

## シリコンマイクロマシニングによるステップアクチュエータ

Step Motion Actuators by Silicon Micromachining

年 吉 洋\*・小林 大\*\*・三田 信\*・橋口 原\*\*\*

藤田 博之\*・遠藤 潤二\*\*\*\*・和田 恭雄\*\*\*\*

Hiroshi TOSHIYOSHI, Dai KOBAYASHI, Makoto MITA, Gen HASHIGUCHI

Hiroyuki FUJITA, Junji ENDO, Yasuo WADA

## 1. はじめに

シリコン表面/バルクマイクロマシニングによるアクチュエータの最も一般的な駆動方法は、印加電圧の静電引力を利用したものである。特に歯型アクチュエータよばれる構造は、駆動電圧-変位の線形領域を拡大できるため、高精度の位置決め精度が要求される用途に使われている。その例として、シリコンチップ上に集積化したトンネル電流計測デバイス[1,2]、光学波長フィルタ[3]、光スキャナ[4]、ハードディスク磁気ヘッドのマイクロトラッキング機構[5,6]などが挙げられる。

静電アクチュエータの位置決め精度を決定する最たる要因は、使用する電圧源の安定度である。最大出力電圧に対するノイズの比は通常 10-5 程度であるが、用途によってはこれでも不十分な場合がある。そこで、位置決め精度を改善する手段として、尺取り虫のような動作でナノメートルのステップ移動をおこなうスクラッチドライブアクチュエータ[7]や、対抗する 2 方向からの力のバランスをとることで制御性を向上する手法[8]などが提案されている。なかでも、粗動と微動のアクチュエータを直列に用いる方法が注目を集めている[5,6]。ところが、これらの方法ではフィードバック制御により位置決めを行う必要があり、アクチュエータをアレイ状に配置したときなど制御対象が多数の場合にはシステム構成が非常に煩雑になる場合がある。また、マイクロマシンにおいてもステップモータとラック・ピニオンの組み合わせによる減速機構[9]が利用されているが、高精度位置決め装置に用いるにはギアの

遊びによるバックラッシュが無視できない。

本研究では、オープンループでも原理的に比較的高精度の位置出力が得られるマイクロ機構として、機械的デジタル/アナログ変換機構を検討したので報告する。

## 2. マイクロメカニカル D/A 変換器

図 1 は R-2R 抵抗ネットワークと呼ばれる最も簡単な 4-bit の電圧デジタル/アナログ変換器 (digital to analog converter, DAC) である。抵抗 2R はそれぞれスイッチを介して GND または定電圧源  $V_{in}$  に接続されている。キルヒホッフの法則を用いると、等価回路は  $1/2 V_{in}$ ,  $1/4 V_{in}$ ,  $1/8 V_{in}$ ,  $1/16 V_{in}$  の 4 つの定電圧源の直列接続となる。図から明らかなように、スイッチ  $b_1$  と  $b_4$  はそれぞれ most significant bit (MSB) と least significant bit (LSB) に対応する。

この電気回路を機械系に置き換えることを考える。電圧  $V$ 、電流  $I$ 、抵抗  $R$ 、変位  $x$ 、力  $F$ 、コンプライアンス  $C$  とすると、 $V = RI$ 、および、 $x = CF$  の関係から、電圧-変位対応を用いることができる。この対応の利点は、抵抗の値と配置をそのまま機械的コンプライアンスに置き換えるこ

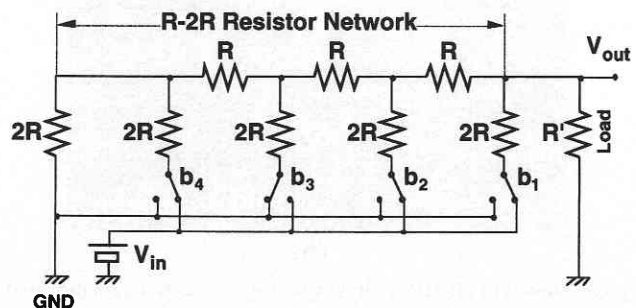


Fig.1 Passive electric digital-to-analog converter known as R-2R resistor network.

\*3rd Department, Institute of Industrial Science, University of Tokyo

\*\* Tokyo Denki University

\*\*\* Kagawa University

\*\*\*\* Advanced Research Laboratory, Hitachi, Ltd. Co.

研 究 速 報

とができる点にある。この変換を行うと、図 2 (a)に示す梯子型のサスペンションネットワークが得られる。すなわち、図 1 の抵抗はサスペンションに、定電圧源とスイッチの組み合わせが変位を制限された並進のアクチュエータ (シャトル) に置き換えられている。また、GND にはサスペンションの固定端が対応している。シャトルの変位は図 2 では壁面によって制限されている。各シャトルは DAC の入力に対応し、シャトルが左右に動くことで、発生する変位がサスペンションを介して横向きの部材 (Lateral Beam) に伝えられる。これらの単位構造は、横方向に戻りバネを介して連結されており、局所的な変位は戻りバネ-横向き部材の変位として蓄積され、右端の X の場所で変位出力として観測される。電気系の DAC に対してマイクロ電気機械系の DAC という意味で、この機構を MEMDAC (micro electro mechanical digital-to-analog converter) と呼んでいる。

幅  $w$ 、高さ  $h$ 、長さ  $L$  の長方形断面をもつサスペンションの両端の回転変位を拘束し、一端をその軸に対して垂直方向に変位させたときのコンプライアンス  $C$  は、

$$C = L^3 / E w^3 h$$

で表される。ここで、 $E$  は材料のヤング率である。この式から、幅が一定の場合、 $C$  はサスペンション長の 3 乗に比例するため、長さを半分にした場合には、 $C$  が 8 倍になることが分かる。また、同じサスペンションを 2 本並列に用いると、 $C$  はもとの半分になる。一方、同じサスペンション 2 本を戻りバネ状に配置すると、 $C$  は 2 倍となる。この関係から、長さ  $L$  のサスペンション (コンプライアンス  $4C$  とする) を並列に用いることで  $2C$  がえられる。また、長さ  $1/2 L$  のサスペンション ( $1/2 C$ ) を戻りバネ状にすると  $C$  が得られる。コンプライアンスをバネの幅を制御して調整することも可能であるが、プロセス精度に大いに依存するため、ここで述べたように長さとの組み合わせを選択する方法を用いた。

図 2 には、図 1 には見られないサスペンションがシャトルに付加されている。これは、シャトルの  $Y$  方向の横滑り変位を抑えるための安定用サスペンションである。このサスペンションの有無に関わらずシャトルは壁面に当たるまで駆動するので、MEMDAC の機能には影響はない。ただし、シャトルの駆動に必要な力が増加する。

図 2 (b) にシリコンマイクロマシニングで製作した 4-bit MEMDAC を示す。図 2 (a) の構造を上下対称にして、シャトルの並進変位が安定して得られるようにしている。シャトルの駆動には、印加電圧の静電引力を利用している。サスペンションの寸法は、幅  $6 \mu\text{m}$ 、長さ  $200 \mu\text{m}$  であり、シャトルの寸法は幅  $100 \mu\text{m}$ 、長さ  $300 \mu\text{m}$  である。この構造は厚さ  $20 \mu\text{m}$  の張り合わせシリコン基板を用いているため、厚みは一定である。

図 3 にシャトルの拡大写真を示す。(a) 電圧が印加されない状態で、シャトルは中央に保持されている。シャトルを支える戻りバネと基板の間にわずかな隙間が見えるが、これは構造をリリースする際に除去された酸化膜の膜厚  $1 \mu\text{m}$  に相当する。(b) は左側の電極に電圧  $150 \text{V}$  を印加して、シャトルを吸着した様子を示している。シャトルとストッパーの間の距離は約  $6 \mu\text{m}$  である。同様に (c) は右側の電極に吸着した様子である。これらのシャトルの駆動は MEMDAC の  $N$  ビットのシャトルすべてに独立に行われ、アナログ変位の制御が行われる。

図 4 に 4 ビット MEMDAC の出力変位を 2 進数表記の入力変位でプロットした結果を示す。MEMDAC の先端が図 2 (b) の  $X$  軸方向で最も負の側に移動した位置を原点としている。粗動距離  $5.8 \mu\text{m}$  に対し、微動ステップ  $0.38 \mu\text{m}$  が得られている。駆動には  $150 \text{V}$  以上の電圧を印加した。

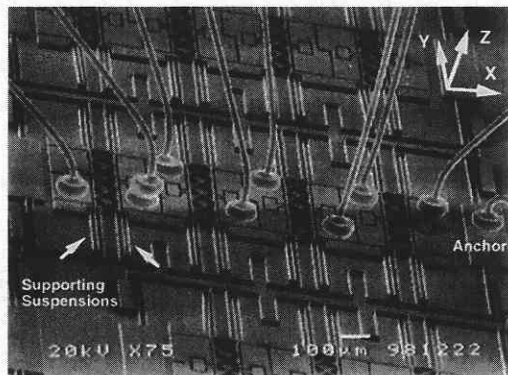
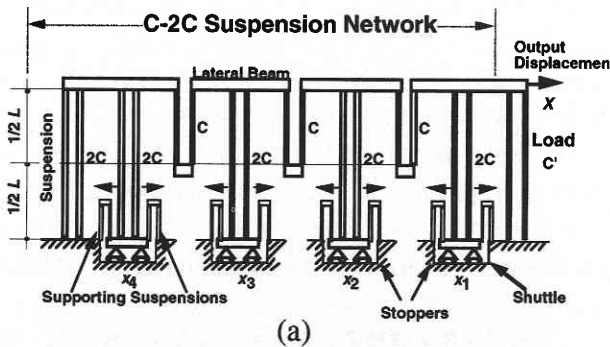


Fig.2 Design of MEMDAC and SEM view of silicon microfabricated 4-bit structure.

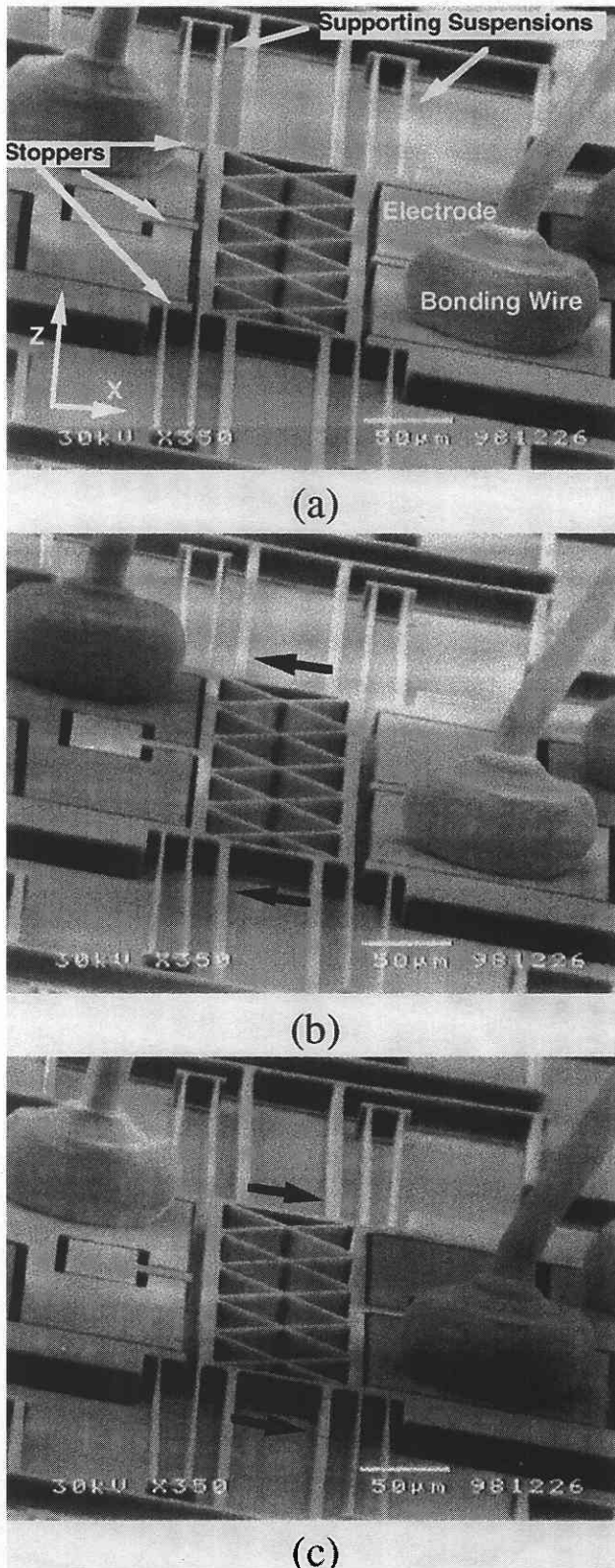


Fig.3 Close-up views of shuttle structure.

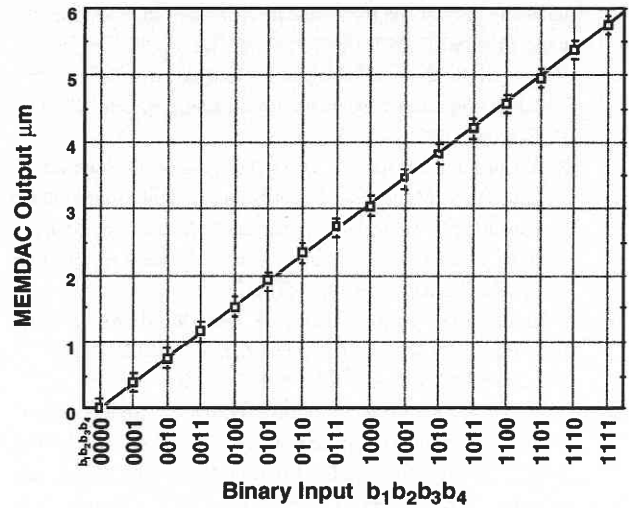


Fig.4 Experimental result of analog displacement output of 4-bit MEMDAC as a function of binary input.

### 3. ま と め

アクチュエータの出力変位をデジタル/アナログ変換することで、駆動電圧制御に依存しない高精度位置決め装置 (MEMDAC) を製作する手法について報告した。解像度をさらに向上するには、ビット数を増やすか、各アクチュエータの変位を一様に縮小する方法がある。MEMDAC の出力誤差の最も大きな原因は MSB からの寄与である。このため、実際の設計においては、MSB が発生する変位誤差が LSB からの寄与よりも大きくなるビット数が N の最大値となる。ここでは、変位を積分するタイプの構造について報告したが、原理的には、力を積分する別の機構も可能である。これらの特性を比較検討や、過渡応答等の特性については別途報告する予定である。

### 謝 辞

マイクロマシニング用のフォトリソマスクの製作には本研究所大学院生の三田吉郎氏、技術官の飯塚哲彦氏、東大 VDEC の皆様に協力していただきました。また、製作には信越化学株式会社から寄付していただいた SOI ウエハを使用しています。この研究は、科学技術事業団の戦略研究の補助を受けています。

(1999年6月25日受理)

### 参 考 文 献

- 1) D. Kobayashi, H. Fujita, "Design, Fabrication and Operation of a Micromachined Tunneling Control Unit," Trans. IEE Japan 116-E (8) (1996) pp.330-344.
- 2) Y. Wada, M. Lutwyche, M. Ishibashi, "Micromachine scanning

- 研究速報
- tunneling microscope for nanoscale characterization and fabrication," Proc. SPIE 2879 (1996) pp. 327-331.
- 3) Y. Uenishi, K. Honma, S. Nagaoka, "Tunable laser diode using a nickel micromachined external mirror," Electron. Lett. 32 (13), 1207-1208 (1996).
  - 4) R. A. Conant, P. M. Hagelin, U. Krishanmoorthy, O. Solgaard, K. Y. Lau, R. S. Muller, "A Raster-Scanning Full-Motion Video Display using Polysilicon Micromachined Mirrors," The 10 th Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators (Transducers 99), June 7-10, 1999, Sendai, Japan, pp. 376-279.
  - 5) T. Hirano, L.-S. Fan, J. Q. Gao, W. Y. Lee, "MEMS Milliactuator for Hard-Disk-Drive Tracking Servo," IEEE/ASME J. Microelectromech. Sys. 7(2), 149-155 (1999).
  - 6) S. Nakamura, K. Suzuki, M. Ataka, H. Fujita, "An electrostatic micro actuator for a magnetic head tracking system of hard disk drives," Proc. of The 9 th Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators (Transducers 97), 16-19 June 1997, Chicago, USA, p.1081-4 vol.2.
  - 7) T. Akiyama, D. Collard, H. Fujita, "Scratch drive actuator with mechanical links for self-assembly of three-dimensional MEMS," J. of Microelectromechanical Sys. 6 (1), (1997) p.10-17.
  - 8) J. I. Seeger, B. E. Boser, "Dynamics and Control of Parallel-Plate Actuators beyond the Electrostatic Instability," The 10 th Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators (Transducers 99), June 7-10, 1999, Sendai, Japan, pp.474-477.
  - 9) M. S. Rodgers, J. J. Sniegowski, J. J. Allen, S. L. Miller, J. H. Smith, P. J. McWhorter, "Intricate Mechanism-on-a-chip Enabled by 5-Level Surface Micromachining," The 10 th Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators (Transducers 99), June 7-10, 1999, Sendai, Japan, pp.990-993.