

モーションコントロール技術 における新展開

モーションコントロールの新展開に関する調査専門委員会編

(発行日 2023年9月20日)

目	次
1. はじめに	03
1.1 背景	03
1.2 委員会の概要	03
1.3 本技術報告の内容	03
2. モーションコントロールの基礎技術に関する新展開	05
2.1 磁気浮上系を内包するダイレクトドライブモータの運動制御	05
2.2 ロボットの制御性能向上を考慮したモータ開発	09
2.3 カルマンフィルタを用いた正弦波エンコーダの位置検出	15
2.4 要素記述法による非線形現象のモデリング	19
2.5 単相マルチレベルインバータのデッドタイムに起因する電圧誤差に関する検討	23
2.6 検出出力の量子化誤差を考慮したプラント周波数応答関数推定法	27
2.7 限定極配置法の状態空間表現への適用	33
3. モーションコントロールによる柔軟な制御に関する新展開	37
3.1 インタラクション制御のための直列弾性駆動機の設計と制御	37
3.2 半導体ひずみゲージを用いたハイダイナミックレンジ1軸力覚センサの開発	41
3.3 電流微分値に基づく埋込磁石同期電動機の位置/トルクセンサレス制御	45
4. モーションコントロールによる振動抑制に関する新展開	49
4.1 2慣性制御系ためのロボットモーションコントロール	49
4.2 ひずみ量フィードバック制御を併用したメカトロニクス機器の制振制御	53
4.3 負荷側情報を有効に用いた2慣性系の負荷側外力推定	57
4.4 多リンク2慣性系としてモデル化した6軸ロボットアームの物理パラメータ同定と振動抑制制御	61
4.5 等価剛体オブザーバによる2慣性系の振動抑制	65
5. モーションコントロールへの人工知能適用に関する新展開	71
5.1 深層強化学習による重機の自律制御	71
5.2 深層強化学習を用いたロボットマニピュレータのための障害物回避制御	75
5.3 ニューラルネットワークによるターボチャージャのモデル同定	78
5.4 ネットワーク化制御におけるデータ送信スケジューリング	81
6. モーションコントロールの応用に関する新展開	85
6.1 クラッチを有する二慣性系の非線形モデル予測制御に基づくねじれトルク制御法	85
6.2 可変インピーダンス制御を用いた操舵支援システムにおけるドライバ受容性評価	91
6.3 二足歩行ロボットにおけるビジュアルサーボ	95
6.4 2足歩行ロボットの終端状態制御を用いたポテンシャルバリア突破時間制御	99
6.5 ロータ角速度を用いたプロペラ推進システムの力制御	105
7. おわりに	109
7.1 今までの委員会	109
7.2 本委員会の活動記録	109

モーションコントロールの新展開に関する 調査専門委員会委員

委員長 浦川 禎之(日本工業大学)
幹事 元井 直樹(神戸大学)
矢代 大祐(三重大学)
幹事補佐 八田 禎之(岐阜大学)
委員 浅野 洋介(木更津高専)
熱海 武憲(千葉工業大学)
池田 英俊(三菱電機)
石井 千春(法政大学)
伊藤 和晃(岐阜大学)
伊藤 正英(愛知県立大学)
内村 裕(芝浦工業大学)
恵木 守(オムロン)
呉 世訓(D G I S T)
大明 準治(東芝)
大内 茂人(早稲田大学)
小田 尚樹(公立千歳科技大)
桂 誠一郎(慶應義塾大学)
加藤 敦(住友重機械工業)
金子 健二(産業技術総合研究所)
上條 芳武(東芝インフラシステムズ)
小西 信克(I H I)
小山 昌人(三重大学)
境野 翔(筑波大学)
残間 忠直(千葉大学)
柴田 昌明(成蹊大学)
島田 明(芝浦工業大学)
下野 誠通(横浜国立大学)
朱 赤(前橋工科大学)
関 健太(名古屋工業大学)
高橋 悟(香川大学)

委員 高橋 太郎(トヨタ自動車)
田村 有矢(ニコン)
辻 俊明(埼玉大学)
恒木 亮太郎(ファナック)
永井 栄寿(東京大学)
中島 明(南山大学)
名取 賢二(千葉大学)
野崎 貴裕(慶應義塾大学)
橋本 誠司(群馬大学)
林 崇(富士電機)
平田 光男(宇都宮大学)
藤本 博志(東京大学)
松家 大介(日立製作所)
真鍋 舜治(
望月 慶佑(三菱重工業)
藪井 将太(東京都市大)
横倉 勇希(長岡技術科学大学)
吉浦 泰史(安川電機)
岩崎 誠(名古屋工業大学)
大石 潔(長岡技術科学大学)
大西 公平(慶應義塾大学)
河村 篤男(横浜国立大学)
駒田 諭(三重大学)
齊藤 英一(三菱電機)
鈴木 達也(名古屋大学)
早川 聡一郎(三重大学)
藤本 康孝(横浜国立大学)
堀 洋一(東京理科大学)
村上 俊之(慶應義塾大学)
弓場井 一裕(三重大学)

オブザーバ

1. はじめに

1.1 背景

モーションコントロールは、機構系を正確かつ多様に駆動する技術として、工作機械・産業用ロボット・ステージ装置・マテリアルハンドリングシステム・エレベータ・ディスク装置・車両駆動システム・圧延機・印刷機・フィルム成形機・人間支援装置など、さまざまな機器においてその中核をなす技術として広く用いられている。これらの機器では、一層の高速化・高精度化による性能向上でその付加価値を高めていくことができる。一方で、今後の人口減少や高齢化を考えると、新たな分野での応用拡大も強く期待されている。すなわち医療・福祉分野や人間支援技術など人間により近い分野、また通信と組み合わせた遠隔制御技術、さらには人工知能など情報技術と組み合わせたより多様な制御技術など、従来の枠組みを超えた分野において新たな付加価値を生み出し、一層幅広く社会に貢献することが期待される。特に 2020 年初頭から猛威を振っているコロナ禍においては、密にならずに人間の動作を代替する自動機械や遠隔操作などに大きな期待が集まっており、これらのニーズに応えるための技術開発の重要性は非常に大きなものがある。

このようなモーションコントロール技術の高性能化および新展開について検討するには、深く本質を検討するとともに、積極果敢に新規技術との融合を図っていく必要がある。すなわち、従来技術の深化を測ると共に、新しい応用分野についても幅広く検討する必要がある。このためには理論的な検討や具体的な実装方法、アクチュエータおよびセンシング手法の開発、IoT など新しいシステム構成とその応用検討など、基礎から応用まで分野を限定せずに検討を進めていく必要があると思われる。

1.2 委員会の概要

このような状況に鑑み、モーションコントロール技術の発展に寄与することを目的として「モーションコントロールの新展開に関する調査専門委員会」が設立された。具体的には、モーションコントロールの新展開についてその研究開発動向を調査すること、またこの調査活動を通して委員間の情報交換および議論を行いモーションコントロール技術の展開および向上を図ること、さらにはこれらの知見を基に電気学会研究会および産業応用部門大会などに於いて、シンポジウム・オーガナイズドセッション等を提案し、議論の結果を広く開示し、モーションコントロールに関する研究の幅広い発展を図ることを目的として、令和 2 年（2020 年）10 月～令和 4 年（2022 年）9 月の 2 年間にわたって以下の観点から調査を行った。

(1) モーションコントロールの基礎技術に関する調査

モーションコントロールシステムを実現するにはセンサ・アクチュエータ・パワーデバイス・電力変換器などのハードウェア、制御アルゴリズムや実装方法、システム構成な

どソフトウェアが基本となる。これら基礎技術の技術動向や開発内容について調査する。

(2) モーションコントロールの応用技術に関する調査

上記基礎技術を実際のシステムに適用するには、対象システムの把握・解析、さらには実用時の様々な動作形態への対応など、応用ならではの解析・工夫が必要となる。これら実用に伴う技術についてその動向や技術開発を調査する。

(3) モーションコントロールの新展開に関する調査

従来使われていなかった分野への応用や、従来の枠組みを超えた組み合わせなど、新規開発領域ならではの技術開発について、そのニーズやシーズなどを把握する。また新規領域の開発動向を探り、必要な技術を調査する。

1.3 本技術報告の内容

本技術報告は、これらの調査活動をまとめて報告するものである。各委員の報告を以下のような 5 つの領域に分けてまとめた。

(1) モーションコントロールの基礎技術に関する新展開

- (a) 磁気浮上系を内包するダイレクトドライブモータの運動制御と駆動回路技術のご紹介（小山）
- (b) ロボットの制御性能向上を考慮したモータ開発（八田）
- (c) カルマンフィルタを用いた正弦波エンコーダの位置検出（上田）
- (d) 要素記述法による非線形現象のモデリング（桂）
- (e) 電力変換器の特性を考慮した制御性能改善の試み（名取）
- (f) 検出出力の量子化誤差を考慮したプラント周波数応答関数推定法（前田）
- (g) 限定極配置法の状態空間表現への適用（浦川）

(2) モーションコントロールによる柔軟な制御に関する新展開

- (a) インタラクション制御のための直列弾性駆動機的设计と制御（呉）
- (b) 半導体歪ゲージを用いたハイダイナミックレンジ軸力覚センサの開発（辻）
- (c) 電流微分値に基づく埋め込み磁石同期電動機の位置/トルクセンサレス制御（野崎）

(3) モーションコントロールによる振動抑制に関する新展開

- (a) 2 慣性制御系のためのロボットモーションコントロール（大石、横倉、川合）
- (b) 高次振動モードを有するメカトロニクス機器の振動解析と制御（関）
- (c) 負荷側情報を有効に用いた 2 慣性系の負荷側外力推定（山田）
- (d) 多リンク 2 慣性系としてモデル化した 6 軸ロボットアームの物理パラメータ同定と振動抑制制御（大明）
- (e) 等価剛体オブザーバによる 2 慣性系の振動抑制（吉浦）

(4) モーションコントロールへの人工知能適用に関する新