

# ナノスケールサーボのための 革新的な制御技術

ナノスケールサーボのための革新的な制御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	4	
1.4 委員会の開催履歴と関連研究会発表	4	
2. マスストレージにおける高速・高精度な位置決め 制御技術	6	
2.1 サポートベクタマシンによるシーク終了判定	6	
2.2 速度特性を有する摩擦モデルを用いたショ ートスパンシーク時の高精度軌跡追従制御	10	
2.3 HDD の回転周期振動を補償する制御手法	16	
2.4 光ディスク装置の直列 2 段フィードフォ ワード制御系の一検討	22	
3. 産業機器における高速・高精度な位置決め制 御技術	28	
3.1 自己共振相殺制御と精密位置決めステー ジへの応用事例紹介	28	
3.2 SPM モータの高速位置決め制御のため の力積に基づいた電流プロファイル作成 手法	34	
3.3 ガルバノスキャナにおける軸受性能低 下の定量化と位置決め性能への影響分 析手法の検討	40	
3.4 粗微動間連結分離機構を有する新たな 精密位置決めステージの制御法	44	
3.5 共振周波数変動に対するロバスト性を 考慮した 2 段アクチュエータ荷重制御 系の設計	50	
3.6 他軸への干渉力と環境への衝撃力を 考慮したテーブル装置の位置指令生 成	56	
4. ナノスケールサーボのための制御基盤技 術と応用展開	62	
4.1 周波数応答を用いた Nyquist 線図上 での性能制約を満たす多変数制御器 設計	62	
4.2 円条件に基づくプラント変動に対 するロバスト FB 補償器設計	67	
4.3 モード影響定数行列を用いた多慣性 系の制御系設計	73	
4.4 バイラテラル制御やパワーアシスト 制御	77	
4.5 ねじれ回転する吊り荷を有する旋 回クレーンの振れ止め制御	83	
4.6 二関節筋を有する下肢ロボットの FF 制御	87	
5. 次期委員会に向けて	93	

# ナノスケールサーボのための革新的な制御技術 協同研究委員会委員

委員長 奥山 淳(東海大学)  
幹事 関 健太(名古屋工業大学)  
幹事 白石 貴行(東京都立産業技術高等専門学校)  
委員 石川 潤(東京電機大学)  
伊藤 和晃(豊田工業高等専門学校)  
岩崎 誠(名古屋工業大学)  
内田 博((株)HGST Japan)  
浦川 禎之(ソニー(株))  
大石 潔(長岡技術科学大学)  
大内 茂人(東海大学)  
小田井 正樹((株)日立製作所)  
小野 裕幸( )  
川福 基裕(大同大学)  
小出 大一(NHK 放送技術研究所)  
坂田 晃一((株)ニコン)  
佐藤 孝雄(兵庫県立大学)  
高木 清志(キヤノン(株))

委員 高倉 晋司((株)東芝)  
長縄 明大(秋田大学)  
中村 剛(日本精工(株))  
中村 裕司((株)安川電機)  
原 進(名古屋大学)  
原 武生((株)東芝)  
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(THK(株))  
堀 洋一(東京大学)  
松家 大介((株)日立製作所)  
宮崎 敏昌(長岡技術科学大学)  
藪井 将太((株)HGST Japan)  
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 矢崎 雄馬(東京大学)

# 1 はじめに

## 1.1 本技術報告書の発刊にあたり

本協同研究委員会の前身であるマストレージシステム (MSS) を冠した委員会は 3 期 (6 年間) 続き、それを引き継いでナノスケールサーボ (NSS) を冠した委員会が開始され、この NSS を冠した委員会は本協同研究委員会で 4 期目 (8 年間) が終了となる (下記参照)。

- 1999 年 6 月～ 2001 年 5 月：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 (MSS1 委員会) (1, 2, 3)
- 2001 年 10 月～ 2003 年 9 月：マストレージシステムのための超精密超高速サーボ技術調査専門委員会 (MSS2 委員会) (4, 5, 6)
- 2003 年 12 月～ 2005 年 11 月：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 (MSS3 委員会) (7, 8, 9)
- 2006 年 2 月～ 2008 年 1 月：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 (NSS1 委員会) (10, 11, 12)
- 2008 年 3 月～ 2010 年 3 月：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 (NSS2 委員会) (13, 14, 15)
- 2010 年 5 月～ 2012 年 4 月：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 (NSS3 委員会) (16, 17, 18)
- 2012 年 8 月～ 2014 年 7 月：ナノスケールサーボのための革新的な制御技術協同研究委員会 (NSS4 委員会) (19, 20, 21)

この間、高速高精度な位置決め制御技術に関する知見を深めるとともに、これらの整理・体系化を行なってきた。特に NSS 委員会では、ナノメートルの精度で超高速かつ超高精度に位置決めを行う技術を「ナノスケールサーボ」と定義し、ハードディスク装置や光ディスク装置に代表されるマストレージシステムのみならず、レーザ加工機 (ガルバノスキャナ)、半導体および液晶基板の露光装置 (ステージ)、原子間力顕微鏡 (AFM) などを含めて、ナノスケールサーボ制御技術について網羅的調査を実施してきた。

本協同研究委員会は、ナノスケールサーボ制御技術を中心とした先端制御技術とその産業応用について網羅的調査を継続するとともに、アクチュエータ、センサ、ドライバなどの制御系設計以外の要素技術にも目を向け、これら要素技術の設計・実装に関する普遍的方法論について議論・検討することを目的として発足した。こ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

本報告書は、内容的に以下の 3 つに分けられる。

- マストレージにおける高速・高精度な位置決め制御技術に関する課題と動向 (2 章)
- 産業機器における高速・高精度な位置決め制御技術に関する課題と動向 (3 章)

- ナノスケールサーボ制御の応用展開に関する課題と動向 (4 章)

まず 2 章では、マストレージに特化して、その高速・高精度な位置決め制御技術について纏めている。次に 3 章では、ステージやガルバノスキャナなど、各種産業機器における高速・高精度な位置決め制御技術について纏めている。続く 4 章では、共通する制御技術を纏め、ナノスケールサーボ制御の応用展開について議論している。そして最後に 5 章では、次期委員会に向けた展望と課題について纏めている。

2.1 節では、平田光男委員に、「サポートベクタマシンによるシーク終了判定」と題して、制御対象の入出力データを用いてハードディスク装置のシーク終了判定を行う手法について纏めて頂いた。本手法は、シークが終了したときと未終了のときの制御対象の状態変数を分離する識別関数をサポートベクタマシンを用いてあらかじめ学習しておき、学習した識別関数を用いてリアルタイムにシーク終了を判定するものである。

2.2 節では、川福基裕委員に、「速度特性を有する摩擦モデル用いたショートスパンシーク時の高精度軌跡追従制御」と題して、実機において測定した転がり摩擦特性とピボット軸受の力学的な考察から実機特性を高精度に再現する摩擦モデルについて纏めて頂いた。本研究は、構築した摩擦モデルをハードディスク装置のショートスパンシーク制御時における FF 型摩擦補償器に適用し、その有効性を実験により示したものである。

2.3 節では、藪井将太委員に、「HDD の回転周期振動を補償する制御手法」と題して、ハードディスク装置のヘッド位置決め制御系に加わる周期外乱を補償する制御手法について纏めて頂いた。本研究は、共振フィルタ、Adaptive Feedforward Cancellation (AFC)、繰り返し制御の 3 種類の制御手法の比較を行い、それぞれの制御系の特徴を明らかにしたものである。

2.4 節では、宮崎敏昌委員に、「光ディスク装置の直列 2 段フィードフォワード制御系の一検討」と題して、光ディスク装置における高速・高精度なトラッキング制御系の設計手法について纏めて頂いた。本研究では、等価完全追従制御に基づくロバスト 3 重制御系を用いた新しいトラッキング制御系を提案している。

3.1 節では、坂田晃一委員に、「自己共振相殺制御と精密位置決めステージへの応用事例紹介」と題して、駆動側および負荷側ともに位置センサを配した 1 入力多出力系の枠組みで設計される自己共振相殺 (SRC) 制御技術について纏めて頂いた。本研究では、この SRC 制御技術を XY ガントリステージへ適用し、実機検証によりその有効性を示している。

3.2 節では、大石 潔委員に、「SPM モータの高速位置決め制御のための力積に基づいた電流プロファイル作成手法」と題して、SPM モータの加減速時において力積のバランスのとれた高速位置決め制御について纏めて頂いた。本研究では、電流プロファイル作成における各モードの力積に基づく切り替え手法を提案し、作成された電流プロファイルを実際に用いて高速位置決め制御が達成可能であることをシミュレーション及び実験によって確認している。

3.3 節では、松家大介委員に、「ガルバノスキャナにおける軸