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*

藤井信忠** 鳩野逸生† ヤリ ワーリオ†† 上田完次**

A Study on Development of Line-less Production System Using Self-Organization

Nobutada FUJII, Ituso HATONO, Jari VAARIO and Kanji UEDA

In this paper, a line-less production system is proposed to realize a system which can deal with complexity and uncertainty in changing production environments. The line-less production system can be defined as the system in which all production elements can move on the floor. To realize the line-less production, the concept of Biological Manufacturing System is used, i.e., a potential field based self-organization is adopted. The effectiveness of the line-less production system is discussed, and the computer simulation is developed. The comparison results with a line-wise production system demonstrate the feasibility of the proposed line-less production system.

Key words: line-less production system, self-organization, biological manufacturing system

1. はじめに

ライン型生産システムは低コストで高い生産性を獲得可能であるが、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工程間の負荷の平準化が必要不可欠となる。生産環境が複雑化を遂げ、多品種生産が必要とされる現在¹⁾、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である。また、ライン型生産では、そのシステム様式により部分の故障がシステム全体の停止に結び付くなどの問題点もある。

ライン型生産において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モジュールを、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モジュール方式が実用化されている。モジュール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²⁾。しかし、柔軟性を向上させようと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、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。

近年、人の持つ柔軟性に着目したセル生産方式³⁾が注目を集め、家電製品分野等では実用化されているが、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⁴⁾。また、市場の不確実性に適応するために開発された APS (Adaptive Production System) は、ト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、生産途中で設備台数を変更することで、トランスファーラインの生産性と柔軟性の両立を図ったシステムである⁴⁾。しかし、システムの基本様式はライン型を踏襲しているため、工程間の平準化は依然必要となり、ライン型システムと同様の特性は有したままである。

ライン型生産に代わる様式として、本稿では多品種生産を実現するために生物指向型生産システム^{6),7)}の一構築例として、ラインレス生産システムを提案するとともに、ライン型システムとの比較を行い提案手法の有効性を確認する。

2. ラインレス生産システム

2.1 ラインレス生産システムの特徴

ラインレス生産システムとは、機械、AGV 等の生産に関わる全ての要素が無軌道で製造フロア上を移動可能で、生産要素が移動しながら生産が進むシステムと定義する。ラインレス生産システムの利点として、以下が期待される。

1. 多品種生産が可能

ライン型システムのように一定のタクトタイムでラインが動作することが無いため、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。

2. 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、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。

3. 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、個別に教示するだけで良い。

一方、ラインレス生産では、以下のような問題点を考慮する必要がある。

1. 広い空間が必要

全ての生産要素がフロア上を移動するために、ライン型のシステムに比べると大きな空間が要求される可能性がある。

2. 導入コストの増大

移動しながら作動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測される。

* 原稿受付 平成 14 年 8 月 8 日

** 正 会 員 東京大学人工物工学研究センター (目黒区駒場 4-6-1)

† 正 会 員 神戸大学学術情報基盤センター (神戸市灘区六甲台町 1-1)

†† Nokia China Investment Co. Ltd.

Fig. 1 Local matching process between capabilities and requirements

2.2 ポテンシャル場を用いた自己組織化による制御

ラインレス生産システムにおいては、全ての設備が製造フロアを移動するため、制御対象となるシステムの自由度が大きくなり、既存の集中管理的手法で制御することは困難となる。そこで本研究では、ポテンシャル場を用いた自己組織化を利用することで、ラインレス生産システムの実現を図る。

生産過程を生産情報の観点から捉えると、素材に配分された生産要求を、生産機械の生産能力に対して割り振っていく過程であるとみなすことが可能である。既存の生産計画においては、大域的な機構により生産要求と生産能力の適合を図ってきたが、システムの規模の拡大、複雑化にともない、計画の作成は困難となる。そこで本研究においては、図1の様に、製造フロアを構成する生産機械と、素材を搭載したAGVによる局所的な相互作用の結果、生産能力と生産要求の適合が局所的に行われ、生産が進行する手法を利用する。この過程を生産における自己組織化とする⁸⁾。

次に、機械の生産能力と素材の生産要求の局所的適合を実現するためには、その間の相互作用を実現する必要がある。そこで本研究では、相互作用としてポテンシャル場を利用する。ポテンシャル場は、要素間に作用する力が要素間の距離の関数として記述できる場としてモデル化する。要素間に作用する力の正負によって、引力場と斥力場に分類可能であり、引力場は要素同士を引き付けるのに利用し、斥力場は要素同士を遠ざけるのに利用する。

3. ラインレス自動車溶接工程

3.1 自動車溶接工程への適用

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、計算機実験を行った。各要素のモデルは実工場のデータを基に構築した。

対象となる製造フロア内には、溶接の対象である車体を搭載した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。その生産要求と生産能力の適合に前節で述べた自己組織化を用いる。つまり、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。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、ラインレス生産を実現する。

Fig. 2 Welding robot with field sensors

3.2 各要素モデルと実験設定

3.2.1 製品

ライン型生産を採用している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、先述のような特徴のために作業量の制約をほとんど受けない。そこで、本計算機実験においては、生産対象全20車種をフロアに投入する。

投入される車体はそれぞれ生産要求として、溶接の種類ごとに必要な打点数を持つ。総打点数は450-840であり、車種によって全て異なる。また、打点の径によって{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。

3.2.2 溶接ロボット

溶接ロボットには、ATYPEとBTYPEの2種類が存在する。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。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参考にしている。

溶接ロボットは、BraitenbergのVehicle⁵⁾のように構成する(図2に示す)。フィールド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度となっており(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。

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

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、図2中の様に進行方向に対して逆向き方向を持つ駆動力を表すベクトルであり、

$$|\vec{F}_1| = |\vec{f}_1| + |\vec{f}_2| - 0.8 \times |\vec{f}_4|, \quad (2)$$

$$|\vec{F}_2| = |\vec{f}_3| + |\vec{f}_4| - 0.8 \times |\vec{f}_1|, \quad (3)$$

を満たす。ただし図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。

Fig. 3 An AGV generating attraction fields

3.2.3 AGV

車体をのせた AGV は、図 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。各部分にロボットののための結合部が存在し、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。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付けられ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、全ての加工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。

3.2.4 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の形状は以下の通りである。

$$Field_{attr} = (1.18 - 0.0006 \times dist)^{16.0} + 0.1, \quad (4)$$

$$Field_{repl} = \frac{0.2}{1.0 + (\frac{dist}{size})^{6.0}} + 0.1. \quad (5)$$

ここで、 $Field_{attr}$ は引力場、 $Field_{repl}$ は斥力場、 $dist$ は要素間距離、 $size$ は衝突回避を行う距離を表している。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。

3.2.5 フロア構成

図 4 は、製造フロアの概要を表している。フロアの大きさは 75m×50m であり、溶接ロボット ATYPE 30 台、BTYPE 35 台、AGV 25 台で構成される。

AGV はフロア左側の出入口において待機し、全 20 車種の内 1 車種 5 台ずつ 45 秒間隔で車体をのせてフロア左の素材出入口より投入される。全ての工程が終了した AGV はフロア右の回収口に回収され、フロアの外側を通り再び出入口にて待機する。

Fig. 4 An overview of the line-less welding floor

3.3 ラインレス溶接過程

前節のモデルを用いてラインレス溶接工程の計算機実験を行った。図 5 は実験開始後 30 分までフロアの様子であり、ラインレス溶接過程を観察した。図のように開始後 30 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。これはシステムの構成要素の条件に応じてシステムが秩序を形成した結果であり、製品投入口が 2 つの時は 2 つとなる傾向があることを観察している。また、ラインレス生産が環境変動が無い場合は効率のよくなるライン型のシステムのように振る舞うことが本結果から分かる。

図 6 は、実験中の ATYPE、BTYPE 各ロボットの座標の重心位置の変遷である。(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。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 付近へと変化しており、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観察された。

このよう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。

3.4 ライン型システムとの比較

ラインレス生産システムの特性を明確にするため、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、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。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

(a) After 5 minutes.

(b) After 15 minutes.

(c) After 30 minutes.

Fig. 5 Line-less welding process during first 30 minutes

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溶接ラインである。

3.4.1 生産性に関する比較

表1は、製造フロアの面積は同じとし、上記の生産性の条件を満たすシステムを構築した場合の生産要素数の比較である。ラインレス生産の方がATYPE, BTYPE ロボット, AGV が少ない数で同等の生産性を獲得していることが分かる。

また、図7は、総生産量とロボットの稼働率の比較を示しており、ラインレス生産の方がロボットの平均稼働率が高くなっていることが観察できる。

ライン型生産においては、搬送車の移動中には加工ができ

Table 1 Comparison in the number of facilities

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

(a) After 5 minutes.

(b) After 15 minutes.

Fig. 6 Transition of the gravity of robots' position

Fig. 7 Comparison in the points of throughput and the availability of robots

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に左右される。それに対してラインレス生産では、全ての加工は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。このために、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り、その結果、製造フロア面積も同等の広さで実現可能であることが確認できた。

3.4.2 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。このようなシステム内部での環境変動へ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。

図8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

Fig. 8 Comparison in the point of MTBF

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。

3.4.3 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。

表2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。

Table 2 Comparison in the point of cost

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

(million \$)

4. おわりに

本稿の内容は以下のようにまとめることができる。

1. ラインレス生産システムの提案
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、多品種生産の可能性、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。
2. 自己組織化を利用したモデル化および計算機実験
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。
3. ライン型生産システムとの比較実験
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、多品種生産環境化での生産性、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。

また、今後の課題としては、ラインレス生産実現のための必要案件の特定、要素技術開発などが考えられる。

謝 辞

本研究の一部は、IMS 国際共同研究プログラム「次世代生産システムのモデリングとシミュレーション」において推進された。また、実験に必要なデータ提供をしていただいた渡辺寿也氏（ホンダエンジニアリング（株））、シミュレーション構築補助をしていただいた岩本羽生大学院生（現 松下電器産業（株））に謝意を表する。

参考文献

- 1) H.P. Wiendahl, P. Scholtissek: Management and Control of Complexity in Manufacturing, Annals of the CIRP, **43**, 2 (1994) pp. 533-540
- 2) 人見勝人: 生産システム工学 (第2版), 共立出版 (1990)
- 3) 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)
- 4) 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, **65**, 8 (1999) pp. 1087-1091.
- 5) V. Braitenberg: Vehicles - Experiments in Synthetic Psychology. The MIT Press, (1984).
- 6) 上田完次: 生物指向型生産システム, 工業調査会 (1994)
- 7) 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), **62**, 595 (1996) pp. 1239-1245
- 8) J. Vaario and K. Ueda: An Emergent Modeling Method for Dynamic Scheduling, Journal of Intelligent Manufacturing, **9** (1998) pp. 129-140