

# パラレルメカニズム型マイクロCMMの研究 (第2報)

## (対偶部の誤差補正装置)

### Coordinate Measuring Machine using Parallel kinematics for Micro Parts (2nd report)

(Compensation System of Joint Error and Thermal Expansion)

正 大岩 孝彰 (静大工) 高橋 良介 (静大工)  
光井 健二 (静大工)

Takaaki OIWA, Shizuoka University, Johoku3-5-1, Hamamatsu, Shizuoka 432-8561  
Ryosuke TAKAHASHI and Kenji MITSUI, Shizuoka University

This paper describes a compensation device for joint motion errors, elastic displacements of the joints and links, and thermal deformations of the links. This device employs two rods connecting with the joints and a scale unit. The scale unit can measure the variation of the distance between the joints independently of the external load because the rods aren't subjected to the load. Moreover, temperature fluctuation has little effect on measured variation because the rods are made of Super Invar. This device is built in the experimental active prismatic joint of a coordinate measuring machine for micro parts. Experiments show that the device improves the stiffness and decreases the thermal expansion of the link.

**Key Words** : parallel mechanism, error compensation, joint error, thermal expansion, machine tool, coordinate measuring machine

## 1. 緒 言

近年、マイクロマシン技術に代表される微細加工技術や三次元造形加工法の発達により、立体的で複雑な形状を持つ高精度な微小パーツの成形が現実となりつつある。しかし、これらのパーツは三次元的にその精度評価を行う必要がある。従来このような寸法精度や幾何偏差の測定には直交座標軸を持つ三次元座標測定機 (CMM) が用いられてきたが、サブミクロンからナノメートルオーダの測定にはまったく適していない。そこで、従来の直交座標型 CMM を小型化して高分解能化と高精度化を目指した CMM の研究が各所で開始されている<sup>(1)(2)</sup>。

筆者らは、直交座標型メカニズムではなく、空間3自由度パラレルメカニズムを用いた CMM を提案してきた<sup>(3)</sup>。本研究ではこのパラレルメカニズムを用いた小型 CMM (図1)を開発する。前報<sup>(4)</sup>では、研究の目標と機構の概要について述べ、さらにリンク配置について検討した。本報では、ジョイント部の変形やリンクの熱的膨張を補正するための機構を組み込んだ直動リンクの原理と試作したリンクの性能について報告する。

## 2. 運動誤差の発生要因

パラレルメカニズムには、現実的な問題として以下のような位置決め誤差の発生要因が存在する。

- (1) 機構の駆動に伴うジョイントの運動誤差
- (2) 重心移動に伴って発生するリンクに掛かる力の変動に起因する、リンクおよび対偶部の弾性変形
- (3) 同上の力あるいは外乱などに起因する、メカニズムを支持するフレーム部の弾性変形
- (4) 室温変動に伴うリンク部の熱的変形
- (5) 室温変動に伴うフレーム部の熱的変形

既報<sup>(5)</sup>において前述の(1)~(5)までの要因によるすべての誤差をインプロセスで計測し、総合的に補償するシステムについての原理について報告した。本報では上記のメカニズムに関する項目すなわち(1)(2)および(4)に起因する誤差を補正する機構を直動リンクに組み込んだ。

## 3. 変形補償機構の原理

補正機構の原理図を図2に示す。図では両端が球面ジョイントの場合について描いてある。このような両端に球面

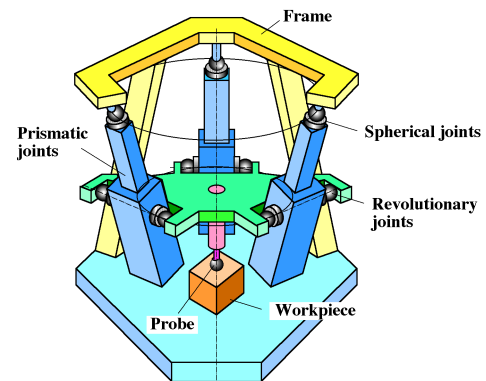


Fig. 1 Proposed CMM based on 3 DOF parallel kinematics

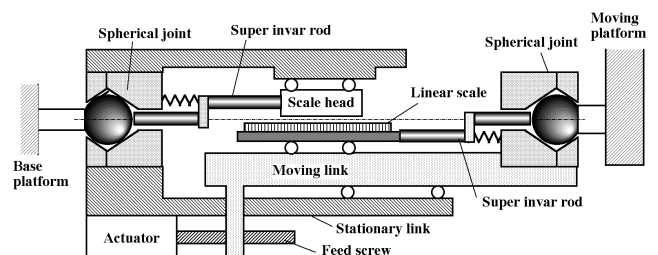


Fig. 2 Compensation device using Super-Invar rods connecting with reference balls and scale unit

あるいは回転ジョイントを配置した連結連鎖では、球面ジョイント間の距離の変化が直動ジョイントに内蔵したリニアスケールにより正確に測定されることが重要である。そこで、球面ジョイント内の高精度な球面部品 (ボール) にロッドを一定の力で接触させ、スケールユニットと連結した。これによりボール間の距離の変動はスケールとスケールヘッドの相対変位と一致する。この方法ではリンクに働く外力はロッドに伝わらないため、球面ジョイントが揺動した際の回転誤差だけでなく、外力が作用したときに発生する球面ジョイントの弾性変形もスケールユニットによって測定することが可能となる。出力節の運動誤差に影響を与えるのは能動直動ジョイント方向のみである<sup>(6)(7)</sup>から、この方向のみの誤差だけ考慮した。さらに、上記ロッ

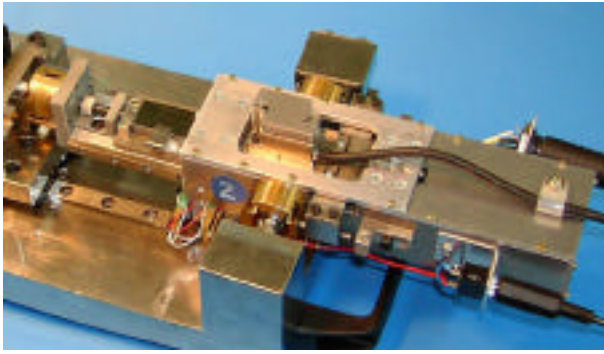


Fig.3 Active link consisting of prismatic joint with compensation device, which is mounted on test bed

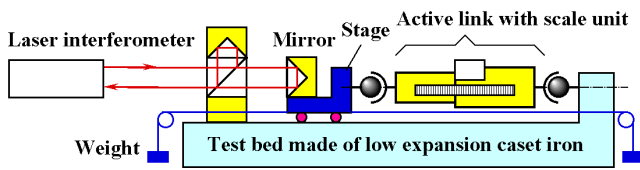


Fig.4 Experimental setup for active link subjected to external load

ドは低膨張材料（スーパーインバー，線膨張係数：0.3～0.5 ppm/K）で製作したので，室温変動にほぼ無関係に，ボール間の距離変動は正確にスケールユニットに伝えられることになる．したがってリンク全体を低膨張材で製作する必要はない．

#### 4. 実験装置

実際に製作した直動リンクを図3に示す．片側は2個の球面ジョイントを用いた回転ジョイントとしてある．直動リンクの伸縮のためのアクチュエータは，積層型圧電素子を3個使用したインチワーム機構を採用し，伸縮量はリニアスケール（ハイデンハイン LIP-401 R，ストローク：100 mm，精度 $\pm 0.1 \mu\text{m}$ ）により分解能約 2 nm（ $2 \mu\text{m} / 1024$ ）で測定される．リンクの構造材料は主にアルミを用いた．

図4は，製作した直動リンクの性能を評価するためのテストベッドである．直動リンクにより位置決めされるステージの変位はレーザ干渉測長器（レニショー，ML10）にて測定した．ステージおよびベッドは低熱膨張材（日本鋳造，線膨張係数約 0.5 ppm/K）にて製作した．

#### 5. 実験結果

まずリンクの剛性が最も低い状態，すなわち直動ジョイントを最も伸ばした状態（ジョイント間距離 130 mm）にてインチワームをロックし，リンクに引張および圧縮荷重を掛けた場合のステージの変位と内蔵スケールユニットの変位差を図5に示す．補正装置の動作を止めた場合は荷重に比例して差が増大し，500 gf 荷重時で 4.2～6.8  $\mu\text{m}$  に達するが，補正装置を働かせると変位差は減少し，引張時に 0.247  $\mu\text{m}$ ，圧縮時で 0.33  $\mu\text{m}$  となった．これはジョイントやリンクの弾性変形をスケールユニットで測られていることを示しており，リンク剛性が 0.72 N/ $\mu\text{m}$  から 14.8 N/ $\mu\text{m}$  に向上（約 21 倍）したと等価である．

つぎに空調機を操作して室温を変動させ，リンクの温度を  $+2^\circ$  強上下させた．図6は補正を行わなかった場合であるが，スケールユニットの読みとステージの変位の間には最大 1.59  $\mu\text{m}$  の差が観察された．図7は補正装置を動作させた場合であるが，図6の場合と比較して温度勾配は約 2 倍となっているにもかかわらず，両者の変位の差は 0.31  $\mu\text{m}$  しかなかった．これはリンク全体の線膨張係数が 12.2 ppm/K

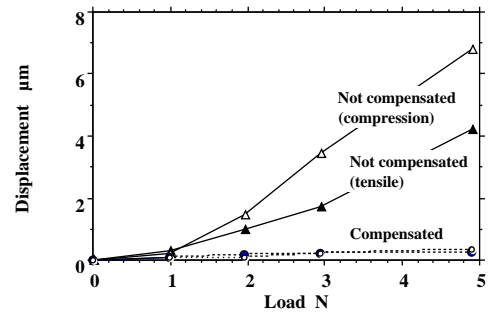


Fig.5 Differences of measured displacements between scale unit and laser interferometer

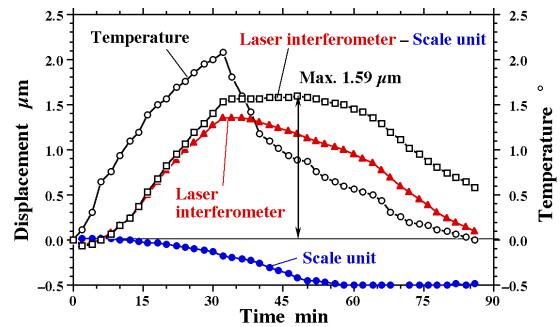


Fig.6 Measured displacements of scale unit and laser interferometer without compensation device

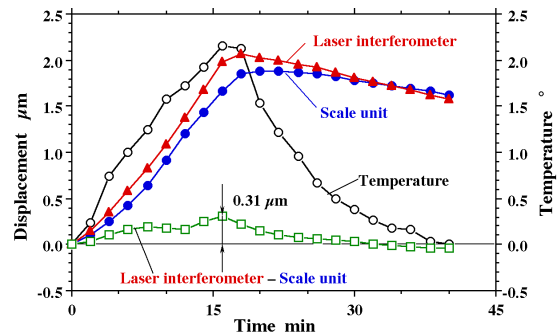


Fig.7 Measured displacements of scale unit and laser interferometer with compensation device

K から 2.38 ppm/K (19.5%) へ約 1/5 となったことと等価である．リンクの熱伸縮を 0.1  $\mu\text{m}$  以下に押さえるためには，機械温度の変動を  $0.71^\circ\text{C}$  以下に制御すればよい．

#### 6. 結 言

パラレルメカニズム型小型 CMM のために，ジョイント誤差とリンクの熱膨張を補正する機構を組み込んだ能動直動リンクを製作し，その剛性および熱伸縮について評価した．その結果，外力を作用させたときおよび温度が変動した際の補正効果が確認できた．

本研究の一部は科研費補助金 H12～13 年度基盤研究(B)および H13 年度基盤研究(C)，マイクロマシンセンター助成金にて行われた．以上記して謝意を表する．

#### 参 考 文 献

- (1) 小澤ら，1995年度精密工学会春季大会講演論文集，1043．
- (2) 若林ら，1997年度精密工学会春季大会講演論文集，785．
- (3) 例えば，T. OIWA, Int. J. JSPE, Vol. 31, No. 3 (1997) 232．
- (4) 大岩，山本：2000年度精密工学会春季大会講演論文集，470．
- (5) 大岩：日本機械学会第2回機素潤滑設計部門講演論文集，(2002) 131．
- (6) 大岩，山口：精密工学会誌，66，9 (2000) 1378．
- (7) 大岩，玉木：2000年度精密工学会秋季大会講演論文集，(2000) 247．