自動組立システムの動向*

牧野 洋** 新井民夫***

Trend of Automatic Assembly System / Hiroshi MAKINO and Tamio ARAI

Key words: assembly system, automation, flexibility, robotic assembly, versatility index (VI), trend

1. ま え が き

1994年8月のCIRP総会において、著者ら2人は連名で“New Developments in Assembly Systems”と題するキーノート講演¹⁾を行った。以下はその要約であり、自動組立システムがどのように変化してきたかを中心にまとめたものである。

2. 組立システムの分類

組立システムは(i)人手による手作業組立システム、(ii)特定の製品のみを対象とした専用組立機械システム、(iii)数種の製品を対象としたロボットによるフレキシブル組立システムの3つに大別できる。通常、多種少量生産には手作業システムが、少種多量生産には専用機システムが用いられ、ロボットシステムはその中間の中種中量生産に用いられる。製品のますますの多様化とモデルチェンジの頻繁化に伴って、組立システムにはより一層のフレキシビリティが求められるようになってきている。

図1²⁾は80年代と90年代とで組立技術に対する要求がどのように変わってきたかを示したものである。すなわち、80年代において、組立工程に求められたものは品質の向上、生産性の向上、コストの低減の3つであったが、90年代になると、これに多様化への対応、納期の短縮の二つがさらに求められるようになった。そうして、システムの開発期間も、従来は製品設計、工程計画、設備開発(物流の実現、稼働)が直列に行われていたが、この間にオーバーラップをとることにより(いわゆるコンカレントエンジニアリングの採用により)、短縮することが望まれるようになった。

3. 部品の流れと製品の流れ

「組立」とは、2つ以上の部品を一体化して製品を作る過程であり、これを実現する組立システムには部品の流れと製品(半製品)の流れが観察される。それがどのように行われるかによって組立システムの形態が定まる。

図2は組立システムの歴史的な変化の過程を図示したもの

* 原稿受付 平成9年8月11日

** 正会員 山梨大学工学部(甲府市武田4-3-11)

*** 正会員 東京大学大学院工学系研究科(東京都文京区本郷7-3-1)

牧野 洋

1956年東京大学工学部精密工学科卒、工学博士。同年松下電器産業入社、1966年山梨大学助教授、1976年教授、現在に至る。1985年

SCARAロボットの開発によりエンゲルバーガー賞、ゴールデンロボット賞を受賞。研究分野:機構学、自動組立、ロボット

新井民夫

1970年東京大学工学部精密機械工学科卒、1977年同博士課程修了。工学博士。1987年東京大学工学部精密機械工学科教授。1979年英国エディンバラ大学人工知能学科研究員。産業用ロボット言語の標準化活動を推進。自動組立、双腕協調制御、移動ロボットなどの研究に従事。精密工学会監事、自動化推進協会会長、精密工学会、日本ロボット学会、IEEE、CIRP等の正会員

図1 自動組立システムに対する要求の変化

図2 自動組立ラインの変遷

のである。まず図2(a)は従来型の専用組立機械システムを示している。ワーク（製品または半製品）は通常パレットに載せられて、○印で示した組付けステーション間を移動する。この流れを「移送」(transfer)と呼ぶ。各ステーションでは通常それぞれ1個（1種類）の部品が組み付けられ、8個の部品を組むには8ステーションを必要とする。各部品の整列供給装置（□印で示す）は通常組付けヘッドのすぐ近くに配置され、部品はシュート、直線振動フィーダ、コンベアなどを用いてステーションに供給される。この流れを「供給」(feeding)と呼ぶ。また、「組付け」(assembly)はカムを用いたピック・アンド・ブレース装置等によって行われる。移送・供給・組付けの3機能は専用組立機械システムにおいて不可欠のものであり、これを自動組立の3要素と呼んでいた。

80年代に入って、SIGMA, PUMA, SCARAなどの組立用ロボットが実用化されるようになると、組立システムの構成にも変化が生じた。これを図2(b)に示す。組立用ロボットはプログラマブルに位置決めを行うことができ、したがって、適当な工具・保持具を工夫するならば多数の（多種類の）部品を1ステーションで組み付けることができる。図2(b)は1ステーション当たり4個の部品を組む様子を示している。

1ステーション当たりで組むことのできる部品点数を「集積度」と呼ぶことにすると、集積度が4になったことによってさまざまな問題が生ずる。もっとも顕著なのはタクトタイムである。部品1個の組付けに3秒かかるのであれば、図2(a)のシステムのタクトは移送時間を無視すると3秒、(b)では12秒である。1か月当たりの実働時間を（一直として）10000分と試算すると、(a)は月産20万個の製品向きの組立ライン、(b)は月産5万個の製品向きのラインということになる。

図3 腕時計外装組立ラインのステーションユニット

(b)のシステムでもっともクリティカルな要素は組立ロボットである。移送および供給は12秒に1回行えば良いから(a)の場合に比べて相対的な重要度は低下している。それに対して、ロボットは3秒に1回の割合で動作しなければならない、これを高速化すれば、そのことが全体のタクトに及ぼす影響は大きい。

部品供給に関しては装置のスペースの問題が新たに生ずる。通常、組立機械の供給装置として用いられている振動ボウルホッパフィーダの直径は $\phi 400 \sim 500$ mmのものが平均的なサイズであり、これをロボットの周辺に多数配置することは困難なことが多い。

図3は腕時計の外装（外箱）の組立に用いられているフレキシブル組立ライン³⁾の1つのステーションを示したものである。外装組立ラインはこのようなステーションが44台直列に連結されてコンピュータコントロールされたフレキシブルラインを構成している。このラインで組み立てられる腕時計は数十種類に及んでおり、品種切換えがあると、それに応じて組み付ける部品が切り換えられる。図の3個のボウルフィーダはそのために用意されているものである。このほかにマガジン、シュート、パートトレイなどの部品供給装置が用いられることもある。

腕時計の場合には部品が小さく、ボウル径も $\phi 200$ mmぐらいなので、各ステーションに多数個のボウルを配置することも可能であったが、オートバイのエンジンの組立などになると、ボウル径も $\phi 1$ mぐらいになってスペースを取ってしまう。そこで横山らが考案したのは多段フィーダ・多重フィーダ⁴⁾などの立体的なフィーダであり、ボウルを垂直に積んでいくことによってこの問題を解決した。

次に出てきたのが図2(c)のようなシステムである。これは、部品の整列供給装置群を組立ラインと切り離し、その間に何らかの配送系（transport system）を置こうとするものである。配送の目的は必要な部品を必要とするス

図4 VTR メカニズム自動組立ライン

図5 VTR 組立ラインのトレイ循環装置

ーションにインタイムに送り届けることである。部品を入れる容器は部品の整列姿勢を保ち、かつ、ロボットがピックアップしやすいようになっていなければならないが、通常この目的に対しては部品が平面的にマトリクス状に配置された箱、すなわちパーツトレイ (parts tray) が用いられる。

部品供給センタは工場内の（時には工場外の）組立ラインとは離れた所に置かれ、この間をコンベアあるいはAGV (automatic guided vehicle) で結ぶのが普通である。これを外部配送 (external transport) と呼ぶ。

図4は日立製作所が開発したVTR自動組立ライン⁵⁾である。このラインのロボットステーションと部品倉庫の間は2台のAGVによって結ばれており、AGVは段積みされたパーツトレイを各ステーションに届ける。図5はステーション側に設けられたトレイ循環装置であり、部品のバッファの役割を兼ねている。このバッファの量が少

ないと、AGVは頻繁に往復しなければならないことになる。

後述のソニーのSMARTシステムでは、配送システムは組立システムの中に組み込まれている。このような場合には内部配送 (internal transport) と呼ぶ。

図2(c)におけるクリティカルな要素は組立ロボットである⁶⁾が、バッファやトレイの容量によっては配送が問題になることがある。プリント基板に電子部品を実装するマウンタやインサータでは、組付けサイクルタイムが早く、部品の種類が多い上に、バッファがほとんどないので、内部配送系の設計は大きな問題となっている。

配送系は、機能的には供給系の最後の工程であるが、構造的、技術的には移送系と共通するところが多い。いずれにしても、現在の組立システムは供給・組付け・移送の3要素から供給・配送・組付け・移送の4要素へと変化してきたと行うことができるであろう。

4. 再構成の容易なシステム

ロボットを用いたシステムは通常、製品のある特定のグループ（これを製品の「ファミリー」と言う）に対して計画される。しかし、場合によって、ファミリーの構成が当初の予想をこえて変化したり、あるいは生産計画の上から、ファミリーそのものがなくなってしまう場合がある。この

ような場合には、その組立システムそのものを改造する必要がある。

このような場合には、システムがブロック化・モジュラー化されていて、再構成の容易な (reconfigurable な) システムになっていなければならない。

図6 標準化された組立ラインの要素

図7 手作業と自動ステーションの両方を含むモジュラーライン

図8 モジュール化ラインによるタイプライタリボンの組立

このような考え方は昔からあり、手作業組立ラインや、専用機システムにも適用されてきた。

図6にはドイツ・ボッシュ社の組立システム⁷⁾を示す。このシステムはアルミニウムの押出し材を基本に構成されており、止め金具やねじの1本1本に至るまで標準化されている。設計者はカタログを見て部品を選び、棒材の長ささえ指定すれば、ただちに図6のようなラインを作ることができる。

図6は手作業を想定したものであるが、専用機あるいはロボットを含んだシステムにおいても、そのそれぞれのステーションをモジュール化しておき、これを組み合わせることによってコンピュータでレイアウトを行うことが容易となる。図7⁸⁾にはその一例を示す。

図8はそのようなモジュールシステムとして実用化された例⁹⁾である。このラインはタイプライタリボンユニットを組み立てるもので毎時13000個の高速で製品を組むことができるという。このシステムのそれぞれのステーションモジュールは図9¹⁰⁾のようにカスタ付きで入れ換えられるよ

図9 モジュラーユニットの付け替え

図10 ソフトウェアによる可変構成システム

うになっている。

図10はソフトウェアによってハードウェアの構成を変えようという思想によって作られたモデルライン¹¹⁾である。6角形の本流と6本の支流へどのような順序でワーク

図11 自由に動き回るモジュラーユニット

図12 SMART システムの全景

を流すかはコンピュータでコントロールされ、その意味でリコンフィガラブルとなっている。

日立製作所生技研は図11のようなシステム¹²⁾を発表した。これは組立ロボット、組立テーブル、フィーダユニットなどが、それぞれ自走車にのっており、コンピュータの指令に基づいて自由に動き回ってシステムを構成するというものである。思想的には面白いが、実際の工程に適用できるとは思われない。

5. SMART システム

ソニーのSMART システム¹³⁾は上記4つの要素を持ち、各部をモジュール化することによって再構築可能なシステムとしている。現時点においてもっとも完成されたシステムであると言ってもよいであろう。図12にシステムの一例の全景を、図13にその一つのステーション（ソニーではSMART セルと言っている）を示す。

SMART セルは1台のSCARA 型ロボットを中心に構成されている。ロボットの前方にはフリーフローのパレット移送コンベアが、後方には同じくフリーフローのパートトレイ配送コンベアがある。後方のトレイコンベアからバッファレール部に押し出されたパートトレイはロボット自身の手によって前方6か所のトレイ置場に運ばれる。ロボットはタレットツールを切り換えながら、最大6種類の部品をピックアップし、これをパレット上の組付けジグに組み込む。パレットには通常複数の組付けジグが取り付けられており、これはツールチェンジの回数を減

らすのが目的である。

このシステムを成功させたのは図14に示すAPOS (advanced parts orientation system) と呼ばれる装置¹⁴⁾の開発である。これは振動方式（ふるい方式）によってパートトレイに切られた穴溝の中に部品を配置する方式である。これによって、軸や小歯車など、通常他のフィーダで十分供給可能であると思われる部品も含めて、統一的にパートトレイを用いることが可能となり、小物部品の配送方式を確立した。

このシステムは平均タクトが20秒であり、月産3万個前後の生産に適している。同社のメカトロ製品の多くはこのラインによって組立てられている。

図13 SMART システムのステーションユニット

図14 APOS 自動部品整列供給装置

6. 組立システムを選択

フレキシビリティ (flexibility, 柔軟性) という言葉はいろいろな意味に使われているが、ここではそのシステムによって生産される製品のモデルチェンジに対して、いかに容易に対応しうるかの尺度、すなわち汎用度 (versatility) であると定義する。品種切換えの多い生産工程に対して、品種切換えに対応しにくい生産システムを用いれば、システムのマッチングが取れなくなり、生産効率が落ちる。

この関係を定量的に評価するために、著者らの一人は汎用度指数 (versatility index, VI)¹⁵⁾ を定義した。これはそのシステムに要求される、あるいはそのシステムが処理しうる1年間当たりのモデルチェンジ切換えの回数言うのであり、これと「90%ルール」の併用によって、システムの評価と選択を的確に行うことができる。

組立機械あるいは組立システムの設計に当たっては、通常その機械あるいはシステムで組立てるべき製品の品種 (または品種のファミリー) と、それぞれの生産量が想定される。行程に要求される VI 、すなわち VI_p はこれから容易に算出される。

図15はこの関係を対数グラフに表したものであって、横軸に汎用度指数、縦軸にシステムのサイクルタイム (タクトタイム) を取っている。右縦軸は月産量 (一直当たり) を示しており、1分当たり1個の生産速度は月産1万個に相当する。いま、タクトタイムを30秒、平均ロット数 (品種切換えまでに流れる製品個数) を1000個とすると、この行程では500分につき1回の品種切換え、言い換えればほぼ1日に1回の品種切換えを要することになり、これは1年間当たりに換算すれば240回、すなわち $VI_p = 240$ ということになる。この例を図では矢印で示した。

一方、組立機械あるいは組立システムの持っている汎用

図15 ロット数と汎用度指数の関係

図16 段取替え時間と生産効率の関係

度は次のようにして知ることができる。図16において、たとえば2時間に1回の頻度での品種切換えは汎用度で言えば1000に相当する。このとき、システムにおいて品種切換えに要する時間が2時間かかれば実生産にかかることができず、生産効率は0となる。1時間かかれば効率は

50%である。

ここで、次の90%ルールを採用する。すなわち、(計画上の)生産効率は90%以上を満足しなければならない。言い換えれば、品種切換えに要する時間は品種切換え周期の1/10以下でなければならない。この数字はかなり経験的に決められたものであるけれども、実状によく合っている。実際の生産効率はこれにさらに機械の故障、部品供給のトラブルなどがあって、さらにその90%、すなわち81%程度になる。

この90%ルールを採用すると、上記 $VI=1000$ のシステムでは切換え時間を12分以下にすべきである。逆に言えば、品種切換え時間を12分以下にできるならば、そのシステムは $VI=1000$ を満足する。これをシステム側の VI 、すなわち VI_s と考え、 $VI_s \geq VI_p$ となるようにシステムを設計すればよい。

ちなみに、トヨタのカンバン方式では、平均的に言ってほぼ2時間に1回カンバンが回ってきて品種切換えを要求される。一方、トヨタ生産方式では、「シングル段取り」を強調しており、これは10分以内に段取替えを終了せよということである。これらの数字は90%ルールを満足している。

7. ま と め

単品種多量生産用の専用機システムから、集積度が6ぐらいまでの中品種中量生産用のフレキシブル組立システムまでを概説した。

現在求められているのは、集積度が20ないし30ぐらいの多種少量生産システムである。これについては色々な試みがなされているがここには述べなかった。成功例がほとんどないため、現在ではこれらの多種少量生産システムは

手作業に任されているというのが現状である。

これを実現するためには、組立用ロボットのより一層の高速化・多機能化とともに、高速で信頼度の高い配送システムの開発が必要になると思われる。

参 考 文 献

- 1) H. Makino and T. Arai : New Developments in Assembly Systems, CIRP Ann., **43**, 2, (1994) 501.
- 2) H. P. Wiendahl : Shortening the Manufacturing Cycle of Products with Many Variants by Simultaneous Assembly Engineering, Proc. 10th ICAA, Kanazawa, (1989) 11.
- 3) Y. Maruyama and Y. Yamazaki : Automatic Assembly of Many Types of Watches, Proc. 11th ICAA, Dearborn, (1990) MS 90-827-1-8.
- 4) 横山恭男：自動組立の基礎技法—パーツハンドリング，工業調査会，(1985) 251.
- 5) T. Ohashi et al. : The Automatic Assembly Line for VTR Mechanisms, Proc. 4th ICAA, Tokyo, (1983) 350.
- 6) H. Makino : Estimation of Production Rate in Flexible Assembly Systems, CIRP Ann., **44**, 1, (1995) 7.
- 7) P. Drexel : Modular Flexible Assembly System "FMS" from Bosch, Proc. 3rd ICAA, Boeblingen, (1982) 129.
- 8) H. J. Warnecke : Computer-Aided Planning of Assembly Systems, Proc. 8th ICAA, Copenhagen, (1987) 53.
- 9) M. Moinet : New Dimension in Automation, Proc. 7th ICAA, Zurich, (1986) 233.
- 10) M. Moinet : Practical Example of a Computer Integrated Assembly System Built Up, Proc. 9th ICAA, London, (1988) 109.
- 11) H. Van Brussel and P. Valckenaers : Hierarchical Control of a Generic Flexible Assembly Cell, CIRP Ann., **38**, 1, (1989) 33.
- 12) K. Tamaki et al. : A Restructurable Assembly Center Employing Mobile DD-Robots, Proc. 24th ISIR, Tokyo, (1993) 119.
- 13) T. Fujimori : Development of Flexible Assembly System "SMART", Proc. 21st ISIR, Copenhagen, (1990) 75.
- 14) H. Hirakawa : Advanced Parts Orientation System Has Wide Application, Assembly Automation, **8**, 3, (1988) 147.
- 15) H. Makino : Versatility Index - An Indicator for Assembly System Selection, CIRP Ann., **39**, 1, (1990) 15.