Proceedings of the 12th
KACC, October 1997

조준경 안정화를 위한 H^∞ 제어기 설계

H^∞ Controller Design for Line-Of-Sight Stabilization System

°이건한*, 조상현*, 조희수*, 박홍배*

*경북대학교 전자전기공학부
(Tel: +82-53-950-5548; Fax: +82-53-950-5505; E-mail: green@palgong.kyungpook.ac.kr)

Abstract This paper presents a scheme for designing H^∞ controllers for stabilizing LOS(line-of-sight) of military tank. The obstacles for tracking and fixing LOS are mechanical friction, vibration, and distortion of architectures. The treatment of modeling error caused by nonlinear factors is very important. To make system robust with presence of rough condition, we apply H^∞ control theory to angular velocity control loop of mirror system. Normalized left coprime factor approach and loop shaping technique are adopted to achieve robustness and better performance. We compare classical PI-Lead controllers with H^∞ controllers through computer simulation.

Keywords H^∞ controller, LOS, normalized left coprime factor, KGPS

1. 서론

사격의 정확도를 향상시키기 위한 조준경 시스템의 정밀화와 함께 전차를 비롯한 각종 기갑차량의 현대화가 이루어져 왔으며, 현재는 주행중의 교란환경에서도 조준선을 유지하여 목표물을 명중시킬 수 있는 기술이 발전되어 왔다. 국내에서는 K1전차와 대공차량용 조준경 개발에 체계적 연구를 진행하여 상당한 성과를 거두었다.

포수조준경(KGPS: Korean Gunner's Primary Sight)은 전차에 장착되어 포수로 하여금 좌우 10° 씩, 상향 20° , 하향 10° 이내의 전방을 감시하여 목표를 탐색, 추적하도록 고안되었다. 조준경 미러의 안정화 장치는 크게 두가지 모드로 작동한다. 첫째는 정상적인 상황에서 각종 외란에 대해 시선을 고정시키는 안정화모드로서 포수의 핸들명령에 의해 구동되는 각속도 제어루프를 형성하여 포를 조준경에 종속시켜 움직이도록 하는 상태이며 둘째는 비상시 조준선을 주포에 종속시키는 비상모드이다.

본 논문은 이 중 안정화모드를 위한 H^∞ 제어기 설계방법을 제시한다. 목표물의 추적이나 조준에 장애가 되는 요인들에는 내부의 기계적 마찰, 구조물의 변형, 외부 바람의 영향, 차체의 진동 등이 있다. 주행시 차량변속이나 노면의 불균일함에 의한 진동외란의 영향을 최소화하는 것에 주안점을 두었으며 모델의 선형화 오차에 대한 견실성 문제에도 비중을 두었다. 존재할 수 있는 여러 부정적 상황하에서도 목표물의 추적성능을 견실하게 유지하기 위해 조준경 시스템의 각속도 제어루프에 H^∞ 이론을 적용하고 우수한 성능 확보를 위하여 루프쉐이핑 기법[7]을 사용한다. 마지막으로, 제시한 제어기와 기존 설계된 PI-Lead 제어기를 모의실험을 통해 비교함으로써 설계된 H^∞ 제어기의 성능을 평가한다.

2. 조준경의 구조와 안정화모드

김벌 시스템은 선회방향으로 구동하는 김벌하우징과 고저방향으로 구동하는 플랫폼, 반사미러, 관성안정기 등으로 이루어져 있다. 최종적으로 제어하고자 하는 대상은 목표물에 대한 시각영상을 받아들이고 레이저 발사시 빔을 지향시키는 반사미러이다. 미러는 선회방향의 경우 구동부와 직접 연결되어 있지만 고저방향의 경우 강철벨트를 통해 간접적으로 연결되어 있으므로 관성안정기를 미러와 고저모터 사이의 벨트에 접촉시켜 고저운동의 안정화를 보조하도록 되어있다.

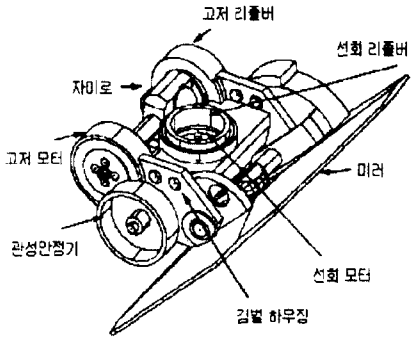

그림 1. 김벌의 구조
Fig. 1. Architecture of gimbal.

KGPS에는 제어루프 형성에 필요한 상태정보인 미러의 각도와 각속도 감지를 위해 자이로와 리졸버 두가지 센서가 장착되는데 안정화모드에서는 자이로만을 사용한다. 관성을 이용한 각속도 센서인 자이로는 독립된 두개의 축으로 되어있어 하나의 센서로 선회, 고저 두방향의 정보를 동시에 취할 수 있으며 각속도와 각도 두종류의 출력을 제공할 수 있다. 또한 외부로부터 인위적인 각속도 신호를 받아들여 추종명령으로 사용할 수 있게 고안되었다.

본 논문에서 다루는 안정화모드는 주행 등으로 발생하는 외란 환경에서도 미러의 흔들림을 억제하여 시선을 고정시킴과 동시에 포수의 각속도 명령에 안정하게 추종시키는 상황이다. 제어루프는 김벌의 자세이동을 감지하는 자이로에서 선회, 고저방향의 각변동량을 전자회로에 전달하면 여기서 필요한 양만큼의 보

상신호를 모터에 가하여 이루어진다. 안정화모드를 위한 제어루프의 블럭선도는 그림 2와 같다.

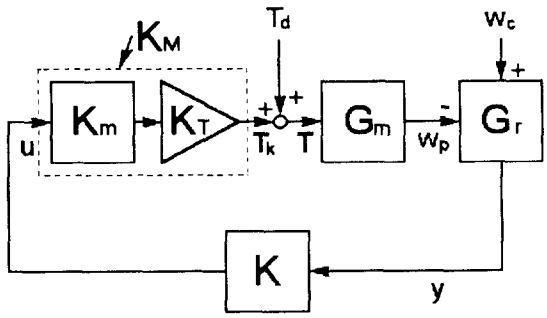

그림 2. 안정화 루프의 블럭선도
Fig. 2. Block diagram of stabilizing loop.

그림 2에서 K_m은 김벌 구동을 위한 DC 토크모터와 모터드라이버 시스템이고 K_T는 전류에 대한 모터의 고유 토크상수이다. 모터와 모터드라이버 사이에는 구동특성 개선과 대역폭 확장을 위해 별도의 궤환루프가 형성되어 있다. T_k는 모터로부터 출력되는 토크이고 T_d는 주행에 따르는 각종 진동이나 모델오차의 영향을 토크외란으로 등가적 표현을 한 것이다. 입력토크 T는 모터축과 연결된 플랫폼이나 김벌하우징을 구동시켜 각속도 운동을 일으킨다. 이때 김벌 내부에는 마찰력을 비롯해 구동을 방해하는 힘이 발생한다. 이러한 현상에는 강철벨트의 탄성, 비스코스마찰, 역기전력과 같은 선형요소와 쿨롬마찰, 정지마찰, 스트리벡현상 등 비선형요소들이 혼재한다. 비선형마찰 요인들에 대한 정확한 계수값 추정은 어렵고 제어기의 간결성을 추구하기 위해 제작사에서 제시한 저차의 선형모델만을 공칭플랜트로 사용한다. 이 모델에는 비선형요소들의 영향이 실험 동작점에서의 선형화 계수값들에 반영되어 있다. 따라서 선형화모델 추출시 고려한 동작점 이외의 상황에서는 다소간의 모델 불확실성을 포함하므로 H^∞ 이론에 입각한 제어기법이 실용적 의미를 가진다.

G_r은 안정화모드에서 사용되는 각속도 센서인 자이로인데 프랑스 SAGEM사에서 제작한 GSL82-21 DTG(dynamic tuned gyroscope)와 00BM52보드 모델이 사용되었다[9]. 각도 출력모드와 각속도 출력모드 중 잡음문제과 대역폭에 있어 좀더 유리한 각도 출력모드를 사용하며 김벌의 각속도 변위 W_p를 감지함과 동시에 포수가 인위적으로 가하는 각속도 명령신호(전압) W_c를 세차입력(precession input) 단자로 받아들인다. 그리고 두 각속도요소의 오차를 각도로 적분하여 전압의 형태 y로 출력한다. 세차입력의 스케일은 고저축이 1(°/s/Vdc), 선회축이 4(°/s/Vdc)이고 최대 10Vdc에서 최소 -10Vdc까지 입력이 가능하다. 출력은 고저, 선회 동일하게 30Vdc/ °로 공급된다. 이렇게 얻어진 정보 y를 바탕으로 안정화 제어기 K는 김벌의 각속도 W_p와 포수명령 W_c의 오차가 0에 접근하도록 적절한 신호 u를 모터드라이버에 공급함으로써 제어루프를 형성시킨다.

3. H^∞ 제어기 설계

제공된 모델에는 부품가공, 선형화 등으로 인한 오차가 반드시 존재한다. 섭동모델을 설정하는 방법에는 여러가지가 있을 수 있으나 본 논문에서는 소인수요소 모델[6]을 사용하였다.

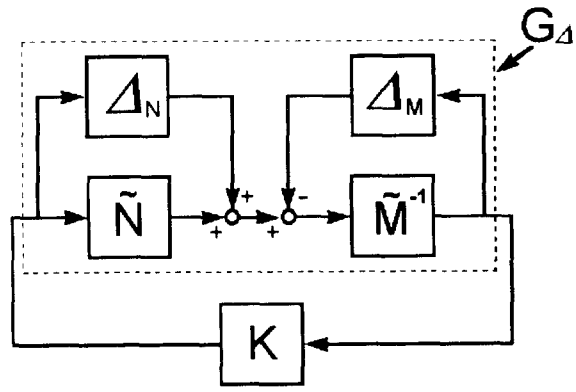

그림 3. 소인수요소 섭동 모델
Fig. 3. Coprime factor uncertainty model.

그림 3에서 $(\tilde{N}, \tilde{M})$은 공칭플랜트 G의 정규화된 좌소인수요소이고 섭동을 포함한 전체 시스템은

$$G_\Delta = (\tilde{M} + \Delta_M)^{-1}(\tilde{N} + \Delta_N) \tag{1}$$

으로 표현될 수 있다. 이때 섭동요소 Δ은

$$\Delta = [\Delta_N, \Delta_M] \in RH^\infty, \quad \|\Delta\|_\infty < \varepsilon \tag{2}$$

을 만족하고 좌소인수요소 견실안정화는

$$\left\| \begin{bmatrix} K \\ I \end{bmatrix} (I - GK)^{-1} \tilde{M}^{-1} \right\|_\infty \leq \gamma = \varepsilon^{-1} \tag{3}$$

를 만족하는 제어기 K를 구하는 것으로 해결할 수 있다.

공칭플랜트 G는 모터드라이버에서 자이로까지의 선형모델로서 두 SISO 시스템으로 표현되는데 고저방향의 경우

$$G_{El}(s) = \frac{-(2.20s + 3008)}{9.72\times10^{-9}s^4 + 6.23\times10^{-5}s^3 + 0.072s^2 + 0.42s + 2.4} \tag{4}$$

로 주어지고 선회방향의 경우

$$G_{Az}(s) = \frac{-(3.87s + 24167)}{2.66\times10^{-7}s^4 + 8.09\times10^{-4}s^3 + 2.74s^2 + 8.12s + 22.9} \tag{5}$$

로 주어진다.

외란 개입시의 시선진동 최소화, 대역폭 확대 등의 개선을 위해 루프쉐이핑 작업을 거친다. SISO로 분리된 시스템이므로 하중함수는 고저, 선회에 대해 하나씩만 사용한다. 고저방향 제어를 위한 하중함수는

$$W_{El} = \frac{4(s+20)}{(s+50)}, \tag{6}$$

로 설정하였고 선회방향을 위한 하중함수는

$$W_{Az} = \frac{5(s+40)}{(s+80)} \tag{7}$$

로 설정하였다.

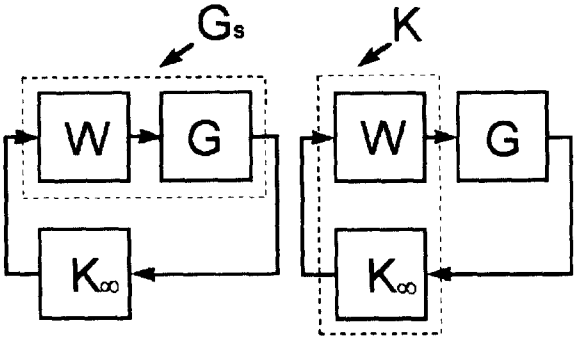

그림 4. 루프쉐이핑 블럭선도
Fig. 4. Loop shaping block diagram.

공칭플랜트 G에 하중함수 W를 가하여 구성된 G_s로부터 Glover-Doyle 알고리듬[2]을 적용시켜 제어기 K를 구하면 고저방향의 경우

$$K_{El}(s)=\frac{\begin{array}{c}9.161\times10^{4}s^{5}+6.033\times10^{8}s^{4}+7.836\times10^{11}s^{3}\\+1.244\times10^{14}s^{2}+4.027\times10^{15}s+3.696\times10^{16}\end{array}}{\begin{array}{c}s^{6}+2.700\times10^{4}s^{5}+1.546\times10^{8}s^{4}+2.557\times10^{11}s^{3}\\+1.243\times10^{14}s^{2}+7.732\times10^{15}s+1.070\times10^{17}\end{array}} \quad (8)$$

이고, 선회방향의 경우

$$K_{Az}(s)=\frac{\begin{array}{c}1.502\times10^{5}s^{5}+4.847\times10^{8}s^{4}+1.634\times10^{12}s^{3}\\+3.040\times10^{14}s^{2}+1.608\times10^{16}s+2.603\times10^{17}\end{array}}{\begin{array}{c}s^{6}+1.716\times10^{4}s^{5}+6.164\times10^{7}s^{4}+1.735\times10^{11}s^{3}\\+9.259\times10^{13}s^{2}+9.224\times10^{15}s+2.318\times10^{17}\end{array}} \quad (9)$$

이다. 그리고 이때 γ의 최소값은 고저의 경우 2.516, 선회의 경우 2.438이다. 따라서 불확실성 요소 Δ의 최대치가 안정도 여유 $1/\gamma_{\min}$ 을 넘지 않는 한 이 제어기는 시스템의 안정성을 보장한다.

한편, 실제 조준경 시스템의 구조를 볼때 주로 문제가 되는 불확실성의 형태는 그림 5와 같이 나타난다. 모터 K_M과 자이로 G_r의 경우 모델이 비교적 정확하게 나와있고 관심있는 대역내에서 일관적 동특성을 보이지만 김벌의 경우 2절에서 언급했듯이 동작점에 따라 선형모델이 많이 변동될 수 있다. 그 불확실 요소는 미러의 각속도 W_p를 입력으로 하여 토크신호 T_d를 김벌에 가하는 궤환의 형태로 생각할 수 있다. 시스템의 안정성을 유지하기 위한 Δ_p의 조건을 구하기 위해

$$\|[I-G_sK_\infty]^{-1}G_s\|\le\gamma \quad (10)$$

로 부터 [6]의 정리 5.9를 적용하면

$$\|(1-G_m K_p)^{-1}G_m\| \le \gamma\left|\left(\frac{G_s^2}{1+G_s^2}\right)\right|^{1/2}\frac{1}{|W\cdot K_M|\,|G_r|} \quad (11)$$

이 유도된다. 결국 K_M, G_r의 모델링 오차를 무시할 수 있다고 가정할 경우 김벌의 섭동 Δ_p가 모든 주파수에서

$$|\Delta_p| < \frac{1}{\gamma}\left|\left(\frac{G_s^2}{1+G_s^2}\right)\right|^{-1/2}|W\cdot K_M|\,|G_r| \quad (12)$$

을 만족하면 설계된 제어기로써 시스템의 안정성을 보장할 수 있다.

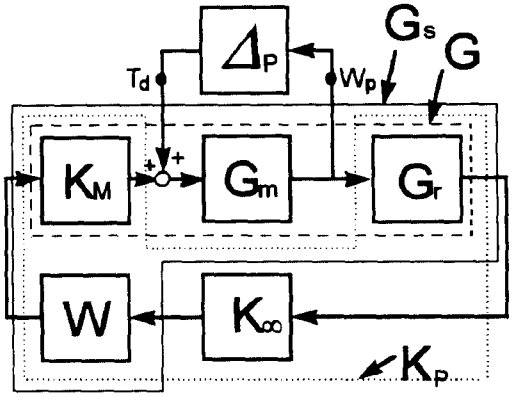

그림 5. 김벌내부의 각속도-토크궤환 모델 불확실성
Fig. 5. Modeling uncertainty of angular velocity-torque feedback in gimbal.

4. 모의실험 결과

그림 6부터 그림 9까지는 외란이 가해질때 미러의 시선각 변동을 Matlab의 simulink를 이용해 모의실험한 것이다. 점선으로 나타난 것은 기존 PI-Lead 제어기의 결과이고 실선으로 표시된 것은 제시한 제어기의 결과이다. 외란은 그림 2에서의 토크외란 T_d로서 피크치 2in-oz의 1Hz 사인파와 피크치 0.5in-oz의 랜덤잡음을 중첩시켜 인가하였다. 그림 6과 그림 8은 핸들명령이 없고 외란만 있을경우 시선각이 얼마나 벗어나는 가를 보여주고 그림 7과 그림 9는 외란과 함께 핸들명령이 가해질때 시선각 추종성능과 정상상태 유지도를 보여준다. 핸들명령은 입력 가능 최고치인 고저 0.1745rad/s, 선회 0.6981rad/s를 0.2초동안 펄스로 가하였다.

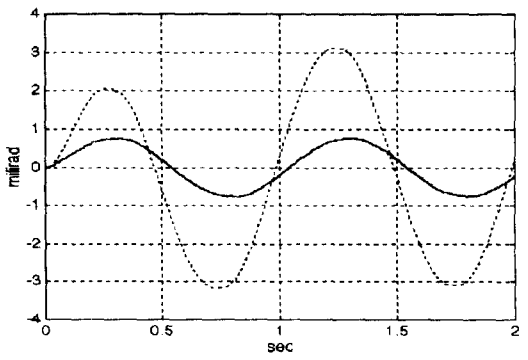

그림 6. 핸들명령이 없을때 고저방향 시선각
Fig. 6. Elivation LOS without handle command.

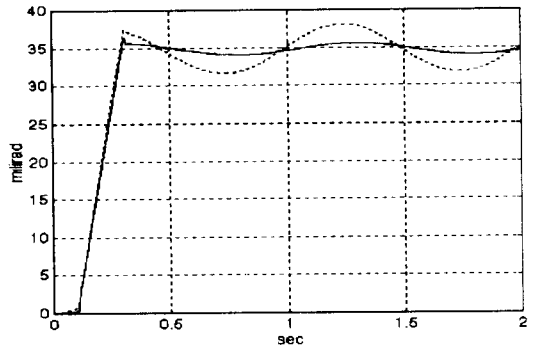

그림 7. 핸들명령이 있을때 고저방향 시선각
Fig. 7. Elivation LOS with handle command.

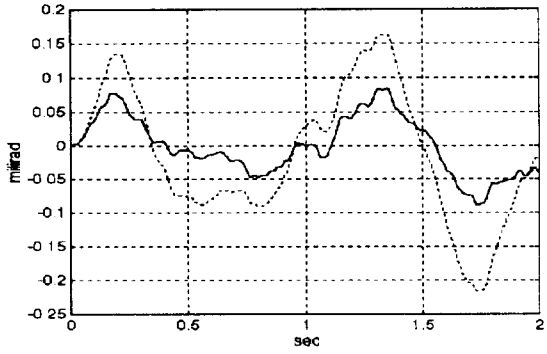

그림 8. 핸들명령이 없을때 선회방향 시선각
Fig. 8. Azimuth LOS without handle command.

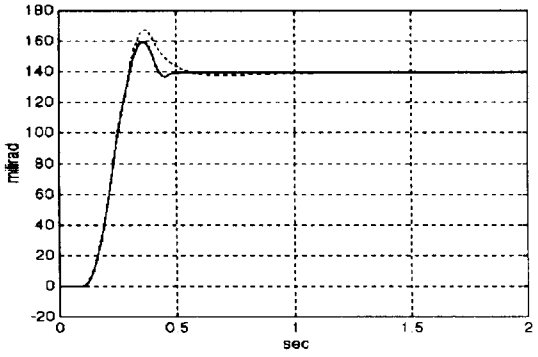

그림 9. 핸들명령이 있을때 선회방향 시선각
Fig. 9. Azimuth LOS with handle command.

5. 결론

본 논문에서는 KGPS 시선 안정화모드 제어기 설계에 H^{∞} 기법을 적용시키고 주된 모델섭동이 김벌구조에 있다는 가정하에 안정성을 깨뜨리지 않는 섭동의 범위조건에 대해서 논하였다. 설계된 H^{∞} 제어기를 현재 설치된 PI-Lead 제어기와 비교한 결과 고저방향과 선회방향 모두의 경우에서 외부명령에 대한 시선각 추종시 오버슈트나 정상상태로 수렴되는 시간을 줄일 수 있었고, 외란에 따른 시선각 이탈도 많이 개선되었다.

앞으로의 과제는 실제 KGPS 시스템에 적용시켜 모의실험상에서 얻은 결론을 확인하고 현장에서 발생할 수 있는 문제점들을 더욱 체계적으로 분석하여 보다 나은 제어기를 설계하는 것이다. 나아가 현재 제작중인 KCPS(Korean Commanders Panoramic Sight)에도 적용시켜 볼 계획이다.

참고문헌

[1] B. Armstrog-Helouvry, P. Dupont, and C. Canudas 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.

[2] K. Glover and J. Doyle, "State-space formulae for all stabilizing controllers that satisfy an $H\infty$ norm bound and relations to risk sensitivity," *Syst. Contr. Lett.*, vol. 11, pp. 167-172, 1988.

[3] M. Green and D. J. N. Limebeer, *Linear Robust Control*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J., 1995.

[4] R. A. Hyde, *$H\infty$ Aerospace Control Design. A VSTOL Flight Application*, Springer-Verlag, 1995.

[5] M. Iecovich, "Line of sight stabilization requirements for target tracking systems," *SPIE, Acquisition, Tracking and Pointing IV*, vol. 1304, pp. 100-111, 1990.

[6] D. C. McFarlane and K. Glover, "An $H\infty$ design procedure using robust stabilization of nomalized coprime factors," *Proc. IEEE CDC*, Austin, Texas, pp. 1343-1348, 1988.

[7] D. C. McFarlane and K. Glover, *Lecture Notes in Control and Information Sciences: 138*, Springer-Verlag, 1989.

[8] K. Zhou, J. C. Doyle and K. Glover, *Robust Optimal Control*, Prentice-Hall, Upper Saddle River, N. J., 1996.

[9] Sagem Inc. *Two Axis Gyroscopic System*, Sagem publishing, 1992.

[10] 안규봉, *조준경 안정화장치의 파라미터 추출 및 제어기 설계*, 경북대학교 대학원 석사학위 논문, 1996.