The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	球面アクチュエータの高精度位置決め制御に関する研究
Author(s)	房安, 浩嗣
Citation	大阪大学, 2023, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/91936
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

様式３

論　文　内　容　の　要　旨

氏　名　（　　房安　浩嗣　　）	
論文題名	球面アクチュエータの高精度位置決め制御に関する研究

論文内容の要旨

産業用ロボットの分野では，近年，工作機械をはじめとする多くの機械が多軸化，多自由度化しており，多自由度の動作を実現するために，その自由度に応じて1自由度アクチュエータを組み合わせている。それらの装置では，各アクチュエータの位置決め誤差の累積により，ロボット先端の位置決め精度が低下するという課題がある。これに対して，球面駆動可能なアクチュエータを用いることで，機構小型化に加え，各自由度の回転軸が一点で交わることで逆運動学を幾何学的に解くことができ，高精度な位置決めと複雑な制御への対応が可能となる。

球面同期アクチュエータは，任意軸回りのトルクを制御可能なトルク発生式が提案されており，磁界解析等で事前取得したマグネットトルク定数行列とコギングトルクベクトルからなるトルクマップに基づき姿勢制御する方法が提案されている。しかしながら，解析および実測のトルクマップに相違がある場合，このモデル化誤差が位置決め精度を低下させるため，産業用ロボットである微細作業ロボットへの適用に対しては，トルクマップの解析精度が不十分であるという問題がある。さらに，球面同期アクチュエータのベース構造である永久磁石モータのコギングトルクは，製造時に設計値の2～3倍となる報告があり，球面アクチュエータにおいても同様の課題が存在する。

本研究では，微細作業ロボットへの球面同期アクチュエータの適用に向けて，理想状態での位置決め精度と量産ばらつきが生じた際の位置決め精度を向上させる方法を検討し，球面同期アクチュエータの高精度位置決め制御手法を提案した。

第1章では，産業用ロボットの技術動向をはじめ，球面同期アクチュエータを微細作業ロボットへ適用する際の課題や問題点などを示した。さらに先行研究の抱える課題を明らかにし，本論文の目的を示した。

第2章では，球面同期アクチュエータの動作原理に関して，任意軸まわりのトルクを制御可能なトルク発生式について述べ，3次元有限要素法による磁界解析で事前取得したトルクマップを用いて行う静トルク特性解析法を示した。本解析法を球面同期アクチュエータに適用し，静トルク特性解析における出力トルクの解析精度を検証し，微細作業ロボットへの適用には，トルクマップのモデル化誤差の低減が課題であることを明らかにした。

第3章では，アクチュエータ設計時などのばらつきのない理想状態におけるトルクマップのモデリング誤差の低減方法を検討した。球面同期アクチュエータの解析精度に影響を与える諸因子に対して，静トルク特性解析を適用し，磁極構造，要素分割法の検討等により，高精度化を実現した。さらに，磁界解析と制御シミュレータを連携させることで，トルクマップベース制御に対応した動トルク特性解析における閉ループ制御系を構築した。トルクマップに対してコギングトルクの隣接磁極影響の補正法を導入することで，高トルク密度である鉄心コイル型球面アクチュエータにおいて，先行研究における低トルク密度である空芯コイル型と同等の位置決め精度が得られた。これにより，微細作業ロボットへの適用に対して，アクチュエータ設計時などのばらつきのない理想状態としては十分な解析精度が得られ，本解析法の有用性が明らかになった。

第4章では，トルクマップベース制御法において，量産時の製造ばらつき誤差により解析および実測のトルクマップに相違がある場合に対して，深層強化学習であるDDPGを適用した電流補償器を導入し，位置決め精度を改善する手法を提案した。強化学習における各パラメータが位置決め精度に与える影響を解明し，統計的検定を行い，本手法に統計的優位性があることを明らかにした。

第5章では，試作機による実験環境を構築し動作特性を計測した。動トルク特性解析の結果と比較することで，本手法の有効性を確認し，実機においても深層ニューラルネットワークにより球面同期アクチュエータの複雑な駆動と強い非線形性に対応できることを示し，解析と実験の両面から本手法の有効性が明らかになった。

第6章では，各章の内容を総括し，本論文をまとめている。

様式 7

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏　名　（　房安　浩嗣　）			
論文審査担当者		（職）	氏　名
	主 査	教授	平田　勝弘
	副 査	教授	中谷　彰宏
	副 査	准教授	宮坂　史和
	副 査	教授	吉矢　真人
	副 査	准教授	土井　祐介
	副 査	講師	石原　尚

論文審査の結果の要旨

産業用ロボットの分野では，高精度な多自由度動作に向けて球面駆動可能なアクチュエータが研究されている。球面同期アクチュエータは，任意軸回りのトルクを制御するためにトルク発生式が用いられており，磁界解析などで事前に取得したトルクマップに基づき姿勢制御する方法が提案されている。しかしながら，解析と実測のトルクマップに相違があると，モデル化誤差が位置決め精度を低下させ，現状では，微細作業ロボットへ適用するにはトルクマップの解析精度が課題となっている。さらに，球面同期アクチュエータのベース構造である永久磁石型モータでは，製造時にコギングトルクが設計値の 2～3 倍となるとの報告もある。本論文では，球面同期アクチュエータの理想状態での位置決め精度と量産ばらつきが生じた際の位置決め精度を向上させる高精度位置決め制御手法を提案することを目的とする。

第 1 章では，産業用ロボットの技術動向を述べ，球面同期アクチュエータを微細作業ロボットへ適用する際の課題や問題点などを示している。さらに先行研究の抱える課題を明らかにし，本論文の目的を示している。

第 2 章では，球面同期アクチュエータの基本構成と動作原理を説明し，トルクマップを用いた静トルク特性解析法を述べている。本解析法を球面同期アクチュエータに適用し，出力トルクの解析精度を検証した結果，微細作業ロボットへの適用には，トルクマップのモデル化誤差が課題であることを明らかにしている。

第 3 章では，アクチュエータ設計時のばらつきのない理想状態におけるトルクマップのモデリング誤差低減方法を検討している。解析精度に影響を与える諸因子に対して，磁極構造，要素分割法を検討して高精度化を実現している。更に，磁界解析と制御シミュレータを連携させて，トルクマップベース制御に対応した動トルク特性解析における閉ループ制御系を構築している。トルクマップに対してコギングトルクの隣接磁極の影響補正法を導入し，高精度化に不利な高トルク密度の鉄心コイル型球面アクチュエータにおいて，先行研究である低トルク密度の空芯コイル型と同等の位置決め精度が得られ，寸法ばらつきのないモデルでは十分な解析精度が得られ，本解析法の有用性を確認している。

第 4 章では，量産時の製造ばらつき誤差により解析と実測のトルクマップに相違がある場合に対して，深層強化学習を適用した電流補償器を導入し，位置決め精度を改善する手法を提案している。強化学習における各パラメータが位置決め精度に与える影響を解明し，統計的検定を行い，本手法の優位性を確認している。

第 5 章では，試作機による実験環境を構築し動作特性を計測している。動トルク特性解析の結果と比較することで，本手法の有効性を確認し，実機においても深層ニューラルネットワークにより球面同期アクチュエータの複雑な駆動と強い非線形性に対応できることを示し，解析と実験の両面から本手法の有効性を明らかにしている。

第 6 章では，各章の内容を総括し，本論文をまとめている。

以上のように，本論文では球面同期アクチュエータの高精度位置決め制御手法を提案し，その有効性を明らかにしており，今後の球面同期アクチュエータの研究とその応用技術の発展に寄与するものであるといえる。

よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。