外乱推定による VTR キャプスタンモータの ロバスト制御

正会員 長 沢 雅 人[†], 横 山 英 二[†]
石 田 禎 宣[†], 江 口 健太郎^{**}
正会員 佐 野 彰^{**}, 正会員 三 橋 康 夫^{**}

あらまし 我々は、現代制御理論の外乱推定器で構成した外乱除去ループにより、VTR キャプスタンモータの回転変動を大幅に抑圧し、モータのバラツキに対してロバストなシステムを実現した。また、FG センサのノイズを抑圧する速度状態推定器を用いて、上記外乱推定能力を向上させ、これを実用化した。

1. ま え が き

現行のアナログ方式 VTR においては、回転機構部の性能が画質、音質を大きく左右しており、近年では小型軽量化、高画質化のため、ドラムやキャプスタンへの要求性能も、きわめて高くなっている。従来の VTR におけるモータ制御では、デジタル化およびソフトウェア化することで回路の信頼性向上、小型化を進展させたが、制御システム本来の性能（ワウ・フラッタ、外乱抑圧度、モータのバラツキに対する制御剛性等）を向上するには至らなかった。そこで、VHS-VTR のキャプスタン制御において、現代制御理論に基づく外乱状態推定器による外乱除去ループを設け、走行系ワウ・フラッタを大幅に改善すると共に、モータの経時変化バラツキに対してシステムを高剛性化した。また、上記外乱推定能力が、FG センサの観測ノイズで限定されることに着目し、観測ノイズを効果的に抑圧する速度状態推定器と組合せることで外乱推定能力を向上させこれを実用化した。

2. モータにおける外乱抑圧能力

VTR 等の情報記録機器では、ジッタ、ワウの低減

[†] 三菱電機株式会社 電子商品開発研究所

^{**} 三菱電機株式会社 京都製作所

“Robust Control System Using Disturbance Observer for VTR Motor” by Masato Nagasawa, Eiji Yokoyama, Yoshinobu Ishida (Consumer Electronics Laboratory, Mitsubishi Electric Corporation, Kyoto) and Kentarou Eguti, Akira Sano and Yasuo Mituhashi (Kyoto Works, Mitsubishi Electric Corporation, Kyoto)

が大きな課題となっている。そのため、サーボ系の外乱抑圧能力と、機構系の外乱量が評価される。従来の位相制御+速度制御における外乱抑圧度は一般的に図 1 のような山形特性であり、図中速度制御分担領域にて、機構系外乱量（テープ走行負荷変動、トルクリップル、FG センサの着磁ムラ等）を少なくすることが設計のポイントとなる。当然、イナーシャを大きくすることや、速度制御系の帯域アップによる抑圧度の改善は、デッキの小型軽量化に反する他、FG センサの精度を維持しつつ函数を増やさなければならぬ困難な問題に直面する。

3. 外乱状態観測器

図 2 は外乱推定の原理図で、加速度検出結果に基づ

図 1 AFC, APC サーボ系における外乱抑圧特性
Disturbance suppression characteristics of AFC and APC servo system.

図 2 外乱推定の原理
The principle on estimated disturbance.

き、図中モータの発生トルク T_m と外乱トルク T_G の力の釣合いを、オブザーバ内で電氣的に再現している。この結果、推定外乱 T_G を入力にフィードフォワード加算することで、外乱があってもワウ・フラッタが生じないシステムが構成できる。このときモータに対する出力速度は、

$$I_a K (1/Js) = \dot{\theta} \quad (1)$$

で表されるが、推定器込みのモータ入出力特性は、

$$I_a K_n (1/J_n s) = \dot{\theta} \quad (2)$$

となるため、外乱量のフィードフォワード補償によってモータの諸特性 (K, J) が変化しても駆動電流から速度までの見かけ上の特性は (K_n, J_n) に固定され、制御剛性が無限大になっている¹⁾。しかし、微分器もしくは加速度センサを用いた上述のシステムは、実際上観測ノイズや安定性の観点から実現不可能であるため、現代制御理論におけるゴピナスの最小次元オブザーバの形に作り変えた。ここで、モータの状態方程式を外乱と回転速度について立てると、

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ T_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{J} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ T_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{K}{J} \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (3)$$

$$y = [1, 0] \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ T_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

となり、推定値は、

$$\begin{bmatrix} \hat{\theta} \\ \hat{T}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \omega + \begin{bmatrix} 1 \\ -gJ \end{bmatrix} \dot{\theta} \quad (5)$$

ω : 積分器の出力

となるため、結果的に図3のシステムが構成される。しかし、微分器を含まない上述のオブザーバはすべての周波数領域で外乱を抑圧するわけではなく、図3における外乱 (T_c) から速度 ($\dot{\theta}$) までの伝達特性が

$$-((T_c)(S/(x+g)))/JS = \dot{\theta} \quad (6)$$

のような低域遮断特性となっている¹⁾。このオブザーバを用いた結果、外乱推定帯域 $g(\text{rad/sec})$ 以下の周波数領域において従来の外乱抑圧度をさらに改善でき、 g を大きくするほど抑圧能力が向上する。

図 3 外乱推定器による外乱抑圧
Disturbance suppression by Disturbance observer.

4. 外乱推定値の改善

外乱推定帯域 g はむやみに大きくできるわけではなく、外乱ループの安定性と密接な関係がある。速度ループ込みの外乱ループのオープンループ特性 $G(s)$ は、オブザーバがモデルマッチングしている場合、

$$G(s) = \{1/(1+\alpha S)\} \{S/(S+g)\} g \{1-(F/V)\} \quad (7)$$

$$\therefore \alpha = \{(F/V)K_{AFC}K\}/(J)$$

K_{AFC} : 速度制御系ゲイン

であり、観測ノイズに対し、フィードフォワードループであることから、

$$\|G(s)\| < 1 \quad (8)$$

が安定のための条件となる。(7)式の第1, 2項は低減遮断および高域遮断特性であり、図4の実測値に見られる山形の周波数特性であることを示している。このとき第3項の外乱推定帯域 g を大きくすると、図4のゲイン余裕が減少し、(8)式より不安定になることは(7)式からも明らかである。また、第4項はFGセンサが理想的な速度検出器の場合 $(F/V)=1$ となるため、 $\{1-(F/V)\}=0$ によって(7)式=0となり、外乱ループが充分安定となることを意味する。このとき g は限りなく大きくできるが、実際速度検出にはFGセンサの着磁ムラ、量子化ノイズ等が存在するため $(F/V) \neq 1$ となり、 $\{1-(F/V)\} \neq 0$ となる。そのため、外乱ループの安定性を維持しつつ外乱推定能力 g を大きくするには、速度検出に含まれるノイズを図4の山形特性頂点付近の周波数領域において抑えることが必要である。そこで今回、図5の速度推定オブザーバの推定速度を、外乱推定に必要な速度検出入力とすることによって、観測ノイズを抑圧し g を大きくした。図5のオブザーバは²⁾³⁾ある程度の動特性をそこなわずにFGセンサのむだ時間を駆動電流からの情報で補い、高周波の観測ノイズをフィルタリングする効果がある。

図 4 外乱抑圧ループのオープンループ特性
Open loop bode diagram of disturbance suppression loop.

図 5 外乱推定能力の高い外乱状態推定器
New disturbance observer.

3. モデルマッチング

現代制御理論に基づくシステムでは、ミスモデル (制御対象とパラメータのずれ) の影響を考慮する必要がある。図 3 の制御入力 V_{in} から $\dot{\theta}$ までの伝達特性は、

$$V_{in} \left[\frac{K}{JS} \right] \left[\frac{(S+g)}{S+g(1+\beta(K(J_n/J)(F/V)-K_n))} \right] = \dot{\theta} \quad (9)$$

$$\therefore \beta = 1/K_n$$

となる。(9)式より、 $(F/V) \approx 1$ と見なせる周波数領域においてモデルマッチング時 ($J_n = J, K_n = K$) には、 $K(J_n/J)(F/V) - K_n = 0$ となり (9) 式の第 3 項 = 1 となるため、 $V_{in} - \dot{\theta}$ 間の伝達特性はオブザーバが存在しないときの特性に等しい。しかし、

$$K(J_n/J)(F/V) - K_n > 0 \quad (11)$$

なるミスモデルにより第 3 項は位相進み特性となり、

$$K(J_n/J)(F/V) - K_n < 0 \quad (12)$$

なるミスモデルにより、第 3 項は位相遅れ特性となる。よって、元々の AFC, APC 制御システムのオー

図 6 ミスモデル時のキャプスタン制御系オープンループ特性
Open loop bode diagram of capstan motor control in miss model matching.

図 7 強制外乱に対するシステムの色度変動
Velocity error vs disturbance.

図 8 キャプスタンモータにおける速度ムラ
Wau-flatta of capstan motor.

図9 テープ走行系ワウフラッタ
Wau-flutta of tape speed.

ブループ特性において、モデルマッチング時には変化がなく、ミスモデル時には図6のように遅れ進み特性となって現れ、実測もこれを裏づけている。

6. 動作結果

本システムでは、図7のように外部から強制的に加えた $250 \text{ g} \cdot \text{cm}$ の外乱に対して、従来あった 1.2 rad/sec もの速度変動を、ほぼゼロにまで抑圧することができる。その結果、外部振動や走行負荷変動を効果的に抑圧した。図8は実機におけるキャプスタンモータ

の速度検出出力を拡大したもので、本システムの導入により速度ムラが少なくなっている。さらに、固定ヘッドオーディオのワウ・フラッタが図9のように少なくなっていることから ($-10 \sim 20 \text{ dB}$)、きわめて安定な走行系が実現できていることが確認された。

7. むすび

今回我々は、現行VTRにおけるテープ走行系を安定化させるため、外乱状態推定器による新たな外乱除去ループを構成し、キャプスタンサーボの外乱抑圧能力を大幅に改善した。さらに速度推定法に基づきFGセンサの観測ノイズを抑え、結果的に外乱推定能力を向上させた。以上により、負荷変動に起因する走行ワウを $10 \sim 20 \text{ dB}$ 改善すると共に、外乱に対してきわめて強く、モータの経時変化バラツキに対しロバストな制御系を実現し、これを実用化した。

最後に、本研究に当り有益な助言を頂いた、電子商品開発研究所 大西所長、国井部長、多大な協力を頂いた京都製作所 森マネージャ、加藤氏に謝意を表します。

(1990年9月26日受付、1990年10月16日再受付)

【参考文献】

- 1) 大西：“オブザーバを用いた電動機制御”，S63 電学大全，13-S，16-2-3
- 2) 長沢ほか：“オブザーバを用いた光ディスクのトラッキング制御”，テレビ誌，43，5（1989）
- 3) 長沢，横山ほか：“家庭用デジタルVTRにおけるサーボ方式の検討”，テレビ学技報，14，41（1990）
—オブザーバに関する一般知識—
- 4) 岩井，井上，川路：“オブザーバ”，コロナ社

ながさわ まさと
長沢 雅人 昭和58年，山梨大学工学部精密工学科卒業。同年，三菱電機(株)に入社。電子商品開発研究所に勤務し，現在に至る。AV機器の精密制御技術，特にVTR，ディスク関連のサーボシステムの研究に従事。正会員。

よこやま えいじ
横山 英二 昭和62年，愛媛大学大学院工学研究科機械工学専攻修了。同年，三菱電機(株)に入社。同社電子商品開発研究所に勤務し，現在に至る。VTR等の制御システムの研究に従事。

いしだ よしのぶ
石田 禎宣 昭和47年，大阪大学大学院工学研究科修士課程修了。同年，三菱電機(株)に入社。中央研究所，応用機器研究所を経て，56年より，電子商品開発研究所に勤務。オーディオ・ビデオ装置のデジタル信号処理技術，誤り制御技術，記録再生技術等の研究開発に従事。

えぐちけんたろう
江口 健太郎 昭和63年，名古屋大学計測工学科卒業。同年，三菱電機(株)に入社。VTRの要素技術開発に従事。現在，同社京都製作所ビデオ技術部勤務。

さの あきら
佐野 彰 昭和51年，同志社大学工学部電気工学科卒業。同年，新日本電気(株)に入社。56年，三菱電機(株)に転移。以来，VTRの制御用ICの開発，オートトラッキング機能の開発に従事。現在，同社京都製作所ビデオ技術部に勤務。正会員。

みやはし やすお
三橋 康夫 昭和41年，慶応義塾大学工学部電気工学科卒業。同年，三菱電機(株)に入社。テレビ技術部にて製品設計，54年より，ビデオ技術部に移り，画像処理，デジタルトラッキング，オートトラッキング技術の開発に従事。現在，同社京都製作所ビデオ技術部に勤務。正会員。