

마그네틱 베어링의 가변구조제어

Variable Structure Control of a Magnetic Bearing

°이대중, 박장환, 유정웅

충북대학교 전기공학과 (Tel: 0431-61-2419; Fax:68-7621)

Abstract : In this paper, we consider variable structure controller design of a active magnetic bearing(AMB). In particular, we design a switching hyperplane, considering coupling characteristic among each magnet. This method is designed by applying decentralized control method. Controller design consist of two factors that is, one is a linear control part to drive state variables to zero asymptotically and the other is a nonlinear controller part to maintain within neighborhood of switching hyperplane. Finally, A control method designed here is checked by simulation, which shows good results.

1. 서론

마그네틱 베어링(magnetic bearing)은 기계적 접촉 없이 회전자(rotor)를 지지하는, 즉, 회전자가 부상하는 베어링이다. 회전자의 둘레에는 수 개의 전자석 쌍들이 방사상으로 배열되어 회전자를 자력으로 능동적(active)으로 제어한다. 이러한 마그네틱 베어링은 전통적인 기계적인 베어링보다 우수한 장점들을 가지고 있다. 우선, 저손실 특성과 고회전속도의 가능성을 들 수 있고, 그 외에 윤활유가 필요 없으며, 적은 정비 및 고 신뢰성 등을 제공한다. 응용분야로는 고진공 기기류, 터보 기기류, 인공 기상학, 클린룸(clean room), 우주선과 인공위성을 위한 결합위치 제어, 에너지 저장 시스템 등에서 사용되어 지고 있으며, 점차 산업전반에서 수요를 증가하고 있다.

본 논문은 회전자를 부상시키기 위하여 전자석의 흡인력을 이용한 능동 마그네틱 베어링(active magnetic bearing:AMB)에 관한 연구를 갖는다. 여기서, AMB에 의해 지지되는 회전자는 그것의 강체(rigid body)에 대해 6-자유도(six-degrees-of-freedom)를 가진다. 여기서 회전자의 회전방향의 자유도를 제외하고, 방사방향에 대하여 4-자유도, 축의 방향에 대한 1-자유도가 자력에 의하여 제어 될 수 있다. 특히, AMB의 방사방향 제어문제는 다변수 문제이고, 개루프 불안정 시스템이므로 강인한 안정화와 성능을 위한 제어를 필요로 한다.

AMB의 가장 큰 장점 중의 하나는 제한된 물질강도 이상까지 회전자가 고속의 회전이 가능하다는 것이다. 그러나, 이러한 고속의 회전 기기에 있어서 매우 주목할만한 다음의 두 가지 문제가 나타난다. 첫째로, 전체 계통행렬은 비대각 결합(off-diagonal coupling) 항이 회전속도의 함수이라는 것이다. 이들 결합 항들은 회전운동에 의한 영향을 야기시킨다. 또한, 이 항은 AMB의 제어 계통들에 심각한 문제를 야기시킨다. 공칭속도에서 안정화한 페루프 계통이 어떤 회전속도에서는 불안정하게 되기 때문이다. 그런 까닭에 제어기는 회전자의 회전속도의 변화에 대응하여 페루프 계통이 강인하게 안정화하도록 설계되어야 한다. 둘째로 회전자의 불평형은 회전 기기에서 회전자의 선회운동과 회전자의 교번력(alternation force)을 야기시킨다.

여기서, 본 논문은 슬라이딩모드에서 파라미터 변화, 모델의 불확실성 및 외란에 대한 강인성을 갖는 가변구조제어를 설계하였고 AMB의 과도응답과 회전결합에 의한 영향에 대하여 결과를 제시하였다. 특히 스위칭 초평면을 분산극배치 방법으로 설계하여 AMB 계통에 대하여 제어를 설계하였다.

본 논문의 내용은 다음과 같다.

제 2절에서는 마그네틱 베어링의 모델과 동특성을 소개한 후,

모델 불확실성과 마그네틱 베어링의 성능을 기술하고 제 3절에서는 대규모계통의 이론을 적용하여 다변수계통의 스위칭 초평면을 분산제어방식으로 결정하는 방법을 기술하였다. 제4절에서는 마그네틱 베어링의 회전결합과 회전자의 교번력을 줄이기 위하여 선형제어부와 비선형제어부로 구성된 제어기설계에 대하여 서술한 후 마지막으로 수치 예에 대한 모의실험을 가지고 설계된 제어계통의 강인한 안정성과 양호한 성능을 보였다.

2. AMB계통의 모델링

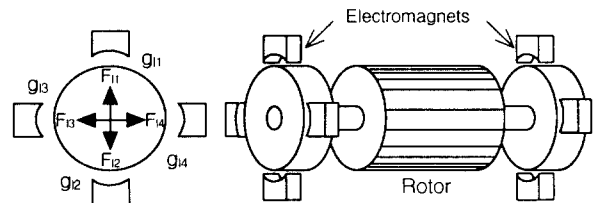


FIG 1. System Model for AMB

그림1에 대한 동작점 근방에서 수학적 모델은 식(2.1)과 같이 선형화될 수 있다[1].

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (2.1)$$

$$A = \begin{bmatrix} C_1 + (A_1 + B_1 C_2) C_1^{-1} & I & 0 \\ C_1 A_2 C_1^{-1} & 0 & 0 \\ -R/L \cdot I & C_1 B_1 C_1^{-1} & -R/L \cdot I \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ I/L \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

여기서, $x = [g_1 \ g_2 \ g_3 \ g_4 \ i_1 \ i_2 \ i_3 \ i_4 \ i_5 \ i_6]^T$, $u = [u_1 \ u_2 \ u_3 \ u_4]^T$ 이다. g_i 는 전자석과 회전자사이에서 정상상태 갭과의 편차, i_i 는 전자석의 정상상태 전류와의 편차이고 u_i 는 전자석의 정상상태전압과의 편차이다. 아래첨자 "1"과 "r"은 각각 자기베어링의 왼쪽과 오른쪽을 표시하고, 하첨자 "1"과 "3"은 각각 회전자의 수직방향중 하나와 수평방향중 하나를 표시한다. 그리고 식(2.2)에서 각각의 행렬은 아래와 같이 정의된다.

$$A_1 = \begin{bmatrix} a/m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a/m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -l/J_y \\ 0 & 0 & l/J_x & 0 \end{bmatrix},$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1/m & 1/m \\ -1/m & -1/m & 0 & 0 \\ l/J_y & -l/J_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & l/J_y & -l/J_y \end{bmatrix}, C_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & -l & 0 \\ 0 & 1 & l & 0 \\ -1 & 0 & 0 & -l \\ -1 & 0 & 0 & l \end{bmatrix}$$

$$C_2 = \begin{bmatrix} 0 & -2(F_1 + F_2)/W & 2(F_1 + F_2)/W & 0 \\ 0 & -2(F_1 + F_2)/W & 2(F_1 + F_2)/W & 0 \\ 2(F_1 + F_2)/W & 0 & 0 & 2(F_1 + F_2)/W \\ 2(F_1 + F_2)/W & 0 & 0 & 2(F_1 + F_2)/W \end{bmatrix}$$

$$C_3 = 2 \text{diag} \left[\frac{F_1}{I_1} + \frac{F_2}{I_2}, \frac{F_1}{I_1} + \frac{F_2}{I_2}, \frac{F_1}{I_1} + \frac{F_2}{I_2}, \frac{F_1}{I_1} + \frac{F_2}{I_2} \right]$$

파라미터와 기호 값들은 5절의 <Table 1.>에 명시하였다.

3. 다변수 계통의 스위칭 초평면 설계

다음과 같은 m개의 부계통으로 구성된 다변수 계통을 고려하자.

$$\dot{x}_i = A_i x_i + \sum_{j=1}^m A_{ij} x_j + B_i U_i, \quad i=1, 2, \dots, m \quad (3.1)$$

여기서, $x_i \in R^n, U_i \in R, A_{ij} \in R^{n_i \times n_j}, B_i \in R^{n_i}$ 이고 $\sum_{i=1}^m n_i = n$ 이다.

만약 변환된 상태 x_i 가

$$x_i = \begin{bmatrix} x_i^1 \\ x_i^2 \end{bmatrix}, \quad x_i^1 \in R^{m_i}, x_i^2 \in R^{h_i}$$

와 같이 새로 분해된다면 행렬 A_{ij}, B_i 역시 일치하여 분해하면 다음 식과 같이 재구성되어질 수 있다[2].

$$\dot{x}_i^1 = A_i^{11} x_i^1 + A_i^{12} x_i^2 + \sum_{j=1}^m A_{ij}^{11} x_j^1 + \sum_{j=1}^m A_{ij}^{12} x_j^2 \quad (3.2)$$

$$\dot{x}_i^2 = A_i^{21} x_i^1 + A_i^{22} x_i^2 + \sum_{j=1}^m A_{ij}^{21} x_j^1 + \sum_{j=1}^m A_{ij}^{22} x_j^2 + b_i u_i \quad (3.3)$$

여기서,

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} A_{ij}^{11} & A_{ij}^{12} \\ A_{ij}^{21} & A_{ij}^{22} \end{bmatrix}, \quad b_i = \begin{bmatrix} 0 \\ b_i \end{bmatrix}$$

슬라이딩모드동안에 i번째 스위칭 초평면은 다음과 같이 결정된다.

$$\begin{aligned} \sigma_i &= c_i x_i + \sum_{j=1}^m c_{ij} x_j \\ &= c_i^1 x_i^1 + \sum_{j=1}^m c_{ij}^1 x_j^1 + c_i^2 x_i^2 + \sum_{j=1}^m c_{ij}^2 x_j^2 = 0, \quad \forall i \geq t_i \end{aligned} \quad (3.2)$$

여기서, t_i 는 슬라이딩모드에 도달했을 때의 시간이고 $c_{ij} = [c_{ij}^1 \quad c_{ij}^2]$ 이다. c_i, c_{ij} 를 결정하기 위한 가장 간단한 방법은 Utikin과 Yang[2]에 의해서 $c_i^1 = 1, c_i^2 = 0$ 으로 하면 식(3.4)는 다음과 같다.

$$x_i^2 + c_i^1 x_i^1 + \sum_{j=1}^m c_{ij}^1 x_j^1 = 0 \quad (3.5)$$

식(3.5)에서 x_i^2 는 $x_j^1 (j=1, \dots, m)$ 에 선형적인 관계를 가지므로 식(3.2)에 대입하면 스위칭초평면의 N(C)(C의 null space)에 도달하여 유지할 때 등가계통은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_i^1 &= (A_i^{11} - A_i^{12} c_i^1) x_i^1 \\ &+ \sum_{j=1}^m (A_{ij}^{11} - A_{ij}^{12} c_j^1 - A_{ij}^{12} c_j^2 - \sum_{k=1}^m A_{ik}^{12} c_k^1) x_j^1 \end{aligned} \quad (3.6)$$

이 식에서 알 수 있는 바와 같이 안정한 스위칭 초평면의 설계를 위하여 식(3.6)이 좌반부에 n-m개의 고유 값을 가지도록 c_i 와 c_{ij} 의 결정을 요구한다. 여기서는 선형동적시스템에 대한 분산극배치방법을 기초로 하여 설계하였다. 분산극배치방식[3]은 각 부계통의 안정화를 지역제어부(local controller part)에 의해서 이루고, 상호간섭을 고려한 범안정도(global stability)개선을 위하여 교정제어부(corrective controller part)를 추가하는 2단계 계층제어(2-level hierarchical control)방식이다.

먼저, $(A_i^{11} - A_i^{12} c_i^1)$ 가 제어가능하다는 가정아래 $A_i^{11} - A_i^{12} c_i^1$ 의 고유값이 원하는 극배치를 이루기 위해 임의의 구분된 위치, $-\sigma_i^1 \pm j\omega_i^1, \dots, -\alpha_i^1 \pm j\omega_i^1, -\alpha_i^1 + 1, \dots, -\alpha_i^{n-1}$ 를 위한 c_i^1 를 선정할 수 있다. 상호간섭을 가진 계통 식(3.6)에서 c_{ij}^1 를 결정하기 위하여 다음의 선형정칙변환[4]

$$x_i^1 = P_i \cdot \bar{x}_i$$

을 하고 정리하면 다음과 같다.

$$\dot{\bar{x}}_i = A_i \bar{x}_i + \sum_{j=1}^m (A_{ij} - \sum_{k=1}^m \Gamma_{ik} \bar{c}_{kj}) \bar{x}_j \quad (3.7)$$

여기서, $A_i = P_i^{-1} (A_i^{11} - A_i^{12} c_i^1) P_i$ 는 준대각행렬(quasidiagonal form)이고,

$$\bar{x}_i = P_i^{-1} x_i^1, \quad \bar{c}_{ij} = c_{ij}^1 P_i$$

$$A_{ij} = P_i^{-1} (A_{ij}^{11} - A_{ij}^{12} c_j^1) P_i$$

$$\Gamma_{ik} |_{i=k} = P_i^{-1} (A_i^{12} + A_{ij}^{12}), \quad \Gamma_{ik} |_{i \neq k} = P_i^{-1} A_{ik}^{12} \quad k=1, \dots, m$$

이다. 이때 전체시스템의 안정도 판별조건은 Sevastyanov-Kotelyanskii의 조건[3]을 만족하는 \bar{c}_{ij} 는 다음과 같다.

$$\bar{C} = (P^T P)^{-1} P^T \Lambda \quad (3.8)$$

여기서, $\bar{C} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \bar{c}_{ij}$ 이고 P와 Λ 는 각각 P_{ij}, Λ_{ij} 의 i번째 요소를 가진 행렬이다. 따라서 시스템 식(3.1)에서 교정부분(corrective part)의 스위칭 초평면은 $c_{ij}^1 = \bar{c}_{ij} P_i^{-1}$ 에 의하여 주어진다. 그러므로, 범안정도를 고려한 전체 스위칭 초평면은 다음 식에 의하여 주어진다..

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} + c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1m} \\ c_{21} & c_{21} + c_{22} & \dots & c_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_{m1} & c_{m2} & \dots & c_{m1} + c_{mm} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

4. 제어기 설계

4.1 가변구조제어설계를 위한 표준형

식 (2.1)에서 A와B는 상수행렬이다. 여기서, $n > m$ 이고 B는 full rank m이고 (A, B)는 완전히 가제어하다면 다음과 같은 직교행렬(orthogonal matrix)T가 존재한다[2].

$$TB = \begin{bmatrix} 0 \\ B_2 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

여기서 B_2 는 $m \times m$ 정칙행렬이다.

변환행렬 T를 이용하여 $y = TX$ 로 변환하면 상태방정식을 아래와 같이 재정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{y}_1(t) &= A_{11} y_1(t) + A_{12} y_2(t) \\ \dot{y}_2(t) &= A_{21} y_1(t) + A_{22} y_2(t) + B_2 u(t) \end{aligned} \quad (4.2)$$

그리고 스위칭 초평면은 다음과 같다.

$$S = Cx = CT^T y = c_1 y_1(t) + c_2 y_2(t) = 0 \quad (4.3)$$

여기서,

$$TAT^T = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}; \quad CT^T = [c_1 \quad c_2], \quad c_2 = I_m$$

이다.

4.2 가변구조제어설계

일반적으로 가변구조제어법칙은 다음과 같은 선형제어부와 비선형제어부 두 부분으로 구성된다[2].

$$U(x) = U^l(x) + U^M(x) \quad (4.4)$$

먼저 선형제어부는 다음과 같은 단순한 상태제어제어기이다.

$$U^l = Lx \quad (4.5)$$

상태제어 이득행렬 L값을 구하기 위하여 변환행렬 T2를 이용하여 상태 y를 다음과 같이 재변환한다.

$$z = T_2 y \quad (4.6)$$

여기서,

$$T_2 = \begin{bmatrix} I_n & 0 \\ F & I_m \end{bmatrix}, \quad F = c_2^{-1} \cdot c_1$$

변환된 상태 z를 다음과 같이 분할하면

$$z^T = [z_1^T \quad z_2^T], \quad z_1 \in R^n, \quad z_2 \in R^m$$

$$z_1 = y_1 : z_2 = Fy_1 + y_2 \quad (4.7)$$

위식으로부터 계통이 스위칭 초평면상에 도달하면 $z_2=0$ 임을 알 수 있다.

변환된 시스템방정식을 재정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= \sum z_1 + A_{12}z_2 \\ \dot{z}_2 &= \Theta z_1 + \Phi z_2 + B_2 u \end{aligned} \quad (4.8)$$

여기서,

$$\sum = A_{11} - A_{12}F : \Theta = F\sum - A_{22}F + A_{21} : \Phi = FA_{12} + A_{22}$$

슬라이딩모드에 도달하기 위하여 z_2 와 \dot{z}_2 는 같이 0이어야 한다. 그러기 위한 제어입력은 다음과 같다.

$$U^L(z) = -B_2^{-1}(\Theta z_1 + (\phi - \phi_*)z_2) \quad (4.9)$$

여기서, ϕ_* 는 좌반부에 고유값을 갖는 $m \times m$ 행렬이다. 특히, $\{\mu_i; \text{Re}(\mu_i) < 0, i=1, \dots, m\}$ 이면, $\phi_* = \text{diag}\{\mu_i; i=1, \dots, m\}$ 으로 놓을 수 있다.

원래의 상태공간(x-space)으로 역변환하면,

$$L = -B_2^{-1}[\Theta \phi - \phi_*]T_2T \quad (4.10)$$

선형제어법칙 U^L 은 상태성분 z_2 를 점진적으로 0으로 이끌어간다. 유한한 시간에 $N(C)$ 에 도달하기 위하여 비선형제어요소 U^N 이 필요하다.

가변구조계통은 무한히 빠른 스위칭을 원하나 실제적으로는 불가능하므로 이러한 비이상적인 상황에서 비선형 스위칭제어를 부가하면 채터링(chattering)현상이 발생한다. 채터링의 고주파 요소들은 모델화되지 않고 고주파계 동특성을 여기서 시키기 때문에 예측하지 않은 불안정성이 나타난다. 실제 물리적인 상황에서 이런 빠른 스위칭에 의하여 기기에 손상을 입히므로 이러한 결점을 보완하기 위해 제어부의 비선형부분을 선형근사화로 대체한 다음의 근사화한 스케일인자를 가지는 단위벡터 비선형제어를 고찰한다.

단위벡터제어[5]는

$$U^N = \rho \frac{Cx}{|Cx| + \delta} \quad (4.13)$$

의 형태를 가지며, 여기서 δ 는 작은 양의 상수이고 ρ 는 음수이다.

5. 시뮬레이션

우리는 3절에서 소개한 스위칭 초평면을 기반으로 AMB의 선형화 모델에 대한 제어기를 설계하였다. 여기서, 그 AMB모델의 데이터는 <Table 1.>에 명시되었다[1].

스위칭 초평면의 설계에서 부계통 S의 계수가 다음과 같이 정의될 때,

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ k_1 & 0 & k_2 \\ 0 & 0 & k_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

이 부계통을 위한 극배치가 식(5.2)와 같을 때 스위칭 초평면을 식(5.3)에 의하여 결정한다.

$$(s+a)(s+\beta) = s^2 + (a+\beta)s + a\beta \quad (5.2)$$

$$c_1 = \frac{a\beta + k_1}{k_2}, c_2 = \frac{a+\beta}{k_2} \quad (5.3)$$

<그림2>는 rpm=0인 경우에 제안된 가변구조제어를 적용하였을 때 수직, 수평축의 갭 응답이다. 여기서, t가 0.5초 일 때에 외외란이 인가되었다. 이 외외란의 형태는 한 주기의 sin-파이고, 주기는 10Hz이며 최대값은 5V이다. <그림3>은 이 때의 제어입력이다. <그림4>와 <그림5>는 위와 동일한 환경에서 선형제어부만을 가지는 계통의 수직, 수평축의 갭 응답과 제어입력이다. 이 결과로부터 우리는 가변구조제어의 우수한 성능과 비선형

Table 1. Parameters of AMB System

파라미터	기호	값	단위
속도	p	-	rpm
회전자질량	m	13.9	kg
x에 대한 관성모멘트	J _x	1.348×10 ⁻²	kg·m ²
y에 대한 관성모멘트	J _y	2.2326×10 ⁻¹	kg·m ²
전자석과 물체중심간의 거리	l	0.13	m
정상상태 갭	W	5.5×10 ⁻⁴	m
정상상태전류	I ₁ , I _{r1}	0.63	A
	I ₂ , I _{r2}	0.31	A
	I ₃ , I _{r3}	0.31	A
	I ₄ , I _{r4}	0.31	A
정상상태 흡인력	F ₁₁ , F _{r1}	90.9	N
	F ₂ , F _{r2}	22	N
	F ₁₃ , F _{r3}	22	N
	F ₃ , F _{r3}	22	N
저항	R	10.7	ohm
인덕턴스	L	0.285	H

제어부의 역할을 알 수 있었다. 특히, 가변구조제어에서 비선형 제어부의 역할이 설계된 스위칭 초평면에 빠른 시간 내에 도달하도록 힘을 가해준다는 것을 출력 전압으로부터 볼 수 있다.

<그림2>~<그림5>에서는 단지 가변구조제어가 선형제어보다 우수한 성능을 보여줄을 밝히기 위하여 극점들을 원점에서 멀리 선정하였다. 선형제어는 극배치는 원점에 가까울수록 그것의 과도응답은 원하지 않는 빈약한 성능을 초래한다. 그러나 <그림6>과 <그림7>는 가변구조제어를 한 경우 선형제어부의 극점들을 원점에 보다 가까이 선정하여도 양호한 결과를 얻을 수 있음을 보여준다.

<그림6>과 <그림7>는 실제 계통의 제안된 갭 영역을 설정하여 시뮬레이션을 행하였다. 여기서, 선형제어부의 극배치 값은 다음과 같다.

$$(s^2 + 50s + 635)(s+1)^4$$

그리고, $\mu_i = -50, \rho = 120, \delta = 0.1$ 이다. <그림 7>는 위와 동일한 환경에서 회전자가 100,000[회/sec]로 회전하는 경우이다. 마지막으로, <그림8>은 <그림7>과 동일한 선형제어부만 갖은 경우이다. 회전속도와 제안된 영역의 영향으로 불안정한 결과를 초래했다.

이상의 결과로부터 우리는 제안된 가변구조제어가 AMB모델의 파라미터변화 및 외란에 대한 강인성을 갖고있는 것을 보여주었다.

6. 결론

자기부상계통은 최근에 많은 응용에서 좋은 결과를 보여주고 있다. AMB계통은 자기부상계통의 한 분야로서 많은 발전을 기대한다. 본 연구는 AMB계통의 제어기설계에 관한 연구로서 가변구조제어를 적용하였다. 가변구조제어기는 분산극배치방법에 의하여 스위칭 초평면이 설계되었고 동작점 부근에서 선형화된 AMB모델에 적용한 결과 회전자의 비대각결합의 영향과 외란의 영향에 강인함을 시뮬레이션을 통하여 보였다.

7. 참고문헌

- 1 Fumio Matsumura and Takeshi Yoshimoto, " System Modeling and Control Design of a Horizontal-Shaft Magnetic-Bearing System", IEEE Transaction on Magnetics, Vol. 22, No. 3, pp. 196-203, 1986.

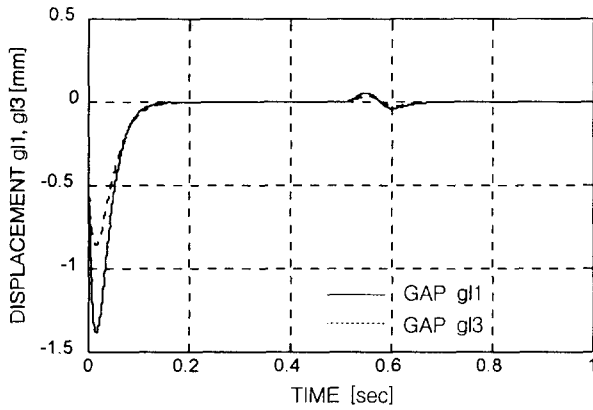


FIG 2. Output Response Including Nonlinear Controller

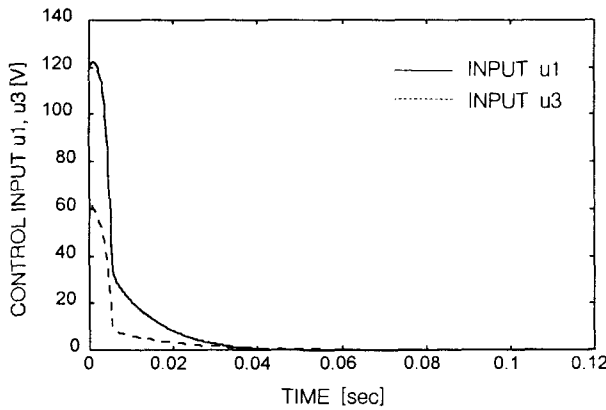


FIG 3. Control Voltage Including Nonlinear Controller

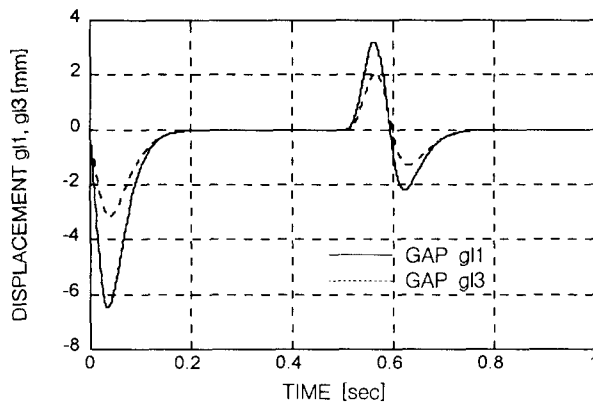


FIG 4. Output Response with Only Linear Controller

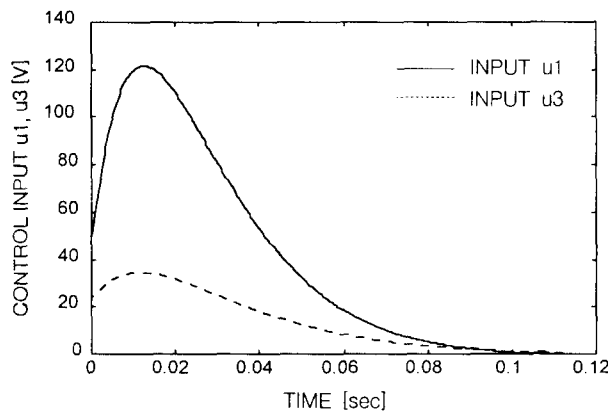


FIG 5. Control Voltage with Only Linear Controller

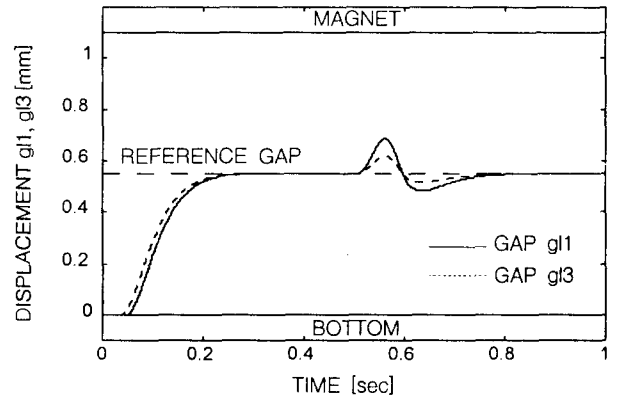


FIG 6. Output Response (Linear+Nonlinear)

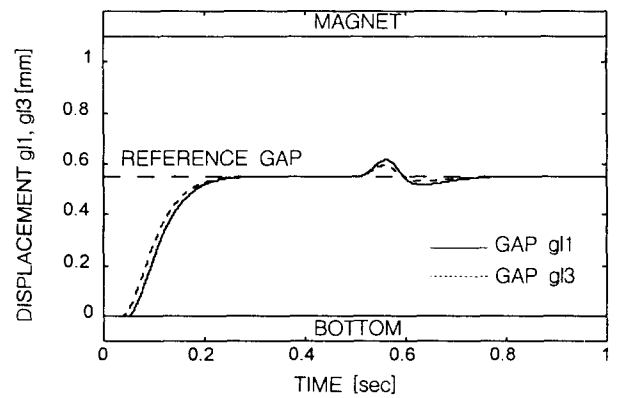


FIG 7. Output Response for Rotation (100,000 rpm/min)

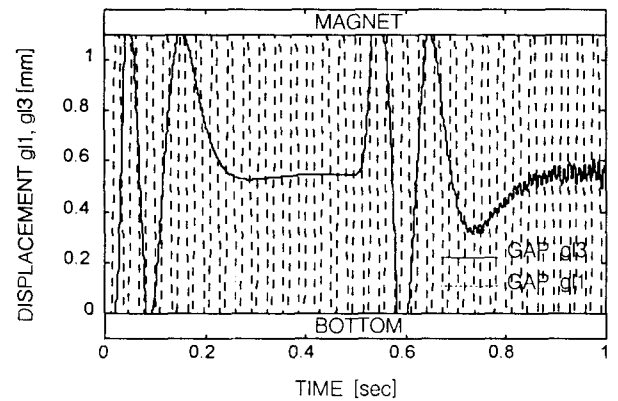


FIG 8. Output Response (Only Linear, 100,000 rpm/min)

- 2 C. M. Doring and A. S. I. Zinober, "Two approaches to Hyperplane Design in Multivariable Variable Structure Control Systems", *Int. J. Control*, Vol. 44, No. 1, pp. 62-85, 1986.
3. D.D. Siljak, "Large-Scale Dynamic System", North-Holland, Inc. 1978.
4. C.T. Chen, "Linear System Theory and Design", CBS Colleague, 1984.
5. J. A. Burton and A. S. Zinober, "Continuous Approximation of Variable Structure Control", *Int. J. System Sci.*, Vol. 17, No. 6, pp.875-885, 1986.
6. Masayuki Fujita, et al., "Loop Shaping Based Robust Control of a Magnetic Bearing", *IEEE Control System Magazine*, vol. 13, No. 4, pp.57-65, Aug., 1993.