

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

中村 則仁*, 堀 洋一 (東京大学)

A Novel Estimation Method of Head Position of HDD considering Measurement Noise
Norihito Nakamura*, Yoichi Hori (The University of Tokyo)

Abstract

In the production process of Hard Disk Drive (HDD), there is a process of writing servo signals on magnetic disks to move the head to target address. However, conventional servo track writer takes longer time to draw servo signals because of recent increase of the capacity of HDD. Therefore, Self Servo Track Writer method has already been suggested to resolve these problems.

However, it is difficult to realize SSTW because of measurement noise. In this paper, we design a new feedforward input considering measurement noise. Furthermore, simulation results are shown to verify its performance.

キーワード：磁気ディスク装置、Self Servo Track Writer、フィードフォワードコントロール
(Hard Disk Drive, Self Servo Track Writer, Feedforward Control)

1. はじめに

磁気ディスク装置はコンピュータの外部記録装置として広く使われ、また最近ではHDDレコーダなどの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。このような要求から、磁気ディスクの記憶容量も急速に増えてきている。それに伴い、サーボトラック書き込み時間の増大によるコスト増が問題とされるようになってきた。そこで、従来のPush-Pin方式のServo Track Writerに代えて数多くの手法が提案されている。本論文では、磁気ディスク本来に備わっている読み込み、書き込み機能を使ってサーボトラックを書き込む手法として提案されているSelf Servo Track Writer(SSTW)について論じる。しかし、その手法には1)高周波数領域における補感度関数のゲインが0以上である、2)磁気ディスク特有の各種外乱が存在している、3)観測している信号が限られている、という3つの問題があり、完全な実現には至っていない⁽¹⁾。

現在の実現へ向けた問題点は、フィードフォワード入力を作成する際に誤差がのってしまっているという点である。これは位置誤差信号を観測する際の観測雑音が原因であった⁽²⁾。よって本論文では、この観測雑音を考慮したうえでの新しいフィードフォワード入力の提案をし、それをシミュレーションによって検証することを目的とする。

2. Self Servo Track Writerの定式化と問題点の整理

2.1 Self Servo Track Writerの説明およびパラメータの設定

SSTWの原理は先ほど述べたように、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。よって、何らかの方法で1周目だけ書かれていれば、これを繰り返していくことでサーボトラックを得ることができる手法である。

SSTWを論じるうえでの設定を説明する。まずSSTWのブロック線図を図1に示す。入力がすでに書かれたサーボ

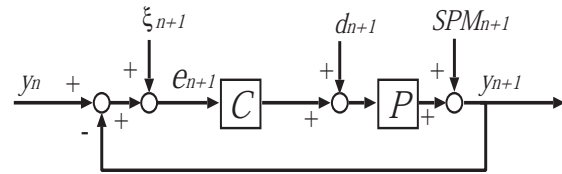


図1 SSTWのブロック線図(1)
Fig. 1. Block diagram of SSTW(1)

トラックであり、出力が新しく書かれるサーボトラックに相当している。よって、 n 周のトラックを書く場合はこのブロック線図を n 回繰り返して通過することになる。また本論文では、使用した記号を表1のように定義した。これより、入力から出力までの伝達関数を求めると式(1)になる。

$$\Delta y_{n+1} = \frac{CP}{1+CP} \Delta y_n + \frac{CP}{1+CP} \xi_{n+1} + \frac{P}{1+CP} d_{n+1} + \frac{1}{1+CP} SPM_{n+1} \cdots (1)$$

Δy_{n+1} が真値からの誤差であり、これがサーボトラックの発散につながってしまっていた。これは図2のように、前周で生じた誤差 Δy_n を打ち消すようなフィードフォワード入力を作成することによって発散を抑えることができる。しかし現在、式(2)のように作成したフィードフォワード入りに観測雑音が含まれてしまうことが問題となっている。

$$u_{FFn+1}(= \hat{\Delta} y_n) = - \sum_{m=2}^n e_m[k] + \sum_{m=2}^n \xi_m \cdots \cdots (2)$$

書かれたサーボトラックへ、この ξ の項がどのような影響を与えるのかを示す。観測雑音を無視しない場合の n 周目における出力、位置誤差信号および次周で用いるフィードフォワード入力は以下ようになる。

$$y_{n+1} = \frac{P}{1+CP} d_n + \frac{1}{1+CP} SPM_n + \frac{CP}{1+CP} \sum_{k=1}^n \xi_k$$

表 1 使用した記号の定義

Table 1. Definition of symbols

$y_{R,n+1}$	n+1 周目を書いているときの読み込みヘッドの絶対位置
$y_{W,n+1}$	n+1 周目を書いているときの書き込みヘッドの絶対位置
$y_{r,n}$	n 周目の理想のサーボトラック
$y_{r,n+1}$	n+1 周目の理想のサーボトラック
y_n (= $y_{W,n}$)	すでに書かれた n 周目のサーボトラック
Δy_n	n 周目における真円からの誤差
Δy_{n+1}	n+1 周目における真円からの誤差
ξ_{n+1}	n+1 周目における観測雑音
d_{n+1}	n+1 周目におけるトルク外乱
SPM_{n+1}	n+1 周目におけるディスクの揺動による位置誤差外乱

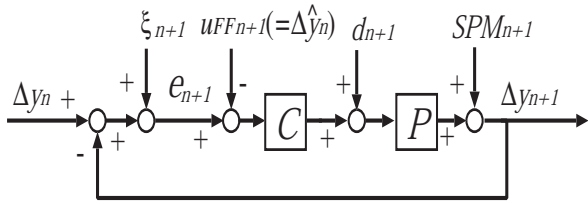


図 2 FF 入力を加えた SSTW のブロック線図
Fig. 2. Block diagram of SSTW with FF input

$$e_n = \frac{P}{1+CP}(d_{n-1} - d_n) + \frac{1}{1+CP}(SPM_{n-1} - SPM_n) + \frac{1}{1+CP}\xi_n$$

$$u_{FFn+1} = \frac{CP}{1+CP}d_n + \frac{1}{1+CP}SPM_n - \frac{1}{1+CP}\sum_{k=1}^n \xi_k \quad (3)$$

すなわち n+1 周目の入力と u_{FFn+1} の差は以下のようになる。

$$y_n(=ref) - y_{FFn+1} = \sum_{m=2}^n \xi_m \quad (4)$$

この右辺が発散の原因であった。よって、本論文では観測雑音を考慮したうでのフィードフォワード入力の設計を提案する。

2.2 シミュレーションの方法 本論文ではシミュレーションのモデルとしてフォロイングモードの電気学会 HDD ベンチマークソフトを用いた。SSTW のシミュレーションを再現方法を簡単に説明する。まず 1 周目の書き込みに相当するシミュレーションとして、Reference に 0(誤差がないトラックが 1 周だけすでに書かれていると仮定し、これを 0 周とカウントする) を代入してシミュレーションを動かす。そして 2 周目では、1 周目の出力のデータを Reference として入力する。3 周目でも同様に、2 周目の出力を Reference に代入する。これを繰返し行うことによってシミュレーションを再現している。

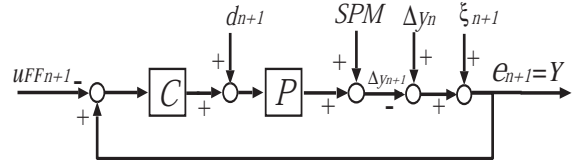


図 3 図 2 を書き換えた SSTW のブロック線図
Fig. 3. Block diagram of SSTW (changed from Fig.2)

3. 観測雑音を考慮したフィードフォワード入力の設計

3.1 カルマンフィルタを用いる場合 n 周目の位置誤差信号 (= e_n) は、ノイズがのっていない真値の n 周目の位置誤差信号の値を PES_{real} とすると次のような式で表すことができる。

$$e_n = PES_{real,n} + \xi_n \quad (5)$$

このノイズは白色雑音であるので、カルマンフィルタによってノイズの部分を取り除くことができれば真値に近い位置誤差信号が得られる。フィードフォワード入力は式 (2) のように位置誤差信号を足し合わせたものであるので、カルマンフィルタでノイズを削除した位置誤差信号を用いれば正確なフィードフォワード入力が作成できると考えられる。

図 2 を書き換え、フィードフォワード入力を入力とし、位置誤差信号 (PES) を出力としたブロック線図を書くと図 3 のようになる。ここではまず各周において正確にヘッド位置推定が行われ、前週のトラック (図 3 では Δy_n) は 0 であると仮定する。また外乱を無視した場合、フィードフォワード入力を入力として位置誤差信号を出力とした場合の伝達関数は以下のような式で表される。

$$Y(=e_{n+1}) = -\frac{CP}{1+CP}u_{FFn+1} \quad (6)$$

式 (6) を変換すると以下のような式 (7) で表される。

$$\frac{Y}{-u_{FF}} = \frac{CP}{1+CP} \quad (7)$$

ここで C は設計したコントローラのため既知であり、そして P(プラントモデル)にはノミナルモデルを用いて以下のような離散時間の状態空間表現にする。

$$x(t+1) = A_{kal} \cdot x(t) + B_{kal} \cdot u(t) + w(t) \quad (8)$$

$$Y(t) = C_{kal} \cdot x(t) + D_{kal} \cdot u(t) + v(t) \quad (9)$$

ただし、ここで離散時間のサンプリングタイムを T_s とし、図 3 のとき入力は $u(t) = -u_{FFn+1}$ 、出力は $Y(t) = e_{n+1}$ としている。また式 (9) における $v(t)$ が、図 3 における白色雑音 ξ_{n+1} となっている。なお、ここでは推定結果は省略するが、真値に近い推定結果を示すことができていた。

シミュレーションの結果を示す。図 4 および図 5 が従来のフィードフォワード入力を加えた場合の出力および PES の 3σ の推移であり、図 6 および図 7 がカルマンフィルタ

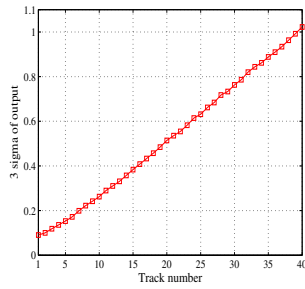


図 4 通常フィードフォワード
入力時の出力の 3σ
Fig. 4. 3σ of output with
normal FF input

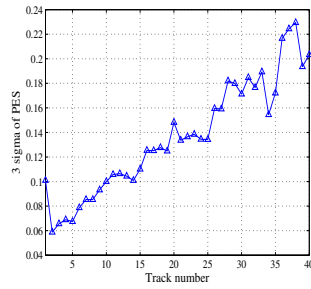


図 5 通常フィードフォワード
入力時の PES の 3σ
Fig. 5. 3σ of PES with
normal FF input

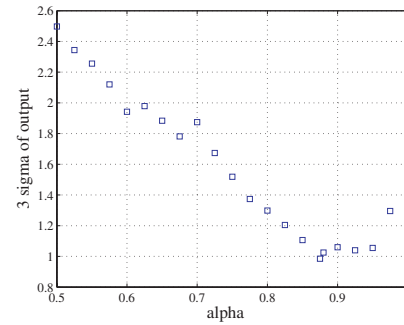


図 8 α の値を変動させた場合の出力の 3σ 値 (100 周)
Fig. 8. 3σ of output (changing α from 0.5 to 1, 100 track)

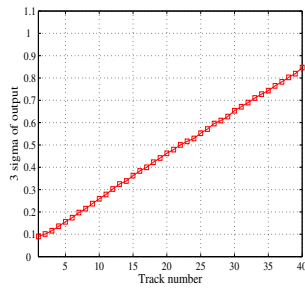


図 6 カルマンフィルタ適用時
の出力の 3σ
Fig. 6. 3σ of output with
kalman filter

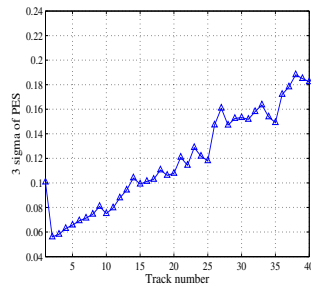


図 7 カルマンフィルタ適用時
の PES の 3σ
Fig. 7. 3σ of PES with
kalman filter

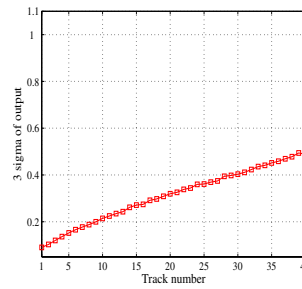


図 9 α を導入した場合
出力の 3σ の変化
Fig. 9. 3σ of output in
each track with parameter α

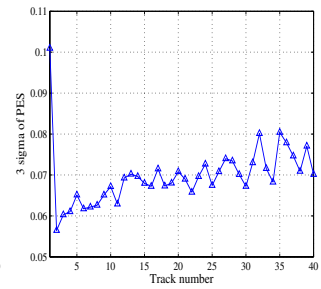


図 10 α を導入した場合
PES の 3σ の変化
Fig. 10. 3σ of PES in
each track with parameter α

を適用した場合の出力および PES の 3σ の推移である。以上の結果より、カルマンフィルタにより観測雑音を取り除いたほうがよい結果を出すことができている。しかし、カルマンフィルタはあくまでも確率的に白色雑音を取り除く手法であり完全な推定を行えていないため、わずかながら発散をしてしまっている。

3.2 α というパラメータを導入した場合 次に α というパラメータを導入する手法を提案する。先ほど述べたように式 (4) の右辺の項が 0 になれば発散は抑えられる。よって、式 (10) を満たすような 0 より大きく 1 より小さい α を見つけることが出来れば、発散の原因である白色雑音の影響を取り除けると考えられる。

$$y_n - \alpha \cdot y_{FFn+1} = 0 \dots \dots \dots (10)$$

この式は詳しく計算すると式 (11) となる。

$$\begin{aligned} y_n - \alpha \cdot y_{FFn+1} \\ = (1 - \alpha) \frac{P}{1 + CP} d_{n+1} + (1 - \alpha) \frac{1}{1 + CP} SPM_{n+1} \\ + \left(\frac{CP}{1 + CP} + \frac{1}{1 + CP} \alpha \right) \xi_{n+1} \\ \dots \dots \dots (11) \end{aligned}$$

この式 (11) の右辺の項を 0 にするような適切な α を見つけるために、その値を変動させてシミュレーションを行っ

た。フィードフォワード入力を 0 から 1 の間の数字で α 倍する場合について、シミュレーションによって確認した。図 8 に α の値を変動させた場合の 100 周目における出力の 3σ 値をプロットしたものを示す。まず α の値が少しずつ 1 より小さくなると、 3σ 値が少しずつ改善される。これは式 (11) を見てみると、観測雑音の影響を小さくすることを意味している。しかし、 α の値がさらに小さくなると 3σ 値が大きくなってしまっている。これは、 α がさらに小さくなることによってその他の外乱である d や SPM の影響が大きくなってしまっているためである。このなかで双方のバランスのとれた α を選べばよい結果が出る。

図 8 より $\alpha = 0.875$ の値をとったときが最適であると考え、先ほどと同様に 40 周目までの 3σ の推移をシミュレーションで確認した。その結果を図 9 および図 10 に示す。 α を導入したことによって観測雑音をある程度取り除けたため、以前よりは良い結果を得ることができている。ただ先ほど述べた通り、 α が 1 より小さくなることによって d や SPM の影響が大きくなってしまいうため本手法においても完全にサーボトラックの発散をとめることはできなかった。

3.3 カルマンフィルタと α を併用する場合 先ほどの章で述べたとおり、単純に α 倍するだけでは発散を完全に抑えることはできなかった。本節では、提案したカル

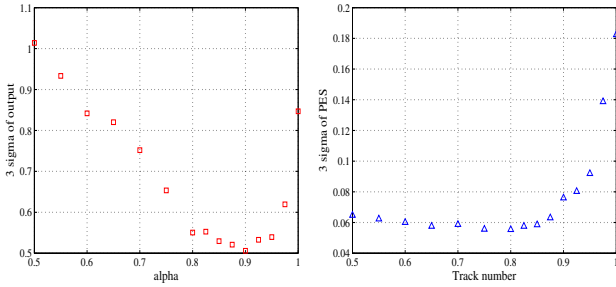


図 11 2 手法を併用した場合 α の値による出力の 3σ の変化
 Fig. 11. 3σ of output with two method (changing α from 0.5 to 1)

図 12 2 手法を併用した場合 α の値による PES の 3σ の変化
 Fig. 12. 3σ of PES with two method (changing α from 0.5 to 1)

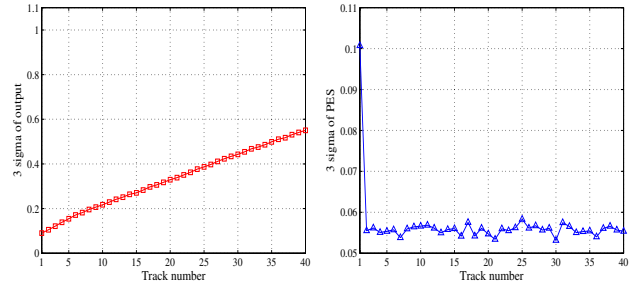


図 13 2 手法を併用した場合 出力の 3σ の変化 ($\alpha = 0.8$)
 Fig. 13. 3σ of output in each track with two method ($\alpha = 0.8$)

図 14 2 手法を併用した場合 PES の 3σ の変化 ($\alpha = 0.8$)
 Fig. 14. 3σ of PES in each track with two method ($\alpha = 0.8$)

マンフィルタの手法と α 倍する手法を併用することでさらに性能を改善することを目指す。フィードフォワード入力の作成にカルマンフィルタを用い、それを加える際に α 倍をしてシミュレーションを行った。図 11 および図 12 にシミュレーションの結果を示す。 α の値によってその性能が変化するので、最適な値を求めるために出力および PES の 3σ 値を求めた。この結果、 α の値として 0.8 を選択した。図 13 および図 14 に $\alpha = 0.8$ とカルマンフィルタを併用した場合の出力および PES の 3σ 値の推移を示す。これは以前の手法よりも良い結果を示している。特に PES の 3σ 値に関しては収束させることができていた。

この提案手法が従来よりも結果を出せた理由は、 α のみでは白色雑音だけを取り除こうと α を小さくするとそのほかの雑音の影響が大きくなってしまふという欠点を、カルマンフィルタを用いることでそもそもの誤差分を低減させることができたからである。

一方、PES がなぜ発散しなかったのかについて考察する。これは導入した α の影響によるものであると思われる。 α が $0 < \alpha < 1$ であるので次のような式を満たす。

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \alpha^n = 0$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} (1 - \alpha)^n = 0$$

詳細な n 周目の PES の式は非常に煩雑になるため導出は省略するが、フィードフォワード入力に毎周において α 倍されるため、古くから存在する項により多くの α が乗算される。よって、古い項から次第に 0 に近づくため次第に PES は一定範囲の値に収束したと考えられる。PES が収束しているにもかかわらず出力が発散しているのは矛盾しているように思えるが、これについては以下のように説明がつく。収束したのはあくまでも以下の式 (12) であり、前周と今のトラックとの差に観測雑音を加えたものである。

$$e_{n+1} = y_n - y_{n+1} + \xi_{n+1} \dots \dots \dots (12)$$

この式では出力が収束することを示すことはできておらず、よってサーボトラックが発散していったと考えら

れる。そしてこの発散の原因は、やはり観測雑音を完全に除去していないためである。

3.4 フィルタ $k(s)$ を導入する場合 フィルタ $k(s)$ を導入する場合は式 (10) は以下のような式 (13) のように書くことができる。

$$y_n - k(s) \cdot y_{FFn+1} = 0 \dots \dots \dots (13)$$

この式は詳しく計算すると以下のような式 (14) で表すことができる。

$$\begin{aligned} y_n - k(s) \cdot y_{FFn+1} &= \frac{P}{1+CP} d_{n+1} + \frac{1}{1+CP} SPM_{n+1} + \frac{CP}{1+CP} \xi_{n+1} \\ &\quad - k(s) \cdot \left(\frac{P}{1+CP} d_{n+1} + \frac{1}{1+CP} SPM_{n+1} - \frac{CP}{1+CP} \xi_{n+1} \right) \\ &= (1 - k(s)) \frac{P}{1+CP} d_{n+1} + (1 - k(s)) \frac{1}{1+CP} SPM_{n+1} \\ &\quad + \left(\frac{CP}{1+CP} + \frac{1}{1+CP} k(s) \right) \xi_{n+1} \dots \dots (14) \end{aligned}$$

右辺 3 項目である ξ にかかる項を以下のようにフィルタ $T(s)$ とおき、外乱にかかるそのほかの係数がどのような形に整理できるのかを考える。なお同様の式によるフィルタの設計は行われていた⁽³⁾⁽⁴⁾。しかしその導出方法は異っており、本論文では外乱をベースとした設計を行っている。

$$T(s) = \frac{CP}{1+CP} + \frac{1}{1+CP} k(s) \dots \dots \dots (15)$$

フィルタ $T(s)$ の具体的な形は後述する。このフィルタ $T(s)$ を設定することによって $k(s)$ を逆算することができ、すべての項を求めることができる。 $k(s)$ は下記の式 (16) のように求められる。

$$k(s) = (1 + CP) \cdot T(s) - CP \dots \dots \dots (16)$$

それではそれ以外の第一項目および第二項目について計算をする。まず第二項目について計算する。式 (15) を変形すると、以下の式 (17) のようになる。

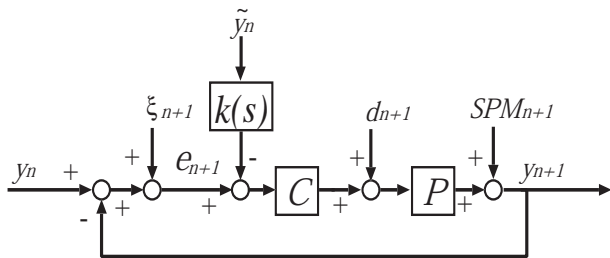


図 15 フィルタ $k(s)$ を加えた場合のブロック線図
Fig. 15. Block diagram of SSTW with filter $k(s)$

$$-\frac{1}{1+CP}k(s) = \frac{CP}{1+CP} - T(s) \dots \dots \dots (17)$$

このようにおくと第二項目の係数は次のように計算することができる。

$$(1-k(s)) \frac{1}{1+CP} = \frac{1}{1+CP} + \frac{CP}{1+CP} - T(s) \\ = 1 - T(s) \dots \dots \dots (18)$$

第一項目である $(1-k(s)) \frac{P}{1+CP}$ は式 (16) を代入して計算すると次のようになる。

$$(1-k(s)) \frac{P}{1+CP} = (1 - (1+CP)T(s) + CP) \frac{P}{1+CP} \\ = (1+CP)(1-T(s)) \frac{P}{1+CP} \\ = (1-T(s))P \dots \dots \dots (19)$$

以上を整理すると以下のようにまとめられる。

$$(1-k(s)) \frac{P}{1+CP} = (1-T(s))P \dots \dots \dots (20)$$

$$(1-k(s)) \frac{1}{1+CP} = 1-T(s) \dots \dots \dots (21)$$

$$\frac{CP}{1+CP} + \frac{1}{1+CP}k(s) = T(s) \dots \dots \dots (22)$$

以上をふまえ $k(s)$ を設計し、シミュレーションを行った。シミュレーションでは $T(s)$ を 1 次のローパスフィルタとし、 $\tau = 0.009$ とした。その結果を図 16 および図 17 に示す。この結果より、フィルタ $k(s)$ を導入した場合には出力および PES の 3σ 値共に完全に発散を抑えることができる。しかし τ の値によって、発散する場合もあった。なぜ発散が抑えられたのかを解析するために、発散しない場合と発散する場合の式 (20) ~ (22) のボード線図を比較する。発散しない場合の式 (20) ~ (22) のボード線図を図 18 ~ 図 20 に示す。ただし、発散しない範囲で τ を 0.003 ~ 0.018 まで 0.003 刻みで変動させてプロットしている。一方、発散する場合の式 (20) ~ (22) のボード線図を図 21 ~ 図 23 に示す。こちらは、発散してしまう範囲で τ を 2.5×10^{-6} ~ 2.75×10^{-5} まで 5.0×10^{-6} 刻みで変動させている。(注: 図 23 において観測雑音途中途で途切れているのは、シミュレーションで定義されたものが図で示した周波数までだったためである。)

これらよりわかることを整理する。まず、図 18 と図 21

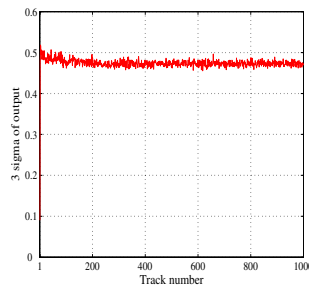


図 16 $k(s)$ を適用した場合
出力の 3σ の変化
Fig. 16. 3σ of PES in
each track with filter $k(s)$

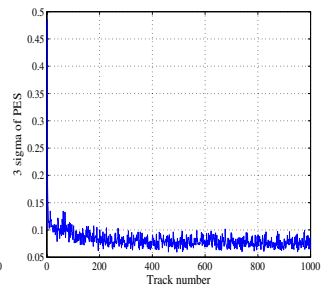


図 17 $k(s)$ を適用した場合
PES の 3σ の変化
Fig. 17. 3σ of PES in
each track with filter $k(s)$

より、発散しない場合にはトルク外乱のボード線図よりも式 (20) のボード線図の上部に存在し、トルク外乱のボード線図をそのままの形で上部にシフトしただけのようなボード線図を示している。また、図 19 と図 22 より SPM (RRO 外乱やフラッター外乱) はカットせずにそのまま通過させたほうが良い性能となっている。最後に図 20 と図 23 からは、発散しない場合はある程度観測雑音をローパスフィルタによってカットしていることがわかる。

さらに、サーボトラックが発散しない場合には、 τ を今回の条件より大幅に変えた場合でも式 (20) のボード線図 (図 18) は大きな変化をしなかった。当然、そのほかの項である式 (21) および式 (22) はハイパスフィルタおよびローパスフィルタであるので、カットオフ周波数が大きく変動する。しかし、図 19 よりいくらかハイパスフィルタのカットオフ周波数が変わっても、外乱 SPM をすべて通過させることには変わりがない。また、ローパスフィルタが掛かる項である観測雑音は、そのほかの外乱に比べてはるかにゲインが小さい。実際得られるシミュレーションの結果 (出力の 3σ 値) に大きな変化は見られなかった。

一方、サーボトラックが発散する場合では式 (20) のボード線図 (図 21) の形は大きく変動してしまい、 τ が小さくなるにつれその形は外乱 d のボード線図よりも下に位置するようになってしまった。また τ が小さくなるにつれより、 SPM (RRO、フラッター外乱) を通過させないようなフィルターにしたいになってしまっていた。

これらのすべての現象を踏まえると、サーボトラックが発散しなかった理由は d (トルク外乱) にフィルタをかけたものと SPM にフィルタをかけたものがうまくバランスがとれたことにあるのではないかと考えられる。(今回の結果では、出力の 3σ 値が 0.5 周辺に落ち着いたので観測雑音は支配的ではなかったと思われる。) よって、さらに良い結果を出すことができそうな設計方法は、まず式 (20) のボード線図を今の経験を元に形を推定し直接設計する。その時に、式 (21) のボード線図がそのまま外乱を通過させていること、かつ式 (22) のボード線図がすべての領域において 0[dB] を超えないことが条件ではないかと想像できる。この検証は

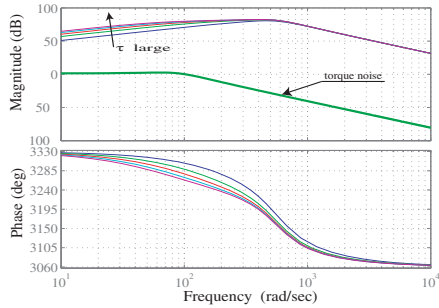


図 18 発散しない時：式 (20) のボード線図 (トルク外乱をあわせてプロットした場合)
Fig. 18. Bode diagram of eq.(20) (Servo track:stable)

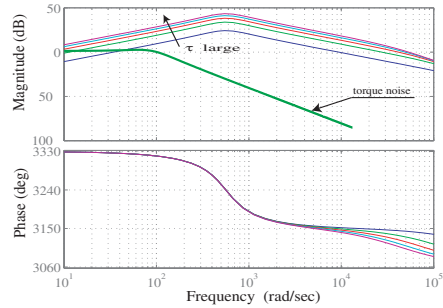


図 21 発散する時：式 (20) のボード線図 (トルク外乱をあわせてプロットした場合)
Fig. 21. Bode diagram of eq.(20) (Servo track:unstable)

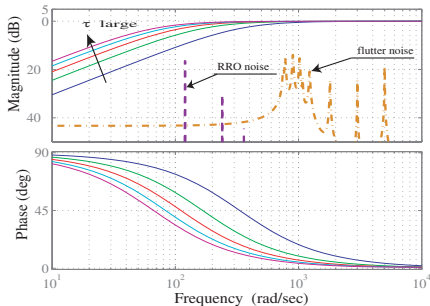


図 19 発散しない時：式 (21) のボード線図 (RRO 外乱およびフラッター外乱をあわせてプロットした場合)
Fig. 19. Bode diagram of eq.(21) (Servo track:stable)

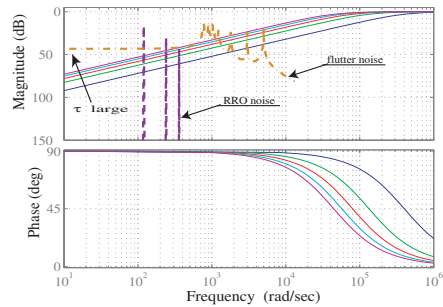


図 22 発散する時：式 (21) のボード線図 (RRO 外乱およびフラッター外乱をあわせてプロットした場合)
Fig. 22. Bode diagram of eq.(21) (Servo track:unstable)

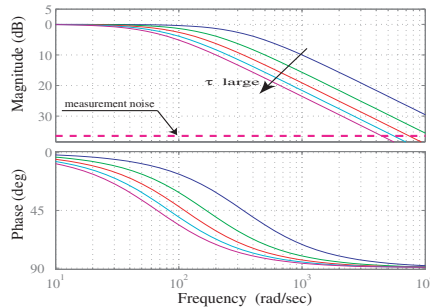


図 20 発散しない時：式 (22) のボード線図 (観測雑音をあわせてプロットした場合)
Fig. 20. Bode diagram of eq.(22) (Servo track:stable)

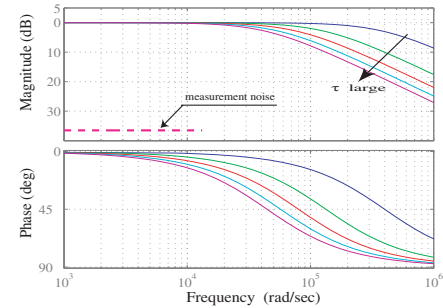


図 23 発散する時：式 (22) のボード線図 (観測雑音をあわせてプロットした場合)
Fig. 23. Bode diagram of eq.(22) (Servo track:unstable)

今後行う予定である。

4. 結論

本論文では、SSTW を実現するための手法として 4 つの手法を提案した。特に $k(s)$ というフィルターを導入する場合には、出力および位置誤差信号の 3σ 値共に発散を抑えることに成功した。今後の課題として、さらなる $k(s)$ の解析をさらに行うこと、および一般化プラントを作成して理論的に $k(s)$ を設計することを考えている。

参考文献

- (1) 坂東信尚, 堀 洋一: "SSTW のためのヘッド位置推定とフィードフォワード制御の検討" 電気学会産業計測制御

研究会, IIC-04-72, 2004.9

- (2) 中村 則仁, 堀 洋一, 坂東 信尚: "ベンチマークソフトを用いた Self Servo Track Writer の性能評価" 電気学会産業計測制御研究会, IIC-05-114, 2006.9
(3) C.Du, J.Zhang and Guoxiao Guo: "Disturbance modeling and control design for self-servo track writing", *IEEE Trans.Mechatronics*, Vol.10, Feb, 2005
(4) Hemant Melkote, Robert McNab, Bob Cloke and Vinay Agarwal: "A study of radial error propagation and self-servowriting in disk drives", Proceedings of the American Control Conference, May, 2002