

논문 2015-52-8-16

# 불확실성 파라미터를 포함하는 김발시스템의 상태궤환 강인제어기 설계

( A Robust State Feedback Control of Gimbal System with Parametric Uncertainty )

전 영 범\*, 최 우 석\*, 한 지 훈\*, 이 성 우\*\*, 강 태 하\*\*

( YeongBeom Jeon<sup>Ⓞ</sup>, WooSeok Choi, JiHoon Han, SungWoo Lee, and TaeHa Kang )

## 요 약

본 논문에서는 불확실성 파라미터를 포함한 김발시스템의 상태궤환 강인제어기를 제안하였다. 제안한 제어기는 김발시스템 동역학 변화에 강인하도록 설계하였고, 위치 및 속도 정상상태 오차 감소를 위한 동적보상기를 상태변수에 추가하였다. 페루프 시스템의 안정도는 Lyapunov 안정도판별법을 이용하여 증명하고, 2축 김발시스템 모델링을 이용한 모의실험을 통해 제어기 성능입증을 수행하였다.

## Abstract

In this paper, we propose a state feedback robust controller of 2-axis gimbal system which have bounded parametric uncertainty. The proposed controller is robust against dynamics variations of gimbal system and contains a dynamic compensator in order to improve a steady state error and a transient response. The stability of the closed-loop system is proved by Lyapunov approach. The performance of the proposed method is demonstrated by simulation on a 2-axis gimbal system.

**Keywords** : Gimbal system, Parametric uncertainty, Robust controller, Dynamic compensator, State feedback

## I. 서 론

김발시스템은 관절을 갖는 로봇시스템과 유사한 서보시스템으로 김발의 자세와 모션제어를 필요로 하는 다양한 분야에서 연구되고 있다. 특히, 방위산업 분야에서 2축 김발시스템의 경우 동적 플랫폼에 장착되는 EO/IR, 탐색기, 항공용 레이더 등에 적용되고 있다.<sup>[1]</sup>

기존 김발시스템의 경우 주로 PI 제어기가 사용되었<sup>[2, 10]</sup>다. PI 제어기는 동역학 파라미터 값을 아는 경우 구성이 용이하고 간편하나 김발 말단부에 설치되는 장비의 설계변경으로 인한 관성모멘트, 무게중심, 마찰토크 등 파라미터 변화에 의해 성능이 저하되거나 정밀구동을 위해 제어기를 재 튜닝해야하는 번거로움이 있다.<sup>[3]</sup> 파라미터 변동범위가 한정적인 경우 강인제어기법을 적용하여 이러한 문제를 해결할 수 있다.<sup>[4-5, 7]</sup> 강인제어기법의 경우 파라미터 추정시간이 필요하지 않은 장점이 있으나 유한시간 내에 일정 범위의 오차만을 보장하는 기법이므로 김발시스템에서 중요한 각도 오차에 대한 보상이 추가적으로 이루어져야 한다.<sup>[7, 9]</sup> 각도 오차를 보상하기 위해 기존에 주로 사용되는 적분기는 오

\* 정회원, LIG넥스원 우주영상연구센터  
(LIG Nex1)

\*\* 국방과학연구소 국방위성체계개발단  
(Agency for Defense Development)

Ⓞ Corresponding Author(E-mail: jyb119@naver.com)

Received ; October 6, 2014    Revised ; June 11, 2015

Accepted ; July 29, 2015

차를 0으로 수렴시키지만 과도응답 성능이 떨어져 응답성을 높이면 오버슈트가 발생되기 때문에 운용각도가 제한적이고 빠른 응답성이 요구되는 김발시스템의 경우 적합한 보상기를 적용해야한다.<sup>[11]</sup>

이와 더불어 기존 논문의 2축 김발시스템 모델링은 각 축 간에 발생하는 영향이 고려되지 않아 동시 구동시 성능 저하의 원인이 될 수 있기 때문에 정밀제어가 요구되는 경우라면 각 축의 결합관성, 코리올리, 구심력, 중력 영향을 포함하여 모델링이 되어야 한다.<sup>[8~10]</sup>

본 논문에서는 강인제어기법을 적용한 김발시스템의 불확실성 파라미터를 보상하는 제어기를 제안하였다. 김발시스템 모델링은 각 축의 영향성이 보상될 수 있도록 오일러-라그랑지 방정식을 이용하였으며, 강인제어기의 불확실성 파라미터 범위는 기존 말단부의 무게, 각 축의 무게중심점의 2배로 선정하였다. 강인제어기법에서 발생될 수 있는 잔여 오차 감소 및 과도응답개선을 위해 동적보상기를 상태변수에 추가하였다. 전체 페루프 시스템 안정성은 Lyapunov 안정도 판별법을 이용해 증명하고, 기존 제어기의 실험환경과 동일한 조건에서 제안한 제어기의 모의실험을 통해 성능 향상 및 타당성을 입증하였다.

## II. 모델링 및 제어기설계

### 1. 김발시스템 동역학

n축 김발 시스템은 n축 로봇 매니퓰레이터와 유사한 구조를 갖으며 오일러-라그랑지 방정식을 이용하여 모델링을 수행한다. 오일러-라그랑지 방정식을 일반적인 행렬 형태로 표현하여 김발시스템 동역학 방정식은 다음과 같다.

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau \quad (1)$$

여기서,  $q, \dot{q}, \ddot{q} \in R^n$ 은 관절의 위치, 속도, 가속도 벡터이고,  $\tau \in R^n$ 은 토크 벡터를 나타낸다.  $M(q)$ 는 결합관성행렬로 양한의  $n \times n$  대칭행렬,  $C(q, \dot{q})\dot{q}$ 는 코리올리 힘으로  $n \times 1$  벡터이고,  $G(q)$ 는  $n \times 1$ 의 중력벡터이다.

#### 가. 2축 김발시스템 모델링

성능 검증을 위한 2축 김발시스템 구조는 그림 1과 같으며, 오일러-라그랑지 방정식을 적용하여 상세 모델

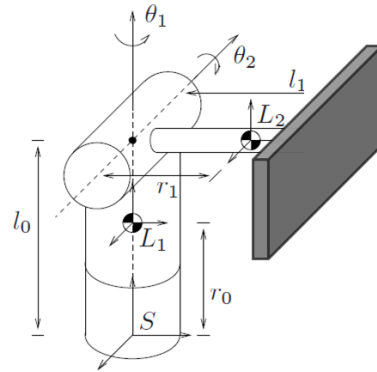


그림 1. 2축 김발시스템 구조  
Fig. 1. Structure of Gimbal system.

링을 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} M_{11}(q) & M_{12}(q) \\ M_{21}(q) & M_{22}(q) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{11}(q, \dot{q}) & C_{12}(q, \dot{q}) \\ C_{21}(q, \dot{q}) & C_{22}(q, \dot{q}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_1(q) \\ G_2(q) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

식 (2)에서 결합관성행렬  $M(q)$ , 코리올리스  $C(q, \dot{q})$ , 중력벡터  $G(q)$ 의 요소는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} M_{11}(q) &= I_{y2} \sin^2(q_2) + I_{z1} + I_{z2} \cos^2(q_2) + m_2 r_1^2 \cos^2(q_2) \\ M_{12}(q) &= M_{21}(q) = 0 \\ M_{22}(q) &= I_{x2} + m_2 r_1^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_{11}(q, \dot{q}) &= (I_{y2} - I_{z2} - m_2 r_1^2) \cos(q_2) \sin(q_2) \dot{q}_2 \\ C_{12}(q, \dot{q}) &= (I_{y2} - I_{z2} - m_2 r_1^2) \cos(q_2) \sin(q_2) \dot{q}_1 \\ C_{21}(q, \dot{q}) &= -(I_{y2} - I_{z2} - m_2 r_1^2) \cos(q_2) \sin(q_2) \dot{q}_1 \\ C_{22}(q, \dot{q}) &= 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} G_1(q) &= 0 \\ G_2(q) &= -(m_2 g r_1) \cos(q_2) \end{aligned}$$

여기서,  $m_i$ 는  $i$ 축의 질량이고,  $I_{x1}$ 는  $x$ 좌표에서 1번째 축의 관성이다.  $L_i$ 는  $i$ 축의 무게중심 점이고,  $r_i$ 는  $i$ 회전축에서 무게중심 점까지의 거리이며,  $g$ 는 중력가속도이다.

#### 나. 동역학 방정식의 성질

식(1)의 김발시스템 동역학 방정식은 다음과 같은 성질을 갖는다. 이 성질은 김발시스템의 강인제어기 안정도 해석에 이용된다.

성질 : 식(1)의 동역학 방정식은 미지의 파라미터 벡터  $\theta$ 에 대해 선형식으로 나타낼 수 있다.

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = Y(q, \dot{q}, \ddot{q})\theta = \tau \quad (3)$$

여기서  $\theta$ 는 김발시스템 각 축의 무게, 길이 등 물리적인 파라미터로 구성된  $m \times 1$  벡터이며,  $Y(q, \dot{q}, \ddot{q})$ 는  $n \times m$  축차행렬이다.

2. 김발시스템 제어기 설계

김발시스템은 상위의 통제부로부터 각 축의 위치 명령을 인가받으며, 김발시스템은 회전각 제한요소가 있기 때문에 오버슈트가 없도록 각속도 프로파일을 생성하여 각 축의 위치 궤적을 생성하여야 한다. 아래는 통제부로부터 입력받는 위치명령으로부터 생성한 각속도 프로파일이다.

$$\dot{q}_d = q_{cmd} K^2 \exp(-Kt) \quad (4)$$

여기서,  $q_{cmd}$ 는 통제부로부터 입력받는 위치 스텝명령이고  $K$ 는 양한(Positive Definite)의 설계 이득이다.

식(4)를 적분하여 위치 궤적  $q_d$ , 미분하여 가속도 궤적  $\ddot{q}_d$ 을 생성한다.

가. 상태궤환 강인제어기 설계

김발시스템의 위치 추종오차 함수를  $\tilde{q} = q_d - q$ 로 정의하면 식 (1)의 동역학 방정식으로부터 다음과 같은 오차상태방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{q}} &= \dot{q}_d - \dot{q} \\ \ddot{\tilde{q}} &= \ddot{q}_d - \ddot{q} \\ &= M^{-1}(q)[M(q)\ddot{q}_d + C(q, \dot{q})\dot{q}_d + G(q) - \tau] \end{aligned} \quad (5)$$

기준 궤적 추종성능과 과도응답 특성을 개선하기 위한 동적 보상기를 다음과 같이 정의한다.

$$\dot{\sigma} = -\Phi\sigma + \Gamma\tilde{q} + \dot{\tilde{q}} \quad (6)$$

여기서,  $\sigma$ 는  $\tilde{q}$ 를 입력으로 하는 동적 보상기 출력이며,  $\Phi, \Gamma$ 는 대칭 구조인 동적보상기 이득 행렬이다. 동적보상기의 블록도는 그림 2와 같다.

식 (5)의 오차 상태방정식에 동적보상기를 포함시킨 확장 상태변수를  $\zeta = [\sigma \ \tilde{q} \ \dot{\tilde{q}}]^T$ 로 정의하면 확장 오차 상태방정식을 얻을 수 있다.

$$\dot{\zeta} = A\zeta + BM^{-1}(q)[Y(q, \dot{q}, \ddot{q})\theta - \tau] \quad (7)$$

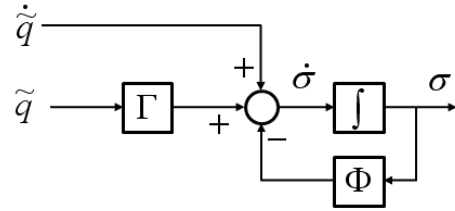


그림 2. 동적보상기 블록도  
Fig. 2. Block diagram of Dynamic compensator.

여기서,  $Y(q, \dot{q}, \ddot{q})\theta = M(q)\ddot{q}_d + C(q, \dot{q})\dot{q}_d + G(q)$  이고

$$A = \begin{bmatrix} -\Phi & \Gamma & I_{n \times n} \\ 0 & 0 & I_{n \times n} \\ 0 & 0 & 0_{n \times n} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0_{n \times n} \\ I_{n \times n} \end{bmatrix} \text{이다.}$$

김발시스템의 고각부에 장착되는 카메라나 안테나 부하 변동에 따라 발생하는 불확실성 파라미터는 고각부 질량  $m_2$ , 방위각/고각 관성모멘트  $I_{z1}, I_{x2}$ , 고각부의 무게 중심점  $r_1$ 이 있다. 불확실성 파라미터에 의해 변동되는  $\theta$ 의 변동범위는 제한되어 다음과 같이 표현된다고 가정한다.

$$\|\tilde{\theta}\| = \|\theta - \theta_0\| \leq \rho, \rho > 0 \quad (8)$$

여기서  $\theta_0, \rho$ 는 아는 파라미터이다.

불확실성 파라미터를 보상하는 김발시스템의 토크 입력은 다음 식과 같이 정한다.

$$\tau = Y(q, \dot{q}, \ddot{q})\theta_0 - M_0(\tilde{q}, q_d)K\zeta + \tau_n \quad (9)$$

여기서,  $\theta_0, M_0$ 은 알고있는 물리적 파라미터로 이루어진 공칭행렬(nominal matrix)이며,  $K$ 는 제어 이득 행렬이고  $\tau_n$ 은 파라미터 불확실성을 보상하기 위한 비선형항이다.

나. Lyapunov 안정도 판별

불확실성 파라미터가 포함된 김발시스템은 아래의 가정이 성립되며, 시스템 안정도 해석에 사용된다.

가정1:  $M^{-1}(q)$  행렬의 norm은 다음을 만족한다.

$$\lambda_m \leq \|M^{-1}(q)\| \leq \lambda_M \quad (10)$$

가정2: 다음을 만족시키는 상수  $\alpha_M, \alpha_C, \alpha_G \geq 0$ 가 존재한다.

$$\begin{aligned} \|M(q) - M_0(q)\| &\leq \alpha_M \\ \|C(q, \dot{q}) - C_0(q, \dot{q})\| &\leq \alpha_C \|\dot{q}\| \\ \|G(q) - G_0(q)\| &\leq \alpha_G \end{aligned} \quad (11)$$

가정3: 다음부등식을 만족하는 상수  $\beta$ 가 존재한다.

$$\|Y(q, \dot{q}, \ddot{q}_d)\tilde{\theta}\| \leq \alpha_M \|\ddot{q}_d\| + \alpha_C \|\dot{q}_d\|^2 + \alpha_G = \beta \quad (12)$$

토크입력의 비선형항  $\tau_n$ 을 다음과 같이 정한다.

$$\tau_n = \begin{cases} \frac{\lambda_M \beta(\zeta) s}{\lambda_m \|s\|} & \text{if } \lambda_M \beta(\zeta) \|s\| > \mu \\ \frac{\lambda_M^2 \beta^2(\zeta) s}{2\lambda_m \mu} & \text{if } \lambda_M \beta(\zeta) \|s\| \leq \mu \end{cases} \quad (13)$$

여기서  $s = B^T P \zeta$ ,  $\beta(\zeta) = \beta + \alpha_M \|K\| \|\zeta\|$  이고  $\mu > 0$ 는 설계파라미터이다. 또한 행렬  $P = P^T$ 는 Lyapunov 방정식  $(A - BK)^T P + P(A - BK) = -I$ 의 해이다.

시스템의 안정도를 해석하기 위하여 Lyapunov 후보함수  $V$ 를 다음과 같이 정한다.

$$V = \zeta^T P \zeta \quad (14)$$

식 (14)는 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\lambda_{\min}(P) \|\zeta\|^2 \leq V \leq \lambda_{\max}(P) \|\zeta\|^2 \quad (15)$$

Lyapunov 후보함수 식 (14)를 미분하면 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \dot{\zeta}^T P \zeta + \zeta^T P \dot{\zeta} \\ &= [(A - BK)\zeta + BM^{-1}(Y\tilde{\theta} + \tilde{M}K\zeta - \tau_n)]^T P \zeta \\ &\quad + \zeta^T P [(A - BK)\zeta + BM^{-1}(Y\tilde{\theta} + \tilde{M}K\zeta - \tau_n)] \\ &= \zeta^T [(A - BK)^T P + P(A - BK)] \zeta \\ &\quad + (Y\tilde{\theta} + \tilde{M}K\zeta - \tau_n)^T (M^{-1})^T s + s^T M^{-1} (Y\tilde{\theta} + \tilde{M}K\zeta - \tau_n) \\ &= -\zeta^T \zeta + 2s^T M^{-1} (Y\tilde{\theta} + \tilde{M}K\zeta - \tau_n) \\ &\leq -\|\zeta\|^2 + 2\|s\| \lambda_M (\|Y\tilde{\theta}\| + \|\tilde{M}K\zeta\|) - 2s^T M^{-1} \tau_n \\ &\leq -\|\zeta\|^2 + 2\|s\| \lambda_M \beta \end{aligned} \quad (16)$$

$\lambda_M \beta(\zeta) \|s\| > \mu$ 인 조건에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -\|\zeta\|^2 + 2\|s\| \lambda_M \beta(\zeta) - 2s^T M^{-1} \left[ \frac{\lambda_M \beta(\zeta) s}{\lambda_m \|s\|} \right] \\ &\leq -\|\zeta\|^2 + 2\|s\| \lambda_M \beta(\zeta) - \frac{2\lambda_m \|s\|^2 \lambda_M \beta(\zeta)}{\lambda_m \|s\|} \\ &= -\|\zeta\|^2 \leq 0 \end{aligned} \quad (17)$$

$\lambda_M \beta(\zeta) \|s\| \leq \mu$ 인 조건에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -\|\zeta\|^2 + 2\|s\| \lambda_M \beta(\zeta) - 2s^T M^{-1} \left[ \frac{\lambda_M^2 \beta^2(\zeta) s}{2\lambda_m \mu} \right] \\ &\leq -\|\zeta\|^2 + 2\|s\| \lambda_M \beta(\zeta) - \frac{1}{\mu} (\lambda_M \beta(\zeta) \|s\|)^2 \\ &= -\|\zeta\|^2 + \mu \end{aligned} \quad (18)$$

식 (15)를 이용하여 식(18)를 정리하면 다음과 같다.

$$\dot{V} \leq -\frac{V}{\lambda_{\max}(P)} + \mu \quad (19)$$

집합  $\Omega_c = \{(\zeta) \mid V \leq c\}$ ,  $c > 0$ 로 정의할 때  $\mu$ 는 다음 조건을 만족하는 임의의 작은 값으로 정할 수 있다.

$$\mu \leq \frac{c}{\lambda_{\max}(P)} \quad (20)$$

또한,  $0 < b < c$ 인 집합  $\Omega_b = \{(\zeta) \mid V \leq b\} \in \Omega_c$ 를 정의하고,  $\alpha > 1$ 에 대해  $\mu$ 를  $\mu = \frac{2b}{\alpha \lambda_{\max}(P)}$ 로 정하면,  $V \geq b$ 에서 식 (19)는 다음과 같이 된다.

$$\dot{V} \leq -\mu(\alpha - 1) < 0 \quad (21)$$

따라서, 초기상태로부터 유한시간 내에  $\Omega_b$ 에 머물게 되어 균일 최종 한계(Uniformly Ultimate Bounded)를 만족한다.

### III. 컴퓨터 시뮬레이션

#### 1. 실험환경 및 파라미터

제한한 상태제환 강인제어기의 성능 검증을 위해 2축 김발 모델링(그림.1)을 이용하여 모의실험을 수행하였다.

김발시스템의 물리적 파라미터는 표 1과 같다.

위의 식 (10), (11), (12)의 조건에 대한 파라미터 상수와 사용한 제어기의 이득 값은 표 2와 같다.

표 1. 김발시스템 물리적 파라미터  
Table 1. Physical Parameters of Gimbal System.

기호	값	단위
m1	5.5	kg
m02	2.5	kg
$\Delta$ m2	2.5	kg
r1	0.1	m
$\Delta$ r1	0.05	m
$I_{z1}$	0.1	kg/m <sup>2</sup>
$\Delta I_{z1}$	0.05	kg/m <sup>2</sup>
$I_{x2}$	0.06	kg/m <sup>2</sup>
$\Delta I_{x2}$	0.06	kg/m <sup>2</sup>
g	9.8	m/s <sup>2</sup>

표 2. 김발시스템 제어 파라미터  
Table 2. Control Parameters of Gimbal System.

기호	값	기호	값
$\Phi$	diag(5,5)	$\lambda_M$	7.6923
$\Gamma$	diag(50,50)	$\lambda_m$	4.9383
$\mu$	0.1	$\alpha_M$	0.1175
K	[2 30 30]	$\alpha_C$	0.0306
$\beta$	5.3626	$\alpha_G$	4.9

2. 제안제어기 vs 선형 PI제어기 비교실험

본 절에서는 기존 논문<sup>[1, 10]</sup>에 적용되었던 동역학 파라미터 변화를 보상하지 않는 선형 PI제어기와 파라미

터 변화에 강인하도록 제안한 제어기를 비교 실험하였다. 1축과 2축의 대한 위치명령은 정현파(약 10deg, 0.4Hz)를 입력하고, 동역학의 변화가 없는 경우와 있는 경우에 따른 각 제어기의 위치추종오차 변화를 분석하였다.

그림 3, 그림 4는 김발의 1축 위치 오차를 나타낸 결과이다. 동역학 변화가 없는 경우 PI 제어기의 위치 추종오차는 rms 0.0607deg, 제안한 제어기의 위치 추종오차는 rms 0.0568deg로 유사한 결과를 보인다. 동역학 파라미터가 변동된 경우 PI제어기의 위치 추종오차는 rms 0.1165deg, 제안한 제어기는 rms 0.0662로 기존 대비 약 2배 오차가 커지는 PI제어기와 달리 제안한 제어

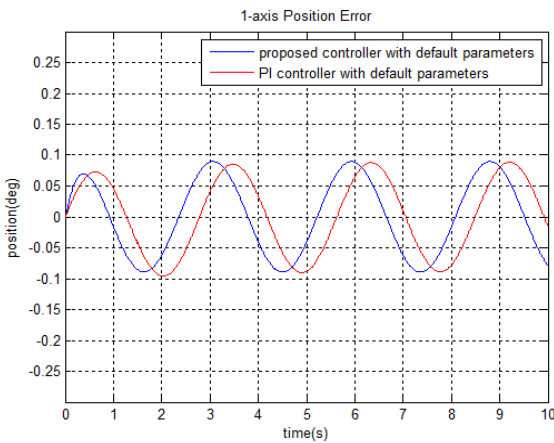


그림 3. 1축 위치 추종오차 (동역학 파라미터 변동 없는 경우)  
Fig. 3. Position Tracking error of 1-axis. (without parameter uncertainty)

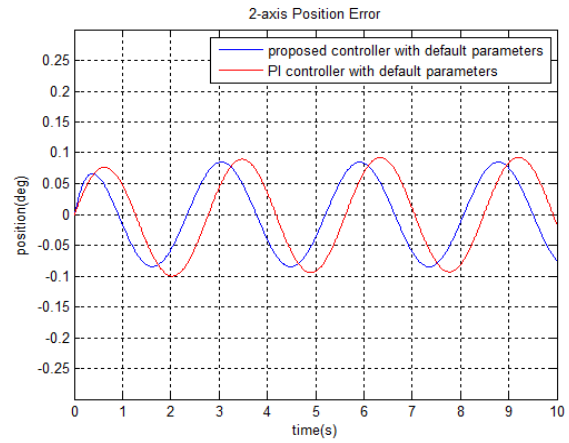


그림 5. 2축 위치 추종오차 (동역학 파라미터 변동 없는 경우)  
Fig. 5. Position Tracking error of 2-axis. (without parameter uncertainty)

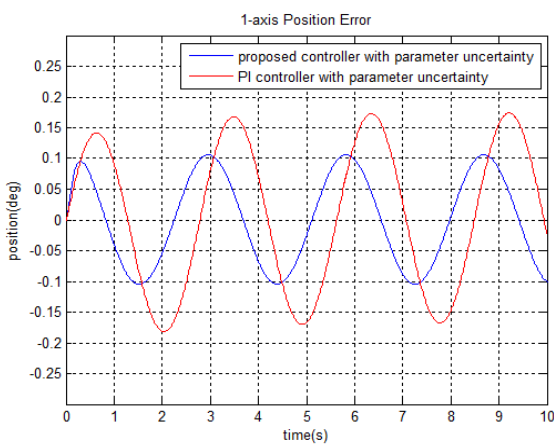


그림 4. 1축 위치 추종오차 (동역학 파라미터 변동된 경우)  
Fig. 4. Position Tracking error of 1-axis. (with parameter uncertainty)

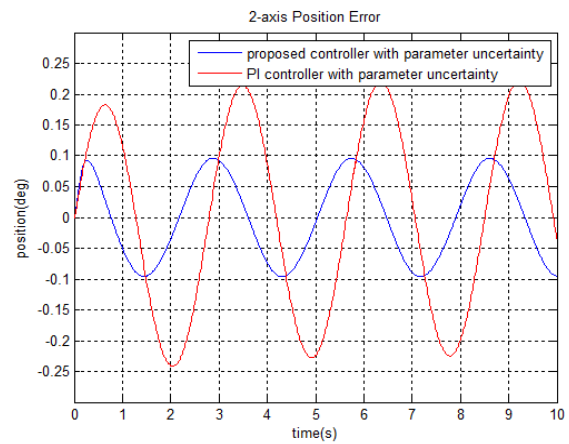


그림 6. 2축 위치 추종오차 (동역학 파라미터 변동된 경우)  
Fig. 6. Position Tracking error of 2-axis. (with parameter uncertainty)

기는 동역학 변화에도 강인함을 보인다.

그림 5, 그림 6은 김발의 2축 위치 오차를 나타낸 결과이다. 동역학 변화가 없는 경우 PI 제어기의 위치 추종오차는 rms 0.0637deg, 제안한 제어기의 위치 추종오차는 rms 0.0538deg로 유사한 결과를 보인다. 동역학 파라미터가 변동된 경우 PI제어기의 위치 추종오차는 rms 0.1517deg로 기존 대비 2배 이상 오차가 커지나 제안한 제어기는 rms 0.0607로 동역학 변화에도 유사한 결과를 보인다.

### 3. 제안제어기 vs 기존 비선형제어기 비교실험

본 절에서는 기존 논문<sup>[11]</sup>에 적용되었던 적분보상기

를 포함하는 비선형 강인제어기와 동적보상기를 포함하는 제안한 제어기를 비교 실험하였다.

그림 7, 8은 김발 위치오차에 대한 결과 그래프이다. 적분기를 포함하는 비선형제어기는 초기에 1축은 약 4.5deg, 2축은 약1.9deg의 오버슈트가 발생하며, 수렴하는데 약 3초가 소요되고, 최종 위치오차는 2.0E-6deg, 6.0E-7이다. 제안한 제어기는 초기 오버슈트는 1축은 1.5deg, 2축은 0.7deg, 수렴시간은 두 축 모두 1초 이내, 최종 위치오차는 2.3E-4deg, 5.7E-4deg로 기존 제어기보다 최종 위치오차는 크나 충분히 작은 값이다.

그림 9, 10은 김발 각속도 오차에 대한 결과 그래프이다. 적분기를 포함하는 비선형제어기는 초기에 1축은

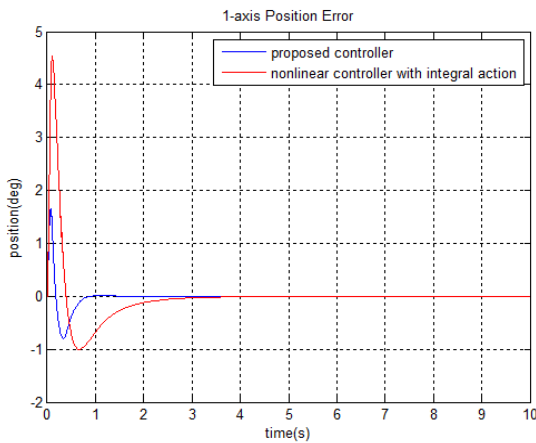


그림 7. 스텝입력 시 1축 위치 오차 (제안한 제어기vs비선형제어기)  
Fig. 7. Position error of 1-axis with step input. (Proposed controller vs Robust controller)

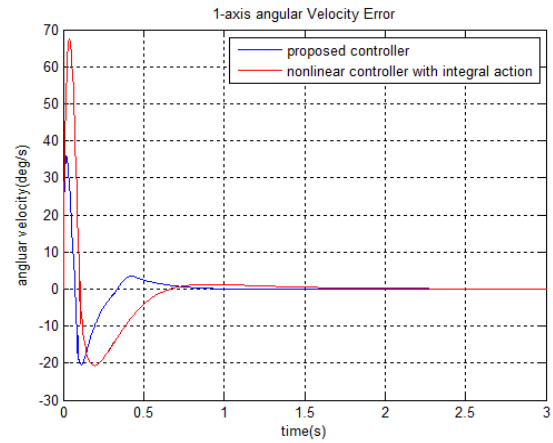


그림 9. 스텝입력 시 1축 각속도 오차 (제안한 제어기vs비선형제어기)  
Fig. 9. Angular Velocity error of 2-axis with step input. (Proposed controller vs Robust controller)

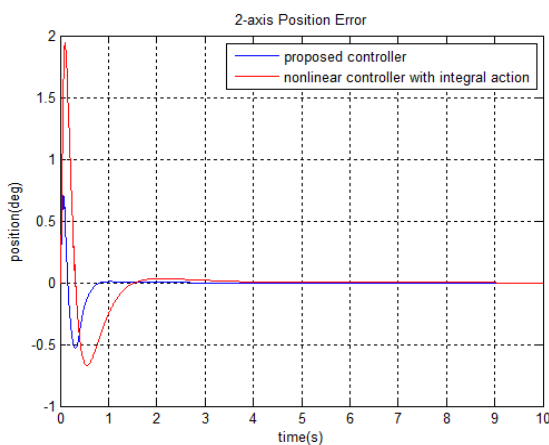


그림 8. 스텝입력 시 2축 위치 오차 (제안한 제어기vs비선형제어기)  
Fig. 8. Position error of 2-axis with step input. (Proposed controller vs Robust controller)

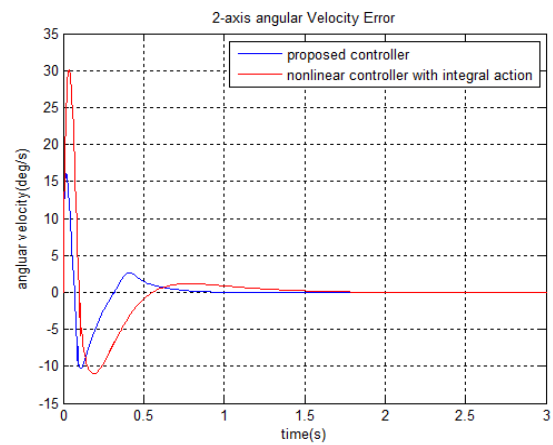


그림 10. 스텝입력 시 2축 각속도 오차 (제안한 제어기vs비선형제어기)  
Fig. 10. Angular Velocity error of 2-axis with step input. (Proposed controller vs Robust controller)

68deg/s, 2축은 30deg/s의 오버슈트가 발생하며, 수렴하는데 두 축 모두 약 2초가 소요된다. 제안한 제어기는 초기 오버슈트는 1축은 35deg/s, 2축은 15deg/s, 두 축 모두 1초 이내에 수렴한다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 파라미터 불확실성이 존재하는 김발 시스템에 대해 동적보상기를 포함하는 출력궤환 강인제어기를 제안하였다.

부하변동에 의한 파라미터 불확실성으로 발생하는 정상상태 오차는 비선형보상항과 동적보상기에 의해 개선되도록 하였으며 제안된 제어 시스템의 페루프 안정도는 Lyapunov 안정도 판별법으로 입증하였다. 제안된 제어기의 제어성능은 2축을 갖는 김발시스템 대상으로 시뮬레이션을 수행하였으며, 기존 PI 제어기와 적분보상기를 포함한 비선형 제어기, 제안한 제어기의 결과를 비교하였다. 제안한 제어기가 기존 PI 제어기 대비 파라미터 불확실성에 강인함을 확인하였고, 적분보상기를 포함한 비선형 제어기의 과도응답 및 수렴시간을 2배 이상 단축시키는 것을 확인하였다. 단 최종 오차는 동적보상기 특성상 적분보상기보다 크지만 충분히 작은 범위로 수렴하였다. 실제 김발을 이용한 실험을 통하여 실용성을 입증하는 것은 향후 과제이다.

#### REFERENCES

[1] S.K Lee and J.Y Lee, "Design and Implementation for Motion control system with precise driving machanism," IEMEK J.Embed.Sys.Appl., Vol. 8, no. 3, pp. 129-136, June, 2013.

[2] K.N Lee and B.H Lee, "Stabilization system for mobile antenna gimbal based on dynamic characteristics analysis," Trans.Korean Soc.Mech. Eng.A., Vol. 37, no. 7, pp. 851-856, 2013.

[3] K.R Lee and T.S Kim, "Delay Dependent Fuzzy  $H_{\infty}$  control radar gimbal stabilization system with parameter uncertainty and time delay," Journal of Control, Automation and systems Engineering., Vol. 11, no. 11, pp. 920-929, Nov, 2005.

[4] Slotine, J.J.E and Li, W, "Adaptive Manipulator control : A Case Study," IEEE Trans. Automat.

Cont., Vol. 33, no. 11, pp. 995-1003, Nov, 1998.

[5] Kelly, R, "Robust Asymptotically stable visual servoing of planar robots," IEEE Trans. Robotics and automat., Vol. 12, no. 5, pp. 759-766, Oct, 1996.

[6] Imura, J, Sugie, T and Yoshikawa, T, "Adaptive Robust Control of Robot Manipulators Theory and Experiment," IEEE Trans. Robotics and Automat., Vol. 10, no. 5, pp. 705-710, Oct, 1994.

[7] F.L. Lewis, C.T Abdallah and D.M. Dawson, "Control of Robot Manipulators," Macmillan, New York, 1989.

[8] Jason Osborne, Gregory Hicks and Robert Fuentes, "Global Analysis of the Double-Gimbal Mechanism," IEEE Control Systems Magazine, Aug, 2008.

[9] Kim, C. S., Mo, E. J., Han, S. M., Jie, M. S., & Lee, K. W. "Robust visual servo control of robot manipulators with uncertain dynamics and camera parameters" International Journal of Control, Automation and Systems, Vol.8, no. 2 , pp. 308-313, 2010

[10] S.P, Hwang and J.H, Park, "Control System Design for a UAV-Mounted Camera Gimbal Subject to Coulomb Friction", Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, Vol.18, no.7, pp. 680-687, June, 2012

[11] M.S Jie and K.W Lee. "Image-Based robust control of robot manipulators with integral actions." Computational Science - ICCS Springer Berlin Heidelberg, pp.108-116, 2006

저 자 소 개



전 영 범(정회원)  
2010년 한서대학교 항공전자  
공학과 학사 졸업.  
2013년 항공대학교 항공전자  
공학과 석사 졸업.  
2009년~2011년 서보산전  
기술연구소 근무

2013년~현재 LIG Nex1 우주영상연구센터  
Project1팀 연구원  
<주관심분야 : 로봇 제어, 모터 구동>



최 우 석(정회원)  
2007년~현재 LIG Nex1  
우주영상연구센터 Project  
1팀 선임연구원



이 성 우(정회원)  
1990년~현재 국방과학연구소  
국방위성체계개발단  
책임연구원



강 태 하(정회원)  
1987년~현재 국방과학연구소  
국방위성체계개발단  
책임연구원