

# 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による高付加価値化に関する調査専門委員会編

(発行日 2023年10月12日)

## 目 次

1. はじめに	03	3.3 漸化式型フィルタと伝達関数型フィルタによる外乱補償について	44
1.1 本技術報告の発刊にあたり	03	3.4 複数モード系に対するマルチレートフィードフォワード制御	49
1.2 委員会の活動報告	03	3.5 Simultaneous identification of backlash amount and linear characteristics with hybrid identification of time-series data and FRD	56
1.3 各章の構成と概要	04	4. HDD ベンチマーク問題に対する制御系設計	62
1.4 今後の展開	05	4.1 HDD ベンチマーク問題と設計例	62
2. 各種メカトロニクス機器における精密サーボ技術	06	4.2 HDD ベンチマークモデルにおける DISO 制御系の設計戦略	68
2.1 Equivalent Mass Matrices Design Methods Considering Interference to Force Control in Force Sensorless Hybrid Control for Rubbing Motion	06	4.3 RCBoode plots-based auto-tuning method of the loop shaping filter for disturbance rejection in hard disk drive systems	73
2.2 精密ステージの位置決め制御技術	12	4.4 周波数応答データ駆動の共振フィルタ設計	78
2.3 半導体熱処理成膜装置のヒータ・クーラ統合による高速高精度温度制御法	16	5. あとがき	85
2.4 摩擦システムに対する位置決め動作信号を用いた高精度プラント周波数応答関数推定法	22		
2.5 Effects of wind noise on hybrid active noise cancellation headphones	28		
3. 精密サーボ技術ための要素技術と制御応用	32		
3.1 基底関数と周波数領域設計を組み合わせたタスク柔軟で高精度な ILC の基礎検討	32		
3.2 多自由度変調を用いたパルス駆動制御	38		

# 精密サーボシステムによる高付加価値化に関する調査 専門委員会委員

委員長	熱海 武憲(千葉工業大学)	委員	鈴木 雅康(宇都宮大学)
幹事	大西 亘(東京大学)		関 健太(名古屋工業大学)
幹事	藪井 将太(東京都市大学)		関口 裕幸(三菱電機(株))
幹事補佐	前 匡 鴻(東京大学)		高倉 晋司((株)東芝)
委員	伊藤 和晃(岐阜大学)		竹内 一生((株)東京自働機械製作所)
	五十嵐 洋一(日本精工株式会社)		田中 淑晴(豊田工業高等専門学校)
	石川 潤(東京電機大学)		田中 翼(ピアメカニクス(株))
	上田 伸治(足利大学)		寺田 祐貴(DMG 森精機(株))
	浦川 禎之(日本工業大学)		永田 良((株)FUJI)
	小川 博紀((株)日立製作所)		中 邨 勉(ファナック(株))
	奥山 淳(東海大学)		原 武生(東芝デバイス&ストレージ(株))
	甲斐 光心(パナソニック インダストリー社)		平田 輝(東京エレクトロン テクノロジーソリューションズ株式会社)
	桂 誠一郎(慶應義塾大学)		藤本 博志(東京大学)
	川福 基裕(大同大学)		箕浦 康祐((株)豊田自動織機)
	北吉 良平((株)安川電機)		宮崎 敏昌(長岡技術科学大学)
	酒井 健史(オークマ(株))		山元 純文((株)ハーモニック・ドライブ・システムズ)
	坂田 晃一((株)ニコン)		弓場井 一裕(三重大学)
	白石 貴行(鹿児島工業高等専門学校)		

## 1. はじめに

### 1.1 本技術報告の発刊にあたり

2019年末に出現した新型コロナウイルス感染症 (COVID-19) により、人類は大きな混乱に見舞われた。特に、経済の面においては、様々な産業がその活動を縮小させ、歴史的な水準で GDP が低下する非常事態となった。そのような中においても、情報産業については COVID-19 の流行以前よりも勢いを増し、COVID-19 の流行が終息した後も、その勢いは継続している。

情報産業はソフトウェアとハードウェアに大別される。日本はソフトウェア分野に関して圧倒的に輸入超過であることから、ソフトウェア産業が日本の将来をけん引する成長エンジンとなることを期待することは現実的ではない。一方のハードウェアについては、半導体製造を支える様々な機械装置やデータセンターにおける大半の情報を保存しているハードディスクドライブ (HDD) など、日本が世界をけん引している分野が数多く存在している。そして、それらの多くは、精密サーボシステムを必要不可欠とするメカトロニクス装置である。このことは、「今後も起こり続ける大きな社会構造の変化を日本が乗り越えていくためには、日本の産業界およびアカデミアが有している精密サーボシステム技術を発展させ、それらが生み出す付加価値を高めていくが重要である」ことを示していると言える。

電気学会産業応用部門では、マストストレージシステム (MSS) を冠した調査専門委員会が 1999 年から 2005 年までの間 3 期に亘り設置され、主に磁気ディスク装置や光ディスク装置などのマストストレージシステムで重要となる位置決め制御系の高速・高精度化を実現するための知見整理と様々な課題を克服するための実践的な制御系設計論の体系化が行われた<sup>(1)-(3)</sup>。その後、ナノスケールサーボ

(NSS) を冠した協同研究委員会として 2006 年から 2014 年までの4 期に亘り、マストストレージシステムのみならず、半導体や液晶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調査研究対象を広げ、コア技術である高速・精密位置決めレベルの水平展開を図った<sup>(4)-(7)</sup>。さらに、2014年から2016 年にかけては「精密サーボシステムの多様性探求調査専門委員会」として、2018 年から2019 年にかけては「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」として、位置決め制御のみならず、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システムを含めた制御システムへと調査範囲を拡大し、精密サーボ技術を核としたサーボシステム全体に関する調査・検討を継続して数々の成果を挙げるに至っている<sup>(8)-(9)</sup>。

本委員会は、これらの成果をさらに発展させ、引き続き実践的な知の共有・提供という形で他分野との交流を図りながら、日本の産業界およびアカデミアが有している精密サーボシステム技術を発展させ、それらが生み出す付加価値

を高めていくことを目的に設置された。本技術報告書は、それらの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ホームページを参照されたい<sup>(10)</sup>。

- 第1回：2020年3月10日 (Zoom)
- 第2回：2021年5月27日 (Zoom)
- 第3回：2021年7月15日 (Zoom)
- 第4回：2021年9月7日 (Zoom)
- 第5回：2021年11月19日 (岐阜大学および Zoom)
- 第6回：2022年3月8日 (Zoom)
- 第7回：2022年6月13日 (神田サニー貸会議室および Zoom)
- 第8回：2022年9月26日 (電気学会会議室および Zoom)
- 第9回：2022年11月17日 (羽田イノベーションシティ, 榊トーショー, および Zoom)
- 第10回：2023年2月 (東京大学本郷キャンパスおよび Zoom)

一方、本委員会が主催・協賛した電気学会研究会<sup>(11),(12)</sup>での発表件数、電気学会産業応用部門大会シンポジウム<sup>(13)</sup>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, 2021年9月7日 (Zoom) : 10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, 2022年9月26日 (電気学会会議室および Zoom) : 17件
- 電気学会産業応用部門大会シンポジウム/高付加価値を支えるモーションコントロール, 2022年8月31日 : 6件
- IEEJ International Workshop SAMCON2021, Invited Session/Motion Control for High Performance, 2021年3月10日 : 6件
- IEEJ International Workshop SAMCON2021, Special Session/Advanced Motion Control for High Value-Added Mechatronic Systems in the 21st Century, 2021年3月10日 : 5件
- IEEJ International Workshop SAMCON2022, Special Session / Motion Control for High Value-Added Mechatronic Systems, 2022年3月8日 : 5件
- IEEJ International Workshop SAMCON2022, Invited Session/Novel Development of Motion Control, 2022年3月9日 : 5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