

レーザステップ対角線測定による工作機械の三次元空間誤差の推定法

京都大学 ○畑 貴文, 茨木創一, 松原 厚

The Estimation of Three-dimensional Volumetric Errors by Laser Step Diagonal Measurement
Kyoto University Takafumi HATA, Soichi IBARAKI, Atsushi MATSUBARA

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. As a case study, the proposed formulation is applied to estimate volumetric errors on the three-axis commercial machine tool. Experimental results show that straightness and squareness errors can be identified with the estimation error of about 1 μ m over the measurement distance of 120mm.

1. 緒言

工作機械の真直度・直角度を求める従来の方法としては、直定規・直角定規等の物理的基準と、変位センサを用いて測定する方法が一般的である。しかし、この方法には、高精度の測定を行なうためには物理的基準に求められる形状精度も高くなり、測定コストが高くなることと、異なる方向の誤差成分を計測する時に逐一基準と変位センサのセットアップの変更が必要になり、測定時間が長くなることという問題点がある。

工作機械の可動領域全体における空間誤差を低コストで、より能率的に測定するための方法として、レーザステップ対角線測定が提案されている¹⁾。レーザステップ対角線測定とは、レーザ測長器による位置決め誤差の測定結果のみから、真直度・直角度を含む空間誤差を全て同定できるとされている方法である。図1に測定の概略を示す。測定範囲を表す立方体の対角線方向にレーザ測長器の光軸を向け、鏡面を光軸に対し垂直になるよう調整を行った後、X、Y、Zの順に階段状の一定幅の指令を与えた時の対角線方向変位を測定する。同様の測定を異なる3本の対角線について行う。この測定は、物理的基準を使用せず、また測定器のセットアップを変更する回数も少ないため、大きな測定範囲における空間誤差の評価を低コストに、能率的に行うことが出来るという長所を持つ。しかし著者らはこれまでに、レーザステップ対角線測定の従来の定式化¹⁾には、光軸と鏡の方向のセットアップ誤差により、同定結果に無視できない誤差が現れる問題点を指摘した²⁾。本研究では、調整不良が存在する条件下でもその影響をキャンセルし、空間誤差の推定を行うことが出来る新しい定式化を提案する。また、提案した定式化に基づき、レーザステップ対角線測定による空間誤差の推定精度を実験により検証した。

2. 従来の定式化における問題点

(1) レーザステップ対角線測定の従来の定式化

簡単のため、X、Y、Z方向に1ステップのみ機械が移動する時の空間誤差の同定を考える。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方向に移動した場合の誤差も同様に定義する。階段状の経路に沿ってX、Y、Zの順に機械が移動した時、各々の停止位置で対角線方向変位を測定する。1回の移動距離を a 、X方向移動時の対角線方向変位を R_x 、レーザ光軸の方向を表す単位ベクトルを

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

と定義すると、X方向移動時は次の関係式が成立する。

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

Y、Z方向に機械が移動した時についても同様の関係式が得ら

れる。異なる他の2本の対角線についても測定を行うことにより、計9個の関係式が得られる。この9個の関係式を連立方程式として解くことにより、9個の空間誤差 $E_x(x)$ 、 $E_y(x)$ 、 $E_z(x)$ 、 $E_x(y)$ 、 $E_y(y)$ 、 $E_z(y)$ 、 $E_x(z)$ 、 $E_y(z)$ 、 $E_z(z)$ を求める。

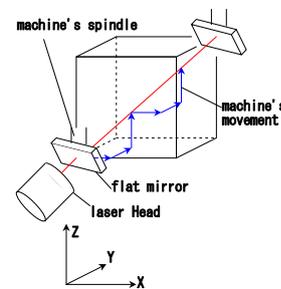


Fig.1 Laser Step Diagonal Measurement

(2) 新しい定式化

従来の定式化は、光軸の方向が対角線方向と完全に一致していることと、光軸と鏡面が完全に垂直に調整されていることの2点を仮定している。しかし、実際の測定では、光軸の方向、及び鏡の方向は、対象機の運動を基準に調整せざるを得ない。機械に空間誤差が存在する限り、上記の仮定が満たされていることを保証することは不可能である。著者らは、調整不良が空間誤差の推定結果に無視できない大きさの影響を及ぼす場合が一般的であることを、解析的及び実験的に示した²⁾。

9個の空間誤差成分全てを1ステップ各々の対角線方向変位9個との関係による連立方程式から求めようとする従来の定式化では、調整不良の誤差をキャンセルすることは出来ない。しかし、同定対象である空間誤差9成分の内、各軸の送り方向の位置決め誤差である $E_x(x)$ 、 $E_y(y)$ 、 $E_z(z)$ は、レーザ測長器を用いて容易に測定することが出来る。そこで、式(1)に示すように、送り方向の位置決め誤差3成分を既知として扱うこととする新しい定式化を提案する。式(1)を用いることにより、調整不良の誤差が大きな条件化であっても、6個の空間誤差成分を同定することが出来る。

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 \\ -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x(x) \\ E_z(x) \\ E_x(y) \\ E_z(y) \\ E_x(z) \\ E_y(z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{3}R_{ppp} - 3a - (E_x(x) + E_y(y) + E_z(z)) \\ \sqrt{3}R_{ppp} - 3a - (E_x(x) + E_y(y) + E_z(z)) \\ \sqrt{3}R_{ppp} - 3a - (E_x(x) + E_y(y) + E_z(z)) \\ \sqrt{3}R_{x,ppp} - a - E_x(x) \\ \sqrt{3}R_{y,ppp} - a - E_y(y) \\ \sqrt{3}R_{z,ppp} - a - E_z(z) \end{bmatrix} \quad (1)$$

ただし、 R_{ppp} 、 R_{ppp} 、 R_{ppp} 等の添え字は、それぞれ別の対角線についての測定であることを意味する。

3. ケーススタディ

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い、空間誤差の同定精度を検証した。対象機のストロークは X:900mm, Y:500mm, Z:350mm. 最小移動単位は 0.1 μ m である。レーザ測長器は Optodyne 社製 MCV-500 を用いた。対角線測定のスレッド幅は 10mm とし、測定範囲は X, Y, Z どれも 120mm とした。また、対角線測定と同定精度を検証するために、比較測定として、対角線測定と同じ測定空間において、直定規・直角定規（真直度の校正値 1 μ m/150mm 以下・直角度の校正値 1.5 μ m/150mm 以下）と、分解能 10nm のレーザ変位計を用いて測定した。

図 2 に X, Y, Z 各軸の送り方向の位置決め誤差について、レーザ測長器で直接測定した値と、従来の定式化による同定値を示す。なお、例えば $P_x(x)$ は X 方向に位置決めした場合の基準位置に対する X 方向の位置決め誤差を表し、 $E_x(x)$ の累積値として与えられる。図 2(中)(下)に示すように、Y, Z 方向については 20 μ m 程度の差が現れ、従来の定式化では送り方向の位置決め誤差を正確に同定出来ないことがわかる。

図 3 に空間誤差 9 成分の内、3 成分の測定結果を示す。図 3(上)に Y 方向移動時の、基準位置に対する X 方向の誤差 $P_x(y)$ の同定結果を示す。X=120mm において、直角定規を用いた測定の結果は -1.7 μ m であるのに対し、レーザステップ対角線測定の新しい定式化による同定結果は -1.5 μ m、従来の定式化による同定結果は +2.4 μ m となった。表 1 に、送り方向の位置決め誤差・真直度・直角度の、物理基準を用いた測定結果、レーザステップ対角線測定の新しい定式化による同定結果、新しい定式化による同定結果についてまとめたものを示す。

直角度の全成分について、レーザステップ対角線測定の新しい定式化による同定値よりも新しい定式化による同定値が、物理的基準を用いた比較測定の結果に近い値を示した。

Table1 Measured and estimated straightness and squareness errors

	Measured	Conventional estimation	Proposed estimation
Positioning error in X	0.6 μ m	1.9 μ m	—
Positioning error in Y	0.2 μ m	-18.9 μ m	—
Positioning error in Z	-1.0 μ m	21.0 μ m	—
Straightness of X axis(Y direction)	0.6 μ m	0.3 μ m	0.3 μ m
Straightness of X axis(Z direction)	0.4 μ m	0.8 μ m	0.5 μ m
Straightness of Y axis(X direction)	0.1 μ m	0.3 μ m	0.4 μ m
Straightness of Y axis(Z direction)	0.9 μ m	0.5 μ m	0.9 μ m
Straightness of Z axis(X direction)	0.3 μ m	0.6 μ m	1.0 μ m
Straightness of Z axis(Y direction)	1.3 μ m	0.8 μ m	0.7 μ m
Squareness of X-Y	-1.2 μ m	2.4 μ m	-1.7 μ m
Squareness of X-Z	1.2 μ m	-3.3 μ m	0.5 μ m
Squareness of Y-Z	1.9 μ m	-3.7 μ m	-0.1 μ m

*All the errors are over the range of 120mm

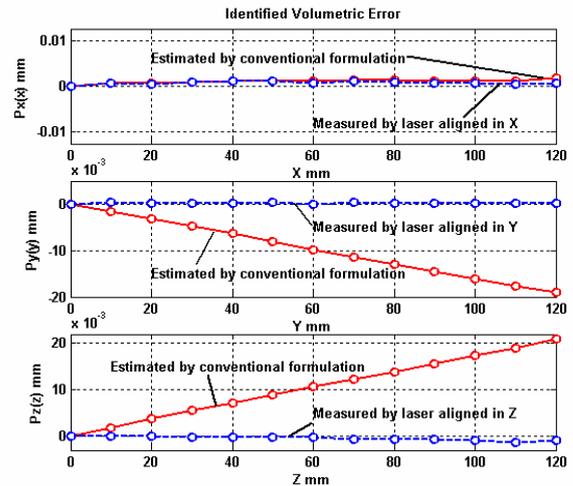


Fig.2 Measured and estimated positioning errors (Top: linear positioning error in x $P_x(x)$, middle: $P_y(y)$, bottom: $P_z(z)$)

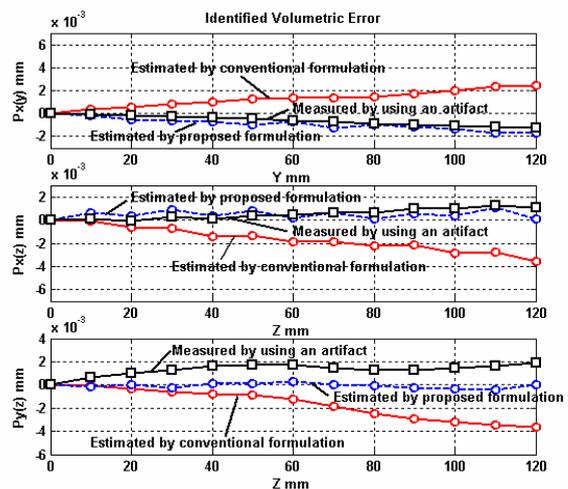


Fig.3 Measured and estimated volumetric errors (Top: positioning error in x for the motion toward Y $P_x(y)$, middle: $P_x(z)$, bottom: $P_y(z)$)

4. 結言

従来の定式化ではレーザ光軸と鏡面の方向のセットアップ不良により大きな同定誤差が現れる問題点がある。セットアップ不良に同定精度が左右されないための新しい定式化を提案した。実機での検証では、送り方向の位置決め誤差について、従来の定式化を用いた同定結果には、実測値と 20 μ m 程度の誤差が現れ、正確な同定が行えないことが示された。また直角度誤差の何れの成分についても、従来の定式化による同定値よりも新しい定式化による同定値が実測値に近い値を示し、同定精度は 2 μ m 以下となった。

参考文献

- (1) Wang, C.: Laser vector measurement technique for the determination and compensation of volumetric positioning errors, 2000 American Institute of Physics(2000)
- (2) 畑貴文, 茨木創一, 松原厚: レーザステップ対角線測定を用いた工作機械の三次元空間精度の推定法, 日本機械学会 2007 年度年次大会講演論文集(2007)