

직동외란의 효율적 억제기능을 갖는 서보계 설계법에 관한 연구 A Study on Servosystem Design with Effective Direct Disturbance Rejecting Technique

이동훈* · 수메이야 샤키르* · 박환철** · 김영복*** · 김형진****†
Dong-Hun Lee*, Soumayya Chakir*, Hwan-Cheol Park**,
Young-Bok Kim*** and Hyong-Jin Kim****†

(Received 15 June 2020, Revision received 24 June 2020, Accepted 24 June 2020)

Abstract : This paper presents an interference disturbance compensation method for the connected system. The disturbance is generated from the system motion such that it directly affects the relative motion. For example, in the robot system, the arm motions influence each other because the arms are connected in series. If we design a servosystem for controlling the robot motions including arm angle, the interference disturbance should be carefully considered. The reason for this is that it influences and works as the disturbance which degrades the tracking performance. Therefore, the authors developed a novel interference disturbance rejecting method by simple feedforward control strategy based on the framework of robust servosystem design. By applying the proposed method to a 2DOF robot system, its effectiveness was evaluated.

Key Words : Interference disturbance, Relative motion, Robot system, Servosystem, Rejecting, Feedforward

1. 서 론

본 논문에서는 로봇과 같이 암 등이 직렬로 연결된 시스템의 운동제어문제에 대해 고찰한다. 이

러한 시스템은 일반적으로 자유도 수에 해당하는 액추에이터를 장착하여 각각의 운동을 제어하도록 구성된다. 그러나 각 암 운동간의 상호간섭이 발생하고, 그 영향을 억제하기 위해서 구조를 최

****† 김형진(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-3945-0482)
: 직원, 삼성전자(주)

E-mail : persel@naver.com, Tel : 051-629-6197.

*이동훈(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-6157-9763) : 대학원생,
부경대학교 대학원 기계시스템공학과

*수메이야 샤키르(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-7668-0140) :
대학원생, 부경대학교 대학원 기계시스템공학과

**박환철(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-5670-7246) : 1
등기관사, 부경대학교 실습선 가야호.

***김영복(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-6035-6744) :
교수, 부경대학교 기계시스템공학과

****† Hyong-Jin Kim(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-3945-0482):
Staff, Samsung Electronics Co.

E-mail : persel@naver.com, Tel : 051-629-6197.

*Dong-Hun Lee(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-6157-9763) :
Graduate School Student, Department of Mechanical System
Engineering, Pukyong National University.

*C. Soumayya(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-7668-0140)
: Graduate School Student, Department of Mechanical System
Engineering, Pukyong National University.

**Hwan-Cheol Park(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-5670-7246) :
First Engineer, Training Ship Kaya, Pukyong National
University.

***Young-Bok Kim(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-6035-6744) :
Professor, Department of Mechanical System Engineering,
Pukyong National University.

적화하거나, 능동적 제어기법을 포함한 소프트웨어적인 방법으로 대응하고 있다.¹⁻³⁾ 그러나 무겁고 강한 구조는 관성력 증가로 운동성능을 저하시키며, 가볍고 유연한 구조는 고주파 동적특성을 여기하여 작업정밀도를 떨어뜨리게 된다. 이와 같은 문제해결방안에 대한 필요성이 꾸준히 요구되고 있으나 아직 뚜렷한 대안이 없는 실정이다. 고속 운동성능이 필요하다면 강력한 구동력과 제어력을 가진 액추에이터를 장착하거나, 그렇지 않다면 저속으로 구동하는 방법이 대안이면 대안이라 할 수 있다. 이러한 상황을 고려한다면, 제어기 설계를 통해 제어성능을 개선하는 것이 가장 효과적인 방법일 것으로 판단한다. 그래서 본 연구에서는 상호간의 간섭운동을 효과적으로 억제하는 방법에 대해 고찰한다. 기존연구에서는 상호간의 간섭운동을 직동외란(direct disturbance)으로 간주하고 이것을 피드포워드 보상법으로 억제한다.⁴⁻⁹⁾ 그러나, 외란을 억제하는 것을 주목적으로 하는 경우와 달리, 추종성능을 확보하는 것을 목적으로 설계된 서보계에서는 직동외란 보상기 설계에 신중을 기해야 한다. 즉, 외란보상기 신호는 직동외란이 존재할 경우에만 작용해야 하나 그렇지 않을 경우에는 추종성능에 악영향을 미치는 결과를 초래한다.⁸⁻⁹⁾

따라서 본 연구에서는 외란보상기가 추종성능에 미치는 영향을 가능한 억제하면서, 서보계로서의 목적을 달성할 수 있도록 하는 새로운 제어기 설계법을 제안한다. 제어계는 불확실성에 강한 피드백제어기와 직동외란을 적극적으로 억제하기 위한 피드포워드 제어기로 구성된다. 기존 제어기법과의 비교평가를 위해 시뮬레이션을 수행하고 이를 통해 제안하는 기법의 유효성을 검증한다.

2. 문제설정

2.1 기존연구 분석 및 제어목적

먼저 본 연구에서 제안하는 제어계의 유효성을 검증하기 위해, 제어대상으로 Fig. 1의 2자유도 로봇시스템을 고려한다. 로봇 각 자유도의 운동은 그것과 연결된 다른 로봇 암의 운동을 방해하게

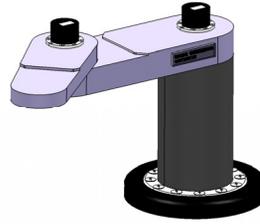


Fig. 1 2DOF robot system as controlled system

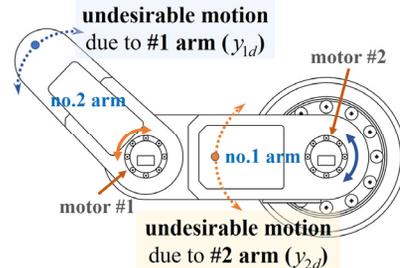


Fig. 2 Mechanism of disturbance generation

된다. Fig. 2에 이러한 간섭현상이 발생하는 메커니즘을 간단히 나타내었다. 1번 암의 회전운동은 2번 암의 회전관성력을 증가시킨다. 그리고 2번 암의 구동장치가 1번 암 끝단에 위치함으로써 1번 암에 부가적인 운동을 발생시키게 된다. 이러한 간섭현상은 직렬이든 병렬이든 발생하게 되므로, 구조적으로 이러한 간섭이 생기기 않도록 대응하고 있는 것이 현실이다.¹⁰⁻¹³⁾

그래서 본 연구에서는 각 암의 운동으로 발생하는 간섭외란의 동적특성을 파악할 수 있다고 가정하고, 이를 기초로 외란을 효과적으로 억제하는 방법을 제안한다. 즉, 첫 번째 로봇 암의 운동이 다른 암의 운동에 미치는 영향 정도를 파악할 수 있다고 한다면 보다 선제적이고 적극적인 방법으로 그 영향을 상쇄하여 바람직한 제어성능을 확보할 수 있을 것이다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 1에 나타난 두 개의 암으로 구성된 로봇 시스템의 운동제어문제를 통해 제안하는 기법의 유효성을 평가한다. 이때 상호간에 미치는 영향정도를 파악할 수 있으며, 이것을 전달함수 형식으로 표현한다. 이러한 사실을 기반으로, 상호작용하는 외란을 억제하는 방법을 제안한다.

2.2 간섭외란 동특성 모델링

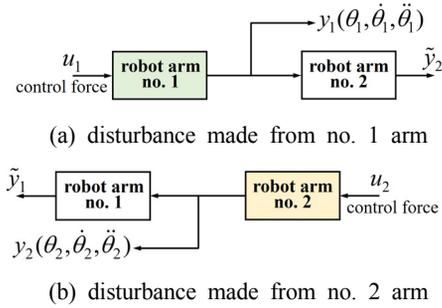


Fig. 3 Interference disturbance modeling process

우선 2자유도 로봇시스템을 기준으로 간섭외란의 동특성을 파악하는 방법에 대해 설명한다. Fig. 3에 간섭외란 발생 메커니즘과, 그것의 동적특성 모델링 방법을 나타내었다. 특히 Fig. 3 (a)는 1번 로봇 암이 2번 암에 미치는 영향정도를 분석하는 과정을 설명하고 있다. 이때 2번 암에는 제어입력을 인가하지 않고 자유운동이 가능한 상태로 둔다. 이런 상태에서, 1번 암에 기지의 제어신호를 인가하여, 1번 및 2번 로봇 암의 운동(각도 및 각속도)을 계측한다. 즉, 인가한 제어신호를 입력으로, 각도 및 각속도를 출력으로 하여 전달함수를 획득한다. 이때 1번 암의 운동으로 2번 암에 전달되는 영향, 즉 외란으로 정의한 전달함수는, 1번 암의 출력을 입력신호로, 2번 암에서 얻어지는 운동특성을 출력으로 하여 구한다. 2번 암의 운동이 1번 암에 미치는 영향은 Fig. 3 (b)와 같이 (a)의 경우와 반대로 구하면 된다. 따라서 입력과 출력간의 관계는 다음 식으로 정리할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \tilde{y}_1 \\ \tilde{y}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_1 & 0 \\ 0 & G_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{u}_1 \\ \tilde{u}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & G_{2d} \\ G_{1d} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

식 (1)에서,

- $G_1(s)$: 1번 로봇 암 동특성을 표현하는 전달함수
- $G_2(s)$: 2번 로봇 암 동특성을 표현하는 전달함수
- $G_{2d}(s)$: 2번 로봇 암이 1번 로봇 암에 미치는 영향을 나타내는 간섭외란 모델
- $G_{1d}(s)$: 1번 로봇 암이 2번 로봇 암에 미치는 영

향을 나타내는 간섭외란 모델

2.3 간섭외란 억제방법에 대한 고찰

제어대상인 로봇시스템에서 상대적 운동으로 발생하는 영향은 직동외란이다. 따라서 상대운동을 발생시키는 구동신호 정보를 이용하면 보다 선제적이고 적극적으로 그 영향을 억제할 수 있다. 이 방법은 Fig. 4 (a)와 같이 도식적으로 나타낼 수 있다. 즉, 2번 로봇 암의 구동에 따라 1번 암이 간섭을 받게 되는 구조를 나타내고 있다. 보다 상세하게 설명하면, 제어입력 u_2 로 2번 로봇 암 $G_2(s)$ 를 제어할 경우, 2번 로봇 암의 운동출력 y_2 가 1번 로봇 암의 출력 \tilde{y}_1 에 직접 나타나 원래의 출력 y_1 에 영향을 주게 된다. 그 영향을 억제하기 위해서는, 보상기 $\bar{G}_2(s)$ 를 이용하여 출력 \tilde{y}_1 에 외란 y_{2d} 가 나타나지 않도록 하는 제어입력 \tilde{u}_1 을 구하면 된다. (이때 $u_1 = 0$ 라 둔다.) 즉, 외란이 포함된 1번 암의 출력은

$$\begin{aligned} \tilde{y}_1 &= y_1 + y_{2d} \\ &= G_1(s) \tilde{u}_1 + G_{2d}(s) y_2 \end{aligned} \quad (2)$$

이므로, 제어입력을

$$\tilde{u}_1 = -G_1(s)^{-1} G_{2d}(s) y_2 \quad (3)$$

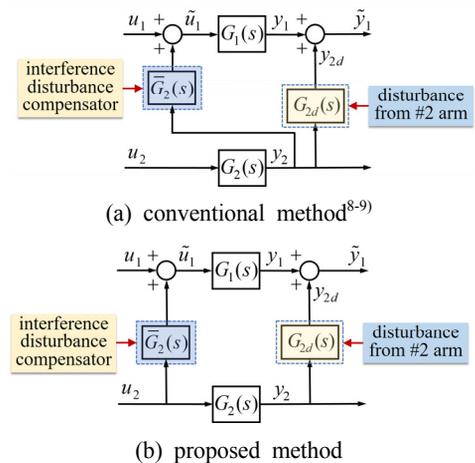


Fig. 4 Interference disturbance compensation methods

와 같이 결정하면 간섭외란이 출력에 나타나지 않게 된다.⁸⁻⁹⁾ 이때

$$\bar{G}_2(s) = -G_1(s)^{-1}G_{2d}(s) \quad (4)$$

는 $\bar{G}_2(s) \in RH_\infty$ 조건을 만족하도록 결정하는 것도 유효한 방법이 된다. Fig. 4 (a)의 문제점을 기술하기 이전에 (b)의 경우, 간섭외란을 억제하기 위한 보상기는 식 (4)와 달리 다음 식과 같이 결정하면 된다.

$$\begin{aligned} \bar{G}_2(s) &= -G_1(s)^{-1}G_{2d}(s)G_2(s) \\ (\bar{G}_1(s) &= -G_2(s)^{-1}G_{1d}(s)G_1(s)) \end{aligned} \quad (5)$$

Fig. 4에 나타낸 두 가지 방법에서의 차이점은 보상기 입력신호를 상대 운동체의 출력측 혹은 입력측 어디에서 가져오느냐에 있다. 이 경우 발생하는 문제점은 출력 y_2 로부터 획득하는 정보이다. 상호간섭은 동적인 운동에 의해 발생한다는 점에 주의해야 하는데, 만일 제어변수가 각도라고 하자. 이럴 경우, 2번 암의 출력이 목표값에 도달하고 나면 제어신호 \tilde{u}_1 는 '0'이 되어야 한다. 그러나 y_2 는 일정한 값을 출력하므로 이것은 간섭외란 보상기로 입력되어 제어력을 발생시킨다. ($\tilde{u}_1 \neq 0$) 즉, 1번 암으로는 더 이상 간섭외란의 영향이 작용하지 않음에도 불구하고 외란억제력이 지속적으로 가해지게 되어 1번 암에 대한 추종 성능이 떨어지게 된다. 따라서 단순히 외란만을 억제하기 위한 제어시스템의 경우에는 Fig. 4 (a)의 방법도 유용하나, 서보계에서 외란을 억제해야 하는 문제에서는 (b)의 방법이 효과적이다.

3. 제어계 설계

3.1 모델링 및 간섭외란 보상기 설계

앞서 기술한 것과 같이 본 연구에서의 제어대상은 2자유도 로봇시스템이다. 제어대상 실험장치는 Fig. 5의 사진에 나타내었으며, 두 개의 암이 연결되어 평면상에서 운동하는 구조이다.¹⁴⁻¹⁶⁾

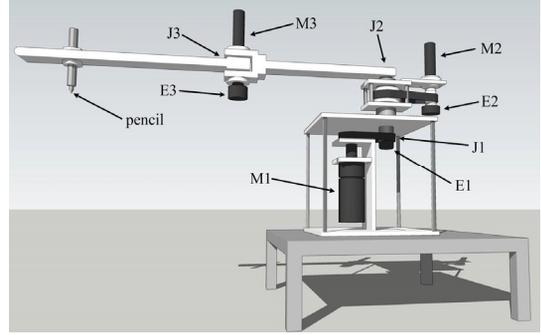


Fig. 5 2DOF robot system¹⁴⁻¹⁶⁾

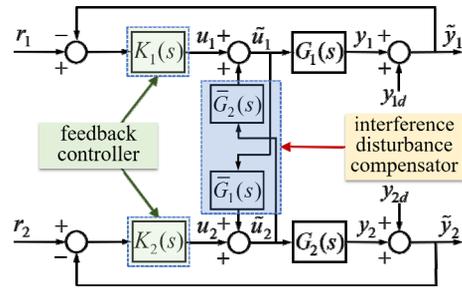


Fig. 6 2DOF robot motion control system with interference disturbance compensators

제어대상에 대한 운동특성과 간섭외란에 대한 동특성을 실험적으로 구한 후 제어를 설계한다.

로봇시스템의 제어목표는 각 암의 회전운동을 적절히 조절하는 것이므로, 본 연구에서는 암 회전각을 제어하기 위한 서보계를 기본으로, 간섭외란을 억제하기 위한 외란보상기를 설계한다.

$$G_1(s) = \frac{-(0.02s + 161)}{s^2 + 4.10s + 0.01} \quad (6)$$

$$G_2(s) = \frac{-(0.05s + 416)}{s^2 + 6.07s + 0.006} \quad (7)$$

$$G_{1d}(s) = \frac{0.70s - 0.20}{s^2 + 0.48s + 0.16} \quad (8)$$

$$G_{2d}(s) = \frac{-0.01s + 0.001}{s^2 + 0.35s + 0.01} \quad (9)$$

결국 본 연구에서 설계하고자 하는 전체 제어 시스템 구성도는 Fig. 6과 같다.

제어계 설계를 위해서는 로봇의 운동특성과 간섭외란의 동특성을 파악해야 한다. 그 과정은 Fig. 3에 나타난 것과 같고, 실험과 시뮬레이션을 통해 식 (6)~(9)와 같이 구하였다.

이것으로부터, Fig. 6에서의 외란보상기 $\bar{G}_i(s)$ ($i=1,2$)는 식 (5)의 표현대로, 다음의 식 (10) 및 식 (11)과 같이 간단히 구해진다. 이때 각각의 보상기는 조건 $\bar{G}_i(s) \in RH_\infty$ (stable and proper)을 만족한다.

$$\bar{G}_1(s) = \frac{N_{g1}}{D_{g1}} \quad (10)$$

$$N_{g1} = -5.62 \times 10^{-5}s^4 - 0.57s^3 - 3.25s^2 + 0.99s - 0.001$$

$$D_{g1} = 0.042s^5 + 416.2s^4 + 1907s^3 + 891s^2 + 273.1s + 0.38$$

$$\bar{G}_2(s) = \frac{N_{g2}}{D_{g2}} \quad (11)$$

$$N_{g2} = 1.29 \times 10^{-6}s^4 + 0.01s^3 + 0.04s^2 - 0.05s - 6.89 \times 10^{-5}$$

$$D_{g2} = 0.02s^5 + 161.1s^4 + 1.03 \times 10^3s^3 + 3.45 \times 10^2s^2 + 273.1s + 0.38$$

3.2 피드백제어기 설계

Fig. 6의 제어시스템은 기본적으로 로봇암의 회전각도를 제어하기 위한 서보계이다. 각각의 암

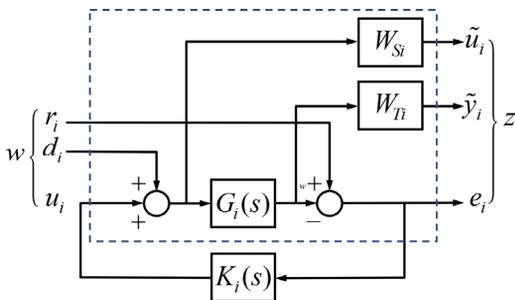


Fig. 7 A robust control system by considering multiplicative uncertainties

운동으로 간섭외란이 인가된다는 것을 고려하면, 서보계는 외란을 포함한 기타 불확실성에 대한 강인성 또한 확보해야 한다. 따라서 피드백 제어기 $K_1(s), K_2(s)$ 는 H_∞ 제어기 설계법에 따라 설계한다. 이때 Fig. 6에서 알 수 있듯이, 각 제어대상을 기준으로 입력측에는 외란보상기로부터 발생하는 제어신호가, 출력측에는 간섭외란이 유입된다. 서보계를 기준으로 하면, 간섭외란과 이것을 억제하기 위한 제어력은 부가적으로 유입되는 외부입력이다. 따라서 이러한 외력에 대한 강인성을 확보하고자 한다면 Fig. 7의 제어제도 하나의 후보가 될 것이다.¹⁷⁾ 이때

$G_i(s)$: 제어대상인 로봇 암 전달함수

$K_i(s)$: 피드백 제어기

$W_{Ti}(s), W_{Si}(s)$: 중량함수(weighting functions)

이고, 특히 $W_{Ti}(s)$ 에는 외란보상기 특성이, $W_{Si}(s)$ 에는 제어대상의 출력측으로 유입되는 간섭외란특성이 반영되도록 적절히 선정한다.

결국 Fig. 7의 제어계 설계목표는 아래 식 (12)의 조건을 만족하는 제어기 $K_i(s)$ ($i=1,2$)를 구하는 것이다.^{8,9)}

$$\| T_{zw} \|_\infty < \gamma (> 0) \quad (12)$$

여기서, T_{zw} 는 외부입력 $w = [r_i, d_i]^T$ 에서 출력 $z = [\tilde{u}_i, \tilde{y}_i, e_i]^T$ 까지의 전달함수이다. 이때, r_i : 추종해야 할 목표값, d_i : 외부입력(외란보상기 출력에 상응하는 신호), \tilde{u}_i : 제어입력, \tilde{y}_i : 제어출력, e_i : 추종오차를 나타낸다. 이것으로부터 식 (12)의 조건을 만족하는 제어기는 식 (13) 및 식 (14)와 같다. 여기서 $K_1(s)$ 는 첫 번째 로봇 암 제어기, $K_2(s)$ 는 두 번째 로봇 암의 제어기이다.

$$K_1(s) = \frac{N_{k1}(s)}{D_{k1}(s)} \quad (13)$$

$$\begin{aligned}
 N_{k1}(s) &= -4.31 \times 10^5 s^8 - 4.31 \times 10^9 s^7 \\
 &\quad - 2.81 \times 10^{14} s^6 - 9.27 \times 10^{17} s^5 \\
 &\quad - 2.26 \times 10^{20} s^4 - 3.74 \times 10^{21} s^3 \\
 &\quad - 2.61 \times 10^{22} s^2 - 5.22 \times 10^{21} s - 1.2 \times 10^{20} \\
 D_{k1}(s) &= s^9 + 1.71 \times 10^4 s^8 + 7.25 \times 10^8 s^7 \\
 &\quad + 6.81 \times 10^{12} s^6 + 1.67 \times 10^{16} s^5 \\
 &\quad + 6.36 \times 10^{20} s^4 + 6.85 \times 10^{20} s^3 \\
 &\quad + 6.59 \times 10^{21} s^2 + 2.24 \times 10^{21} s + 3.8 \times 10^{19}
 \end{aligned}$$

$$K_2(s) = \frac{N_{k2}(s)}{D_{k2}(s)} \quad (14)$$

$$\begin{aligned}
 N_{k2}(s) &= -6.48 \times 10^4 s^8 - 6.81 \times 10^8 s^7 \\
 &\quad - 3.35 \times 10^{11} s^6 - 1.10 \times 10^{14} s^5 \\
 &\quad - 1.83 \times 10^{15} s^4 - 6.34 \times 10^{15} s^3 \\
 &\quad - 2.93 \times 10^{15} s^2 - 8.75 \times 10^{14} s - 1.2 \times 10^{12}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 D_{k2}(s) &= s^9 + 2.76 \times 10^4 s^8 + 1.86 \times 10^8 s^7 \\
 &\quad + 9.84 \times 10^{10} s^6 + 3.28 \times 10^{13} s^5 \\
 &\quad + 1.77 \times 10^{15} s^4 + 7.40 \times 10^{15} s^3 \\
 &\quad + 3.49 \times 10^{15} s^2 + 1.06 \times 10^{15} s + 1.46 \times 10^{12}
 \end{aligned}$$

그리고 각각의 제어기를 구할 때 선정한 중량 함수는 아래 식 (15)~(18)과 같다. 이것은 입력측과 출력측 외란 및 그 외 불확실성을 고려하여 선정하였다.

$$W_{T1}(s) = \frac{N_{T1}}{D_{T1}} \quad (15)$$

$$\begin{aligned}
 N_{T1} &= 0.5s^5 + 5.0 \times 10^3 s^4 + 3.26 \times 10^8 s^3 \\
 &\quad + 1.07 \times 10^{12} s^2 + 2.52 \times 10^{14} s + 2.46 \times 10^{15}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 D_{T1} &= s^5 + 1.0 \times 10^4 s^4 + 6.52 \times 10^8 s^3 \\
 &\quad + 2.15 \times 10^{12} s^2 + 5.10 \times 10^{14} s + 5.0 \times 10^{15}
 \end{aligned}$$

$$W_{S1}(s) = \frac{50.0s^2 + 17.56s + 0.41}{s^2 + 0.35s + 0.01} \quad (16)$$

$$W_{T2}(s) = \frac{N_{T2}}{D_{T2}} \quad (17)$$

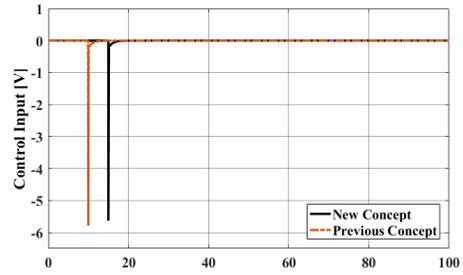
$$\begin{aligned}
 N_{T2} &= 2.7s^5 + 2.7 \times 10^4 s^4 + 1.24 \times 10^5 s^3 \\
 &\quad + 5.78 \times 10^4 s^2 + 1.78 \times 10^4 s + 24.32
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 D_{T2} &= s^5 + 1.0 \times 10^4 s^4 + 4.58 \times 10^4 s^3 \\
 &\quad + 2.14 \times 10^4 s^2 + 6.57 \times 10^3 s + 9.0
 \end{aligned}$$

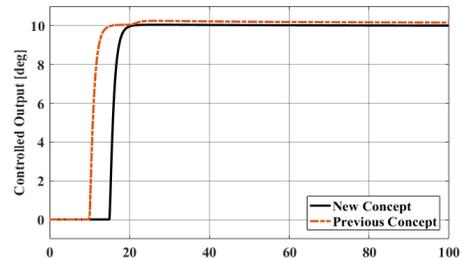
$$W_{S2}(s) = \frac{8.0s^2 + 4.55 \times 10^3 s + 1.07 \times 10^6}{s^2 + 4.82 \times 10^2 s + 1.59 \times 10^5} \quad (18)$$

4. 시뮬레이션 평가

3장에서 제안한 제어기 설계방법의 유효성을 평가하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다. H_∞ 제어기 설계법에 따라 설계한 식 (13) 및 식 (14)의 피드백제어기를 기반으로 간섭외란보상기의 외란억제 성능을 평가한다. 2장의 Fig. 2에서 (a)는 선행연구에서 그 유효성이 검증되었으나, 서보계에서는 추종성능에 악영향을 미치는 문제가 발생한다. 이를 보완하고자 하는 것이 (b)이며, 두 가지 방법의 비교 평가를 통해 제안하는 방법의 유효성을 검증하도록 한다. 결국 시뮬레이션은 Fig. 6의 서보계를 이용하여 수행되며, 간섭외란보상기의 구조를 달리하면서 비교 평가하도록 한다.

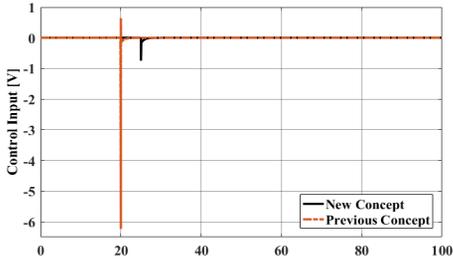


(a) control inputs [V]

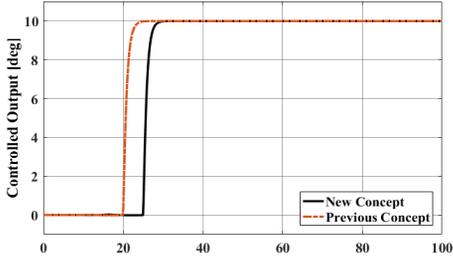


(b) arm angles [deg]

Fig. 8 Step responses of the arm #1 with disturbance compensation

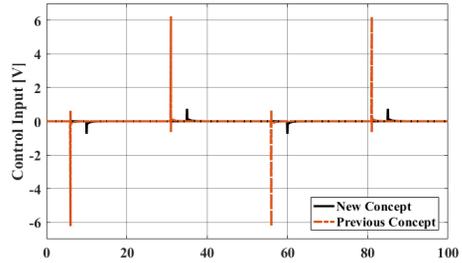


(a) control inputs [V]

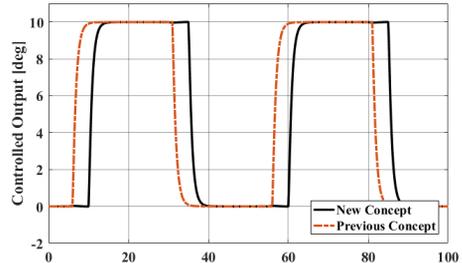


(b) arm angles [deg]

Fig. 9 Step responses of the arm #2 with disturbance compensation

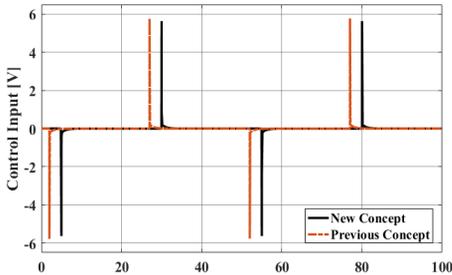


(a) control inputs [V]

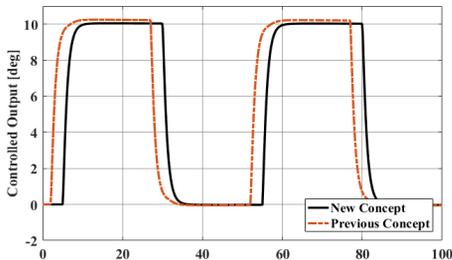


(b) arm angles [deg]

Fig. 11 Responses of the arm #2 for the pulse type reference with disturbance compensation



(a) control inputs [V]



(b) arm angles [deg]

Fig. 10 Responses of the arm #1 for the pulse type reference with disturbance compensation

먼저 Fig. 8 및 Fig. 9는 두 가지 외란보상기법을 비교 평가하기 위한 스텝응답을 나타내고 있다. Fig. 8은 1번 암에 대한 제어입력과 제어출력을 나타내고 있고, 2번 암에 대한 응답특성은 Fig. 9에 나타내었다.

이때 이해를 돕기 위해 목표값을 5 sec 차이가 나도록 각각 증가하였다. Fig. 8 (b)에 나타난 암 각도를 보면, 기존방법을 적용한 경우(점선)에는 직동외란의 영향으로 제어출력이 목표값으로부터 이탈하는 것을 확인할 수 있다. 이것은 각 암이 설정된 목표값(각도)에 도달하였음에도 불구하고 제어력이 지속적으로 증가되기 때문이다.

그리고 2번 암의 운동특성을 나타내고 있는 Fig. 9의 경우, 암 회전각도에 대한 추종성능은 두 경우 모두 양호한 결과를 얻었다. 그러나 제어입력을 나타내고 있는 (a)를 보면, 기존방법(점선)에 비해 지극히 작은 제어입력(실선)으로도 바람직한 제어출력을 얻을 수 있다는 것을 확인할 수 있다.

아울러, 보다 다양한 출력특성을 평가하기 위해

펄스형 목표값에 대한 응답특성을 Fig. 10과 Fig. 11에 나타내었다. Fig. 10은 기존기법을 적용한 경우이며, Fig. 11은 본 연구에서 제안하는 기법을 적용한 경우이다. 스텝응답 결과와 마찬가지로 본 연구에서 제안하는 기법을 적용한 경우가 보다 양호한 외란억제성능과 추종성능을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 다수의 시스템이 직렬구조로 연결되어 있을 경우에 발생하는 문제를 다루고 있다. 로봇과 같이 암이 서로 연결되어 있을 경우, 각 암의 운동은 간섭외란으로 작용하여 다른 암의 운동에 영향을 미치게 된다. 결과적으로 국부적뿐만 아니라 시스템 전체의 운동제어성능을 떨어뜨리게 된다. 그래서 본 연구에서는 직렬연결구조의 운동제어시스템에서

1) 간섭외란을 억제하기 위한 보상기 설계방법에 대해 고찰하였다. 즉, 간섭외란보상기를 설계할 경우, 기존연구에서 나타나는 추종성능이 악화되는 문제점을 해결할 수 있는 새로운 기법을 제안하였다.

2) 외란보상기로부터 만들어지는 제어력은 또 다른 외부입력이므로, 이를 포함한 불확실성에 강인하게 대처할 수 있는 서보계를 H_∞ 제어기법으로 설계하였다.

결론적으로 서보계로서의 기본적인 기능을 충분히 발휘할 수 있는 외란보상기 설계법을 제안하였고, 시뮬레이션을 통해 제안하는 기법의 유효성을 확인하였다.

Author contributions

H. Kim; Formal analysis and Writing-review. C. Soumayya; Formal analysis & editing. D. Lee and H. Park ; Validation. Y. B. Kim; Project administration and Supervision.

References

1. D. Dac and Y. Kim, 2015, "Accurate Motion Generation Technique with Robust Control Approach", Science and Technology Development, Vol. 18, No. K6-2015, pp. 183-191. (<https://doi.org/10.32508/stdj.v18i3.900>)
2. M. Tran, K. Han and Y. Kim, 2017, "Robot Motion Regeneration based on Independent Arm Control System Design Method", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 21, No. 1, pp. 30-36. (<https://doi.org/10.9726/kspse.2017.21.1.030>)
3. M. Tran, E. Choi and Y. Kim, 2017, "A Study on Response Time Delay and Tracking Error Suppression Strategy in Gear Mechanism: Control System Design Approach", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 21, No. 4, pp. 77-83. (<https://doi.org/10.9726/kspse.2017.21.4.077>)
4. C. H. Kang, B. S. Lee, H. C. Kang and M. H. Kang, 2012, "Current Status of EOTS for Fighter and Its Technical Trends", Proceedings of KSAS Conference, pp. 693-698.
5. J. B. Lim, S. S. Kim and J. Yu, 2013, "Maneuverability Improvement of EOTS by Driving the Outer Gimbal First", Journal of Control, Robotics and Systems, Vol. 19, No. 10, pp. 873-878. (<https://doi.org/10.5302/j.icros.2013.13.1914>)
6. J. H. Back, T. S. Yang, S. H. Kim and Y. K. Kwak, 2002, "A Study on the Bandwidth of Gear Reduction Servo System according to Backlash and Motor Supplied Voltage", Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 19, No. 6, pp. 119-127.
7. M. J. Kim, D. W. Shin, K. Y. Kim and J. S. Kim, 2002, "Designs of Line-of-Sight Stabilization Control Systems Using Disturbance Observer and Sliding Mode Observer",

- Proceedings of KSME Annual Conference, pp. 126-131.
8. 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.
(<http://dx.doi.org/DOI:10.9726/kspse.2019.23.3.065>)
 9. C. Soumayya, J. H. Suh, S. W. Ji and Y. B. Kim, 2020, "A Composite Control Design for Suppressing Mutual Interference of Interconnected Systems", Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 34, No. 2, pp. 867-875.
(<https://doi.org/10.1007/s12206-020-0135-1>)
 10. C. I. Park, 2010, "Nonlinear Dynamic Analysis of Helical Gears with Backlash by Torque Fluctuation", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 20, No. 7, pp. 677-684.
(<https://doi.org/10.5050/ksnve.2010.20.7.677>)
 11. Y. S. Choi, B. H. Lee and Y. H. Sin, 1997, "Nonlinear Dynamic Analysis of Gear Driving System due to Transmission Error and Backlash", Transactions of the Korean Society of the Automative Engineers, Vol. 5, No. 1, pp. 69-78.
 12. S. J. Kim, D. H. Moon and Y. B. Kim, 2013, "Synchronized Control of Active Harmonic Gear System", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 18, No. 2, pp. 64-68.
(<https://doi.org/10.9726/kspse.2014.18.1.112>)
 13. B. Han, S. Zheng, Z. Wang and Y. Le, 2015, "Design, Modeling, Fabrication and Test of a Large-Scale Single-Gimbal Magnetically Suspended Control Moment Gyro", IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol. 62, No. 12, pp. 7424-7435.
(<https://doi.org/10.1109/tie.2015.2459052>)
 14. H. Li, X. Ning and B. Han, 2017, "Composite Decoupling Control of Gimbal Servo System in Double-Gimbaled Variable Speed CMG Via Disturbance Observer", IEEE/ASME Transaction on Mechatronics, Vol. 22, No. 1, pp. 312-320.
(<https://doi.org/10.1109/tmech.2016.2601340>)
 15. H. Li, S. Zheng and X. Ning, 2017, "Precise Control for Gimbal System of Double Gimbal Control Moment Gyro Based on Cascade Extended State Observer", IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol. 64, No. 6, pp. 4653-4661.
(<https://doi.org/10.1109/tie.2017.2674585>)
 16. M. Yasuda, T. Osaka and M. Ikeda, 1996, "Feedforward Control of a Vibration Isolation System for Disturbance Suppression", Proceedings of the 35th CDC, pp. 1229-1233.
(<https://doi.org/10.1109/cdc.1996.572662>)
 17. K. Zhou and J. C. Doyle, 1998, "Essentials of Robust Control", Prentice Hall.