ベンチマークソフトを用いたSelf Servo Track Writerの性能評価

中村 則仁 *, 堀 洋一 (東京大学), 坂東 信尚（宇宙航空研究開発機構）

Performance Verification of Self Servo Track Writer using Hard Disk Benchmark Software

Norihito Nakamura, Yoichi Hori (The University of Tokyo)
and Nobutaka Bando(Japan Aerospce Exploration Agency)

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.

In our past work, new method is proposed to realize SSTW. However, servo tracks diverge gradually if we apply this method to real product. In this paper, we find out the reason why servo tracks diverge gradually by using Hard Disk Benchmark Software.

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、ベンチマーク問題
(**Hard Disk Drive, Self Servo Track Writer, Feedforward Control, Benchmark Problem**)

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，ＨＤＤプレーヤ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いる。このような社会の要求から，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，製造段階でのサーボトラックを書き込む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 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，実現には至っていない。坂東ら [1][2] によりすでに提案されている設計法では，従来の設計手法に比べて大幅な性能改善を図ることができている。しかし，実機に提案手法を適用した場合，書き込んだサーボトラックが徐々に発散していってしまうことが確認されている。本論文では，正確に作成されたベンチマークソフトを用いることにより，その発散の原因について考察することを目的とする。次節では，まず Self Servo Track Writer の説明とその定式化を行う。

2 Self Servo Track Writer の問題点とその定式化

本論文では，現在提案されている Self Servo Track Writer の手法をベンチマークソフトへ適用し，その効果を検証することを目的としている。よって，本節では Self Servo Track Writer の説明と検証する手法について説明する。

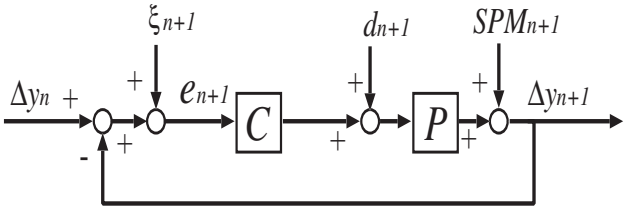

図 1: Self Servo Track Writer のブロック線図
Fig. 1 Block diagram of SSTW with error coordinates

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

Self Servo Track Writer の原理について，簡単に説明をする。まず，1 周目は何らかの方法で書かれているとする。2 周目は，読み込みヘッドを 1 周目に追従させながら，一定距離離れた書き込みヘッドによって書き込む。3 周目を書く際も同様に，読み込みヘッドを 2 周目に追従させながら，一定距離離れた書き込みヘッドによって 3 周目を書き込む。これを繰り返していくことによって 1 周ずつサーボトラックを書いていくことができる。

$$y_n[k] \quad = \quad y_{r,n}[k] + \Delta y_n[k] \tag{1}$$

$$\Delta y_{n+1}[k] = \frac{CP}{1+CP}\Delta y_n[k] + \frac{CP}{1+CP}\xi_{n+1} + \frac{P}{1+CP}d_{n+1}[k] + \frac{1}{1+CP}SPM_{n+1}[k] \tag{2}$$

図 1 に示したものが，Self Servo Track Writer のブロック線図である。式 (1) は，$\Delta y_n[k]$ が理想のサーボトラックと実際に書かれたサーボトラックとの誤差を表していることを示している。よって，$\Delta y_n[k]$ を 0 にすることが理想であり，この 0 である状態が真円のサーボト

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
l	読み込みヘッドと書き込みヘッドの距離
N	1 トラックに存在するセクター数
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

ラックを書けていることを意味する。また，その入力から出力までの伝達関数は式 (2) のように示すことができる。さらに，本論文で用いる各記号の定義については表 1 に示す。

2.2 ヘッド位置推定手法の紹介

磁気ディスク装置では，観測している信号は図 1 に示したブロック線図の中の'e' で示した位置誤差信号のみである。これはヘッドの絶対位置を観測していないことを意味しているため，Self Servo Track Writer の実現を困難にしていた。よって本節では，この位置誤差信号のみを用いてヘッド位置を推定する手法を紹介する。まず，各周における位置誤差信号を書き出すと式 (3)〜(5) が得られる。

$$e_{n+1}[k] = y_n[k] - y_{R,n+1}[k] + \xi_{n+1}[k] \quad (3)$$
$$e_n[k] = y_{n-1}[k] - y_{R,n}[k] + \xi_n[k] \quad (4)$$
$$\vdots$$
$$e_2[k] = y_1[k] - y_{R,2}[k] + \xi_2[k] \quad (5)$$

これらの式の左辺と右辺をそれぞれ足し合わせると，以下の式が得られる。

$$\begin{aligned} e_{n+1}[k] &+ e_n[k] + \cdots + e_2[k] \\ &= y_1[k] + (n-1)l - y_{R,n+1}[k] + \sum_{m=2}^{n+1} \xi_m[k] \end{aligned} \quad (6)$$

ここで式 (6) の $\sum_{m=2}^{n+1} \xi_m[k]$ は白色雑音の和なので平均化して 0 であるため，ここではこの項を無視して考える。よって以下の式が得られる。

$$\begin{aligned} e_{n+1}[k] &+ e_n[k] + \cdots + e_2[k] \\ &= y_1[k] + nl - y_{W,n+1}[k] \quad (7) \\ &= y_1[k] - \Delta y_{n+1}[k] \quad (8) \end{aligned}$$

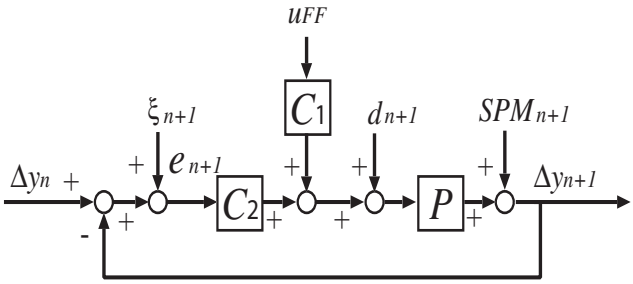

図 2: フィードフォワード入力を加えた場合のブロック線図 (1)
Fig. 2 Block diagram with feedforward input(1)

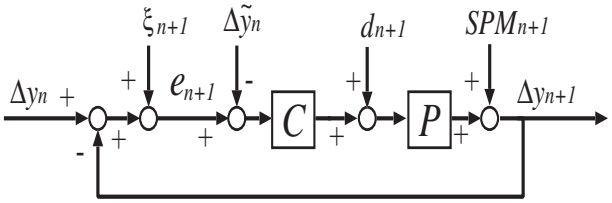

図 3: フィードフォワード入力を加えた場合のブロック線図 (2)
Fig. 3 Block diagram with feedforward input(2)

よって

$$\Delta y_{n+1} = y_1 - \sum_{m=2}^{n+1} e_m[k] \quad (9)$$

となり，一周目のサーボトラックは誤差なく書かれている ($y_1 = 0$) とすれば，式 (1) よりヘッド位置 (y_{n+1}) を推定することができる。

2.3 フィードフォワード入力の設計

本節では，前節で推定したヘッド位置を用いることでフィードフォワード入力を設計する。発散を抑えるためには図 2 に示したようなフィードフォワード入力 u_{FF} を作成する必要がある。伝達関数は以下のように表される。

$$\Delta y_{n+1}[k] = \frac{C_2 P}{1 + C_2 P} \Delta y_n[k] + \frac{C_1 P}{1 + C_2 P} u_{FF}[k] \quad (10)$$

$\Delta y_{n+1}[k]$ を 0 にするように $u_{FF}[k]$ を設計することを考える。これを実現するには式（10）において
$C_1 = C_2, u_{FF}[k] = -\Delta y_n[k]$
とすることによって以下の式 (11) のようになり $\Delta y_{n+1}[k]$ を 0 に収束させることができる。

$$\begin{aligned} \Delta y_{n+1}[k] &= \frac{C_2 P}{1 + C_2 P} \Delta y_n[k] - \frac{C_2 P}{1 + C_2 P} \Delta y_n[k] \\ &= 0 \end{aligned} \quad (11)$$

よってフィードフォワード入力 $u_{FF}[k]$ を $u_{FF}[k] = -\Delta y_n[k]$ とする。ブロック線図は図 3 のように示される。次節ではこの手法を適用したシミュレーションの結果を示す。

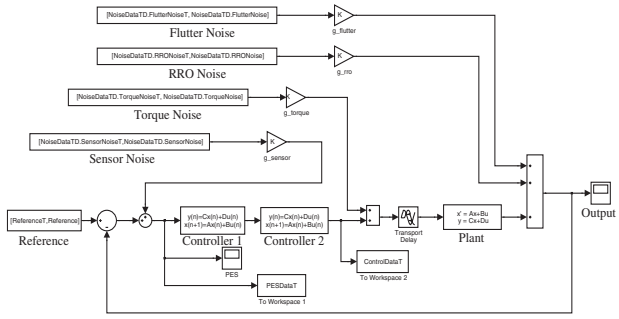

図 4: ベンチマークソフト上でのブロック線図の構成（フィードフォワード入力なし）
Fig. 4 Block diagram without FF input (Matlab)

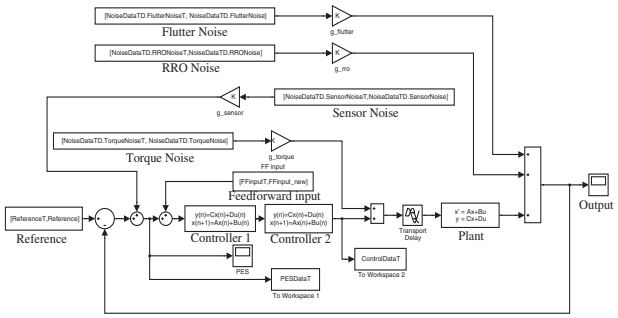

図 5: ベンチマークソフト上でのブロック線図の構成（フィードフォワード入力あり）
Fig. 5 Block diagram with FF input (Matlab)

3 シミュレーションおよびその考察

3.1 シミュレーションの方法

まず Self Servo Track Writer のシミュレーションをベンチマークソフト上で再現する方法を説明する。図 4 が従来手法をベンチマークソフト上で構成したものを示し，図 5 はそれにフィードフォワード入力を加えたものを示している。図 4 を例にとって説明する。まず 1 周目に相当するシミュレーションとして，Reference に 0 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 5 の場合も基本は同様で，図 4 の場合にフィードフォワード入力を加えているだけである。

なおコントローラは例題として提供されているものをそのまま用いた。本論文の目的はフィードフォワード入力の検証であるので，コントローラの設計は特に考えないこととした。また，各周のシミュレーション時間は 0.1667 秒とした。

3.2 シミュレーションの結果と考察

シミュレーションを行った結果を図 6 から図 8 に示す。まず図 6 と図 7 を比較してみる。すると，わずか 20 周目のサーボトラックであるにもかかわらず，急速に発散してしまっている様子が確認できる。一方，フィードフォワード入力を適用した場合，図 8 から分かるとおり，サーボトラックは従来手法に比べはるかに安定したものとなっていることが分かる。しかし，わずかではあるが発散してしまっている。

図 9 に，それぞれの手法を適用した場合の各周における出力の 3σ の値をプロットしたものを示す。3σ の値を見ても、フィードフォワード入力を適用した場合でも線形的にわずかずつ発散してしまっている様子が確認できる。フィードフォワード入力によって完全に発散が抑えられているならばこれは一定となるはずであり，これが実機における発散につながってしまっていると考えられる。

サーボトラックが発散してしまった原因は，式 (6) において $\sum_{m=2}^{n+1}\xi_m[k]$ を 0 として無視してしまったからである，と考えられる。発散の原因が観測雑音であったのかどうかを確かめるため，図 5 の観測雑音のゲインを 0 にしてシミュレーションを行った。図 10 にその結果を示す。1 周目の 3σ 値が 0.087327 であったのに対し，20 周目の 3σ 値も 0.087327 であり同じ値であった。このように，観測雑音を考慮しなかった場合には発散していく現象は見られなかった。このことからも，発散の原因は観測雑音を考慮したフィードフォワード入力の設計をしなかったためであると考えられる。

この現象を数式によって確認する。もし，式 (6) において $\sum_{m=2}^{n+1}\xi_m[k]$ の項を無視せずに n 周目の出力の伝達関数を求めた場合，以下の式 (12) のようになる。

$$y_n = \frac{P}{1+CP}d_n + \frac{1}{1+CP}SPM_n + \frac{CP}{1+CP}\Sigma_{k=1}^{n}\xi_k \quad (12)$$

この式において，右辺 3 項目が発散につながってしまっていると考えられる。これを解決するためには，フィードフォワード入力の設計を新たにすることが必要である。n+1 周目で用いるフィードフォワード入力 u_{FFn+1} は以下のように書き表せる。

$$y_{FFn+1} = \frac{P}{1+CP}d_n + \frac{1}{1+CP}SPM_n - \frac{1}{1+CP}\Sigma_{k=1}^{n}\xi_k \quad (13)$$

n+1 周目の入力 (式 (12) の y_n) と u_{FFn+1} の差は以下のようになる。

$$y_n(=ref) - y_{FFn+1} = \Sigma_{k=1}^{n}\xi_k \quad (14)$$

式 (14) の右辺が 0 になれば発散をしないことを意味する。よって，これが 0 になるようにフィードフォワード入力を再設計する必要がある。よって式 (15) を満たすような，重み $k(s)$ を設定すればよい。

$$y_{n+1} - k(s)\cdot y_{FFn+1} = 0 \quad (15)$$

重み $k(s)$ をかける手法は坂東らも提案していたが、定数をかけるだけであった。ここでの $k(s)$ の決定には学習などを用いることを考えている。

4 結論

本論文ではベンチマークソフトにおいて Self Servo Track Writer のシミュレーションを行い，現在の手法でサーボトラックが発散していってしまう現象の原因が何であるのかを考察した。今後の予定としては，観測雑音を考慮した上でフィードフォワード入力の設計を行い，サーボトラックの発散を完全に抑えられる制御器の提案を目標としている。

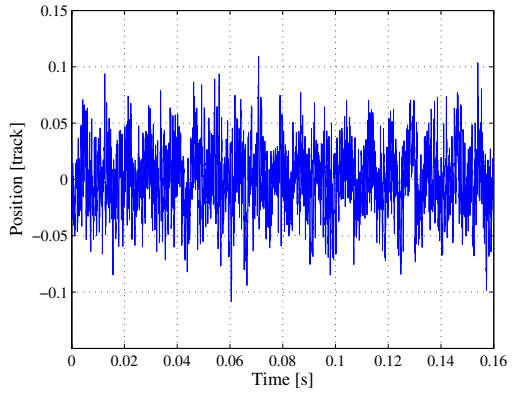

図 6: 1 周目の出力の様子
Fig. 6 Time series of output (1st track)

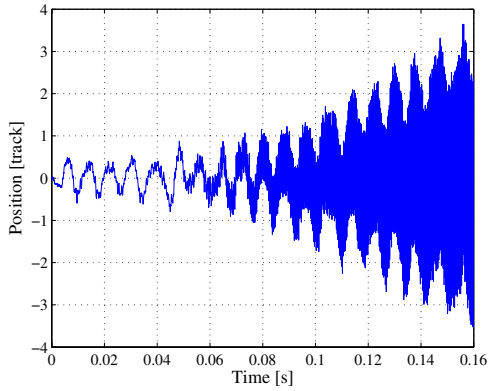

図 7: 従来手法での 20 周目の出力の様子
Fig. 7 Time series of output without FF input (20th track)

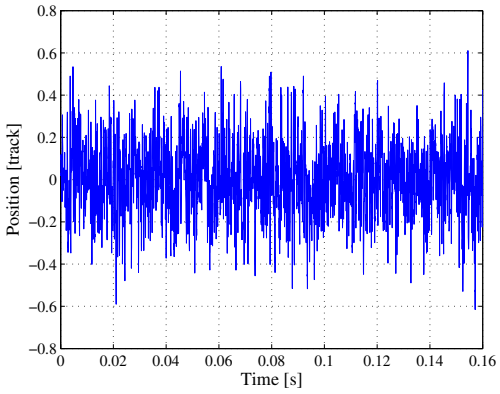

図 8: フィードフォワード入力を加えた場合の 20 周目の出力の様子
Fig. 8 Time series of output with FF input (20th track)

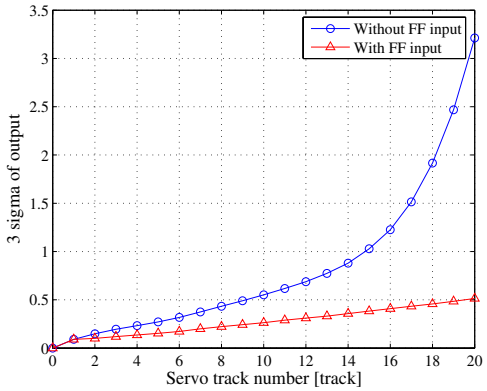

図 9: 従来手法と新手法とのそれぞれの周での 3σ の比較
Fig. 9 3 sigma of output in each track

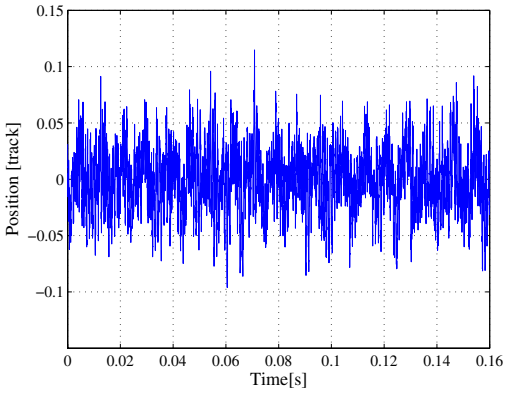

図 10: 観測雑音のゲインを 0 にした場合の 20 周目の出力の様子
Fig. 10 Time series of output with FF input (20th track, gain of sensor noise = 0)

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] Nobutaka Bando , Yoichi Hori: "Estimation of the Head Position for Self Servo Track Writer and the Application of PTC" Technical Meeting on Industrial Instrumentation and Control, IEE Japan,IIC-05-67, 2005(in Japanese)
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-05-67, 2005

[3] Norihito Nakamura, Nobutaka Bando and Yoichi Hori: "Control Design for Self Servo Track Writer using Estimation of the Head Position" Advanced Motion Control, 2006.3