

# 博士学位論文審査要旨

2015年1月6日

論文題目：5軸制御マシニングセンターの運動精度と加工精度向上に関する研究

学位申請者：赤井 孝行

審査委員：

主査：同志社大学大学院理工学研究科 教授 廣垣 俊樹

副査：同志社大学大学院理工学研究科 教授 青山 栄一

副査：京都大学 名誉教授 垣野 義昭

要 旨：

近年、工作機械業界において従来の直交直進3軸で位置決めを遂行する3軸制御マシニングセンターに加えて、直交2軸の旋回運動の姿勢制御も加えた高精度5軸制御マシニングセンターの開発ニーズが高まってきた。また従来設計の5軸制御マシニングセンターでは、旋回軸に減速機を介した機構を有していたため、機械全体のサーボ特性が低くなる問題も顕在化してきた。そこで本論文は、新たな5軸制御マシニングセンターを開発するための手法として、その運動精度の向上およびサーボ系の改善手法の確立を目的としている。すなわち、5軸制御マシニングセンターの運動精度の向上のための新たなキャリブレーション手法を開発し、それに基づく運動精度の改善、さらに旋回軸には減速機を介さない旋回運動を実現するダイレクトドライブ（DD）モータ方式を採用する手法に取り組み、直進3軸に旋回2軸の姿勢制御も含めた高精度なマシニングセンターの研究開発を試みている。

本論文は全8章で構成され、第1章において本研究の背景および目的とその意義について述べている。第2章では5軸制御に向けた新たなキャリブレーション手法を提案している。第3章では旋回軸にDDモータ方式を採用した5軸制御マシニングセンターに提案手法を適用して、その手法の有効性を示している。第4章ではNAS979規格に基づいたテーパコーン加工に準じた運動を提案手法に適用して、その有効性を示している。第5章では旋回軸と直進軸のサーボ特性の違いによる生じる運動誤差を診断する手法を提案し、DDモータ方式を採用した旋回軸の有用性を示している。第6章では旋回軸のアライメント誤差をソフト補正する手法を提案してその効果を検証している。第7章では複雑さを変化させた工作物を新開発した高精度な5軸制御マシニングセンターで加工して、全体チューニングの効果を実証している。第8章では得られた結果とその要点および結論を総括し、今後の展望について述べている。これらの成果は、高精度で柔軟な運動制御を具現化する新たな工作機械の設計開発の指針を示しており、本論文は工学的に極めて価値あるものと評価できる。よって、本論文は、博士（工学）（同志社大学）の学位論文として十分な価値を有するものと認められる。

## 総合試験結果の要旨

2015年1月6日

論文題目：5軸制御マシニングセンターの運動精度と加工精度向上に関する研究

学位申請者：赤井 孝行

審査委員：

主査：同志社大学大学院理工学研究科 教授 廣垣 俊樹

副査：同志社大学大学院理工学研究科 教授 青山 栄一

副査：京都大学 名誉教授 垣野 義昭

要 旨：

本論文の提出者は、2013年4月に本大学院理工学研究科機械工学専攻博士課程（後期課程）に入学し、現在在籍中である。

本論文の主たる内容は、精密工学会誌, Vol.76, No3, pp.333-337, 日本機械学会論文集 C 編 Vol.77, No782, pp.3951-3960, Journal of Society of Manufacturing Engineers, Japan, Vol.1, No.1, pp13-21 および Vol.3, No.4, pp5-16, Proceedings of International Symposium on Flexible Automation 2010, JPS-2479, pp.1-4, 同志社大学理工学研究報告 Vol.55, No2, pp.134-144, 砥粒加工学会誌, Vol.59 (掲載決定) に掲載され、すでに十分な評価を受けている。

2014年12月13日15時より約2時間にわたり、提出論文に関する博士論文公聴会が開かれ、種々の質疑応答が行われたが、提出者の説明により十分な理解が得られた。さらに公聴会終了後、審査委員より、論文に関する諸問題につき口頭試問を実施した結果、本人の十分な学力を確認することができた。なお、語学に関しては英語の語学試験に合格しており、十分な語学力を有しているものと認められる。以上より、本論文提出者の専門分野に関する学力および語学力は十分であることが確認できた。よって総合試験の結果は合格であると認める。

# 博士學位論文要旨

論文題目： 5軸制御マシニングセンターの運動精度と加工精度向上に関する研究  
氏名： 赤井 孝行

## 要 旨：

5軸制御マシニングセンターは、1960年代に最初に欧米で開発され、インペラーやタービンブレードで代表される航空機部品の加工など複雑形状部品や金型の加工に使用されていたが、現在ではそれだけにとどまらず、一般産業用や自動車部品のギヤハウジング、リングギヤ、バルブディストリビュータなどの複雑形状部品の加工に広く使用されるようになった。ただ、これらの部品においては、形状は複雑であるけれども、精度的には $50\mu\text{m}$ 程度の形状精度や位置精度が必要とされる程度であり、必ずしも高精度部品とは言いがたかった。逆に国内では $10\mu\text{m}$ 程度の高い精度が必要な金型の加工には5軸制御マシニングセンターはほとんど使用されてこなかった。これは5軸制御マシニングセンターの加工精度、ひいてはその原因である運動精度が悪かったのがその主な原因であった。欧米と異なり、日本においては、金型はある程度の形状精度とともに、表面の滑らかさが非常に強く要求されているので、金型の表面にキズ、段差、溝、大きなあらさなどの欠陥が残るのを極端に嫌ったためであった。それらの欠陥は運動軸（＝制御軸）の反転時に生じやすく、軸数が多い5軸制御マシニングセンターでは3軸制御マシニングセンターに比べて格段に不利であった。また需要が少なかったために5軸制御マシニングセンターや5軸用のCAMシステムが高価であったことも、その普及に悪影響を及ぼしていた。

ところが近年にいたって、5軸制御マシニングセンターの良さが見なおされて、国内でもその需要が増大しつつある。すなわち、同時5軸制御加工が必ずしも必要でない場合でも、回転軸はワークのインデックス用に用い、残りの直進軸の同時3軸制御で加工を行い、ワンチャックで1部品の形状全てを加工する方が、加工能率や部品全体の精度が確保しやすいことが広く認識されたためである。また、従来はいくつかの別々に加工した部品を組み立ててユニットにしていたものを、1部品として加工し、組立作業を合理化した方が有利であるものがかなりあることが分かってきたためである。副次的には5軸制御マシニングセンターや5軸用のCAMシステムの価格がかなり安くなってきたことも原因している。

すなわち、現在の3軸制御マシニングセンターによる加工に対して、運動精度さえ同等レベルを確保できれば、5軸制御マシニングセンターによる新たな加工技術の分野の開拓が期待できるものである。

しかし、一方では3軸制御マシニングセンターの精度キャリブレーションの威力を発揮している従来型のDBB法（Double Ball Bar:DBB3法と称する）は、そのままでは5軸制御マシニングセンターの精度キャリブレーションには使えず、他に有効な精度キャリブレーション法もなく、工作機械メーカーはその運動精度の向上のための手法がなく非常に困っていた。

そこで本研究では、DBB3法を改良することで5軸制御マシニングセンターの運動誤差原因を診断する手法を構築し、その結果に基づき運動精度の向上、ひいては加工精度の向上のための構造の改良の指針を示すことを目指した。すなわち、提案する測定法により回転軸のオフセット誤差と角度誤差からなるアライメント誤差の測定を具現化する。これらの誤差はCNCやCAMシステムを用いた補正によってかなり軽減できるはずであるので、そのソフト補正法を用いた運動精度向上についても研究した。さらに、これらの工作機械が加工対象とする高精度な複雑形状部品について、種々な方式で加工を行い、その比較検討により同時5軸制御を用いた加工法の利点についても研究した。

本論文は、以下のように全8章で構成している。

第1章では、本研究の目的と概要を述べた。

第2章では、従来は主に3軸制御マシニングセンターの運動精度診断に用いられてきたダブルボールバー (DBB3) を改良して、新たに5軸制御マシニングセンター向けにDBB5測定法の原理を考案した。すなわち、DBB5法では球とバーを繋ぐ支柱をX,Y,Zの3軸に対して45°傾けることにより、球の位置を変更することなく、XY,YZ,ZX平面について360°の運動誤差軌跡を測定できるようにした。さらに高精度な着脱再現性を有するEROWAのチャックを用いてテーブル側球面座の位置を軸方向に変化させて、前述の測定およびC-XY (Z軸まわりの旋回運動軸をC軸と称する)、B-ZX (Y軸まわりの旋回運動軸をB軸と称する)の同期測定を行うことにより、B,C旋回軸のオフセット誤差および角度誤差を測定できるようにした。その結果、これらの測定が同一セットアップで測定でき、運動誤差測定の精度が向上し、測定に要する時間を短縮できることを示した。さらに本研究の基礎となるDBB5精度キャリブレーション法の原理についてDBB3法と比較しながら、その特徴の考察も遂行した。

第3章では、旋回軸にDDモータ駆動 (ダイレクトドライブ) 機構を有する本研究で主に対象としているテーブル・オン・テーブル型の5軸制御マシニングセンターNMV5000に、このDBB5測定法を適用して計測精度キャリブレーションを遂行した。その後、実際に5軸制御マシニングセンターの運動誤差軌跡から直進および旋回軸に関する運動誤差原因の診断を遂行した。また、旋回軸にウォーム減速機を有する従来型の5軸制御マシニングセンターの運動誤差との差についても考察した。その結果、開発機の運動誤差は5軸制御にもかかわらず、従来の3軸制御立型マシニングセンターや横型マシニングセンターのそれらとほぼ同程度であることを示した。

第4章では、現在行われているNAS979規格に基づいたテーパコーン加工実験に準じた同時5軸制御時の運動精度の評価をDBB5法で行う手法に取り組んだ。その結果より、本機に存在する改良すべき点について検討するとともに、実際にテーパコーン切削を行った場合に得られた加工形状誤差と運動誤差との比較検討も遂行した。すなわち、実加工後に加工ワークを評価する手法に比べ、提案手法は治具など整備することで計測および評価に要する時間を大幅に短縮でき、工業的に極めて有効な手法となることを示した。

第5章では、旋回軸と直進軸のサーボ特性の違いによって生じる運動誤差について検討した。すなわち、1つの旋回軸と1つの直進軸を同期させて円運動を行なわせた場合に生じる運動誤差を解析して求める式および診断法を構築した。特にサーボ系の位置フィードバックループのゲイン $K_p$ を種々変更して、旋回軸におけるDDモータ駆動機構と従来のウォーム減速機を有する機構との差について比較検討した。その結果、旋回軸のサーボ特性を向上させるためには、減速機を介さないDDモータを用いることが非常に有効であることを示した。また、これらの結果をまとめて、1つの旋回軸と1つの直進軸で円弧補間運動させた場合に現れる典型的な軌跡パターンも明確化した。

第6章では、旋回軸B,Cのアライメント誤差を構成するオフセット誤差と角度誤差について、DBB5を用いた回転測定法を考察し、さらにその測定結果に基づきNCを用いたそれらの誤差のソフト補正法について検討した。さらにテーブル・オン・テーブル型とトラニオン型の旋回軸の構造について、その適用性の違いについても検討した。ソフト補正による運動精度の向上は、旋回軸の双方向再現性誤差が限界となるので、さらに運動精度を向上させるためには、旋回軸の双方向再現性誤差を減少させることが不可欠であることを解明した。また、これらの一連の測定と補正に要した時間は1~4時間で、再調整の組立とすり合わせに要する時間に比べるとはるかに短いことも解明した。これらの方法に習熟すれば作業時間はさらに短縮できるものと考えられ、極めて有効な手法になることを示した。

第7章では、5軸制御機の有利さを活かして、円錐台形状をモチーフにして複雑さを変化させたワークを実際に加工し、従来の同時3軸制御加工の結果と比較し、加工精度と加工能率を比較

検討した。特に高精度な5軸制御マシニングセンターを用いた場合について、加工現象を考慮しながらワークの複雑さの度合いとの関係を検討した。すなわち、ワーク形状が複雑になればなるほど、5軸制御の加工の方が加工時間が大きく短縮されることが確認できた。また、加工精度についても両者はほぼ同等に加工できており、加工現象も考慮することで高精度な5軸制御マシニングセンターを使用すれば、従来考えられていたような3軸制御の加工の方が加工精度で有利であるとは言えないことが実証できた。

第8章は、以上をまとめた本研究の結論を示した。

以上より、本論文は5軸制御マシニングセンターの旋回2軸と直進3軸の運動における、運動精度の測定とその診断法およびその改善手法、さらに同時5軸制御の加工法における加工精度について考察した。それらの成果により、高精度化した5軸制御マシニングセンターは、航空機産業や部品産業だけでなく、金型産業など高い加工精度が求められる分野においても、極めて有効な工作機械になることを示すことができた。