

マイクロマシンの浮揚に関する基礎的研究

Basic Research for the Levitation of Micromachine

鳥井昭宏†、坂野正昭††、植田明照†
Akihiro Torii, Masaaki Banno, Akiteru Ueda

Abstract We describe the structure of a micromachine, and preliminary experimental results. The micromachine, which consists of a piezoelectric element and two masses, can jump or levitate on a flat surface. The micromachine jumps by the rectangular voltage applied to the piezo, and levitates by the sinusoidal voltage. The height of the jump and the levitation is discussed by the use of some different experimental conditions. The height of the jump of the micromachine is about 10 μm by using a rectangular voltage. The micromachine levitates in about 10 μm by the use of a sinusoidal waveform. The jump and levitation of the micromachine are measured with a displacement sensor, an optical microscope, and an electrical circuit.

1. はじめに

近年、小型の生産設備が開発されている⁽¹⁾。小型の生産設備は、消費エネルギーが少なく、占有スペースが小さく、運転コストが安価であるなど多くのメリットが期待され、エネルギーとコストの最小化を目指している。これらの生産設備には、移動、搬送、および位置決め機構を欠くことができない。筆者らの研究室では、平面上を移動する $x y \theta$ アクチュエータや高さ方向の変位が可能な6自由度アクチュエータに関する研究を行っている^(2,3,4)。

ところで、空間を自由に移動できる十センチメートルサイズの微小飛行物体や、数マイクロメートルの微小な浮揚を用いた搬送技術が開発されている。これらは、室内飛行用ヘリコプタや非接触搬送装置としての応用が期待されている^(5,6)。現在のところ、数センチメートルサイズの小型物体が3次元空間内を自在に飛行することには困難を伴うが、小型物体の数マイクロメートルの微小な跳躍や浮揚は、跳躍後の着地により発生する衝撃力を用いた加工や、接触状態・摩擦係数の制御などの応用が期待されている。

そこで本稿では、圧電素子を用いた小型物体（以下、マイクロマシンと記す）の跳躍と浮揚を目指した基礎実験とその結果について述べる。製作するマイクロマシンの構造と制御法を述べた後に、跳躍と浮揚に関する基礎的実験方法、ならびに跳躍・浮揚を確認する計測方法を述べ、最後に実験結果を示す。

2. マイクロマシンの構造

図1は、本実験で扱うマイクロマシンの一例の写真である。積層型圧電素子の上部には慣性力を用いるための

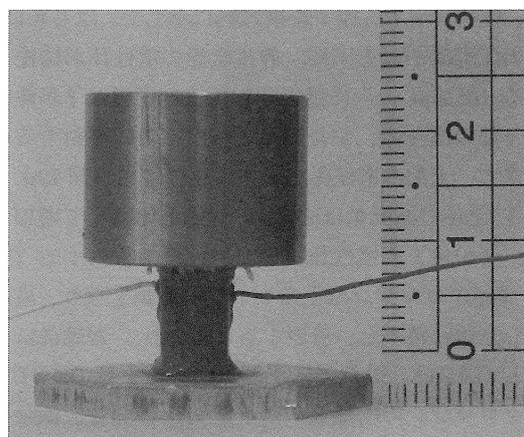


Fig. 1: Micromachine consists of a piezo and two masses.

† 愛知工業大学工学部電気学科（豊田市）

†† 愛知工業大学大学院工学研究科電気電子工学専攻

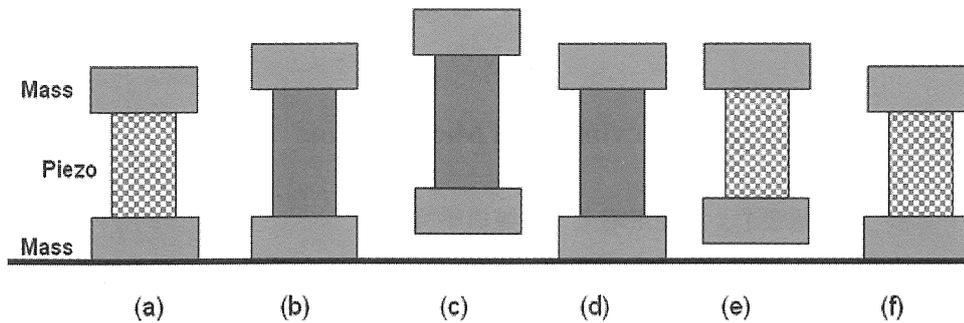


Fig. 2: Schematic diagram of a jumping micromachine; (a) original stage, (b) piezo extension, (c) jumping, (d) landing, (e) bound, and (f) end.

慣性体が、下部には慣性体を兼ねた平板が取り付けられている。下部の慣性体は、安定性を高めるために平板である。マイクロマシンは平面上に置かれ、積層型圧電素子は鉛直方向に伸縮する。平面と平板の接触面は、特別な加工を施していない。図1の圧電素子は NEC トーキン製 AE0505D08 で、大きさは $5 \times 5 \times 10 \text{ mm}$ 、DC100V 印加時に $6.1 \mu\text{m}$ 伸びる（公称値）。圧電素子の伸縮量の個体差は $1.5 \mu\text{m}$ であり、100V 印加時の伸縮量は最大で $7.6 \mu\text{m}$ 、最小で $4.6 \mu\text{m}$ である。電圧の印加には2本のリード線を用いる。圧電素子の断面積は、圧電素子が伸びる時の発生力に関係し、断面積と発生する力は比例する。圧電素子の質量は慣性体の質量と比べて非常に小さい。上部の慣性体は 30 g 、下部の平板は 15 g である。圧電素子と慣性体の取り付けにはシアノアクリレート系の接着剤を用いた。

3. 駆動方法

マイクロマシンを構成する圧電素子に方形波電圧を与えた時の動作を図2に示す。自然長の状態の圧電素子が伸長し、再び収縮する様子を模式的に示した。はじめに、自然長の圧電素子の上下に、静止状態の慣性体が接続されている（図2a）。次に電圧印加により圧電素子が伸びると、下部の慣性体、すなわち平板は下方に移動することができず、上部の慣性体が上方に変位する（図2b）。このとき、全体の運動量は図2aの状態と比較して増加している。その後、両慣性体は等しい速度で移動する（図2c）。マイクロマシンは上方への投射運動となり、最高点に達した後に落下し、着地する（図2d）。着地後にバウンドし（図2e）、最終的に平面上に静止する（図2f）。

マイクロマシンの圧電素子に十数 kHz の正弦波振動を与えた時、振動による空気膜が慣性体の周囲に発生する。

この空気膜を介してマイクロマシンは基板上方に非接触支持されて浮揚する。大きな振動振幅を得るために、駆動周波数は圧電素子と慣性体からなる構造物全体の共振周波数に限られる。

4. 計測方法

マイクロマシンの跳躍実験では、マイクロマシンの圧電素子に方形波電圧を印加する。数 Hz 程度の低周波電圧を圧電素子に印加し、断続的に跳躍を繰り返す。マイクロマシンの上部慣性体と下部慣性体の変位を、変位計を用いて計測する。

マイクロマシンの浮揚実験では、マイクロマシンの圧電素子に正弦波電圧を印加する。電圧にはオフセットを与える。十ミクロン程度の変位を得るために十数 kHz 程度の共振周波数を用いる。共振周波数は実験的に求める。跳躍実験と同様に変位計を用いてマイクロマシンの上部慣性体と下部慣性体の鉛直方向変位を計測する。さらに、浮揚実験では、図3に示す実験装置を用いてマイクロマシンと基板の間の接触状態を確認する。この装置は、直流電圧源 E、抵抗 R、マイクロマシンの下部慣性体とマイクロマシンが動作する基板の空隙の抵抗 R_G を直列に接続した閉回路である。下部慣性体と基板は金属であり、両者が接触した状態では導通状態であり、抵抗 R_G の端子電圧はゼロ、抵抗 R の端子電圧は流れる電流に比例し

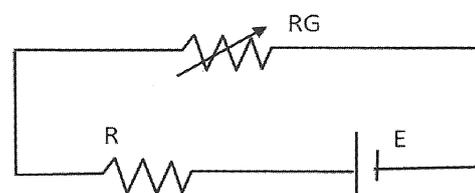


Fig. 3: Measurement circuit.

た値となる。一方、両者が非接触の状態であるとき、抵抗RGは無敵大であり、回路を流れる電流はゼロになり、抵抗Rの端子電圧はゼロとなる。すなわち、図3の抵抗Rの端子電圧を計測することによって、マイクロマシンの浮揚状態を確認することができる。

5. 実験結果

5.1 跳躍実験

マイクロマシンの圧電素子に方形波電圧を印加した時の結果の一例を図4に示す。この実験では積層型圧電素子 AE1010D16 を用いた。予備実験では、この圧電素子は印加電圧 100V に対して 12.3 μm 変位した。図4では、右側に質量 0.4kg の慣性体を用いた実験結果を、左側に質量 0.01kg の慣性体を用いた実験結果を示した。上から順に、積層圧電素子への印加電圧、上部慣性体の変位量（鉛直上方への変位を正の値として示す）、下部慣性体の変位量（鉛直上方への変位を負の値として示す）、圧電素子の変位量を示す。圧電素子の変位量は、上下の慣性体の変位量の差より求めた。

図4より、慣性体の質量により、最高到達点に違いが生じることがわかる。質量 0.4kg の慣性体を用いた実験結果（図4右）では、上部慣性体の最高到達点は 25 μm

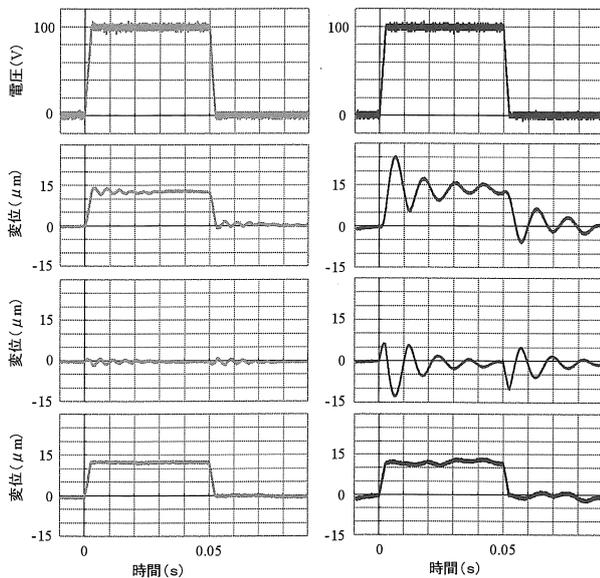


Fig. 4: Experimental results by the use of rectangular waveform. (left) experimental result with 0 kg mass (right) experimental result with 0.4 kg mass. (from top to bottom) input waveform, displacement of the top mass, displacement of the bottom mass, and the deformation of the piezo.

であり、下部慣性体の最高到達点は 13 μm である。両者の差は 12 μm であり、圧電素子の変形量と等しい。すなわち 100V の電圧が印加された瞬間に上向きの慣性力が発生し、マイクロマシンが跳躍すると考えられる。跳躍量を下部慣性体の変位をもとに評価すると、質量 0.4kg の慣性体を用いた実験での跳躍量 13 μm は、質量 0.01kg の慣性体を用いた実験での跳躍量 2 μm と、約 7 倍の違いがあった。

5.2 浮揚実験

浮揚実験の結果を図5に示す。初めに駆動周波数を決定した。上から順に圧電素子への印加電圧、上部慣性体の変位（鉛直上方への変位を正）、下部慣性体の変位（鉛直上方への変位を正）、圧電素子の変形量（上記変位量の差）を示す。低い周波数ではマイクロマシンの浮揚は確認されなかった。周波数 500Hz 以下では、上部慣性体の上下振動は印加電圧と同期し、下部慣性体は変位しないことがわかる。周波数 1000Hz 付近では、上部慣性体だけでなく下部慣性体にも変位が見られるが、現在のところ浮揚に相当するマイクロマシンの挙動は観察されず、今後より詳細な検討を行う必要がある。駆動周波数が 1000Hz 以上になると印加電圧の振幅が減少する原因は、圧電素子駆動用増幅器の性能に起因する。慣性体の変位が最大になる周波数は 14.2kHz と求められ、以下の実験における駆動周波数とした。駆動周波数における上部慣性体の変位量は最大で 18 μm 、下部慣性体の変位量は最大で 13 μm 、圧電素子の伸びは 5 μm 程度であった。なお、容量性負荷である圧電素子への印加電圧は、使用する増幅器の性能によって制限され、使用した実験機器では印加電圧の振幅や圧電素子の振動を大きくすることは困難であった。

光学顕微鏡を用いて観察した結果を図6に示す。黒色の鉄板上に銀色のマイクロマシンの下部慣性体が置かれている。圧電素子への印加電圧振幅 10V（オフセット 50V）、周波数 14.2kHz の条件で、マイクロマシンが浮揚した（図6右）。一方、駆動周波数以外では浮揚が観察されなかった（図6左）。光学顕微鏡を用いて観察したため、浮揚しているマイクロマシンと基板の間隙には光が届かず、黒色に観察される。図6の相違は黒色部分の幅であり、図6右の矢印で示した黒色部分が浮揚部分である。図6左の矢印の黒色部分と比較することにより浮揚量を求めることができる。使用した光学顕微鏡の倍率の制限から浮揚量を正確に計測することは困難であるが、マイクロマシンの浮揚は約 10 μm と求められた。また、図6左の写真と比較して図6右が不鮮明であるのは、振動の影響と考えている。

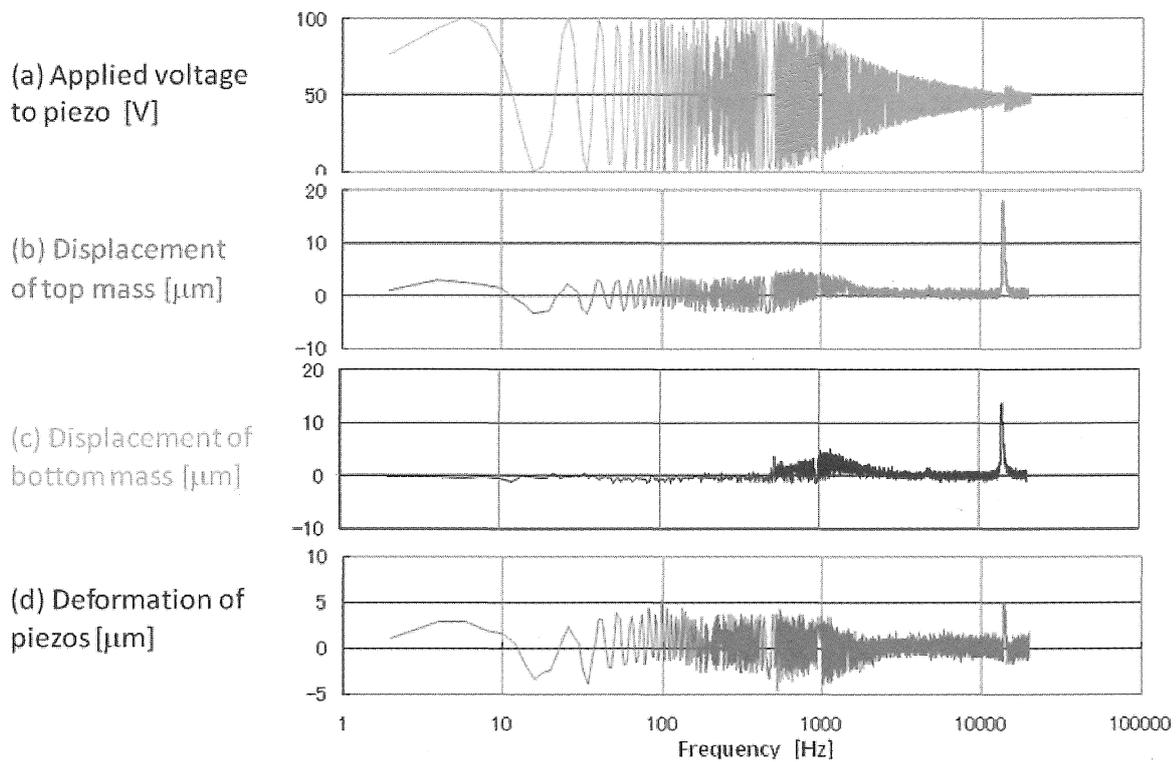


Fig. 5: Experimental results. (a) applied voltage to piezo, (b) displacement of top mass, (c) displacement of bottom mass, and (d) deformation of piezos.

振動状態のマイクロマシンの上部慣性体と下部慣性体の変位、および圧電素子への印加電圧（ 14.2kHz 、 $50\text{V}_{\text{DC}} + 10\text{V}_{\text{AC}}$ ）を図 7 に示す。マイクロマシンの圧電素子に電圧を与えた状態から、電圧をゼロにする時の変化を示した。時刻 180ms 以前の時点では、圧電素子への印加

電圧はオフセットのある交流信号であり、上部慣性体の変位量と下部慣性体の変位量の差が圧電素子の伸長量である。時刻 180ms に印加電圧をゼロにすると、下部慣性体と上部慣性体の変位量が同時にゼロとなることから、電圧印加時に浮揚していることがわかる。また、下部慣

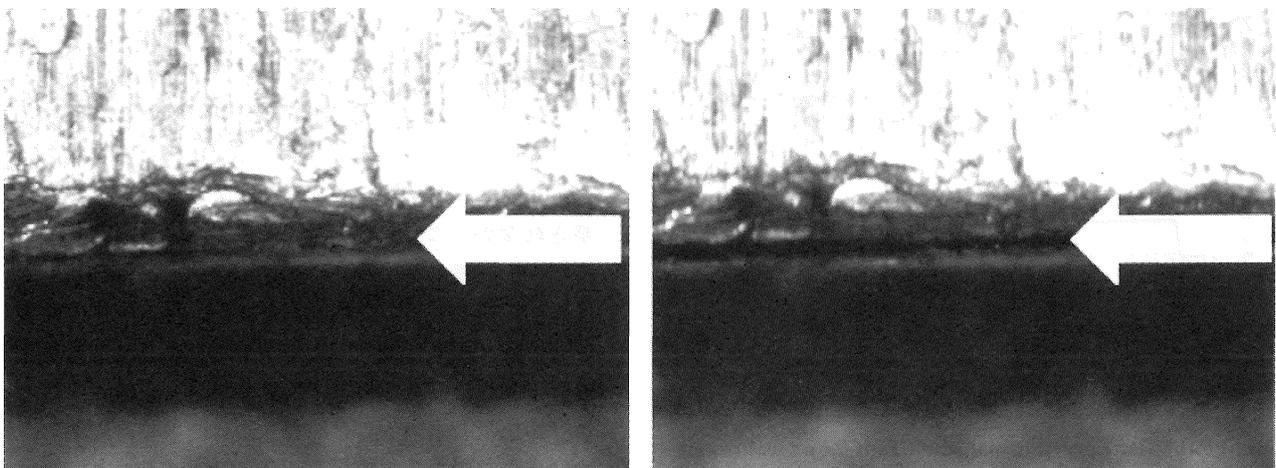


Fig. 6: Photos of the contact point of the micromachine and an iron surface. (right) piezo vibrates at the resonant frequency, (left) piezo does not vibrate. The gap indicated by the arrow in the right photo is about $10\ \mu\text{m}$.

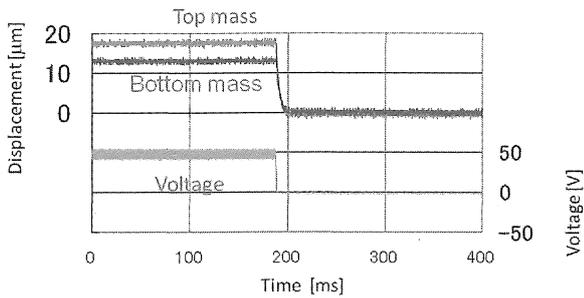


Fig. 7: Displacement of the top mass and bottom mass, and the applied voltage. The displacement of the mass becomes zero when the voltage disappears. The applied voltage is $50 V_{DC}+10V_{AC}$.

性体の浮揚高さは約 $12\mu\text{m}$ であり、振動時の上部慣性体は静止時と比較して $18\mu\text{m}$ 変位していることがわかる。両者の差は約 $6\mu\text{m}$ であり、この値が共振状態の圧電素子の伸長量である。

最後に下部慣性体と基板間の導通状態の実験結果を図8に示す。圧電素子への印加電圧がゼロの状態から計測を開始し、正弦波状電圧を与えた後に、再び印加電圧をゼロの状態とした。このときの図3の抵抗 R の端子電圧を測定した。測定結果がゼロの状態では回路を流れる電流がゼロ、すなわちマイクロマシンと基板間の抵抗 R_G が無限大、マイクロマシンと基板間が導通していないことを示す。逆に、抵抗 R の端子電圧がゼロでないときは、電源電圧が R と R_G に分圧されていること意味し、マイクロマシンと基板間が導通状態であることを示す。具体的には図3の閉回路の電源電圧に $10V$ 、抵抗 R を $10k\Omega$ とした。図8の結果は、圧電素子に正弦波状の電圧を与えられて、圧電素子が振動している間は、抵抗 R の端子電圧がゼロになっている。したがって、正弦波の印加によってマイクロマシンと基板間には接触状の無い浮揚状態であることが確認された。ただし、浮揚状態のマイクロマシンの測定結果には、商用周波数の 60Hz (周期 16.6ms) に相当するノイズが見られる。

6. まとめ

積層型圧電素子を用いたマイクロマシンを製作し、圧電素子の急速変形を用いたマイクロマシンの跳躍実験と、圧電素子に正弦波振動を与える浮揚実験を行った。その結果、圧電素子に方形波電圧を与えことによってマイクロマシンの跳躍現象を確認した。圧電素子に正弦波

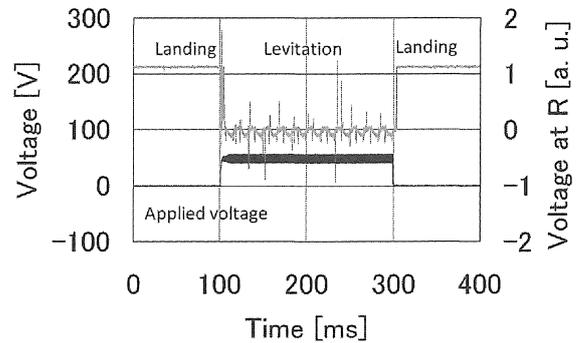


Fig. 8: Levitation by the applied voltage. While the voltage is applied to the piezo, the measured voltage at the resistance R is zero, so that the circuit is open and no current flows. The applied voltage is $50 V_{DC}+10V_{AC}$.

信号を与えることによってマイクロマシンの浮揚現象を確認した。今後はマイクロマシンの跳躍現象を利用した加工や移動制御、マイクロマシンの浮揚現象を利用した摩擦力・摩擦係数の制御や精密位置決めに取り組む予定である。

本研究は平成19年度愛知工業大学総合技術研究所プロジェクト共同研究により行われた。記して謝意を表す。

参考文献

- (1) 青山尚之・岩崎隆之・佐々木彰・深谷次助・下河辺明、小型自走機械群による超精密生産機械システム (第1報)、精密工学会誌、59巻6号、pp. 1007 - 1012 (1993)
- (2) 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XYQアクチュエータ、電気学会論文誌C、119C巻1号、pp. 57-62 (1999)
- (3) Akihiro Torii, Yoshiyuki Fukaya, Kae Doki, Akiteru Ueda, Motion of a miniature robot using three piezoelectric elements controlled by rectangular voltage, J. of Robotics and Mechatronics, Vol. 15, No. 6, pp. 602-608 (2003)
- (4) 楠慎也・鳥井昭宏・道木加絵・植田明照、圧電素子を用いたスチュワートプラットフォーム形自走マイクロロボット (第5報)、精密工学会春季大会 B01 (2008)
- (5) 磯部浩巳・久曾神煌・小島茂、圧電素子の高周波振動を利用したアクティブスクイーズ空気軸受の開発 (第1報)、精密工学会誌、65巻3号、pp. 438 - 442

(1999)
(6) Samir Bouabdallah, Pierpaolo Murriero, Roland
Siegwart, "Towards autonomous indoor micro

VTOL", *Autonomous Robots*, Volume 18, No. 2, pp.
171-183 (2005)

(受理 平成 20 年 5 月 30 日)