

가변구조제어에 의한 조준경 고각 안정화

◦ 김 중 완* 이 정 규** 김 주 상** 이 만 형***
 ◦ 동아대학교 공과대학 기계공학과*
 부산대학교 대학원 기계공학과**
 부산대학교 공과대학 정밀기계공학과***

Stabilization of Elevation for Gunner Primary Sight Using Variable Structure Control

◦ Joong-Wan Kim* Jeong-Kyu Lee** Joo-Sang Kim** Man-Hyung Lee***
 ◦ Dept. of Mechanical Eng. Dong-A University*
 Dept. of Graduate School Busan National University**
 Dept. of Precision Eng. Busan National University***

ABSTRACT

Gunner primary sight(GPS) stabilization system lays line of sight(LOS) to find out a target and transmits informations to the fire control system(FCS).

In a moving vehicle, accuracy of LOS and FCS depends on the design of GPS and servomechanism system.

The heavy vibration of vehicle on the severe off-road environment degenerates the stabilization capability of GPS.

In this study, to stabilize of elevation for GPS using the variable structure control, we derived the dynamic equation of GPS system and designed the variable structure controller.

Computer simulation results fulfilled the static and dynamic stability of GPS using the variable structure control.

1. 서론

조준경 안정화 (Gunner Primary Sight Stabilization) 시스템은 적 목표물의 인식과 탐지를 위해 조준선을 안정화시키며, 목표물의 위치를 알아내어 탄도계산기에 필요한 정보를 보내므로 화기제어시스템에서 매우 중요하다.[1]-[3]

기동중인 궤도차량에서 원거리 목표물을 인지하고 효과적으로 사격하기 위한 조준선 안정도와 화기제어 정확도는 조준경과 서보시스템 설계의 정밀성에 좌우된다.[4]-[6]

궤도차량에서 조준경의 고각 안정화 시스템은 불안정한 비선형 시스템이며, 지면에서 인가되는 토크 외란은 고각 안정화를 저하하는 요소로서 지속적으로 시스템에 작용하게 된다.[7]-[9]

가변구조제어는 시스템의 파라미터 변동이나 외란에 대하여 강인한 성능을 가지며 특히 불안정한 비선형 시스템에 대한 제어성능이 탁월한 것으로 알려져 있다. [10]-[12]

본 연구에서는 조준경 고각 안정화 시스템의 운동방정식을 유도하고 가변구조제어기를 설계하였으며 실제 주행시험결과 측정된 차량의 각속도를 외란으로 사용하여 컴퓨터 시뮬레이션하여 가변구조제어에 의한 조준경 고각 안정화가 정적 안정도 및 동적 안정도를 충족시킴을 보였다.

2. 조준경 고각 안정화 시스템

완전한 비선형모델을 세우기 위해 고려되는 일반화된 작용력은 시스템의 각각의 구성요소에 대해 다음과 같다.

- 1) 관성력
- 2) 롤링마찰과 점성마찰
- 3) 시스템의 요소들을 연결하는 케이블에 의한 등가스프링력
- 4) Band Driver의 인장력 변화에 기인한 작용 토크
- 5) 회전축의 비틀림으로 인한 등가스프링력
- 6) 질량불균형에 기인한 작용토크

Lagrange 방정식을 사용하여 유도한 결과 운동방정식은 다음과 같다.[13]-[15]

$$M_1(\theta_M + \Phi_E) + N_M \theta_M + C_M \operatorname{sgn}(\theta_M) + \gamma_M^2(K_1 + K_M) \theta_M - \gamma_M \gamma_P K_1 \theta_P - \gamma_M \gamma_B K_M \theta_B = 0 \quad (1)$$

$$P_1(\theta_P + \Phi_E) + N_P \theta_P + C_P \operatorname{sgn}(\theta_P) + \gamma_P^2(K_1 + K_P) \theta_P - \gamma_P \gamma_M K_1 \theta_M - \gamma_P \gamma_B K_P \theta_B = T_{MP} \quad (2)$$

$$B_1(\theta_B + \Phi_E) + N_B \theta_B + C_B \operatorname{sgn}(\theta_B) + r_B^2(K_P + K_M) \theta_B - r_B r_P K_1 \theta_M - r_P r_B K_P \theta_B = 0 \quad (3)$$

$$G_{33}(\theta_G + \Phi_A) + N_G \theta_G + C_G \operatorname{sgn}(\theta_G) - K_R \Phi_R + K_r V_1 = T_{mG} \quad (4)$$

$$(R_{11} + C_{11})(\beta_1 + \theta_P - \Phi_E) + N_A \beta_1 - \omega R_{12}(\theta_G + \Phi_A) = T_{mA} \quad (5)$$

$$(R_{23} + C_{23})(\beta_2 + \theta_G - \Phi_A) + N_E \beta_2 - \omega R_{22}(\theta_P + \Phi_E) = T_{mE} \quad (6)$$

여기서, 점자 m, p, b, g, a, e 는 각각 시스템의 구성요소인 Mirror, Platform, Balancer, Gimbal, Azimuth Gyro, Elevation Gyro를 나타내며, Φ_A, Φ_R, Φ_E 는 각각 터렛의 방위각, 롤각, 고각을 나타낸다. N_1, C_1 는 각 구성요소의 점성마찰계수, 쿨롱마찰계수이며 r_i 는 반경, K_i 는 등가스프링계수이다. M_1 은 Mirror의 관성모우멘트, P_1 은 플랫폼의 관성모우멘트, B_1 은 관성균형자의 관성모우멘트, G_{33} 는 방위각 김벌의 관성모우멘트, $R_{11} + C_{11}$ 은 방위각 자이로의 회전자와 내부김벌의 주관성모우멘트의 합, $R_{23} + C_{23}$ 은 고각자이로의 회전자와 내부김벌의 주관성모우멘트의 합이다. T_{mP} 는 플랫폼용 구동토크, T_{mG} 는 김벌 구동토크, T_{mA} 는 방위각 자이로의 세차운동을 일으키는 토크, T_{mE} 는 고각 자이로의 세차운동을 일으키는 토크이다.

모델 단순화 과정을 위한 그 기본개념 및 가정은 다음과 같다.

- 1) 방위각 안정화 루우프와 고각 안정화 루우프를 독립적으로 설계한다.
- 2) Band Driver의 인장은 무시한다.
- 3) 시스템 요소들을 연결하는 케이블의 등가스프링력이 Band Driver의 인장력변화에 따른 작용토크 보다 더 크게 작용된다.
- 4) 벨런서의 쿨롱마찰, 등가스프링력은 무시한다.
- 5) 자이로의 시스템 요소들의 마찰력은 쿨롱마찰이 지배적이다.

여기서는 고각 안정화 시스템 대해 운동방정식을 유도하기로 한다.

2.1 자이로 운동방정식

안정화 장치에 사용되는 자이로의 종류는 크게 속도자이로와 속도적분자이로로 대별된다. 속도자이로는 직접 관성속도를 측정하여 제어루우프에 쉽게 사용되지만 편차가 약간 있으므로 정확한 안정화 장치에는 적합하지 않다. 더욱 정밀한 측정을 위해 개발된 것이 속도적분자이로이며 오차가 적으므로 많이 사용하고 있다.

자이로의 일반적인 방정식은 다음과 같다.

$$(I_E p^2 + C_E p + K_E) A_E = H_E [\omega_{IA} - \omega_{cmd} - A_E \omega_{SRA} - (U) \omega_E] - I_E p \omega_{OA} \quad (7)$$

여기서, I_E 는 모우멘트, C_E 는 점성마찰계수, K_E 는 스프링계수이며 A_E 는 각위치, H_E 는 각운동량이다. 식 (7)의 우변에서 셋째항의 상호간섭, 넷째항의 불가피한 편류, 다섯째항의 유니트 지지대의 각속도항을 무시하고 또한 스프링력을 고려하지 않으면 다음과 같이 된다.

$$(I_E p^2 + C_E p) A_E = H_E (\omega_{IA} - \omega_{cmd}) \quad (8)$$

각속도 명령과 실제 구동된 각속도와 차이에 대한 차이로 검출기의 각변위 출력을 전달함수형태로 표시하면 다음과 같다.

$$\frac{A_E}{(\omega_{IA} - \omega_{cmd})} = \frac{H_E}{[C_E s (1 + I_E / C_E s)]} \quad (9)$$

검출기 이득은 K_P 라 하고 각속도차이에 대한 출력전압의 최종전달함수는 식 (10)과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{V_A}{(\omega_{IA} - \omega_{cmd})} &= \frac{H_E K_P}{[C_E s (1 + I_E / C_E s)]} \\ &= \frac{K_E}{s(1 + \tau_E s)} \end{aligned} \quad (10)$$

여기서, $\tau_E = I_E / C_E$, $C_E = H_E$, $K_P = K_E$

자이로 각위치를 $x_1 (= A_E)$, 각속도를 $x_2 (= \dot{A}_E)$ 라 하고 상태방정식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= \frac{H_E (\omega_{IA} - \omega_{cmd}) - C_E x_2}{I_E} \end{aligned} \quad (11)$$

2.2 김벌 운동방정식

완전한 비선형모델의 단순화를 위한 기본개념 및 가정 2)에서 플랫폼, 관성균형자, mirror 폴리들의 관계식은 식 (12)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} K_m &= K_p = K_b = 0 \\ r_m \theta_m &= r_p \theta_p = r_b \theta_b \end{aligned} \quad (12)$$

여기서 K, r, θ 는 각각 탄성력계수, 반경, 회전각이며 점자 m, p, b 는 각각 Mirror, 플랫폼용, 벨런서를 나타낸다. 가정 4), 5)에서

$$F_b = K_{sB} = 0 \quad (13)$$

$$N_m = N_p = N_b = 0 \quad (14)$$

여기서, F 는 쿨롱마찰계수, N 은 점성마찰계수이다.

식 (12), (13), (14)를 비선형모델식 (1), (2), (3)에

대입하고 조준경 및 자이로들의 상대회전에 따른 계이벌의 등가스프링력 $K_{\theta 1}, K_{\theta 2}$ 를 고려하여 종합하면 식 (15)와 같이 mirror를 기준으로 다시 정리하면 식(16)이 구해진다.

$$(J_m \theta_m + C_m \text{sgn}(\theta_m) + K_{\theta 1} \theta_m) + (J_B \theta_B) + (J_P \theta_P + C_P \text{sgn}(\theta_P) + K_{\theta 2} \theta_P) = T_{mp} \quad (15)$$

$$(J_m + R^2 J_B + 4J_P) \theta_m + (C_m + 2C_P) \text{sgn}(\theta_m) + (K_{\theta 1} + 2K_{\theta 2}) \theta_m = T_{mp} \quad (16)$$

Mirror 각위치를 $x_3 (= \theta_m)$, 각속도를 $x_4 (= \dot{\theta}_m)$ 로 두고 상태방정식으로 표현하면 다음식과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_3 &= x_4 \\ \dot{x}_4 &= \frac{T_{mp} - (C_m + 2C_P) \text{sgn}(x_4) - (K_{\theta 1} + 2K_{\theta 2}) x_3}{J_m + R^2 J_B + 4J_P} \end{aligned} \quad (17)$$

식 (11)과 식 (17)은 조준경 고각 안정화 시스템에 대한 상태방정식이다.

3. 가변구조제어기 설계

앞 절에서 유도된 안정화 시스템에서 물봉마찰을 고려하지 않은 선형시스템은 복소평면 허수축에 개루우프 극점이 2개 존재한다($s_1, s_2 = \pm 0.742j$).

그러므로 본 논문에서는 시스템의 총체적 점근적 안정성을 보장하기 위해 가변구조제어 시스템을 구성한 다.

가변구조 제어계에서는 제어입력을 상태변수의 함수로 정의하며 슬라이딩 레짐에 의해서 스위칭 논리를 받아 부호가 바뀌므로 계의 구조를 변화시킨다.

다음과 같은 상태방정식을 고려한다.

$$\dot{X} = A X + B u \quad (18)$$

가변구조 제어계에서 스위칭 평면과 제어법칙은 다음식으로 정의된다. [10]-[12]

$$\sigma(X) = \sum_{i=1}^n C_i X_i = C X = 0 \quad (19)$$

$$u = \left(-\sum_{i=1}^n \phi_i |X_i| \right) \text{sign}(\sigma(X)) \quad (20)$$

$$\text{여기서 } \text{sign}(\sigma(X)) = \begin{cases} +1 & \text{if } \sigma(X) > 0 \\ -1 & \text{if } \sigma(X) < 0 \end{cases} \quad (21)$$

스위칭 평면에서 슬라이딩운동이 일어날 필요충분조건은 다음과 같다.

$$\sigma(X) \dot{\sigma}(X) \leq 0 \quad (22)$$

식 (23)으로부터 식 (22)의 계수 ϕ_i 의 범위를 구하면 다음과 같다.

$$\phi_i \geq (\max \bar{a}_i) / (\min \bar{b}) \quad (23)$$

$$\text{여기서 } \bar{a}_i = \sum_{j=1}^n C_j a_{ij} \quad (i = 1, \dots, n)$$

$$\bar{b} = \sum_{j=1}^n C_j b_j > 0$$

상태변수가 스위칭 평면에서 이상적으로 슬라이딩 운동을 한다면 다음식이 성립한다.

$$\sigma(X) = 0 \quad (24)$$

$$\dot{\sigma}(X) = \frac{\partial \sigma}{\partial X} \dot{X} = CAX + CBu = 0 \quad (25)$$

식 (25)에서 등가입력 u_{eq} 를 구할 수 있다.

$$u_{eq} = -(CB)^{-1} CAX, \quad \text{단 } |CB| \neq 0 \quad (26)$$

식 (26)을 식 (18)에 대입하면 다음과 같은 등가 상태방정식을 구할 수 있다.

$$\dot{X} = (I - B(CB)^{-1} C) AX = A_{eq} X \quad (27)$$

식 (27)에서 A_{eq} 의 모든 고유치의 실수부가 음의 값을 갖도록 C를 선택하면 시스템이 안정해짐을 알 수 있다.

조준경 고각 안정화 시스템의 상태방정식 (11)과 식 (17)을 이용하여 가변구조 제어기를 설계하면 다음과 같다.

스위칭 평면

$$\sigma(X) = 50 X_1 + X_2 \quad (28)$$

스위칭 논리

$$\text{sat}(z) = \begin{cases} z & \text{if } |z| < 1 \\ \text{sign}(z) & \text{if } |z| \geq 1 \end{cases} \quad (29)$$

여기서

$$z = \sigma(X) / (|X_1| + |X_2|) \quad (30)$$

제어법칙

$$u = -[\phi_1 |X_1| + \phi_2 |X_2|] \text{sat}(z) \quad (31)$$

여기서

$$\phi_1 = -32545.467$$

$$\phi_2 = -254.8359$$

4. 시뮬레이션 및 고찰

컴퓨터 시뮬레이션 조건은 표 1과 같다.

Table 1. Conditions for Simulation

조건	기준입력	속도	포 각
1	20 deg/sec	8 km/h	0°
2	"	24 km/h	0°
3	"	30 km/h	90°

조건 1의 시뮬레이션 결과를 그림 1 (a), (b)에 도시하였다. 그림 1 (a)는 조준경의 각위치 오차를 나타내며 그림 1 (b)는 조준경의 각속도 오차를 나타낸다. 약 0.05 초 이내에 시스템이 안정되며 외란에도 불구하고 정적 및 동적 안정도를 충족시킴을 볼 수 있다.

궤도차량의 속도가 비교적 빠른 조건 2와 조건 3에서 시뮬레이션된 결과를 각각 그림 2 (a), (b)와 그림 3 (a), (b)에 도시하였다. 조건 1의 결과와 유사한 경향이며 안정화가 성공적으로 수행되고 있음을 알 수 있다.

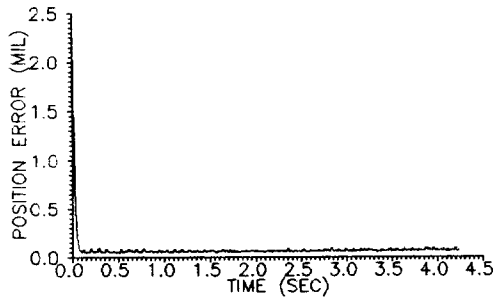


Fig. 1 (a) Angular position error.

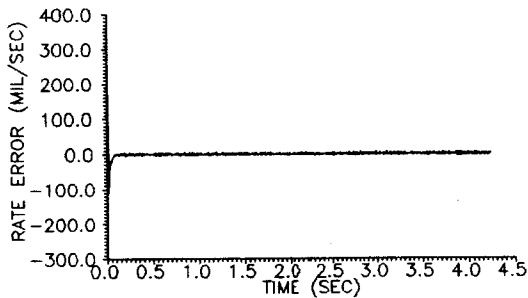


Fig. 1 (b) Angular rate error.

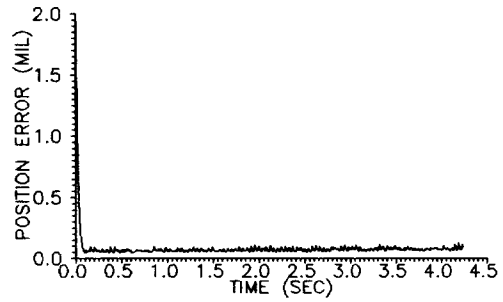


Fig. 2 (a) Angular position error.

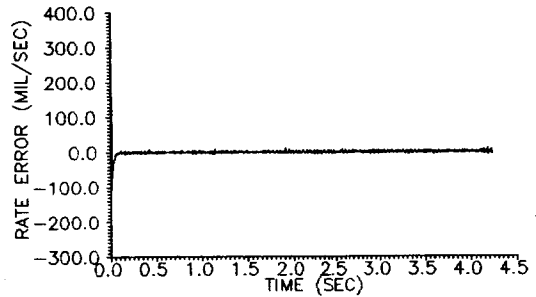


Fig. 2 (b) Angular rate error.

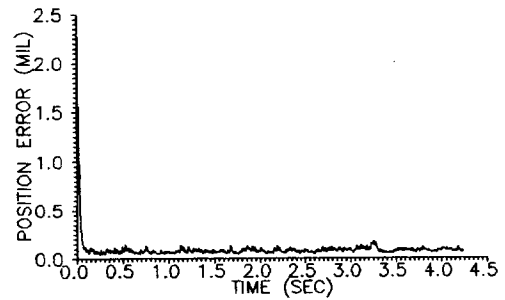


Fig. 3 (a) Angular position error.

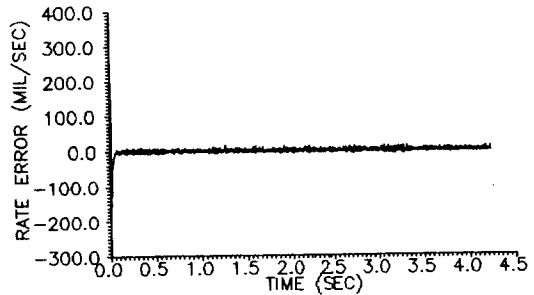


Fig. 3 (b) Angular rate error.

5. 결 론

가변구조제어에 의한 조준경 고각 안정화를 위하여 조준경 고각 안정화 시스템에 대한 운동방정식과 상태방정식을 유도하고 가변구조제어기를 설계하고 실제 측정된 토크외란을 인가하여 시뮬레이션한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 가변구조제어에 의하여 불안정한 조준경 고각 안정화 시스템이 안정한 시스템으로 바뀌었다.
- 2) 가변구조제어에 의하여 조준경 시스템에 가해지는 토크외란에도 불구하고 고각 조준이 안정화되었다.
- 3) 가변구조제어에 의하여 고각안정화의 정적정확도 및 동적정확도를 충분히 만족한다.
- 4) 가변구조제어에 의하여 안정상태에 이르는 시간은 약 0.05초 이내이다.

앞으로 계속 연구할 내용은 조준경 안정화 서보루우프의 제어를 위한 조준경 시스템의 하드웨어설계이다. 그리고 회로 부분은 현재 공개되지 않은 자이로 토크드라이브를 해석하고 역설계하는 것이 과제라고 사료된다.

참고문헌

- [1] T.Harrison, "Computer Simulation and Studies of the Behavior of Stabilized Gun Systems Subject to Hull Disturbance," The Royal Military College of Science, Dept. of Mechanical Engineering, Report No. 7MVT/4, Oct., 1979.
- [2] "Proposal for a Gunner's Primary Tank Thermal Sight(GPTTS) for the XK-1 Tank," Texas Instruments, Oct., 1984.
- [3] W. H. Baykin, et al., "Derivation and Analysis of the Complete Nonlinear Dynamic Equation of the Micom Stabilized Mirror Systems," Technical Report RG-75-11, Army Missile Research, Development, and Engineering Laboratory, September, 1974.
- [4] "Gunner's Primary Tank Thermal Sight(GPTTS) for the Korean XK-1 Tank," Texas Instruments, Nov., 1984.
- [5] "Gunner's Primary Tank Thermal Sight (GPTTS) Part Number 2830000," Nov. 1987.
- [6] "Fire Control System Methodology Analysis and Results," Texas Instruments.
- [7] Mil-R-23750A(AS), Rate Integrating Gyro MS 3391, July, 1963.
- [8] 이만형, "Micom Stabilized Mirror System에 대한 완전한 Nonlinear Dynamic Equation의 유도 와 해석," 국방과학연구소 위탁연구 중간보고서 1989.
- [9] 박용운 외 2인, "Mirror 안정화 장치의 제어기 설계," 한국자동제어학술회의 논문집, 10, 1988.
- [10] 김중완, 이만형, "가변구조제어계의 시변슬라이딩레짐에 관한 연구," 한국정밀공학회지, 제6권, 제2호, pp30-39, 1989.
- [11] 김중완, 이만형, "가변구조제어계의 체터링현상의 제어를 위한 연속입력 제어법칙의 개선," 전기학회 논문지, 제38권, 제1호, pp60-67, 1989.
- [12] 김중완, "가변구조제어계의 시변 슬라이딩레짐에 관한 연구," 부산대학교 대학원 박사학위논문, 8, 1989.
- [13] 이병호, 동력학 특론, 민음사, 1984.
- [14] Basics of Gyroscopes, TR-6026
- [15] D. T. Greenwood, Principles of Dynamics, Prentice-Hall Inc. 1980.