

## レーザトラッカを用いた NC 工作機械の 3 次元空間誤差の推定法に関する研究

京都大学 ○竹内国貴, 茨木創一, 松原厚

### 要旨

本研究では、レーザトラッカを用いて加工機の可動領域内における主軸端の位置座標を測定し、加工機の 3 次元空間内における空間誤差を推定・評価する。レーザトラッカとは、ターゲットまでの距離を測定するレーザ干渉計に対し、測定対象を自動追尾する機能を追加した測定器で、三点測量の原理を用いてターゲットの 3 次元位置を推定することができる。本論文では、その推定精度の評価を実験的に行った。

### 1. 緒言

航空機部品や自動車のエンジン部品など、複雑な構造の大型ワークの機械加工の加工精度を向上させるためには、可動領域全体において、加工機の主軸端を 3 次元空間内の指令点に位置決めしたとき、全ての方向への位置決め誤差を低減する必要がある。このような 3 次元空間内における位置決め誤差成分を総称して空間誤差と呼ぶ。機械加工の精度向上のためには、この空間誤差を可動領域全体で効率的に測定・評価することが重要である。しかし、この空間誤差を直接測定できる計測器は存在しないといってよく、新しい計測器が望まれている。

本研究では、上記の目的を達成する計測器として、レーザトラッカと呼ばれる新しい計測器に着目した。レーザトラッカとは一方向の距離を測定できるレーザ干渉測長器にレーザ光軸の方向を変えられる機構を加えたもので、ターゲット(コーナキューブ)を追尾し、3 次元空間内での位置座標を測定可能な計測器である。レーザトラッカを用いる利点は大きく 2 つある。1 つ目は、追尾可能な範囲ではターゲットの移動パスの制約がないので任意の指令位置に対する空間誤差を直接測定可能な点である。2 つ目は、4 台のトラッカを用いて同時に測定することで機械に一度の指令値を与えるだけで空間誤差の同定が可能となり、セットアップが一回で済むので測定時間の短縮が可能となる点である。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、レーザトラッカを用いた空間誤差の推定法の構築である。畑<sup>[1]</sup>らは、矢野<sup>[2]</sup>らが開発したレーザトラッカを用いて、それを工作機械の空間精度の評価に適用する研究を行ってきた。しかし、測定範囲が 40mm 立方と小さく、また空間誤差も推定精度も十分なものは得られなかった。

そこで、本論文ではレーザトラッカの測定範囲の拡張および空間誤差の推定精度の向上を目的とした。上記と同じレーザトラッカ装置について、主に送り速度や、ターゲットとトラッカの距離を調整し、100mm 立方の測定範囲内で空間誤差の測定を行い、トラッカの測定精度の評価を行う実験を行った。

### 3. 実験方法と結果

実験には直交 3 軸の立型マシニングセンタを用いた。テーブル上に従来のレーザトラッカ装置<sup>[2]</sup>を設置し、機械の主軸端にターゲット(コーナキューブ)を設置した。Fig.1 のようにターゲットを x, y, z 方向 100mm 立方の空間内の指令位置に位置決めし、4 箇所に配置したトラッカとターゲット間の距離を測定した。各レーザトラッカから測定したレーザ変位の測定結果を Fig.2 に示す。

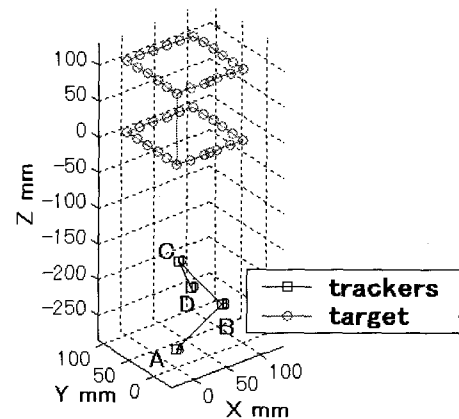


Fig.1 Location of trackers and measurement range

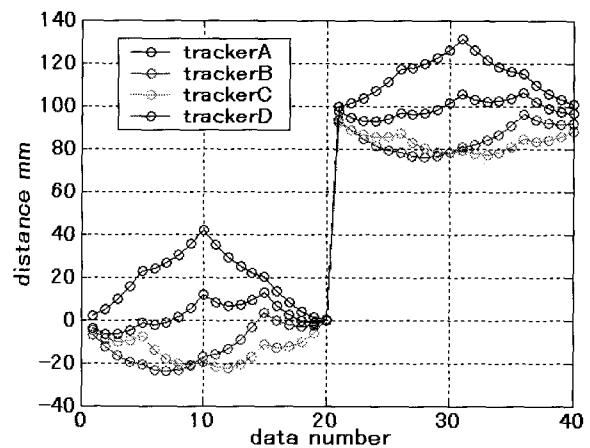


Fig.2 Laser displacement

今回の実験では、送り速度を遅くし、ターゲットとトラッカの距離を離すことで、100mm 立方の測定範囲内での測定を行うことができた。

#### 4. 推定方法

測定結果からニュートン法を用いてレーザトラッカおよびターゲットの位置を推定し、ターゲットの指令位置からの位置決め誤差(以下、推定誤差と呼ぶ)を検証した。ターゲット座標を  $\mathbf{u}_i = [u_i \ v_i \ w_i]^T$  ( $i=1,2,\dots,m$ ) とし、トラッカの座標は  $\mathbf{U}_j = [U_j \ V_j \ W_j]^T$  ( $j=1,2,3,4$ ) とする。ここで  $m$  は同定対象となるターゲットの位置座標の点数を表す。(Fig.3 参照)同定対象である未知パラメータをまとめて、 $\mathbf{p} = [U_2 \ U_3 \ V_3 \ U_4 \ V_4 \ W_4 \ u_1^T \ u_2^T \ \dots \ u_m^T]^T$  とする。

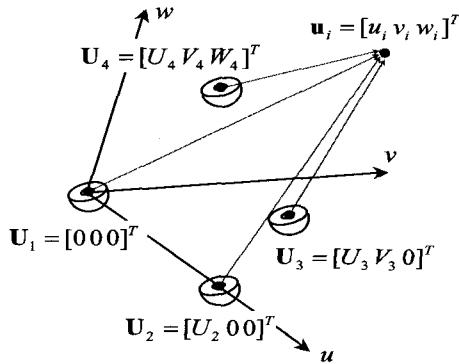


Fig.3 Unknown parameters

$j$  台目のトラッカにより、ターゲットの初期位置  $\mathbf{u}_1$  を基準として  $i$  番目の停止位置  $\mathbf{u}_i$  で測定されるレーザ変位を  $d_{ij}$  とするとレーザ変位は次のようにまとめられる。

$\mathbf{d} = [d_{11} \ d_{21} \ d_{31} \ d_{41} \ \dots \ d_{1m} \ d_{2m} \ d_{3m} \ d_{4m}]^T$   
また次の方程式を満たす。

$$d_{ij} = \|\mathbf{u}_i - \mathbf{U}_j\| - \|\mathbf{u}_1 - \mathbf{U}_j\| \equiv f_{ij} \quad (1)$$

$\mathbf{f}(\mathbf{p}) = [f_{11} \ f_{12} \ f_{13} \ f_{14} \ \dots \ f_{1m} \ f_{21} \ f_{22} \ f_{23} \ f_{24} \ \dots \ f_{2m} \ f_{31} \ f_{32} \ f_{33} \ f_{34} \ \dots \ f_{3m} \ f_{41} \ f_{42} \ f_{43} \ f_{44} \ \dots \ f_{4m}]^T$   
とすると、

$$\mathbf{d} - \mathbf{f}(\mathbf{p}) = \mathbf{0} \quad (2)$$

と表せるので、未知パラメータの同定は  $|\mathbf{d} - \mathbf{f}(\mathbf{p})|$  を最小化するパラメータベクトル  $\mathbf{p}$  を求めることと同義である。非線形関数  $\mathbf{f}(\mathbf{p})$  を線形近似し、繰り返し演算によるパラメータの改良によって最終的な推定値を求める。繰り返し演算の回数を  $k$ 、 $k$  回改良されたパラメータベクトルを  $\mathbf{p}^{(k)}$  とし式(2)を置き換えると、式(3)ようになる。

$$\mathbf{d} - \mathbf{f}(\mathbf{p}) \cong \mathbf{d} - \left( \mathbf{f}(\mathbf{p}^{(k)}) + \left( \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{p}} \right)_{\mathbf{p}=\mathbf{p}^{(k)}} \cdot (\mathbf{p} - \mathbf{p}^{(k)}) \right) = \mathbf{0} \quad (3)$$

ここで、 $\Delta \mathbf{d}^{(k)} = \mathbf{d} - \mathbf{f}(\mathbf{p}^{(k)})$ 、 $\Delta \mathbf{p}^{(k)} = \mathbf{p} - \mathbf{p}^{(k)}$ 、 $\mathbf{A}^{(k)} = \left( \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{p}} \right)_{\mathbf{p}=\mathbf{p}^{(k)}}$  と

定義して式(3)を更に書き換えると、

$$\Delta \mathbf{d}^{(k)} - \mathbf{A}^{(k)} \cdot \Delta \mathbf{p}^{(k)} = \mathbf{0} \quad (4)$$

となるので、線形の最小二乗法も用いて解くことができる。

#### 5. 結果と考察

前節のアルゴリズムを用いて、 $i$  番目の指令位置とターゲットの推定位置  $\mathbf{u}_i$  の差を  $x$ ,  $y$ ,  $z$  方向それぞれについて計算したものが Fig.4 である。(横軸は指令位置の番号  $i$ ) また、同じターゲットの推定位置  $\mathbf{u}_i$  と指令位置との差を 1,000 倍にして XY 平面上への投影を示したものが Fig.5 である。

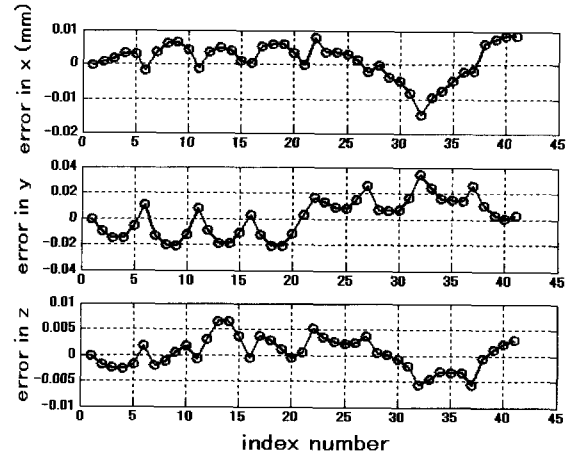


Fig.4 Estimation errors in x,y,z directions

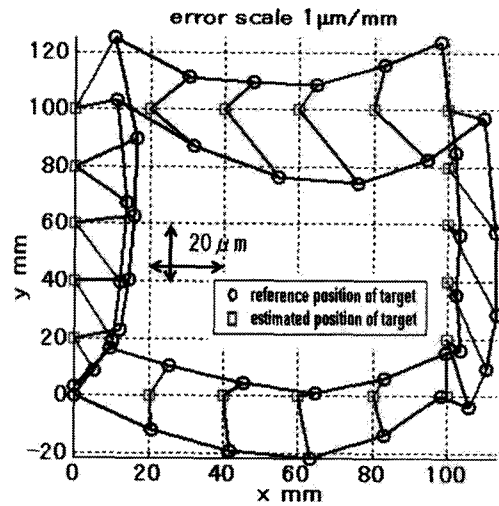


Fig.5 Estimation errors in the XY plane

本論文では、ターゲットの実際の位置を別のより信頼性の高い測定器で測定することはしなかったが、加工機の空間誤差は 100mm 立方の空間内において数  $\mu\text{m}$  程度と予測される。つまり、Fig.4, Fig.5 に示した誤差の大部分はレーザトラッカの測定誤差であると判断できる。よって、レーザトラッカはまだ工作機械の空間誤差の評価に用いるには十分な精度とはいえないことが分かる。

#### 参考文献

- [1] 畑貴文:レーザ測定を用いた工作機械の3次元空間誤差の推定法に関する研究,京都大学大学院 2008 年度修士論文.
- [2] 矢野智昭, 高辻利之, 鈴木健生, 板部忠喜, 本村洋一, 2 軸球面モータレーザトラッカの基本性能, 日本機械学会 2004 年度年次会講演論文集 Vol.4, p.265-266, (2004).