

# 精密サーボシステムを支える 要素技術と制御応用

精密サーボシステムの多様性探求調査専門委員会編

## 目 次

1. はじめに	3	4. 産業機器における高速・高精度な位置決め制御技術	61
1.1 本技術報告の発刊にあたり	3	4.1 限定極配置法を用いたレンズ位置決め制御	61
1.2 各章の構成	3	4.2 工作機械の送り軸における高速・高精度軌跡制御	67
1.3 今後の展開	5	4.3 リニアボールガイドを用いたナノメータ輪郭制御	71
1.4 委員会の開催履歴と関連研究会発表	6	4.4 圧電位置決めステージへのコンポジットフィルタの適用	75
2. 精密サーボシステムを支える要素技術	7	4.5 複数アクチュエータの回転中心・重心点ハイブリッド駆動法による超精密ステージの非干渉化制御	79
2.1 リニアガイドの微小変位領域での摩擦挙動	7	4.6 外乱オブザーバとトルクリプル方程式のハイブリッド補償器を用いた PMSM の高精度位置決め制御	85
2.2 システムレベル CAE を活用するフロント・ローディング開発	11	5. 精密サーボ技術の力制御応用	89
2.3 連続時間不安定零点を考慮した軌道生成法	17	5.1 2 ステージ Series Elastic Actuator を用いたバイラテラル制御	89
2.4 PWM 型入力系の厳密線形化法と応用	23	5.2 波動制御に基づく共振系の力制御	95
2.5 MEMS 加速度センサを活用した拡張カルマンフィルタによる 2 慣性共振系の負荷状態量推定	29	5.3 環境との接触動作を考慮した高精度センサレス加圧力制御	99
2.6 Adaptive Vibration Suppression Perfect Tracking Control for Ball-Screw Feed Drive Systems	33	6. あとがき	105
2.7 負荷軸フィードバック制御による高速・高精度位置決め	39		
3. 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	43		
3.1 光ディスク装置の高速・高精度位置決め	43		
3.2 HDD ヘッド位置決め系における高精度位置決め制御	49		
3.3 周波数応答を用いた広帯域化を実現する制御器設計	55		

## 精密サーボシステムの多様性探求調査専門委員会委員

委員長 伊藤 和晃(岐阜大学)  
幹事 坂田 晃一((株)ニコン)  
幹事 関 健太(名古屋工業大学)  
幹事補佐 大西 亘(東京大学)  
委員 熱海 武憲(千葉工業大学)  
石井 眞二(DMG 森精機(株))  
石川 潤(東京電機大学)  
岩崎 誠(名古屋工業大学)  
浦川 禎之(日本工業大学)  
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)  
桂 誠一郎(慶應義塾大学)  
金谷 保彦(大船企業日本(株))  
川福 基裕(大同大学)  
後藤 謙典(ビアメカニクス(株))  
柴田 知宏(オークマ(株))  
白石 貴行(鹿児島工業高等専門学校)  
鈴木 孝輔(ビアメカニクス(株))  
関口 裕幸(三菱電機(株))  
高木 清志(キヤノン(株))  
高倉 晋司((株)東芝)

委員 田中 淑晴(豊田工業高等専門学校)  
遠山 聡一(サイバネットシステム(株))  
長縄 明大(秋田大学)  
永田 良(富士機械製造(株))  
中邨 勉(ファナック(株))  
中村 裕司((株)安川電機)  
原 進(名古屋大学)  
原 武生((株)東芝)  
平田 光男(宇都宮大学)  
藤本 博志(東京大学)  
二見 茂(THK(株))  
松家 大介((株)日立製作所)  
藪井 将太(名古屋大学)  
山口 高司((株)リコー)  
山元 純文((株)ハーモニック・ドライブ・システムズ)  
弓場井 一裕(三重大学)  
執筆協力者 鈴木 雅康(宇都宮大学)  
Thomas Beauduin(東京大学)  
宮崎 敏昌(長岡技術科学大学)  
横倉 勇希(長岡技術科学大学)  
齊藤 優(東京電機大学)

# 1 はじめに

## 1.1 本技術報告の発刊にあたり

本調査専門委員会の前身である「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」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、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）なども含めて、ナノスケールサーボ技術に関する知見を深め、整理・体系化を行ってきた。特に機構振動や案内等で発生する非線形摩擦が制御性能に与える影響を明らかにすると共に、超高速・超高精度位置決めを実現するためのモデリング技術や制御理論応用に関する共通の方法論を整理・体系化した。また、ナノスケールサーボを構成するモータの電流制御部や駆動回路（モータドライバ）、制御量を検出するセンサなどを調査対象に加え、それらが制御性能に与える影響について検討を行ってきた。上記の活動の中で、ナノスケールサーボで培った制御技術を多種多様な産業機器の位置決め制御へと水平展開するのみならず、速度制御や力制御の高速・高精度化へと垂直展開する可能性を探ることが、今後、重要な課題の一つになるとの認識を得るに至った。

本調査専門委員会は、ナノスケールサーボの制御技術について引き続き網羅的調査を行うと同時に、速度制御や力制御の高速化・高精度化へと応用展開するための制御理論応用、および設計・実装に関する問題解決のための共通の方法論を見出すための道筋を探ることを目的とし設置された。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4つに分けられる。

- 精密サーボシステムを支える要素技術に関する課題と動向（2章）
- 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（3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（4章）
- 精密サーボ技術の力制御応用に関する課題と動向（5章）

まず2章では、精密サーボシステムを支える要素技術として、非線形摩擦に代表される非線形要素のモデリング技術、PWM型入力系の厳密線形化手法、高速・高精度制御技術、参照軌道生成手法、センサ特性に起因する実用上の問題点に対する解決策、制御コントローラ設計における1D-CAEの活用事例について纏めている。次に3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。続く4章では、小型レンズ駆動機構や工作機械、精密ステージなど、各種産業機器における高速・高精度位置決め制御技術について纏めている。その後の5章では、精密サーボ技術の垂直展開として力制御系の高精度サーボ技術について纏めている。そ

して最後に6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、田中淑晴委員に、「リニアガイドの微小変位領域での摩擦特性」と題して、一般的リニアボールガイドにおける微小な変位領域での非線形ばね特性について纏めていただいた。リニアボールガイドをマイクロメートル、およびナノメートルの変位領域で用いた場合の摩擦挙動を実験により明らかにし、摩擦挙動を再現する非線形ばね特性モデルとして、変位に応じてばね定数が変化する改良形ブラシモデルを提案している。従来のブラシモデルでは、変位の大きさに応じて実際の摩擦挙動に対する再現度が低下し、パラメータの再調整を要していたが、本手法は、変位に応じたばね関数を導入することで、変位の大きさに依らず実際の摩擦挙動を高精度に再現できている。

2.2節では、遠山聡一委員に、「システムレベルCAEを活用するフロント・ローディング開発」と題して、システム指向の計算機援用工学として近年注目されている1D-CAEの方法論について概説いただくと共に、多層プリント配線板の製造に用いられるレーザ穴明機の開発にSTEMコンピューティング・プラットフォームとシステムレベルCAEを活用した開発事例について纏めていただいた。まず、レーザ穴明機の技術特性と構成要素の顧客価値の関係を分析し、レーザ穴明機の主要要素であるガルバノサーボ機構が担う要求機能を導いている。それを指針とし、揺動電磁アクチュエータの詳細設計を行い、実機搭載の制約と穴加工条件のバリエーションを満たすような可動子構造を最適設計している。ガルバノサーボ機構のように複雑で複合領域にまたがるシステムの精密モデリングや相互作用の評価を行う上で、1D-CAEが有効に機能することを紹介いただいている。

2.3節では、白石貴行委員に、「連続時間不安定零点を考慮した軌道生成法」と題して、非最小位相連続時間系の制御対象に対し、所望の軌道に追従させるための手法として、時間領域での状態変数参照軌道生成法と周波数領域での近似逆デジタルフィルタ設計法について纏めていただいた。時間領域での参照軌道生成法では、出力参照軌道を考慮した出力方程式（微分方程式）を正と負の時間でそれぞれ解き、軌道が収束する積分定数を求めて有限時間シフトすることで所望の軌道を生成している。一方の周波数領域での近似逆デジタルフィルタは、制御対象を零位相系と最小位相系に分解し、それぞれに対する逆システムとして、零位相FIRフィルタと完全追従制御器を用いることで近似逆デジタルフィルタを実現している。

2.4節では、鈴木雅康氏（宇都宮大学）に、「PWM型入力系の厳密線形化法と応用」と題して、PWM型入力をともなう二次の線形時不変系を対象とした厳密線形化法について纏めていただいた。本手法では、PWM型入力をともなう二次系に対し、矩形波の幅だけでなく制御周期における配置位置を可変にすることで、系の固有値が実数であるか、あるいは、複素数の場合にはサンプリングレートがある程度高い系において、系のサンプル点上の振る舞いを厳密に線形化できる。さらに、低サンプリングレートにおいては、サンプル点間応答の複雑性を利用して、正のパルス波のみを用いた制御系を設計できることを、