: コストに関する比較

Cost for Welding (1000 products/day)		line-wise system	line-less system
Initial costs	robots	0.1×86	0.2×58
	conveyer/AGVs	0.06×31	0.2×25
	power source	0	2.4
Running costs	operation costs	0.6	1.2
	labor costs	1.2	0.24
Reconfiguring costs	labor costs	12	0.1
	facilities	20	0.05

(million \$)

差の違いで表現する。つまり、標準偏差 0.0 (1 品種に相当), 20.0 (2 品種), 51.0 (4 品種), 75.7 (10 品種), 96.5 (20 品種) の各条件に関して比較を行った。

比較に用いたラインレス生産システムは、前節までの 20 品種を製造するフロア設定を各条件に関して共通で使用した。結果の比較には、1 日間の計算機実験により得られた値を利用する。一方、ライン型生産システムには、現有設備のデータを利用して各品種数を製造できるラインを設計し、1 日間の生産を行った場合の結果を計算により求めた。

Fig. 5.13 に溶接ロボットの平均稼働率に関する比較結果を示す。図より、製品の品種数が 2 品種を越えるまでは、ライン型生産システムの方が装置稼働率は高い。しかし、ライン型生産システムでは、投入製品の品種数が増えるに従いロボットの平均稼働率が大きく下降する。これは、各ステーションにおける作業量の平準化が困難となるためである。

一方、ラインレス生産システムでは、生産する品種数による影響をほとんど受けない。これは、ライン型生産システムのように作業を行う製品が互いに連結されておらず、作業量平準化が必要でないことをよく表している。

Fig. 5.14 は総生産量に関する比較結果を示している。図からわかるように、両システムともに目標生産量の 1000 台/日を達成している。詳細に

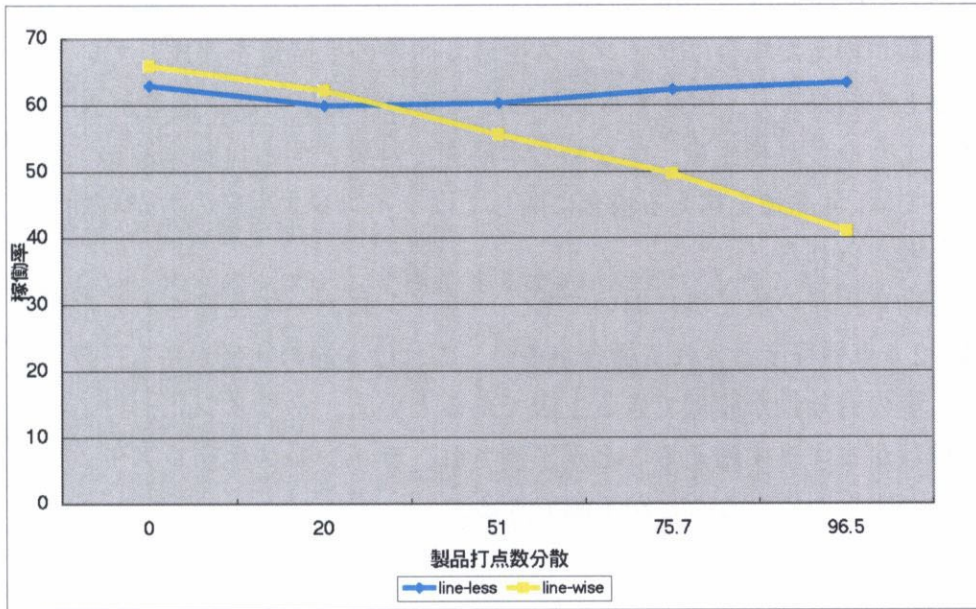


Fig. 5.13: 生産品種間の作業量標準偏差と溶接ロボット稼働率の関係

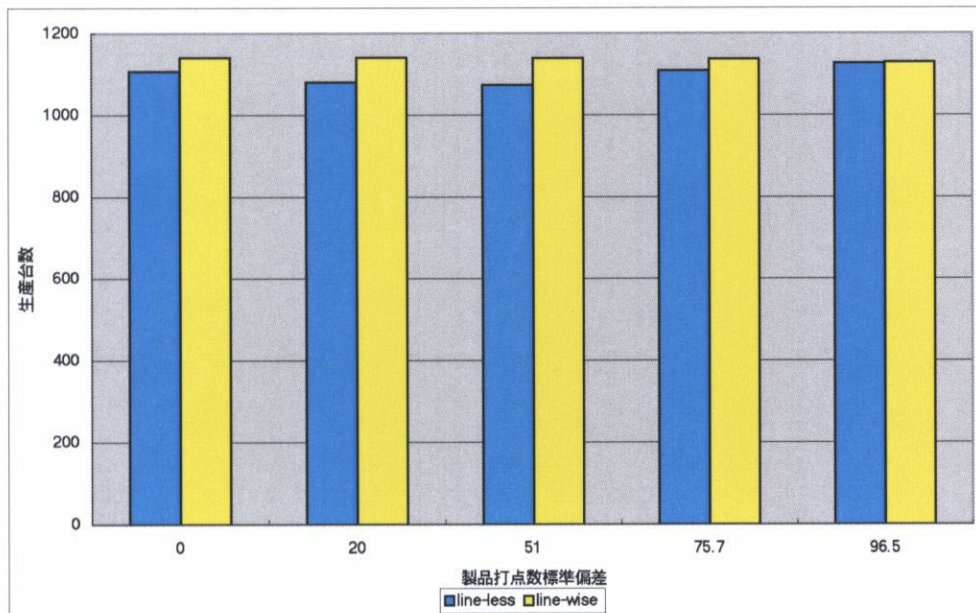


Fig. 5.14: 生産品種間の作業量標準偏差と溶接ロボット稼働率の関係

みると、生産品種数が小さい場合はライン型生産の方が生産量が多いが、品種数が増えた場合はラインレス生産も同等の生産量を達成している。

以上の結果より、生産する製品の品種間の作業量の標準偏差が20を上回るような多品種生産、すなわち本研究で対象とする自動車溶接工程においては、4品種を越える場合に関してはラインレス生産の方が有効であると考えられる。

自動車生産の実工場においても、一ラインにおいて生産される品種数は、2-4車種程度とされる場合が多い。これは本節の比較からも、ライン型生産の有効性が確保できる上限であるといえ、一ラインにおける生産品種数がますます増えることが予測され、ラインレス生産システムの有効性が明らかになることが予測できる。

5.6 結言

本章では、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、ポテンシャル場による自己組織化を用いて、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。

ライン型生産システムとの比較実験を行った結果、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遜色のない結果が得られた。

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する比較を行った結果、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。