市場の不確実性に順応する生産システム (APS) の開発*

——自動車用スターラインへの適用——

花井嶺郎**

土屋総二郎***

日比 均†

中斎龍美††

寺田宏幸††

Development of Adaptive Production System (APS) to Market Uncertainty
- Application to Automotive Starter Assembly Line - /
Mineo HANAI, Sojiro TSUCHIYA, Hitoshi HIBI, Tatsumi NAKASAI and
Hiroyuki TERADA

Key words: adaptive production system, automated production system,
human-social function, autonomy, cooperation, succession, rapid transforma-
tion, assembly line

1. はじめに

21世紀の到来を目前に控え、消費嗜好の多様化やグローバルな規模での製品開発競争の激化などによって、従来の生産システムは大きな転換期に立たされている。従来の需要が安定的に確保された生産環境から、需要が不確実な、すなわち、生産量や生産期間が予測し難い生産環境への転換である。これを乗り越えるには、生産品目の変更や生産量の増減に迅速かつ柔軟に対応できる新たな生産システムの構築が必要である。

近年、このニーズにこたえる生産システムとして、人の

持つ柔軟性に着目した、セル型、一人生産方式などと呼ばれる手作業を中心とした生産システムが現れており、パソコンなどの需要が不透明で生産期間も数か月という短い製品で効果を発揮している¹⁾。しかしながら、自動車部品などの部品事業分野では、生産量や生産期間の予測が難しいとされているものの、手作業生産システムでは自動化生産システムに対して経済的でかなわない生産量が一定期間は確保されており、自動化生産システムで、生産品目および生産量の変化に迅速かつ柔軟に対応できる新生産システムが強く求められていた。

そこで、今回、その糸口として、需要の変化に迅速かつ柔軟に対応し、経済性も確保できる新たな発想の自動化生産システムを考案し、自動車用スタータ組立ラインにて実用化した。以下、第2章で新生産システムに求められる課題、第3章で新たに考案したコンセプトと開発した生産システム、第4章で開発技術の事例、第5章で本開発結果について述べ、最後に第6章で本稿のまとめを述べる。

2. 新生産システムへの課題

まず、新生産システムが解決すべき課題を、図1に示す従来の生産システムの経済性と生産量の変化への対応性に着目して抽出する。

トランスファライン（自動化生産システム）は特定の生産量の範囲で生産システムの構造を最適化するためにミニマムコストを実現できる反面、生産量の変化に対して製造コストの変化の感度が高いという欠点を持っており、今後想定される需要変動範囲が広い状況下では、安定的に安い

* 原稿受付 平成11年5月14日。1998年度（第18回）精密工学会技術賞受賞業績。受賞者：花井嶺郎、土屋総二郎、日比均、中斎龍美、寺田宏幸

** 正会員（株）デンソー 生産推進センター（刈谷市昭和町1-1）

*** 正会員（株）デンソー デバイス事業部（日進市米野木町南山500-1）

† 正会員（株）デンソー 産業機器技術3部（安城市高棚町新道1）

††（株）デンソー 生産技術部（刈谷市昭和町1-1）

花井嶺郎

1972年名古屋大学大学院工学研究科修士課程修了。（株）デンソー生産推進センター担当取締役

土屋総二郎

1975年名古屋大学大学院工学研究科修士課程修了。（株）デンソーデバイス事業部副事業部長

日比 均

1974年京都大学工学部電気工学科卒。（株）デンソー産業機器技術3部部長

中斎龍美

1974年慶応大学工学部機械工学科卒。（株）デンソー生産技術部副部長

寺田宏幸

1985年名古屋工業大学工学部機械工学科卒。（株）デンソー生産技術部担当部長

図1 新生産システムの課題

図2 APSの基本的な考え方

製造コストを維持することは非常に難しい。一方、手作業ラインは生産量の変化に応じて作業者を1名単位で増減させることで需要の変化に小刻みに追従させる順応性に優れた形態であり、大きな需要変動範囲においても製造コストの変化は小さく、リスクの小さな生産を可能にできる。しかし、コストポテンシャルとしてはトランスファラインには及ばず、特に自動車部品などではトランスファラインが優位な生産量の範囲も大きい。

以上より、新生産システムへの課題は、生産性の高いトランスファラインに、手作業ラインの持つ生産量の変化に対する順応性を統合することであると考えた。

3. 開発システム（APS）

3.1 コンセプト

経済性の高いトランスファライン（自動化）の形態を維持しつつ、手作業ラインの生産量の変化に対する順応性を兼ね備える新発想の自動化生産システム—アダプティブ生産システム（Adaptive Production System, 以下APSと略す）—の基本的考え方を図2に示す。APSは、生産量の変化に応じてシステムを構成する自動機械を増減させることで最も経済的なシステム構造を維持し続ける自動化生産システムである。APSは、手作業ラインの分析に基づき、自律・協調・継承という、言わば人の持つ社会的機能を従来のトランスファラインへ組み込むことによって生産量の変化に対する順応性を実現しており、以下の特徴を有する。

- (1) 生産システムの構造は、需要の変動に応じて、機械の負荷が最大となるよう迅速に変化させることができる。
- (2) 機械は、自律的な機能を有し、作業範囲の決定、該当する作業ステーションへの移動、および、多様な作業を、自律的に行うことができる。
- (3) 機械は、機械間で連携し合う協調的機能を有し、相互の作業を補完し合うことによって、機械の負荷を高めるように効率的な作業を行うことができる。
- (4) 機械は、人との協調機能も有し、人が機械の作業を

図3 自動車用スタータ

代替したり、機械の従属的な作業を支援することで、人と機械の特長を積極的に活用することができる。

- (5) 機械は、作業の継承機能を有し、生産システム構成の変化時に機械同士で迅速に作業技能やノウハウの伝授を行うことができる。

3.2 スタータ組立自動化ライン

本コンセプトを自動車用スタータの組立ラインに適用した。本組立ラインでは、図3に示すように、ハウジング、クラッチ、マグネットスイッチ、アーマチュアなど計17点の部品を組み立てている。図4に開発した自動車用スタータAPSの概観図を示す。

本APSの基本構成は、組立要素として移動ロボットART（Associate RoboTの略、以下ARTと略す）を中心に、搬送要素としてコンベア、汎用部品供給ユニット、専用組付ユニットなどから構成される。

生産システムとしてのAPSの基本的挙動を以下に示す。

- (1) ワーク（被組付部品）を搭載したパレットは、コンベアによって組立順に各作業ステーションに搬送され、また、各作業ステーションでは組付部品が、汎用部品供給ユニットによって供給される。

図4 開発した自動車用スタータ組立ライン

- (2) ART は、アーム、視覚システムにより、各作業ステーションにおいて組付部品の位置を認識し、これをピッキングし、パレット上のワークに組立てる。
- (3) 必要に応じて、組立後の検査（組付確認等）を ART または補助ジグが行う。
- (4) 組付完了後のワークを搭載したパレットはコンベアによって次作業ステーションに搬送される。
- (5) ART は、次作業（現作業ステーションでの組付作業、前後の作業ステーションへの移動）を判断し、行動する。

APS では生産量が変化すると、ART が最大効率で作業を行えるように ART 台数を変化させることができる。このとき ART は担当工程の持ち範囲を変更する必要があるが、ART 同士は互いにコミュニケーションしながら自律的に工程の持ち範囲を変更することができる特長を持つ。以下、開発技術の事例を示す。

4. 開発技術の詳細事例

4.1 ART の自律機能

APS の中核となる構成要素が、作業、移動、認識の機能を有する移動ロボット ART である。図5に ART の概観、表1に主な諸元を示す。

ART は作業機能として、6 自由度、長さ 900 mm、可搬重量 5 kg のアームを有しており、多様な組付作業が可能である。また、移動機能として、積載重量 80 kg、走行速度 40 m/min、磁気誘導の能力を有しており、組付作業に必要なジグを搭載して、作業ステーション間を自由に移動する。さらに、認識機能として、組付部品の位置を高精度に認識する視覚システム、作業者の接近を検知し自動停止する赤外線センサシステムを有している。これらの機能により、ART は自律的な作業や作業者との共存作業を可能としている。以下、特徴的な視覚システムについて詳細に説明する。

ART は任意の作業ステーションへ移動し多様な作業を

図5 ART 概観

表1 ART 諸元

作業	制御軸数	6 軸
	リーチ長	900 mm
	可搬重量	5 kg
移動	積載重量	80 kg
	走行速度	40 m/min
	誘導方式	磁気式
認識	ワーク認識	視覚システム
	作業者	赤外線システム

安定的に行うために、高精度に作業対象を認識できる視覚システムが必要となる。しかしながら、従来の視覚システムは、工場全体のオープンな環境下においてはセンシングする CCD (Charge Coupled Device) のダイナミックレンジが狭いため、周囲を遮蔽板などで囲った固定した環境で用いられていた。

そこで今回、明るさ変動のあるオープンな環境下でも、高精度認識が行える視覚システム—ロバストビジョン—を開発した。図6にロバストビジョンの概要を示す。ロバストビジョンでは、周囲環境の明るさをパラメータとしてカメラからの入力情報を制御し、画像処理装置のダイナミックレンジ範囲内で処理可能な状態に自動的に変換する。この結果、ART は周囲環境の明るさに応じて高精度に画像認識することが可能となり、昼夜の明るさが変動する工場環境で視覚認識による多様な作業を実現した。

4.2 ART 間の協調機能

ART 同士は、互いに協調し作業を補完し合うことで、効率的に作業を行うことができる。個々の ART は非常にシンプルな意思決定基準に基づき、自律的に自己の挙動を決定することで、ART 同士の協調機能を実現した。

図7に ART 間協調の基本的なモデルを示す。この考え方は、手作業ラインで作業者が相互に助け合う協調方法を

図6 ロバストビジョン

図7 ARTの自律協調モデル

基本としている。協調のための基本的な入力情報は、現在の作業ステーションのワークの有無、その前後のバッファのワークの有無、および前後の作業ステーションの他のARTの有無である。図7のモデルは、次式で表される。

$$M_k(P_i) = f(A_i, B_i, B_{i+1}, P_{i-1}, P_{i+1}) \quad (1)$$

M_k はARTの行き先パターン（“とどまる”，“前の作業ステーションへ移動する”，“後の作業ステーションへ移動する”）， P_i は作業ステーションにおけるARTの有無， A_i は作業ステーションのワークの有無， B_i はバッファ在庫の有無である。

この関数 f は、ARTの行き先を決定するシンプルな関数であり、ARTは作業終了後、 $A_i, \dots, P_{i+1}$ の状態を認知し、得られた状態のパターンによって、“そこにとどまって作業する”か、“前の作業ステーションに移動して作業する”か、あるいは“後の作業ステーションに移動して作業する”かの3動作のうち1動作をART自身で決定し、次作業に向けての行動に移る。

この協調制御のアルゴリズムを、コンピュータシミュ

図8 コンピュータシミュレーションによるARTの挙動

レーションを活用してダイナミックな挙動を評価し、最大効率を得られる設計を行った。図8にこのシミュレーションによるARTの挙動の事例を示す。

この事例は、13工程を7台のARTで分担作業する稼働状態において、3号機が第5工程で一定時間停止した場合の挙動を示している。3号機が停止すると、4～7号機は第5工程以降に新たなワークが流れてこないため、現存する流動中のワークに合わせて全体的に後ろに移動しながら作業している。次にその流動ワークがなくなると、3号機の復旧に備えて第6工程以降に前より詰めて待機する。一方、1,2号機は3号機の前までの作業を行いワークをためている。その後、3号機が復旧すると、まず、その3号機の周辺で全体が集中して作業しながら、徐々に全体に分散している。

このように、1台のARTが一定時間停止した場合に

表2 開発結果

	従来トランスファライン	スタータ組立 APS
生産能力	固定 (60 000 台/月)	可変 (4 700~61 000 台/月)
自動化率	80%	80%
転用性	10%	70%

は、協調機能によって他の ART が支援することでシステム全体として効率的な稼働を実現することが分かる。

また、この協調機能により、ART 群の状態を常時監視し、各 ART へ作業指示する管理・制御機能が不要となり、システムが大幅に簡素化している。例えば、生産量の増減に対しても、ART の制御ソフトを変更せずに迅速に ART の台数変更を行うことができる。

5. 開発結果

本 APS はデンソー安城工場において、1997 年春より少量生産にて実ラインとして稼働し始めた。さらに、1998 年春に ART の増設によって、月産 33 000 台に成長し、現在に至っている。本システムの開発結果をまとめると表 2 となる。

本システムは、ART を 1 台単位で増減させることで、月産 4 700 台～61 000 台の間を 4 700 台単位で生産能力を変更可能である。自動化率は従来トランスファラインと同様の 80% となっている。また、転用率は、ART を中心とした汎用設備で構成されるため、従来の 10% 以下から 70% へと大幅に向上した。

6. 結 び

製品の需要予測がますます困難になりつつある 21 世紀に向け、従来自動化が難しいとされてきた生産量と生産期間の不確かな領域において、不確かさへの順応性と高生産性を両立させる新たな生産システム概念—アダプティブ生産システム (APS)—を考案し、自動車用スタータ組立ラインにてこれを実証した。今後は、ART の積極的な活用とさらなる技術開発によって、他 APS の事例展開に向け活動していく計画である。

参 考 文 献

- 1) 篠原 司：コンベア撤去の衝撃走る 1 人完結の「セル生産」, 日経メカニカル, 459 (1995. 7. 24) 20.