マイクロ加工・組立用試作システム

正 員 古 田 一 吉 (セイコーインスツルメンツ株式会社)

The Experimental Microfactory System for Processing and Assembling
Kazuyoshi Furuta (Seiko Instruments Inc.)

Microfactory is a novel manufacturing system, which is useful for energy saving, space saving and on-site manufacturing. We have developed the experimental Microfactory system for processing and assembling. As an example of Microfactory, the system consists of processing unit, assembling unit and conveyance unit. And the size of the system is 600mm(W) x 650mm(D) x 750mm(H). In the processing unit, a gear pattern in the diameter of 600 μ m, is etched and deposited by electrochemical machining on a Chromium substrate. In the conveyance unit, pallet with electromagnet, is carried by planer coils in any direction on the unit. The assembling unit consists of two micro-arms, a rotational stage and some working tools, and miniature parts assembly is accomplished in accuracy of about $\pm 20 \mu$ m. The power consumption of air conditioning of the system is advantage to the conventional system.

キーワード マイクロファクトリ、電解加工、精密組立、省エネルギー

Keywords Microfactory, Electrochemical processing, Micro-assembling, Energy saving

1. はじめに

近年、自然環境の保護、エネルギー問題、消費者ニーズの多様化、インターネットの発達、新たなマイクロマシンの創出の要求など、製造業を取り巻く環境が大きく変化し、従来の大量生産を前提とした大型の生産システムのあり方を見直すべき時期が到来している。

例えば、省エネルギー化は生産システムを構築する上で、特に考慮すべき要件となってきた。総合エネルギー統計によれば、現代社会の重要なエネルギー源として使用されている石油は、現在の消費状況が続けば50年もしないうちに枯渇すると言われている。新たな油田の開発や、燃料電池や太陽光発電などの代替エネルギー源の開発も重要な課題であり、様々な取り組みがなされているが、現状のエネルギー源の消費削減も必須の事項である。また、これは、結果的に排出されるCO₂の削減になり地球温暖化防止につながる。

消費者ニーズの多様化に伴って多品種少量向けの生産システムの必要性が高まってきた。ものがあふれる現代では、製品の性能、機能のみではなく、付加価値としての新規性、個性が製品の価値を大きく左右する。また、コンピュータ関連機器の場合のように、搭載部品の性能が短期間で向上し、新製品としての期間が短くなることも多品種少量生産システムが必要となる理由である。

インターネットの発達は、生産システムのあり方に大きな変化を発生させている。最も大きな変化は、ユーザーのニーズを反映したものづくりが求められることである。インターネットを利用して、消費者の嗜好をとらえることが簡単に行われるからである。この形態が発展すれば、店頭や家庭でユーザーニーズを取り入れながら生産するシステムが要求される可能性は高いと思われる。さらに、インターネットで生産設備を管理できるなら、大きな工場に製造設備を設置しておく必要はなく、分散型の工場が成り立ってくる。

種々のマイクロマシンを創出するためには、従来の製法に変わる方法の構築が必要である。特に、マイクロマシンでは扱う対象部品のサイズは極めて小さいため、対象を動かさない工夫や、加工と組立を統合化するなどの新たな試みが重要と考えられる。これらの要求に応えられる生産システムの一つが、マイクロファクトリである⁽¹⁾。

以上のような観点から、経済産業省の産業科学技術研究開発制度に基づくプロジェクト「マイクロファクトリ技術開発」では生産システムの省エネルギー化、省スペース化および小型化を前提とし、しかも、精密な加工、組立を実現できるシステムを構築するための基礎的な研究を実施してきた。

本報では、従来にない小型の加工、組立統合システムである「マイクロ加工・組立用試作システム」の主な機能、特性とエネルギー消費量について報告する。なお、本研究

表1 担当デバイスと研究実施企業
Table.1. devices and research companies

担当デバイス	研究実施企業
塗布デバイス	(株) アイシン・コスモス研究所
電解加工デバイス (加工ユニット)	セイコーインスツルメンツ (株)
送液ポンプ、把持デバイス	(株) 日立製作所
マイクロアーム	ファナック (株)
搬送ユニット	(株) 富士電機総合研究所
環境認識デバイス	三菱電線工業 (株)
マイクロサーボアクチュエータ (検査ユニット、回転ステージ)	(株) 安川電機

は、表1に示す7社が、それぞれの主要なデバイスの開発を担当し、共同で実施したものである。

2. マイクロ加工・組立用試作システム

<2.1 システムの概要> マイクロファクトリの基礎研究をするために構想したシステムがマイクロ加工・組立用試作システムである。図1に示したのは、マイクロ加工・組立用試作システムの写真である。このシステムはデスクトップのサイズ (幅 600mm×奥行き 650mm×高さ 750mm) に、加工ユニット、組立ユニット、搬送ユニットが搭載され、さらに、加工ユニット、組立ユニットそれぞれには検査ユニットが組み込まれている。

このシステムでは、システムのサイズをできるだけ小さくするために、2つの異なるアプローチを行っている。すなわち、加工ユニットや搬送ユニットのように、小型化に適した方式を利用してシステムを小型化するアプローチと、組立ユニットのように、従来の方式を踏襲しながら、その構成部品を小型化することでシステムを小型化するアプローチである。なお、このシステムは、将来のマイクロファクトリの実現をめざして、精密なマイクロ加工組立がデスクトップサイズのシステムでも可能か否かということを確認することと、マイクロマシンデバイスをシステム化する時に発生する課題とその解決策を研究するために取り上げたものである。そのため、生産対象物としてはこの点を考

慮して、その製作に精密な加工、組立が必要なギヤボックスを選択している。ギヤボックスの外径は10mmで、その中に、0.6mmから3.6mmの歯車を組み込んだ減速機構である。

ギヤボックスの製造工程は、まず、加工ユニットに挿入された基板に歯車形状をエッチング加工して、型を形成する。次に、型の表面に犠牲層を形成した後、この型を組立ユニットに運び、組立ユニットでピン立てを実施した後、再度、加工ユニットに戻して、基板に歯車本体部を電鍍加工する。そして、犠牲層をエッチングした後、組立ユニット運び、組み付けを行う。すなわち、マイクロマシン製作への適応を考慮して、加工と組立が相互に乗り入れるプロセスをあえて採用している。以下に、各ユニットについて述べる。

<2.2 加工ユニット> 加工ユニットは電解加工をベースにした歯車を加工するユニットである。図2に示したのが加工ユニットの写真である。この加工法の原理は加工溶液中で加工電極と加工対象を近接させ、適度な電圧をかけると、電位の方向によってエッチング反応が起きたり、めっきが起きるというものである⁽²⁾。

電解加工法は、以下に述べる特徴から装置の小型化に適応できる方式であるとともに、高分解能な加工を実現できる可能性を持つ加工法である。この加工法の特徴は、以下の通りである。

- ・真空装置が不要なので、装置サイズが小さい。
- ・STM(Scanning Tunneling Microscopy)の機構を利用すれば、トンネル電流でモニタして、プローブ先端と基板との距離を数10nmに制御することができるので、サブミクロンレベルの分解能の加工も実現できる。
- ・電流の向きを変えることにより、一台の装置で付加工、除去加工の両方ができる。
- ・プローブ加工なので、任意の場所に加工がしやすい。

本ユニットの加工分解能は $\pm 20\mu\text{m}$ (STM使用時は $\pm 2\mu\text{m}$) である。

図1 マイクロ加工・組立用試作システムの全景写真
Fig.1 The photograph of the experimental system

図2 加工ユニットの写真
Fig.2 The photograph of the processing unit

図3 送液ポンプの写真

Fig.3 The photograph of micro-pumps

図4 検査ユニットの写真

Fig.4. The photograph of the inspection unit

なお、電解加工では、対象の金属に応じた加工液、および洗浄液が必要になる。それら複数の溶液を送液するための小型のトロコイドポンプを搭載している。図3は、その送液ポンプの写真であり、このポンプの送液能力は、 10 ml/min である⁽³⁾。また、加工後の状態を検査するために検査ユニットも搭載している。検査ユニットは、イメージガイドと接触センサを搭載した環境認識デバイスとこれを観察位置まで送り出すサーボアクチュエータを搭載したボールネジ機構からなる(図4)⁽⁴⁾。

図5は、スルファミン酸溶液中でクロム基板に電解エッチング加工をしたものであり、外形 $600\mu\text{m}$ 、深さ $100\mu\text{m}$ のパターン形成例である。

< 2. 3 搬送ユニット > 従来の生産システムでは、ベルトコンベア方式の搬送が一般的である、しかし、この

図5 電解加工による加工例

(加工素材: Cr 加工深さ: $100\mu\text{m}$)

Fig.5 The etched pattern by electrochemical machining on Cr substrate (Depth: $100\mu\text{m}$)

方式は各工程の速度の整合をとるため、多段階の工程を含むシステムでは多くの部品待機場所を設ける必要があるため、装置の小型化には不利な方法である。また、マイクロマシンのような極めて小型の部品を扱う場合には、加工と組立が相互に乗り入れられることも必要である。

そこで、この搬送ユニットでは2次元に搬送できる方式を追求した⁽⁵⁾。その構成は 1 mm 角のプレーナークoilを 1600 個並べたコイルダイオードモジュールを8枚連結したものである。なお、部品等は、永久磁石を埋め込んだ搬送パレットに乗せて運ばれる。すなわち、任意の搬送コースにしたがってプレーナークoilの on, off を切り替えていくと、それらが発生する磁界に搬送パレットがひっぱられて、搬送コースに沿って運ばれるという方式である。また、製作した搬送デバイスの主な特性は、搬送速度 30 mm/sec 、最大搬送重量 1 g 、搬送終点での位置決め精度 $\pm 20\mu\text{m}$ である。

< 2. 4 組立ユニット > 組立ユニットは、マイクロアーム、各種作業ツール、回転ステージ、組立用検査ユニットなどで構成されている。図6は組立ユニットの写真である。このユニットは、従来の自動組立の主流であるロボットによる組み立て方式を採用し、その構成部品を小さくすることで全体サイズを小型することを基本としているが、その他にも、マイクロマシンの組立を考慮した要素が追求されている。

例えば、組み立てロボットに相当するものはマイクロアームであるが、各関節に小型、高トルクで低速回転可能な多層型超音波モータを搭載し、さらにそれぞれの超音波モータに高精度なエンコーダを取り付けることにより、小型で高精度、しかも多自由度なマイクロアームを実現している⁽⁶⁾。このマイクロームの繰り返し位置決め精度は、 $\pm 10\mu\text{m}$ である。(ただし、実際に作業をする場合の組立精度は、作業ツールとの装着誤差のため $\pm 20\mu\text{m}$ である。) 組立ユニットには、このマイクロアームが2台設置されてお

図6 組立ユニットの写真

Fig.6. The photograph of the assembling

り、それらが協調的な作業を行えば、人が手で行うような自由度の高い作業も可能になってくる。

このマイクロームは、その先端に装着した作業ツールで作業を行い、各作業ツールは、電磁石を介して自動的に着脱される。その作業ツールには、微小部品を把持する3種類の把持デバイスと接着剤を微小領域に塗布する塗布デバイスがある。ここで、微小部品をハンドリングする場合、ピンセットのように、つまむ方式のいわゆるグリップでは、対象の形状によっては位置決めが難しいことと、静電力の影響で対象の離脱が困難になり、離脱のための機構が複雑になることから、本システムでは、対象を吸着して把持する2つの方式を用いている。すなわち、真空吸着方式と、電磁吸着方式である。図7に示したのは、把持デバイスの1種である真空チャックである。従来の生産システムでは、真空チャックを用いる場合、真空ポンプから配管を引き回して、利用する方式が一般的に用いられているが、その配管がマイクロームの動きの障害となる可能性があるため、マイクロームの先端に装着できる小型、軽量、低振動の真空ポンプとして、スクロール型で30mmの長さの真空ポンプを開発、設置している。

対象部品のサイズが小さくなってくると、ネジやピンによる固定が困難になってくる。その場合、接着剤による固定が簡便で利用しやすい方式である。ただし、塗布すべき接着剤の適量は極微量であり、しかも接着面積も極めて狭い領域であると想定される。そこで、本システムには、微量の接着剤を塗布できる塗布デバイスが開発、搭載されている⁽⁷⁾。図8に示したのが塗布デバイスの写真である。この塗布デバイスは流路壁にある5つのダイヤフラムを光で順次駆動することにより、微量の接着剤を塗布することができる。その主な特性は、最少吐出量 3 nl/s 、最小吐出幅 $100\text{ }\mu\text{m}$ である。

この組立ユニットにも加工ユニットと同様に、検査デバイスが搭載されている。この検査デバイスは、組立後の状態を観察するデバイスであり、直径3mmの管状の環境認

図7 真空チャックの写真

Fig.7. The photograph of the vacuum chuck

図8 塗布デバイスの写真

Fig. The photograph of coating device

図9 組立ユニットで減速用歯車を組み付けた状態の写真

Fig.9 The photograph of a plate and reduction gears after assembling

識デバイスとボールネジを用いた送り機構で構成されている。環境認識デバイスには、形状記憶合金のアクチュエータが組み込んであり、先端部を上下左右に $\pm 45^\circ$ の角度まで曲げることができるので、広い領域を観察することができる。また、イメージガイドが2本組み込まれているので、観察対象を立体視できる⁽⁸⁾。

これらのデバイスを、システム上で協調的に動かすことにより、歯車列の下基板に減速用歯車を組み付けた状態の写真が図9である。さらに下基板の側壁上面に微量な接着剤を塗布する作業、上蓋のはめ込み、 $120\mu\text{m}$ のピンに直径 1.7mm の歯車を組み付ける作業などを実施して目的の歯車列を組み立てることができた。

< 2.5 システムの消費エネルギー > システムとしての省エネルギー効果の可能性を検証するために、各ユニットの主なデバイスについて待機時及び稼働時の消費電力を電流クランプ方式で測定した。その結果を表2に示す。加工ユニットでは、実際の加工に関与するエネルギーは、ポテンシオスタットによって供給されるが、待機時と稼働時はともに 59.4W で変化がなかった。すなわち、加工行為によって消費されるエネルギーは、 $1/10\text{W}$ 以下である。一方、X-Yステージの稼働に約 10W 、液晶ディスプレイでは約 20W のエネルギーが必要である。また、組立ユニットでは、マイクロアームの2軸を稼働させたとき約 15W 、塗布デバイスでは、稼働に約 100W の電力を消費している。搬送ユニットでは、搬送時に約 30W 消費される。

一方、付属品としての空調機器や市販の真空ポンプを稼働させた場合、それぞれ、 628W と 380W の消費エネルギーである。すなわち、実際にシステムが稼働して作業をする場合に、マイクロデバイスが消費するエネルギーはごくわずかで、周辺機器を稼働させるためのエネルギーの

方が数倍から数十倍大きい値となっている。これは、加工の原理や、対象のサイズ、および対象の重量から予想されたことではあるが、システムに用いる個別のデバイスの消費エネルギーを小さくしても汎用部品として用いるコンピュータや制御装置、真空ポンプなどの付属品の消費エネルギーを削減しなければ、効果が得られないということである。

ただし、本システムを $\pm 1^\circ\text{C}$ の温度で空調にするために必要なエネルギーは、 628W となっていることは、従来から通常に行われてきたシステムが設置された部屋全体を空調する場合に、少なくとも数 kW の電力が必要なことから考えれば、 $1/10 \sim 1/100$ 程度である。また、生産現場がクリーン環境を必要とする場合も同様に、生産システムの必要な部分のみをクリーン化することで、大幅な消費エネルギー削減が期待できる。したがって、生産システムを小型化できれば、システムのみを空調することで、大きな省エネルギー効果を得られると期待される。

3. まとめ

経済産業書の産業科学研究開発制度に基づくプロジェクト「マイクロファクトリ技術開発」において、加工、組立、搬送の工場における基本要素をデスクトップサイズ($600\text{mm (W)} \times 650\text{mm (D)} \times 750\text{mm (H)}$)に組み込んだ「マイクロ加工・組立用試作システム」を独自に設計製作し、個別のデバイスがシステム上で、機能を果たすことを確認し、デスクトップサイズのシステムでもミクロンレベルの精度が必要な加工組立が可能であることを示した。また、システムとしての消費エネルギー効果は、生産システムの小型化による空調に要するエネルギーの削減効果が最も大きいことを示した。

表2. 主要デバイスの消費電力
Table.2. Power consumption of each unit

	in static condition (W)	in active condition(W)
Processing unit		
Stage controller	47.6(X-Y stage)	57
LC display	10	31.5
Potentiostat	59.4	59.4
Assembling unit		
Micro arm	86	100(2 axis)
Adhesive device	120(Laser)	220
Conveyance unit		
Device	46	78
Controller	30	30
Others		
Air conditioner		628
Vacuum pump		380

謝 辞

本研究の一部は、経済産業省の産業科学技術研究開発制度に基づく「マイクロマシン技術の研究開発」の一環として、NEDOから委託を受けた(財)マイクロマシンセンターの再委託業務としてセイコーインスツルメンツ(株)等が実施したものである。

(平成13年7月5日受付、平成13年11月30日再受付)

古田 一吉

(正員) 1958年10月生まれ。1982年名古屋大学工学部応用化学科卒業。同年(株)第二精工舎(現セイコーインスツルメンツ(株))入社。フォトマスクの開発、マイクロセンサの研究開発、1994年よりマイクロファクトリ技術開発に従事。現在、研究開発部 課長

文 献

- (1) N. Kawahara, T. Suto, T. Hirano, T. Kitahara, N. Ooyama, T. Ataka, "Microfactories: new applications of micromachine technology to the manufacture of small products"; Technical papers, Microsystem Technologies, pp37-41, 1997.
- (2) M. Suda, R. Irie, K. Furuta, T. Sakuhara and T. Ataka, "The Application of Electrochemical Machining for Microfactory"; proceedings of International Workshop on Microfactories 1998 (IWMF' 98), pp197-201, 1998.
- (3) Takeshi Harada, Yasuhiro Yoshimura, Yoshishige Endou and Akiomi Kouno, "Microfluid operation devices using a surface treatment technique"; proceedings of IWMF' 98, pp202-207, 1998.
- (4) T. Kabashima, T. Matsuo, K. Matsuzaki, K. Uemura and H. Nakamura, "Micro-Servo Actuators for Microfactory Systems"; proceedings of IWMF' 98, pp214-220, 1998.
- (5) H. Nakazawa, Y. Watanabe, O. Morita, M. Edo and E. Yonezawa, "Micro-parts conveyance unit"; proceedings of IWMF' 98, pp232-237, 1998.
- (6) H. Oku, K. Sawada, T. Sakano and S. Toyama, "Development of Micro-Arm"; proceedings of IWMF' 98, pp208-213, 1998.
- (7) Koichi Iriya, Shinji Ando, Takashi Kawano, Wataru Nogimori and Yoshihiro Naruse, "A METHOD OF DISPENSING FOR COATING DEVICE IN MICRO-FACTORY"; proceedings of IWMF' 98, pp227-231, 1998.
- (8) O. Tohyama, S. Maeda, K. Abe, M. Murayama and T. Tachibana, "Environmental Recognition Devices for Microfactory"; proceedings of IWMF' 98, pp221-226, 1998.