2次元変位センサの自律校正法に関する研究*

林 玉 池** 高 偉*** 清 野 慧***

A Self-Calibration Method for Two Dimensional Displacement Sensor

Yuchi Lin, Wei Gao and Satoshi Kiyono

This paper presents a new self-calibration method for calibrating the linearity error of two dimensional displacement sensors. By using this method, the linearity error can be calibrated accurately without using any other accurate calibration reference. This method utilizes the special feature of the two dimensional displacement sensor so that the self-calibration can be realized easily and effectively. In this paper, the proposed method is applied to calibrate two dimensional position-sensing devices (PSD). A calibration system, which consists of only a laser diode, an X-Y stage and a two dimensional PSD, is constructed. The laser diode is placed on the X-Y stage, and the PSD is fixed spatially. The laser beam from the laser diode is used to scan two-dimensionally the surface of the PSD by moving the X-Y stage. Two kinds of PSD were calibrated using the calibration system, and the experimental results confirming the effectiveness of the proposed method are presented.

Key words: metrology, two dimensional displacement sensor, two dimensional PSD, self-calibration, linearity, reference, accuracy

1. 緒 言

精密技術の種々の分野における精度向上に伴い、センサや測定器に対する精度と分解能向上の要求が強まっている。市販品のセンサの使用に当たっても、それに添付されたデータより高い分解能や精度を実現したい場合が多い。

また、測定器やセンサの利用者は、装置の購入時の性能が時間が経った後も保たれていると信じていることが多いが、思ったより大きな誤差を生じていることがある¹⁾。

上述の問題を考慮すると、変位計や角度計だけでなく種々の測定器でも出来るだけ頻繁に校正してそれらの能力一杯までの精度で利用する手法を確立する必要がある^{2)~7)}。

しかし、従来の校正法では、目的のセンサより精度の高い基準を使って校正するため、いろいろな条件の制限が生じる。そこで、特別な基準を必要としない自律校正法を実現する必要性が生じている^{3) 4) 7) 8)}。

光スポットの重心位置を電気信号として検出する2次元PSD(半導体位置検出素子)は、変位計、角度計を始め多くの光学センサにとって重要なキーパーツとなっている⁹⁾。しかし、現在入手し得る2次元PSDはS/N比から評価される高い分解能のわりに線形誤差が大きい。また、各PSDに与えられる仕様は特定の条件のもとで得たデータであり、利用する条件によっては与えられたものと大きく違うことがある。このためカタログデータだけではユーザの使用条件に合った情報が得られず、最適の設計が出来ないことも多い。そこで、PSDの能力を十分に発揮させるためにはユーザが必要な精度と条件で詳しく校正して使用する必要がある。

筆者らは1次元のPSDを自律的に校正する手法を提案しその有効性を確認した^{8) 10)}。2次元PSDに対してこの手法をそのまま拡張することもできる。しかし、2次元の位置決めが

できるセンサやスケールでは2次元に特有のより簡単な方法がある。本論文では2次元PSDを例として、その自律校正法を提案する。提案した自律校正法はPSDに限らずそれを応用した各種の2次元センサに対しても簡単に利用できる。

提案した校正法では空間に固定した2次元PSDと2次元テーブルに配置した光ビーム走査部からなるシステムを用いる。その手法により、特別な基準を用いずに2次元PSDの詳細な線形誤差が得られた。本論文ではその自律校正法の原理、校正システムと実験結果について述べる。

2. 原 理

1次元センサの自律校正法ではこの原理で1:nの比率を与えた2箇所の変位を比較測定して得たデータを基に、2個のセンサを互いに校正した^{3) 8)}。X, Y方向の光スポット位置を検出する2次元PSDの自律校正原理はつぎのようになる。

光スポットを $X:Y=1:n$ ($n>1$) になる方向に、すなわち図1(a)のように移動して、Yの読みの $1/n$ を基準とし、Xの読みを出力としてXに関する校正データを得る。次に図1(b)のように光スポットを $X:Y=n:1$ ($n>1$) になる方向に移動して、Yに関する校正データを得る。PSDの受光面全面に必要な密度の点でデータを取る。最初のXの校正データ

Fig.1 Principle of self-calibration of two dimensional PSD

* 原稿受付 平成7年10月17日

** 正 会 員 中国天津大学(現、東北大学工学部)

*** 正 会 員 東北大学工学部(仙台市青葉区荒巻字青葉)

Fig.2 Self-calibration system for a two dimensional PSD

にはYの未知の線形誤差（直線へのあてはめ誤差）を $1/n$ 倍したものが含まれる。これを使ってYに関する校正データを補正すると、その結果の校正データには未知であったYの線形誤差を $1/n^2$ 倍したものが含まれることになる。さらに、これを使ってXの校正データを補正するとその校正誤差は元の値の $1/n^3$ 倍になる。この計算を繰り返すと両方向の校正データの誤差はゼロに近づく。

3. 装置とデータ処理

3.1 実験装置とシステム

提案の校正原理を実現するために構築した実験システムの概略を図2に示す。

実験装置は光ビーム走査部と受光部からなる。光ビーム走査部は光源部とxyテーブルから構成され、受光部は校正対象となる2次元PSDと上、下に移動できるzテーブルから構成される。以下ではxyテーブルの両方向をx, yと呼び、2次元PSDの両方向をX, Yと呼ぶ。

光源部は発振波長780nmの半導体レーザー(LD)と集光レンズからなる。xyテーブルは日本精工(株)製、CD1515-140型で、ストローク $150 \times 150 \text{ mm}^2$ 、バックラッシュ $1 \mu\text{m}$ 、位置決め精度 $10 \mu\text{m}$ 、繰返し位置決め精度 $\pm 3 \mu\text{m}$ のものである。また、光ビーム走査部と受光部の配置はつぎのようにした。xyテーブルのx方向を運転する時、光スポットが $X:Y=1:n$ 、あるいはPSDの姿勢を変えて、 $X:Y=n:1$ ($n=2$)になる方向でPSDの受光面上を移動する。zテーブルは上下に移動すると、光源とPSDの距離が変わるので、これを利用してPSDに入射する光スポット径を変える。

xyテーブルは手動運転とコンピュータによる自動運転が使える。そのテーブルのx, y両方向を利用して、毎回の測定始点を調整する。測定中にはコンピュータでxyテーブルのx方向だけを1ステップ(約 $60 \mu\text{m}$)ずつ移動してデータを取る。1本の曲線を得るためのサンプリング数は最大200になる。PSD上の光スポット位置は、次式により求められる。

$$\left. \begin{aligned} X &= \frac{X_2 - X_1}{X_2 + X_1} \cdot \frac{L}{2} \\ Y &= \frac{Y_2 - Y_1}{Y_2 + Y_1} \cdot \frac{L}{2} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここで、LはPSD上の電極間の距離、 X_1, X_2, Y_1, Y_2 は各電極から得られる出力信号（光電流）、X, Yは光スポットの位置座標である。

信号処理部はI/V変換回路、増幅回路、デジタルマルチメータ、コンピュータからなる。PSDの出力の電流信号をI/V変換回路で電圧信号に変換し、増幅した後、デジタルマルチメータで読み取り、GPIBボードを介して、コンピュータに取り込みデータ処理を施す。計算精度を考えて除算器を用いずコンピュータで式(1)の計算をする。

3.2 実験手順

3.2.1 データの収録

PSDのXとYの全測定範囲をスポットの走査方向によって同じピッチで m ($m=20$) 分割する。測定は二つに分けて行う。すなわち、走査方向が $X:Y=1:n$ になる(x方向と呼ぶ)場合と $X:Y=n:1$ になる(y方向と呼ぶ)場合である。図3のように、x方向に I_1 の線を測定した後、1ピッチ平行移動して I_2, I_3 と I_{m-1} まで繰り返す。x方向を測定した後、PSDの姿勢を調整し、y方向の測定を $\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_{m-1}$ の線に沿って行う。測定時の走査にはxテーブルだけを使う。xとy方向の全部を測定すると、PSDの受光面上に測定線の交点が $(m-1) \times (m-1)$ 個だけ生じる。

まず、光学系を調整し、レンズの光軸をPSDの受光面に直交させ、zテーブルを調整し、予定サイズの光スポットを当てる。xyテーブルを試運転してPSDの移動量 $X:Y=1:n$ になるようにPSDの姿勢を調整する。それから、PSDの出力が1回目の始点座標になるようxyテーブルを移動し、PSD光源との相対位置を調整する。システムを安定させた後、次の手順で実験を進める。

- 1) xyテーブルのy方向を固定し、x方向を1ステップずつコンピュータによって移動し、設定した範囲まで1ライン上のPSDのX, Yのデータを取る。
- 2) テーブルのxとy方向を調整しながらスポット位置をPSDのX方向に1ピッチ移動して、1)と同様に次のラインのX, Yのデータを取る。
- 3) 1ピッチずつ移動しながらX, Yの測定を $m-1$ 回繰り返す。

Fig.3 Measurement lines

これらはYを基準としたXに関するデータとなる。

- 4) PSDの姿勢を調整し、スポットの移動量X:Y=n:1になるよう、PSDと光源部移動方向(x方向)との相対姿勢を変更して、1)~3)と同じようにXを基準としたYに関する測定データをm-1ライン分取る。

3. 2. 2 データの処理

Fig.4 Intersection point

1) 交点の座標の計算

Xに関するm-1本の曲線とYに関するm-1本の曲線の交点の座標を計算する。Xに関するi番目の曲線(I_i)とYに関するj番目の曲線(II_j)の関係が図4のような時、その交点Pの座標をその近傍にある I_i 上の測定点A(a_x, a_y), B(b_x, b_y)と II_j 上の測定点C(c_x, c_y), D(d_x, d_y)を使って計算する。 $a_x \dots d_x, a_y \dots d_y$ はそれぞれA, B, C, D点のX, Y座標である。P点のX, Y座標 X_{ij}, Y_{ij} はそれぞれ次式で近似的に与えられる。

$$\left. \begin{aligned} X_{ij} &= \frac{K_1 \cdot a_x - K_2 \cdot c_x - a_y + c_y}{K_1 - K_2} \\ Y_{ij} &= \frac{K_2 \cdot a_y - K_1 \cdot c_y + K_1 \cdot K_2(c_x - a_x)}{K_2 - K_1} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ただし、 $K_1 = (b_y - a_y) / (b_x - a_x)$
 $K_2 = (d_y - c_y) / (d_x - c_x)$

2) 比例値nの決定

2次元PSDの中心部の $4 \times 4 \text{ mm}^2$ 範囲で収録したデータによってnを計算する。Xに関するデータではx方向の移動距離でy方向の移動距離を割った商の平均値を比例値 n_1 として、Yに関するデータではy方向の移動距離でx方向の移動距離を割った商の平均値を比例値 n_2 とする。

なお、厳密な比例値が不明で、そのnの評価に δn の誤差があったとすると、X(あるいはY)方向の最初の校正曲線の基準側が $1/(1+\delta n_1)$ (あるいは $1/(1+\delta n_2)$)だけ真値より縮小して表現される。さらに、XとYの両方向のデータを交換して校正すると、その結果には基準側が $1/(1+\delta n_1)(1+\delta n_2)$ だけ縮小され、感度は拡大される。その値と最初に与えた平均感度から比例値nの誤差を自律的に補正することができる³⁾。

3) 線形誤差の計算

上で得た交点のデータによって次の手順で収束演算処理をする。

- (a) P点の座標を使い、Xに関するi番目の曲線の始点からP点までのY方向の距離を求める。そのY成分の $1/n_1$ を基準にして、P点のX座標を修正する。
 (b) 修正したP点のX座標を使い、Yに関するj番目の曲線の始点からP点までのX方向の距離を求める。そのX成分の $1/n_2$ を基準にして、P点のY座標を修正する。
 (c) 1巡目で得たP点の座標の修正値を使って、2巡目のP点の座標の修正値を計算する。その後、同じように3巡目、4巡目、…、と前後2回の計算結果の差の絶対値の最大値が与えた値(本計算では $0.2 \mu\text{m}$)より小さくなるまで収束計算を

繰り返す。

- (d) 収束完了後の修正値を基準とし、初期のP点のX座標値とXの修正値との差をX方向の誤差とし、P点のY座標値とYの修正値との差をY方向の誤差とする。

4. 実験結果

校正対象とする2種類の2次元PSDの特性に関するカタログ値を表1に示す⁹⁾。2次元PSDはS1200とS1300の2種類である。S1200が表面分割型で、S1300が両面分割型である。PSDの有効受光面積は $13 \times 13 \text{ mm}^2$ であるが、メーカーの仕様表では 5 mm と 2.5 mm の半径の範囲のデータが与えられている。比較の便利のため、校正範囲は原点を中心に $10 \times 10 \text{ mm}^2$, $4 \times 4 \text{ mm}^2$ の正方形に定めた。なお、理論的にはPSDの出力は入射光の強度分布の重心の位置に比例し、光スポット径の大きさに関係がない。実際にはPSDの感度むらが存在するため¹¹⁾、スポット径や強度分布の変化がPSDの直線性に影響を与える。同一条件におけるPSDの性能評価をするため、本実験では光スポット径を 0.2 mm に固定した。

2次元PSDの校正実験にはXに関するデータとYに関するデータの2組をとる必要がある。1組のデータの収録の時間(実験手順1)~3))は1時間程度である。実験装置の安定性を把握す

Table 1 Properties of PSDs

Type	S1200	S1300
Active area mm^2	13×13	13×13
Resolution μm	10	6
Position detection error	in $\phi 2.5 \text{ mm}$	$\pm 1.5\%$ (TYP.) $\pm 3.0\%$ (MAX.)
	in $\phi 5 \text{ mm}$	$\pm 12\%$ (TYP.) $\pm 15\%$ (MAX.)
		$\pm 0.8\%$ (TYP.) $\pm 1.5\%$ (MAX.)
		$\pm 1.5\%$ (TYP.) $\pm 2.5\%$ (MAX.)

Table 2 Repeated calibration results of S1300

Number	X-direction		Y-direction	
	MAX.	MIN.	MAX.	MIN.
1	2.1	-7.8	3.5	-7.2
2	2.0	-8.0	3.0	-7.4
3	2.3	-7.6	3.4	-7.0
4	2.4	-7.7	3.2	-7.6
5	2.3	-7.7	3.6	-7.3
6	2.2	-7.9	3.5	-7.2
7	2.5	-7.6	3.3	-7.5
8	2.2	-8.0	3.5	-7.4
σ	0.09	0.08	0.14	0.12

Fig.5 Drift of PSD output

(a) x-direction

(b) y-direction

Fig.6 Repeatability of S1300

(a) X-direction

(b) Y-direction

Fig.8 Calibrated linearity error of S1300 in $4 \times 4 \text{ mm}^2$

(a) X-direction

(b) Y-direction

Fig.7 Calibrated linearity error of S1200 in $10 \times 10 \text{ mm}^2$

(a) X-direction

(b) Y-direction

Fig.9 Calibrated linearity error of S1300 in $10 \times 10 \text{ mm}^2$

る目的で、実験システムのドリフトについて調べた。

実験装置を校正実験の時と同じ配置にして、光スポットを PSD の中心部に移動する。両ステッピングモータに電源を投入して、 x y テーブルが静止した状態で 1 時間のドリフト試験を行った。S1300 の PSD を使った測定結果を図 5 に示す。データのとり方は、約 10 秒の時間ごとに、PSD の 4 電極と温度センサか

らの信号をサンプリングし、一つのデータにする。PSD の出力は式 (1) によって計算し、 X と Y のデータにする。測定結果では、1 時間で温度が約 0.2°C 、PSD の出力に約 $\pm 0.5 \mu\text{m}$ の変化のあることが見られた。その変化の様子は時間によって違うが、図は代表的な例である。

PSD S1300 を使って、その $4 \times 4 \text{ mm}^2$ の範囲で間に日を置き

Fig.10 Comparison between results of the two methods

ながら8回繰り返して得た校正結果を表2に示す。標準偏差 σ で評価して最大 $0.14\mu\text{m}$ のばらつきが見られた。

S1300の $4\times 4\text{mm}^2$ 範囲で3日間3回繰り返して得た校正結果からPSDの中心を通るx, y方向それぞれ I_{10} , Π_{10} を1本選んで、走査線に沿った誤差曲線を図6に示す。図6(a)はx方向、図6(b)はy方向の3回の繰返し結果である。図から見ると繰返し誤差も最大で $\pm 0.3\mu\text{m}$ 程度である。この原因の主なもの繰返し時毎回の位置の差異のほか、ドリフトにある。この値はドリフトから見たセンサの安定性と分解能の限界に達しているといえる。

測定結果の3次元的表示は図7、図8と図9ようになる。図をプロットする際に計算によって、走査方向に沿ったx, y方向誤差曲線をもとにPSDのX, Yと平行するX, Y方向曲線を求めた。底平面はPSD受光面の位置座標として、高さ方向は誤差の大きさを示す。図7はPSDS1200の $10\times 10\text{mm}^2$ の誤差で、図8はPSDS1300の $4\times 4\text{mm}^2$ の誤差で、図9はPSDS1300の $10\times 10\text{mm}^2$ の誤差である。図(a), 図(b)というのはそれぞれX方向の誤差とY方向の誤差である。

PSDS1300をx yテーブルの平行方向に置き、分解能 $1\mu\text{m}$ のデジタル変位計を使って変位を測定した。デジタル変位計の読みを基準として、PSDの $10\times 10\text{mm}^2$ の線形誤差を評価した。PSDの座標の平行方向では 1mm 間隔の格子線状にX, Yそれぞれ11本の測定線を得る。そのデータをもとに図3のI, IIに相当する線上のデータを得る。この I_{10} , Π_{10} 上でそれぞれx, yの誤差を比較すると、図10のようになる。図の横軸は基準変位で、縦軸は線形誤差である。実線①は自律校正の結果で、点線②はデジタル変位計の出力を基準にして求めた結果である。図から見ると両者の傾向は良く合っているが、量的には $2\sim 3\mu\text{m}$ の差がある。その原因はデジタル変位計の誤差と両方法での走査線の位置の差異と考えられる。

S1200とS1300PSDのそれぞれ $4\times 4\text{mm}^2$ と $10\times 10\text{mm}^2$ の範囲の3回の校正結果における誤差の最大値と最小値を表3に示す。そのX, Yの値は3回の平均値で σ はその標準偏差である。 $10\times 10\text{mm}^2$ の範囲の標準偏差 σ は $4\times 4\text{mm}^2$ の範囲に比べて大きい、その原因にはPSDの誤差だけでなく、各走査始点の不一致も含まれる。 $10\times 10\text{mm}^2$ の範囲では端の誤差が大きいため、場所の影響が強い。 $4\times 4\text{mm}^2$ の範囲ではこの影響がより小さいので、標準偏差 σ の値は実際の状況に近いと考えられる。

この結果から、両PSDともカタログで保証されているより高い精度の位置検出が実現されていることがわかる。最大最小値の差(変動幅)から見ると、PSDS1300の方は

小領域だけでなく全範囲でも線形誤差がPSDS1200に比べてほぼ1けた小さい。

Table 3 Calibrated linearity error of PSDs

Type		S1200		S1300	
		MAX.	MIN.	MAX.	MIN.
in $4\times 4\text{mm}^2$	X	57.3	-19.5	2.2	-7.7
	σ	0.9	2.0	0.11	0.13
	Y	17.3	-14.2	3.3	-7.2
	σ	1.6	1.0	0.11	0.17
in $10\times 10\text{mm}^2$	X	416.6	-127.3	14.2	-12.3
	σ	8.5	7.0	0.71	0.65
	Y	263.5	-298.2	19.5	-20.7
	σ	10.3	10.1	0.62	0.53

5. 結 言

特別な高精度の基準を必要としない、2次元センサに特有の自律校正法を提案し、構築した自律校正システムにより2種類の2次元PSDの線形誤差を校正、考察し、次のような結論を得た。

- (1) 提案した校正法において、分解能と測定系のノイズとドリフトによる限界の繰返し精度で校正ができた。
- (2) デジタル変位計による校正結果と比べると、ほぼ同様の線形誤差の傾向が得られた。
- (3) 少なくとも低周波特性ではカタログの分解能より1けた以上高い精度でPSDを使うことができることが分かった。

謝 辞

装置の作製には本学の水戸正美技官の協力を得た。また、本研究の一部は平成7年度文部省科研費(一般研究C)の助成を受け行われたことを付記し、感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 秦 勝一郎：計測の標準・トレーサビリティと校正，設計工学，28, 3 (1993) 93.
- 2) 益田 正，梶谷 誠：ロータリエンコーダの校正法，設計工学，28, 3 (1993) 102.
- 3) 清野 慧，杉端 亨，森島 健：変位計の線形誤差の自律校正，精密工学会誌，59, 12 (1993) 2043.
- 4) 清野 慧，張 世宙：角度センサの高精度自律的校正法の研究，精密工学会誌，60, 11 (1994) 1591.
- 5) 松田 次郎，矢野 宏：三次元座標測定機における誤差解析，精密工学会誌，52, 8 (1986) 1313.
- 6) 中村 収ほか：三次元トラッキングレーザ干渉計による座標測定機の精度評価，精密工学会誌，58, 11 (1992) 1899.
- 7) L. De Jonge, J.P. Kruth: Self-Calibration Method for Three Dimensional Coordinate Measuring Machines Using a Ball Plate, Proc. 7th Int. Prec. Eng. Seminar, Kobe, May 1993, p.402.
- 8) 清野 慧，林 玉池：PSD線形誤差の自律校正，日本機械学会1994年度東北支部講演会講演論文集，(1994) 130.
- 9) 浜松ホトニクス株式会社：半導体位置検出素子(PSD)カタログ，(1989.7).
- 10) 林 玉池，清野 慧：PSDの高精度自律校正法の研究，日本設計工学会1994年度秋季講演会講演論文集，(1994) 71.
- 11) 倉沢 一男：位置測定におけるPSDの応用，精密機械，51, 4 (1985) 730.