PSD を搭載したミニチュアロボットの位置姿勢計測

正員 鳥井 昭宏* 学生員 川根 祐輔*
正員 道木 加絵* 正員 植田 明照*

Position and Angle Measurement of a Miniature Robot by Using Position Sensitive Detectors

Akihiro Torii*, Member, Yusuke Kawane*, Student Member, Kae Doki*, Member, Akiteru Ueda*, Member

In this paper, position and angle measurements of a miniature robot by using position sensitive detectors (PSDs) are proposed. The miniature robot carries three PSDs and laser beams are irradiated on the PSDs' surfaces. The position and angle of the robot are obtained by the positions of the laser spots. Since the PSD, which is sensitive according to the laser spot, provides a continuous signal, the measurement sensitivity is theoretically determined by the sensitivity of the PSD. The results obtained by preliminary experiments in the linear and rotational displacements are described.

キーワード：ミニチュアロボット，位置検出素子，PSD，精密計測

Keywords: miniature robot, position sensitive detector, PSD, precision measurement

1. はじめに

卓上生産システムの構築を目指し，数 cm サイズのミニチュアロボットが研究されている⁽¹⁾。筆者らは，圧電素子を用いた数種類のミニチュアロボットを試作し，その基本的な動作を確認してきた⁽²⁾⁽³⁾。また，特化された用途のミニチュアロボットに関する研究も行われている⁽⁴⁾。

これらのミニチュアロボットの目的は，卓上生産システムの一つの構成要素として微細な作業を行うことである。大型の生産システムを使用した従来の微細作業はエネルギーやスペースの点で効率的とは言えず，省エネルギー，省スペースの点でミニチュアロボットなどを用いた小型の生産システムが望まれる。例えば，ミニチュアロボットに作業ツールを搭載しエンドエフェクタの替わりに用いる。この場合，ミニチュアロボットの位置姿勢は生産システムのエンドエフェクタの位置姿勢に対応し，ミニチュアロボットには生産システムのエンドエフェクタと同程度の数十 cm の作業空間と数 μm の精度が要求される。リニア型・ロータリー型アクチュエータにより構成される工作機械は，対応するセンサを用いて位置姿勢計測が可能であるが，ミニチュアロボットの位置姿勢計測法は確立されているとは言えず，使用環境などに応じて適切に計測する必要がある⁽⁵⁾。

数十 cm から 1m 程度の大きさの移動ロボットを対象とした位置姿勢計測では，外部に置かれた計測基準と移動ロボットに搭載したセンサを用いたものが多い。検出結果を移動ロボット上で信号処理し，自己の位置と姿勢を求めている。例えば，室内に設置された超音波発信器，赤外線発信器からの信号を移動体に搭載した超音波センサ，赤外線センサを用いて位置姿勢を計測する方法があげられる⁽⁶⁾。これらの位置の測定精度は数 cm 程度となっている。外部信号を用いる場合には外部と自律移動ロボットの間での信号の同期や通信プロトコルなども問題になる⁽⁷⁾。

大きさが数 cm 程度のミニチュアロボットを対象とした位置姿勢計測方法では，大きさを考慮した点に特徴がある。ミニチュアロボットへの搭載物を LED やミラーに限定するなど，位置姿勢の計測に必要な最低限とし，外部に設置されたセンサなどを用いて計測している。ミニチュアロボットの動作範囲の上方に PSD カメラビジョンを用いた方法⁽⁸⁾は，簡単にミニチュアロボットの位置姿勢を計測する方法であるが，精度や分解能が mm 程度である。光波干渉計を用いた方法⁽⁹⁾は，光の波長に依存した計測を行うため $1\mu\text{m}$ 以下の精密計測が可能であるが，ミニチュアロボットの姿勢変化は光路の変化を伴うため回転角度の計測は困難である。これまで筆者らは反射光量を検出する光ファイバ式変位計を用いてきた⁽²⁾⁽³⁾。しかし，光ファイバ式変位計，うず電流変位計，静電容量変位計などの近接センサは微小な変位の計測には有効であるが，ミニチュアロボットの姿勢変化が位置計測に影響を与えるため位置と姿勢の同

* 愛知工業大学工学部電気工学科
〒 470-0392 豊田市八草町
Dept. of Electrical Eng., Aichi Institute of Technology
Yakusa-cho, Toyota 470-0392 Japan

時計測が困難であった。また近接センサをミニチュアロボットの近傍に設置する必要があった。これらは、ロボット上に計測用センサを搭載していないことに特徴があった。

ところで、位置検出素子 (Position Sensitive Detector, 以下 PSD と略す) は、フォトダイオードの表面抵抗を利用した受光素子の一種であり、受光面に照射される光スポットの位置を検出する位置センサである。CCD とは異なり非分割型のため、連続した電気信号が得られる点に特徴がある。1 次元 PSD は帯状の受光面の長さ方向について位置計測を行い、微小な角度変位の検出などに用いられている⁽¹⁰⁾。2 次元 PSD は受光面上の xy 座標について位置計測を行い、はめあいの位置検出などに用いられている⁽¹¹⁾。これらの使用例は、微小変位の精密計測に PSD が有効であることを示している。PSD の大きさは数 cm 程度であるため、ミニチュアロボットに搭載した位置姿勢計測用センサとして応用できる可能性も高い。

そこで本論文では、ミニチュアロボットの位置と姿勢の計測に PSD とレーザを用いる方法を提案し、有効性を実験的に確認する。数 cm 程度の大きさのミニチュアロボットを対象とし、位置姿勢の同時計測を実現する。ミニチュアロボットには PSD を搭載し位置姿勢計測用センサとして用い、外部に設置されたレーザ光線を計測基準として用いる。本方法は、現状で容易に入手可能な電子部品、光学部品を用いて数 cm サイズのミニチュアロボットに搭載可能な位置計測システムを構築するところに特徴があり、ミニチュアロボットに搭載可能な最小構成の位置姿勢計測システムである。次章以降で、ミニチュアロボットの構造と動作原理、計測システムの構成と計測原理について述べ、予想される誤差を検討したうえで、基本的な実験により提案方法の有効性を示す。

2. ミニチュアロボット

使用するミニチュアロボットの基本構造は、筆者らがこれまでに提案した電磁石と圧電素子を用いたミニチュアロボットである⁽³⁾。このミニチュアロボットはインチワームを基本としているが、発生する電磁力を有効に使うことができるよう磁路と制御波形に工夫が施してある。センサの搭載を目的として上部が円形状のステージとなっていることを除けば、これまでに提案したミニチュアロボットと同じ構造である。

図1はミニチュアロボットの写真である。圧電素子 (Piezo) と電磁石 (EM) の配置を示している。ミニチュアロボットは正三角形に配置された圧電素子と、その頂点の電磁石により構成される。使用した圧電素子は TOKIN 製 AE0203D08 である。電磁石は直径 3mm のコアの周りに、直径 0.1mm のエナメル線を 1800 回巻いてある。ミニチュアロボットは電磁力の保持力を用いるため、鉄などの磁性体基板上で動作する。常に 3 個中 2 個の電磁石に電磁力を生じさせる制御電圧を印加する。電磁石の発生する磁束が無駄なく電磁力となるよう、原理的に空隙の無い閉磁路構造である。電

図1 ミニチュアロボットの構造
Fig. 1. Structure of a miniature robot.

図2 PSD を搭載したミニチュアロボット
Fig. 2. Miniature robot with three PSDs.

磁力の働いていない 1 個の電磁石を、その電磁石と接続してある 2 個の圧電素子の伸縮により移動させる。3 個の電磁石を順に移動させるため、1 周期は 3 区間から成る。電磁石と圧電素子への印加電圧のタイミングを制御することにより、ミニチュアロボットは直進もしくは回転動作を行う。圧電素子への印加電圧を変化させることにより、変位量と変位速度を制御することができる。変位速度は制御周期によっても変更可能である。ミニチュアロボットへの制御信号はパーソナルコンピュータにて生成し、増幅器を通して圧電素子と電磁石へ印加する。

図2は PSD を搭載した状態でのミニチュアロボットの写真である。3 個の PSD をミニチュアロボットの上に正三角形に搭載した。ミニチュアロボットの大きさを基準に使用する PSD の大きさを決定した。直径 28mm のミニチュアロボットへの搭載を前提としているため、有効受光面長が 12mm の 1 次元 PSD を 3 個搭載した。位置姿勢計測に用いる PSD は浜松ホトニクス社製 S3932 を用いた。PSD の受光面は均一な抵抗層であり、受光点にて光電流 I_0 が発生する。発生した光電流は、PSD の表面抵抗の比にしたがって受光面の両端の電極より流出する。受光面の中央から受光点までの距離を x 、受光面の長さを $2L$ とすると、各電極からの流出電流は

$$I_1 = I_0 \frac{L-x}{2L} \dots\dots\dots (1)$$

$$I_2 = I_0 \frac{L+x}{2L} \dots\dots\dots (2)$$

となるため、受光面中央からの受光点までの距離 x は

$$x = \frac{-I_1 + I_2}{I_1 + I_2} 2L \dots\dots\dots (3)$$

と求められる。すなわち、両端の電極からの流出電流を検出することにより、レーザ光の受光点を求めることができる。

本研究は3個のPSDを用いたミニチュアロボットの位置姿勢計測の可能性を示すために、PSDの発生する電流を処理する信号処理装置はロボットの外部に設置した。1個のPSDから2本の信号処理用の配線を外部に接続する。配線の張力の影響を最小限にするために、直径0.1mmの細いワイヤーを用いた。信号処理装置は、式(3)を用いてPSDが発生する電流を受光点の位置に変換する回路であり、オペアンプなどを用いて構成される。したがって、ミニチュアロボット上に搭載可能な小形サイズの信号処理装置の製作は、比較的容易であると考えている。外部信号処理装置は電流値を電圧値に変換し、受光点の位置と比例した電圧を出力するよう調整した。PSDから発生した光電流を外部装置で処理した。パーソナルコンピュータは、PSD上の照射された受光点の位置を電圧値として獲得する。PSDの中央付近でレーザの受光点と出力電圧の関係を実測したところ $600\mu\text{m}/\text{V}$ の関係があった。

3. 位置姿勢計測原理

図3は、ミニチュアロボットの位置姿勢計測の模式図を示す。ミニチュアロボットの外部に3個のレーザ光源を空間的に $2\pi/3\text{rad}$ 間隔で配置する。3個のレーザ光線が一点にて交わるようレーザ光の照射角度を調整し、レーザ光の交点を原点とする。提案する方法では3個のレーザ光線が3個のPSDに入射しなければならないため、使用するPSDの受光面の長さが計測範囲を決定する。有効受光面長が12mmの1次元PSDを使用したため、計測範囲は最大で12mmになる。

本手法では、作業空間内のすべての地点における精密位置姿勢計測は不可能であるが、原点近傍でのミニチュアロボットの精密位置姿勢計測が可能である。ミニチュアロボットから常にレーザ光線が3方向見えることが必要であるが、レーザの設置位置は一意に定まるものではなく、レーザの規定する座標軸と絶対座標の対応が適切であれば、3個のレーザの交点へのミニチュアロボットの誘導や交点付近での精密位置姿勢計測が可能です。作業空間外の3方向からレーザ光線の照射が不可能な場合には、ミラーを用いるなどにより制約を軽減できる。

図4は、ミニチュアロボットの位置姿勢計測の原理を示す。仮想的な絶対座標 (x, y) 座標を規定し、レーザを $2\pi/3\text{rad}$ 間隔で配置する。3個のレーザ光は原点にて交わり、1個のレーザは負の y 軸上に配置する。ミニチュアロボットに搭

図3 位置姿勢計測の模式図

Fig.3. Schematic diagram of position and angle measurement.

図4 位置姿勢計測原理

Fig.4. Principle of position and angle measurement.

載されたPSD上でのローカル座標を、それぞれ x_1, x_2, x_3 とする。ローカル座標の座標軸は図4に示したPSD上での矢印の向きとする。また、ロボットの姿勢（回転角度変位）については、反時計回りを正とする。

ミニチュアロボットが回転角度 θ の姿勢で、中心座標（重心座標）が (x, y) にある場合を考える。この場合、各PSD上の受光点位置のローカル座標 (x_1, x_2, x_3) は、ミニチュアロボットの重心の位置と姿勢 (x, y, θ) を用いて、

$$x_1 = \frac{1}{\cos \theta} (x + h \sin \theta) \dots\dots\dots (4)$$

$$x_2 = \frac{1}{\cos \theta} (-x \sin \frac{\pi}{6} + y \cos \frac{\pi}{6} + h \sin \theta) \dots\dots (5)$$

$$x_3 = \frac{1}{\cos \theta} (-x \sin \frac{\pi}{6} - y \cos \frac{\pi}{6} + h \sin \theta) \dots\dots (6)$$

と表される。ここで h はミニチュアロボットの中心とPSDの間の最短距離である。この式を (x, y, θ) に関して解くと、

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{x_1 + x_2 + x_3}{3h} \right) \dots\dots\dots (7)$$

$$x = \left(\frac{2x_1 - x_2 - x_3}{3} \right) \cos \theta \dots\dots\dots (8)$$

$$y = \frac{1}{\sqrt{3}} (x_2 - x_3) \cos \theta \dots\dots\dots (9)$$

が得られる。これら式は、PSD上の受光点位置の検出結果 (x_1, x_2, x_3) を用いてミニチュアロボットの位置 (x, y) と姿勢 θ が一組の計算式によって得られることを示している。こ

これはロボット上の複数の点の位置 (x, y) を計測し、それらの幾何学的考察より姿勢 θ を求める方法とは大きく異なる。

レーザ光源の設置の x 軸方向（または y 軸方向）に関する誤差について検討する。この誤差は図 4 の座標系と実際に設置されたレーザが構成する座標系の相違を意味し、 x_1, x_2, x_3 の検出値に誤差 dx_1, dx_2, dx_3 として含まれる。例えば、図 4 で $y = -\infty$ より照射されるレーザが、 $x = \delta$ だけずれた場所に設置され y 軸と平行に発光している状態である。この場合、 x_1 の検出値に誤差 dx_1 が含まれ、3 個のレーザ光線は 1 点で交わらない。ミニチュアロボットの姿勢 θ は式 (7) において逆正接関数を用いて表されているので、姿勢計測の誤差 $d\theta$ は、

$$d\theta = \left| \frac{\partial \theta}{\partial x_1} dx_1 \right| + \left| \frac{\partial \theta}{\partial x_2} dx_2 \right| + \left| \frac{\partial \theta}{\partial x_3} dx_3 \right| \cdots \cdots (10)$$

と表される。ここで、 $i = 1, 2, 3$ として、

$$\frac{\partial \theta}{\partial x_i} = \frac{1}{3h} \frac{1}{1 + \left(\frac{x_1 + x_2 + x_3}{3h} \right)^2} \cdots \cdots (11)$$

であるので、姿勢の検出誤差は $x_i = 0$ 、すなわち $\theta = 0$ 付近で最大である。この場合、 h が cm オーダであり、 dx_1, dx_2, dx_3 が μm オーダであると仮定すると、式 (10)(11) より誤差は最大で 1mrad となる。同様に x, y の誤差は式 (8)(9) より、最大でそれぞれ、 $(2|x_{11}| + |dx_2| + |dx_3|)/3$ 、 $(|dx_2| + |dx_3|)/\sqrt{3}$ 、となる。この結果は、レーザ光源の設置誤差が μm オーダであれば、PSD を用いた検出結果に含まれる誤差が、 μm オーダになることを示している。

レーザ光源の設置角度の誤差の影響を検討する。例えば、図 4 で 3 個のレーザ光線が原点で交わりながらも、それぞれが $2\pi/3\text{rad}$ 間隔ではない状態である。このとき、図 4 で $y = -\infty$ より照射されるレーザを角度の基準にすると、他の 2 個のレーザ光線の角度は、 $\alpha = 2\pi/3 + \delta$ 、 $\beta = 4\pi/3 + \gamma$ と書くことができる。ここで、設置角度の微小な誤差を δ, γ とした。これを用いて式 (4)(5)(6) を書き直すと、

$$x_1 = \frac{1}{\cos \theta} (x + h \sin \theta) \cdots \cdots (12)$$

$$x_2 = \frac{1}{\cos \theta} (x \sin \alpha + y \cos \alpha + h \sin \theta) \cdots \cdots (13)$$

$$x_3 = \frac{1}{\cos \theta} (x \sin \beta + y \cos \beta + h \sin \theta) \cdots \cdots (14)$$

が得られる。これらを x, y, θ に関して解き、 α, β に関する項を加法定理を用いて分解する。さらに、 δ, γ は微小な角度誤差であるため $\sin \delta = \delta, \sin \gamma = \gamma, \cos \delta = 1, \cos \gamma = 1$ とし、さらに、 δ, γ に関する 2 次の項を微小なものとして無視すると、

$$\begin{aligned} \tan \theta &= \frac{x_1 + x_2 + x_3}{3h} \\ &\quad + \frac{1}{3\sqrt{3}h} (\delta x_1 - \gamma x_1 + \gamma x_2 + \delta x_3) \cdots \cdots (15) \\ x &= \left(\frac{2x_1 - x_2 - x_3}{3} \right) \cos \theta \end{aligned}$$

$$+ \frac{\cos \theta}{3\sqrt{3}} (-\delta x_1 + \gamma x_1 - \gamma x_2 + \delta x_3) \cdots \cdots (16)$$

$$y = \frac{1}{\sqrt{3}} (x_2 - x_3) \cos \theta + \frac{\cos \theta}{3} (\delta x_1 + \gamma x_1 - \gamma x_2 + \delta x_3) \cdots \cdots (17)$$

を得る。これらの結果は、 $\delta = \gamma = 0$ の場合、すなわち外部レーザの設置角度に誤差が無い場合は、式 (7)(8)(9) と一致する。式 (15)(16)(17) における第 2 項は角度設置誤差に因るものである。ここで、誤差 δ, γ が 0.1 度 (2mrad) 以下であるとすると、すべての要素が微小な角度誤差 δ, γ と検出位置 x_1, x_2, x_3 の積として表れる第 2 項は、 x_1, x_2, x_3 に関して係数を比較することにより第 1 項の約 0.1% である。この値は計測範囲を mm オーダ、rad オーダとすると、誤差が μm 、mrad オーダであることを意味する。

これらのレーザの設置に関わる計測誤差をまとめると、位置と姿勢に関して大きく見積もって数 μm 、数 mrad となる。これらはロボットの位置と姿勢により変化するが、その変化は連続的であるため原点近傍のミニチュアロボットの相対変位計測に及ぼす影響は小さい。

レーザの設置と同様に PSD の設置に関しても詳細な検討を行う必要があるが、PSD の設置誤差は相対的にレーザの設置誤差に対応する。そのため、PSD の設置誤差がレーザの設置誤差と同程度であれば、ミニチュアロボットの位置と姿勢の相対変位の計測結果には同程度と見積もることができる。また、PSD の構成する三角形の重心とミニチュアロボットの中心のずれは位置計測における偏り誤差として表れ、ミニチュアロボットの相対変位を計測する上では相殺される。

4. 実験および実験結果

提案する計測方法の有効性を示すために、2 種類の基礎実験を行う。最初の実験では、ミニチュアロボットを座標原点付近で直進と回転させたときの微小な位置姿勢を計測する。次の実験では、8mm×8mm の範囲内でのミニチュアロボットの xy 変位と $x = y = 0$ 付近での $\pm 0.4\text{rad}$ の範囲内のミニチュアロボットの角度変位を計測する。

実験装置の概要を図 5 に示す。最初に 3 個のレーザを設置する。実験準備の都合上、Laser1 には半導体レーザ (波長 670nm, 出力 2.4mW, ビーム径 $50 \times 170\mu\text{m}$)、Laser2 と 3 には He-Ne レーザ (波長 632.8nm, 出力 5mW, ビーム径 0.59mm) を用いた。基板上に正三角形を描き、その各頂点にレーザを置いた。レーザの高さは使用するミニチュアロボットの PSD の高さを元に基板面より 30mm とし、正三角形の一辺の長さは 8cm とした。レーザ光線は基板に平行に発光し、対向する辺の中央に照射されるようレーザ光線の向きを調節した。この作業により、3 個のレーザ光線は基板上に描かれた正三角形の中心にて交わる。本論文では、提案する手法の有効性を示すために、レーザ光源の設置にかかわる計測誤差の評価は行わない。したがって、3

図 5 実験装置

Fig. 5. Experimental setup.

個のレーザ光源は誤差なく設置されているものと仮定する。

ミニチュアロボットへの印加電圧の1周期は3区間であり、各区間を166msとし、各区間に1024個のデータを収集した。したがってデータ収集間隔は163 μ sである。静止状態のミニチュアロボットを用いてPSDからの出力電圧を計測したところ、最大で150mVのランダムノイズが観測された。これは主として、室内照明下で実験を行ったため外乱光の影響を排除していないことと、レーザ光が空気の揺らぎを受けていることなどによる。また、配線による張力を軽減するためにPSDと外部信号処理装置間にシールド線を用いなかったため、ノイズが重畳しやすいことも原因の一つであると考えている。これらのランダムノイズは128個のデータを移動平均処理したところ（時間間隔で20.8ms）、等価的に10mVのノイズとなった。移動平均の平均時間はミニチュアロボットの動作の1区間の1/8であるため、平均化処理による波形ひずみは無視して良い。

圧電素子への最大印加電圧は100Vとした。そのときの圧電素子の伸張量は $6.1 \pm 1.5 \mu\text{m}$ （カタログ値）であるが、実験を繰り返し $6.0 \pm 0.1 \mu\text{m}$ の圧電素子を使用した。電磁石への印加電圧は10Vとした。力センサを用いて電磁力を実測したところ、約2Nであった。

精密位置計測におけるミニチュアロボットの進行方向は、図4の x_1 の方向とした。進行方向に対して90度の方向にレーザを設置し、そのレーザとPSD1の受光面が垂直になるよう配置した。すなわち、PSD1のローカル座標 x_1 とミニチュアロボットのグローバル座標 x とが一致させてある。したがって、ミニチュアロボットの圧電素子が構成する正三角形と、ミニチュアロボットに搭載したPSDが構成する正三角形とは、30度向きが異なっている。

ミニチュアロボットの中心と各PSDの間の距離 h は14mmであった。一方、PSDの受光面長は12mmである。検出可能なミニチュアロボットの角度変位は $2\pi/3\text{rad}$ 間隔で $\pm\theta = \tan^{-1}(6\text{mm}/14\text{mm}) = \pm 0.405\text{rad}$ の範囲である。これは1周($2\pi\text{rad}$)にわたる角度の計測が不可能であることを意味するが、PSDの構成する正三角形の各辺の長さをPSDの受光面長に近づけることにより、計測範囲が拡大する。

図 6 PSD 上の光点の位置 (直線変位)

Fig. 6. Light spot positions on PSDs (linear displacement).

図 7 直線変位

Fig. 7. Measured linear displacement.

ミニチュアロボットを原点付近で x 軸方向に微動させたときの3個のPSD上の受光点の位置を図6に示す。この結果は、先に述べた移動平均以外のフィルタ処理を施していない。さらに、図6の結果を式(7)(8)(9)を用いて変換した結果を図7に示す。 x 軸方向の変位を生じる制御信号を与えたものの、ミニチュアロボットは y 軸方向と θ 方向に微小な変位が生じていることがわかる。圧電素子の構成する正三角形とPSDの構成する正三角形は、30度の相違を持たせたが、取り付け誤差が存在する。この取り付け誤差が y 軸方向への変位の原因の一つである。また、等しい伸びを発生する圧電素子を使用したか、個体差を完全に排除できていないことも原因と考えられる。ミニチュアロボットの変位を近接センサで計測する場合には、センサヘッドの検出方向とミニチュアロボットの変位方向を一致させる必要があるが、本手法ではその必要がない。図6において、3個の計測データ中、2個が減少傾向にあり、1個が増加傾向にあることが特徴である。仮にミニチュアロボットの進行方向が x 軸と平行であれば、PSD上のローカル座標に関して $x_2 = x_3$ の関係が成り立つ。実験結果では x_2 と x_3 の傾きに相違があり、この傾きの相違が y 方向への変位成分を表す。

ミニチュアロボットの変位を光ファイバ式非接触変位計(岩通ST-3711)を用いて同時に計測した結果を図7中に黒

図 8 PSD 上の光点の位置 (回転変位)

Fig. 8. Light spot positions on PSDs (rotational displacement).

図 9 回転変位

Fig. 9. Measured rotational displacement.

丸印で示した。ミニチュアロボットにはミラーを搭載し、図 7 の実験と同時にデータを獲得した。角度変化の影響を避けるため、制御信号に同期して 0.5s 間隔でミニチュアロボットの位置を計測した。光ファイバ式非接触変位計で得られた y 方向の結果が直線よりずれていることが、ミニチュアロボットの y 方向のふらつきを示している。図 7 のデータを詳細に比較したところ、非接触変位計の計測結果と提案手法の計測結果の最大誤差は $0.52\mu\text{m}$ であった。

ミニチュアロボットを原点付近で反時計周りの微小回転をさせたときの計測結果を示す。図 8 は各 PSD 上の受光点の位置を示し、図 9 は式 (7)(8)(9) を用いて得られた変換結果を示す。これらの結果も、先に述べた平均化処理以外のフィルタ処理などは行っていない。図 8 において、3 個の計測データが全て増加傾向にあることが、回転変位の表れである。これらの結果の傾きに多少の相違が見られるが、原点を中心とした回転であれば 3 個のデータの傾きが等しくなる。

図 9 に x, y 方向の変位には周期的増減が見られるが、 θ 方向の変位には周期的増減は見られない。 x 軸成分は振動しながら増加傾向にあり、 y 軸成分は振動しながら減少傾向にある。両者の周波数はほぼ等しいので、相関があると考えられる。そこで、図 9 の x, y の関係を xy 座標上に表示すると図 10 が得られる。これは、このミニチュアロボットの中心座標が回転しながら原点から遠ざかる方向に移動

図 10 回転中心の移動

Fig. 10. Displacement of rotational center.

図 11 広範囲の位置計測結果

Fig. 11. Measured displacement in a large area.

していることを示している。回転中心が移動の影響を受けない他の角度センサの入手が困難であったため、計測結果を他のセンサとは比較できなかった。

図 7 と図 9 のノイズの幅より、原点近傍でのミニチュアロボットの位置と姿勢の読み取り精度は、 $3\mu\text{m}$, 0.2mrad であった。信号処理過程やレーザ光に含まれるランダムノイズを考えると、ミニチュアロボットの変位を精度良く計測できている。この値は計測を繰り返した結果、ほぼ一定であった。

次に、本手法での計測範囲のほぼ全域にわたる $8\text{mm} \times 8\text{mm}$ の位置変位を計測した。ミニチュアロボットの変位は試行毎に微小に異なるため、PSD を搭載した状態のミニチュアロボットを xy ステージに載せてステージを変位させ、ステージの読み取り目盛 (最小目盛 $10\mu\text{m}$) と本方法での計測結果を比較した。結果を図 11 に示す。 x 軸、 y 軸ステージの読みをそれぞれ $x = 0, \pm 2, \pm 4\text{mm}$, $y = 0, \pm 2, \pm 4\text{mm}$ としたときに、本手法で読み取った値をプロットした。25 個の地点で各 128 回の計測を行い、その結果をプロットした。各地点で得られた 128 個のデータは区別できない程度に一致しており、本手法の繰り返し精度が高いことが確認された。中心部分 ($-2\text{mm} < x < 2\text{mm}$, $-2\text{mm} < y < 2\text{mm}$) 付近は良く一致し、誤差はステージの最小目盛りの $10\mu\text{m}$ 以下であった。特に、原点における誤差は直線ステージの読取限界の $1\mu\text{m}$ 程度であった。周辺部分は誤差が目立つ。

図 12 広範囲の姿勢計測結果

Fig.12. Measured rotational displacement in a large angle.

PSD には個々に固有の位置検出誤差があり、誤差は PSD の中心から離れると非線形になるためである。しかも、使用した PSD は最大で $\pm 240\text{nm}$ の誤差がある⁽¹²⁾。ステージ (-4.0mm , -4.0mm) の位置における計測誤差が最大であった。個々の PSD の位置検出誤差を変換テーブルなどで補正することによって誤差を小さくすることが可能である。

最後に、原点付近での角度計測範囲のほぼ全域にわたる $\pm 0.4\text{rad}$ の回転変位を計測した。PSD を搭載した状態のミニチュアロボットを θ ステージに載せてステージを回転させ、ステージの読み取り目盛 (最小目盛 $55\text{秒}=0.27\text{mrad}$) と本方法での計測結果を比較した。結果を図 12 に示す。横軸に回転ステージの読みを、縦軸に本手法により得られた値を示す。回転ステージの各回転角度に対して 128 回の計測を行い、その結果をプロットした。各角度で得られた 128 個のデータは識別不可能な程度に一致しており、角度計測においても本手法の繰り返し精度が高いことが確認された。 $\theta = 0$ 付近では誤差が少なく、回転ステージの最小目盛りの 0.27mrad 程度である。この値は図 7, 図 9 より得られた誤差 (0.3mrad) が、概ね信頼できることを意味する。角度変位が大きい場所での誤差が大きい。これは図 11 と同様、PSD の中心から離れた場所での非線形な位置検出誤差に由来する。この誤差も位置の計測と同様に PSD の誤差の補正により軽減可能である。

5. まとめ

本論文では、卓上生産システムの構築を目指した数 cm サイズのミニチュアロボットの位置姿勢の計測方法を提案した。提案した方法は、ミニチュアロボットに搭載すべき位置センサに 1 次元 PSD を用いた。ミニチュアロボットの外部に $2\pi/3\text{rad}$ 間隔で 3 個のレーザを設置し、ミニチュアロボットの上部に正三角形に 3 個の PSD を搭載し、PSD 上に照射されるレーザ光線の光スポットの位置からミニチュアロボットの位置と姿勢を求める関係式を明らかにした。提案する方法に含まれる誤差を、レーザの設置誤差を中心に検討した。PSD による受光点の検出はレーザ光の照射角度に依存しないため、原理的に直線変位と回転変位が干渉

しない位置姿勢計測が可能になった。

提案する方法の有効性を確認するために実験を行い、ミニチュアロボットが直線変位するときと回転変位するときの変位を計測した。PSD 上での受光点の位置情報を移動平均フィルタ (サンプリング数 128 データ, 平均区間として 20.8ms) を用いて処理したところ、原点付近では $3\mu\text{m}$, 0.2mrad の精度で変位計測が可能であった。この移動平均フィルタ処理は、ミニチュアロボットの制御周期に比べて十分に短く、本実験結果には影響を与えない。ミニチュアロボットの計測範囲全体にわたる計測を行った結果、 $x = y = \theta = 0$ 付近での位置姿勢の計測誤差は小さいものの、PSD の端部を用いた計測結果は、PSD に固有の非線形性により誤差が含まれた。今後、個々の PSD の非線形な検出誤差を補正することにより誤差の低減が可能である。

本論文では 3 個の 1 次元 PSD をミニチュアロボットに搭載し、PSD により生じる光電流を処理する信号処理装置などは、ミニチュアロボットの外部に設置する方式とした。将来、これらの信号処理装置は、プロセッサの小型化などによりミニチュアロボットに搭載可能となる。信号処理装置をミニチュアロボットに搭載することにより、ミニチュアロボットの自律性が高まると期待される。提案手法により得られた位置姿勢情報をもとにしたミニチュアロボットの位置姿勢のフィードバックも可能である。

本手法では、外部からのレーザ信号を基準として、ミニチュアロボットは常に自分自身の位置を検出することができる。すなわち、外部に置かれた 3 個のレーザが恒常的に位置情報を提供する。したがって、外部の計測器を用いた計測結果をロボットに伝達する必要がないため通信プロトコルの議論は不要である。このことは、多数のロボットの位置と姿勢の同時検出が困難であることを意味するが、3 個のレーザの集光点付近における 1 台のロボットの精密位置姿勢計測には有効である。一方で、計測範囲がミニチュアロボットに搭載された PSD の受光面の大きさによって制限された。今後、広い計測範囲を確保するためには、リニアステージ上に光源を搭載する方法などを検討する。例えば、1 辺の長さが 1m の正三角形の各辺にリニアステージを配置し、辺と直角方向にレーザ光を照射し、レーザの集光点にミニチュアロボットを誘導することが可能である。この場合、本論文の提案手法を採用して、集光点を原点とした位置計測が可能になる。これらの拡張により、絶対座標による位置決めも可能になる。また、多数のミニチュアロボットの位置と姿勢の同時計測も望まれる。レーザ光線を格子状に配置するなどして、ミニチュアロボット群の位置と姿勢の計測システムへの拡張を試みる予定である。実現方法については、今後の課題である。

本研究の一部は、科学研究費補助金、堀情報科学振興財団、内藤科学技術振興財団からの研究助成を用いました。記して謝意を表します。

(平成 15 年 3 月 13 日受付, 平成 15 年 7 月 11 日再受付)

文 献

- (1) H.Aoyama, T.Iwasaki, A.Sasaki, J.Fukaya, and A.Shimokobe: "An ultra precision production system organized by miniature robots", *J. of the Japan Society for Precision Engineering*, Vol.59, No.6, pp.1007-1012 (1993-6)(in Japanese)
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)」, 精密工学誌, **59**, 6, pp.1007-1012 (1993-6)
- (2) H.Kato, K.Hayakawa, A.Torii, and A.Ueda: "XY Θ actuators using piezoelectric and electromagnetic actuators", *T. IEE Japan*, Vol.119-C, No.1, pp.57-62 (1999-1)(in Japanese)
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」, 電学論誌 C, **119**, 1, pp.57-62 (1999-1)
- (3) A.Torii, H.Kato, and A.Ueda: "A miniature actuator with electromagnetic elements", *T. IEE Japan*, Vol.120-C, No.1, pp.40-45 (2000-1)(in Japanese)
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」, 電学論誌, **120**, 1, pp.40-45 (2000-1)
- (4) O.Fuchiwaki, Y.Syouji, T.Chomchana, and H.Aoyama: "Development of versatile micro robot for microscopic operation (1st report)", *J. of the Japan Society for Precision Engineering*, Vol.63, No.3, pp.403-408 (2002-3)(in Japanese)
淵脇大海・庄司裕一・Trevat Chomchana・青山尚之:「顕微鏡作業用 xy θ 小型自走機械の開発(第1報)」, 精密工学誌, **63**, 3, pp.403-408 (2002-3)
- (5) H.Aoyama: "Positioning system for microrobots", *J. of the Japan Society for Precision Engineering*, Vol.65, No.10, pp.1415-1420 (1999-10)(in Japanese)
青山尚之:「マイクロロボットの位置決め技術」, 精密工学誌, **65**, 10, pp.1415-1420 (1999-10)
- (6) M.Iwata, H.Takahashi, K.Sasaki, and M.Takano: "Positioning system for mobile robot using LED marks", *J. of the Japan Society for Precision Engineering*, Vol.61, No.11, pp.1579-1583 (1995-11)(in Japanese)
岩田宗之・高橋英男・佐々木健・高野正晴:「LED 灯台を用いた移動ロボット用位置姿勢検出システム」, 精密工学誌, **61**, 11, pp.1579-1583 (1995-11)
- (7) M.Kohno, M.Matsunaga, K.Okuno, and Y.Anzai: "Components and an adaptive sensor network", *IEICE Trans.*, Vol.J82-A, No.3, pp.454-462 (1999-3)(in Japanese)
河野通宗・松永昌浩・奥埜賢士・安西祐一郎:「適応型センサネットワークの構成手法」, 信学論誌 A, **J82-A**, 3, pp.454-462 (1999-3)
- (8) M.Suzuki, Y.Yamada, N.Tsuchida, and K.Imai: "A study on position detection and control system of self-movable micro robot (2nd report)", *J. of the Japan Society for Precision Engineering*, Vol.60, No.9, pp.1365-1369 (1994-9)(in Japanese)
鈴木基之・山田陽滋・土田縫夫・今井孝二:「自走式小型ロボット位置計測制御システムの研究(第2報)」, 精密工学誌, **60**, 9, pp.1365-1369 (1994-9)
- (9) S.Sakuta, K.Ogawa, and K.Ueda: "Experimental studies on ultra-precision positioning, - inchworm movement method using fine and coarse positionings", *J. of the Japan Society for Precision Engineering*, Vol.57, No.12, pp.2133-2138 (1991-12)(in Japanese)
佐久田茂・小川 潔・上田勝宣:「超精密位置制御に関する研究」, 精密工学誌, **57**, 12, pp.2133-2138 (1991-12)
- (10) J.J.Aguilar, J.A.Yague, J.A.Albajez, and J.Santolaria: "Application of lateral effect position sensitive detectors (PSD) to angles measuring in a self-centring probe", *Proceedings of the 3rd international conference of european society for precision engineering and nanotechnology*, Eindhoven, the Netherlands, Vol.1, pp.741-744 (2002-1)
- (11) S.Hayakawa, N.Tsuchida, and H.Tanaka: "Shaft inserting into moving object using robot with the cross type PSD", *T. IEE Japan*, Vol.120-C, No.4 pp.516-521 (2000)(in Japanese)
早川聡一郎・土田縫夫・田中 均:「十字型 PSD センサを装着したロボットによる移動物体へのはめ合い作業」, 電学論誌 C, **120**, 4, pp.516-521 (2000-4)
- (12) HAMAMATSU PHOTONICS K.K. Catalog: One-dimensional PSD, S3932, Cat. No. KPSD1002E02 (2001)
浜松フォトニクス株式会社カタログ: 1次元 PSD S3932, Cat. No. KPSD1002J06 (2001)

鳥井 昭 宏 (正員) 1966 年 11 月 25 日生。1994 年名古屋大学大学院工学研究科博士課程後期課程修了。博士(工学)。同年、愛知工業大学工学部電気工学科助手、同大講師を経て、2000 年より助教授。圧電素子と電磁石を用いたミニチュアロボット、原子間力顕微鏡の原理を用いた精密計測を中心とした、マイクロメカトロニクスに関する研究に従事。1994 年精密工学会沼田記念論文賞受賞。2002-03 年英国 Univ. of Warwick 客員研究員。精密工学会、応用物理学会、euspen、IEEE の各会員

川 根 祐 輔 (学生員) 1978 年 11 月 1 日生。2001 年愛知工業大学工学部電気工学科卒業。2003 年愛知工業大学大学院工学研究科電気電子工学専攻修了。ミニチュアロボットの位置計測に関する研究に従事。

道 木 加 絵 (正員) 1974 年 9 月 11 日生。2002 年名古屋大学大学院工学研究科博士課程後期課程修了。博士(工学)。同年、愛知工業大学工学部電気工学科助手。自律移動ロボットの行動獲得に関する研究に従事。ロボット学会会員。

植 田 明 照 (正員) 1943 年 2 月 6 日生。1965 年名古屋大学工学部電気学科卒業。同年日立製作所入社。工学博士。1994 年より愛知工業大学電気工学科教授。電力系統用、産業用、車両用の電力変換装置の研究に従事。1983 年 IEEE-IAS 論文賞, 1990 年電気学会論文賞受賞。IEEE 会員。