

회전 장비 사용을 배제한 짐벌 시스템의 공간 안정화 성능 측정 방법

Evaluating Spatial Stabilization Performance of Gimbal System Without Using Rotating Equipment

김정석¹, 임현자¹, 김대연*¹

(Jeongseok Kim¹, Hyunja Im¹, and Daeyeon Kim^{1,*})

¹Missile Research Institute, Agency for Defense Development, Korea

Abstract: Gimbal control systems play a crucial role in spatial stabilization across various applications, aiming to minimize sensitivity to external disturbances. Traditional evaluation of stabilization performance relies on expensive rotational equipment to generate real disturbances, increasing both cost and complexity. This paper proposes a novel, cost-effective method for assessing stabilization performance by injecting virtual disturbance signals into the gimbal control processor. This approach eliminates the need for physical disturbance generation, significantly reducing testing costs while maintaining high realism in simulating real-world conditions. Furthermore, it simplifies the evaluation process, enhancing accessibility and efficiency for practical applications. Simulation results validate the effectiveness of this approach, demonstrating its potential as a reliable alternative for evaluating gimbal control system performance accurately and efficiently.

Keywords: gimbal control, spatial stabilization, sensitivity to perturbation, performance evaluation

I. 서론

짐벌 제어 시스템은 차량, 우주선 및 다양한 무기체계 등에 장착된 카메라나 레이저와 같은 다양한 장치의 방향 제어에 있어서 중요한 역할을 한다[1,2]. 이러한 시스템의 성능은 외란(플랫폼의 요동)의 영향을 받아 저하되며, 높은 정밀도와 견고성을 보장하기 위해 고급 제어 전략이 요구된다.

짐벌 제어 시스템에 대한 연구는 지난 수십 년간 상당한 발전을 이루었다. 예를 들어, 적응형 제어 기법은 짐벌 시스템의 성능을 향상시키기 위해 널리 채택되고 있다. 참고문헌 [3]은 2축 짐벌 시스템을 위한 적응적 제어를 제안하여 비선형성과 불확실성을 효과적으로 해결하였다. 문헌 [4]에서는 항공기에 장착된 짐벌의 적응적 제어를 위한 보상기를 도입하여 안정성과 응답성을 개선하였다. 문헌 [5]에서는 시간 지연 제어와 내부 모델 제어를 결합하여 마찰 보상 문제를 개선하였으며, 문헌 [6]에서는 다중 외란 환경에서 최적의 피드백 안정화 성능을 개선하였다. 문헌 [7,19]에서는 2축 짐벌 탐색기의 성능을 개선하였으며 문헌 [8,9] 또한 적응형 외란 제거 제어기의 설계 및 하드웨어 구현으로 성능을 개선하였다. 비교적 최근에는 마찰, 커플링, 외란 등을 처리하기 위한 방법으로서 외란 관측기(DOB) 기반 제어 방식이 주목을 받아왔다. 문헌 [10]에서는 DOB 설계에 민감도 최적화 접근법을 제안하였고 문헌 [11]에서는 2차 시스템에서 DOB의 견고성과 성능을 탐구하였으며 문헌 [12]에서는 OB를 표준 H^∞ 제어 프레임워크에 통합하여 성능을 향상시켰다. 문헌 [13,20]

에서는 외란 감쇠 및 노이즈 억제를 개선하였고 문헌 [14]는 DOB를 활용한 복합 디커플링 제어를 개발하였으며 문헌 [15]에서는 DOB로 고정밀 방해 억제 제어를 구현하였다. 문헌 [16]에서는 H^∞ 기반 필터를 적용하여 변화하는 조건과 모델 부정확성 속에서도 시스템 안정성을 보장하였다. 또한, 다양한 산업과 국방 분야에서 짐벌 시스템은 고속 이동 중에도 안정적인 시선 제어가 요구되며, 이러한 시스템의 성능은 감시, 탐지 및 추적과 같은 핵심 임무의 성공에 직결된다. 예를 들어, 정밀 유도 시스템에서는 외란 민감도를 최소화하여 관찰 대상을 정확히 추적할 수 있어야 한다. 이를 통해, 짐벌 제어 시스템의 설계와 평가 기술은 더 높은 수준의 신뢰성과 성능을 필요로 하고 있다.

이상 검토된 문헌들은 짐벌 시스템을 활용한 외란 보상 제어 기술에 대한 다양한 방법들을 제시하고 있다. 한편 본 논문에서는 외란 보상 기능을 제공하는 짐벌 시스템에 대한 성능을 측정하는 방법에 초점을 맞춘다. 짐벌 제어 시스템의 외란 민감도를 측정하는 일반적인 방법은 문헌 [16]의 실험에서 활용된 회전 장비 등을 사용하여 외란을 가하므로 비용이 많이 들고 번거로울 수 있다. 예를 들어 고고도에서 운용되는 플랫폼의 경우 유사 환경을 모사하기 위하여 저온 챔버 내에서의 성능측정이 필요할 수 있으나 공간의 제약 상 회전 장비 구축하기 어려울 수 있다. 또 다른 예로 플랫폼의 자세가 다양하게 변하는 경우 이를 모사하기 위하여 회전 장비를 다양한 방향으로 기울일 수 있는 추가 장치가 필요하다.

*Corresponding Author

Manuscript received December 29, 2024; revised January 29, 2025; accepted February 4, 2025

김정석: 국방과학연구소 선임연구원(bluesky@add.re.kr, ORCID[®] 0009-0003-4255-8731)

임현자: 국방과학연구소 선임연구원(jasmine@add.re.kr, ORCID[®] 0009-0005-8079-1790)

김대연: 국방과학연구소 책임연구원(daeyeon@add.re.kr, ORCID[®] 0000-0002-5271-0368)

따라서, 본 연구에서는 외란을 데이터 신호 형태로 짐벌 제어 프로세서에 직접 입력하는 새로운 방법을 제안한다. 이 접근법은 비용을 절감할 뿐 아니라 테스트 과정을 단순화하여 성능을 평가하는 데 있어서 보다 효과적이다. 따라서 본 논문에서는 제안 방법의 원리를 설명하기 위하여 수학적 모델로 이를 유도하는 과정을 설명한다. 또한 시뮬레이션 테스트로 회전 장비를 이용하는 경우와 유사한 결과가 도출될 수 있음을 확인한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제2장에서는 공간 안정화 제어 시스템의 원리와 그에 대한 일반적인 성능측정 방법을 소개한다. 제3장에서는 제안된 방법과 그 구현 방안을 제시한다. 제4장에서는 제안된 방법의 효용성을 입증하는 시뮬레이션 결과를 제시한다. 마지막으로 5장에서 본 연구를 종합한다.

II. 공간 안정화 제어 개요

본 장에서는 공간 안정화 제어를 수행하는 짐벌 시스템의 작동 원리와 성능 평가 방법을 설명한다. 짐벌 시스템 모델에서 사용되는 변수, 상수 및 함수들은 표 1에 정의하였다.

관성 안정화 제어기의 다이어그램은 그림 1과 같다(이 모델은 짐벌의 단일 회전 축에 해당하며, 다축 짐벌의 경우 관심 축에 독립적으로 적용할 수 있다)

그림 1에 나타난 관성 안정화 제어기 F_C 는 자이로 센서 출력 ω_S 를 참조하여 서보모터의 회전력 명령 τ_C 을 생성하며, 이는 다음과 같이 정의한다.

$$\tau_C := F_C(\omega_S) \tag{1}$$

회전력 명령 τ_C 는 서보모터 F_M 에 인가되어 회전력 τ_M 을 생성한다. 그러나 서보모터의 마찰 회전력 τ_R 로 인해, 서보모터의 총 회전력은 다음과 같다.

표 1. 짐벌 안정화 제어 모델의 변수, 상수 및 함수.

Table 1. Variables, constants and functions of gimbal stabilization control model.

기호	설명
F_C	공간 안정화 제어기
F_M	짐벌 회전을 위한 서보모터 모델
F_R	회전력에 대한 마찰 모델
F_G	관성 모멘트에 따른 짐벌 모델
F_S	각속도 측정을 위한 자이로 센서 모델
τ_C	서보모터 제어를 위한 회전력 명령
τ_M	서보모터에 인가된 회전력
τ_R	서보모터에 발생한 마찰 회전력
τ	서보모터에 발생한 총 회전력
m	짐벌 모델의 관성 모멘트 (상수)
θ	시선과 플랫폼 축 간 각도
$\dot{\theta}$	시선과 플랫폼 축 간 각속도
ω	시선과 관성 축 간 각속도
ω_S	자이로 센서로 측정된 각속도
ω_E	플랫폼 축과 관성 축 간 각속도
s	라플라스 연산자

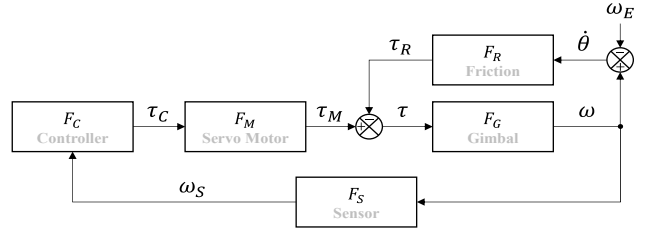


그림 1. 짐벌 안정화 제어 모델의 다이어그램.

Fig. 1. Diagram of gimbal stabilization control model.

$$\tau = \tau_M - \tau_R \tag{2}$$

여기서 플랫폼과 짐벌 사이의 상대 각속도 $\dot{\theta}$ 에 의해 영향을 받는 마찰 회전력 τ_R 는 다음과 같이 정의한다.

$$\tau_R := F_R(\dot{\theta}) \tag{3}$$

서보모터에서 생성된 회전력은 각속도 $\dot{\omega}$ 와 관성 모멘트 m 의 함수로서 $\tau = m\dot{\omega}$ 이므로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\omega := F_G(\tau) = \frac{\tau}{ms} \tag{4}$$

짐벌의 각속도 ω 는 시선의 회전을 나타내며, 플랫폼의 각속도 ω_E 와 상대 각속도 $\dot{\theta}$ 의 합이므로 상대 각속도는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\dot{\theta} = \omega - \omega_E \tag{5}$$

실제 각속도 ω 는 자이로 센서를 통해 측정되므로, 이용 가능한 정보는 센서 출력 $\omega_S := F_S(\omega)$ 이다. 외란에 대한 민감도는 외부에서 가해진 각속도 ω_E 와 측정된 시선 각속도 ω_S 의 표준편차 비율로 정의되며, 이는 다음과 같다.

$$\Gamma := \frac{STD(\omega_S)}{STD(\omega_E)} \tag{6}$$

공간 안정화 성능은 위 값이 작을수록 우수함을 의미한다.

III. 제안 방법의 이론

위에서 설명한 대로 관성 안정화 성능을 측정하기 위해서는 미리 계획된 각속도 ω_E 로 정밀하게 회전할 수 있는 기계 장비가 필요하다. 제안된 방법은 ω_E 를 기계적 회전 대신 데이터 신호 형태로 인가함으로써 이와 관련된 비용을 줄이는 것을 목표로 한다. 그림 1에 나타난 바와 같이, 안정화 제어를 방해하는 마찰 회전력 τ_R 은 상대 각속도 $\dot{\theta}$ 의 함수이다. 여기서 $\dot{\theta}$ 는 식 (4)를 식 (5)에 대입하여 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\dot{\theta} = \frac{\tau}{ms} - \omega_E = \hat{\tau} \tag{7}$$

여기서 회전력은 $\hat{\tau} := \tau - m\dot{\omega}_E$ 로 정의된다. 따라서, 식 (4)에서 회전력 $\hat{\tau}$ 로부터 유도된 시선 각속도를 식 (8)과 같이 정의할 수 있으며, 이는 식 (7)과 동일하다.

$$\hat{\omega} := F_G(\hat{\tau}) = \frac{\hat{\tau}}{mS} \quad (8)$$

비용 절감을 위해 기계적 회전을 배제하면 $\omega_E = 0$ 이므로 식 (5)에 따라 상대 각속도 ω 는 $\dot{\theta}$ 가 된다. 따라서 동일한 마찰 회전력 τ_R 이 식 (3)에 따라 생성된다. 식 (2)에 따르면, 결과 회전력은 $\hat{\tau} = \hat{\tau}_M - \tau_R$ 로 정의된다. 그러므로 서보모터에 유도된 회전력은 $\hat{\tau}_M := \tau_M - m\dot{\omega}_E$ 로 정의된다. 또한 위의 회전력을 적용하기 위한 회전력 명령을 $\hat{\tau}_C$ 라고 하면, $\hat{\tau}_M = F_M(\hat{\tau}_C)$ 이므로, 이를 역함수로 표현하면 $\hat{\tau}_C := F_M^{-1}(\hat{\tau}_M)$ 로 쓸 수 있다. 이는 서보모터에 대한 회전력 명령을 $\hat{\tau}_C$ 로 생성함으로써 짐벌을 시선 각속도 $\dot{\theta}$ 로 제어할 수 있음을 의미한다. 함수 F_M 을 역을 가지는 선형 모델 L_M 로 가정하면, 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{\tau}_C &\approx L_M^{-1}(\hat{\tau}_M) = L_M^{-1}(\tau_M - m\dot{\omega}_E) \\ &= L_M^{-1}(\tau_M) - L_M^{-1}(m\dot{\omega}_E) \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 $L_M^{-1}(\tau_M) \approx F_M^{-1}(\tau_M) = \tau_C$ 이므로, $\hat{\tau}_C \approx \tau_C - L_M^{-1}(m\dot{\omega}_E)$ 를 얻을 수 있다. 위의 L_M 은 전달 함수 G_M 으로 근사할 수 있으며, 근사값 $\hat{\tau}_C'$ 는 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$\hat{\tau}_C' := \tau_C - \frac{m\dot{\omega}_E}{G_M} \approx \hat{\tau}_C \quad (10)$$

위에서 언급된 회전력 명령에 따라 발생된 회전력은 $\hat{\tau}_M' := F_M(\hat{\tau}_C') \approx \hat{\tau}_M$ 로 정의된다. 따라서, 마찰까지 고려한 회전력은 다음과 같다.

$$\hat{\tau}' := \hat{\tau}_M' - \tau_R \approx \hat{\tau} \quad (11)$$

그러므로 근사된 상대 각속도는 $\dot{\theta}' := F_G(\hat{\tau}') \approx \dot{\theta}$ 로 생성될 수 있다. 이 상대 각속도에 의해 유발된 마찰 회전력은 $\tau_R' := F_R(\dot{\theta}') \approx \tau_R$ 로 정의된다. 결과적으로, 식 (11)은 $\hat{\tau}' := \hat{\tau}_M' - \tau_R' \approx \hat{\tau}$ 로 수정될 수 있다. 따라서 서보모터에 회전력 명령 $\hat{\tau}_C'$ 를 적용함으로써, 그림 1의 ω 대신 $\dot{\theta}$ 의 근사값인 관성 각속도 $\dot{\theta}'$ 를 생성할 수 있다. 이로 인한 자이로 센서의 출력은 $\dot{\theta}_S' := F_S(\dot{\theta}')$ 로 표현된다. 그러나 식 (10)에서 $\hat{\tau}_C'$ 를 생성하기 위한 τ_C 는 (1)과 같이 ω_S 를 제어기에 입력하여 결정되므로 ω_S 는 자이로 센서 F_S 에 대한 선형 모델 L_S 로 표현될 수 있으며, 이는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \omega_S &= F_S(\omega) = F_S(\dot{\theta} + \omega_E) \\ &\approx L_S(\dot{\theta} + \omega_E) = L_S(\dot{\theta}) + L_S(\omega_E) \end{aligned} \quad (12)$$

위 식에서 $L_S(\dot{\theta}) \approx F_S(\dot{\theta}) \approx F_S(\dot{\theta}') = \dot{\theta}_S'$ 이므로 ω_S 는 $\omega_S' := \dot{\theta}_S' + L_S(\omega_E) \approx \omega_S$ 로 근사될 수 있다. 자이로 센서의 선형 모델 L_S 을 전달 함수 G_S 로 간주하면, 이는 다음과 같이 재정의될 수 있다.

$$\omega_S' := \dot{\theta}_S' + G_S\omega_E \quad (13)$$

따라서 제어기에 $\dot{\theta}_S'$ 대신 ω_S' 를 입력함으로써, 회전력 명령 τ_C 에 대한 근사값을 $\tau_C' := F_C(\omega_S')$ 로 생성할 수 있으므로 식 (10)을 다음과 같이 쓸 수 있다.

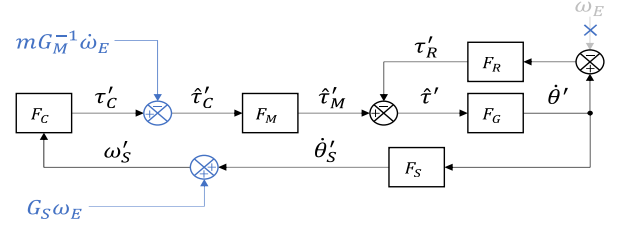


그림 2. 교란에 대한 민감도를 추정하기 위한 제안된 방법의 다이어그램.

Fig. 2. Diagram of proposed method for estimating sensitivity to perturbation.

$$\hat{\tau}_C' := \tau_C' - \frac{m\dot{\omega}_E}{G_M} \approx \hat{\tau}_C \quad (14)$$

그림 2는 본 장에서 설명된 제안된 방법의 다이어그램을 나타낸다.

그림 2에서 식 (13)과 (14)에 따라 ω_S' 와 $\hat{\tau}_C'$ 를 얻기 위하여, 제안된 방법은 미리 계획된 플랫폼의 각속도 $\dot{\omega}_E$ 와 각속도 ω_E , 그리고 모델 추정값 m , G_M 및 G_S 를 활용한다. 즉, $G_S\omega_E$ 와 $m\dot{\omega}_E/G_M$ 가 각각 관성 안정화 제어기의 입력과 출력에 추가된다. 외란 민감도는 테스트 시간 동안 ω_S' 의 표준편차를 측정하여 다음과 같이 계산한다.

$$\Gamma' := \frac{STD(\omega_S')}{STD(\omega_E)} \quad (15)$$

이 두 추가 신호는 제어 동작 중에 변경되지 않으므로, 제어기에 사전 프로그래밍할 수 있다. 예를 들어, 제어기 소프트웨어에 관성 안정화 테스트 모드를 추가함으로써, 특정 시간 동안 이 두 신호를 적용하여 짐벌을 작동하도록 구현할 수 있다.

IV. 시험 결과

본 장에서는 시뮬링크 시뮬레이션을 사용하여 제안된 방법의 타당성을 입증한다. 그림 1과 그림 2에 나타난 시스템을 구현하고, 식 (6)과 (15)를 사용하여 얻은 결과로부터 민감도를 계산하고 비교하였다. 구현을 위해 짐벌의 관성 모멘트 m 는 0.003 Kg m^2 로 설정하였다. 따라서 다음의 모델을 고려한다.

$$F_G(\tau) = \frac{\tau}{0.003s} \quad (16)$$

짐벌 서보모터의 마찰 모델 $F_R(\dot{\theta})$ 는 식 (17)과 같이 스트리백 효과[17]를 고려하였으며, 쿨롱 마찰 K_C , 스트리션 레벨 K_S , 점성 마찰 K_V 및 스트리백 속도 V_S 를 각각 0.7 mNm , 1 mNm , 0.09 mNm , 및 0.5 deg/s 로 설정하였고 그 결과는 그림 3과 같다.

$$F_R(\dot{\theta}) = \text{sign}(\dot{\theta}) \left(K_C + (K_S - K_C) e^{-\left| \frac{\dot{\theta}}{V_S} \right|^2} \right) + K_V \dot{\theta} \quad (17)$$

또한 식 (17)에서 $\text{sign}(\dot{\theta})$ 은 입력의 부호로서 $\dot{\theta}$ 이 0 이상이면 1이고 그 외의 경우 -1이다.

서보모터와 자이로 센서의 동적 특성은 문헌 [18]을 기반으로 모델링되었으며, 이는 각각 식 (18)과 (19)로 정의된다.

$$F_M = \frac{24637.68}{(s^2 + 1500s + 20942)} \quad (18)$$

$$F_S = \frac{2500}{(s^2 + 70s + 2500)} \quad (19)$$

이러한 특성을 고려하여, 공간 안정화 제어기는 식 (20)과 같이 설계되었다.

$$F_C = \left(-\frac{70s + 2500}{s + 2500}\right) \left(\frac{10s^2 + 240s + 1400}{s^2 + 1000s}\right) \quad (20)$$

여기서 첫 번째 항은 자이로 특성을 보상하기 위한 것이며, 두 번째 항은 서보모터 특성을 반영하며 음수 부호는 음의 피드백을 나타낸다. 본 연구의 목적은 성능 향상이 아니므로 식 (20)은 제어기의 일례일 뿐 다른 어떠한 제어기를 가정하여도 무방하다. 이 모델의 민감도를 측정하기 위해, 정현파 외란 $\omega_E = A \sin(2\pi ft)$ 를 특정 시간 동안 적용하였다.

그림 4의 곡선 Conv는 진폭 A 를 30 deg/s, 주파수 f 를 3 Hz로 설정한 외란 ω_E 에 대하여 기존 방법을 고려할 경우의 자이로 출력인 ω_S 를 나타낸다. 곡선 Prop는 그림 2의 제안 방법에 대하여 동일한 외란 ω_E 와 이에 대한 미분 값 $\dot{\omega}_E = 2\pi f A \cos(2\pi ft)$ 를 고려하여 얻은 ω_S' 를 나타낸다. 제안 방법을 적용하기 위하여 필요한 식 (18)에 대한 역함수는 다음과 같이 근사될 수 있다.

$$G_M^{-1} = \frac{1500s + 20942}{s + 24637.68} \quad (21)$$

또한 제안 방법을 위해 필요한 G_S 의 경우, 식 (19)를 그대로 적용하였다.

그림에서 진폭이 30 deg/s인 입력 외란의 표준편차는 약 21.21 deg/s이며, ω_S 와 ω_S' 의 표준편차는 각각 약 0.74 deg/s와 0.69 deg/s이다. 따라서, I 와 I' 는 각각 약 0.035와 0.032로 계산되며, 이는 -29.1 dB와 -29.77 dB에 해당한다. 그림 5는 다양한 외란 주파수에 대한 민감도를 나타낸다. 그림에 따르면 외란의 주파수가 높아질수록 두 방법 간의 차이가 벌어지는데, 이는 그식 (21)의 G_M^{-1} 이 (18)의 F_M 에 대한 완벽한 역함수가 아님에

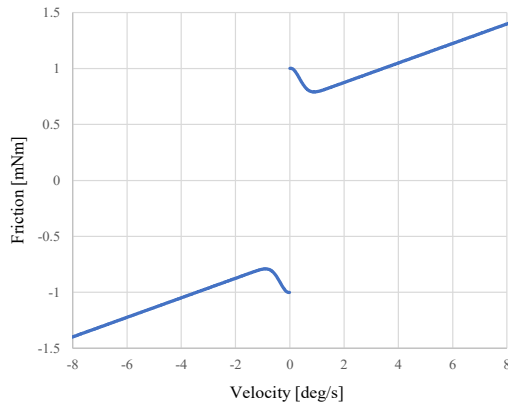


그림 3. 시뮬레이션에 고려된 마찰 모델.

Fig. 3. Friction model considered for the simulation.

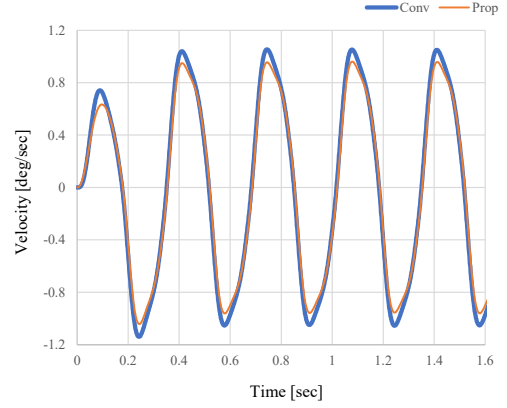


그림 4. 식 (18), (19), (20), (21)을 가정하여 기존 방법과 제안된 방법으로 계산된 시선 각속도.

Fig. 4. LOS angular velocities calculated by conventional and proposed method, where (18), (19), (20) and (21) are assumed.

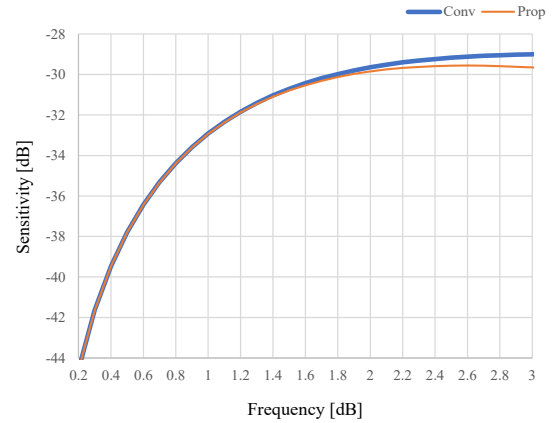


그림 5. 식 (18), (19), (20), (21)을 가정하여 기존 방법과 제안된 방법으로 계산된 교란에 대한 민감도.

Fig. 5. Sensitivities to perturbation calculated by conventional and proposed method, where (18), (19), (20) and (21) are assumed.

$$F_M = 1 \quad (22)$$

기인한다. 이를 검증하기 위해, 역함수를 가지는 동적 특성을 가진 또 다른 서보모터를 다음과 같이 고려하였다. 또한, 적절한 민감도 성능을 달성하기 위해 제어기를 식 (23)과 같이 수정하였다.

$$F_C = \left(-\frac{70s + 2500}{s + 2500}\right) \left(\frac{0.3s + 3}{s}\right) \quad (23)$$

그림 6의 곡선 Conv는 앞서 고려된 동일한 외란에 대하여 기존 방법을 사용하여 얻어진 ω_S 를 나타낸다. 또한, 곡선 Prop-Case1은 $G_M^{-1} = 1$ 로 설정한 경우 제안된 방법을 사용하여 얻어진 ω_S' 를 나타내며, 이는 곡선 Conv와 일치한다. 한편, 곡선 Prop-Case2와 Prop-Case3은 G_M^{-1} 를 각각 0.9와 0.8로 설정하여 얻어진 ω_S' 를 나타내며, G_M^{-1} 가 이상 값에서 벗어난 정도가 성능에 미치는 영향을 확인하기 위한 것이다. 결과에 따르면, 이상 값에서 멀어질수록 제안된 방법의 정확도가 저하된다.

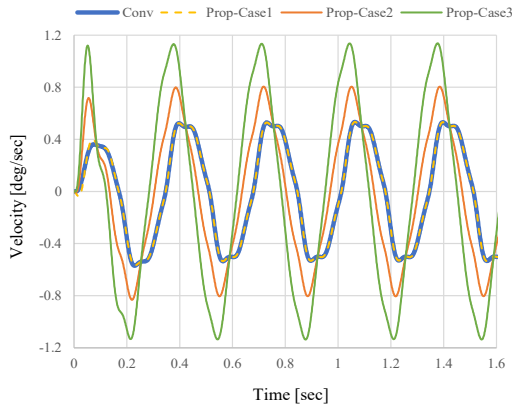


그림 6. 식 (22), (19), (23)을 가정하고 1, 0.9, 0.8의 값을 적용하여 기존 방법과 제안된 방법으로 계산된 시선 각속도.

Fig. 6. LOS angular velocities calculated by conventional and proposed method, where (22), (19), (23) and G_M^{-1} of 1, 0.9 and 0.8 are assumed.

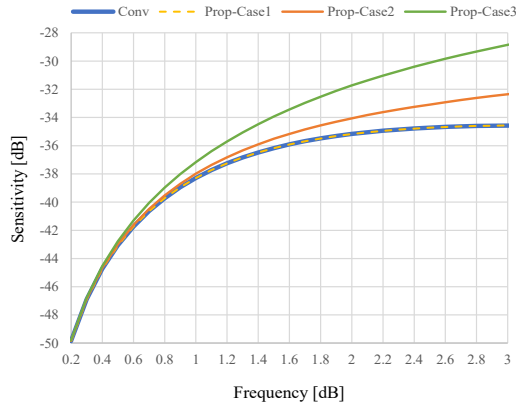


그림 7. 식 (22), (19), (23)을 가정하고 1, 0.9, 0.8의 값을 적용하여 기존 방법과 제안된 방법으로 계산된 교란에 대한 민감도.

Fig. 7. Sensitivities to perturbation calculated by conventional and proposed method, where (22), (19), (23) and G_M^{-1} of 1, 0.9 and 0.8 are assumed.

그림 7은 보다 다양한 주파수에서 계산된 민감도를 보여준다. 이 그림은 G_M^{-1} 가 실제 값에서 멀어질수록 제안 방법의 정확도가 저하되며 특히 외란 주파수가 높아질수록 더 크게 저하된다. 또한, 자이로 센서 모델 G_S 가 제안된 방법의 정확도에 미치는 영향 또한 유사한 경향을 보이는데 이에 대한 논의는 생략한다. 언급된 바와 같이 제안 방법의 정확도는 입력 신호를 생성하는데 사용된 서보모터와 자이로 센서 모델의 정밀도에 의존한다. 즉, 보다 정확한 모델을 고려할수록 제안된 방법의 성능이 향상된다. 그러나 모델이 다소 부정확하더라도 약 1Hz 이하의 저주파수 외란에 대하여 오류가 크지 않다. 이는 고주파 외란과 비교할 때 중요한 이점이다. 왜냐하면, 동일 조건의 각속도 진폭에 있어서, 외란의 주파수가 낮을수록 회전 각의 크기가 커지기 때문에 (그에 따라 관촬 대상이 영상획득 장치의 시계 밖으로 벗어날 확률이 커지므로) 저주파 외란에 대한 공간 안정화 성능이 더욱 중요한 관심의 대상이 되기 때문이다.

본 장에서는 시뮬레이션을 통해 제안된 방법이 저비용으로 짐벌 시스템의 민감도를 측정하는 데 유용함을 확인하였다. 이는 실용적 적용 가능성을 보여주며, 실험적 검증과 실제 환경에서의 적용 가능성을 보여준다.

V. 결론

본 논문에서는 짐벌 제어 시스템에서 물리적 회전 장비를 사용하지 않고, 외란을 데이터 신호로 짐벌 제어 프로세서에 입력하여 민감도를 측정하는 방법을 제안하였다. 이 방법은 기존의 물리적 장비를 사용하는 방식에 비해 비용을 절감하고, 테스트 과정을 단순화하며, 다양한 외란 조건에서의 유연한 성능 평가를 가능하게 할 수 있다. 제안 방법을 도출하기 위하여 공간 안정화 제어 시스템을 수학적으로 모델링하였고 이를 분석하여 물리적 외란을 대체하는 신호 생성 방법을 유도하였다. 이 대체 신호는 제어기와 자이로 센서에 대한 모델을 기반으로 계산되며 정확한 모델을 상정하는 경우 기존의 물리적 방법과 일치하는 결과를 출력한다. 시뮬레이션 결과, 모델 오차만큼의 열화된 신뢰도를 보였으며 이는 정확한 모델을 확보하는 것이 중요함을 의미한다. 따라서 모델의 정확성이 신뢰도에 미치는 영향성을 줄이는 방안은 여전히 숙제로 남아있다. 이러한 한계에도 불구하고 제안 방법은 항공우주, 국방, 정밀 짐벌 제어와 같은 다양한 분야에서 실질적인 적용 가능성을 보여준다. 향후 연구에서는 실험적 검증과 함께 다양한 짐벌 및 센서 모델에 대한 분석을 통해 제안된 방법의 정확성과 활용성을 더욱 강화할 것이다.

REFERENCES

- [1] M. K. Masten, "Inertially stabilized platforms for optical imaging systems," *IEEE Control Syst.*, vol. 28, no. 1, pp. 47-64, Feb. 2008.
- [2] J. M. Hilkert, "Inertially stabilized platform technology concepts and principles," *IEEE Control Syst. Mag.*, vol. 28, no. 1, pp. 26-46, Feb. 2008.
- [3] M. Khayatian, "Adaptive dynamic surface control of a two-axis gimbal system," *IET Science, Measurement & Technology*, vol. 10, no. 6, pp. 607-613, 2016.
- [4] V. Obiora and I. E. Achumba, "Adaptive control of Aerialvehicle gimbal using fuzzy-PID compensator," *Proceedings of the 2017 IEEE 3rd International Conference on Electro Technology for National Development*, Owerri, Nigeria, November 2017, pp. 451-456.
- [5] P. Cui, D. Zhang, S. Yang, and H. Li, "Friction compensation based on time-delay control and internal model control for a gimbal system in magnetically suspended CMG," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 5, pp. 3798-3807, 2017.
- [6] S. Zhan, W. Yan, Z. Fu, and Y. Zhao, "Optimal feedback stabilization of a two-axis gimballed system subject to saturation nonlinearity and multiple disturbances," *Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, vol. 228, no. 2, pp. 248-261, 2014.

- [7] M. M. Abdo, A. R. Vali, A. R. Toleci, and M. R. Arvan, "Improving two axes gimbal seeker performance using cascade control approach," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, vol. 229, no. 1, pp. 38-55, 2015.
- [8] R. Caponetto and M. G. Xibilia, "Fractional order PI control of a gimbal platform," *Proceedings of the 2017 European Conference on Circuit Theory and Design (ECCTD)*, Catania, Italy, September 2017, pp. 1-4.
- [9] B. Ahi and A. Nobakhti, "Hardware implementation of an ADRC controller on a gimbal mechanism," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 26, no. 6, pp. 2268-2275, 2018.
- [10] A. Tesfaye, H. S. Lee, and M. Tomizuka, "A sensitivity optimization approach to design of a disturbance observer in digital motion control systems," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 5, no. 1, pp. 32-38, March 2000.
- [11] Y. Choi, K. Yang, W. K. Chung, H. R. Kim, and I. H. Suh, "On the robustness and performance of disturbance observers for second-order systems," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 48, no. 2, pp. 315-320, Feb. 2003.
- [12] J. Su, L. Wang, and J. Yun, "A design of disturbance observer in standard H^∞ control framework," *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, vol. 25, no. 16, pp. 2894-2910, Nov. 2015.
- [13] N. H. Jo, C. Jeon, and H. Shim, "Noise reduction disturbance observer for disturbance attenuation and noise suppression," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 2, pp. 1381-1391, Feb. 2017.
- [14] H. Li, X. Ning, and B. Han, "Composite decoupling control of gimbal servo system in double-gimbaled variable speed CMG via disturbance observer," *IEEE Transactions on Mechatronics*, vol. 22, no. 1, pp. 312-320, 2017.
- [15] L. Huang, Z. Wu, and K. Wang, "High-precision anti-disturbance gimbal servo control for control moment gyroscopes via an extended harmonic disturbance observer," *IEEE Access*, vol. 6, 2018.
- [16] W. Ren, Q. Qiao, K. Nie, and Y. Mao, "Robust DOBC for Stabilization Loop of a Two-Axes Gimbal System," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 110554-110562, 2019.
- [17] A. Mshayekhi, S. Behbahani, A. Nahvi, M. Keshmiri, and M. Shakeri, "Analytical describing function of LuGre friction model," *International Journal of Intelligent Robotics and Applications*, vol. 6, pp. 437-448, Jan. 2022.
- [18] M. H. Ahmad, K. Osman, M. F. M. Zakeri, and S. I. Samsudin, "Mathematical modelling and PID controller design for two DOF gimbal system," *IEEE 17th international Colloquium on Signal Processing & Its Applications (CSPA)*, pp. 138-143, March 2021.
- [19] I.-W. Lee and S.-Y. Yi, "Simulation of sensorless BLDC motors and a two-axis gimbal using MATLAB/Simulink," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 30, no. 7, pp. 750-754, Jul. 2024.
- [20] Y. Joo, "Nominal performance recovery of a disturbance observer-based control system with respect to the time constant of Q-filters," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 30, no. 12, pp. 1340-1346, Dec. 2024.



김정석

2011년과 2013년에 충남대학교 컴퓨터공학 학사 및 석사 취득. 2022년부터 한국과학기술원 전산학부에서 박사과정 재학 중. 2013년~현재 국방과학연구소 (ADD) 선임연구원. 관심분야는 짐발 제어, 탐지/추적 및 모델 경량화.



임현자

2007년과 2009년에 충남대학교 전자전파통신공학 학사 및 석사 취득. 2010년~2014년 한국전자통신연구원(ETRI) 근무. 2014년~현재 국방과학연구소 (ADD) 근무. 관심분야는 짐발 모델링/제어.



김대연

2006년 경희대 전자과 졸업. 2008년 동대학원 석사 졸업. 2013년 동경 소재 전기통신대학 박사 졸업. 2013년~현재 국방과학연구소 (ADD) 근무. 관심분야는 짐발 모델링/제어.