

研究解説
(公開講演)

UDC 621.9.047/.048:621.382.002.5

インテリジェントマイクロメカトロニクス

Intelligent Micro Mechatronics

藤田博之*

Hiroyuki FUJITA

超小型の知的メカトロニクスシステムを実現するためには、IC製造用微細加工技術を用いるアプローチと、極限的な精密機械加工を用いるアプローチ、さらにこうして作られた微小デバイスを統合するメカトロニクスのアプローチの3つが必要である。これらの技術の最先端を、生産研での成果を中心に解説する。特に、静電気や超電導を用いたマイクロアクチュエータ、マイクロ放電加工、衝撃力による微細位置決め法について述べる。

1. はじめに

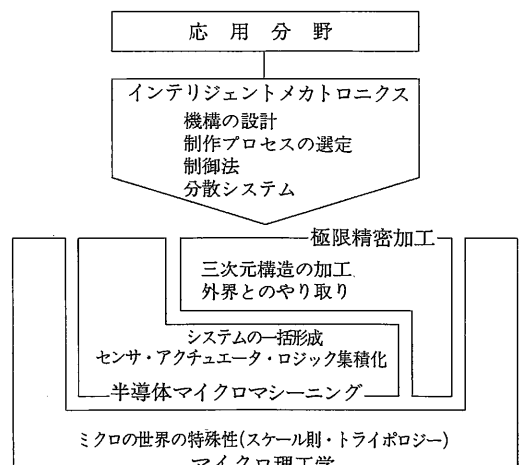
「微小な機械の研究をしています」と言われたとき、皆さんはどんな研究対象を想像するだろう。例えば、まめ粒や米粒より小さな人工のアリのようなものが、地面をはっている姿であろうか。そうでなければ、SF映画「ミクロの決死圏」の超小形潜水艇が血管の中を進む様子であろうか。微小機械の夢として描かれるこのようなイメージは、残念ながら現在の研究レベルでは実現が難しいし、また研究の目標としても適当ではないと思われる。鳥と飛行機が違いうように、工学システムには生物と違った形態が必要であろうし、またマクロな世界の機械をそのままマイクロ化してもうまく働かないことが多い。ミクロの世界では、ミクロの世界の原理が支配しているためである。

では一体どのような形の、どのような機能を持つマイクロ知能機械システム(単なる微小機械と区別するため、MIMS: Micro Intelligent Mechanical Systemsと呼ぶ)を目指したら良いのだろうか。MIMSの研究はまだその緒に付いたばかりであり、完全な答えはいまだわかっていない。私たちにできることは、MIMSを作るのに必須の技術を考え、それを実際に適用する中で、MIMSのあるべき姿を見つけ出していくことである。この過程で、MIMSの設計や製作の哲学を確立することができるであろう。

さて、MIMSに必須の技術として、図1に示すような3つの分野が挙げられる。すなわち、半導体マクロマシーニングおよびそれで製作したデバイスに関する技術、微小物加工組み立ておよびそれで製作したデバイスに関する技術、デバイスをシステムにまとめるためのインテリジェントメカトロニクス技術である。

半導体マイクロマシーニング技術は、フォトリソグラフィやエッチングといった、IC製造用の技術を μm オーダーの機械部品、アクチュエータ、センサの製造に応用したものである¹⁾。この技術の利点は、①組み立てのいらぬブリアセンブル加工、②複雑なシステムの一括製作、③センサやマイクロプロセッサを含めた集積化と知能化、④多数のモジュールを用いた自律分散形の運動システムの実現、などである。一言で言えば、小さく賢い可動システムを、組み立てなしに大量に作れる、という可能性があり、最近大きな注目を浴びている。無論、限界もある。平面的なICプロセスでは、本当に複雑な三次元構造を作ることは難しいし、外部へ直接力や動きを取り出すことも現状では困難である。

これらの難点を補うために、微小物加工組み立て技術が必要となる。従来の精密加工技術は、ある程度大きな対象をいかに精度良く作るかを問題としていた。これを、



*東京大学生産技術研究所 第3部

図1 インテリジェントマイクロメカトロニクスを支える分野

いかに小さな対象を作るか、という方向に発展させたのが、微小物加工組み立て技術である。特に微小物は単に作るだけでなく、その後の物体の操作と組み立ての工程が重大な問題となるため、加工と組み立てを同時もしくは連続して行うようにする必要がある²⁾。このような加工は、任意の立体構造を作ったり、外部の対象に力を加える操作器を作ったりするのに向いている。反面、生産性は必ずしも良くないし、知的機能の集積化は望めない。

そこで、両者の欠点を補うようにいかに組み合わせ、望みの動きをさせるようにいかに制御するかを決める、システム化技術が必要となる。この技術には、上述の製作法によって作られる要素デバイスの複合化や、それらを最大限に利用する機構の工夫、設計法、知的制御法など広い範囲が含まれる。本論では、これをインテリジェントメカトロニクスと呼ぶことにする。

以下では、生産技術研究所の研究活動を中心に、上述の3分野での最新の成果について紹介する。

2. 半導体マイクロマシーニング

2.1 種々の材料の加工法

半導体技術で μm 程度の機械要素(マイクロストラクチャ)を作るとき、基本となるのは薄膜形成、リソグラフィ、エッチングの3つの技術である。図2に半導体マイクロマシーニング(主としてエッチング法)の発展の歴史を示す。最下段に示されているのが、表面マイクロマシーニングと呼ばれる、画期的な新プロセスである。この手法により、AT&Tベル研究所(現在、東大生産研)のGabrielらは中心軸の回りを自由に回るギア(図3)を、カリフォルニア大学パークレー校(UCB)のFanらはガイドの下を左右に動くスライド等を、多結晶Si薄膜で作った^{3),4)}。これらの機械部品の大きさは、約 $10\sim 100\mu\text{m}$ と、髪の毛の太さと同じ程度である。この方法の要点は、多結晶シリコンに比べ磷珪素ガラス(PSG)が容易にエッチングされる性質を利用し、間にPSGの層を挟みながら、いろいろな形が多結晶シリコンの部品を次々に重ねていって、最後にPSG層を溶かして多結晶シリコン

- ◇薄膜のフォトリソグラフィ
微細な電極パターンの形成
静電アクチュエータの駆動電極
- ◇異方性エッチング(ウェットプロセス)
結晶方位面に沿う深溝加工
梁などの作製
- ◇異方性エッチング(ドライプロセス)
任意形状の深溝加工
個別な微小機械部品の製作
- ◇表面マイクロマシーニング
組み立てられた機械部品の製作
歯車・モータの製作

図2 マイクロマシーニング技術の発展

の部品を可動にする点にある。このように、構造部品の間に挿入しておき後でエッチングしてしまう層のことを、分離層(sacrificial layer)と呼んでいる。

半導体マイクロマシーニングの対象は、シリコンばかりに限らない。Gabrielらは、ポリイミド樹脂を用いて、マイクロストラクチャやマイクロアクチュエータを試作した⁵⁾。ポリイミド樹脂は、スピコートで簡単に薄膜が作れ、スピコートを何回も繰り返すことで数十 μm 以上の厚い膜にすることもできる。また、アルミニウムを分離層に使うことで、表面マイクロマシーニング法を適用できる。このため、容易に種々のマイクロストラクチャを作ることが可能である。さらに、多結晶シリコンよりヤング率が1ケタ近く小さく、弾性支持体として用いたときに小さな力で大きな変位が得られること、絶縁性のため静電アクチュエータの電極間の支持に使えることなどの利点があり、注目される材料である。

また形状記憶合金も、半導体プロセスで作ることができる。Gabrielらは、TiNiの形状記憶合金で、厚さ数 μm 、幅 $10\mu\text{m}$ 程度の細いパネのような形状を作り、それに電流を通じて駆動することに成功した⁶⁾。形状記憶合金は、極めて変位の大きなマイクロアクチュエータの素材として関心を集めており、スパッタ法による薄膜形成と、ポリイミド樹脂を分離層に使った表面マイクロマ

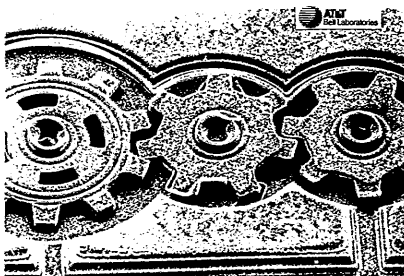


図3 歯数比1.4:1:1の三つのギアで構成したギヤトレイン³⁾

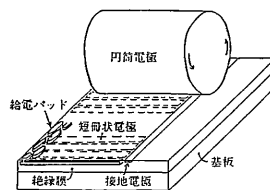


図4 シリコン・マイクロ・アクチュエータの概念図¹⁰⁾

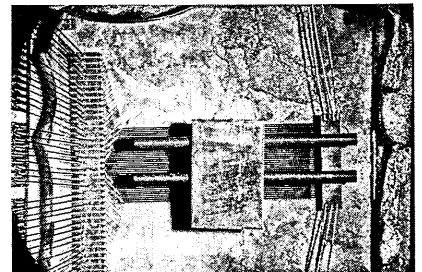


図5 シリコン・マイクロ・アクチュエータの小型モデル¹⁰⁾

シーニング法で基板から分離した構造が得られるようになったことは、大変重要な進歩である。

2.2 マイクロアクチュエータ

マイクロアクチュエータは、MIMSの最も大切な要素である。ここでは、特に半導体マイクロマシーニングに準じて作られたものを紹介しよう。UCB⁷⁾やマサチューセッツ工科大学(MIT)⁸⁾の発表した、静電マイクロモータに先駆けて、筆者らは静電リニアアクチュエータ(ESLAC)を発表した¹⁰⁾。このアクチュエータは、マイクロ領域で問題となる表面摩擦を、可動部が固定部の上をころがって動くことで解決する点が特徴である。図4に示すように、このアクチュエータは絶縁薄膜内に埋め込まれた短冊状電極と、絶縁膜の上に置かれた円筒電極からなっている。円筒と短冊状電極の間の静電容量から円筒の位置を検出し、その位置に合わせて給電パッドから短冊状電極に電圧を印加すると、円筒(接地電極により接地されている)と短冊の間に静電引力が働く。円筒が静電力によって回転するにつれ、電圧をかける電極を切り替えていけば、回転が持続する。さらに図5の写真のようにこの円筒を幾つか並べた上にもう1枚の板を重ねると、上下の板が平行に移動するリニア・アクチュエータができる。現在 $30\mu\text{m}$ の幅の電極で直径 $400\mu\text{m}$ 、質量 3mg のローラを 2mm/s 程度の速度で駆動している。また、図5の状態では2本のローラを閉ループ駆動することができた。可動部をころがす形のアクチュエータは種々の変形が考えられ、筆者らが作った円錐の中に円錐が回転する形¹¹⁾のほか、円筒が太さの違う円筒に対して回転する形が、ユタ大学¹²⁾、AT&Tベル研¹³⁾、MIT¹⁴⁾から次々と発表されている。

図6は、筆者らが試作した、円錐形のローラと円錐形の凹みを持つステータからなる静電歳差モータの模式図である¹¹⁾。ステータの凹みの直径は 2mm で、中心部にローラ接地用の電極、その回りに放射状に駆動電極を形成した。ローラは、凹みより頂角の狭い金属円錐である。駆動電極の一つに電圧をかけ、ほかを接地すると、ローラはその駆動電極に引き付けられ、凹みの内面をころがりながら回転する。この時、見かけの回転方向と逆方向に、ローラはゆっくり自転する。ちょうどハーモニックドライブと同じ原理で、ステータとローラの直径の差が小さいほど、見かけの回転と自転の間の減速比は大きくなり、低回転・高トルクの特徴が得られる。写真に示したモータは $50\sim 80\text{V}$ の印加で回転すること、100倍程度の拡大モデルについては、動作および特性が計算値と一致することを確認した。

摩擦を減らす次の手段は、弾性体で可動部を支持することである。筆者らの静電リニアアクチュエータ(図4のものとは違うことに注意)は、多結晶シリコンの厚さ $10\mu\text{m}$ 程度のダイヤフラムを、静電的にたまわせるきわ

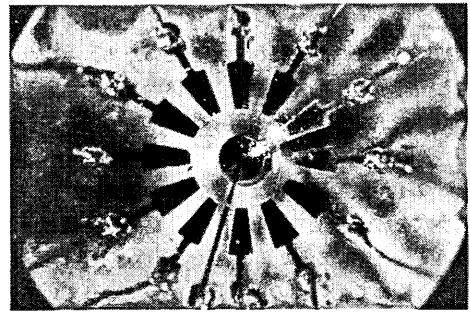
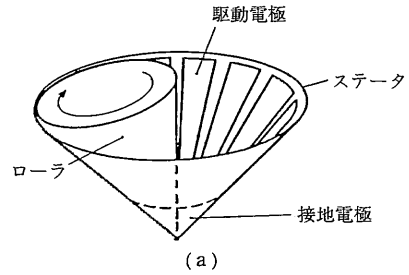


図6 静電歳差モータの模式図(a)とステータの写真(b)¹¹⁾

めて簡単な構造である¹⁵⁾。特長は、閉ループの位置制御により、精度 $0.1\mu\text{m}$ ・応答時間 1ms 程度で変位を制御できる点である。またUCBの静電振動子は、2重に折れ曲がった梁で両側から支えられており、駆動力の発生部分はくしの歯を二つ、互い違いにかみ合わせたような構造になっている¹⁶⁾。二つの歯の間に電圧を加えると、歯と歯がより重なるようにする方向に力が働く。電圧の周波数を機械的な共振周波数($10\sim 100\text{KHz}$)に一致させると、 $10\mu\text{m}$ 程度の振動が得られる。ただし現在得られている力は、極めて小さい。

大きな力を得るためには、前者の例のように電界と平行な方向の力を利用する方が、後者のように主な電界の方向と垂直な力を利用するよりずっと有利である。しかし、前者のアクチュエータでは、基板と垂直で基板に向かう方向の動きしか得られず、この動きを利用するのは難しい。これを解決するには、基板と平行な動きを得る構造を工夫する必要がある。現在、筆者らはGabrielと共同して、このような構造を試作中である。

他の摩擦軽減策は、可動部を浮上して摩擦を避ける構造である。筆者らの開発した超電導リニアモータ(マイスナック)は、セラミック系高温超電導体($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$)をステータ側に配置し、スライダーとして永久磁石を用いる¹⁷⁾。両者間にはいわゆるマイスナ効果による反発力が働いてスライダーは浮上する。横方向への駆動は、マイスナ効果による力を用いる場合¹⁷⁾と、電磁力を用いる場合¹⁸⁾がある。浮上力は 1g/cm^2 、浮上高さは 1mm のオーダーである。駆動力は、 $10\mu\text{N}$ 程度である。

空気による浮上は、いくつかの実験例がある^{9),10)}。UCBのピスターらは、空気圧浮上の静電リニアモータを試作した²⁰⁾。また静電気で安定な反発力を得ることは難しいが、東大生産研の樋口らは半導電体層を持つフィルムと帯状の駆動電極を多数持つ固定子とを組み合わせ、瞬間的な静電反発力と駆動力を得るアクチュエータを開発した^{21),22)}。このアクチュエータの駆動原理は次のとおりである。まず、図7(1)のように電圧を印加すると、抵抗体内で電荷が移動し、伝伝子が帯電する(2)。ここで(3)のように電圧を切り替えると、移動子上の電荷は高い抵抗に妨げられて瞬時には移動できないため、上向きの反発力と横向きの駆動力が発生し、移動子が横に動く(4)。

3. 微小物加工技術

3.1 ワイヤ放電研削による微細棒の加工

微小穴を放電加工するための工具電極や各種ビーム装置のエミッタ電極など、直径数十 μm からときには数 μm といった極めて細い棒の加工要求が多くなっている。こ

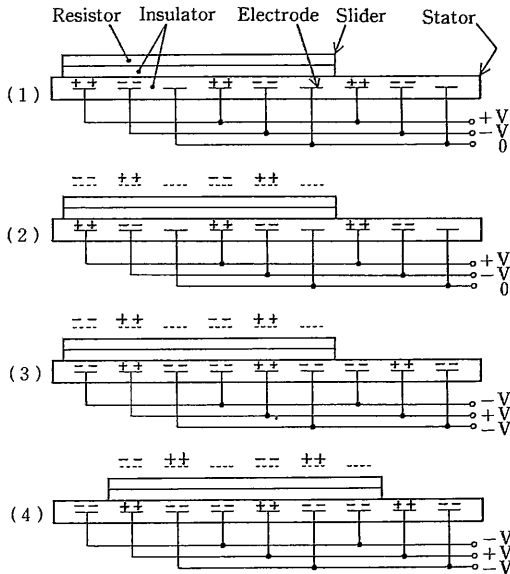


図7 アクチュエータの動作原理

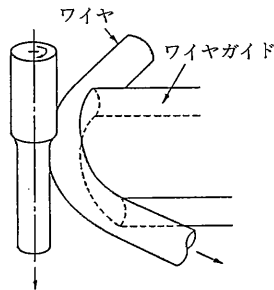


図8 ワイヤ放電研削法

のような細い棒は加工力のかかる切削、研削などの加工方法では製品破損の危険性が増すとともに、高度の熟練を必要とし自動化が困難である。

東大生産研の増沢らは、走行するワイヤを電極とし、加工位置でワイヤを支持することでワイヤの振動などを防止する新しい加工手法、ワイヤ放電研削法(WEDG)²³⁾を開発した(図8)。この手法によれば研削と異なり加工力による工作物の弾性変形や破損などの問題はなく、また、金属ブロックを電極とした逆放電など従来の放電加工法のような電極消耗の問題もない。ワイヤガイドの位置決めにより直接加工寸法の制御ができるので、高精度で、しかもテーパ、段差などを含む複雑な形状でも自由自在に加工できる。さらに、工作物の回転を止めたり、制御したりすることで、角柱やらせん形状などまで応用が拡張できる。この方式により成形した細棒の例を図9に示す。

3.2 マイクロ打抜き加工システムの開発

直径数十 μm といった微細穴の打抜き加工では、ダイセットの製作および型合わせにかなりの熟練を要する。そこで増沢らはWEDG, EDMを組み合わせ、ダイセット製作を自動的に行えるマイクロ打抜き加工システムを開発した²⁴⁾。この方法は図10のような手順により、パンチと

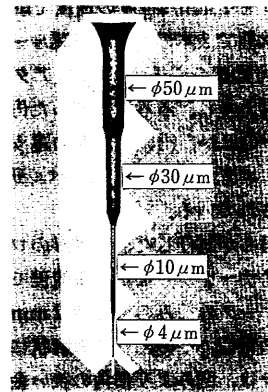


図9 微細棒の加工例

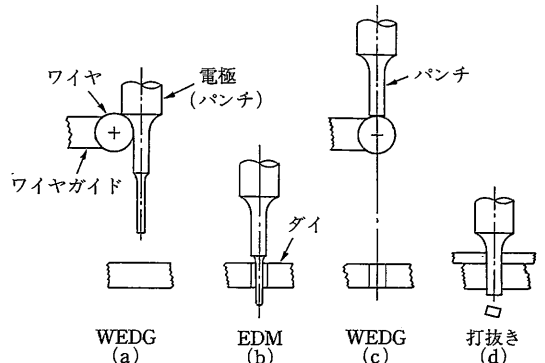


図10 打抜き加工システム

ダイの素材をセットした後、2時間以内にダイセットが完成し、打抜き加工を開始できる。また、形状は丸穴のみならず多角形状の加工も行えるのが特徴である。図11はこの手法により打抜いた厚さ $50\mu\text{m}$ のポリイミドシートである。

3.3 放電による微細深穴加工

微細放電加工では、加工液から遊離するカーボンや排出しきれない加工屑などの影響により、穴径の5倍以上の深さをもつ穴を加工することは容易ではない。また、工具電極製作も通常の加工方法では強度の問題からアスペクト比を大きくすることは困難である。

増沢らは、加工液にカーボンの遊離しない純水を使用することと工具電極製作にWEDGを採用することで、深穴加工を熟練なしに高速、高精度で加工することに成功した。図12はWEDGにより製作した工具電極と、これにより加工した工作物 (SK5) の断面を示したものである。

3.4 ナノモルディング

このほか、モルディングにより微細な凹凸の型を転写することもできる。西独のカーlsruエ原子核センタのEhrfeldらは、LIGAプロセスと呼ばれるマイクロ加工法の最終段階で、モルディングを用いている²⁵⁾。

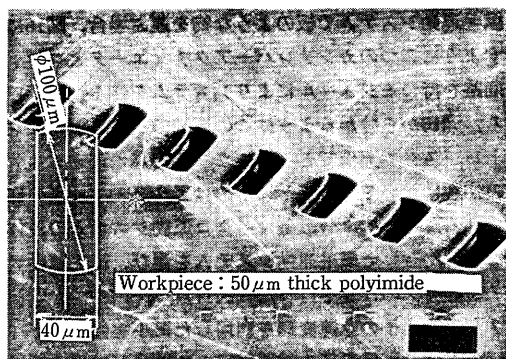


図11 異形穴の打抜き加工

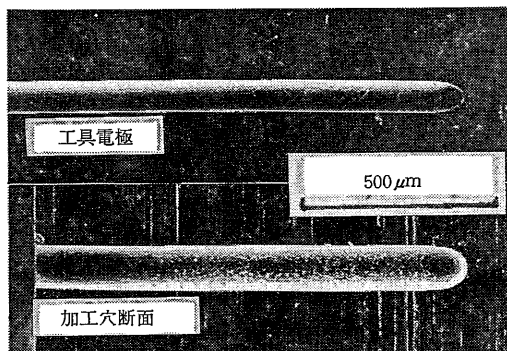


図12 深穴加工例および使用した工具電極

LIGAプロセスではまず、シンクトロンから放射される強力な横方向広がり少ないX線ビームを用いて、 $400\mu\text{m}$ 程度の深いリソグラフィを行う。このプロセスで作ったハニカム構造の例では、高さが $350\mu\text{m}$ に対し壁の厚さが $4\mu\text{m}$ と、非常にアスペクト比が大きいことが特徴である。別の構造による実験では、高さ $400\mu\text{m}$ にわたって厚みが $7.2\pm 0.1\mu\text{m}$ と、ほとんど変化しなかった。なお直接リソグラフィでマスクパターンを転写できるのは、アクリル樹脂等のレジスト材料に限られるため、それを鋳型として電鍍により金属に転写している。さらにこの金属を鋳型として、インジェクションモールド法でプラスチックに型どりしている。これは素材の変換に留まらず、低コストの大量生産のためにも大きい意味がある。また東大生産研の中川らも、nmオーダの表面形状を精密に転写する、ナノモルディングの技術を開発中である。

4. インテリジェントメカトロニクス

4.1 分散型マイクロ運動システム

4.1.1 分散型マイクロ運動システムの発想

現在マイクロマシーニング技術を用いて作製されるマイクロアクチュエータの動作は非常に単純である。しかし多数の同じマイクロアクチュエータを直並列に組み合わせるとシステムを構築すれば、個々のアクチュエータの動作が単純であっても、それらのアクチュエータが協調的に動くことによってシステム全体としては複雑な動作を実現できる。これが筆者らが提案する分散型マイクロ運動システムの発想である²⁶⁾。

しかしこのようなシステムの場合、多数のアクチュエータをいかに協調制御するかという問題がある。従来のように個々のアクチュエータを外部のコンピュータとつないで制御する方法は、アクチュエータの数が百、千と増えていくのに従って、通信の規模が大きくなりすぎるため、多数のアクチュエータの協調制御には適した方法とはいえない。

この問題は、センサ、アクチュエータ、ロジック回路を同一のプロセスで一体化したモジュールを作ることによって解決できる。なぜならばモジュール内部にローカルな情報処理系と制御系を持つため、それを集積化したシステムは、その通信量を大幅に減らすことが可能だからである。つまり同一モジュールを多数、直並列に結合し、各モジュールが互いに協調するシステムを作れば、そのシステムは複雑な動作を実現でき、かつその動作は外部から簡単に制御できるはずである。これが分散型マイクロ運動システムである。

4.1.2 蠕動運動システムと繊毛運動システム

分散型マイクロ運動システムの具体的な例として蠕動運動システム (Vermicular motion system) と繊毛運動

システム(Ciliary motion system)を考えてみる。前者は自走システム、後者は搬送システムを実現するものである。

(a) 蠕動運動システム

蠕動運動とは、筋肉を部分的に収縮させ、その収縮波を徐々に移行させることにより生じる運動である。図13は“みみず”の蠕動運動による移動の様子をモデル化したものである。この運動は図14に示すシステムにより実現できる。このシステムは多数の同一のモジュールより構成され、各モジュールは屈折運動のできるアクチュエータと保持と遅延の機能を持つロジック回路から成り立つ。隣接するモジュールあるいは外部から信号がモジュールに到達したとき、保持回路は一定期間アクチュエータを曲がった状態に保ち、遅延回路はある遅延の後に信号を次のモジュールに送る。これにより、入力信号は進行波となってシステムの中を伝搬し、それに従ってモジュール内のアクチュエータが曲がり図13のような動きを生じ、システムが前進する。これが自走機能を持つ蠕動運動システムである。

(b) 繊毛運動システム

繊毛運動とは文字どおり多数の繊毛が作り出す運動で

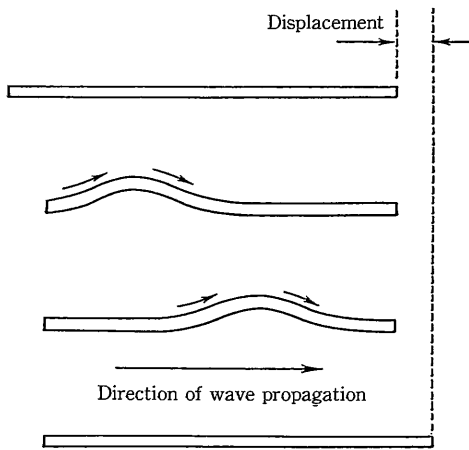


図13 蠕動運動

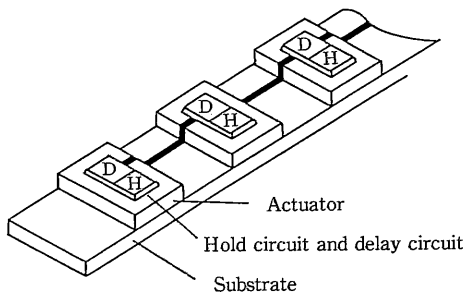


図14 蠕動運動システム

ある。ある種の生物の表皮には毛のような突起物(繊毛)が一様に生えている。その繊毛は自律的に振動していて、その振動の周期はすべて等しく、隣り合った振動は一定の位相差を保っている。そしてこの協調動作により繊毛は全体として進行波をつくりだし、液体や気体の流れを作り出したり、自ら移動したりしている。そこで、この運動を模擬することで運搬機能を実現するシステムが考えられる。図15はそのシステムを示している。この場合も蠕動運動システムと同様に多数の同一モジュールから構成され、各モジュールは、カンチレバー型のアクチュエータと自励振動を起こす回路から成り立っている。適当な信号入力により各モジュールの振動周期を一致させ、隣接する振動に一定の位相差を生じさせるようにすれば、図15のような動作ができ、物を運ぶことができる。このようなシステムを繊毛運動システムと呼ぶ。

(c) 繊毛運動アクチュエータ

分散型マイクロ運動システムはセンサ、アクチュエータ、ロジック回路から構成されている。実際にこのシステムを構築する際、センサとアクチュエータの作製がネックになる。なぜならばロジック回路のマイクロ化、集積化は現在の半導体ICの技術を用いれば、アクチュエータとの一体化という問題を別にすれば、それ自体の作製は容易だからである。

繊毛運動システムで板のような物を運ぶ場合、図16に示すように二つのカンチレバーアクチュエータとロジック回路を持つモジュールによりシステムを作ることができる。図16から分かるようにこの運動の制御は簡単なシフトレジスタで実現できる。つまりこの繊毛運動システムの作製においてネックとなるのはアクチュエータの作製である。そこで、分散型マイクロ運動システムの具体的な実現例として繊毛運動システムを選び、繊毛運動アクチュエータの作製を行った(図17)²⁶⁾。

4.2 圧電素子の急速変形を利用した微小駆動

樋口らは、圧電素子や電歪素子の急速変形に伴う慣性力を利用して、微小移動を起こす機構を考案した²⁷⁾。移動体と慣性体を圧電・電歪素子で結合し、移動体をベース上に置いて摩擦力を保持しただけという、単純な機構で

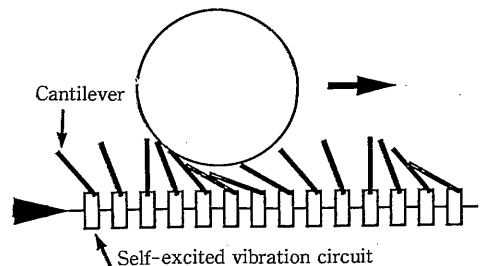


図15 繊毛運動システム

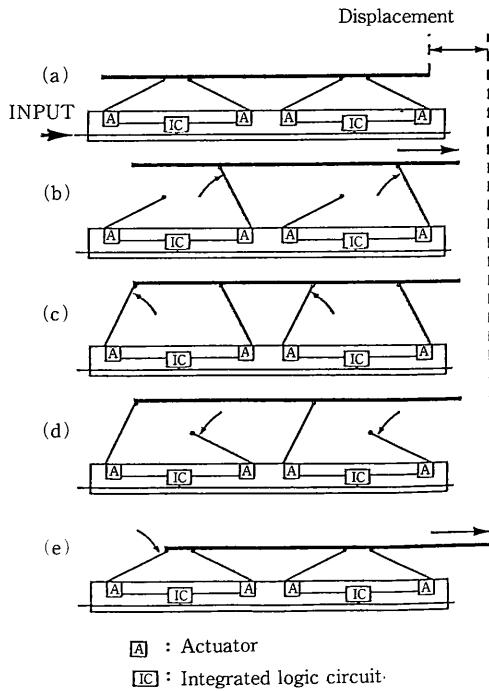


図16 単純化した織毛運動システム

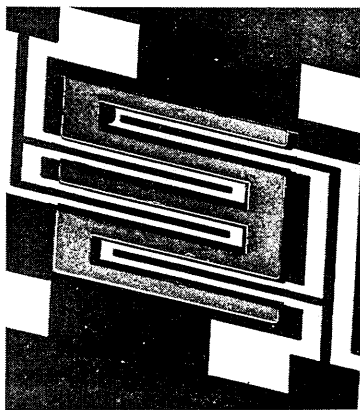


図17 ポリイミド・ニッケル・カンチレバー・アクチュエータ

ありながら、2 nmから10 μ m程度のステップ状の微動を可能にすることが確認された。この機構を、適当なセンサと組み合わせて、フィードバックシステムを構成すれば、センサの精度および分解能と同程度の、位置決め精度および位置決め分解能を実現できる。また、この機構では静止位置が摩擦力で保持されるので、位置決め完了後は、パワーを必要としない。しかも、通常のサーボ機構による精密位置決め機構で問題となる静止位置保持時に微細な振動を起こすという現象が、起こらないという利点がある。

図18は超精密位置決め機構の移動原理を示した図である。

(1) 移動体は固定されたベース上に摩擦力で保持されている。一方、移動体の端面に慣性体(オモリ)が圧電素子を介して接着固定されている。

(2) まず、ある特定パターンの電圧を圧電素子に印加し圧電素子を急速に伸ばす。その際、慣性力で移動体は微小移動(移動量 dx')する。

(3) 次にゆっくりと圧電素子を縮める。

(4) 最後に急速停止させる。すると移動体はさらに前回と同一方向に微小移動(移動量 dx'')する。

以上が移動原理である。図18では左方向の動きについて示したものであるが、右方向および回転も同様である。また、印加する電圧パターンやパルス数を変化させることで、移動距離をnmからmm台まで変化できる。

この原理を利用して、超高真空用の3軸移動テーブル²⁸⁾、数nmの位置決め分解能を持つマイクロロボットアーム²⁹⁾、細胞操作用のマイクロマニピュレータ³⁰⁾などが開発されている。図19は圧電素子を用いた微小駆動装置(ピペット駆動装置)を市販の倒立顕微鏡に取り付けた実験装置である。図20に微動部を示す。微動部分である直径4 mmのピペットホルダ(ステンレス製)に、圧電素子2個と8 gの慣性体2個を接着したプレート(アルミ製)を固定して、静止摩擦発生機構であるガイド部(真鍮製)に取り付けた。ピペットホルダにはマイクロピペット(ガラス製)を取り付けた。今回実験に使用したピペット駆動装置は、電圧振幅が20Vのとき、1ステップ0.18

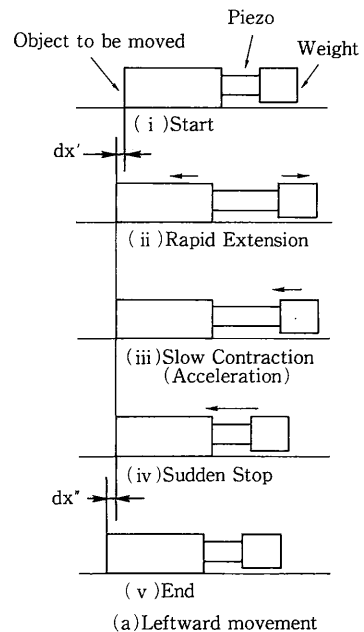


図18 衝撃力移動の原理

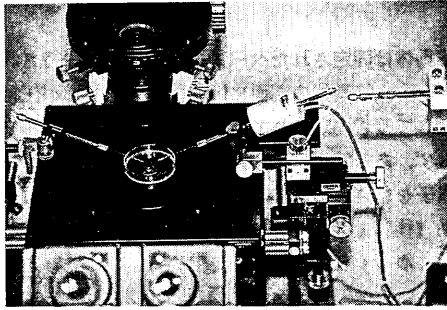


図19 マイクロマニピュレータ

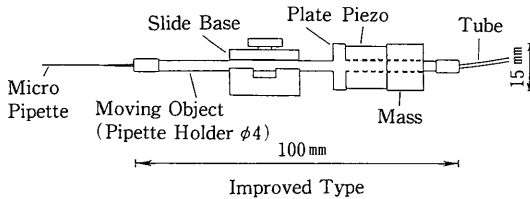


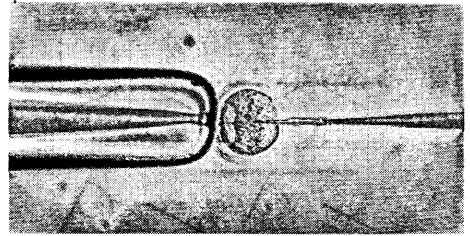
図20 マイクロピペットに取り付けた駆動部

μm の微小移動を記録した。なお、本機構は原理上ナノメータオーダの超微小移動を可能にしている。

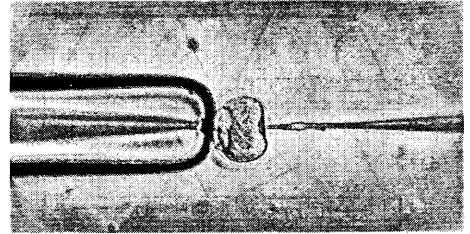
図21に圧電方式マイクロマニピュレータと油圧駆動マイクロマニピュレータの細胞操作の様子を示す。実験に使用した細胞はうさぎの卵子で、大きさは約 $180\mu\text{m}$ である。油圧方式では、微小領域のマイクロマニピュレーションには大変熟練を必要とし、微細針の位置決め分解能や細胞操作の良否もオペレータの能力次第である。また、弾性の強い細胞膜などに微細器具を挿入する際、細胞が変形し挿入がうまくいかないことがあった。今回、開発した圧電方式は、最小駆動ステップが非常に微小であり、駆動に圧電素子の急速変化に伴う衝撃力を利用しているため、弾性のある細胞膜などに微細器具を非常にスムーズに挿入でき、細胞に与えるダメージが非常に少ないという特徴があり、非熟練者でも微小領域における正確な作業が可能なので、細胞操作用マイクロマニピュレータの駆動機構に適していることが確認できた。

4.3 STMを利用した位置決め

微小領域では、通常レーザー干渉計が変位の測定に用いられるが、川勝らは原子の結晶格子を基準に位置決めをする方法を考察した³¹⁾。装置の原理図を図22に示す。圧電素子で駆動するXYスキャナーが中央に垂直に置かれ、その両面に2つのSTM(走査トンネル顕微鏡)のユニットが配置されている。XYスキャナーの片面に基準となる結晶格子(例えば、黒鉛のへき開面)を付け、他方に位置決めしたい物体を固定する。2つのSTMユニットは、前述の左電素子の急速変形による移動機構で両方の面に近づけられる。トンネル電流が流れるようになった



(1) 圧電駆動



(2) 油圧駆動

図21 卵子にピペットを挿入したところ

後は、Z方向駆動用の圧電素子で鋭い針に一定のトンネル電流が流れるように針と試料表面の間隔を制御しながら、XYスキャナーを動かす。このときのZ方向の駆動電圧をXY表示すると表面の凹凸が原子レベルで観察できる(図23)。

図23は両面に、黒鉛を張って測定した結果である。同図(a)でa-b間と、c-d間の距離を結晶格子がいくつ入っているかから求め、他の面(同図(b))での測定と比べると、a'-b'で0.3%、c'-d'で4%の誤差があった。結晶格子の間隔(格子定数)は正確に知られているので、片面を基準とすれば他面上の距離を上記のような誤差で絶対測定できる。

5. 終わりに

以上、生産研の成果を中心として、マイクロメカトロニクスの研究の現状を紹介した。本研究は、多くの工学分野の研究者が緻密な接触を保ちつつ、研究を進めていける点に特長がある。マイクロメカトロニクスのように、きわめて学際的(トランスディシプリン)な研究分野の推進には最高の研究環境である。上述したような成果をふまえ、さらに寄附研究部門を活用した国際共同研究を含めて、おのおのの知恵と技術の統合により、新しい工学の分野を切り開いていきたい。

(1990年9月13日受理)

参考文献

- 1) 藤田博之「マイクロメカトロニクスとは何か、どのように発展するか」電学誌、110巻4号、289-296頁(1990)
- 2) 増沢「マイクロマシーンに挑む」TTレクラー第9号、科学技術と経済の会(1990)
- 3) W.S.N. Trimmer, et al., 「ミクロの機械システム」日

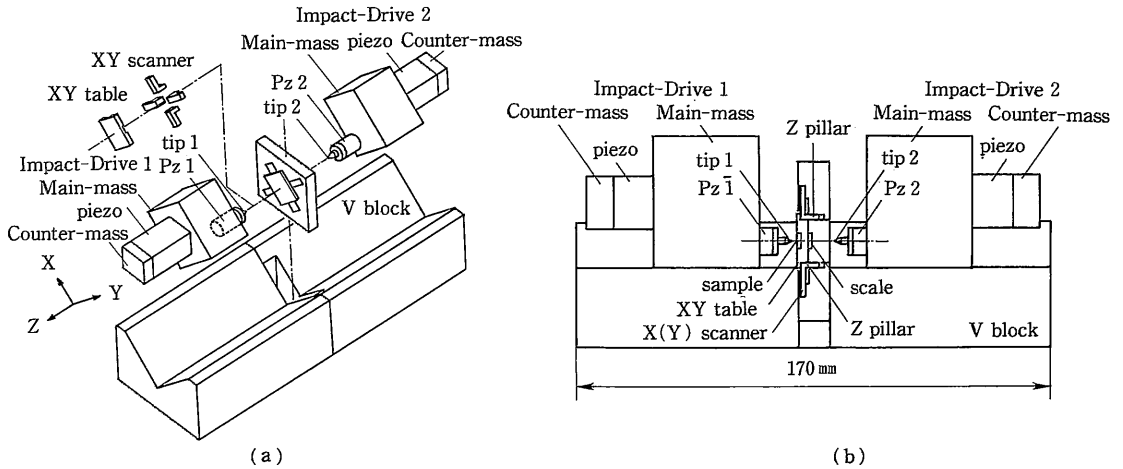


図22 デュアルトンネルユニットSTMの模式図 (a) と断面図 (b)

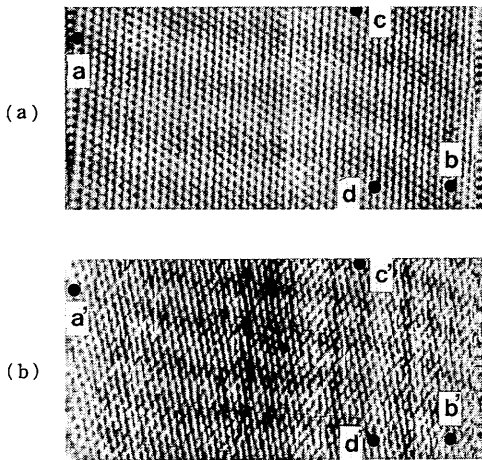


図23 デュアルトンネルユニットSTMの両面にグラファイト試料を付けて観察した像
(a)スケール側, (b)サンプル側

経エレクトロニクス, 1987年12月14日号 (通巻436号) 209頁

- 4) L.S. Fan, et al., "Integrated Movable Micromechanical Structures for Sensors and Actuators" IEEE Trans. Electron Devices, vol. ED-35, No. 6, pp. 724-730, (1988).
- 5) R. Mahadevan, et al., "Application of Electric Microactuators to Silicon Micromechanics" Sensors and Actuators, A21-23 (1990) pp. 219-225.
- 6) J.A. Walker, et al., "Thin-film Processing of TiNi Shape Memory Alloy" ibid. pp. 243-246.
- 7) L.S. Fan, et al., "IC-processed electrostatic micromotors" Sensors & Actuators, vol. 20, pp. 41-48 (1989).
- 8) Y.C. Tai, et al., "IC-processed electrostatic synchronous micromotors" ibid. pp. 49-56 (1989).
- 9) M. Mehregany, et al., "A Study of Three Microfabricated Variable Capacitance Motors" Sensors & Actuators, A21-23 (1990) pp. 173-179.
- 10) H. Fujita, et al., "Fabrication of an Electrostatic Linear Actuator" IEEE Trans. Electron Devices, vol. ED-35, pp. 731-734 (1988).
- 11) 坂田, ほか「静電歳差モータ (ESTOM) のマクロモデル」平成元年電気学会全国大会講演論文集第6分冊, pp. 193-194 (1989)
- 12) S.C. Jacobsen, et al., "A design overview of an eccentric-motion electrostatic microactuator" Sensors & Actuators, vol. 20, pp. 1-16 (1989)
- 13) W.S.N. Trimmer, et al., "Harmonic Electrostatic Motors" Sensors & Actuators, vol. 20, pp. 17-24 (1989)
- 14) M. Mehregany, et al., "Operation of Microfabricated Harmonic and Ordinary Side-Drive Motors" Proc. 3rd. IEEE MEMS Workshop, Napa Valley, Feb. (1990), pp. 1-8.
- 15) 原田, ほか「単結晶シリコン薄膜を用いた可変焦点凹面鏡」平成元年電気学会全国大会講演論文集第6分冊, 163-164頁 (1989)
- 16) W.C. Tang, et al., "Laterally driven polysilicon resonant microstructures" Sensors & Actuators, vol. 20, pp. 25-32 (1989).
- 17) Y.K. Kim, et al., "A Superconducting Actuator Using Meissner Effects" Sensors & Actuators, vol. 20, No. 1/2, pp. 33-40 (1989)
- 18) Y.K. Kim, et al., "Fabrication and Testing of a Micro Superconductive Actuator Using Meissner Effect" Proc. 3rd. IEEE MEMS Workshop, Napa Valley, Feb. (1990), pp. 61-66.
- 19) K.J. Gabriel, et al., "In Situ Measurement of Friction and Wear in Integrated Polysilicon Mechanisms" Transducers '89, June (1989), Montreux, Switzerland, pp. 109-111.
- 20) K.S.J. Pister, et al., "An Planar Air Levitated

- Electrostatic Actuator System" Proc. 3rd. IEEE MEMS Workshop, Napa Valley, Feb. (1990), pp. 67-71.
- 21) 柄川, 樋口「フィルムを利用した静電マイクロアクチュエータ」日本機械学会, ロボティクス・メカトロニクス講演会'89予稿集48-49頁
 - 22) S. Egawa, T. Higuchi, "Multi-Layered Electrostatic Film Actuator", Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop, Napa Valley, CA, Feb (1990) pp. 199-171.
 - 23) T. Masuzawa, et al., Annals of the CIRP Vol. 34, No. 1, 1985, pp. 431-434.
 - 24) T. Masuzawa, et al., Proc. of ISEM-9, 1989, pp. 86-89.
 - 25) W. Ehrfeld, et al., Micro Robots & Teleoperators Workshop, Hyannis, MA, Nov. 1987.
 - 26) N. Takeshima and H. Fujita, "Design and Control of Systems with Microactuator Array", IEEE International Workshop on Advanced Motion Control, Yokohama, Japan., pp. 219-224, March 1990.
 - 27) 樋口, ほか「圧電素子の急速変形を利用した超精密位置決め機構」精密工学会誌54巻, 11号 (1988) pp. 2107-2112
 - 28) 佐伯, ほか「超高真空3軸微動テーブルの試作と評価」真空, 33巻3号 (1990) pp. 248-250
 - 29) 樋口, ほか「圧電素子の急速変形を利用したマイクロロボットアーム」生産研究42巻6号 (1990) pp. 381-384.
 - 30) 工藤, ほか「圧電素子を用いた細胞操作用マイクロマニピュレータの開発」哺乳卵研誌7巻1号 (1990) pp. 7-12.
 - 31) H. Kawakatsu, et al., "Crystalline Lattice for Metrological Applications and Positioning Control by Dual Tunneling Unit Scanning Tunneling Microscope" Sensors and Actuators (to be published).