

# ワーク・ツール間の6自由度完全相対運動を目指した 超精密機械の開発(続報) —リンク配置の検討—

静岡大学 大岩孝彰 静岡大学 ○辰ノ歴識

## Ultra-Precise Machine with 6-DOF Perfect Relative Motion between Tool and Workpiece(2nd report) - Link Layout Design -

Takaaki OIWA Shizuoka University, Tsunenori TATSUNO Shizuoka University

**Abstract** — To realize an ultra-precise machine, a mechanism which generates high relative motion between its tool and the workpiece is required as well as the accuracy improvements of each element of the machine. This study proposes a compensation system for 6-degree-of-freedom errors between the tool and the workpiece in machine tools and measuring machines. A hexapod-type parallel mechanism installed between the tool spindle and the surface plate measures these errors regardless with the temperature fluctuation and external force. Moreover, the tool position is compensated by using these errors. This paper describes link layout design for isotropic measuring resolutions and kinematic calibration using a redundant passive kinematic chain.

## 1. 緒言

近年、半導体製造に代表される超精密機械産業において 10nm 以下の位置決め分解能および 100nm 以下の絶対位置決め精度が要求されつつある。このような超高精度な機械を実現するためには、機械要素単体の性能向上だけでなく、機械全体の安定性、すなわち内・外乱(外力・振動・熱など)の影響を受けずにツールとワークの相対位置精度を保証する機械システムが要求される。本研究では機械の本質的な運動がツールと工作物の間の 6 自由度相対運動であることに着目し、内・外乱の影響を受けずに工作物の載る定盤とツールとの間の 6 自由度相対運動を、アクチュエータを組み込まない受動的なヘキサポッド型パラレルメカニズムで計測する。さらにこれを用いて既存の機械のアクチュエータを制御し、工作物とツール間の運動誤差を補正する(図 1)手法を提案している<sup>1)</sup>。

本報告では、工作物の載る定盤とツール間に設置するヘキサポッド型パラレルメカニズムに冗長リンクを 1 本加え(図 2)，その時のリンク配置の位置決め分解能の等方性及び機構パラメータ推定に及ぼす影響を調査した。

## 2. 条件数

6 自由度相対運動を高精度に測るために、各並進方向(x, y, z 方向)と各回転方向(x 軸, y 軸 z 軸回り)の分解能が等しい、すなわち等方性が重要である。過去の研究<sup>2)</sup>において 6 自由度ヘキサポッドの等方性を持ったリンク配置を求めた。本研究では、冗長リンクを加えた 6 自由度ヘキサポッドが等方性を持つように、リンク配置を評価指標に条件数を用いた。

既報<sup>3)</sup>において 6 本のリンクから求められる残り 1 本のリンク変位誤差を用いてジョイント位置とリンク長さのパラメータを推定している。そこで n 番目のリンクを除いた 6 本のリンクの条件数を以下のように求める。

一般にリンクの微小変位  $\delta l$  と加工点の微小変位・回転  $\delta X$  は次式のように表せられる。

$$\delta X = J \delta l \quad (1)$$

式(1)におけるヤコビ行列  $J$  は並進方向成分  $J_f$  及び回転方向成分  $J_m$  に分けられる。

$$J = \begin{bmatrix} J_f \\ J_m \end{bmatrix} \quad (2)$$

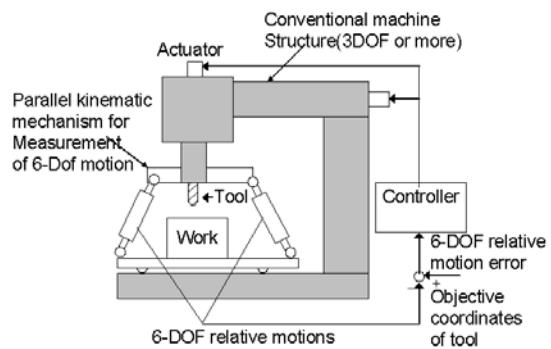


Fig.1 Fundamentals of proposed machine system using measurement device for 6-DOF motion

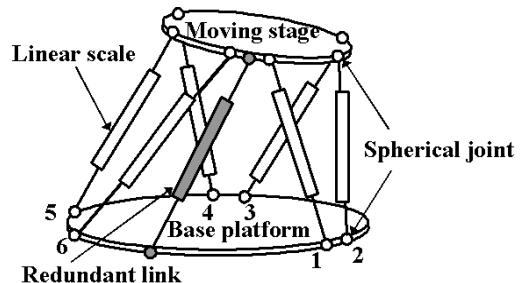


Fig.2 Added redundant link to 6-DOF parallel machine

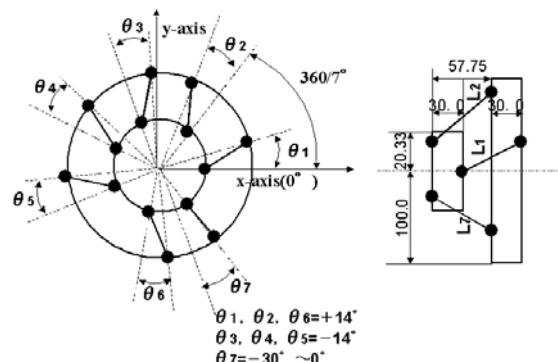


Fig.3 Link arrangement with joint position angles divided into 7 equal angle

$J_f \cdot J_m$ を別個に考えることにより並進・回転方向について評価でき、このヤコビ行列を特異値分解することにより特異値  $\lambda_i$  ( $i=1 \sim 3$ )を得る、このうち最大特異値  $\lambda_{\max}$  と最小特異値  $\lambda_{\min}$  の比を用いて、等方性を評価すると。並進方向成分の条件数は

$$C[J_f] = \frac{\lambda_{\max}[J_f]}{\lambda_{\min}[J_f]} \quad (3)$$

と表せ、回転方向成分の条件数  $C[J_m]$  も同様に求められる。そこで本研究では以下の式を用い機構の等方性の評価を行った。

$$C = \frac{1}{14} \sum_{n=1}^7 (C_n[J_f] + C_n[J_m]) \quad (4)$$

ここで  $C_n[J_f]$ ,  $C_n[J_m]$  は  $n$  番目のリンクを除いたときの並進・回転方向の条件数である。

### 3. リンク配置の検討

最適なリンク配置を調べるために下記に示す 2 つのリンク配置の条件数を調べた。

1) 図 3 のようにステージの円周上を 7 等分した位置に各ジョイントを取り付け、 $\theta_7$  を変化させた。 $\theta$  は座標系原点からの各リンクのベースとステージのジョイント取り付け角の差である。

2) 既報<sup>2)</sup>で求めた位置・回転が共に等方化された(条件数が 1) リンク配置の中央に冗長リンクを取り付け、冗長リンクの長さを変えずにジョイントの取り付け高さ  $h$  を変化させた(図 4)。

上記 1) 及び 2) のリンク配置の条件数を図 5, 図 6 に示す。1) の場合条件数は最小で 5, 2) では 3 となった。

### 5. 条件数が機構パラメータ推定結果に与える影響

上記の 1), 2) で条件数が最も小さくなかった 2 つのリンク配置を用い最小二乗法で機構パラメータの推定を行った。計算条件としては、両方とも同じ位置・姿勢 49 点にステージを動かし、繰り返し回数 10 回、機構パラメータ初期誤差  $\pm 0.1\text{mm}$  とした。1) のリンク配置を用いた時の校正前後の位置誤差を図 7 に示し、2) の結果を図 8 に示す。1) の推定結果は、 $x$  方向の誤差は少なくなっているが  $y$ ,  $z$  方向は推定前より誤差が大きくなっている、2) の推定結果では  $x$ ,  $y$ ,  $z$  方向すべてで推定前より誤差が小さくなった。

### 4. 結言

ワーク・ツール間の 6 自由度相対運動を計測するために用いる、冗長リンクを加えた 6 自由度ヘキサポッドの位置決め分解能の等方性を評価した。結果、冗長リンクをヘキサポッドの中央に取り付けた配置が測定分解能の等方性が良くなること、条件数が小さいほどキャリブレーション結果が良くなることが分かった。

本研究の一部は H16 年度科研費基盤 B, マザック財団, カシオ科学振興財団, 中部電力基礎技術研究所の研究助成により行われたことを記し、謝意を表する。

### 参考文献

- 1) 大岩:精密工学会春季大会講演論文集, (2004) pp. 869.
- 2) 大岩, 玉木:6 自由度パラレルメカニズムのリンク配置に関する研究, 精密工学会春季大会講演論文集, (2001) pp. 326.
- 3) 大岩, 大林:6 自由度パラレルメカニズムの校正に関する研究—冗長受動リンクを用いたキャリブレーション, 精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2004) pp. 1321 - 1322.

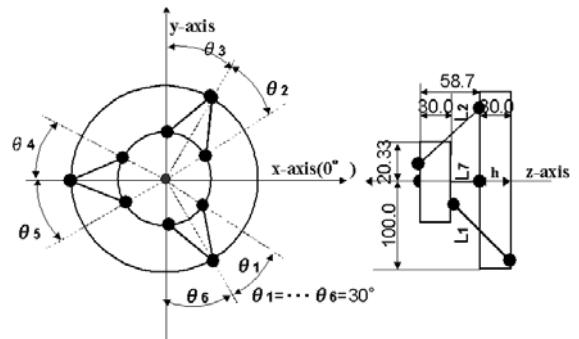


Fig.4 Link arrangement of 7th link coaxial to Z-axis

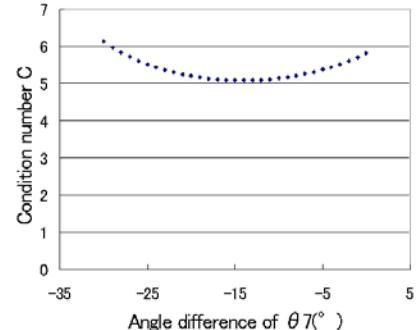


Fig.5 Condition number calculated with link arrangement shown in fig.3

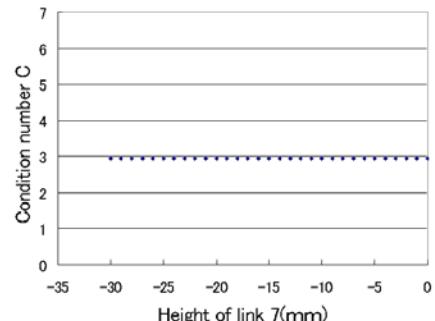


Fig.5 Condition number calculated with link arrangement shown in fig.4

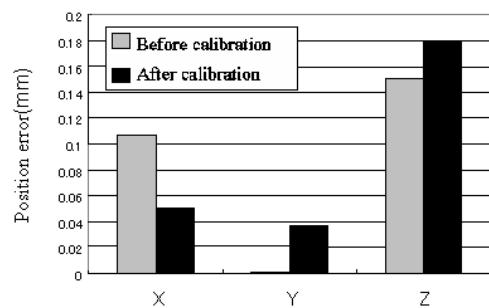


Fig.7 Calibration result using link arrangement show in fig.3

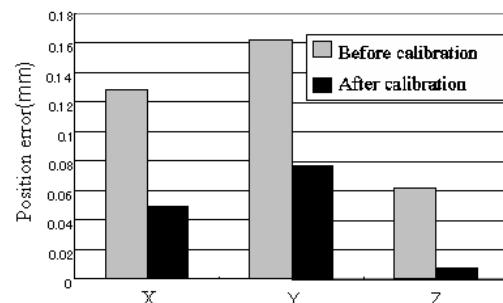


Fig.8 Calibration result using link arrangement show in fig.4