

듀얼 스테이지 서보 시스템을 이용한 영상 추적장치의 정밀제어

최영준*, 강민식#

Dual Stage Servo Controller for Image Tracking System

Young Joon Choi* and Min Sig Kang#

ABSTRACT

In this paper, a dual stage servo mechanism has been developed for image tracking system to improve control performances such as small rise time, small overshoot, small settling time, small stabilization error etc. A secondary stage, a platform, actuated by a pair of electro-magnets is mounted on a conventional elevation gimbal. In this mechanism, the gimbal provides large range but slow motion and the platform provides small range but fast positioning. A sliding mode control is applied to the platform positioning to attain robust performances and stability in the presence of the disturbance related to dynamic coupling of the gimbal and the platform. Results from experiments illustrate that the suggested dual stage mechanism controlled by the sliding mode control is effective in improving responses and attenuating the disturbance response related with dynamic coupling.

Key Words : Electro-Magnetic Actuator(전자기 액츄에이터), Sliding mode control (슬라이딩 모드 제어), Dual stage system(듀얼 스테이지 시스템), Dynamic coupling(동적 연성), Image tracking system(영상추적장치)

기호설명

e_e = control input voltage
 F_c = electro-magnetic force
 I_o, γ_o = nominal current and nominal air-gap
 J_g = moment of inertia of gimbal
 J_p = moment of inertia of platform
 K_{amp} = gain of power amplifier

K_c, K_y = current and position stiffnesses
 r, w = reference input and disturbance
 u_{eq}, u_N = equivalent and reaching control inputs
 x, u = state vector and control input
 σ = sliding function
 ϕ_g, ϕ_p = position angles of gimbal and platform

접수일: 2006년 6월 28일; 게재승인일: 2007년 1월 8일

* 다사테크

교신저자: 경원대학교 기계공학과

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

1. 서론

영상추적장치는 전방의 목표 물체를 추적하기 위해 사용되는 전자광학장치로 주로 군사적 목적으로 이용된다. 이 장치는 차량에 장착되어 사용되며, 차량이 이동할 때도 표적을 추적하기 위한 추적 및 안정화 성능이 요구된다. 기존의 영상추적장치는 2-자유도 짐벌(gimbal) 구조를 가지며, 선회방향 짐벌 위에 고각방향 짐벌이 설치되고, 고각 짐벌에는 영상반사거울이나 카메라가 설치되어 영상을 획득한다. 차량이 이동할 때 고각방향 회전이 선회방향 회전에 비해 상대적으로 크기 때문에 고각 짐벌의 추적 및 안정화 성능은 특히 중요하다.

군사 목적으로 사용되는 영상추적장치는 상당한 수준의 안정화 성능을 보이고 있으나, 보다 정밀한 안정화 성능을 얻기 위한 노력이 진행되고 있으며, 안정화 오차 해석 결과 축 지지를 위해 사용되고 있는 기계적 베어링의 마찰이 주요 원인으로 지적되고 있다.¹ 영상추적장치의 짐벌 축은 차량이 이동시 발생하는 축의 진동을 감소시키기 위해 선하중을 준 베어링으로 조립된다. 선하중이 클수록 반경방향 강성은 높아지나, 반면에 축의 회전을 방해하는 마찰은 커진다. 마찰은 비선형 특성을 가지며, 스틱-슬립과 같은 불안정성 또는 위치오차를 발생시킨다.² 특히 추적장치와 같이 회전방향이 자주 바뀌는 경우 추적 및 안정화오차를 발생시킨다. 마찰의 영향을 감소시켜 제어 성능을 향상시키기 위한 많은 연구가 소개된 바 있으나, 마찰이 갖는 비선형성, 운용환경에 따른 특성 변화 등 때문에 완벽한 마찰영향 제거는 불가능하다.² 영상추적장치에서 마찰에 의한 영향을 감소시키고, 추적 및 안정화성능을 향상시키기 위해 고이득 되먹임 제어로 제어계의 대역폭을 증가시킬 수 있으나, 대역폭 증가를 위해서는 모터 용량을 키워야 된다. 그러나 모터 용량 증가는 다시 짐벌의 관성을 증가시키며, 결국 시스템이 커지는 단점이 있다. 또한 고이득 제어는 잡음 민감도를 높여 공진 유발의 원인이 되기도 한다.

본 논문은 기존 영상추적장치가 갖는 이러한 문제의 해결 방안으로 새로운 기구적 메커니즘과 이 메커니즘의 특성에 적합한 제어 알고리즘을 제시하는데 목적을 두었다. 메커니즘으로는 듀얼 스테이지(dual stage) 구조(기존의 모터 구동 짐벌에 전자기 액츄에이터(EMA: Electro-magnetic actuator)로

구동되는 플랫폼을 추가한 구조)를 제시한다. 이 메커니즘은 구동범위는 크나 응답 속도가 느린 모터-짐벌구동과 구동범위는 좁지만 응답속도는 빠른 EMA-플랫폼 구동을 결합하여 카메라가 장착되는 플랫폼의 빠른 응답, 광대역화, 정밀 안정화를 도모한다. EMA-플랫폼 구동계는 구조가 간단하고, 크기가 작으며, 마찰이 작아 정밀 위치제어가 가능하다.

듀얼 스테이지 구조는 하드디스크 드라이브(hard disk drives)의 seeker 서보장치에 많이 적용되는 방법으로, 구동계의 대역폭을 확장시켜 데이터 읽기-쓰기 속도와 정확성 향상을 목적으로 활발하게 연구되고 있다.^{3,4,5} 듀얼 스테이지 시스템의 제어 방법으로는 대역폭의 증가, 강인성 등을 위해 영위상오차 앞먹임 제어(zero phase error feedforward control),⁶ 슬라이딩모드제어(SMC: sliding mode control)⁷ H_2 , H_∞ -synthesis 를 이용한 강인제어 기법^{8,9} 등이 사용되고 있다.

모터-짐벌과 EMA-플랫폼을 갖는 듀얼 스테이지에서 두 구동계는 상호 동력학적 연성이 존재한다. 하드디스크 드라이브에서 사용되는 듀얼 스테이지의 경우 이 연성이 작아 무시되고 있으나, 본 논문에서 제시하는 듀얼 스테이지 시스템에서는 이 연성이 커서 이를 고려한 제어기 설계가 필요하다.

슬라이딩모드 제어는 제어계의 동특성과 외란에 무관하게 제어 목적에 적합한 슬라이딩 평면을 정의 할 수 있고, 계의 상태를 이 평면에 유지시킬 수 있다.^{10,11,12} 따라서 듀얼 스테이지 서보계에서 제어계의 연성을 제거토록 슬라이딩 평면을 설계하면 짐벌 구동계와 플랫폼 구동계의 제어를 독립적으로 설계할 수 있는 장점이 있다.

이상의 듀얼 스테이지 구조를 갖는 실험 모델을 제작하고, 슬라이딩모드 제어를 적용하여 추적 및 안정화 성능을 규명하였다.

2. 듀얼 스테이지 시스템

2.1 듀얼 스테이지 구조

차량이 주행할 때 방위각 방향 운동에 비해 고각방향 운동이 상대적으로 크고 고주파 특성을 가지므로 영상추적장치의 고각방향 추적 및 안정화 성능은 더욱 중요하다. 기존 영상추적장치에서는 목표물 추적 및 안정화를 위해 고각 짐벌부 전

체를 구동해야 되므로 응답속도를 높이는데 한계가 있으며, 또한 선하중을 주어 조립된 베어링의 마찰은 안정화 오차를 유발시키는 요인이 된다.¹ 이러한 문제점을 개선하기 위해 Fig. 1 와 같이 듀얼 스테이지 구조의 영상 추적장치 고각 기구부를 구성하였다. 듀얼 스테이지 시스템은 기존 영상추적장치에서 사용되는 DC 서보 모터로 구동되는 고각 짐벌 위에 추가적으로 전자기 액츄에이터로 구동되는 플랫폼이 설치되며, 이 플랫폼에 목표물의 영상을 획득하는 카메라가 설치된다.

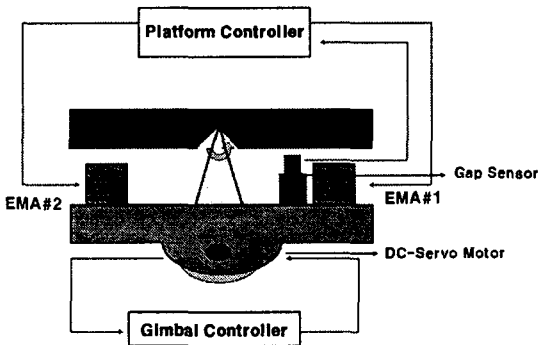


Fig. 1 Schematic drawing of dual stage servo system

플랫폼은 중앙 힌지점을 중심으로 회전하므로 마찰이 거의 없으며, 좌우 양 끝 짐벌 부분에 설치된 한 쌍의 전자기 액츄에이터에 의해 구동된다. 전자기 액츄에이터는 구조가 간단하며 응답속도가 빠르고, 비접촉 동력전달이 가능하여 기계적 마찰이 없는 장점이 있다. 플랫폼 제어는 위치 오차에 따른 제어 신호가 전력 증폭기를 통한 후 서로 반대 부호인 제어 전류를 전자석 코일에 인가하게 되며, 이 때 발생된 전자기력이 플랫폼에 전달된다. 실제 코일에는 바이어스(bias) 전류와 제어전류의 합이 흐르게 된다. 짐벌 기준 플랫폼의 회전각은 비접촉 간극센서를 이용하여 측정한다. 액츄에이터와 센서가 플랫폼 양단에 위치하므로 플랫폼의 길이가 길어질수록 회전토크가 커지고, 각도 검출 분해능이 높아지나, 반면 플랫폼의 회전구동 범위는 좁아진다.

듀얼 스테이지 시스템에서 모터-짐벌의 구동계는 구동범위가 넓으나 응답속도가 느리며, 전자기-플랫폼 구동계는 응답속도가 빠른 대신 구동범위가 좁다. 따라서 두 구동계의 결합을 통해 넓은 구

동범위, 넓은 구동대역폭을 갖는 광대역 고정밀 안정화가 가능하다.

2.2 전자기 액츄에이터 (EMA)

Fig. 1 의 EMA-플랫폼 구동계는 Fig. 2 와 같이 한쌍의 전자석 내에 플랫폼이 있는 것으로 등가적으로 나타낼 수 있다. 단, 플랫폼 중량은 무시한다. 플랫폼에 가해지는 전자기력은 식(1)과 같이 코일에 흐르는 전류의 제곱에 비례하고, 공극의 제곱에 반비례하는 비선형 특성을 갖는다.

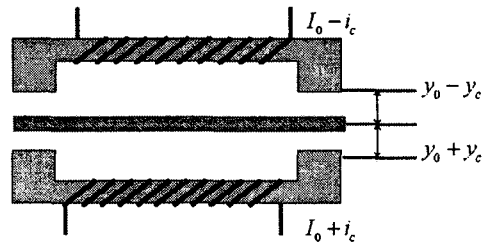


Fig. 2 Principle of EMA

$$F_c = \frac{\mu_0 N^2 A}{4} \left[\left(\frac{I_0 + i_c}{y_0 - y} \right)^2 - \left(\frac{I_0 - i_c}{y_0 + y} \right)^2 \right] \quad (1)$$

여기서 A 는 자극의 단면적, N 은 코일 감은 수, I_0 는 바이어스 전류(bias current), i_c 는 제어 전류, y_0 는 공칭공극, y 는 전자석과 플랫폼 사이의 공칭공극을 기준으로 한 공극의 변화이며, μ_0 는 공기 중에서의 투자율 $4\pi \times 10^{-7} H/m$ 을 나타낸다.

제어전류 i_c 와 공극 y 가 작다고 가정하면 식 (1)의 전자기력은 다음과 같이 선형화 된다.

$$F_c(y, i_c) \cong K_y y + K_c i_c \quad (2)$$

여기서 $K_y = \frac{\mu_0 N^2 A I_0^2}{y_0^3}$, $K_c = \frac{\mu_0 N^2 A I_0}{y_0^2}$ 는 각각 EMA 의 위치강성(position stiffness)과 전류강성(current stiffness)을 나타낸다

전자석 코일에 전류를 공급하는 전력 증폭기 내부에 전류 되먹임 회로를 구성하여 입력전압에 비례하는 전류를 얻을 수 있다. 즉,

$$i_c = K_{amp} e_c \quad (3)$$

여기서, e_c 는 제어 입력전압, K_{amp} 는 전력증폭기의 이득이다.

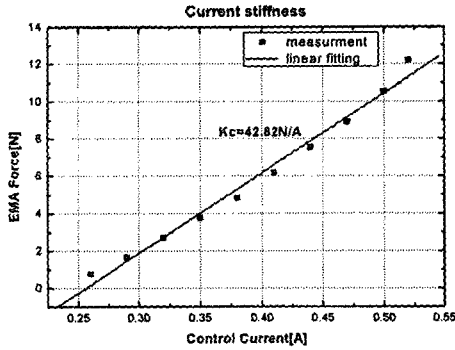


Fig. 3 Relation between control current and EMA force

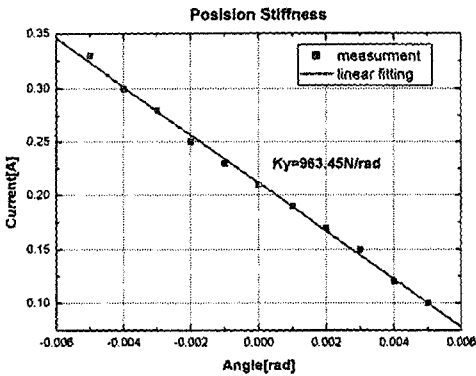


Fig. 4 Relation between air-gap and coil current

식 (2)와 (3)에서 EMA 의 주요 파라미터는 K_y , K_c , K_{amp} 이다. K_{amp} 는 식 (3)에서와 같이 전압 e_c 와 전류 i_c 의 관계를 측정하여 얻을 수 있다. K_y 와 K_c 는 식(2)에서 해석적으로 구할 수 있지만, 전자석의 조립 조건에 따라 변화하므로 실험적방법으로 구하는 것이 정확성을 높일 수 있다.

Fig. 1 의 실험장치에서 전류 강성 K_c 를 측정하기 위해 우선 PD-제어를 이용하여 공칭공극 위치로 플랫폼을 위치시킨 후, 이 위치에서 하중계로 플랫폼을 구속시킨다. 기준입력을 변경시키면 플랫폼이 회전하지 못하므로 전류가 변화되며, 이 때 플랫폼에 전달되는 힘을 하중계로 읽는다. Fig. 3 은 이 때 측정된 전류와 힘의 관계를 나타낸 것으로 실험한 전류 범위에서 선형성을 잘 만족함을 알

수 있으며, 직선의 기울기로부터 구한 전류강성은 $K_c = 42.82 \text{ N/A}$ 이다.

위치 강성 K_y 측정을 위해 PID-제어를 이용하였고, 플랫폼의 회전각과 이 때 코일에 흐르는 전류를 측정하였다. Fig. 4 는 측정된 회전각과 전류로 선형성이 잘 만족됨을 알 수 있다. 이 결과에서 얻은 직선의 기울기와 전류강성 K_c 로 부터 위치 강성은 $K_y = 963.45 \text{ N/rad}$ 으로 결정되었다. Fig. 3 과 4 의 실험에서 짐벌은 고정된 상태이다.

2.3 듀얼 스테이지 시스템의 운동 방정식

듀얼 스테이지 시스템은 Fig. 5 와 같이 간략화 나타낼 수 있다. 하부는 모터로 구동되는 고각 짐벌, 상부는 EMA 로 구동되는 플랫폼을 나타낸다. 운동방정식은 다음과 같다.

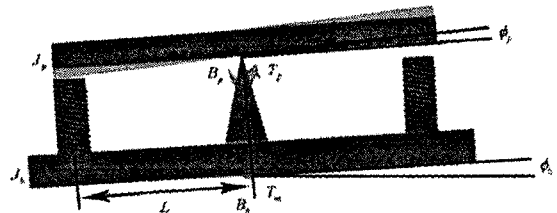


Fig. 5 Dynamic model of dual stage servo system

$$J_g \ddot{\phi}_g + B_g \dot{\phi}_g = -T_p + N_m T_m \quad (4.1)$$

$$J_p (\ddot{\phi}_p + \ddot{\phi}_g) = T_p \quad (4.2)$$

$$T_p = F_c L \quad (4.3)$$

여기서 ϕ_g 와 ϕ_p 는 각각 짐벌의 회전각, 짐벌 기준 플랫폼 회전각을 나타내며, J_g , B_g 는 각각 짐벌의 관성모멘트와 점성마찰계수, T_p 는 EMA 에 의해 발생된 토크, T_m 은 모터 토크, N_m 은 모터에 결합된 기어의 기어비, J_p 는 플랫폼의 관성모멘트이다. F_c 는 식(2)의 전자기력, L 은 회전 중심축에서 전자석까지의 거리이다.

식(2), (3)을 (4)에 대입하여 정리하면 운동방정식은 다음과 같다.

$$J_g \ddot{\phi}_g + B_g \dot{\phi}_g = -K_y L^2 \phi_p - K_c K_{amp} L e_c + N_m T_m \quad (5)$$

$$J_p \ddot{\phi}_p - K_y L^2 \phi_p = K_c K_{amp} L e_c - J_p \ddot{\phi}_g$$

식(5)에서 짐벌과 플랫폼은 동력학적으로 연성

되어 있으며, 플랫폼은 불안정함을 알 수 있다.

Fig. 1 의 실험 모델에서 시스템 파라미터는 Table 1 과 같다.

Table 1 System Parameters

Symbol	Parameter	Value
J_g	Gimbal moment of inertia	0.00322 [Kg m ²]
J_p	Platform moment of inertia	0.00125 [Kg m ²]
L	Length of platform	85 [mm]
I_o	Nominal current	4 [A]
γ_o	Nominal air-gap	0.58 [mm]

3. 슬라이딩모드 제어

듀얼 스테이지 시스템은 2-입력 1-출력을 갖는 다중입출력계로 단일입출력계에 비해 제어기 설계가 복잡하고, 물리적 해석이 까다롭다. 또한 식(5)에서와 같이 짐벌과 플랫폼은 동력학적으로 연성되어 있다. 따라서 슬라이딩모드 제어를 적용하여 비연성화시켜 독립적인 두 개의 모델로 구분하면, 제어기 설계가 수월해지며, 듀얼 스테이지 시스템의 제어 특성을 충분히 고려한 제어기 설계가 가능하다. 식(5)를 다음과 같이 다시 쓰면,

$$(J_g + J_p)\ddot{\phi}_g + B_g\dot{\phi}_g = N_m T_m + d_g \quad (6.1)$$

$$J_p\ddot{\phi}_p + B_p\dot{\phi}_p - K_y L^2 \phi_p = K_c K_{amp} L e_c + d_p \quad (6.2)$$

여기서, $d_g = -J_p\ddot{\phi}_p - B_p\dot{\phi}_p$, $d_p = -J_p\ddot{\phi}_g$ 는 연성을 일으키는 요소이며, 또한 모델 불확실성 및 나머지 총괄적인 외란을 포함할 수 있다. 듀얼 스테이지 시스템에서 짐벌의 관성이 크고 모터는 하모닉 드라이브를 채택하고 있어 d_p 가 짐벌응답에 미치는 영향은 무시할 수 있는 수준이다.

슬라이딩모드 제어는 모델에 불확실성이 존재하거나 외란이 존재할 경우, 이에 관계없이 폐회로가 원하는 동력학 특성을 갖도록 설계할 수 있는 제어방법으로, 구조가 간단하여 유용하게 사용된다.¹¹

플랫폼 운동방정식, 식(6.2),를 상태공간에서 나타내면 식(7)과 같다. 여기서 계단입력이나 일정한 크기를 갖는 외란에 의한 정상상태 오차 제거를

위해 상태변수에 오차의 적분항을 포함시킨다.

$$\dot{x} = Ax + B_u u + B_r r + B_w w \quad (7)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & K_y L^2 / J_p & -B_p / J_p \end{bmatrix} \quad B_u = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$B_r = \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad B_w = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$x = \left[\int (\phi_p - r) dt \quad \phi_p \quad \dot{\phi}_p \right]^T$$

$$u = K_c K_{amp} L e_c / J_p, \quad w = d_p / J_p$$

여기서 r 은 기준위치입력을 나타낸다.

식(7)에서 (A , B_u) 은 가제어성을 만족하며, 외란은 정합조건(match condition)을 만족한다.

슬라이딩모드 제어를 위해 다음과 같이 행렬 S 와 상태변수로 슬라이딩 평면을 정의한다.

$$\sigma(t) = Sx(t) \quad (8)$$

슬라이딩 제어입력은 등가제어입력(equivalent control input) $u_{eq}(t)$ 와 도달제어입력(reaching control input) $u_N(t)$ 의 합으로 주어진다. 즉,

$$u_p(t) = u_{eq}(t) + u_N(t) \quad (9)$$

등가제어입력 $u_{eq}(t)$ 은 계를 슬라이딩 평면에 유지시키는 입력으로, 외란이 없는 시스템에서 슬라이딩 평면의 미분을 영으로 하여 구한다. 즉,

$$u_{eq} = -(SB_u)^{-1} \{SAx + SB_r r\} = 0 \quad (10)$$

단, SB_u 는 비특이(nonsingular) 행렬로 가정한다.

도달제어입력 $u_N(t)$ 은 계의 상태를 슬라이딩 평면에 도달시키는 입력으로 다음과 같이 정의하자.

$$u_N = -(SB_u)^{-1} \mu \sigma - (SB_u)^{-1} \rho \operatorname{sgn}[\sigma], \quad \mu > 0 \quad (11)$$

$u_N(t)$ 의 도달법칙(reaching condition) 만족성을 평가하기 위해 Lyapunov 함수 $V(t) = 0.5\sigma(t)^2$ 를 정의하고, 그 도함수를 구하면 다음과 같다.

$$\dot{V} = -\mu\sigma^2 + \sigma(t)\{SB_w w - \rho \operatorname{sgn}[\sigma]\} \quad (12)$$

따라서 만약 다음과 같은 ρ 가 존재한다면,

$$|SB_w w| < \rho \quad (13)$$

식(12)의 도함수는 음이 되어 도달법칙을 만족한다. 식(13)에서 짐벌의 연성에 의한 외란 및 불확실성의 합인 w 는 유한한 값을 가지므로 식(13)을 만족하는 유한한 ρ 가 존재하게 된다.

실제 적용시 체터링(chattering) 방지를 위해 제어기의 부호함수 대신 다음의 근사식을 사용하여 체터링을 방지할 수 있다.

$$\operatorname{sgn}[\sigma(t)] \cong \frac{\sigma(t)}{|\sigma(t)| + \varepsilon}, \quad \varepsilon > 0 \quad (14)$$

이 제어기는 슬라이딩모드 제어기와는 차이가 있지만, ρ 가 클 경우 슬라이딩모드 제어의 안정성을 보장할 수 있다.

최종적으로 슬라이딩 제어입력은 식(9), (10), (11)에서 다음 식으로 정리된다.

$$u = -(SB_w)^{-1} \{SAx + SB_r r + \mu\sigma + \rho \operatorname{sgn}[\sigma]\} \quad (15)$$

이 제어기의 선형부, $\rho = 0$ 인 경우는 식(7)의 상태변수 정의에 따라 PID-제어기 구조를 갖는다.

식(8)에서 슬라이딩 평면을 정의하는 행렬 S 를 다음과 같이 선정하자.

$$S = [w_n^2 \quad 2\zeta w_n \quad 1] \quad (16)$$

식(16)의 행렬과 식(7), (8) 및 식(15)의 제어기를 이용하여 폐회로 동력학 방정식을 구하면,

$$(D + \mu)(D^2 + 2\zeta w_n D + w_n^2)\phi_p(t) = w_n^2(D + \mu)r(t) + B_w \dot{w} - \rho D\{\operatorname{sgn}[\sigma]\} \quad (17)$$

여기서 D 는 미분기 d/dt 를 나타낸다.

따라서 폐회로는 ζ, ω_n 으로 정의되는 두 개의 복소 극점과 $s = -\mu$ 에 단일 극점을 갖게 되므로, 쉽게 폐회로 극점 배치가 가능하다. 또한 체터링이 발생되지 않는 경우 일정 크기의 기준입력과 외란에 대한 정상상태 오차는 제거된다.

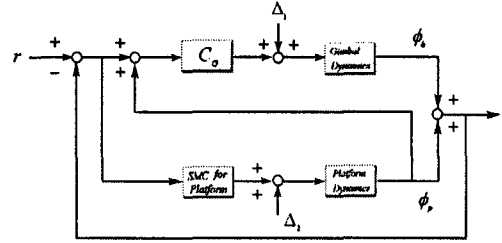


Fig. 6 Block diagram of dual-stage control system

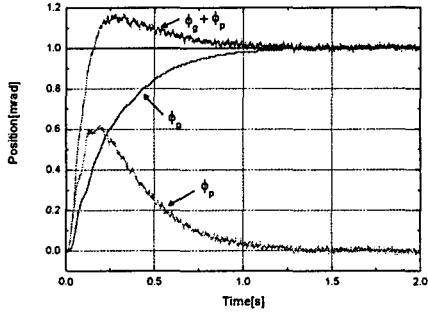
슬라이딩모드 제어를 포함한 전체적인 듀얼 스테이지 시스템 제어는 다음 Fig. 6 의 블록선도로 나타낼 수 있다. 짐벌의 제어기 C_g 는 일반적인 PID-제어를 적용하며, 플랫폼은 식(15)의 슬라이딩모드 제어를 적용한다. Δ_1 과 Δ_2 는 연성에 의한 외란과 기타 파라미터 불확실성, 선형화 오차 등을 포함한 전체 외란을 나타낸다.

4. 실험 결과 및 논의

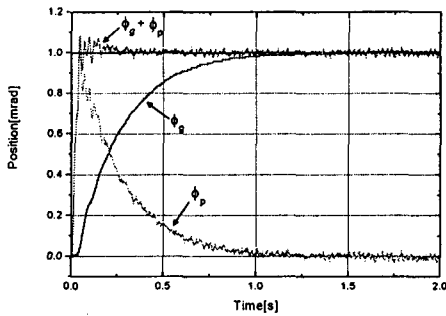
Fig. 6 의 제어기 구조를 듀얼 스테이지 시스템에 적용하였다. 식(16)의 행렬 S 는 감쇠비 $=0.7$, 고유진동수 $\omega_n=30\text{Hz}$, 그리고 식(11)에서 $\mu=400$ 을 선정하였다. 따라서 폐회로는 $\mu=0.7$, $\omega_n=30\text{Hz}$ 인 복소 극점이 나타내는 동적특성에 지배받게 된다. 짐벌은 PID-제어를 적용하여 계단입력에 대한 정상상태 오차를 제거하였으며, 제어기 이득은 사용된 모터의 용량 제한을 고려하고 기계적 공진 방지를 위해 폐회로 시정수가 0.25 초가 되도록 결정하였다. 제어에서 샘플링 주파수는 1kHz 로 택하였다. 앞에서 논의한 바와 같이 식(15)의 슬라이딩 모드 제어기의 선형부는 PID-제어기 구조를 가지며, 이 선형제어에 의해 플랫폼은 안정화된 것을 확인하였다.

위의 제어 이득을 적용하여 시스템의 추적 성능 규명을 위해 계단응답을 구했다. 기준 위치입력, Fig. 6 의 r ,이 플랫폼 구동범위($\pm 6\text{mrad}$)보다 작은 경우와 큰 경우로 나누어 실험하였다. Fig. 7 은 기준 위치입력이 플랫폼 구동 범위보다 작은 1mrad 일 때 계단응답으로, Fig. 7a 는 슬라이딩 모드 제어기에서 비선형 항을 제외한 선형제어를 적용한 경우, Fig. 7b 는 슬라이딩모드 제어를 적용한 경우 응답이다. ϕ_g 는 짐벌의 회전각, $\dot{\phi}_g$ 는 짐벌

기준 플랫폼 회전각, $\phi_g + \phi_p$ 는 플랫폼의 절대 회전각을 나타낸다.



(a) Linear Control



(b) Sliding mode control

Fig. 7 Step response of dual stage system-small input case

두 경우에서 짐벌 응답은 유사하며, 플랫폼의 응답 속도가 짐벌 응답 속도 보다 빠름을 알 수 있다. Fig. 7a 에서 플랫폼 절대 회전각은 짐벌 응답에 비해 빨라지지만, 과도응답이 크고 정착시간은 짐벌 응답과 비슷한 수준이다. 이는 짐벌의 회전운동이 플랫폼 구동계에 외란으로 작용하기 때문으로 분석된다. 반면에 Fig. 7b 의 경우 짐벌 운동에 의한 외란이 슬라이딩모드 제어에 의해 감소되어 플랫폼은 초기에 기준 위치에 도달된 후 짐벌의 회전에도 불구하고 기준입력 위치를 유지하는 형태를 보이며, 결과적으로 빠른 정착시간, 작은 과도응답을 보인다. 이 응답 특성으로부터 슬라이딩모드 제어에 의한 비연성화로 플랫폼이 슬라이딩 평면 근처에 잘 유지되고 있는 것으로 분석된다.

실제 추적장치에서 기준 입력은 플랫폼 구동 범위를 초과할 수 있다. Fig. 8 은 기준위치입력이

이 구동범위를 초과한 $1^\circ(17.4\text{mrad})$ 의 계단일 때 응답이다. 이 때 플랫폼 제어에서는 포화구간 $\pm 4\text{mrad}$ 을 정하여 플랫폼이 구동 범위 내에서 작동되도록 하였다. 그림에서 ϕ_g , ϕ_p , $\phi_g + \phi_p$ (SMC control)은 각각 슬라이딩모드 제어 시 짐벌, 짐벌 기준 플랫폼 회전각, 플랫폼 절대 회전각이며, $\phi_g + \phi_p$ (Linear control)은 선형제어 시 플랫폼 절대 회전각이다.

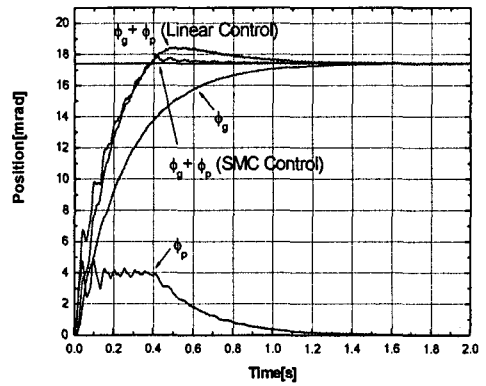


Fig. 8 Step response of dual stage system-large input case

슬라이딩 모드 제어 시 플랫폼은 빨리 포화 위치까지 구동되어 포화 위치에 정착되며, 위치오차가 포화 범위 이내로 들어오는 약 0.4 초 부근에서는 짐벌의 구동과 반대방향으로 회전하여 플랫폼의 절대위치가 기준입력을 유지토록 구동됨을 알 수 있다. 선형제어를 적용한 경우와 비교하면 플랫폼의 상승시간은 거의 유사하며, 위치오차가 플랫폼 구동범위 이내로 들어오는 시점 이후에서 슬라이딩모드 제어가 상대적으로 작은 과도응답, 빠른 정착 성능을 보임을 알 수 있다. 상승시간이 비슷한 것은 플랫폼 구동범위의 제한 때문이며, 위치오차가 플랫폼 구동범위 내로 들어온 이후 응답은 슬라이딩모드 제어에 의해 많은 향상 보이게 된다. 이 결과는 앞의 Fig. 7 에서 슬라이딩모드 제어가 보인 특성과 일치된다. 선형제어와 슬라이딩모드 제어 시 과도응답은 각각 6.3%, 2.3%이다.

차량이 이동시 카메라가 목표물을 추적하기 위해서는 플랫폼이 차량의 회전과 반대방향으로 회전해야 된다. 이 때 듀얼 스테이지 시스템에는 차량의 회전각과 크기는 같고 방향이 반대인 기준

위치입력이 제공된다. 차량의 고각방향 회전 운동은 약 10Hz 대역폭을 갖는 랜덤 운동으로 가정할 수 있으므로,¹ 이 주파수 범위에서 듀얼 스테이지 시스템의 추적 성능을 실험하였다.

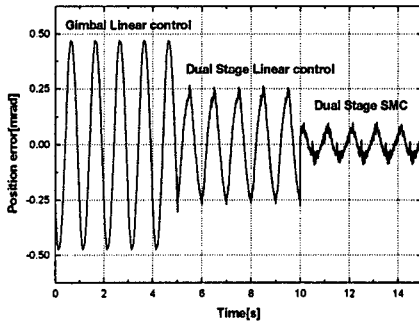


Fig. 9 Position error for 1 Hz sinusoidal reference input

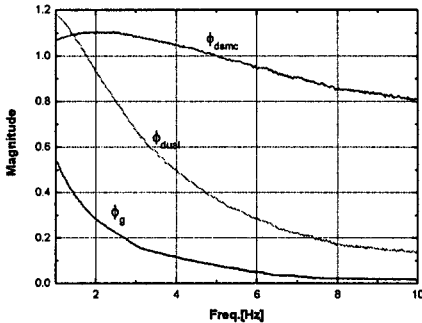


Fig. 10 Frequency response functions between reference input and platform position

Fig. 9 는 크기가 4mrad 이고 주파수가 1Hz 인 기준입력에 대한 플랫폼 절대위치 응답으로, 앞 부분부터 짐벌의 제어 응답, 듀얼 스테이지+선형제어 응답, 듀얼 스테이지+슬라이딩 모드제어 응답의 위치오차를 보인다. 오차의 크기는 각각 0.46mrad, 0.26 mrad, 0.08mrad 로, 듀얼 스테이지 시스템이 짐벌 구동계에 비해 위치오차가 작으며, 듀얼 스테이지+슬라이딩모드제어가 가장 우수한 제어 성능을 보였다. 동일한 방법을 이용하여 관심 대역폭에서 구한 기준입력과 위치응답간의 주파수 응답함수는 Fig. 10 과 같다. 짐벌 구동에 비해 듀얼 스테이지 시스템의 대역폭이 크며, 선형제어의 경우 2.9Hz, 슬라이딩모드 제어의 경우 약 12Hz 로 증가하였다.

대역폭 증가는 추적 성능 향상을 의미하므로, 슬라이딩모드 제어가 보다 선형제어에 비해 높은 추적 성능을 보이게 된다.

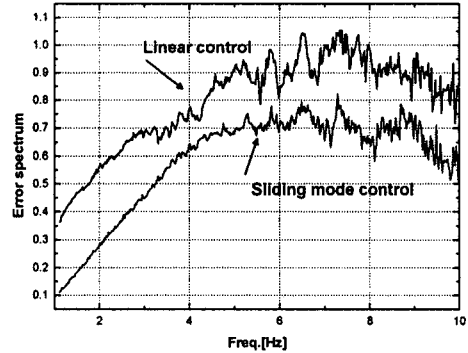


Fig. 11 Sliding mode control of dual stage system-step response

영상 추적장치는 차량이 기동 중에도 플랫폼은 항상 절대 좌표계 기준 일정 회전각을 유지하는 안정화 성능이 매우 중요하다. 안정화 성능을 실험하기 위해서는 듀얼 스테이지 시스템 전체를 회전시켜야 된다. 그러나 이는 실험실에서 실현하기 어려워, 간접적인 방법으로 안정화 성능을 규명하였다. 즉, 차량 기동시 짐벌의 안정화 오차를 짐벌로 재현하고 이 때 플랫폼의 절대각이 일정한 각을 갖도록 제어하였다. 차량 기동시 기존 영상 안정화 장치의 안정화 오차는 10Hz 대역폭을 갖는 랜덤 운동으로 가정되므로,¹ 플랫폼 안정화 오차의 주파수 특성을 규명하기 위해 짐발을 1Hz 에서 10Hz 까지 sine sweep 방법을 이용하여 구동하고, 각 주파수에서 짐벌의 회전각과 플랫폼의 안정화 오차 사이의 주파수 응답을 구하였다. 따라서 이 주파수 응답이 작을수록 안정화 성능이 우수하다. Fig. 11 은 실험결과로 슬라이딩 모드제어가 선형제어에 비해 오차의 크기가 30% - 50% 수준임을 알 수 있다. 이러한 결과는 앞에서의 추적 성능 실험에서와 같이 구동계의 연성 제거에 의한 효과로 분석된다.

이상의 실험 결과로 본 논문에서 제시한 듀얼 스테이지 구조와 슬라이딩 모드 제어는 영상추적 장치의 기준입력 추종 성능 및 안정화 성능 향상에 효과가 있으며, 이 효과는 듀얼 스테이지 구조가 갖는 대역폭 증가와 슬라이딩 모드제어를 통한

짐벌과 플랫폼의 동력학적 연성 제거에서 오는 것임을 알 수 있다.

5. 결론

영상추적장치의 추적 및 안정화 제어 성능 향상을 위해서 듀얼 스테이지 구조의 안정화 메커니즘과 이 시스템의 특성에 적절한 제어기 설계방법으로 슬라이딩 모드 제어를 제안하였다. 듀얼 스테이지 메커니즘은 큰 구동범위, 느린 응답속도 특성을 갖는 모터-짐벌구동과 작은 구동범위, 빠른 응답속도특성을 갖는 EMA-플랫폼 구동의 결합을 통해 빠른 응답, 광대역화, 정밀 안정화를 시도하였으며, 짐벌과 플랫폼 구동계의 동력학적 연성을 슬라이딩모드 제어를 통해 제거토록 하였다. 실험을 통해 제안된 메커니즘이 기존의 짐벌 구조에 비해 대역폭을 증가시킬 수 있어 제어 성능을 향상시킬 수 있음을 확인 하였으며, 또한 슬라이딩 모드 제어를 이용하여 연성된 짐벌과 플랫폼 동력학을 분리함으로써 제어기 설계가 간단하고, 추적 및 안정화 성능을 향상시킬 수 있음을 검증하였다.

본 실험 모델을 기존 영상 추적장치에 적용하기 위해서는 적용 시스템에 적합하도록 수정이 필요하지만, 실험 모델의 기본적인 구조 및 제어 기법은 추적장치의 추적 및 안정화 성능 향상에 도움이 될 것으로 기대된다.

참고문헌

- Kang, M. S., Lyu, J., Seok, H. D. and Lim, J. K., "Analysis of Stabilization Error Sources for Main Battle Tank," Proceedings of Seminar for Ground Weapon Systems Development, pp.12-15, 2004.
- Amstrong, B., Dupont, P. and Canudas, C., "A Survey of Models, Analysis Tools and Compensation Methods for Control of Machines with Friction," Automatica, Vol. 30, No. 7, pp.1083-1138, 1994.
- Kobayashi, M. and Horowitz, R., "Tracking Seek Control for Hard Disk Dual-Stage Servo Systems," IEEE Trans. Magnetics, Vol.37, No.2, pp.949-954, 2001.
- Semba, T. and Hirano, T., "Dual-Stage Servo Controller for HDD Using MEMS Microactuator," IEEE Trans. Magn, Vol. 35, No. 5, pp. 2271-2273, 1999.
- Park, Y. P. and Yang, H. S., "Technology Trends for High Recording Density in HDD," J. of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 18, No. 4, pp.9-19, 2001.
- Schroek, S. J. and Messner, W.C., "On Controller Design for Time-Invariant Dual-Input Single-Output Systems," Proc. of American Control Conference, Vol. 6, pp.4122-4126, 1999.
- Lee, S. H., Baek, S. E. and Kim, Y. H., "Design of a Dual-Stage Actuator Control System with Discrete-Time Sliding Mode for Hard Disk Drives," Proc. IEEE Conf on Decision and Control, Vol. 4, pp.3120-3125, 2000.
- Maciejowski, J. M., "Multivariable Feedback Design," MA:Addison-Wesley, pp.1-210, 1989.
- Burl, J. B., "Linear Optimal Control, H2 and H-infinity Control," Printice Hall, pp. 179-432, 1999.
- Jeonh, H. S. and Utkin, V. I., "Sliding Mode Tracking Control of Systems with Unstable Zero Dynamics- Variable Structure Systems, Sliding Mode and Nonlinear Control," London: Springer-Verlag, pp. 303-328, 1999.
- Edwards, C. and Spurgeon, S., "Sliding Mode Control," Taylor & Francis, pp.1-92, 1998.
- Yeh, T. J. and Chung Y. J., "Sliding Control of Megnetic Bearing Systems," Proc. of American Control Conference, Vol. 3, pp.1622-1626, 2000.
- Xu, J. X., Lee, T. H. and Pan, Y. J., "On the Sliding Mode Control for DC Servo Mechanisms in the Presence of Unmodeled Dynamics," Mechatronics, Vol. 13, No. 7, pp.755-770, 2003.