

PES 信号を利用したフィルタ設計に基づく SSTW 制御器の提案

呉 世訓, 堀 洋一 (東京大学生産技術研究所), 中村 則仁 (東日本電信電話株式会社)

PES Filter Design for Control of Self-servo Track Writer
Sehoon Oh, Hori Yoichi (Institute of Technology, University of Tokyo)
Norihiro Nakamura (Nippon Telegraph and Telephone East Corporation)

Abstract

Two approaches are taken in this paper to minimize the propagation of writing error in the Self-servo Track Writer (SSTW): estimation of the absolute head position and feedforward filter design using the Position Error Signal (PES) in the previous track. To improve the estimation of the head, Kalman filter is designed and removes the effect of sensor noise in PES. For the feedforward filter design problem, two kinds of transition matrix are derived which can describe the propagation characteristics of SSTW. To verify the matrix, a feedforward filter is designed based on the matrix. Simulations results verify the effectiveness of two suggestions: accurate head position estimation using Kalman filter and feedforward filter design based on the transition matrix.

キーワード：磁気ディスク装置, セルフサーボトラックライタ (SSTW), 誤差伝播, カルマンフィルタ, 周波数整形 (Hard Disk Drive, Self-servo Track Writer, Error propagation, Kalman filter, Loop shaping)

1. 序 論

1.1 セルフサーボトラックライタの必要性 磁気ディスク装置はもはやコンピュータの中での記録装置だけでなく, HDD レコーダで代表されるコンシューマエレクトロニクスでも広く用いられるようになってきている。このような状況からその記憶容量も急速に増えてきており, それに伴いサーボトラックの書き込み時間が増大している。この増大によるコスト増は問題になってきている。

そこで, 従来の Push-Pin 方式にサーボトラックライタに代わる, 磁気転写型サーボトラックライタ, Media-level サーボトラックライタなどの多数の手法が提案されている。本稿ではそういった流れの中で, 磁気ディスク本来に備わっている読み込み, 書き込み機能を利用しているセルフサーボトラックライタ (Self-servo Track Writer, SSTW) について論じることにする。

この SSTW は基本的に前周に書き込まれたサーボトラックを指令値として次の周のトラックを書き込んでいく, 繰り返しの自己複製特性を持っている。それによってトラックに一回生じた誤差が基本的にはそのまま残り, 周波数によっては伝播されていく特長をもっている。

これに関して,

- (1) 高周波数領域における 0 以上の補感度関数のゲイン
- (2) 磁気ディスク特有の各種外乱
- (3) 限られている観測信号

と, その問題点が整理されてもいる⁽¹⁾。

1.2 本稿の目標 そこで, 本稿では SSTW の繰り返し特性だけに注目してこれらの問題の解決を試みる。もちろん, 実際の SSTW の実現には本稿が問題としている繰り返しによる誤差の伝播以外にも解決しなければならない問題が多数存在するが, 本稿ではあくまでも繰り返しの特

徴だけに注目することにする。

本稿は以下のような構造で構成される。まず 2 節で対象となる SSTW をモデリングし, その誤差伝播特徴を論じる。3 節ではその誤差伝播特性を抑制するための具体的な制御器の中, ヘッド位置推定手法に関して説明し Kalman Filter によってその性能改善を試みる。そして 4 節では SSTW の繰り返しにおける誤差伝播特性を解析し, それをフィードフォワードフィルタ設計に反映する。最後の 5 節で結論を述べる。

2. セルフサーボトラックライタのモデリングと問題定式化

SSTW の前述したように磁気ディスク装置本来に備わっている読み込み機能ですでに書かれたサーボトラックへ追従し, その時に書き込みヘッドで次のサーボトラックを書き込む運動を繰り返している。各周を書き込むときの動きは従来のハードディスク制御のフォロイング動作と同一である。そこで, フォロイング制御に利用するハードディスクモデルを利用することで SSTW を記述することができる。

2.1 セルフサーボトラックライタのモデル化 図 1 に SSTW における自己複製特性をブロック線図で表した。制御器 C とプラント P の一組で構成されているループがフォロイング制御時のハードディスクの動作を表している。ただし, 図に表記されている各記号の意味は表 1 に紹介されている。

n 周目のヘッド位置によって書かれた位置 y_n が $n+1$ 周目の位置指令として与えられている。このループによって SSTW の自己複製特性が現れる。

2.2 セルフサーボトラックライタにおける誤差伝播特性 以上で説明した自己複製特性があると周を重ねて書いていく途中に入ってきた雑音や外乱が消えずに伝播して

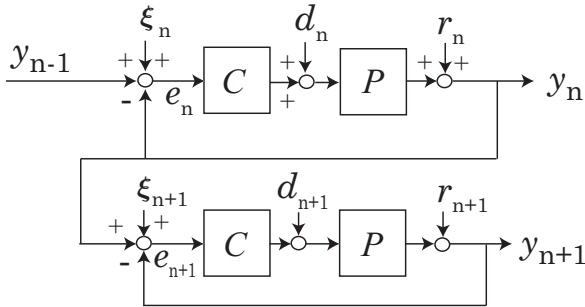


図 1 セルフサーボトラックライタの自己複製特性
Fig. 1. Self-reproduction in Self-servo Track Writer

表 1 使用した記号の定義
Table 1. Definition of Symbols

y	Absolute position of the head
Δy	Position error from the ideal circle track
ξ	Sensor noise in Position Error Signal
u^{ff}	Feedforward control input
d	Torque disturbance
r	Repeatable runout (RRO) w/ flutter noise
e	Position Error Signal (PES)
$n(\text{subscript})$	n th track
$ref(\text{superscript})$	Reference signal
$KF(\text{superscript})$	related with Kalman Filter

いく現象が起きる。フォロイング制御では高域までの強い制御をかけていて様々な外乱が抑えられているが、完全に消去されるとは言えない。それに起因し生じた誤差が SSTW では、周を増すごとに増幅して書き込まれるサーボトラックに現れるようになる。

たとえば、出力端に加わったトルク外乱 d_n は最初の周では $\frac{P}{1+PC}$ の特徴をもって抑えられて出力 y_n に現れるが、それが次の週の指令値として入ることで $\frac{PC}{1+PC}$ の補感度関数を通し、制御帯域内に残った誤差はその後永遠に残ることになる。またウォータベッド効果によって抑え切れなかった周波数帯の外乱などはずっと伝播されることになる。これを抑えない限り SSTW の実現は難しい。そこで、本稿ではこの誤差伝播特徴を抑えるべく、測定できる位置誤差信号 (PES) を利用して誤差伝播を抑える制御器を提案する。

2.3 ベンチマーク問題を利用したシミュレーション
本稿では SSTW における誤差伝播特徴の解析と制御を行う際に電気学会の「マストレージシステムのための次世代サーボ技術調査専門委員会」におけるワーキンググループが作成したフォロイングモード用のベンチマーク問題ソフト⁽³⁾を利用してシミュレーションを行う。図 2 に一周分の動きをシミュレーションするブロック線図を示した。このブロック線図で一周分のシミュレーションを行い、ヘッドの位置 Y と位置誤差信号 PES を保存、次の周で保存した Y を指令値として、PES をフィードフォワード制御入力の

ソースとして利用する。

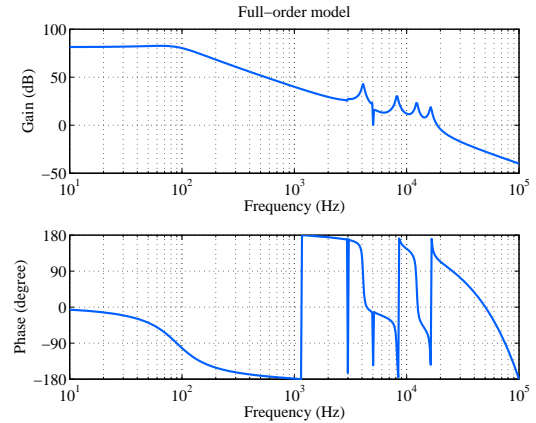


図 3 VCM モデルの周波数特性
Fig. 3. Frequency Response of VCM Model

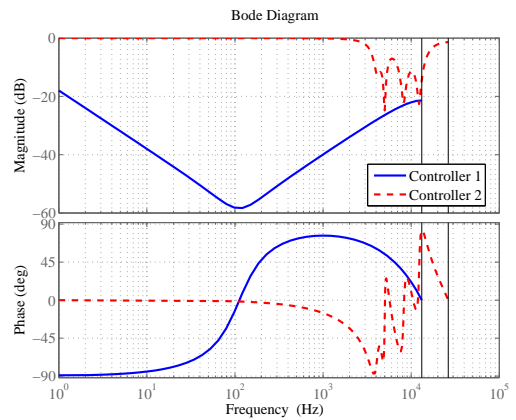


図 4 フィードバック制御器の周波数特性
Fig. 4. Frequency Response of Controllers

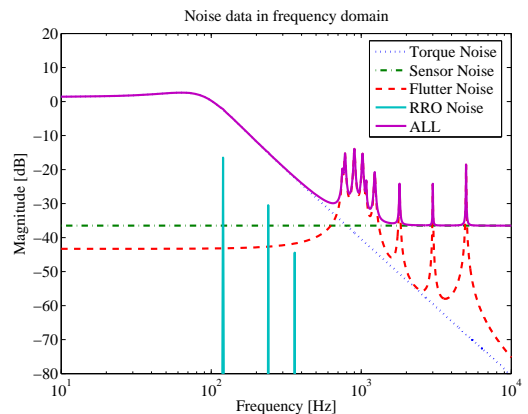


図 5 考慮する外乱の周波数特性
Fig. 5. Frequency Characteristics of Disturbances

図 3 から図 5 までにベンチマーク問題で利用している VCM プラント、二つの制御器、考慮する外乱の周波数特

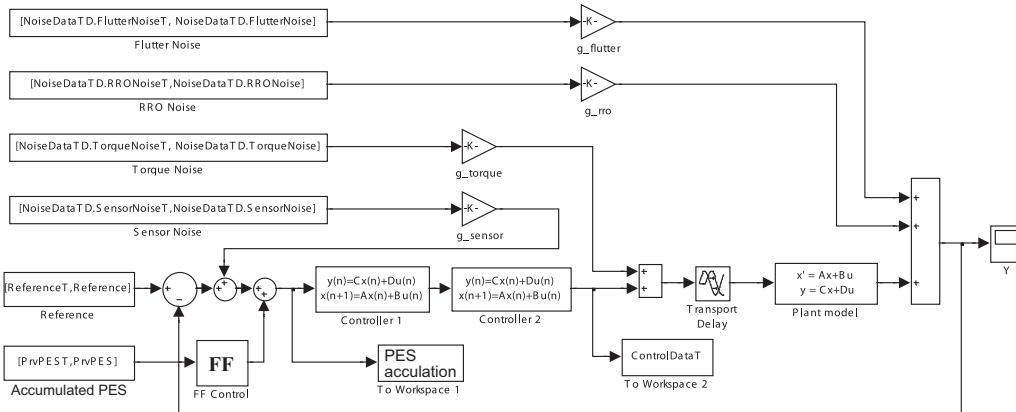


図 2 利用するベンチマークシミュレーションのブロック線図
 Fig. 2. Block-diagram of Benchmark Simulation

性を表した。フォロイング用のフィードバック制御器は離散 PID 制御器とその 2 倍のサンプリング周波数を持つノッチフィルタがマルチレートとして入っている。また、各外乱や雑音は每周新しい乱数に基づいて生成される。図 2 で FF と記されているブロックは前周の PES 信号をフィードフォワード制御入力として入れるときに利用するフィルタである。このフィルタの適切な設計によって誤差伝播特徴を抑えていくのが SSTW 制御の大きな目標である。

誤差伝播抑制制御の評価はヘッド位置 Y と位置誤差 PES の分散値による変動を持って行う。平均値も確かめる必要があるのは言うまでもないが、以下行われたすべてのシミュレーションの結果ではどれでも 0 として近似できる小さい値だった。

まず、これからの比較のため伝播抑制がまったくない場合の誤差伝播特徴をシミュレーションによって確かめ、図 6 に示した。トラック番号に対する PES とヘッド位置の分

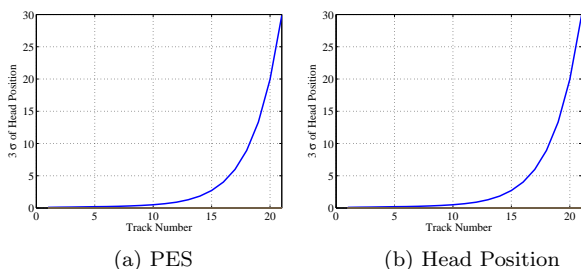


図 6 PES(a) とヘッド位置 (b) の 3σ の変化
 Fig. 6. Transitions of 3σ of PES and Head Position

散値を 3σ で表したグラフで、周が増えるにつれ分散が指数的に増加しているのがわかる。

3. ヘッド位置推定による誤差伝播抑制制御

PES 信号を利用する SSTW 制御器はトラック中心から見たヘッドの絶対位置を推定するアプローチ^{(1), (4)} や前周の PES 信号をフィルタリングして次の周にフィードフォワード信号として入れるアプローチ⁽⁵⁾ がある。本稿では両手法のこの違いを明確にし、それぞれを少しずつ改良した手法を提案する。本節ではまずヘッド位置推定におけるセンサ雑音の問題に対し Kalman Filter を導入することで解決を試みる。

3.1 位置誤差の和によるヘッド位置推定 每周得られる位置誤差信号からその周に書くべき真円の情報を計算する手法である。ヘッドの読み込み部と書き込み部の距離を l とすると各周は l の間隔をもって同心円を描くことになる。 n 周目に書くべき円は半径 nl を持つ真円であるが、誤差伝播が起きると実際に書かれるサーボトラックはこの真円からずれることになり、しかも制御系が利用できるヘッド位置の情報は前周に書き込まれたトラックからの誤差 (PES) しかないので真円を書くことがさらに難しいとされている。

そこで、文献^{(1), (4)} では以下の式 (2) の計算で真円からのずれを推定している。

$$e_n[k] = y_{n-1}^{ref}[k] - y_n^{ref}[k] + \frac{1}{1+PC}\xi_n[k] \cdots (1)$$

$$\sum_{i=1}^n e_i[k] = y_0^{ref}[k] - y_n^{ref}[k] + \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{1+PC}\right)^i \xi_i[k]$$

$$= \Delta \hat{y}_n[k] = u_{n+1}^{ff}[k] \cdots \cdots \cdots (2)$$

推定した $\Delta \hat{y}_n[k]$ を、次の周を書くときのフィードフォワード入力 $u_{n+1}^{ff}[k]$ として入れることで真円からのずれを補償する。しかし、この手法は式 (2) にも現れるように PES に現れる白色雑音も蓄積することになり、ヘッドに位置の分散が徐々に大きくなっていく問題を持っている⁽²⁾。

3.2 ヘッド位置推定における観測誤差の影響 式 (2) の PES 信号を蓄積したフィードフォワード入力補償を入れることで n 周目のトラックでは

$$e_n[k] + u_n^{ff}[k] = y_n[k] - y_{n-1}[k] + u_n^{ff}[k] + \xi_n[k] \quad (3)$$

がフォロイング制御によって抑えられることになり, $y_n[k]$ を真円に近づける効果が期待できる. フォロイング制御の結果として書き込まれるヘッドの位置は, 制御帯域の中では

$$y_n[k] \rightarrow y_0[k] + \sum_{i=1}^{n-1} \left(\frac{1}{1+PC} \right)^i \xi_i[k] + \xi_n[k] \cdots \quad (4)$$

に収束する. 書き込み部と読み込み部の距離による半径の増加分を無視している仮定を考えると, このフィードフォワード補償によって n が増えていっても常に真円に近づけることが可能なのがわかる. しかし問題なのは ξ で表されているセンサー雑音で, フィードフォワード補償があっても完全に消えることはなく, 感度関数がかけられながら伝播していくのがわかる.

この特徴をシミュレーションで確かめる. 図 7 は式 (2)

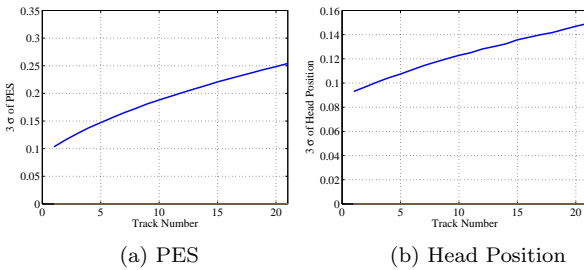


図 7 PES(a) とヘッド位置 (b) の 3σ の変化
Fig. 7. Transitions of 3σ of PES and Head Position

のフィードフォワード補償を入れたときのシミュレーション結果である. このグラフが右上がりであるということは外周の方にトラックを書き加えていくとき, そのトラック信号が上記のような分散を持って振動することを意味する. すなわち, 誤算が伝播しヘッドの位置が振動的になり, 書かれるサーボトラックも振動的になることを意味する. また, 各周のサーボトラック自体の位置も重要であるが, PES で表される隣のサーボトラックとの相関位置も実用上重要な評価項目であるので両方の分散を同時に評価する.

シミュレーションの結果, このフィードフォワード補償値とする制御は図 6 に比べると大幅に伝播を抑えていることがわかるが, どちらも誤差伝播がまだ残っている. 特に PES の方の誤差伝播が大きい.

また, このシミュレーションでは PES 信号の蓄積にゲイン 1 をかけてフィードフォワード入力としているが, 文献^{(1), (4)}では 1 以下のゲインをかけた方がよりよい制御性能が得られるとの報告がある. そこで, ゲインを 0.88 にしてシミュレーションを行ってみたが図 7 の実験より伝播が大きかった. このことに関しては次節で議論を行う.

3.3 Kalman Filter を利用したより正確な絶対トラック信号位置推定 PES における白色雑音が問題になっていることから, Kalman Filter を適用することで白色雑音の影響をなるべく抑えるように制御を行う. まず, PES のセンサノイズを考慮した Kalman Filter を設計する.

図 1 の y_n から y_{n+1} までのシステムをプラントとして設計に利用する. 簡単化のために VCM は 2 次のノミナルモデル, フィードバック制御器はノッチフィルタを入れていない PID コントローラだけを Kalman Filter の設計に入れる. よって式 (5) で定義される対象となる状態は VCM の状態 2 次, 制御器の状態 3 次を含む 5 次のものである.

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_i^{KF}[k+1] &= A\mathbf{x}_i^{KF}[k] + B\mathbf{u}_i^{KF}[k] + G\mathbf{w}_i^{KF}[k] \\ y_i^{KF}[k] &= C\mathbf{x}_i^{KF}[k] + B\mathbf{u}_i^{KF}[k] + H\mathbf{w}_i^{KF}[k] + v_i[k] \end{aligned} \quad (5)$$

ただし, 入力 u_i^{KF} は PID 制御器の前に入る信号で, $y_i^{ref}[k]$ が書き込み部と読み込み部の間隔を無視している仮定から 0 と仮定できるのでフィードフォワード補償入力がある場合には $u_i^{ff}[k]$ が u_i^{KF} になる. 出力 $y_i^{KF}[k]$ としては計測可能信号である PES ($e_i[k] + \xi_i[k]$) を利用する. また推定の対象となる状態は白色雑音が引かれた正確な位置誤差信号 $e_i[k]$ であるが, フィードフォワード入力が入った場合にはその和 $\sum_{i=1}^n e_i[k]$ を推定し, 次の周のフィードフォワード入力とすることにする.

以上のことから SSTW における誤差伝播抑制のための Kalman Filter とそれに基づくフィードフォワード制御入力は以下のように設計される.

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}_n^{KF}[k+1] &= A\hat{\mathbf{x}}_n^{KF}[k] + B\mathbf{u}_n^{ff}[k] \\ &+ K(PES_n[k] + u_n^{ff}[k] - C\hat{\mathbf{x}}_n^{KF}[k] - D\mathbf{u}_n^{ff}[k]) \\ u_{n+1}^{ff}[k] &= \hat{y}_n^{KF}[k] = C\hat{\mathbf{x}}_n^{KF}[k] + D\mathbf{u}_n^{ff}[k] \cdots \cdots \quad (6) \end{aligned}$$

ただし, K は Kalman Filter 理論で設計する. ここで一つ注意すべきことは PES の雑音 ξ は観測ノイズ v として考慮するのでなく, システムノイズ w_i^{KF} として考慮しなければならないことである. 観測ノイズの場合には実際のシステムの状態に影響を与えないノイズだが, ξ の場合には実際フィードバックされヘッドの位置などの状態に影響を及ぼしている. そこで ξ をシステムノイズの一つとして考え, 一般的には単位行列として設定される式 (5) の行列 G の中の列一つを B と同一に設計した.

この式 (6) の設計でシミュレーションを行った. ただ, まずは ξ に対する Kalman Filter 推定の有効性をチェックするため, シミュレーションモデルを少し簡略化した. 図 2 の 4 つの外乱中 Flutter Noise と RRO Noise を省略したモデルに対してシミュレーションを行い, 誤差の伝播がどのように変わるのかを確かめた. その結果と Kalman Filter がない場合との比較を図 8 から図 10 に示した.

Kalman Filter の効果を確かめる前にまず注目すべき点はフィードフォワード入力に使われるゲインの値である. Flutter Noise と RRO Noise を省略しなかったモデルで最

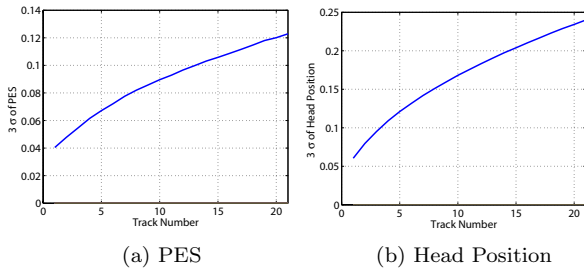


図 8 PES(a) とヘッド位置 (b) の 3σ の変化 (ゲイン 1)
Fig. 8. 3σ of PES and Head Position with the gain 1

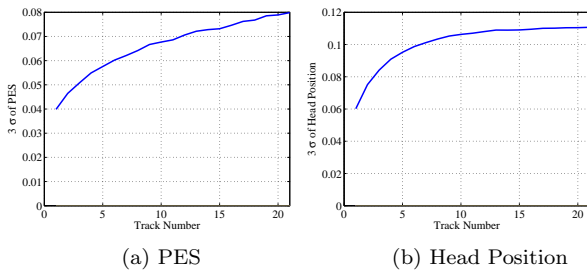


図 9 PES(a) とヘッド位置 (b) の 3σ の変化 (ゲイン 0.88)
Fig. 9. 3σ of PES and Head Position with the gain 0.88

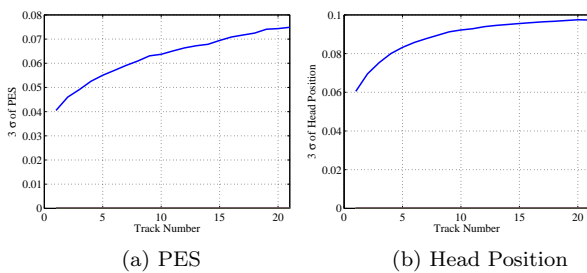


図 10 PES(a) とヘッド位置 (b) の 3σ の変化
Fig. 10. 3σ of PES and Head Position w/ the gain 0.88 and Kalman Filter

もよい結果を見せていたゲイン 1 の制御が、二つの外乱を省略した場合にはその性能が悪化する。逆にすべての外乱がある場合には劣った性能を見せていたゲイン 0.88 の方が二つの外乱を省略した場合にはより優れた性能を見せている。省略された外乱は高周波の外乱がメインであることを考えると、高周波の雑音の伝播を抑えるためにはフィードフォワードゲインが 1 にならなければならないが、PES の観測ノイズやトルク外乱などの低周波のノイズが多いところではゲインを 1 以下に下げることがこのシミュレーション結果 (図 8 と 9) からわかる。

図 10 は式 (6) を利用して推定したフィードフォワード制御入力にゲインを 0.88 かけて制御した時の伝播特性である。図 9 より伝播特性が抑えられていて、PES の白色雑音に対して Kalman Filter が有効であることが確かめられた。

4. 誤差伝播特性に注目した PES フィルタリングによる誤差伝播抑制制御

本節ではヘッド位置推定を行わず、単に前周の PES 信号

をフィルタリングして次の周にフィードフォワード信号として入れる制御に関して論じる。文献⁽⁵⁾に体表される既存研究があるが、それと前節で述べた位置誤差推定との本質的な違いを述べ、新しい PES フィルタの設計法を提案し、シミュレーション結果を示す。

4.1 フィルタリングするソース信号の選択問題 図 11 に PES フィルタリングによる SSTW 制御の特徴を示すブロック線図を示した。前周で得られた PES に何らかのフィルタをかけ、次週のフィードフォワード入力として利用する手法である。前節で説明したゲインをフィルタとして考えると前節で述べたヘッド位置推定手法と同じようにも見えるが、本質的な違いはフィルタリングする信号を前週のループの中、どこから取ってくるかによって生じる。

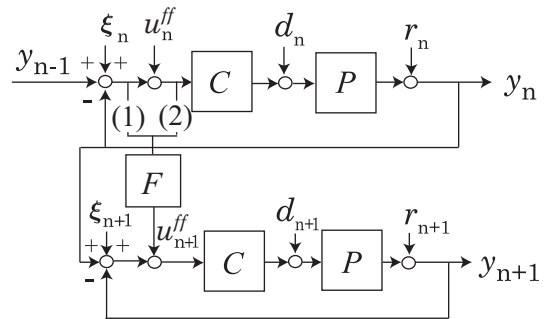


図 11 前周の PES をフィードフォワードする SSTW 制御手法
Fig. 11. SSTW Control using Filtered PES

図 11 の (1) から信号を取ってきてフィルタリングする手法が文献⁽⁵⁾、⁽⁶⁾で紹介している手法で、(2) から信号を取ってくると PES を蓄積する手法はヘッド位置推定とつながるようになる。まず (1) の接続のように PES 信号だけをつないでいく制御における誤差伝播特徴を調べる。ただし、今後の議論ではすべての外乱に適用される伝播特徴をより一般的に調べるため、PES を含む各種の外乱・ノイズは数式展開上では省略される。

図 11 の構造下で接続 (1) によるフィードフォワード補償を行った時の y_{n-1}, u_n^{ff} が y_n, u_{n+1}^{ff} と変わっていく時の伝達関数を求めると以下の式 (7) と式 (8) になる。

$$u_{n+1}^{ff}[k] = F(-T u_n^{ff}[k] + (1-T)y_{n-1}[k]) \dots \dots \dots (7)$$

$$y_n[k] = T(u_n^{ff}[k] + y_{n-1}[k]) \dots \dots \dots (8)$$

ただし、簡略化のため $\frac{CP}{1+CP} = T$ と表記した。二つの状態遷移を行列として見ると

$$\begin{pmatrix} u_{n+1}^{ff}[k] \\ y_n[k] \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -FT & F(1-T) \\ T & T \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_n^{ff}[k] \\ y_{n-1}[k] \end{pmatrix} \dots \dots (9)$$

となる。この行列の特異値などのノルムがこの系に入ってきたすべての外乱や雑音の伝播特性を決める。無限大ノルムが一

以下になるように F を決めれば系は安定になり、各種の外乱やノイズの伝播が抑えられるようになる。

しかし、このように (1) 接続で PES をフィードバックする構造では、 $u_n^{ff}[k]$ を通し前前周の影響までを受けるようになってしまい、伝播特性が 2×2 の行列として表される。その結果、複雑な構造になり設計が若干難しくなる。

4.2 より簡単な構造を持つ新しい PES フィルタによる誤差伝播抑制制御器の設計 図 11 の (2) の接続を利用し、前節で述べた PES の和の意味を持つ信号をフィードフォワード補償入力として利用すると構造がより簡単になる。接続 (2) の場合、式 (9) の伝播行列を計算すると

$$\begin{pmatrix} u_{n+1}^{ff}[k] \\ y_n[k] \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F(1-T) & F(1-T) \\ T & T \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_n^{ff}[k] \\ y_{n-1}[k] \end{pmatrix} \quad (10)$$

となる。この式から

$$T u_n^{ff}[k] = F(1-T)y_{n-1} \dots\dots\dots (11)$$

の関係式が成り立ち、伝播の式は

$$y_{n+1} = (T + F - TF)y_n \dots\dots\dots (12)$$

と簡単に表せるようになった。この $(T + F - TF)$ を適切に周波数整形することによって伝播特徴を制御することができる。

そこで補感度関数 T を制御帯域までのローパスフィルタ $T = \frac{1}{\tau_L s + 1}$ として簡略化し、フィルタ F を $F = \frac{N_F}{D_F}$ とおくと伝達特性は

$$T + F - TF = \frac{N_F \tau_L s + D_F}{(\tau_L s + 1) D_F} \dots\dots\dots (13)$$

と書くことができ、 F を簡単な一次のフィルタとする場合、これに基づき簡単にフィルタの設計ができる。

まず、低周波域でのゲインを 1 より小さくするために積分を入れ N_F の定数項を -1 とする。また高周波域でのゲインを位置より小さくするためには分子の 1 次項を 1 以下の値にする必要がある。その結果、式 (14) のようなフィルタが設計でき、 α を 1 以下の値で変えながらそれを離散化したフィルタを入れてシミュレーションを行った。

$$F = \frac{\alpha s - 1}{s} \dots\dots\dots (14)$$

その中で伝播抑制効果が特によかった $\alpha = 0.8$ の場合の結果を図 12 に示した。PES はほぼ一定値に収束していき、ヘッド位置も伝播が大きく抑えられているのが確認できる。しかしこの伝播の抑えではやはり何万周までの書き込みはできない。式 (9) と式 (10) に基づいたより詳細までを考えたフィルタの設計が必要である。

5. 結論

本稿ではセルフサーボトラックライタ (SSTW) の自己複製機能による誤差伝播特徴に注目、それを解決する制御器を提案した。まず、従来の二つの手法 1) ヘッド位置推定による誤差伝播抑制と 2) 前周 PES フィルタリングによる

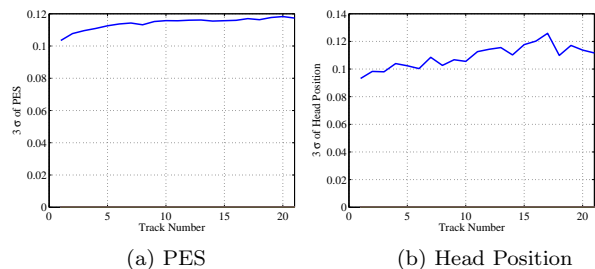


図 12 PES(a) とヘッド位置 (b) の 3σ の変化 ($\alpha = 0.8$)
Fig. 12. 3σ of PES and Head Position ($\alpha = 0.8$)

誤差伝播抑制制御を比較し、その類似性と違いを確かにした。

ヘッド位置推定手法における PES 観測雑音問題の解決策としての Kalman Filter の有効性をシミュレーションを持って確かめた。PES フィルタリングによる誤差伝播抑制に関してはフィードフォワードにより系の伝播特性がどのように変わるかを伝播行列を持って表し、その特異値などを設計することで伝播特性が改善できることを提案した。そしてシミュレーションを行い、従来の手法では得られなかった誤差伝播抑制効果を確認した。しかし、いずれの手法からもまだ満足できる伝播抑制は得られてなく、制御パラメータの最適化などを行う必要が残っている。

参考文献

- (1) Nobutaka Bando and Yoichi Hori, "Estimation of the Head Position for Self Servo Track Writer and Application of PTC", in *IEE of Japan Technical Meeting Record*, IIC-04-72, 2004
坂東信尚, 堀洋一: "Self Servo Track Writer のためのヘッド位置推定と PTC の適用" 電気学会産業計測制御研究会, IIC-04-72, 2004
- (2) Chunling Du, Jingliang Zhang and Guoxiao Guo, "Vibration Analysis and Optimal Control in Self-servo Track Writer", in *the Proc. of Control, Automation, Robotics and Vision*, vol. 1, pp. 156- 161, 2002
- (3) http://mizugaki.iis.u-tokyo.ac.jp/nss/MSS_bench.htm
- (4) Norihito Nakamura and Yoichi Hori, "A Nove Estimation Method of Head Position of HDD considering Measurement Noise", in *IEE of Japan Technical Meeting Record*, IIC-07-36, 2007
中村 則仁, 堀 洋一: "観測雑音を考慮した HDD の新しいヘッド位置推定手法の提案" 電気学会産業計測制御研究会, IIC-07-36, 2007
- (5) Chunling Du, Jingliang Zhang and Guoxiao Guo "Disturbance Modeling and Control Design for Self-servo Track Writing", *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 10, no. 1, pp. 122-127,2005
- (6) Haibei Ye, Sng, V., Chunling Du, Jingliang Zhang and Guoxiao Guo, "Radial Error Propagation Issues in Self-servo Track Writing Technology", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 38, no. 5, pp. 2180- 2182, 2002