生産システムの自動化におけるロボットの役割*

長 谷 川 幸 男**

1. は じ め に

生産の歴史をひもといてみると、新しい生産技術の誕生には必ずパイオニアの役割を果たす産業の貢献が見られる。

ロボットの分野に於て最初にこの新しい機械を生み育ててくれたのは自動車産業であった。1960年代後半からの自動車ボディのスポット溶接へのロボットの導入はボディの製造工程の様相をみるみるうちに変えてゆき、自動車工場でもっと辛い仕事の一つであったスポット溶接の作業は、今日ではロボットが行うのが当然と考えられるようになった。

それと平行して工作機械や塑性加工機械等へのワークの着脱を行うハンドリングロボット、アーク溶接ロボット、塗装ロボット、組立用ロボット等が大量に導入され、1工場で1,000台近くのロボットが用いられるのは珍しくない時代が到来した。

自動車産業の次にパイオニアの役割を引受けるようになったのは電機産業である。組立作業を中心に、より器用でインテリジェントなロボットが開発され、数年前より、導入台数では自動車産業を超越してトップに立つようになった。

時代の推移とともにこれからもロボットの分野におけるパイオニア産業はつぎつぎに出現することが予想されるが、ロボットの導入に関して常に云えることは、この新しい、フレキシブルで、そしてインテリジェントな機械が、その時々における生産に関連した社会的、経済

的ニーズを見事に充足して来たことである。例えば自動車産業へのロボットの導入は客の注文を1台ごとに細かく受けるオーダーエントリー方式の採用を可能にし、電機産業では IC 等の製造におけるクリーン度の向上や検査調整作業の自動化による製品々質の向上に貢献した。

換言すれば、ロボットの導入は単に局所的な省力効果のみならず、対象産業における製造技術の革新の中心的な役割を果たして来たことを私共は評価してよいであろう。

以上の観点に立って、本稿ではロボットが生産システムの進歩に果たして来た役割、ロボットの導入によって変る生産システムの未来像、そしてロボットへの期待と課題について考察を加えてみたいと思う。

2. 生産システムの構成要素としてのロボットの特色

生産に用いられる産業用ロボットを最初に発想したのは米国の Devol だと云われている。1950年代の中頃に制御技術者であった Devol は、多くの米国の工場を観察した結果、作業内容が単純であるにも拘らず段取り時間がかかるために、機械化や自動化が小ロット生産に対応出来ないのを見て、誕生間もないコンピュータを従来のカムやリンクに代る機械の腕の制御に用いて段取り時間の短縮を図ることを思い立ち、図1に示すようなフレキシブルなハンドリングシステムの特許を申請した。

この特許をもとにベンチャービジネスである Unimation 社が設立され、後に自動車ボディのスポット溶接ロボットの決定版とも云うべき Unimate Mark II ロボットが誕生した。

Unimation 社の社長を永く勤めた Engelberger はこのような産業用ロボットの特徴を次の3項目に集約して

図1 George C. Devol 氏の特許
(米国特許第 2988237 号資料より引用)

いる。

1) **Off the Shelf Product**(棚から出して直ちに使用出来る製品)

予め標準的なロボットを見込生産で製造して貯蔵しておき、ロボットの導入個所が決まったならば、直ちに在庫品を引当てて用いる。即ち棚から取り出すように需要にすぐに応ずることが出来る。

2) **Little Debugging Time** (短い調整時間)

ロボット自体の仕様を標準化してまとめて製造する結果、製品の検査・調整 (debug) も予めまとめて自動的に行うことが可能となり、それ故に実際の適用場所で調整を行う時間は僅かで済む。

3) **No Obsolescence** (陳腐化しない)

ロボット自体にフレキシビリティ (汎用性) を保たせるために、個々の適用個所でのニーズよりも機能を広く設定して、もしある特定の用途で不用になった場合には、直ちに他の用途に振向けることが可能で、従って陳腐化せずに長期間活用が可能である。

Engelberger が提案したこの産業用ロボットの3つの特徴は、ロボットが生産システム構築におけるリードタイムの短縮やエンジニアリングマンパワーの節減に大きく貢献することができることを示している。

しかしこのようなロボットの定義については、ロボッ

表 1 ロボットの備えるべき特性¹⁾
(Engelberger, 長谷川)

- 1) 物をつかんだり離したりできる手
- 2) 手を3次元的に移動させることができる腕
- 3) 手-手首の組合せを、作業空間内のどこへでももってゆける関節を有する腕についた手首
- 4) 対象とする物体を持ち上げるに十分な筋肉の力
- 5) 作業上の必要性に対応した繰返し位置決め精度
- 6) ロボットのすべての肢の機能を1人の人間が操縦できる手動制御
- 7) 人間による教示を学びとることのできる組込みの記憶装置
- 8) 人間の教示者がいない場合にも記憶が作業のコントロールを可能にする自動システム
- 9) 少なくとも人間よりは速い作業速度
- 10) 前に教示した作業をロボットに切り換えられるように、欲する作業の分が選び出せるプログラムライブラリ
- 11) 作業を行うプラントまたは機械と共にある場合の安全やプロセス制御の情報を授受するインタロックの設備
- 12) コンピュータと共用できるインタフェース
- 13) 実用的な作業環境のなかで十分な、MTBF (平均故障間隔) の信頼性
- 14) 故障したときの早い対応と部品の互換性、そして自己診断ルーチンに援けられた保守の容易化を可能とするシステム構成
- 15) 必要に応じて情報を自らとり入れ、適切な行動を判断する知的機能

表 2 動作の分類²⁾

① 単なる動きや加力動作および指の動作	③ 液体や粉体のような集合体を扱う動作	⑤ 柔軟体を操作する動作
Move (動かす) Incline (傾ける) Pull (引っ張る) Lift (持ち上げる) Turn (まわす) Twist (ねじる) Push (押す) Support (支える) Shake (振る) Vibrate (振動する) Swing (ゆらす) Impact (衝撃力を加える) Strike (打つ) Fit (あてる) Slide (すべらす) Grasp (にぎる) Pick (つまむ) Release (はなす)	Pur (注ぐ) Paint (塗る) Plaster (しっくいを塗る) Spray (散布する) Distribute (まく) Sift (ふるいにかける) Fill (充填する) Lubricate (油をやる) Stuff (ねり物をつめる) Miz (まぜる) Wipe (ふく) Gather (かき集める) Draw (汲む) Scoop (すくう) Ladle (ひしゃくですくう) Clean (清掃する) Write (書く)	Wash (洗う) Squeeze (絞る) Wind (巻く) Tie (むすぶ) Wire (配線する) Spread (張る) Bend (曲げる) Wrap (つつむ) Saw (縫う) Knead (もむ) Tear-off (はがす)
② 物の移動および他の物体との結合状態を変える動作	④ 加工を加える動作	⑥ マクロな動作-作業
Transfer (運ぶ) Throw (投げる) Place (置く) Put-on (のせる) Arrange (配列する) Lean (立てかける) Hang (つるす) Insert (挿入する) Combine (結合する) Screw (ねじ込む) Unscrew (ねじをぬく) Seperate (分離する) Extract (引き抜く) Attach (取りつける) Set (合わす) Lock (絞める) Unlock (ゆるめる) Pack (つめる) Unpack (とり出す)	Punch (たたいて穴をあける) Drill (ドリルで穴をあける) Saw (のこでひく) Cut-off (切り抜く) Whet (研ぐ) Sharpen (とがらす) Shave (削る) Plane (かんなで削る) Whittle (ナイフで削る) Polish (みがく) Grind (研磨する) Weld (溶接する) File (やすりをかける) Squeeze (押しつぶす) Powder (粉にする) Scratch (ひっかく) Drive-nail (釘を打つ) Unnail (釘を抜く) Dig (ほる)	Assemble (組み立てる) Disassemble (分解する) Repair (修理する) Build (建てる) Produce (生産する)

表 3 産業用ロボットの一般的分類

番号	用 語	読 み 方	意 味	対 応 英 語 (参考)
1110	操縦ロボット	そうじゅうろぼ っと	ロボットに行わせる作業の一部又はすべてを人間が直接操作することによって作業が行えるロボット。	operating robot
1120	シーケンスロボ ット		あらかじめ設定された情報(順序・条件及び位置など)に従って動作の各段階を逐次進めていくロボット。	sequence robot
1130	プレイバックロ ボット		人間がロボットを動かすことによって、順序・条件・位置及びその他の情報を教示し、その情報に従って作業を行えるロボット。	playback robot
1140	数値制御ロボッ ト	すうちせいぎょ ろぼっと	ロボットを動かすことなく、順序・条件・位置及びその他の情報を数値・言語などにより教示し、その情報に従って作業を行えるロボット。	numerically controlled (NC) robot
1150	知能ロボット	ちのうろぼっと	人工知能によって行動決定できるロボット。 備考 人工知能とは認識能力・学習能力・抽象的思考能力・環境適応能力などを人工的に実現したものである。	intelligent robot
1151	感覚制御ロボッ ト	かんかくせいぎ ょろぼっと	感覚情報を用いて、動作の制御をするロボット	sensory controlled robot
1152	適応制御ロボッ ト	てきおうせいぎ ょろぼっと	適応制御機能をもつロボット。 備考 適応制御機能とは環境の変化などに応じて制御等の特性を所要の条件を満たすように変化させる制御機能をいう。	adaptive controlled robot
1153	学習制御ロボッ ト	がくしゅうせい ぎょろぼっと	学習制御機能をもつロボット 備考 学習制御機能とは作業経験などを反映させ、適切な作業を行う制御機能を行う制御機能をいう。	learning controlled robot

(JIS B 134 1986)

ト技術の進歩が日進月歩であるために、各国とも定義の設定に努力しつつあるにも拘わらず、仲々きめられないのが実情である。

このような状況の下で日本産業用ロボット工業会では産業用ロボットの定義を次のように設定した。「人間の上肢(腕や手)の動作機能に類似した多様な動作機能を有するか、または感覚機能や認識機能を有し、自律的に行動できるもの」

この定義を中心にロボットにふさわしいキーワードズを列挙してみると次のようになる。

柔軟性 自律性
感覚機能 知能性
汎用性 移動性
個性 奴隷性 等

これらを総合すると、従来の工場などで用いられる機械はどちらかと云えば、大地にしっかり根を下した植物的なイメージを持つものに対して、ロボットは機敏に餌(えさ)を求めて動き回る動物のイメージを感じさせるところがある。そこでこのようなロボットの特性に合っ

た適用分野を割当ててやれば、大きな成果を期待することが出来るようになる。

Engelberger が自著「Robotics in Practice」邦訳書名「応用ロボット工学」の中で挙げた産業用ロボットの備えるべき諸特性に、筆者なりの補足を加えてまとめてみ

表 4 作業側とロボット側の特性の関連³⁾(作成:長谷川)
(関連項目が複数になるのを省略)

No.	作 業 側	ロ ボ ッ ト 側
1	動作パターン	骨格系
2	動作距離	腕の長さ
3	動作時間	動作速度
4	動作精度	動作精度
5	ワークの重量	可搬重量
6	ワークの形状・材質等	ハンドの構造
7	作業の複雑さ	記憶容量
8	不確定動作	センサ(判断能力)
9	他との連系動作	インターロック機能
10	設置空間の制約	本体の構造と大きさ
	⋮	⋮

ると、表1のようになる。これによって工場などで多く用いられる産業用ロボットのイメージを明らかに把握することが出来るようになるであろう¹⁾。

より具体的には、工場で行われる表2に挙げられるような諸動作²⁾を行わせるロボットを、表3のJISの分類(JIS B 0134 1986)に該当する多くの既存のロボットの中から選定して割当て、又は新規開発することにより、生産システムを構築してゆくことになる。

その際のロボットの仕様の具体的な設定に当っては、表4に示されるように、作業側の機能的なニーズに対応した、ロボット側の静的、動的そして制御上の諸特性が検討されることになる³⁾。

しかし、その場合の作業機能のロボットへの割当のさせ方についても、図2に見られるように、加工機械や周辺機器に分担させる場合や、ロボットが全部を引受ける場合など、多くの組合せの可能性が考えられる³⁾。

一般的な傾向としては、ロボット機能の成熟の度合に応じて1から4の方向への移行が見られ、システムとしてのフレキシビリティも1から4の方向に増大することが考えられる。

その一例として、切削加工にも組立にも用いられるイタリアオリ Orivetti 社の Sigma ロボットや航空機の胴体の3次元的な切削加工に応用された Unimate トロボットなどのように、ロボット自体が従来の工作機械の分野に参入しはじめ、しかもロボットのプログラミングというソフトウェア的な対応のみで短期間に、低いコストの切削加工システムを構築している状況は、ロボットを積極的に活用した生産システムの将来の可能性を暗示しているようにも思われる。

図3はロボットの進歩の段階とそれによって可能とな

No.	機能分担	記 事
1		マシンテンディング形(加工機へのワークの着脱などの補助をロボットがするタイプ)の代表的なものでロボットの機能が不足するために周辺機器を用いる。
2		マシンテンディング形であるがロボットの機能が大きいために周辺機器が不要の場合。
3		ロボット自体が加工機の役割を兼ねたり、はじめから加工機を必要としないオペレーション形の場合。
4		ロボット自体が加工や組立の作業を行うと同時に自分でワークを持って動き回り、搬送の役割も兼ねる場合。

図2 機能分担のパターンの例³⁾ (作成:長谷川)

る生産自動化のレベルについてまとめてみたものである。

これにより、ロボットの進歩の過程は、そのままこれまで不可能であるとあきらめていた個所の自動化への再挑戦と、ロボット技術による障壁打破の繰返しの連続であると云っても過言ではない。すなわち生産システムの自動化におけるロボットの役割は、そのまま自動化の可能性の増大の歴史とオーバーラップするものと考えてよいであろう。

3. ロボットによって生産システムはどう変わるか

MIT の人工知能研究所の所長であった Minsky 教授は、ロボット関係者の間で著名な論文“Mini Robot Proposal to ARPA”⁹⁾の中でロボットの特色を活かした新しい生産システム実現の可能性について概略次のように述べている。

“1950年代にNC工作機械が発明されて以来、多品種少量生産が効率的に行われるようになったが、オートメーション技術が画期的に進歩したと云うことは出来ない。

われわれが進歩した生産形態であると思ひ込みがちな流れ作業は、個々の工程を受持つ機械設備の作業遂行範囲が狭いために、多くの工程を連結する必要があるので出現したに過ぎず、このような生産形態を生産の理想形と認めることは出来ない。工程が長くなるとリードタイムが大きくなり、勢い見込生産の形態を採用して、無駄な在庫を持つ必要が生ずる。

一方、私共は永年にわたり標準化の美名のもとに個人の都合を制約することに馴らされて来た。例えば私共が現在用いている靴の大部分は、足の長さや横幅の2つのパラメータのみで選ばれているが、これが最善であるとは云い切れない。

例えば足のくせを詳細に自動計測する測定機を開発し

	ロボット機能の進歩	生産自動化のレベル
1	例 シーケンス ロボット	単純繰返し作業の自動化 →
2	例 プレイバックロボット+センサ	限定された変動要因への対応を含む自動化 →
3	例 知能ロボット	一般的変動要因への対応を含む自動化 →
4	例 知能ロボット+自己修復機能	突発事故への対応を含む自動化(完全無人化システム) →
5	例 知能ロボット+自改修復機能+自己増殖機能	不可能および否定すべき自動化(人間が亡ぼされるおそれあり)

図3 ロボットの進歩の段階と生産自動化のレベル

表 5 将来の製造システムのイメージを示す諸特性⁵⁾

項 目	内 容
1 リードタイム	製造期間の長さ
2 変化に対する応答時間	製造仕様、生産量、生産工程等の変更に対処する所要時間
3 同 期 性	作業速度の同期化の程度
4 安 定 性	内外部からの阻害要因にたいする抵抗力
5 制 御 性	システムの構成要素として制御する容易性
6 自 律 性	環境条件等の変化に自律的に対応する能力
7 可 近 接 性	振動、衝撃、騒音、塵埃などを出さずに近接設置できる可能性
8 無 人 性	人手を用いないでできる可能性
9 親 人 間 性	人間が快適に作業できる可能性
10 耐 久 性	永続性を期待する程度

その結果を NC 化された自動靴製造機にインプットしてやれば、ひとりひとりの客の足くせによくフィットしたはき心地のよい靴が自動的に、しかもそれほど高いコストをかけずに出来るかも知れない。

知能を備えたロボットが開発されると、ロボットはちょうど人間の作業者のように、組立・検査・調整という多種類の仕事を1台で一度に全部こなし、個々の顧客の好みに応じた製品が自動的に、短時間に、従来の大量生産の場合と同じように製造される時代が来るに違いない。このようなアドバンスドオートメーションシステムに於ては、

個別大量生産 (Individual Mass Production)

受注生産 (On Demand Production)

の2項目が生産システムを特徴づけるキーワードとして尊重されるようになるのであろう。

このような新しい生産システムの出現を可能にしてくれる最大の支援材料はコンピュータの進歩による急速な情報処理能力の増大と処理コストの低下である。すなわち、情報処理技術の進歩がシステムの複雑さという障壁を取除いてくれることになったのである。センサによる情報の自動収集も含めて、これらの新技術の恩恵を活用すべきである……”

Minsky 教授がロボットの古典とも思われるこの論文を作成するに当たって、どの程度の調査研究を基礎としているかを知る由も無いが、彼が描く未来の生産システムのイメージはなお変らぬ新鮮さで印象付けるものがある。

表5は筆者等が生産システム設計に於て着目すべき諸項目をまとめたものであるが、ロボット技術の進歩は、

図 4 多品種少量生産システムの人類に対する貢献⁵⁾

これらの諸要因の取扱いの自由度を大きく拡げてくれることになる。

また図4は修理形を含む広義の多品種少量生産システムの果す社会的使命についてまとめてみたものであるが、ロボット技術の進歩とその活用により、新しい生産システムがより大きな貢献をなし得ようになるであろうことは疑問の余地が無い。

図 5 ロボットを中心とした CIM システムのモデルに見る問題領域⁶⁾

4. 生産システムの立場から見たロボットの課題

一般的に理解されているように、生産システムの領域的な広がりレベルは、つぎのような段階を迎えるものと思われる。

1. 単独工程の自動化→Flexible Manufacturing Cell (FMC)
2. 工程系列又はグループの自動化→Flexible Manufacturing System (FMS)
3. 工場の現場レベルの自動化→Factory Automation (FA)
4. 設計や資材調達、生産管理を含む総合的な生産活動の自動化→Computer Integrated Manufacturing (CIM)

厳密な用語の定義の立場からすれば、FMS→FA→CIMの間に、更に検討を要する範疇の問題が残されているようであるが、生産システムがこのような階層構造により成り立っている点については疑問の余地がない。

そしてロボットを適用した生産システムの発展過程は1から4の方向に向っており、今後第4段階のCIMについての論議が熱を帯びてくることが予想される。

図5はこの第4段階のCIMにおけるロボットを中心とした問題領域をまとめたものである⁶⁾。ロボットは元来生産システムの構成要素のひとつであるが、そのロボットの活用を図るために、Spurはプロセス制御の上位機能として作業管理や戦略的管理の課題を取り上げている。

またCIMの挙動に必要なツールの一部が図の右側に記述されている。

図6 CIM 誕生の要因⁷⁾

図6はこのようなCIMシステムが誕生するようになった直接的間接的要因を整理してみたものである⁷⁾。図中にも明らかにように、CIMの開発には非常に広範囲な社会的・技術的要因が複合されていることが判る。

1986年に大阪で行われた日米FA国際シンポジウムに於て、MIT, CSD研究所のDr. Whitneyがいきなり指摘したように、これからのロボットを含むアドバンストオートメーションシステムの開発には

1. ロボットなどの自動制御の分野を専門とする技術者
2. 知識工学や人間工学などの人間行動を対象とする研究者
3. 仕事自体の方法の研究をする生産技術者

の3つの立場の専門家の緊密な協力が必要不可欠なものと思われる。

いまひとつの重要な課題は生産システムの自動化に関連した国際的な標準化の問題である⁸⁾。

生産システムは一般的にかなりの規模となることが多いために、システムの構成要素となるロボットや加工機械、搬送機器などを総て1社の製品でまかなうことは到底不可能である。また今後産業の国際交流が促進されると、各国で製造された機器を結果としてひとつの生産システムにまとめる機会が非常に多くなるものと予想される。

その場合に用いられる用語や記号、安全のルール、そして機器間の接続方法や通信規約等が異なっているシステムとしての総合化は不可能となる。この問題に手遅れにならないうちに対処するために、ISO(国際標準機構)の中に1983年に産業オートメーションの問題を取り扱う第184技術委員会(TC184)が設置された。

図7はその委員会構成であるが、ロボットの分野でも積極的に対応するために国内対策委員会が設置され、SIOとJISの整合性を保ちつつロボットの標準化を促進するための努力が続けられている。わが国がロボットの分野で国際的にリーダーシップを保つために、この種の努力は必要不可欠である。

以上の他に生産システムの立場から考えられるロボットへの課題として、レイアウト上の制約を除きスペース効率を良くするための小型化の問題、エンドエフェクタやアームなどのモジュール化の問題、異なるタイプのロボット間でのプログラムの共通利用(移植)の問題、オフライン及び自動プログラミングの問題、ロボットと他の機器を併せたシステムとしての安全の問題など多くの課題が考えられるが、紙幅の都合により他の機会に譲ることとしたい。

図 7 CIM に関連した ISO/TC 184 委員
会の構成 (ISO 資料より引用)

5. お わ り に

本稿では生産システムの自動化の立場から、個々のロボットの問題よりも、主にロボットによって影響を受ける生産システムの側から考察を加えてみた。これからのロボット技術の進歩により、生産システムは今後も更に大きな変革を遂げることが予想される。

米国 Purdue 大学の CIDMAC (Center for Integrated Design and Manufacturing) を訪ねた際に、FA や CIM システム設計のリーダーとなる技術者養成への大学に対する期待の大きさとその難しさについて、指導的な教授達から苦勞ばなしを聞いたことがある。

わが国ではこの分野の課題は個々の企業の努力にゆだねられる傾向が強いが、目覚ましい進歩を続けるロボット技術の生産システムへの有効な活用を図るために、学会レベルでの研究協力が一層必要となることであろう。

引用参考文献

- 1) J.F. エンゲルバーガー著、長谷川幸男 監訳 “応用ロボット工学” 朝倉書店、1984
- 2) 高瀬国克 “知能ロボットこれからの展開” 精密工学会第 12 回ロボットに関する マラソンシンポジウム 予稿集、1987

- 3) 日本産業用ロボット工業会編 “産業用ロボットの応用、日刊工業新聞社、1979
- 4) 伊東 諒 “次世代 FMS の姿とシステム設計、日本ロボット学会誌、Vol.3, No.2, 1985
- 5) 長谷川幸男編 “多品種少量生産システム(第 2 版)” 日刊工業新聞社、1984
- 6) G. Spur “Robot System Integration Into CIM” Proc. 16th ISIR, p.523, 1986
- 7) 長谷川幸男 “CIM とは——新しいコンピュータ化自動製造システム”, コンピュータール No.11, p.2, 1985
- 8) 長谷川幸男 “80 年代～90 年代を支える CIM システム……” 「インテリジェント工場」, 日刊メカニカル別冊、1986
- 9) 長谷川幸男 “ISO/TC 184/SC2 (工業用ロボット) について”, ロボット, No.53 (国際標準化の動向特集号) p.43～48, 1986

長谷川幸男

(Yukio HASEGAWA)

1951 年早稲田大学 理工学部卒業、直ちに(株)精工舎に入社し生産技術業務に従事、1957～8 年米国 ICA 計画により Univ. of Michigan に留学して生産工学を研究。

帰国後工場建設、自動化計画等に従事し、技術課長、能率課長を経て、1965 年～(株)精工舎より早稲田大学生産研究所(現システム科学研究所)へ移籍、助教授を経て現在教授。ロボットの応用技術および生産システム設計技術の研究に従事。1977 年米国ロボット協会より第 1 回エンゲルバーガー賞を受賞。1978 年スイスローザンヌ工科大学客員教授として組立用ロボットの研究・開発に協力。

(日本ロボット学会正会員)