

マイクロロボットの 3次元位置計測

Three-Dimensional Position Measurement of a Microrobot

川根祐輔[†], 道木加絵[†], 鳥井昭宏[†], 植田明照[†]
Yusuke KAWANE, Kae DOKI, Akihiro TORII, Akiteru UEDA

Abstract Many microrobots with various types of sensors and actuators have been developed. We propose three-dimensional position measurement of a microrobot using position sensitive detectors (PSDs), since its dimension is suitable for the microrobot. We install the PSDs on the microrobot actuated by piezoelectric elements and electromagnets, and we measure the linear and rotational displacement of the microrobot.

1. はじめに

近年、超精密加工技術やマイクロマシニング技術の発達により、様々なマイクロパーツやアクチュエータおよびセンサが容易に供給されるようになってきている。このことはマイクロ部品を効率的にパッケージングする技術が要求されるマイクロロボットの開発に大きく役立っていると言える。すでに多くのマイクロロボットが開発されており、管内の欠陥検査用、ホビー用あるいは精密計測機器用として多くの成果が発表または市販されている。これらは更に実用化を目指して小型化するとともに、各種のセンサ、アクチュエータおよびコントローラを搭載し、自律的に動作するように開発が進められている。

一般にマイクロロボットにはその特徴の 1 つである微動機構が最初から備わっていると言える。しかし位置決め機能が決められた位置に正確に停止し、その位置を外乱に対しても維持する機能であると定義すると、これは自己位置認識機能を内蔵することが難しいマイクロロボットにとって最も困難な機能の 1 つであると言える。これは同時に実用化の大きな障害にもなっている。そのためこれまでの多くの試みは、まずあらかじめ準備した非接触式の精密変位検出器によりマイクロロボットの位置を計測し、所定の位置に停止するように駆動信号を調整している。この時、使用される位置計測器は適当な測定レンジと精度を有することは言うまでもない。

微細作業用のマイクロロボットを精密に制御する場合、これらの精密な 2 次元または 3 次元位置計測が重要になる。ところがマイクロロボットの 2 次元位置を精密に測定し、位置決めする有効な手段はあまり検討されていない。この場合、一般的にはまずカメラを上部に設置しマイクロロボットに輝点を装着し、画像解析装置を介して絶対座標系で 2 次元座標値を取り出し、マイクロロボットの軌道を制御する方法(ビジュアルフィードバック)が

知られている。この方法は汎用ロボットの軌道制御技術としては一般的であり、成功例も多く紹介されているが、マイクロロボットに適用する場合は、特に広範囲にわたって精度を保証することが難しいことが知られている¹⁾。

カメラビジョンを用いた方法では、CCD カメラを用いてマイクロロボットの位置を計測する。計測範囲の上方(天井)に CCD カメラを設置し、マイクロロボットには LED などの光点を搭載する。画素の大きさ以下の計測は困難であるため、CCD カメラの画素の大きさとカメラビジョンの広さにより、位置計測精度が決まる。例えば、1 m 四方の測定範囲に対して、100 万画素(1000 画素四方)の CCD カメラを用いると、測定精度は 1 mm 程度である。測定範囲が広くなると測定精度は劣化する。マイクロロボットに搭載する LED を 2 個以上にすることにより、2 個の光点の位置を用いて姿勢の計測も可能である。

光干渉法を用いた方法では、マイケルソン干渉計などの 2 光束干渉計や様々な原理を用いた干渉計を用いて、マイクロロボットの位置を計測する。計測範囲と同一平面状に干渉計を設置し、マイクロロボットにはミラーなどの光学素子を搭載する。位置の計測の精度は使用する光源の波長に依存し、マイクロメートルから最高でナノメートル程度の精度を得ることができる。しかし、角度変化の計測は困難であり、主として直線変位の計測に適している。

近接センサを用いた方法では、渦電流変位計や静電容量変位計などの近接センサをマイクロロボットの近傍に配置し、マイクロロボットの位置を計測する。これらのセンサはマイクロロボットの近傍に配置され、マイクロロボットには金属など用いるセンサに適したターゲットを搭載する。これらのセンサは単体での位置計測精度は、ナノメートルからサブマイクロメートルに達するものもあるが、マイクロロボットの姿勢の変化がターゲットの

[†] 愛知工業大学 工学部 電気工学科 (豊田市)

角度変化を起こし、直線方向の変位計測結果と干渉する。すなわち、角度変化と位置変化の分離が困難である。また、測定範囲がたかだか数ミリメートル程度と非常に狭い。

近接センサや干渉計など多くのセンサは、ターゲットの向きが変わると検出誤差が大きくなる。例えば、静電容量式変位センサは、ターゲットの姿勢変化による静電容量の変化と、センサヘッドとターゲット間の距離の変化による静電容量の変化を分離して検出することが原理的に不可能である。渦電流式、光反射式の変位センサも同様である。干渉計を用いた変位センサもターゲットの姿勢変化が光路長の変化となるため、距離計測の誤差となる。すなわち、これらのセンサは原理的に姿勢変化と位置の変化の干渉を取り除くことが不可能であり、姿勢の変化に影響されない位置姿勢計測方法が望ましい。また、近接センサを用いるためにはターゲットの近傍に近接センサを配置しなければならず、計測に要する時間の面でも改善すべき点が多い。そこで、3 個の位置検出素子 (Position Sensitive Detector, PSD) を用いた 3 次元の位置計測方法を提案し、従来のマイクロロボットの位置計測よりも簡単で、位置と姿勢の計測が干渉せず、しかも高い精度を有する方法を提案する。

2. マイクロロボットの構造

図 1 にマイクロロボットの下面図を示す。マイクロロボットは 3 個の電磁石と 3 個の圧電素子で構成され、上部には鉄製の円形ステージが設置されている。電磁石は鉄心にエナメル線を 1800 回巻いた構造である。鉄心の一端はねじ形であり、円形ステージにねじ込まれている。正三角形の頂点に位置する電磁石の間に圧電素子 (トーチン, AD020308) が圧入されている。圧電素子の大きさは、 $2.0 \times 3.0 \times 9.0 \text{ mm}^3$ である。圧電素子の長さによって決められるマイクロロボットの直径は 28 mm である。マイクロロボットは電磁力を利用するため、磁性体材料上でのみ動作する。円形ステージ、電磁石および磁性体基板の間には、原理的に空隙が存在しない。そのため、コイルから発生する磁束は磁性体材料内の閉磁路を通過し、大きな磁束と大きな電磁力を得ることができる²⁾³⁾。

図 2 に位置検出素子 (Position Sensitive Detector, PSD) を搭載したマイクロロボットを示す。マイクロロボットのステージまでの高さは 16.5 mm である。3 次元の位置計測を実現するために、3 個の PSD (浜松ホトニクス, S3932) をステージ上に搭載する。マイクロロボットのステージの大きさを考慮して、大きさ $1.5 \times 4.8 \times 15.2 \text{ mm}^3$ の PSD を使用する。マイクロロボットは電源を搭載しておらず、圧電素子と電磁石へのエネルギーは細い配線によって供給される。PSD によって得られる

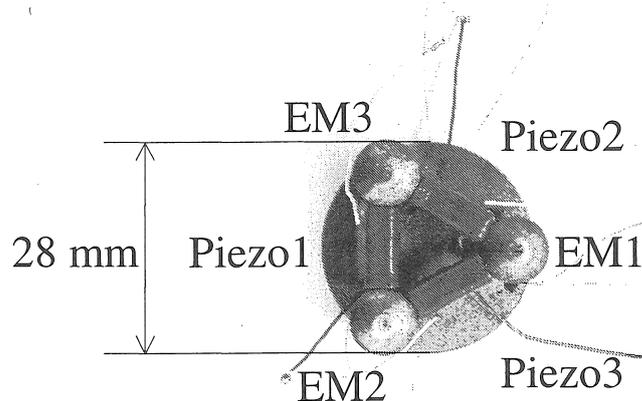


図 1 : マイクロロボットの下面図

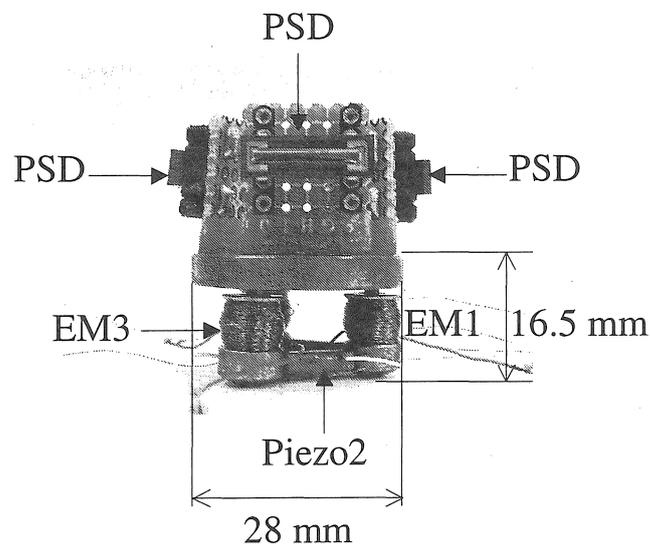


図 2 ; マイクロロボットの下面図

位置信号は、マイクロロボットの外部に設置された PSD 信号処理回路 (浜松ホトニクス, C3683-01) に細い配線によって送られる。

マイクロロボットの動作原理は、インチワーム機構と類似している。電磁石はマイクロロボットの保持機構として使用され、圧電素子はマイクロロボットの変位の発生素子として使用される。マイクロロボットは、電磁石による基板への吸着と圧電素子の伸縮のタイミングを制御することによって、微小な動作を実現する。電磁石の吸着と圧電素子の伸縮に着目すると制御周期は 3 動作からなるが、電磁石に流す電流の向きを考慮すると制御周期は 6 動作からなる。マイクロロボットと磁性体基板との間で閉磁路を形成するために、電磁石は 2 個 1 組として動作する。電磁石への印加電圧は三相交流と同様に

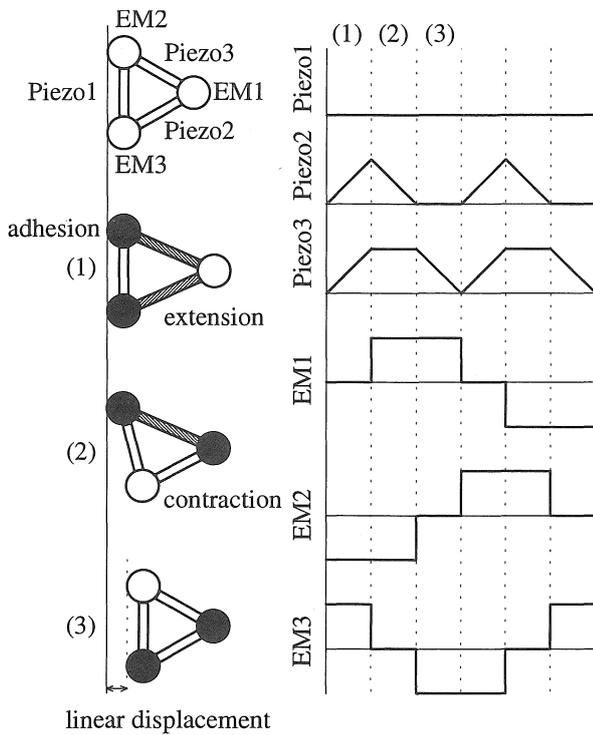


図3：マイクロロボットの直線変位の動作原理と制御波形

120° ずつ位相の異なった波形である。3 個の電磁石の中の常に 2 個の電磁石に逆極性の電圧を印加し、その 2 個の電磁石を通る閉磁路によってマイクロロボットは基板に吸着する。この吸着のタイミングと圧電素子の伸縮のタイミングを制御し、直線変位と回転変位を実現する。

図3にマイクロロボットの直線変位の動作原理と制御波形を示す。(1), (2), (3)の動作を繰り返すことによって、マイクロロボットはEM1方向の直線変位を実現する。EM2, EM3方向の直線変位も同様である。

図3に示された直線変位 x は、圧電素子の伸びの量を ΔL とすると、

$$x = \frac{\Delta L}{\cos(\pi/6)} = \frac{2}{\sqrt{3}}\Delta L \quad (1)$$

と求められる⁴⁾。

図4にマイクロロボットの回転変位の動作原理と制御波形を示す。(1), (2), (3)の動作を繰り返すことによって、マイクロロボットは左回りの回転変位を実現する。右回りの回転変位も同様である。図3と図4に示した電磁石EM1, EM2, EM3の制御波形は同一の波形である。図4に示された回転変位 θ は、圧電素子の長さを L 、圧電素子の伸びの量を ΔL とすると、

$$\theta = \frac{2\sqrt{3}\Delta L}{L} \quad (2)$$

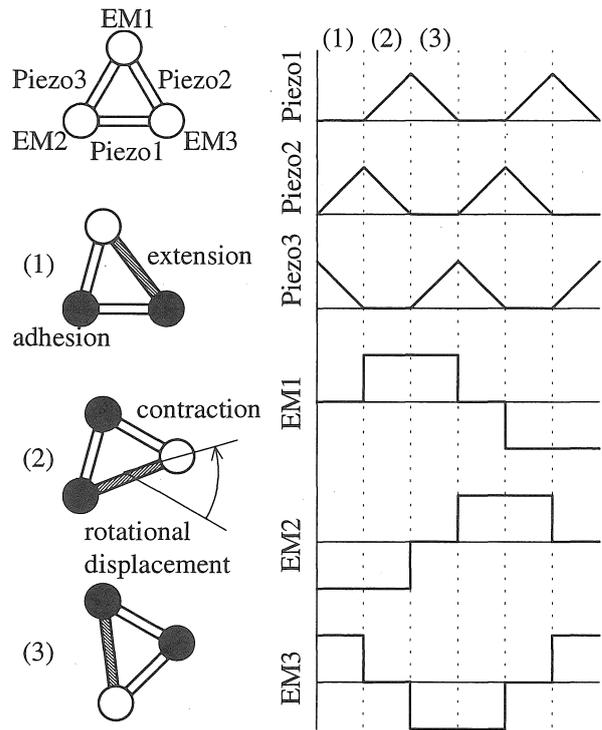


図4マイクロロボットの回転変位の動作原理と制御波形と求められる⁴⁾。

3. 計測原理

位置検出素子 (Position Sensitive Detector, PSD) とは受光素子の一種であり、受光面上の光点の位置を検出する素子である。図5に光点の位置が受光面の中心から右方向に x の時の、PSDの受光面とその等価回路を示す。受光面は均一な抵抗層であり、光点において光電流が発生する。光点で発生する光電流 I_0 は、抵抗の比で各電極に分配される。受光面の長さを L 、抵抗値を $2R$ とすると、各電極に流れる電流は

$$I_1 = \frac{L/2 - x}{L} I_0 \quad (3)$$

$$I_2 = \frac{L/2 + x}{L} I_0 \quad (4)$$

と表される。式(3), (4)より、光点の位置と各電極に流れる電流との関係は

$$x = \frac{I_2 - I_1}{I_1 + I_2} L \quad (5)$$

と表される。式(5)の関係より、光点の位置 x が得られる。

3次元の位置計測を実現するために、レーザとPSDを各3個ずつ使用する。図6にレーザとPSDとの位置関係を示す。マイクロロボットの周囲にレーザを120°

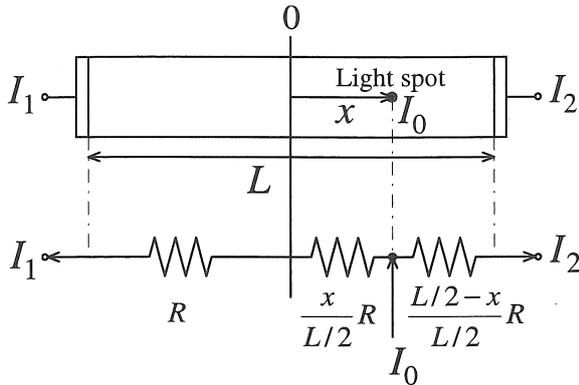


図 5 : PSD の受光面とその等価回路

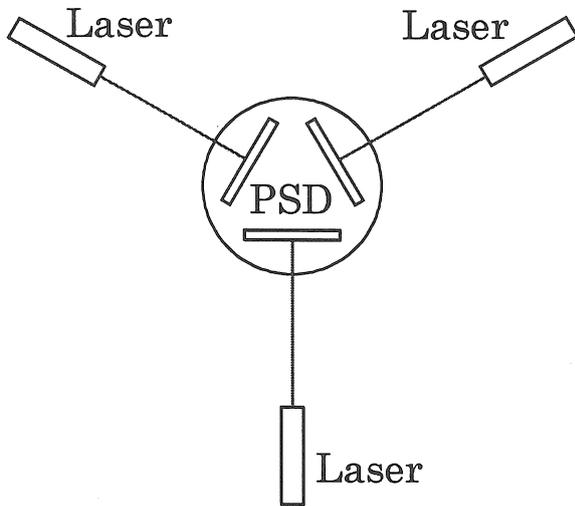


図 6 : レーザと PSD との位置関係

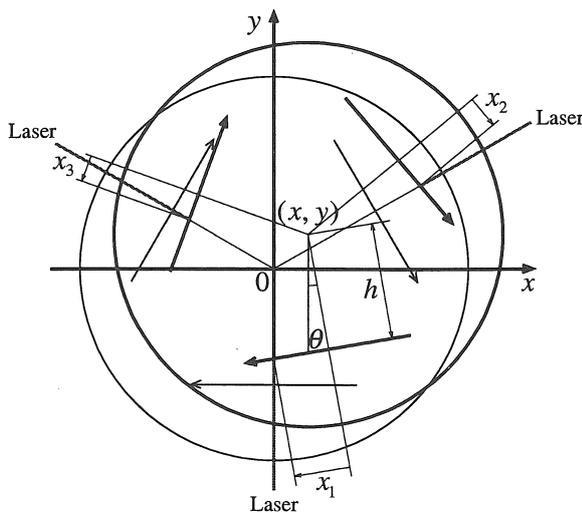


図 7 : 座標系

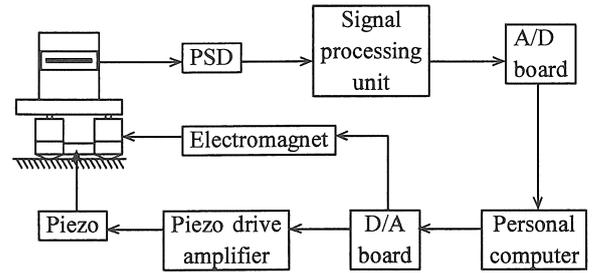


図 8 : 位置計測システムの構成

間隔で設置する。マイクロロボットのステージ上に、受光面がレーザー光に対して垂直となるように PSD を正三角形形状に配置する。

図 7 に座標系を示す。変位前のマイクロロボットの中心を原点とする。マイクロロボットの中心の座標と回転角度は x, y, θ で表される。3 個の PSD で検出される光点の位置を、それぞれ x_1, x_2, x_3 とする。また、マイクロロボットの中心から PSD までの距離を h とする。

図 7 より、PSD の光点の位置 x_1, x_2, x_3 は、マイクロロボットの中心の座標 x, y, θ とマイクロロボットの中心から PSD までの距離 h を用いて

$$x_1 = \frac{1}{\cos \theta} x + h \cdot \tan \theta \quad (6)$$

$$x_2 = -\frac{1}{2} \frac{1}{\cos \theta} x + \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{1}{\cos \theta} y + h \cdot \tan \theta \quad (7)$$

$$x_3 = -\frac{1}{2} \frac{1}{\cos \theta} x - \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{1}{\cos \theta} y + h \cdot \tan \theta \quad (8)$$

と表される。式 (6), (7), (8) より、マイクロロボットの中心の座標 x, y, θ は

$$x = \left(x_1 - \frac{x_1 + x_2 + x_3}{3} \right) \cos \theta \quad (9)$$

$$y = \frac{1}{\sqrt{3}} (x_2 - x_3) \cos \theta \quad (10)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{x_1 + x_2 + x_3}{3h} \right) \quad (11)$$

と表される。式 (6), (7), (8) より、PSD の光点の位置 x_1, x_2, x_3 と幾何学形状 h を用いて、マイクロロボットの中心の座標 x, y, θ を求めることができる。

図 8 に提案する位置計測システムの構成を示す。PSD 上では、レーザー光の光点位置に応じた光電流が発生する。そこで、PSD で発生した電流をマイクロロボットの外部に設置された信号処理回路に送り、光点位置に比例した電圧値 (± 10 V) に変換する。この電圧値を A/D ボードを通してパソコンで獲得し、マイクロロボットの位置を計測する。A/D ボードの分解能は 12 ビットである。3 個の PSD を使用するので、A/D ボードは 3 チャンネル使用する。制御範囲は PSD の受光面の長さでマイクロ

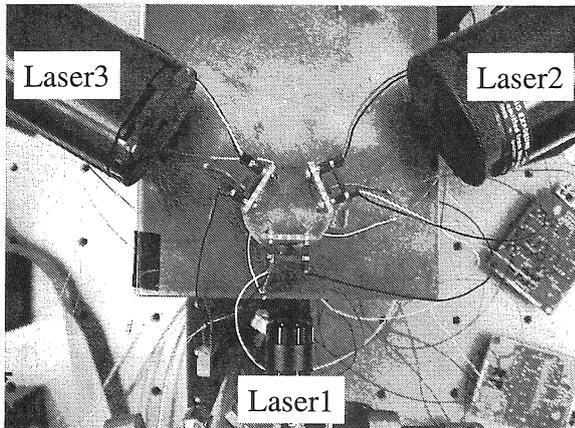


図8：実験装置

ロボットの中心から PSD までの距離 h によって決まる。受光面の長さは 12 mm、マイクロロボットの中心から PSD までの距離 h は 16 mm である。したがって、直線変位は最大 12 mm、回転変位は最大 0.71 rad まで計測可能である。

4. 実験方法

実験装置の写真を図8に示す。レーザ1は半導体レーザ(波長 670 nm, 出力 2.4 mW, ビーム径 $50 \times 170 \mu\text{m}$)、レーザ 2, 3 は He-Ne レーザ(波長 632.8 nm, 出力 5 mW, ビーム直径 0.59 mm) である。実機の都合上 2 種類のレーザを使用した。3 個のレーザは、マイクロロボットの位置が $(x, y) = (0, 0)$ のとき、マイクロロボットの中心にて交差するように、 120° 間隔に配置した。レーザの高さは、マイクロロボット上の PSD の高さを基準にした。スポット光サイズが $200 \mu\text{m}$ のとき、PSD の位置検出誤差は最大 $\pm 240 \mu\text{m}$ 、PSD の位置分解能は $0.3 \mu\text{m}$ である。PSD の受光面の長さ 12 mm と信号処理回路の出力電圧 $\pm 10 \text{ V}$ によって、PSD の位置感度は $600 \mu\text{m}/\text{V}$ となる。このことは、PSD の位置感度を基準に、マイクロロボットの位置と姿勢を計測することを意味する。

マイクロロボットの制御周波数は 2 Hz とした。第 2 章で述べたマイクロロボットの動作原理に従い、制御周期は 3 動作より構成されるため、1 秒間に 6 動作が存在する。1 動作の間に、A/D ボードの各チャンネルで 1024 個のデータを獲得した。すなわち、A/D ボードのサンプリング周波数は 6144 Hz である。したがって、データの獲得間隔は約 0.163 ms である。

圧電素子への印加電圧は 100 V とする。このときの圧電素子の変位量は約 $6 \mu\text{m}$ である。電磁石への印加電圧は 10 V とする。このとき、約 5 mA の電流が流れ、約 2 N の電磁力が発生する。

圧電素子の正三角形と PSD の正三角形は、 30° 角度

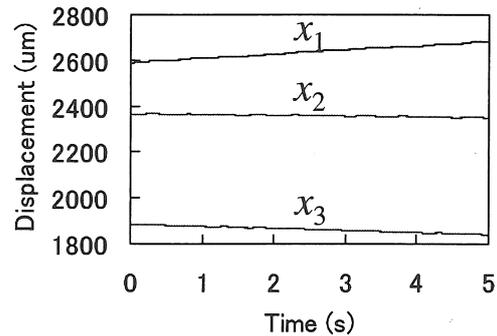


図9：PSD 上の光点の位置 (直線変位)

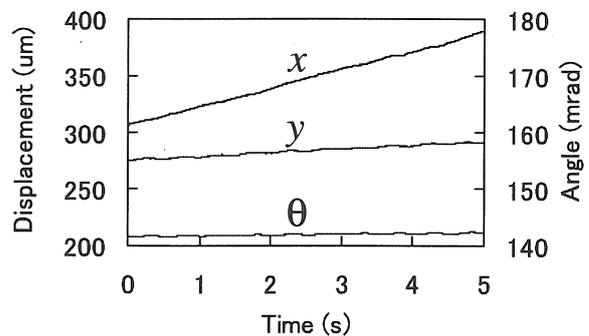


図10：マイクロロボットの位置 (直線変位)

がずれている。これは、 x_1 方向への変位が、PSD の検出値 x_1 と 1 対 1 に対応することを考えたためである。

実験では、PSD、PSD 信号処理回路、配線等に対する遮光、電磁シールド、LC フィルタなどのノイズ対策を施さなかった。静止状態で獲得した信号には約 0.16 V のランダムノイズが含まれていたため、ノイズを除去するためソフト的に信号処理を施した。マイクロロボットの制御周期 (0.5 s, 3072 サンプル) の $1/3$ となる 1 動作 (約 0.167 s, 1024 サンプル) の区間の移動平均値を位置計測用データとして用いた。PSD の位置感度と、信号処理を施したデータのノイズレベルを考慮すると、 $1.5 \mu\text{m}$ 程度の直線変位の分解能が期待できる。回転変位に対しては、 0.094 mrad 程度の分解能が期待できる。

5. 直線変位の実験結果

マイクロロボットの 3 次元の位置を計測するために、3 個の PSD をマイクロロボットに搭載して実験を行った。圧電素子への印加電圧を 100V とし、 x_1 方向にマイクロロボットを直線変位させた。このときの PSD 上の光点の位置 x_1, x_2, x_3 を図 9 に示す。式 (9), (10), (11) を用いて x_1, x_2, x_3 を変換すると x, y, θ が得られる。 x, y, θ を図 10 に示す。

式 (1) より 1 ステップあたりのマイクロロボットの直線変位の理論値は約 $7 \mu\text{m}$ になる。図 10 より 1 ステップ

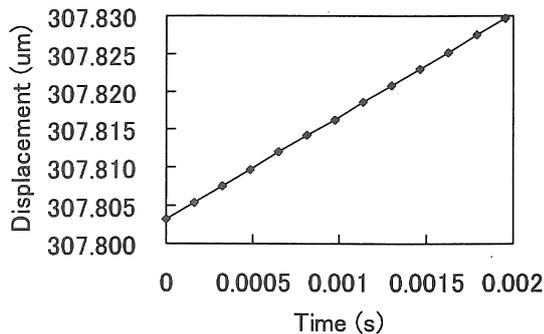
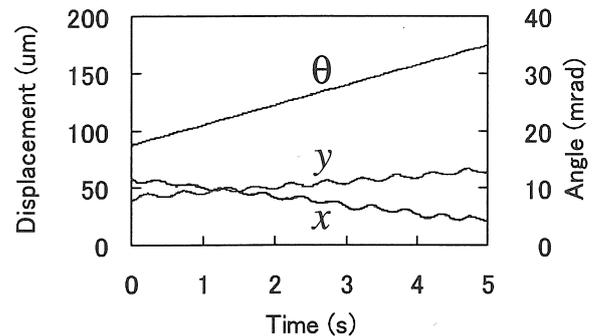
図 11 : x の拡大図

図 13 : マイクロロボットの位置 (回転変位)

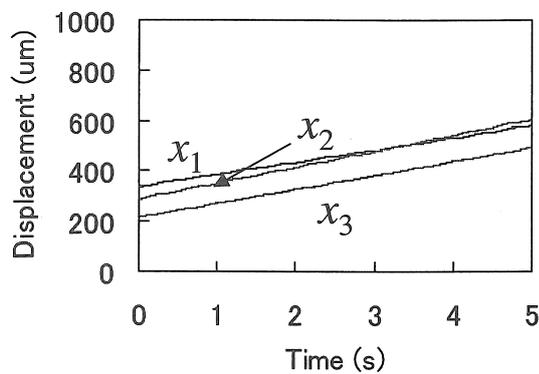
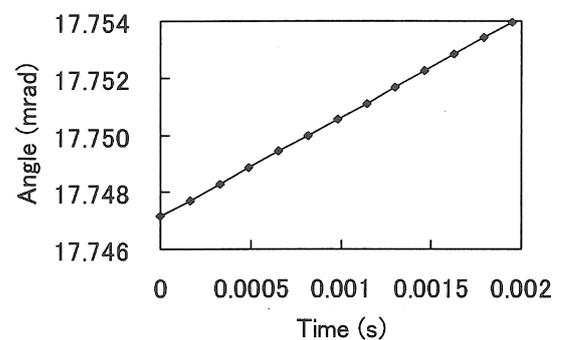


図 12 : PSD 上の光点の位置 (回転変位)

図 14 : θ の拡大図

あたりのマイクロロボットの直線変位の計測値は約 $7.3 \mu\text{m}$ になり、理論値とほぼ一致する。図 10 から、マイクロロボットを x 方向に直線変位させたにもかかわらず、 y 方向への変位と θ 方向への回転が確認できる。これは、前で述べた動作原理で進行方向に対して後ろの 2 個の足を、片方ずつ移動させるためである。そのために、制御波形と同期した y 方向への変位と θ 方向への回転が生じる。

図 10 中の x の拡大図を図 11 に示す。データの獲得間隔は約 0.163 ms であるので、 2 nm 程度の読み取りが可能である。

6. 回転変位の実験結果

圧電素子への印加電圧を 100V として、左回りにマイクロロボットを回転変位させた。このときの PSD 上の光点の位置 x_1, x_2, x_3 を図 12 に示す。

直線変位と同様に、式 (9), (10), (11) を用いて x_1, x_2, x_3 を変換すると x, y, θ が得られる。 x, y, θ を図 13 に示す。式 (2) より 1 ステップの回転変位の理論値は約 2.3 rad になる。図 14 より 1 ステップの回転変位の計測値は約 1.7 rad になり、理論値の 70% 程度となった。

図 13 から、マイクロロボットを回転変位させたにもかかわらず、 y 方向への変位と y 方向への回転が確認で

きる。これは、前で述べた回転変位の動作原理で、マイクロロボットの中心が移動しながら回転するためである。そのために、制御波形と同期した x 方向への変位と y 方向への変位が生じる。

図 13 中の θ の拡大図を図 14 に示す。データの獲得間隔は約 0.163 ms であるので、 $0.6 \mu\text{rad}$ 程度の読み取りが可能である。

7. まとめ

本論文では以下の事を述べた。

1. 3 個の圧電素子と 3 個の電磁石で構成されるマイクロロボットの構造を示した。また、直線変位と回転変位の動作原理を示した。
2. マイクロロボットの位置計測方法として、カメラビジョンを用いた方法、光干渉法を用いた方法、近接センサを用いた方法を述べた。
3. 従来法の問題点を明らかにした上で、位置検出素子 (Position Sensitive Detector, PSD) を用いたマイクロロボットの位置計測方法を提案した。提案法では 3 個の PSD を用いることにより、高精度で 3 次元の位置計測が可能となった。
4. PSD が光点の位置を検出する原理を述べた。

5. 3個のPSDがそれぞれ検出する光点の位置と、マイクロロボットの中心位置の座標との幾何学的関係式を導出し、マイクロロボットの3次元の位置を計測するための関係式を導出した。
6. マイクロロボットの直線変位と回転変位を計測し、2 nm, 0.6 μ rad 程度の分解能が得られた。

今後の課題として、複数回の計測による誤差の検討や、外乱光やノイズの対策が挙げられる。さらに、位置計測結果を用いたフィードバック制御を行い、位置決めを実現することが目標である。

参考文献

- [1] 青山尚之. マイクロロボットの位置決め技術. 精密工学会誌. Vol. 65, No. 10, 1999, pp. 1415-1420.
- [2] 鳥井昭宏, 加藤治奈, 植田明照. 電磁石を用いた小型自走アクチュエータ. 電気学会論文誌 C. Vol. 120-C, No. 1, 2000, pp. 40-45.
- [3] 小柳友洋, 鳥井昭宏, 植田明照. 傾斜面におけるマイクロロボットの動作. 電気学会論文誌 C. Vol. 120-C, No. 12, 2000, pp. 1794-1800.
- [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XY Θ アクチュエータ. 電気学会論文誌 C. Vol. 119-C, No. 1, 1999, pp. 57-62.

(受理 平成15年3月19日)