改良型反転法による真直度測定*

艾 曉 庸** 清 水 毅*** 小 尾 誠***

Straightness Measurement Using Improved Reversal Method

Xiaoyong AI, Tsuyoshi SHIMIZU and Makoto OBI

Reversal Method (RM) is a well-known method for straightness and roundness measurements. Although this method is very simple in principle, it requires the reversion of the test piece relative to the measurement reference. Such a reversion becomes serious problems in practical application because of operability and accuracy. Authors propose an improved reversal method (IRM) for straightness measurement. In this method, one triangular prism is used as reference piece and is rotated through 180° instead of the test piece. The edge of the triangular prism is measured with one laser sizer, in conjunction with a measurement of surface of test piece by one displacement sensor. The reversion becomes simple and its error can be reduced in this way. In this paper the effectiveness of IRM was discussed theoretically and experimentally as compared with RM. According to the experimental results, both methods are about the same measuring accuracy. Therefore, it became clear that the IRM could be applied for on-machine measurement.

Key words: straightness, straightness measurement, reversion, reversal method, improved reversal method, measuring accuracy, on-machine measurement

1. 結 言

走査型の真直度測定方法の一つとして、反転法^{1)~3)} および改良型反転法⁴⁾ が知られている。反転法は、1回目の走査測定後、測定物（あるいは測定装置）を反転させて再び同様に測定し、反転前後の2回の測定から真直度を求める方法である。その測定精度は走査案内誤差の再現性に依存する。改良型反転法は、測定物以外の基準物を準備し、それを反転法で測定する。同時に、測定物も同じ走査案内誤差のもとに測定する。この方法の特徴は、走査案内誤差の再現性を考慮する必要がないということにある。両反転法では、各測定点の測定結果が単独で処理されるため、測定誤差が累積されない利点を持つが、それぞれに課題もある。特に、操作性あるいはそれに伴う測定誤差が問題となり、また測定装置も大きくなる傾向がある。しかし、わずかな工夫をすることにより、広く研究されてきた逐次二点法、逐次三点法などに劣らない操作性、測定精度が可能であると期待している。

このような状況を踏まえて、本研究では、オンマシン測定の見地から、従来の反転法を発展的に改善した反転法と改良型反転法の開発を試みた。まず、三角柱エッジの真直度測定を行うために、レーザ寸法測定器を利用する反転法を提案した。この方法によれば、1) 三角柱の両端に回転可能な円筒を設けることにより、反転に伴う大きな空間を全く必要としないので、測定装置の小型化が可能になり、また、2) 三角柱のエッジを刃の形状とすることにより、反転誤差の影響を受けにくくなる。次に、オンマシン測定を実現するために、レーザ寸法測定器と

渦電流変位計を併用した改良型反転法を提案した。試作測定装置を立型フライス盤に組み立て、両反転法による真直度測定実験を行い、改良型反転法の実用性について評価した。

2. 測 定 原 理

2.1 反転法

図1は反転法の原理を示す。曲線 $S(X)$ は基準曲線とし、曲線 $P(X)$ およびそれを 180° 反転した曲線 $-P(X)$ は測定曲線とする。ここで、走査方向 (X 方向) に任意の測定点 X を取り、 Z 方向に基準曲線から2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

$$Z_1(X) = S(X) - P(X) \quad (1)$$

$$Z_2(X) = S(X) + P(X) \quad (2)$$

と表される。式 (1) と式 (2) の和あるいは差を取ると、

Fig. 1 The principle of reversal method

* 原稿受付 平成12年3月6日

** 学生会員 山梨大学大学院 (甲府市武田4-3-11)

*** 正 会 員 山梨大学工学部

Fig. 2 Measuring model of reversal method

$$S(X) = [Z_1(X) + Z_2(X)]/2 \quad (3)$$

$$P(X) = [-Z_1(X) + Z_2(X)]/2 \quad (4)$$

となる。従って、式 (3)、式 (4) を用いて、測定開始点から順次計算すれば、基準曲線 $S(X)$ 、測定曲線 $P(X)$ を求めることができる。

そこで、この測定原理を実現するために、図 2 に示すような真直度形状測定モデルを考える。これはレーザ寸法測定器からの出力情報を用いて真直度形状を求めるという、これまでになかった手法である。図に示されるように、三角柱 TP (測定物) と三角柱 RP (基準物) を平行に配置し、両者のエッジ真直度形状を測定対象とする。ここで、レーザ寸法測定器 (発光器 LP と受光器 LR) は走査ステージ上に固定しておく。

まず、レーザ寸法測定器により 2 つの三角柱の距離を測定し、測定結果 $A(X)$ を得る。次に、三角柱 TP を 180° 回転させたあとに、もう一度同様の測定を行い、その結果として $B(X)$ を得る。これらの測定結果は、次の式 (5)、式 (6) で表される。

$$A(X) = S(X) - P(X) \quad (5)$$

$$B(X) = S(X) + P(X) \quad (6)$$

ここで、 $P(X)$ 、 $S(X)$ は三角柱 TP、三角柱 RP のエッジに対応する真直度形状である。従って、真直度形状 $P(X)$ 、 $S(X)$ は、反転前後の 2 回の測定結果をもとに、以下の式 (7)、式 (8) を用いて求められる。

$$S(X) = [A(X) + B(X)]/2 \quad (7)$$

$$P(X) = [-A(X) + B(X)]/2 \quad (8)$$

2.2 改良型反転法

上述の反転法は、両三角柱のエッジの相対距離を測定することにより実現される。つまり、レーザ寸法測定器を利用することによって、Y、Z 方向の並進誤差の影響をまったく受けないこととなる。なお、このようなレーザ寸法測定器では、測定モードを選択することによって、レーザビームと直交する方向、すなわち Z 方向の並進誤差に対応する感度が現れる。そこで、本研究は、平面形状の真直度測定に対して、レーザ寸法測定器と変位計を併用した改良型反転法を提案する。

図 3 は改良型反転法の測定モデルを示す。この方法では、図

Fig. 3 Measuring model of improved reversal method

に示されるように、レーザ寸法測定器 (発光器 LP と受光器 LR) と変位計 DS を走査ステージ上に固定し、三角柱 TP (基準物) と直方体 MP (測定物) を平行に置く。最初に、往路方向にレーザ寸法測定器を使って、三角柱のエッジからレーザビームのエッジまでの距離を測定し、測定結果 $C(X)$ を得る。この測定と同時に、変位計を使って直方体 MT の表面も測定し、測定結果 $H(X)$ を得る。次に、三角柱 TP を反転し、同じ測定を行う。その測定結果として $D(X)$ 、 $K(X)$ を得る。反転に伴う傾斜を取り除いて、以上の測定結果は、次の式 (9) ~ (12) で表される。

$$C(X) = P(X) - S_1(X) \quad (9)$$

$$D(X) = -P(X) - S_2(X) \quad (10)$$

$$H(X) = S_1(X) - G(X) \quad (11)$$

$$K(X) = S_2(X) - G(X) \quad (12)$$

ここで、 $P(X)$ は三角柱エッジの真直度形状であり、 $G(X)$ は直方体表面の真直度形状である。 $S_1(X)$ と $S_2(X)$ は反転前後におけるステージのそれぞれの並進誤差である。これらの測定結果を用いて、真直度形状 $P(X)$ 、 $G(X)$ は次のように求められる。

$$P(X) = [C(X) - D(X) + H(X) - K(X)]/2 \quad (13)$$

$$G(X) = -[C(X) + D(X) + H(X) + K(X)]/2 \quad (14)$$

2.3 反転誤差の影響

反転法および改良型反転法では、反転誤差の影響を可能な限り小さくするために、三角柱 TP のエッジは刃の形状としている。例えば、図 4 に示すように、任意の測定位置で反転誤差 δ によって変位 $U(X)$ 、 $V(X)$ が生じるが、レーザビーム方向の変位、すなわち変位 $V(X)$ は測定されず、変位 $U(X)$ だけが直接に測定される。 $U(X)$ は、測定出力 $B(X)$ (図 2) および測定出力 $D(X)$ (図 3) に含まれることとなり、 $U(X)$ は次式で表される。

$$U(X) = T(X) + R \quad (15)$$

$$T(X) = P(X)(1 - \cos \delta) \quad (16)$$

$$R = W(1 - \cos \delta) \quad (17)$$

ここで、 W は三角柱の断面の高さ、 $P(X)$ は三角柱のエッジの

Fig. 4 Schema of showing a case that the triangular prism was not perfectly inverted

真直度形状である。真直度測定において、変位 $U(X)$ の定数成分 R には影響されないが、変数成分 $T(X)$ が測定誤差として現れる。例えば、 $W=15\text{mm}$ 、 $P(X)=200\mu\text{m}$ とし、反転誤差 δ を $15'$ 分とすれば、 $U(X)=0.143\mu\text{m}$ 、 $T(X)=0.002\mu\text{m}$ となる。すると、技術的には、三角柱の反転誤差 δ を $15'$ 程度に、あるいはそれ以下にすることは十分に可能であり、ここで、 $T(X)$ は三角柱のエッジ形状によって決定されるので、測定誤差は、エッジの真直度が小さくなるほど、減少する。また、測定誤差の値は $T(X)/2$ であるからさらに小さなものとなる。

2.4 ステージの傾き角の影響

レーザ寸法測定器は Z 方向の各距離を出力するが、このとき、走査ステージの傾き角の影響によって、誤差が生じる。図5は、反転法および改良型反転法において、走査ステージが傾斜した状況を示す模式図である。図中、 Q 点はレーザビームのエッジ位置であり、 C 点は走査ステージの中心である。また、 M は C 点から Q 点までの距離であり、 N は C 点から変位計先端までの距離である。

最初に、反転法の場合について取り上げると、図5に示されるように、三角柱 (RP, TP) のエッジを真線と仮定すると、出力 $A(X)$ 、 $B(X)$ に対して、ステージの傾き角 (ピッチング角 α 、ローリング角 β) を考慮すると、出力誤差 $\Delta A(X)$ 、 $\Delta B(X)$ は、それぞれ次式で表される。

$$\Delta A(X) = A(X)[1 - \sec \alpha] \quad (18)$$

$$\Delta B(X) = B(X)[1 - \sec \alpha] \quad (19)$$

$$\Delta A(X) = A(X)[1 - \cos \beta] \quad (20)$$

$$\Delta B(X) = B(X)[1 - \cos \beta] \quad (21)$$

例えば、ステージの傾き角を 10 秒とし、 $A(X)$ 、 $B(X)$ をそれぞれ 5mm 、 35mm とし計算すると、 $\Delta A(X)$ 、 $\Delta B(X)$ は約 0.006nm 、約 0.042nm としてそれぞれに求められる。

改良型反転法の場合には、図5に示されるように、さらに直方体 MP の表面を平面と仮定する。すると、寸法測定器の出力 $C(X)$ 、 $D(X)$ に対して、ステージの傾き角 (ピッチング角 α 、ローリング角 β) を考慮すると、出力誤差 $\Delta C(X)$ 、 $\Delta D(X)$ は、それぞれ次式で表される。

$$\Delta C(X) = [C(X) + M](1 - \sec \alpha) \quad (22)$$

$$\Delta D(X) = [D(X) + M](1 - \sec \alpha) \quad (23)$$

$$\Delta C(X) = [C(X) + M](1 - \cos \beta) \quad (24)$$

$$\Delta D(X) = [D(X) + M](1 - \cos \beta) \quad (25)$$

Fig. 5 Schema of showing a case that scanning stage was tilted slightly in XZ and YZ cross sections

また、変位計の出力 $H(X)$ 、 $K(X)$ に対しても、ステージの傾き角 θ (ピッチング角 α あるいはローリング角 β) を考慮することによって、出力誤差 $\Delta H(X)$ 、 $\Delta K(X)$ は次式で表される。

$$\Delta H(X) = [H(X) + N](1 - \sec \theta) \quad (26)$$

$$\Delta K(X) = [K(X) + N](1 - \sec \theta) \quad (27)$$

ここで、 $M=N=50\text{mm}$ 、 $C(X)=35\text{mm}$ 、 $D(X)=5\text{mm}$ 、 $H(X)=K(X)=1\text{mm}$ とし、ステージの傾き角を $10''$ とすると、 $\Delta C(X)$ 、 $\Delta D(X)$ 、 $\Delta H(X)$ 、 $\Delta K(X)$ は約 0.102nm 、約 0.066nm 、約 0.061nm として求められる。これらの出力誤差の値が寸法測定器の分解能より小さいならば、すべての出力誤差は測定されないこととなる。なお、工作機械の場合、ステージの傾き角を $10''$ 程度あるいはそれ以下に調整することは容易である。

3. 測定装置

反転法および改良型反転法を検証するために、ここでは、立型フライス盤を利用した測定装置を試作した。図5はその測定装置の構成を示す。最初に、基板をフライス盤テーブルに固定し、その上に2つの三角柱 (RP, TP) と直方体 MP を置く。レーザ寸法測定器 (発光器 LP と受光器 LR) と変位計 DS は走査ステージ上に固定し、このステージをフライス盤の主軸に取り付ける。そして、測定を開始する。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。レーザ寸法測定器と変位計の出力は、レーザコントローラと A/D コンバータを介してコンピュータに取り込まれる。

三角柱 TP には、その両端に反転させるための円筒部が設けられている。この円筒部は、 180° 回転させ、円筒端面の定位線とその支持壁上の定位線を合わせることで、反転操作が簡単に行える構造となっている。

実験に用いたレーザ寸法測定器 (LS-5000 シリーズ、キーエンス (株)) は、高速・高機能寸法測定器であり、レーザコントローラの1ビット分は、レーザ寸法測定器の出力に換算して約 $0.05\mu\text{m}$ である。変位計は渦電流式変位計 (S-06LN 型、電子応用 (株)) を採用した。研削面に対して、A/D コンバータの

Fig. 6 Measurement system

1 ビット分は、変位計の出力に換算して約 $0.05\mu\text{m}$ になるように設定した。

立型フライス盤 (KG-55, 牧野フライス製作所) の主な仕様は次の通りである。

- ・動き範囲 (X 方向): 850mm
 - ・テーブルのピッチング誤差: $6''$
 - ・テーブルのローリング誤差: $4''$
 - ・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。
- ・寸法測定器と変位計の配置 (図 4): $M=50\text{mm}$, $N=50\text{mm}$
 - ・測定距離: 200mm
 - ・サンプリング間隔: 10mm

4. 測定実験および結果考察

本研究では、著者らの提案する反転法と改良型反転法の実験的考察を行うにあたって、まず、三角柱 TP のエッジを対象に真直度形状を測定し、両反転法の測定結果を検討する。次に、直方体 MP の表面を対象に真直度形状を測定し、改良型反転法の測定結果を確保し、三次元測定機 (TCMM: GC800D, 東京精密) による同一の測定物 (直方体 MP) の測定結果を比較し、改良型反転法の適否を検証した。なお、三次元測定機の各軸指示精度は、200mm の測定長さに対して約 $3.8\mu\text{m}$ であり、繰返し精度 (標準偏差) は $1\mu\text{m}$ 以下である。

本測定実験を開始するにあたり、テーブルの傾き角 (ローリング角, ピッチング角) を確認したが、フライス盤の精度検査成績表に示された $6''$ よりも小さい値であることが認められた。従って、2.4 節での分析を参考にすると、テーブルの傾き角の影響は無視できることがわかった。

図 7 は、測定に使用するレーザ寸法測定器と渦電流式変位計

Fig. 7 The stability of sizer and sensor

Fig. 8 The displacement by reversal operation

を対象に、任意の測定位置で連続サンプリングして得た出力変動である。その結果、30 分間における出力変動は、レーザ寸法測定器では $0.15\mu\text{m}$ 、渦電流式変位計では $0.2\mu\text{m}$ であった。従って、これらの寸法測定器と変位計による測定精度の上限は $0.2\mu\text{m}$ 程度になると予測される。

図 8 は、反転誤差の影響について検討した結果である。この測定操作について簡単に説明すると、まず、任意の測定位置で両三角柱 (RP, TP) のエッジの距離を測定する。次に、三角柱 TP を少し回転させてから、反転と同様に、三角柱の円筒端面の定位線とその支持壁上の定位線を合わせて、三角柱を元の位置に戻す。そして、両三角柱のエッジの距離を再度測定する。このような回転前後の測定結果から、図 4 に示した変位 $U(X)$ を求めることができる。従って、測定点の始点から終点まで、前述の測定を 2 回行い、変位 $U(X)$ の測定結果を比較検討する。全測定範囲における 1 回目の結果 (実線 U_1) および 2 回目の結果 (破線 U_2) を見ると、変位 $U(X)$ の値は $0.3\mu\text{m}$ 以下であった。図 7 のレーザ寸法測定器の出力変動を考慮すると、2.3 節の分析から反転誤差の影響は無視できることがわかった。

次に、両反転法と三次元測定機の測定結果 (図 9～図 11) を考察するために、本測定では、真直度形状の始点と終点の変位が等しくなるように調節し、測定結果に関する評価を行った。

図 9 は、三角柱 TP のエッジの真直度形状測定結果を示す。破線 Pr は反転法による結果、実線 Pi は改良型反転法による結果である。いずれの方法においても、三角柱のエッジは、放物線状になり、全体の形状としてほぼ完全に類似した形が得られ

Fig.9 Measurement results by RM and IRM

Fig.10 Measurement results by RM and IRM

た。2つの測定結果の比較誤差（実線 Er）は最大約 $0.2\mu\text{m}$ であり、寸法測定器と変位計の出力変動とほぼ同程度であった。

図 10 は、もう1つの三角柱 TP のエッジを測定対象とした場合の反転法および改良型反転法による真直度形状の測定結果を示す。図 9 の結果と比較すると、三角柱のエッジの形状が異なり、全体の形状が波状になっているが、2つの測定結果の比較誤差（実線 Er）はほぼ同程度であった。また、10 回の繰返し測定の標準偏差を計算すると、両反転法の標準偏差はほぼ同じで、約 $0.25\mu\text{m}$ であった。

このように、著者らの提案する反転法は、変位計の代わりにレーザ寸法測定器を用いているので、三角柱エッジの真直度形状測定を可能にするばかりか、走査案内誤差の再現性を必要とする従来の反転法とは異なり、走査案内誤差の影響をまったく受けていない。すなわち、この反転法は、改良型反転法と同様に、走査案内誤差の再現性に依存しないといえる。その結果、図 9 および図 10 の測定結果が示すように、両反転法によって三角柱エッジの真直度形状の測定精度はほぼ同程度になったと評価できる。

図 11 は、改良型反転法による直方体 MP 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。改良型反転法の測定結果（実線 Pi）は、三次元測定機の測定結果（破線 Pt）と比べ、最大のずれが約 $1\mu\text{m}$ であった。また、2つの測定結果は、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。この結果は、10 回の測定結果のうち最も一致するものを選んだが、他の測定結果を選んだ場合には、両者の差は最大約 $1.6\mu\text{m}$ であった。さらに、10 回の測定結果から真直度形状の標準偏差を計算する

Fig.11 Measurement results by IRM and TCMM

と、図に示されるように、2つの標準偏差曲線は、測定点の始点と終点を除きほぼ平坦な形状となる。改良型反転法の標準偏差（実線 Si）では最大約 $0.25\mu\text{m}$ 、三次元測定機の標準偏差（破線 St）では最大約 $0.55\mu\text{m}$ として示された。従って、この結果は、改良型反転法の方が、三次元測定機による測定よりも高い繰返し精度が期待できることを示唆している。

5. 結 言

本論文の結果をまとめると、以下のようになる。

- (1) 反転法の原理を基に、三角柱エッジの真直度測定モデルを提案し、さらに、これを発展的に改善した改良型反転法を提案した。これらの方法は、レーザ寸法測定器の出力情報を利用しており、従来にない手法である。
- (2) 試作装置による実験結果において、著者らの提案する反転法と改良型反転法の測定精度はほぼ同程度であった。また、本試作装置は、三次元測定機より高い繰返し精度（標準偏差）を得ることができる。
- (3) 改良型反転法は、測定操作およびその自動化が容易であることから、オンマシン測定および工作機械の運動精度の測定への応用が可能である。

参 考 文 献

- 1) 海老原 敬吉, 山本 晃, 和田 良造: 直定規あるいは線定規を基準とするベッド滑り面の真直度測定に就て. 日本機械学会論文誌, 8, 31 (1942) IV-159.
- 2) 横山 豊: 真直度測定器の試作. 精密機械, 36, 7 (1970) 463.
- 3) 沢辺 雅二: 形状測定及び形状公差等の規格動向. 精密機械, 48, 2 (1982) 268.
- 4) Ch. Hoffrogge, R Mann, and H.J Rademacher: A Method of Measuring Straightness by Using a Straightedge in Two Positions. Messtechnik, 9 (1972) 263.
- 5) オズワルド・ホリカワ, 佐藤 海二, 下河辺 明: 改良型反転法による真円度および絶対回転運動精度の評価. 精密工学会誌, 57, 12 (1991) 2231.
- 6) D. J. Whitehouse: Some Theoretical Aspects of Error Separation Techniques in Surface Metrology, J. Phys. E. Sci. Instrum., 9 (1976) 531.