

잔여외란을 고려한 외란관측기 기반 고자유도 로봇의 강인 임피던스제어

Robust Impedance Control of High-DOF Robot Based on Disturbance Observer Considering Residual Disturbance

김준혁¹·박승규²·윤태성[†]

Junhyuk Kim¹, Seungkyu Park², Taesung Yoon[†]

Abstract: This paper presents a robust impedance control of high-DOF robot based on disturbance observer(DOB). A novel DOB is derived by considering the residual disturbance caused by the difference between actual disturbance and disturbance decoupling input which utilizes the estimated disturbance. It focuses on the elimination of the residual disturbance and improvement of the control performance as well as the good estimation of disturbances. In the control of high-DOF robot, numerical dynamic model, which is conducted by a software based on dynamics, is utilized because the analytical model of high-DOF robot is difficult to be obtained. The simulation of high-DOF robot with numerical dynamic model is provided to verify the performance of the proposed controller.

Keywords: Disturbance Observer, High-DOF Robot, Impedance Control, Residual Disturbance

1. 서 론

산업용 로봇 등과 같이 자유도가 낮은 로봇의 제어에는 역기구학을 이용하여 원하는 동작에 해당하는 각 관절의 움직임을 계산하여 제어하는 독립 관절 제어를 사용하고 있다. 이에 반해 휴머노이드와 같은 고자유도 로봇의 제어에 있어서는 역기구학을 적용하기가 어렵기 때문에 로봇의 동특성을 이용한 모델기반제어를 사용해야만 한다^{1,2}. 그러나 고자유도 로봇의 동특성 모델을 해석적으로 확보하는 것은 불가능하기 때문에 동역학에 기반을 둔 프로그램에 의해 제공되는 수치해석적 모델을 사용한다. 수치해석적 모델은 매 샘플링주기마다 동특성모델의 파라미터가 제공되며 제어기를 구하는 과정은 해석적인 모델을 사용하는 경우와 같다.

로봇의 제어에 있어서 성능을 저하시키는 주 원인은 외란

및 모델링 불확실성이며 이를 해결하기 위하여 다양한 강인제어 기법들이 연구되어 왔다. 대표적인 강인제어 방법으로는 외란관측기(DOB: Disturbance observer) 기반 제어³⁻⁶, 슬라이딩모드제어^{7,8}, H_{∞} 제어 등이 있다⁹⁻¹¹.

이들 가운데서 DOB 기반 제어는 외란을 추정하여 외란을 제거하는 단순한 원리를 사용하기 때문에 어떤 종류의 제어기와도 같이 사용되어 강인성을 향상시킬 수 있다는 장점을 가지고 있으며 많은 연구 결과들이 존재한다. DOB 설계에는 계통의 역전달함수를 사용하는 주파수 영역설계방법¹²⁻¹⁵과 계통의 상태방정식을 사용하는 상태공간 설계 방법들이 있다^{16,17}. 상태공간 설계방법 중에서는 보조변수를 활용한 DOB가 그 구조의 단순함으로 인하여 가장 일반적으로 사용되고 있다^{18,19}.

DOB 기반 제어에서는 DOB에 의해서 추정된 추정외란을 사용하여 실제외란을 상쇄하는데 추정된 외란과 실제외란과의 차이 때문에 미처 상쇄되지 못한 외란을 잔여외란(residual disturbance)라고 한다. 기존의 DOB 들은 외란 추정과정에 있어서 이 잔여외란을 고려하고 있지 않기 때문에 DOB 기반 제어가 실제로는 점근적 안정도를 보장함에도 불구하고 해석상으로는 유계 안정도만을 확인할 수 있을 뿐이다.

이에 본 논문에서는 외란을 추정하는 과정에서 DOB 기반 제어에 있어 발생하는 잔여외란을 고려하여, 보조외란을 사용

Received : Dec. 2. 2020; Revised : Dec. 26. 2020; Accepted : Jan. 11. 2021

※ This work was supported by research funds from Changwon National University in 2019~2020

1. Researcher, Electrical Engineering, Changwon National University, Changwon, Korea (jhkim@changwon.ac.kr)

2. Professor, Electrical Engineering, Changwon National University, Changwon, Korea (skpark@changwon.ac.kr)

† Professor, Corresponding author: Electrical Engineering, Changwon National University, Changwon, Korea (tsyoon@changwon.ac.kr)

하는 상태공간 DOB의 외란 추정능력과 DOB 기반제어시스템의 제어성능을 향상시키고자 한다. 먼저 리아프노프 안정도를 적용함에 있어 DOB의 추정 오차와 DOB 기반 제어시스템의 상태를 동시에 다룸으로써 점근적 안정도 해석과 제어 성능 향상이 가능하도록 하는 새로운 DOB를 제안한다. 그런 후 새로운 DOB를 임피던스 제어기와 함께 사용하여 고자유도 로봇의 강인한 임피던스 제어 시스템을 구성한다. 임피던스 제어는 로봇의 위치, 속도와 힘의 관계를 원하는 동특성으로 만들어 줄 수 있는 제어기로 본 논문에서는 미분 이득과 비례 이득을 사용하는 PD형 임피던스 제어기를 사용한다^{20,21}.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 2장에서는 문제설정을 다루고, 제 3장에서는 새로운 DOB와 DOB 기반 임피던스 제어에 대해 기술하며, 제 4장에서는 시뮬레이션 및 그 결과를 기술한다. 제 5장에서는 결론을 기술한다.

2. 문제 설정

관절공간에서 로봇의 동특성은 식 (1)과 같이 표현된다.

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

여기서 q 는 n 차 관절변수, $M(q)$ 는 $n \times n$ 관성행렬, $C(q, \dot{q})$ 는 $n \times n$ 코리올리힘과 원심력행렬, $G(q)$ 는 $n \times 1$ 중력행렬, τ 는 $n \times 1$ 입력 토크이며, d 는 $n \times 1$ 미지의 입력외란이다.

위 관절공간에서의 동특성은 자코비안 행렬을 이용하여 식 (2)와 같은 작업공간에서의 동특성으로 변환될 수 있다.

$$p(x)\ddot{x} + \mu(x, \dot{x})\dot{x} + g(x) = F + d_x \quad (2)$$

여기서 $p(x)$ 는 $m \times m$ 작업공간 관성행렬, $\mu(x, \dot{x})$ 는 $m \times m$ 작업공간에서의 코리올리힘과 원심력행렬, $g(x)$ 는 $m \times 1$ 입력 힘이고, d_x 는 $n \times 1$ 작업공간에서의 미지의 입력외란이다.

작업공간에서 구해진 제어입력으로부터 각 관절에 인가되는 토크 입력은 식 (3)에 의해 구해진다.

$$\tau = J^T F \quad (3)$$

본 논문에서의 제어기는 다음 식과 같은 PD형 임피던스 제어를 기반으로 하며 제어목적은 상태가 원하는 과도응답 특성과 최종 목표 값으로 가도록 하는 것이다.

$$F = p(x)(-K_p(x - x_d) - K_d(\dot{x} - \dot{x}_d)) + \mu(x, \dot{x})\dot{x} + g(x) \quad (4)$$

여기서 x_d 는 말단 장치의 원하는 위치이고 $\dot{x}_d = 0$ 라고 가정한다.

식 (4)를 식 (2)에 대입하면 식 (5)와 같이 결과를 얻을 수 있다.

$$p(x)(\ddot{e} + K_d\dot{e} + K_p e) = d_x \quad (5)$$

그러므로 오차는 식 (6)과 같은 동특성을 갖는다.

$$\ddot{e} + K_d\dot{e} + K_p e = d_{px} \quad (6)$$

여기서 $d_{px} = p^{-1}(x)d_x$ 이다.

식 (6)의 오차 동특성으로부터 외란을 고려하지 않은 임피던스 제어를 사용하는 경우, 오차가 영으로 수렴할 수 없음을 알 수 있다. 이에 외란의 영향을 제거하여 오차를 영으로 수렴하도록 함으로써 제어목적을 달성한다.

3. DOB 기반 제어기 설계

본 장에서는 기존 DOB의 약점을 보완한 새로운 DOB를 제안하여 DOB 기반 임피던스 제어기를 설계하고자 한다.

3.1 기존의 DOB 기반 제어

본 논문에서는 기존의 상태공간 DOB 중에서 가장 일반적으로 사용되는 보조 상태를 사용한 DOB(이하 기존 DOB)의 성능을 향상시켜 DOB 기반 제어에 사용하고자 한다.

식 (7)로 표현되는 계통을 고려해 보자.

$$\dot{x} = Ax + B(u + d) \quad (7)$$

기존의 DOB는 식 (8)과 같다.

$$\hat{d} = z - Lx \quad (8)$$

여기서 \hat{d} 은 외란 추정값, L 은 관측기 이득이며 보조신호 z 는 식 (9)와 같은 동특성에 의해 결정된다.

$$\dot{z} = L(Ax + Bu - B\hat{d}) \quad (9)$$

식 (8)을 미분하면 DOB에 의해 외란이 추정되는 원리를 파악할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{d}} &= L(Ax + B(u + \hat{d})) - L(Ax + B(u + d)) \\ &= LB(\hat{d} - d) \end{aligned} \quad (10)$$

식 (10)에서 평형 상태는 $\hat{d} = d$ 이며 LB 의 고유치가 안정하다면 평형 상태로 도달할 수 있게 되어 외란의 추정치가 외란과 같게 됨을 알 수 있다.

위와 같은 기존의 DOB는 DOB 기반 제어에서 발생하는 잔여외란, 즉 실제외란과 추정된 외란과의 차이를 전혀 고려하지 않고 있으며 외란을 추정하는 것에만 초점을 맞추고 있다.

DOB 기반 제어는 외란 추정이 정확하게 이루어져 외란제거가 완전히 된다는 가정 하에 제어 시스템을 구성하고 있으나 실제로는 잔여외란이 존재하기 때문에 안정도 해석에서 점근적 안정도를 증명하지 못하고 있다. 다음에서 이를 살펴

기로 한다. 상태 피드백 입력 $u = -Kx$ 가 적용되어 계통이 안정화 되었다고 할 때, 외란 제거 입력이 인가된 경우의 폐루프 계통은 식 (11)과 같다.

$$\begin{aligned}\dot{x} &= (A - BK)x + Be_{res} \\ &= A_K x + Be_{res}\end{aligned}\quad (11)$$

여기서 $e_{res} = d - \hat{d}$ 이며 잔여외란이라고 부르기로 한다. 기존의 DOB 기반 제어에서 리아프노프 후보함수는 식 (12)와 같다.

$$V = \frac{1}{2} x^T P x \quad (12)$$

여기서 P 는 양정치 행렬이다. 위의 리아프노프 후보함수는 계통의 상태만을 포함하고 있다. 식 (11)에 미분을 취하면 식 (13)처럼 결과를 얻을 수 있다.

$$\dot{V} \leq -(\min(\text{eig}(Q)) - 1) \|x\|^2 + PB \|e_{res}\|^2 \quad (13)$$

여기서 $A^T P + PA = -Q$ 이며 계통이 안정하기 때문에 양정치 행렬 Q 가 존재하며 $\min(\text{eig}(Q))$ 는 가장 작은 고유치이다. 위 식은 리아프노프 후보함수의 미분이 식 (14)와 같은 집합 밖에서 0보다 작은 값을 보여주고 있다.

$$\Omega = x(t) \in R^n: \|x\|^2 \leq \frac{1}{l} \|PB e_{res}\|^2 \quad (14)$$

여기서 $l < \min(\text{eig}(Q)) - 1$ 이다.

외란 추정에 문제가 없다면 추정 오차가 영으로 되어 최종적으로 리아프노프 후보함수의 미분값 \dot{V} 이 영보다 작게 될 수 있지만 식 (13)에서 추정 오차가 큰 경우에는 영보다 큰 순간이 존재하는 경우가 생길 수 있음을 알 수 있다. 본 논문에서는 모든 시간에 대해 \dot{V} 이 영보다 작도록 하는 새로운 DOB를 제안한다.

3.2 새로운 DOB 기반 제어

본 논문에서는 다음의 정리를 통해 DOB 기반 제어에서 발생하는 잔여외란을 고려한 새로운 DOB를 제안한다.

정리 1: 식 (11)의 계통에 대해 식 (15)와 같은 DOB를 사용하는 DOB 기반 제어는 점근적 안정도를 보장한다.

$$\hat{d} = z - Lx \quad (15)$$

여기서 \hat{d} 은 외란추정값, L 은 관측기 이득이며 z 는 식 (16)을 만족하는 동특성에 의해서 결정된다.

$$\dot{z} = L(A_K x + B(-\hat{d}) + x^T P B) \quad (16)$$

증명: 식 (15)를 미분하면 식 (17)과 같은 추정오차에 대한 동특성을 얻을 수 있다.

$$\dot{e}_{est} = LBe_{est} + x^T P B \quad (17)$$

여기서 추정오차 $e_{est} = \hat{d} - d$ 이고 LB 의 고유치는 안정해야 한다. 참고로 식 (11)의 잔여외란과 비교해보면 $e_{est} = -e_{res}$ 임을 확인할 수 있다.

리아프노프 후보함수를 식 (18)과 같이 계통의 상태와 추정 오차를 동시에 포함하도록 선정한다.

$$V(t) = x^T P x + e_{est}^2 \quad (18)$$

식 (18)을 미분하면 식 (19)와 같다.

$$\begin{aligned}\dot{V}(t) &= x^T (A_K^T P + P A_K) x + x^T P B e_{res} + e_{est} \dot{e}_{est} \\ &\leq x^T P B e_{res} + e_{est} (L B e_{est} + x^T P B) \\ &= L B e_{est}^2 \leq 0\end{aligned}\quad (19)$$

식 (19)에서 $x^T (A_K^T P + P A_K) x \leq 0$ 이고, $e_{res} = -e_{est}$ 이기 때문에 부등식과 등식들이 성립한다. 위 식으로부터 x 와 e_{est} 의 값이 영이 아닌 경우에는 리아프노프 후보함수의 미분값이 영보다 작기 때문에 $V(t)$ 가 영으로 수렴하며 결과적으로 x 와 e_{est} 가 점근적으로 영에 수렴한다.

기존의 DOB의 보조변수 상태방정식 (9)와 제안된 DOB의 보조변수 상태방정식 (16)을 비교해보면 제안된 DOB는 추가의 $x^T P B$ 항을 포함하고 있어서 식 (19)의 안정도 해석에서 잔여외란의 영향을 제거할 수 있게 됨으로써 점근적 안정도를 증명할 수 있게 된다. 반면에 기존의 DOB는 외란추정과 제어 시스템의 안정도 해석이 분리되어 있어 외란추정의 점근적 안정도는 증명하고 있으나 시스템의 안정도는 유계안정도로 증명되어 있다. 이와 더불어 기존의 DOB와 같은 관측기 이득 L 을 사용하여 \dot{V} 의 값을 더 큰 음의 값을 갖도록 함으로써 수렴 속도의 개선을 기대할 수 있다.

3.3 DOB 기반 임피던스 제어기

식 (4)로 표현되는 로봇의 임피던스제어기에 DOB의 외란 제거 입력이 추가된 제어기의 형태는 식 (20)과 같다.

$$\begin{aligned}F &= p(x) (-K_p(x - x_d) - K_d(\dot{x} - \dot{x}_d)) \\ &\quad + \mu(x, \dot{x}) \dot{x} + g(x) + u_d\end{aligned}\quad (20)$$

여기서 \hat{d}_{px} 는 d_{px} 의 추정 값이고, 외란 제거 입력은 $u_d = -\hat{d}_{px}$ 이다.

DOB 기반 임피던스 제어기가 적용된 로봇시스템의 동특성은 식 (21)과 같다.

$$\ddot{e} + K_d \dot{e} + K_p e = \dot{d}_{px} - \hat{d}_{px} \quad (21)$$

상태공간 외란관측기를 구성하기 위해 식 (21)을 식 (22)처럼 상태방정식으로 표현한다.

$$\dot{x}_I = A_I x_I + B_I e_{res} \quad (22)$$

여기서 $x_I = \begin{bmatrix} e \\ \dot{e} \end{bmatrix}$, $A_I = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -K_p & -K_d \end{bmatrix}$, $B_I = \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix}$ 이며 잔여외란은 $e_{res} = \dot{d}_{px} - \hat{d}_{px}$ 이다.

식 (15)로부터 외란 관측기는 식 (23)과 같이 구성된다.

$$\hat{d}_{px} = z_I - Lx_I \quad (23)$$

여기서 L 은 외란 관측기 이득이고, z_I 는 식 (24)와 같은 동특성에 의해 결정된다.

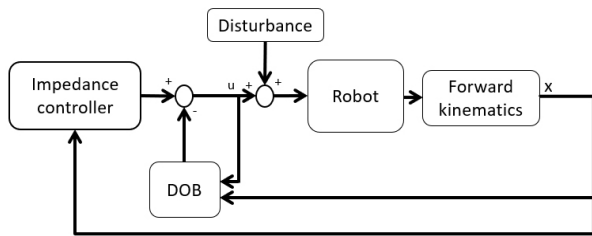
$$\dot{z}_I = L(A_I x_I - B_I \hat{d}_{px}) + x_I^T P B_I \quad (24)$$

리아프노프 후보함수를 식 (25)와 같이 선정한다.

$$V(t) = x_I^T P x_I + e_{est}^2 \quad (25)$$

A_I 가 안정하도록 K_p 와 K_d 가 결정되어 있으므로 식 (23)의 DOB를 사용하는 DOB 기반 임피던스 제어기는 오차와 외란 추정오차가 영으로 수렴한다.

DOB 기반 임피던스 제어 시스템의 전체 블록도는 [Fig. 1]과 같다.



[Fig. 1] DOB-based impedance control system

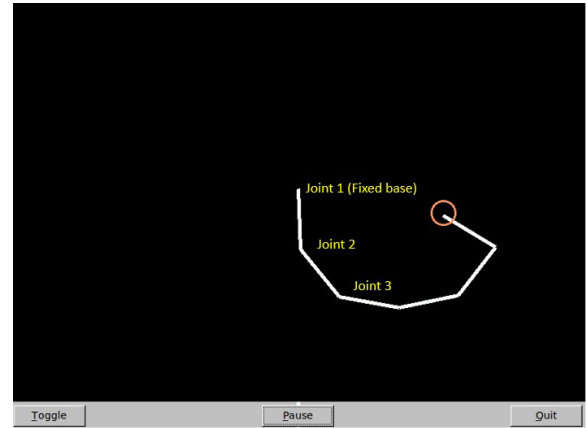
4. 시뮬레이션

제 2장에서 언급한 바와 같이 본 논문에서는 로봇의 동특성 기반 제어에 있어 수치해석적 모델을 사용한다. 수치해석적 모델을 제공하는 프로그램은 Stanford whole body control (SWBC)이다²²⁾. SWBC는 로봇에 대한 수치해석적 모델을 제공하는 기능과 더불어 로봇의 모델기반제어에 필요한 프로그램들을 포함하고 있다.

로봇의 수치해석적 모델을 얻기 위해 [Table 1]과 같이 각 조인트의 위치, 회전축, 회전방향, 무게중심, 관성 등의 로봇 구조에 대한 정보를 XML파일 형식으로 입력한다.

[Table 1] Robot parameters

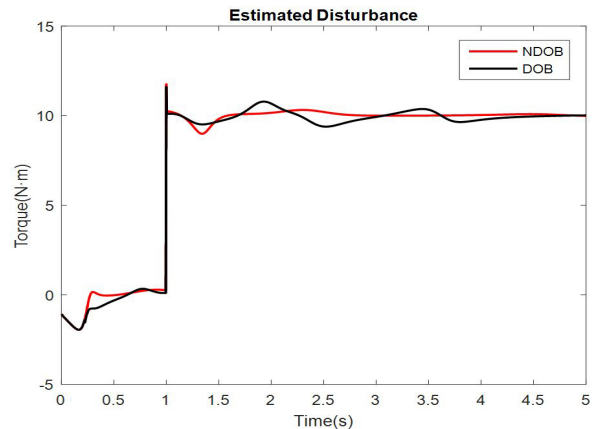
Joint number	1	2	3	4	5	6
Axis of rotation	Z	Z	Z	Z	Z	Z
Length (x-axis, m)	1	1	1	1	1	1
Inertia (kg·m ²)	1	1	1	1	1	1
Center of mass (kg)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Mass (kg)	3	1	1	1	1	1



[Fig. 2] 6-axis robot described by FLTK

[Table 2] Controller parameters

K_p	K_d	L	P
3	2.4	-1.15	0.05



[Fig. 3] Estimation performance of disturbance

Fast Light Toolkit (FLTK)를 이용하여 표현된 로봇의 형태는 [Fig. 2]와 같다. FLTK는 C++ 기반 GUI 라이브러리로 SWBC에서 로봇의 동작을 그래픽으로 표현하는 역할을 한다.

작업공간은 2차원이며 말단장치(end-effector)의 제어 목표 위치는 $(x, y) = (2.4, -1.4)$ 이다. 외란은 10 Nm이고 1초부터 인가되었다. 시뮬레이션에 사용된 제어기 파라미터들은 [Table 2]와 같다.

위의 [Table 2]에 보이는 K_p 와 K_d 는 오차동특성의 고유치

가 되도록 결정하였고 L 과 P 는 로봇의 움직임을 고려하여 조정하였다.

[Fig. 3]는 동일한 관측기 이득 하에서 제안된 DOB, 즉 NDOB와 기존 DOB의 추정 성능을 보여준다. 시간 1[sec]부터 일정한 크기 10인 외란이 인가되었으며 새로운 DOB가 기존의 DOB보다 10배 빨리 수렴하는 향상된 성능을 보임을 확인할 수 있다.

[Fig. 3]에서 보이는 오버슈트는 1[sec]에서 가해지는 외란에 의한 것으로 기존의 DOB와 제안된 DOB에서 동일한 크기로 발생함을 볼 수 있다. 이러한 현상은 외란추정의 과도응답에 영향을 미치는 외란추정기의 관측기 이득 L 을 조정하여 개선할 수 있다.

[Fig. 4]와 [Fig. 5]에서는 기존 DOB를 사용한 임피던스 제어와 새로운 DOB를 사용한 임피던스 제어의 x 축과 y 상태 오차를 확인할 수 있다.

[Fig. 4]와 [Fig. 5]의 x 축과 y 축의 위치 오차 응답으로부터 제안된 DOB 기반 임피던스 제어의 오차가 기존의 DOB를 사용한 경우보다 영으로 빨리 수렴함으로써 향상된 성능을 보임을 알 수 있다.

다음 [Table 3]는 [Fig. 4]와 [Fig. 5]에서의 오차를 정량적으로 나타낸 것이다. 즉, 오차의 r.m.s. (root mean square) 값을 구하여 [Table 3]에 나타내었다.

아래의 [Table 3]에서 제안된 DOB의 오차의 크기가 기존 DOB의 오차의 크기보다 감소하였음을 알 수 있다.

[Fig. 6]와 [Fig. 7]은 DOB 기반 임피던스 제어의 제어 입력을 나타낸다. 제안된 DOB를 사용한 경우 외란추정 성능과 상태 응답특성이 좋아짐에 따라 입력의 크기도 상대적으로 줄어들었음을 알 수 있다.

다음 [Table 4]는 [Fig. 6]와 [Fig. 7]에서의 기존 DOB와 제안된 DOB의 제어 입력의 크기를 정량적으로 나타내고 있다. [Table 4]는 제어 입력에 대한 r.m.s. 크기를 구하여 나타낸 것이다.

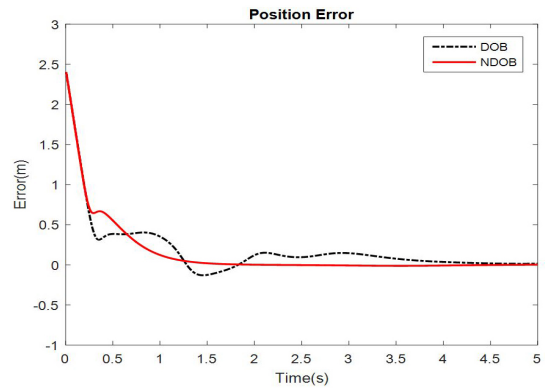
아래의 [Table 4]에서 제안된 DOB의 제어 입력의 크기가 기존 DOB의 제어 입력의 크기보다 감소하였음을 알 수 있다.

[Table 3] Comparison of r.m.s. value of state errors

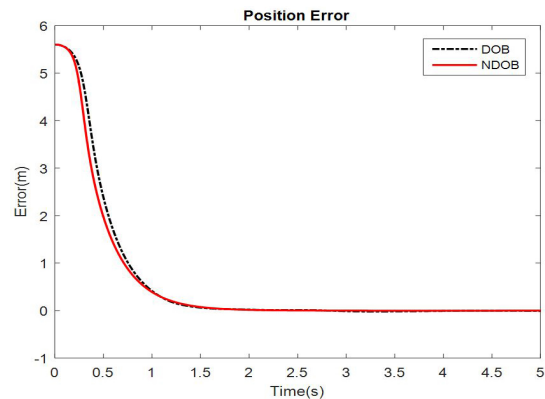
	Error size of x-axis	Error size of y-axis
DOB	0.182839	0.591539
NDOB	0.139792	0.546409

[Table 4] Comparison of r.m.s. value of control input sizes

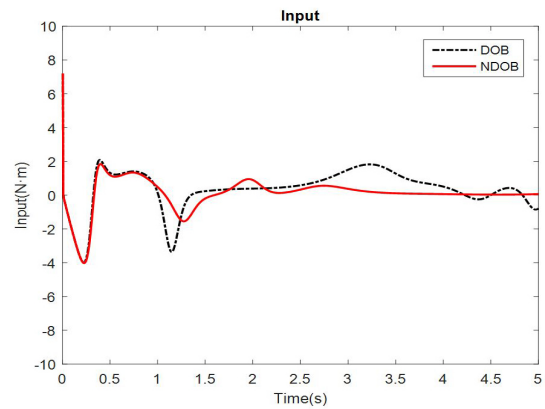
	Input size of x-axis	Input size of y-axis
DOB	1.527793	11.21087
NDOB	1.154772	10.93969



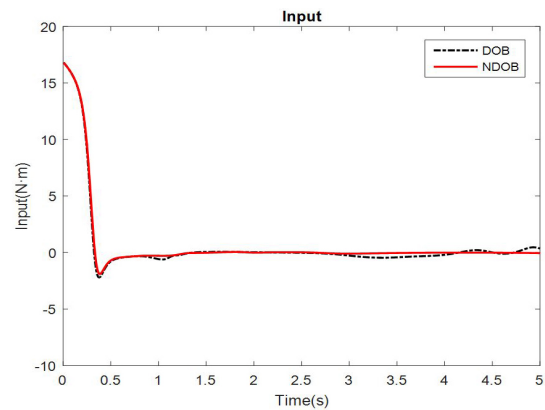
[Fig. 4] Error response of x-axis



[Fig. 5] Error response of y-axis



[Fig. 6] Control inputs of x-axis



[Fig. 7] Control inputs of y-axis

5. 결 론

본 논문에서는 잔여외란을 고려한 새로운 DOB를 제안하고, 이를 이용한 DOB 기반 임피던스 제어기를 구성하여 강인성을 향상시켜 고자유도 로봇 제어에 적용하였다. DOB 알고리즘에서 잔여외란을 고려함으로써, 안정도 해석에서는 DOB 기반 임피던스 제어시스템의 점근적 안정도를 증명할 수 있었고, 시뮬레이션을 통해 기존의 DOB를 사용한 경우보다 임피던스 제어의 성능이 향상됨을 알 수 있었다. 고자유도 로봇에 적용한 시뮬레이션에서는 수치해석적 모델을 사용하여 제안한 제어기의 성능 향상을 입증하였다. 본 연구의 결과는 ROS 패키지로 구성되어 PC 기반 로봇 제어에서 ROS를 이용하여 바로 실제 로봇 제어에 사용될 수 있다.

References

- [1] O. Khatib, L. Sentis, J. Park, and J. Warren, "Whole-body dynamic behavior and control of human-like robots," *International Journal of Humanoid Robotics*, vol. 1, no. 1, pp. 29-43, 2004, DOI: 10.1142/S0219843604000058.
- [2] L. Sentis, J. Park, and O. Khatib, "Compliant Control of Multicontact and Center-of-Mass Behaviors in Humanoid Robots," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 26, no. 3, pp. 483-501, Jun, 2010, DOI:10.1109/TRO.2010.2043757.
- [3] A. Zolotas, "Disturbance Observer-Based Control: Methods and Applications [Bookshelf]," *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 35, no. 3, pp. 55-57, Jun, 2015, DOI: 10.1109/MCS.2015.2408011.
- [4] H. Shim, G. Park, Y. Joo, J. Back, and N. H. Jo, "Yet another tutorial of disturbance observer: robust stabilization and recovery of nominal performance," *Control Theory Technol.*, vol. 14, pp. 237-249, 2016, DOI: 10.1007/s11768-016-6006-9.
- [5] M. T. White, M. Tomizuka, and C. Smith, "Improved track following in magnetic disk drives using a disturbance observer," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 5, no. 1, pp. 3-11, Mar, 2000, DOI: 10.1109/3516.8285 84.
- [6] E. Sariyildiz, R. Oboe, and K. Ohnishi, "Disturbance Observer-Based Robust Control and Its Applications: 35th Anniversary Overview," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 67, no. 3, pp. 2042-2053, March, 2020, DOI: 10.1109/TIE.2019.2903752.
- [7] V. Utkin, J. Guldner, and J. Shi, "Control of Linear Systems," *Sliding mode control in electro-mechanical systems*, London: CRC Press, 2009, ch. 5, pp. 79-102, DOI: 10.1201/9781420065619.
- [8] J. -M. Yang and J. -H. Kim, "Sliding mode control for trajectory tracking of nonholonomic wheeled mobile robots," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 15, no. 3, pp. 578-587, 1999, DOI: 10.1109/70.76 8190.
- [9] S. Boyd, L. E. Ghaoui, E. Feron, and V. Balakrishnan, "Miscellaneous Problems," *Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory*, SIAM, 1994, ch.10, pp. 148-149, DOI: 10.1137/1.9781611970777.
- [10] K. Zhou and J. C. Doyle, " H_∞ control," *Essentials of Robust Control*, Prentice Hall, 1998, ch. 13, pp. 260-290, [Online], <https://www.pearson.com/us/higher-education/program/Zhou-Essentials-of-Robust-Control/PGM241994.html>.
- [11] A. Garcia, S. Keshmiri, and D. Shukla, "Nonlinear control based on H- infinity theory for autonomous aerial vehicle," *2017 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, Miami, FL, USA, pp. 336-345, 2017, DOI: 10.1109/ICUAS.2017.7991395.
- [12] E. Sariyildiz and K. Ohnishi, "A guide to design disturbance observer," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 136, no. 2, pp. 11-21, 2014, DOI: 10.1115/1.4025801.
- [13] W. -H. Chen, J. Yang, L. Guo, and S. Li, "Disturbance-Observer-Based Control and Related Methods-An Overview," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, no. 2, pp. 1083-1095, Feb, 2016, DOI:10.1109/TIE.2015.2478397.
- [14] K. Kong and M. Tomizuka, "Nominal model manipulation for enhancement of stability robustness for disturbance observer-based control systems," *International Journal of Control, Automation and Systems*, vol. 11, pp. 12-20, 2013, DOI: 10.1007/s12555-011-9214-6.
- [15] N. Paine, S. Oh and L. Sentis, "Design and Control Considerations for High-Performance Series Elastic Actuators," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 19, no. 3, pp. 1080-1091, Jun, 2014, DOI: 10.1109/TMECH.2013.2270435.
- [16] K. Ohnishi, M. Shibata, and T. Murakami, "Motion control for advanced mechatronics," *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, vol. 1, no. 1, pp. 56-67, Mar, 1996, DOI: 10.1109/3516.491410.
- [17] C. Johnson, "Accommodation of external disturbances in linear regulator and servomechanism problems," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 16, no. 6, pp. 635-644, Dec, 1971, DOI: 10.1109/TAC.1971.1099830.
- [18] E.Sariyildiz, R.Mutlu, and C.Zhang, "Active disturbance rejection based robust trajectory tracking controller design in state space," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 141, no. 6, pp. 061013-0631019, Jun, 2019, DOI: 10.1115/1.4042878.
- [19] E. Sariyildiz, C. Gong, and H. Yu, "Robust trajectory tracking control of multi-mass resonant systems in state-space," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 12, pp. 9366-9377, Dec, 2017, DOI: 10.1109/TIE.2017.2708001.
- [20] N. Hogan, "Impedance Control: An Approach to Manipulation: Part I-Theory," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 107, no. 1, Mar., 1985, DOI: 10.1115/1.3140702.
- [21] A. Dietrich, K. Bussmann, F. Petit, P. Kotyczka, C. Ott, B. Lohmann, and A. Albu-Schäffer, "Whole-Body Impedance Control of Wheeled Mobile manipulators," *Autonomous Robots*, vol. 40, pp. 505-517, 2016, DOI: 10.1007/s10514-015-9438-z.
- [22] O. Khatib, J. Park, K. C. Chang, D. Ruspin, R. Featherstone, B. Holmberg, F. Conti, R.Philippsen, and L. Sentis, "Stanford Whole-Body Control Framework," 2011, [Online], <http://stanford-wbc.sourceforge.net/doxy/index.html>.



김 준 혁

2019 창원대 전기공학과 졸업
2019~현재 창원대학교 전기공학과 석사과정

관심분야: 로봇 제어, 강인 제어



박 승 규

1984 고려대 전기공학과 졸업
1986 고려대 대학원 석사
1990 고려대 대학원 박사
1990~현재 창원대학교 전기공학과 교수

관심분야: 강인제어, Whole Body Control



윤 태 성

1978 연세대 전기공학과 졸업
1980 연세대 대학원 석사
1989 연세대 대학원 박사
1989~현재 창원대학교 전기공학과 교수

관심분야: 강인제어, 이동로봇 제어