

論文の内容の要旨

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)

藤本 博志

ロボット・モータ・ハードディスク装置などのメカトロ機器の高速・高精度制御系においては、コンピュータを用いて制御を行うデジタル制御が重要な役割を果たしている。これらの制御のサンプリング周期と制御周期は、計算機やセンサ・アクチュエータ、AD/DA 変換器の性能によって決定されるが、従来型の制御方式では、サンプリング周期と制御周期を同期させるシングルレート方式が使用されてきた。これに対して、本論文では入出力の周期を敢えて多重化するマルチレートサンプリング制御方式の提案を行った。

本論文は前半部では、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マルチレート制御系の新しい理論的枠組を構築した。後半部では、これらの核となる制御理論を、ロボット・サーボモータ・ハードディスク装置・2 慣性系・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及び実機実験により、その有効性を明らかにした。

本論文の内容及び構成は、以下のようになっている。

第1章では、従来のマルチレートサンプリング制御の研究を振り返り、その問題点を明らかにし、本研究の位置付けを行なった。従来からマルチレートサンプリング制御に関しては、零点配置・強安定化・同時安定化など様々な理論的研究が行なわれてきたが、制御入力が増動的になるなどの問題点が指摘され、これまでにこれらの研究が実システムに応用されたケースは数少ない。また、低精度エンコーダを用いたサーボモータの速度制御系や、ハードディスク装置に対して、マルチレート制御を適用する試みもなされてきたが、各アプリケーションに対して固有の理論に留まっており、統一的な制御理論を構築する段階には到達していない。このような従来の研究を踏まえ、本論文ではマルチレート制御の統一的な理論体系を構築し、さらに実システムに応用し、実用的な制御方式に発展させた。

目標軌道に対して追従を行なう追従制御系において、従来のデジタル制御方式であるシングルレート制御系では、離散時間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となり、その結果大きな追従誤差を生じる問題点があった。これに対して、本論文の第2章では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を導入して、誤差なく目標軌道に追従する完全追従制御 (PTC) を提案した。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ルダの機構に制限がある系や、むだ時間を持つ系に対しても対応できるよう理論の拡張を行なった。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、その構造が非常に見通しが良いことを明らかにした。

モーションコントロールにおいては、制御出力のサンプリング周期が制御入力周期よりも長いという制限を持つ制御系が数多く存在する。例えば、ハードディスクのヘッドの位置決め制御系では、ディスク上に離散的に書かれたサーボ信号が検出されたときのみ位置信号が検出されるが、最近の高速なプロセッサを使用すれば、制御周期を信号検出の周期よりも4倍程度は高速に設定することが可能である。また、ロボットのビジュアルサーボ系においては、視覚信号は33[ms]程度のビデオレートでしか検出できないが、制御入力となるジョイントサーボ系の制御周期は1[ms]以下と非常に高速である。さらに、低精度エンコーダを用いたサーボモータの速度制御系においては、速度信号の検出周期を短くすると、低速時に量子化誤差の影響が非常に大きくなることから、サンプリング周期を十分に大きく設定することが不可能である。また、近年プロセッサを搭載し、信号処理と通信の機能を追加した高性能なエンコーダが開発されつつあるが、これを使用したモーション制御系においては、位置信号の検出周期は通信の周期に固定化される。

このようなサンプリング周期が相対的に大きい系においては、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る問題点や、ある程度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。これに対して第3章では、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という新しい制御手法を提案し、これにより安定余裕が大幅に改善される手法と、定常状態においてサンプル点間に複数回、外乱を完全に抑圧する制御手法(完全外乱抑圧制御:PDR)を提案した。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れば、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た。

デジタル制御系の設計においては、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するという手法が適用されていた。しかしながら、制御性能の向上のためには、制御帯域を限界まで広げる必要がある。このような場合には、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、従来型の近似的に離散化した制御器では、望ましい性能が得られる保証がなく、制御系が不安定になってしまうことすらある。このような現状に対して、第4章はマルチレートサンプリング制御を導入して閉ループ特性を保存する新しい制御器の離散化の手法を提案した。その特徴は、デジタル制御系の状態変数の閉ループ時間応答が、連続時間領域で設計した望ましい応答に完全に一致(完全状態一致:PSM)するというものである。さらに、サンプリング周期が比較的長い系にも対応できるよう理論的拡張を行なった。

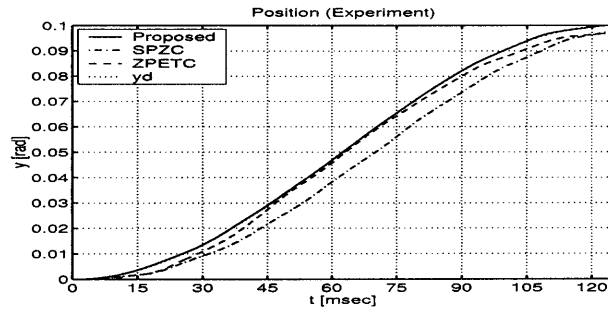
本論文の後半では、前半部で構築した理論を、実際のモーションコントロール系へ適用した。第5章では、まず最初に第2章で提案したマルチレートフィードフォワード制御による完全追従制御(PTC)を、DDロボットのサーボモータの位置制御系に対して実験及びシミュレーションを行ない、従来型の手法に比べて、追従性能が格段に優れていることを実証した(図1)。次に、ハードディスク装置のヘッドの高速移動制御に適用して、その有効性を確認した。その成果は、最も重要とされているショートスパンシーク動作を、ハードウェアの大きな改良をすることなく、従来手法よりも飛躍的に高速化できるというものであった(図2,3,表1)。

第6章では、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、及びロボットのビジュアルサーボ系に適用した。まず、ハードディスク装置に対して、提案するサンプル点間オブザーバを用いれば、ホールダによって生じる大きな位相遅れが回復でき、安定余裕が大きく向上することを明らかにした。さらに完全外乱抑圧制御により、従来手法では不可能とされていたナイキスト周波数に近い高周波領域においても、効果的に Repeatable Runout と呼ばれる周期的な外乱が抑圧できることを示した(図4)。さらに、ビジュアルサーボ系に対して、作業空間コントローラと非線形写像を導入することにより線形化を行ない、提案するマルチレートフィードバック制御系を適用した。これにより、周期的な運動を繰り返す目標物体に対して、誤差なくロボットを追従させることが可能となることを示した。

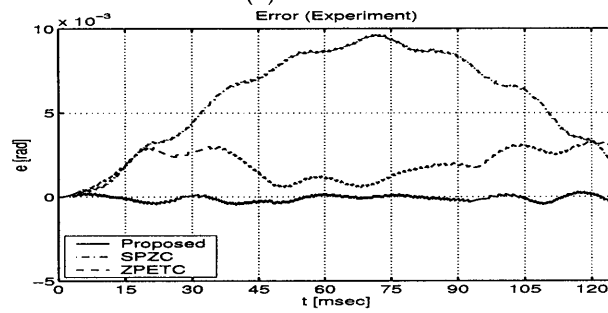
第7章では、第4章で提案した完全状態一致制御(PSM)による制御器の離散化手法をモーションコントロールに適用した。まず最初に、外乱オブザーバを用いたサーボモータのロバスト位置決め制御系に対して提案手法を適用し、従来手法よりも限界に近い高性能な設計が可能となることを明らかにした(図5)。次にハードディスク装置の振動抑制制御系に対して、本手法を適用すれば、従来は不可能とされていたナイキスト周波数周辺の振動抑制制御がマルチレート制御により可能となることを明らかにした。

第8章では、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振り返り、フィードフォワード、フィードバックの両面性や、ハードウェアによるサンプリング機構の制限に関する視点や、応用可能なシステムに基づく観点から、提案した手法のそれぞれの関連性を見通し、本論文がマルチレート制御の統一的な枠組を確立することに成功したと結論づけた。本論文は制御理論的な新規性も重要であるが、コンピュータの性能を限界まで利用する、実用的な制御法であるという観点からも、その工学的重要性は計り知れない。本論文の後半で述べた適用例は、従来の制御手法の性能を遥かに凌駕し、実際の製品にも適用され、実用化されている。この事実からも本研究が制御工学に新たなブレークスルーを与え、従来のモーションコントロールが超えられなかった壁を打破することに成功したとすることができる。

なお、本文は英語により記述されていることを付記する。



(a) Position



(b) Tracking error

図 1: 完全追従制御によるサーボモータの位置決め制御系の実験結果
(提案手法は従来手法 (SPZC,ZPETC) に比べて誤差が非常に小さく、追従性能が大きく向上した。)

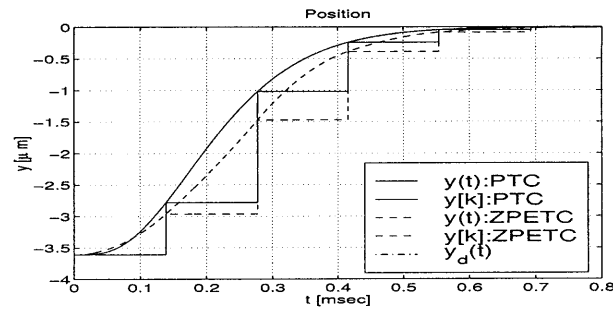


図 2: ハードディスク装置のシミュレーション結果
(提案する完全追従制御法は従来手法 (ZPETC) より高速なシークが達成されている。)

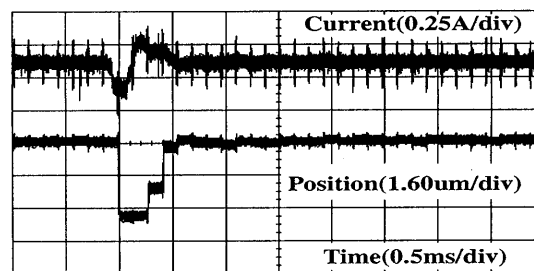


図 3: ハードディスク装置の実験結果
(提案手法により、従来は不可能とされていた 3 サンプルでのシーク動作が可能となった。)

表 1: 実験により達成されたシーク時間

	PTC [ms]	ZPETC [ms]	Conventional [ms]
1trk	$3.17T_s$	$3.77T_s$	$4.14T_s$
6trk	$8.66T_s$	$9.57T_s$	$14.0T_s$

(提案手法 (PTC) により、従来より高速なシーク時間が達成された。)

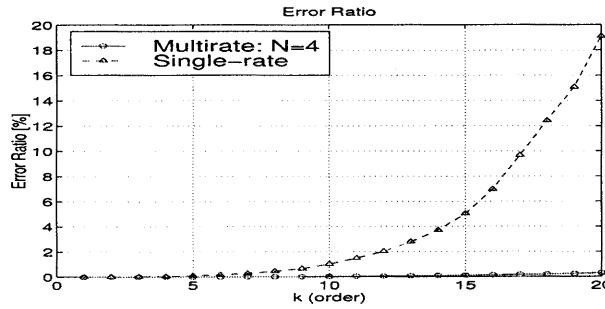
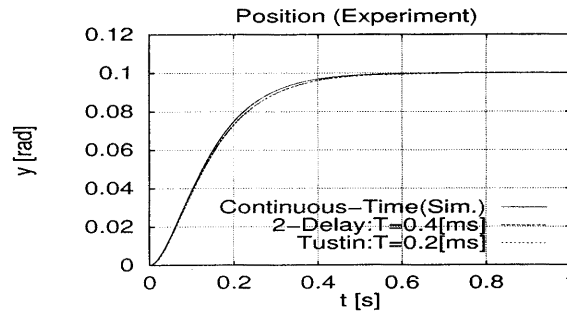
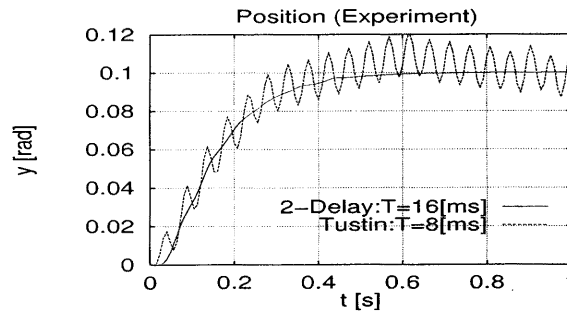


図 4: 完全外乱抑圧制御 (PDR) によるハードディスクの高精度位置決め制御の外乱抑圧率 (提案手法は、従来のシングルレート制御に対して、高周波領域でも効果的に外乱を抑圧できている。)



(A) 制御周期 0.2[ms]



(B) 制御周期 8[ms]

図 5: 完全状態一致制御 (PSM) によるロバストサーボ系の実験結果

(サンプリング周期が制御帯域に比べて十分に小さいと仮定できる場合には従来手法 (Tustin) でも十分な性能が得られる (図 A)。この仮定が成り立たない領域では、従来法は不安定化するが、提案手法では安定な応答が得られている (図 B)。)