

パラレルメカニズム型工作機械の精度向上に関する研究

著者	太田 浩充
号	2741
発行年	2001
URL	http://hdl.handle.net/10097/8014

氏名	おおた ひろみち		
授与学位	太田 浩充 博士 (工学)		
学位授与年月日	平成 13 年 10 月 10 日		
学位授与の根拠法規	学位規則第 4 条第 1 項		
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 航空宇宙工学専攻		
学位論文題目	パラレルメカニズム型工作機械の精度向上に関する研究		
指導教官	東北大学教授 内山 勝		
論文審査委員	主査 東北大学教授 内山 勝	東北大学教授 小菅 一弘	
	東北大学教授 庄司 克雄	東北大学教授 江村 超	

論文内容要旨

第 1 章 序論

パラレルメカニズムは高速, 高精度, 高剛性という優れた特長を持ち, 近年その特長を生かした応用研究が多数報告されるようになってきた. 工作機械への応用では, 上記三つの特長を同時に実現する必要があるが, 精度については, 従来のマシニングセンタ等に比べ十分ではない. これは, パラレルメカニズムであるがゆえに顕著に現れる問題があることによる. その問題とは, 機構パラメータの誤差の位置決め誤差への影響, 重力による機構の弾性変形, 機構による誤差の拡大という三つである. 本論文では, 機構パラメータの誤差, 重力による機構の弾性変形と静的精度との関係を解析すると共に, これを解決するための機構パラメータのキャリブレーション方法, および重力補償方法を提供する. これらの方法においては, 精度, 取り扱いの容易さ等を考慮し工作機械としての実用に耐えうる水準のものを目指す. さらに, 重力等の外力によって各軸にかかる負荷が位置, 姿勢によらず一様に小さくなるような機構の最適化方法および機構内部に発生した誤差の工具先端での拡大率が位置, 姿勢によらず一様に小さくなるような機構の最適化方法について検討を加える.

第 2 章 逆運動学を用いた機構パラメータのキャリブレーション

パラレルメカニズムでは, 逆変換式中に含まれる機構パラメータの誤差により絶対位置決め精度が劣化する. この問題の解決には, 正しい機構パラメータの値を求め, 逆変換式中の値を修正する, 機構パラメータのキャリブレーションが必要である.

本章では, まず我々の開発したパラレルメカニズム型加工機 HexaM について機構のモデリングを行い, 姿勢変化を考慮しないモデル 36 および姿勢変化を考慮したモデル 54 を定義した. そして, 新たに逆運動学的に機構パラメータをキャリブレーションする方法を提案した. 本方法では, 機械に移動指令を与えたときの工具先端の座標を外部から測定し, 測定値が指令値と一致するように各アクチュエータ位置を調整する. このときの指令値と測定値に対応するアクチュエータ座標の差が最小になるように機構パラメータを同定する. 工具先端座標の測定では, 位置関係が正確に測定された基準ピンを配置した基準ジグをテーブル上に設置し, その基準ピンの位置に機械を移動させる. そして, トラベリングプレートに取り付けた三つのダイヤルゲージで基準ピンを測定することにより x, y, z 方向の位置を検出する. また, トラベリングプレートに取り付けた二つの精密水準器により, A, B 軸の回転角を, トラベリングプレートに取り付けたミラーとオートコリメータにより C 軸の回転角を検出する.

本方法の有効性をシミュレーションおよび実験によって確認した. 実験では, 実機をモデル 36 に想定して, キャ

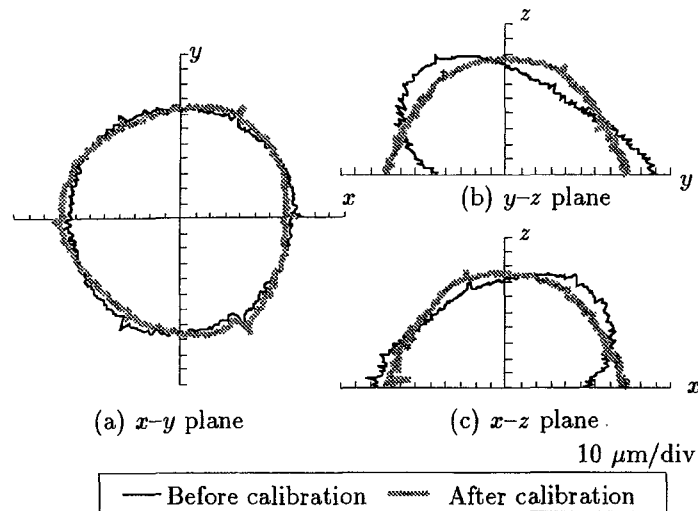


Fig. 1 Circularity of loci before and after calibration

リブレーションを行い、位置決誤差を $20\sim 30\ \mu\text{m}$ 程度まで、真円度については図 1 に示すように $20\ \mu\text{m}$ 程度まで改善できることを確認した。一方、測定の困難さから、モデル 54 における実際のキャリブレーションは実施しておらず、逆運動学を用いる方法の実用面での問題が明らかになった。

第 3 章 順運動学を用いた機構パラメータのキャリブレーション

パラレルメカニズムでは、順運動学を解析的に解くことは困難であるが、順運動学的に機構パラメータをキャリブレーションする場合、工具先端の座標を必ずしも全軸同時に知る必要はなく、測定の簡易化、姿勢変化させた状態での測定への対応を容易にすることができる。本章では、順運動学を用いた新しいキャリブレーション方法を提案する。本方法は、パラレルメカニズム型工作機械全般に使用可能な方法である。

本方法では、順運動学関係を表す順変換式から工具先端の位置誤差とパラメータの誤差の線形な関係を表す微分関係式を導き、同式の微分係数を差分に置き換えることによって数値計算可能な形に変換している。そして、変換した式に最小 2 乗法を適用してパラメータを同定する。工具先端座標の測定には、工作機械の運動精度測定に一般的に用いられる計測器 Double Ball Bar (DBB) を用いた。DBB は、テーブル上の固定点とトラベリングプレート上の可動点をバーで接続してそのバー長を測定するものであるが、ここでは十分な情報量を得るためにテーブル上の 3 点とトラベリングプレート上の 3 点をそれぞれ一箇所ずつバーで接続して測定する。シミュレーション、実験においてモデル 36、モデル 54 の二つのモデルに対してキャリブレーションを実施し、位置誤差、円軌跡の真円度を評価した。姿勢変化の無い状態では、両モデルとも同等の精度であったが、姿勢変化のある状態では、図 2 の円軌跡の真円度に見られるようにモデル 36 の精度劣化が顕著なのに対しモデル 54 の劣化が少なく、姿勢変化を伴う場合にはモデル 54 でのキャリブレーションが必要であることを示した。ただし、モデル 54 の場合においても姿勢が 15° 以上になると精度が劣化することから、モデルと実体とのずれが推測された。

第 4 章 重力による弾性変形を考慮した機構パラメータのキャリブレーション

前章の結果において、姿勢変化が大きくなると精度が低下するという現象があり、キャリブレーションモデルの実体からのずれを問題として示したが、パラレルメカニズムでは各軸の可動部の質量の分担割合が位置や姿勢に

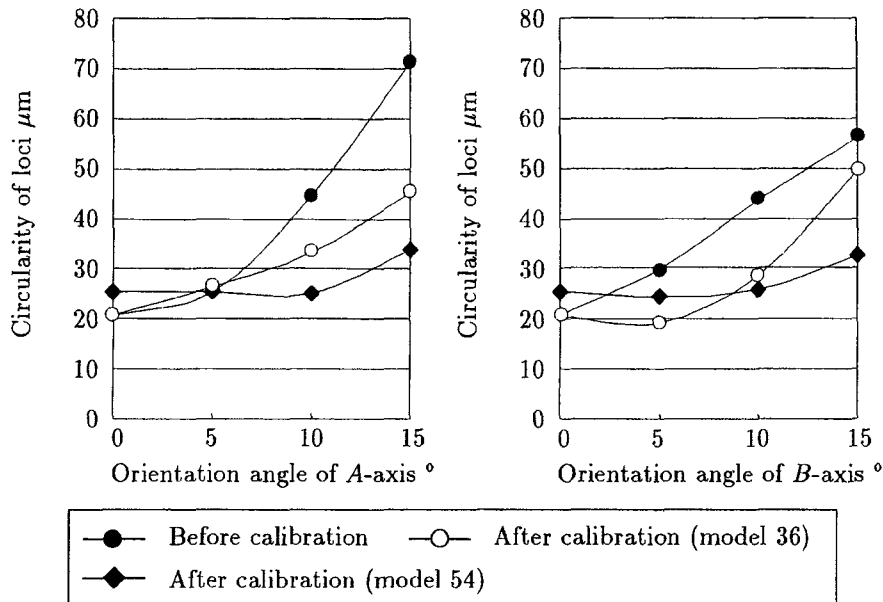


Fig. 2 Circularity on the x - y plane with traveling plate orientation

よって変化し、特に姿勢変化が大きい部分でそのバランスが大きいくずれることが予想されることから弾性変形との関連が大きいことが推測された。

本章では各リンクにかかる力の位置、姿勢による変化、その力の変化による弾性変形量の変化と工具先端の位置決め精度への影響度を力の釣り合いモデルから解析した。その結果、姿勢変化が大きくなるにつれ、特定のリンクにかかる力が大きくなり、それによる弾性変形の補償が必要になったことがわかった。補償方法として、弾性変形量の変化を機構パラメータの変化と考え、逆変換式の中で機構パラメータを動的に変化させる方法を提案した。また、弾性変形の影響を受けることなく正しい機構パラメータを同定するために、重力補償をかけて動作させたときの位置決め誤差から機構パラメータをキャリブレーションする方法を示した。効果の検証の結果、特に姿勢変化が大きい時の精度が向上し、図3のように z 方向の位置誤差については、約 $170\ \mu\text{m}$ の精度向上効果が見られた。また、円軌跡の真円度については、約 $15\ \mu\text{m}$ 、最小2乗円の半径については、約 $7\ \mu\text{m}$ の精度向上効果が見られた。

第5章 機構の最適化による静的精度の向上

前章の解析結果から、一つのリンクに非常に大きな力がかかる場合があることがわかった。この力が過大な場合には、重力補償の精度も低下する。さらに、ベアリング部にかかる大きな力は、ロストモーションという別の精度劣化要因をもたらす。このような現象を回避するためには、位置、姿勢によらず各リンクにかかる力が一様に小さいことが望ましい。また、もう一つの問題として、機構内部に生じた誤差の工具先端での拡大の問題がある。ロストモーション等のキャリブレーションや補正では対応できない誤差が機構内部に生じたとき、工具先端部分において拡大しないようにすることは重要な問題である。これらの問題の解決には、機構の最適化が必要である。

本章では、各軸にかかる負荷が位置、姿勢によって拡大される割合を表す負荷拡大比、および機構内部に生じた誤差が工具先端で拡大される割合を表す誤差拡大比を定義し、これらの値と機構パラメータとの関係を解析した。解析結果から、最適な機構パラメータによる最適機構案を検討し、それらが優れた特性を有することをシミュレーションで確認した。効果の検証のため、簡易的に機構を変更して負荷拡大比および誤差拡大比をシミュレーション

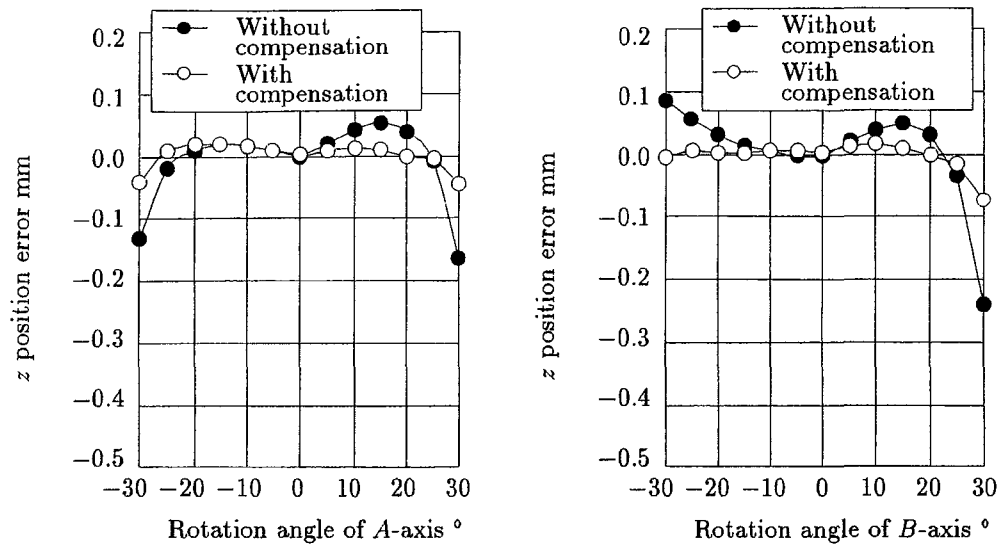


Fig. 3 Tool position error with and without gravity compensation

および実験で検証した結果，機構変更前に対して負荷拡大比が約 75%，誤差拡大比が約 70% に減少することを確認した。また，図 4 に示すように機構変更により同一軌跡の往復動作における軌跡誤差が 1/4 以下に減少したことから，精度向上の効果を実験的に確認できた。本方法は，機構本来が持つ精度上の特性の改善に有用である。

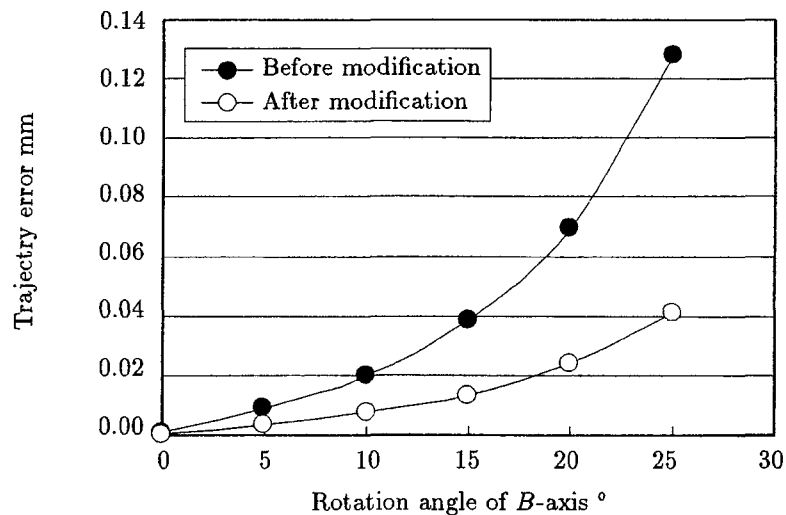


Fig. 4 Trajectory error by lost motion before and after modification

第 6 章 結 論

本論文では，パラレルメカニズムを工作機械に応用する場合の課題の一つである精度の問題として機構パラメータの誤差，重力による機構の弾性変形，および機構による誤差の拡大を取り上げ，それぞれの問題を解決する方法として，機構パラメータのキャリブレーション方法，重力補償方法，精度から見た機構の最適化方法を示した。そして，これらの方法により，精度を向上できることをパラレルメカニズム型加工機 HexaM を実例として示した。これらの方法は，対応する運動学やキャリブレーションモデル，弾性変形モデルを考慮すれば，他の機構にも適用可能であり，高精度が必要なパラレルメカニズム型工作機械の精度向上に有効な方法と考えられる。

審査結果の要旨

パラレルメカニズムは、高速、高剛性という特長を持ち、工作機械における高能率加工を達成する手段として期待されている。しかし、精度については、機構パラメータの誤差、機構の重力による弾性変形、および機構による誤差の拡大の影響により、従来のマシニングセンタ等に比べ劣っているのが現状である。本論文は、以上の問題を解決するために、機構パラメータのキャリブレーション、重力による弾性変形の補償、および機構の最適化の方法を提案するとともに、パラレルメカニズム型工作機械にこれを適用し、シミュレーションおよび実験によりその有効性を検証したもので、全編6章よりなる。

第1章は序論であり、本研究の背景および目的を述べている。

第2章では、キャリブレーションモデルについて述べたのち、逆運動学計算により機構パラメータをキャリブレーションする方法を提案している。姿勢変化が無い場合のモデルについて、キャリブレーション実験を行い、本方法の有効性を確認している。同時に、測定の手間、姿勢変化がある場合の測定の困難さという、本方法の問題点も明らかにしている。

第3章では、順運動学計算により機構パラメータをキャリブレーションする方法を提案し、シミュレーションおよび実験により、姿勢変化の無い場合、ある場合ともに、精度の改善効果があることを確認している。本方法は、測定の手間短縮が可能であり、パラレルメカニズム型工作機械全般において有用な技術である。

第4章では、重力による機構の弾性変形が位置決め精度へ及ぼす影響を解析するとともに、この補償方法ならびに、これを考慮したときの機構パラメータのキャリブレーション方法を提案し、シミュレーションおよび実験によりその効果を検証している。とくに、姿勢変化が大きいとき、精度向上の効果が顕著であることが確認されている。本方法は、第3章の方法と合わせ、パラレルメカニズム型工作機械の精度向上において、重要な技術である。

第5章では、負荷拡大比、誤差拡大比を定義し、これらの値と機構パラメータとの関係を解析することにより、精度の観点から最適な機構案を提案している。実験では、機構の変更により、負荷拡大比、誤差拡大比、および同一軌跡の往復動作における軌跡誤差の減少が確認され、機構の最適化の有効性が示されている。本方法は、機構が持つ精度上の特性を改善するうえで有用である。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、パラレルメカニズム型工作機械の精度上の問題に対し、総合的な立場より検討を加え、機構パラメータのキャリブレーション、重力補償、および機構の最適化の方法を提案し、その有効性をシミュレーションおよび実験によって確認したものであり、その成果はパラレルメカニズム型工作機械全般に適用可能であり、精密工学およびロボット工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。