

京都大学	博士 (工学)	氏名	洪 策 符
論文題目	Error Calibration on Five-axis Machine Tools by Relative Displacement Measurement between Spindle and Work Table (主軸・テーブル間の相対変位の測定に基づく5軸制御工作機械の誤差キャリブレーション法)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文は、被削物または工具の直線運動を制御するための直進3軸に加え、姿勢を制御するための旋回2軸を持つ5軸制御工作機械において、旋回軸の運動精度の計測・評価法に関する研究をまとめたものであって、7章からなっている。</p> <p>第1章は緒論であり、5軸制御工作機械の運動誤差の測定法に関する研究動向を概説している。従来の旋回軸の運動検査では、ある旋回軸の運動誤差が、重力による構造部材の変形などの原因で、もうひとつの旋回軸の割り出し角度に応じて変化することが考慮されていなかった。この問題を解決するために、本論文では、旋回中心軸の位置と向きが、旋回軸の旋回に伴ってどのように変化していくかを測定してモデル化し、可視化する手法が述べられている。</p> <p>第2章では、本研究で用いる測定器である、R-test測定器の概要を説明している。R-test測定器とは、テーブルに固定した3つの接触式変位センサを用いて主軸に取り付けた基準球の3次元相対変位を測定する測定器である。5軸制御工作機械の旋回軸の回転と、直進軸による円弧補間運動を同期させ、その同期誤差を測定する。本研究で製作したR-test測定器の説明を行い、R-test測定により誤差マップを可視化する方法の基礎となる5軸加工機の幾何学モデルについて説明している。</p> <p>第3章では、R-test測定を用いた旋回軸の誤差パラメータの同定アルゴリズムを提案している。従来の旋回軸の運動検査では、最も基本的な誤差要因である旋回軸の軸平均線の位置・姿勢の誤差のみを評価対象としていたのに対し、本研究では、旋回中心軸の位置と向きが、旋回軸の旋回に伴ってどのように変化していくかを明らかにするために、旋回軸の誤差マップというモデルを考案している。次に、2つの旋回軸の様々な割り出し角度で、主軸・テーブル間の相対変位をR-test測定器を用いて測定し、測定結果から誤差マップを同定するためのアルゴリズムを提案している。提案した測定・評価方法を実際に5軸制御工作機械に適用し、旋回軸の誤差マップを可視化し、運動誤差を定量化した結果を示している。R-test測定の測定精度は、旋回軸だけでなく、直進軸の運動誤差の影響も受ける。従来の研究では、直進軸の運動誤差は十分小さいと仮定していたのに対し、本論文では、R-test測定器の設置位置を4通りに変えて測定することで、直進軸の直角度の影響を測定結果から除去し、旋回軸の誤差の評価を行うアルゴリズムを提案している。</p> <p>第4章では、R-test測定により誤差マップを可視化する方法を応用し、送り系のサーボモータの発熱による旋回軸の運動誤差の変化を評価する方法を提案している。ISO規格等に規定された従来の熱変形の評価法では、熱変形の静的位置決め精度に及ぼす影響のみを評価するのに対し、提案法は旋回軸の運動誤差への影響を評価できる。旋回軸の繰り返し運動による発熱が、回転テーブルの運動誤差に及ぼす影響を、誤差マップの変化として可視化できることを、実機での測定実験により示している。</p>			

第 5 章では、旋回軸の動的な運動誤差の測定法を提案している。従来の R-test 測定器では接触式の変位センサを用いているため、センサと基準球の接触面の摩擦や、変位センサの支持ばねの動特性の影響などから、動的な運動精度評価が難しかった。この問題を解決することと、測定の安全性の向上を目的として、レーザ変位計を用いた非接触 R-test 測定器を開発している。まず、異なる測定原理を持つ 4 つのレーザ変位計の測定不確かさを実験により比較し、球面を測定するために適したレーザ変位計を選定している。次に、レーザ変位計の測定から基準球の相対変位を求めるためのアルゴリズムと、レーザ方向に対する測定対象面の傾斜が原因で生じる測定誤差を補正するアルゴリズムを提案している。開発した非接触 R-test 測定器を用いて、旋回軸の静的及び動的な運動誤差の測定を行い、接触式の R-test 測定器と比較している。その結果、動的な運動誤差の測定において、接触式の R-test 測定器ではセンサと基準球の接触面の摩擦に起因すると推測される測定誤差が生じているが、非接触 R-test 測定器ではそのような測定誤差は観察されないことが示されている。

第 6 章では、旋回軸の様々な運動誤差が、加工物の形状誤差に及ぼす影響を定量的に評価する感度解析手法を提案し、提案手法を NAS (National Aerospace Standard) 規格に規定された円錐盤の加工試験に適用している。提案手法では、Monte Carlo 法に基づく統計的手法を用いて、工作機械の運動誤差要因が工作物の形状誤差に与える影響の大きさを調べる。具体的な測定例として、円錐盤の加工試験の例では、回転テーブル (C 軸) の中心位置が傾斜軸 (B 軸) の回転に伴って変位することが、加工物の真円度に比較的大きな影響を及ぼすことを示している。このような誤差は、従来の旋回軸の運動検査法で評価することが難しいが、R-test 測定で得られた誤差マップを可視化する方法により評価できることを測定実験で示している。

第 7 章は本論文の結論であり、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、被削物または工具の直線運動を制御するための直進3軸に加え、姿勢を制御するための旋回2軸を持つ5軸制御工作機械において、旋回軸の運動精度の計測・評価法に関する研究をまとめたものであって、得られた主な成果は以下の通りである。

1. ある旋回軸の運動誤差が、他の旋回軸の旋回に伴ってどう変化するかを評価する方法を提案した。R-test 測定器により主軸・テーブル間の相対変位を測定し、測定結果を誤差マップとしてモデル化することで、旋回軸の運動誤差を可視化し、定量的に運動誤差を評価する方法を提案した。
2. R-test 測定により誤差マップを可視化する方法を応用し、送り系のサーボモータの発熱によって、旋回軸の運動誤差がどのように変化するかを評価する方法を提案した。従来の熱変形評価法と異なり、熱変形の旋回軸の運動誤差への影響を評価できることを実機での測定実験により示した。
3. 旋回軸の動的な運動誤差の測定を行うことを目的として、レーザ変位計を用いた非接触 R-test 測定器を開発した。レーザ変位計の測定から基準球の相対変位を求めるためのアルゴリズムと、測定対象面がレーザ方向に対して傾斜することが原因で生じる測定誤差を補正するアルゴリズムを提案した。レーザ変位計を用いた非接触 R-test 測定器を試作し、接触式の変位センサを用いた従来の R-test 測定器との比較を行った。
4. 旋回軸の様々な運動誤差が、加工物の形状誤差に及ぼす影響を定量的に評価する感度解析手法を提案した。円錐盤の加工試験を適用例として取り上げ、回転テーブル(C軸)の中心位置が傾斜軸(B軸)の回転に伴って変位することが、加工物の真円度に比較的大きな影響を及ぼすことを示した。このような誤差は、R-test 測定で得られた誤差マップを可視化する方法により評価できることを示した。

以上、本論文は、5軸制御工作機械の旋回軸の運動誤差の評価法を体系的に示したものであり、学術上、實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24年2月22日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。