

포수 조준경 안정화 장치의 슬라이딩 모드 적응 제어기 설계

계중읍*, 성기종**, 이원구** ,이만형***

Sliding Mode Adaptive Control of the Gunner's Primary Stabilized Head Mirror

Joong Eup Keh*, Ki Jong Sung**, Won Gu Lee**, and Man Hyung Lee***

ABSTRACT

In this paper, a direct adaptive control, based on Lyapunov Function Candidate, is applied to a nonlinear Gunner's Primary Stabilized Head Mirror system to derive a parameter adaptation scheme; furthermore, a nonlinear sliding mode control is also previously applied to the system to reduce the modeling error and settling time of the system. This adaptive controller is available for not only decreasing the gain of sliding mode control, but also compensating the error in identification of the parameters which are even varying or have uncertain values. The performance of the adaptive controller is determined by the tracking ability to a desired model under some disturbances and the slowly varying parameters of the system. Both adaptive scheme and sliding mode play an important role in the improvement of the nonlinear system control.

Key Words : Gunner's Primary Stabilized Head Mirror(포수 조준경 안정화), Adaptive Control(적응제어), Sliding Mode(슬라이딩모드), Lyapunov Function Candidate(리아프노프 후보 함수) Tracking Performance(추적 성능)

1. 서론

조준경 안정화장치는 다양한 외란에 대해 양호한 조준선(LOS)을 유지하기 위해 안정된 제어기(Controller)의 설계가 요구되어 시스템의 정확한 동특성을 알아야 한다. 시스템 특성상 안정화모드와 비상모드의 두가지 중에서 안정화 모드 장치인 짐벌 시스템(Gimbal system)을 기준모델 적응 제어(MRAC)기법을 이용하여 비선형 시스템의 불확실

성을 보상하고 슬라이딩모드를 이용하여 입력에 대한 응답속도를 높일 뿐만 아니라 모델링오차 또한 크게 줄일 수 있다. 먼저, 원하는 동작을 하는 시스템의 기준 모델을 선정하고 실제 시스템이 선정된 기준 모델을 잘 추적하는 정도에 따라 제어기의 성능이 평가되는데, 비선형 조준경 시스템의 안정성과 운동에 영향을 미치는 파라미터들의 오차들을 보상하기 위해 리아프노프 후보 함수(Lyapunov function candidate)를 이용하여 적응제어 법칙을 유

* 국방품질연구소

** 부산대학교 대학원 정밀기계공학과

*** 부산대학교 기계공학부

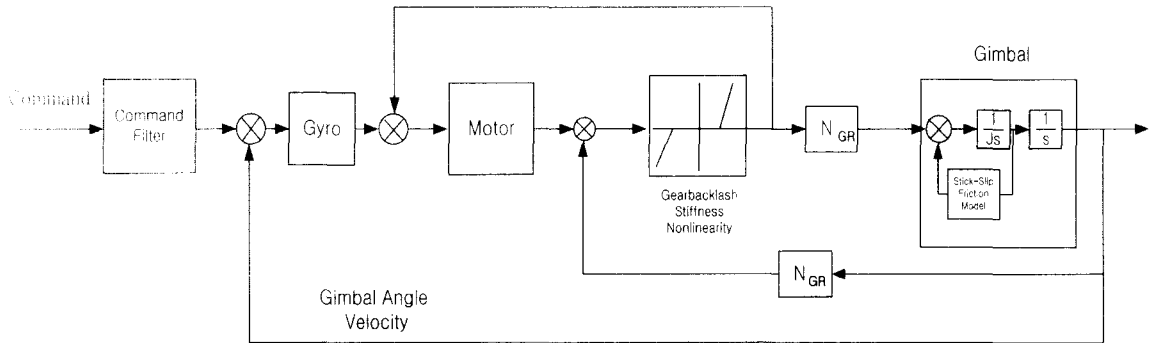


Fig. 2 Block diagram of the system

도한다. 시스템의 비선형 요소에는 쿨롱마찰, 정지 마찰, 탄성계수 등을 들 수 있는데 이 논문에서는 상대적으로 실제 시스템에 큰 영향을 미치는 쿨롱 마찰만을 고려하기로 한다.

본문에서는 조준경 안정화 장치의 짐벌 구동부의 모델링, 기준 모델, 슬라이딩 모드를 이용한 적응제어기 설계와 제어 법칙(Control law) 그리고 시뮬레이션 결과를 토대로 결론을 맺는다.

2. 조준경 안정화장치 및 모델링

2.1 시스템 구성

조준경 안정화 장치의 구조는 Fig.1과 같이 구동 시스템을 개략적으로 나타낼 수 있다.⁽¹⁶⁻¹⁷⁾

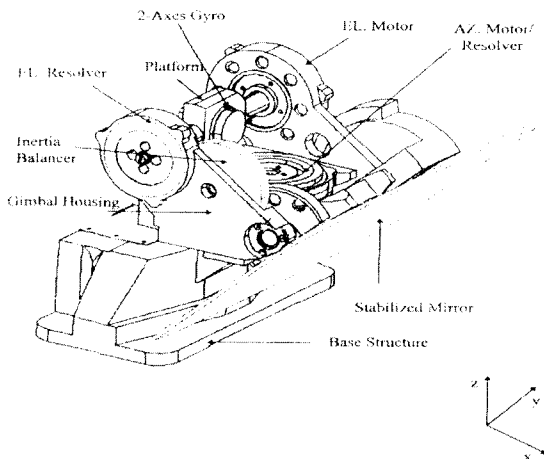


Fig. 1 The Structure of Stabilized Head Mirror

조준경 안정화장치의 기능은 포수의 제어신호에 의하여 조준선이 지정된 위치로 제어되는 제어 기능과 포탑 혹은 차체의 기동에 의하여 존재하는 외란에 대하여 조준선이 지정된 위치를 유지하는 안정화기능으로 나눌 수 있다. 제어기능의 신호 흐름도는 포수가 조준경을 통하여 관측하면서 조준선과 표적의 위치오차를 제거하고 표적의 움직임을 추적하도록 포수핸들로서 자이로에 속도명령을 인가하면 속도명령은 정밀하게 스케일링되어 자이로 토오크 전류증폭기로 입력되고, 이 전류증폭기는 자이로의 마이크로 동기검출기에 편위 전압을 발생시킨다. 이 전압신호는 복조기(demodulator), 여파기(filter)를 거친 후 보상기에 입력되므로 보상기에서는 짐벌 토오크 모터를 구동시키는 신호가 발생된다. 이때, 안정거울이 부착된 자이로가 짐벌 운동의 각운동량 변화를 통해 안정거울의 이동에 따른 속도를 감지하며 이 신호를 피드백 함으로써 페루프가 형성된다. 이 루프는 피드백 신호가 포수의 속도명령과 같아져서 조준경이 안정되게 구동되도록 작용한다. 또한, 조준선은 조준경을 통하여 포수의 눈에 역계환되므로 페루프가 형성되는데 이 루프는 조준선이 표적과 일치되도록 포수가 위치제어를 하는 루프로서 작동한다.

위의 Fig. 2에서 시스템의 블록선도를 살펴보면 포수가 조준경을 통하여 표적을 조준하고 있거나 움직이는 표적을 정확하게 추적하고 있을 때 전차가 기동 등으로 인한 외란이 발생하고 이 외란이 조준경의 구조물에 작용하면 조준경 구조물과 짐벌 사이에 마찰력이 발생하여 외란이 짐벌에 전달되어 안정거울에 부착된 자이로가 이를 감지하여 외란에 대해 반대로 운동할 수 있도록 전압신호를 발생시

키는데 이 신호는 복조기, 역과기 및 제어기를 거쳐 제어신호로 된다. 제어신호에 의하여 토르모터는 짐벌을 외관과 반대방향으로 구동시켜 짐벌에 부착된 안정거울의 조준선을 최초위치로 유지시킨다. 이때 자이로는 계속하여 안정거울의 이동속도를 감지하여 역회환 시킴으로써 안정화루프를 형성한다. 동작주파수 대역은 자이로와 짐벌구조의 연성적인 동력학으로 인해 제한되며 리졸버와 모터 그리고 자이로 등에서 발생하는 구조적 공진에 의한 고주파 성분을 제거하기 위해 4개의 노치필터가 사용된다.

2.2 시스템 모델링

2.2.1 수학적 모델링

조준경의 운동방정식을 유도하기 위해 조준경을 크게 짐벌(Gimbal), 플랫폼(Platform), 거울(Mirror) 및 밸런서(Balancer)로 나누고 라그랑지(Lagrange)방정식을 이용하여 모델링을 하였다. 그리고, 밴드 드라이버의 강성을 고려하고, 정밀 위치 제어시 베어링 마찰의 영향을 알아보기 위해 각각 구조물(Base Structure)과 짐벌, 플랫폼과 거울사이의 쿨롱 마찰을 고려하였다.

2.2.2 모델의 단순화

위에서 얻어진 비선형 방정식은 너무 복잡하여 시스템 해석이 어려우므로 다음과 같은 가정을 통해 비선형 모델을 단순화한다.

① 방위각 안정화 루프와 고저각 안정화 루프를 독립적으로 설계한다. 즉 자이로 축의 운동이 방위각 루프에 미치는 영향은 방위각 회전축과의 고저각에 대한 할선성분(secant)에 해당하는 개인 곱을 더하여 보상하고 또한 방위각 짐벌의 운동이 고저각 루프에 미치는 성분은 포탑의 운동이 작을 경우 무시한다.

② 고저각안정화 루프에서 거울과 플랫폼을 같이 구동시켜주는 밴드 드라이버는 인장되지 않는다. 즉 밴드 드라이버의 인장력 변화에 기인한 작용 토크는 무시한다.

③ 시스템의 요소들을 연결하는 전선에 의한 등가 스프링력이 밴드 드라이버의 인장력 변화에 따른 적용토크 보다 더 크게 작용한다.

④ 관성 균형자의 마찰, 등가 스프링력은 무시

될 수 있다. 즉, 관성력만 고려한다.

5. 자이로와 시스템 요소들의 마찰에 있어서 쿨롱 마찰만 고려한다.

2.2.3 비선형 운동방정식 유도

비선형 시스템의 운동방정식은 라그랑지 방정식을 이용해 도출했으며, 시스템에 상대적으로 영향을 작게 미치는 요소들은 모델의 단순화과정에 의해 삭제하였다.⁽¹⁸⁻¹⁹⁾ 아래 운동방정식에서 보듯이 선회방향과 고저방향의 식들이 서로 연관이 없이 불연성(Decoupling)되어 있는 단일 입출력(SISO)시스템이므로 독립적으로 제어 가능하다.

- 방위각 방향의 운동방정식

$$\begin{aligned} J_{gi} \ddot{x}_{gi} + C_{gi} \text{Sgn}(\dot{x}_{gi}) + K_{gi} x_{gi} &= T_{mgi}, \\ J_m \ddot{x}_m + C_m \text{Sgn}(\dot{x}_m) + R_m^2(K_1 + K_m)x_m \\ - R_m R_p K_1 x_p - R_m R_b K_1 x_b &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

- 고저각 방향의 운동방정식 :

$$\begin{aligned} J_m \ddot{x}_m + C_m \text{Sgn}(\dot{x}_m) + R_m^2(K_1 + K_m)x_m \\ - R_m R_p K_1 x_p - R_m R_b K_1 x_b &= 0, \\ J_p \ddot{x}_p + C_p \text{Sgn}(\dot{x}_p) + R_p^2(K_1 + K_p)x_p \\ - R_p R_m K_1 x_m - R_p R_b K_1 x_b &= T_{mp}, \\ J_b \ddot{x}_b + C_b \text{Sgn}(\dot{x}_b) + R_b^2(K_1 + K_b)x_b \\ - R_b R_m K_1 x_m - R_b R_p K_1 x_p &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

- 자이로 운동방정식 : 자이로는 각속도 외란에 피드백되어 들어오는 출력의 차를 입력으로 한다.

$$\tau_g \ddot{x}_g + (I_g p^2 + C_g p)x_g = H_g(\omega_{ref} - \omega_{los}) \quad (3)$$

- 모터 운동방정식 : 자이로에서 나오는 전류신호를 입력으로 하여 모터상수를 곱한 후 이를 시스템의 토크입력으로 보낸다.

$$E_a = K_g x_g, \quad T_{mi} = K_{vc} K_m E_a \quad (4)$$

여기서, 아래첨자들은 각각 gi : 짐벌, m : 조준경, p : 플랫폼, b : 관성안정기, g : 자이로를 나타내고, ω_{ref} (reference), ω_{los} (line of sight) 는 각각

기준 입력과 이에 대한 출력을 나타낸다.

2.2.4 상태 방정식 유도

조준경과 플랫폼, 그리고 관성 안정기 사이에는 $R_m x_m = R_p x_p = R_b x_b$ 이 성립하고, 이 식들을 구동 모터 식과 함께 상태변수 방정식으로 표현하면 아래와 같다. 먼저, 선회방향에 대한 자이로 회전각을 $x_{1a} = x_g$ 로, 짐벌의 회전각을 $x_{3a} = x_{ma}$ 라 두면,

$$\begin{aligned} \dot{x}_{1a} &= x_{2a} \\ \dot{x}_{2a} &= \frac{1}{\tau_g} (H_g(r - x_{4a}) - K_g x_{2a}) \\ \dot{x}_{3a} &= x_{4a} \\ \dot{x}_{4a} &= \frac{1}{J_a} (-\alpha_a \text{Sgn}(\dot{x}_{4a}) - \beta_a x_{4a} + \gamma_a x_{1a}) \end{aligned} \quad (5)$$

과 같은 식이 얻어지고, 여기서 a (Azimuth)는 선회방향, e (Elevation)는 고저방향을 각각 나타낸다. 고저 방향에 대해서도 마찬가지로, 자이로의 회전각을 $x_{1e} = x_g$, 조준경의 회전각을 $x_{3e} = x_{me}$ 라 하고 아래 식을 얻는다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_{1e} &= x_{2e} \\ \dot{x}_{2e} &= \frac{1}{\tau_g} (H_g(r - x_{4e}) - K_g x_{2e}) \\ \dot{x}_{3e} &= x_{4e} \\ \dot{x}_{4e} &= \frac{1}{J_e} (-\alpha_e \text{Sgn}(\dot{x}_{4e}) - \beta_e x_{4e} + \gamma_e x_{1e}) \end{aligned} \quad (6)$$

위 두 식들과 함께 $E_a = K_g x_g$ 와 $T_{mi} = K_{vc} K_m E_a$ 두 관계식도 성립한다. 여기서, E_a , K_g , K_{vc} , K_m 은 각각 자이로 출력전압, 자이로 이득, 모터의 전류 대 전압 비, 모터의 토크 대 전류 비의 이득을 나타내며 $\alpha_a, \beta_a, \gamma_a, \alpha_e, \beta_e, \gamma_e$ 는 불확실하거나 상황에 따라 서서히 변하는 시스템 변수들이다.

3. 비선형 제어기 설계

3.1 슬라이딩 모드 적응 제어기 설계

어떤 시스템의 적응 제어 법칙(Adaptive Control

Law)을 유도하기 위해서는 우선 그 제어대상이 되는 플랜트의 파라미터에 대한 확실한 정보가 있어야 한다. 불확실한 파라미터를 가진 시스템에 대해서는 적응제어 법칙을 유도할 수 있으며, 최소 위상 시스템(Minimum Phase System)의 경우에 그 파라미터들의 추정 값을 알아낼 수도 있다.⁽¹⁻¹⁴⁾ 이를 위해 가장 흔히 쓰이는 방법으로 직접방법에 의한 기준모델 적응제어(Model Reference Adaptive Control)기법을 들 수 있다.⁽¹⁻³⁾

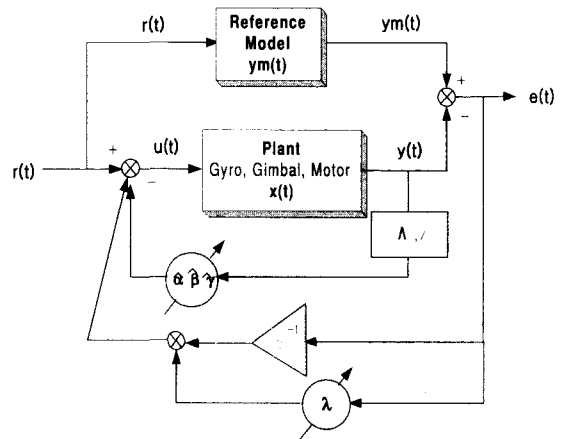


Fig. 3 MRAC Block diagram of Sliding mode Adaptive Control

하지만, 조준경 시스템의 특성상 아주 빠른 실시간 응답을 요구하므로 불확실한 파라미터의 추정과 우리가 원하는 응답을 얻어낼 수 있는 기준모델 적응제어기법^(3,4)과 빠른 응답에 유리한 슬라이딩 모드 제어기법을 동시에 응용하여 시스템의 효과적인 제어를 꾀한다. 이로 인한 불확실한 파라미터 값들에 대한 규명뿐만 아니라, 각 파라미터들간의 연관성과 시스템의 새로운 규명에도 도움이 된다.

Fig.3은 직접 기준 모델 적응제어(Direct MRAC) 기법에 의한 파라미터들 $(\alpha_i, \beta_i, \gamma_i)$ 의 조정과 슬라이딩 모드 제어에 의한 피드백 선형화 기법을 보여준다. 앞서 소개한 $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ 에 대하여 실제 각 속도 성분 (x_{4i}) 은 다음과 같이 1 차식으로 표현된다.

$$\dot{x}_{4i} = \frac{1}{J_i} (-\alpha_i \text{Sgn}(\dot{x}_{4i}) - \beta_i x_{4i} + \gamma_i x_{1i}) \quad (7)$$

여기서, i 는 a (선회 방향: Azimuth)와 e (고저

방향: Elevation)를 나타낸다.

각 가속도 출력에 대한 입력신호는 (7)식으로부터 x_{1i} 가 되고, 추적에러를 $e(x, t) = x_{4i} - x_{di}$ 라 하면 슬라이딩 평면은 다음과 같이 정의된다.⁽⁹⁾

$$s(x, t) = \dot{e} + \lambda e, \quad \lambda > 0. \quad (8)$$

그러므로, 원하는 제어입력 (x_d)은

$$x_{di} = \frac{1}{\gamma_i} (\hat{\alpha}_i Sgn(\dot{x}_{4i}) + \hat{\beta}_i x_{3i} + J_i \dot{x}_{4d} - J_i \lambda s) \quad (9)$$

로 표현된다. 여기서, 각 항의 파라미터 값 ($\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$)들에 대한 정확한 측정이 어려우므로 기준모델에 의한 추정값 ($\hat{\alpha}_i, \hat{\beta}_i, \hat{\gamma}_i$)으로 대체한다.

그리고 리아프노프 후보 함수 (Lyapunov Function Candidate)를 다음과 같이 정의한다.

$$V = s^2 + \frac{1}{2} \rho_1 \alpha_i^2 + \frac{1}{2} \rho_2 \beta_i^2 + \frac{1}{2} \rho_3 \gamma_i^2 \quad (10)$$

$\tilde{\alpha}_i = \alpha_i - \hat{\alpha}_i, \tilde{\beta}_i = \beta_i - \hat{\beta}_i, \tilde{\gamma}_i = \gamma_i - \hat{\gamma}_i$ 들로서 실제 파라미터 $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ 에 대한 추정 파라미터들 ($\hat{\alpha}_i, \hat{\beta}_i, \hat{\gamma}_i$)의 오차들로 정의를 하면,

$$\dot{V} = s\dot{s} - \rho_1 \tilde{\alpha}_i \dot{\tilde{\alpha}}_i - \rho_2 \tilde{\beta}_i \dot{\tilde{\beta}}_i - \rho_3 \tilde{\gamma}_i \dot{\tilde{\gamma}}_i \quad (11)$$

이 얻어진다. 여기서, ρ_i 는 적응 이득을 나타낸다. 슬라이딩평면의 미분 값을 (11)식에 대입하여 정리하면 아래 식을 얻어낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{V} = & -\lambda s^2 - \tilde{\alpha}_i \left(\frac{s}{\rho_1} Sgn(x_{4i}) + \dot{\tilde{\alpha}}_i \right) - \tilde{\beta}_i (s x_{3i} + \rho_3 \dot{\tilde{\beta}}_i) \\ & + \tilde{\gamma}_i \left(\frac{\hat{\alpha}_i Sgn(x_{4i}) + \hat{\beta}_i x_{3i} + \dot{x}_{4des} - \lambda_1 s_1}{\hat{\gamma}} - \rho_3 \dot{\tilde{\gamma}}_i \right) \end{aligned} \quad (12)$$

저음 항을 제외한 나머지 항이 모두 0 이 되면, $\dot{V} = -\lambda s^2 \leq 0$ (단, $\lambda > 0$ 인 임의의 양의 상수)을 만족하고 시스템이 점근적으로 안정하게 된다. 슬라이딩 평면 $s(x, t)$ 는 떨림(chattering)현상을 보여주기 하나 점차적으로 0으로 수렴한다. 위의 조건에 따라 다음과 같은 파라미터들에 관한 적응법칙 (Adaptive law)을 구해낼 수 있다.

$$\dot{\hat{\alpha}}_i = -\frac{s Sgn(x_{4i})}{\rho_1}$$

$$\dot{\hat{\beta}}_i = -\frac{s x_{3i}}{\rho_2}$$

$$\dot{\hat{\gamma}}_i = \frac{\hat{\alpha}_i Sgn(x_{4i}) + \hat{\beta}_i x_{3i} + \dot{x}_{4des} - \lambda s}{\rho_3 \hat{\gamma}_i} \quad (13)$$

3.2 기준 모델(Reference Model) 선정

시스템의 기준모델이 될 식은 기준입력에 대하여 앞에서 언급한 조준경 사양에 만족하도록 기준모델을 선정하였고, 실제 조준경은 (14)식과 같이 입력신호의 각 변화량에 대해 반대 방향으로 작동하는 것이 이상적이다.

$$x_m(t) = -K x_i(t) \quad (14)$$

여기서, m은 mirror를 i는 입력을 나타내고 K(K>0)는 비례 상수를 나타낸다. 입력에 대하여 원하는 동작을 하는 기준모델은 안정화 필요조건에 따라 설계한다. 시스템은 입력신호에 대해 매우 빠른 응답을 요구하며 2축 자이로가 응답할 수 있는 주파수대역이 160Hz 이므로 다음과 같은 기준모델을 선정하였다. 먼저, 오버슈트를 일으키지 않고 정상상태에 도달하는 시간이 0.1(sec)이며 160Hz를 차단 주파수(cut-off frequency)로 가지고 응답의 크기는 기준입력과 같은 크기로 한다. 아래 식은 기준입력의 전달함수이다.

$$G(s) = \frac{4.096 \times 10^6}{s^3 + 632s^2 + 101120s + 4.096 \times 10^6} \quad (15)$$

4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

4.1 방위각 방향

방위각 방향 기준모델의 스텝입력에 대한 정상상태 도달시간은 0.1초이고 안정화 필요조건을 모두 만족한다

Fig. 4는 25° /s 스텝입력을 인가했을 때 기준모델과 시스템과의 오차를 나타내며, 0.2초 내로 기준모델을 추적한다. Fig. 5의 (a)~(c)는 그 때의 파라미터 값을 나타내며, 모두 일정한 값으로 수렴한다.

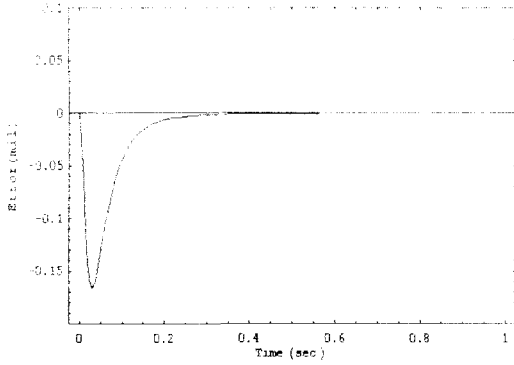
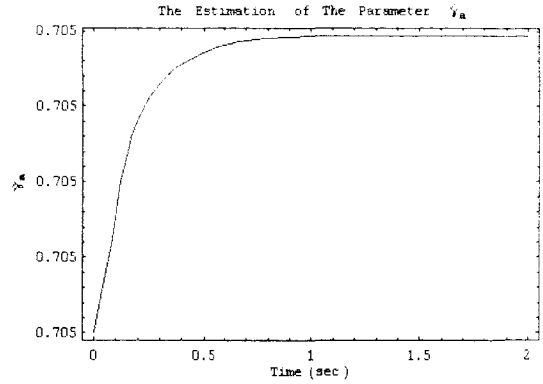
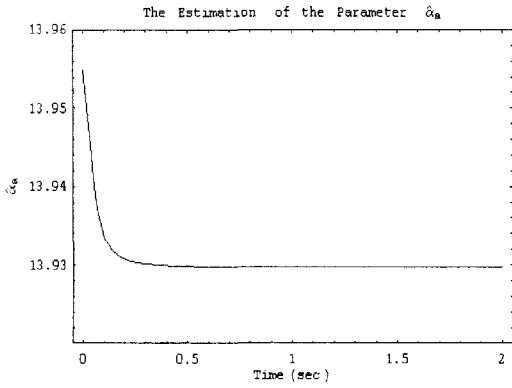


Fig. 4 The error in the azimuth direction for 25° step input, S_a



(c) γ_a

Fig. 5 The coefficients of azimuth direction for $25^\circ/s$ step input



(a) α_a

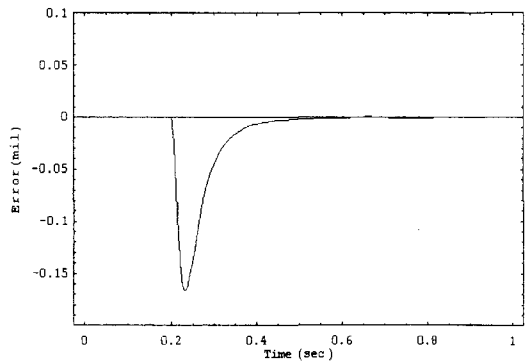
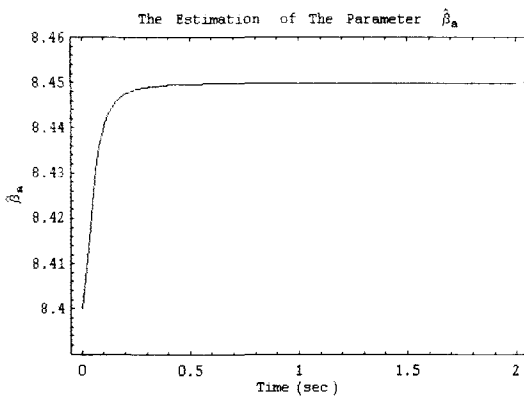


Fig. 6 The error in the azimuth direction for step input with $10^\circ/s$ and $25^\circ/s$



(b) β_a

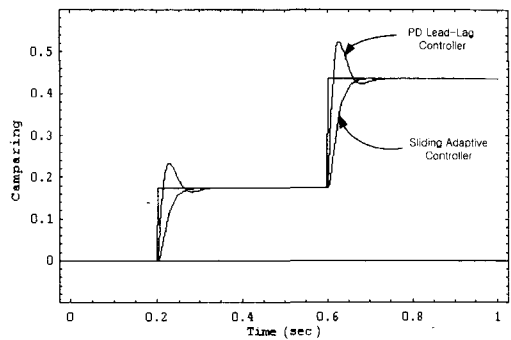


Fig. 7 The comparison of performance in the azimuth direction for step input with $10^\circ/s$ and $25^\circ/s$

Fig.6은 정지 상태에서 정상상태 도달 시간과 구동 중일 때 정상상태 도달 시간 사이에는 차이가 있음을 보여준다. Fig.7에서 기존의 제어기(PD Lead-Lag)와 비교했을 때 오버 슈트 없고 빠른 정상상태 도달시간을 보이며 훨씬 개선된 성능을 보여준다. 시스템의 방위각 방향으로는 모든 입력 신호에 대해 대체로 짧은 떨림만으로 시스템이 안정화되며 추적성능이 좋기 때문에 정상상태 도달시간도 빠르게 제어된다.

4.2 고저각 방향

방위각 방향과 마찬가지로 고저각 방향에서도 정상상태 도달 시간은 0.1초이며 고저각 방향의 안정화 필요조건을 모두 만족한다.

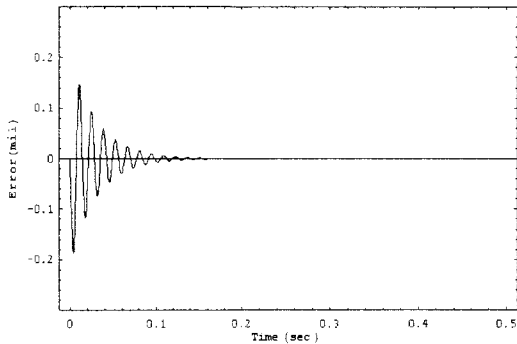
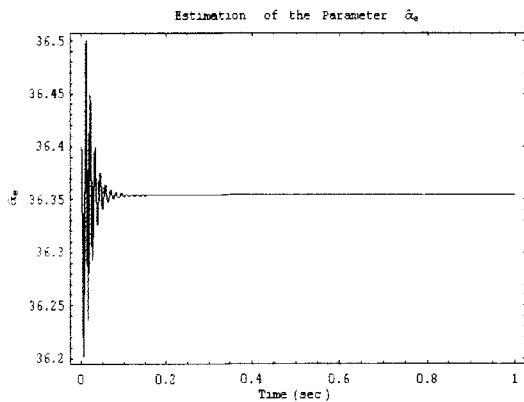
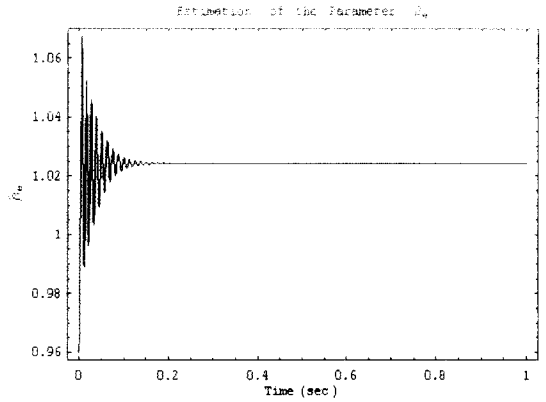


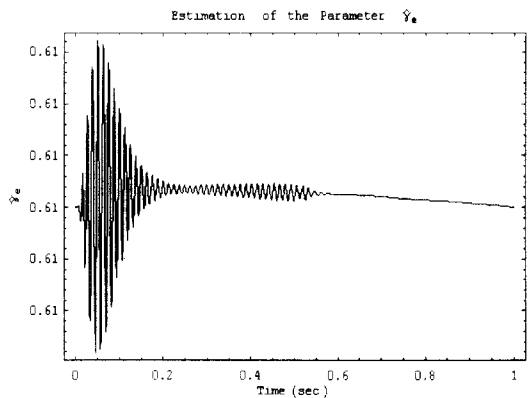
Fig. 8 The error in the elevation direction for $20^\circ /s$ step input, s_e



(a) α_e



(b) β_e



(c) γ_e

Fig. 9 The coefficients of the elevation direction for $20^\circ /s$ step input

Fig. 8 은 $20^\circ /s$ 스텝입력을 인가했을 때 기준 모델과 시스템과의 오차를 나타내며, 0.15초내에 기준모델을 추적한다. Fig. 9의 (a)~(c)는 그 때의 파라미터 값들을 나타내며 모두 일정한 값으로 수렴한다. 고저각 방향의 제어도 앞의 방위각 방향에서와 거의 비슷한 성능결과를 얻었으나 정상상태 도달 시 많은 떨림현상이 생기고 정상상태 도달시간이 조금 느린 편이다. Fig. 10은 기존의 제어기(PD Lead-Lag)와 비교한 것인데 오버슈트 없이 정상상태 도달 시간에도 큰 향상을 가져왔다.

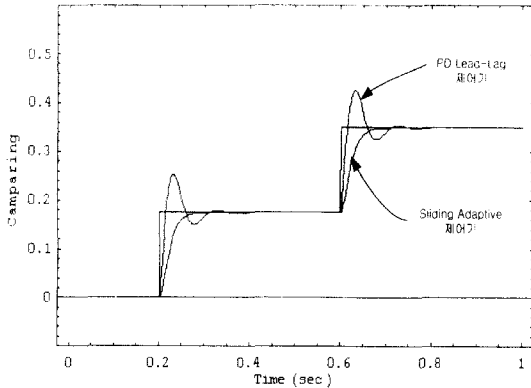


Fig. 10 The comparison of performance in the elevation direction for step input with $10^\circ/s$ and $25^\circ/s$

5. 결론

본 논문은 비선형 시스템인 조준경 안정화장치 내의 안정화모드 장치인 집벌 구동부를 제어하기 위해 기준모델 적응제어(MRAC)기법을 이용하여 슬라이딩 모드 제어를 함께 적용시켜 제어기의 성능을 보다 향상 시켰다. 서서히 변하거나 불확실한 시스템 파라미터들을 보상하기 위하여 적응 제어 알고리즘을 적용하였고 리아프노프 후보 함수(Lyapunov Function Candidate)를 이용해 시스템의 안정성을 보장하면서 적응제어법칙을 유도하였다. 실험적인 방법으로 슬라이딩 모드 제어를 이용하여 작은 이득 값으로 시스템의 보상과 응답속도를 높였다. 슬라이딩 모드 제어에 의한 떨림(chattering)현상은 보이나 기준모델에 대한 뛰어난 추적 성능을 보이며 기존의 제어기와 비교할 때 보다 빠른 시간 내에 오버슈트없이 정상상태 오차한계에 도달하고 안정된 값으로 수렴해간다. 본 논문의 슬라이딩 모드 적응 제어기의 성능은 기준모델에 대한 시스템의 추적 성능으로 평가되는데, 일반적으로, 슬라이딩 이득 값을 크게 할수록 추적성능을 향상시키고 모델링 오차를 크게 줄일 수는 있으나, 적응이득(adaptive gain : ρ_1, ρ_2, ρ_3)을 함께 조정(tuning)함으로써 슬라이딩 이득(sliding gain : λ_i)을 작게 하고도 추적성능을 더욱 향상시키고 모델링 오차를 보다 효과적으로 줄일 수 있다. 적응 알고리즘에 의한 파라미터들의 규명으로 추적 성능의 향상과

더불어 시스템의 새로운 규명에도 도움이 된다.

참고문헌

1. S. Sastry, and M. Bodson, Adaptive Control, Stability, Convergence and Robustness. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1989.
2. K. S. Narendra, Yuan-Hao Lin, and L. S. Valavani, "Stable Adaptive Controller Design, Part II: Proof of Stability," IEEE Trans. Automat. Contr., Vol. AC-25, No. 3, pp. 440-448, June, 1980.
3. F. Giri, P. A. Ioannou, and F. Ahmed-Zaid, "A Stable Indirect Adaptive Control Scheme for First-Order Plants with no Prior Knowledge on the Parameters," IEEE Trans. Automat. Contr., Vol. 38, No. 5, pp. 766-771, May, 1993.
4. G. C. Goodwin and D. Q. Mayne, "A Parameter Estimation Perspective of Continuous Time Model Reference Adaptive Control," Automatica, Vol. 23, No. 1, pp. 57-70, 1987.
5. A. Alleyne and J. K. Hedrick, "Adaptive control for active suspensions," DSC-Vol. 52, Advanced Automotive Technologies, pp. 7-13, in Proc. 1993, ASME Winter Annual Meet., New Orleans, LA, Nov. 1993.
6. A. Alleyne and J. K. Hedrick, "Nonlinear adaptive control of active suspensions," IEEE Trans. Contr. Systems Technologies, Vol. 3, No. 1, pp. 94-102, Mar. 1993.
7. A. Alleyne and P. D. Neuhaus, and J. K. Hedrick, "Application of nonlinear control theory to electronically controlled suspensions," Vehicle System Dynamics, Vol. 22, No. 5-6, pp.309-320. Also presented in the Proc. Int. Symp. on Advanced Vehicle Contr.(AVEC), Yokohama, Japan, Sept. 1992.
8. R. Ortega and M. W. Spong, "Adaptive motion control of rigid robots: A tutorial," Automatica, pp. 877-888, Nov. 1989.
9. J. J. E. Slotine and W. Li, Applied NonLinear Control. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1991.
10. M. Vidyasagar, NonLinear Systems Analysis. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1993.

11. K. S. Narendra, and A. M. Annaswamy, Stable Adaptive Systems. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1989.
12. K. J. Astrom and B. Wirrenmark, Adaptive Control. Reading, MA: Addison-Wesley, 1995.
13. M. Sunwoo, K. C. Cheok, and N. J. Huang, "Model refermce adaptive control for vehicle active suspension systems," IEEE Trans. Indust. Electron., Vol. 38, No. 3, pp. 217-221, June 1991.
14. S. Sastry and A. Isidori, "Adaptive control of linearizable system," IEEE Trans. Automat. Contr., Vol. 34, No. 11, pp. 1123-1131, Nov. 1990.
15. 전기준, 장준오, 신현재, 장원규, "차세대 조준경의 신경망 제어기 설계," 경북대학교 공과대학 부속 전자기술연구소 기술보고서, 1994.
16. 이만형, 신윤기, "조준경의 제어 및 안정화 특성 연구," 부산대학교 기계기술연구소 기술보고서, 1990.
17. 국방과학연구소, "조준경 안정화 최적제어 연구," 1994.
18. 국방과학연구소, "조준경 안정화 장치의 동적 구조 해석," Technical report, UD920130BD, 1993.
19. 국방과학연구소, "안정화 장치 짐벌구동부의 동력학적 해석," 1994.
20. 이건한, 조상현, 조희수, 박홍배, "조준경 안정화를 위한 H^∞ 제어기설계," Proceedings of the 12th KACC, pp. 1137-1140, Oct. 1997.
21. V. I. Utkin, Sliding Modes and Their Application In Variable Structure Systems. Moscow: MIR Publishers, 1978.