

시선 안정화 시스템의 고 정밀 적응제어

Adaptive High Precision Control of Line-of Sight Stabilization System

전 병균, 전 기준

(Byung-Gyoon Jeon and Gi-Joon Jeon)

Abstract : We propose an adaptive nonlinear control algorithm for high precision tracking and stabilization of LOS(Line-of-Sight). The friction parameters of the LOS gimbal are estimated by off-line evolutionary strategy and the friction is compensated by estimated friction compensator. Especially, as the nonlinear control input in a small tracking error zone is enlarged by the nonlinear function, the steady state error is significantly reduced. The proposed algorithm is a direct adaptive control method based on the Lyapunov stability theory, and its convergence is guaranteed under the limited modeling error or torque disturbance. The performance of the proposed algorithm is verified by computer simulation on the LOS gimbal model of a moving vehicle.

Keywords : friction compensation, adaptive nonlinear control, line-of-sight, stabilization

I. 서론

시선(Line of Sight, LOS) 안정화 시스템은 이동 카메라나 정밀 타격용 군사용 장비에 폭 넓게 사용되고 있다. 이러한 시선 안정화 시스템은 기본적으로 운영자가 특정한 방향으로 목표물을 추적하기 위한 추적제어와 그 시스템이 탑재된 차량으로부터 들어오는 외란에 대하여 시선을 유지하기 위한 안정화 제어를 목적으로 하고 있다.

현재 무한 궤도차량에 탑재되어 운용되고 있는 시선 안정화 시스템은 약 0.1~0.2 mil rms 오차 수준의 성능을 가지고 있으며 지속적으로 성능을 향상 시키고 있다. 이들 시선 안정화 시스템은 대부분 PID 제어를 근간으로 시스템에 따라 부분적으로 위상 보상기를 사용하고 있는데, 이렇게 PID를 기반으로 하는 선형 제어기는 추적 성능을 높이거나 과도 응답 특성을 향상시키기 위하여 위상을 보상한 후 루프 이득을 높이는 방법이 사용되는데 이때 자칫 시스템이 불안정해질 수 있고, 불필요하게 대역폭이 넓어져 잡음에 약해지곤 한다. 근래에는 마찰력을 추정하여 보상하는 방법으로 좋은 결과를 얻고 있으며 이러한 보상제어 시스템은 여러 분야에서 많은 사람들에 의하여 제안되었다 : 간단한 쿨롱 마찰 추정 알고리즘에 의한 마찰 추정 및 보상제어[1], 김벌의 마찰 파라미터를 실험적으로 규명하여 보상한 시선 안정화 시스템 마찰 보상 제어[2], 지능제어 이론에 기반을 둔 시선 안정화 시스템 마찰 보상제어[3], 쿨롱 마찰과 관성 모멘트를 추정하여 보상한 X-Y 테이블 적응 마찰보상 제어[4] 등. 이러한 방법들은 PID로 대표되는 선형 제어기만으로 구성된 제어 시스템 보다 상대적으로 향상된 성능을

보여주고 있다. 그러나 많은 제어 시스템들이 간단한 쿨롱 마찰력만 추정하여 보상 하거나, 마찰 모델 및 파라미터의 추정으로 나타나는 오차와 측정잡음의 영향을 고려하지 않거나, 또는 시스템 오차가 작은 범위에서 제어 입력의 감소로 인한 정상상태 오차가 발생하는 등 추가적인 성능향상의 여지를 남겨놓고 있다.

본 논문에서는 1-자유도 시선 안정화 시스템의 고 정밀제어를 위한 마찰 보상 비선형 적응 제어기를 제안한다. 마찰력을 추정하여 보상하기 위한 마찰모델로는 정지마찰 영역과 운동마찰 영역에서 마찰 현상을 잘 표현해 주고 있는 Canudas 마찰모델[5]을 수정하여 적용한다. 즉, 마찰 파라미터를 식별하기 위하여 시선 안정화 시스템의 김벌에 간단한 비례 제어루프를 구성하여 개략적인 마찰 파라미터의 존재범위를 확인하고 동시에 마찰 파라미터를 규명하기 위한 적절한 입출력 샘플 신호를 얻는다. 김벌의 관성 모멘트와 마찰모델로 구성되는 기준 모델에 대하여 입출력 신호로서 파라미터 존재범위 내에서 진화 스트레티지 알고리즘을 사용하여 비실시간(off-line)으로 파라미터를 추정한다. 제어기로는 시스템오차가 작은 범위에서 비선형 함수로서 제어입력을 크게 계산하여 제어 정밀도를 높이는 비선형 제어기, 시스템오차에 비례하여 제어입력을 산출하는 비례 제어기, 관성 모멘트를 추정하여 보상하는 관성 모멘트 추정기 및 기준 마찰모델에 의한 마찰력 보상기 등으로 적응제어 시스템을 구성하며, 이 페루프 시스템에 대하여 Lyapunov의 직접 방법을 적용하여 제어입력을 산출한다. 이 적응제어 시스템의 성능을 Canudas 마찰 모델에 근거한 시선 안정화 김벌 모델에 대하여 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 확인한다.

본 논문은 2장에서 일반적인 시선 안정화 시스템의 구성과 모델을 알아보고, 3장에서 마찰 보상 적응 제어기를 설계하며, 4장에서 컴퓨터 시뮬레이션으로 성능을 확인하고 끝으로 5장에서 결론을 맺는다.

접수일자 : 2000. 5. 10., 수정완료 : 2000. 8. 25.

전병균 : 국방과학연구소

전기준 : 경북대학교 전자전기공학부

※ 이 논문은 1999년도 두뇌한국21사업에 의하여 지원 되었음.

II. LOS 시스템 구성 및 모델

그림 1에서 보여주는 시선 안정화 시스템은 무한 계도차량 위에서 목표물을 추적하고 시스템의 외란을 제거하여 시선을 유지 하도록 김벌을 제어한다. 김벌은 김벌 하우징, 안정거울 및 김벌 플랫폼으로 구성되어 있으며 김벌 하우징은 기본 구조물위에 조립되어 선회 방향으로 360° 운동하고, 플랫폼은 김벌 하우징에 조립되어 고저방향으로 운동한다. 플랫폼에는 고저방향과 선회방향 자이로가 내장되어 플랫폼의 각속도를 감

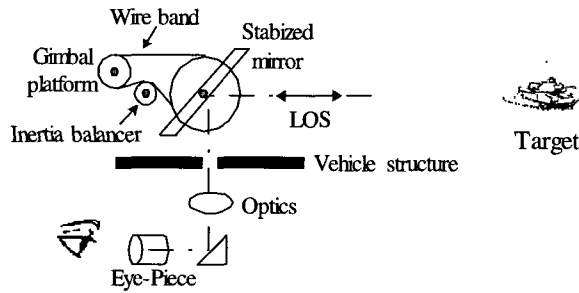


그림 1. 시선 안정화 시스템.
Fig. 1. LOS stabilization system.

지 하여 제어루프를 형성 함으로서 플랫폼을 관성적으로 안정화 시킨다. 각 구동축은 볼 베어링을 사용하고, 선회방향 구동축에는 슬립링(slip-ring)이 있어 김벌과 기본 구조물사이의 전기신호를 전달하며, 플랫폼과 안정거울 축은 강철 와이어 밴드로 연결되어 있다. 이 모델의 선회방향 운동방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$J\ddot{\theta}_{LOS}(t) + F_r(\bullet) + \varepsilon_d(t) = u(t) \quad (1)$$

여기서 J 는 김벌의 관성 모멘트, $\theta_{LOS}(t)$ 는 김벌의 시선 각 변위, $F_r(\bullet)$ 은 모든 마찰력의 통합, $u(t)$ 는 제어 입력이며, $\varepsilon_d(t)$ 는 측정 잡음 등 각종 잡음들로부터 유도되는 등가 외란으로서 크기가 특정한 상수 상한값으로 제한된다. 즉,

$$|\varepsilon_d(t)| < \delta_d, \quad t > 0 \quad (2)$$

일반적으로 볼 베어링을 사용하는 구동시스템은 정지 마찰영역에서 외부 토크에 비례하여 마찰력이 증가하는 스프링 힘(Spring-Force) 현상과 저속의 스틱-슬립(Stick-Slip) 마찰 영역에서 마찰 지연(Friction memory)현상이 나타나며 음의 점성마찰(Stribeck) 현상은 거의 나타나지 않는 것으로 알려져 있다[2][6]. 그래서 본 논문에서는 이 항을 제거한 Canudas의 마찰 모델[5]을 이용하여 마찰을 추정하고 보상하였는데 이것은 Dahl이 베어링 마찰모델에서 제시한 것[7]과 유사한 형태를 가진다. Canudas등은 [5]에서 Haessig등[8]이 제안한 강모의 굽힘현상을 이용하여 마찰현상을 체계적으로 모델링 하였는데 강모의 각속도에 대한 운동 방정식은 다음 식과 같다.

$$\frac{dz}{dt} = \omega - \frac{|\omega|}{g(\omega)} z \quad (3)$$

여기서 z 는 강모의 평균 굽힘을 나타내는 내부 변수이고, $g(\omega)$ 는 마찰면의 재질, 윤활 및 온도 등으로 결정되는 양의 값으로서 음의 점성마찰 현상에 대응한다. 김벌의 각속도 ω 와 내부 변수 z 로 나타내는 전체 마찰력은 다음식과 같다.

$$F_r = K_0 z + c \frac{dz}{dt} + f_\omega \omega \quad (4)$$

여기서 K_0 는 강성계수(Stiffness coefficient)로서 정상 상태에서

$$K_0 = \{f_c + (f_s - f_c)e^{-(\omega/\omega_s)^2}\} / z_{ss} \quad (5)$$

특성을 가지는데, f_c 는 쿨롱 마찰계수, f_s 는 최대 정지 마찰계수, ω_s 는 음의 점성마찰 각속도, z_{ss} 는 정상상태에서 강모의 굽힘을 나타낸다. c 는 강모의 감쇠계수 이고, f_ω 는 점성 마찰 계수이다. 이 마찰모델에서 추정해야 할 파라미터는 $f_c, f_s, \omega_s, z_{ss}, c, f_\omega$ 의 6개이나 본 시선 안정화 시스템의 김벌 과 같이 음의 점성마찰이 무시되면 f_s 는 f_c 와 같으므로 ω_s 를 제외한 4개이다.

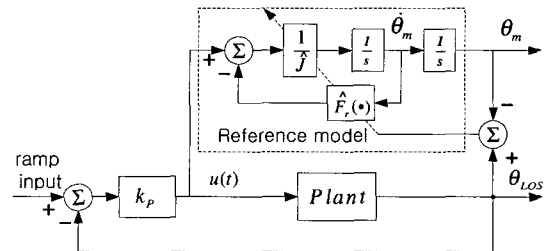


그림 2. 파라미터 추정을 위한 블록 다이어그램.
Fig. 2. A block diagram of the parameters estimation.

이들 마찰계수는 그림 2와 같이 김벌의 관성 모멘트 J 와 마찰력 f_r 을 포함하는 기준모델 출력 θ_m 과 시스템 출력 θ_{LOS} 을 비교하여 f_c, z_{ss}, c, f_ω 등 미지의 파라미터를 추정하는데 여기서는 Kim등[9]이 제안한 진화 알고리즘을 이용하여 비 실시간(off-line)으로 추정하였다. 위 마찰 파라미터 4개와 관성 모멘트 J 로 구성되는 파라미터 벡터에 의한 기준모델 출력과 실제 시스템의 출력 오차를 (6)과 같이 정의하여 이들의 제곱합의 평균 J_c 를 비용함수로 하고 이를 최소화 하는 파라미터 벡터를 찾는다.

$$e_0(\hat{x}, t_i) \triangleq \theta_{LOS}(x, t_i) - \theta_m(\hat{x}, t_i) \quad (6)$$

$$J_c(\hat{x}) = \frac{\sum_{i=1}^{N_s} e_0^2(\hat{x}, t_i)}{N_s} \quad (7)$$

여기서 \hat{x} 는 추정된 파라미터 벡터, $\theta_{LOS}(x, t_i)$ 는 시선

안정화 시스템의 각도 출력, $\theta_m(\hat{x}, t_i)$ 는 추정된 파라미터에 의한 기준모델의 각도 출력이며, N_s 는 비 실시간 추정을 위한 샘플 데이터 수이다. 이때 각 마찰 파라미터는 간단한 실험을 통하여 존재 범위를 추정할 수 있는데 이 범위에서 각 파라미터를 탐색 함으로서 진화 알고리즘의 추정 효율을 높일 수 있다. 그리고 여기서 추정된 \hat{j} 는 나중에 제어 법칙(Control law)에 사용되는데 이 값이 \hat{j} 의 실시간 (on-line) 추정때 초기치로 사용된다.

III. 마찰보상 적응 제어기

이장에서는 Lyapunov 직접방법에 기반을 둔 시선 안정화 시스템의 직접 적응 제어기를 제안한다. 그림 3은 추정된 마찰력 보상입력 (u_f), 선형 비례 제어입력 (u_b), 비선형 함수 $P(\cdot)$ 를 통한 비선형 제어입력 (u_o) 및 추정된 관성 모멘트 보상입력 (u_j) 등으로 제어입력을 구성하는 새로운 제어 블록으로서 시스템 입력신호

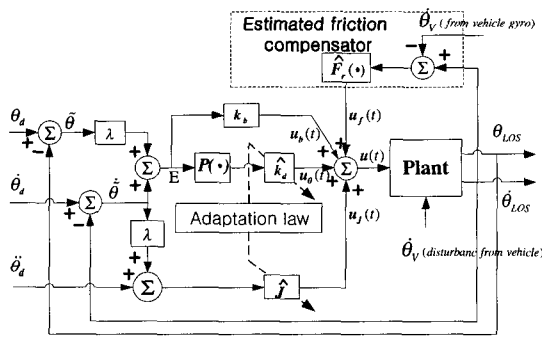


그림 3. 비선형 적응제어 블록 다이어그램.
Fig. 3. Nonlinear adaptive control block-diagram.

벡터 $\Theta_d(t) \triangleq [\theta_d(t), \dot{\theta}_d(t)]^T$ 를 출력신호 벡터 $\Theta_{LOS}(t) \triangleq [\theta_{LOS}(t), \dot{\theta}_{LOS}(t)]^T$ 가 추종 하도록 하며, 시선 안정화 시스템의 탑재 차량으로부터 입력되는 외란 $\hat{\theta}_v(t)$ 에 대하여 시선을 관성적으로 안정화 시키는 시선 안정화 시스템의 선회방향 블록 다이어그램이다. 외란 $\hat{\theta}_v(t)$ 는 탑재체의 외란으로서 무한궤도차량의 경우 시선안정화 시스템이 장착되는 포탑(turret)의 안정화를 위하여 추정하는데, 그림 3에서는 이 추정신호를 마찰 보상에 이용한다. 비선형 제어 시스템의 추종오차와 이들의 선형조합 인 결합오차 $E(t)$ 를 정의하면 다음과 같다.

$$\tilde{\Theta}(t) = [\tilde{\theta}(t), \dot{\tilde{\theta}}(t)]^T \triangleq \Theta_d(t) - \Theta_{LOS}(t) \quad (8)$$

$$E(t) \triangleq \tilde{\Theta}(t) + \lambda \dot{\tilde{\Theta}}(t), \quad \lambda > 0 \quad (9)$$

여기서 $\tilde{\Theta}(t)$ 는 추종오차 벡터, $\tilde{\theta}(t)$ 와 $\dot{\tilde{\theta}}(t)$ 는 각도와 각속도 추종오차, λ 는 경험으로 얻어지는 양의 설계상수 이다. 이때 결합오차가 $|E(t)| \leq \delta_b$ 로 제한되면 추종오차는 $|\tilde{\theta}(t)| \leq \delta_b/\lambda$ 의 범위로 제한된다[10].

제안한 시스템의 제어입력은 그림 3에서 다음과 같

이 얻어진다.

$$u(t) = u_f(t) + u_b(t) + u_o(t) + u_j(t) \quad (10)$$

$$= \hat{F}_r(\cdot) + k_b E(t) + \hat{k}_d P(\cdot) + \hat{j}(\ddot{\theta}_d(t) + \lambda \dot{\tilde{\theta}}(t))$$

$\hat{F}_r(\cdot)$ 는 추정된 마찰 모델로부터 김벌의 상대 각속도에 따라 추정되는 마찰력 보상항이고, k_b 는 양의 비례 제어이득이며, \hat{k}_d 는 추정된 비선형 제어 이득이고, $P(\cdot)$ 는 비선형 함수로서 결합오차 E 에 대하여 (11)과 같으며, \hat{j} 는 추정된 관성 모멘트이다. 앞으로 편의상 시간변수 t 는 생략한다.

$$P(E) \triangleq (1 + |E|^\alpha) \cdot DAD(E/\delta_b), \quad 0 < \alpha < 1$$

$$DAD(E/\delta_b) = \begin{cases} \text{sgn}(E/\delta_b), & \delta_b \leq |E| \\ 0, & |E| < \delta_b \end{cases} \quad (11)$$

비선형 함수 $P(E)$ 는 그림 4와 같이 α 의 변화에 따라 비선형 이득을 발생 시킨다. 일반적으로 정상상태 부근에서와 같이 시스템 오차가 작은 부분에서는 제어입력이 작아서 자칫 정상상태 오차를 야기하거나 시스템의 안정시간(settling time)이 길어진다. $P(E)$ 는 결합오차 E 가 작은 범위에서 제어입력을 비선형적으로

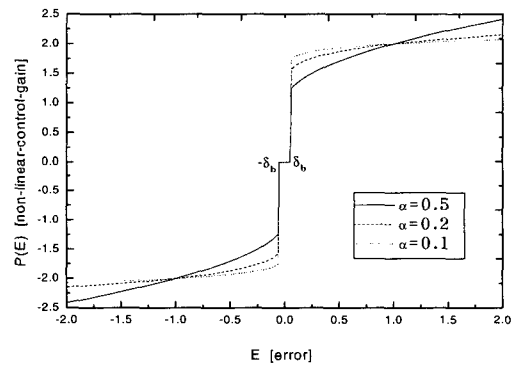


그림 4. 비선형 제어 함수.
Fig. 4. Nonlinear control function.

크게 계산 함으로서 시스템의 정상상태 오차와 안정시간을 줄여준다. 이때 오차가 $|E| > 1$ 에서는 $P(E)$ 의 특성에 따라 비선형 제어 이득이 작아질 수 있는데, 이 영역에서는 그림 3에서 보는 것과 같이 선형비례 제어기 (k_b)로서 보완한다.

관성 모멘트의 추정치 \hat{j} 은 다음의 적응 법칙

$$\dot{\hat{j}} = \gamma_1 (\ddot{\theta}_d + \lambda \dot{\tilde{\theta}}) E \quad (12)$$

으로부터 얻으며, 비선형 제어이득 추정치 \hat{k}_d 는 (13)을 통하여 얻을 수 있다.

$$\dot{\hat{k}}_d = \gamma_2 |E| \quad (13)$$

단, $0 < |E| < \delta_b$ 영역에서 (13)의 적분값 \hat{k}_d 가 $\hat{k}_d \leq k_b \delta_b$ 를 만족하면 그적분 값을 \hat{k}_d 로 하고, 그렇지 않으면 $\hat{k}_d = k_b \delta_b$ 가 되도록 선정한다. 여기서 γ_i ($i=1,2$) 는 양의 적응이득으로서 파라미터의 수렴

속도를 결정한다. 위와 같은 제어 법칙과 적응법칙을 사용하는 페루프 시스템에서 결합오차 E 의 시간 미분 값을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{J}E &= J(\ddot{\theta}_d - \ddot{\theta}_{LOS} + \lambda\dot{\theta}) \\ &= \tilde{J}(\ddot{\theta}_d + \lambda\dot{\theta}) + \tilde{F}_r + \varepsilon_d - k_b E - \hat{k}_d P(E) \end{aligned} \quad (14)$$

여기서 $\tilde{J} \triangleq J - \hat{J}$ 로서 김벌의 실제 관성모멘트와 추정된 관성모멘트의 차로 정의하며, $\tilde{F}_r \triangleq F_r - \hat{F}_r$ 로서 실제 마찰력과 추정된 마찰력의 차로 정의하는데 본 논문에서는 모델링 오차를 포함하는 모든 마찰력 추정 오차를 양의 상수 상한 값, 즉 $|\tilde{F}_r(\cdot)| < \delta_f$ 로 가정한다. 그래서 모든 모델링 오차의 상한 값과 잡음 및 외란의 총합으로 구성되는 미지의 상수 k_d 는 다음과 같이 정의하며 이는 양수이다.

$$k_d \triangleq \delta_f + \delta_d \quad (15)$$

이렇게 제안한 적응 보상 기법은 다음 정리에 의하여 전체 시선안정화 시스템에 대한 안정도가 보장된다.

정리 : (1)의 동적 시스템과 (10)과 같은 제어법칙 및 (12)(13)의 적응법칙으로 구성된 전체 시선안정화 시스템은 Lyapunov 관점에서 안정하고 결합오차 E 는 미리 설정한 미소 구간 δ_b 내로 점근적으로 수렴한다.

증명 : 위의 정리를 증명하기 위하여 다음과 같은 Lyapunov 후보함수를 선정한다.

$$V(E, \tilde{J}, \tilde{k}_d) = \frac{1}{2} J E^2 + \frac{1}{2\gamma_1} \tilde{J}^2 + \frac{1}{2\gamma_2} \tilde{k}_d^2 \quad (16)$$

여기서 $\tilde{J} = J - \hat{J}$, $\tilde{k}_d = k_d - \hat{k}_d$ 이며 이들의 미분은 다음과 같다.

$$\dot{\tilde{J}} = \frac{d}{dt}(J - \hat{J}) = -\dot{\hat{J}} \quad (17)$$

$$\dot{\tilde{k}}_d = \frac{d}{dt}(k_d - \hat{k}_d) = -\dot{\hat{k}}_d \quad (18)$$

(16)을 미분하고 여기에 (12)(14)(17)(18)을 적용하면 다음식이 되는데, 즉

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \tilde{J}(\ddot{\theta}_d + \lambda\dot{\theta})E + (\tilde{F}_r + \varepsilon_d)E - k_b E^2 - \hat{k}_d P(E)E \\ &\quad - \frac{1}{\gamma_1} \tilde{J}\dot{\hat{J}} - \frac{1}{\gamma_2} \tilde{k}_d \dot{\hat{k}}_d \\ &\leq k_d |E| - k_b E^2 - \hat{k}_d P(E)E - \frac{1}{\gamma_2} \tilde{k}_d \dot{\hat{k}}_d \end{aligned} \quad (19)$$

여기에 (13)을 적용하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -k_b E^2 - \hat{k}_d P(E)E + \hat{k}_d |E| \\ &= -k_b E^2 - \hat{k}_d \{P(E)E - |E|\} \end{aligned} \quad (20)$$

여기서 결합오차 E 의 구간에 따라 \dot{V} 의 크기를 알아 보면

i) $\delta_b \leq |E|$

$0 \leq P(E)E - |E|$ 이므로 (20)은

$$\dot{V}(E, \tilde{J}, \tilde{k}_d) < 0 \quad (21a)$$

ii) $|E| < \delta_b$

$P(E) = 0$ 이므로 (20)은 $\dot{V} \leq -k_b E^2 + \hat{k}_d |E|$ 이며, 이때 $0 < \delta_b < 1$ 이므로 다음과 같다.

$$\dot{V} \leq -k_b E^2 + \hat{k}_d |E| \leq -k_b \delta_b^2 + \hat{k}_d \delta_b \quad (21b)$$

따라서 (13)의 조건에서 $\hat{k}_d \leq k_b \delta_b$ 이므로 $\dot{V} \leq 0$ 이다

iii) $E = 0$

$$\dot{V} = 0 \quad (21c)$$

따라서 위와 같이 \dot{V} 은 E 의 전 영역에서 연속이고, 음의 반한정이므로 Barbalat's Lemma[10]에 의하여 $t \rightarrow \infty$ 이면 $\dot{V} \rightarrow 0$ 이 되고, 또한 (21)에 의하여 시스템 결합오차 E 는 미리 설정한 미소구간 δ_b 영역내로 점근적으로 수렴한다. ■

위 정리에서 결합오차 E 가 δ_b 로 수렴한다고 해서 추정된 파라미터의 오차가 영으로 수렴한다는 것을 의미하는 것은 아니며, 적응 법칙으로부터 추정된 파라미터들은 기준입력 신호가 계속하여 여기 되면 그들의 추정오차가 유한한 값 내에 존재하게 된다. 또한 비선형 제어이득을 추정하는 (13)과 같이 양수로만 적분 되는 제어이득은 감소하지 않고 증가만 하며, 정상상태에서 시스템오차가 영으로 되었을 때 제어이득의 증가는 멈추게 된다. 이런 상태에서 시스템의 특성이 변하거나 외란이 시스템에 계속 가해지면 추정 비선형 제어이득의 파라미터 값이 계속 증가하는 표류(drift)현상이 발생하여 시스템이 불안정해질 수 있다. 그러나 제안한 알고리즘은 매 스텝마다 (13)으로 추정 비선형 제어이득 \hat{k}_d 을 얻은 후 결합오차 E 가 δ_b 내로 들어오면 (13)의 조건식에 맞는 값을 선택 하고, 다음 스텝의 \hat{k}_d 를 산출할 때는 직전의 \hat{k}_d 를 초기치로 사용 함으로서 추정 비선형 제어이득이 무한히 증가 하지 않도록 하여 시스템의 표류현상을 제거 하였다.

IV. 컴퓨터 시뮬레이션

본 장에서는 제안된 제어 법칙에 대하여 그 성능을 컴퓨터 시뮬레이션으로 확인한다. 먼저 표 1의 파라미터를 가지는 독립적인 2축의 시선 안정화 시스템에 대하여 실험적으로 밝혀진 파라미터를 적용한 플랜트를 이용하였는데, 편의상 선회방향 1축에 대하여 시뮬레이션을 실시하였다. Canudas의 마찰 모델[5]을 기준 모델로 하고 진화 스트레티지로 마찰특성과 관성 모멘트를 비 실시간으로 추정하였다. 컴퓨터 시뮬레이션에 사용된 김벌의 파라미터와 그 것들이 존재하는 범위 및 진화 스트레티지를 이용하여 추정된 파라미터를 표 1에 나타내었다.

표 1. 김벌의 선회방향 파라미터
Table 1. Yaw parameter value of the gimbal

파라미터	시스템 모델값	파라미터 존재범위	추정된값
J [ft-lb-sec ²]	1.23	0.5-2.5	1.22932
f_c [ft-lb]	2.0	0.5-3.0	2.00052
f_ω [ft-lb/(rad/sec)]	0.01	0.0-0.025	0.00789
z_{ss} [deg]	0.3	0.1-0.6	0.30361
c [ft-lb/(rad/sec)]	8.67	4.0-20.0	8.46782

그리고 설계자가 결정해야 하는 (9)~(13)의 설계상수는 다음과 같이 정하였으며

$$k_b = 150, \lambda = 100, \alpha = 0.1, \gamma_1 = 20, \gamma_2 = 200 \quad (22)$$

추정될 제어 파라미터를 위한 초기치는 다음과 같이 정하였다.

$$\hat{J}(0) = 1.22932, \hat{k}_d(0) = 0.0 \quad (23)$$

추종 성능을 시뮬레이션 하기 위하여 사용한 각도 및 각속도 입력 신호는 다음의 각가속도 값을 적분하여 사용하였으며, 그림 5와 같다.

$$\ddot{\theta}_d(t) = \begin{cases} 5\sin(16\pi t/T) & 0 < t < T/8, 6T/8 < t < 7T/8 \\ 5\sin(16\pi t/T) & 2T/8 < t < 3T/8, 4T/8 < t < 5T/8 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \text{ [deg/sec}^2\text{]} \quad (24)$$

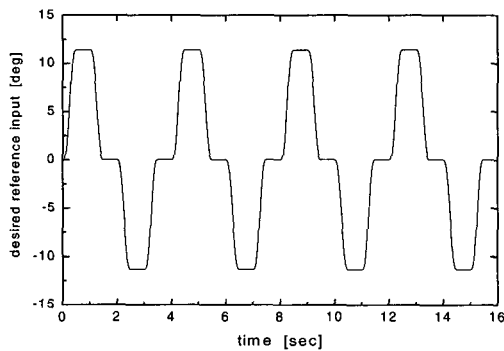


그림 5. 기준 각도 입력 신호.
Fig. 5. Desired reference angular input.

여기서 주기 T는 8초로 하였다. 그리고 탑재차량으로부터 들어오는 외란에 대한 시선 안정도를 시뮬레이션 하기 위하여 차량에서 입력되는 외란과 유사한 형태를 갖도록 N(0,1)의 백색신호로 다음의 필터를 거친 신호를 사용하였다.

$$T_\omega(s) = \frac{1028.7s}{s^2 + 6.3s + 9.923} \quad (25)$$

이 신호는 무한 궤도 차량의 운동에 관련한 시험규격에 제시된 파워 스펙트럼 밀도(Power Spectrum

Density)를 만족하며, 0.25~50 Hz 주파수 범위에서 83 mil/sec rms 가지는 각속도 외란이다[11].

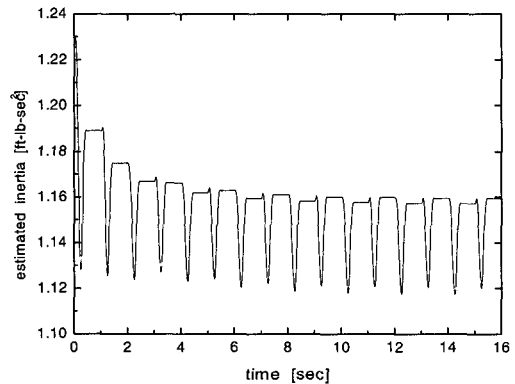
그리고 본 논문과 유사한 형태의 적응제어 알고리즘을 갖는 참고문헌[4]와 성능을 비교 하였는데 먼저 이 알고리즘을 적용하여 시선안정화 제어시스템을 구성하고 [4]에서 제시한 (26)(27)의 적응법칙을 이용하여 제어 파라미터를 구하였다. 이때 설계자가 정해주는 설계상수는 (28)과 같으며, 초기치는 (29)와 같다.

$$\dot{\hat{J}} = -\gamma_1 \ddot{\theta}_d E \quad (26)$$

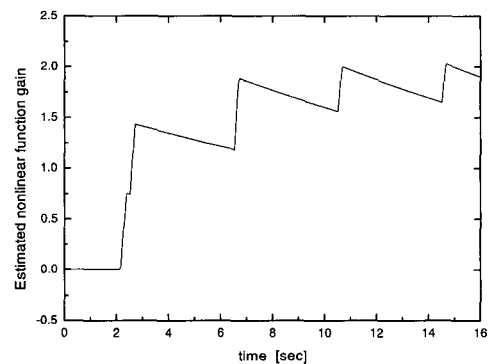
$$\dot{\hat{f}}_c = \gamma_2 E \quad (27)$$

$$k_b = 400, \lambda = 120, \gamma_1 = -20, \gamma_2 = 50 \quad (28)$$

$$\hat{J}(0) = 1.22932, \hat{f}_c(0) = 0.0 \quad (29)$$



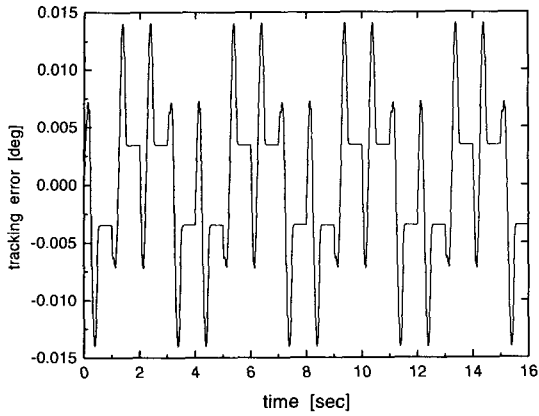
(a) 추정된 관성 모멘트(\hat{J})



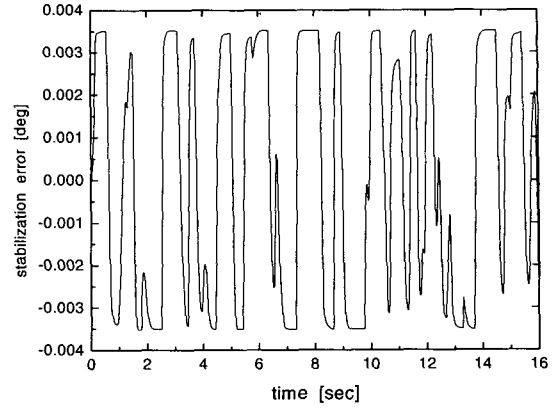
(b) 추정된 비선형 제어 이득(\hat{k}_d)

그림 6. 추정된 제어 파라미터.
Fig. 6. Estimated control parameter.

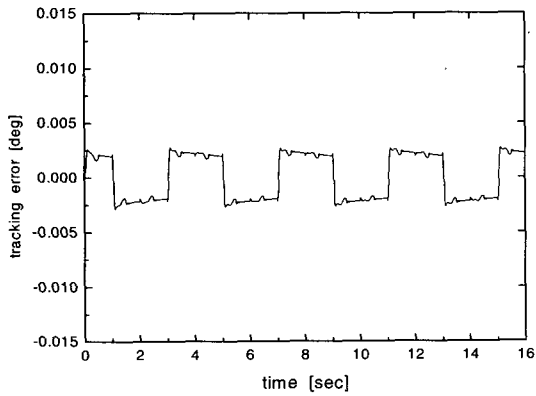
그림 5의 입력신호에 대하여 (12)(13)으로부터 얻을 수 있는 추정 관성모멘트(\hat{J})와 비선형 제어 이득(\hat{k}_d)을 그림 6에 나타내었다. 각 제어 파라미터는 일정한 범위에 존재하고 있음을 알 수 있다. 또한 그림 5에 대한 추종오차를 PD 제어기, [4]의 적응제어기 및 제한한 제어기 경우를 그림 7에 나타내었다. 그림에서 보듯 추종 오차는 처음에 초기치의 선정문제로 제한한 제어기가 [4]의 경우보다 약간 크나 곧 줄어들었으며,



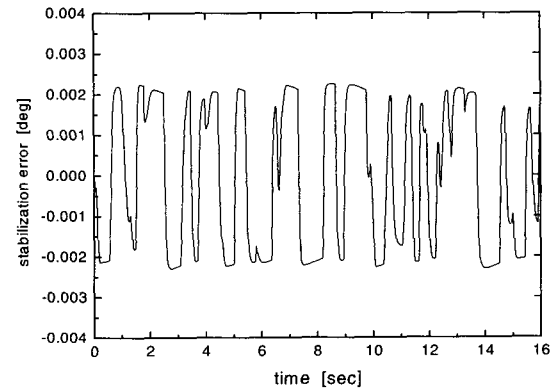
(a) PD 제어기



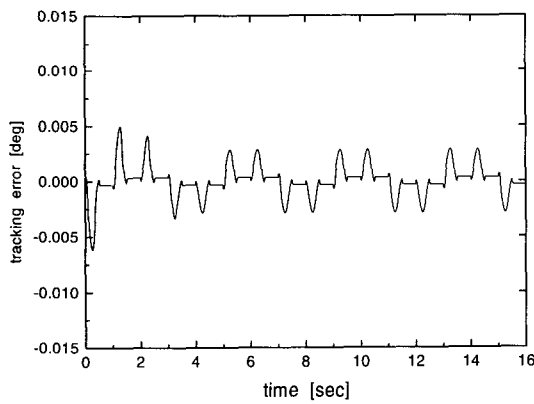
(a) PD 제어기



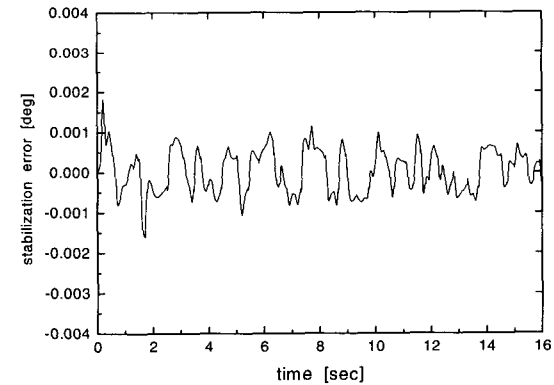
(b) Li 등의 적응제어기[4]



(b) Li 등의 적응제어기[4]



(c) 제안한 적응제어기



(c) 제안한 적응제어기

그림 7. 기준 입력신호에 대한 추종 오차.
Fig. 7. Tracking error for reference input.

그림 8. 각속도 외란에 대한 안정화 오차.
Fig. 8. Stabilization error for angular velocity Disturbance.

정상상태 오차도 상대적으로 매우 작다.

(25)의 필터를 거친 외란에 대한 안정화 성능을 그림8에 나타내었는데 각 제어기의 위치오차 값을 구해보면 PD 제어기는 0.051371 mil rms , [4]의 적응 제어기는 0.032239 mil rms 및 제안한 제어기는 0.009553 mil rms 이다.

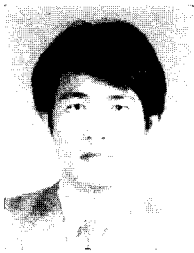
V. 결론

시선 안정화 제어를 위하여 Lyapunov 안정도에 기반을 둔 새로운 직접 적응제어 알고리즘을 제안하였다. 일반적으로 제어 시스템이 상수 이득과 대역폭의 제한 때문에 과도 응답 특성 문제나 정상상태 오차를 일으키기 쉬운 현실에서 비선형 제어기를 사용하여 시

시스템의 오차가 작은 범위에서 제어입력을 비선형적으로 산출하여 제어하고, 시선 안정화 시스템을 탑재하는 포탑의 외란을 마찰 보상에 이용 함으로서 정상상태 오차 및 과도응답 특성을 상당히 개선할 수 있었다. 제안된 제어기는 김벌의 관성 모멘트를 모르거나 그것이 변할 때에도 적용 가능한 알고리즘으로 모델링 오차나 토크 외란 등이 유한한 범위 내에 존재하면 결합 오차는 점근적으로 영으로 수렴하는 것이 보장된다. 이 제어기의 성능을 확인하기 위하여 무한 궤도차량에서 사용되는 시선 안정화 시스템의 김벌 모델을 대상으로 컴퓨터 시뮬레이션을 실시하였다. 명령 추종 성능과 외란에 대한 안정화 성능을 유사 제어기와 비교하였으며, 제안된 제어기의 성능이 우수함을 확인 하였다.

참고문헌

- [1] B. Friedland and Y. J. Park, "On Adaptive Friction Compensation," *IEEE Transactions On Automatic Control*, vol. 37, no. 10, pp. 1609-1612, October, 1992.
- [2] Y. S. Kang, *Friction Identification of a Sight Stabilization System and Feasibility Study on its Application to Control Performance Imporvement*, Ph.D dissertation KAIST, KOREA, 1997.
- [3] J. O. Jang, B. G. Jeon and G. J. Jeon, "Neuro-controller design for the line of sight stabilization system containing nonlinear friction," *Journal of Control, Automation and Systems Engineering*, vol. 3, no. 2, pp. 139-148, April, 1997.
- [4] W. Li and X. Cheng, "Adaptive high-precision control of positioning tables-theory and experiments," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 2, no. 3, pp. 265-270, September, 1994.
- [5] C. Canudas de Wit, H. Olsson, K. J. Astrom, and P. Lischinsky, "A new model for control of system with friction," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 40, no. 3, pp. 419-425, March, 1995.
- [6] B. Armstrong-Helouvry, P. Dupont, and C. Canu-das de Wit, "A survey of models, analysis tools and compensation methods for the control of machines with friction," *Automatica*, vol. 30, no. 7, pp. 1083-1138, 1994.
- [7] P. Dahl, "Solid friction damping of mechanical vibrations," *AIAA Journal*, vol. 14, no. 12, pp. 1675-1682, 1976.
- [8] D. A. Haessig and B. Friedland, "On the modeling and simulation of friction," *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 113, pp. 354-362, 1991.
- [9] J. H. Kim, H. K. Chae, J. Y. Jeon, and S. W. Lee, "Identification and control of systems with friction using accelerated evolutionary programming," *IEEE Control system*, pp. 38-47, August, 1996.
- [10] J.-J. E. Slotine and W. Li, *Applied Nonlinear Control*, NJ : Prentice Hall, 1991.
- [11] Y. Waltec, "Gunner's primary sight subsystem development specification," *Spec. No. SB-BB17100C, General Dynamics Land System Division*, Nov., 1982.



전 병균

1985년 2월 경북대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1987년 2월 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 1995년 3월 ~ 현재 경북대학교 대학원 전자공학과 박사과정. 1987.2 ~ 현재 국방과학연구소 선임연구원. 주관심분야는 고 정밀 제어, 적응제어, 신경망. GA 기법 제어 등임.



전 기준

1969년 2월 서울대학교 공과대학 졸업(공학사). 1978년 8월 미국 Houston대 전기공학과 졸업(공학석사). 1983년 12월 Houston 대 전기공학과 졸업(공학박사). 1971 ~ 1976년 국방과학연구소 연구원. 1983년 12월 ~ 현재 경북대학교 전자.전기공학부 교수. 1999년 9월 ~ 현재 경북대학교 BK21 정보기술인력양성사업단장. 주관심분야는 제어 및 시스템 이론, 퍼지.신경망.GA기법의 실시간 응용 등임.