

〔解説〕

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

樋口俊郎* 山形豊**

1. はじめに

マイクロメカニズムを実現する場合一つの重要な要素としてアクチュエータがある。通常の方式のアクチュエータは小型化には限界があり新しい小型化に適したアクチュエータが必要とされている。圧電素子の急速変形を利用した精密位置決め機構は静止摩擦力と圧電素子の急速な変形に伴う衝撃的な慣性力を利用した移動機構であり、極めて単純な機構でありながら数 nm から十数 μm 程度のステップ状の微動が可能であることが確認されている¹⁾。またこの機構はきわめて簡素な構造であるために小型化に適していること、XY テーブルのような平面的な位置決め機構だけではなく3次元的な動作にも適していると考えられるため、この機構を用いて2種類のマイクロロボットアーム用関節駆動機構を試作した。本文ではそれらについて説明を行いそれらの応用についても考察を加える。試作した関節は一つが単純な回転型の物でありもう一つは3自由度の動きを可能にした関節である。

2. 圧電素子の急速変形を利用した移動機構

2.1 移動原理

この機構の移動原理を一軸移動機構を用いて説明する。図1では移動体はベース上におかれて、摩擦力で保持されている。この端面に慣性体が圧電素子を介して接着されている。以下に図1-(a)をもとに左方へ移動するときの駆動方法を説明する。

- (i) 移動ステップ①～② (駆動パターン No.1)
- ①: 圧電素子を縮めた状態からサイクルを開始する。
 - ②: 急激に圧電素子を伸ばすと衝撃的な慣性力が発生し、移動体と慣性体が逆方向に移動する。
- (ii) 移動ステップ③～⑤ (駆動パターン No.2)
- ③: 慣性体を一定の加速度で加速しながらゆっくりと

引き戻してやる。このとき移動体が静止した状態に保つ必要があるため、慣性体の加速による慣性力が移動体とベースの間の静止摩擦力よりも小さくなるように加速度を制御する。

④: 素子が元の長さに戻ったところで慣性体の動きを急に止めてやれば、慣性体が移動体に衝突するような形になり、移動機構全体が静止摩擦力に打ち勝って運動を始める。

⑤: 移動機構はここで得た運動エネルギーを動摩擦力によって失うまで移動して停止する。

以上①～⑤で1サイクルの移動が完了するので、これの繰り返しによって、長い距離の移動が実現できる。

(iii) (i) と (ii) を相乗した駆動 (駆動パターン No.3)

加速しながら素子を縮め、④で直ちに急激に素子を延ばして元の長さに戻すという駆動方法も考えられ、この場合は (i) と (ii) における移動量の和に相当する移動が1回で起こる。この電圧パターンがもっとも移動距離を大きくとれ、効率的であると考えられる。図2にそれぞれのパターンに対応した圧電素子への印加電圧波形を示す。

(iv) 逆方向への駆動

図1-(b)の様に、(i)、(ii)のサイクルを伸びと縮みを置き換えることにより、逆方向への移動もまったく同様に行うことができる。

2.2 本機構の特徴

この機構の特徴としては、次のような点があげられる¹⁾。

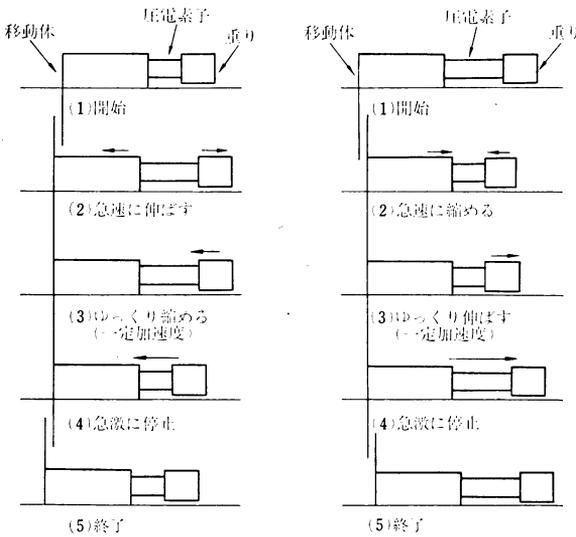
- ① 摩擦により保持された移動体に圧電素子と重りを取り付けただけの簡単な構造で駆動電圧振幅を変えることにより数 nm から数 μm のステップ状の移動を起こすことができる。
- ② 数 nm 程度という高い分解能と原理上は無限の可動範囲を持つ。
- ③ 移動体は静止位置が摩擦力で保持されるので、位置決め完了後はパワーを必要としない。また静止時の安定性が高く、位置決め系の固有振動数も高められる。
- ④ 構成が簡単のため多自由度の機構への応用も容易

原稿受付 1990年5月21日

Micro Robot Arm Utilizing Rapid Deformations of Piezoelectric Elements

* 東京大学生産技術研究所

** 東京大学大学院



(a) 左方への移動 (b) 右方への移動
図1 移動原理

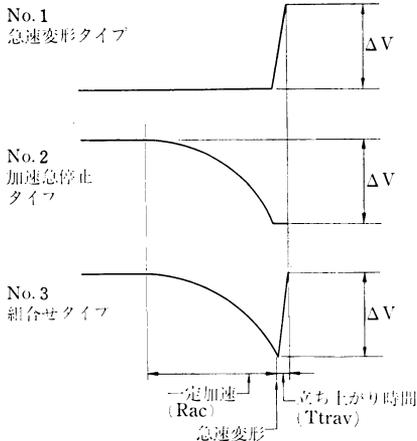


図2 圧電素子に加える電圧パターン

である。

3. 圧電素子の急速変形を利用したマイクログロブットアーム²⁾

3.1 1自由度回転型関節の構成

図3に1自由度回転型関節の構造図を示す。この関節はアームとそれに取り付けられた軸とそれを押しつけるスプリング及びスタンドからなり、スタンドと軸のフランジ部分との間で固体摩擦を発生し、保持力を発生している。アームは中心から先端までの長さが50mmで、軽量化を図るためアルミニウム製であり、2個の圧電素子と慣性体が接着されている。この圧電素子と慣性体は回転軸の中心を通る半径と直角でかつ中心からの距離が同じになるように設計されており、偶力を

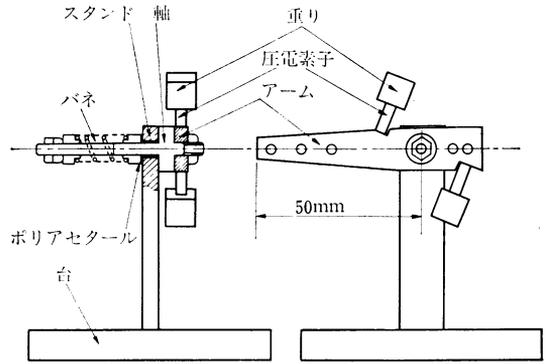


図3 1自由度回転型関節

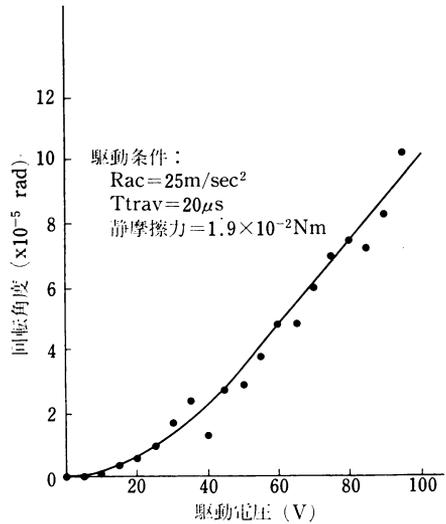


図4 駆動電圧振幅と回転角の関係

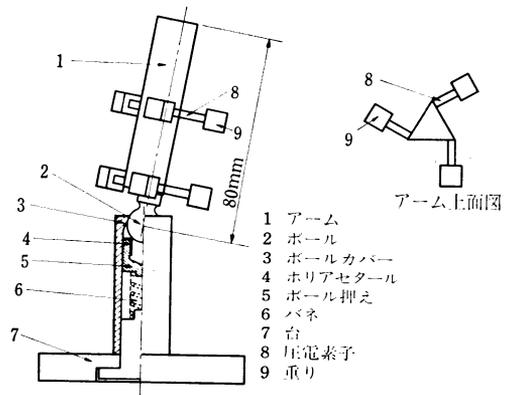


図5 3自由度回転型関節

発生する。圧電素子はPMN 積層層形のもので外形が $2 \times 3 \times 10 \text{ mm}$ で150Vの印加電圧で $8 \mu\text{m}$ の伸びを生じる。偶力を発生させるため二つの圧電素子は並列に接続され同じ電圧で駆動されている。駆動波形はパーソナルコンピュータ内で生成されD/Aコンバータより出力さ

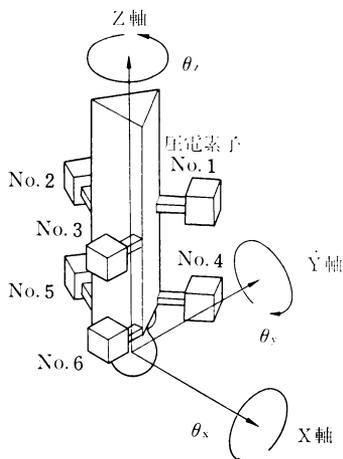


図6 アームの座標系

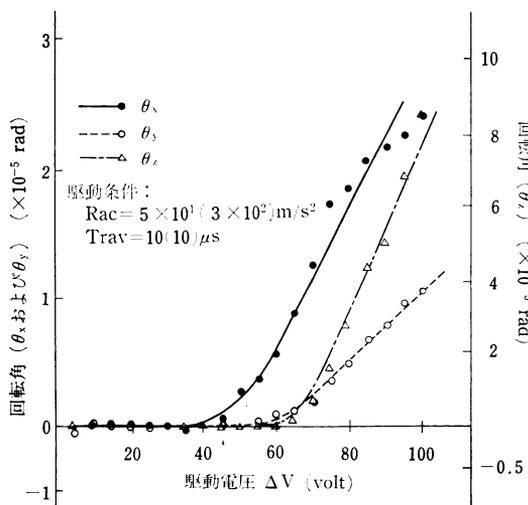


図7 回転角度と駆動電圧振幅の関係

れ電力増幅回路を通して圧電素子に供給されている。

3.2 1自由度回転型関節の特性

図4に1ステップ当りの回転角度と駆動電圧振幅の関係を示す。最大で1ステップあたり 1×10^{-5} rad の回転量が得られている。またこれはアームの先端の動きに換算すると約5ミクロンであり一軸移動機構の例から推定するとアーム先端で $0.1 \mu\text{m}$ 以下の分解能が得られると考えられる。本機構では外部から負荷力をかけられると負荷力に逆らう方向の移動量は減少し、負荷力と同じ方向の移動量は増加することがわかっているが、この関節は最大でアーム先端の力に換算して 20 gf 程度の負荷力に逆らって動くことができる。

3.3 3自由度回転型関節の構成

図5に3自由度型関節の構成を示す。関節の部分はボールジョイントになっており、下側からボール押えによ

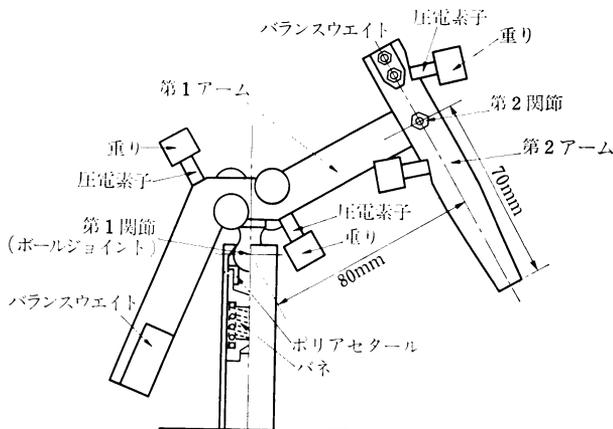


図8 2関節4自由度マイクロロボットアーム

り力をかけられボールカバーとの間で固体摩擦を発生するようになっている。ボール押えは上部に固体潤滑材がはめ込まれこの部分での摩擦を少なくしている。アームはアルミニウム製でボール中心からの長さが 80 mm で断面は一辺 18 mm の正三角形である。圧電素子および慣性体は正三角形の断面を持つアームに6組取り付けられている。圧電素子は、一自由度型回転関節と同じもので寸法は $2 \times 3 \times 10 \text{ mm}$ であり、慣性体の質量は 4 g である。これにより3つの回転自由度に対してそれぞれ独立に回転力(偶力)を発生できる。ボールによる支持を採用したことでこの関節は、図6に示すように3個の回転の自由度を持つことになる。 θ_x , および θ_y は、可動範囲が ± 20 度であり、 θ_z の可動範囲は無制限である。

6個の圧電素子は独立に駆動され、アームの x , y , z 軸周りの回転を可能にしている。駆動電圧波形は一自由度型の関節と同様にパーソナルコンピュータによって x , y , z 軸の回転に対応する電圧波形が生成されそれらがアナログ回路によって構成された分配回路で6個の圧電素子に対応する波形に分配され圧電素子に供給されている。

3.4 3自由度型関節の特性

図7に x , y および z 周りの1ステップ当りの回転量と駆動電圧の関係を示す。これからこの関節は x , y および z のどの軸周りにも回転が可能であることがわかる。また一軸駆動機構の実験結果から推定すると $0.1 \mu\text{m}$ 以下の位置決め能力をアーム先端で持っていると考えられる。また負荷能力としてはアーム先端で θ_x 方向で 15 gf 程度の力に逆らって動くことができる。

☆ ☆

圧電素子の急速変形を用いた一自由度型の回転関節および3自由度型回転関節を製作しそれがアーム先端で

0.1 μm 程度の微動が可能でありまたの1自由度で20 gf 3自由度で15 gf 程度の負荷能力を持つことが判明した。また回転速度としてはアーム先端の速度で2から5 mm/sec の値が得られている。また3自由度型の関節はサーボモータの様な従来型のアクチュエータでは実現が困難であると考えられるがこの関節機構は同じ自由度のロボットアームを製作した場合でも1自由度の回転関節を組み合わせた場合と比較すると関節の数を減らすことができ、ロボットアームの剛性を高めるために有利であると考えられる。また原理上は多関節多自由度のアームも構築可能であり、現在図8に示すようなこれらの関節を組み合わせた多自由度のロボットアームの開発を行っている。

4. 本マイクロロボットアームの応用

この圧電素子の急速変形を利用したロボットアームは、小型であるというだけでなく構造が簡単のため安価である。またアームの駆動には数本の導線しか必要としない。そのため複数の本機構を用いたアームを同時に使用したり、あるいは閉鎖された容器の中へ設置すること、また場合によっては使い捨てにすることも可能であると考えられる。具体的には次のような応用が考えられる。

マイクロメカニズムの組立システム：微細な機械システムを作るための加工技術は研究がかなりおこなわれているが組立に関してはいまのところ加工と同時に組立が完了するような方式が主流である。しかし複雑な微小機械システムを構築するには部品を別個に製作し組み立てる技術が必要になると思われる。そのような状況で本機構を用いたアームは複数個を限られた空間内に配置できるため微小機械組立システムに有効であると考えられる。

医療用マイクロマニピュレータ

医学の分野では眼球内、耳腔内あるいは脳内の手術など限られた空間中で微細な作業を行う必要が生じている。このような場合には小型のロボットアームを患部の近傍に多数固定し作業を行うことで作業をより容易にすることができると考えられる。

植物培養システム

近い将来の植物工場では細胞からの植物の培養や植物の成長点を分離成長させ優れた個体を多数生産する方法を取ると思われる。そしてそれぞれの植物は閉鎖された生物的にクリーンな容器中で栽培される。このような場合に植物の移植や間引き等の為になんらかのマニピュレータが必要となる。本ロボットアームはこのような場合に滅菌処理をはじめ成長、収穫に至る過程まで一貫して容器内に設置することができる。

細胞操作用マクロマニピュレータ

本機構を用いた一軸のマクロマニピュレータにより細胞操作を行い、ステップ状の移動のため弾性のある細胞膜に微細針を容易に挿入できることが判明している³⁾。本機構を用いることで単に微細針を挿入するだけでなく細胞融合や特定部位の操作などが容易に行えると考えられる。

このように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はマイクロメカニズムの応用分野を広げていくものと期待している。

参 考 文 献

- 1) 樋口俊郎, 渡辺正浩, 工藤謙一:「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 Vol.154, No.11 (1988 Nov.), pp.2107.
- 2) 1989年度ロボット学会学術講演会予稿集, Nov. (1989), pp.815-816.
- 3) 1990年度精密工学会春季大会学術講演論文集, Mar. (1990), pp.389-390.



樋口俊郎 (Toshiro HIGUCHI)

1950年2月26日生。'77年、東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻博士課程修了。同年、東京大学生産技術研究所講師。'78年、同助教授となり現在に至る。メカトロニクス、磁気軸受、ステップモータ、超精密位置決め、自動組立、生産工学などの研究に従事。'85年、工作機械技術振興賞論文賞受賞。'89、'90年精密工学会賞受賞。工学博士。精密工学会、計測自動制御学会、日本機械学会、電気学会会員。

(日本ロボット学会正会員)



山形 豊

(Yutaka YAMAGATA)

1964年5月25日生。1990年東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻修士課程修了。現在同博士課程在学中。圧電素子を用いた精密位置決め機構、マイクロメカニズムおよびアクチュエータの研究に従事。

精密工学会会員。

(日本ロボット学会学生会員)