



Double Active 제어기법에 의한 로봇 암 운동제어계 설계에 관한 연구

Robot Arm Motion Control System Design based on Double Active Disturbance Rejection Method

수메이야 샤키르* · 서진호** · 김영복***†
 Chakir Soumayya*, Jin-Ho Suh** and Young-Bok Kim***†

(Received 09 April 2019, Revision received 13 June 2019, Accepted 14 June 2019)

Abstract: In order to decouple and reject the disturbance from multi-connected system, this paper presents a composite controller based on the disturbance compensator and state feedback control. We developed a dynamic model of a 2DOF robot system, and analyzed the system characteristics with disturbances which are made by each arm motion control. For this system, the authors propose a new decoupling method through regarding the coupling term as systems disturbance. The system disturbances were considered as known uncertainty and modelled by experiment. In this study, a disturbance compensator for rejecting the known disturbance and robust feedback controller for coping the unpredictable uncertainties are provided. We concluded from simulation results that the proposed method was effective in decoupling and disturbance compensation control of 2DOF robot system, and enhanced system disturbance rejection and motion control performance.

Key Words : Robot, Disturbance, Composite controller, Feedback control, 2DOF robot system

1. 서 론

본 논문에서는, 다자유도 시스템에서 각 자유도 간의 간섭으로 인해 시스템의 제어성능이 저하되는 문제를 다루고 있다. 대표적인 것으로 로봇이나 짐벌(gimbals)시스템을 들 수 있으며, 복수의

암이나 구조물이 결합되어 구성된다. 로봇의 경우, 로봇 암 끝단의 위치나 암 운동을 정교하게 제어하는 것이 최종목표가 된다. 여러 개의 암이 연결된 구조물이므로, 다양한 해석과 제어규칙을 통해 바람직한 제어성능을 확보할 수 있다. 다수의 로봇 암, 즉 여러 개의 구조물이 연속적으로

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

교수, 부경대학교 기계시스템공학과

E-mail : kpjiwoo@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6197.

*수메이야 샤키르(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-7668-0140)

대학원생, 부경대학교 대학원 기계시스템공학과

**서진호(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-8673-4528) : 교수,

부경대학교 기계시스템공학과

*** 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.

*Chakir Soumayya(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-7668-0140)

: Graduate student, Department of Mechanical System Engineering, the Graduate School, Pukyong National University.

**Jin-Ho Suh(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-8673-4528) :

Professor, Department of Mechanical System Engineering, Pukyong National University.

연결되어 있으므로 로봇 암 각각의 운동은 서로 간의 간섭으로 작용한다. 즉 첫 번째 로봇 암의 운동은 그 이후로 연결된 모든 암의 운동에 영향을 주게 되고, 반대로 첫 번째 로봇 암에는 관성 부하 증가라는 부담이 생긴다. 즉 하나의 강제구조가 아니므로 각각의 운동이 상호간에 영향을 미치게 된다.

로봇공학적 관점에서는 전체시스템 운동방정식을 구하고, 이를 기반으로 운동제어를 위한 제어 시스템을 설계함으로써 위에서 거론한 문제는 해결할 수 있다. 이를 위해서는 구조적인 관점에서부터 문제해결을 시도하거나, 강력한 운동제어력을 가지도록 하드웨어를 구성해야 한다. 즉 로봇다이나믹스를 하나의 방정식으로 표현하고, 이를 기반으로 제어계를 설계하는 경우가 일반적이다.

그러나 현장에서 로봇을 운용하는 측면에서는 위와 같이 설계된 시스템의 수정보환 작업은 상당히 번거롭고 어렵다. 즉 작업지시나 작업스케줄 변경이 어려워 반드시 전문가의 도움이 필요하고, 운전준비에 상당한 시간과 노력이 요구된다. 이러한 불편함을 해소하기 위한 방법으로는 로봇전체에 대한 하나의 운동방정식기반 제어기법이 아니라, 로봇 암 하나 하나를 독립된 제어대상으로 간주하고 제어기를 각각 설계하는 방법이 있다^{1,3)}.

이럴 경우, 위에서 문제점으로 거론한 잦은 작업스케줄 변경에도 신속하게 대응하고, 전문가가 아니라도 일련의 작업과정을 수월하게 수행할 수 있게 된다. Chi 등의 연구결과^{1,3)}에서 제어성능 확보를 위한 가장 중요한 사항은, 앞서 언급한 것과 같이, 각각의 로봇 암 운동으로 발생하는 상호간 간섭현상을 억제하는 방법을 제안한 것이다. 간섭현상을 억제하기 위한 방법으로, 상호간섭 작용을 불확실성 혹은 외란으로 간주하고 이를 억제하기 위해 강인제어기법을 도입하였다.

이와 유사한 제어대상 및 제어기법을 적용한 사례는 짐벌시스템의 운동제어연구 사례에서 찾아 볼 수 있다^{4,7)}. 짐벌시스템도, 로봇과 유사하게 2자유도 혹은 그 이상의 자유도를 가지는 구조이다. 일반적으로는 광학시스템 등이 장착되어 실시간 감시용으로 활용되는데, 설치장소 등 환경에

따라 제어해야 할 자유도가 달라진다. 예를 들어, 선박이나 항공기에 탑재하여 운용해야 할 경우에는 6자유도 운동에 대응한 모션제어기술이 적용된다. 이러한 경우에도, 각각의 운동이 상호간의 간섭으로 작용하므로, 간섭작용을 억제함으로써 제어성능을 개선하고자 하는 연구결과도 많이 제안되었다.

관련한 기존연구에서는, 강인제어기법으로 불확실한 외란을 억제하거나, 외란관측기를 이용하여 외란을 추정하여 상쇄하고자 하는 방법이 대부분이다⁸⁻¹⁰⁾. 그러나 제어이론적 관점에서 외란은 불확실한 외부입력이고, 추정 또는 예측이 불가능한 것으로 간주하는 것이 일반적이다. 이러한 불확실성에 대해 외란관측기(disturbance observer)나 강인제어기법으로 제어기를 설계한다 하더라도 완전히 그 영향을 억제하는 것이 불가능하다. 만일 외란이 추정가능하거나 예측가능하다면 적극적으로 외란을 억제하여 바람직한 제어성능을 확보할 수 있을 것이다.

예를 들어, 로봇모션제어문제에서, 첫 번째 로봇 암 운동은 그 끝단에 연결된 모든 로봇 암의 운동에 영향을 주게 된다. 만일 그 영향정도를 추정하여 수식적으로 표현이 가능하다면, 첫 번째 로봇암의 운동제어신호에 반영함으로써 간섭작용에 의한 제어성능저하를 억제할 수 있을 것이다.

이와 같이 본 연구에서는, 로봇 암 상호간에 미치는 영향은 추정하여 수식적으로 표현할 수 있으므로, 이것을 예측이 가능한 외란으로 가정하고, 외란억제를 위한 제어기에 직접적으로 반영한다. 그리고, 추정이 불가능한 파라미터 변동이나 예측이 어려운 외란 등에 대해서도 대응하기 위해 강인제어기법으로 제어기를 설계한다. 즉, 예측이 가능한 외란은 적극적으로 억제하고, 일반적인 불확실성에도 대응하기 위해 두 가지 제어기를 도입한다.

본 연구에서 제안하는 기법은, 기존의 독립적인 목적을 달성하기 위한 제어기법의 한계를 극복하기 위한 방법으로, 2자유도 로봇운동제어에 적용하여 그 유효성을 평가하고 검증하도록 한다.

2. 제어대상 및 문제설정

2.1 제어대상 표현 방법 및 제어 목표

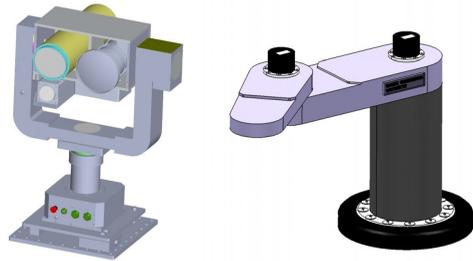
먼저 본 연구에서의 제어대상인 다자유도 운동 특성을 갖는 대표적 시스템을 Fig. 1에 정리하여 나타내었다. 서론에서 기술한 것 같이 집벌과 로봇이 주요 대상이고, 그림에서 (a)는 광학장치(카메라) 등을 내장한 물체 추적장치의 일종이다. (b)는 2자유도 로봇으로 반도체 조립공정에 활용되고 있다. (a)는 팬(pan)과 틸팅(tilting)이 기본운동이다. 즉 수평회전운동과, 상하회전운동으로 목표물을 추적한다. 육상용, 선박 및 항공기용으로 그 적용범위는 다양하고, 그에 따라 운동제어방법도 복잡하다. 아무튼 집벌시스템의 경우, 팬 및 틸팅 모션제어가 동시에 수행되므로 각각의 독립적인 운동은 서로간의 간섭운동으로 작용하고, 이것이 제어성능을 저하시키는 결과를 초래하게 된다.

이러한 현상은 로봇시스템의 경우에도 마찬가지로 각 자유도의 운동은 그것과 연결된 다른 로봇 암의 운동을 방해하게 된다.

이와 같은 현상과 문제점은 누구나 알고 있으며, 일반적으로는 전체시스템을 운동방정식으로 표현하고, 최적화 기법으로 제어계를 설계하여 그 영향 등을 최소화 하고 있다⁸⁻¹⁰⁾. 만일, 첫 번째 로봇 암의 운동이 다른 암의 운동에 미치는 영향 정도를 파악할 수 있다고 하자. 이럴 경우에는 보다 선제적이고 적극적인 방법으로 그 영향을 상쇄시킴으로써 바람직한 제어성능을 확보할 수 있을 것이다¹¹⁾.

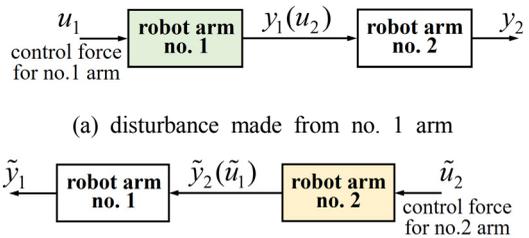
따라서 본 연구에서는 Fig. 1 (b)와 같이 두 개의 암으로 구성된 로봇 시스템의 운동제어문제를 다룬다. 그래서 상호간에 미치는 영향정도를 예측 가능한 외란으로 정의하고 전달함수 형식으로 표현한다. 이것을 이용하여, 상호작용하는 외란을 억제하는 방법을 제안한다.

먼저, Fig. 1 (b)의 2자유도 로봇시스템에서, 1번 암과 2번 암 상호간에 작용하는 외란을 추정하는 방법에 대해 기술한다. 그 과정을 Fig. 2에 나타내었다. 우선, 1번 로봇암이 2번 암에 미치는 영향정도를 추정한다. 이때 2번암에는 제어입력을 인가



(a) pedestal for vessel (b) 2DOF robot

Fig. 1 Control target systems for compensating interacted motions



(a) disturbance made from no. 1 arm

(b) disturbance made from no. 2 arm

Fig. 2 Direct disturbance modeling process

하지 않고 자유운동이 가능한 상태로 둔다.

이런 상태에서, 1번 암에 기지의 제어신호를 인가하여, 1번 및 2번 로봇 암의 운동특성(각도 및 각속도)을 확인한다. 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 운동제어로 인해 1번 암에 미치는 영향은 위와 반대로 구하면 된다. 즉, 1번 암을 자유운동이 가능한 상태로 두고 2번 암에 제어신호를 인가하여 각각의 운동특성을 파악하면 된다. 이러한 과정으로부터, 각 로봇 암 및 상호간의 간섭에 대한 모델을 다음과 같이 전달함수 형식으로 나타낼 수 있다고 한다.

$G_1(s)$: 1번 로봇 암에 대한 전달함수

$G_2(s)$: 2번 로봇 암에 대한 전달함수

$G_{2d}(s)$: 2번 로봇 암의 운동이 1번 로봇 암에 미치는 영향을 표현한 전달함수

$G_{1d}(s)$: 1번 로봇 암의 운동이 2번 로봇 암에 미치는 영향을 표현한 전달함수

이것으로부터 상대운동으로부터 발생하는 영향, 즉 기지의 외란을 억제하는 방법은 단순한 계산을 통해 구해진다. 예를 들어, 두 개의 암으로 구성된 로봇에서, 로봇 암 하나는 자유운동상태로 두고, 다른 암을 제어하는 문제를 고려하자. 이것은 아래 Fig. 3과 같이 나타난다. 여기서, 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 주는 결과를 초래한다. 이 경우, 제어계 설계 목적은 외란 y_{2d} 의 영향을 제거하거나 억제할 수 있는 외란 보상기 $\bar{G}_2(s)$ 를 설계하는 것이다. 즉, 출력 \tilde{y}_1 에 외란 \tilde{y}_{2d} 가 나타나지 않도록 하는 제어입력 u_1 을 구하면 된다. 이것은 다음과 같은 단순한 계산으로 구할 수 있다. (이때 편의상 $\tilde{u}_1 = 0$ 라 둔다.)

즉 외란이 포함된 출력은

$$\begin{aligned} \tilde{y}_1 &= y_1 + y_{2d} \\ &= G_1(s)u_1 + G_{2d}(s)y_2 \end{aligned} \quad (1)$$

이므로, 외란이 출력에 나타나지 않도록 하기 위해서는 제어입력을

$$u_1 = -G_1(s)^{-1}G_{2d}(s)y_2 \quad (2)$$

와 같이 결정하면 된다. 이때

$$\bar{G}_2(s) = -G_1(s)^{-1}G_{2d}(s) \quad (3)$$

으로 두고, $\bar{G}_2(s) \in RH_\infty$ 조건을 만족한다고 가정한다. 모델링 과정에서, 각 로봇 암 혹은 제어기를 포함한 전달함수 특성에 따라 위의 조건을 만족하도록 외란모델 $G_{id}(s) (i=1,2)$ 을 적절히 구하면 된다.

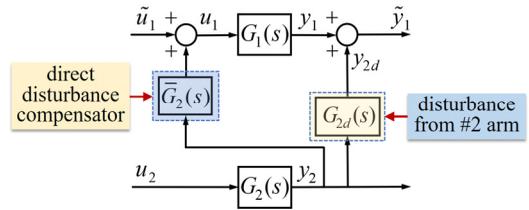


Fig. 3 Direct disturbance and its compensator

2.2 문제설정

2.1 절에 기술한 것과 같이 각 암의 운동에 따른 상호작용을 예측 가능한 외란으로 가정하면, 수식적으로는 얼마든지 그 영향을 상쇄시켜 바람직한 제어성을 확보할 수 있다. 이것은 제어대상 및 외란특성을 상세히 표현한 정확한 모델이 주어졌을 경우에 가능하다.

제어계 설계과정에서 필요한 모델은 동적특성을 적절하게 표현한 것이지, 완벽하지는 않다. 즉, 모델에는 다소간의 오차 등 불확실성이 포함되어 있으며, 다양한 형태로 예측 불가능한 외란이 시스템으로 유입된다. 결국 식 (1)~(3)으로 표현한 관계는 이상적인 경우이므로, 실제 시스템에 적용할 경우에는 시뮬레이션과 같은 결과를 얻을 수 없다.

따라서 명확하게 파악할 수 없는 다양한 형태의 불확실성을 고려한 제어계 설계방법을 고려해야 한다. 따라서 본 연구에서는, 로봇 암 상호간에 작용하는 예측 가능한 외란을 억제할 뿐만 아니라 일반적으로 예측이 불가능하다는 외란 및 파라미터 변동에 강인하게 대응할 수 있는 제어계를 설계하도록 한다.

3. 제어계 설계

3.1 제어대상과 외란모델 및 외란억제 방법

앞서 기술한 것과 같이 본 연구에서의 제어대상은 2자유도 로봇 시스템이다. 제어대상 실험장치는 Fig. 4의 사진에 나타내었으며, 두 개의 암이 연결되어 평면운동을 하도록 구성되어 있다¹²⁻¹⁴⁾.

각 로봇 암의 운동특성 및 외란에 대한 전달함수는 Fig. 2에 소개한 방법으로 실험과 시뮬레이션을 통해 다음과 같이 구하였다.

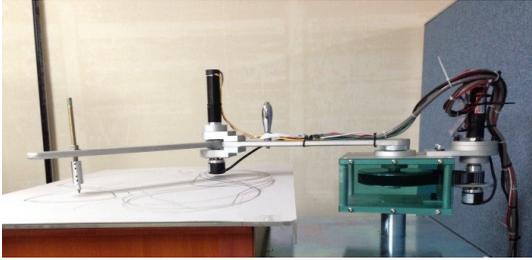


Fig. 4 2DOF robot system for experiment¹²⁾

$$G_1(s) = \frac{-(0.0161s + 161)}{s^2 + 4.102s + 0.0057} \quad (4)$$

$$G_2(s) = \frac{-(0.0461s + 416)}{s^2 + 6.074s + 0.0062} \quad (5)$$

$$G_{1d}(s) = \frac{0.6986s - 0.2022}{s^2 + 0.4819s + 0.1594} \quad (6)$$

$$G_{2d}(s) = \frac{-0.00062s + 0.00058}{s^2 + 0.3512s + 0.0080} \quad (7)$$

이것으로부터, 식 (3)에 나타난 보상기, 즉 로봇 암의 운동으로 상호 간섭 외란의 영향을 상쇄시키기 위한 보상기는 다음과 같이 각각 계산된다.

$$\bar{G}_1(s) = \frac{-0.0062s^3 - 0.0197s^2 + 0.0238s + 0.0003}{0.0161s^3 + 161s^2 + 56.54s + 1.295} \quad (8)$$

$$\bar{G}_2(s) = \frac{-0.6986s^3 + 4.0441s^2 - 1.224s - 0.00123}{0.0416s^3 + 416s^2 + 200.5s + 66.31} \quad (9)$$

3.2 외란억제 방법에 대한 평가

3.1 절에 소개한 외란억제 방법은, 외란이 예측 가능한 경우에 유효하다. 이러한 경우는 이상적인 경우, 즉 제어대상 및 외란의 동적특성이 정확하게 표현가능하다는 전제가 따른다.

일반적인 상황을 고려하면, 정확한 모델링은 불가능하므로, 불확실성이 포함된다는 사실을 고려해야 한다. 따라서 Fig. 5와 같이 외란보상기 출력 및 시스템 출력측으로 인가되는 예측 가능한 외란과 함께 다양한 형태의 불확실성이 시스템에 존재한다고 가정한다.

따라서 Fig. 3과 같은 단순한 구조의 외란보상기 만으로는 Fig. 5와 같은 일반적인 상황에 대응이 불가능하며, 결국 제어성능이 보장되지 않을 것이다. 이와 같은 문제점을 보완하기 위해서는 외란보상이 가능하면서도 시스템의 안정성 및 제어성능을 확보할 수 있는 폐루프계 구성이 필요하게 된다. Fig. 6과 같은 제어시스템이 위에 거론한 문제를 해결할 수 있는 후보가 될 것이다. 그림으로부터 알 수 있듯이, 일반적인 폐루프계에 예측 가능한 외란 보상기 $\bar{G}_i(s)$ ($\in RH_\infty, i=1,2$)가 결합된 구조이다.

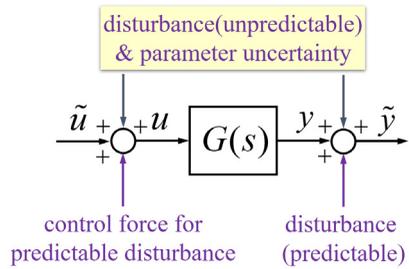


Fig. 5 A control system configuration with uncertainties

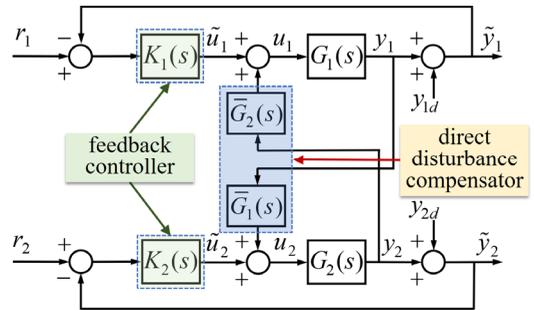


Fig. 6 A control system configuration with feedback controller for coping with uncertainties, and disturbance compensator

3.3 피드백제어기 설계

Fig. 6에서, 피드백 제어기 $K_1(s), K_2(s)$ 는 강인제어기법으로 설계한다. 궁극적인 목적은 제어대상이나 외란모델에 반영되지 않은 불확실성에

대응하기 위해서이다. 잘 알려져 있는 것과 같이, 강인제어기법, 특히 H_∞ 제어기 설계법에 따르면, 다양한 방법으로 파라미터 변동이나 외란의 영향을 반영한다.

본 연구에서도 이와 같은 방법에 따라, 제어대상을 기준으로 입력과 출력측에 외란이 유입된다고 가정한다. 그 이유는 로봇 암 운동에 따른 영향이 제어대상의 출력측으로 유입되고, 외란억제를 위한 보상기 출력은 시스템 입력측에 인가되기 때문이다. 그 외 파악하기 어려운 불확실성도 위와 같은 통로로 유입된다고 가정한다.

그러면 H_∞ 제어기 설계법에 기반한 제어계는 Fig. 7과 같이 나타낼 수 있게 된다¹⁵⁾.

이때, $G_i(s)$ 는 제어대상, $K_i(s)$ 는 설계해야 할 제어기이다. $W_{Ti}(s)$ 와 $W_{Si}(s)$ 는 제어기 설계시 반영하는 중량함수(weighting functions)이다. 특히, $W_{Ti}(s)$ 에는 외란보상기의 특성이, $W_{Si}(s)$ 에는 제어기 출력측으로 유입되는 외란특성이 반영되도록 적절히 선정한다. 단 제어기는 각 로봇 암에 대해 독립적으로 설계한다.

결국 Fig. 7에 나타난 제어계 설계목표는 외부 입력이 시스템출력에 미치는 영향을 최소화하고, 동시에 제어계를 안정화시키는 제어기 $K_i(s)$ 를 구하는 것으로 정리된다. 즉 다음의 놈 조건을 만족하는 제어기를 설계하는 것이다.

$$\| T_{zwi} \|_\infty < \gamma (> 0), i = 1, 2. \quad (10)$$

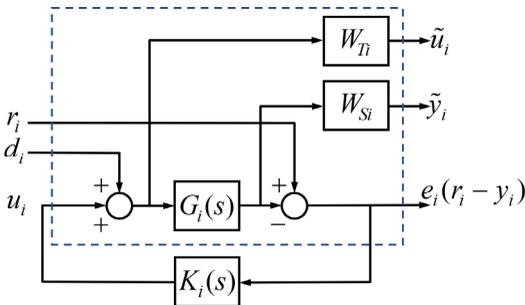


Fig. 7 A robust control system with multiplicative uncertainties

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. 이때 출력 z_i 에는 제어입력 및 오차항(e_i)이 포함되어 있다. 식 (10)의 표현에는, 가능한 작은 제어력으로 외란의 영향을 억제해야 할 뿐만 아니라, 목표값과 출력간의 오차 또한 최소화하겠다는 목표가 포함되어 있다.

이것을 기초로 설계한 제어기는 식 (11) 및 식 (12)와 같다. 여기서 $K_1(s)$ 는 첫 번째 로봇 암 제어기, $K_2(s)$ 는 두 번째 로봇 암 운동제어기이다.

$$K_1(s) = \frac{N_{k1}(s)}{D_{k1}(s)} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} N_{k1}(s) &= -0.0001s^6 - 0.2837s^5 - 2.4846s^4 \\ &\quad - 1.6446s^3 - 0.3202s^2 - 0.0130s - 0.0001 \\ D_{k1}(s) &= 0.0001s^7 + 0.0002s^6 + 0.8790s^5 + 63.9840s^4 \\ &\quad + 44.6530s^3 + 8.8180s^2 + 0.3480s + 0.0040 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} N_{k2}(s) &= -0001s^6 - 0.0143s^5 - 0.2608s^4 - 1.2191s^3 \\ &\quad - 3.3655s^2 - 1.0514s - 0.0237 \\ D_{k2}(s) &= 0.0001s^7 + 0.0003s^6 + 0.0571s^5 + 0.5071s^4 \\ &\quad + 25.6290s^3 + 84.9991s^2 + 27.0871s + 0.6130 \end{aligned}$$

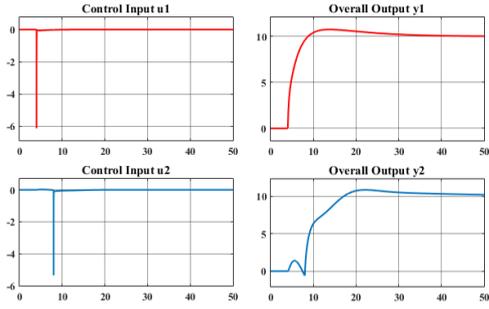
그리고 각각의 제어기를 계산할 때 선정된 중량함수는 아래 식 (13)~(16)과 같다. 이것은 입력측과 출력측 외란 및 그 외 불확실성을 고려하여 선정하였다.

$$W_{T1}(s) = \frac{0.004s^3 - 3.4832s^2 - 1.2231s - 0.0278}{0.0001s^3 + 1.0s^2 + 0.3512s + 0.0080} \quad (13)$$

$$W_{S1}(s) = \frac{50.0s^2 + 17.5538s + 0.4058}{1.0s^2 + 0.3512s + 0.0080} \quad (14)$$

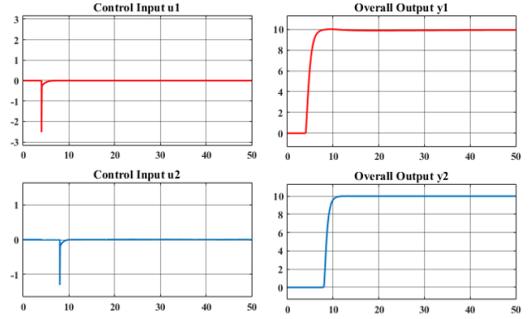
$$W_{T2}(s) = \frac{-0.0008s^3 - 7.3532s^2 - 2.5822s - 0.0588}{0.0001s^3 + 1.0s^2 + 0.3512s + 0.0080} \quad (15)$$

$$W_{S2}(s) = \frac{50.0s^2 + 241.6486s + 794.9780}{1.0s^2 + 4.8190s + 15.9400} \quad (16)$$



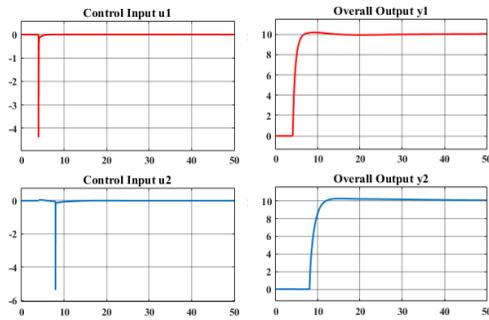
(a) control inputs[V] (b) controlled output[deg]

Fig. 8 Step responses with **PID** control, and without compensation for direct disturbance ($\bar{G}_i (i = 1,2) = 0$)



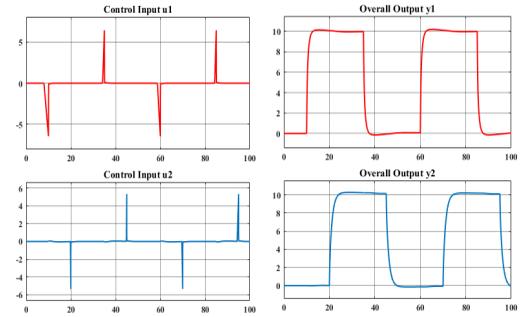
(a) control inputs[V] (b) controlled output[deg]

Fig. 11 Step responses with H_∞ control and direct disturbance compensation ($\bar{G}_i (i = 1,2) \neq 0$)



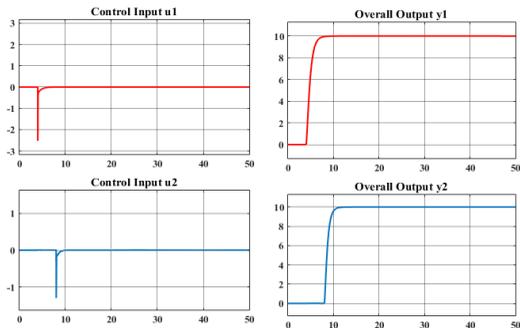
(a) control inputs[V] (b) controlled output[deg]

Fig. 9 Step responses with **PID** control and compensation for direct disturbance ($\bar{G}_i (i = 1,2) \neq 0$)



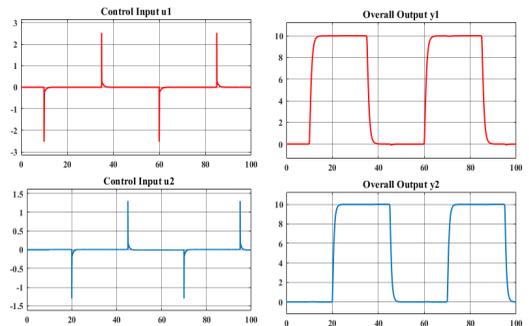
(a) control inputs[V] (b) controlled output[deg]

Fig. 12 Responses for pulse type reference with **PID** control, and direct disturbance compensation ($\bar{G}_i (i = 1,2) \neq 0$)



(a) control inputs[V] (b) controlled output[deg]

Fig. 10 Step responses with H_∞ control, and without direct disturbance compensation ($\bar{G}_i (i = 1,2) = 0$)



(a) control inputs[V] (b) controlled output[deg]

Fig. 13 Responses for pulse type reference with H_∞ control and direct disturbance compensation ($\bar{G}_i (i = 1,2) \neq 0$)

4. 시뮬레이션 평가

3장에서 제안한 제어기 설계방법에 따라 설계한 식 (11) 및 (12)의 제어기를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다.

제안하는 제어기법의 비교평가를 위해 PID제어기법을 적용한 경우의 시뮬레이션 결과에 대해서도 소개한다. 이때 첫 번째 및 두 번째 로봇 암의 PID 제어기 이득은 각각 다음 식과 같다.

$$K_{P1} = 0.033, K_{I1} = 0.0013, K_{D1} = 0.0113 \quad (17)$$

$$K_{P2} = 0.0182, K_{I2} = 0.0005, K_{D2} = 0.0104 \quad (18)$$

먼저, Fig. 4에서, 오른쪽 회전중심축을 기준으로 회전축에 연결된 암을 첫 번째, 좌측에 연결된 암을 두 번째 암이라 한다. 이것을 참고로 하여, 각 암의 운동제어를 통해 상호간의 간섭현상에 대한 외란억제성능을 평가하도록 한다.

먼저, Fig. 8-Fig. 9는 식 (17) 및 식 (18)의 PID 제어기를 적용한 경우를 나타낸다. 본 시뮬레이션에서, 끝단인 두 번째 암은 초기상태를 유지하도록 하고, 첫 번째 암은 일정각도로 회전하도록 계단상의 목표값을 인가한 경우이다. 즉, 첫 번째 암의 회전운동으로 두 번째 암이 영향을 받을 것이며, 그 영향이 가능한 나타나지 않도록 하는 것이 제어목적이다.

이때 Fig. 8은 예측 가능한 외란을 억제하기 위해 도입한 외란보상기 $\bar{G}_i (i=1,2)$ 가 동작하지 않는 경우를 나타낸다. 그림에서 (a)는 첫 번째 및 두 번째 암의 제어입력을 나타내고 있으며, (b)는 제어출력인 각 암의 회전각도를 나타내고 있다. (b)의 그림에서 알 수 있듯이, 첫 번째 암이 계단상 목표신호에 따라 운동하고 이의 영향이 두 번째 암의 운동특성에 나타나고 있음을 알 수 있다.

Fig. 9는, Fig. 8의 시뮬레이션과 유사한 조건에서 외란보상기 \bar{G}_i 가 동작하는 경우를 나타낸다. Fig. 8과 달리, 외란의 영향이 억제되어 시스템 응답특성이 상당히 개선되었음을 확인할 수 있다.

그리고, Fig. 10~Fig. 11은 본 연구에서 제안한 H_∞ 제어기를 적용한 경우를 나타내고 있다. PID 제어의 경우와 같이, Fig. 10은 외란보상기가 동작하지 않은 경우, Fig. 11은 외란보상기가 동작한 경우를 나타낸다. 각 그림에서 (a)는 제어입력, (b)는 제어출력을 나타내고 있다. PID 제어기를 적용한 경우보다 월등히 나은 제어성능을 달성할 수 있음을 확인할 수 있다. 보다 명확한 비교평가를 위해, 펄스형의 목표신호를 인가한 경우의 시뮬레이션 결과를 Fig. 12 (PID 제어) 및 Fig. 13 (H_∞ 제어)에 나타낸다. 이때 외란보상기는 모두 동작한다. 이전 시뮬레이션과 같이, (a)는 제어입력, (b)는 제어출력을 각각 나타내고 있다. 연속적으로 변하는 목표신호가 인가될 때, 각각의 제어기법에 대한 제어성능을 보다 쉽게 평가할 수 있다. 전술한 것과 같이 H_∞ 제어기법의 경우가 보다 양호한 외란억제성능 및 추종성능을 나타내고 있다.

5. 결 론

본 연구에서는, 다자유도 시스템의 운동제어성능을 개선하기 위한 새로운 제어기 설계법을 제안하였다. 로봇시스템은 대표적인 다자유도 시스템의 하나로, 여러 개의 암이 연결되어, 각 암의 운동은 다른 암의 운동을 방해하는 요인이 되기도 한다. 결국 제어성능을 떨어뜨리는 외란의 범주에 포함되나, 경우에 따라서는 예측이 가능하여 적극적인 대응전략으로 그 영향을 억제할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 외란이 유입되는 시점에서 적극적으로 이것을 상쇄시키는 방법을 도입하였다. 아울러, 예측이 불가능하거나, 파라미터 변동 등의 일반적인 불확실성에도 대응하여 바람직한 제어성능을 확보하기 위해 강인제어기법에 따라 피드백제어도 설계하였다. 결국 본 논문에서 제안한 제어기는, 예측 가능한 외란에 대한 외란보상기와 일반적인 불확실성에 대응하기 위한 강인제어기가 병합된 구조이다. 즉 각각의 제어기를 독립적으로 적용한 경우의 한계점을 충분히 극복하여 양호한 외란억제 및 제어성능을 달성할 수 있음을 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

후 기

This research was a part of the project titled 'Development of the ICT convergence smart sliding docking system', funded by the Ministry of SMEs and Startups, Korea.

Author contributions

S. Chakir; Formal analysis and Writing-review & editing. J. H. Suh; 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. (DOI: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. (DOI: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. (DOI: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. (DOI: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. 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. (DOI:10.5050/ksnve.2010.20.7.677)
9. 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 Automotive Engineers, Vol. 5, No. 1, pp. 69-78.
10. 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. (DOI:10.9726/kspse.2014.18.1.112)
11. 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. (DOI:10.1109/tie.2015.2459052)
12. 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. (DOI:10.1109/tmech.2016.2601340)
13. 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. (DOI:10.1109/tie.2017.2674585)
14. M. Yaosuda, T. Osaka and M. Ikeda, 1996, "Feedforward Control of a Vibration Isolation System for Disturbance Suppression", Proceedings of the 35th CDC, pp. 1229-1233. (DOI:10.1109/cdc.1996.572662)
15. K. Zhou and J. C. Doyle, 1998, "Essentials of Robust Control", Prentice Hall.