

대부하 표적 지향시스템의 안정화 성능향상을 위한 외란보상 적응제어

Adaptive Disturbance Compensation Control for Heavy Load Target Aiming Systems to Improve Stabilization Performances

강민식† · 임재근* · 최영준** · 유준*** · 석호동**** · 김병운****

Min Sig Kang, Jae Keun Lim, Young Jun Choi, Joon Lyou, Ho Dong Seok and Byung Un Kim

(2005년 9월 20일 접수 ; 2005년 10월 17일 심사완료)

Key Words : Target Aiming System(표적지향시스템), Disturbance Compensation Control(외란보상제어), Adaptive Control(능동제어), Filtered_x Least Mean Square Algorithm(FxLms 알고리즘), Stabilization(안정화)

ABSTRACT

Stabilization error of target aiming systems mounted on moving vehicles is an important performance because the error directly affects hit probability. In a heavy load target aiming system, the disturbance torque comes from mass unbalance and linear acceleration is a main source of stabilization error. This study suggests an experimental design method of disturbance feedforward compensation control to improve the stabilization performance of heavy load target aiming systems. The filtered_x least square(FxLMS) algorithm is used to estimate the compensator coefficients adaptively. The proposed control is applied to a simple experimental set-up which simulates dynamic characteristics of a real target aiming system. The feasibility of the proposed technique is illustrated, along with results of experiments.

기 호 설 명

B_x, B_y : 모터, 지향체의 점성마찰계수
 ζ, k : 볼스크류의 등가 점성계수, 강성
 $\hat{d}_0(k), \hat{d}_1(k), \dots$: 보상기 계수 추정치

g : 중력가속도
 $G_f(q^{-1}), \hat{G}_u(q^{-1})$: 보상기 다항식, $G_u(q^{-1})$ 의 추정
 $G_x(q^{-1}), G_y(q^{-1})$: 시스템 전달함수
 J_m : 모터와 기어의 질량관성모멘트 합
 J_x, J_y : 모터, 지향체의 질량모멘트
 K_b : 토션바 강성
 K_T, K_{amp}, K_b : 모터토크상수, 앰프이득, Back emf계수
 l_y : 포신회전축과 볼스크류간의 거리
 M_y, L_y : 지향체질량, 지향체 질량중심점 거리
 N_y : 기어비

† 책임저자 : 정회원, 경원대학교 기계공학과
E-mail : mskang@kyungwon.ac.kr
Tel : (031) 750-5524, Fax : (031) 750-5273
* (주) 바른기술
** 경원대학교 기계공학과
*** 충남대학교 정보통신학부
**** 국방과학연구소

- p : 볼스크류 피치
- q^{-1} : 한스텝 지연 연산자
- ϕ_m, ϕ_g : 모터, 지향체의 회전각
- T_m : 모터 구동토크
- $y(k), u(k), \eta(k)$: 출력, 입력, 외란 샘플데이터
- \ddot{y} : 지향체 회전축의 직선 가속도

1. 서 론

표적지향 시스템이 주행 중에도 항상 표적을 지향하는 기능이 안정화이며, 이 안정화 성능은 표적지향 시스템의 명중률에 직접적으로 영향을 미치므로 매우 중요하다. 그 동안 원하는 안정화 성능을 달성하기 위해 많은 연구가 수행되어 원하는 목표 수준을 달성한 바 있으나, 안정화 성능을 더욱 향상시킬 필요가 있다.⁽¹⁾

대부하 표적지향 시스템의 안정화 성능에 영향을 미치는 주요 요소로는 차량의 회전운동, 표적지향시스템 자체의 질량불균형과 차량의 상하방향 직선가속도의 곱으로 표현되는 외란 토크 및 마찰을 들 수 있다.⁽²⁾

기존의 안정화를 위한 제어기는 되먹임 제어를 기본으로 하며, 자이로로 차량의 회전속도를 측정하여 차량회전운동에 의한 외란을 보상하는 제어를 적용하고 있다. 따라서 현재의 안정화 성능을 더욱 향상시키기 위해서는 나머지 주요 외란인 질량불균형과 차량 직선운동에 의한 외란의 영향을 감소시킬 필요가 있다. 만일 차량의 상하 직선가속도를 측정할 수 있다면, 위의 외란 토크를 보상하는 제어를 적용함으로써 안정화 성능을 보다 향상시킬 수 있다. 기존의 되먹임 제어에 외란 보상제어를 추가함으로써 보다 제어 입력의 큰 증가 없이 외란응답을 줄일 수 있기 때문이다.^(3,4)

일반적으로 외란보상제어기는 시스템의 동적 모델을 이용하여 설계할 수 있지만, 만일 시스템의 동특성이 시간에 따라 변하거나 정확한 동적모델을 구하기 어려운 경우 모델 기반 제어기 설계보다는 적응형 보상을 적용하는 것이 보다 효과적일 수 있다.⁽³⁾

적응형 외란보상제어기 설계방법으로는 능동소음제어, 신호처리 등의 분야에서 활발히 적용되고 있는 FxLMS 알고리즘을 들 수 있다.⁽⁵⁻⁹⁾ FxLMS 알고리

즘은 그 구조가 간단하고 수렴성이 좋아 적용하기 편리한 장점을 갖고 있으며, 전자기 베어링계의 외란보상 제어기 설계에 적용하여 그 유용성이 입증된 바 있다.^(10,11)

이상의 논의를 바탕으로 본 연구에서는 표적지향시스템의 구동계 동적 특성을 반영한 실험장치를 제작하여 적응형 외란보상제어를 적용하였으며, 실험을 통해 그 적응성 및 성능을 규명한다.

2. 안정화 구동 시스템

표적지향 시스템의 구동시스템은 전기모터와 모터 출력축에 연결된 기어박스, 기어의 회전운동을 직선운동으로 변환하는 볼-스크류 메카니즘, 그리고 스크류의 직선운동에 의해 회전하는 지향체로 구성된다. 즉, 모터의 회전에 의해 지향체의 회전이 발생하는 구조이다. Fig. 1은 구동시스템의 개념도를 나타내며, Fig. 2는 이를 동력학적으로 등가화한 것이다. 지향체는 관성이 크므로 볼-스크류의 강성을 무시할 수 없다. 따라서 볼-스크류의 동적 특성을 Fig. 2와 같이 강성과 점성마찰 모델로 등가화 하였다. 지향체는 유언모드를 갖고 있으나, 구동계의 대역폭에 비해 상대적으로 높아 그 영향은 무시할 수 있으므로 강제로 가정한다.

Fig. 2를 기준으로 운동방정식을 세우면 다음과 같다.

$$J_m \ddot{\phi}_m + c_{11} \dot{\phi}_m + k_{11} \phi_m + c_{12} \dot{\phi}_g + k_{12} \phi_g = T_m \quad (1-1)$$

$$J_g \ddot{\phi}_g + c_{21} \dot{\phi}_m + k_{21} \phi_m + c_{22} \dot{\phi}_g + k_{22} \phi_g = D \quad (1-2)$$

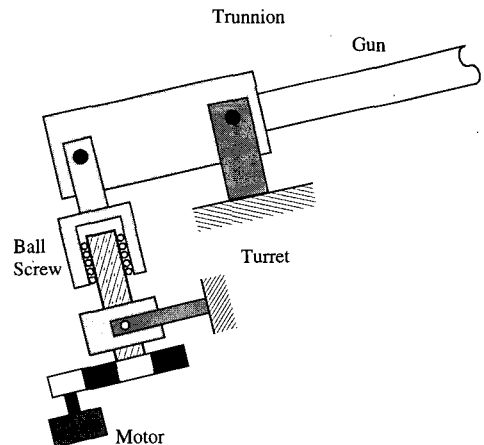


Fig. 1 Schematic diagram of gun driving system

$$D = -m_g r_g \ddot{y}_g + (B_g + l_g^2 c_s) \dot{\phi}_t + l_g^2 k_s \phi_t - m_g r_g g \cos \phi_g - T_{fric} \quad (1-3)$$

여기서

$$c_{11} = c_s p^2 / N_g^2, \quad c_{12} = -c_s l_g p / N_g$$

$$k_{11} = k_s p^2 / N_g^2, \quad k_{12} = -k_s l_g p / N_g$$

$$c_{21} = -c_s l_g p / N_g, \quad c_{22} = B_g + c_s l_g^2$$

$$k_{21} = -k_s l_g p / N_g, \quad k_{22} = k_s l_g^2$$

식 (1)에서와 같이 운동방정식은 볼-스크류 메카니즘의 동적 특성에 의해 연성되어 있으며, 외란 D 의 영향을 받는다. 외란에서 첫 번째 항은 지향체의 질량 불균형과 회전축의 상하방향 가속도의 곱으로 나타나는 토크로 차량의 주행에 의해 발생되며, 두 번째와 세 번째 항은 차량의 회전운동에 의하며, 네 번째 항은 지향체의 중력에 의한 항, 마지막은 회전축의 마찰에 의한 외란에 해당된다. 표적지향 시스템에서 표적 지향을 위한 제어는 기본적으로 되먹임 제어와 차량의 회전각속도 $\dot{\phi}_t$ 를 자이로를 이용하여 측정하여 차량의 회전운동에서 발생하는 외란을 보상하는 제어를 적용하고 있다. 또한 구조적 설계에서 질량 불균형을 최소화하기 위해 노력하고 있지만, 지향체의 질량분포가 복잡하고 질량 또한 매우 크므로 질량불균형이 존재한다. 지향시스템의 안정화 오차요인 분석 결과 이 질량 불균형과 차량의 상하방향 직선가속도의 곱으로 나타나는 토크가 주요 요인으로 분석된 바 있다.⁽²⁾ 따라서 이 연구에서는 이 외란 토크에 의한 안정화 오차를 감소시키기 위한 제어 방법을 연구 대상으로 하였다. 이 연구에서 제안하는 제어기는 적응형이므로 직접 표적지향 시스템에 적용하여 제어

기의 설계 타당성 및 성능을 검증해야 하지만 어려움이 있어 표적지향 시스템의 구동 메카니즘의 동적 특성을 모사한 실험장치를 제작하여 적용하였다.

제작된 실험장치는 Fig. 3과 같다. Fig. 3의 실험장치는 동력 발생을 위한 모터와 볼-스크류의 동적 특성을 모사한 토션바, 그리고 질량 불균형을 갖는 지향체로 구성하였다. 지향체-토션바-모터 결합체는 차량의 주행에서 발생하는 지향체 회전축의 상하방향 직선운동을 모사할 수 있는 리니어 모터 스테이지 위에 장착되었다. Fig. 4는 실험장치의 개념도이다. 여기서 y -방향으로 표현된 리니어모터 스테이지의 운동은 차량의 상하 방향 운동에 해당된다. 모터와 지향체의 회전각은 각각 분해능 0.0009[o/pulse], 0.045[o/pulse]를 갖는 엔코더로 측정하며, 리니어모터의 직선가속도는 가속도계를 이용하여 측정한다. 제어 및 데이터 획득은 DSP(digital signal processor, dspace DS1102) 보드를 장착한 컴퓨터에 의해 이루어지며, 사용된 샘플링 주파수는 1 kHz이다.

계의 운동방정식을 구하면 식 (2)와 같다. 여기서 포신의 구동 각도는 작은 것으로 가정한다.

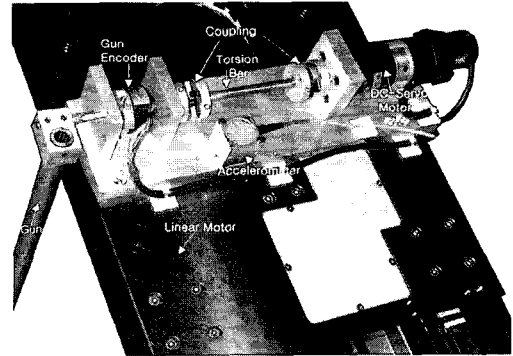


Fig. 3 Experimental set-up

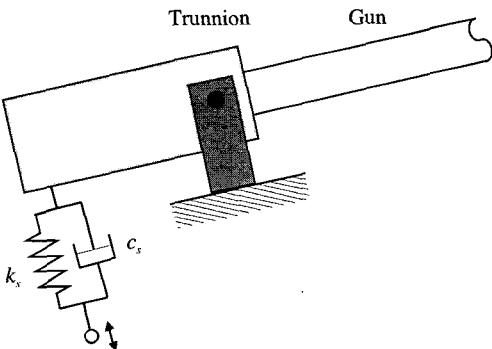


Fig. 2 Dynamic model of experimental set-up

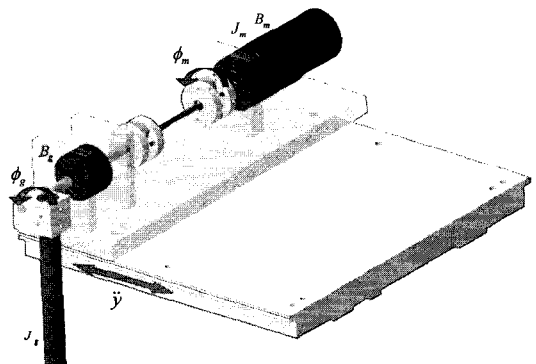


Fig. 4 Schematic of experimental set-up

$$J_m \ddot{\phi}_m + B_m \dot{\phi}_m + K_o(\phi_m - \phi_g) = T_m \quad (2-1)$$

$$J_g \ddot{\phi}_g + B_g \dot{\phi}_g + K_o(\phi_g - \phi_m) = M_g L_g \ddot{y} - M_g L_g g \quad (2-2)$$

식 (2-2)의 우항에 있는 외란은 식 (1-3)의 외란에서 질량불균형과 직선운동에 의한 토크 외란과 중력에 의한 외란이 반영된 것을 알 수 있다. 모터의 토크 T_m 은 모터 코일의 인덕턴스를 무시할 경우 다음의 식으로 표현된다.

$$T_m = \frac{K_T}{R_a} (K_{amp} u - K_b \dot{\phi}_m) \quad (2-3)$$

실험장치의 주요 파라미터는 Table 1과 같다.

2.1 되먹임 제어

구동장치는 되먹임제어를 기본으로 한다. 식 (2)의 운동방정식을 이용하여 상태 되먹임 제어를 적용하였으며, 그 구조는 다음과 같이 PI-D 제어기 구조를 갖는다. 계단형 입력에 대한 정상상태 오차와 지향체 증량에 의한 정상상태 오차를 제거하기 위해 적분제어를 적용하였다.

$$u = K_1 \dot{\phi}_g + K_2 (R - \phi_g) + K_3 \int (R - \phi_g) dt + K_4 \dot{\phi}_m + K_5 \phi_m \quad (3)$$

여기서 R 은 기준입력이며, 제어기 이득 $K_{1,2,\dots,5}$ 는 계단입력에 대한 정상상태 오차와 과도응답이 없으며, 상승시간이 0.3초 이내가 되도록 정하였다.

2.2 외란보상제어

제어계에서 고이득 되먹임 제어에 의해 외란의 영향을 줄일 수 있지만, 고이득제어는 공진이 발생하여 시스템을 불안정하게 하거나, 잡음 민감도를 증가시켜 제어 성능을 저해할 수 있으므로, 이득을 키우는

데 한계가 있다. 외란이 측정 가능한 경우 외란 앞먹임 보상제어는 되먹임 제어에 비해 효과적이다. 식 (2-2)에서 $M_g L_g$ 는 상수이므로 가속도 \ddot{y} 을 측정하여 외란토크 $M_g \ddot{L}_g \ddot{y}$ 을 알 수 있다. 외란보상제어는 독립적으로 설계하며, 자체가 안정한 조건을 만족하도록 설계하면 된다. 외란 보상제어기는 시스템의 수학적 모델로부터 설계할 수 있으나, 성능은 모델의 정확성에 민감한 특성을 갖는다. 모델이 정확치 않거나 시변계인 경우 적응형 보상제어기를 설계할 수 있다.

식 (3)을 식 (2-3)에 대입한 식을 다시 식 (2-1)에 대입한 결과와 식 (2-2)는 폐회로의 운동방정식이며, 이를 이산시간계에서 나타내면, 다음과 같이 일반적인 전달함수 형태로 나타낼 수 있다.

$$\phi_g(k) = G_u(q^{-1})u(k) + G_d(q^{-1})a_y(k) \quad (4)$$

여기서 $a_y(k)$ 는 $\ddot{y}(kT)$ 를 나타내며, $G_d(q^{-1})a_y(k)$ 는 가속도가 포신 각오차에 미치는 영향을 나타낸다. $\ddot{y}(kT)$ 는 가속도계를 이용하여 측정된다. T 는 샘플링 간격이다. 식 (2)에서 중력에 의한 외란은 포신의 구동 범위가 작으며, 이 외란에 의한 안정화 오차는 적분기를 갖는 되먹임제어에 의해 충분히 감소시킬 수 있으므로 무시하고 식 (4)를 정리하였다.

외란보상제어기는 IIR(infinite impulse response) 또는 FIR(finite impulse response) 필터로 설계할 수 있으나, 적응형으로 설계할 경우 IIR 필터는 매 샘플링 순간마다 제어기의 안정성을 확인해야 되는 어려움이 있다. 따라서 항상 안정성이 보장되는 FIR-필터 구조의 제어기가 선호된다.⁽⁶⁾

만일, 외란보상제어기를 다음과 같이 N -차의 FIR 필터로 설계할 경우

$$u(k) = G_{ff}(k, q^{-1})a_y(k) \quad (5-1)$$

$$G_{ff}(k, q^{-1}) = d_0(k) + d_1(k)q^{-1} + \dots + d_N(k)q^{-N} \quad (5-2)$$

식 (5-2)의 다항식 계수 $d_0(k), d_1(k), \dots, d_N(k)$ 는 FxLMS 알고리즘을 이용하여 추정할 수 있다. FxLMS 알고리즘은 매 샘플링 순간에 $E[\phi_g^2(k)]$ 가 최소가 되도록 계수를 갱신한다. 여기서 $E[*]$ 는 *의 앙상블평균(ensemble average)을 나타낸다.

Table 1 System parameters

Symbol	Value	Symbol	Value
J_g	0.077 [Kgm ²]	J_m	0.043 [Kgm ²]
M_g	0.578 [Kg]	L_g	0.27 [m]
K_o	24.8 [Nm/rad]	K_T	4.91 [Nm/A]
K_{amp}	0.2	K_b	4.78 [V/rpm]
R_a	4.7 Ω		

FxLMS 알고리즘의 구조는 Fig. 5와 같으며, 계수의 갱신은 다음 식에 따른다.

$$\hat{W}(k+1) = \hat{W}(k) + \mu X(k)\phi_g(k), \mu > 0 \quad (6)$$

$$\hat{W}(k) = [\hat{d}_0(k) \hat{d}_1(k) \dots \hat{d}_N(k)]^T$$

$$X(k) = [x(k) \ x(k-1) \dots x(k-N)]^T \\ = \hat{G}_u(q^{-1})\xi(k)$$

$$\xi(k) = [a_y(k) \ a_y(k-1) \dots a_y(k-N)]^T$$

여기서 $\hat{G}_u(q^{-1})$ 은 전달함수 $G_u(q^{-1})$ 의 추정이며, μ 는 수렴상수, $x(k)$ 는 외란이 필터 $\hat{G}_u(q^{-1})$ 를 통과한 출력이다.

추정식 식 (6)의 수렴조건은 다음과 같다.^(3,12,13)

$$-90^\circ < \angle P(e^{-j\omega T}) < 90^\circ \quad (7-1)$$

$$0 < \mu < \frac{2E[X_f(k) \cdot X(k)]}{E[X_f(k)^2 \ X_f(k)^2]} \quad (7-2)$$

여기서 기호 \angle 는 함수의 위상을 나타내며, $P(q^{-1})$ 와 $X_f(k)$ 는 다음으로 정의된다.

$$P(q^{-1}) = \frac{G_u(q^{-1})}{\hat{G}_u(q^{-1})} \quad (8)$$

$$X_f(k) = P(q^{-1})X(k) \\ = [x_f(k) \ x_f(k-1) \dots x_f(k-n)] \quad (9)$$

따라서 수렴상수 μ 와 필터 $\hat{G}_u(q^{-1})$ 가 식 (4)를 만족할 경우 갱신된 계수는 다음과 같이 최적값에 접근하게 된다.

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \hat{W}(k) = W^* \quad (10)$$

여기서 W^* 는 다음과 같이 $E[\phi_g^2(k)]$ 을 최소화 시키

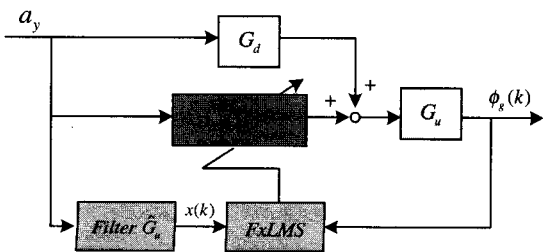


Fig. 5 Disturbance compensator by FxLMS algorithm

는 최적 필터계수벡터이다.

$$\frac{\partial E[\phi_g(k)^2]}{\partial W} \Big|_{w=w^*} = 0 \quad (11)$$

3. 실험결과 및 논의

이상에서 제시된 제어를 Fig. 3의 실험장치에 적용하였다. Fig. 6은 되먹임 제어를 적용한 폐회로 계단 응답이다. 정상상태 오차가 없고, 과도응답이 무시할 만한 수준이며, 상승시간은 0.26초로 설계목적을 만족한다.

다음으로 FxLMS 알고리즘을 이용하여 외란보상 제어를 설계하였다. 우선 전달함수 $G_u(q^{-1})$ 의 추정인 $\hat{G}_u(q^{-1})$ 을 구하기 위해 입력 u 와 출력 ϕ_g 간의 주파수 응답을 sine-sweep 방법을 이용하여 실험적으로 구했다. 이 때 구동계는 앞에서 설계된 되먹임 제어를 적용하였다. Fig. 7은 실험을 통해 얻은 G_u 의 주파수 응답의 크기와 위상을 보인다. 10 Hz 근방에서 크기가 갑자기 작아지는 이유는 이 주파수 이상에서는 구동모터 출력의 제한 때문에 지향체의 회전각이 엔코더의 분해능 이내로 발생했기 때문이다. 실험에서 구한 주파수 응답을 이용하여 $\hat{G}_u(q^{-1})$ 를 얻었으며, 이 $\hat{G}_u(q^{-1})$ 의 주파수응답은 Fig. 7과 같다. 두 주파수 응답이 서로 유사함을 알 수 있다. 이 때 결정된 $\hat{G}_u(q^{-1})$ 는 다음의 5차 IIR-필터이다.

$$\hat{G}_u = \frac{(-4.26 + 8.46q^{-1} - 4.20q^{-2}) \times 10^{-9}}{1 - 4.48q^{-1} + 7.96q^{-2} - 6.98q^{-3} + 3.00q^{-4} - 0.51q^{-5}} \quad (12)$$

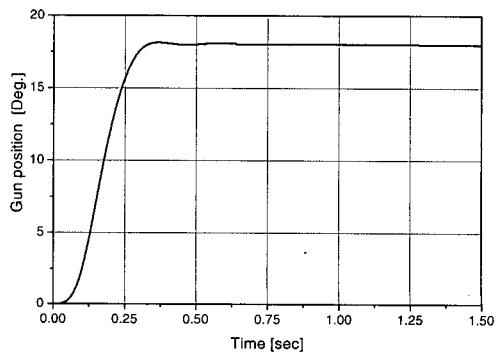


Fig. 6 Step response of gun

식 (7-1)의 수렴조건과 비교할 때 Fig. 7.2의 두 주파수 응답함수의 위상 차이는 이 조건을 충분히 만족한다.

앞에서 구한 필터 $\hat{G}_u(q^{-1})$ 를 Fig. 5의 FxLMS 알고리즘에 적용하였다. 차량의 주행시 운동을 재현하기 위해 리니어모터 스테이지는 가속도가 2~10 Hz의 대역폭을 갖는 유색잡음이 되도록 구동하였다. 이 외란 하에서 FxLMS 알고리즘을 실행하였다. 갱신계수는 식 (7-2)를 만족하면 수렴성이 보장되지만 일반적으로 작은 값을 취한다. 갱신계수가 클수록 수렴 속도는 빨라지지만 계수는 외란의 변화에 민감하며, 반대로 갱신계수가 작을수록 수렴속도는 느려지고 외란의 변화에 둔감해지게 된다.

우선 필터를 3-차 FIR-필터로 선정하였다. Fig. 8은 갱신계수가 $\mu=0.0001$, 0.0005 , 0.001 인 각각의 경우 추정된 계수 $\hat{d}_0(k)$, $\hat{d}_1(k)$, $\hat{d}_2(k)$, $\hat{d}_3(k)$ 를 보인다. 모든 계수의 초기치는 영으로 하였다. $\mu=0.0001$ 인 경우 계수의 수렴이 매우 느리며, $\mu=0.0005$ 인

경우 상대적으로 빨라짐을 알 수 있다. $\mu=0.001$ 인 경우 수렴속도는 $\mu=0.0005$ 와 큰 차이를 보이지 않으며, $\mu=0.001$ 보다 큰 경우 불안정해짐을 확인하였다. 앞의 논의와 같이 갱신계수가 커질수록 계수의 고주파 변화가 커짐을 알 수 있다. 세 가지 경우 모두 수렴속도가 매우 느린데, 그 이유는 FxLMS

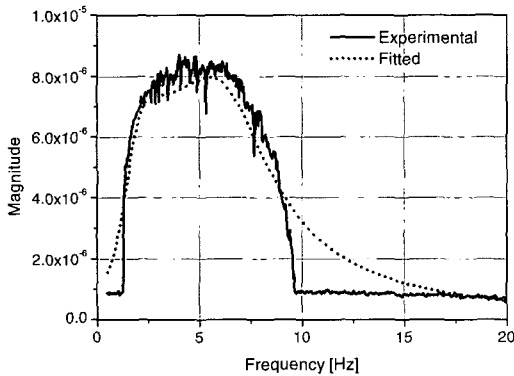


Fig. 7.1 Magnitudes of G_u and \hat{G}_u

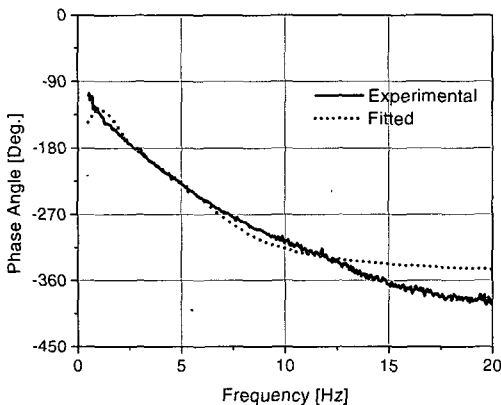


Fig. 7.2 Phase angles of G_u and \hat{G}_u

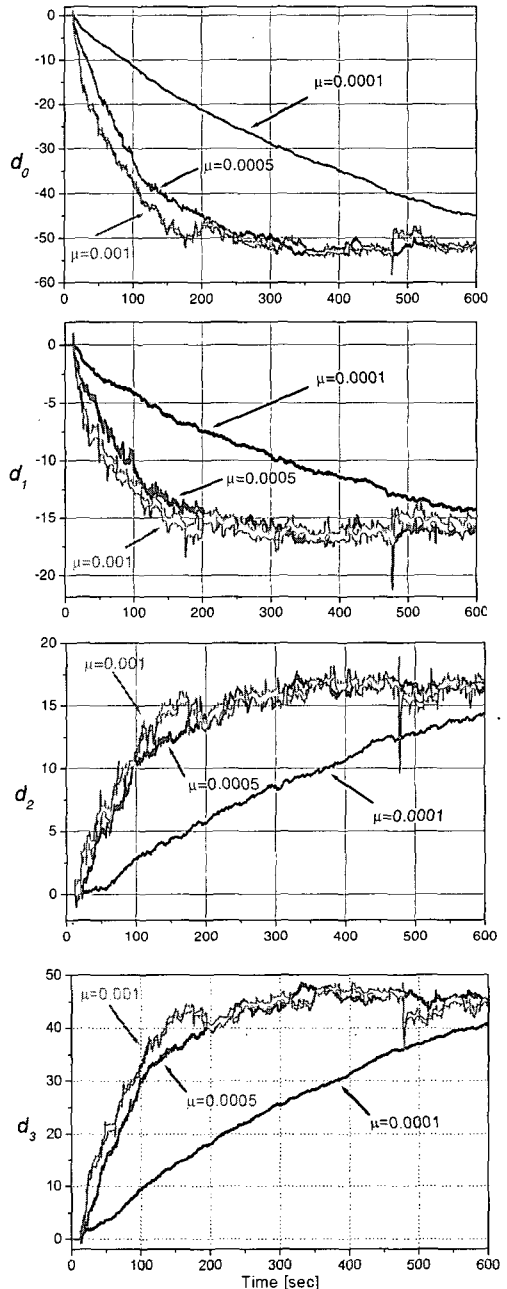


Fig. 8 Estimated coefficients according to different update gains

알고리즘의 수렴속도는 계수의 초기치에 따라 다르기 때문에 분석된다. FxLMS 알고리즘에서 샘플링 주파수가 외란의 주파수에 비해 충분히 높을 경우 최종

수렴계수로부터 벡터 $[1, 1, 1, 1]$ 의 방향으로 수렴 속도가 빠르지만 이 벡터에 수직 방향으로 수렴 속도가 매우 느리기 때문이다.^(12,13) Fig. 8로부터 초기계수에서 최종수렴계수를 연결하는 벡터가 벡터 $[1, 1, 1, 1]$ 에 거의 수직을 이룸을 알 수 있다. 초기계수와 수렴 속도에 관한 구체적 연구는 후속 연구에서 수행할 예정이다.

Fig. 8과 같이 계수가 수렴하는 동안 지향체 응답은 Fig. 9와 같다. Fig. 9.1과 9.2는 각각 $\mu=0.0001$, 0.0005 인 경우로 되먹임 제어시와 비교 계수가 수렴함에 따라 점차 감소하였다. $\mu=0.001$ 인 경우는 Fig. 9.2와 유사하였다.

표적지향 시스템과 같이 신뢰성이 중요한 시스템에서는 적응형 제어기보다는 고정 제어기가 선호된다. Fig. 8의 최종 수렴된 계수로 설계한 고정형 보상제어기를 적용한 경우 응답은 Fig. 10과 같다. 외란은 Fig. 9와 동일하며, 전반부는 되먹임제어, 후반부는 보상기를 추가한 경우 포신응답이다. 각각의 경우 응답의 표준편차는 $\sigma=0.702$, $\sigma=0.283$ 로 외란보상기를 추가함으로써 되먹임제어 응답의 40% 수준으로 안정화 오차가 감소하였다.

보상기를 FIR 필터 구조로 구현할 경우 필터는 식 (4)에서 $-G_d/G_w$ 의 근사식으로 수렴하게 되므로, 필터의 차수가 높을수록 근사화 오차가 감소하므로 외란의 영향을 줄이는데 유리하다. 그러나 차수가 증가하면 추정해야 될 계수의 수가 증가하여 실시간 추정 계산량이 증가하게 된다. 따라서 차수는 성능을 고려하여 되도록 낮은 차수를 선택하게 된다. 추가적인 실험 결과 4차 이상의 보상기에서 계수의 수렴 특성은 Fig. 8과 유사하였으며, 안정화 성능 또한 유사한 수준임을 확인하였다. 2차 이하의 경우 안정화 성능이 2차에 비해 낮은 수준이었다.

이상의 결과로써 제안한 외란보상제어기는 안정화 오차 향상에 효과가 있는 것으로 판단된다. 이 실험의 정량적인 결과를 직접 표적지향시스템의 안정화 성능 향상으로 볼 수는 없지만, 대상으로 한 외란이 주요 안정화 오차 요소이고, 제안한 방법이 일반적인 보상기 설계 방법이므로 실제 표적지향 시스템의 안정화 향상을 위한 방법으로 적용할 수 있을 것으로 판단된다. 다만 수렴 속도 향상을 위한 연구는 지속할 필요가 있을 것으로 판단된다.

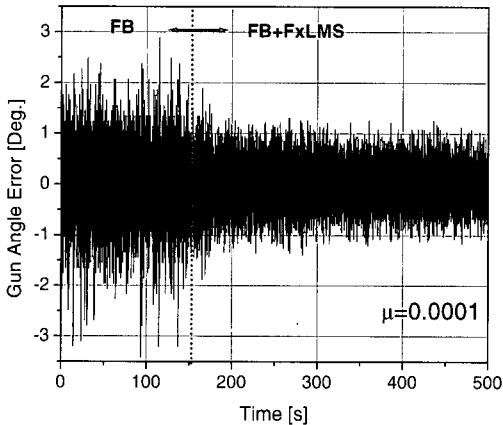


Fig. 9.1 Gun response when $\mu=0.0001$

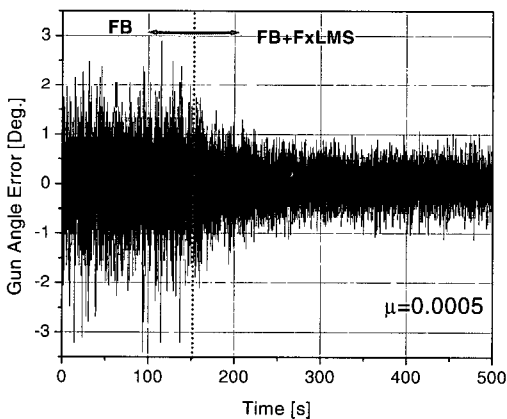


Fig. 9.2 Gun response when $\mu=0.0005$

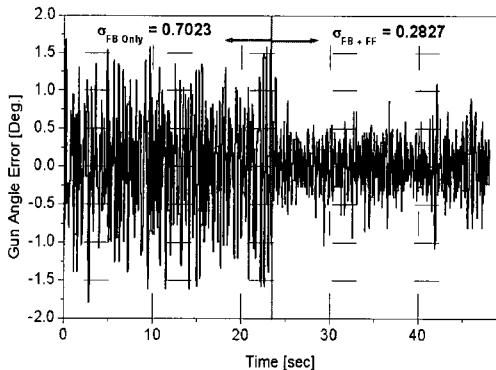


Fig. 10 Gun responses in cases of FB and FB+FF

4. 결 론

표적지향 시스템의 안정화 성능 향상을 위해 측정할 수 있는 외란의 앞먹임 보상제어기 설계방법을 제안하였다. 보상제어기는 FxLMS 알고리즘을 이용한 적응형 FIR 필터가 적용되었다. 간단한 실험장치를 구성하여 보상기 특성 및 성능을 검증하였다. 보상기 계수는 수렴 계수에 따라 다른 수렴특성을 보였으나, 최종 수렴계수는 유사하였다. 수렴된 보상기를 추가함으로써 기존의 되먹임 제어만 수행할 때보다 외란에 의한 안정화 오차를 향상시킬 수 있었으며, 따라서 제안된 보상기 설계방법은 실제 표적지향 시스템에 적용할 수 있을 것으로 보인다. 다만 FxLMS 알고리즘의 수렴속도가 초기계수에 따라 달라지는 현상에 대한 후속 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

(1) Kim, B. U. and Kang, E. S., 2004, "Control of a Heavy Load Pointing System Using Neural Networks," J. of KSPE, Vol. 21, No. 5, pp. 55~63.
 (2) Kang, M. S., Lyu, J., Seok, H. D. and Lim, J. K., 2004, Analysis of Stabilization Error Sources for Main Battle Tank, Proceedings of Seminar for Ground Weapon Systems Development, pp. 12~15.
 (3) White, M. T. and Tomizuka, M., 1997, "Increased Disturbance Rejection in Magnetic Disk Drives by Acceleration Feedforward Control and Parameter Adaptation", Control Engineering Practice, Vol. 5, No. 6, pp. 741~751.
 (4) Suzuki, Y., 1998, "Acceleration Feedforward Control for Active Magnetic Bearing Excited by Ground Motion", IEEE Proc. Control Theory Appl., Vol. 145, No. 2, pp. 113~118.

(5) Widrow, B., Glover, J. R., McCool, J. M., Kaunitz, J., Williams, C. S., Hern, R. H., Zeidler, J. R., Dong, E. and Goodlin, R. C., 1975, "Active Noise Canceling: Principles and Applications," Proc. IEEE, Vol. 63, pp. 1692~1716.
 (6) Kuo, S. M. and Morgan, D. R., 1996, Active Noise Control Systems, A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, Inc.
 (7) Widrow, B. and Stearns, S. D., 1985, Adaptive Signal Processing, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
 (8) Reason, J. and Ren, W., 1993, "Estimating the Optimal Adaptive Gain for the LMS Algorithm," Proceedings of CDC, San Antonio, pp. 1587~1588.
 (9) Lee, K. S., 2003, "Convergence of the Filtered-x Least Mean Square Adaptive Algorithm for Active Noise Control of a Multiple Sinusoids," Transactions of the KSNVE, Vol. 13, No. 4, pp. 239~246.
 (10) Kang, M. S., 2003, "Acceleration Feedforward Control in Active Magnetic Bearing System Subject to Base Motion by Filtered-x LMS Algorithm", Transactions of the KSME(A), Vol. 27, No. 10, pp. 1722~1719
 (11) Kang, M. S. and Jung, J. S., 2004, "Disturbance Compensation Control of An Active Magnetic Bearing System by Multiple FxLMS Algorithm-theory", J. of KSPE, Vol. 21, No. 2, pp. 74~82.
 (12) Kang, M. S., 2005, "Geometric Analysis of Convergence of FxLMS Algorithm," Transactions of the KIEE, Vol. 54D, No. 1, pp. 40~47.
 (13) Ljung, L., 1977, "Analysis of Recursive Stochastic Algorithm," IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. AC-22, No. 4, pp. 551~575.