

## 論文審査の結果の要旨および担当者

報告番号	※ 甲 第 14238 号
------	---------------

氏 名 河合 宏明

### 論 文 題 目

モーションコントロールシステムにおけるモータドライブのためのモデル予測制御に関する研究  
(Model Predictive Control for Electric Motor Drives in Motion Control System)

### 論文審査担当者

主査	名古屋大学	工学研究科	教授	道木 慎二
委員	名古屋大学	未来材料・システム研究所	教授	片山 正昭
委員	名古屋大学	工学研究科	教授	長谷川 浩
委員	千葉大学	工学研究院	准教授	残間 忠直

## 論文審査の結果の要旨

河合宏明君提出の論文「モーションコントロールシステムにおけるモータドライブのためのモデル予測制御に関する研究」は、モーションコントロールを支えるモータドライブの高機能化・高応答化を目指し、有限状態モデル予測制御 (Finite Control Set - Model Predictive Control : FCS-MPC)の適用を検討し、その可能性を明らかにしたものである。各章の概要は以下の通りである。

第1章では、背景、モーションコントロール用途に向けたモータドライブの制御モードと要求特性、FCS-MPCの特徴を述べ、研究の目的及び設定課題を明示した。研究の背景として産業分野ではモータドライブのモーションコントロールへの適用が拡大している点を挙げ、システム全体の性能向上や新機能創出におけるモータドライブの駆動制御応答性の重要性を説明した。次に、モーションコントロールにおけるモータドライブの役割を踏まえ、速度制御速度制御、停止動作のためのサーボブレーキ制御、電流制御を対象として設定した。加えて、モータ制御に対する要求特性として、制御応答性に関わるオーバーシュート量抑制や外乱印加時の偏差や目標値への到達時間削減と、低振動・騒音、高効率運転のための電流脈動抑制を設定し、本研究で提案する制御手法の方針を明らかにした。

第2章では、本研究で対象とする永久磁石同期モータ(Permanent Magnet Synchronous Motor: PMSM)と電圧形インバータから構成されるドライブシステムのモデル化、FCS-MPCによるモータ制御のアルゴリズムについて述べ、シミュレーションにより制御性能を明らかにした。FCS-MPCは、カスケードフリー構造の速度制御と電流制御の2つの制御モードを対象に、負荷トルクオブザーバの構成や予測に用いる数理モデルを含めて、その制御のフローについて説明した。シミュレーションによる性能検証では、速度制御及び電流制御において、一般的な制御手法であるベクトル制御とも比較し、速度及び電流制御ともに駆動応答性の面では優位性を有することを確認した。一方で、負荷トルクの推定応答性によって速度制御性能の低下を引き起こす、定常状態において顕著な電流脈動が発生する結果も得られ、前述の設定課題の妥当性を確認した。

第3章では、FCS-MPCによるカスケードフリー制御において安定かつ負荷トルク変化に対して応答性の高い推定を実現するため、オブザーバゲインの調整方法を提案した。提案手法では、FCS-MPCにおける予測速度と負荷トルクの間関係を、オブザーバゲインを含んだ伝達関数として定式化し、伝達関数の安定性及び応答を指標とすることで適切なゲイン値を決定する。シミュレーション及び実機実験では、提案手法で決定したゲイン値を負荷トルクオブザーバに適用することで、加減速動作や負荷トルク印加に伴う条件下でも、カスケードフリー構造で安定かつ高応答な駆動制御が可能であることを示した。

第4章では、駆動制御応答性と応答性と低電流脈動の両立のため、新たな出力電圧候補と変調手段を導入した新たなFCS-MPCを提案し、速度制御に適用した内容について述べた。FCS-MPCでは、最適解の探索領域が、出力可能な電圧に対応する8点に限定されており、電流脈動を引き起こす要因であることに着目し、FCS-MPCのシンプルな最適化プロセスを維持しつつ、より望ましい最適解探索領域を設定する手法を提案した。この提案手法をカスケードフリーの速度制御に適用し、その制御アルゴリズムを説明した上で、シミュレーション及び実機実験により性能検証を行った。従来のFCS-MPCと同等の駆動制御応答性を実現し、かつ定常状態における電流脈動を効果的に抑制できる結果を示し、有効性を明らかにした。

第5章では、第4章で述べたFCS-MPCと、新規に提案する評価関数を用いて、サーボブレーキ制御器を構成した内容について述べた。停止位置に追従させるため、角度位置と速度から成る停止位置までの目標軌道を取り入れ、かつ速度制御との切り替えを可能とする評価関数を提案した。シミュレーションと実機実験により、負荷トルクが印加される条件においても、目標角度位置に追従できること、速度制御とのシームレスな切り替えが可能であることを示した。

第6章では、電流制御電流制御における制御応答性と低電流脈動の両立を目的に、第4章にて提案したFCS-MPCに、出力電圧候補生成時の平滑度を可変にする機能を加えた制御器を提案した。電流制御では、制御プラントが時定数の小さいモータの電気回路のみとなり、ロータの機械的なダイナミクスを含む速度制御等と比較すると、制御器にはより高い応答性が求められる。そこで駆動状況によって出力電圧を生成する際の平滑度を可変にし、特に過度状態特に過度状態における制御応答性の向上を図った。シミュレーション及び実験により、従来のFCS-MPC及び平滑度を一定とした提案した提案FCS-MPCと比較し、制御制御応答性と定常性能の両立に有効であることを示した。

第7章では、研究成果について総括し、研究成果の適用先拡大や実用化に向けた今後の課題について述べている。

以上の様に本論文では、モーションコントロールを支えるモータドライブの高機能化・高応答化に向けたFCS-MPCの問題を明らかにした上で解決法を示し、実用化への道を拓いた。これらの成果は、モータドライブによる

## 論文審査の結果の要旨

MPCの問題を明らかにした上で解決法を示し、実用化への道を拓いた。これらの成果は、モータドライブによるモーションコントロールの適用拡大と高度化を実現するために重要であり、工学の発展に寄与するところが大きいと判断できる。よって、本論文の提出者である河合宏明君は博士（工学）の学位を受けるに十分な資格があると判断した。