パレレルメカニズムの3次元座標測定機への応用

Application of Parallel Kinematics Mechanisms to Coordinate Measuring Machine / Takaaki OIWA

静岡大学 大岩 孝彰

1. は じ め に

パレレルメカニズムは、その運動の自由度の多さ、および高速性を利用して、古くはフライトシミュレータやアミューズメント機器などへ利用され、90年代ぐらいからは高速ロボットあるいは高速切削加工機などへの応用が進んできた。本稿では、精密な機械への応用例として、三次元座標測定機 (Coordinate Measuring Machine, 以下 CMM) に応用した事例について紹介する。パレレルメカニズムを用いた CMM という、単に直角座標型メカニズムをパレレルメカニズムで置き換えただけと思われがちであるが、実際には測定精度を向上させるために種々の新機軸を導入しており、これらの取組みについても触れたい。

2. 研究の背景

現在、一般に普及している CMM は、図 1 に示すような直角座標型メカニズムを用いている¹⁾。この CMM では、被測定物を検知する測定プローブとその相対変位を計測する 3 軸の測定系および相対運動を可能とするメカニズムから成っている。従来は、各軸ごとに運動精度や測定精度を高め、各軸間の直角度などを物理的に調整して空間的な測定精度を向上させてきた。しかし、アップの原理 (後述) を満たしていないために機構の運動誤差の影響を受けやすく、機械的な精度向上が難しくなってきたため、現在ではソフトウェア的に誤差を補正している。しかし、総合的な精度はマイクロメートルオーダーにとどまっていた、近年の機械加工精度の向上と比較して十分な精度とはいえず、次世代システムへの期待が高まっている²⁾。

図1 直角座標型メカニズムを用いた一般的な CMM の原理図

他の 3 次元座標測定方法として、レーザスキャナあるいはレーザ干渉計などを用いる光学的方法^{3)~5)}、超音波を用いる方法⁶⁾などが研究されている。これらの方法ではメカニズムの可動部の負担が少なく高速度な計測が可能であるが、空気の流れ、温度、気圧変化などの影響を受けやすい。つまり光は真空中では一定の速度でまっすぐ進むが、大気中ではそうではない。また音も均質な媒体中では一定の速度で伝搬するが、空気中では変化する。よって長い距離を高精度に測ることは困難である

3. パレレルメカニズムを用いた精密機械の利点

3.1 運動誤差

ここでは直角座標型とパレレルメカニズムの運動誤差の伝搬のようすを比較してみたい。まず 1 自由度の直線運動機構では図 2 に示すように、空間内を運動する際に進行方向 (x 方向) への位置決め誤差 δx 、進行方向に直角な 2 方向への運動の真直度誤差 (並進誤差) δy および δz 、直交する 3 軸回りの姿勢誤差 (x 軸回りのローリング $\delta \alpha$ 、y 軸回りのピッチング $\delta \beta$ 、および z 軸回りのヨーイング $\delta \gamma$) が発生する。運動体の原点 O とエンドエフェクタ P 点の間に図中のベクトル $P=[x, y, z]^T$ のようなオフセットが存在すると、以上の姿勢誤差とオフセットの積で表される各方向への並進誤差 ϵ_x , ϵ_y , および ϵ_z が発生する。つまり、

$$\begin{aligned}\epsilon_x &\approx \delta x + y \cdot \delta \gamma + z \cdot \delta \beta \\ \epsilon_y &\approx \delta y + z \cdot \delta \alpha + x \cdot \delta \gamma \\ \epsilon_z &\approx \delta z + x \cdot \delta \beta + y \cdot \delta \alpha\end{aligned}$$

となる。直角座標型機構では以上の運動機構が 3 組積み重ねられているから、エンドエフェクタの運動誤差は上述

図2 直線運動機構の 6 方向の運動誤差

図3 パラレルメカニズムの1本の連結連鎖内の対偶の運動誤差のものが3段累積される。つまり、各々の運動軸の並進誤差が累積し、さらに姿勢誤差がオフセットにより拡大されてエンドエフェクタの位置誤差として現れる。また3段積み重ねられることにより各運動軸とエンドエフェクタ間のオフセットも増大する。以上のように誤差の発生因子は膨大な数となり、精度向上すなわち誤差を小さくするためには、各軸の位置決め誤差を減ずるだけではなく、姿勢誤差かオフセットの片方でできれば両方を小さくしなくてはならない。

以上に対して、一般的なヘキサポッド（六脚の意）機構と呼ばれる伸縮型の6自由度パラレルメカニズムの1組の連結連鎖の運動誤差を図3に示す。まず、各プラットフォーム上の球面ジョイントの運動誤差を連結連鎖の長さ方向成分 δl_{Si} および δl_{Bi} とそれに直角な2方向成分 $\delta t_{Si}, \delta t_{Bi}, \delta n_{Si}$ および δn_{Bi} へ分解して表す ($i=1 \sim 6$)。また直動ジョイントの位置決め誤差 δx_i を連結連鎖の長さ方向の誤差とし、その他の5方向の運動誤差を図2と同様に表すことにする。まず、球面ジョイントの連結連鎖の長さ方向の誤差成分 δl_{Si} および δl_{Bi} は、連結連鎖の長さ変化と等価であるから、エンドエフェクタの位置誤差を引き起こす。しかし、連結連鎖の長さ方向に直角な2方向の誤差はそれが微小であれば連結連鎖の長さはほとんど変化しない（正確にはコサイン誤差つまり二乗誤差となる）ので、エンドエフェクタの位置誤差とはならない⁷⁾。次に、連結連鎖内の直動ジョイントの位置決め誤差 δx_i は連結連鎖の長さ変化そのものであるからエンドエフェクタの位置誤差を引き起こす。しかし、それと直角2方向の誤差 δy_i および δz_i はやはりコサイン誤差となるため、連結連鎖の長さは変化しない。さらに直動ジョイントの姿勢誤差のうち、長さ方向の誤差となる可能性のある姿勢誤差ピッチ $\delta \beta_i$ とヨー $\delta \gamma_i$ については、直動ジョイントのオフセットを0とすれば長さ方向の誤差は発生せず、エンドエフェクタの位置誤差を引き起こさない。以上をまとめれば、6自由度伸縮型パラレルメカニズムの場合は連鎖方向の誤差成分のみがエンドエフェクタへ伝搬するだけで、他の方向の誤差成分は無視できる。このことは、後述（6章）のようにパラレルメカニズムの運動精度を向上させるために大変都合が良い。

3.2 アッペの原理

従来の直角座標型メカニズムでは、精密機械の基本原則であるアッペの原理⁸⁾を満たすことが非常に困難である

図4 3-SPR型3自由度空間パラレルメカニズム

ことが従来から指摘されている。アッペの原理とは「ある点の変位を測定する際、測定軸がその点の運動に対して平行であるだけではなく、その点が測定軸の延長線上になくしてはならない」というものである。例えば図1のCMMでは、プローブは z 軸の測定軸の延長線上にあるが、 x 軸および y 軸はそうではなくアッペの原理を満たしていない。これは前出の3軸のオフセットを同時に0とすることが非常に困難であることに起因している。前式より、これらのオフセットを0にできなければ、各姿勢誤差を減ずるか、各移動軸の姿勢誤差を計測して既知のオフセットを乗じて各方向の並進誤差を計算しエンドエフェクタの座標値の補正を行うことになる。しかし、各軸に発生する姿勢誤差は各々3方向あって、それらの誤差を測るためには膨大な数の微小角度計測センサが必要となる。

これに対して、ヘキサポッド機構では6本の連結連鎖によりエンドエフェクタの位置・姿勢の6自由度運動が制御されている。よってエンドエフェクタがムービングプラットフォームのどこにあっても、エンドエフェクタの位置は計測され、また駆動できる（ただし、各ジョイントに前述の連結連鎖方向の誤差がないものとして）。従って、ヘキサポッド機構では、エンドエフェクタを各測定軸の延長線上に置かねばならないなどの機構設計上の制約がない⁷⁾。ただし、図4のような3-SPR型3自由度空間パラレルメカニズムなどでは測定軸が3組しかないため、エンドエフェクタの位置と姿勢の6自由度運動を独立して計測することができず、エンドエフェクタを計測軸の延長線に置く必要がある⁹⁾。この場合のエンドエフェクタの並進誤差は、図中の測定軸・エンドエフェクタ間のオフセット d とエンドエフェクタの姿勢誤差の積に比例する。これは図1の1自由度機構や直角座標型メカニズムのアッペ誤差と同じである。

4. 3自由度パラレルメカニズムを用いたCMM

筆者の研究室では、パラレルメカニズムが持つ高精度な機構としての資質に着目し、これを用いたCMMの開発を行ってきた^{10) 11)}。一例として3自由度空間パラレルメカニズム（図4）を用いた試作機¹²⁾の写真を図5に示す。3

図10 駆動系と計測系のブロック線図

図10は駆動系と主な計測系のブロック線図である。3台のACサーボモータドライバへのパルスの送出はパーソナルコンピュータにて行った。位置決め制御にはサーボモータ内蔵のロータリエンコーダを用いており、セミクローズドループとなっている。一般にCMMでは厳密な位置決め精度は必要なく、このためリニアスケールはフィードバックには用いていない。パーソナルコンピュータはムービングプラットフォーム下側に取付けられたタッチトリガープローブ（レニショー製、TP-200、繰返し精度 $2\sigma \leq 0.18\mu\text{m}$ ）が被測定物に接触した瞬間に、3台の32ビットカウンタの値を保持・読み込みを行い、順運動学の非線形連立方程式を解くことにより、タッチプローブ先端のxyz座標を計算する。本機ではxyz方向の測定分解能がスケールの分解能と同等でかつ等方的になるようにリンク配置設計をしている¹³⁾ため、測定分解能も約50nm程度となっている。さらに通常のCMMと同様に、測定機座標系に対して回転角および並進変位を持って設置された被測定物に対しても測定が可能なように、ワーク座標系を設定するアライメント作業用プログラムを作成した。

5. メカニズムのキャリブレーション

直角座標型機構の組立て・調整時には、作業空間におけるエンドエフェクタの位置・姿勢精度を保証するために、各移動軸の位置決め精度や運動精度をチェックし、さらに各軸間の直角度を物理的に調整する。これに対してパラレルメカニズムの場合では、各能動ジョイントの位置決め精度のチェック以外に、受動的なジョイントの位置・姿勢や能動ジョイントの初期変位や角度、工具やプローブの長さなどの機構パラメータを正確に求める必要がある。この機構パラメータは、能動ジョイントの変位・回転角からエンドエフェクタの位置・姿勢を求めるための順運動学やその逆の計算を行う逆運動学などのプログラム内の多くの定数のことであり、実機の値と異なっていればエンドエフェクタの計算値と実際の座標位置が一致しないことになる。このような誤差は繰返し性のある系統的誤差となる。

この機構パラメータを正確に求めることがパラレルメカニズムの主な校正となるが、幾つかの方法が提案されており、1) 他のCMMなどでジョイントの位置や節の大きさ等の機構パラメータを直接計測する方法、2) エンドエフェクタの位置・姿勢誤差を求め、目標値との差がなくなるまで機構パラメータを修正する方法、3) 長さや角度を測るセンサを受動的なジョイントに取り付け、冗長性を利用

図11 パラレルメカニズム型CMMの機構パラメータと追加した受動ジョイント

して機構パラメータを求める方法¹⁴⁾などがある。2) における位置・姿勢誤差を求める方法として、3Dレーザ座標測定器¹⁵⁾、オートコリメータ¹⁶⁾、ダブルボールバー¹⁷⁾¹⁸⁾などの外部測定器を用いる方法や、寸法や形状が既知であるブロックゲージや3Dボールプレートなどのアーティファクトをタッチプローブなどで計測して位置・姿勢誤差を得る方法などがある。3)の方法は校正に必要な測定器を機械に組み込むためセルフキャリブレーションと呼ばれる。2)と3)の方法の多くは、ロボット用のキャリブレーションと同様に、測定した誤差が小さくなるように最小二乗法などを用いて機構パラメータを推定し機械の精度を向上させる。つまり直角座標型機構のように物理的（ハードウェア的）に機械を調整するのではなく、ソフトウェア的に機械の精度向上を行うことが従来の機械の校正と異なる点である。

筆者の研究室でも今までに3Dボールプレート¹⁹⁾やダブルボールバー²⁰⁾などを用いた校正方法を検討してきたが、現在は図11のように、高精度な測長器を内蔵した受動的な直動ジョイントを含む連結連鎖をパラレルメカニズムに追加し、エンドエフェクタを測定空間内に移動した際に取得した長さ誤差を用いてメカニズム自体の機構パラメータを推定する²¹⁾という3)の方法を検討している。

6. ジョイント・リンクの誤差補正装置²²⁾

繰返し性のある誤差については機構パラメータの校正により誤差を改善できることを前章で述べたが、機構には再現性のない誤差も発生する。例えば、ジョイントの遊び、回転誤差、外力によるジョイントとリンクの弾性変形あるいは室温変動によるリンクの熱膨張などである。3章にてパラレルメカニズムでは連結連鎖方向の誤差がエンドエフェクタの位置誤差に大きく影響することを述べた。よって、この方向の誤差を除去、あるいは計測・補正すればよい。まず両端部の球面ジョイントと回転ジョイントの誤差に対しては、図8および図9のように変位センサ（Mahr社電気マイクロメータ Millitron）を設置し、ジョイントの精度基準である鋼球の連結連鎖方向の振れを測っている。これにより両端部のジョイント間の距離の変化はリニアスケール

図12 ジョイントおよびリンクの誤差の補正装置

図13 定盤からみたフレームの変形を6自由度パラレルメカニズムで測定する装置

ル読取値にこれらの変位計の測定値を加えたものとなる。さらに、室温変動により固定側および移動側のアルミ製リンクには熱的な変形が発生するが、リンクのたわみや軸周りのねじれが連結連鎖の長さに及ぼす影響は軽微である。したがって、熱変形も連結連鎖方向の変形のみを取扱えばよい。そこで図6中に示すように、球面ジョイントとリニアスケールヘッドの間、および回転ジョイントとリニアスケールの間を低熱膨張材であるスーパーインバー（線膨張係数約 $0.5 \times 10^{-6}/K$ ）製のロッドで連結した。スケールヘッドとスケールはそれぞれ長さ方向に微動できるように弾性ヒンジを用いた4節平行リンク機構で支持してある。以上のようにすれば、両端のジョイント間の距離の変化は温度変化の影響を受けずにリニアスケールユニットで計測できる。また、リンクには変動する引張荷重が働き微小な変形も予想されるが、前述のロッドにはこれらの外力は作用せず長さが変化しないので、リンクの弾性変形も併せてスケールユニットで計測できる。

連結連鎖の長さが比較的短い場合は、両端のジョイントの誤差を測定する変位センサのかわりに、図12のようにロッド先端をジョイント内の鋼球に押当ててもよい。これにより内蔵のリニアスケールユニットでジョイントの誤差も併せて計測できる。筆者の研究室で本機以後試作したパラレルメカニズムはすべてこの方式を採用しているが、実験の結果リンクの力学的・熱的変形の補正に大きな効果があることが確認された²³⁾。例えば、連結連鎖方向の等価剛性が $3.7N/\mu m$ から $15N/\mu m$ へ、等価熱膨張係数が $15.4 \times 10^{-6}/K$ から $0.66 \times 10^{-6}/K$ へ改善した。これは連結連鎖全体をスーパーインバーで製作した場合とほぼ等しい。

図14 ワークとツール間の6自由度相対運動を受動型ヘキサポッドで計測・補正する超精密機械システムの概念図

7. フレームの変形補正システム²²⁾

パラレルメカニズム自体の精度を向上させても、それを支えるフレーム部分にも変形が発生し、機械の精度を低下させてしまう。大部分は熱的な変形であるが、従来の工作機械やCMMでは熱変形解析を行い、複数の温度センサを用いて熱変形予測・補正を行ってきた。しかし有限個のセンサで測った部分的な温度情報では急激な室温変動による変形は正確に予測できない。そこで本機では、フレームの変形はパラレルメカニズムのベースプラットフォームの大きさ・位置・姿勢の変化である、という点に着目し、フレームの構造や材質などに関係なく、被測定物を搭載する定盤から見たパラレルメカニズムのベースプラットフォームの大きさ、位置および姿勢を直接インプロセス計測し補正することにした。計測システムの概要を図13に示す。まずベースプラットフォームの大きさの変動、つまり3つの球面ジョイントからなる三角形の大きさの変化を測るために、3組のスーパーインバー製ロッドと変位センサを設置した。さらに、ベースの位置・姿勢の6自由度運動を計測するために、定盤と3つの球面ジョイント間に6組のスーパーインバー製ロッドと変位計を設置した。ベースの位置と姿勢は、一般的な6自由度のヘキサポッド機構の順運動学式より求められる。以上のフレームの変形量の情報を用いて、3自由度パラレルメカニズムで得られた測定座標値を補正する。6章の補正装置と併せた実験の結果、特にフレームの熱膨張の大きいz方向の測定値が著しく改善した。例えば、機械の温度変化が 1.4° 程度でアルミ製フレームが数十 μm も熱変形している場合でも、測定座標値の変動は $2 \mu m$ 以内という結果が得られた²⁴⁾。

8. 超精密機械システムへの応用^{25) 26)}

本章では前章の補正システムをさらに拡張した機械システムを紹介する。多くの機械ではツールとワークの間の6自由度相対運動の運動精度が重要である。しかし様々な要因により機械構造物が変形し、ツール・ワーク間の相対位置・姿勢は正確に保たれない。そこで、図14のように定盤上にヘキサポッド機構のベースプラットフォームを、ツール主軸にムービングプラットフォームを設置し、定盤から見た主軸の6自由度相対運動を受動型ヘキサポッドで計測する。以上のリアルタイムで計測した6自由度相対運動

から6方向の運動誤差を算出し、既存の機械のアクチュエータを誤差が最小となるように制御する。要するに6自由度ヘキサポッドを6自由度運動を計測するフィードバックセンサとして用いる。この機械システムでは、機械の構造系と計測系をほぼ完全に分離できる（このような計測専用の構造物は計測フレーム²⁷⁾と呼ばれる）ため、機械の内外乱の影響を受けずに計測・補正ができる。また3.2節で述べたように、エンドエフェクタの6自由度運動（位置と姿勢）を測っているために、アッペのオフセットを小さくするようにエンドエフェクタを配置する必要がない。さらに、パラレルメカニズムの各連結連鎖に5章で述べた誤差補正装置を組み込めば、外力や室温変動の影響を受けずに6自由度相対運動が計測できる。このような機械システムでは、従来の機械のように極端な高剛性化による運動特性の低下や恒温環境に機械を設置する必要がないなどの特長を有する。

9. お わ り に

パラレルメカニズムを応用した精密機械の一例として3次元座標測定機を紹介しながら、直角座標型メカニズムとの違いや特長を述べた。また機構の系統的誤差を減ずるための校正方法について概説した。さらに、再現性のない力学的・熱的な誤差に対する補正システムについて述べ、最後にパラレルメカニズムを6自由度フィードバックセンサとして用いる超精密機械システムの構想についても紹介した。パラレルメカニズムの実用化のための研究は近年始まったばかりであり、従来の概念に捕らわれない精密機械への応用が期待される。このメカニズムに興味を持たれた若い研究者・技術者各位により、近い将来、素晴らしい機械が創製されることを確信している。

参 考 文 献

- 例えば、精密機械設計便覧，精機学会，(1989) 642.
- 精密工学会超精密位置決め専門委員会編，次世代精密位置決め技術，フジテクノシステム，(2000) 94.
- J. H. Gilby and G. A. Parker : Laser Tracking System to Measure Robot Arm Performance, Sensor Rev., Oct. (1982) 180.
- K. Lau, R. J. Hocken and W. C. Haight : Automatic Laser Tracking Interferometer System for Robot Metrology, Prec. Eng., **8**, 1, (1986) 3.
- 大岩孝彰，鈴木 稔，久曾神 煌：球面ミラーと線状レーザ光を用いた空間座標位置の測定，精密工学会誌，**59**, 2 (1993) 305.
- 例えば，H. Peremans, K. Audenaert and V. Campenhout : A High-resolution Sensor Based on Tri-aural Perception, IEEE Trans. Robotics Automat., **9**, 1, (1988) 36.
- 大岩孝彰，玉木雅人：6自由度パラレルメカニズムにおけるアッペの原理に関する研究（対偶の回転誤差が機構の運動誤差に及ぼす影響），機論C編，**69**, 678 (2003) 472.
- S.T.Smith and D.G.Chetwynd: Foundation of ultra precision mechanism design, Gordon and breach science publishers, 1992, 71.
- 大岩孝彰，山口浩希：パラレルメカニズムを用いた三次元座標測定機（第3報）アッペの原理，精密工学会誌，**66**, 9 (2000) 1378.
- Oiwa, T., New Coordinate Measuring Machine Featuring a Parallel Mechanism, Int. J. JSPE, **31**, 3 (1997) 232.
- 大岩孝彰：パラレルメカニズムを用いた三次元座標測定機—基本原理と運動学—，精密工学会誌，**64**, 12 (1998) 1791.
- 大岩孝彰，馬場周平：パラレルメカニズムを用いた三次元座標測定機（第4報）試作機の開発，精密工学会誌，**66**, 11 (2000) 1711.
- 大岩孝彰，久利直道，馬場周平：パラレルメカニズムを用いた三次元座標測定機（続報）リンク配置の検討と誤差解析，精密工学会誌，**65**, 2 (1999) 288.
- Hanqi Zhuang : Self-Calibration of Parallel Mechanisms with a Case Study on Stewart Platforms, IEEE Transactions on Robotics and Automation, **13**, 3 (1997) 387.
- 小関義彦，新井健生，杉本浩一，高辻利之，後藤充夫：レーザ3次元測定器を用いたパラレルメカニズムのキャリブレーション，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'97講演論文集，A (1997) 463.
- 太田浩充，渋谷哲朗，遠山退三：パラレルメカニズムのキャリブレーション方法の研究（第1報）—逆運動学による機構パラメータのキャリブレーション—，精密工学会誌，**66**, 6 (2000) 950.
- 太田浩充，渋谷哲朗，遠山退三，内山 勝：パラレルメカニズムのキャリブレーション方法の研究（第2報）—順運動学による機構パラメータのキャリブレーション—，精密工学会誌，**66**, 10 (2000) 1568.
- 武田行生，沈 崗，舟橋宏明：フーリエ級数を用いたパラレルメカニズムのキャリブレーション（第1報，キャリブレーション法および測定運動の選定法の提案），機論C編，**68**, 673 (2002) 2762.
- 大岩孝彰，京極正人，山口浩希：パラレルメカニズムを用いた三次元座標測定機（第5報）—立体的なボールプレートをを用いたキャリブレーション—，精密工学会誌，**68**, 1 (2002) 65.
- 大岩孝彰，片岡頼洋：パラレルメカニズムを用いた三次元座標測定機の校正に関する研究—ダブルボールバーとタッチプローブを用いたキャリブレーション—，精密工学会誌，**69**, 2 (2003) 222.
- 大岩孝彰，首藤圭一：パラレルメカニズムを用いた三次元座標測定機の校正に関する研究—冗長パッシブジョイントを用いたキャリブレーション—，精密工学会誌，**71**, 4 (2005) 5126.
- Oiwa, T: Accuracy Improvement of Parallel Kinematic Machine - Error Compensation System for Joints, Links and Machine Frame-, proc. 6th ICMT2002, (2002) 433.
- 大岩孝彰，加本哲也：パラレルメカニズム型マイクロCMMの研究（第3報）（対偶誤差補正装置の改良），日本機械学会第4回機素潤滑設計部門講演会，(2004) 165.
- 大岩孝彰，寺澤祐哉：パラレルメカニズムを用いた高速・高精度3次元座標計測システム（第16報）—リンクとフレーム変形の補正—，日本機械学会年次大会講演論文集，4 (2005) 261.
- 大岩孝彰：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，精密工学会秋季大会論文集，2004，869.
- Oiwa, T: Ultra-precise Machine with 6-DOF Perfect Relative Motion Between Tool and Workpiece, Int. Conf. Manuf. Machine Design and Tribology (ICMDT2005), (2005) DLM 305.
- Bryan, J. B. and Carter, L. D: Design of a new error-corrected coordinate measuring machine, Precision Engineering, **3** (3) : 125.