

탐침형 정보 저장 장치의 서보 시스템 설계

민동기, 홍승범

삼성종합기술원 HDD Program Team

Servo System Design of Probe Data Storage

Dong-Ki Min, Seungbum Hong

HDD Program Team, Samsung Advanced Institute of Technology

**Abstract** - 탐침형 정보 저장 장치는 원자 현미경의 원리를 이용한 차세대 고밀도 저장장치로 여겨진다. 정보의 크기가 수십 나노미터 이하이므로 정밀한 위치 제어 알고리즘이 필수적이다. 본 논문에서는 별도의 위치 센서 없이 복수개의 탐침을 이용하여 원하는 데이터 위치로 이동하는 servo algorithm, 정보 추종을 위한 tracking algorithm 및 위치 검출용 탐침의 수를 줄이고 최적 제어기 설계를 위한 노이즈 특성 안정화를 위한 servo code 설계법을 제안하고 제어기 설계법을 제안한다.

즉 좌표  $(i, j)$ 를 검출하기 위하여 별도의 복수개( $P$ )의 탐침(servo probe)과 servo field를 두고 각 servo probe에서 검출되는 값( $s_n$ )은 2진 코드( $S = s_p s_{p-1} s_{p-2} \dots s_1$ )의 각 bit로 mapping되어 식 (1)과 같이 정보의 절대 좌표를 encoding하게 된다[4].

$$S = G(i + (j-1) \times n, P) \tag{1}$$

각 data field의 정보 개수가 그림 2와 같이  $n \times m$ 일 경우 servo probe의 개수는  $\log_2(n \times m)$ 보다 많아야하며 코드  $S$ 는 Gray이다.

1. 서 론

원자 현미경(scanning probe microscopy, SPM)은 수십 나노미터의 유효 반경을 가지는 탐침(probe)을 이용하여 표면의 물리적 특성을 나노미터의 해상도로 검출할 수 있다. 이러한 원자 현미경의 원리와 정보를 기록할 수 있는 원리를 적용하면  $1\text{Tb/in}^2$ 의 밀도를 가지는 정보 저장 장치로 개발할 수 있다[1][2]. 정보는 자기, 전기[3], 열, 형상[2]을 이용하여 매체에 저장할 수 있으며 그림 1은 전기적으로 정보를 읽고 쓰는 탐침형 정보 저장 장치의 개략도를 나타낸다. 이러한 정보 저장 장치는 정보의 크기가 수십 나노미터 이하이므로 정밀한 위치 제어 알고리즘이 필수적이다. 본 논문에서는 별도의 위치 센서 없이 복수개의 탐침을 이용하여 원하는 데이터 위치로 이동하는 servo algorithm, 정보 추종을 위한 tracking algorithm 및 위치 검출용 탐침의 수를 줄이고 최적 제어기 설계를 위한 노이즈 특성 안정화를 위한 servo code 설계법을 제안하고 제어기 설계법을 제안한다.

2.2 Tracking Algorithm

위 servo algorithm은 대략적으로 정보의 직경에 이산화된 절대 좌표를 검출할 수 있으나 기록 및 재생 시점에 탐침이 정보의 중심에 위치할 수 있도록 더 세밀한 위치 검출 알고리즘이 필요하다. 전부 1로 기록된 별도의 tracking field와 별도의 tracking probe를 이용하여 그림 3(a)과 같이 scan방향과 수직으로 scanner를 특정 주파수로 가진다면 그림 3(b)과 같은 probe의 재생 신호  $p$ 가 발생한다. 탐침이 이동하면서 정보와 만나는 시점을  $t_a, t_b, t_c, t_d$ 라 할 때 각 축 방향의 외란  $x_d, y_d$ 는 다음과 같은 관계식을 가진다.

$$\begin{aligned} t_a + t_b &= \frac{4}{5V_s} (2x_d + y_d) + \frac{4R}{V_s} \\ t_c + t_d &= \frac{4}{5V_s} (2x_d - y_d) + \frac{12R}{V_s} \end{aligned} \tag{2}$$

그림 3(c)(d)와 같은 decomposition 신호  $u_x, u_y$ 를 probe 재생 신호  $p$ 와 곱하면 그림 3(e)(f)와 같이  $t_x, t_y$  신호를 얻을 수 있으며 이를 주기 T 동안 적분하면 식 (3)과 같이 각 축의 위치 오차를 검출할 수 있다[4].

$$\begin{aligned} \hat{x}_d &= \int_T t_x dt = \left( -\int_{t_a}^{t_b} + \int_{t_c}^{t_d} - \int_{t_c}^{t_d} - \int_{t_a}^{t_b} \right) dt = \frac{4T}{5R} x_d \\ \hat{y}_d &= \int_T t_y dt = \left( -\int_{t_a}^{t_b} + \int_{t_c}^{t_d} - \int_{t_c}^{t_d} + \int_{t_a}^{t_b} \right) dt = \frac{2T}{5R} y_d \end{aligned} \tag{3}$$

검출된 x축 오차는 동기화 오차로 별도의 time recovery circuit이 필요 없으며 y축 오차는 off-track 오차이다. 위 알고리즘은 이상적인 scanner 대역폭, 재생 신호 형태 등의 가정으로 유도되었으나 실제 조건들을 고

2. Servo System Design

2.1 Servo Algorithm

원자 현미경은 나노미터의 해상도를 가지고 있기 때문에 별도의 위치 센서 없이 탐침을 이용하여 위치를 검출할 수 있다. 낮은 scan 주파수로 외란에 민감할 수 있으므로 연속적으로 위치 검출이 가능한 센서가 바람직하다. 이를 위하여 실시간으로 위치 검출이 가능한 그림 2와 같이 위치 검출 알고리즘을 제안한다. 정보의 위치

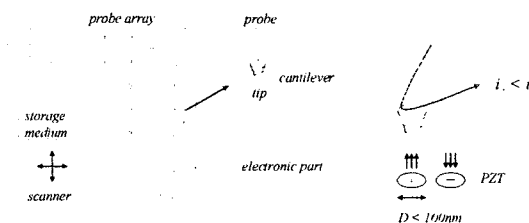


Fig. 1. Schematic view of probe storage and resistive probe.

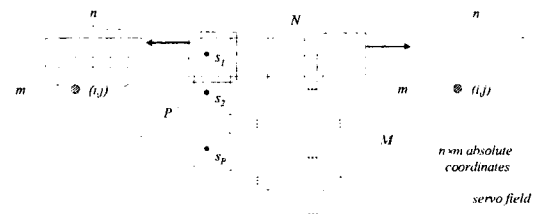


Fig. 2. Servo algorithm: absolute position encoding.

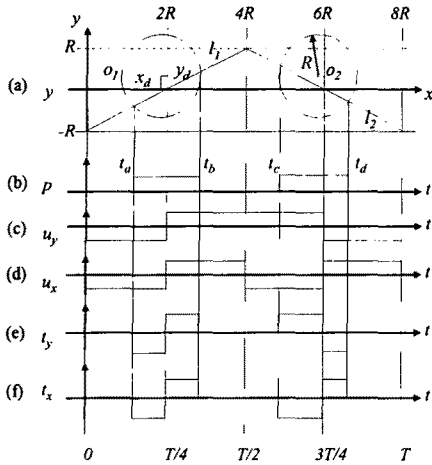


Fig. 3. The illustrative waveform to explain the tracking algorithm: (a) scanner vibration in y-axis (b) probe signal (c) decomposition signal of y-axis (d) decomposition signal of x-axis (e) probe signal multiplied by the decomposition signal of y-axis (f) probe signal multiplied by the decomposition signal of x-axis.

려하면 선형성, 동작 영역 등의 제한이 발생되나 실제 조건에서는 유효하게 사용할 수 있다[5].

### 2.3 Servo+Tracking(ST) Code

tracking probe를 복수개( $Q$ ) 사용하여 평균화하면 잡음을  $Q^{-1/2}$ 배 감소시킬 수 있다. 이외 servo probe가  $P$ 개 필요하므로 servo system을 구성하기 위한 probe의 개수는  $P+Q$ 개가 된다. 만약 식 (1)을 만족하는 servo code  $S$ 를 그림 3(a)와 같이 scan 방향의 인접 bit가 연속적으로 1이 되도록 나열한다면(이 경우 tracking condition이 만족한다) 총 probe의 개수를 줄일 수 있다. 이러한 servo+tracking(ST) code는 식 (4)와 같이 Hamming weight가  $n$ 인 code  $A_k$ , Hamming weight가  $(n+1)$ 인 code  $B_k$ 가 번갈아가며 나열하여 생성할 수 있다[4].

$$S_T(P,n) = A_1, B_1, A_2, B_2, \dots \quad (4)$$

그림 4와 같이 ST code 생성은 balanced bipartite graph에서 Hamiltonian path를 찾는 문제와 동일하며[6] 그 해가 존재하도록  $P$ 와  $n$ 을 설정한다[7].

만약  $B_i, B_j(i \neq j)$  조건을 제외하면 servo probe가 code  $A$ 를 읽을 경우만 좌표값이 유효한 대신 ST code를 간편하게 생성할 수 있다(half-absolute encoding). 그림 5는 ST code의 예와 tracking 조건을 만족하는 probe를 보여준다.

그림 6(a)(b)는 9개의 servo probe를 이용하여 binary

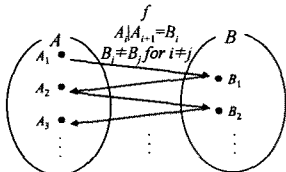


Fig. 4. ST code generation.

	$s_1$	$s_2$	$s_3$	$s_4$	$s_5$	$s_6$	$s_7$	$s_8$	$s_9$	$s_{10}$
$B_{k-1}$	0	0	1	0	1	1	1	0	1	1
$A_k$	0	0	1	0	1	1	1	0	1	0
$B_k$	0	0	1	0	1	1	1	1	1	0
$A_{k+1}$	0	0	1	0	1	1	1	1	0	0

Fig. 5. Example of ST codes generated by half-absolute encoding.

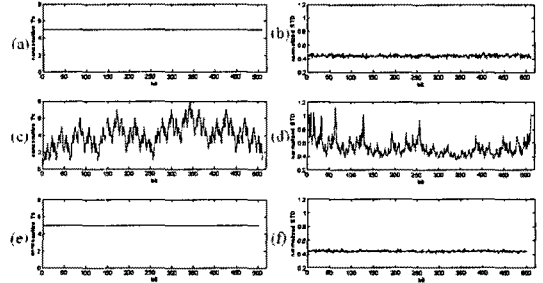


Fig. 6. Consecutive '1's and noise characteristics: (a)(b) 9 servo probes and 5 tracking probes, (c)(d) 9 servo probes, (e)(f) 10 servo and tracking probes with ST code.

reflected Gray code(BRGC)로 생성된 servo code로 제어되고 5개의 tracking probe를 사용하였을 때의 tracking probe에서 읽힌 연속적으로 1이 기록된 개수와 잡음 특성을 나타내고 그림 6(c)(d)는 9개의 servo probe를 사용하고 이를 tracking용으로 사용하였을 때의 경우이다. 그림 6(e)(f)는 10개의 probe와 ST code를 이용하였을 때의 연속적으로 1이 기록된 개수와 잡음 특성을 나타낸다. 비록 표시 가능한 좌표수는  $2_{10}C_2=504$ 로  $2^9=512$ 보다 조금 작지만 추가된 1개의 probe로서 5개의 잡음 특성을 나타낼 수 있으며 안정된 noise 특성으로 안정된 제어기 특성을 확보할 수 있다.

### 2.4 Controller Design

기록 매체를 움직이는 xy stage의 state equation은 제어기 출력의 DAC quantization ( $Q[e]$ )과 외란 noise( $d_n$ )가 포함되도록 식 (5)와 같이 구성된다. deterministic 외란은  $d$ 이다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + B_x Q[u] + B_d(d + d_n) \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (5)$$

외란을 추정하기 위하여 위 식은 외란이 포함된 augmented state를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_a &= A_a x_a + B_a u + \Gamma w \\ z &= C_a x_a + v \end{aligned} \quad (6)$$

process 잡음( $w^T=[u_n \ d_n]$ )은  $N(0, Q)$ 의 특성을 가지며 그 중  $u_n$ 은 DAC quantization noise로  $LSB^2/12$ 의 variation을 가지는 Gaussian으로 간략화하였다. 마찬가지로 측정 잡음( $v$ )도 제안된 tracking algorithm에 의해 실제 위치의 ADC 검출에 의한 quantization error 성분으로  $LSB^2/12$ 의 variation을 가지는 Gaussian( $N(0, R)$ )으로 간략화하였다.

제어기 출력은  $u_k = R_k r_k - K \hat{x}_k - \hat{d}$ 으로 외란 성분을 제거를 위해 state와 함께 추정된 외란 성분이 feedback된다. 이득  $K$ 는 LQ 최적 설계에 의해 선정되었다.

Kalman filter는 속도와 외란을 추정하며 식 (6)을 sampling time  $T$ 에 이산화한 식 (7)을 이용하여 구성한다.

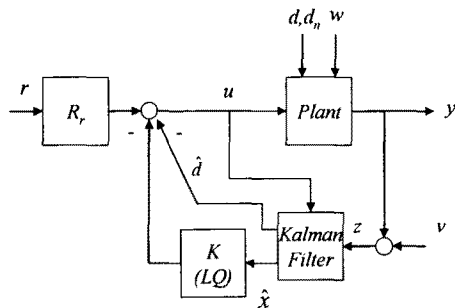


Fig. 7. Block diagram of feedback control system.

Table 1. Simulation parameters

parameter	value	parameter	value
scanner mass	0.001kg	scan speed	2mm/s
damping ratio	0.01	sampling time	0.2ms
natural freq.	500Hz	#tracking probes	5
bit radius	50nm	STD(disturbance)	2nm
scan range	100um	ADC,DAC	16bit

$$\mathbf{x}_{a,k+1} = \mathbf{A}_{ad}\mathbf{x}_{a,k} + \mathbf{B}_{ad}\mathbf{u}_k + \mathbf{\Gamma}_d\mathbf{w}_k$$

$$z_k = \mathbf{C}_{ad}\mathbf{x}_{a,k} + \nu_k \quad (7)$$

이산화에 따른 covariance matrix는 다음과 같이 간략화할 수 있다[9].

$$\mathbf{Q}_d \approx \mathbf{B}_a^T \mathbf{Q} \mathbf{B}_a \mathbf{T}$$

$$\mathbf{R}_d \approx \mathbf{R} \mathbf{T} \quad (8)$$

따라서, Kalman filter에 사용되는 time update와 measurement update의 수식은 각각 식 (9)와 (10)과 같이 주어진다[8].

$$\hat{\mathbf{x}}_k^- = \mathbf{A}_{ad}\hat{\mathbf{x}}_{k-1} + \mathbf{B}_{ad}\mathbf{u}_k$$

$$\mathbf{P}_k^- = \mathbf{A}_{ad}\mathbf{P}_{k-1}\mathbf{A}_{ad}^T + \mathbf{Q}_d \quad (9)$$

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_k^- \mathbf{C}_{ad}^T (\mathbf{C}_{ad}\mathbf{P}_k^- \mathbf{C}_{ad}^T + \mathbf{R}_d)^{-1}$$

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \hat{\mathbf{x}}_k^- + \mathbf{K}_k (z_k - \mathbf{C}_a \hat{\mathbf{x}}_k^-)$$

$$\mathbf{P}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{C}_a) \mathbf{P}_k^- \quad (10)$$

표 1은 tracking algorithm 및 외란 추정 Kalman filter를 시뮬레이션(MATLAB)하기 위한 파라미터들이다. 제안된 알고리즘의 유효성을 검증하기 위하여 scan을 100회 실시하여 추정 및 제어 특성을 통계적으로 분석하였다. 그림 8(a)은 외란 추정값의 표준 편차와 track 방향 오차의 regulation 오차의 표준 편차의 특성을 나타낸다. A는 9개의 servo probe를 사용하여 BRGC의 servo code에 의해 제어되는 경우이고 B는 10개의 servo 및 tracking probe를 이용하여 ST code에 의해 제어되는 경우이다.

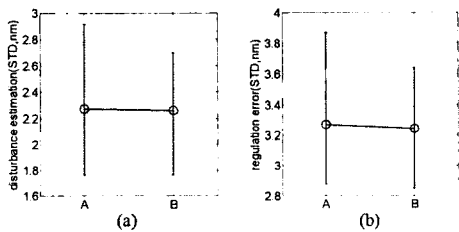


Fig. 8. Standard deviation of (a) disturbance estimation and (b) regulation error when using 9 servo probes (A) and 10 servo and tracking probes with ST code (B).

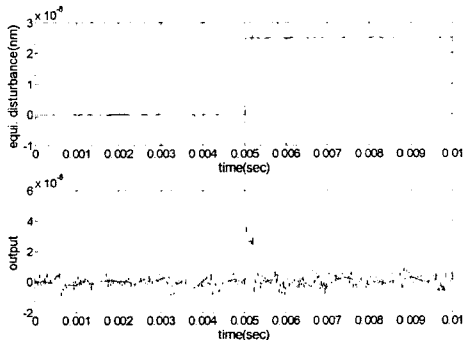


Fig. 9. Disturbance estimation and regulation when step disturbance is applied.

각각의 error bar에서 보는 바와 같이 표준 편차의 변화 폭이 줄어 추정 및 제어 특성이 향상되었음을 알 수 있다.

그림 9은 step 외란 ( $d=25\text{nm}$ )이 인가된 경우 Kalman filter에 의해 추정된 외란과 off-track 오차의 regulation을 나타낸다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 별도의 위치 센서 없이 복수 개의 탐침을 이용하여 원하는 데이터 위치로 이동하는 servo algorithm, 정보 추종을 위한 tracking algorithm을 제안하였다. 또한 새로운 servo code 설계법을 제안하여 위치 검출용 탐침의 수를 줄이고 최적 제어기 설계를 위한 노이즈 특성을 개선하였다. 설계된 외란 추정 Kalman filter와 LQ 제어기에 의해 안정적으로 제어됨을 시뮬레이션을 통하여 검증하였다.

### 참 고 문 헌

- [1] H. J. Mamin, B. D. Terris, L. S. Fan, S. Hoen, R. C. Barrett, D. Rugar, "High-density data storage using proximal probe techniques," *IBM J. Res. Develop.*, 39(6), pp. 681-700, 1995
- [2] E. Eleftheriou, T. Antonakopoulos, G. K. Binnig, G. Cherubini, M. Despont, A. Dholakia, U. Durig, M. A. Lantz, H. Pozidis, H. E. Rothuizen, P. Vettiger, "Millipede - a MEMS-based scanning-probe data-storage system," *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 39, No. 2, pp. 938-945, 2003.
- [3] H. Park, J. Jung, D.-K. Min, S. Kim, S. Hong and H. Shin, "Scanning Resistive Probe Microscopy: Imaging ferroelectric domains", *Appl. Phys. Lett.* 84(10), pp. 1734-1736, 2004
- [4] D.-K. Min, S. Hong, "Servo and Tracking Algorithm for a Probe Storage System," *IEEE Trans. on Magnetics*, 41(2), pp. 855-859, 2005
- [5] D.-K. Min and S. Hong, "New positional error detection algorithm for a probe-based data storage", *IEEE conference on Sensors*, pp. 601-604, 2004
- [6] M. Buck, D. Wiedemann, "Gray codes with restricted density," *Discrete Math.*, 48, pp. 163-171, 1984
- [7] J. R. Faudree, R. J. Gould, F. Pfender, A. Wolf, "On k-ordered bipartite graph," *Electronic Journal of Combinatorics*, 10, #R11, 2003
- [8] G. Welch, G. Bishop, *An introduction to the Kalman Filter*, Technical Report TR95-041, University of North Carolina at Chapel Hill, 1995.
- [9] M. S. Grewal, A. P. Andrew, *Kalman filtering: theory and practice using MATLAB 2e*, John Wiley & Sons, 2001