

# ナノスケールサーボのための 制御応用技術

ナノスケールサーボのための制御応用技術協同研究委員会編

	目	次
1.	はじめに	3
1.1	本技術報告書の発刊にあたり	3
1.2	各章の構成	3
1.3	今後の展開	5
1.4	委員会の開催履歴と関連研究会発表	5
2.	マストレージのナノスケールサーボ	6
2.1	ハードディスクドライブのヘッド位置決め制御	6
2.2	ハードディスク装置における Self-servo Track Writing システムの設計	11
2.3	転がり摩擦の動特性を考慮した磁気ヘッド位置決め制御系の設計	15
2.4	光ディスクのための高速高精度制御系の設計	21
3.	産業応用精密位置決め装置のナノスケールサーボ	26
3.1	工作機械用ボールねじ駆動ステージにおける摩擦モデリングと補償	26
3.2	LuGre モデルに基づく摩擦補償制御	30
3.3	転がり摩擦モデルに基づく位置決め整定時の遅い応答の要因考察とモード切り換え摩擦補償	36
3.4	テーブル駆動装置の外乱および干渉モデリングと高速高精度位置決め制御	42
3.5	ガルバノスキャナ位置決め装置の目標軌道設計による高速化の検討	48
3.6	ガルバノスキャナにおける電流アンプの低電圧化を目指した終端状態制御による軌道設計法	52
3.7	静圧空気軸受式モータの摩擦特性と位置決め制御	58
4.	ナノスケールサーボのための制御基盤技術	64
4.1	精密位置決めにおける実用的制御技術	64
4.2	柔軟構造物のパワーアシスト搬送のための制振から位置決めへの切り換え制御手法	70
4.3	完全追従制御を用いたモード切り換え制御系の設計	75
4.4	ダンパを有する精密位置決め装置の特性解析と制御	80
4.5	スペクトラルモデルによるナイキスト線図上での制御器設計	86
4.6	限定極配置法による制御パラメータ設計	92
4.7	利得指定による IIR フィルタの設計法と SCILAB 用プログラム	98
5.	ナノスケールサーボの将来展望と課題	102

## ナノスケールサーボのための 制御応用技術協同研究委員会委員

委員長 岩崎 誠(名古屋工業大学)  
幹事 伊藤 和晃(豊田工業高等専門学校)  
幹事 松家 大介((株)日立製作所)  
幹事補佐 白石 貴行(横浜国立大学)  
委員 熱海 武憲((株)日立製作所)  
五十嵐 洋一(日本精工(株))  
石川 潤(東京電機大学)  
伊藤 博(九州工業大学)  
内田 博((株)日立GST)  
浦川 禎之(ソニー(株))  
呉 世訓(東京大学)  
大石 潔(長岡技術科学大学)  
大内 茂人(東海大学)  
奥山 淳(東海大学)  
小田井 正樹((株)日立製作所)  
小野 裕幸( )  
川福 基裕(名古屋工業大学)  
小出 大一( N H K )  
佐藤 孝雄(兵庫県立大学)  
関 健太(名古屋工業大学)

委員 高木 清志(キヤノン(株))  
高倉 晋司((株)東芝)  
遠山 聡一(日立ピアメカニクス(株))  
長縄 明大(秋田大学)  
中村 裕司((株)安川電機)  
原 進(名古屋大学)  
原 武生(東芝ストレージデバイス(株))  
坂東 信尚(宇宙航空研究開発機構)  
平田 光男(宇都宮大学)  
藤本 博志(東京大学)  
二見 茂((株)システムの機能研究所)  
堀 洋一(東京大学)  
山浦 弘(東京工業大学)  
山口 敦史((株)ニコン)  
山口 高司((株)リコー)  
執筆 弓場井 一裕(三重大学)  
協力者 星野 大貴(東京電機大学)  
前田 佳弘(名古屋工業大学)  
佐藤 海二(東京工業大学)  
木坂 正志(MKサーボ開発)

# 1 はじめに

## 1.1 本技術報告書の発刊にあたり

本協同研究委員会は、前身である「ナノスケールサーボのための制御技術の共通基盤協同研究委員会<sup>(1)</sup>」で培った産業分野横断型制御技術の共通基盤調査、およびそれらの相互活用の可能性に関する基礎的な知見整理・体系化を基に、各産業分野間で知識をさらに融合して相互に役立てる方法論、すなわちナノスケールサーボの制御理論応用および設計・実装に関する普遍的方法論への展開を目的として発足した。そこでは、ナノスケールサーボの制御技術について網羅的調査を中心に継続すると同時に、応用可能な制御・信号処理などの方法論や産業機器に対する技術展開・応用例の整理を実施した。

ナノスケールの高速高精度位置決めを始めとする関連モーションコントロール技術は、家電・ユビキタス機器、ストレージデバイス・情報機器、そして様々な産業機器・FA システムの中核をなす要素技術の一つである。従って、我が国が技術立国として今後も世界をリードしていくに当たって、ナノスケールサーボはものづくりを支える重要な学問分野の一領域として益々重要になっていくであろう。このような背景の下、電気学会では、1999年6月に「マストレージシステムのための新しいサーボ技術調査専門委員会<sup>(2)</sup>」が発足し、続いて「マストレージシステムのための超精密高速サーボ技術調査専門委員会<sup>(3)</sup>」(2001年10月発足)、「マストレージシステムのための次世代サーボ技術調査専門委員会<sup>(4)</sup>」(2003年12月発足)、さらに「ナノスケールサーボのための新しい制御技術協同研究委員会<sup>(5)</sup>」(2006年2月発足)、そして上述の「ナノスケールサーボのための制御技術の共通基盤協同研究委員会<sup>(1)</sup>」(2008年3月発足)において、様々な技術調査やサーボ方式検討を継続し、数々の成果を挙げて現在に至っている。本委員会では、これら一連の成果をさらに発展させ、引き続き実践的な知の共有と技術の社会還元で産業界へ貢献し、そして各分野間で知識を融合し相互にこれを役立てる方法論、すなわちナノスケールサーボの制御理論応用および設計・実装に関する普遍的方法論に関する議論を目指してきた。それらの議論と成果を纏めたものが本報告書である。以下では、各章の内容を概観し、最後に今後の活動展開について述べる。

## 1.2 各章の構成

本報告書では、ナノスケールサーボの応用領域を大きく3つに分類し、それぞれの製品やシステムに特化した、または共通するサーボ関連技術を纏めている。すなわち、2章ではハードディスクを始めとする各種マストレージデバイスに対するナノスケールサーボ技術を、3章では工作機械や加工機械など各種産業応用精密位置決め装置に対するナノスケールサーボ技術を、4章ではナノスケールサーボのための制御基盤技術を、それぞれ議論している。そして最後に、5章ではナノスケールサーボ技術に関する将来展望と課題について纏めている。

まず2章では、ハードディスクや光ディスクなどのマストレージデバイスのためのナノスケールサーボ技術を概説する。

2.1節では、熱海武憲委員に、「ハードディスクドライブの

ヘッド位置決め制御」と題して、制御系のループ整形とその可視化について纏めていただいた。本手法は、ロバスト制御性能を満たす条件をオープンループ特性の周波数応答上で可視化することのできる“Robust Bode plot”を用いて、制御系のループ整形を実現するものである。Robust Bode plot 法は、制御対象と目標となる重み関数を周波数応答として与えることができるため、モデル化などの煩雑な作業が不要、設計されるコントローラの次数も必要最小限にとどめることができる。

2.2節では、奥山淳委員に、「ハードディスク装置における Self-servo Track Writing システムの設計」と題して、Self-servo Track Writing システムの誤差伝播の影響を低減する新しいフィルタ設計法について纏めていただいた。本制御手法は、システムの誤差伝播影響の低減に際して、前のトラックにおける位置誤差の周期成分を採取して記憶しておき、それをフィルタ処理することで補償信号を生成するものである。

2.3節では、川福基裕委員に、「転がり摩擦の動特性を考慮した磁気ヘッド位置決め制御系の設計」と題して、磁気ディスクのピボット軸受け周りに働く摩擦のモデル化と補償法について纏めていただいた。本手法では、磁気ヘッドの慣性力を考慮した転がり摩擦特性の動特性解析を基に、高速動作時に資する転がり摩擦の動特性モデルを構築している。そして、その動特性モデルベースのフィードフォワード型摩擦補償法を、磁気ディスク装置のショートスパン制御に適用している。

2.4節では、大石潔委員に、「光ディスクのための高速高精度制御系の設計」と題して、システムのモデリングとヘッドトラッキング制御系設計について纏めていただいた。本手法では、精密な実機数学モデルの導入により、実機応答を高精度で再現可能な数値シミュレーターを構築でき、それを用いた光ディスクヘッドのトラッキング制御系設計を実施している。

次に3章では、工作機械用精密ステージに対する摩擦モデリングと補償、およびレーザ加工機用ガルバノスキャナに対する高速高精度位置決めに関するナノスケールサーボ技術を概説する。

3.1節では、藤本博志委員に、「工作機械用ボールねじ駆動ステージにおける摩擦モデリングと補償」と題して、ボールねじ駆動ステージに働く摩擦のモデル化と補償について纏めていただいた。本研究は、摩擦モデリングの精度がボールねじ駆動ステージの追従誤差に与える影響を解析し、数式ベースのGMSモデルと提案するデータベース摩擦モデルを実機で比較検討し、データベース摩擦モデルの有効性を示したものである。

3.2節では、石川潤委員と星野大貴氏(東京電機大)に、「LuGre モデルに基づく摩擦補償制御」と題して、LuGre モデルを用いた時変の摩擦推定オブザーバの一構成法について纏めていただいた。本手法では、摩擦モデルとして LuGre モデルを扱うことを前提に、ボールねじ駆動の直動ステージの位置決め挙動からそのモデルパラメータを求める。そして、パラメータを同定した LuGre モデルに基づく時変外乱オブザーバを設計し、摩擦補償に適用している。

3.3節では、岩崎誠委員と前田佳弘氏(名古屋工大)に、「転がり摩擦モデルに基づく位置決め整定時の遅い応答の要因考