

## 시간지연을 갖는 2축 짐벌시스템의 강인한 추종제어계 설계에 관한 연구

# A Study on a Robust Target Tracking Control Design for a 2-Axis Gimbal System with Time Delay

박환철\* · 김영복\*\*†

Hwan-Cheol Park\* and Young-Bok Kim\*\*†

(Received 20 January 2021, Revised 6 April 2021, Accepted 9 April 2021)

**Abstract :** This paper presents a novel target tracking control design method for 2-axis gimbal system. Especially, the delay time raised from control signal calculation, sensing signal transducing and transmitting, affects the system stability and degrades the control performance. To overcome these issues, in this study, the authors propose a new tracking system design method based on robust control framework. The designed control system can preserve the system stability and control performance simultaneously in spite of time delay. The developed control method was applied to a 2-axis gimbal system. A STSMC (super-twisting sliding mode control) scheme was provided for a comparison study. Finally, the simulation results were presented for validating the usefulness of the method.

**Key Words :** Target tracking, Gimbal, Time delay, Stability, Performance

### 1. 서 론

본 논문에서는 시간지연을 갖는 시스템의 안정성 및 제어성능을 동시에 확보하기 위한 새로운 제어계 설계법을 제안한다. 물리시스템의 운동을 제어하는 문제에서 정도의 차이일 뿐 시간지연은 반드시 존재한다. 일반적으로 시스템 자체가 갖는 고유의 시간지연에 비해 센싱시스템이나 제어시스템이 갖는 그것의 정도가 작아 무시할 뿐이다. 예를 들어 비전시스템을 이용하는 경우에는 이미

지프로세싱 소요시간 때문에 모션제어시스템 구축과 실 시스템 적용에 어려움이 따른다.<sup>1-9)</sup> 이와 같은 문제는 센싱신호처리지연, 제어신호 계산시간이 길어지는 경우에도 발생한다. 즉, 제어대상인 물리시스템의 운동상태를 정확하게 파악하지 못하게 됨으로써 부적절한 제어신호의 계산, 제어대상으로의 제어신호 입력지연 등으로 이어지게 된다. 결국, 바람직한 제어성능을 기대하기가 어렵고 경우에 따라서는 제어계의 안정성마저 보장되지 않게 된다.

\*\*† 김영복(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-6035-6744)  
: 교수, 부경대학교 기계시스템공학과  
E-mail: kpjiwoo@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6197  
\*박환철(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-5670-7246) : 1등  
기관사, 부경대학교 실습선 백경호

\*\*† Young-Bok Kim(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-6035-6744)  
: Professor, Department of Mechanical System Engineering,  
Pukyong National University.  
E-mail: kpjiwoo@pknu.ac.kr, Tel: 051-629-6197  
\*Hwan-Cheol Park(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-5670-7246) : 1st Engineer, Training Ship Packyong, Pukyong National  
University.

이것이 시간지연문제에 대한 많은 연구가 진행되고 있는 주된 이유이고, 그 해결방법으로 제안된 대표적인 연구결과의 하나가 예측기 설계기법이다.<sup>10)</sup> 이 연구의 핵심내용은 시간지연 항을 보상기에 포함시켜 특성방정식에 시간지연 항이 나타나지 않도록 함으로써 그 영향을 억제할 수 있다는데 있다. 이를 바탕으로, 다양한 제어기법과 이것을 병합하는 방법으로 시간지연문제를 해결하고자 하는 연구도 이어지고 있다. 그러나 시간지연 항이 제어대상의 입력측, 출력측에 존재할 경우와 상태에 존재할 경우에 발생하는 문제 등, 주로 이론적으로 해결하고자 하는 연구내용이 대부분이다. 공통적인 내용은 예측기를 제외한 제어기를 어떻게 설계하고 구성하느냐에 따라 제어능이 달라진다는 것이다. 현재까지는 슬라이딩 모드 제어기법(SMC)을 적용한 경우가 비교적 우수한 제어성을 확보할 수 있는 것으로 알려져 있다. 아무튼 시간지연은 바람직하지 않은 특성이며 아직도 문제해결을 위해 많은 연구노력이 필요하다는 것은 틀림없다.

따라서 본 연구에서는 파라미터변동 및 외란의 영향을 효과적으로 억제할 수 있는 강인제어기법<sup>11)</sup>을 이용하여 시간지연에 따른 주요문제를 해결하기 위한 새로운 제어기 설계법을 제안한다. 여기서 시간지연 항을 제어대상에 포함된 불확실성으로 간주하고 이것의 영향을 억제함으로써 제어 성능개선 및 제어계의 안정성을 확보하도록 한다.

강인제어기법에 따라 제어기를 설계함으로써 설계된 제어계의 안정성은 자동적으로 보장된다. 그리고 바람직한 제어성능 또한 확보할 수 있음을 시뮬레이션으로 통해 검증하도록 한다. 시뮬레이션에서는 슬라이딩모드 제어기법과의 비교 평가를 수행하고 이것으로부터 제안하는 설계법의 유효성을 검증한다.

## 2. 연구배경 및 문제설정

### 2.1 연구배경

서론에서 기술한 것과 같이 시간지연문제는 다양한 방법으로 다루어지고 있다. 이론적 관점에서

는 안정성해석문제가 가장 중요한 이슈이다.<sup>12-17)</sup>

구체적으로는 시간지연 항의 고려위치에 따라 안정성 조건이 다르게 주어지는 등 상당히 어려운 문제 중의 하나이다. 이러한 이유로 이론적 관점에서의 연구에 많은 관심이 집중되어 있다고 볼 수 있다. 제어대상을 포함한 전체시스템에 존재하는 시간지연 항은 다양한 형태로 표현된다. 일반적으로 단순하게 함수  $e^{-As}$ 로 표현하고, 기어 백래시(backlash)와 같이 비선형적이고 불연속적인 물리특성을 대표하기도 한다.<sup>18-21)</sup>

그래서 본 연구에서는 보다 일반적인 관점에서 시간지연 요소가 시스템 제어성능에 미치는 문제를 해결함과 동시에 안정성도 확보할 수 있는 제어기 설계법에 대해 고찰한다. 제안하는 설계법의 유효성을 확인하기 위해 2축 짐벌(gimbal)시스템을 제어대상으로 하고, 특히 제어신호의 통신과정에서의 시간지연으로 인한 제어성능 저하문제를 개선하고자 하는데 제어기 설계목표를 둔다.

### 2.2 문제설정

본 연구에서의 제어대상은 Fig. 1에 나타낸 2축 짐벌시스템이다. 기본적으로 팬(Pan)과 틸트(Tilt)의 2자유도 운동을 한다. 카메라 등의 광학센싱시스템이 장착되므로 이것의 부하정도에 따라 상호간섭 영향정도도 달라진다. 이러한 문제를 설계단계에서 고려하여 제작한 경우에는 상호간섭 영향이 거의 없어 각각의 운동을 독립된 운동방정식으로 표현한다. 본 논문에서의 제어대상인 짐벌시스템도 상호간섭이 거의 없다는 것을 실험으로

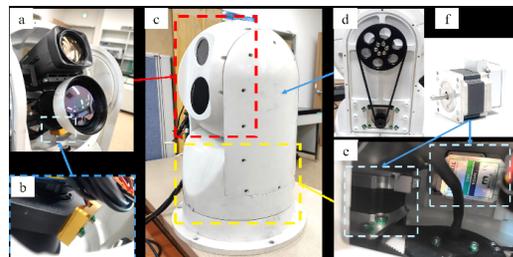


Fig. 1 2-axis gimbal system : controlled system (a: optical sensor and camera, b: gyro sensor, c: body with pan tilt, d: connecting belt, f: motor)

확인하였다. 따라서 본 연구에서도 짐벌시스템의 운동특성을 2개의 서로 독립인 운동방정식으로 표현하여 제어를 각각 설계하도록 한다.

먼저 강인제어기법에 따라 제어를 설계하기 위해 시간지연 항의 처리방법에 대해 설명한다.

시간지연 항을  $e^{-sT_i}$  ( $T_i$ : 지연시간,  $i=1,2$ )로 표현하고, 이것을 포함한 제어대상을  $G_i(s)$ , 시간지연 항을 포함하지 않은 경우에는  $G_{i0}(s)$ 로 두어 Fig. 2와 같이 나타낸다. 그림에서와 같이 제어대상의 입력측에 시간지연 항이 존재한다고 가정한다. 이와 달리 출력측에 시간지연 항이 존재할 경우에도 특별한 제약조건 없이 표현을 달리하는 방법으로 제어계 설계가 가능하다. 서론에서 소개하였듯이 시간지연에 따른 안정성문제 및 제어성능저하를 개선하기 위한 대표적인 방법으로 스미스 예측기법(Smith Predictor)<sup>10)</sup>을 들 수 있다. 예측기를 포함한 서보계를 구성한 예를 Fig. 3에 나타내었다. 이 기법은 입력신호에 대한 지연시간만큼 늦은 응답을 미리 예측하여 제어입력을 계산하는 방법으로 상당히 유용한 제어계 설계법이다. 그 특징을 살펴보면, 예측기를 도입하지 않은 경우 ( $H(s)$ )와 예측기를 도입한 경우의 폐루프 전달함수( $H_p(s)$ )는 각각 다음 식으로 표현된다.

$$H(s) = \frac{K_i(s)G_{i0}(s)e^{-sT_i}}{1 + K_i(s)G_{i0}(s)e^{-sT_i}} \quad (1)$$

$$H_p(s) = \frac{K_i(s)G_{i0}(s)}{1 + K_i(s)G_{i0}(s)} e^{-sT_i} \quad (2)$$

식 (1) 과 식 (2)의 차이는 각 전달함수의 분모항에 시간지연함수  $e^{-sT_i}$ 가 존재하거나 그렇지 않는데 있다. 즉, 예측기를 도입하면 식 (2)와 같이 특성방정식에 시간지연 항이 포함되지 않으므로

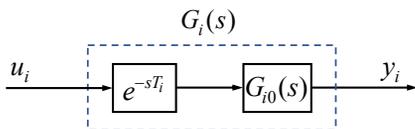


Fig. 2 Controlled system with time delay

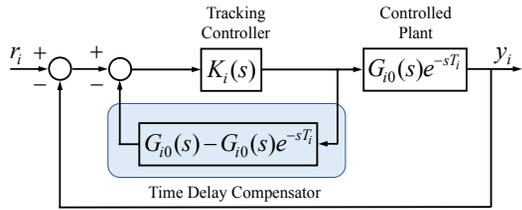


Fig. 3 A tracking control system by incorporating Smith Predictor to cope with time delay

결국 이 항이 제어계의 안정성에 영향을 미치지 않게 된다. 이것은 시간지연이 없는 제어대상에 대해 폐루프계가 안정하도록 제어기  $K_i(s)$ 를 구한 후 스미스 예측기를 도입하게 되면 시간지연에 따른 안정성문제는 더 이상 고민하지 않아도 된다는 것을 의미한다. 결국 스미스 예측기로 시간지연의 영향을 보상한다하더라도 기본적으로는 피드백제어기(Fig. 3의  $K_i(s)$ )를 적절하게 설계해야 한다. 이것은 서론에서 기술한 본 연구의 목적을 요약하는 것으로 시간지연이 존재하는 경우에도 강인제어기법으로 제어계를 설계하면 안정성도 보장되고 제어성능 개선도 가능하다는 것을 의미한다.

### 3. 강인제어기법에 의한 제어계 설계

#### 3.1 일반화 플랜트의 구성

본 연구에서는 짐벌시스템에 장착한 광학장치로 목표물을 안정적으로 탐색하고 추적할 수 있는 추종제어계를 설계하는 것이 목표이며, 이를 위한 제어계 구성도를 Fig. 4에 나타내었다. 그림에서 파선으로 표시한 블록은 액추에이터 자체에 기본적으로 제어기( $K_{ip}(s)$ )가 내장되어 있다는 것을 의미한다. 따라서 제어대상은 파선 블록으로

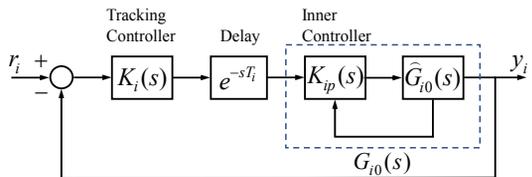


Fig. 4 Configuration of the standard image-based visual tracking control system

표시한  $G_{i0}(s)$ 에 시간지연 항이 포함된 것이다.

결국 제어기  $K_i(s)$ 를 설계하여 목표물을 안정적으로 추종하도록 하는 제어계를 구성하는 것이 본 연구의 목표이다. 앞서 기술하였듯이 시간지연 항을 불확실성으로 간주하고 강인제어기법으로 제어계를 설계한다. 이때 시간지연 항을 제어대상의 입력측에 두면 Fig. 2를 Fig. 5와 같이 변환하여 나타낼 수 있다. 즉, Fig. 2와 Fig. 5는 등가적인 표현이고 이것은 다음 식으로부터 쉽게 확인할 수 있다.

$$\Delta(s) = e^{-sT_i} - 1 \quad (3)$$

강인제어기법, 즉  $H_\infty$  제어기법에 따르면 식 (3)을 곱셈형 불확실성(multiplicative uncertainty)으로 간주하여 제어기 설계에 반영하면 된다. 이때 시간지연함수  $e^{-sT_i}$ 는 Pade의 2차 근사화기법으로 근사화하고 이를 제어기 설계에 이용한다.

이것으로부터 제어기 설계문제는 Fig. 6과 같이 나타낼 수 있게 된다. 이때,  $G_i(s)$ 는 제어대상,  $K_i(s)$ 는 설계해야 할 제어기이다.  $W_{di}(s)$ 와  $W_{ri}(s)$ 는 제어기 설계 시 반영하는 가중함수(weighting function)이다. 특히,  $W_{di}(s)$ 는 식 (3)의 시간지연 특성을 반영하고, 제어대상의 입력측으로 유입되는 외란의 영향을 억제하고자 하는 목적으로 도입되는 가중함수로

$$\|\Delta(s)\|_\infty \leq \|W_{di}(s)\|_\infty, \quad \forall \omega \quad (4)$$

의 조건을 만족하도록 선정한다. 그리고  $W_{ri}(s)$ 에는 제어기 출력측으로 유입되는 외란이나 불확실성이 반영되도록 적절히 선정한다.

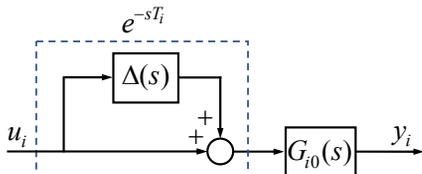


Fig. 5 A transformed controlled system description

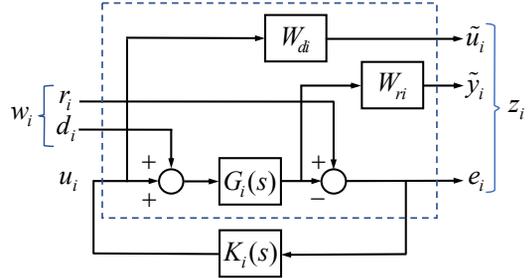


Fig. 6 A robust control system with multiplicative uncertainties

결론적으로, Fig. 6의 제어계 설계문제는 외부로부터 유입되는 입력이 시스템에 미치는 영향을 억제하고, 안정성 확보는 물론 목표값에 출력이 오차없이 추종하도록 하는 제어기  $K_i(s)$ 를 구하는 것이다. 결국 이것은 아래 식 (5)의 놈 조건을 만족하는 제어기를 설계하는 문제로 귀착된다.

$$\|T_{zwi}\|_\infty < \gamma (> 0), \quad i = 1, 2. \quad (5)$$

여기서  $T_{zwi}$ 는 외부입력  $w_i = [r_i, d_i]^T$ 에서 출력  $z_i = [\tilde{u}_i, \tilde{y}_i, e_i]^T$ 까지의 전달함수를 나타낸다.

### 3.2 제어기 설계

지금부터는 제어기 설계과정을 설명한다. 먼저 제어대상은 2축 짐벌시스템이고 틸트와 팬 운동에 대한 운동방정식은 실험을 통해 구하였다. 구해진 각각의 운동방정식은 다음과 같다.

$$G_1(s) = \frac{22.25}{s^2 + 21.97s + 0.28} e^{-0.06s} \quad (6)$$

$$G_2(s) = \frac{28.44}{s^2 + 30.40s + 0.03} e^{-0.06s} \quad (7)$$

위에서  $G_1(s)$ 는 틸트,  $G_2(s)$ 는 팬 운동을 나타내는 전달함수이며, 지연시간은 위 식에 표현한 것처럼 동일하게  $T_1 = T_2 = 0.06$  sec이다. 이것은 수차례의 실험을 통해 취득한 값의 평균값이다. 이때 시간지연 항을 Pade 근사화기법을 이용하여 2차계로 표현하면 다음의 식 (8)과 같은 전달함수

로 표현된다.

$$e^{-0.06s} = \frac{s^2 - 100s + 3.3 \times 10^3}{s^2 + 100s + 3.3 \times 10^3} \quad (8)$$

이것으로부터 식 (3)은 다음과 같이 계산된다.

$$\Delta(s) = \frac{e^{-0.06s} - 1}{200s} = \frac{1}{s^2 + 100s + 3.3 \times 10^3} \quad (9)$$

제어대상인 짐벌시스템을 구성하고 있는 액추에이터 및 그 외 부속장치의 규격은 Table 1에 정리하였다. 지금까지의 준비로부터 식 (5)의 조건을 만족하는 각각의 제어기는 식 (10)~(11)과 같이 구하였다. 여기서  $K_1(s)$ 는 틸트 운동 제어기,  $K_2(s)$ 는 팬 운동 제어기이다.

$$K_1(s) = \frac{N_{k1}(s)}{D_{k1}(s)} \quad (10)$$

$$N_{k1}(s) = 2.3267 \times 10^2 s^4 + 1.2875 \times 10^4 s^3 + 1.1979 \times 10^6 s^2 + 2.2583 \times 10^7 s + 3.1563 \times 10^5 \quad (11)$$

$$D_{k1}(s) = s^5 + 2.0031 \times 10^4 s^4 + 6.2260 \times 10^5 s^3 + 4.846810^6 s^2 + 1.8860 \times 10^7 s + 1.9247 \times 10^4$$

$$K_2(s) = \frac{N_{k2}(s)}{D_{k2}(s)} \quad (12)$$

$$N_{k2}(s) = 1.5337s^4 + 2.0551 \times 10^2 s^3 + 7.3305 \times 10^4 s^2 + 2.4698 \times 10^6 s + 1.0697 \times 10^2 \quad (13)$$

$$D_{k2}(s) = s^5 + 1.5778 \times 10^3 s^4 + 6.0784 \times 10^4 s^3 + 4.7768 \times 10^5 s^2 + 1.8876 \times 10^6 s + 2.8854 \times 10^3$$

그리고 각각의 제어기를 설계할 때 선정된 가중함수는 아래 식 (14)~(17)과 같다. 이것은 제어대상의 입력측과 출력측으로 유입되는 외란 및 기타 파라미터 불확실성을 고려하여 선정하였다.

Table 1 Controlled plant specifications

Apparatus	Item	Value
Actuator: CoolMuscle CMI-C23S30	Rated Power	45[W]
	Max. Speed	3000[rpm]
	Rated Torque	0.294[Nm]
	Supply Voltage	24[VDC]±10%
	Supply Current	3.9[A]
	Gear Ratio	5:1
Sensor: NTRexLAB MW-AHRS	Signal Processing: Fusion of acceleration and gyro sensor with Kalman filter	
	Angle's resolution	0.001°
	Static Error	0.1°
	Dynamic Error	2°
	Response Time	1[ms]

특히 식 (14) 및 식 (15)의  $W_{di}(s)$ 는 식 (4)에 정의한 놈(norm) 조건을 만족한다.

$$W_{d1}(s) = \frac{0.011s^2 + 220s}{s^2 + 100s + 3.3 \times 10^3} \quad (14)$$

$$W_{r1}(s) = \frac{1.60s + 2.24 \times 10^{-2}}{s + 0.01} \quad (15)$$

$$W_{d2}(s) = \frac{0.143s^2 + 220s + 0.001}{s^2 + 100s + 3.3 \times 10^3} \quad (16)$$

$$W_{r2}(s) = \frac{0.281s}{s + 0.001} \quad (17)$$

## 4. 시뮬레이션

3장에서 설계한 제어기로 시뮬레이션을 수행하였다. 이때, 본 연구에서 제안하는 제어기법으로 설계한 식 (10)~(13)의 제어기와의 비교 평가를 위해 슬라이딩모드 제어기 중 슈퍼트위스팅 슬라이딩모드 제어기법(STSMC)으로 제어기를 설계하였으며 제어기 블록선도를 Fig. 7에 나타내었다. STSMC 제어기에 대해서는 제어기의 구조와 파라미터만 간단히 요약하여 정리한다. 이때 슬라이딩 매니폴드(sliding manifold)는

$$\begin{aligned} e_i &= y_{di} - y_i \\ s_i &= \dot{e}_i + m_i e_i \end{aligned} \quad (18)$$

와 같고( $i = 1, 2$ ), 여기서  $e_i$ : 오차,  $y_{di}$ : 목표값,  $y_i$ : 실제출력,  $s_i$ : 슬라이딩 평면,  $m_1 = 2$ ,  $m_2 = 1.5$ 이다. 이것으로부터 STSMC 제어칙은 식 (19)와 같이 구하였다.

$$u_i = \frac{1}{c_i} \left( \ddot{y}_{di} + a_i \dot{y}_i + b_i y_i + m_i \dot{e}_i + \lambda_{1i} |s_i|^{1/2} \text{sgn}(s_i) + \lambda_{2i} \int_0^1 \text{sgn}(\lambda_i) d\tau \right) \quad (19)$$

$$\left( \frac{d}{dt} \approx \frac{\gamma s}{s + \gamma}, \text{sgn}(s_i) \doteq \frac{s_i}{|s_i| + \delta_i} \right)$$

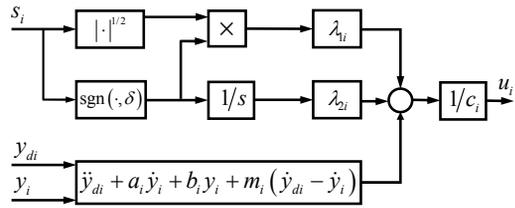
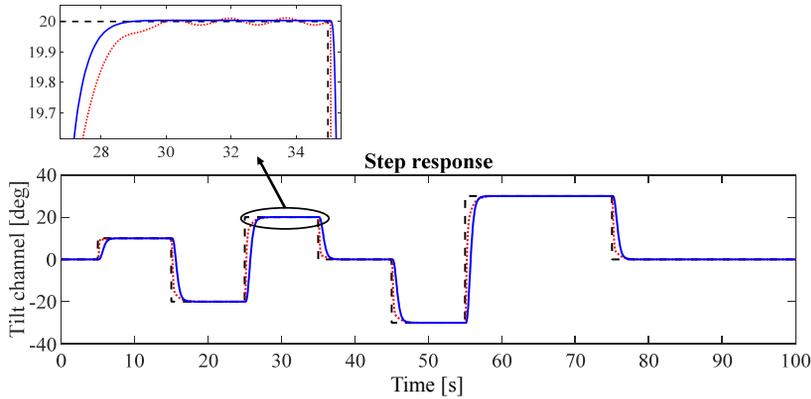
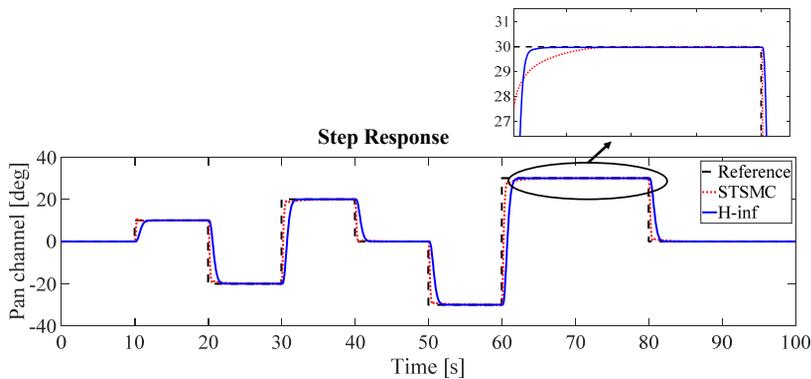


Fig. 7 Schematic block diagram of Super-Twisting Sliding Mode Control system for comparison study



(a) tilt response



(b) pan response

Fig. 8 Tracking performance for step type reference (dashed : reference, red dotted : STSMC, blue solid : proposed control)

위 식에서 각 파라미터값은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \lambda_{11} = 120, \lambda_{12} = 200, \delta_1 = 5, \gamma_1 = 10, \\ \lambda_{21} = 200, \lambda_{22} = 200, \delta_2 = 5, \gamma_2 = 10 \end{aligned} \quad (20)$$

이것으로부터 시뮬레이션을 실행하였고, 그 결과를 Fig. 8과 Fig. 9에 나타내었다.

먼저 Fig. 8은 스텝상 목표신호(각도)에 대한 틸트 (a) 및 팬 (b) 응답을 나타내고 있다. 파선이 목표값, 점선(적색)은 STSMC 응답, 그리고 실선(청색)이 제안하는 제어기법을 적용한 경우의 응답이다. 또한 이때의 제어입력은 Fig. 9에 나타내었다.

Fig. 8의 응답특성을 분석해 보면, STSMC의 경우, 목표값에 대해 초기응답속도(상승시간)가 상대적으로 빠르다는 것을 알 수 있다. 반면에 정상상태에 이르는 속도는 느리며 다소 불안정한 응답특성을 보이고 있다. 목표값 추종이라는 목적이려면 신속한 정상상태 도달 및 정상상태오차가 존재하지 않도록 제어계를 설계해야 한다. 따라서 추종제어계로서는 제안하는 제어기법이 보다 우수한 성능을 보유하고 있다는 것이 명확하다.

아울러 Fig. 9의 제어입력을 살펴보면, STSMC의 경우보다 제안하는 제어기법의 경우가 상당히 작은 제어입력이 제어대상에 가해지고 있다는 것을 확인할 수 있다. 이것은 실제 시스템에 적용

하는 경우 및 효율성 측면에서도 지극히 바람직한 특성임에 틀림없다.

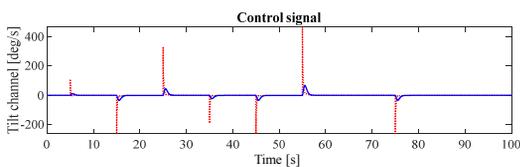
## 5. 결 론

본 연구에서는 시간지연을 갖는 시스템의 안정성 및 제어성능 확보를 위한 새로운 제어계 설계법을 제안하였다. 제어대상에 포함된 시간지연 항은 입력신호에 대한 출력을 지연시켜 제어신호를 적절하게 활용하는 것이 어렵고, 경우에 따라서는 시스템의 안정성마저 보장되지 않는 상황에 직면할 수도 있다. 이러한 문제를 다루기 위한 이론기반의 다양한 제어계 설계법이 제안되어 있으나 기본적으로는 페루프 제어기를 설계하고 이를 기반으로 예측기법 등의 제어기법을 추가로 도입하고 있다. 즉, 안정성 문제와 제어성능 문제를 독립적으로 다루고 있다.

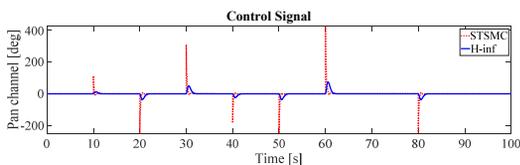
따라서 본 연구에서는 두 가지 문제를 하나로 통합하여 해결할 수 있는 제어계 설계법을 제안하였다. 구체적으로는 시간지연 항을 제어대상의 불확실성으로 간주하여 강인제어기법에 기반한 추종제어계 설계법을 제안하였다. 슬라이딩모드 제어기법과의 비교 평가를 통해 제안하는 기법의 유효성을 검증하였다. 본 논문에서 제안하는 기법은 안정성과 제어성능 확보라는 제어계설계에 있어서의 기본적인 목표를 명확하게 보장하는 기법이다. 응답특성에서 상승시간이 느려지는 등의 문제는 예측기법 등을 병합하는 방법을 통해 보다 나은 결과를 도출할 수 있을 것이다.

## Author contributions

Y. B. Kim; Conceptualization. H. C. Park; Data curation. H. C. Park; Formal analysis. H. C. Park; Funding acquisition. H. C. Park; Investigation. Y. B. Kim; Methodology. Y. B. Kim; Project administration. H. C. Park; Software. Y. B. Kim; Supervision. H. C. Park; Validation. H. C. Park; Writing-original draft. H. C. Park; Writing-original draft. H. C. Park; Writing-review & editing.



(a) control signal for tilt



(b) control signal for pan

Fig. 9 Control signals (red dotted : STSMC, blue solid : proposed control)

## References

1. F. Chaumette and S. Hutchinson, 2006, "Visual Servo Control I : Basic Approaches", IEEE Robotics & Automation Magazine, Vol. 13, No. 4, pp. 82-90.  
(<https://doi.org/10.1109/MRA.2006.250573>)
2. F. Chaumette and S. Hutchinson, 2007, "Visual Servo Control II, Advanced Approaches [Tutorial]", IEEE Robotics & Automation Magazine, Vol. 14, No. 1, pp. 109-118.  
(<https://doi.org/10.1109/MRA.2007.339609>)
3. G. Palmieri, M. Palpacelli, M. Battistelli and M. Callegari, 2012, "A Comparison between Position-Based and Image-based Dynamic Visual Servoings in the Control of a Translating Parallel Manipulator", Journal of Robotics, Vol. 2012, Article ID 103954.  
(<https://doi.org/10.1155/2012/109251>)
4. Z. Hurák and M. Řezáč, 2012, "Image-based Pointing and Tracking for Inertially Stabilized Airborne Camera Platform", IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 20, No. 5, pp. 1146-1159.  
(<https://doi.org/10.1109/TCST.2011.2164541>)
5. Z. Hurák and M. Řezáč, 2009, "Combined Line-of-Sight Inertial Stabilization and Visual Tracking: Application to an Airborne Camera Platform", Proceedings of the 48th IEEE Conference on Decision and Control (CDC) held jointly with 2009 28th Chinese Control Conference, Shanghai, pp. 8458-8463.  
(<https://doi.org/10.1109/CDC.2009.5400793>)
6. C. Bibby and I. Reid, 2005, "Visual Tracking at Sea", Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Barcelona, Spain, pp. 1841-1846.  
(<https://doi.org/10.1109/ROBOT.2005.1570381>)
7. T. Carlo and T. Kanade, 1991, "Detection and Tracking of Point Features", Computer Science Department, Carnegie Mellon University.
8. S. Jianbo and C. Tomasi, 1994, "Good Features to Track", IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 593-600.  
(<https://doi.org/10.1109/CVPR.1994.323794>)
9. K. Zdenek, K. Mikolajczyk and J. Matas, 2010, "Forward-Backward Error: Automatic Detection of Tracking Failures", Proceedings of the 20th International Conference on Pattern Recognition 2010, pp. 2756-2759.
10. G. Mahmoud, S. Nayera, R. Mohamed, A. Saoud and K. Ahmed, 2016, "Delay Compensation Using Smith Predictor for Wireless Network Control System", Alexandria Engineering Journal, Vol. 55, pp. 1421-1428.  
(<https://doi.org/10.1016/j.aej.2016.04.005>)
11. J. C. Doyle and K. Glover, 1989, "State Space Solutions to Standard  $H_2$  and  $H_\infty$  Control Problems", IEEE Trans. on Automatic Control, Vol. 32, No. 8, pp. 831-847.  
(<https://doi.org/10.1109/9.29425>)
12. K. Watanabe and M. Ito, 1981, "A Process-Model Control for Linear Systems with Delay", IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 26, No. 6, pp. 1261-1269.  
(<https://doi.org/10.1109/TAC.1981.1102802>)
13. A. Yilmaz, O. Javed, and M. Shah. 2006, "Object Tracking : A Survey", ACM Computing Surveys, Vol. 38, No. 4. pp. 2-45.  
(<https://doi.org/10.1145/1177352.1177355>)
14. K. J. Åström, 2000, "Limitations on Control System Performance", European Journal of Control, Vol. 6, No. 1, pp. 1-19.  
([https://doi.org/10.1016/S0947-3580\(00\)70906-X](https://doi.org/10.1016/S0947-3580(00)70906-X))
15. G. J. Silva, A. Datta and S. P. Bhattacharyya, 2005, "PID Controllers for Time-Delay Systems", Birkhuser Basel.  
(<https://doi.org/10.1007/b138796>)
16. J. M. Hilkert, 2008, "Inertially Stabilized Platform Technology Concepts and Principles", IEEE Control Systems Magazine, Vol. 28, No. 1, pp. 26-46.

- (<https://doi.org/10.1109/MCS.2007.910256>)
17. M. K. MASTEN, 2008, "Inertially Stabilized Platforms for Optical Imaging Systems", IEEE Control Systems Magazine, Vol. 28, No. 1, pp. 47-64. (<https://doi.org/10.1109/MCS.2007.910201>)
18. R. M. R. Bruns, J. Diepstraten, X. Schuurbiens and J. Wouters, 2006, "Motion Control of Systems with Backlash", Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, pp. 1-27.
19. J. E. Normey-Rico and E. F. Camacho, 2007, "Control of Dead-Time Processes", London, Springer, pp. 131-137. (<https://doi.org/10.1007/978-1-84628-829-6>)
20. C. Soumayya, J. H. Suh and Y. B. Kim, 2019, "Robot Arm Motion Control System Design based on Double Active Disturbance Rejection Method", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 23, No. 3, pp. 65-74. (<https://doi.org/10.9726/kspse.2019.23.3.065>)
21. S. W. Ji, M. S. Tran and Y. B. Kim, 2019, "Accurate Robot Manipulator Control by Using a Model Reference Adaptive Control Method", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 23, No. 5, pp. 75-85. (<https://doi.org/10.9726/kspse.2019.23.5.075>)