

圧電素子を用いた多自由度マイクロロボットの構造と動作

The Structure and Motion of a Multi-DOF Microrobot Using Piezoelectric Elements

鳥井昭宏 †, 楠慎也 † †, 植田明照 †, 道木加絵 † † †

Akihiro Torii, Shinya Kusunoki, Akiteru Ueda, Kae Doki

Abstract We describe the structure and preliminary experimental results of two microrobots. The structure of the robot is a Stewart platform using piezo elements. The robots move on a surface in a wide operation area by the principle of an inchworm. Their platforms realize minute displacement with six degrees of freedom by the parallel mechanism. The static displacement of the platforms is expressed by using the Jacobian matrix. The minute displacements obtained by the preliminary experiments were described. In the first model, the displacement was much smaller than the theoretical value, because of the stiffness of the structure. In the second model, we introduced elastic hinge mechanism which enlarges the deformation of the piezo and decreases the stiffness of the structure. The minute displacement which was obtained experimentally almost agreed with the theoretical displacement. The minimum displacement in the linear direction was 1 μm , and the maximum linear displacement was about 10 μm .

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⁾。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、運転コストは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。特にセンサ・アクチュエータや、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、微小な動作の実現には圧電素子が注目されている⁽²⁾。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場合が多い。

ところで、インチワーム機構は、広い動作範囲を確保しつつ微小動作が可能である。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^(3, 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、発生する変位は x y 平面内に限られた。そこで、複数の圧電素子を組み合わせることで動作の多自由度化を図る必要がある。

そこで本稿では、2 種類のスチュワートプラットフォーム型マイクロロボットの 6 自由度の微小動作について動作原理と基礎実験の結果を述べる。はじめに、マイクロロボットの構造を述べ、プラットフォーム面の動作と圧電素子の伸縮の関係を明らかにする。実験結果を評価し、改良型マイクロロボットを製作する。ヒンジ機構を採用してプラットフォーム面の動作範囲を拡大したマイクロロボットについて、変位拡大機構の構造を述べた上

† 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

† † † 愛知工業大学工学部機械学科

で、微小動作の実験結果について述べる。

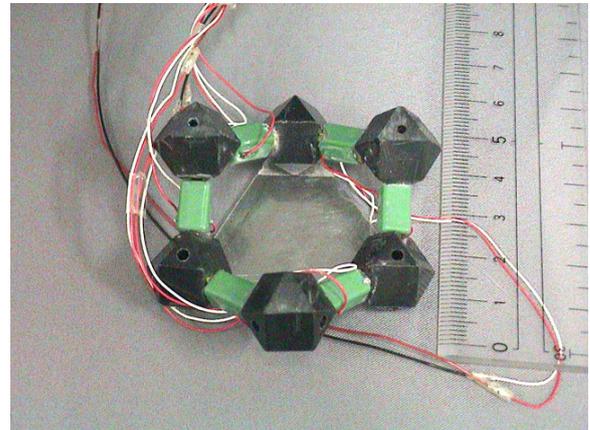
2. マイクロロボットの構造

図 1 は、筆者らが提案する 6 個の圧電素子をシュワートプラットフォーム形に配置したマイクロロボットである。本稿で製作するマイクロロボットは、6 個の圧電素子をシクロヘキサンの構造に接続したシュワートプラットフォーム型マイクロロボットである。x y 平面に置かれた状況を $z = \infty$ または $z = -\infty$ の位置から観察すると正六角形である。図 1 (a) はマイクロロボットの下面図である。マイクロロボットを上下逆に配置して撮影した。全体の大きさが約 5cm である。圧電素子は大きさ $5 \times 5 \times 10 \text{mm}$ の NEC トーキン製 AE0505D08 で、DC100V 印加時に $6.1 \mu\text{m}$ 伸びる。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。図 1 (b) は側面図である。接続部（コネクター）を含めて高さ 2cm 程度である。圧電素子を接続する 6 個の接合部は樹脂製である。全体の質量は 30g である。表面上に接する接続部分（黒色）を「脚」、その他の接続部分を「頂点」とする。

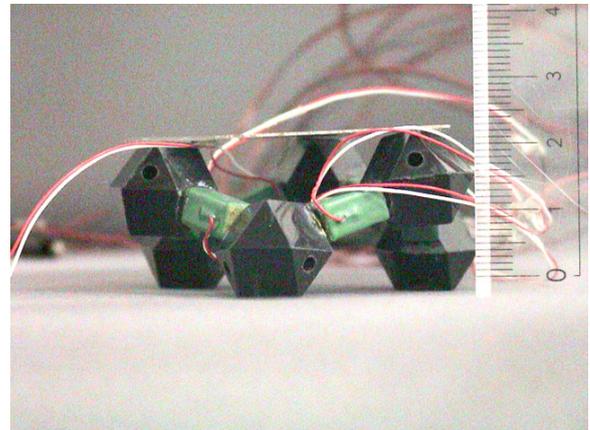
このマイクロロボットの特徴は、その形状にある。この構造は炭素化合物の六員環構造を模倣したものであり、炭素原子間の結合部分に積層型圧電素子を配置した。圧電素子の接続角度は炭素化合物の SP_3 混成軌道を模倣し、炭素原子を中心とした空間的に等間隔な 4 方向の電子雲を積層型圧電素子の伸縮方向として対応付けた。隣り合う圧電素子の成す角は 109.5 度であり、圧電素子を接続するコネクターが炭素原子に相当する。圧電素子の接続角度には大岩らの報告もあるが⁽⁵⁾、ここではシクロヘキサンの六員環構造を模倣する。基板に接触する 3 個の脚は正三角形を構成し、その一辺、すなわち脚と脚の間の距離は 41mm である。同様に基板に接触していない 3 個の頂点も正三角形を構成し、頂点と頂点間の距離は 41mm である。頂点と脚の距離 L は 25.7mm である。頂点は三角形のプレートに接着し、常に正三角形の配置を維持する。これらの対応によって有機化合物の構造を模倣した多種類のマイクロロボットを製作可能であり、有機化合物の構造に基づき一意に決定される。使用する圧電素子の数を増加させることによって、膜構造ロボットや立体マイクロロボットなどの実現が期待される。

図 1 の試作機は脚に基板とロボットの間位置を保持する力が働かない。脚に電磁石を用いるなどして保持力を発生させることにより、インチワームの原理を用いた移動が可能になる。

3. マイクロロボットの動作原理



(a) 下面図



(b) 側面図

図 1 マイクロロボット

このマイクロロボットは、2つの動作モードを用いることで広い可動範囲とプラットフォーム部分の多自由度動作を実現する。自走モードでは圧電素子を振動させることにより超音波モータと同様の原理でロボット本体が移動する。このモードは可動範囲が広く数 mm/s 程度の動作を行うが、動作は x y 平面内の並進と回転の 3 自由度に制限される。微動モードでは各圧電素子の伸びによりロボット上部に設置されたプラットフォームの姿勢を 6 自由度で変位させることができる。このモードでは可動範囲が圧電素子の変位程度に制限される。

マイクロロボットの動作を表す座標系を図 2 に示す。x y 平面上に置かれたロボットの高さ変位 z と、各軸周りの角度変位を示した。圧電素子をそれぞれ Piezo 1 から Piezo 6 とした。微動モードにおける動作の一例を図 3 に示す。図中の黒い接合部は脚を示している。頂点が正三角形のプラットフォームを支持している。頂点と脚の間の距離を L 、圧電素子 Piezo 1 から Piezo 6 に対応する圧電素子の伸びを dL_1 から dL_6 とする。ここで、脚の位

置が変化しないと仮定し、圧電素子を L_n+dL_n (n は1から6)に伸ばすことで z 軸方向の高さ変位が得られる。6 個の圧電素子の伸縮量を変えることによって6 自由度の動作が可能であり、頂点に支持されたプラットフォームの位置と姿勢を微小に変えることができる。

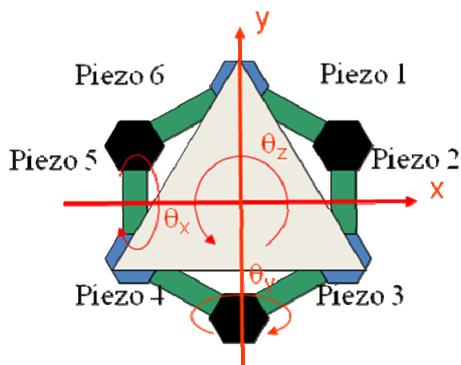


図2 マイクロロボットの座標系

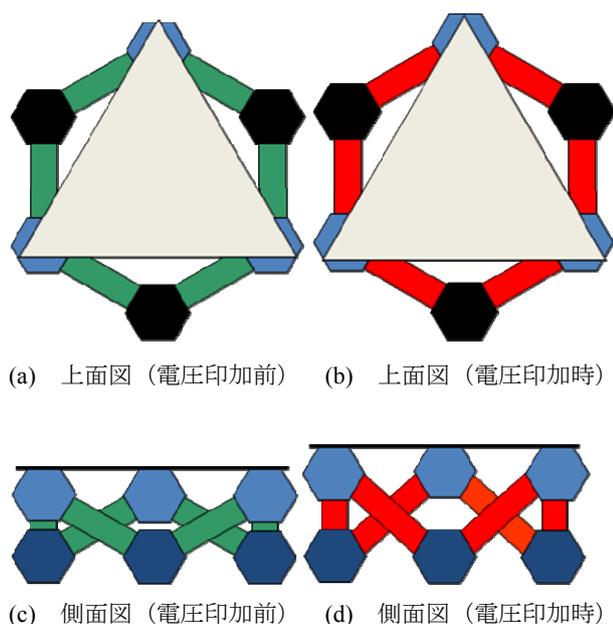


図3 プラットフォームの高さ変位

このとき、プラットフォームの微小な並進変位 (dx, dy, dz) と角度変位 ($d\theta_x, d\theta_y, d\theta_z$) より、微小変位ベクトル $\mathbf{dp}=(dx, dy, dz, d\theta_x, d\theta_y, d\theta_z)^T$ を定義する。また、圧電素子の微小変形ベクトル $\mathbf{dq}=(dL_1, dL_2, dL_3, dL_4, dL_5, dL_6)^T$ を定義する。両者の間には、

$$\mathbf{dp}=\mathbf{J} \mathbf{dq} \quad (1)$$

の関係がある。ここで、 \mathbf{J} はヤコビ行列であり、6 行 6 列の正方行列である。

ヤコビ行列の計算結果を式(2)に示す。脚と頂点の間の

長さを $L=25.7 \text{ mm}$ 、ステージの微小変位量 dx, dy, dz を $0.001\mu\text{m}$ 、微小角度変位 $d\theta_x, d\theta_y, d\theta_z$ を 0.001mrad とし幾何学的計算によって求めた。具体的には、 $\mathbf{dp}=(1\mu\text{m}, 0, 0, 0, 0, 0)^T$ を与えた時の圧電素子の変形量ベクトル \mathbf{dq} を幾何学的に求める。同様に $\mathbf{dp}=(0, 1\mu\text{m}, 0, 0, 0, 0)^T, (0, 0, 1\mu\text{m}, 0, 0, 0)^T, (0, 0, 0, 1\mu\text{rad}, 0, 0)^T, (0, 0, 0, 0, 1\mu\text{rad}, 0)^T, (0, 0, 0, 0, 0, 1\mu\text{rad})^T$ に対して得られる各 \mathbf{dq} を連立させ、それらを解くことによって \mathbf{J} を求めた。

$$\mathbf{J}=\begin{pmatrix} -0.40 & -0.20 & 0.20 & -0.20 & 0.20 & 0.40 \\ 0.00 & -0.35 & 0.35 & 0.35 & -0.35 & 0.00 \\ 0.50 & 0.50 & 0.50 & 0.50 & 0.50 & 0.50 \\ 42 & 0 & -42 & -42 & 0 & 42 \\ -24 & -48 & -24 & 24 & 48 & 24 \\ 9 & -9 & 9 & -9 & 9 & -9 \end{pmatrix} \quad (2)$$

ここで、上3行の要素は無次元で、下3行は rad/m の単位である。

圧電素子の微小変位とプラットフォームの変位の例を示す。例えば、全ての圧電素子に $1\mu\text{m}$ の変位を与えると $\mathbf{dp}=(1\mu\text{m}, 1, 1, 1, 1, 1)^T$ となり式(1)(2)より $\mathbf{dq}=(0, 0, 1\mu\text{m}, 0, 0, 0)^T$ が得られる。また dL_1, dL_3, dL_5 に $1\mu\text{m}$ の変位を、 dL_2, dL_4, dL_6 に $-1\mu\text{m}$ の変位を与えると、同様に $\mathbf{dq}=(0, 0, 0, 0, 0, 1 \mu\text{rad})^T$ と求まり、 z 軸周りの角度変位が得られる (図4)。

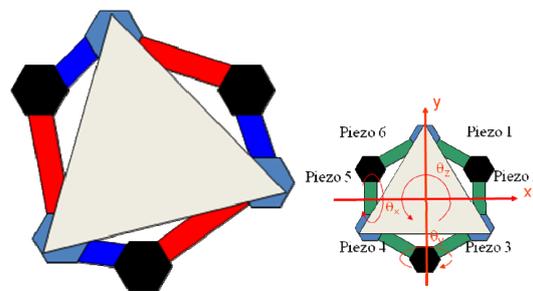


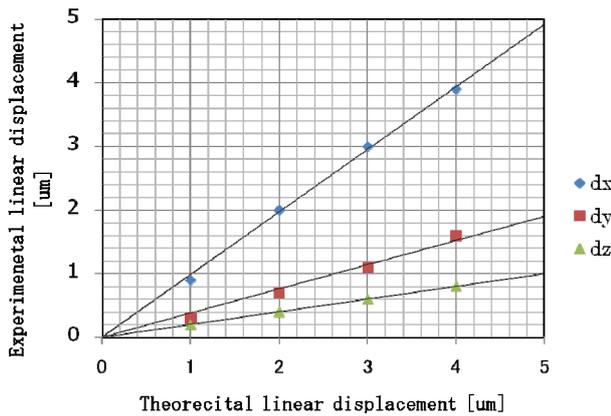
図4 z 軸周りの角度変位

4. 実験および実験結果

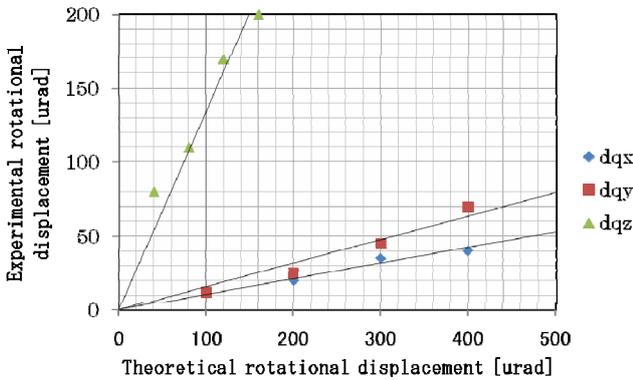
マイクロロボットの3個の脚を基板に固定し、プラットフォームの変位を計測した。圧電素子の変位量は数 μm であり、静電容量変位計 (Iwatsu ST3512) と光ファイバ変位計 (Iwatsu ST3711) を用いた。

実験結果を図5に示す。圧電素子の伸縮量を $0.061 \mu\text{m/V}$ 一定と仮定し、式(1)(2)を用いて横軸の理論値を得た。図5(a)の直線変位の結果では、 x 軸方向の変位量は概ね理論値と一致したが、 y 軸方向、 z 軸方向の変位量は理論値の20%から40%程度と大きく異なった。図5(b)の角度変位の結果では、 z 軸周りの回転角度変位 ($d\theta_z$) を

dqz と表示)はほぼ理論通りの値が得られたものの、x 軸周りの角度変位(dqx と表示)と y 軸周りの角度変位(dqy と表示)は理論値の 10%から 20%と小さな値となった。理想的には圧電素子の接合部分は多自由度対偶であるが、実際には固定されており圧電素子の伸縮がプラットフォームの変位に反映されなかったためと考えられる。そこで、次章ではヒンジ機構を用いたマイクロロボットを製作する。



(a) 直線変位



(b) 回転角度変位

図 5 直線変位と回転変位の計測結果

5. ヒンジ機構を用いたマイクロロボット

図 6 のヒンジ機構は、左右方向に伸縮する圧電素子、圧電素子の上下におかれたプレート面、それらを連結するレバーよりなる。レバーとプレート、レバーと圧電素子の連結部は回転対偶と仮定する。圧電素子の左右方向の変形がプレートの上下方向の変位に変換される。圧電素子が dL だけ伸びると、プレート間隔は da だけ変化する。このときの da は、圧電素子の伸縮量 dL と変位前のレバーの角度 θ を用いて

$$\delta a = \frac{\delta L}{\tan \theta} \quad (3)$$

と表される。したがって、 $\theta < 45^\circ$ であれば圧電素子の伸びよりも変位が拡大される。今回は $h=10\text{mm}$, $w=25\text{mm}$ とし、圧電素子の伸びに対して 5 倍の変位が得られるよう $\tan \theta=0.2$ の機構を製作した。

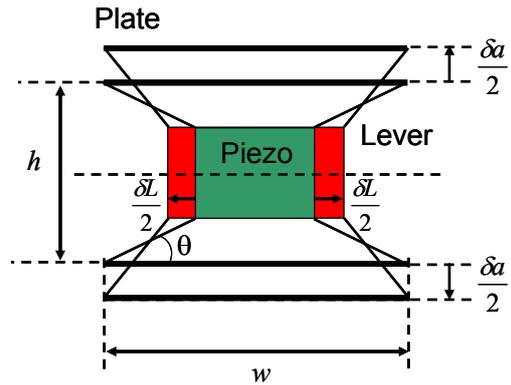
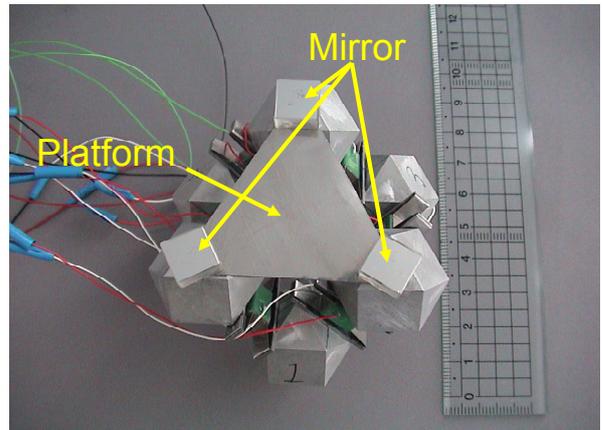
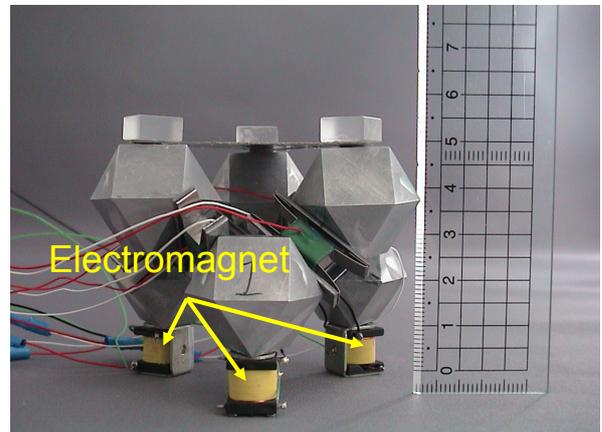


図 6 変位拡大機構



(a) 上面図



(b) 側面図

図 7 ヒンジ機構を用いたマイクロロボット

製作したマイクロロボットを図7に示す。ロボットは図6で示した6個のヒンジ機構を用いてスチュワートプラットフォームを構成している。圧電素子は前述ものを用いた。弾性ヒンジは厚さ0.3mmのバネ材SUS304を用いている。圧電素子を六員環に接続する6個の接合部はAl2024(超ジュラルミン)である。ロボットの大きさは73×70×53mmで質量は163gである。図7では吸着素子として電磁石が取り付けられている。電磁石を励磁し、脚を固定した状態でヒンジ機構を動作させ、プラットフォームを6自由度に変位させる。基板に接触した3個の脚は正三角形を構成し、その一辺、すなわち脚と脚の間の距離は42.3mmである。頂点には三角形のプラットフォームを接着し、常に正三角形の配置を維持する。プラットフォーム上には計測用のミラーが設置されている。図1のマイクロロボットと形状に多少の相違があり、ヤコビ行列を再計算したところ、

$$J = \begin{pmatrix} -0.48 & -0.24 & 0.24 & -0.24 & 0.24 & 0.48 \\ 0.00 & -0.42 & 0.42 & 0.42 & -0.42 & 0.00 \\ 0.28 & 0.28 & 0.28 & 0.28 & 0.28 & 0.28 \\ 23 & 0 & -23 & -23 & 0 & 23 \\ -13 & -26 & -13 & 13 & 26 & 13 \\ 10 & -10 & 10 & -10 & 10 & -10 \end{pmatrix} \quad (4)$$

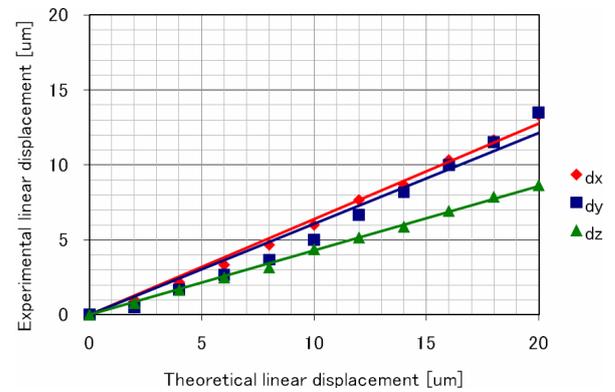
であった。上3行の要素は無次元、下3行はrad/mの単位を持つ。

前章と同様に、圧電素子の伸びが電圧に比例し、ヒンジ機構の変位が理論通りであると仮定する。プラットフォームが直線変位 dx , dy , dz と回転変位 $d\theta_x$, $d\theta_y$, $d\theta_z$ を得られるように圧電素子を伸縮させる。プラットフォーム面の変位を $20\mu\text{m}$ まで、角度変位を $800\mu\text{rad}$ まで変位させた。実験結果を図8に示す。横軸が理論値、縦軸が実験値を示す。 $d\theta_x$ と $d\theta_y$ はこのスケールのグラフでは違いを認識できない程度に一致している。各変位方向における変位量は dx , dy が理論値の約60%、 dz が45%、 $d\theta_x$ (dqx と表示)、 $d\theta_y$ (dqy) が30%、 $d\theta_z$ (dqz) が83%と全体的に理論値より小さくなった。しかしながら、圧電素子の伸縮に伴う弾性が増加したため、実験結果が理論値に近づいた。

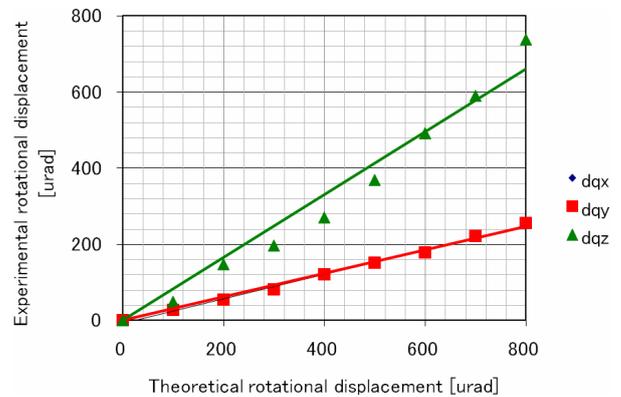
6. まとめ

圧電素子を組み合わせた6自由度マイクロロボットの微小変位について述べた。この6自由度マイクロロボットは超音波モータの原理、あるいはインチャームの原理を用いた粗動が可能であることと、スチュワートプラットフォームのメカニズムに従って微動が可能であることを

述べた。はじめに六員環構造のマイクロロボットのプラットフォーム面の動作を理論的に明らかにした。ヤコビ行列を用いて、微動モードにおける動作を解析し、実験結果と比較した。実験結果は理論解析結果と大きく異なった。そこで、弾性ヒンジによる変位拡大機構を用いた圧電アクチュエータを使用することで、微動モードにおける変位を拡大した。主に変位を拡大することを目的とした形状設計を行ったため、必ずしも接続部の自由度を増したとは言えないが、変位量を増加させることができた。その結果、直進方向に約 $10\mu\text{m}$ 、回転角度方向に約 $200\mu\text{rad}$ の最大変位を得ることができ、最小変位は直進方向に $1\mu\text{m}$ 、回転角度方向に $50\mu\text{rad}$ であった。



(a) 直線変位



(b) 回転角度変位

図8 ヒンジ機構を用いたマイクロロボットの微動計測

今後は、ヒンジ機構の形状設計を見直し、プラットフォーム部の6自由度微動の計測、多自由度微動機構の設計法を確立する予定である。さらに、インチャームの原理を用いた自走を行わせ、画像認識を用いたフィードバック制御による自走モードの動作制御や、粗動(自走)モードと微動モードを組み合わせたプラットフォームの移動制御をマイクロロボットに実装する予定である。

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) 佐久田茂・小川潔・上田勝宣、長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)
- (3) 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)
- (4) 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)
- (5) 大岩孝彰・平野正和、パラレルメカニズムを用いた 6 自由度精密運動機構、精密工学会誌、65 巻 10 号、pp. 1425 - 1429 (1999)

(受理 平成 20 年 3 月 19 日)