

博士学位論文審査要旨

2021年1月19日

論文題目：工作機械の直進・旋回軸の同期運動に基づくエンドミル加工の
切削点送り速度一定化制御に関する研究

学位申請者：鈴木 尊丸

審査委員：

主査：理工学研究科 教授 廣垣 俊樹

副査：理工学研究科 教授 青山 栄一

副査：理工学研究科 教授 辻内 伸好

要 旨：

日本のものづくりにおける競争力として、多機能・多軸制御工作機械の研究開発が進められている。その中で、直進直交3軸の送り駆動軸系にダイレクトドライブ方式の旋回2軸の運動駆動軸を付加した5軸制御工作機械の運動精度の向上およびそれらを活用した新しい加工技術の開拓が求められている。そこで本論文では、直進軸と旋回軸の運動を組み合わせることで、エンドミル加工における工具と工作物の切削点の送り速度ベクトル一定化制御を具現化する新たな加工技術を考案し、そのために必要となる両運動軸の制御パラメータのチューニング方法も提案し、それらの有効性の検討を遂行している。

本論文は全6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章ではエンドミル加工における切削点送り速度ベクトル一定化の基礎理論およびそのための制御系パラメータの基本的な調整方法を示している。第3章では直進送り軸に対してDDモータ旋回軸のトルク飽和で生じる限界点の検討をしている。第4章では先行制御係数に着目して旋回軸で生じるトルク飽和限界の改善方法を示している。第5章では工具アプローチ運動も含めエンドミル加工での具体的な具現化方法を検討し、さらに実加工時の切削力をIoT型無線ホルダで実測して、提案する手法の有効性を示している。第6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、次世代の多機能・多軸制御工作機械の研究開発における国際競争力の向上にも資するものであり、さらにそれを応用した高度な加工技術を具現化するための基幹となる技術の指針を示すものである。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

2021年1月19日

論文題目：工作機械の直進・旋回軸の同期運動に基づくエンドミル加工の
切削点送り速度一定化制御に関する研究

学位申請者：鈴木 尊丸

審査委員：

主査：理工学研究科 教授 廣垣 俊樹

副査：理工学研究科 教授 青山 栄一

副査：理工学研究科 教授 辻内 伸好

要 旨：

本論文の提出者は、2018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、日本機械学会論文集, Vol.83, No.849, pp.1-16, *Advances in Materials and Processing Technologies*, 2019, Vol.5, No.3, pp.1-15, *International Journal of Automation Technology*, Vol.13, No.5, pp. 679-690, 日本機械学会論文集, Vol.86, No.889, pp.1-18, に掲載され、既に十分な評価を受けている。

2020年12月19日午前9時00分より約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、さらに複数の国際会議発表の実績も有することから、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： 工作機械の直進・旋回軸の同期運動に基づくエンドミル加工の切削点送り速度一定化制御に関する研究

氏名： 鈴木 尊丸

要旨：

直交3軸に加えて旋回2軸を具備した5軸工作機械（以降、5軸MCと称す）については、1955年に米国で開発され歴史は古いものの、近年になって注目されるようになってきている。これまでは、日本においては金型など10 μm 程度の高い精度を要求されるとともに表面の滑らかさも重視されることが多いが、軸数が多い5軸MCは3軸工作機械と比較し、金型の表面にキズ、段差、溝、大きな仕上げ面での粗さなどが残る可能性が高いため敬遠されていた。ところが、5軸MCは複雑形状の加工が可能であること、工程集約が可能であること以外に、突き出し量の少ない工具で加工できるため工具の剛性が向上してびびりなどの振動を回避することが可能であること、また工具と加工面の位置関係を変更できるため自由度の高い加工が可能であることというメリットについてもユーザーの認識が進んできた。それに伴い、可能な限り加工精度を向上させるべく加工面の法線に対して傾斜した姿勢を維持する工具先端点制御、軸反転時に発生する象限突起を補正する制御、各軸の特性をそろえるためのサーボゲイン調整制御、追従遅れを減らすためのプログラム先読み機能を備えたCNC（Computerized Numerical Control）加減速処理など多岐にわたる様々な制御技術が開発された。これらの制御技術により、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のみならず、一般産業用や自動車部品のエンジンブロックやトランスミッションブロック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。

さらに近年では大量生産のため高速での5軸MCの直進軸、旋回軸両軸を用いた加工が増えてきた。ところが、2010年まではウォーム等の減速機型の旋回軸が主流であり、旋回軸の最高回転数、応答性が不足するため直進軸と同等の運動性能を示すことができない問題が顕在化した。モータ技術については、1990年代末にネオジウム磁石が開発されたことにより、高磁束密度向けの電磁鋼板の開発も進み、次第に産業用FA（Factory Automation）としてCD/DVDの高速搬送装置などの機器においてもモータに減速機を用いないDD（Direct Drive）方式が採用されるようになってきていた。そうしたモータの技術背景もあり、工作機械のモータ開発においてもDD方式を前提とした研究開発が必要となり、従来のウォーム等の減速機を有する旋回軸からネオジウム磁石を応用したモータによるDD方式の旋回軸に置き換わった5軸MCが2010年に開発された。

その一方で、回転軸の制御特性を扱った研究の大部分はモータに減速機を有するタイプであり、DD方式の報告例は少ないのが現状である。また、その実用的な加工技術も含む研究報告は少なく、特に自由曲面などでは形状精度だけでなく創成面全体における粗さの均一性等の面品質も重要になる場合も考慮した報告例が極めて少ない。ひいては工作機械として工具とワーク間で直進軸とDD方式の旋回軸の運動が組み合わされることで生じる問題点やその応用、そして制御パラメータチューニング法に関する報告例はほぼないのが現状である。更なる発展が見込まれるDD方式を採用した旋回軸を用い、そこで、面品質も考慮した5軸MCのさらに高度な直進軸と旋回軸の同期制御向上が必要不可欠である。

したがって本研究では、創成面全体における粗さの均一性等の面品質を向上させる手法として、直進軸と旋回軸を用いた同時制御によりエンドミルと加工物の切削点における相対送り速度（以下、切削点送り速度と称す）を一定に維持する手法に着目した。具体的な対象として、5軸

MC のボールネジ駆動である直進 2 軸と DD 方式の旋回 1 軸の同時制御により切削点送り速度を一定化しながら円形状を加工することを考慮し、その際に加工形状に現れる工作機械の運動誤差に起因する加工形状の誤差（以降、形状誤差と称す）の原因解明および形状誤差の低減方法について検討した。特にサーボの内部情報を取得することで各軸のサーボ特性を考慮し加工形状へ影響を与える形状誤差の要因の解明およびその誤差低減方法を提案しその有効性を検討した。さらにこれらの成果に基づき、実加工におけるエンドミル工具の弾性変形や切削力の変動も考慮しての実用的な発展を目指して、つながる工場と IoT (Internet of Things) の技術より開発された回転工具からの加工情報をワイヤレス通信で取得する無線式工具ホルダーシステムを導入し、実加工時の工具アプローチ方法の検討もおこなった。

本論文は、以下のように全 6 章で構成している。

第 1 章は、本研究の目的と概要を述べた。

第 2 章では、5 軸 MC の直進 2 軸と旋回 1 軸を組み合わせて切削点送り速度を一定にする手法を用いて円形状を切削する運動に着目し、それらサーボ系の特性差に起因する形状誤差を考察した。そしてその考察に基づいて、試行錯誤によらない更なる加工形状精度の向上方法を検討した。その結果、工作機械の運動性能に起因して発生する形状誤差の主要な要因は、直進軸の半径減少量と旋回軸と直進軸の指令値からの位相遅れの差である相対角度差であることが判明した。そして、それらのその誤差を最小化させるために先行制御 (G08) の先行制御係数を決定する手法を提案して実機への適用を試み、サーボ内部情報による各軸運動をモニタして、実際の効果を確認することができた。

第 3 章では、複雑形状を切削点送り速度一定化条件で加工をおこなう際など旋回軸に高速回転が求められる場合において高周波数応答の特性を得るための手法を提案することを目指し、DD 方式のモータ駆動で生じやすいトルク飽和による形状誤差への影響を考察した。その結果、旋回軸が高速回転時においても形状誤差の主な要因の 1 つとして旋回軸と直進軸の相対角度差があり、トルク飽和を考慮したモデルにより相対角度差、ひいては形状誤差への影響を精度高く推定できることが判明した。そして、トルク飽和を考慮したモデルにより相対角度差を推定することができるため、2 章で提案した先行制御係数を適切に設定する手法を適用することで、形状誤差を十分に小さく改善することができる可能性があることを示した。

第 4 章では、DD 方式のモータ駆動である旋回軸のトルク飽和を考慮したモデルを用いて、トルク飽和を回避しながら形状誤差を低減するための最適な先行制御係数を算出する手法を検討した。その結果、トルク飽和をモデル化することで、トルク飽和を回避するための先行制御係数を算出することが可能であること、ひいては本手法を適用することで形状誤差を低減するための最適な先行制御係数を算出することが可能であることがわかった。さらに、本手法によりトルク飽和を回避するための角速度の上限が増加し、実加工で創製可能である最小のワーク半径を減少させることが可能であることもわかった。

第 5 章では、切削点送り速度を一定の条件下において実加工に適用するための工具アプローチ方法の検討を遂行した。さらに直進 2 軸と旋回 1 軸の同期運転中に生じる切削抵抗のリアルタイム計測のため、無線式工具ホルダを導入してエンドミル側の回転座標系で切削抵抗のリアルタイム計測を試みた。その結果、形状誤差の主な要因の 1 つとして、アプローチ方法により変化する直進軸の円弧補間運動の偏心（指令中心と実運動中心の差）があることが判明した。その結果に基づき、形状誤差を減少させるための工具アプローチ方法の検討が可能であることもわかった。また、無線式工具ホルダを用いて、工具のアプローチ時も含めて切削抵抗をモニタしたところ、安定した実加工が具現化できることを示すことができた。

第 6 章では、以上をまとめた本論文の結論を示した。

以上より、従来の直交 3 軸の運動に基づく工作機械に対して、直交 3 軸に旋回 2 軸を加え、さらに旋回軸には DD 方式を採用してその応答性を向上した 5 軸 MC に着目して、エンドミル加

工において切削点送り速度一定化制御の導入を提案し、創製形状の加工面品質の向上と高度な直進軸と旋回軸の同期制御向上による形状誤差の低減のための手法を構築することで、次世代の多軸の工作機械の制御技術および加工技術へ寄与する成果を示した。