

# 主論文の要約

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)

氏名 河合 宏明

## 論文内容の要約

産業分野における多くの機器・設備・装置において、モータドライブの適用が急速に拡大している。例えば電気自動車では、環境負荷低減や高効率化に留まらず、モータ制御を駆使することで、内燃機関では困難な、滑らかかつ速やかな加減速を可能とする動作特性が実現されている。工作・加工機械においても、サーボモータと制御技術の組み合わせにより、更なる加工精度の向上やタクトタイム削減に向けた開発が進められている。これらの例に見られるように、モータドライブで実現される優れたモーションコントロール性能は、システム全体の性能向上や新たな機能の創出において重要な位置付けを占めている。その上で、モータドライブの制御の観点では、駆動中の電流脈動を抑制し、モータの特長である低振動・騒音、高効率な特性を発揮させることはもとより、モーションコントロール性能に直結する制御応答性の向上が重要な課題となる。

本論文では、モーションコントロール用で望まれる高い制御応答性を備え、かつモータの低振動・騒音、高効率な運転特性のための低電流脈動を実現する制御手法の構築を目的に、モデル予測制御の一つである、Finite Control Set Model Predictive Control (FCS-MPC) を基にした制御手法を提案し、その成果をまとめた。

以下に、各章の概要を示す。

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、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。またモータの制御手法について、提案手法の基となる FCS-MPC の特徴を他の制御手法とも比較しながら整理した。FCS-MPC は、高い駆動応答性を有しながらシンプルな最適化プロセスで実装できる点、負荷トルクオブザーバを用いることで、駆動制御応答性の向上に有利なカスケードフリー構造で速度、サーボブレーキ制御器を容易に実現できることからモーションコントロール用途においても有力な手法であることを示した。最後に、FCS-MPC の実用化に向けた問題点をもとに、本研究で取り組む以下 2 点の課題を設定した。

1) FCS-MPC の制御応答性と安定性を両立する負荷トルクオブザーバのゲイン調整方法の確立

2) 定常状態における電流脈動低減と過渡状態における制御応答性の両立

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ながら、性能を評価した。結果、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。

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接関係を、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。

4 章では、駆動制御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た。そこで提案手法では、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ことを狙った。具体的には、デジタルフィルタを使用した平滑処理により生成する新たな出力電圧候補と、それを出力するための変調手段を FCS-MPC に導入した。変調器の利用を前提とすることで、従来の FCS-MPC で生じていた探索領域の制約を解消することができ、これまでに不可能であった領域での最適解の探索が可能となる。また、最適解候補の数、すなわち最適化処理において必要となる繰り返し演算の回数は従来の FCS-MPC と同一であり、演算負荷を増大させることなく、制御目標に到達する上で、より望ましい電圧の選択と出力が実現できる。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。

5 章では、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。

6 章では、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、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 FCS-MPC と比較し、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。

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た。