

高機能化のためのモーション コントロールの最新技術

モーションコントロールの高機能化に
関する協同研究委員会編

目 次

1. まえがき	3	4. モビリティのためのモーションコントロール	
1.1 背景	3	4.1 ヒューマノイドクライミング ロボットの移動制御	50
1.2 委員会活動報告	3	4.2 ハイブリッドシステム表現に基づく ドライバ運転行動群モデルによる 車両制御システム設計	54
1.3 本報告書の概要	3	4.3 自動運転を行う自動車の EPS フェイルに 対するインホイールモータを利用した 操舵手法の提案	58
2. 基盤技術としてのモーションコントロール		5. ネットワーク制御のためのモーション コントロール	
2.1 外乱オブザーバとトルクリプルテーブルの ハイブリッド補償による位置決め制御	5	5.1 ネットワークを通信路とした 制御系の制御	64
2.2 波動歯車装置を内在する位置決め機構の フルロード制御	9	5.2 無線通信を用いた遠隔地における ロボット制御	68
2.3 ハードディスクドライブの磁気ヘッド 位置決め制御技術	13	5.3 フィードバックループ内の L2 スイッチの影響の解析	73
2.4 等価剛体オブザーバを使用した制振制御	17	6. あとがき	77
2.5 共振比制御に基づく 2 慣性共振系の 負荷側加速度制御	21		
2.6 スカラロボットのモデリングと 振動抑制制御	25		
3. 人間や環境とのインタラクションのための モーションコントロール			
3.1 人間を支援するロボットシステム	29		
3.2 アクチュエータのバックドライバビリティ	33		
3.3 油圧アクチュエータを用いた モーションコントロール	40		
3.4 人間の機械的インピーダンスに 基づくモーション設計手法	46		

モーションコントロールの高機能化 に関する協同研究委員会委員

委員長 弓場井一裕(三重大学)
幹事 久保亮吾(慶應義塾大学)
残間忠直(千葉大学)
幹事補佐 野崎貴裕(慶應義塾大学)
委員 浅野洋介(木更津工業高等専門学校)
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)
伊藤正英(愛知県立大学)
岩崎誠(名古屋工業大学)
内村裕(芝浦工業大学)
浦川禎之(ソニー)
恵木守(オムロン)
呉世訓(DGIST)
大明準治(東芝)
大石潔(長岡技術科学大学)
大内茂人(東海大学)
大西公平(慶應義塾大学)
置田肇(ファナック)
小椋優(IHI)
小田尚樹(千歳科学技術大学)
小田井正樹(日立製作所)
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)
河村篤男(横浜国立大学)
駒田諭(三重大学)
境野翔(埼玉大学)

委員 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)
鈴木達也(名古屋大学)
関健太(名古屋工業大学)
高橋悟(香川大学)
高橋太郎(トヨタ自動車)
辻俊明(埼玉大学)
名取賢二(千葉大学)
橋本誠司(群馬大学)
早川聡一郎(三重大学)
林田宣宏(ニコン)
平田光男(宇都宮大学)
藤本博志(東京大学)
藤本康孝(横浜国立大学)
堀洋一(東京大学)
真鍋舜治(
南方英明(千葉工業大学)
村上俊之(慶應義塾大学)
望月慶佑(三菱重工業)
元井直樹(神戸大学)
矢代大祐(三重大学)
藪井将太(名古屋大学)
横倉勇希(長岡技術科学大学)
吉浦泰史(安川電機)
劉江桁(富士電機)
執筆 山田翔太(東京大学)
協力者

1 ま え が き

1.1 背 景

モーションコントロールはロボットなどの運動制御のための制御技術であり、特に日本が世界をリードする研究分野として認識されている。産業応用部門においては、産業計測制御技術委員会 (IIC) に 1989 年に設置された「アドバンスドモーションコントロール調査専門委員会」を嚆矢とし、現在でもその応用分野を広げながら多くの研究者を輩出している。モーションコントロールに関連する研究規模の拡大から、IIC のモーションコントロールに関連するメンバーを中心としてメカトロニクス制御技術委員会 (MEC) が 2013 年 1 月に設立され、「モーションコントロールの高機能化に関する協同研究委員会」(設置期間 2015 年 3 月～2017 年 2 月) もその傘下に設置された。主な活動内容は、ますます発展を続けているモーションコントロール技術に対する調査・検討であり、基盤的な技術は勿論のこと、電動機制御・ロボット制御に留まらず多岐に渡るモーションコントロール技術の応用についての調査を行ってきた。本協同研究委員会の具体的な活動は委員会 HP⁽¹⁾ 上で公開されているので、興味のある読者には参考にされたい。

1.2 委員会活動報告

「モーションコントロールの高機能化に関する協同研究委員会」は学界、産業界からの委員 50 名と幹事 2 名、幹事補佐 1 名で構成されて 2015 年 3 月に発足し、途中 2 名の新規委員を迎え、2017 年 2 月末を以ってその活動を終えた。本委員会では活動期間中に 10 回の委員会を開催した他、電気学会に留まらず、多くの学会の SS や OS の企画を行い、その調査活動を通してモーションコントロールの発展と普及に寄与してきた。主な調査活動をまとめると、以下の 4 つの研究分野に分類することができる。

1. 基盤技術としてのモーションコントロール

モーションコントロールの基盤技術として、精密位置決め、振動抑制などの制御性能の向上を目指した研究動向について調査・検討を行った。磁気ディスク装置のヘッド位置決め制御技術におけるトレンドとサンプル点間における不可観測な振動を抑制する方法、不確かさの位相情報(正実性、虚負性)を利用したロバスト制御についての調査を行った。また、モーションコントロールの分野では典型的な制御対象となる二慣性共振系における振動抑制に対し、負荷側にセンサを設置する制御手法に関する検討も行った。精密な制御を行う上で、モデルの正確さは重要なファクターとなるが、観測信号から雑音や摩擦などの非線形性に起因する成分を除外し、正確なモデルを同定を行う手法についての検討も行った。

2. 人間や環境とのインタラクションのためのモーションコントロール

モーションコントロールの応用を大きく広げた要因の一つに、人間や環境とのインタラクションを可能にした制御技術の開発が挙げられるだろう。力制御技術の展開として、大型のロボットシステムやバイラテラル制御を実現するた

め、高出力の油圧システムによる力制御の検討が行われた。また、高効率・高減速ギアを備えた高出力アクチュエータの調査を行い、小型化・エネルギー効率の上昇だけでなく、バックドライバビリティの向上も実現しておりセンサレス力制御の性能を向上も期待できる。こうした力制御技術は人間とのインタラクションを可能にし、ロボットの活躍の場を工場などの生産ラインから、より人間に近い場所へ移している。中でも人間の機能アシストやリハビリ支援機器の開発は活発に行われている。

3. モビリティのためのモーションコントロール

電気自動車の普及により、電動機制御において培ってきたモーションコントロール技術を電気自動車の運動制御へ展開する動きも多く見られる。電動機はエンジンなどの内燃機関に比べ、はるかに高速な応答性を持つことからこれまでの自動車では実現できなかった機能を持たせることも可能になった。また、自動運転の機運も高まっており、人間の運転技能を自動運転に移植する取組も積極的に行われている。また、電気自動車だけではなく、人間並みの運動性能を持ち、人間を追従し荷物持ちなど人間の生活をアシストするパーソナルロボットの開発も行われている。

4. ネットワーク制御のためのモーションコントロール

ネットワーク環境の充実とともに、モーションコントロールの応用分野として、ネットワークを介したモーションコントロールについての需要も高まりつつある。具体的な応用として、遠隔地でのバイラテラル制御など注目を集めている。ネットワークを介することにより、伝送遅延の問題が大きな課題となっている。遠隔地でのバイラテラル制御の具体的な応用例として、遠隔手術などが想定されているが、患部での触覚を正確に、かつ時間遅れの影響を受けることなく伝送することが重要な課題である。むだ時間系の制御では、これまでスミス法などがあるが、無線通信などでは遅れ時間が可変となり、スミス法による補償では不十分であった。この問題に対し、これまでモーションコントロールの分野で精力的に取り組まれてきた外乱オブザーバの技術を応用することで可変長の遅れ時間に対応する補償を可能にしている。また、通信システムにおいては通信インフラの有効活用のため、利用可能な転送レートに制限を受けている。こうした転送レートの制限の下では制御に必要な情報を効率的に伝送する技術が重要となる。このような要求の下、最適な量子化技術など、さまざまな課題が取り組まれるようになってきている。

1.3 本報告書の概要

本報告書の第 2 章以降は前述の本委員会で扱ってきた 4 つの研究分野についての報告となっている。

2 章では「基盤技術としてのモーションコントロール」の研究報告として、位置決め精度の向上や振動抑制を目指した制御法について 6 名の研究者に寄稿して頂いた。3 章は「人間や環境とのインタラクションのためのモーションコントロール」の研究報告として、油圧アクチュエータを用いた力制御技術の検討や、人間をアシストするロボットシステムの制御法について