改良型置換測定法による真直度測定*

艾 暁 庸^{*1}, 清水 毅^{*2}, 小 尾 誠^{*2}

The Straightness Measurement Based on Improved Displacement Method

Xiaoyong AI^{*3}, Tsuyoshi SHIMIZU and Makoto OBI^{*3} Yamanashi University, Graduate School of Engineering,
Takeda 4-3-11, Kofu city, Yamanashi, 400-8511 Japan

Displacement method (DM) is based on a very simple principle for straightness measurement, but there are few experimental examples. It requires three operations to measure straightness. Two of these are operations to scan the measuring piece like a reversal method, and the other is to displace the measuring piece in scanning direction. However, such a displacement becomes serious problems in practical application because of operability and accuracy. In order to solve these problems, authors propose an improved displacement method (IDM). In this method, three displacement sensors are mounted on a stage in the pattern of triangle. Instead of the displacement of measuring piece, the stage is turned through half a revolution between two scanning operations. In this paper the effectiveness of IDM was discussed theoretically and experimentally as compared with DM. According to the experimental results, both methods are about the same in measuring accuracy, and the measuring operability of IDM is much better than DM. IDM can be applied on machine tool.

Key Words: Measurement, Straightness, Displacement Method, Improved Displacement Method, Measuring Accuracy

1. 緒 言

走査型の真直度測定においては、従来から多くの方法が提案され、実用されている。例えば、逐次二、三点法は、2もしくは3個の変位計を利用してそれらの相対変位出力を累積し真直度を求める^{(1)~(3)}。また、反転法は、被測定物あるいは測定装置を反転し、反転前後の2回の測定結果から真直度を求める^{(4)~(6)}。いずれもこのような操作測定により測定時の並進誤差を修正しているが、それぞれ課題もある。特に前者は測定誤差が累積されること、後者は測定装置が大きくなる欠点等が指摘されている。

一方、Thwaiteにより置換法(Displacement Method)と呼ばれる方法が提案されている。この方法は、操作性あるいはそれに伴う測定誤差が問題になり、実用的な例はほとんど見られなかった。しかしながら、わずかな工夫をすることにより、先の逐次二、三点法あるいは反転法に劣らない操作性、測定精度が可能であることがわかった。そこで、これを改良型置

換法(Improved Displacement Method)と呼ぶことにし、その測定原理および試作装置による測定結果を報告する。

2. 測 定 原 理

ここでは、まず、置換法の原理を簡単に述べ、置換法の原理を実現した測定モデルを述べる。次に、本研究で提案する改良型置換法の原理を述べる。

2.1 置換法 置換法は、1回めの走査測定後、被測定物を走査方向にわずかに移動させた後、再び測定する。したがって両測定結果は位相差が生じる。そこで、これを重ね合わせることにより、測定時の並進誤差

Fig. 1 Principle of displacement method

* 原稿受付 1999年7月9日。

^{*1} 学生員, 山梨大学大学院 (〒400-8511 甲府市武田3-4-11)。^{*2} 正員, 山梨大学工学部。

E-mail: xiaoyong@ccn.yamanashi.ac.jp

を取除こうとする方法である。

図1に Thwaite によって提案された置換法の原理を示す。図1において曲線 $S(X)$ を基準曲線、曲線 $P(X)$ およびそれを距離 d 移動した曲線 $P(X+d)$ を測定曲線とする。ここで、走査方向に任意の測定点 X をとり、 Z 方向に基準曲線から二つの測定曲線までの距離をそれぞれ $Z_1(X)$, $Z_2(X)$ とすれば、 $Z_1(X)$, $Z_2(X)$ は幾何学的に

$$Z_1(X) = S(X) + P(X) \cdots \cdots (1)$$

$$Z_2(X) = S(X) + P(X+d) \cdots \cdots (2)$$

となる。式(1)と(2)の差を取ると、

$$P(X+d) - P(X) = \Delta Z \cdots \cdots (3)$$

$$\Delta Z = Z_2(X) - Z_1(X) \cdots \cdots (4)$$

となる。式(3)は測定曲線 $P(X)$ の一階差分式であり、 $P(X)$ 上の1点を初期値として与えることにより、差分式を解き、測定曲線 $P(X)$ を求めることができる。

Thwaite は、以上の測定原理を提案したが、それを実現すべき装置についてはふれていない。そこで、この測定原理を実現すべく、図2に示す測定モデルを提案する。図2に示されるように、3個の変位計 A, B, C は一直線上に配置し、ステージに固定されるが、線分 AC は 45° 方向にセットする。被測定物と基準物は平行に配置する。

この方法では、まず変位計 A を使って被測定物を

測定し、同時に変位計 B, C を使って基準物を測定する。これにより、測定結果 $A_1(X)$, $B_1(X)$, $C_1(X)$ を得る。次に、 X 方向に被測定物を距離 d 移動させたあとに、3個の変位計を使って同様の測定を行う。その測定結果として、 $A_2(X)$, $B_2(X)$, $C_2(X)$ を得る、以上の測定結果は、次の式(5)~(10)で表される。

$$A_1(X) = P(X) + S_1(X) \cdots \cdots (5)$$

$$B_1(X) = R_b(X+L) + S_1(X) + L[\alpha_1(X) + \beta_1(X)] - \Delta_1 \cdots \cdots (6)$$

$$C_1(X) = R_c(X+2L) + S_1(X) + 2L[\alpha_1(X) + \beta_1(X)] - \Delta_2 \cdots \cdots (7)$$

$$A_2(X) = P(X+d) + S_2(X) \cdots \cdots (8)$$

$$B_2(X) = R_b(X+L) + S_2(X) + L[\alpha_2(X) + \beta_2(X)] - \Delta_1 \cdots \cdots (9)$$

$$C_2(X) = R_c(X+2L) + S_2(X) + 2L[\alpha_2(X) + \beta_2(X)] - \Delta_2 \cdots \cdots (10)$$

ここで、 $P(X)$ は被測定物の真直度形状、 $R_b(X)$, $R_c(X)$ は変位計 B, C に対応する基準物の真直度形状である。また、 $S_1(X)$, $S_2(X)$ は移動前後の並進誤差、 $\alpha_1(X)$, $\alpha_2(X)$ はピッチング誤差、 $\beta_1(X)$, $\beta_2(X)$ はローリング誤差である。 Δ_1 , Δ_2 は変位計の零点の調整誤差である。また、 L は変位計 B より変位計 A, C の配置距離である。

次に、式(5)~(10)を用いて、真直度形状 $P(X)$ の一階差分式を求めると、

$$P(X+d) - P(X) = \Delta Z \cdots \cdots (11)$$

$$\Delta Z = A(X) - 2B(X) + C(X) \cdots \cdots (12)$$

となる。ただし、

$$A(X) = A_2(X) - A_1(X) \cdots \cdots (13)$$

$$B(X) = B_2(X) - B_1(X) \cdots \cdots (14)$$

$$C(X) = C_2(X) - C_1(X) \cdots \cdots (15)$$

これらの式を用いて、測定時のサンプリング間隔を距離 d とし、測定開始点からの測定結果を順次計算すれば、被測定物の真直度形状を求められる。この方法は、ステージの並進誤差の再現性に依存せず、またピッチングやローリングの影響、および変位計の零点の調整誤差が回避できることがわかる。

2・2 改良型置換法

2・1節で示した置換法は、基準物を準備し、被測定物あるいは基準物を移動することにより実現される。しかし、この操作は実用性としては好ましくない。そこで、本研究では、変位計ステージを回転することにより、結果的に被測定物を移動したと同等に考えられる改良型置換法を提案する。

図3は改良型置換法の測定モデルを示す。この方法では、図3に示されるように、ステージ上3個の変位計 A, B, C のうち、変位計 B を一直線上から反走査

Fig. 2 Model of displacement method

Fig. 3 Improved displacement method

方向に距離 δ だけずらすように配置し、線分 AC は 45° 方向にセットする。

このとき、 δ はピッチングに伴う測定誤差が十分小さい範囲に設定されなければならない。例えば、ステージが傾くことによって、測定時の変位計 B の並進誤差は次の式で表される。

$$S_b(X) = S(X) + \Delta S(X) \quad (16)$$

$$\Delta S(X) = \delta \alpha(X) \quad (17)$$

ここで、 $S_b(X)$, $S(X)$ は変位計 B 、ステージの中心 (O) に対応する並進誤差、 $\alpha(X)$ はステージのピッチング誤差である。いま、ステージの傾き角度を 10 秒とし、変位計 B の配置距離 δ を (10 mm, 5 mm, 1 mm) とすれば、 $\Delta S(X)$ は約 (0.5 μ m, 0.25 μ m, 0.05 μ m) となる。 $\Delta S(X)$ の値が変位計の分解能より小さいとすれば、 $\Delta S(X)$ は測定されない。これにより、図 3 に δ を十分小さく取ると、変位計 B の並進誤差はステージの中心 O での並進誤差に等しいと考えられる。

この方法では、まず往路方向に 3 個の変位計を使って被測定物を測定し、測定結果 $A_1(X)$, $B_1(X)$, $C_1(X)$ を得る。次に、ステージを 180° 回転させる。このとき、変位計 B の測定位置は走査方向に移動し、同時に変位計 A と変位計 C の測定位置が入れ換わる。さらに、復路方向に同様の測定を行うと、測定結果 $A_2(X)$,

$B_2(X)$, $C_2(X)$ を得る。以上の測定結果は、次の式 (18)~(23) で表される。

$$A_1(X) = P_a(X-L) + S_1(X) + L[\alpha_1(X) + \beta_1(X)] - \Delta_1 \quad (18)$$

$$B_1(X) = P(X-\delta) + S_1(X) \quad (19)$$

$$C_1(X) = P_c(X+L) + S_1(X) - L[\alpha_1(X) + \beta_1(X)] - \Delta_2 \quad (20)$$

$$A_2(X) = P_c(X+L) + S_2(X) - L[\alpha_2(X) + \beta_2(X)] - \Delta_1 \quad (21)$$

$$B_2(X) = P(X+\delta) + S_2(X) \quad (22)$$

$$C_2(X) = P_a(X-L) + S_2(X) + L[\alpha_2(X) + \beta_2(X)] - \Delta_2 \quad (23)$$

ここで、 $P_a(X)$, $P(X)$, $P_c(X)$ は変位計 A , B , C に対応する被測定物の真直度形状である。 $S_1(X)$, $S_2(X)$ は回転操作前後の並進誤差、 $\alpha_1(X)$, $\alpha_2(X)$ はピッチング誤差、 $\beta_1(X)$, $\beta_2(X)$ はローリング誤差である。 Δ_1 , Δ_2 は変位計の零点の調整誤差である。また、 L はステージの中心 O より変位計 A , C の配置距離である。

次に、式 (18)~(23) を用いて、真直度形状 $P(X)$ の一階差分式を求めると、

$$P(X+\delta) - P(X-\delta) = \Delta Z \quad (24)$$

$$\Delta Z = B(X) - [A(X) + C(X)]/2 \quad (25)$$

となる。ただし、

$$A(X) = A_2(X) - A_1(X) \quad (26)$$

$$B(X) = B_2(X) - B_1(X) \quad (27)$$

$$C(X) = C_2(X) - C_1(X) \quad (28)$$

これらの式を用いて、前節の置換法と同様、測定開始点からの測定結果を順次計算すれば、被測定物の真直度形状 $P(X)$ を求めることができる。

3. 測定装置

置換法および改良型置換法を検証するために、ここでは、立型フライス盤を利用し、簡単な測定装置を製作した。図 4 は測定装置の構成を示す。図 4 に示されるように、最初に基板をフライス盤テーブルに固定し、その上に被測定物と基準物を置く。3 個の変位計 (A , B , C) は、置換法と改良型置換法によって、各ステージ上に固定する。ステージをフライス盤の主軸にフランジ T を介して取付け、測定を開始する。なお、テーブルの移動は、サンプリング間隔ごとに、手動方式により行う。このとき、3 個の変位計の出力は A/D コンバータを介してコンピュータに取込まれる。

置換法の場合には、被測定物を移動するとき、マイクロメータ M (AEC-1002, 電子応用) を使って移動距離 (d) を確認する。なお、基板の表面は研削仕上げ

Fig. 4 Measurement system

れ、表面粗さはほぼ $1.6 \mu\text{m} R_y$ である。また、320 mm の長さに対して、基板の表面の真直度誤差は三次元測定機で測定したところ、最大約 $7 \mu\text{m}$ 程度であった。

改良型置換法の場合には、ステージを 180° 回転するとき、ステージ上の定位線とフランジ T 上の定位線を合わせることで回転角度を確認し、固定ピン S を使ってステージに固定する。

変位計は渦電流式微小変位計 (PL 06 A 型, 電子応用) を用いた。研削面に対して、A/D コンバータの 1 ビット分は、変位計の出力に換算して約 $0.4 \mu\text{m}$ になるように設定した。

実験用の立型フライス盤 (KG-55, 牧野フライス製作所) についてのおもな仕様は次のとおりである。

- ・テーブル (長さ×幅) : $1200 \times 400 \text{ mm}$
 - ・左右の動き範囲 (X) : 850 mm
 - ・テーブルのピッチング誤差 : 6 秒
 - ・テーブル位置の指示精度 : $\pm 1 \mu\text{m}$
- 測定条件は、次のように設定した。
- ・変位計の配置位置について：
 - 変位計 A, C の位置 (図 2, 3) : $L=20 \text{ mm}$
 - 変位計 B の位置 (図 3) : $\delta=5 \text{ mm}$
 - ・被測定物の移動距離 (図 2) : $d=10 \text{ mm}$
 - ・被測定物の測定距離 : 300 mm
 - ・サンプリング間隔 : 10 mm

Fig. 5 Outputs of sensors at one position

Fig. 6 Straightness profiles by the presented methods

4. 測定結果および考察

本研究では、三次元測定機 (TCMM: GC 800 D, 東京精密) を使って同一の被測定物を測定し、両置換法による真直度形状の測定結果の適否を検証した。三次元測定機の各軸指示精度は、300 mm の測定長さに対して約 $4 \mu\text{m}$ であり、繰返し精度 (標準偏差) が $1 \mu\text{m}$ 以下である。

両置換法と三次元測定機の測定結果を比較する際には、測定点の始点と終点が X 軸に重なるように測定結果を処理してから、真直度形状の測定結果に関する評価を行った。

図 5 は、測定に使用する変位計を対象に、任意の測定位置で連続サンプリングして得た 3 個の変位計の出力変動を示す。その結果、30 分間における出力変動は、変位計 A では $0.8 \mu\text{m}$ 、変位計 B, C では $1.2 \mu\text{m}$ であった。したがって、これらの変位計による測定精度の上限は $1.2 \mu\text{m}$ 程度になると予測される。

図 6 は、両置換法による被測定物の真直度形状の測定結果、および三次元測定機による真直度形状の測定

結果を示す。三次元測定機の測定結果(破線 P_T)と比べると、置換法による測定結果(実線 P_d)では最大のずれが約 $2.6\ \mu\text{m}$ 、改良型置換法による測定結果(実線 P_i)では最大のずれが約 $2.4\ \mu\text{m}$ であった。また、これらの測定結果は、精細に観察すると、形状の違いとして示されているが、全体的には、ほぼ一致している。

図7は、10回の測定を行ったときの、被測定物の真直度形状に関する測定結果を示す。最初に、繰返し誤差に注目すると、この誤差は、任意の2回の測定結果を採取し求められ、置換法(破線 R_d)では最大約 $1.5\ \mu\text{m}$ 、改良型置換法(実線 R_i)では最大約 $1.6\ \mu\text{m}$ であった。したがって、両置換法では、全体的な形状としてとらえると、ほぼ一致した結果が得られた。次に、10回の測定結果から真直度形状の標準偏差を計算すると、図7に示されるように、置換法による結果(実線 D_d)では最大約 $1.7\ \mu\text{m}$ 、改良型置換法による結果(実線 D_i)では最大約 $1.2\ \mu\text{m}$ として示された。両置換法の標準偏差曲線は、三次元測定機のものとは比べて、全体の形状が放物線状になっている。両置換法は、3個の変位計の出力を累積することを基本としているの

で、原理的に測定結果に放物線誤差を含む可能性がある。このような放物線誤差をもたらす一つの要因として、変位計の零点の調整誤差および安定性がある。本測定は、零点の調整誤差は回避される。一方、安定性は測定精度の限界に影響する。図5の結果を見ると、変位計の時間変動は約 $\pm 0.4\ \mu\text{m}$ であり、図7の結果から判断すると、変位計の時間変動が平均化され、ある程度測定精度劣化への影響は小さいと考えられる。三次元測定機の場合には、真直度形状の標準偏差(破線 D_T)は、測定点の始点と終点を除きほぼ平坦な形状となり、標準偏差は最大約 $1\ \mu\text{m}$ 程度であった。

以上の結果から、改良型置換法は、置換法と同等の測定が可能であることがわかった。ここで、真直度形状は、2章に示した一連の式において、並進誤差などを消去することによって導かれるが、逆に、真直度形状などを消去すれば、同様の方法でテーブルの並進誤差を求めることができる。次に、テーブルの並進誤差に関する結果を示す。

図8, 9は、置換法および改良型置換法によって求められたテーブルの並進誤差を示す。実線 S_1 は被測定

Fig. 7 Repeatability test results of profile

Fig. 9 Straight motion error of the table by the improved displacement method

Fig. 8 Straight motion error of the table by the displacement method

Fig. 10 Repeatability test result of table motion

物の移動前(あるいはステージの回転前)の並進誤差, S_2 は移動後(あるいは回転後)の並進誤差である。いずれの方法においても, テーブルの並進誤差(実線 S_1 , 破線 S_2)は全体の形状として類似した形が得られ, 最大の並進誤差は約 $7\mu\text{m}$ であった。

図 10 は, 両置換法によって測定されたテーブルに関する並進誤差の繰返し誤差および標準偏差の結果を示す。最初に, 繰返し誤差は, 図 8 と 9 の測定結果をもとに求められ, その結果, 置換法(破線 R_d)では最大約 $2\mu\text{m}$ となり, 改良型置換法(実線 R_i)では最大約 $1.3\mu\text{m}$ となった。したがって, 両置換法では, 全体的な形状としてほぼ一致したテーブルの繰返し誤差が得られた。次に, 10 回の測定結果から並進誤差の標準偏差を計算すると, 置換法による結果(実線 D_d)では最大約 $1.7\mu\text{m}$, 改良型置換法による結果(実線 D_i)では最大約 $1.1\mu\text{m}$ であった。両置換法の標準偏差曲線は, 全体的に緩やかな放物線状の形状を示した。

5. 結 言

真直度測定法の一つに置換法が提案されているが, 測定操作が問題となり, その実用的な例は見られない。しかし, 本研究で提案した改良型置換法によれば, 従来の測定法に比較し決して劣らない測定操作性, 精

度が実現可能であることがわかった。本論文のおもな結果をまとめると, 以下のとおりである。

(1) Thwaite が提案した置換法の原理を実現した真直度測定モデルを考察し, その欠点をもとに発展的な改良型置換法を提案した。

(2) 試作装置による実験結果において, 置換法および改良型置換法の測定精度はほぼ同程度であり, またそれらは三次元測定機の測定精度とほぼ同じであった。

(3) 一方, 改良型置換法は, 従来の置換法に比較し, 測定操作およびその自動化が容易であることからオンマシン測定への応用が可能である。

(4) また同様な理由から, 被測定物の真直度形状測定のみならず, 工作機械の運動精度例えばテーブル並進誤差の測定にも応用可能である。

文 献

- (1) 戸沢幸一・ほか 3 名, 機論, 47-419, C(1981), 909-917.
- (2) 田中宏明・ほか 3 名, 機論, 48-423, C(1981), 1930-1937.
- (3) 山口城治, 精密工学会誌, 59-5(1993), 773-778.
- (4) 横山 豊, 精密機械, 36-7(1970), 463-468.
- (5) 沢辺雅二, 精密機械, 48-2(1982), 114-119.
- (6) Hoffrogge, C., Mann, R. and Rademacher, H. J., *Messtechnik*, 9 (1972), 263-266.
- (7) Thwaite, E. G., *Messtechnik*, 10 (1973), 317-318.