

振動を用いて浮上するマイクロロボットの平面移動 Transverse Displacement of a Microrobot Levitating by Vibration

鳥井昭宏†、坂野正昭††、植田明照†、北川一敬†††
Akihiro Torii†, Masaaki Banno††, Akiteru Ueda† and Kazutaka Kitagawa†††

Abstract Friction control by the use of the vibration of a piezoelectric element is used in active bearings. The aim of this report is to propose a transverse displacement of a microrobot which levitates in air by the vibration. The advantages of this work are (i) the microrobot itself vibrates and levitates, (ii) the barycentric position of the microrobot changes the moving direction, and (iii) the microrobot can move in any directions. This report shows the structure of the one degree of freedom and two degrees of freedom microrobots and some experimental results.

1. はじめに

近年、小型製品は小型生産装置によって製作されるべきであるとの発想に基づき、小型の生産設備が開発されている^(1,2)。小型の生産設備は、消費エネルギーは少なく、占有スペースは小さく、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。これらの生産設備は、従来の工場の超小型版ととらえることができ、多数の要素によって構成されている。特に、移動・搬送・位置決め機構はシステム構成上欠かすことができない。

小型物体の移動には微小な動作が要求され、微小な動作には、精密さや正確さなどが求められる。微小な動作の実現には圧電素子が注目されている⁽³⁾。圧電素子は数 nm の高い分解能を持ち、数百 N の大きな力を発生でき、微動機構の要素として重要な役割を果たす。一般に微動機構は可動範囲が狭く、圧電素子の発生する変位量（変形量）もマイクロメートル程度と微小である。そのため微小動作に適するが、動作範囲を広くするために別のアクチュエータと組み合わせて用いられることが多い。

インチワーム機構は、微小な動作を確保しつつ広い動作範囲を得る機構の一つである。インチワーム機構は変位を発生する要素と位置を保持する要素から成る。その一例が圧電素子の伸縮と電磁石などの吸着を用いた構造である。筆者らは圧電素子と電磁石を用いたインチワ

ーム機構に関する研究を行ってきた⁽⁴⁾。圧電素子の伸縮と電磁石の吸着を制御することによって、平面内の直進動作と回転動作を可能にした。しかし、吸着状態の電磁石が圧電素子の伸縮によって望まない移動を生じること、吸着していない電磁石の変位にバラツキが発生することなどの問題があり、これらは平面上を摺動しながら移動することによる摩擦に起因すると考えた。また、筆者らが開発した圧電素子の急速変形を用いた移動機構も、試行毎のばらつきが存在した⁽⁵⁾。このばらつきは、動作面の状態、例えば表面粗さや不均質な摩擦が原因であると考えられた。

そこで本稿では、原理的に摩擦を生じない構造の移動機構の開発を試みる⁽⁶⁾。鉛直方向の振動によって発生するスクイーズ膜を用いて浮揚する機構に、電磁石と永久磁石の組合せによって質量を移動する機構を搭載し、平面上を移動する機構とする。次章以降で、構造、実験方法、実験結果ならびに今後の展開について述べる。

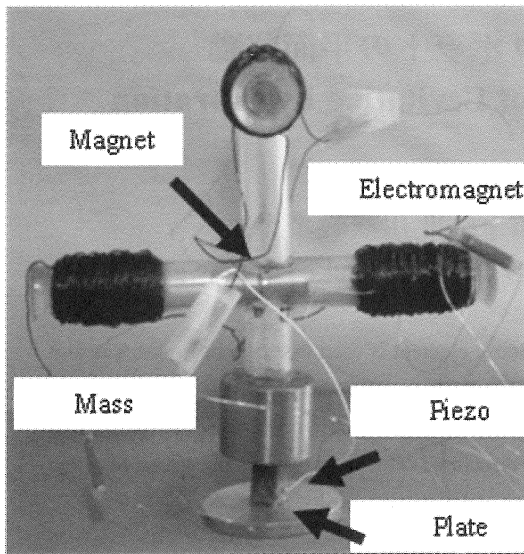
2. マイクロロボットの構造

図 1 にマイクロロボットの構造を示す。図 1 (a)は側面図である。直径 30mm のアルミ板の上に圧電素子を接着する。圧電素子は大きさ 5×5×10mm の NEC トーキョー製 AE0505D08 で、DC100V 印加時に 6.1μm 伸びる。圧電素子の伸縮量の個体差は 1.5μm であり、100V 印加時の伸縮量は最大で 7.6μm、最小で 4.6μm である。圧電素子の伸縮は鉛直方向とする。

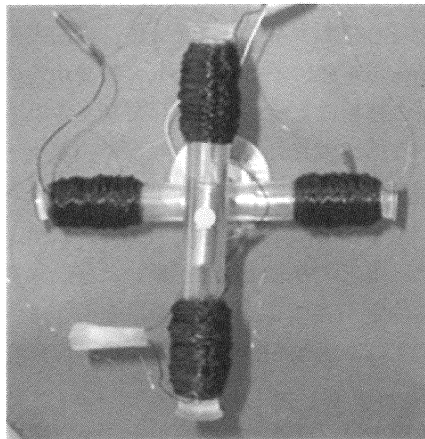
† 愛知工業大学工学部電気学科（豊田市）

†† 愛知工業大学大学院工学研究科博士前期課程
電気電子工学専攻

††† 愛知工業大学工学部機械学科



(a) Side view



(b) Top view

Figure 1: Microrobot with the mechanism which can change the center of gravity.

圧電素子の上に重さ 37g の円柱型の慣性体を取り付ける。慣性体の上に長さ 86mm のアクリルパイプを水平に取り付け、両端に 300 回巻の電磁石を製作する。アクリルパイプの内部には長さ 10mm、直径 5mm の円柱型磁石を 2 個入れる。その上に同じ構造のアクリルパイプを直角に取り付ける。図 1 (b) は上面図である。2 個のアクリルパイプが直交して配置されていることがわかる。アクリルパイプ内の磁石は、フェライト磁石の 5 倍程度の磁力を持つネオジウム磁石で、磁力は 4950G である。電磁石と圧電素子への電力供給は細いエナメル線を介して行う。エナメル線は、外力の影響を排除するために、直径 0.62mm と細いものを用いた。アクリルパイプは電磁石に

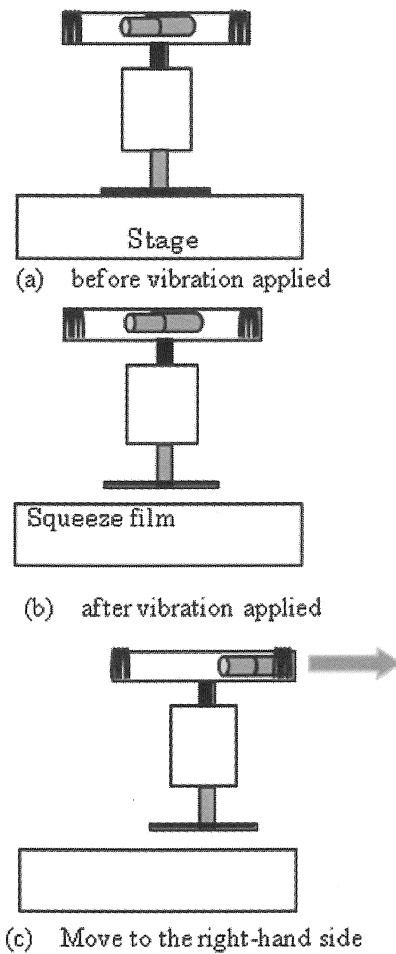


Figure 2: Schematic diagram of the principle of displacement of the microrobot.

電圧を印加した状態ではネオジウム磁石がパイプ内を移動し、磁石の移動によりロボットの重心が変化する。全体の高さは 90mm、質量は 99g となった。

3. マイクロロボットの移動原理

図 2 に、マイクロロボットの浮上と磁石の移動によるマイクロロボットの移動の模式図を示した。図 2 (a) は初期状態である。圧電素子は静止状態であり、ステージ面に接している。図 2 (b) はマイクロロボットの浮上を示す。圧電素子に高周波電圧を印加することにより、鉛直方向の振動が発生する。磁石が中央にある状態で圧電素子の振動によってマイクロロボットが浮上する。このとき基板との接触部分にはスクイーズ膜が形成され、スクイーズ膜を介してロボットが浮上する。両端に質量が取り付けられた圧電素子の共振を用い、静的な圧電素子の変位

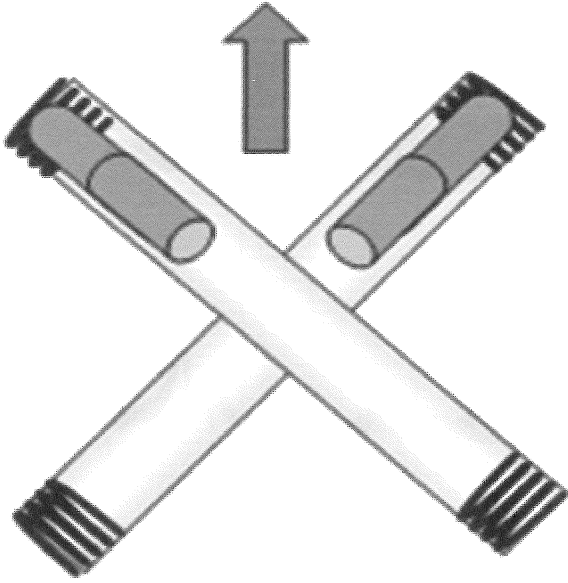


Figure 3: Schematic diagram of the 2-DOF motion mechanism.

量と比較して大きな振動振幅を得る。浮上量は圧電素子の共振現象を用いているため、圧電素子の静的な変位量より大きく数十マイクロン程度となる。共振を生じる駆動周波数は実験的に求める。ロボットが浮上した状態で電磁石を励磁するとアクリルパイプ内の磁石が移動する。磁石は長さ方向に着磁してあるため、電磁石に流れる電流の向き、すなわち電磁石の発生する磁界の方向に従って電磁石に反発あるいは吸着し、アクリルパイプ内を移動する。ネオジウム磁石の移動はマイクロロボットの重心位置の変化である。図 2(c)では磁石が右方向に移動し、マイクロロボットは右方向に移動する。電磁石の方向にマイクロロボットが移動し、磁石がアクリルパイプ中心にあるときは移動しない。

図 3 は平面内での二自由度動作への拡張を目指した模式図である。2 個の磁石が移動することによって、両者の重心位置が移動する。図 3 では、磁石の重心位置が図中の上方にあり、矢印で示した方向にマイクロロボットは移動する。

今回製作したマイクロロボットは位置を保持する機構を持たない。したがって、移動面の平面度が重要な役割を果たす。ネオジウム磁石が中心にあるときにロボットが移動してはならない。実験では 2 自由度傾斜ステージを用いて、浮揚状態のマイクロロボットが移動しないように移動面の傾斜を調整した。

4. 実験方法

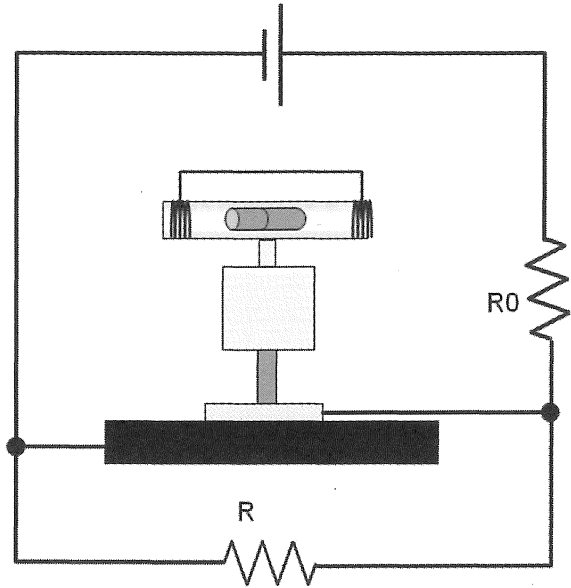


Figure 4: The circuit which measures the contact between the microrobot and surface.

重心移動機構を 2 個搭載した二自由度移動が可能なマイクロロボットの実験を行う前に、重心移動機構を 1 個搭載した一自由度移動機構の実験を行う。

はじめに、圧電素子へ高周波電圧を与えたときのマイクロロボットの浮上を確認する。発振器の出力電圧を増幅器によって増幅し、圧電素子に印加する。容量性である圧電素子が負荷であるため、周波数の増加に伴って電圧振幅が小さくなる。電圧振幅が 10V を下回らない値とした。実験では図 4 を用いてマイクロロボットの浮上を確認した。マイクロロボットが基板面に接触している状態では、ロボットと基板間の電気抵抗はほぼゼロであり、抵抗 R の端子電圧は 0V となる。一方、浮上状態でのロボットと基板間の電気抵抗は無限大であり、抵抗 R の端子電圧は電圧源の電圧 E を抵抗 R と R0 で分圧した値となる。したがって抵抗 R の端子電圧を測定することによって浮上の有無を確認できる。浮上確認用の直流電圧は 3V 程度とする。同時に、光ファイバ変位計 (Iwatsu ST3711) を用いて浮揚量を計測した。

次に、ロボットの移動を計測する。計測にはカメラビジョンを用いる。ロボットの移動は 15cm 四方とし、カメラの視野と倍率を調整した。電磁石へは最大で 10V、300mA の直流を与えた。電流の向きを変えることにより電磁石の移動方向を変えた。電流の向きはトグルスイッチを用いて機械的に変更した。1 台のカメラで上方からロボットを撮影し、リアルタイムで 2 次元位置を計測した。計測平面を鉛直上方からカメラで撮影した。測定対象のマイクロロボットには、電磁石の中央部分に測定用マークを取り付け、マークの位置を求めた。動画像に二

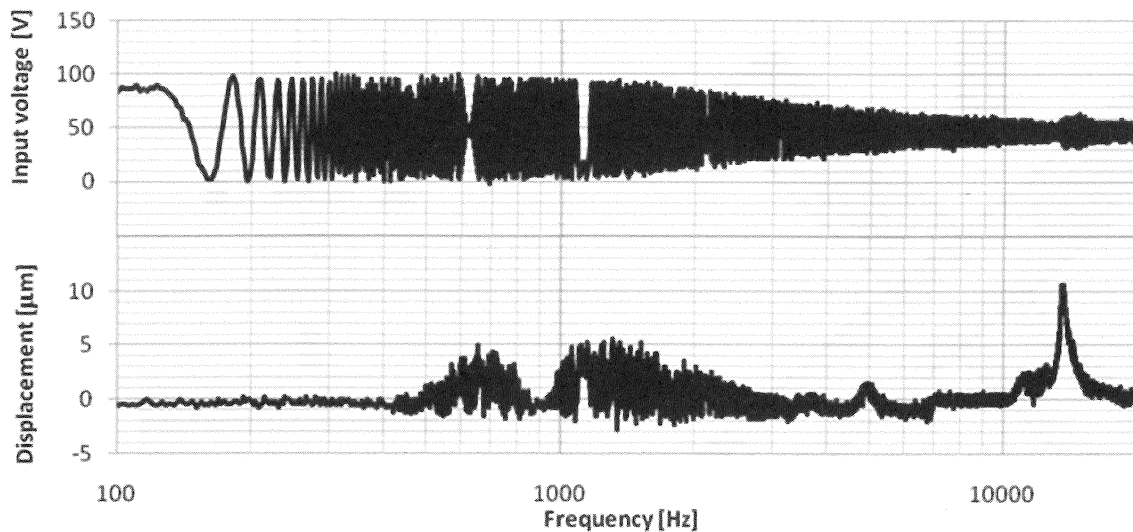


Figure 5: Input waveform and vertical displacement of the microrobot which levitates at 14 kHz.

値化演算と面積重心演算を施してマイクロロボットの画面上での位置を求めた。

5. 実験結果

5. 1 1自由度動作

マイクロロボットの上部にアクリルパイプを用いた重心移動機構を一組搭載した1自由度機構を製作し、動作確認を行った。

はじめに駆動周波数を変えて共振状態の確認を行った。図5に結果を示す。周波数を変化させた時の圧電素子への印加電圧と、その時のマイクロロボットの下部のプレートの変位量を示す。容量性負荷である圧電素子は、周波数の増加に伴って印加電圧の交流成分が減少する。使用する増幅器の特性に依存し、実験では1500Hz程度から印加電圧の交流成分が減少した。駆動周波数14kHzで印加電圧が増加し、さらにマイクロロボットの高さ変位が最大になっていることがわかる。このときの圧電素子への印加電圧の振幅は約25Vppであり、静的な圧電素子の変化量に比べて非常に大きく、圧電素子とその両端に接続された慣性体による共振状態によるものである。

共振状態での浮揚状態を、図4の回路を用いて確認した。結果を図6に示す。図6は、上から順に浮揚と着地を切替えるゲート信号(High状態で浮揚、Low状態で着地)、圧電素子への印加電圧(浮揚状態では50Vdc+10Vac、着地状態では50Vdc一定)、図4の抵抗Rの端子電圧(High状態で浮揚、Low状態で着地)、光ファイ

バ変位計による浮揚量を示す。ゲート信号に同期して、浮揚と着地を繰り返すことがわかる。なお、光ファイバ変位計の出力に重畳する約2ミクロンの振動成分の原因は明らかになっていない。また図5と図6の高さ変位は異なった値となっている。測定時の変位計のキャリブレーションが不適切だったためと思われる。

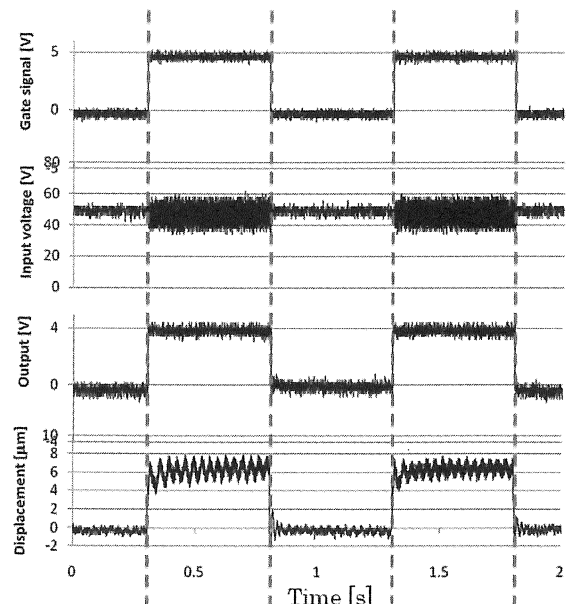


Figure 6: Experimental results of the levitation of microrobot. From top to bottom, gate signal for levitation, voltage applied to the piezo, levitation measurement and height displacement of the robot.

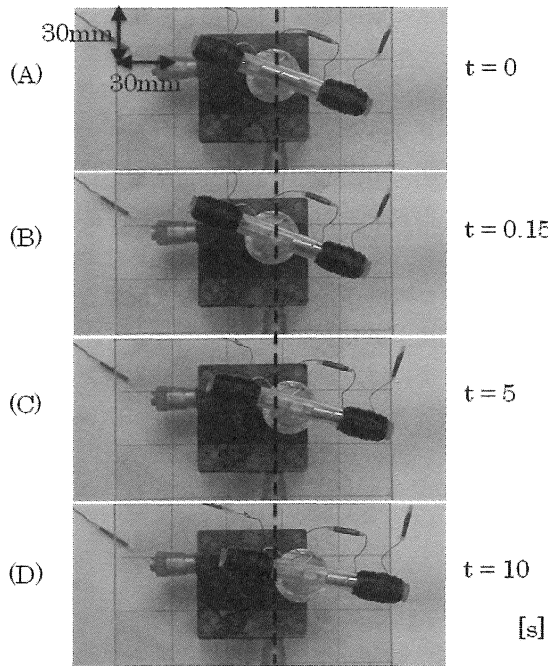


Figure 7: A sequence of photographs with one degree of freedom motion mechanism. (A) the magnet is at the center, (B) the magnet is at the right, (C) the robot moves rightward, and (D) the displacement is about 15 mm.

次に、カメラビジョンを用いて動的状態を計測した。連続写真を図7に示す。時刻0sでは中央にあるネオジウム磁石がアクリルパイプ内の右側に移動し、マイクロロボットは時間経過とともに右側に移動していることがわかる。移動時間と移動距離から、移動速度は1.5mm/s程度であった。

5.2 2自由度動作

次に、重心移動機構を2個搭載した2自由度移動機構を製作した。先の実験と同様に圧電素子を鉛直方向に振動させ、浮揚する駆動周波数を実験的に決定した。マイクロロボットが浮揚している状態において電磁石に電流を与え、浮揚状態の変化を求めた。電磁石への電流によってロボットは平面内を移動するが、移動中の基板とロボットの接触状況を確認した。結果を図8に示す。図8は上から順に、(a)圧電素子へのゲート信号(High状態で浮揚、Low状態で着地)、(b)図4の抵抗Rの端子電圧、(c)電磁石に与える電流を示した。電磁石への電流が途中で逆転しており、アクリルパイプ内のネオジウム磁石の位置を変化させたことがわかる。ゲート信号が浮揚(High)である間は、抵抗Rの出力電圧がHigh状態であり、ロボットが浮揚していることがわかる。電流の極性を変えることによってロボットの移動方向を変化させたが、その間も抵抗Rの端子電圧が非接触状態を表すHighレベ

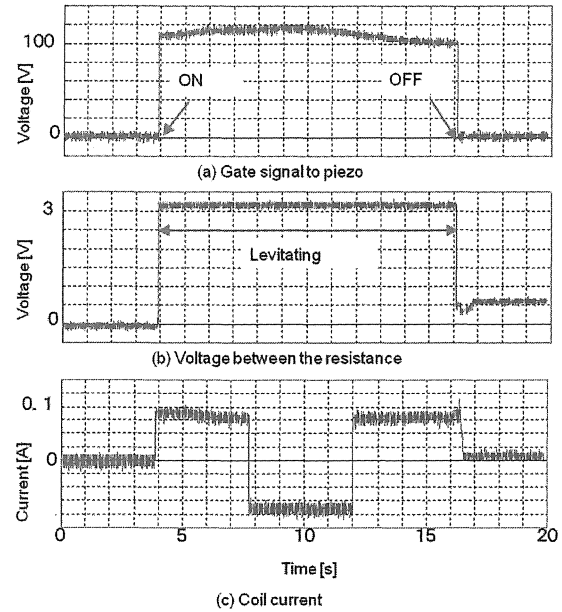


Figure 8: Levitation with 2-DOF motion mechanism.

ルにあり、ロボットが着地することなく、地面に触れることなく、浮揚を続けていることが確認できる。

移動結果の連続写真を図9に示す。右上と右下部分にネオジウム磁石があり、全体の重心が右側にある。この場合、マイクロロボットが右方向に移動していることがわかる。3枚の連続写真の時間間隔は0.66sであり、非常にゆっくりとした速度であるがマイクロロボットが重心方向に移動していることがわかる。移動距離は6mmである。

6. まとめ

振動を用いて浮上するマイクロロボットの平面移動について述べた。このマイクロロボットは圧電素子の鉛直方向の高周波振動を用いて浮上した。ロボットの上に搭載した永久磁石の移動による重心位置の変化によってロボットは移動する。永久磁石の移動には、永久磁石の両端に配置した電磁石の励磁により生じる電磁力を用いた。圧電素子の駆動周波数は実験的に求めた。はじめに一自由度に移動する機構を製作し、マイクロロボットを浮上させた。圧電素子の共振周波数を実験的にもとめ、駆動周波数とした。圧電素子の振動状態ではマイクロロボットが浮揚し、圧電素子の静止状態ではマイクロロボットが着地していることが明らかになった。カメラビジョンを用いて、浮上状態のマイクロロボットの動作を観察した。重心移動機構はネオジウム磁石と電磁石の組み合わせであり、電磁石の励磁によってネオジウム磁石を移動

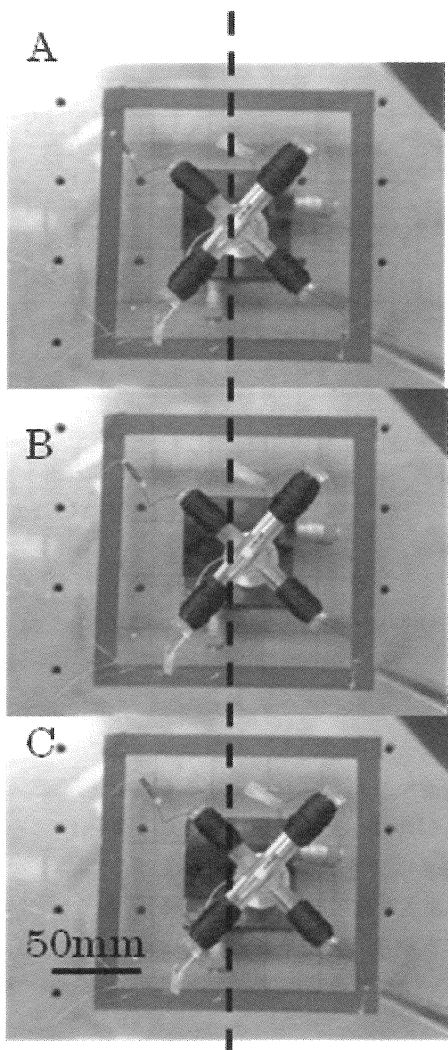


Figure 9: A sequence of photographs with 2-DOF motion mechanism. Two weight magnets are on the right side of the pipe, and the center of gravity is right-hand side of the robot. The robot slides to the right. The interval of the photos is 0.66 s.

させ、マイクロロボットの重心を移動させた。ネオジム磁石の移動方向、すなわち重心の移動方向にマイクロロボットが移動することを確認した。

次に一自由度の重心移動機構を組み合わせた二自由度移動機構を製作した。一自由度機構と同様に圧電素子の鉛直方向の共振を実験的に求め、マイクロロボットを浮

揚させた。マイクロロボットが浮揚した状態で永久磁石の移動によって生じる重心の移動方向へのマイクロロボットの移動を確認できた。

今後は、マイクロロボットに負荷を搭載した場合の浮上量の変化を明らかにし、浮上量一定制御を行う予定である。また、提案手法による平面移動は、平面内を移動する駆動力に乏しく、高速な移動には至らなかった。そこで、マイクロロボットの移動速度を支配する要素を明らかにし、速度制御も試みたい。

本研究の一部には愛知工業大学総合技術研究所プロジェクト共同研究 B の経費を用いた。実験には菅原正宏氏の協力を得た。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) J. P. Wulfsberg and J. Lehmann, Downscaling micro machine tools, 6th int. conf. of the European society for precision engineering and nanotechnology, Baden bei Wien, Austria, pp. 333-336 (2006)
- (3) 佐久田茂・小川潔・上田勝宣、超精密位置制御に関する研究、精密工学会誌、57 巻 12 号、pp. 2133 - 2138 (1991)
- (4) 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)
- (5) 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)
- (6) 坂野正昭・鳥井昭宏・植田明照、振動と重心移動を用いたリニアスライダ、2009 年精密工学会春季大会学術講演会、I37、pp. 651-652 (2009)

(受理 平成 21 年 6 月 29 日)