低剛性の自動輪郭測定装置における計測補正の解析*

永井健一^{*1}, 笹井重俊^{*2}, 長屋幸助^{*3}
武田定彦^{*3}, 内山 茂^{*1}

A Functional Approach of Error Compensation in a Two-dimensional Measuring Device with Lower Stiffness

Ken-ichi NAGAI, Shigetoshi SASAI, Kosuke NAGAYA,
Sadahico TAKEDA, and Shigeru UCHIYAMA

This paper presents a method for the error compensation of measuring data in a two-dimensional length measuring device from lack of sufficient stiffness. Introducing the mode shape function which is expressed with the product of the finite power series truncated with fourth order and the trigonometric function to the least square approximation. Applying the method to the test device, the effects of compensation are clarified. It is found that this method gives good results to improve the measuring accuracy with the limited number of terms for unknown coefficients, compared with the approach of the Fourier series.

Key Words: Measurement, Error Compensation, Mode Shape Function, Least Square Method, Automatic Two-dimensional Measuring Device

1. 緒 言

近年, 機械の生産性の向上のため, 生産ラインでの自動化が広く普及している。これら機械部品の精度の維持は重要で, 高精度で安定な計測ならびに, その自動化が特に要求されている。例えば, 送り機構スライダなどの長尺部品の真直度は製品の可否を決める重要な因子の一つである。真直度や形状を計測する代表的な装置に三次元測長器がある。これは測定精度を保つため, 計測センサの移動で生ずる装置の変形を最小とする高剛性の構造となっている。そのため, 測定範囲に対し, 装置は大形, 大重量で, 温度変化の影響を受けやすく, 生産ラインなどでの使用に問題がある。可搬性, 測定の自動化, 高速性を考慮に入れた場合では装置の軽量化が必要となる。しかし, それに伴う剛性の低下が装置自体の弾性変形を生じさせ, 直接測定精度の低下の原因となる。それゆえ計測量に何らかの補正を加えることが最も容易で, 測定精度の向上が保たれる。形状測定装置の変形の補正に関し, 誤差ベクト

ルを導入した研究⁽¹⁾がある。また変形や形状の関数表示としていくつかの関数があるが, 特に表面あらさ表示にはフーリエ級数⁽²⁾の利用や, その他スプライン関数⁽³⁾などがあげられる。変形に伴う誤差補正を関数近似により行う場合, 実際の使用時の作業効率などを考慮すると, 適用が容易でかつ少ない近似項数で高次の変形を精度良く近似できる関数が望まれると言える。

本研究は低剛性の一軸方向の移動台を有する輪郭測定装置に関し, 自重または組立てにより弾性変形が測定誤差を生じさせることに注目し, 提案する形状関数を導入することにより, より少ない項数で, 測定精度の向上を図る方法を示す。まず, 形状関数は四次までのべき級数と三角関数の余弦との積で示される。ついでその関数の多項式で測定量を仮定し, 最小二乗近似により, その各項数に対する未定係数を決定した。さらに試作した輪郭測定装置とパーソナルコンピュータを組合せ, 真直度の自動計測実験を行い, 本補正法を適用した。さらにフーリエ級数近似による結果との比較も行い, より少ない項数で実用上十分な精度が得られることを示した。

2. 誤差補正の方法

測定装置は変位センサを搭載した移動台を持ち, 台

* 昭和63年3月31日 第65期通常総会講演会において講演, 原稿受付 昭和63年4月19日。

^{*1} 正員, 群馬大学工業短期大学部(☎376 桐生市天神町1-5-1)。

^{*2} 准員, 東京測器研究所(☎140 東京都品川区南大井6-8-2)。

^{*3} 正員, 群馬大学工学部。

を移動させて変位センサからの測定量を読取るものとする。図1(a)に示すごとく移動量を x 、センサから基準平面までの距離を z とする。計測により得られた離散測定量を x の小さい順にそれぞれ $x_p, z_p (p=0, 1, 2, \dots, n)$ とする。境界の値はそれぞれ (x_0, z_0) と (x_n, z_n) である。なお一般に x 方向の測定長さに対して z 方向の長さは十分に小さいものと仮定する。計算の便宜上、任意の x と対応する z に対し、つぎの無次元量を導入する。

$$\left. \begin{aligned} \xi &= (x - x_0)/x_r, \quad w = (\bar{z} - z)/z_r \\ \text{ただし } x_r &= x_n - x_0 \\ \bar{z} &= [z_n(x - x_0) + z_0(x_n - x)]/x_r \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

上式で x_r は測定範囲の長さ、 z_r は z 方向の任意な代表長さである。また $\bar{z}$ は境界値 (x_0, z_0) と (x_n, z_n) を結ぶ直線の一点から x 軸まで下した垂線の長さである。上式を用いて離散量 x_p, z_p はそれぞれ $\xi_p, w_p (p=0, 1, 2, \dots, n)$ に変換できる。つぎに $w_p (p=0, 1, 2, \dots, n)$ の形状を次式の連続関数⁽⁴⁾で仮定する〔図1(b)〕。

$$\left. \begin{aligned} w(\xi) &= \sum_j b_j \zeta_j(\xi), \quad (j=1, 2, 3, \dots) \\ \text{ただし } \zeta_j(\xi) &= f(\xi) \cos(j-1)\pi\xi \\ f(\xi) &= \sum_{k=1}^4 c_k \xi^k \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

上式において b_j は未定係数、 $\zeta_j(\xi)$ は形状関数で、 $f(\xi)$ の四次までのべき級数と三角関数の余弦との積で表してある。 $f(\xi)$ は等分布荷重をうける一様ばりのたわみ形状に対応し、三角関数は高次の変形を記述できるように考慮したものである。 $f(\xi)$ の c_k は境界でのたわみ形状により変わる定数である。その値を表1に示す。表1で、記号Sは境界でのたわみが単純支持、すなわち、たわみと曲げモーメントが0($w=w_{,ss}=0$)を満足する条件を示す。記号Cは固定の条件たわみ w

図1 測定センサの軌跡と基準平面との関係

と傾き $w_{,ss}$ がともに零に対応する。また一端固定、他端単純支持である(CS)の場合の形状を図2に示す。各次数 j に対応する形状を最大値を1として ζ_j で示してある。なお境界条件の選択には $w_p (p=0, 1, 2, \dots, n)$ の境界近傍の形状と比較して最適な場合を用いる。つぎに未定係数 b_j を決定するために最小二乗近似を行うと、つぎの連立一次方程式を得る。

$$\left. \begin{aligned} \sum_p \zeta_i(\xi_p) \zeta_j(\xi_p) b_j &= \sum_p \zeta_i(\xi_p) w_p \\ (i, j=1, 2, 3, \dots; p=0, 1, 2, \dots, n) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

未定係数 b_j の最大項数 m を決定し、上式を解くことにより $b_j (j=1, 2, 3, \dots, m)$ が定まる。式(2)よりたわみ w が求まり、任意の ξ において測定値が補間されることとなる。また式(1)よりこの場合の x, z が定まる。

被試験物などの輪郭測定にあたっては図1(a)に示すごとく z 軸変位計センサの指示量を $\bar{z}$ とすると、基準平面から試験物表面の座標 x と z^* は次式より求まる。

$$\left. \begin{aligned} x &= \xi x_r + x_0 \\ z^* &= z - \bar{z} = \bar{z} - w z_r - \bar{z} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

3. 輪郭測定装置の構成

3.1 測定装置本体 本装置は門形フレームによりつり下げられ、直下にある測定台上の被測定物の輪郭を測定するものである。装置の構成を図3に、またその写真を図4に示す。なお長手方向を x 軸、鉛直方向を z 軸とする。測定装置本体の基礎①は軽量化のた

表1 べき級数 $f(\xi)$ の係数 c_k の値

Boundary Condition	c_1	c_2	c_3	c_4
SS	1	0	-2	1
SC	1	0	-3	2
CS	0	3	-5	2
CC	0	1	-2	1

図2 (CS) の場合の形状関数

め、ジュラルミン材を加工し箱形断面構造とした。スライドテーブル②は、高速移動を可能とするためボールベアリング式のリニアガイド③ (NSK 製 500 mm) をかいして基礎①に取付け、ステップモータ④とボールねじ⑤ (NSK 製、送りピッチ 10 mm) により駆動した。その際、テーブルの移動量は磁気式のリニア測長器⑥により検出される。テーブルの有効ストロークは約 360 mm である。z 軸方向変位測定には渦電流形非接触変位センサを用いた (エミック製 1 000 μm , 分解能 0.1 μm)。センサは感度調節用のマイクロメータ⑧および位置調節用スライダ⑨をかいてテーブル②に取付けてある。これより、x および z 軸方向の変位量が決定される。

3・2 測定および制御装置 測定および制御装置のブロックダイアグラムを図 5 に示す。テーブルの位置決めはつぎのごとくなる。スライドテーブル①の位置を磁気式リニア測長器②および本体③にて読取る。その位置の値は RS 232 C 回線を通してパーソナルコンピュータ④に入力される。コンピュータはこの値と動作命令における目標値の差に応じたモータ回転パルス数をモータコントローラ⑤に与える。⑤はステップ

モータ⑥を駆動し、テーブルを移動する。さらに最終目標値の補正動作を行い、位置の再測定を行う。この場合の位置決め分解能は 10 μm である。一方、変位センサ⑦の変位出力は本体⑧からデジタル電圧計⑨の GP-IB 信号ラインをかいてコンピュータに入力し演算記録される。これより基準平面を測定したデータより z 軸の補正用たわみ形状関数の係数が決定される。その結果を磁気デスクに記録し、実際の測定での補正に用いる。例えば異なる温度や測定条件の下での補正値を記録しておけば、各場合に対して正確な補正が可能となる。

4. 実験結果

4・1 実験方法 まず測定装置のテーブル移動に伴う測定値の再現性を確認した。ついで、本方法を基準平面に対し適用し測定精度におよぼす未定項数 m の影響を明らかにした。さらにフーリエ級数近似による結果との比較を行った。実験での基準平面は水銀面を利用した。水銀上には酸化蒸発防止用に油膜を張った。また温度変化による熱膨張の影響をさけるため装置全体を簡易恒温室内に設置し実験を行った。実験を通して、温度は $18 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 以内であった。

4・2 実験結果 同一基準面を有効測定長さにわたり多数回測定した場合の結果を図 6 に示す。横軸は x 軸の移動量で、縦軸は z 軸方向の変位量である。なお測定間隔は 1 mm で行い、データ数は $n=350$ である。なお図 6 では 1 回の掃引ごとに測定値 z にオフセットを加えてある。この場合、移動量 350 mm に対し、装置の変形が最大で 50 μm あることがわかる。また曲線群はほぼ平行となっておりテーブルの移動による変形の再現性は保たれることがわかる。なお微小振幅の変動はほぼ $\pm 1 \mu\text{m}$ 以内である。これは装置のリニアスライド内のベアリングの転動に起因するものである。つぎに同一間隔の測定結果に対し式 (2) と表 1 の (SS) 条件を用い $m=2$ までの近似を行った結果を図 7 に示す。なお補正の基準となる境界の値は境界近傍

図 3 輪郭測定装置の構成

図 4 輪郭測定装置の全体写真

図 5 測定および制御装置のブロックダイアグラム

での測定値に対し三次のべき級数近似により求めてある。図7中、太い実線が測定値を示し、細い実線が補正曲線である。この場合補正による誤差は最大で約 $10\mu\text{m}$ である。上記補正曲線から測定値までの偏差 D_v を近似項数 m を逐次増加して計算した結果を図8に示す。横軸は x 方向の移動量、縦軸は偏差である。近似項数 m の増加に応じて偏差が減少していくのがわかる。さらにその影響を明らかにするため、標準偏差 S_d (実効値) ならびに、偏差の絶対値の最大値を最大偏差 M_d として各項数 m ごとに求めた。またフーリエ級数

図6 装置の測定再現性 $n=350$

図7 測定装置の変形ならびに補正曲線 $m=2$ (SS)

図8 近似項数と偏差の関係 (SS)

による近似についてもあわせ行なった。なおフーリエ級数近似では式(2)の w に対応してつぎの式で仮定する。

$$w = d_0/2 + \sum_j d_j \cos j\pi\xi + \sum_j e_j \sin j\pi\xi \quad (j=1, 2, 3, \dots) \quad (5)$$

この場合の近似項数は式(3)の最小二乗近似における方程式における未定係数の数と対応して、次数の小なる順に数えてある。例えば5項では $(d_0, d_1, e_1, d_2, e_2)$ である。結果を図9に示す。縦軸は偏差の量を示し、横軸は近似項数 m である。図9より本方法における標準偏差 S_d は最初の3, 4項で $2\mu\text{m}$ 以内となり、5, 6項ではほぼ $1\mu\text{m}$ となっている。一方フーリエ級数近似は本法と比べ次数の小なる範囲で約2倍の項数をもって同程度の精度を得ることがわかる。つぎに他の測定環境で実験を行った。その際、装置に外力を加え新たな変形状態とした。この場合 $\xi=0$ で w の傾きが零に近い測定結果を得た。これに (CS) の条件を適用した場合の曲線を図10に示す。なお項数 m を3とし、上の曲線が本方法で、下がフーリエ級数によるものである。本方法が境界をも含め良い近似を得ていることがわかる。図11に標準偏差 S_d , 最大偏差 M_d を項数 m に対して示した。(CS) による補正結果を太い実線で結び、(SS) を破線、またフーリエ級数近似の結果を細線でそれぞれ結んである。(CS) の場合が最も少ない

図9 項数による偏差の収束状況 (SS)

図10 本補正 (CS) とフーリエ級数近似との比較 $n=220, m=3$

図 11 各近似による偏差の収束状況

項数で小さい偏差を得ていることがわかる。これより境界近傍の変形に応じて形状関数の係数を選ぶことにより、より良い精度の変形の計測補正が可能となる。

5. 結 言

低剛性の二次元の輪郭測定装置の変形に伴う測定誤差を形状関数を用いて補正する方法を提示するとともに実験を行いその有効性を吟味した。得られた結果を要約するとつぎのごとくなる。

- (1) 本補正方法で用いた形状関数は、べき級数の

係数の変更のみで各変形形状を表し、少ない近似項数で測定範囲全体にわたり、高い精度の誤差補正が可能である。したがって、小容量のパーソナルコンピュータでも実用上十分な精度を持たせることが容易となる。

(2) 試作の輪郭測定装置において、真直度に対する補正を行ったところ、無補正の場合では測定範囲が 350 mm に対して最大約 50 μm の変形誤差を有していたが、本補正を行うことにより、同範囲に対して $\pm 1 \mu\text{m}$ 以内の誤差を残すのみとなり、約 20 倍の精度向上が図れることを明らかにした。

最後にリニアガイド、ボールねじに関し協力いただいた日本精工 KK、ならびに非接触変位計を貸与していただいたエミック KK に謝意を表する。

文 献

- (1) 大矢・ほか 3 名, 機論, 52-484, C (昭 61), 3236.
- (2) 佐藤・大堀, 機論, 48-426, C (昭 57), 188.
- (3) 市田・吉本, スプライン関数とその応用, (昭 56), 80, 教育出版.
- (4) 永井・ほか 3 名, 機論, 54-497, C (昭 63), 39.