

# レーザトラックシステムを用いた3次元運動精度測定

京都大学工学研究科 ○飯塚厚史, 茨木創一, 松原厚, 独立行政法人産業技術総合研究所 佐藤理, 大澤尊光

## 要旨

本研究では、レーザトラックシステムと呼ばれる3次元の座標測定装置を工作機械の空間誤差の計測に適用し、新たな空間誤差計測法を構築することを目的とする。その基礎として、レーザトラックシステムによる3次元位置の推定において、トラックの設置位置と測定範囲の位置関係が推定誤差に及ぼす影響を感度解析の視点から議論する。また、初期的な推定精度の評価実験を行った。その結果、精度向上のためにトラックの設置位置の修正などが必要であることが分かった。

## 1. 緒言

工作機械の運動誤差に関して、位置決め誤差や真直度、直角度などを含む3次元空間における全ての静的誤差成分を総称して空間誤差と呼ぶ。近年、工作機械の空間誤差の評価がより重視されるようになってきている。

真直度や直角度の測定法としては、直定規や直角定規などの物理基準と変位センサとを用いる測定が一般的であり、交差格子スケール(KGM)を用いた測定なども知られている。しかし、いずれの方法も空間誤差の全ての成分を測るには複数方向での測定を組み合わせねばならず、煩雑なセットアップを繰り返す必要がある。

本研究では、レーザトラックシステムを工作機械の空間誤差の測定に適用することを考える。それにより、空間上の任意の点の座標を測定できるというレーザトラックシステムの利点を生かした、新たな空間誤差計測法を構築することを目指す。特に本論文では、レーザトラックシステムの測定精度の評価実験と、測定精度に影響を及ぼす要因ならびにその影響の理論的解析を示す。

## 2. レーザトラックシステムの概要

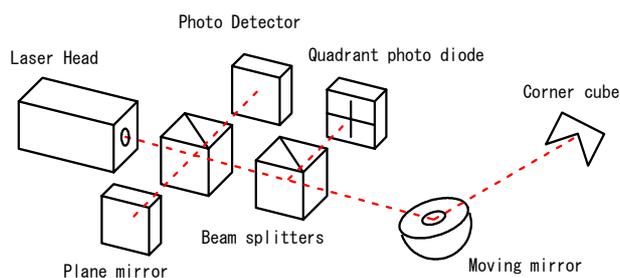


Fig.1 Optical system of laser tracker<sup>(1)</sup>

### 2.1 装置の概要

本論文では、矢野らが開発した装置<sup>(1)</sup>を使用した。図1にトラックの光学系の概要を示す。これは従来型のレーザ干渉測長器に対し、レーザ照射方向を制御するための可動ミラーと、測定対象からの反射光の変位を観測するための4分割ダイオードとを加えたものとなっている。

レーザがターゲットであるコーナキューブミラーに入射すると、レーザは入射光と平行な反射光となりトラックに戻る。このとき、反射光軸は入射光軸に対してオフセット

を持って戻ってくるので、これを4分割ダイオードにより観測する。このオフセットは、レーザ入射位置がコーナキューブ頂点から離れるほど大きくなる。これを0にするように可動ミラーの角度を制御しターゲットを自動追尾する。

### 2.2 座標推定のアルゴリズム

トラックのミラー中心座標及びターゲット座標を推定するアルゴリズムは梅津らが提案したもの<sup>(2)</sup>を用いる。4台のトラックの座標が  $\mathbf{U}_1 = [0 \ 0 \ 0]^T$ ,  $\mathbf{U}_2 = [U_2 \ 0 \ 0]^T$ ,  $\mathbf{U}_3 = [U_3 \ V_3 \ 0]^T$ ,  $\mathbf{U}_4 = [U_4 \ V_4 \ W_4]^T$  となるような座標系  $u-v-w$  において、ターゲット座標を  $\mathbf{u}_i = [u_i \ v_i \ w_i]^T$ , ( $i=1,2,\dots,m$ ) とする。 $(m$  は測定点数)  $j$  台目のトラックによって  $i$  回目に測定されるレーザ変位  $d_{ij}$  と座標との間には以下の観測方程式が成り立つ。

$$\mathbf{d} - \mathbf{f} = \mathbf{0} \quad (2.1)$$

$$\begin{cases} \mathbf{d} = [d_{11} \ d_{21} \ \dots \ d_{3m} \ d_{4m}]^T \\ \mathbf{f} = [f_{11} \ f_{21} \ \dots \ f_{3m} \ f_{4m}]^T, f_{ij} = (\|\mathbf{u}_i - \mathbf{U}_j\| - \|\mathbf{u}_i - \mathbf{U}_j\|) \end{cases}$$

式(2.1)において、未知な座標パラメータは  $6+3m$  個である。これらを全てまとめたパラメータベクトルを  $\mathbf{p} = [U_2 \ U_3 \ V_3 \ U_4 \ V_4 \ W_4 \ \mathbf{u}_1^T \ \mathbf{u}_2^T \ \dots \ \mathbf{u}_m^T]^T$  とする。一方レーザ変位データの数は  $4m$  であり、 $m > 6$  のとき測定データ数がパラメータの数を上回ることになる。

パラメータ推定の繰り返し回数を  $k = 0, 1, 2, \dots$  とする。 $k$  回目の推定計算で得られたパラメータを  $\mathbf{p}^{(k)}$  とすると、

$$\mathbf{d} - \mathbf{f}(\mathbf{p}) \cong \mathbf{d} - \left( \mathbf{f}(\mathbf{p}^{(k)}) + \left( \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{p}} \bigg|_{\mathbf{p}=\mathbf{p}^{(k)}} \right) (\mathbf{p} - \mathbf{p}^{(k)}) \right) = \mathbf{0} \quad (2.2)$$

なる近似が成り立つ。

$$\Delta \mathbf{d}^{(k)} = \mathbf{d} - \mathbf{f}(\mathbf{p}^{(k)}), \Delta \mathbf{p}^{(k)} = \mathbf{p} - \mathbf{p}^{(k)}, A^{(k)} = \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{p}} \bigg|_{\mathbf{p}=\mathbf{p}^{(k)}} \quad (2.3)$$

と記号を定義すると、パラメータの改良は

$$\mathbf{p}^{(k+1)} = \mathbf{p}^{(k)} + \Delta \mathbf{p}^{(k)} = \mathbf{p}^{(k)} + (A^{(k)T} A^{(k)})^{-1} A^{(k)T} \Delta \mathbf{d}^{(k)} \quad (2.4)$$

と行なうことができる。なお、初期パラメータはトラックの大まかな設置位置と測定対象に加えた座標指令値により与える。次節に示す測定実験では、安定した収束が得られなかったため、トラック座標ないしターゲット座標の一方

を固定し他方を推定する推定計算を交互に繰り返す手法をとった。

### 3. 測定精度の評価実験

#### 3.1 実験方法

測定には1台のトラックを用い、トラックの設置位置を変えて4度の測定を繰り返した。ただし、測定対象の機械の非再現性誤差は十分小さいと仮定した。測定対象には立型マシニングセンタを用いた。本実験ではテーブル上にトラックを設置し、主軸にコーナキューブを取り付けた。

#### 3.2 実験条件

トラックの設置位置と測定範囲との概略を図2に示す。格子位置において測定対象機を一定時間停止し、トラックからの距離を測定した。測定範囲は100mm×100mm×100mm及び50mm×50mm×50mmの2通りとした。格子点間隔は前者が20mm、後者が10mmであり、測定点数は共に $6^3=216$ 点である。

#### 3.3 実験結果および考察

それぞれの測定点について、推定座標と指令座標との差を成分ごとに図3に示す。図3から分かる通り、推定座標と指令座標のずれは最大数100 $\mu$ m程度の大きさがある。測定対象機の空間誤差は最大でも数10 $\mu$ m程度であることが過去の実験から分かっている。よって、図3は座標推定が十分な精度で行なわれていないことを示している。

また、測定範囲が100mm×100mm×100mmの場合と、50mm×50mm×50mmの場合を比較すると、後者的の方が推定座標と指令座標の誤差が大きいたことが分かる。

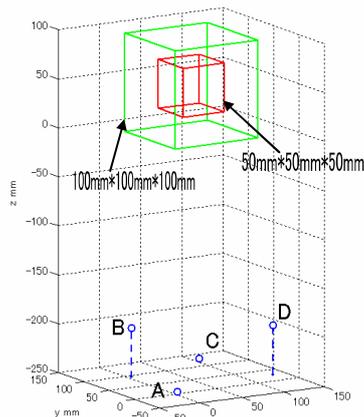


Fig.2 Tracker's location A,B,C,D and measurement area

#### 4. 推定誤差の解析

推定に有利な条件、不利な条件を判別する方法として、式(2.7)におけるヤコビアン行列 $A^{(k)}$ の条件数に着目した。条件数が大きいほど測定値 $\Delta d^{(k)}$ に含まれる誤差(測定誤差、機械の位置決め非再現性誤差、計算の丸め誤差)などが解 $\Delta p^{(k)}$ に及ぼす影響が大きくなる(すなわち、 $A^{(k)}$ の条件数が大きいほど同定精度が悪化すると考えられる)。以上を確認するために、座標測定シミュレーションを行なった。シミュレーションでは、トラックの位置を3章の実験時と同じ位置とし、測定範囲も実験時と同じ100mm×100mm×100mm及び50mm×50mm×50mmの2通りとした。ここでは、機械Aに与えたターゲットの座標指令値が理想的に実現されているとしたときの、それぞれ

のトラック座標を推定する問題を考える。

表4.1に示す条件数を比較すると、測定範囲50mm×50mm×50mmでの測定は100mm×100mm×100mmの場合と比べて、座標推定に不利な条件といえる。これは、トラック設置位置と測定範囲の位置関係によって推定式に対するパラメータの感度が増えるため、トラックと測定点との位置関係が大きく変化するような条件が有効であることによるものと考えられる。

### 5. 結言

本研究では、レーザトラックシステムを用いた測定対象の3次元位置の測定精度を評価する実験を行った。大きな測定誤差が見られたため、誤差要因としてについてトラックの設置位置と測定範囲の位置関係に着目した。感度解析の観点から、トラックの設置位置と測定範囲の位置関係が推定誤差に影響することをシミュレーションにより確かめた。

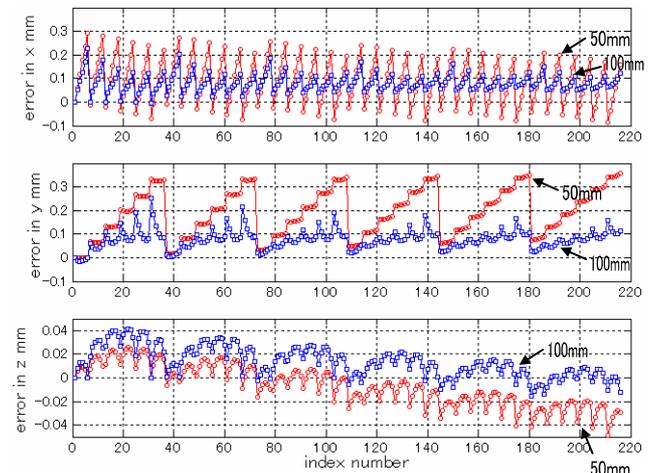


Fig. 3 Estimated positions with 50mm×50mm×50mm measurement area and 100mm×100mm×100mm (upper : x coordinate, middle : y, lower : z)

Table 4.1 Condition number of the Jacobian matrix

Location of trackers	Condition number of Jacobian matrix	
	100*100*100 mm	50*50*50 mm
Tracker A	172.4	621.4
Tracker B	241.1	904.6
Tracker C	227.2	802.7
Tracker D	164.1	576.4

#### 参考文献

- (1) 矢野智昭ら：サブミクロンの測定精度を有する小型2軸球面モータ型レーザ追尾距離測定装置の開発, IEEJ Trans. SM, Vol.126, No.4, (2006)
- (2) Kenta Umetsu et.al.: Geometric calibration of a coordinate measuring machine using a laser tracking system, Meas. Sci. Technol. 16 (2005)
- (3) 中川徹, 小柳義夫: 最小二乗法による実験データ解析, 東京大学出版会, 1982