

# スクイーズ膜効果を用いたミニチュアロボット浮上量推定とその応用

## Floating Height Estimation of a Miniature Robot Using Squeeze Film Effect and Its Application

山田智弘†, 鳥井昭宏††, 植田明照††  
Tomohiro Yamada, Akihiro Torii, Akiteru Ueda

**Abstract** This paper describes a feasibility of floating height estimation of a miniature robot using squeeze film effect. The miniature robot can levitate with a vertically vibrating piezoelectric element. It is difficult to measure the floating height of the robot because of the restriction of measurement instruments. The input voltage and load current of the piezoelectric element used in the vertical vibration contain the information of the floating height. The input voltage and load current which are obtained in both the floating miniature robot and the landing miniature robot are compared. An inchworm-type miniature robot using a vertical levitation is also proposed. The levitating elements move sequentially by the deformation of a horizontal piezoelectric element. Some experimental results are shown.

### 1. はじめに

近年、精密な製品を製造するために、大型作業用ロボットが使用されている。製品の高度化に伴い生産設備の大型化が進めば、スペースやコストの増加が予想される。このため、迅速かつ精密な作業ができ、省エネルギー、省資源、省スペースの観点から小型作業用ロボットが必要とされている。ミニチュアロボットを用いた生産システムは、大型のものとは比べ容積や重量が小さい分、ロボットを複数用いることで、異なる作業を並行して行うことができるなどの利点がある。

筆者らは、圧電素子を用いたミニチュアロボットの研究を行っている<sup>(1)</sup>。圧電素子とは、水晶や酸化亜鉛などの圧電体を二枚の電極で挟んだ素子で、電圧を印加すると伸縮する逆圧電効果という特性があり、この変位量は数マイクロンから数十マイクロンと非常に小さく、ミニチュアロボットの精密な動作に適している。

圧電素子を用いた従来のミニチュアロボットの動作原理は、インチワームの動作原理<sup>(2)</sup>を用いたものや圧電素子の急速変形を用いたもの<sup>(3)</sup>などが発表されている。これらのミニチュアロボットは動作基板上を摺動しながら移動するため、接地面との摩擦によるエネルギーの損失や接地面の摩擦、また発生する微小な粉塵などの問題があった。

この問題を解決するために浮上型のミニチュアロボットが期待されている。浮上しながら移動するミニチュアロボットは、摩擦による損失や粉塵を原理的にゼロにすることができ、空気清浄度を必要とする場面での応用が期待さ

れる。

しかし、浮上しながら移動するミニチュアロボットの浮上量を光学的、あるいは電磁気的な変位センサを用いて検出することは、動作範囲の点から、またセンサ設置の観点から困難であり、それゆえにセンサレスで浮上量を検出することが望ましい。これまでに圧電アクチュエータの変位推定法が提案されている<sup>(4)</sup>。

そこで本論文では、ミニチュアロボットが浮上している状態での浮上用圧電素子の印加電圧と負荷電流を計測することにより、ミニチュアロボットの浮上量の推定の可能性を明らかにする。ミニチュアロボットは、スクイーズ膜効果によって浮上する。スクイーズ膜効果とは、高周波振動によって、動作基板とロボットの接地面との間に正の圧力が発生し、空気の膜を生成することである。この圧力を用いてミニチュアロボットは浮上する。次に、浮上時と接地時の摩擦力の差を利用したミニチュアロボットを試作し、平面移動時の基本性能を明らかにする。

### 2. 浮上量推定の可能性

#### 2.1 振動型浮上マイクロロボット

図1に、鉛直方向に浮上する微動機構の構造を示す。鉛直方向に振動する積層型圧電素子の上下に、慣性体を接着する。上方の慣性体は円柱状であり、圧電素子の下部には円盤状プレート（慣性体）を取り付ける。積層型圧電素子には NEC トーキン社製の AD0505D08F を用いた。この圧電素子は 100V 印加時に 6.1 $\mu$ m 伸びる。上部慣性体の質量は 20g、下部の円盤状プレートは 10g である。圧電素子への印加電圧、上部慣性体の鉛直方向変位、下部プレートの鉛直方向

† 愛知工業大学大学院工学研究科電気電子工学専攻  
(愛知県豊田市八草町)

†† 愛知工業大学工学部電気学科(愛知県豊田市八草町)

変位を測定する。鉛直方向変位の計測には光ファイバ式変位計を用いる。

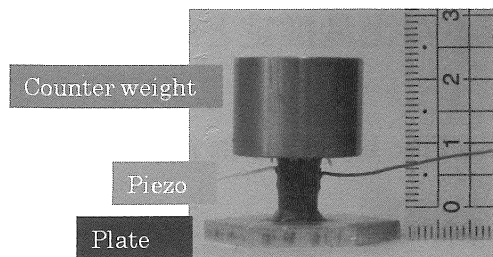


図1 鉛直浮上ミニチュアロボット

図2に、圧電素子への印加電圧と浮上量の計測結果を示す。時刻180ms時に圧電素子に電圧印加を開始した。印加電圧は振幅5V、オフセット電圧48V、周波数10kHzの正弦波とした。電圧印加後に上部慣性体と下部円盤状プレートが上方に移動していることがわかる。上部慣性体は、電圧印加によって約 $17\mu\text{m}$ だけ上方に移動し、下部円盤状プレートは、約 $11\mu\text{m}$ だけ上方に移動している。下部円盤状プレートの変位から、このミニチュアロボットは浮上していることがわかる。上部慣性体と下部円盤状プレートの鉛直方向変位の差の約 $6\mu\text{m}$ は、圧電素子の伸びである。しかし、正弦波入力電圧による微小振動振幅は確認できない。また、浮上開始から定常状態に至るまでの時間が約20msであることもわかる。

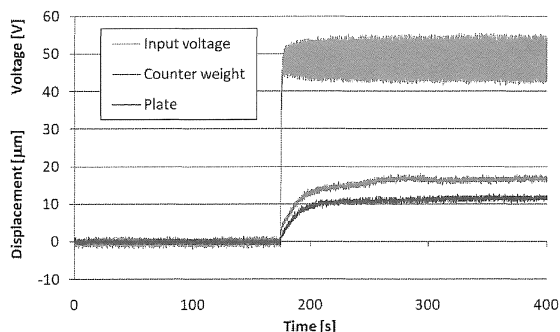


図2 ミニチュアロボットへの制御入力と変位

## 2.2 印加電圧と負荷電流

ミニチュアロボットの浮上時の入力電圧と負荷電流、浮上していない状態での入力電圧と負荷電流を求めた。圧電素子の振動によって浮上する周波数と、浮上しない周波数を用いて電圧と電流を比較した。結果を図3と図4に示す。図3は浮上時である。ミニチュアロボットが浮上する周波数を図2の条件と等しく10kHzとした。図4は浮上しない(着地している)状態である。周波数を100Hzとした。

図3より、ミニチュアロボットが浮上している状態では、圧電素子への印加電圧と負荷電流の位相が揃っていることがわかる。一方で、図4より、ミニチュアロボットが着地している状態では、電圧と電流の位相が90度ことになっていることがわかる。容量性負荷である圧電素子の特徴が表れている。さらに、図3と図4では、等しい大きさの電圧を印加した。負荷電流をみると浮上時の図3の負荷電流は、着地時の図4の負荷電流よりも約10倍の大きさである。両者を比較すると、ミニチュアロボットの浮上時に、圧電素子の伸縮によってミニチュアロボットにエネルギーが供給されていることがわかる。

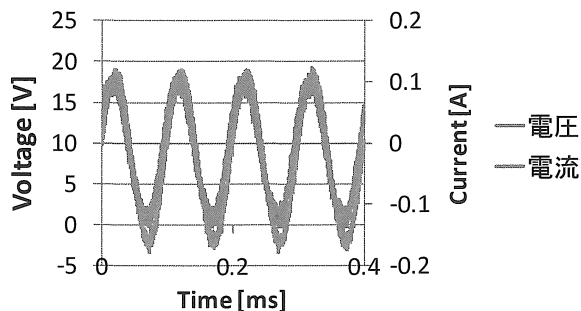


図3 制御周波数10kHz浮上時の電圧電流波形

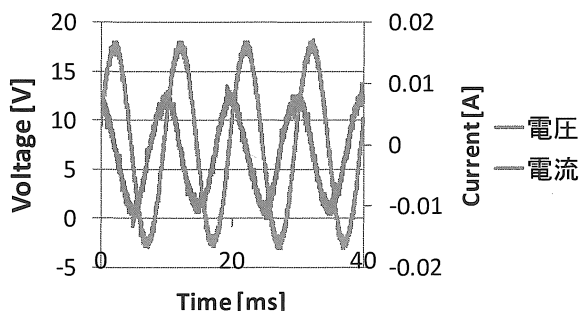


図4 制御周波数100Hz着地時の電圧電流波形

以上のことから、以下のことが推定される。まず、ミニチュアロボットの浮上の有無は、鉛直方向に振動する圧電素子の印加電圧と負荷電流の位相差に影響を及ぼす。さらに、負荷電流の大きさに影響を与える。これらの値はミニチュアロボットの浮上量検出センサや変位計を用いることなく取得できるため、ミニチュアロボットの浮上量のセンサレス推定が可能であると期待できる。

## 3. 浮上を用いたインチワーム型アクチュエータの試作

### 3.1 構造と動作原理

図5に製作するミニチュアロボットを示す。このロボットは、図1と類似構造の浮上型ミニチュアロボットを連結した構造である。連結部分には平行板ばねと水平方向に伸縮する圧電素子を用いている。各部の質量は図1と等しい。図5で使用した積層型圧電素子はNECトーキン製AE0505D16で、断面積 $5\text{mm}\times 5\text{mm}$ で、長さ20mmであり、100V印加時には $11.6\mu\text{m}$ 伸びる。質量は5gである。平行板ばねは鉛直方向の浮上用振動が他方の浮上機構に伝達することを防ぐために用いる。全体の質量は80gである。この構造での駆動周波数は、鉛直方向浮上用の制御周波数が約15kHzとなった。以下では、連結部に使用している水平方向に変位する圧電素子を推進用圧電素子、浮上用に用いる鉛直方向に振動する圧電素子を励振用圧電素子と呼ぶ。

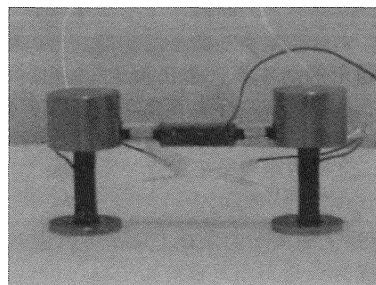


図5 インチワーム型浮上ロボット

図6に各圧電素子の入力電圧波形を示す。上から順に推進用圧電素子への印加電圧と励振用圧電素子への2個の入力電圧波形を示す。励振用圧電素子は交互に励振する。すなわち、2個の浮上部分は交互に浮上し、一方が浮上している間は他方は着地している。励振用圧電素子に電圧が与えられている間に、推進用圧電素子への印加電圧がランプ状に上昇する。励振用圧電素子を切り替えた後に、推進用圧電素子への印加電圧がランプ状に減少する。これらを繰り返すことによって、浮上部分がインチワームと同様の原理によって移動する。

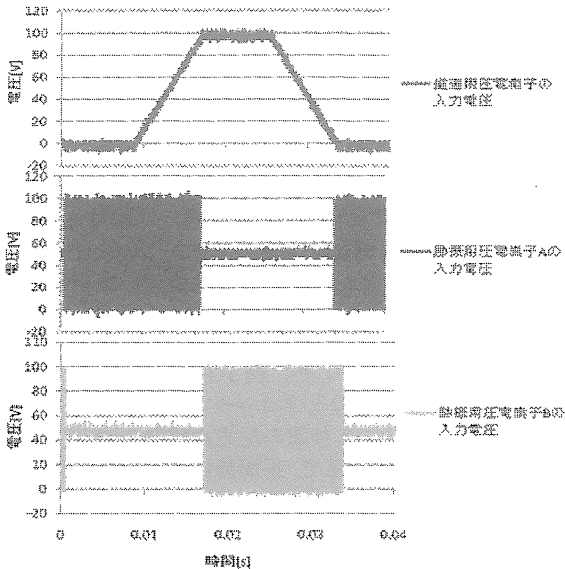


図6 制御波形

移動の模式図を図7に示す。ここでは右側の浮上部分をA、左側の浮上部分をBとした。励振用圧電素子を交互に励振し、スクイーズ膜効果によって左右のブロックを交互に浮上させる。励振用圧電素子の動作と推進用圧電素子の伸縮を同期させることによって、インチワーム型マイクロロボットは移動する。Aの励振用圧電素子が振動している段階では、Aの部分が浮上している。この段階で推進用圧電素子が伸長するとAは右側へと移動する。次にAの励振を停止するとAの部分は着地し、Bの励振を開始するとBの部分が浮上する。この状態で推進用圧電素子の電圧を減少すると、推進用圧電素子は収縮し、Bの部分が右へ移動する。への図2(b)に動作順序を示す。右に移動させる場合、右側のブロックを浮上させ、推進用圧電素子を伸ばす、その後、右側のブロックの降下と同時に左側のブロックを浮上させ、推進用圧電素子を縮める。これを繰り返すことで、ロボットを右に移動させることができる。左に移動させる場合には、推進用圧電素子の伸縮する位相を入れ替える。

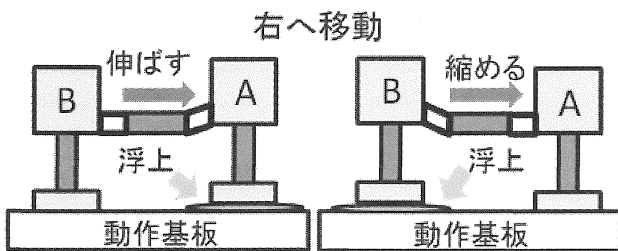


図7 右方向移動の模式図

### 3.2 電気回路による浮上時間と降下時間の測定

各励振用圧電素子を振動させたときの、浮上時間と降下時間を測定する。浮上ブロックの接地部分と動作基板を通る電氣的閉回路を構成し、浮上ブロックの接地部分と動作基板間の電位差を測定した。浮上時の電位差が5V、接地時には0Vとなる閉回路とした。

左右のブロックを浮上させるために使用する励振用周波数を実験で求めたところ、それぞれ16kHzと14kHzであった。以後の実験でも同じ周波数を用いる。ミニチュアロボットの制御信号は、発振器の出力を増幅し、各圧電素子に印加した。励振用圧電素子への印加電圧は、振幅50V、オフセット50Vの正弦波交流とした。浮上していないときには一定値の直流電圧を印加することとし、実験では50V(一定値)とした。

浮上の計測結果を図7に示す。左側にブロックAの測定結果、右側にブロックBの測定結果を示す。浮上と着地を20ms間隔で繰り返した。すなわち間欠駆動の周波数は25Hzであった。入力振動はオフセット50V、振幅50Vとした。この横軸範囲では入力信号の周波数を確認することはできない。停止時の圧電素子への印加電圧は50Vの一定値であり、この状態では圧電素子は振動しない。圧電素子が高速に振動している期間の振動確認用回路の出力電圧が5Vとなっており、その期間では基盤から浮上した状態であることを示している。ここで、振動確認用回路が0Vから5Vに立ち上がる時間、すなわち浮上に要する時間と、5Vから0Vに立ち下がる時間、すなわち着地に要する時間を検討する。前者は数ms程度である。一方、後者は約10msであり、この値は振動している空間内に存在する空気膜の除去に必要な時間である。

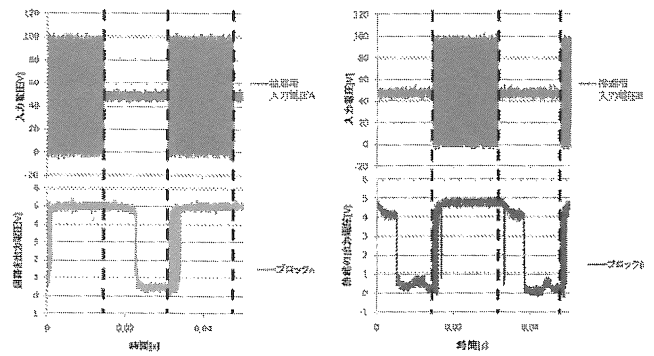


図7 浮上確認 (左:ブロックA、右:ブロックB)

ここで、間欠駆動の周波数を変化させて計測を繰り返した。その結果、図8を得た。ここでは、浮上に要する時間と降下に要する時間を示した。比較のために、浮上要素を連結せずに、単体で浮上させた場合の必要時間も示した。連結することによって、浮上時間・下降時間ともに大きくなることがわかる。浮上時間は連結していないものの2倍から4倍、降下時間は8倍から10倍となった。これらのことから、左右のブロックが同時に浮上している時間が存在することが分かる。この期間に推進用圧電素子が伸縮すると、接地部分がないため移動方向を定めることができない。したがって、制御周期の決定に当たっては、着地に要する時間と推進用圧電素子の伸縮開始の位相を詳細に検討する必要がある。

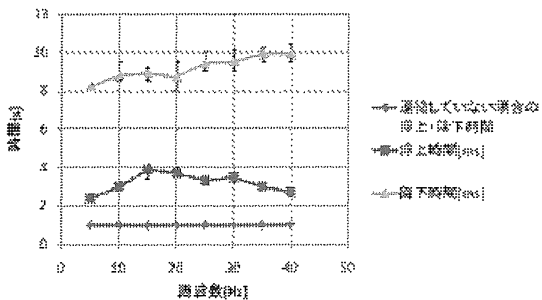


図 8 浮上時間と下降時間

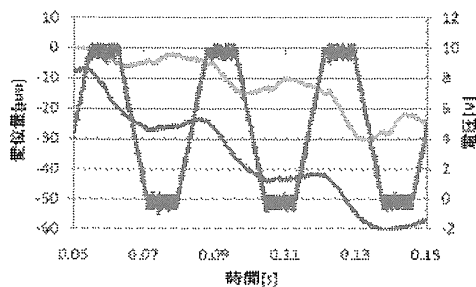


図 1 1 左方向移動結果

3.3 変位量の測定

ミニチュアロボットの微小な平面内移動量を測定する。微小変位の測定には光ファイバ変位計(岩通、ST-3711)を用いる。変位感度は  $65\text{mV}/\mu\text{m}$  で、測定範囲は最大で  $100\mu\text{m}$  程度である。ミニチュアロボットの両側から平面内の移動量を測定し、図 5 における右方向の移動を正の値として表現する。

使用する測定器の制約から、最初に、推進用圧電素子への印加電圧と、それに同期した同期用信号の例を図 9 に示す同期用信号が High の状態で推進用電圧が上昇し、同期用信号が Low の状態で推進用電圧が下降する。

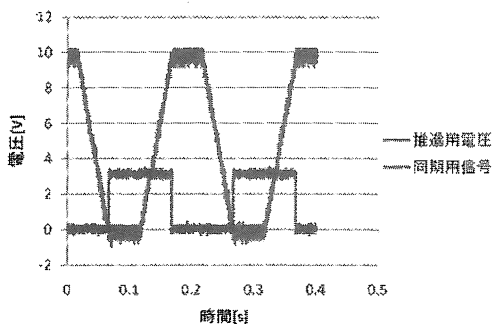


図 9 推進用電圧波形

図 9 は、5Hz の推進用圧電素子用電圧の周波数であった。しかし、実験を繰り返したところ、推進用周波数が動作に影響を及ぼしていた。そこで、もっとも移動速度の速い周波数を求めたところ 30Hz が最速であった。そこで、推進用周波数を 30Hz としたときの実験結果を図 1 0 と図 1 1 に示した。図 1 0 は右方向の移動を示す。1 周期あたり約  $8\mu\text{m}$  の変位が生じている。図 1 1 は左方向への移動を示す。1 周期あたりの変位は約  $10\mu\text{m}$  から  $15\mu\text{m}$  程度とばらついているが、これは使用した光ファイバ変位計のキャリブレーションに起因する誤差と考えている。前述した動作原理にしたがった左右両方向への移動が確認できた。

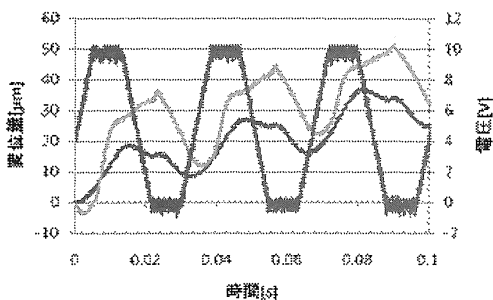


図 1 0 右方向移動結果

ミニチュアロボットの水平面内の広範囲移動を、真上から動き解析マイクロスコープ(キーエンス、VW-6000)にて撮影した。モーションアナライザにて、撮影した動画を解析し、ミニチュアロボットの移動量を測定した。このときのロボットの横方向(図 5 における左右方向)を X 軸とし、右側を正の値とした。この方法により、図 1 0、図 1 1 よりも広い範囲の動作データを得ることができる。

結果を図 1 2 と図 1 3 に示す。推進用圧電素子への制御周波数は 30Hz とした。図 1 2 は、10 秒間の右方向移動を示す。二つの浮上ブロックの移動軌跡を示した。図 1 3 も、同様に 10 秒間の左方向移動を示した。獲得データのメモリの関係で、平面移動を必ずしも再現していないが、10 秒間に右方向に  $6\text{mm}$ 、左方向には  $5\text{mm}$  の移動ができていていることがわかる。制御周波数を 30Hz としたため、1 周期あたりの移動量は右方向に約  $20\mu\text{m}$ 、左方向に  $17\mu\text{m}$  となった。

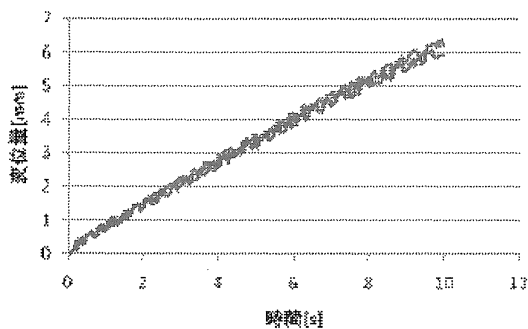


図 1 2 右方向の 10 秒間変位

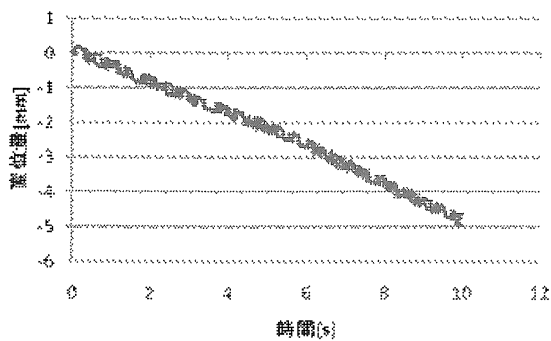


図 1 3 左方向の 10 秒間変位

#### 4. まとめ

鉛直振動する圧電素子を用いた浮上用マイクロロボットを製作し、その基本特性を求めた。浮上時の電圧電流波形より、(1) 浮上時には印加電圧と負荷電流の位相が等しい、(2) 浮上時の負荷電流の大きさは、着地時の負荷電流の約 10 倍程度に大きくなる、ことが明らかとなった。これらをもとに、センサレス浮上量推定の可能性が明らかになった。

スクイーズ膜効果によって浮上するブロックに、圧電素子の伸縮を利用した推進機構を取り入れ、直進動作を可能にした浮上型のミニチュアロボットを試作した。浮上と着地に要する時間を、電気的閉回路を用いて測定したところ、浮上に数 ms、着地に約 10ms の時間を要した。浮上する部分を連結することによって浮上と降下に要する時間が長くなることを明らかにした。浮上と着地を繰り返すインチワーム型の動作原理を採用し、直進移動を行った。スクイーズ膜効果で浮上した部分を順に移動させることによって、直進動作が可能であることを確認した。直進移動に適した推進用周波数を実験的に求め、微小動作を光ファイバ式変位計によって求め、広範囲動作をカメラビジョンによって測定した。その結果、10 $\mu$ m 程度の微小動作を繰り返しながら、インクリメンタルな動作を行っていることが明らかになった。

今後は、圧電素子の入力電圧と負荷電流を用いた変位推定アルゴリズムを明らかにする予定である。また、推定結果を用いてインチワーム型の浮上マイクロロボットの動

作制御を試みる。

本研究は愛知工業大学総合技術研究所プロジェクト共同研究の助成を用いた。記して謝意を表する。

#### 参考文献

1. 加藤治奈・早川和明・鳥井昭宏・植田明照：「圧電素子と電磁石を用いた XY $\Theta$ アクチュエータ」、電気学会論文誌 C、119 巻 1 号、pp. 57-62、1999
2. 古谷克司・河越克己：「3 自由度アザラシ型位置決め機構の移動特性の改善」、電気学会論文誌 E、126 巻 4 号、pp. 131-136、2006
3. 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、54 巻 11 号、pp.2107-2112、1988
4. Furutani and Nobuyuki Ohta, Displacement Monitoring of Stacked Piezoelectric Actuator by Observing Induced Charge, International Journal of Automation Technology, Vol. 2, No. 1, pp. 12-17 2008

(受理 平成 22 年 6 月 25 日)