

# 신경회로망을 이용한 대부하 표적지향 시스템 제어

김병운\*, 강이석#

## Control of a Heavy Load Pointing System Using Neural Networks

Byung Un Kim\*, E-Sok Kang#

### ABSTRACT

This paper presents neural network based controller using the feedback error learning technique for a heavy load pointing system. Also the mathematical model was developed to analyze heavy load pointing system. The control scheme consists of a feedforward neural network controller and a fixed-gain feedback controller. This neural network controller is trained so as to make the output of the feedback controller zero. The proposed controller is compared with the conventional PI controller through simulations, and the results show that the pointing accuracy of the proposed control system are improved against the disturbance induced by vehicle running on the bump course.

**Key Words** : Feedback error learning (귀환 오차 학습), Pointing system (표적지향 시스템), Unbalance moment (불균형 모멘트)

### 기호설명

$\theta_H$  = hull position  
 $\theta_M$  = motor position  
 $\theta_T$  = turret position  
 $\theta_B$  = basket position  
 $\theta_S$  = suspension position  
 $\eta$  = lateral gun bending position  
 $T_M$  = developed motor torque  
 $\ddot{\theta}_R$  = hull rolling acceleration  
 $\ddot{\theta}_F$  = hull pitching acceleration  
 $J_H$  = hull moment of inertia

$J_{GR}$  = gear moment of inertia  
 $J_M$  = motor moment of inertia  
 $J_B$  = basket moment of inertia  
 $J_T$  = turret moment of inertia  
 $M_T$  = turret mass  
 $K_S$  = suspension spring rate  
 $K_{GRP}$  = gear train spring rate  
 $K_{TB}$  = spring rate between turret and basket  
 $D_S$  = viscous damping coefficient of suspension  
 $D_{GRP}$  = viscous damping coefficient of gear train  
 $D_{TM}$  = viscous damping coefficient of motor  
 $D_{TB}$  = viscous damping coefficient between turret

접수일: 2003년 8월 20일 ; 게재승인일: 2004년 2월 20일

\* 국방과학연구소

# 교신저자, 충남대학교 기계설계공학과

Email eskang@cnu.ac.kr Tel. (042) 821-6647

and basket

$D_{HT}$  = viscous damping coefficient between hull and turret

$T_{TM}$  = motor coulomb friction

$T_{HT}$  = coulomb friction between hull and turret

$R_{34}$  = gear ratio final pinion-ring gear

$R_{12}$  = gear ratio(reciprocal) motor-final pinion

$\zeta_{\theta IG}$  = bending damping factor

$w_{\theta IG}$  = bending frequency

### 1. 서론

대부하 표적지향 시스템은 차량이 주행 중 노면으로부터 받는 외란과 무관하게 조준선(line of gun)을 표적에 일정하게 지향하는 장치이다. 대부하 표적지향 시스템의 성능은 포/포탑을 구동하는 구동장치, 목표물에 시선을 안정화시키는 조준경장치, 노면에서 인입되는 외란을 억제하는 현수장치, 포/포탑의 물리적 특성 및 안정화 제어장치간의 복합적인 특성에 따라 좌우되며 기동간 명중률을 향상시키는 데 중요한 요소가 된다

대부하 시스템에서는 표적지향 오차가 정해진 기준을 초과할 경우 강제로 사격을 금지시키는 회로를 내장하고 있으며, 외란을 효과적으로 제거하지 못하면 중요한 순간에 사격을 하지 못하는 경우가 발생할 수 있으므로 표적지향 오차를 줄이려는 노력이 계속되고 있다.<sup>1,11</sup>

대부하 시스템은 마찰, 포탑의 무게중심과 회전중심의 불일치로 인한 불균형모멘트 등의 비선형 특성이 표적지향 성능을 저해하고 있으나, 지금까지의 대부하 표적지향 시스템의 제어기는 선형제어기인 PI 제어기를 기반으로 구축되어 있어 이러한 비선형 특성에 의한 성능저하에 적절히 대처하기 어렵다. 따라서 이러한 비선형 특성을 갖는 오차요소를 보상하기 위한 제어기법에 대한 연구가 필요하다.

본 논문에서는 전기식 포/포탑 구동기구를 가진 대부하 시스템의 표적지향 성능분석을 위한 모델을 개발하고, 비선형 시스템에 강인한 것으로 알려진 신경회로망을 이용한 제어기를 설계하여 고전적인 PI 제어기로 구성된 시스템의 성능과 비교하여 외란제거에 효과적임을 입증하였다. 여기서 신경망을 이용하여 직접제어 할 때 기존의 PI 제어기에

부가할 수 있는 귀환 오차 학습(feedback error learning, FEL)구조의 신경회로망을 이용하였다.<sup>2</sup> 포/포탑의 선회방향과 포의 고저방향 운동은 서로 직교하며, 완전 독립적으로 운동하므로 본 논문에서는 선회방향에 대해서만 다룬다.

### 2. 수학적 모델

대부하 표적지향 시스템은 크게 차체, 포/포탑, 포/포탑 구동장치, 조준경 장치로 구성된다. 포탑에 위치한 구동모터는 감속기어를 통하여 구동력을 증대하여 포탑을 구동한다. 조준경 장치는 포탑과 독립적으로 시선(line of sight)을 표적에 지향시킬 수 있다.

Fig.1에서 보는바와 같이 조준경과 포/포탑 구동장치는 독립적인 속도 제어 루프로 구성되며, 동시에 조준경의 위치를 포/포탑이 추종하도록 되어 있다.

조준경 장치는 포/포탑과는 달리 관성이 작으므로 개루프 없이 거울이 부착된 구조물에 운동을 감지하는 자이로를 부착하고 외란에 대한 보상신호를 구동모터에 인가하여 보상하는 독립적인 폐루프로 되어 있다.

한편 포/포탑 구동시스템에는 포/포탑의 각 움직임을 감지하는 기준자이로(reference gyro)와 포탑의 수평움직임(yaw)을 감지하는 전방이송자이로(feedforward gyro)가 사용된다. 기준자이로를 이용한 독립적인 폐루프를 구성하고 여기에 포탑의 큰 관성력을 효과적으로 제어하기 위하여 전방이송자이로를 사용한 개루프를 추가한 방식이다.

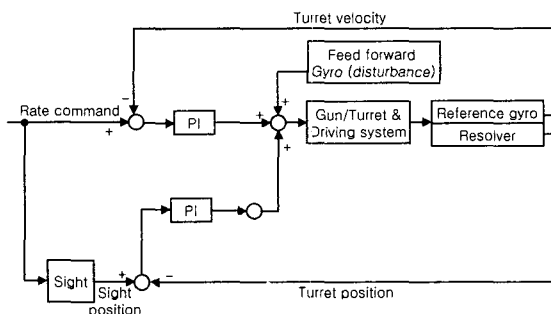


Fig. 1 Block diagram of the pointing system

## 2.1 부하 모델

부하모델은 차체, 구동모터, 바스켓, 포탑, 그리고 벤딩모드로 구성되어 있다. 운동방정식의 유도과정에서 포의 운동이 보존된다고 가정하였으며 또한 포의 분산에너지는 이차 동특성을 갖는 시스템이라고 가정하였다. Fig.2와 Fig.3은 각각 부하모델의 기본 도식도와 기어부의 기구학을 나타내며, Fig.4는 벤딩모드 방정식을 구하기 위한 포의 기구학적 도식도이다. Fig.2와 Fig.3으로부터 모터와 최종 피니언기어 사이의 기어비(역수)는 다음과 같다.

$$R_{12} = \frac{N_{IGR2}}{N_{GR}} \cdot \frac{N_{IGR1}}{N_{IM2}} \cdot \frac{N_M}{N_{IM1}} \quad (1)$$

마찬가지로 피니언 기어와 링 기어 사이의 기어비는 다음과 같다.

$$R_{34} = \frac{N_H}{N_P} \quad (2)$$

한편, 기어의 이빨수와 각 변위의 관계는 Fig. 3으로부터 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$(\theta_{IGR1} + \theta_T) N_{IGR1} = (\theta_{IGR2} - \theta_T) N_{IM2} \quad (3)$$

$$(\theta_{IM1} + \theta_T) N_{IM1} = (\theta_M - \theta_T) N_M \quad (4)$$

$$(\theta_{IGR2} - \theta_T) N_{IGR2} = (\theta_{GR} + \theta_T) N_{GR} \quad (5)$$

$$(\theta_P + \theta_T) N_P = (\theta_T - \theta_H) N_H \quad (6)$$

$$\dot{\theta}_{GR} = R_{12} \dot{\theta}_M - (R_{12} + 1) \dot{\theta}_T \quad (7)$$

$$\theta_P = -R_{34} \theta_H + (R_{34} - 1) \theta_T \quad (8)$$

1 자유도를 갖는 차체와 바스켓, 모터, 포탑, 기어부의 강체 운동 및 포텐셜 에너지, 그리고 분산에너지 관계, 선회구동시 포의 벤딩 특성으로부터 선회 구동부에 대한 운동방정식을 구하면 다음과 같다.

## 차체 운동방정식

$$\begin{aligned} J_H \ddot{\theta}_H + R_{34} K_{GRP} (\theta_{GR} - \theta_P) + K_s (\theta_H - \theta_s) \\ + D_{HT} (\dot{\theta}_H - \dot{\theta}_T) + D_s (\dot{\theta}_H - \dot{\theta}_s) \\ + R_{34} D_{GRP} (\dot{\theta}_{GR} - \dot{\theta}_s) + T_{HT} \text{sgn}(\dot{\theta}_H - \dot{\theta}_T) = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

## 모터 운동방정식

$$\begin{aligned} (J_M + H_{GR} R_{12}^2) \ddot{\theta}_M + J_{GR} R_{12} (-R_{12} + 1) \ddot{\theta}_T \\ + R_{12} K_{GRP} (\theta_{GR} - \theta_P) + R_{12} D_{GRP} (\dot{\theta}_{GR} - \dot{\theta}_P) \\ + D_{TM} (\dot{\theta}_M - \dot{\theta}_T) + T_{TM} \text{sgn}(\dot{\theta}_M - \dot{\theta}_T) = T_M \end{aligned} \quad (10)$$

## 바스켓운동방정식

$$J_B \ddot{\theta}_B + D_{TB} (\dot{\theta}_B - \dot{\theta}_T) + K_{TB} (\theta_B - \theta_T) = 0 \quad (11)$$

## 포탑 운동방정식

$$\begin{aligned} [J_T + J_{GR} (R_{12} + 1)^2] \ddot{\theta}_T + J_{GR} R_{12} (R_{12} + 1) \ddot{\theta}_M \\ + K_{TB} (\theta_T - \theta_B) + (R_{12} + R_{34}) K_{GRP} (\theta_{GR} - \theta_P) \\ + D_{HT} (\dot{\theta}_T - \dot{\theta}_H) + D_{GRP} (R_{12} - R_{34}) (\dot{\theta}_{GR} - \dot{\theta}_P) \\ + D_{TM} (\dot{\theta}_M - \dot{\theta}_T) + D_{TB} (\dot{\theta}_T - \dot{\theta}_B) \\ + T_{HT} \text{sgn}(\dot{\theta}_T - \dot{\theta}_H) + T_{TM} \text{sgn}(\dot{\theta}_T - \dot{\theta}_M) \\ + 2M_{IG} \ddot{\eta} \dot{\theta}_T + (I_{IG} + S_{IG} X_T) \ddot{\eta} \\ = -T_M + M_T c_x \ddot{e}_y \dot{\theta}_H + M_T c_y \ddot{e}_x \dot{\theta}_P \end{aligned} \quad (12)$$

식 (12)의 외력 항에서 모터 토크( $T_M$ )를 제외한 나머지 항은 포탑의 불균형 모멘트에 의한 것으로 Fig.5에서 보는 바와 같이 피치나 롤 운동시 포탑의 무게중심( $e_x, e_y$ )과 회전중심이 일치하지 않아 선회방향으로 우력이 발생한다.

## 포 벤딩 운동방정식

$$\begin{aligned} M_{IG} \ddot{\eta} + 2M_{IG} \zeta_{IG} w_{IG} \dot{\eta} + M_{IG} w_{IG}^2 \eta \\ - M_{IG} \eta \dot{\theta}_T^2 = -(I_{IG} + S_{IG} X_T) \ddot{\theta}_T \end{aligned} \quad (13)$$

여기서

$$\begin{aligned} M_{IG} &= \int_l \rho \phi_T^2 dx \\ S_{IG} &= \int_l \rho \phi_T dx \\ I_{IG} &= \int_l \rho \phi_T x dx \text{ 이다.} \end{aligned}$$

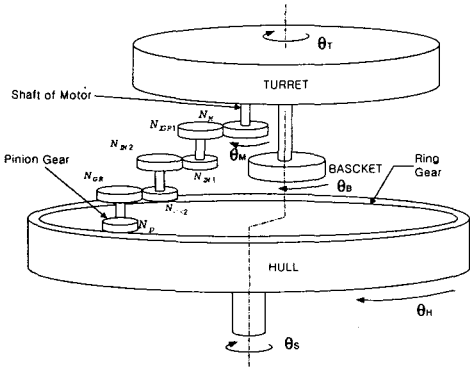


Fig. 2 Schematic diagram of the plant model

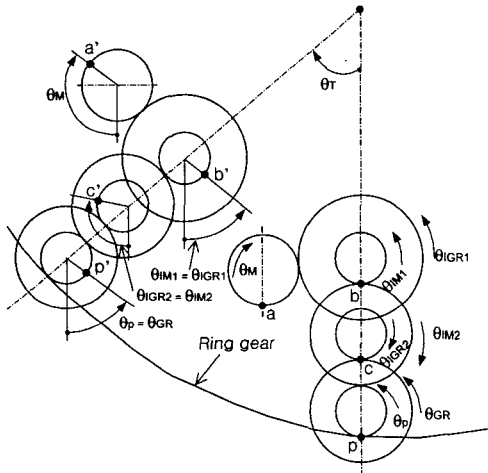


Fig. 3 Kinematic diagram of the gear train

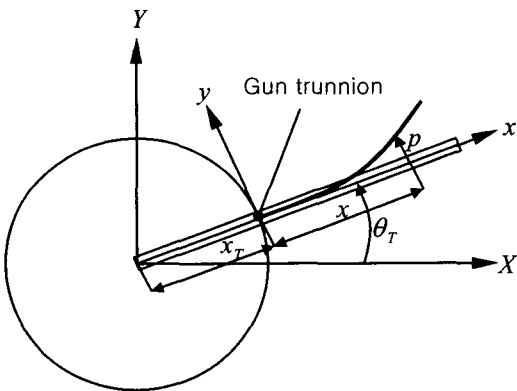


Fig.4 Schematic diagram of the gun bending mode

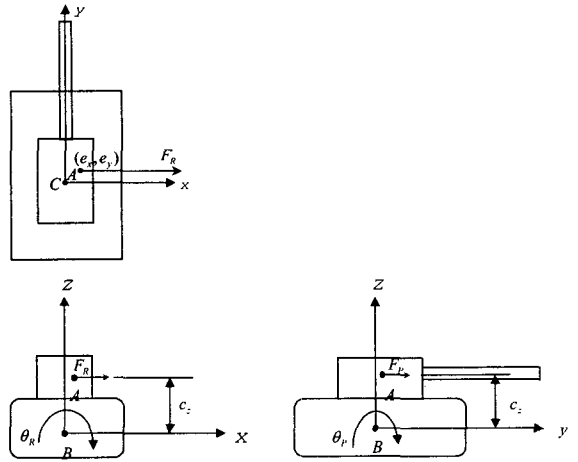


Fig. 5 External forces due to turret unbalance

## 2.2 조준경 모델

조준경 모델은 한국형 포수조준경의 모델<sup>3</sup>을 적용하였으며 적용된 조준경 안정화 제어 구조는 Fig.6과 같다.

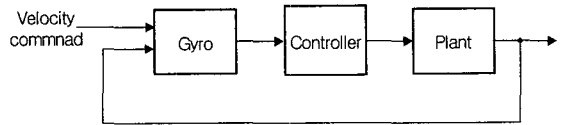


Fig. 6 Block diagram of the sight control system

## 2.3 모터 제어 모델

대부하 시스템의 전기식 구동장치는 BLDC모터를 적용한 벡터제어<sup>4</sup>를 적용하고 있다. 2극 3상 BLDC모터의 비선형 d-q모델은 식(14)와 같다.

$$\begin{pmatrix} \dot{i}_{qs} \\ \dot{i}_{ds} \\ \dot{w}_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{r_s}{L_q} & -\frac{w_r L_d}{L_q} & -\frac{\lambda_m}{L_q} \\ \frac{w_r L_q}{L_d} & -\frac{r_s}{L_d} & 0 \\ \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{\lambda_m}{J_m} & 0 & -\frac{B_m}{J_m} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ w_r \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{v_{qs}}{L_q} \\ \frac{v_{ds}}{L_d} \\ \frac{T_L}{J_m} \end{pmatrix} \quad (14)$$

벡터제어란 회전자 동기축을 기준으로 고정자에 인가되는 3상 전류를 토크성분의 전류(\$i\_{qs}\$)와 자속성분의 전류(\$i\_{dq}\$)로 분기하여 토크와 자속을 독립적으로 제어하는 것을 의미하며 단위전류당 최대 토크를 발생하기위해 d축 상의 전류를 0 이

되도록 제어하면 결국 식(15)와 같은 영구자석 직류전동기와 동일한 선형화 모델이 된다.

$$\begin{pmatrix} \dot{i}_{qs} \\ \dot{w}_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{r_s}{L_q} & -\frac{\lambda_m}{L_q} \\ \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{\lambda_m}{J_m} & -\frac{B_m}{J_m} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{qs} \\ w_r \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{v_{qs}}{L_q} \\ \frac{T_L}{J_m} \end{pmatrix} \quad (15)$$

### 3. 신경망 제어기 설계

비선형 시스템에 강인한 것으로 알려진 신경 회로망을 이용한 제어기를 설계하여 고전적인 PI 제어기로 구성된 시스템의 성능과 비교하여 성능 개선에 효과적임을 입증한다.

여기서 PI 제어기의 이득은 Ziegler-Nichols 방법을 기초로 하여 구하였다. Ziegler-Nichols 방법은 페루프 시스템의 감쇄특성을 저하시키는 단점이 있다. 따라서 정교한 제어성을 얻기 위해서는 시행착오(trial and error) 방법을 통해 이득을 동조하여야 한다.<sup>5</sup> 본 논문에서는 Ziegler-Nichols 방법을 적용하여 PI 제어기 이득을 구한후, 계단 응답과 표적지향 성능 시뮬레이션을 통해 시행착오 방법으로 보정하였는데, 이는 기존의 표적지향 시스템에서 이용하고 있는 방법<sup>10</sup>이다.

가장 간단한 신경회로망 제어방식은 신경회로망을 직접제어기로 사용하는 직접제어방식으로 Fig. 7에 블록선도로 나타내었다. 이 방법은 공정의 역모델을 이용하여 쉽게 제어 대상 시스템과 직렬로 연결할 수 있도록 되어 있다. 그러나 이 방법은 초기에 무작위의 값으로 선택되어진 신경망의 가중치 값이 더해져서 출력되어 지는데 이 초기 출력값이 공정의 안정성을 초기에 보장하기 어렵다.

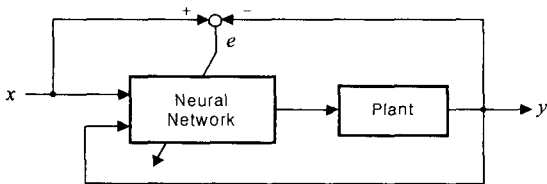


Fig. 7 Block diagram of the direct inverse control system

이러한 문제를 극복하기 위한 역 모델 방법중의 하나는 귀환오차학습(feedback error learning) 방법<sup>2</sup>

으로써 그 구조는 Fig. 8에서 보는바와 같다. 이 방법은 식(16)과 같이 귀환 제어기의 출력을 목적함수로 이용하여 학습하는 앞먹임 제어기의 구조를 가지며, 실시간 제어시 초기에는 귀환제어기를 이용하여 안정성을 확보하고, 어느 정도 시간이 지나면 신경회로망의 학습이 진행되어 신경회로망이 정밀제어를 제공하게 된다.

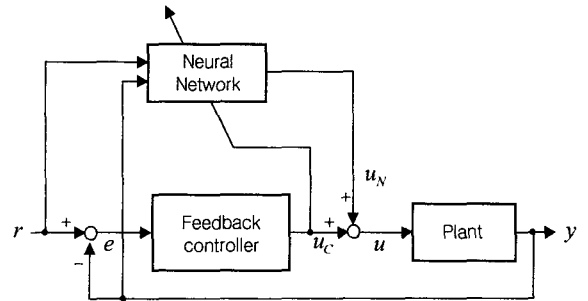


Fig.8 Block diagram of the feedback-error-learning neural network control system

$$E = \frac{1}{2} u_c^2 \quad (16)$$

제어입력  $u$ 는 신경회로망의 출력  $u_N$ 과 귀환 제어기의 출력  $u_c$ 의 합이다.

$$u = u_c + u_N \quad (17)$$

역전파 알고리즘을 적용하기 위해 델타법칙을 적용한다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial w_{kj}} &= \frac{\partial E}{\partial u_c} \frac{\partial u_c}{\partial w_{kj}} \\ &= u_c \frac{\partial (u - u_N)}{\partial w_{kj}} \\ &= u_c \frac{\partial (u - u_N)}{\partial u_N} \frac{\partial u_N}{\partial w_{kj}} \\ &= -u_c \frac{\partial u_N}{\partial w_{kj}} \end{aligned} \quad (18)$$

식(18)을 이용하면 다음과 같이 가중치의 변화량을 계산할 수 있다

$$\Delta w_{kj} = \eta u_c \frac{\partial u_N}{\partial w_{kj}} \quad (19)$$

$$w_{kj}(n+1) = w_{kj}(n) + \Delta w_{kj}(n) + \alpha \Delta w_{kj}(n-1) \quad (20)$$

여기서  $\alpha$ 와  $\eta$ 는 각각 모멘트 변수와 학습률이다.

Fig.8로부터 신경망은 기존의 귀환제어기에 부가되며 기존의 제어기 설계에 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 신경망은 플랜트의 실제 출력과 요구되는 출력이 일치되도록 학습하는데, 이는 귀환제어기의 출력  $u_c$ 가 0이 되도록 하면 가능하다. 따라서 신경망은 오차를 역전과하여 귀환 제어기의 출력  $u_c$ 가 0이 되도록 가중치를 경신한다. 여기서 가중치의 초기값은 0으로 선택하였다.

이 제어기는 신경망이 학습을 시작하는 초기에 귀환제어기의 강인성으로 인해 시스템의 안정성을 확보할 수 있는 장점을 가지고 있다.

제어기의 성능 극대화를 위해 적절한 신경망의 구조와 파라미터를 찾아야 한다. 본 논문에서 신경망의 구조는 입력층, 은닉층, 출력층으로 구성되며 은닉층의 경우 그 수가 증가하면 실시간제어에 어려움이 따르게 되므로 하나의 은닉층을 사용하였다. 한편 입력층은 2개의 유닛, 출력층은 1개의 유닛으로 구성되며, 은닉층의 유닛 수와 학습률, 모멘트 변수 등은 시행착오 방법으로 구하였다.

여기서 신경회로망은 역전파 알고리즘을 이용하여 학습하며, 활성화함수는 시그모이드 함수를 사용한다.

Fig.9는 귀환오차학습방법을 적용한 표적지향 시스템의 블록선도이다.

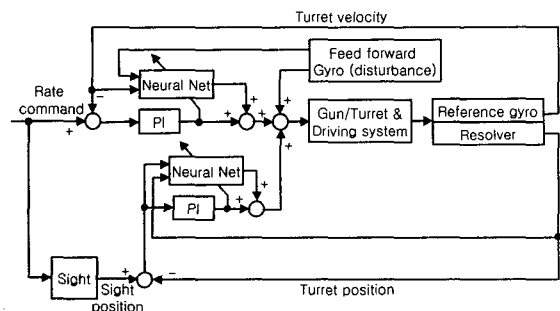


Fig. 9 FEL control configuration for the pointing system

#### 4. 시뮬레이션

대부하 표적지향 성능 시뮬레이션 프로그램을

Matlab의 툴인 Simulink를 활용하여 작성하였다.

여기서 사용한 파라미터들 중 마찰과 관련된 값들은 실험을 통하여 구하였으며, 그 밖의 값들은 설계 데이터로부터 계산하여 구하였다.

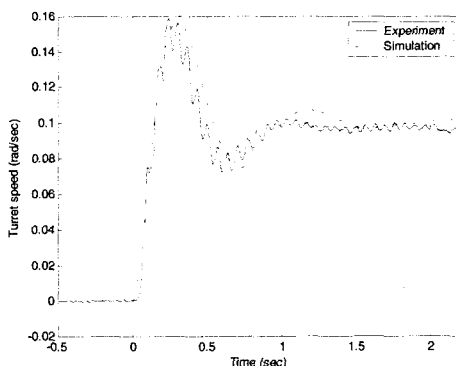
#### 4.1 계단과 응답

표적지향 성능 시뮬레이션을 수행하기 전에 수학적 모델의 정확성을 입증하기 위해 Fig.10의 포탑 구동 실험장치를 이용하여 그 결과를 비교하였다. 여기서 실험장치는 외부로부터 외란을 인가할 수 없으므로 표적지향 성능을 확인할 수 없으며 따라서 가속성능 시험으로부터 모델의 정확성을 확인하였다.

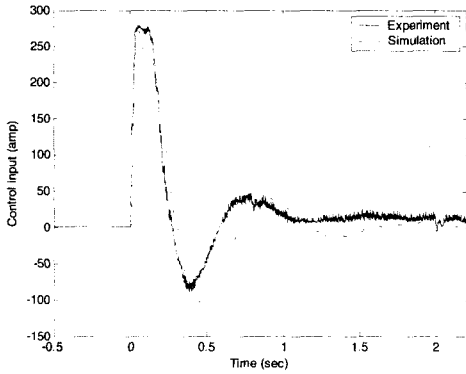
Fig.11은 0.1 rad/sec의 속도입력을 시계방향으로 인가하였을 때의 포탑 선회속도와 제어기의 출력을 나타낸다. 그림으로부터 시뮬레이션 결과와 실험결과가 비교적 잘 일치하며, 따라서 수학적 모델이 잘 일치함을 알 수 있다.



Fig. 10 Experimental equipments



(a) Turret speed



(b) Command input

Fig.11 Step response of the turret

#### 4.2 표적지향 성능

대부하 시스템의 주행간 표적지향 성능을 시뮬레이션 하였으며 시뮬레이션 조건은 16 KPH의 속도로 규격화된 범프 노면을 주행할 때이다. 여기서 범프 노면은 Fig.12와 같은 형상을 가지며, 주로 좌우 대칭인 범프로 구성되어 있고 세 구간에 걸쳐 좌우 비대칭인 범프가 존재한다.

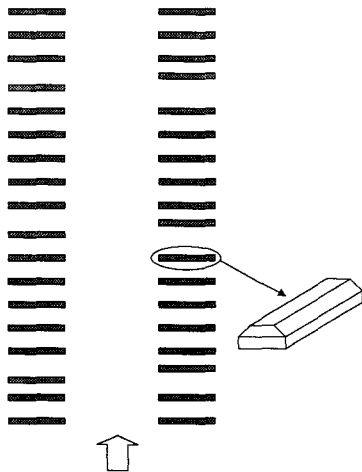


Fig. 12 Bump course section of the track

대부하 시스템이 기동 중 지면으로부터 받는 외란은 유사장비의 실측 외란 데이터<sup>6</sup>를 이용하였으며 Fig.13에 나타내었다.

Fig.14는 PI 제어기를 적용하였을 때의 표적지

향 오차를 보여주는데, 좌우 비대칭 구간을 통과할 때의 오차가 대칭구간을 지날 때 보다 상대적으로 크을 알 수 있다. 이는 좌우 비대칭인 범프가 대칭인 범프보다 형상이 큰 이유도 있지만 포탑의 불균형에 의한 영향이 있는 것으로 보인다. 즉 대부하 시스템이 주행시 포탑 불균형에 의한 표적지향 오차 발생경로는 두 가지로 설명할 수 있는데, 첫 번째는 주행시 피치방향의 속도외란이 포탑의 좌우 불균형 모멘트를 가진시켜서 선회방향의 표적지향 오차를 유발하고, 두 번째는 롤방향의 외란 포탑의 전후 불균형 모멘트를 가진시켜 표적지향 오차를 증가시킨다. 즉 후자의 영향에 의해 비대칭 범프를 통과할 때 오차가 증가하는 것이다.

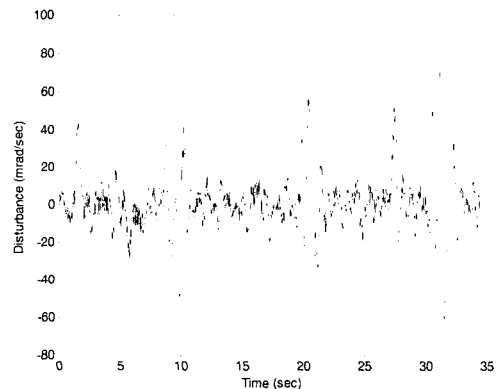


Fig. 13 Hull disturbance (yaw)

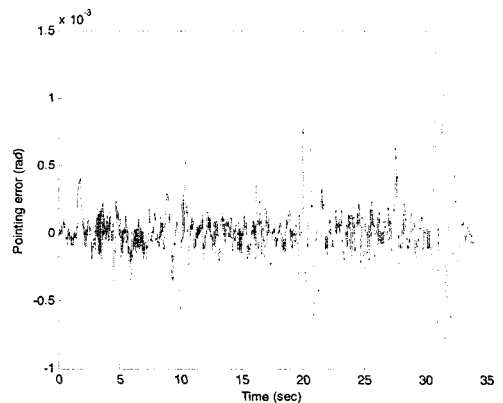


Fig. 14 Pointing error with hull disturbance

Fig. 15는 귀환오차 학습구조의 신경망 제어기를 적용하였을 때 은닉층의 유닛 수의 변화에 따른 표적지향오차를 나타낸다. 여기서 유닛 수는 4개로부터 12개까지 변화시켰다. 시뮬레이션의 결과로부터 유닛의 수가 6개일 때 가장 좋은 결과를 나타냈다. 따라서 유닛수가 6개 인 신경망 제어기와 PI 제어기의 성능을 Fig. 16에 비교하였다. 귀환오차학습 구조의 신경망 제어기를 적용하였을 때의 오차가 PI 제어기를 적용하였을 때보다 감소함을 알 수 있고 특히 좌우 비대칭 범프를 통과할 때의 오차 감소 폭이 큼을 알 수 있다. 여기서 Fig.15와 Fig.16은 결과 비교를 용이하게 하기 위해 전체 시간에서 일부분만 확대하였다.

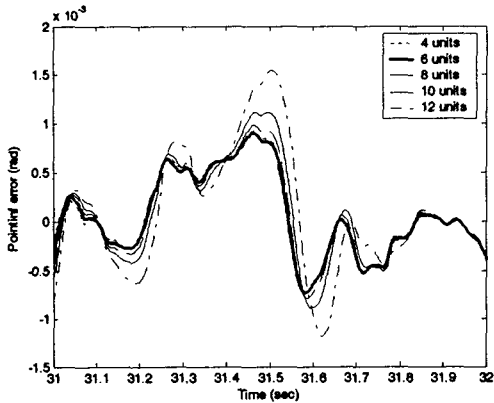


Fig. 15 Response variations with changes of number of hidden layer units

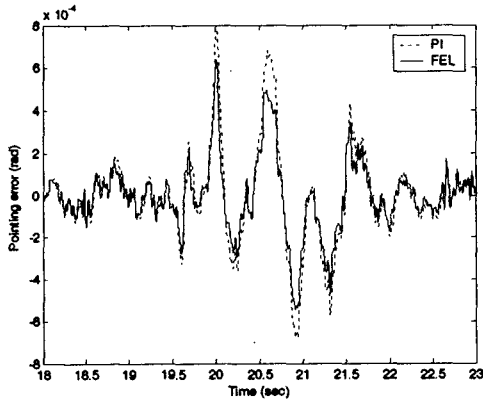


Fig. 16 Comparison of pointing error between the FEL controller and PI controller

Table 1은 범프코스 전 구간에 걸친 두 경우의 표적지향오차의 rms 값을 비교한 것인데 신경망 제어기를 적용하였을 때 오차가 약 14% 감소됨을 알 수 있었다.

Table 1 RMS values of the pointing error

구 분	PI	FEL
표적지향 오차 (mrad)	1.98	1.70

서론에서 언급한 바와 같이 대부하 시스템에서는 표적지향 오차가 정해진 기준을 초과할 경우 강제로 사격을 금지시키는 회로를 내장하고 있으며, 외란을 효과적으로 제거하지 못하면 중요한 순간에 사격을 하지 못하는 경우가 발생할 수 있다. 따라서 귀환오차 학습 구조의 신경망제어기를 적용하였을 때 범프코스 전 구간에 걸쳐 사격 가능한 구간을 다음 식과 같이 계산하였다.

$$\text{사격가능 확률} = \frac{\text{사격가능구간}}{\text{전체구간}} \times 100 (\%) \quad (21)$$

Table 2는 그 결과를 보여주는데 귀환오차학습 구조의 신경망제어기를 적용하였을 때 PI 제어기를 적용하였을 때보다 사격 가능 구간이 약 5% 증가함을 알 수 있다.

Table 2 Probability of firing

구 분	PI	FEL
사격 가능 확률 (%)	84	89

### 5. 결론

전기식 포/포탑 구동기구를 가진 대부하 시스템의 표적지향 성능분석을 위한 모델링과, 신경회로망을 이용한 제어기를 설계하여 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

대부하 표적지향 시스템에 귀환오차학습 구조의 신경망 제어기를 적용한 결과 기존의 PI 제어



기를 적용한 시스템에 비해 표적지향오차가 약 14% 감소하였으며, 이는 기동간 명중률을 향상시킬 것으로 판단된다. 특히 물방향의 외란이 가해질 경우 포탑의 불균형량에 의한 오차를 효과적으로 감소시켜주는 것으로 나타났다.

또한 신경망 제어기를 적용함으로써 사격 금지 구간이 약 5% 감소하였는데 이는 실제 사용자의 운용적인 측면에서 상당한 개선으로 판단된다.

표적지향 오차와 사격금지 구간을 더욱 줄이려는 노력이 필요한데 특히 불균형 모멘트의 영향을 최소화하기 위해 가속도 센서 등을 이용하여 앞먹임 제어하는 방법<sup>9</sup> 등을 생각할 수 있으나 비용대 효과 측면에서 고려해야 한다.

### 참고문헌

1. Lee, D. O., Kang, T. H., Kim, H. S. and Ko, J. H., "A Feedback Linearization Control Technique Based on Iterative Learning Parameter Identification For an Electrically Driven Stabilized Pointing System of Heavy Turreted Vehicles," Proceedings of the 10th Mediterranean Conference on Control and Automation, FP7-6, 2002.
2. Kawato, M., Uno, Y., Isobe, M. and Suzuki, R., "Hierarchical Neural Network Model for Voluntary Movement with Application to Robotics," IEEE Control Systems Magazine, pp. 5-16, April, 1988.
3. Lee, B. H., "Control Performance Evaluation of the Sight Stabilization System in a Gunner's Primary Sight," Technical Report, Agency for Defence Development, 1997.
4. Eun, S. S., "Development of the Digital Controller for Electrical Actuation System Using a Brushless DC Motor," Technical Report, Agency for Defence Development, 1994.
5. Akhyar, S. and Omatu, S., "Self-Tuning PID Control by Neural Networks," Proc. of IEEE Int. Joint Conf. on Neural Networks, pp. 2749-2752, 1993.
6. Kim, B. U., Souh, B. Y. and Kim, E. W., "Unbalance Moment Effect on Gun Stabilization Performance," Technical Report, Agency for Defence Development, 1995.
7. Sasaki, M., Kawafuku, M. and Takahashi, K., "Comparison of Feedback Controllers for Feedback-Error-Learning Neural Network Control System with Application to a Flexible Micro-Actuator," IEEE Int. Conference on System, Man, and Cybernetics, Vol. 5, pp. 4035-4040, Oct. 1997.
8. Almeida Neto, A., Rios Neto, W., Goes, L. C. and Nascimento, Jr., Cairo, L., "Feedback-Error-Learning for Controlling a Flexible Link," Proceedings of The 6th Brazilian Symposium on Neural Networks, pp. 273-278, 2000.
9. Michael, T. DiRenzo and Mark, W. Vandegrift, "Adaptive Control for Pointing and Stabilization of a Flexible Gun Tube," Proceedings of the 36th Conference on Decision and Control, pp. 4943-4948, Dec. 1997.
10. Lee, D. O., Kim, H. S. and Ahn, T. Y., "The Research on The GTDS System Design and Development of PI MBT," Technical Report, Agency for Defence Development, 1995.
11. 최근국, 이만형, 안태영, "구동 링크기구 최적설계 분석 및 불균형 대부하 고저 구동/제어 성능추정 프로그램 개발," 한국정밀공학회 추계 학술대회 논문집, pp. 614-617, 1997.
12. 제롬 살랑선네, 윤여홍, 장봉춘, 이성철, "차동 제동을 이용한 조향제어 시뮬레이션," 한국정밀공학회지, 제19권, 제11호, pp.65-74, 2002.