

Self Servo Track Writerのためのヘッド位置推定とPTCの適用

坂東 信尚*, 堀 洋一 (東京大学)

Estimation of the Head Position for Self Servo Track Writer and the Application of PTC

Nobutaka Bando and Yoichi Hori (The University of Tokyo)

Abstract

In this paper, the estimation of the head position for Self-Servo Track Writer (SSTW) is proposed and PTC (Perfect Tracking Control) is applied to SSTW.

In the production process of HDD (Hard Disk Drive), there is a process of writing servo signals on magnetic disks to move the head to target address. But increasing the capacity of HDD, a servo track writer takes much more time to draw servo signals. As a result, to maintain the number of shipping HDD, manufacturers are forced to make an investment in some equipment and circumstances and desire a low-cost method to draw servo signals. In order to resolve this problem, the SSTW which draws servo signals with own head were already made suggestion, but it is impossible in conventional methods to realize the SSTW since servo signals become divergent as it draws several tracks belong inner servo tracks.

In the proposed method, to estimate the head position, time series of error signals are used which is only observable signal in SSTW. Additionally PTC (Perfect Track Control) is applied to the SSTW to improve tracking performance along the inner tracks. To verify the effectiveness of the proposed method, some simulation results are shown.

キーワード: サーボトラックライタ、ヘッド位置推定、パーフェクトトラッキングコントロール
(Servo Track Writer, Estimation of the head position, Perfect Tracking Control)

1 はじめに

磁気ディスク装置のヘッド位置決め制御系では、高密度に描かれたトラックにいかにかヘッドを追従させるか? という問題が絶えずとりあげられるが、ヘッドが位置決めをするためにディスクに描かれているセンサ信号はさらに細かい精度でディスク上に描かれている必要がある。そのため、このセンサ信号を描き込むためのサーボトラックライタと呼ばれる製造装置の制御問題はここ数年で大きな問題として取り上げられるようになってきた [1][2][3]。

現在、サーボトラックは基準となる座標系が無いことから、磁気ディスク装置を開封し、絶対座標系を基準に取り、外部からサーボトラックライタによって描かれている (図 1) [4]。しかし、最近では PC 以外にも磁気ディスク装置が使われるようになってきたことから、これからの磁気ディスク装置は、携帯用としてより高密度化が進むこと、HDD-DVD デコーダのようにより大容量化が進むといったことが予想される。このような背景に対して、サーボトラックライタでは、

- ディスクのトラック幅が細くなったので、今まで無視してきた外乱の影響が無視できなくなっている (高密度化の影響)

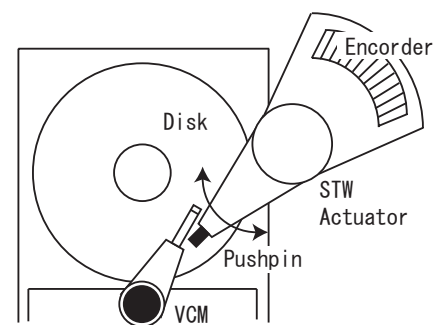


図 1: Pushpin servo track writing method

- ディスク容量の増大とともに、サーボトラック描き込みにかかる時間・コストが大きくなってきている (大容量化の影響)

といった問題点が生じ、今まで維持してきた性能・価格が実現されない可能性もでてきている。

そこで本研究では、磁気ディスク装置が持つ位置決め機構と書き込み機構を利用することによって、磁気ディスク装

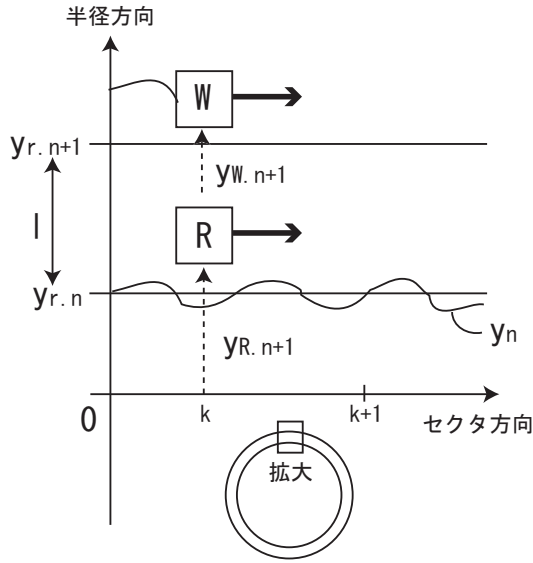


図 2: Coordinate system of SSTW

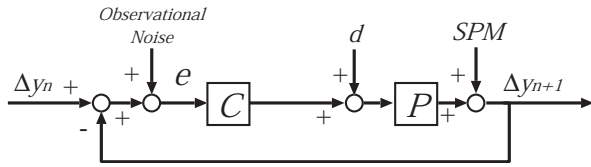


図 3: Block diagram of SSTW with error coordinates

置を開封することなく、磁気ディスク自身がサーボトラックを書き込む Self-Servo Track Writer (以後、SSTW) の実現を目指し、従来幾周もサーボトラックを書き込む工程を経ることによってサーボトラックが乱れてしまっていた問題を解決し、実現が困難だと考えられていた SSTW が実現できることを示す。

また、提案するヘッド位置推定とフィードフォワード入力を用いることによって、藤本・堀らが提案した PTC (Perfect Tracking Control) を SSTW に適用することができることを示し、安定したサーボトラックを描くことができることをシミュレーションにより検証する。

2 SSTW の定式化と問題点

2.1 SSTW のブロック線図と定式化

SSTW は磁気ディスク装置自身が持つヘッドの read 機構、write 機構を用いてサーボトラックを書いていく手法である。本論文では問題を簡略化するために、read 機構と write 機構がトラックピッチと等しい間隔を維持できるものとして位置制御系を構成する。ただし、最内側のサーボトラックは事前に何らかの方法で書かれているものと仮定する。この最内側のサーボトラックを read ヘッドが追従することによって、トラックピッチ間だけ離れた write ヘッドが次週のサーボトラックを書いていく。さらに、次週のサー

ボトラックを read ヘッドが追従することによって、次々とサーボトラックが書かれる仕組みになっている。

以下に SSTW を構成するための変数を定義する。また、各変数 [*] は * セクタ目の情報を示す。

$y_{R,n+1}$:	n+1 周目の servo track を描くときの read ヘッドの絶対位置
$y_{W,n+1}$:	n+1 周目の servo track を描くときの write ヘッドの絶対位置
$y_{r,n}$:	n 周目に相当する真円
$y_{r,n+1}$:	n+1 周目に相当する真円
y_n :	n 周目に write トラックに描かれた track (= $y_{W,n}$)
l :	track 間距離
N :	1 周に存在するセクタ数

図 2 は read ヘッドが内側トラック y_n を追従している際に write ヘッドが y_{n+1} を書いている様子を示す。フィードバック制御器は read ヘッド $y_{R,n+1}$ と既に書かれている内側のトラック y_n との誤差を 0 に収束させるように働き、 y_n と同様のサーボトラックを n+1 周に書くことを試みる。

このとき、read ヘッド・write ヘッド間を l とし、 n 周、 $n+1$ 周に書かれるサーボトラックの真円からの誤差を式 (1)、(2) のように表すと、制御ブロック線図は図 3 のように表すことができる。図中、 C は通常のフォロイングモードで用いられる一般的なフィードバック制御器を示す。また、後述するシミュレーションでは、プラントは高次の共振まで考慮したアクチュエータのモデルを使用している。また、 d : 風乱、 SPM : ディスクの揺動を示す。以下では観測雑音を ξ と記述する。

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

$$y_{n+1}[k] = y_{r,n+1}[k] + \Delta y_{n+1}[k] \quad (2)$$

また、このとき指令値から出力までの伝達関数は式 (3) のように表すことができる。

$$\begin{aligned} \Delta y_{n+1}[k] = & \frac{CP}{1+CP} \Delta y_n[k] \\ & + \frac{CP}{1+CP} \xi_{n+1}[k] \\ & + \frac{P}{1+CP} d_{n+1}[k] \\ & + \frac{1}{1+CP} SPM_{n+1}[k] \end{aligned} \quad (3)$$

2.2 SSTW の問題点

前節で述べた SSTW の定式化において SSTW における問題点をまとめる。

- 制御システムの補感度関数が高周波数帯域で 0[dB] より上に存在するため、その周波数帯の信号を増幅してしまう。
- ディスク回転による風乱、揺動、観測雑音などの白色的な外乱が印加される。
- 観測することができる信号が誤差信号 e のみである。

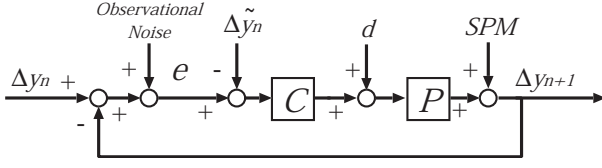


図 4: Block diagram with past servo pattern signal

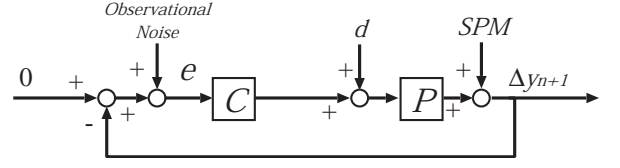


図 6: Block diagram with reference 0

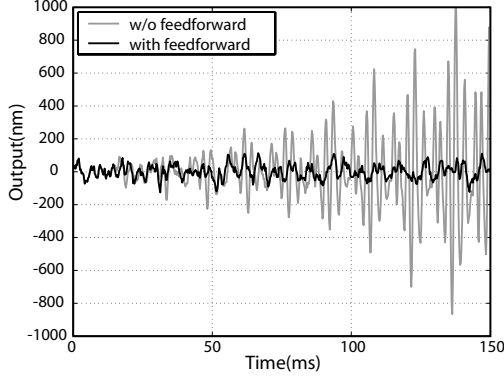


図 5: Time series of output with or w/o FF input in simulation

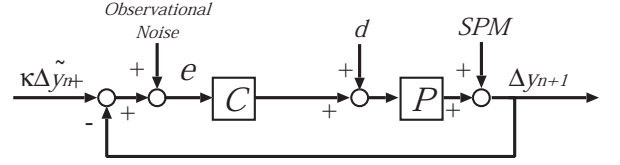


図 7: Block diagram of SSTW with reference $\kappa\Delta y_n$

$$\Delta y_{n+1}[k] = y_1[k] - \sum_{m=2}^{n+1} \xi_m[k] \quad (10)$$

このヘッド位置推定値を利用することによって、通常では観測することができない指令値を推定することができ、図 4 のように前週の指令値を打ち消すブロック線図が実現される。

これにより、図 5 に示すように、フィードフォワード入力なしでは周を重ねる毎に発散していたサーボトラックが、フィードフォワード入力を加えることにより、図 6 のように指令値 0 を印加していることと等価になり、安定したサーボトラックを描くことができる。

3 SSTW の実現と PTC の適用

3.1 ヘッド位置推定値を用いた SSTW の実現方法

前節で述べたように SSTW の実現には多くの問題点が存在するが、[5] ではヘッド位置推定法を適用することによって、安定したサーボトラックを描くことができることを示している。前述したように SSTW では、内側との誤差信号 e のみしか観測することができないが、式 (7) に示すように観測誤差をセクタ毎に加算することによって、ヘッド位置を推定することができることを利用している。途中、観測雑音は白色的であるので、加算することによって、0 に近似している。

$$e_{n+1}[k] = y_n[k] - y_{R,n+1}[k] + \xi_{n+1}[k] \quad (4)$$

$$e_n[k] = y_{n-1}[k] - y_{R,n}[k] + \xi_n[k] \quad (5)$$

⋮

$$e_2[k] = y_1[k] - y_{R,2}[k] + \xi_2[k] \quad (6)$$

$$\begin{aligned} e_{n+1}[k] + e_n[k] + \dots + e_2[k] \\ = y_1[k] + (n-1)l - y_{R,n+1}[k] + \sum_{m=2}^{n+1} \xi_m[k] \end{aligned} \quad (7)$$

$$= y_1[k] + nl - y_{W,n+1}[k] \quad (8)$$

$$= y_1[k] - \Delta y_{n+1}[k] \quad (9)$$

3.2 PTC の適用

[5] で示された SSTW 実現のブロック線図はヘッド位置推定値の誤差が 0 であると仮定すると、等価的に図 6 のように書き表すことができる。また、さらにフィードフォワード入力を調整することにより、図 7 のように内側の周に κ 倍だけ追従する制御系を実現することができる。このように指令値を操作することにより、内側に準じたサーボトラックが外側に描けるようになり、真円に追従させるよりもトラック間距離を安定化させることが可能になる。

また、このように制御系に指令値を与えることができることから、図 8 のようにフィードフォワード制御器を構成することが可能になり、フィードバック制御器、フィードフォワード制御器により $\kappa\Delta y_n[k]$ に追従する制御系が構成可能になる。

ここで、フィードフォワード制御器の設計法として、藤本らが提案したマルチレートサンプリングレートによる PTC(Perfect Tracking Control) を SSTW に適用する [6][7]。これにより、前周に完全追従する制御系が可能になる。フィードフォワード制御器の設計法については付録に詳細を記述する。

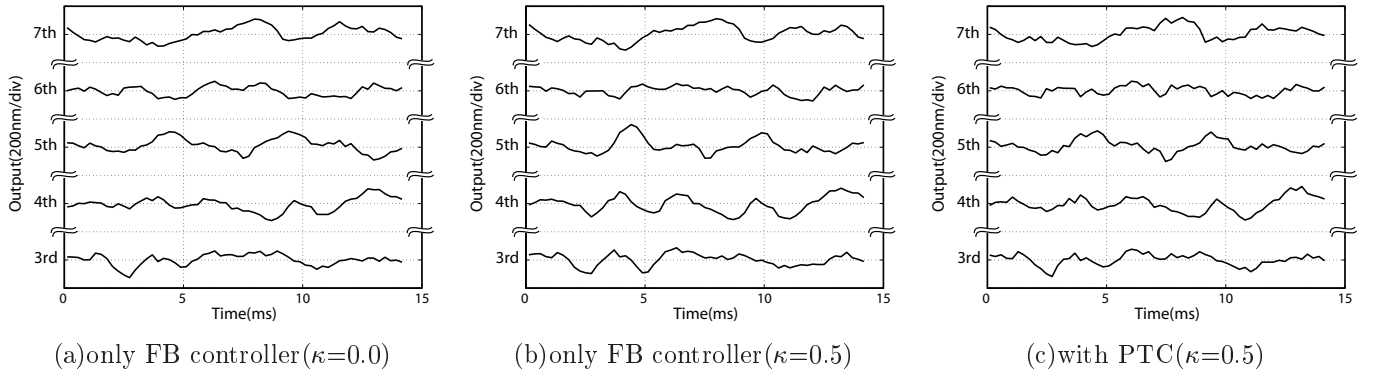


図 9: Time series of output with or w/o PTC in simulation

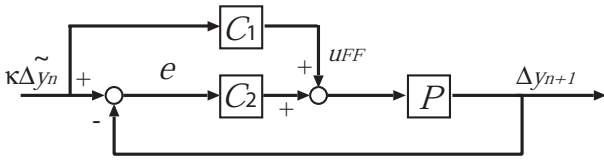


図 8: Block diagram of 2-degree-of-freedom control with reference $\kappa\Delta y_n[k]$

表 1: Simulation result: 3σ of output and track width

制御器	指令値	出力の 3σ	track 間隔の 3σ
FB	真円	138[nm]	705 ± 197 [nm]
FB	前週の 0.5 倍	166[nm]	705 ± 173 [nm]
FB+PTC	前週の 0.5 倍	155[nm]	705 ± 176 [nm]

4 シミュレーション

4.1 シミュレーション条件

PTCを適用したSSTWの効果を実験により検証する。シミュレーションでは、トラック間距離 705[nm]の2.5インチ磁気ディスク装置を想定し、プラントのモデルとして高次の共振モードも考慮したアクチュエータのモデルを使用した。フィードバック制御器はHDDのフォロイングモードに使用される通常のPID制御器である。また、PTCのフィードフォワード制御器にはプラントを2次系に近似したものを、通常のサンプリングタイム 238[μ s]に対して、2倍のマルチレート化を行っている(119[μ s])。

4.2 シミュレーション結果

図9にPTCをSSTWに適用したときのシミュレーション結果を示す。(a)は真円の指令値に対してフィードバック制御器のみの場合の出力の時系列、(b)は内側周の0.5倍の指令値に対してフィードバック制御器のみの場合の出力の時系列、(c)はPTCを適用した場合(フィードバック制御器+マルチレートPTC)を適用した場合の出力の時系列を示す。また、表1にそのときに計算された出力の 3σ 、トラック間隔の 3σ の値を示す。通常、完全追従が実現されるためには、外乱の影響が出ないような高性能なフィードバック制御系が構成されていることが条件となるが、SSTWでは高周波数帯域にも多くの外乱が存在するため、出力の時系列は外乱の影響が出ている。しかし、表1にあるように、PTCを適用することによって、トラック間隔、出力ともにその揺れを減じることが可能になっている。

4.3 考察

式(11)~(13)に前節で行ったシミュレーションのそれぞれの制御器の場合の入力から出力までの伝達関数、式(14)~(16)に入力からトラック間距離までの伝達関数を示す。 S 、 T は図3で示されるブロック線図の閉ループ系の感度関数、補感度関数を示す。ここで、PTCは前週のサーボトラックに対して、完全追従ができていないものと仮定している。真円の指令値を与える場合には、指令値から出力までの影響はないが、トラック間距離では、前周の影響が出ていることがわかる。これに対して、PTCを適用した場合には、指令値から出力までの影響、トラック間距離を見通しよく調整することが可能であることがわかる。これは先のシミュレーション結果とも一致し、定量的にPTCの効果を示している。

5 まとめ

本論文では、SSTWを実現することを目的とし、ヘッド位置推定によるフィードフォワード入力を構成し、さらに藤本らによって提案されたPTCを適用することを提案した。これにより、通常の実円に対する制御系に比べて、トラック間距離まで考慮したSSTWが実現でき、指令値を調整することによって、出力、トラック間距離を任意に決めることができることを示した。

現在、磁気ディスク装置は大きな市場を持ち、これからも多く使われることが予想される。安価で高性能な磁気ディスク装置が出回るよう、これからはサーボトラックライタについても積極的な研究が望まれる。

$$\Delta y_{n+1}[k] = T \cdot \xi_{n+1}[k] + P \cdot S \cdot d_{n+1}[k] + S \cdot SPM_{n+1}[k] \quad (11)$$

$$\Delta y_{n+1}[k] = T \cdot \kappa \Delta y_n[k] + T \cdot \xi_{n+1}[k] + P \cdot S \cdot d_{n+1}[k] + S \cdot SPM_{n+1}[k] \quad (12)$$

$$\Delta y_{n+1}[k] = \kappa \Delta y_n[k] + T \cdot \xi_{n+1}[k] + P \cdot S \cdot d_{n+1}[k] + S \cdot SPM_{n+1}[k] \quad (13)$$

$$l + \Delta y_{n+1}[k] - \Delta y_n[k] = l - \Delta y_n[k] + T \cdot \xi_{n+1}[k] + P \cdot S \cdot d_{n+1}[k] + S \cdot SPM_{n+1}[k] \quad (14)$$

$$l + \Delta y_{n+1}[k] - \Delta y_n[k] = l + (T \cdot \kappa - 1) \Delta y_n[k] + T \cdot \xi_{n+1}[k] + P \cdot S \cdot d_{n+1}[k] + S \cdot SPM_{n+1}[k] \quad (15)$$

$$l + \Delta y_{n+1}[k] - \Delta y_n[k] = l + (\kappa - 1) \Delta y_n[k] + T \cdot \xi_{n+1}[k] + P \cdot S \cdot d_{n+1}[k] + S \cdot SPM_{n+1}[k] \quad (16)$$

6 謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの有益な御助言を頂いき、実験検証のための実験機を貸してくださった(株)東芝の柳原茂樹氏、谷津正英氏、岩代雅文氏、佐渡秀夫氏に対し、ここに記して感謝申し上げます。

参考文献

- [1] M. Hemant, C. Robery and A. Vinay: "Modeling and compensator design for self servowriting in disk", *Proc. of the American Control Conference 2003*, 2003.
- [2] G. Guo, J. Zhang: "Control Strategies for Writing Servo Tracks Narrower Than 5 MicroInches", *Proc. of the IIP/ISPS Joint MIPE'03*, pp. 1-5, 2003.
- [3] C. Kang and C. Kim: "An Iterative Learning Approach to Compensation for the Servo Track Writing Error in High Track Density Disk Drives", *Proc. of the IIP/ISPS Joint MIPE'03*, pp. 20-22, 2003.
- [4] Yukihiro Uematsu, Masanori Fukushi and Kayoko Taniguchi: "Development of the Pushpin Free STW", *IEEE Trans. Magnetics*, Vol. 37, No. 2, 2001.
- [5] 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", 産業計測制御研究会, IIC-04-72, pp. 531-534, 2004.
- [6] 藤本 博志, Bin Yao: "マルチレート適応ロバスト制御に基づくリニアモータの位置決め制御", 平成 16 年電気学会産業応用部門大会予稿集, 2004 年 9 月.
- [7] H. Fujimoto, Y. Hori and Atsuo Kawamura: "Perfect Tracking Control based on Multirate Feedforward Control with Generalized Sampling Periods", *IEEE Trans. Industrial Electronics*, Vol. 48, No. 3, pp. 636-644, 2001.

A 付録：マルチレートサンプリングによる完全追従制御

出力を観測するサンプリングタイム T_y (通常のサンプリングタイム：長い方) に対して、 T_y を n 分割して作るサンプリングタイムを T_u (短い方) とする。短い方のサンプリングタイム T_u で離散化した離散時間プラントは、プラント

の離散状態方程式

$$x[k+1] = A_s x[k] + b_s u[k] \quad (17)$$

$$y[k] = c_s x[k] \quad (18)$$

となる。さらに、1 サンプリングタイム先の状態方程式に代入することで、

$$x[k+2] = A_s x[k+1] + b_s u[k+1] \quad (19)$$

$$= A_s (A_s x[k] + b_s u[k]) + b_s u[k+1] \quad (20)$$

$$= A_s^2 x[k] + [A_s b_s, b_s] \begin{bmatrix} u[k] \\ u[k+1] \end{bmatrix} \quad (21)$$

が得られる。これを n 回繰り返すことで、時刻 $t = iT_y = kT_u$ から $t = (i+1)T_y = (k+n)T_u$ までの長いサンプリングタイム T_y の状態変数の遷移は、

$$x[k+n] = A x[k] + B u[i] \quad (22)$$

となる。ここで、

$$A = A_s^n \quad (23)$$

$$B = [A_s^{n-1} b_s, A_s^{n-2} b_s, \dots, b_s] \quad (24)$$

$$u[i] = [u[k], u[k+1], \dots, u[k+n-1]]^T \quad (25)$$

を表す。ここで改めて式 (26) を長いサンプリングタイムの序数に直し、

$$x[i+1] = A x[i] + B u[i] \quad (26)$$

を得る。ここで、

$$u[i] = B^{-1}(x_d[i+1] - A x_d[i]) \quad (27)$$

$$= B^{-1}(I - z^{-1}A)x_d[i+1] \quad (28)$$

を入力することによって、

$$x[i+1] = x_d[i+1] \quad (29)$$

となり完全追従制御が実現する。

ただし、実プラントとフィードフォワード制御器のプラントが一致していること、プラントの変動に対しては十分ロバスト性を有するフィードバック制御器が存在することが条件となる。