Kobe University Repository : Kernel

PDF issue: 2025-12-04

外部フィードバックを併用したリファレンスガバナを用いたハードディスクのシーク制御

昊, 郭
太田, 有三
増淵, 泉

(Citation)
神戸大学大学院工学研究科・システム情報学研究科紀要,3:68-73

(Issue Date)
2011

(Resource Type)
departmental bulletin paper

(Version)
Version of Record

(URL)
https://hdl.handle.net/20.500.14094/81003818

神戸大学大学院工学研究科・システム情報学研究科紀要　第 3 号　68〜73 頁　2011 年
doi:10.5047/gseku.j.2011.010

外部フィードバックを併用したリファレンスガバナを用いたハードディスクのシーク制御

郭　昊 [1*] ・ 太田　有三 [1] ・ 増淵　泉 [1]

[1] システム情報学研究科 システム科学専攻

(受付: February 2, 2012　受理: March 23, 2012　公開: March 29, 2012)

キーワード: ハードディスク装置,　目標管理,　シーク制御,　入力飽和

本論文では, 外部フィードバックを併用したリファレンスガバナを用いた制御法のハードディスクのシーク制御への応用について述べる。ハードディスクシステムのシーク制御において，実際のハードディスクシステムのの剛体特性のみを考慮した低次元ノミナルモデルを制御用モデルとし，外部フィードバックを併用するリファレンスガバナを用いた参照入力を整形・管理する制御法を適用し，その制御入力を実際のハードディスクシステムへ加える方法を採用する。また，共振モードを励起しないようにするために，ノッチフィルタを用いる。さらに，提案法をハードディスクベンチマーク問題 (シーク問題) に適用してその有効性を検証する。従来最も短いシーク時間を示していた周波数成分を考慮した終端状態制御 (FFSC) や多項式入力型 FSC を用いた場合の 10[track] に対するシーク時間 0.538[ms] よりも短いシーク時間 0.496[ms] を実現できるという結果が得られたことを示す。

1　はじめに

ハードディスクのヘッドの制御は，ナノスケールサーボ制御の代表的な応用の一つであり，近年非常に精力的な研究がなされている [1, 2, 3, 4, 5, 6]。

ハードディスクのヘッドのシーク問題においては，ボイスコイルモーターの駆動回路における入力電流飽和を考慮する必要がある場合がある。これは拘束系の制御の問題であり, 種々の方法が提案されている [7, 8, 9, 10, 11, 12]。これらの多くは，制御対象のモデルを用いてサーボ系に対する参照入力を整形・管理する方法であるが，参照入力が比較的急激に変化する場合が多く，磁気ヘッド駆動機構系の共振モードを励起しないように留意する必要がある。一方，ハードディスクの共振特性を制御用モデルに組み入れると，制御対象の次数が非常に高くなり，制御という観点からは好ましくない。

本研究では，ハードディスクシステムのシーク制御において，実際のハードディスクシステムの剛体特性のみを考慮した低次元ノミナルモデルを制御用モデルとし，外部フィードバックを併用するリファレンスガバナを用いた参照入力を整形・管理する制御法 [11] を適用し，その制御入力を実際のハードディスクシステムへ加える方法を採用する。また，共振モードを励起しないようにするために，ノッチフィルタを用いる。さらに，提案法を文献 [1] で示されているハードディスクベンチマーク問題 (シーク問題) に適用してその有効性を検証する。単一のサンプリング周期 T_s を用いる場合については，従来最も短いシーク時間を示していた周波数成分を考慮した終端状態制御 (FFSC)[3] や多項式入力型 FSC[4] を用いた場合の 10[track] に対するシーク時間 0.538[ms] よりも短いシーク時間 0.496[ms] を実現できるという結果が得られたことを示す。

2　制御方法の概略

2.1　問題設定

ハードディスクベンチマーク問題[*1]（シーク問題）では，剛体特性のみを考慮したノミナルモデルにおける連続時間伝達関数 $P_m(s)$ は，次の式で表される。

$$P_m(s) = \frac{K_p}{s^2}, \quad K_p = \frac{K_f}{mT_p} \tag{1}$$

安定性と速応性を考慮したノミナルモデルに対する連続時間コントローラ $C_m(s)$ は,

$$C_m(s) = K_m \frac{\alpha_m s + 2\pi F_m}{s + \alpha_m 2\pi F_m} \tag{2}$$

で与えられる。ここで, $K_m = 5.67\times10^{-4}$, $\alpha_m = 2.65\times10^2$, $F_m = 42.11$ である。ノミナルモデル $P_m(s)$ とコントローラ $C_m(s)$ をサンプリング周期 $T_s = 3.7879\times10^{-5}[s]$ で，離散近似した安定なサーボシステムが

$$\begin{cases} x[k+1] &= Ax[k] + Br[k], \ x[0] = x_0 \\ y[k] &= Cx[k] \end{cases} \tag{3}$$

で与えられるとする。ここで，$k \in \mathbf{Z}_+ = \{0, 1, 2, \cdots\}$ であり，$x \in \mathbf{R}^n$ はシステムの状態，x_0 は初期状態，$y \in \mathbf{R}$ は制御出力，$r \in \mathbf{R}$ は閉ループ系に対する参照入力である。なお，システム (3) は安定なサーボ系であり，以下の条件が満たされているとする。

(A1)　A は安定行列である。

[*1] 詳細については，文献 [1] を参照されたい。

(A2) (A,B) は可到達である。

(A3) 任意の $\hat{r} \in \mathbf{R}$ に対して，唯一つの平衡点 $\hat{x}(\hat{r})$ が存在して，

$$\hat{x}(\hat{r}) = A\hat{x}(\hat{r}) + B\hat{r},\ C\hat{x}(\hat{r}) = \hat{r} \tag{4}$$

が成立する。

また，状態と入力に関する拘束条件 (制約条件) は

$$z[k] = Lx[k] + Dr[k] \in \mathcal{Z} \subseteq \mathbf{R}^{N_z}\ \ \forall k \in \mathbf{Z}_+ \tag{5}$$

で与えられる。ここで，$\mathcal{Z} \subseteq \mathbf{R}^{N_z}$ は次に定義される凸多面体集合である。

$$\mathcal{Z} = \{z:\ h_i^\top z \leq 1,\ i \in \{1, 2, \cdots, N_c\}\} \tag{6}$$

なお, 本論文では, z として, 制御入力 u を考え, $|u[k]| \leq 0.1$ という拘束条件を考える。ここで, $N_c = 2, h_1 = 10, h_2 = -10$ である。

リファレンスガバナ (Reference Governor) を用いる制御では，リファレンスガバナによってシステム (3) における $r[k]$ の大きさを管理し，(5) 式の制約条件が満足されるようにするという方策がとられる [7)8)]。

2.2　最大出力許容集合

最大出力許容集合は次のように定義される [7)]。

定義 1　最大出力許容集合 (MAS) $\Omega_\infty(\hat{r})$　初期値 x_0 と一定値参照入力 $\hat{r}$ が与えられ，$r[k] \equiv \hat{r}$ とするときシステム (3) の解を $x[k; x_0, \hat{r}]$ で表す。また，$z[k; x_0, \hat{r}] = Lx[k; x_0, \hat{r}] + D\hat{r}$ とする。この時，システム (3) と制約条件 (5) に対して MAS を次のように定義する。

$$\Omega_\infty(\hat{r}) = \{x_0 \in \mathbf{R}^n \mid z[k; x_0, \hat{r}] \in \mathcal{Z}, \forall k \in \mathbf{Z}_+\}$$

注意 1　一定値参照入力 $\hat{r}$ に対するシステム (3) の平衡点を $\hat{x}(\hat{r})$ で表し，$\hat{z}(\hat{r}) = L\hat{x}(\hat{r}) + D\hat{r}$ とおく。$e[k] = x[k; x_0, \hat{r}] - \hat{x}(\hat{r})$ とおくと，$e[k+1] = Ae[k]$ が成り立つので，$e[k] = A^k e[0] = A^k(x_0 - \hat{x}(\hat{r}))$, $z[k; x_0, \hat{r}] = Le[k] + \hat{z}(\hat{r})$ が成り立つことに注意すると，

$$\begin{aligned}\Omega_\infty(\hat{r}) &= \{x_0 : e_0 + \hat{x}(\hat{r}),\ e_0 \in \Omega'_\infty(\hat{r})\} \\ &= \Omega'_\infty(\hat{r}) + \hat{x}(\hat{r})\end{aligned} \tag{7}$$

$$\Omega'_\infty(\hat{r}) = \{e_0 :\ LA^k e_0 + \hat{z}(\hat{r}) \in \mathcal{Z}, k \in \mathbf{Z}_+\} \tag{8}$$

が成り立つ。なお，ここで考えるハードディスクのヘッドの制御のためのサーボ系に対しては，$\hat{z}(\hat{r}) = 0$ が成立する。このときには，$\Omega'_\infty(\hat{r})$ の形状は $\hat{r}$ に依存せず，$\Omega'_\infty(\hat{r}) = \Omega'_\infty(0)$ である。従って，$\Omega_\infty(\hat{r})$ は $\hat{x}(\hat{r})$ を用いて $\Omega_\infty(\hat{r}) = \Omega'_\infty(0) + \hat{x}(\hat{r})$ のように $\Omega'_\infty(0)$ の平行移動で表現できる。

簡単のため，本文では，任意の $\hat{r}$ に対して，$\hat{z}(\hat{r}) = 0$ であるとして話を進める。したがって，

$$\Omega_\infty(\hat{r}) = \Omega_\infty(0) + \hat{x}(\hat{r}) \tag{9}$$

である。$\Omega_\infty(0)$ の計算はかなりの時間を必要とするが，これはオフラインで計算すればよい。

2.3　外部フィードバックを用いる方法

速応性も重視するために，次の問題を考える [9)10)]。

問題 1　ダイナミックスが (3) 式で与えられるとして，初期値 x_0 と一定値参照入力 $r^* \in \mathbf{R}$ が与えられたとき，(5) 式の制約が満たされているという条件の下で，

$$\begin{aligned}&J(\{r[k]\}_{k=0}^N; x_0, r^*) \\ &\quad = \sum_{k=0}^{N} (|y[k] - r^*|^2 + w_r^2 |r[k] - r^*|^2)\end{aligned} \tag{10}$$

を最小にする参照入力 $\{r[k]\}_{k=0}^N$ を求める。

問題 1 の最適解 $\{r[k]\}_{k=0}^N$ を用いて制御を行う方法をリファレンス入力整形法 (Reference input Shaping[9)]，以下では RS と略す) とよぶ。問題 1 は凸 2 次計画問題であり比較的容易に解ける問題であるが，経験的には，$O(n^3N^3)$ 程度の計算時間を要する。nN が大きい場合には，r^* と x_0 が与えられた後で凸 2 次計画問題をリアルタイムで解くことは難しい。従って，何らかの近似的方法を用いる必要がある。ここでは，文献 [11)] で提案された外部フィードバックとリファレンスガバナを用いる方法と文献 [2)] で提案されたモデルフォロイング制御に類似した方法を用いる。

文献 11) では，Fig. 1 に示されるような構造の制御系を提案している。

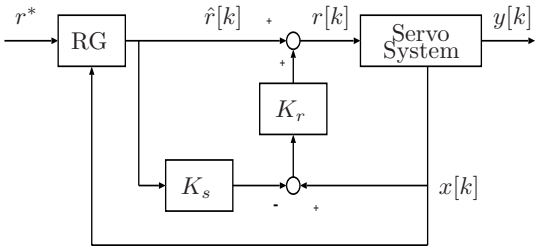

Fig. 1.　Block diagram of the control system using outer feedback, where $K_s = (\mathtt{I} - A)^{-1}B$, $K_r = \hat{Y}\hat{Q}^{-1}$ and $(\hat{\varepsilon}, \hat{Q}, \hat{Y})$ is the optimal solution of (LMI 1) .

次の結果が示されている [11)]。

補題 1　(LMI 1: Linear Matrix Inequality) の最適解を $(\hat{\varepsilon}, \hat{Q}, \hat{Y})$ とする。

$$\text{(LMI 1)}: \begin{cases} \min\limits_{\varepsilon, Q, Y} \quad \varepsilon \\ \text{subject to} \quad Q = Q^\top, Q - \mathtt{I} \succ 0, \\ \begin{bmatrix} Q & (*_{21})^\top & (*_{31})^\top \\ (*_{21}) & Q & 0 \\ (*_{31}) & 0 & \varepsilon\mathtt{I} \end{bmatrix} \succ 0 \end{cases}$$

$$*_{21} = -(AQ + BY), \quad *_{31} = -(SQ + RY)$$

ここで，$S = [C^\top\ \ 0\ ]^\top$，$R = [0\ \ w_r\ ]^\top$ である。また，$M \succ 0$ は左辺の行列 M が正定行列であることを示す。

Fig. 1 において，$\hat{P} = \hat{Q}^{-1}$，$K_r = \hat{Y}\hat{P}$ であり，

$$r[k] = K_r[x[k] - \hat{x}(\hat{r}[k])] + \hat{r}[k] \tag{11}$$

となり，全体の閉ループ系は

$$x[k+1] = G[x[k] - \hat{x}(\hat{r}[k])] + \hat{x}(\hat{r}[k]) \tag{12}$$

となる。ここで，$G = A + BK_r$ は安定な行列である。

さらに，$\hat{r}[k] \equiv r^*$ であるとき，任意の初期値 x_0 に対してシステム (3) の解が (5) 式の制約条件を満たすならば，次式が成立する。

$$\tilde{J}(\{r[k]\}_{k=0}^{N}; x_0, r^*) \leq \hat{\varepsilon}|x_0 - \hat{x}(r^*)|^2 \tag{13}$$

ここで，$r[k]$ は，(11) 式と (12) 式において，$\hat{r}[k] \equiv r^*$ とおいたものである。
閉ループ系 (12) において $r[k] = \hat{r}$ とおき，$e[k] = x[k] - \hat{x}(\hat{r})$ とおくと，誤差系は $e[k+1] = Ge[k]$ となり，拘束条件は $z[k] = Le[k] + \hat{z}(\hat{r}) \in \mathcal{Z}$ となるが，これに対して同様に MAS を計算し，それを $\Omega_\infty(\hat{r}) = \Omega'_\infty(0) + \hat{x}(\hat{r})$ とするとき，Fig. 1 における RG は，$x[k]$ を観測し，

$$\begin{aligned}\lambda[k] = &\max\{\lambda \in [0,1] : \\ &x[k] - \hat{x}(\lambda(r^* - r_0) + r_0) \in \Omega'_\infty(0)\}\end{aligned} \tag{14}$$

となる $\lambda[k]$ を求め，$\hat{r}[k] = \lambda[k](r^* - r_0) + r_0$ と決定する。ただし，$x_0 \in \Omega_\infty(\hat{r}_0)$ であると仮定している。なお，ある k_0 に対して $\hat{r}[k_0] = r^*$ になった場合，$x[k_0] \in \Omega_\infty(r^*)$ であるので，これ以降は，$\hat{r}[k] = r^*$ とすると，$x[k] \in \Omega_\infty(r^*)$ である。そして，(11) 式で与えられる $\{r[k]\}$ は，初期時刻が k_0 で初期値が $x[k_0]$ であった場合の問題 1 の最適解となる。

3　ハードディスクヘッドシーク問題への適用

上で述べた制御方法を文献 1) で示されているハードディスクベンチマーク問題（シーク問題）に適用する。

3.1　ハードディスクのモデル

実際の制御対象の連続時間伝達関数 $P_f(s)$ は次式で与えられる。

$$P_f(s) = \Big(P_m(s) + K_p P_{\mathrm{mech}}(s)\Big)e^{-T_d \cdot s} \tag{15}$$

ここで，$P_m(s)$ は (1) 式で与えられる。$P_{\mathrm{mech}}(s)$ はヘッド駆動機構系の伝達関数であり，次式で与えられる。

$$P_{\mathrm{mech}}(s) = \sum_{i=2}^{7} \frac{A_i}{s^2 + 2\zeta_i\omega_i s + \omega_i^2},\ \omega_i = 2\pi f_i \tag{16}$$

ここで，f_i は 3kHz，4.1kHz，5kHz，7kHz，12.3kHz，16.4kHz である。また，制御対象の変動も考慮されており，P_{mech} の共振周波数 f_i $(i = 2,3,4,5,6,7)$，減衰係数 ζ_i $(i = 5,6,7)$，ゲイン A_i $(i = 2,3,4)$ に対し，変動範囲が与えられる。従って，2^{54} $(54 = 6 \times 3 \times 3)$ 通りの摂動モデルの凸結合で与えられるモデルを考える必要があるが，ベンチマーク問題では，その中から摂動の影響が大きい 18 通りの変動モデルが考慮されている。

3.2　シーク制御

ハードディスク装置のヘッドを目標データトラックに位置決めするためには，現在位置から目標トラック中心に整定する動作（シーク）を行う必要がある。文献 1) に示されているシーク制御のベンチマーク問題では，以下の仕様 1.2.3. が指定されているが，一般に制御入力電流に対する制約も考慮する必要があるので，ここでは，さらに，4. の仕様も追加して考える。

1. 外乱は考慮しない。
2. シーク距離は 10[track] とする。
3. 上述の 18 通りの変動モデル全てに対するシーク波形が目標トラック値 ±0.1[track] 以内に収まった時間をシーク時間とする。
4. 制御入力電流の絶対値は $|u_f[k]| \leq 0.1[A]$ を満足する。

3.3　制御系の構成

制御系のブロック線図を Fig. 2 に示す。図中，$P_m(z)$ と $P_f(z)$ は，それぞれノミナルモデルと振動モデルを示している。ノミナルモデルのサーボシステム $r[k]$ から $y[k]$ への状態方程式は (3) 式で表される。Fig. 2 において $K_s = (\mathrm{I} - A)^{-1}B$ である。また，外部フィードバックのゲイン K_r は，補題 1 の (LMI 1) の最適解を $(\hat{\varepsilon}, \hat{Q}, \hat{Y})$ とすると，$K_r = \hat{Y}\hat{Q}^{-1}$ で与えられる。具体的には，$K_s = 10^{-3} \times [0.52\ \ 0\ \ 0]^\top$，$K_r = [-551.67\ \ -336.93\ \ 2.35]$ である。

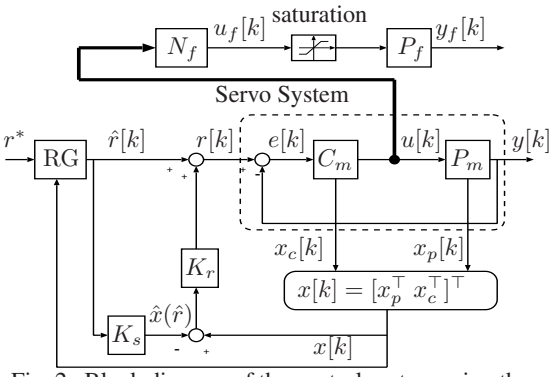

Fig. 2. Block diagram of the control system using the reference governor with outer feedback and the model following control .

$N_f(z)$ はノッチフィルタで，$P_f(z)$ に含まれる共振モードを抑制するために用いられている。ノッチフィルタの連続時間伝達関数は

$$N_f(s) = \prod_{i=2}^{7} \frac{s^2 + d_i 2\zeta_i\omega_i s + \omega_i^2}{s^2 + 2\zeta_i\omega_i s + \omega_i^2} \tag{17}$$

で与えられる。ここで，$\omega_i = 2\pi f_i$ はノッチの中心角周波数，ζ_i はノッチの幅，d_i はノッチの深さを決めるパラメータであり，各周波数のパラメータの設定値を Table 1 に示している。

Table 1. Parameters of notch filter.

i	f_i[Hz]	ζ_i	d_i	i	f_i[Hz]	ζ_i	d_i
2	3000	0.56	0.77	5	7000	0.4	0.10
3	4100	0.3	0.11	6	12300	0.5	0.18
4	5000	0.2	0.18	7	16400	0.5	0.18

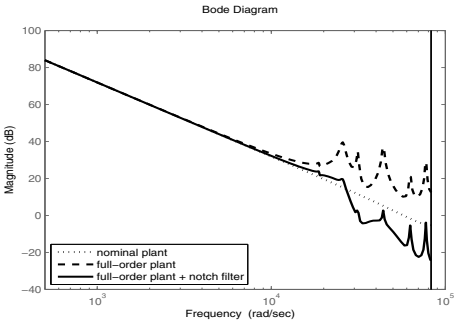

Fig. 3. Open-loop characteristics with and without notch filter.

なお，周波数 3000 に対するパラメータは振動モデルの閉ループのバンド幅とオーバーシュートへの影響を考慮して決めた。また，$N_f(z)$ も $N_f(s)$ をサンプリング周期 T_s で'matched' を用いて離散近似したものである。開ループ特性を Fig. 3 に示す。点線，破線，実線は，それぞれ低次ノミナルモデル P_m，高次モデル P_f，高次モデル＋ノッチフィルタ ($P_f N_f$) の周波数応答のゲイン特性を示す。ノッチフィルタをつけることにより，共振をかなり抑制していることがわかる。

3.4　シミュレーション

提案法のシミュレーション結果を示す。

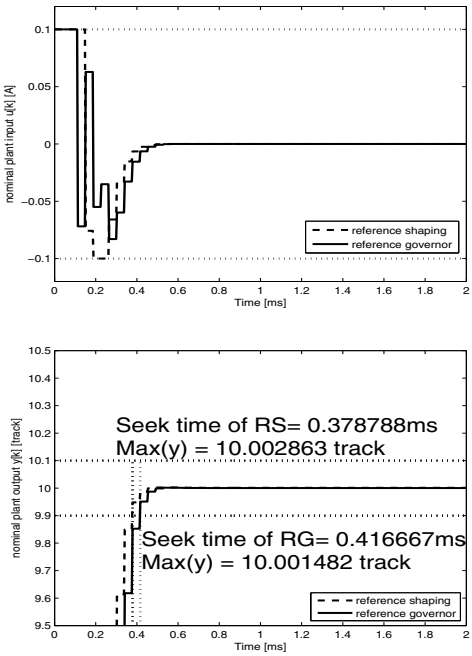

Fig. 4. Input $u[k]$ and output $y[k]$ of nominal plant P_m using RS or RG with outer feedback K_r .

Fig. 4 は，外部フィードバックを併用したリファレンスガバナを用いる制御法を適用した場合のノミナルモデル P_m の入力 $u[k]$ と出力 $y[k]$ を示す。出力 $y[k]$ に対して，オーバーシュートはほとんどなく，シーク時間は約 0.42[ms] である。なお，リファレンスガバナを用いているので $u[k]$ は拘束条件を満たしている。また，シミュレーションは Matlab(R2007b) を用いて行った。

比較のために，Fig. 4 には，システム (3) に RS を適用した場合の波形を破線で示している。外部フィードバックを併用したリファレンスガバナを用いる制御法がリファレンス入力整形法のよい近似を与えるという理論的保証は示されてるわけではないが，この例に関しては，Fig. 4 に示すように比較的よい近似を与えている。

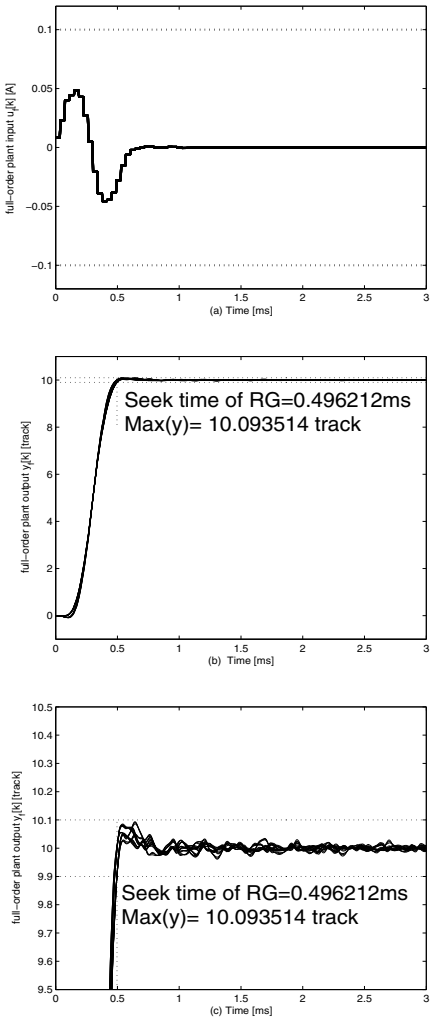

Fig. 5. Input $u[k]$ and output $y_f[k]$ of full-order plant P_f and its enlargement using RG with feedback K_r from 0[track] to 10[track] when using sampling period T_s.

Fig. 5 に摂動モデル P_f に対する入力 $u_f[k]$ と出力 $y_f[k]$ を示す。なお，Fig. 5 で入力の波形が階段状であるのは，周期 T_s で零次ホールドにしているからである。また，出力波形は連続時間システム P_f の出力であるので，階段状でない。(a) 図から $u[k]$ が制約条件を満足していることが確認できる。(c) 図は振動の様子を見やすいように (b) 図を部分的に拡大したものである。出力 $y_f[k]$ のオーバーシュートは約 0.09[track] である。また，$y_f[k]$ のシーク時間は約 0.496[ms] であり，周波数終端状態制御 (FFSC)[3] や多項式入力型 FSC[4] を用いた場合のシーク時間 0.538[ms] より，約 8% 程度の短縮を実現できている。

4　おわりに

本論文では，低次元の制御用モデルに外部フィードバックを併用したリファレンスガバナを用いる制御方法を適用し，それに対する制御入力を実際の制御系へ加える方法を提案した。そして，ベンチマーク問題へ適用し，単一のサンプリングを用いる場合については，従来最も短いシーク時間を示していた周波数成分を考慮した終端状態制御 (FFSC)[3] や多項式入力型 FSC[4] を用いた場合の 10[track] に対するシーク時間 0.538[ms] よりも短いシーク時間 0.496[ms] を実現できるという結果を得た。

周波数成分を考慮した終端状態制御 (FFSC)[3]，多項式入力型 FSC[4]，マルチレートサンプリングを用いる完全追従制御法 [5] は，線形性を仮定しており，制御入力を決めるための計算を比較的高速に行えるが，シーク距離が大きい場合には，オーバーシュートが大きくなることやシークが完了するまでのステップ数 N が大きくなったり，シーク距離に応じて N を変えなければならない場合があるなどの問題がある。一方，提案法では，オンライン・リアルタイムで $\hat{r}[k]$ を決めればよい。このための計算時間はシーク距離には無関係であるという特長がある。ただし，$\Omega_\infty(0)$ のファセット数が大きくなった場合には，そのままでは，$\hat{r}[k]$ の計算時間が問題になる場合も考えられ，これについては今後検討する必要がある。なお，$\Omega_\infty(0)$ の計算はオフライン計算であり，この計算時間は制御の実施時には関係がない。

参考文献

[1] 山口高司 · 平田光男 · 藤本博志：「ナノスケールサーボ制御」，東京電機大学出版局 (2007)

[2] M. Iwashiro, M. Yatsu, and H. Suzuki: Time optimal track-to-track seek control by model following deadbeat control, *IEEE Trans. on Magnetics*,Vol.35,No.2,904-909,(1999)

[3] 平田光男 · 長谷川辰紀 · 野波健蔵：「終端状態制御によるハードディスクのショートシーク制御」, 電学論 D,Vol.125,No.5,pp.524-529(2005-5)

[4] 平田光男 · 上野藤丸:「多項式入力型 FSC によるハードディスク装置のシーク制御」電学論 D,Vol.130,No.3,pp.277-282(2010-3)

[5] 藤本博志 · 堀 洋一 · 山口高司 · 中川真介: 「マルチレートサンプリングを用いた完全追従制御法による磁気ディスク装置のシーク制御」電学論 D,Vol.120,No.10,pp.1157-1164(2000-10)

[6] 福島 啓介 · 藤本 博志: 「高次制振 PTC を用いたベンチマーク問題におけるショートスパンシーク」電気学会研究会資料 (2006-9)

[7] E. G. Gilbert and K. T. Tan: Linear system with state and control constraints:the theory and application of maximal output admissible sets, *IEEE Trans. on Automatic Control*, Vol.36, No.9,pp.1008-1020(1991)

[8] 平田研二 · 藤田政之:「参照入力集合の連結にもとづく拘束システムの制御」システム制御情報学会論文誌，Vol.12，Np.10，pp.586-595 (1999)

[9] 杉江俊治 · 山本浩之:「状態および入力の制約を考慮した閉ループ系の目標値生成」, 計測自動制御学会論文集, Vol.37，No.9，pp.849-855(2001)

[10] A. Bemporda, M. Morari, V. Dua and E.N. Pistikopoulos: The explicit linear quadratic regulator, *Automatica*,Vol.38,3-20(2002)

[11] Y. Ohta, K. Mori, K. Yukimoto, and R. Mishio: On-line reference management for discrete time servo systems under state and control constraints, *Proc. of IECON*,183-188(2005)

[12] T. Taguchi,Y. Ohta: A dual mode reference governor for discrete time systems with state and control constrains, *IEEE Multi-Conference on Systems and Control*, Singapore,202-207(2007)

Seek Control of Hard Disk Divers using Referene Governor with Outer Feedback

Hao Guo[1*] , Yuzo Ohta[1] , Izumi Masubuchi[1]
[1]*Gradute School of System Informatics, Department of System Science*

Key Words: Hard disk drive, Refrence governor, Seek control, Input saturation

In this paper, we propose to use the reference governor with outer feedback to achieve a good response for seek control of hard disk drives. In the hard disk drive problem, the model of the swing arm consists of a double integrator, which is obtained by assuming it is a rigid body, high-frequency resonant terms and delay time, and, hence, it is a rather high order system. Moreover, high-frequency resonant terms have some uncertainties. Thus, the full-order model is too complicated to use it as a model for control. Considering the double integrator as a nominal plant, we design a stable servo system (we call it as a nominal servosystem), and use the reference governor with outer feedback to governs the reference input so that the constraint condition is satisfied and get a good response. We adopt the notch filter to cancel or suppress the high-frequency resonant modes included in full-order model. Applying this method to the benchmark problem, we establish 0.496**[ms] seek time for** 10**[track] seek. This seek time is about** 8**% shorter than** 0.538**[ms] seek time achieved by the Frequency-shaped Final-State Control method, which is the shortest seek time when a single sampling time.**