

京都大学	博士 (工学)	氏名	松 下 哲 也
論文題目	多軸制御工作機械の機構パラメータのキャリブレーション法に関する研究		
(論文内容の要旨) 多軸制御工作機械では、工具－工作物間の相対運動の生成を送り機構の幾何モデルを用いた数値制御で実現しており、制御器内の機構パラメータの設定が運動誤差に与える影響が大きい。このため、機構パラメータのキャリブレーションは運動精度を向上する上で重要な課題である。本論文は、多軸制御工作機械の運動精度を向上するために、実加工に近い運動で測定した運動誤差に基づいて機構パラメータのキャリブレーションを行う手法を提案し、シミュレーションと実験によって提案手法の有効性を検証した結果をまとめたものであって、6章からなっている。 第1章は緒論であり、多軸制御工作機械の普及の背景およびシリアルメカニズムおよびパラレルメカニズム多軸制御工作機械に関する研究動向について概観しながら機構パラメータのキャリブレーションの重要性について述べている。また、測定が容易な動作での運動誤差に基づいて機構パラメータを同定する方法についての問題点を指摘し、実加工動作での運動誤差をDBB（ダブルボールバー）で測定し、得られた運動誤差軌跡からキャリブレーションに影響する機構変形誤差などの他要因の誤差を取り除いた上で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。実加工動作には最も普及している航空機部品加工評価規格NAS（National Aerospace Standard）979のテーパコーン（円錐台）加工の動作を用いることを述べている。 第2章では、テーブル旋回形5軸シリアル機によるテーパコーン加工において、工作物の配置（位置および姿勢）と各送り軸動作の関係を分析している。工作機械の形状創成理論に基づいて幾何誤差モデルを導出して運動誤差シミュレータを開発し、このシミュレータを用いてテーパコーン加工精度に対する工作物の配置、機構パラメータ誤差および回転軸角度偏差の影響を明らかにした。また、全送り軸を動作させるための工作物の位置を示し、この位置でほとんどの機構パラメータ誤差の影響がテーパコーンの真円度にあらわれることを示した。さらに、この条件では、回転軸角度偏差（角度周期誤差、ロストモーション）の影響も真円度にあらわれるため、機構パラメータ誤差の評価を行う際は、回転軸角度偏差を可能な限り小さくする必要があることについて言及している。 第3章では、テーブル旋回形5軸シリアル機におけるテーパコーン加工動作のDBB測定を行い、得られた運動誤差軌跡から機構パラメータを同定する方法を提案している。この方法では、送り機構の幾何誤差モデルをベースとし、測定の制約や機構パラメータ誤差の感度を考慮して数値計算を用いて最適測定条件の選定を行う。また、機構パラメータ誤差以外の運動誤差である送り機構の直進誤差を補正システムによって除去して機構パラメータの同定精度を向上する。実機の機構パラメータの同定課題において、提案した最適測定条件セットの選定法により、4個の測定条件を選定し、この測定条件セットの有効性をシミュレーションにより確認するとともに、実際にテーパコーンDBB測定を行って機構パラメータの同定を行い、同定結果を制御器に設定して、他の動作条件でも運動精度が向上できることを示している。			

第 4 章では、Stewart Platform 型 6 軸パラレル機の外力（重力を含む）および内力（受動ジョイントの回転抵抗）に起因する機構の弾性変形誤差の汎用的なモデルを提案し、実機を対象としてモデルの妥当性を検証している。提案した機構変形誤差モデルでは、送り機構要素の重量やコンプライアンスを要素毎に独立にモデル化しているため、機構要素の変更に対応できる汎用的なモデルである。このモデルを用いて重力に起因する機構変形誤差の補正システムを開発し、その補正効果を検証している。さらに、回転抵抗を変化させたジョイントを用いて、回転抵抗の変化が運動誤差に与える影響をモデルでシミュレーションできることを示している。

第 5 章では、テーパコーンの加工動作を拡張した運動パターンを用いて運動誤差測定を行い、重力・ジョイント回転抵抗による機構変形誤差など他の要因による誤差を運動誤差軌跡から分離して 6 軸パラレル機の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。また、従来の DBB 測定用治具の問題を解決したマルチボールプレート治具を開発し、この治具を用いた拡張テーパコーン DBB 測定によるキャリブレーション法の有効性を実機で検証している。重力とジョイント回転抵抗の運動誤差への影響を取り除くことで、機構パラメータの同定精度が著しく向上することをシミュレーションで示し、提案したキャリブレーションを実機上で行うことで、様々な運動条件で真円度 $10\mu\text{m}$ 程度の運動精度を達成し、かつ従来のシングルボール治具を用いた方法と比較してキャリブレーションの作業効率を約 2 倍に向上できることを示した。

第 6 章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、多軸制御工作機械の運動精度を向上するために、実加工動作で測定した運動誤差に基づいて機構パラメータのキャリブレーションを行う手法を提案し、シミュレーションと実験によって提案手法の有効性を検証した結果をまとめたものであり、得られた主な成果は以下の通りである。

(1) テーブル旋回形 5 軸制御シリアルメカニズム工作機械によるテーパコーン加工において、幾何誤差モデルを用いた精度シミュレータを開発し、このシミュレータを利用して、テーパコーン加工精度に対する工作物の配置、機構パラメータ誤差、回転軸角度偏差の影響を明らかにした。

(2) テーブル旋回形 5 軸制御シリアルメカニズム工作機械におけるテーパコーン加工動作の運動軌跡を DBB 測定器を用いて測定し、得られた運動誤差軌跡から機構パラメータの誤差を同定する方法を考案した。具体的には、測定の制約や機構パラメータ誤差の感度を考慮した最適測定条件の選定法を示し、機構パラメータ誤差以外の運動誤差である送り機構の直進誤差を補正システムによって除去して機構パラメータの同定精度を向上できることを示した。

(3) Stewart Platform 型 6 軸制御パラレルメカニズム工作機械の外力（重力を含む）および内力（受動ジョイントの回転抵抗）に起因する弾性変形誤差を計算するための汎用的なモデルを開発し、実機に応用してモデルの運動誤差予測精度を検証している。また、この変形誤差モデルを用いた誤差補正システムを開発し、その補正の効果を検証した。

(4) テーパコーンの加工動作を拡張した運動パターンで DBB 測定を行い、重力・ジョイント回転抵抗による機構変形誤差など他の要因による誤差を運動誤差軌跡から分離して 6 軸パラレル機の機構パラメータをキャリブレーションする方法を検証した。その結果、様々な運動条件で真円度 $10\mu\text{m}$ 程度の運動精度を達成し、キャリブレーションの作業効率を従来法と比較して約 2 倍に向上できることを示した。

以上のように本論文は、多軸制御工作機械の運動精度向上のための機構パラメータのキャリブレーション法を機構学に基づいて体系化したものであり、学術上、実際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また平成 23 年 2 月 21 日論文内容とそれに関連した口頭試問を行った結果合格と認めた。