

6自由度パラレルメカニズムの校正に関する研究（第3報） —冗長受動リンクを用いたキャリブレーション—

静岡大学 大岩 孝彰, 静岡大学(院) ○大林祐介

Kinematic Calibration for 6 DOF Parallel Kinematic Machine (3rd Report)

- Kinematic Calibration with Redundant Passive Link -

Shizuoka University Takaaki OIWA, Yusuke OOBAYASHI

This study proposes a new kinematic calibration for 6 DOF parallel kinematic machines using a redundant passive link. The kinematic calibration method uses six actuated links and a passive link with a scale unit. The scale units built in each 7 links measure link displacements. Moreover, direct and inverse kinematics calculates the link displacement errors. The least square method using Jacobian matrix corrects gradually the kinematic parameters so that the link displacement errors are minimized. The above calculations have been repeated in numerical simulations.

Key words: 6 DOF parallel kinematic machine, calibration, redundant passive link, least square method

1. 緒 言

パラレルメカニズムは複数のリンクを並列に連結させた機構である。この機構は高剛性、高精度を実現できる可能性があるので工作機械や測定機への応用が考えられる。その際、機構パラメータの校正が必要になってくる。

パラレルメカニズムのキャリブレーション法はいくつか提案されている。本研究室でも、これまで外部測定機で測定したステージの位置、姿勢を用いて機構パラメータの推定を行ってきた^{1), 2)}。しかし、この方法では校正対象のパラレルメカニズムより大きい三次元座標測定機などが必要になるため実用的ではない。そこで本研究では6自由度パラレルメカニズムに冗長受動リンクを1本追加し、パラレルメカニズムだけで独立して校正できる方法を検討する。

2. 6自由度パラレルメカニズム

本研究対象となる6自由度パラレルメカニズムの概略図を図1に示す。ベースとステージは6本のリンクの両端の3自由度の球面ジョイントで接続されている。各リンクにはアクチュエータが内蔵されていて、これらを独立に伸縮させる事でステージの位置、姿勢の6自由度を制御する。

3. 校正方法

6自由度パラレルメカニズムに測長スケールを内蔵した1本の冗長受動リンクを付け加え(図2)、ステージを測定空間内に移動した際に得られるリンク変位誤差を用いてキャリブレーションをおこなう。

3-1. リンク変位誤差

ステージをある任意の位置姿勢にした時、6つの能動リンクと1つの受動リンクより7つのリンク変位 dL を測定で得ることが出来る。これら7つのリンク変位の中の6つのリンク変位から順運動学でステージ位置姿勢を求める。その位置姿勢から逆運動学を用いて残りの1つのリンクの変位 dL' を求める。同様に6つのリンクを変えて計算を繰り返すことにより7つのリンク変位 dL' を得る。ここで運動学で用いた機構パラメータに誤差がある場合 $dL \neq dL'$ となる。この時の dL と dL' の差をリンク変位誤差 ΔL とする。

このリンク変位誤差が最小になるように機構パラメータを推定する。

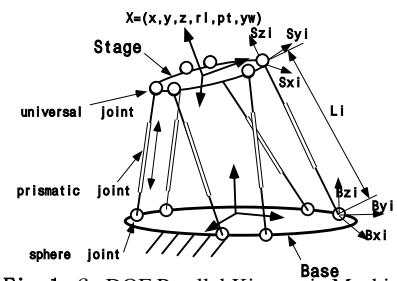


Fig. 1 6 DOF Parallel Kinematic Machine

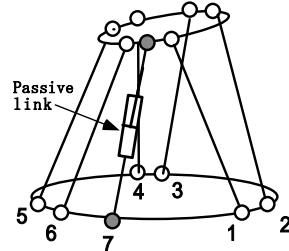


Fig. 2 Redundant Passive Link

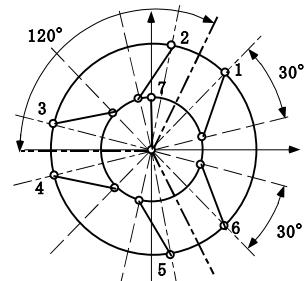


Fig. 3 Link configuration

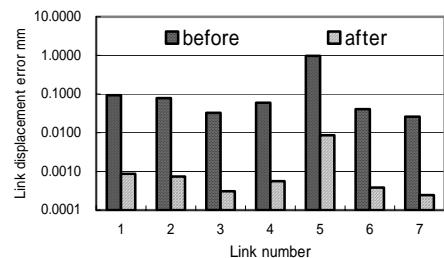


Fig. 4 Links displacement error

3-2. 計算方法

機構パラメータの誤差 ΔP を、リンク変位誤差 ΔL 、ヤコビ行列を J とすると式(1)のような関係になる。

$$\Delta L = J \cdot \Delta P \quad (1)$$

このとき機構パラメータ修正量 ΔP は最小二乗法より式(2)で表される。

$$\Delta P = (J^T \cdot J)^{-1} J^T \cdot \Delta L \quad (2)$$

式(2)で求めた機構パラメータ修正量を現在のパラメータに加える事でパラメータを更新する。

$$P_{new} = P_{old} + \Delta P \quad (3)$$

繰り返し計算は修正量 ΔP が一定に収束するまで行いヤコビ行列は更新されたパラメータで計算し直す。

4. シミュレーション

ベースには7つのジョイントがあり、それらの位置はそれぞれ3個(x, y, z)で表され、全体として21個が必要となる。このうちの6個のパラメータはベース自体の位置、姿勢を表現するために冗長になるので除いて全部で15個のパラメータを推定することとした。ステージも同様に15個のパラメータがある。7つのリンクにはそれぞれ初期長さがあるのでパラメータとする。機構パラメータは全部で37個となる。これら37個のパラメータのキャリブレーションを行った。そのときのリンク配置は図3のようになる。ステージの移動点は10点で7点を校正に使った。繰り返し計算は100回行った。機構パラメータに与えた誤差は最大±0.5mmでランダムに与えた。計算後のリンク変位誤差を図4にステージの位置誤差と姿勢誤差の平均値を図5および図6に示す。リンク変位誤差はキャリブレーションを行うことによって10μm以下までにすることが出来た。しかし、ステージZ方向の位置誤差のみがキャリブレーション前に比べて増加した。

5. リンク配置と条件数

次にキャリブレーションに最適なリンク配置を求めるため解の精度に影響を及ぼす条件数³⁾を求めるキャリブレーション結果との関係を調べた。条件数はキャリブレーションに使った式(2)の

$$C = \text{cond} (J^T \cdot J)^{-1} J^T \quad (4)$$

を調べた。

リンク1～6の配置は図3と同様でリンク7の接続位置をベースの中心にし、図7のようにステージ円周上に5度おきに移動させて条件数を求めた。

条件数とキャリブレーション結果の関係を図8に示す。図8より、60度、180度、300度の時、条件数が極大になっていることがわかる。この時、ヤコビ行列の行列式が0となり、解を得ることが出来なかった。

7. 結 言

6自由度パラレルメカニズムのキャリブレーションのために冗長受動リンクを用いた方法を提案した。その結果リンク変位誤差を減らすことが出来た。しかし、ステージのすべての位置姿勢座標誤差を改善することは出来なかった。条件数とキャリブレーション結果との関係性を調べ、条件数が大きいところでは最小二乗法の計算が困難になることがわかった。

今後はリンク変位誤差だけではなくステージ位置座標誤差を減らすよう方法の改善を行う。

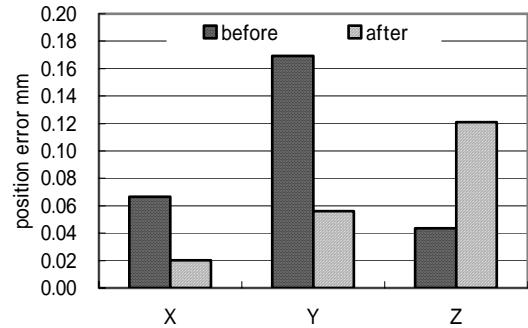


Fig.5 Stage position error

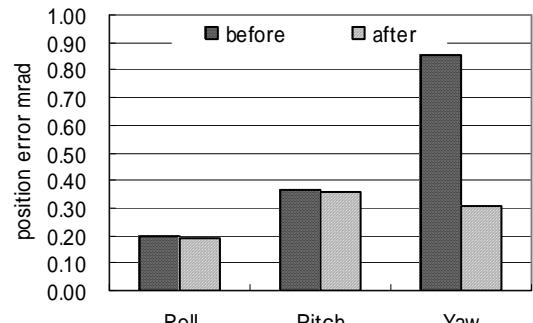


Fig.6 Stage orientation error

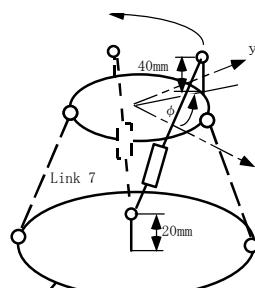


Fig.7 Link configuration

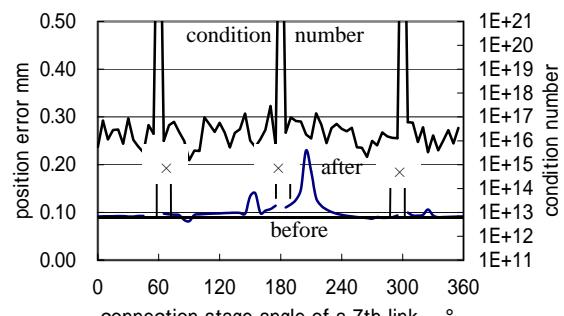


Fig.8 relationship between position error and condition number

参考文献

- 近藤 宏之 他1名:6自由度パラレルメカニズムの校正に関する研究, 2003年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2003) 506頁
- 吉田 理 他2名:6自由度パラレルメカニズムの校正に関する研究, 日本機械学会 2002年度年次大会講演論文集(V), (2002) 45-46頁
- G.ストラング,山口昌哉監訳,井上昭訳:線形代数とその応用,産業図書(1978)307-315頁
- 広瀬 茂男:ロボット工学(改訂版), 裳華房 (1996)138-143頁
- 川崎 晴久:ロボット工学の基礎, 森北出版 (1991)105,106頁