研究

工作機械の直線運動誤差の測定法に関する研究*

垣野義昭** 谷口博之*** 安井 誠† 上杉憲一††

Study on the Measuring Method of Straight Motion Error of Machine Tools

Yoshiaki KAKINO, Hiroyuki TANIGUCHI,
Makoto YASUI and Kenichi UESUGI

Measuring Methods of straight motion error and straightness error of machine tools have been studied and the following conclusions are obtained. (1) Five components of straight motion error of machine tools can be obtained simultaneously and accurately by tracing the known surface profile of the straight edge master on the table with five differential type electric transducers, being attached to the spindle. (2) When the surface profile of the

straight edge master is unknown, the components of straight motion error and the surface profile of the straight edge master can be obtained simultaneously and accurately by three points methods. However, nine transducers are necessary in this case. (3) The straightness error components of the measured vertical type milling machine are very small, less than $3\mu\text{m}$ for 500 mm length of motion, but the angular error components, approximately $80\mu\text{m/m}$, are relatively large.

Key words: measuring method, straight motion error, machine tool, three point method, straight edge master.

1. 緒 言

工作機械の加工性能を低下させる要因の中で、工作機械の幾何学的誤差や運動部分の自重によるたわみの直線運動精度に与える影響は非常に大きい¹⁾。したがって直線運動精度や真直度誤差を測定する多数の方法が開発され、使われてきた。

それらの方法は機械式と光学式に大別でき、一般には光学式の方が機械式より分解能が良いといわれている。中でもレーザ干渉計が使用環境が良ければ最も測定精度が高いといわれているが、一般の工場環境下では意外に測定精度が悪いといわれている。またオートコリメータやレーザ干渉計を用いた方法では一つの装置では同時に一つの直線運動誤差成分や真直度誤差成分しか測定できない。

そこで本研究ではストレートエッジマスタを電気マイクロメータピックアップでトレースするという比較的簡便で工場環境下でも必要な精度で同時に直線運動の5つの誤差成分を測定できる方法を開発することとした。これをストレートエッジマスタの形状誤差が既知な場合と未知な場合について検討した。更にこの方法を用いてフライス盤の直線運動誤差を測定し、その妥当性について検討した。

2. 新しく開発した直線運動誤差の測定法

2.1 測定原理

よく知られているように運動誤差は図1に示す6つのパラメータで表すことができる。これらは工作機械のテーブルと主軸先端との相対運動の際の目標位置と実際位置との差を空間運動とみなして表現したものである。いま x 軸方向の直線運動を考えると、 e_x は位置決め誤差であり、通常は直線運動誤差から除かれている。

残りの5つの成分を測定するために、図2に示すようにテーブル上に固定されたストレートエッジマスタを主軸端に固定した電気マイクロメータピックアップでトレースする。いま簡単のためにストレートエッジマスタは真直で、 x 軸に平行に置かれているとする。ピックアップPU1, PU2からの出力をそれぞれ z_1, z_2 とし、ピックアップPU3, PU4, PU5からの出力をそれぞれ y_3, y_4, y_5 とする。各ピックアップへの直線運動誤差の寄与は、回転角を微小であるとして2次以上の項を無視すると、

Fig. 1 Straight motion error

Fig. 2 Location of pick-ups

* 原稿受付 昭和56年4月6日。昭和55年度精機学会春季大会学術講演会(昭和55年3月30日)にて発表。

** 正会員 京都大学工学部(京都市左京区吉田本町)

*** 松下電器産業(株)(門真市大字門真1006)

† 三菱自動車工業(株)(東京都大田区下丸子4-21-1)

†† 京都大学工学部

Fig. 3 Definition of coordinate system

X : coordinate representing table's position
 x : coordinate which is fixed on the straight edge master
 L : distance between the pick-up and the center of the spindle
 $h(x)$: form error of the straight edge master

$$\left. \begin{aligned} z_1 &= e_z - \beta l_1 \\ z_2 &= e_z + \beta l_2 \\ y_3 &= e_y + \gamma l_1 \\ y_4 &= e_y - \gamma l_2 \\ y_5 &= e_y + \gamma l_1 + \alpha l_3 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

となる。これらの関係より5つの誤差成分を次のように求めることができる。

$$\left. \begin{aligned} e_y &= (l_2 y_3 + l_1 y_4) / (l_1 + l_2) \\ e_z &= (l_2 z_1 + l_1 z_2) / (l_1 + l_2) \\ \alpha &= (y_5 - y_3) / l_3 \\ \beta &= (z_2 - z_1) / (l_1 + l_2) \\ \gamma &= (y_3 - y_4) / (l_1 + l_2) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

2.2 測定値の処理法

2.2.1 直線運動誤差と測定値の関係

いまテーブルの x 軸方向運動の場合を考え、図3のように座標系を定める。ここでピックアップPU1に現れる出力 $E_1(X)$ は

$$E_1(X) = a \cdot (x_0 + X + L_1) + h(x_0 + L_1 + X) + e_z(X) + L_1 \cdot \beta(X) + n_1 \quad (3)$$

で与えられる。ここで x_0 は $X=0$ における主軸中心線の x 座標値、 n_1 は測定の繰返し誤差や電氣的ノイズなどの不確定成分である。 $L=L_2$ にあるピックアップPU2の出力 $E_2(X)$ も同様にして次のようになる。

$$E_2(X) = a \cdot (x_0 + L_2 + X) + h(x_0 + L_2 + X) + e_z(X) + L_2 \cdot \beta(X) + n_2 \quad (4)$$

式(3),(4)を式(2)に代入すると e_z の測定値 $E_z(X)$ が求まる。

$$\begin{aligned} E_z(X) &= \frac{-L_2 E_1(X) + L_1 E_2(X)}{L_1 - L_2} \\ &= a \cdot \{X + x_0\} \\ &\quad + \frac{L_2 \cdot h(x_0 + L_1 + X) - L_1 \cdot h(x_0 + L_2 + X)}{L_2 - L_1} \end{aligned}$$

$$+ e_z(X) + n_3 \quad (5)$$

式(5)の右辺第1項 $a \cdot \{X + x_0\}$ はテーブルの直線運動誤差とは無関係で、ストレートエッジマスタとテーブルの直線運動の平行度と、ピックアップのゼロ点調整に関する項である。第2項はストレートエッジマスタの形状誤差の影響を表す項で、この形状誤差に比べて直線運動誤差 e_z が大きければこの第2項を無視してもよいが、 e_z が小さい場合には無視できない。そのためにストレートエッジマスタの形状誤差をより精密な測定装置を使って測定するか、2.3節で述べる3点法を使って測定する必要がある。形状誤差 $h(x)$ が既知な場合には

$$\bar{E}_1(X) = E_1(X) - h(x_0 + L_1 + X) \quad (6)$$

のようにピックアップからの出力に補正を加えることにより

$$\bar{E}_z(X) = a \cdot \{X + x_0\} + e_z(X) + n_3 \quad (7)$$

となる。 $\bar{E}_y(X)$, $\bar{E}_\alpha(X)$, $\bar{E}_\beta(X)$, $\bar{E}_\gamma(X)$ についても同様である。

2.2.2 直線運動誤差の推定

ピックアップから出力されたデータから式(7)などを用いて直線運動誤差を求めるためには、ランダム誤差を分離するための統計処理と異常値の処理をする必要がある。

統計処理は次のように行った。測定は N 回の繰返しを行い、それぞれ1回の運動ごとに M 点で測定値を得るとする。 $e_x, e_y, \alpha, \beta, \dots$ などの運動誤差の測定値を ξ で表すと、ある誤差成分の測定値は

$$\xi_i(j) \quad (i=1, 2, \dots, N, j=1, 2, \dots, M)$$

と表せる。まず得られた測定値列のゼロ点調整を次式により行う。

$$\bar{\xi}_i(j) = \xi_i(j) - \sum_{j=1}^M \xi_i(j) / M \quad (8)$$

こうして求めた $\bar{\xi}_i(j)$ を改めて $\xi_i(j)$ において統計処理を行う。各点で得られた測定値がそれぞれの点で平均 $\mu(j)$ ($j=1, 2, \dots, M$)、分散 σ^2 の正規分布に従うと考えられるので、ランダム誤差の大きさを表す σ^2 の値を次式により推定することができる。

$$\sigma^2 = \frac{1}{M(N-1)} \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N (\xi_i(j) - \bar{\xi}_i(j))^2 \quad (9)$$

ここで、

$$\bar{\xi}_i(j) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \xi_i(j) \quad (10)$$

直線運動誤差の推定のため、本研究では直交多項式近似を行う。近似の最高次数 K を定めるためにはAIC最小化の方法を用いた²⁾。

2.2.3 異常値の処理

測定データに含まれる異常値には、1回の測定の間に

突然一つだけ跳び離れた値が出るものと、1回の測定分の値の変化の様子が他と異なる傾向を示すものの2種類ある。

跳び離れた値はA-D変換の前にローパスフィルタを通すことによりある程度は除くことができる。これで除ききれない場合には次のように処理した。まず値の離れている程度を表す量 G を

$$G = \frac{\xi_I(J) - \bar{\xi}(J)}{v(J)} \quad (11)$$

$$v(J) = \frac{1}{N-1} \left\{ \sum_{k=1}^N (\xi_k(J) - \bar{\xi}(J))^2 \right\} \quad (12)$$

により求め、 G の値が N により決まる規準値より大であれば測定値 $\xi_I(J)$ を補間により求めた値

$$\bar{\xi}_I(J) = \frac{-\xi_I(J-2) + 4\xi_I(J-1) + 4\xi_I(J+1) - \xi_I(J+2)}{6} \quad (13)$$

で置き換える。

ほかとは異なった変化を示す測定値列が得られた場合には、ほかとは異なる値を出した回の測定値列を除外して運動誤差の推定を行った。

2.3 3点法を用いたストレートエッジマスタの形状誤差と直線運動誤差の測定と処理

ストレートエッジマスタの形状誤差が未知のときには、いわゆる3点法³⁾を用いる。すなわちストレートエッジマスタを直線運動誤差を測定した状態のままで、ピックアップを運動方向にある間隔をもたせて3か所に設置して、同じ部分をトレースする。この3点法によれば、ストレートエッジマスタを乗せたテーブルの直線運動誤差を消去してストレートエッジマスタの形状誤差のみを求めること、およびその逆に形状誤差を消去して直線運動誤差のみを求めることができる。

いま図4に示すようにピックアップを配置し、測り始めと測り終わりの点の間の距離を D とする。ピックアップPU1, PU2, PU3の出力 y_1, y_2, y_3 は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} y_1 &= a \cdot (x_0 + L_1 + X) + h(x_0 + L_1 + X) \\ &\quad + e_z(X) + L_1 \cdot \beta(X) + n_1 \\ y_2 &= a \cdot (x_0 + X) + h(x_0 + X) + e_z(X) + n_2 \\ y_3 &= a \cdot (x_0 - L_2 + X) + h(x_0 - L_2 + X) \\ &\quad + e_z(X) - L_2 \cdot \beta(X) + n_3 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

ここで y_1, y_2, y_3 を用いて

$$\bar{y} = y_1 + \left(-1 - \frac{L_1}{L_2}\right)y_2 + \frac{L_1}{L_2}y_3 \quad (15)$$

を計算すると

$$\bar{y} = h(x_0 + L_1 + X) + \left(-1 - \frac{L_1}{L_2}\right) \cdot h(x_0 + X)$$

Fig. 4 Location of pick-ups at the three points method (shown in a plane)

$$+ \frac{L_1}{L_2} \cdot h(x_0 - L_2 + X) + \bar{n} \quad (16)$$

となって形状誤差 $h(x)$ のみからなる値が得られる。式(16)における $\bar{n}$ の影響をなくするために、 $\bar{y}$ を繰返し測定して得られた $\bar{y}$ の推定値を $\hat{y}$ とする。 $\hat{y}$ の値を M 個の点で求め、それぞれの値を $\hat{y}(j)$ ($j=1, 2, \dots, M$) と書く。 $\hat{y}(j)$ を M 点フーリエ展開して

$$\hat{y}(j) = \sum_{k=1}^m \hat{r}_k \cos \left\{ \frac{2\pi k}{M-1} (j-1) - \hat{\phi}_k \right\} \quad (17)$$

という形式で表したとき、求めた $2m$ 個の値 $\hat{r}_k, \hat{\phi}_k$ ($k=1, 2, \dots, m; m < M/2$) から

$$r_k^* = \frac{\hat{r}_k}{A_k} \quad (18)$$

$$\phi_k^* = \hat{\phi}_k + \psi_k \quad (19)$$

ただし、

$$A_k^2 = \left\{ \cos \frac{2\pi k}{D} L_1 + \left(-1 - \frac{L_1}{L_2}\right) + \frac{L_1}{L_2} \cos \frac{2\pi k}{D} L_2 \right\}^2 \\ + \left\{ \sin \frac{2\pi k}{D} L_1 - \frac{L_1}{L_2} \sin \frac{2\pi k}{D} L_2 \right\}^2$$

$$\tan \phi_k = \frac{\sin \frac{2\pi k}{D} L_1 - \frac{L_1}{L_2} \sin \frac{2\pi k}{D} L_2}{\cos \frac{2\pi k}{D} L_1 + \left(-1 - \frac{L_1}{L_2}\right) + \frac{L_1}{L_2} \cos \frac{2\pi k}{D} L_2}$$

を計算して

$$h(j) = \sum_{k=1}^m r_k^* \cos \left\{ \frac{2\pi k}{M-1} (j-1) - \phi_k^* \right\} \quad (20)$$

よりストレートエッジマスタの形状誤差 $h(j)$ の推定値が求まる。逆にこのようにして求めた $h(j)$ を式(14)に代入することにより直線運動誤差 e_z と β が求まる。

3. 実験装置と方法

図5に示す立てフライス盤の直線運動部の直線運動誤差を測定した。本機の主な仕様は次の通りである。

運動範囲	テーブルの左右の動き (X) : 710 mm
	ラムの前後の動き (Y) : 400 mm
	サドルの上下の動き (Z) : 400 mm

テーブル (長さ×幅) : 1 150 mm×400 mm

主軸回転数: 130~2 200 rpm

主軸電動機: 2.2 kW

Fig. 5 Vertical type milling machine used for the experiment

Fig. 6 Data recording system

(a) Cross section

(b) Straightness error (measured by auto-collimeter)

Fig. 7 Cross section and straightness error of the straight edge master used for the experiment

図6に示すように工型のストレートエッジマスタをテーブル上に置き、主軸端に取り付けた電気マイクロメータピックアップでマスタの表面をトレースする。このマスタは図7(a)のような断面形状をしており、その表面は研削仕上げされ、表面粗さはほぼ $1\mu\text{mR}_{\text{max}}$ である。各面の真直度誤差はオートコリメータで測定したところ、図7(b)に一例を示すように $2\mu\text{m}$ 程度存在していた。X軸方向の運動誤差の測定には長さ1000mmのストレートエッジマスタを使用し、Y軸方向には500mmのそれを使用し、Z軸方向には長さ500mmの直角定規を使用した。

図6中に示したように直線運動中のテーブルの位置を知るために、テーブルに設けた突起を近接スイッチで検出してステップ波を発生させた。電気マイクロメータからの出力とこのステップ波をデータレコーダに一時収録した。これらを再生させて、まずローパスフィルタを通して高周波成分を取り除き、A-D変換する。得られた数値列から計算に必要な数だけ再サンプルし、前章で述べた統計処理を施す。

実験に用いた主な測定装置は次の通りである。

ストレートエッジマスタ：大菱計器製作所(株)製工型 1000mm, 500mm, 直角定規 500mm

電気マイクロメータ：東京精密(株)製、ピックアップ E-MD-LD, メータ E-MD-M5 J

データレコーダ：TEAC(株)製 R-250

測定はX, Y軸方向の場合は送り速度400mm/min, Z軸方向は200mm/minで、5回ずつ繰り返す、1ストローク当たり17点のサンプリングを行い多項式近似を行った。ピックアップPU1とPU2の間隔(L_1+L_2)およびPU3とPU4の間隔(L_1+L_2)は240mmとし、

PU3とPU5の間隔(L_3)はストレートエッジマスタの形状の制約より75mmとした。

3点法の測定もほぼ同様のセットアップと条件で行ったが、ピックアップの間隔は $L_1=40\text{mm}$, $L_2=55\text{mm}$ とした。

4. 実験結果と考察

4.1 直線運動誤差

立てフライス盤の直線運動部の運動誤差を測定した結果を図8に示す。ここで真直度誤差成分である e_{yx} , e_{zx} などについては多項式近似の2次以上の成分を示し、回転成分である α_x , β_x , γ_x などについては1次以上の成分を示した。また5回分のデータのばらつきを標準偏差で示した。

図8において β_x の値が500mmの測定範囲で約80 $\mu\text{m/m}$ 変化している。これはテーブルのX軸方向送りの際にテーブルがサドルから突き出た状態、いわゆるオーバーハング状態になり自重により傾いたものと思われる。Y軸方向送りの場合についても同じことがいえる。 α_Y すなわちY方向送りの場合のピッチング成分が300mmの測定範囲で約35 $\mu\text{m/m}$ 変化しているのは、ラムが突き出されるとともに主軸端側が下がったためである。また γ_Y (ヨーイング)の変動が大きいののはラムがZ軸回りに回転しながら突き出されることがわかる。Z軸方向送りの場合、真直度誤差は e_{zx} , e_{yz} ともに1.5 $\mu\text{m}/300\text{mm}$ と特に小さいが、回転運動の成分があり、サドルを上を送ると前に傾く傾向が見られた。

真直度誤差の大きいのは e_{yx} 、すなわちテーブルのX軸方向送りの際の前後方向の誤差で500mmの測定範囲

Fig. 8 Measured straight motion error of the milling machine (γ_z is not measured)

Fig. 9 Comparison of the straightness errors of the straight edge master measured by two methods

で約 $8 \mu\text{m}$ 存在した。他の真直度誤差はいずれも $3 \mu\text{m}$ 以下と非常に小さかった。JIS B 6204 で規定されている 500 mm につき $30 \mu\text{m}$ という値よりもこれらの測定値ははるかに小さい。これらの結果からこのフライス盤は加工精度に直接関係のある真直度誤差の値は小さいが、テーブル、ラム、サドルの姿勢変化はかなり大きいことがわかった。

真直度誤差の標準偏差 σ についてはすべて $0.055 \sim 0.13 \mu\text{m}$ と非常に小さい。回転成分の σ についても β_x , γ_x , α_y , β_y , γ_y はいずれも $0.24 \sim 0.65 \mu\text{m/m}$ の範囲にあり、非常に小さい。それに対し、 α_x の σ は $1.08 \mu\text{m/m}$ と大きい。これはストレートエッジマスタの形状から定まるピックアップ PU 3 と PU 5 の間隔が他と比べて小さいことによるものと思われる。またサドルを上下方向に送った場合の α_z , β_z の分散 σ は $2 \mu\text{m/m}$ 程度とかなり大きくなった。

4.2 二つの方法で測定したストレートエッジマスタの真直度誤差と直線運動誤差の比較

図 7 に示したストレートエッジマスタの上面 (A 面) の真直度誤差をオートコリメータで測定した結果と、3 点法を用いて測定した結果を比較して図 9 に示す。両者は非常に良く一致しており、差はただか $0.2 \mu\text{m}$ ぐらいしか存在しない。しかしこれは上面である A 面についてのみ言えることであり、他の面についてはストレートエッジマスタを置き直す度に 3 点法で測定した表面形状は $0.5 \sim 1 \mu\text{m}$ 程度異なっていた。これはマスタ下面とテーブルの間の摩擦によってマスタが水平面内で変形したために生じたものと思われる。なぜならストレートエッジマスタの形状誤差と同時に測定されたテーブルの運動誤差はマスタの置き方を変えてもほとんど変わらなかったからである。

Fig. 10 Comparison of the straight motion errors of the table e_{zx} measured by two methods

オートコリメータで測定した既知のストレートエッジマスタの真直度誤差を補正して得られたテーブルの直線運動誤差 e_{zx} と、3 点法を用いて測定した e_{zx} を比較して図 10 に示す。この場合にも両者は非常に良く一致している。

5. 結 論

工作機械の真直度誤差と直線運動誤差を測定する方法について研究した結果、次のことがわかった。

- (1) 形状誤差の既知なストレートエッジマスタを 5 つの電気マイクロメータピックアップでトレースすることにより、直線運動誤差の 5 つの成分を同時に精度良く測定できる。
- (2) ストレートエッジマスタの形状誤差が未知な場合には、3 点法による測定とデータ処理を行えば、ストレートエッジマスタの形状誤差と直線運動誤差を同時に精度良く測定できる。この場合には 9 個のピックアップを必要とする。
- (3) 測定した立てフライス盤については加工精度にかかわる真直度誤差は $3 \mu\text{m}$ と小さかったが、姿勢の変化は 500 mm の測定範囲で $80 \mu\text{m/m}$ と大きいことがわかった。

参 考 文 献

- 1) 例えば, J. Tlustý & F. Koenigsberger: Specifications and Tests of Metal Cutting Machine Tools, UMIST, (1970).
- 2) 赤池弘次: 情報量基準 AIC とは何か, 数理科学, **14**, 153 (1976) 5.
- 3) 例えば, 垣野義昭, 北沢治郎: 工作機械上での 3 点法円筒度測定に関する研究 (第 1 報), 精密機械, **44**, 11 (1978) 1386.