

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 藤本博志

本論文は「General Framework of Multirate Sampling Control and Applications to Motion Control Systems (マルチレートサンプリング制御の一般的枠組とモーションコントロール系への応用)」と題し、前半部では、1) マルチレートフィードフォワード制御を用いた完全追従制御 (Perfect Tracking Control: PTC), 2) マルチレートフィードバック制御を用いた完全外乱抑圧制御 (Perfect Disturbance Rejection: PDR), 3) マルチレートサンプリング制御を用いた完全状態一致制御 (Perfect State Matching: PSM) による制御器の離散化法という三つの手法を提案し、構築したマルチレート制御系の新しい理論的枠組を述べ、後半部では、ロボット・サーボモータ・ハードディスク装置・振動抑制制御系・ビジュアルサーボ系などの実システムに応用し、計算機シミュレーションおよび実機実験によりその有効性を明らかにした結果をまとめたもので、英文により記述されている。

第1章 (Introduction) では、従来の研究の問題点を明らかにし、本研究の位置付けを行なっている。従来、マルチレート制御系に関しては、零点配置・強安定化・同時安定化など様々な研究が行なわれてきたが、たとえば制御入力振動的になるなどの問題点があり、実システムに応用されたケースは少ないこと、低精度エンコーダを用いたサーボモータ制御や、ハードディスク装置に適用した例はあるが、アプリケーション固有の理論に留まっており、統一理論には到達していないことを指摘している。

第2章 (Perfect Tracking Control Based on Multirate Feedforward Control, マルチレートフィードフォワード制御を用いた完全追従制御) では、目標値追従制御系において、シングルレート制御系では離散化した制御対象が必ず不安定零点を持つことから、安定な逆系を構成することが不可能であり、大きな追従誤差を生じる問題点があったのに対し、マルチレートフィードフォワード制御という新しい制御手法によって、誤差なく目標軌道に追従する完全追従制御 (PTC) を提案している。さらに、この手法をハードウェアの制約によりサンプラやホールダの機構に制限がある系、むだ時間を持つ系、多変数系へと理論拡張を行なっている。また、提案する制御器が、伝達関数に基づく簡単な計算により容易に設計できることや、非常に見通しの良い構造をもっていることを明らかにしている。

第3章 (Perfect Disturbance Rejection Control Based on Multirate Feedback Control, マルチレートフィードバック制御を用いた完全外乱抑圧制御) では、ハードディスクのヘッドの位置決め制御系、ロボットのビジュアルサーボ系、低精度エンコーダを用いたサーボモータの速度制御系など、制御出力のサンプリング周期を制御入力の周期よりも長くなる系においては、従来のシングルレート制御方式では、ホールダによる大きな位相遅れにより安定性が損なわれたり、高い周波数領域において外乱抑圧特性が劣化するという問題点があった。ここでは、サンプル点間オブザーバとマルチレートフィードバック制御による新しい制御手法を提案し、安定余裕の大幅な改善と、定常状態においてサンプル点間の複数時点外乱を完全に抑圧する完全外乱抑圧制御 (PDR) を提案している。さらに、開ループオブザーバとスイッチ機能を持つフィードフォワード制御器を導入することにより、ロバスト安定性を犠牲にすることなく、外乱を効果的に抑圧する制御系が構成できることを明らかにしている。

第4章 (Controller Discretization Based on Perfect State Matching, 完全状態一致制御による制御器の離散化) では、マルチレート制御によって閉ループ特性を完全に保存する制御器の離散化法を提案している。従来は連続時間領域で設計した望ましい補償器を離散近

似してデジタル制御系を設計する手法が広く適用されていた。しかし、制御性能の向上のために制御帯域を限界まで広げようとする、サンプリング周波数が十分に高いという仮定が成立しなくなり、所期の目的を達成できないばかりか制御系を不安定化することすらある。そこで、マルチレート制御により、離散時間系の状態変数の閉ループ応答を、連続時間領域で設計した望ましい応答に一致させる完全状態一致制御 (PSM) を開発し、サンプリング周期が制御周期より長い系にも理論的に拡張を行なっている。

本論文の後半では、前半部で構築した理論を、実際のモーションコントロール系へ適用し、その有効性を確認した結果をまとめている。

第5章 (Applications of Perfect Tracking Control, 完全追従制御の応用) では、第2章で提案したマルチレートフィードフォワード制御による完全追従制御 (PTC) を、DDロボットの位置制御系に適用し、シミュレーションおよび2軸DDロボットを用いた実験によって、その優れた追従性能を実証している。次に、ハードディスク装置のヘッドの高速移動制御 (ショートスパンシーク) に適用し、ハードウェアの大きな改良をすることなく飛躍的な高速化を達成したことを述べている。後者はある企業の研究所で実験を行い、すでに実製品に組み込まれるに至っている。

第6章 (Applications of Perfect Disturbance Rejection, 完全外乱抑圧制御の応用) では、第3章で提案したマルチレートフィードバック制御による完全外乱抑圧制御 (PDR) をハードディスク装置の高精度位置決め制御、およびロボットのビジュアルサーボ系に適用している。まず、ハードディスク装置において、サンプル点間オブザーバによって安定余裕が大きく向上すること、完全外乱抑圧制御によってナイキスト周波数に近い高周波領域においてもRRO (Repeatable Runout, 周期的擾乱) が抑圧できることを示している。さらに、作業空間コントローラと非線形写像によって線形化を行なったビジュアルサーボ系に、提案するマルチレートフィードバック制御系を適用し、周期的な運動を繰り返す目標物体に対して、誤差なく追従させることに成功している。

第7章 (Applications of Perfect State Matching, 完全状態一致制御の応用) では、第4章で提案した完全状態一致制御 (PSM) による連続時間制御器の離散化法を、外乱オブザーバを用いたサーボモータのロバスト位置決め制御系に適用し、高性能設計が可能となることを示している。次にハードディスク装置の振動抑制制御系に適用し、従来は不可能とされていたナイキスト周波数周辺の振動抑制制御が可能となることを示している。

第8章 (Conclusion, 結論) では、本論文のまとめとして、提案した完全追従制御・完全外乱抑圧制御・完全状態一致制御の理論を概観し、フィードフォワード制御・フィードバック制御の両面性や、ハードウェアによるサンプリング機構の制限や対象システムの特徴に基づく視点から提案手法の関連性や一般性を論じ、本論文の提案によってマルチレート制御の統一的な枠組の確立に成功したと結論づけている。

以上これを要するに、本論文は、マルチレートフィードフォワード制御による完全追従制御、マルチレートフィードバック制御による完全外乱抑圧制御、マルチレート制御による完全状態一致制御を用いた制御器の離散化法という、マルチレートサンプリング制御のもとづくきわめて斬新な制御手法を提案し、諸種のモーションコントロールシステムに適用してその有効性を実証することにより、マルチレート制御の一般的枠組を構築したものであって、電気工学、制御工学上貢献するところが少なくない。よって、本論文は、博士 (工学) の学位請求論文として合格と認められる。