

포/포탑 구동 시스템의 제어기 설계에 관한 연구

이 석 재 정 오 진 이 교 일
서울대학교 대학원 기계설계학과

A Study on the Controller Design of Gun/Turret Servo system

Seok-jae Lee Oh-jin Jung Kyo-il Lee
Dept. of Mechanical Design and Production Eng.
Seoul National University

Abstract

A hydraulic gun/turret servo system requires fast and robust controller performance because of severe operating condition and precise target tracking objective. Digital controllers are able to satisfy this requirement due to high speed electronic device.

The purpose of this study is to compare with pre-EPU with new-designed optimal, adaptive controllers by simulating nonlinear hydraulic simulation program. The designed digital controller shows good tracking performance and robustness to disturbance.

1. 서론

포/포탑 구동 시스템(Gun/Turret servo system)은 큰 불균형 관성 모멘트를 갖는 대형 구조물이므로 이러한 구조물의 안정되고 정확한 구동을 위해서는 큰 출력의 구동 장치와 견실한 제어기의 성능이 요구된다.

기존 시스템의 경우 센서와 제어기를 포함한 대부분의 전자장비가 아날로그 방식으로 운영되어 왔으나, 최근들어서 각종 전자장비를 디지털화하여 일괄적인 디지털 시스템을 구축하는 작업이 활발하게 수행되고 있다. 이와 같은 노력의 일환으로, 본 연구에서는 몇가지 제어기법을 도입하여 디지털 제어기를 설계하고 그 성능을 평가하였다. [1]

본 연구에서는 전기 유압 서어보 시스템으로 구동되는 속도 출력 포/포탑 플랜트에 대하여, 상태 공간상에서 시스템의 선형 모델을 도출하여 최적제어 이론(Optimal Control Theory)과 LQG/LTR 제어이론, 적응제어 이론을 적용, 제어기를 설계하고 기존의 제어 장치인 전자 유닛(GTD EPU)과 그 성능을 비교하였다. 연구방법은 고저 서어보 시스템과 선회 서어보 시스템을 상호 독립된 시스템으로 고려하여 각각에 대해 제어기를 설계한 후 비선형 시뮬레이션을 통해 그 성능을 분석하였다.

특히 모든 상태를 피드백하여야 되는 최적 제어기의 문제를 해결하며 복잡한 관측기(Observer) 설치를 피하기 위해, 포/포탑 구동 시스템을 각각 6차에서 3차로 축소 차수 모델링 한 후 시스템 상태가 모두 피드백되는 제어기를 구성하였다.

2. 시스템 개요

2.1 포/포탑 구동 안정화 시스템의 구성

기존의 포/포탑 구동 안정화 시스템은 크게 고저 장치(elevation mechanism), 선회장치(traverse mechanism), 고저 서어보 장치(elevation servo mechanism), 선회 서어보 장치(traverse servo mechanism), 포수 조종 핸들 결합체(gunner's control handle assembly), 포/포탑 구동 전자유닛(electronic processing unit : EPU), 기준 자이로(reference gyro), 전방 이송 자이로(feed forward gyro) 등의 8개 주요 구성품으로 구성되어 있다. 각 구성품의 기능은 다음과 같다.

2.1.1 고저장치:고저 서어보 장치로부터 제어된 유압원을 공급받아 유압을 기계적인 직선운동으로 변환시켜 포를 상하로 작동시킨다.

2.1.2 선회장치:선회 서어보 장치로부터 제어된 유압원을 공급받아 유압을 기계적인 회전운동으로 변환시켜 포탑을 회전시킨다.

2.1.3 고저 서어보 장치:포/포탑 구동 전자유닛으로부터 전 기신호를 받아 유량을 전기신호에 비례하게 증폭시켜 고저 장치로 보내어 고저장치를 일정속도로 조절한다.

2.1.4 선회 서어보 장치:포/포탑 구동 전자유닛으로부터 전 기신호를 받아 유량을 전기신호에 비례하게 증폭시켜 선회 장치로 보내어 선회장치를 일정속도로 조절한다.

2.1.5 포수조절 핸들 결합체: 핸들의 기계적 움직임, 즉 핸들의 방향과 각도에 비례하게 전기적신호를 발생시켜 포/포탑 구동 전자유닛으로 보내어 포/포탑을 고저 및 선회방향으로 작동시킨다.

2.1.6 기준 자이로:포의 피칭(pitching) 및 요잉(yawing) 방향의 각속도를 감지하여 이에 비례하는 전기적 신호를 포/포탑 구동 전자유닛에 보내어 포를 안정화시킨다.

2.1.7 전방 이송 자이로: Hull의 요잉(yawing) 각속도와 터렛의 피칭(pitching) 각속도를 감지하여 이에 비례하는 전기적 신호를 포/포탑 구동 전자유닛에 보내어 포를 안정화시킨다.

2.1.8 포/포탑 구동 전자유닛: 속도제어 시스템인 포/포탑 구동 시스템을 제어하는 전자유닛은 포/포탑 구동 안정화 시스템의 각 구성품에 소요되는 전원을 공급하며, 각 센서의 피드 백 신호 및 명령 신호를 처리하여 고저/선회 서어보 장치에 구동 전류를 보낸다.

2.2 포/포탑 구동 시스템의 운동 방정식

유압원으로 구동되는 포 구동 시스템의 운동 방정식은 2단과 3단 서어보밸브 부분과 유압 실린더 부분, 그리고 실린더 로드와 포 운동간의 기구학적 관계식을 모델링하여 설정하였다. 포탑의 경우는 액츄에이터 부분이 유압 모터로 이루어져 있다.

2.3 운동 방정식의 선형화

본 연구에서의 제어대상은 3단 서어보 밸브-액츄에이터부하로 구성된 유압 시스템으로서 선형화시의 작동점은 2단 밸브 스톱 변위와 3단 밸브 스톱 변위를 0인(중립 위치) 점으로 하였다. 2단, 3단 밸브 스톱 변위가 0일때가 유압 시스템의 최악 조건이므로 이러한 작동점에서 모델을 선형화하여 해석하는것이 타당하다.

2.3.1. 포 구동 시스템

선형화된 전체 블록 다이어그램은 그림 1과 같으며 각 부분별로의 선형방정식은 다음과 같다.

i) 2단 서어보 밸브

$$\dot{x}_{v2} = \frac{1}{T_{sv}} (K_{sv} i - x_{v2}) \quad \text{단, } x_{v2}: 2\text{단 밸브 변위}$$

i: 입력전류

ii) 3단 서어보 밸브

$$Q_{L1} = K_{q2} x_{v2} - K_{c2} P_{L1}$$

여기서

$$K_{q2} = \left. \frac{\partial Q_{L1}}{\partial x_{v2}} \right|_{P_{L1}=0} = C_d w_2 \sqrt{\frac{1}{\rho} P_S} \quad ; \text{ flow gain}$$

$$K_{c2} = \left. - \frac{\partial Q_{L1}}{\partial P_{L1}} \right|_{x_{v2}=0} = \frac{\partial Q_{L1}}{\partial P_{L1}} \bigg/ \frac{\partial x_{v2}}{\partial P_{L1}} = \frac{K_{q2}}{K_{p2}} \quad ; \text{ flow pressure coeff.}$$

$$K_{p2} = \frac{\partial P_{L1}}{\partial x_{v2}} \quad ; \text{ pressure sensitivity}$$

$$\dot{P}_{L1} = \frac{2\beta_e}{V_0} (K_{q2} x_{v2} - A_v x_{v3} - (\frac{C_1}{2} + K_{c2}) P_{L1})$$

단, x_{v3} : 3단 밸브 변위 $P_{L1} = P_A - P_B$: 밸브 양단 압력차

3단 서어보 밸브 스톱의 운동 방정식

$$\dot{x}_{v3} = \frac{1}{M_v} [(P_A - P_B) A_v - B_v x_{v3} - K_v x_{v3}]$$

iii) 액츄에이터

$$Q_L = K_q x_{v2} - K_c P_L$$

여기서 $K_q = C_d w_3 \sqrt{\frac{1}{\rho} P_S}$

$$K_c = \frac{K_q}{K_p}$$

$$\dot{P}_L = \frac{4\beta_e}{V_t} (K_q x_{v3} - A_p x_p - (C_{ip} + K_c) P_L)$$

단, P_L : 액츄에이터 양단 압력차, x_p : 액츄에이터 변위

iv) 포의 운동 방정식

마찰 토크항중 stiction과 coulomb friction에 의한 항 및 불균형 관성 토크 항을 무시하여야 선형화가 가능하다.

그러므로 viscous 항만을 고려하여 포의 운동 방정식을 선형화하면

$$\dot{\theta}_g = \frac{1}{J_g} (A_p P_L - B_g \dot{\theta}_g)$$

$$\dot{x}_p = \frac{1}{J_g} (A_p P_L - B_g \dot{x}_p) \quad \text{단, } \theta_g: \text{포의 회전각}$$

2.3.2. 포탑 구동 시스템

액츄에이터부분만이 포 시스템과 달리 유압 모터로 구성되

어있다. 포 구동 시스템과 동일한 방법으로 유량 방정식과 연속 방정식을 선형화 하면

$$\dot{P}_L = \frac{4\beta_e}{V_t} (K_q x_{v3} - D_m \dot{\theta}_m - (C_{im} + \frac{C_{om}}{2} + K_c) P_L)$$

단, θ_m : 유압모터 각변위

포 구동 시스템과 마찬가지로 coulomb friction과 stiction을 무시하고 포탑의 운동방정식을 세우면

$$\dot{\theta}_t = \frac{1}{J_t} (D_m P_L - B_t \dot{\theta}_t)$$

$$\dot{\theta}_m = \frac{1}{J_t} (D_m P_L - B_t \dot{\theta}_m) \quad \text{단, } \theta_t: \text{포탑 회전각}$$

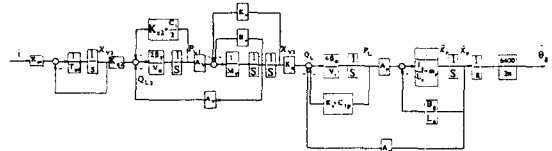


그림 1 포 구동 시스템블록 다이어그램

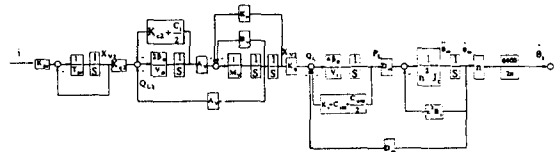


그림 2 포탑 구동 시스템블록 다이어그램

2.4 시스템의 상태 방정식 (state equation)

포 구동 시스템 $\dot{x} = A x + B u$

여기서 $x = [\theta_g \quad P_L \quad x_{v3} \quad \dot{x}_{v3} \quad P_{L1} \quad x_{v2}]^T$
 $u = i$; servo valve 입력 전류

$$A = \begin{pmatrix} -\frac{B_g}{J_g} & \frac{A_p}{J_g} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{4\beta_e A_p}{V_t} & -\frac{4\beta_e K_c}{V_t} & \frac{4\beta_e K_q}{V_t} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{K_v}{M_v} & -\frac{B_v}{M_v} & \frac{A_v}{M_v} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{2\beta_e A_v}{V_0} & -\frac{2\beta_e K_c}{V_0} & \frac{2\beta_e K_q}{V_0} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{sv}} \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{K_{sv}}{T_{sv}} \end{bmatrix}^T$$

포탑 구동 시스템 $\dot{x} = A x + B u$

여기서 $x = [\theta_t \quad P_L \quad x_{v3} \quad \dot{x}_{v3} \quad P_{L1} \quad x_{v2}]^T$
 $u = i$; servo valve 입력 전류

$$A = \begin{pmatrix} -\frac{B_t}{J_t} & \frac{D_m}{J_t} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{4\beta_e D_m}{V_t} & -\frac{4\beta_e K_c}{V_t} & \frac{4\beta_e K_q}{V_t} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{K_v}{M_v} & -\frac{B_v}{M_v} & \frac{A_v}{M_v} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{2\beta_e A_v}{V_0} & -\frac{2\beta_e K_c}{V_0} & \frac{2\beta_e K_q}{V_0} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{sv}} \end{pmatrix}$$

o 시스템의 축소 차수 모델링

측정 가능한 상태 변수(measurable state variable)로 구성되는 시스템의 상태 방정식을 세우기 위해서 입력전류로부터 3단 밸브 변위에 이르는 4차 모델을 1차로 축소하였다. 선정 방법은 단위 계단 함수 입력에 대한 시간응답과 주파수 응답을 고려하였다. 1차 시스템의 시상수에 해당하는 값은 대략 0.005 sec이며 이 값이 effective time constant T_{AV} 에 해당된다. 또한 1차 시스템의 gain에 해당되는 값은 7.975×10^{-4} 이다. 이를 토대로한 1차 모델은 다음과 같다.

$$\dot{x}_{v3} = -200 x_{v3} + 0.1595 i$$

3. 최적 제어 이론을 이용한 제어기 설계(3)

포/포탑 구동 시스템에 대하여 우선, 가장 기본적인 최적제어 이론(Optimal Control Theory ;Linear Quadratic Regulator)을 적용하여 제어기를 설계하였다.

포 구동 시스템에 대하여 계단(step) 함수 추종 최적 제어기를 설계하면 먼저 다음과 같은 선형 모델과

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned}$$

다음식으로 나타나는 성능 지수(performance index)에 대하여

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^T V(x(0), u(\bullet), T) = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^T \{u^T R u + (x - \bar{x})^T Q (x - \bar{x})\} dt$$

여기서 $\bar{x} = L\bar{y}$

$$L = C^T (CC^T)^{-1}$$

$$Q = [I - LC]^T Q_1 [I - LC] + C^T Q_2 C$$

\bar{y} : 요구 출력

\bar{y} 가 계단 함수일때 성능 지수를 최소화 시키는 최적 제어 입력 u 는, 가중치 행렬 Q_1, Q_2, R 을 각각 다음과 같이 설정하면

$$Q_1 = 0, Q_2 = 1, R = \rho$$

$$Q = C^T C, \quad Q \bar{x} = C^T \bar{y} \text{ 이고, regulator 문제로부터}$$

$$u = -\rho^{-1} B^T P x - \rho^{-1} B^T [(A + BK^T)^T]^{-1} C^T \bar{y}$$

1) 포 구동 시스템 : 가중치 행렬을 다음과 같이 주었을 경우

$$R = 0.1, \quad Q = C^T C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

최적 제어 입력 u 를 구하면

$$u = Kx - 0.642 \bar{y}$$

위식을 이용하여 포 구동 시스템을 제어한 시뮬레이션 결과를 그림 3, 5에 나타내었다.

최적제어 이론은 기본적으로 regulator 문제이므로 그림 3에 나타난바와 같이 속도를 0으로 regulating하는 면에서는 우수한 성능을 나타내나 0 이외의 속도를 추종하는 면에 있어서는 제어기 자체가 static한 constant 제어기이므로 제어 오차를 보상해줄 적분 요소가 없고 또한 제어기를 설계할 때 고려되지 않는 시스템 자체의 비선형성, 예를 들어 coulomb friction이나 stiction 등의 영향으로 인하여 0 이외의 속도를 추종 제어할 때에는 정상 상태에서 오차가 발생하게 된다. 그림 5는 일정크기의 입력신호에 대한 최적 제어기와 EPU의 포 구동 시스템의 응답을 비교하였다. 최적 제어기로 포 구동 시스템을 제어한 경우, EPU로 시스템을 제어한 경우보다 우수한 성능을 나타내나, 앞서 기술한 바와 같이 정상상태에서 오차가 발생함을 알수있다. 그림 7에서는 ZOH방법 [2]에 의한 Digital 시뮬레이션 결과를 나타내었다. 샘플링 time이 1msec 정도이하에서 만족할만한 결과를 얻을 수 있다.

2) 포탑 구동 시스템에 대한 최적 제어 입력 u 는 다음과 같다.

$$u = Kx - 0.627 \bar{y}$$

위의 최적 제어 입력을 이용하여 포탑 구동 시스템을 제어한 시뮬레이션 결과를 그림 4, 6에 나타내었다. 포탑 구동 시스템에서도 포구동 시스템과 마찬가지로 정상상태에서 오차가 발생한다. 그림 8은 ZOH에 의한 Digital 시뮬레이션 결과를 보여주며, 포의 경우보다 시스템 응답속도가 매우 느리므로 더 느린 샘플링으로도 안정된 응답특성을 보인다.

Velocity of elevation system LQR regulation

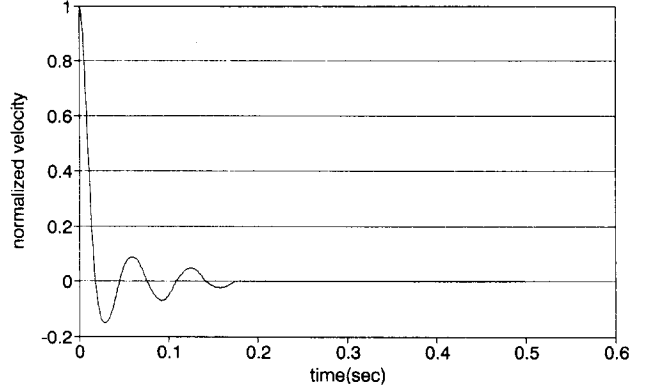


그림 3 LQR 을 이용한 output regulation (포)

Velocity of traverse system LQR regulation

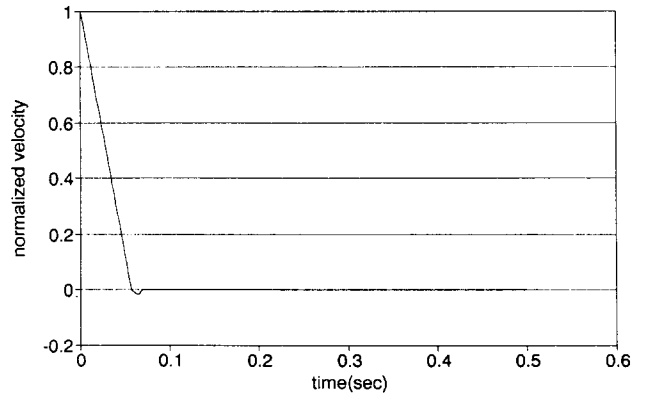


그림 4 LQR 을 이용한 output regulation (포탑)

Velocity of elevation system

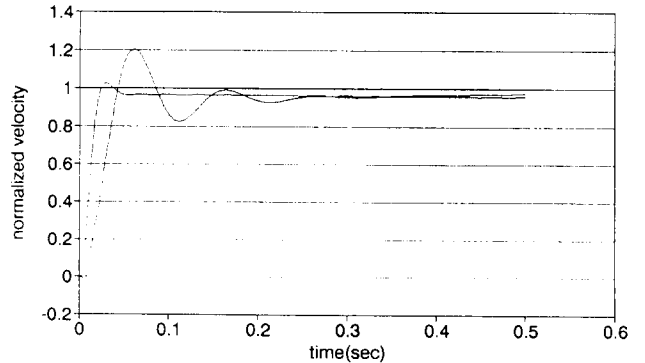


그림 5 LQR 을 이용한 단위입력 tracking (포): EPU 와 비교

— reference - - - with LQR ··· with EPU

Velocity of traverse system

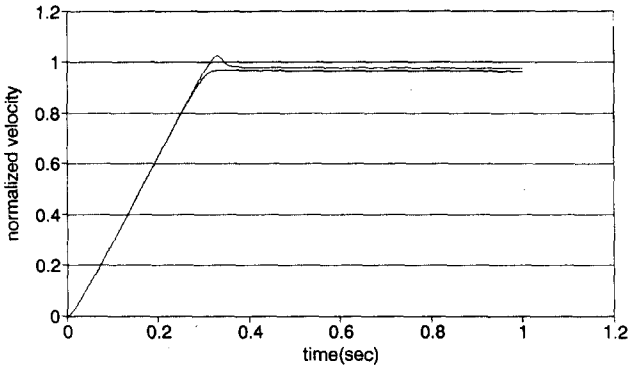


그림 6 LQR 을 이용한 단위입력 tracking (포탑): EPU 와 비교

Velocity of elevation system Digital LQR regulation

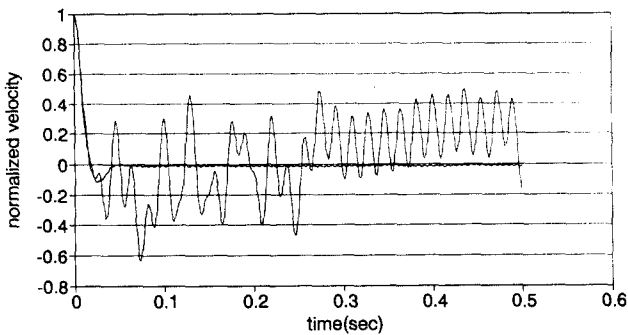


그림 7 Digital LQR 을 이용한 output regulation (포)

Velocity of traverse system Digital LQR regulation

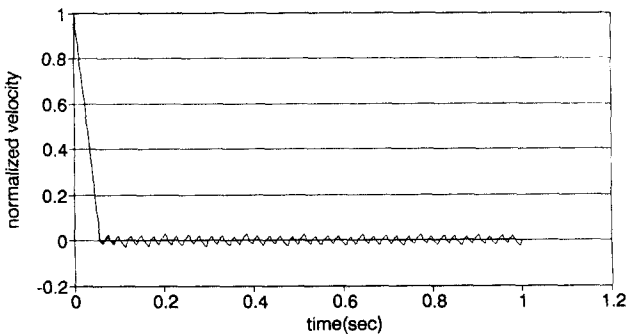


그림 8 Digital LQR 을 이용한 output regulation (포탑)

4. LQG/LTR 설계기법을 이용한 제어기 설계 [4][5]

LQG/LTR 제어 기법의 기본 목적은 시스템의 플랜트 모델에 대하여 전체 시스템의 안정 건실성(stability robustness)과 성능 건실성(performance robustness)이 가능한한 크게 유지될 수 있는 보상기(compensator)를 설계하는 것이다. 안정성과 성능 사이의 적절한 절충은 주파수 영역에서 정의되는 특이치(singular value)를 이용하여 이루어지게 된다. LQG/LTR 방법을 이용한 시스템의

제어기는 다음과 같은 두가지 기본 절차에 의해 설계되게 된다.

1. 요구되는 안정 건실성과 성능 건실성을 만족하는 목적 피어드백 루우프(Target Feedback Loop : TFL)를 구성한다.

2. TFL 구성시 얻어진 설계 변수를 이용하여 LQG/LTR 보상기를 설계한다.

o LQG/LTR 제어기의 설계

LQG/LTR 제어기는 model-based compensator 이므로 제어기 내부에서 시스템의 상태들을 추정하여 이에 상응하는 제어입력을 시스템에 보내주게 된다. 그러므로 시스템을 선형화 하여 선형모델을 구할때 선형모델이 정확히 실제 시스템을 표현할수록 LQG/LTR 제어기 자체가 고유의 성능 건실성과 안정 건실성을 유지하며 시스템을 제어할 수 있게된다. 포/포탑 구동 시스템의 개회로 특이치 궤적을 구해보면 그림 9와 같다. 주파수 영역에서의 설계요건은 단일 입출력 시스템의 경우 특이치 궤적의 교차 주파수(crossover frequency)가 결정되면 TFL의 특성이 결정되므로 TFL의 특이치 궤적의 교차 주파수를 결정해 주면 된다.

구성한 LQG/LTR 제어기를 포함한 전체 포/포탑 구동 시스템의 특이치 궤적을 그림 10에 나타내었다. 그림 11과 12는 설계된 LQG/LTR 제어기를 이용하여 포/포탑 구동 시스템을 제어한 시뮬레이션 결과이다. LQG/LTR 제어기로 시스템을 제어할 경우 기존의 EPU에 의한 제어보다 응답 속도가 빠르고 정상 상태에서 제어 오차가 없음을 알수있다. 또한 static 한 제어기인 LQR에 비하여 내부 dynamics가 포함된 LQG/LTR 제어기는 기존 입력의 크기에 상관 없이 동일한 성능을 나타냄을 알수있다.

디지털 제어기 구성시, 상태 공간에서 주어진 제어기를 bilinear transform이나 impulse invariant 방법을 이용하여 이산영역으로 transform 할 경우에는 연속영역에서와는 다른 입력에서 출력으로의 direct feedforward term 이 생기게되고 이 term에 의한 영향으로 샘플링 시간이 매우 작지않으면 디지털 시스템이 불안정해질 가능성이 있다. 그림 13, 14는 Zero-Order-Hold 방법에 의해 변환된 디지털 LQG/LTR 제어기로 포/포탑 구동 시스템을 제어한 시뮬레이션 결과이다. 안정된 응답을 얻기 위해서는 매우 빠른 샘플링이 필요함을 알수 있으며 샘플링 시간이 0.1 msec 정도에서 정상상태 제어오차가 없는 응답을 얻을 수 있다.

5. 적응제어기법을 도입한 제어기 설계 [6]

시스템의 불확실성(uncertainty)에도 불구하고 원하는 성능과 안정성을 보장하는 건실한 제어기를 설계하기 위한 연구분야가 적응제어이다. 이중 특히 모델 참조 적응제어(model reference adaptive control)는 원하는 모델 출력을 미리 설정하고, 플랜트가 이 궤적을 추종하도록 하는 방식을 말한다. 외란의 영향을 받기쉬운 본 시스템에 대하여 모델추종 적응제어기를 구현하였다.

포/포탑 구동 시스템에 대하여 원하는 출력을 나타내는 모델을 선정한다.

$$\dot{x}_m(t) = A_m x_m(t) + B_m r(t)$$

이때 상태변수 오차 e 를 $x_m - x_p$ 라고 정의하면

$$\dot{e} = A_m e + B_m r - B_p u + (A_m - A_p) x_p \text{ 이고}$$

임의의 양의 한정(positive definite)행렬 Q 에 대해 Lyapunov 방정식 $A_m^T P + P A_m = -Q$

을 만족시키는 해인 행렬 P 가 양의 한정이므로 Lyapunov function $V = e^T P e$ 를 정의하게 되면 위의 식들을 이용,

$\dot{V}(e) = -e^T Q e + 2e^T P [B_m r - B_p u + (A_m - A_p) x_p]$ 이 성립한다.

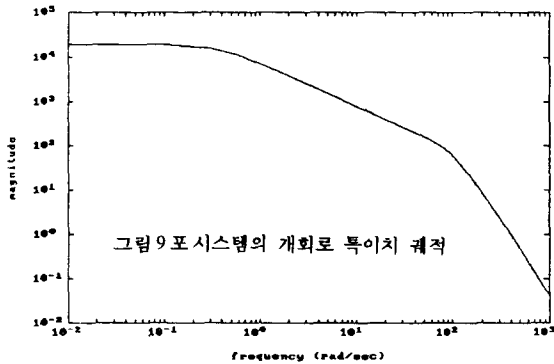
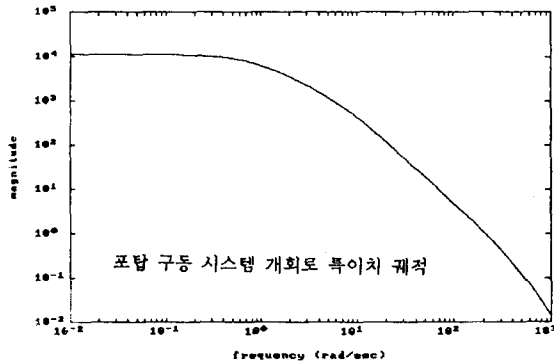
$\Delta A = A_m - A_p$, $\bar{Q} = Q - 2P \Delta A$ 라고 정의하면,

$\dot{V}(e) = -e^T \bar{Q} e + 2e^T P [B_m r - B_p u - \Delta A x_m]$ 가 성립.

이때 $e_1 p_{13} + e_2 p_{23} + e_3 p_{33} = f_c$ 라고 정의하고, $\dot{V}(e)$ 를 최소화시키는 제어입력을 다음식과 같이 dead zone을 사이에 두고 설정하였다.

$$u = \begin{cases} u_{max} & \text{if } f_{c\Delta m1} \geq \xi^b |f_d| + \theta \\ (u_{max}/\theta)(f_{c\Delta m1} - \xi^b |f_d|) & \text{if } \xi^b |f_d| + \theta \geq f_{c\Delta m1} \geq \xi^b |f_d| \\ 0 & \text{otherwise} \\ (u_{max}/\theta)(f_{c\Delta m1} - \xi^b |f_d|) & \text{if } -\xi^b |f_d| - \theta \leq f_{c\Delta m1} \leq -\xi^b |f_d| \\ -u_{max} & \text{if } f_{c\Delta m1} \leq -\xi^b |f_d| - \theta \end{cases}$$

시뮬레이션 결과는 그림 15, 16에 실었으며, 저주파수대의 Hull motion을 Disturbance로 간주하여 추가한 경우도 점근적인 모델 추종 성능을 보였다.



Velocity of elevation system
LQG/LTR control

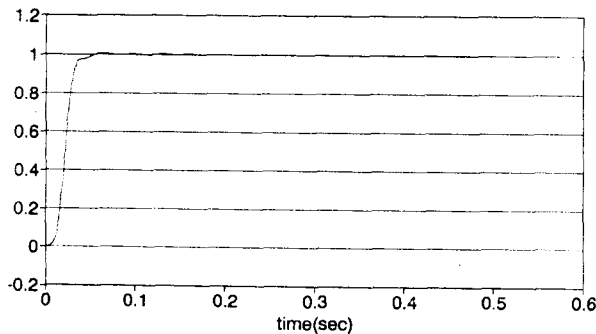
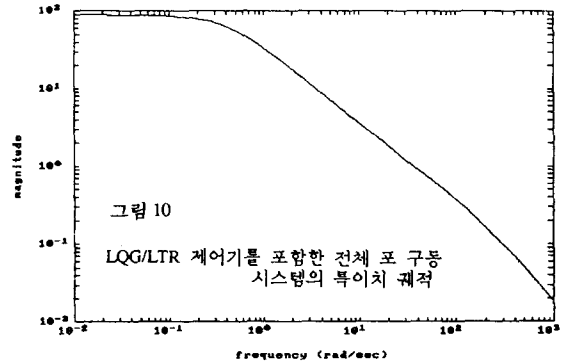
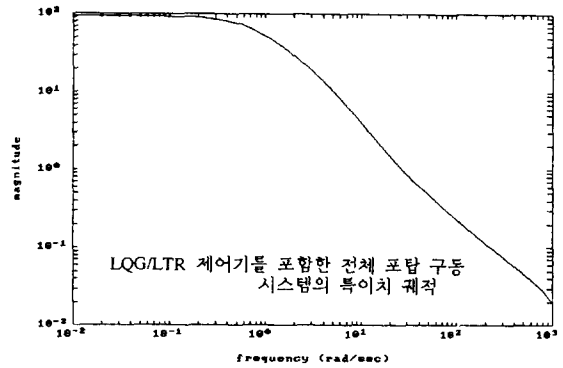


그림 11 LQG/LTR 을 이용한 단위입력 tracking (포)

— reference - - - plant output



Velocity of traverse system
LQG/LTR control

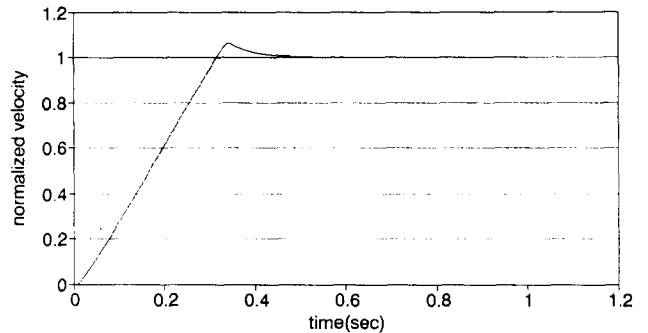


그림 12 LQG/LTR 을 이용한 단위입력 tracking (포탑)

— reference - - - plant output

6. 결론

본 연구에서는 실제 포/포탑 구동 시스템의 효과적인 제어를 위해 추정가능한 상태변수들을 이용한 최적제어기와 적응제어기를 설계하였다.

- 1) 최적제어 이론을 이용하여 설계된 제어기는 EPU에 비하여 적은 overshoot로 기준입력을 추종하였으나 정상상태에서는 선형모델에서 고려되지 않은 시스템자체의 비선형성으로 인하여 제어오차를 발생하였다. ZOH를 통한 디지털제어의 경우 1msec이하에서 안정된 특성을 얻을 수 있었다.
- 2) 정상상태에서의 오차를 없애고 명령추종성능을 높이기 위하여 전실제어기법인 LQG/LTR제어기 설계기법을 이용하여 제어기를 구성, 만족할만한 응답 특성을 얻었다. Z_{cro}

Order Hold 를 통한 디지털 제어의 경우 0.1msec 정도의 매우 빠른 샘플링이 요구되었다.

- 연산속도가 빠른 처리장치를 사용한다면 모델추종 적응제어를 이용, 만족할만한 결과를 얻을수 있을것으로 판단된다. 각 제어기법에 따른 응답특성비교는 그림 17과 같다.

*본 연구는 (주)동명중공업 위탁 연구과제의 일환으로 수행되었음.

[Reference]

- N.Coleman, M.Mattice, "High precision nonlinear, adaptive, robust weapon control system design", Proc. of ACC, June, 1992, p.p.409-412
- G. F. Franklin, J. D. Powell, M. L. Workman, *Digital Control of Dynamic systems*, Addison Wesley, 1990
- B. D. O. Anderson & J. B. Moore, *Optimal Control*, Prentice-Hall, 1989
- John C. Doyle, Gunter Stein, "Multivariable Feedback Design: Concepts for a Classical/Modern Synthesis", IEEE Trans. on Automatic Control, Vol. AC-26, No.1, February 1981 pp.4-16
- J. M. Maciejowski, *Multivariable Feedback Design*, Addison Wesley, 1989
- K.S.Narendra & A.M. Annaswamy, *Stable Adaptive Systems*, Prentice-Hall, 1989
- 이교일, 정오진, 이석재, "성능개량 전차의 GTDEU Digital Control Algorithm 개발보고서", 서울대학교 정밀기계설계 공동연구소, 1992

Velocity of elevation system Digital LQG/LTR control

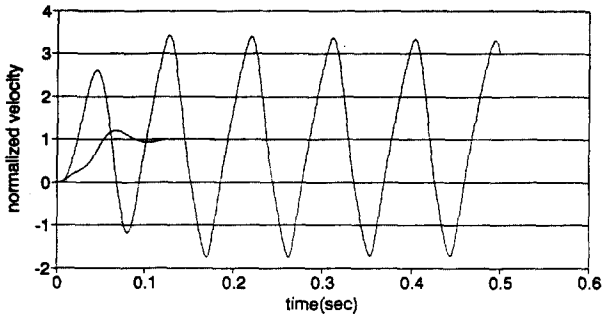
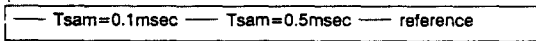


그림 13 Digital LQG/LTR 을 이용한 단위입력 tracking (포)



Velocity of traverse system Digital LQG/LTR control

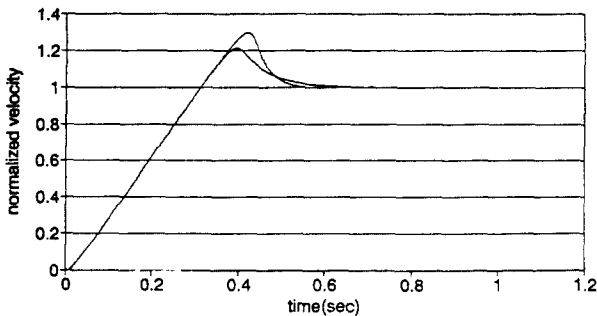
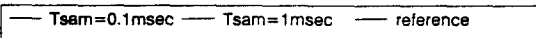


그림 14 Digital LQG/LTR 을 이용한 단위입력 tracking (포탑)



Velocity of elevation system

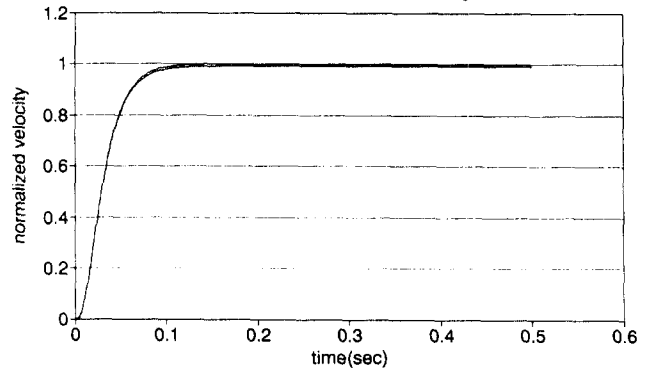
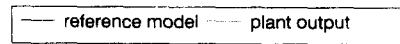


그림 15 Adaptive를 이용한 모델입력 tracking (포)



Velocity of traverse system

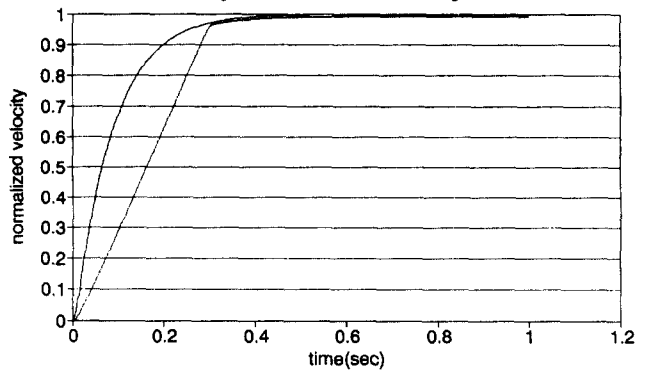


그림 16 Adaptive를 이용한 모델입력 tracking (포탑)



Velocity of elevation system with Hull motion(0.25, 1Hz)

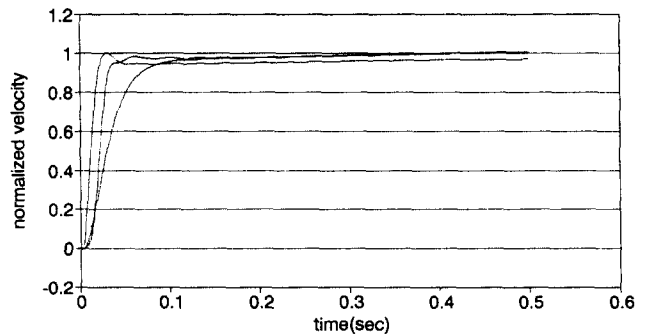


그림 17 전체 제어기의 성능비교

