

精密サーボシステムにおける 共通基盤技術

精密サーボシステムのための共通基盤技術調査専門委員会編

	目	次
1. はじめに	03	
1.1 本技術報告の発刊にあたり	03	
1.2 委員会の活動報告	03	
1.3 各章の構成と概要	03	
1.4 今後の展開	05	
2. 各種メカトロニクス機器における精密サーボ技術	06	
2.1 HDD に適用される精密サーボ技術	06	
2.2 光ディスクドライブに適用される精密サーボ技術	11	
2.3 大型超精密位置決めステージにおける精密サーボ技術	15	
2.4 電子部品実装ロボットの精密サーボ技術	21	
2.5 包装機械における精密サーボ技術	25	
2.6 モーションコントロール市場におけるサーボドライブ開発の事例 ～Σ-7 シリーズ～	29	
3. 精密サーボシステムのための要素技術と制御応用	33	
3.1 拡張型 AFC による HDD の外乱補償	33	
3.2 カスケード型位置制御系の次数とパラメータの同時最適化	38	
3.3 規範モデルを用いない周波数応答を用いた制御器設計	44	
3.4 PWM 型入力を有する二重積分系の出力完全追従制御	50	
3.5 多関節ロボットの制御	54	
3.6 形状可変鏡の波面制御	60	
3.7 任意の振動モード検出のためのひずみセンサ位置探索システム	65	
4. 多入出力系に拡張した新しい精密サーボ技術	69	
4.1 多入力多出力系に対するマルチレートフィードフォワード制御	69	
4.2 自己共振相殺制御をマイナーループに持つ P-PI 制御系の周波数応答を用いた自動設計	75	
4.3 加速度フィードバックによる位置決め装置の相対振動制御	81	
4.4 ダブルエンコーダシステムによる外乱補償に基づく二慣性共振系のねじれトルク制御	86	
5. あとがき	91	

精密サーボシステムのための共通基盤技術調査専門委員会委員

委員長	関 健 太(名古屋工業大学)	委 員	鈴木 孝 輔(ピアメカニクス(株))
幹 事	坂田 晃一((株) ニコン)		関口 裕 幸(三菱電機 (株))
幹 事	藪井 将太(名古屋大学)		高倉 晋 司((株) 東 芝)
幹事補佐	李 堯 希(東京大学)		竹 内 一 生(株)東京自働機械製作所)
委 員	熱海 武憲(千葉工業大学)		田 中 淑 晴(豊田工業高等専門学校)
	伊藤 和晃(岐阜大学)		寺 田 祐 貴(DMG 森精機 (株))
	石 川 潤(東京電機大学)		遠 山 聡 一(サイバネットシステム (株))
	岩 崎 誠(名古屋工業大学)		永 田 良((株) F U J I)
	浦川 禎之(日本工業大学)		中 邨 勉(ファナック (株))
	大 西 亘(東京大学)		原 武 生(東芝デバイス&ストレージ (株))
	小川 博紀((株)日立製作所)		平田 光男(宇都宮大学)
	奥 山 淳(東海大学)		藤本 博志(東京大学)
	桂 誠一郎(慶應義塾大学)		二 見 茂(T H K (株))
	川 福 基裕(大同大学)		宮 崎 敏 昌(長岡技術科学大学)
	北 吉 良平((株)安川電機)		山 口 高 司((株) リ コ ー)
	齊 藤 英一(三菱電機 (株))		山 元 純 文((株) ハーモニック・ドライブ・システムズ)
	酒井 健史(オークマ (株))		弓場井 一裕(三重大学)
	白 石 貴 行(鹿児島工業高等専門学校)	執筆協力者	前 匡 鴻(東京大学)

1. はじめに

1.1 本技術報告の発刊にあたり

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「ナノスケールサーボ」は、ハードディスク装置や光ディスク装置、半導体製造装置や工作機械などの産業機器において、製品の最終性能を決定するコア技術である。電気学会産業応用部門では、1999年から2005年にマストレージシステムを冠した調査専門委員会が3期設置され、主にハードディスク装置や光ディスク装置などのマストレージシステムにおける実践的な高精度位置決め制御系の設計に関する議論と技術の体系化が行われた⁽¹⁾⁻⁽³⁾。その後、マストレージシステムのみならず、半導体や液晶パネル製造装置の精密位置決めステージ、ガルバノスキャナ、原子間力顕微鏡などに対象を広げ、ナノスケールサーボを冠した共同研究委員会として4期の委員会が、2006年から2014年に亘りコア技術である高速・高精度位置決め技術の水平展開と基盤技術の深化を図った⁽⁴⁾⁻⁽⁷⁾。そして、本調査専門委員会の前身である精密サーボシステムの多様性探求調査専門委員会では、これまでに培った位置決め技術を速度、加速度、力の次元へと垂直展開する可能性を探りながら、アクチュエータの駆動回路やセンサを含めた制御システム全体へと範囲を拡大し、精密サーボ技術を核としたシステム全体に関する調査を実施した⁽⁸⁾。

本委員会では、上記のこれまで継続して実施してきた精密サーボ技術を核として、メカトロニクスシステム製品群の中で適用される高速・高精度位置決め、および力制御技術を含めた最新の技術動向と課題を整理しつつ、一段上の精密サーボシステムを実現するための共通基盤技術を調査することを目的として委員会活動を実施した。さらに、サーボシステムを構成し、その性能を左右する因子であるアクチュエータ、駆動回路、センサ、案内／伝達機構の各要素の技術動向、システムのモデリング方法、複数のセンサ／アクチュエータを活用した新たな制御系設計方法も含めて調査検討を行った。本技術報告は、それら調査活動を纏めたものである。

1.2 委員会の活動報告

本調査専門委員会では、2年間で10回の委員会を開催した。各委員会の開催履歴は以下のとおりである。具体的な内容については本調査専門委員会のHP⁽⁹⁾を参照されたい。

- 第1回：2018年2月26日（サニー貸会議室 501）
- 第2回：2018年3月7日（東京電機大学）
- 第3回：2018年5月29日（慶應義塾大学）
- 第4回：2018年9月26日（自動車会館会議室）
- 第5回：2018年9月27日（株）仙台ニコン）
- 第6回：2019年2月28日（東京大学 柏キャンパス）
- 第7回：2019年3月5日（千葉大学）
- 第8回：2019年5月13日（宇都宮大学）

- 第9回：2019年9月18日（ルーテル市ヶ谷会議室）
- 第10回：2019年12月17日（自動車会館会議室）

一方、本委員会が主催・協賛した電気学会研究会⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾での発表件数、電気学会産業応用部門大会シンポジウム⁽¹²⁾開催状況、電気学会産業応用部門 International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (SAMCON) での Session 開催状況を以下に纏める。

- 電気学会メカトロニクス制御研究会／精密サーボシステムと制御技術、2018年9月26日（自動車会館会議室）：13件
- 電気学会メカトロニクス制御研究会／精密サーボシステムと制御技術、2019年9月18日（ルーテル市ヶ谷会議室）：16件
- 電気学会産業応用部門大会シンポジウム／メカトロニクス機器における精密サーボ技術、2019年8月21日：7件
- IEEJ International Workshop SAMCON2018, Invited Session／High Precision Motion Control in Mechatronic Systems, 2018年3月7日：5件
- IEEJ International Workshop SAMCON2019, Special Session／Modeling and Control for High Precision Motion Control Systems, 2019年3月5日：5件
- IEEJ International Workshop SAMCON2020, Invited Session／Design, Modeling, and Control Methodologies of High Precision Control Systems, 2020年3月16日：6件

この他にも、これまでの調査活動を通じて得られた知見を広く社会に還元すべく、サーボ系設計に関する電気学会産業応用フォーラムを2回実施している。

1.3 各章の構成と概要

本技術報告は、1.2節に示した委員会活動を通して得られた結果を基に、3つの章に分けて纏めている。

2章では、各種メカトロニクス機器における精密サーボ技術として、これまで委員会で取り扱ってきた精密サーボを必要とする代表的な製品と、そこで利用されている技術について纏めている。次に3章では、精密サーボシステムのための要素技術と制御応用として、委員会で取り上げられた制御器設計の共通基盤技術と制御応用について纏めている。そして4章では、1入力1出力系の限界を打破するため、本委員会でも精力的に検討されている多入力多出力系に拡張した新しい精密サーボ技術について纏めている。最後に5章では、次の活動の展望と課題について纏めている。

2.1節では、熱海武憲委員にHDDに適用されている精密サーボ技術について執筆いただいた。特に、将来のHDD大容量化を支える磁気ヘッド位置決め制御方式の一つとして提案されている、VCM、ミリ／マイクロのPZT、熱アクチュエータの4段アクチュエータ制御系設計法を紹介いただいている。複数のアクチュエータを併用し適切な制御器を設計することで、外乱抑圧特性を向上できることが示され