

기어강성을 갖는 2-자유도 포신 안정화시스템에서 FXLMS 알고리즘을 이용한 외란 보상 제어기 설계 Disturbance Compensation Control Design for 2-DOF Gun Stabilization System with Gear Stiffness by Using FXLMS Algorithm

임재근* · 강민식**
Lim Jaekeun, Kang Minsig

Key Words : 2-DOF(2 자유도), stiffness(강성), unbalance moment(불균형모멘트), FXLMS algorithm(FXLMS 알고리즘), disturbance compensation(외란보상), acceleration(가속도), feedforward control(앞먹임제어) convergence speed(수렴속도), initial condition(초기조건)

ABSTRACT

In gun stabilization systems, the torque comes from the unbalance mass of gun and the base acceleration is an important source of disturbance which degrades stabilization performance. Fatigue of gear train is another important factor affecting structural safety problems. In this paper, a feedback control gain is designed by optimal control weighting to difference between motor and gun velocity, and a feedforward controller using FXLMS algorithm is adopted to investigate those problems. Experimental results show that the feedforward compensator based on FXLMS can reduce the disturbance effects. The directional convergence property according to initial conditions of the FXLMS is also shown through experiments.

기호설명

- $\phi_M, \dot{\phi}_M, \ddot{\phi}_M$: motor position, velocity, acceleration
- $\phi_G, \dot{\phi}_G, \ddot{\phi}_G$: gun position, velocity, acceleration
- J_M, J_G : motor, gun inertia
- B_M, B : motor, bearing viscous friction coefficient
- K_o : spring constant
- \ddot{y} : gun system base acceleration
- M_G : gun mass
- L_{GCC} : length of gun's center of mass
- T_M : motor torque
- e_v : motor input voltage
- K_T : motor torque constant
- K_b : motor backemf constant
- R_G : motor armature resistance
- K_{Amp} : motor amp gain

1. 서론

현대의 전차에서 주행 중에도 포신의 지향선을 원하는 방향에 유지시키는 기능은 사격의 정밀도 향상 측면에서 매우 중요하다. 이 기능을 포신의 안정화라 칭한다. 포신의 안정화 성능은 구동부의 마찰, 포신 회전축의 가속도와 포신의 질량 불균형에서 야기되는 외란 모멘트에 의해 그 성능이 저해되며, 이러한 오차요소를 보상하여 안정화 성능을 향상시키기 위한 제어기법에 대한 연구가 필요하다⁽¹⁾.

포신 구동시스템에서 모터에서 발생한 회전 모멘트는 강성을 갖는 기어를 통해 포신에 전달되는 데, 기어의 강성으로 인한 반복되는 비틀림은 기어의 피로 파괴를 야기할 뿐 아니라 포신 위치 제어의 응답성과 안정성에 영향을 미친다⁽²⁾⁽³⁾. 또한 포신의 질량 불균형은 차량의 주행에서 발생하는 가속도에 의해 안정화 제어시스템에 토크 외란으로 작용하며, 이 외란은 안정화 시스템에서 성능저하를 야기하는 주요 요인으로 작용한다.

외란에 의한 영향은 고이득을 갖는 되먹임 제어에 의해 그 영향을 줄일 수 있지만, 고이득은 시스템의 안정성을 해칠 수 있으며, 노이즈에 대한 민감도를 증가시켜 그 한계가 있다.

만일 외란이 측정 가능하다면 앞먹임 제어를 이용하여 외란의 영향을 효과적으로 보상할 수 있다. 이때 앞먹임 제어기는 역동역학 모델을 통하

* (주) 바른기술

E-mail : hawklik@intizen.com
Tel. (031)730-8478

** 경원대학교 기계공학과

E-mail : mskang@mail.kyungwon.ac.kr
Tel. (031)750-5524

여 설계할 수 있으나 역동역학 모델을 구하기 위해서는 우선 정확한 모델을 구해야 되므로 어려움이 있다(4)(5). 본 논문에서는 이런 모델 기반 제어기의 어려움을 극복하기 위하여 능동소음 진동제어(6), 런아웃제어(7), 전자기 베어링계에서의 외란 보상(4)(5)(8)에서 연구된 FXLMS 알고리즘을 이용하여 실험적으로 앞먹임 제어를 설계하여 적용하며, 또한 FXLMS 알고리즘에서 계수 추정 수렴 속도가 계수의 초기값에 지배 반응(9)을 실험적으로 입증한다. 또한 되먹임 제어기 설계에서는 기어의 비틀림에 의한 피로파괴를 고려한 최적제어 방법을 적용하여, 가격함수와 비틀림 각속도의 관계를 고찰한다.

실험적 규명을 위해 모터-기어박스-포신으로 구성되는 전기식 포신구동 시스템을 개념적으로 모사한 모터-토션바-부하 구조의 실험장치를 구축하여 제안된 제어기 및 수렴성을 실험적으로 규명한다.

2. 시스템 모델

2.1 운동방정식

실험장치는 Fig. 1 과 같이 질량불균형을 갖는 포신, 기어의 강성을 대치한 토션바, 그리고 구동 모터로 구성된다. 차량의 주행을 모사하기 위해서 리니어 모터를 이용하여 포신-토션바-모터 결합체를 좌우로 흔들어 줄 수 있도록 구성하였다.

Fig. 1 의 시스템은 2-자유도계이며, 운동방정식을 구하면 식(1), (2)와 같다. 이 식에서 포신의 각도는 작은 것으로 가정한다.

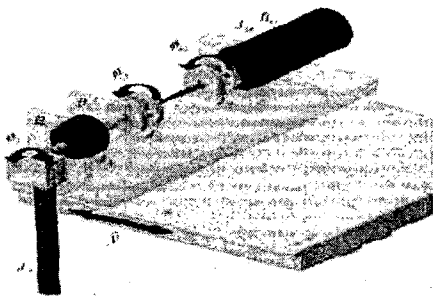


Fig. 1 Schematic of simple gun system

$$J_M \ddot{\phi}_M + B_M \dot{\phi}_M + K_o(\phi_M - \phi_G) = T_M \quad (1)$$

$$J_G \ddot{\phi}_G + B_G \dot{\phi}_G + K_o(\phi_G - \phi_M) = M_G L_{GCG} \ddot{y} \quad (2)$$

위 운동방정식에서 모터토크 T_M 을 DC-서보 모터 모델인 식(3)과 식(4)와 같이 정의된 상태공간벡터를 이용하여 나타낸 시스템의 상태공간방정식은 식(5)와 같다.

$$T_M = \frac{K_T}{R_a} (K_{Amp} e_v - K_b \dot{\phi}_M) \quad (3)$$

$$x = [\phi_M \quad \phi_G \quad \dot{\phi}_M \quad \dot{\phi}_G]^T \quad (4)$$

$$\dot{x} = Ax + Bu + Dd \quad (5)$$

$$y = Cx$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{K_o}{J_M} & \frac{K_o}{J_M} & \frac{(B_M + K_b K_T / R_a)}{J_M} & 0 \\ \frac{K_o}{J_G} & \frac{K_o}{J_G} & 0 & \frac{B}{J_G} \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^T$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{K_{Amp} K_T / R_a}{J_M} \\ 0 \end{bmatrix} \quad D = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{M_G L_{GCG} \ddot{y}}{J_G} \end{bmatrix}$$

3. 제어기 설계

3.1 상태 되먹임 제어

자중에 의한 정상상태 오차를 제거하기 위해 다음과 같이 상태변수를 정의한다. 특히 기어의 피로 파괴를 고려하기 위해 모터와 포신의 속도차를 상태변수로 갖도록 한다.

$$\tilde{x} = [\phi_M \quad \phi_G \quad \dot{\phi}_M - \dot{\phi}_G \quad \dot{\phi}_G \quad \eta = \int (ref - \phi_G)]^T \quad (6)$$

최적제어에 의한 상태 되먹임 제어 설계를 위해 성능지수는 식(7)과 같이 정의한다.

$$J_{opt} = \int \{ \lambda_3 (\dot{\phi}_M - \dot{\phi}_G)^2 + \lambda_4 \dot{\phi}_G^2 + \lambda_5 \eta + \mu e_v \} \quad (7)$$

식(7)을 최소화하는 되먹임 제어입력 e_v 는 식(8)로 나타낸다.

$$e_v = -K_z \tilde{x} \quad (8)$$

$$K_z = [k_{z1} \quad k_{z2} \quad k_{z3} \quad k_{z4} \quad k_{z5}]$$

3.2 외란보상제어

외란이 측정 가능할 경우 외란 보상제어기를 적용할 수 있으며, 이 때 식(9)와 같이 외란과 응답인 $G_d(z^{-1})$, 제어입력과 응답인 $G_u(z^{-1})$ 간의 이산모델을 이용하여 식(10)의 역동역학 모델로 설계하여 외란에 의한 응답은 완전히 제거할 수 있다.

$$y(k) = G_u(z^{-1})u(k) + G_d(z^{-1})d(k) \quad (9)$$

$$u_{ff}(k) = -G_d(z^{-1})/G_u(z^{-1})d(k) \quad (10)$$

그러나 이 방법에 의한 제어기는 계의 모델에서 유도되므로 제어기 성능은 모델의 정확도에 민감하다. 일반적으로 모델은 시스템의 비선형성, 연속계를 등가 이산계 모델로 변환하는 과정에서 발생하는 근사화 오차 및 외란 측정 센서(가속도계)의 동특성과 같은 요인으로 정확한 모델을 얻기 어렵다. 따라서 다음과 같은 실험적 방법에 의한 외란 보상 제어기를 설계한다.

(1) 단일주파수에서의 앞먹임 제어기 설계

주파수 $\omega = \omega_1$ 일 때의 주파수 응답은 식 (11)을 만족하는 1 차 다항식으로 나타낼 수 있다.

$$[G_{ff} = d_0 + d_1 z^{-1}]_{z=e^{j\omega_1 T_s}} = -\left. \frac{G_d(z^{-1})}{G_u(z^{-1})} \right|_{z=e^{j\omega_1 T_s}} \quad (11)$$

Fig.2 는 1 차의 외란 보상 제어기 계수 d_0, d_1 을 능동적으로 추정하는 FXLMS 알고리즘을 보이며, 식(12)로 얻을 수 있다.

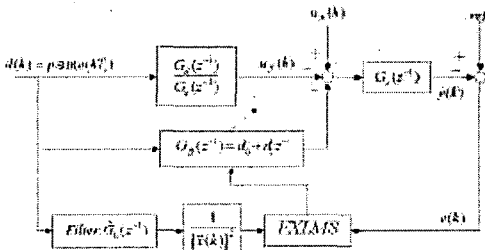


Fig.2 Concept of FXLMS algorithm in single frequency

$$\bar{W}(k+1) = \bar{W}(k) + \mu \frac{1}{\|\bar{x}(k)\|^2} \bar{x}(k)e(k) \quad (12)$$

$$\|\bar{x}(k)\|^2 = \bar{x}^T \bar{x}$$

$$\bar{W}(k) = [d_0(k) \quad d_1(k)]^T$$

$$\bar{x}(k) = [v(k) \quad v(k-1)]^T = \hat{G}_u(z^{-1})\xi(k)$$

$$\xi(k) = [d(k) \quad d(k-1)]^T$$

식(12)에서 μ 는 수렴상수, $e(k)$ 는 오차, $\hat{G}_u(z^{-1})$ 은 시스템 $G_u(z^{-1})$ 의 추정이며, $v(k)$ 는 필터 출력이다. 리니어 모터의 가진 주파수를 변경하여 이 과정들을 반복함으로써 관심있는 주파수에서의 외란 제거 다항식을 구할 수 있다.

(2) 주파수영역에서의 곡선맞춤

앞에서 얻은 각 주파수에서의 외란 제거 제어를 이용하여 제어기의 주파수 응답을 얻고 이를 가장 잘 표현하는 제어기를 구하도록 다음의 가격함수를 정의하여 최적화를 통해 앞먹임 제어기 $G_{ff}(z^{-1})$ 를 구한다.

$$J_{ff} = \sum_{i=1}^n W(\omega_i) [G_{ff}(z^{-1}) - G_{ff}(z^{-1})]_{z=e^{j\omega_i T_s}}^2 \quad (13)$$

여기서 $G_{ff}(z^{-1})$ 은 주파수 ω_i 를 갖는 외란이 작용할 때의 제어기 다항식이며 $W(\omega_i)$ 는 각 주파수에 대한 가중치이다. 식(13)을 최소화하는 IIR(Infinite Impulse Response)모델 형태의 제어기는 불안정할 수 있으므로 안정성을 보장하는 FIR(Finite Impulse Response)모델 형태의 제어기로 설계한다.

4. 실험

4.1 실험장치

실제 실험 장치는 Fig.3 과 같으며 모터와 스프링, 스프링과 모터는 각각 커플링으로 체결하고, 모터는 0.0009 [%/pulse], 포신은 0.045[%/pulse]의 엔코더로 위치를 측정하며, 포신에 미치는 외란은 리니어모터로 재현되며, 가속도계를 통해서 측정되며, 샘플링 시간은 0.001 초이다.

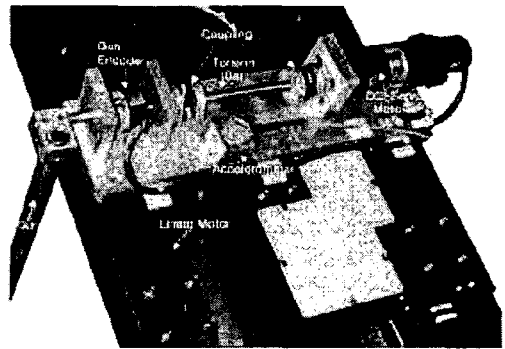


Fig.3 Experimental Setup

주요 시스템 파라미터는 Tab.1 과 같다.

$J_M = 0.043$ [kg·m ²]	$J_G = 0.07722$ [kg·m ²]
$R_a = 4.7$ [Ω]	$M_G = 0.578$ [kg]
$K_T = 4.91$ [N·m/A]	$L_{G,CG} = 0.2698$ [m]
$K_{Amp} = 0.2$	$K_o = 24.802$ [N/m]
$K_b = 4.7746$ [V/rpm]	$g = 9.81$ [m/sec ²]

Tab.1 Parameters

4.2 되먹임 제어

기어강성을 고려한 제어기 설계를 위해 가중치 $\lambda_4 = 1, \lambda_5 = 800000, \mu = 1$ 로 하고 λ_3 의 크기에 따라 기준 위치 18° 에 대한 모터와 포신의 속도 차 응답과 포신위치 응답은 각각 Fig.4, Fig.5 에서 보는 바와 같다. Fig.4 에서 λ_3 가 커짐에 따라 모터와 포신간의 속도차가 작아져 진동이 줄어들을 볼 수 있다. 포신의 진동특성을 줄이기 위하여 튜닝을 통하여 다음의 제어이득으로 결정하였다.

$$k_{z1} = 110.05236, k_{z2} = 26.70494, k_{z3} = 934.75366, \\ k_{z4} = 8948.4995, k_{z5} = -0.86443$$

4.3 외란 보상 제어

FXLMS 알고리즘을 적용하기 위하여 제어 입력 $u(k)$ 와 $y(k)$ 의 전달함수의 추정 필터 $\hat{G}_u(z^{-1})$ 을 동적 신호분석기를 이용하여 식(14) 를 얻었고, 안정하므로 필터로 사용 가능하다.

$$\hat{G}_u(z^{-1}) = \frac{10^{-5} \times (0.07313 - 0.15854z^{-1} + 0.08541z^{-2})}{(1 - 3.95618z^{-1} + 5.86996z^{-2} - 3.87136z^{-3} + 0.95758z^{-4})} \quad (14)$$

식(14) 를 이용하여 각 2~8 [Hz] 를 갖는 외란에 대한 되먹임만 하였을 때와 앞먹임을 추가 하였을 때의 포신응답은 Fig.6 으로 단일주파수에서 설계된 앞먹임 제어기가 효과적임을 보인다. Fig.7 은 포신의 응답이 정상상태에 도달하였을 때 갱신된 앞먹임 제어기 계수이다.

이렇게 결정된 단일 주파수에 대한 외란 보상 제어기 계수에 대하여 식(13) 을 이용해 설계된 FIR 형태의 앞먹임 제어기는 식(15) 와 같고 그 주파수 응답은 Fig.8 과 같다.

$$G_f(z^{-1}) = 10^6 \times (-2.755166 + 0.309562z^{-1} - 11.94261z^{-2} - 0.41494z^{-3} + 11.12105z^{-4} - 8.24410z^{-5} + 1.92619z^{-6}) \quad (15)$$

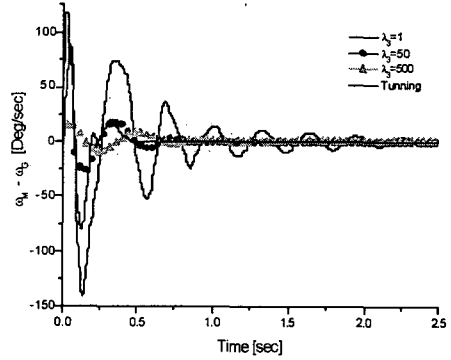


Fig. 4 Difference of velocity about to λ_3

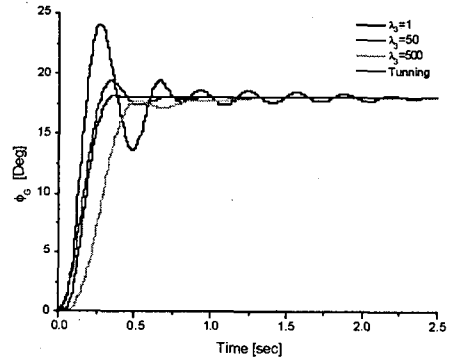


Fig.5 Gun step response about to λ_3

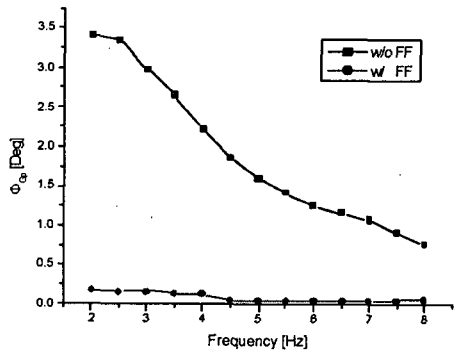


Fig.6 gun response in single frequency w/o and w/ feedforward

식(15)를 이용하여 2~8.25 [Hz]를 갖는 랜덤 신호에 대한 스펙트럼결과는 Fig.9 에서 보는 바와 같이 2~5 [Hz] 구간에서는 앞먹임 제어기의 큰 효과가 보이나 그 이후는 큰 영향을 보이지 못하며, 이는 이산계에서의 모델링 오차와 정상상태에서 구한 제어기가 동특성의 영향을 받으므로 생기는 오차로 보인다. 또한 주파수가 높아짐에 따라 제어기 특성상 최종제어 입력이 포화상태(saturation)에 이르는 것도 주요 원인이 된다.

4.4 초기조건에 따른 수렴속도

실험적 방법인 식(12)의 FXLMS 알고리즘의 수렴속도는 수렴상수 μ 뿐 아니라 초기조건에 의해 결정됨을 참고문헌(9)에서 이론적으로 증명하였다. 이를 포신시스템에 적용하여 실험적으로 입증한다.

식(12)에서 수렴상수 $\mu = 0.005$ 로 하여 초기조건을 달리한 결과 앞먹임 제어기 계수 추정 과정은 Fig.10 과 같다. Fig.11 은 추정계수 d_0 vs. d_1 의 그림으로 Fig.10 과 비교했을 때 45°사선을 따라서 빠른 수렴속도를 보이다가 135°의 사선을 따라서 느리게 수렴함을 볼 수 있다.

이에 따른 포신의 응답은 Fig.12 와 Fig.13 으로 나타낸다. 초기 조건 1 과 4 는 135°사선에 위치한 것으로 초기의 짧은 구간의 45°사선을 따라 감소하여 작은 감소율을 보이며 외란 오차가 줄어든 반면, 초기조건 2 와 3 은 135°사선을 따라 빠르게 실제 앞먹임 제어기에 접근하며 큰 진동을 보이다 빠른 감소율을 갖고 외란 오차가 완전히 제거됨을 보여주고 있다.

5. 결론

본 논문에서는 대부분을 갖는 표적지향 시스템의 포신부를 모터-스프링-부하 구조를 갖는 2 자유도 진동 시스템으로 간소화하여 포신 안정화를 저해하는 불균형 모멘트와 베이스 가속도에 의한 외란을 제거하는데 FXLMS 알고리즘을 이용하여 저주파 대역에서는 약 50%의 감소율을 보였다. 또한 FXLMS 알고리즘을 이용한 수렴과정에서 계수 추정 속도는 계수의 초기조건에 의해 결정됨을 실험적으로 확인하였다.

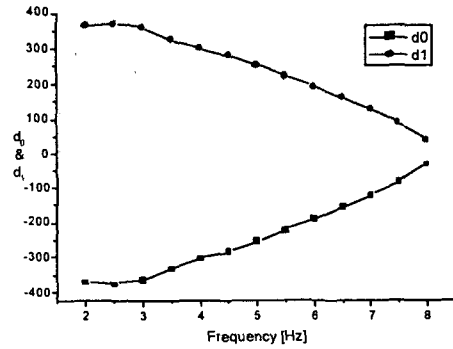


Fig.7 updated filter coefficient in single frequency

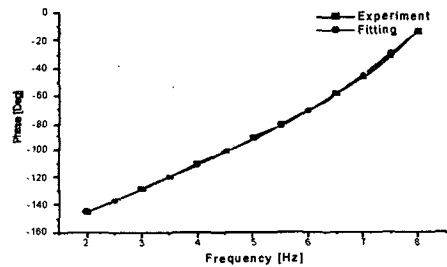
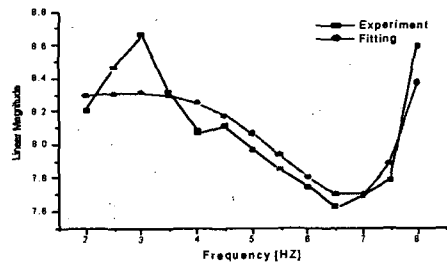


Fig.8 Designed FIR feedforward compensator

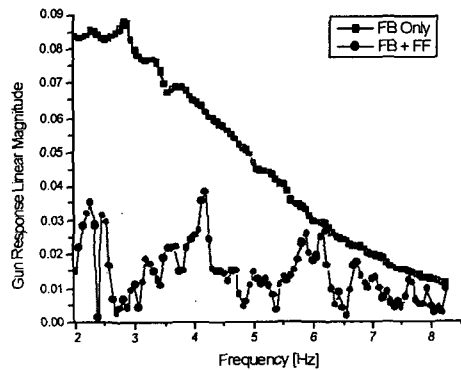


Fig.9 Random A acceleration Response (2 ~ 8.25 [Hz])

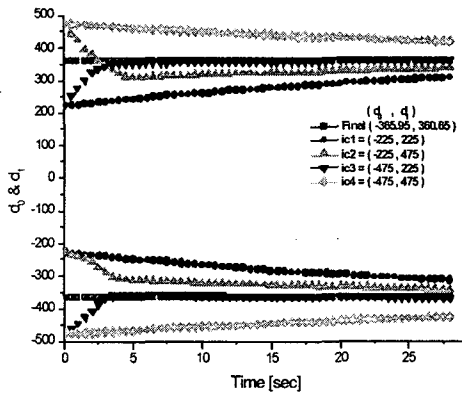


Fig.10 feedforward coefficient update procedure by initial condition

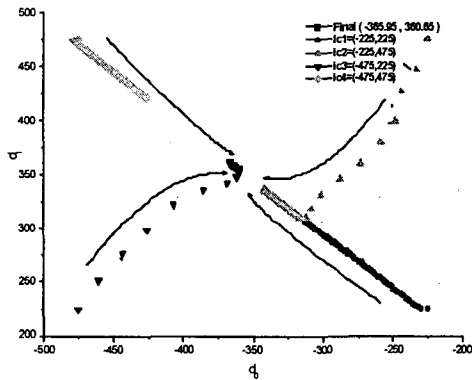


Fig.11 feedforward coefficient update procedure $d_0 - d_1$ by initial condition

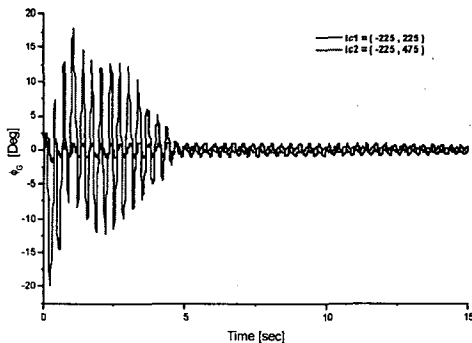


Fig.12 Gun Response by initial condition 1 and 2

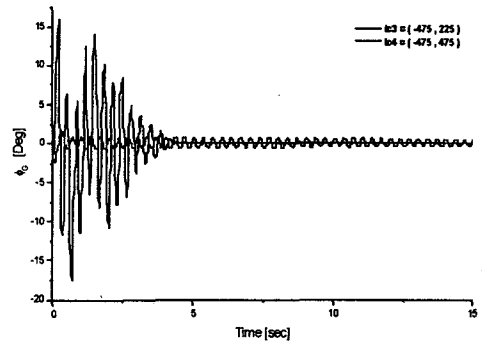


Fig.13 Gun Response by initial condition 1 and 2

참고문헌

- (1) 김병운, 강이석, 2004, "신경회로망을 이용한 대부하 표적지향 시스템 제어", 한국정밀공학회지 제 21 권 제 5 호, 한국정밀공학회 p.55~63.
- (2) M.Mine, etc., 1999, "New simple adaptive control subjet to disturbances and application to torsional vibration suppression", IEEE International Conference on Control application
- (3) Gill A. Pratt, etc., 1995, "Stiffness isn't everything", Preprints of the Forth International Symposium on Experimental Robotics, ISER'95
- (4) 강민식, 2003, "베이스 가진을 받는 능동자기 베어링 시스템에서 Filtered-x LMS 알고리즘을 이용한 가속도 앞먹임 제어", 대한기계학회논문집 A 권 제 27 권 제 10 호, p.1722~1719
- (5) 강민식, 2003, "FXLMS 알고리즘을 이용한 외란보상 제어기 설계", 한국정밀공학회 제 20 권 제 11 호 p.100~107
- (6) 박수홍등, 1997, "Filtered-x LMS 알고리즘을 이용한 유연한 외팔보의 능동진동제어", 한국정밀공학회, 제 14 권 제 3 호
- (7) 김하용 등, 2001, "LMS 알고리즘을 이용한 전자기 베어링계에서의 런아웃, 불균형력 및 와전류 효과 규명", 한국소음진동학회 2001 년도 춘계학술대회는문집, p.172~177
- (8) 강민식, 정중수, 2004, "MFXLMS 알고리즘을 이용한 전자기베어링계의 외란보상제어기-실험", 한국정밀공학회 제 21 권제 2 호 p.83~91
- (9) 강민식, 2005, "FXLMS 알고리즘의 기하학적 해석", 대한전기학회 vol.54D-1-6