

ナノスケールサーボのための 制御技術の共通基盤

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編

目 次

1. はじめに	3	4. 情報記憶装置におけるナノスケールサーボ	43
1.1 本技術報告書の発刊にあたり	3	4.1 ナノを超える位置決め技術ー理論と実証ー	43
1.2 各章の構成	3	4.2 遅れ時間を考慮したデジタルPID 制御系 設計と産業用ロボットおよび光ディスク ドライブへの適用	49
1.3 今後の展開	6	4.3 15000rpm 薄型光ディスクー放送アーカイブ 用記録メディアを目指してー	55
1.4 委員会の開催履歴	6	4.4 薄板化ディスクによる近接場光ディスク システムの高転送レート化技術	59
2. 高速移動・高精度追従のための目標軌道の生成 およびフィードフォワード制御	7	5. 産業機器におけるナノスケールサーボ	64
2.1 時間多項式を用いたショート スパンシーク制御	7	5.1 半導体露光装置とそのステージ機構の現状	64
2.2 多項式入力型終端状態制御による 制振軌道設計	13	5.2 ダイレクトドライブモータの位置決め制御	69
2.3 半導体露光装置用ステージのLPV 型 反復学習制御	18	6. ナノスケールサーボと大学での産学連携研究	73
2.4 マルチレート制御とむだ時間補償に基づく 精密実験ステージのマスタ・スレーブ 同期位置制御	22	6.1 はじめに	73
3. ナノスケールの位置決めを阻む摩擦を 補償する技術	27	6.2 供試装置と制御系基本仕様	73
3.1 テーブル装置における非線形摩擦の モデリングと位置決め制御への応用	27	6.3 有限ステップ整定FF 補償による複数 ストロークの位置決めへの対応	74
3.2 非線形性を有するシステムへの ハイブリッド制御アプローチ	33	6.4 制御入力飽和とプラントパラメータ変動に 対するロバスト性への対応	75
3.3 ピボット摩擦を考慮した磁気ヘッド 位置決め制御系設計	37	6.5 プラントパラメータ変動に対する適応化	76
		6.6 あとがき	77

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

委員長 石川 潤(東京電機大学)
幹事 川福 基裕(名古屋工業大学)
幹事 奥山 淳(東海大学)
幹事補佐 呉 世訓(東京大学)
委員 熱海 武憲((株)日立製作所)
五十嵐 洋一(日本精工(株))
石本 努(ソニー(株))
伊藤 和晃(豊田工業高等専門学校)
伊藤 博(九州工業大学)
高木 清志(キヤノン(株))
岩崎 誠(名古屋工業大学)
内田 博((株)日立グローバルストレージテクノロジーズ)
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)
小野 裕幸(アトム技研)
鈴木 啓之(東芝ストレージデバイス(株))
小出 大一(NHK放送技術研究所)

委員 佐藤 孝雄(兵庫県立大学)
高倉 晋司((株)東芝)
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)
藤岡 久也(京都大学)
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)
弓場井 一裕(三重大学)
楊 曉峰((株)ニコン)

執筆 上野 藤丸(宇都宮大学) 2.2節
協力者 坂田 晃一(横浜国立大学) 2.4節

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ともいえる「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」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なう技術を「ナノスケールサーボ」と定義した。そして、磁気ディスク装置、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、半導体および液晶露光装置（ステッパ、スキャナ）や原子間力顕微鏡（AFM）までも含めて、ナノスケールサーボの制御技術に関する知見を深め、これを整理・体系化した⁽¹⁾。このように分野ごとの最先端技術の研究開発の現状が明らかとなった一方で、各分野間で知識を融合し、相互にこれを役立てるための方法論の検討については、前委員会で十分に議論を行う時間が確保できず、今後、引き続き検討すべき課題となっていた。本協同研究委員会では、これまで分野ごとに行われてきた制御技術に関する調査を分野横断的に実施することに力をいれた。とくに、知識として分野ごとに偏在していた位置決め誤差要因解析のノウハウと、その原因への対策について、調査を網羅的に行うことにした。同時に、分野間の知識の共有と制御問題解決のためのベストプラクティスの体系化を推進することを目的として、ナノスケールサーボの制御理論応用および設計・実装に関する共通の方法論を見出していくための道筋を探ることに注力した。

ナノスケールの高精度かつ高速な位置決めとモーションコントロール技術に対するニーズは、家電分野でも市場拡大が見込まれるハードディスク装置やその他のマストレージシステムの技術開発をはじめ、技術立国・日本をナノテクノロジー分野で支えるものづくりのさまざまな現場においても、今後ますます大きくなっていくと予想される。すでにモータなどアクチュエータ単体でいえば、ナノスケールの精度を標ぼうする製品が数多く出荷されている。しかしながら、これらのアクチュエータをシステムとしてインテグレーションした装置全体の精度・高速性となると市場のニーズを十分に満足しているとはいえず、産業分野を横断した知識の融合による新たな統一的な制御系設計論の体系化が望まれている。このような状況の下、電気学会では、1999年6月から2001年5月にかけての「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⁽²⁾」、2001年10月から2003年9月にかけての「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⁽³⁾」、2003年12月から2005年11月にかけての「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⁽⁴⁾」、そして上記の「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⁽¹⁾」において技術調査・方式検討を継続し、数々の成果をあげ、現在にいたっている。本委員会は、こ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という形で産業界へ貢献すべく議論が

行われてきた。その成果をまとめたものが本技術報告書である。本報告では、とくに分野横断の技術の共通基盤となりうる「目標軌道生成とフィードフォワード制御による高速・高精度位置決め制御」と「摩擦などの外乱のフィードバック制御による補償制御」を中心に、それらの技術の現状と相互活用の可能性について知見を深め整理した。以下、本章では、各章の内容を概観し、今後の活動の展開について述べる。

1.2 各章の構成

まず2章では、ナノスケールの高速・高精度サーボ技術を実現するための目標軌道の生成法と、その目標軌道を有効に活用するためのフィードフォワード制御技術についてまとめた。

2.1節では、熱海武憲委員に、「時間多項式を用いたショートスパンシーク制御」と題して、位置決め整定時の残留振動を抑える目標軌道の生成法についてまとめていただいた。本手法は、機構系共振の振動振幅を推定可能な衝撃応答スペクトラム(SRS, Shock Response-Spectrum) 解析を用いて、ハードディスク装置のショートスパンのトラックシーク動作の制定時に観測される残留振動を分析し、その解析結果を利用してシーク動作に適した残留振動の少ない目標軌道を多項式から生成する手法である。従来、特に製品として出荷されるハードディスク装置に実装される目標軌道の生成アルゴリズムは、軌道生成のためのパラメータをシーク距離別の区間に分けてテーブルで持つ手法が、メモリ量の制約などから一般的となっていた。この従来手法では、分割区間のシーク距離の長い方にあわせて（短い距離はより短時間で移動できるにも関わらず）、シーク時間が設計されるため、装置全体としての高速化の障害となっていた。2.1節で解説される手法は、この問題点を解決することを一つの目的としている。シーク開始および終了の境界条件として、位置、速度、加速度、ジャークの様々な組み合わせを考慮することができ、その境界条件に応じた目標軌道の生成多項式を導出することができる。また、離散された制御対象のモデルをベースにしているため、0次ホールドの影響が正確に考慮されているところも特長である。

2.2節では平田光男委員に「終端状態制御による制振軌道設計」と題して、位置決め時の初期条件と終端条件の制約もとで、ある評価関数を最小とするフィードフォワード入力を求める終端状態制御について解説いただいた。具体的には、周波数領域で重みをかける方法、長距離の移動を行う際に速度一定区間を設ける方法、軌道を多項式から求める方法、さらに軌道の対称性を利用する方法が解説される。とくにハードディスク装置のように位置決め時間が数から十数サンプリング時間程度となるような制御系では、目標軌道の終端条件に対する制御は重要であり、解説される手法は、周波数重みにより共振周波数に対応する振動を励起しない軌道が生成できることを特長としている。また、多項式を用いることで軌道を記憶するメモリ量を節約できる