

ミニチュアロボットの位置計測

Position measurement for a miniature robot

永田千咲子¹、鳥井昭宏¹、道木加絵²、植田明照¹、林亮³

Chisako Nagata, Akihiro TORII, Kae DOKI, Akiteru UEDA, Akira HAYASHI

Abstract: The motion of a miniature robot is described in this paper. The principle of the robot is based on an inchworm. The small linear displacement of the miniature robot is measured by an optical displacement sensor. However the sensor is not suitable for a rotational displacement measurement. We proposed position and angle measurement by using position sensitive detector (PSDs). The rotational displacement of the robot is measured by the PSDs.

1. 背景

近年メカトロニクスの分野において電圧印加によって微小な伸縮を発生する圧電素子を利用したミニチュアロボットが注目されている。ミニチュアロボットは小さな隙間への侵入が可能なため、人の手の届かない場所での幅広い利用が期待される。ミニチュアロボットの利用にあたってはミニチュアロボットの行動を把握する必要がある。特にミニチュアロボットの一周期あたりの動作は微小なため広範囲の動作が可能な機構が必要である。さらに微小かつ広範囲の動作結果を検証する位置計測システムが必要とされる。

筆者らは位置計測に PSD (Position Sensitive Detector, 位置検出素子) を用いてきた^{(1),(2)}。この方法は微小かつ広範囲の計測が可能である。また、直進動作と回転動作の 2 動作の計測に適応する。従来、計測基準として用いられるレーザの設置場所を一箇所に決め、高さや角度を固定していたため、計測範囲が PSD の長さに限られた。また、PSD の特性により PSD の計測範囲の両端付近にレーザ光が照射された場合、誤差が大きくなった。そこでレーザをリニアステージに搭載した。可動レーザを用いることにより広範囲の位置計測ができ、PSD の中心にレーザを照射することで正確な位置計測ができる。

そこで本稿では、はじめに圧電素子を用いたミニチュア

ロボットを製作した、直進波形を入力して、直進動作を行った。移動距離の計測には、光ファイバ変位計を用いた。次に PSD を用いた広範囲の計測方法を検討し、計測原理を述べる。実験ではミニチュアロボットの位置と回転角度を計測する。

2. ミニチュアロボット

図 1 の Δ 形ミニチュアロボットを製作した。大きさ $2 \times 3 \times 10$ mm、特性 $0.06 \mu\text{m}/\text{V}$ の圧電素子を三個、一辺 10mm、定格 12V の電磁石を三個用いて製作する。ミニチュアロボットの一辺は 36 mm、質量は 15 g となった。圧電素子の伸縮は 100V の印加に対して数 μm であるため圧電素子を用いたミニチュアロボットは微小動作が可能である。電磁石は電圧の印加で吸着する。圧電素子の両端に電磁石を取り付け圧電素子の伸縮時に片方の電磁石を固定する。圧電素子の伸縮と電磁石の吸着を組み合わせたイルチワーム動作を利用してミニチュアロボットは移動する。圧電素子に三角波を、電磁石に方形波をそれぞれ入力するとミニチュアロボットは直進、回転移動する。

図 2 には圧電素子への印加電圧(三角波)を示した。横軸が時間、縦軸が印加電圧を表す。直進動作は 3 ステップに分かれる。ステップ 1 では圧電素子 A、C を同時に伸ばし、

ステップ2ではAのみを縮め、ステップ3ではCのみを縮める。この3ステップで一周期の直進動作である。

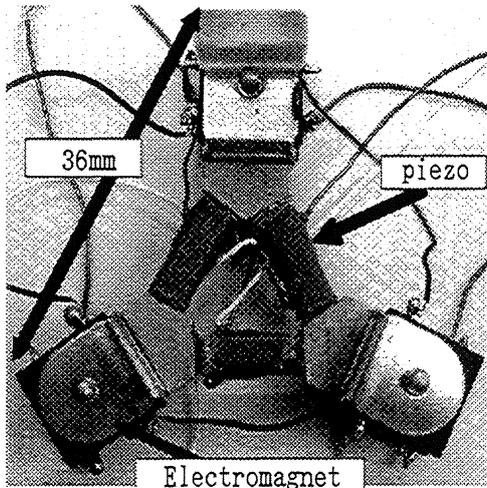


Fig. 1 Miniature robot

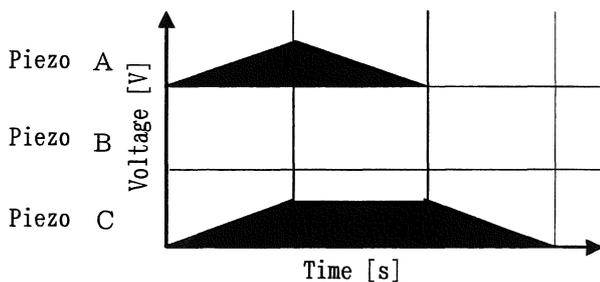


Fig. 2 Waveform of piezos

3. 光ファイバ変位計を用いた計測

ミニチュアロボットの圧電素子には電圧 100V、電磁石には電圧を 12V 入力する。周波数は 1Hz に設定し、ミニチュアロボットの直進動作を光ファイバ変位計で計測した結果を図 3 に示す。右下降のグラフは光ファイバ変位計によるミニチュアロボットの変位量、三角波形は圧電素子への入力電圧である。このグラフよりミニチュアロボットは 1 秒間に約 $5\mu\text{m}$ 直進した。しかし、一周期では前進しているが、各ステップでは後退している部分が確認できる。原因は電磁石の吸着が圧電素子の伸縮力に耐えきれず移動したためと考えられる。

今回の光ファイバ変位計を用いた計測方法では、ミニチ

ュアロボットの直進の計測は可能であるが計測範囲が数 μm 程度に限られる。また、光ファイバ変位計は傾きの計測が不可能であり回転動作の計測には適さない。そこで次章で回転動作に適応可能なより広範囲な位置計測システムを提案する。

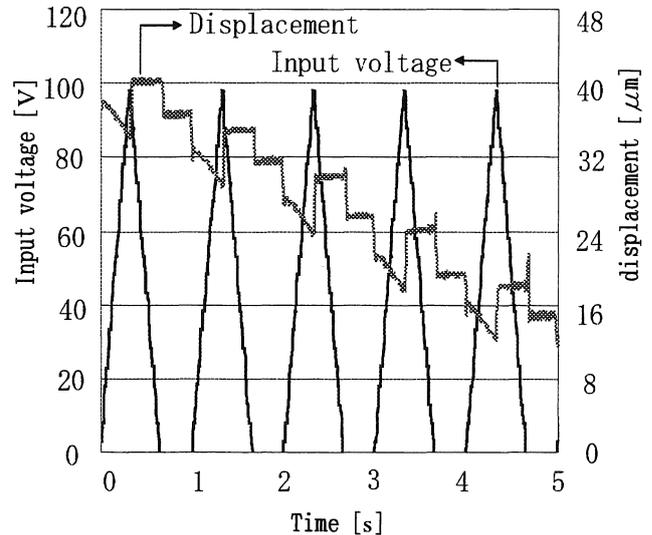


Fig. 3 Linear displacement measured with optical fiber displacement sensor

4. PSD

PSDはレーザスポットを検出する素子である。図4にPSD受光面の模式図を示す。受光面は均一な抵抗層で構成され、レーザ光が受光面に照射すると光電流が発生し、電流が各電極に分配される。各電極に分配された電流から輝点の位置がわかる。今回の実験で用いるのは受光面の長さが 12 mm、左端から右端が -10V から 10V で中心は 0V 出力する。出力電圧は、

$$V_0 = 10 \times \frac{2x}{L} \quad [\text{V}]$$

と表される。 x は PSD 中心からのレーザ光スポットの位置、 L は PSD 受光面の長さである。

図5は、実線がレーザを PSD に 1 mm 間隔に照射した結果の近似曲線、破線が理論値を示す。両者を比較すると実験結果の両端部分が非線形であることがわかる。実験では主に中心付近の線形部分を使用する。

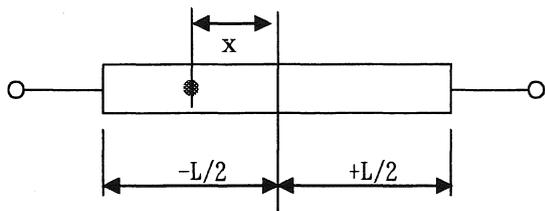


Fig. 4 PSD

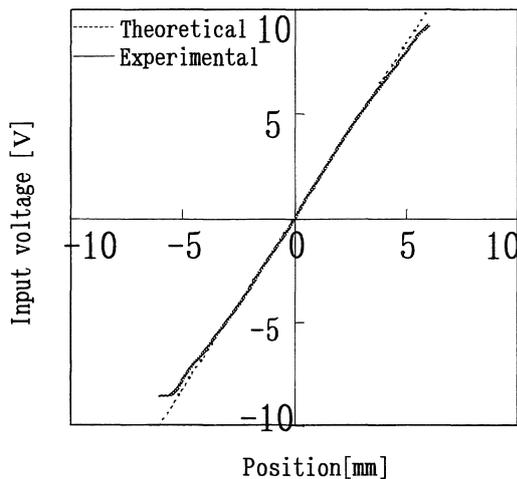


Fig. 5 Characteristic of PSD

5. 計測方法

実験装置を図6に示す。レーザをリニアステージに搭載し、正三角形に配置する。配置されたリニアステージの重心にミニチュアロボットを配置する。リニアステージの中心をレーザの原点と決めるとき、三本のレーザ光が一点で交わる。その点が x, y 座標の中心でありミニチュアロボットの原点と決める。3個のリニアステージがPSDの受光面と平行にあるときミニチュアロボットの回転角度を 0° とする。

図7に位置計測システムの模式図を示す。中心付近の円をミニチュアロボットとし、その周りの白抜き矢印をリニアステージの可動範囲とする。ミニチュアロボットの移動に対してレーザを移動しPSDの中心に照射させ、PSD出力とレーザの位置を計測する。レーザの位置を X_1, X_2, X_3 、PSD出力を x_1, x_2, x_3 とおくと、式(1)(2)(3)からミニチュアロボットの中心座標が求まる。

$$x = \frac{2X_1 - X_2 - X_3}{3} - \frac{2x_1 - x_2 - x_3}{3} \cos \theta \quad (1)$$

$$y = \frac{1}{\sqrt{3}}(X_2 - X_3) - \frac{1}{\sqrt{3}}(x_2 - x_3) \cos \theta \quad (2)$$

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{(X_1 + X_2 + X_3)/(3h)}{\sqrt{1 + ((x_1 + x_2 + x_3)/(3h))^2}} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{x_1 + x_2 + x_3}{3h} \right) \quad (3)$$

リニアステージにレーザを搭載した場合、第一項がレーザの位置による測定部分、第二項がPSD出力による測定部分となり広範囲の位置計測が可能である。レーザを固定した場合、第一項が定数となり第二項を用いて微小範囲の位置計測が可能となる。

今回は PSD を用いた広範囲の位置計測方法を確認するため、ミニチュアロボットのかわりに $xy\theta$ ステージ上に PSD を正三角形に並べた。従来の実験において誤差の大きかった座標 $(x, y) = (-4 \text{ mm}, 4 \text{ mm})$ 、 $(4 \text{ mm}, 4 \text{ mm})$ 、 $(4 \text{ mm}, -4 \text{ mm})$ 、 $(-4 \text{ mm}, -4 \text{ mm})$ の4点と原点の5点を選択し、各計測位置につき θ ステージを 5° 間隔に -30° から 30° まで回転させる。

PSD を計測位置に移動させ、次にレーザを移動させ PSD の中心に照射する。そのときのレーザの位置と PSD 出力を計測する。次に式(1)(2)(3)を用いて PSD の成す正三角形の中心座標を求め、PSD を搭載したステージの値と比較する。

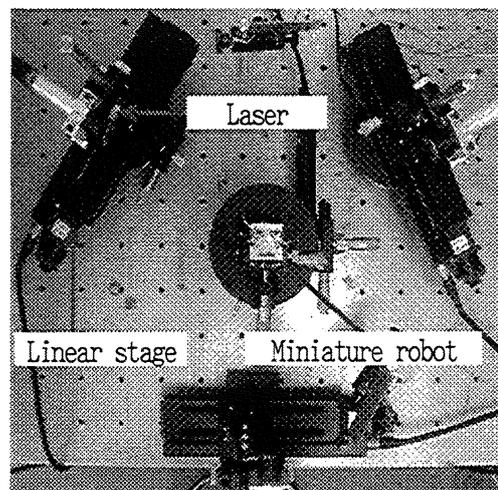


Fig. 6 Experimental device

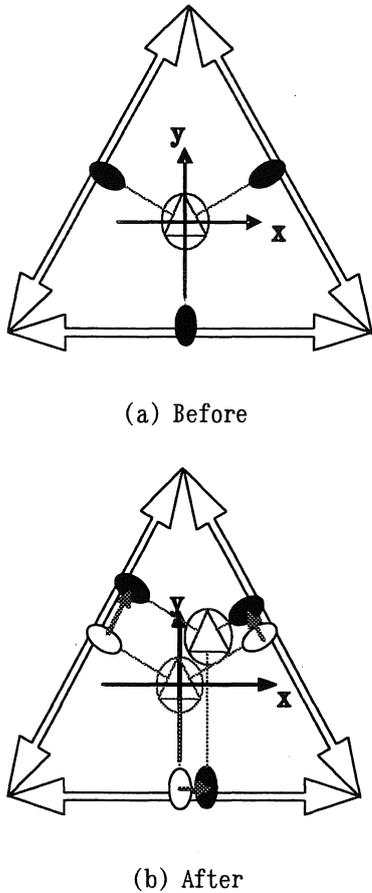


Fig. 7 Position measurement system

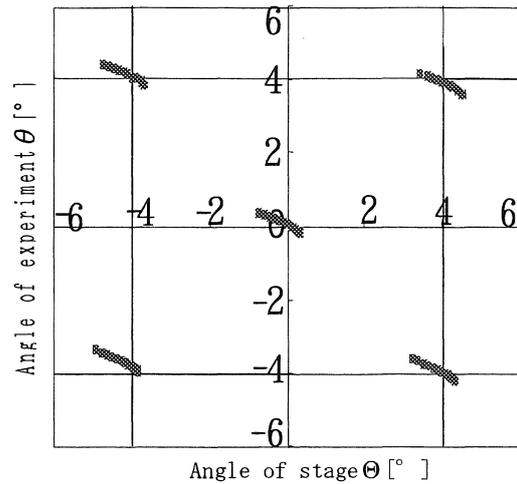


Fig. 9 Direction of Θ

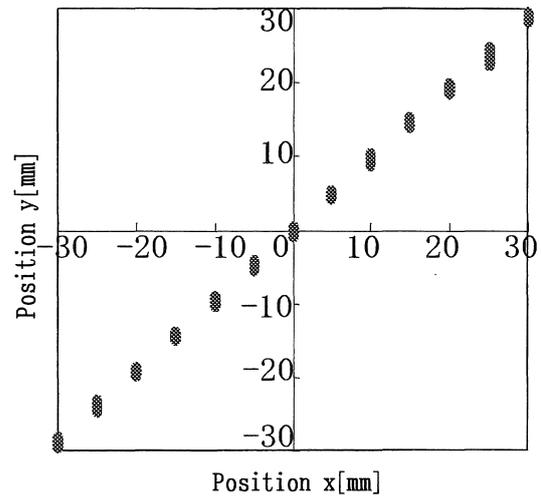


Fig. 10 Direction of xy

7. 実験結果と考察

図8にxy方向の測定結果を示す。x座標とy座標の点線の交点がPSDを搭載したxyステージの位置を示している。ひとつのxy座標において θ を13点計測したため13個の点が計測位置に重なれば誤差は0である。結果は誤差が確認できた。計測結果は円弧状に整列しているためxy θ ステージに搭載した3つのPSDの重心と θ ステージの中心が一致していなかったためと考えられる。

図9に θ 方向のグラフを示す。横軸はPSDを搭載したステージの角度を示し、縦軸は実験結果を示す。各角度の測定結果はxy座標の異なる5点の結果より成る。図8と同様に各角度に5点が重なれば誤差は0である。各角度に対して $\pm 2^\circ$ の誤差が確認できた。レーザを搭載したリニアステージが正三角形に配置されていなかったことが誤差の原因と考えられる。

8. まとめ

圧電素子を用いてミニチュアロボットを製作した。圧電素子に三角波を、電磁石に方形波を入力しミニチュアロボットの動作確認を行った。ミニチュアロボットの動作確認には光ファイバ変位計を使用した。光ファイバ変位計では数 μm 程度の計測範囲であるためミニチュアロボットの様々な微小動作には不向きであった。微小動作に対応でき、広範囲の位置計測としてPSDを用いる方法を提案した。PSDの受光面の中心部分を使用すれば微小範囲の直進変位と回転変位の計測が可能である。PSDを用いて8mm四方内の位置計測と、 $\pm 30^\circ$ の角度計測が可能であることを示

愛総研・研究報告
第8号 2006年

した。

今後は、PSDを用いた位置計測システムの誤差補正を検討する。今回は $xy\theta$ ステージ上にPSDを正三角形に並べた実験を行ったので、実際にミニチュアロボットにPSDを搭載し実験を行う予定である。

本研究の一部は愛知工業大学総合技術研究所プロジェクト研究の援助を得た。記して謝意を表します。

参考文献

1. 鳥井昭宏、川根祐輔、道木加絵、植田明照、「PSDを搭載したミニチュアロボットの位置姿勢計測」、電気学会論文誌C、Vol.123, No.12, 2003
2. 鳥井昭宏、井上透、道木加絵、植田明照、「ミニチュアロボット用マクロ・マイクロ位置計測システム」、電気学会論文誌C、Vol.125, No.12, 2005

(受理 2006年5月2日)