

Laser Step Diagonal Measurement for the Estimation of Three-dimensional Volumetric Errors

○ 畑 貴文 (京大) 正 茨木 創一 (京大) 正 松原 厚 (京大)

Takafumi HATA, Kyoto University, Yoshidahonmachi, Sakyo-ku, Kyoto  
 Soichi IBARAKI, Kyoto University  
 Atsushi MATSUBARA, Kyoto University

The laser step diagonal measurement is a method for the identification of all the volumetric error components, including linear displacement errors, straightness and squareness errors by using only a laser interferometer and a flat mirror. This research first discusses inherent and critical issues with the conventional formulation of the laser step diagonal measurement. Then, we propose a new formulation of the laser step diagonal measurement to accurately estimate the machine's volumetric errors even under the existence of setup errors.

*Key Words*: Step diagonal measurement, volumetric error, laser interferometer

1. 緒言

レーザステップ対角線測定とは、レーザ測長器を用いた直線方向の位置決め誤差の測定のみを用いて、真直度、直角度を含む3次元空間上での全空間誤差成分を同定出来るとされている方法である。しかし、本測定法を提案したWang<sup>1)</sup>らの定式化には、レーザと鏡の方向のセットアップの誤差(以下、調整不良と呼ぶ。)が、同定精度に大きな影響を及ぼす可能性があるという重要な問題がある。調整不良が許容値以下であることを保証することは現実的には難しいので、従来の定式化を用いた空間誤差の同定には、大きな同定誤差が含まれる可能性がある。本研究では、調整不良が存在する条件下においても、空間誤差を正確に同定するための新しい手法を提案する。そして立形マシニングセンタを対象に本測定を行い、両定式化による同定結果を比較することで、提案した手法の優位性を確認した。

2. 従来の定式化

(1) レーザステップ対角線測定の基本原理

レーザステップ対角線測定の概略を図1に示す。測定範囲を表す立方体の対角線方向にレーザ光軸を調整し、鏡を光軸に垂直に調整する。その後、X、Y、Zの順にジグザグの一定幅の指令を与えた時の対角線方向の変位を測定する。このような測定を、異なる3本の対角線に沿って行う。

簡単のため、X、Y、Z方向に1ステップ機械が移動した時の空間誤差の同定を考える。同定対象である空間誤差成分は、各軸3成分(X方向移動時のX、Y、Z方向の位置決め誤差をそれぞれ $E_x(x)$ 、 $E_y(x)$ 、 $E_z(x)$ と定義する。Y、Z方向移動時も同様に定義する)なので、計9成分である。X、Y、Z方向に機械が移動した時、各々の停止位置で対角線方向の変位を測定する。異なる対角線についても測定を行うことで、計9個の測定値が得られる。これらを用いて、9個の未知数を幾何的に同定するのが、本測定の基本原理である。測定ステップ幅を $a$ 、X方向移動時の測定値を $R_x$ 、レーザ光軸の方向を表す単位ベクトルを

$$L = [l_x \quad l_y \quad l_z] = (1/\sqrt{3}) \cdot [1 \quad 1 \quad 1]$$

とすると、X方向移動時は以下のような関係式が得られる。

$$[l_x \quad l_y \quad l_z] \cdot [a + E_x(x) \quad E_y(x) \quad E_z(x)]^T = R_x$$

Y、Z方向移動時についても同様の関係式が得られる。異なる対角線についても測定を行い、計9個の関係式が得られる。

(2) 従来の定式化の問題点

従来の定式化では、レーザ光軸が完全に対角線方向に一致していること、及びレーザ光軸と鏡が完全に垂直に調整されていることを前提としている。しかし、これらのセットアップの精度を保証することは現実には困難である。

簡単のため、図2に2次元平面上での光軸と鏡の調整の概略を示す。ここでは、Y方向移動時のY方向にのみ位置決め誤差が存在すると仮定する。光軸の調整は、測定空間の対角線方向、即ち点A→Cへの直線の移動指令を与えた時、主軸に設置した鏡上のレーザの着光点の位置の変動が出来るだけ小さくなるようにして行う。しかし機械に空間誤差が存在するため、どんなに厳密に調整を行っても、光軸はノミナル方向、即ちXY平面での45°方向には調整されない。また、鏡の調整は、もう一方の対角線、即ち点B→Dへの移動指令を与えた時に、レーザ測長器の測定値の変動が小さくなるように調整する。しかし、光軸の調整と同様、機械に空間誤差が存在するため、この調整で鏡をノミナル方向、即ち光軸に垂直な方向に調整することは出来ない。

一例として、光軸の向きの誤差が測定値に及ぼす影響を簡単なシミュレーションにより示す。図3に3次元空間上の一辺10mmの立方体空間における斜面ABCD上で、レーザ光軸が点Cにおいてノミナル方向から0.01mmずれて調整された状態を示す(鏡は光軸に垂直に調整されているものとする)。表1にこの時の測定値の変化の数値計算結果を示す。ただし $\hat{R}_x$ 、 $R_x$ は光軸の向きの誤差が無い場合とある場合の点Cでの測定値、 $\hat{R}$ 、 $R$ は点Bでの測定値を表す。点Cでの測定値 $\hat{R}_x$ の変化量 $\zeta$ にはほとんど影響しないが、点Bでの測定値 $\hat{R}_x$ の変化量 $\zeta_x$ は決して無視できないことがわかる。

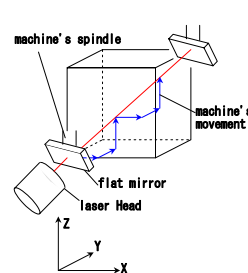


Fig.1 Laser Step Diagonal Measurement

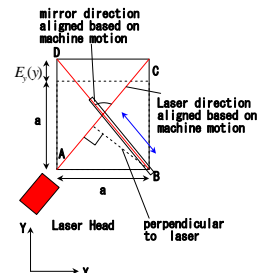


Fig.2 Misalignment of laser and mirror direction

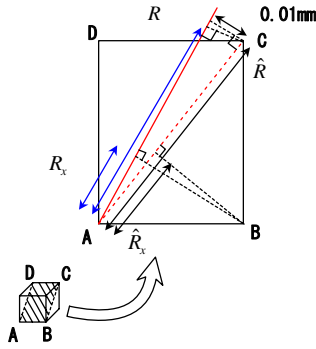


Fig.3 Influence of misalignment of laser direction

Table1 Error scale of misalignment of laser direction

$\zeta_x = \hat{R}_x - R_x$	5 $\mu$ m
$\zeta = \hat{R} - R$	3nm

### 3. 新しい提案法

表1に示すように、X、Y、Z軸各々1ステップ移動後の調整不良の誤差を足し合わせたものの測定値への影響は無視できる。即ち、 $\zeta_x + \zeta_y + \zeta_z = 0$ とみなせる。3本の対角線について同様の関係が成り立ち、関係式を3個増やすことが出来る。また、送り方向と垂直な方向への誤差成分は、座標系の取り方によって変化する相対的な値である。三次元空間では座標系の回転に3個の自由度が存在するため、合計6つの送り方向と垂直な誤差成分の内、3個までを固定値とすることが出来る。以上のような仮定においても、空間誤差成分が9個、調整不良の誤差成分が9個、計18個の未知数に対し、計15個の関係式しか得られず、未知数の数が関係式の数を3個上回る。

未知の空間誤差の内、送り方向の位置決め誤差は、レーザ測長器のみを用いて容易に測定することが出来る。そこで、提案する定式化では、送り方向の位置決め誤差3成分を予め求めておくものとする。調整不良の影響を考慮すると、X方向移動時の関係式は以下ようになる。

$$\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot [1 \ 1] \cdot [E_y(x) \ E_z(x)]^T \\ = R_x - \zeta_x - \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (a + E_x(x))$$

予め送り方向の位置決め誤差3成分を測定しておくことにより、未知数が3個減少し、得られる関係式の数と一致する。全関係式を連立一次方程式として解くことで、全ての未知数を同定することが出来る。

### 4. ケーススタディ

両手法による同定精度の検証を行うため、実際の立形マシニングセンタを対象にレーザステップ対角線測定を行った。対象機のストロークは X:610mm, Y:510mm, Z:460mm。最小表示単位は1 $\mu$ mである。レーザ測長器はOptodyne社製 MCV-500を用いた。レーザ光軸の調整には同社製4象限検出器 LD42を用いた。レーザステップ対角線測定のスレッド幅は10mmとし、測定範囲はX、Y、Zいずれも120mmとした。レーザステップ対角線測定による空間誤差の同定精度を検証するために、機械には実際の運動精度と比較して十分に大きいと考えられる誤差を加えた指令値を与えた。

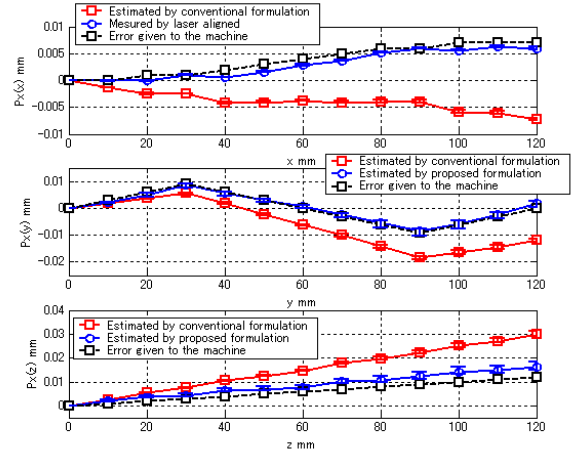


Fig.4 Measured and estimated volumetric errors (Top:  $P_x(x)$ , middle:  $P_x(y)$ , bottom:  $P_x(z)$ )

図4(上)にX軸移動時のX方向の位置決め誤差 $P_x(x)$ の同定結果を示す。X=120mmにおいて、指令値として与えた誤差は+7 $\mu$ mとした。レーザ測長器による直接測定値は+6.0 $\mu$ mであるのに対し、従来の定式化による同定結果は-7.3 $\mu$ mとなった。図4(中)にY軸移動時の、X方向の指令位置からの誤差である $P_x(y)$ の同定結果を示す。Y=120mmにおいて、従来の定式化による同定結果は、指令値と-11.9 $\mu$ mの差が見られるのに対し、提案した手法による同定結果との差は+1.7 $\mu$ mとなり、指令値により近い値を示した。図4(下)にZ軸移動時の、X方向の指令位置からの誤差である $P_x(z)$ の同定結果を示す。従来の定式化による同定結果は、Z=120mmにおいて、指令値と+17.8 $\mu$ mの差が見られるのに対して、提案した手法による同定結果は+4.2 $\mu$ mの差となり、指令値により近い値を示した。 $P_x(y)$ 、 $P_x(z)$ については、別の測定器を用いた測定値と、同定結果の比較は行わなかったため、提案した手法の同定精度を厳密に検証することは現時点では出来ない。しかし、指令軌跡に与えた誤差は機械の空間誤差と比べて十分に大きいので、図4に示した指令軌跡は、機械の実際の運動誤差に近いと考えられる。誤差を与えた成分のいずれにおいても、従来の定式化による同定結果に比べ、提案した手法による同定結果が、指令値として与えた誤差に、より近い同定結果を示した。

### 5. 結言

レーザステップ対角線測定の従来の定式化において、調整不良に伴い無視できない同定誤差が現れることを定量的に示した。また調整不良が存在する条件下でも、空間誤差をより正確に同定するための新しい手法を提案した。

立形マシニングセンタを対象に測定を行い、指令値として加えた誤差との比較によって、提案した手法が従来の定式化と比較して、より高い同定精度を持つことを確認した。

### 参考文献

- Wang, C.: Laser vector measurement technique for the determination and compensation of volumetric positioning errors, 2000 American Institute of Physics(2000)
- Ibaraki, S., Goto, W., and Matsubara, A.: Issues in laser step diagonal measurement and their remedies, Proceedings of 2006 Int'l Symp. on Flexible Automation(2006)