

平成21年5月21日現在

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2006～2008

課題番号：18760314

研究課題名（和文） ハイブリッド同定法によるハードディスクのモデリングと制御

研究課題名（英文） Modeling and Control of Hard Disk Drives by Using  
an Identification Method for Hybrid Systems

研究代表者 平田 光男（HIRATA MITSUO）

宇都宮大学 工学研究科・准教授

研究者番号：50282447

## 研究成果の概要：

ハードディスクドライブでは、トラック追従のためのフォロイング制御と、トラック間移動のシーク制御では、制御対象の動特性が異なる。そこで、本研究では、ハードディスクの制御対象をハイブリッドシステムと捉え、ハイブリッド同定法の開発を行った。そして、多項式カーネルに基づくハイブリッド同定法を提案した。その有効性はハードディスクの制御系を模擬したバネマスダンパシステムにより、実験的に検証した。

## 交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1500,000	0	1500,000
2007年度	1500,000	0	1500,000
2008年度	600,000	180,000	780,000
総計	3600,000	180,000	3780,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：制御工学

キーワード：制御システム

## 1. 研究開始当初の背景

計算機の外部記憶装置として用いられているハードディスクドライブの性能向上にはめざましいものがある。しかしながら、ハイビジョン映像などの保存先として考えた場合、この容量は決して十分ではなく、さらなる大容量化が望まれる。大容量化とアクセ

ス速度の向上において、ヘッド位置決め制御系の果たす役割は大変大きい。

ハードディスクの制御系は、高速性と高精度性の両方を兼ね備えた高度なサーボ技術が必要とされ、詳細なモデリング技術（制御対象及び外乱）、ロバストなフィードバック制御系設計、目標軌道設計を含めたフィード

フォワード制御設計のすべてが重要な研究課題となっている。特に、ここ数年で位置決め精度はナノメートルの領域に達しており、今まで問題にならなかったさまざまな課題が浮上している。

ハードディスク装置の制御系では、磁気ディスクに書かれたデータを読み書きするためにトラックに精度良く追従するフォロイング制御と、目的のトラックにできるだけ速く移動するシーク制御に大別できる。フォロイング制御とシーク制御では、要求される制御性能が異なるため、別々の制御方法が用いられてきた。また、制御対象の動特性も、異なることが知られており、シーク制御系では二重積分型の制御対象を用い、フォロイング制御系では、二次遅れ系の制御対象が用いられている。ナノメートルの精度が要求されるフォロイング制御と最大で数センチもの移動を伴うシーク制御では、制御対象のもつ非線形性により振る舞い変わるからである。しかし、シーク制御からフォロイング制御へ移行する際に、両者のモデルがどのように切り替わるか、といったことにはこれまであまり注意が払われてこなかった。ところが、位置決め精度がナノメートル域に達するに従い、シーク制御からフォロイング制御へ切り替わる際の過渡応答をシミュレーション通りに整形することが難しくなり、アクセス時間を短縮する上で問題となってきた。この問題を根本的に解決するには、シーク制御系及びフォロイング制御系の個々のモデルだけではなく、シーク状態からフォロイング状態への切替までを含む、ヘッドアクチュエータのすべての振る舞いを表現するモデルの獲得が必要となる。

ハードディスク装置に限らず、メカトロニクスにおけるモーションコントロールでは、高精度追従と高速移動制御の両立はもはや欠かすことができず、ここで確立した技術は、光ディスクドライブや半導体及び液晶用露光装置、高精度な加工を実現する工作機械など、あらゆるメカトロ製品の制御性能向上に大きく寄与できると考える。

## 2. 研究の目的

前述のように、トラック間の移動制御であるシーク制御系と高精度なトラック追従制御であるフォロイング制御系では異なる数式モデルが用いられる。そこで、本研究では、近年注目されている「ハイブリッドシステム」という考え方を導入し、ハードディスクを複数のシステムがある条件で切り替わると仮定したハイブリッドシステムとしてとらえ、ハイブリッドシステムに対するシステム同定法（以降、ハイブリッド同定法と呼ぶ）の適用を試みる。まず、既存のハイブリッド同定法の有効性を検証する。そして、そこで

生じた問題点を明らかにし、ハードディスク装置のためのハイブリッド同定法を開発する。また、その有効性をシミュレーション及び実験を通して詳細に検証する。

上記一連の研究を通して、ハードディスク装置だけでなく、ナノメートル領域の制御を前提とし、高速性と高精度性の両方を達成するメカトロ制御系に広く適用できる新しいモデリング技術の確立を目指す。

## 3. 研究の方法

以下の3段階に分けて研究を進める。

### (1) シミュレーションによる基礎検討

ハードディスク装置に対するハイブリッド同定法の適用はこれまでほとんど行われてこなかった。そこで、既存のハイブリッド同定法をハードディスク装置に適用し、その有効性を検証する。

### (2) ハードディスク装置のモデリングに適したハイブリッド同定法の開発

(1)の基礎的検討の結果を踏まえ、ハードディスクドライブに適したハイブリッド同定法を開発を行う。その際、ハードディスク装置の制御対象を、一般的なバネマスダンパ系として捉え、より一般的な理論展開を行う。

### (3) 実験による検証

上記(2)で開発した新しいハイブリッド同定法の有効性を実験で検証する。具体的には、ハードディスク装置を模擬した実験装置を作成し、実験装置から取得した入出力データを用いてハイブリッド同定実験を行う。そして、従来法であるARXモデルを用いた同定結果と比較し、提案手法の有効性を検証する。

## 4. 研究成果

(1)ハイブリッド同定法としてよく知られるFerrariらの手法を、ハードディスク装置の同定に適用したところ、良好な結果が得られないことが明らかとなった。フォロイング制御時のようにナノスケールのオーダーで微小変位しかしない場合と、シーク制御の様に数センチのオーダーで大きく動く場合の両者のモデルは、制御対象の粘性摩擦係数がヘッド速度の絶対値で切り替わるハイブリッドシステムとして近似できるが、Ferrariらの手法では、モデルの切り替え条件が変位や速度の絶対値に依存する場合、うまく行かないことを明らかにした。これを簡単な例を用いて示そう。

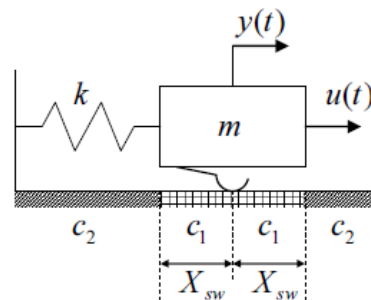


図1 ダンパが変位で切り替わるシステム

図1にダンパが変位の絶対値  $X_{sw}$  で切り替わるシステムを示す。変位  $y(t)$  の絶対値が  $X_{sw}$  より小さいときは **mode1**, 大きいとき **mode2** となるハイブリッドシステムである。このとき、運動方程式は次式となる。

(i)  $-X_{sw} < y(t) < X_{sw}$  (mode 1)

$$m\ddot{y}(t) + c_1\dot{y}(t) + y(t) = u(t)$$

(ii)  $y(t) \leq -X_{sw}$  or  $y(t) \geq X_{sw}$  (mode 2)

$$m\ddot{y}(t) + c_2\dot{y}(t) + y(t) = u(t)$$

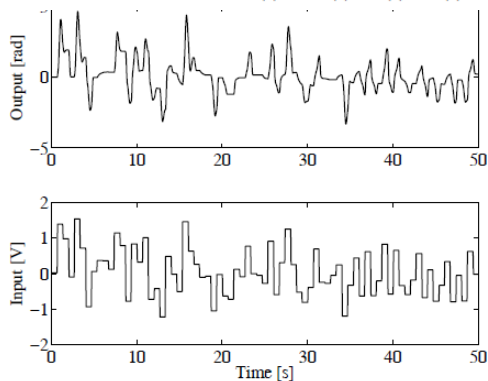


図2 入出力データ

以上から, **mode1** と **mode2** は,  $y^2(t) - X_{sw}^2$  の符号で切り替わることがわかる。しかし, この条件は  $y(t)$  に関して線形な切り替え条件を要求する Ferrari らの方法が適用できない。この他に, 粘性摩擦が速度で切り替わる場合やばね定数が速度で切り替わるシステムの場合も同様のことが言えることから, ハードディスク装置のハイブリッド同定法として利用することができない。

(2) (1) の結果を踏まえ, ハードディスク装置を含む, 一般的なバネマスダンパシステムを考え, システムのパラメータ (粘性摩擦係数やばね定数) が速度の絶対値, あるいは, 変位の絶対値で切り替わる場合のハイブリッド同定法を検討した。そして, システムのパラメータが速度や変位の絶対値で切り替わる場合, 切替条件は, 回帰ベクトルの2次形式の正負で表現できることを示し, さらに, 多項式カーネルを用いたサポートベクタマシン問題に帰着できることを示した。多項式カーネルを用いたサポートベクタマシンの計算については, フリーソフトとして公開されているソルバーが使用できるので, 実用上好都合である。そして, シミュレーションにより, その有効性を示した。

(3) ハードディスクを模擬した実験装置を作成し, (2) で開発したハイブリッド同定法を適用する。実験装置は, 変位の絶対値によって粘性摩擦係数が切り替わるように構

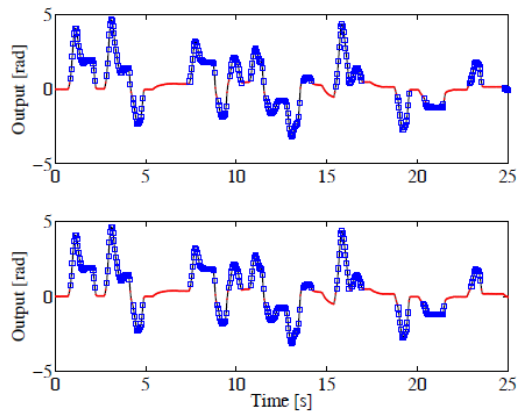


図3 クラスタリング結果

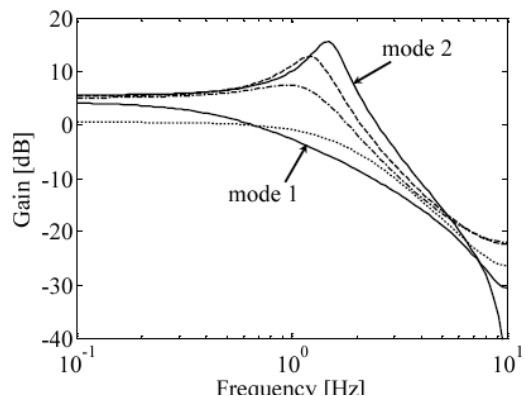


図4 各モードの周波数

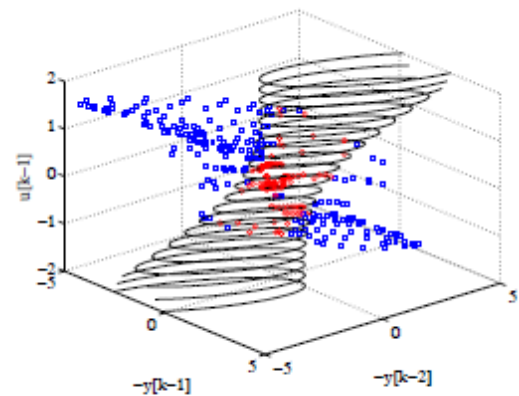


図5 回帰空間

成した。なお, 実験による検証では, 各モードにおける粘性摩擦係数の大きさや, 切り替え条件を変えながらさまざまなデータを取得する必要があるため, 粘性摩擦を速度フィードバックで実現し, その大きさや切り替え条件を簡単に変更できるようにした。

正規性白色雑音を同定入力として加えた時の入出力データを図2に示す。次に, **mode1** と **mode2** にクラスタリングを行った。クラスタリングには従来法と同様に k-means 法を用

いる。その結果を図3に示す。図3の上段はk-means法によるクラスタリング結果、下段は真のクラスタリング結果である。この図から、ほぼ正しくクラスタリングが行われていることが確認できる。

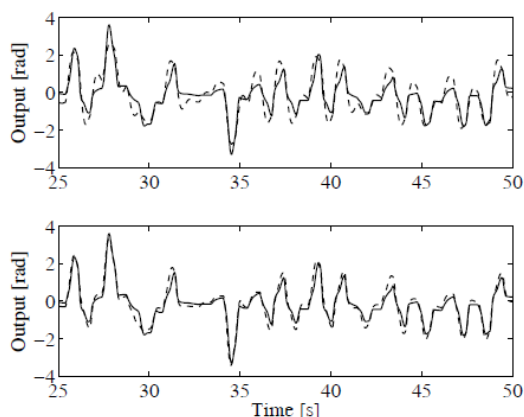


図6 時間応答

図4は各モードの周波数を表しており、実線が真の周波数応答、点線がmode1、破線がmode2、そして、一点鎖線が通常のARXモデルによる同定結果である。この図から、各モードの周波数特性がほぼ正しく同定できていることが確認できる。図5は多項式カーネルによりmode1とmode2に分離された回帰空間を表している。実線が分離面を表しており、赤点がmode1、青点がmode2である。 $y(t)$ の絶対値でmode1とmode2が切り替わっている様子が確認できる。

最後に、時間応答を比較した。図6に結果を示す。上図が従来のARXモデルを用いた場合、下図が提案法を用いた場合の結果を表す。両図において、実線が真の出力、破線が同定モデルの出力を表す。従来のARXを用いた同定法では、適合率が50%と低いが、提案手法では70.7%に大きく向上し、提案手法の有効性を示すことができた。

本研究で提案したハイブリッド同定法は、ハードディスク装置に限らず、変位や速度の絶対値で切り替わるメカニカルハイブリッドシステムのシステム同定に適用できる。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

- ① 平田光男・野口栄・足立修一，速度や変位の絶対値で切り替わるメカニカルハイブリッドシステムの同定法，電気学会論文誌C部門，Vol.128，No.5，pp.781-787，2008，査読有り

[学会発表] (計4件)

- ① 橋本洋平・平田光男・足立修一，変位や

速度の絶対値で切り替わるメカニカルハイブリッドシステムの同定，第51回自動制御連合講演会，2008-11

- ② Mitsuo Hirata，Sakae Noguchi，and Shuichi Adachi，A Hybrid Modeling Method for Precise Positioning System，IFAC World Congress，2008-7
- ③ 平田光男，HDDのハイブリッド同定，電気学会技術報告 第1055号「マストレージシステムのための次世代サーボ技術」，pp.9~13，2006
- ④ 平田光男・野口栄・足立修一，速度によって切り替わるメカニカルハイブリッドシステムの同定，計測自動制御学会第6回制御部門大会資料，pp.479~482，2006

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

平田光男 (HIRATA MITSUO)

宇都宮大学・大学院・工学研究科・准教授

研究者番号：50282447