

# 博士学位論文審査要旨

2014年1月7日

論文題目：双腕ロボットによるプレート2軸旋回運動制御の運動誤差測定と  
その改善に関する研究

学位申請者：呉 魏

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 辻内 伸好

副査：同志社大学大学院理工学研究科 教授 青山 栄一

要 旨：

日本の最新FA (Factory Automation) 技術において、工作機械には自律的な制御性、ロボットにはNC制御による運動の高精度化が求められている。従来は不可能とされていたロボットにおける運動精度の向上が日本のFA産業の世界に向けた優位性になりつつある。さらに新型の双腕ロボットでは双腕の協調により、従来は現場で人が使用してきた道具を操る動作を具現化する技術開発が着目され、新たな応用分野の開拓が期待されている。本論文では、ロボットの双腕で作業プレートを支持することで閉リンク機構を構成し、作業プレートを操ることで十分な支持剛性を維持しながらプレート上での柔軟な作業空間を実現することを目的としている。すなわち、ロボットでも従来の工作機械のNC制御の運動精度に近い性能を具現化する一方、人の作業に近い柔軟性を両立することを試みている。

本論文は全7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章では双腕で作業プレートを支持してエンドエフェクターとして操る手法の有効性を示している。第3章では双腕ロボットに作業プレートを支持して双腕の協調制御による同時2軸制御の旋回運動を与え、プレート上で球の転がり運動を具現化してその軌跡を解析することで、運動精度の定量的な診断法を提案している。第4章では提案する手法において使用する転がりボールの特性を変化させた場合を取り上げ、診断に用いる適切なボールの選定法を示しながら、評価対象とする動作の拡張を試みている。第5章ではボールとプレート間の転がり摩擦係数を変化させた場合を取り上げ、その検出感度に与える影響を解明し、提案する手法の実用性を示している。第6章では双腕ロボットの正面に作業プレートを保持する姿勢の中で、プレートの基本高さは一定にしたまま水平方向に保持位置を変化させて種々の姿勢でプレートの2軸旋回運動を操る場合について調べ、その運動精度の改善方法について述べている。第7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。FA現場において双腕ロボットが自律的かつ高精度に道具を操る技術を研究開発しており、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

2014年1月7日

論文題目： 双腕ロボットによるプレート2軸旋回運動制御の運動誤差測定とその改善に関する研究

学位申請者： 吳 魏

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 辻内 伸好

副査： 同志社大学大学院理工学研究科 教授 青山 栄一

要 旨：

本論文の提出者は、本大学院工学研究科機械工学専攻博士課程（前期課程）を2011年3月に修了し、2011年4月に同博士課程（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C編, Vol.78, No785, pp.292-304 および Vol.78, No793, pp.3317-3330, International Journal of Automation Technology, Vol.6, No.1, pp75-83, International Journal of Key Engineering Material, Vol.516, pp.234-239 および Vols.523-524, pp.889-894, 同志社大学理工学研究報告 Vol.51, No1, pp.9-15 および Vol.54, No1, pp.7-15, に掲載され、すでに十分な評価を受けている。

2013年12月26日正午30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： 双腕ロボットによるプレート 2 軸旋回運動制御の運動誤差測定とその改善に関する研究

氏名： 呉 魏

要旨：

近年、日本の FA(Factory Automation)現場において 5 軸制御マシニングセンターや新しい産業用ロボットの応用範囲が拡大するにつれ、複雑な旋回運動をテーブルに与えるための運動制御の高精度化が望まれており、工作機械と産業用ロボットの役割分担も大きく変化しつつある。すなわち日本の最新 FA 技術において、工作機械には自律的な制御性、ロボットには NC 制御による運動の高精度化が求められている。従来は不可能とされていたロボットにおける運動精度の向上が日本の FA 産業の世界に向けた優位性になりつつある。さらに新型の双腕ロボットでは双腕の協調により、従来は現場で人が使用してきた道具を操る動作を具現化する技術開発が着目され、新たな応用分野も期待されてきている。運動精度を改善するためには、それらの計測および評価の技術が不可欠である。その中でも輪郭運動精度が求められる場合には、2 軸以上の制御軸の同期精度を評価する必要がある。そこで、ダブルボールバー (DBB) を用いて直進 2 軸と旋回 1 軸の同期運動精度を調べた研究などが 5 軸制御工作機械を対象にして多く見られる。しかしながら、その多くは直進軸の運動が含まれた例であり、直交する 2 軸の旋回軸のみの同期運動精度を調べた例はほとんどない。また、双腕ロボットのような両腕の高度な協調動作が求められる新型産業用ロボットに適用した例はない。

DBB 法では 2 点間の距離を計測するスケールを備えた伸縮するバーの伸縮変化量より 2 軸同時制御における運動精度を評価する。しかしその原理上、直進軸の運動なしには計測は不可能であった。旋回 2 軸の同期制御の精度を計測するには、例えば、高精度ジャイロセンサを用いる方法が考えられる。しかし同センサは大型でありコンパクトロボットには適用が難しく、また高価でもあり実用的ではなかった。そこでセンサレスで FA の現場でも容易かつ簡単に旋回運動の診断ができる手法の開発も望まれている。

そこで本研究の目的は、双腕で作業プレートを支持する（ヒトの動作解析に基づく）ことで閉リンク機構を構成し、作業プレートを操ることで十分な支持剛性を維持しながらプレート上での柔軟な作業空間を実現することを目指した。すなわち、ロボットでも従来の工作機械の NC 制御の運動精度に近い性能を具現化する一方、人の作業に近い柔軟性を両立することである。そのため、双腕ロボットの双腕協調制御による複雑で高精度な 2 軸旋回運動を、極めて簡単で、しかし信頼性の高い精度診断に基づき達成する。その対象としてプレート上で球の転がりを取り上げ、その運動軌跡をコンピュータシミュレーションにより解析しながら、同時 2 軸の旋回運動の制御におけるその誤差解析およびその改善手法を確立する。

本論文は、以下のように全 7 章で構成している。

第 1 章では、本研究の背景および目的とその意義について述べた。

第 2 章では、双腕ロボットの新しい応用とその運動精度の向上を目指した最初のステップとして、双腕で作業プレートを支持してエンドエフェクターとして操る手法の有効性を検討した。特に同時 14 軸制御により作業プレート上に球を定常状態で転がり等速円運動させる動作に取り組み、プレート上のボールの転がり運動制御の基本理論について提案し、それらを実験により検証した。その結果、平面の作業プレート上にボールを転がり円運動させるような作業において十分

な精度が確保されていることが判明し、本手法は十分に実用域にあることがわかった。また、直交する回転2軸の運動制御において、転がりボールの運動を制御することで、その運動精度を判定することが可能である。すなわち、X軸またY軸に沿って楕円運動を生じる時はX軸とY軸の最大傾斜角の不一致が生じている。また、楕円の軸がX軸またY軸と一致していない時は、両軸間における運動の位相差に誤差を生じ、サーボの不一致が生じていることがわかった。

第3章では、双腕ロボットに作業プレートを支持して双腕の協調制御による同時2軸制御の旋回運動を与え、プレート上で球の転がり運動軌跡を解析することで、その運動精度の定量的な評価について考察した。その結果、ボールの転がり運動においてプレート旋回運動により生じる遠心力を考慮することで、転がり運動の過渡応答から定常応答まで、それらの軌跡を精度よく予想できることがわかった。また、同時2軸の旋回運動において、プレート上のボールの運動軌跡が楕円でその長軸がX軸またはY軸と一致する場合、両軸間で最大角度に誤差が生じ、その一方で、楕円の長軸がX軸またはY軸と角度を有する場合、ドループの不一致などに起因する位相誤差が生じていることが計算および実測から示された。したがって、モデルによるシミュレーションを併用すれば、ボールの転がり軌跡をモニターすることで、簡易的ではあるが、同時2軸で旋回運動するプレートの運動特性の改善のための有効な手法の1つになることがわかった。また、使用するプレートとボールの組み合わせを工夫することで、プレートの大きさ、旋回運動の角周波数、最大角度が変化しても、本手法はある程度対応できる可能性を示すことができた。

第4章では、提案する手法において使用する転がりボールの特性を変化させた場合を取り上げ、診断に用いる適切なボールの選定に関する考察を行った。さらに旋回軸の旋回運動にオフセット角度誤差が存在し、ボールの転がり運動の中心と旋回軸の旋回中心が一致しない場合について取り組んだ。その結果、高い周波数帯まで十分な応答特性を確保したい場合、外径が大きな中空ボールを選択すると良いことがわかった。ただし中空ボールに関しては、効果を期待するためには内外径比(=外径/内径)で0.8程度以上を用いる必要があることもわかった。さらに、中空ボールは直進軸方向の運動誤差の影響も受けやすいため、そのような外乱が予想される場合には適さないこともわかった。その一方で、プレートのX(Y)軸の旋回制御の角度にオフセット角度誤差がある場合、転がり円軌跡の中心が移動することがわかった。したがって、最大角度誤差および同期誤差(位相差)および角度のオフセット誤差は、転がり軌跡の楕円の長軸と短軸の比およびそれらのX軸またはY軸となす角度、および中心の位置を調べることで診断が可能であることが示された。また、半径が小さく減衰係数も小さなボールを用いれば、小さな運動誤差でも検出が可能になる一方で、検出できる誤差の範囲が狭くなり、逆に、外径が大きく減衰係数も大きなボールを用いれば、小さな運動誤差の検出感度は下がる一方で、検出できる誤差の範囲が広くなることもわかった。したがって、予想される運動誤差を考慮して、適切に用いるボールを選定する必要があることもわかった。

第5章では、ボールとプレート間の転がり摩擦係数を変化させた場合を取り上げ、その検出感度に与える影響を考察することで提案する手法の一般性を広げた。その結果、コンパクトロボットによる小面積のプレートの操り動作などへの応用を考える場合、共振現象などの不安定運動に注意する必要があるが、転がり半径が小さくても十分な誤差を出すために密度の低い小さなセラミックボールなどの使用が有効な手段になる。また、提案する手法は動画からの画像解析に基づいており、その画素のサイズと運動の角度誤差や同期誤差の検出感度の関係を検討した。その結果、双腕ロボットにプレート支持をして2軸同期の旋回運動を行った場合に生じる運動誤差に対して十分な検出感度を有しており、現場的にも有効な手法であることが示された。

第6章では、産業用双腕ロボットの正面に作業プレートを保持する姿勢の中で、プレートの基本高さは一定にしたまま水平方向に保持位置を変化させてボールの転がり運動を操る場合について調べた。特に、工場現場で産業用ロボットに用いられているPoint to Point指令(ティーチング・プレイバック方式による作業指令)をベースにして指令角度を三角波で与えた場合について

のプレートの旋回運動の誤差を考察して、双腕ロボットによる支持の特徴に起因する現象を解明した。さらに誤差要因の DBB 診断に基づき、現場で容易にオンラインプログラミングするための方法を検討した。その結果、双腕ロボットの左右非対称なプレート操り姿勢において、姿勢が決まれば DBB 法を用いて現場で両腕間に生じる相対運動誤差を計測し、周波数特性（運動周期）も含めてその誤差マップからティーチング後に補正を加えることが可能であることがわかった。すなわち、DBB 運動精度測定に基づき効率的に補正することで、種々の姿勢でも、4 点のティーチングで精度よくプレート上にボールの転がり円運動を実現する手法を示した。

第 7 章では、得られた結果とその要点および結論を総括した。

以上より、本論文では双腕ロボットが道具の一種であるプレートを操る運動について考察した。その中で、現場で簡易的に直交 2 軸の同期旋回運動の運動誤差を診断する方法として、作業プレート上に円軌道のボールの転がり運動を創成し、その転がり軌道の基準円に対する誤差に着目する新しい手法を提案した。その手法を用い、さらにその現象を解明することで、双腕ロボットの新たな応用方法として、工作機械の NC 制御に近い運動精度と産業用ロボットの自律性を両立するための指針を示すことができた。