

논문 2021-16-40

로봇 머니플레이터에서의 수렴속도 향상을 위한 적분 슬라이딩 모드 기반 적응 시간 제어 기법

(Adaptive Time-delayed Control with Integral Sliding-mode Surface for Fast Convergence Rate of Robot Manipulator)

백재민, 강민석*

(Jae-Min Baek, Min-Seok Kang)

Abstract : This paper proposes an adaptive time-delayed control approach with the integral sliding-mode surface for the fast convergence rate of robot manipulators. Adaptive switching gain aims to guarantee the system stability in such a way as to suppress time-delayed estimation error in the proposed control approach. Moreover, it makes an effort to increase the convergence ability in reaching the phase. An integral sliding-mode surface is employed to achieve a fast convergence rate in the sliding phase. The stability of the proposed one is proved to be asymptotically stable in the Lyapunov stability. The efficiency of the proposed control approach is illustrated with a tutorial example in robot manipulator, which is compared to that of the existing control approach.

Keywords : Model-free control, Sliding-mode control, Time-delayed control, Robot manipulator, Lyapunov stability.

1. 서론

로봇 머니플레이터는 수십 년 전부터 전 세계적으로 개발이 지속되고 있고, 최근에는 재활 로봇 [1] 및 산업용 로봇 [2]까지 확대되면서 광범위한 영역에서 인간의 업무를 대신하는 데 이바지하고 있다. 로봇 머니플레이터 분야는 산업의 변화에 따라 이목이 집중되고 있으며, 산업에서 중요시하는 편의성 및 생산성을 높일 수 있도록 로봇 머니플레이터를 이용한 산업들은 정밀 제어 기술을 반드시 요구하고 있다.

로봇 머니플레이터에서 잘 알려진 정밀 제어 기술 중 하나로서, 선형 2차 최적 제어 [3], 모델 예측 제어 [4], 계산토크 제어 [5] 및 슬라이딩 모드 제어 기술 [6] 등 시스템 모델에 근간을 둔 제어 기술들이 개발되어왔다. 이 제어 기술들은 시스템 모델에 근간을 두기 때문에 모델에 대한 정보가 많고 명확할수록 원하는 결과를 얻기 용이하다. 하지만, 이러한 접근 기술은 대부분 산업체에서 시스템에 대한 선형적 지식을 기반으로 하는 수학적 모델을 반드시 요구하고 있고, 높은 비선형성, 커플링 역학 효과 및 모델링 불확실성을 갖기 때문에 로봇 머니플레이터의 고정밀 추적 제어를 달성하는 것은 여간 어려운 일이 아니다.

이러한 문제들을 해결하고자, 시스템 모델에 기반하지 않는 제어 기술들이 개발되기 시작하였다. 잘 알려진 기술 중

하나로써, 시간 지연 제어 기술 [7, 8]은 과거의 상태 정보를 이용하여 시스템 모델의 불확실성을 추정하고 있다. 이 제어 기술은 과거의 상태 정보를 현재의 상태 정보로 활용하기 때문에 모델에 대한 정보가 필요하지 않다는 장점이 있다. 따라서 시간 지연 제어 기술은 로봇 머니플레이터와 같은 복잡하고 비선형성을 가진 시스템에 적용할 때 매우 간단하고 효과적으로 적용할 수 있게 설계하는 것을 돕는다. 이러한 이점들 덕분에, 직류 변환기 [9], 무인 비행기 [10] 및 미사일 [11] 등 많은 시스템에 적용되어왔다. 하지만, 이러한 장점과 높은 유용성에도 불구하고 이 제어 기술은 현재 상태 정보를 추정하기 위해 사용되는 과거 상태 정보를 얻는 과정에서 현재 상태와의 정보 차이가 발생할 수 있고, 마찰력과 순간적으로 발생하는 외란 [12]에 의해 시간 지연 추정 오차가 발생하여 시스템의 정밀성과 강인성을 저하하는 요인으로 지목되고 있다.

앞서 언급된 문제를 해결하고자, 적응 슬라이딩 모드 제어 [13], 내부 모델 제어 [14], 터미널 슬라이딩 모드 제어 [15], 백스텝핑 제어 [16] 등 여러 가지 제어 기술이 시간 지연 제어 기법과 결합되어 사용되어왔다. 보조적으로 사용된 제어 기술들은 시간 지연 추정을 압박하고자 사용된 방법이기 때문에 외란 등에 강인함을 보장하도록 설계할 수 있다. 그래서 로봇 머니플레이터 이외에 여러 가지 비선형 시스템에의 적용 가능성에 길을 열어주었다. 하지만, 시간 지연 제어 기술을 사용하면서 발생하는 시간 지연 추정 오차는 알려지지 않은 변수이자 급변하는 신호이기 때문에 항상 시간 지연 추정 오차의 제한된 상한값을 보장할 수 있어야 한다. 하지만 제한된 상한값을 보장하기 위해서는 반드시 안정성 기준 [17]을 충족시켜야만 하며, 이는 시간 지

*Corresponding Authors (mskang@kongju.ac.kr)

Received: Oct. 11, 2021, Revised: Nov. 11, 2021, Accepted: Nov. 29, 2021.

J.M. Baek: Gangneung-Wonju Nat'l University (Asst. Prof.)

M.S. Kang: Kongju Nat'l University (Asst. Prof.)

* 이 논문은 2021년도 정부 (교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. 2021R111A3059648).

연 제어 기술의 이득과 시스템에서의 관성 모멘트와 직접 관련되어 있다. 이러한 이유로, 관성 모멘트의 정보를 알아야 한다는 점과 시간 지연 제어 기술의 이득을 제한적으로 사용할 수밖에 없다는 것을 내포하므로, 보조적으로 사용된 제어 기술들은 신호 흔들림이라든지 채터링과 같은 악영향을 완전하게 배제하지 못하고 있다. 다시 말해, 시간 지연 제어 기술에 근간을 둔 보조 제어 기술은 과도하거나 부적절한 이득을 사용하여 시스템에 안정성에 문제를 초래할 여지가 충분히 있다.

이러한 문제를 줄이고자, 최근에 안정성을 항상 보장할 수 있는 시간 지연 제어 기술이 개발되었다 [18]. 이 제어 기술의 경우에는 시간 지연 제어 기술의 안정성 조건을 만족하지 않더라도 항상 시스템의 안정성을 보장하는 것을 돕고 있다. 다시 말해, 관성 모멘트의 정보를 알지 못하더라도 추적성 관점에서만 이점을 가지도록 시간 지연 제어 기술의 이득을 설정할지라도 부정적인 요소 발생 없이 로봇 머니플레이터의 추적성능을 향상시키고 동시에 시스템의 안정성 역시 보장할 수 있음을 말한다. 이처럼, 이 제어 기술은 앞서 언급된 능력 덕분에 도달 단계에서 강점을 가지고 있으나, 1계 선형 슬라이딩 변수를 활용하고 있으므로 추적 오차를 평형점으로 보내는 속도를 결정할 수 있는 슬라이딩 단계에서의 성능을 높이는데 여전히 힘을 기울일 필요가 있다. 이러한 관점에서 시스템에 대한 안정성을 항상 보장할 수 있으며 슬라이딩 단계에서의 성능까지 보완할 수 있는 제어 기술이 개발된다면 매우 의미 있는 연구가 될 수 있으리라 생각된다.

본 논문에서는 적분 슬라이딩 모드에 근간을 둔 적응 시간 제어 기술을 제안한다. 먼저, 제안된 제어 기술은 도달 단계에서의 안정성과 수렴성을 높이고자 시간 지연 추정 오차의 상한값을 활용한 적응 슬라이딩 제어 방법을 사용하였다. 이 방법에서 사용된 이득들은 [18]에서 증명된 바와 같이 매우 작은 값을 선정하여도 충분히 안정성을 보장할 수 있으므로 사용자가 매우 유용하게 사용할 수 있다. 다음으로는 슬라이딩 단계에서의 수렴 속도를 향상하고자 적분 슬라이딩 변수를 등용하였다. 적용된 변수는 [18]에서 사용된 기존 1계 선형 슬라이딩 변수와 달리 우세 극점을 가지도록 2계 선형 슬라이딩 변수로 설계되어 수렴 속도를 높일 수 있다. 이와 같은 이유로, 제안된 제어 기술은 추적성능을 높일 수 있을 뿐만 아니라 시스템의 안정성 역시 향상하는 것을 돕고 있다. 이 기술은 리아푸노프 안정성 (Lyapunov Stability) 판별법을 활용하여 시스템의 안정성을 보장하고 있으며, 성능 분석은 로봇 머니플레이터 시뮬레이션을 통해 입증하였다.

본 논문의 나머지 부분은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 제안된 적분 슬라이딩 모드에 근간을 둔 적응 시간 제어 기술을 설명하고, 3장에서는 단일 입력·출력 로봇 머니플레이터 시뮬레이션을 통해 추적성능을 분석한다. 4장에서는 본 논문의 결과를 요약 정리하여 설명한다.

II. 제안된 제어 기술

본 장에서는 제안된 제어 기술을 소개하고자 한다. 제안된 제어 기술을 소개하기에 앞서 단일 입력·출력 로봇 머니플레이터 역학 모델을 설명하겠다. 일반적으로 잘 알려진 로봇 머니플레이터의 수식은

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

이다. 수식 (1)에서의 q , \dot{q} , \ddot{q} 는 각각 로봇 머니플레이터의 관절의 각도, 각속도, 그리고 각가속도를 나타내며, 이 변수들은 수식 (1)의 관성 모멘트를 의미하는 $M(q)$, 코리올리 힘과 원심력을 의미하는 $C(q, \dot{q})$, 로봇 머니플레이터에 작용하는 중력을 의미하는 $G(q)$, 마찰력 $F(q, \dot{q})$ 및 관절에 인가되는 제어 입력 τ 에 적용되고 있다. τ_d 는 로봇 머니플레이터에 작용하는 외란이며, 다음과 같은 상계가 존재한다고 가정한다:

$$\tau_d \leq \bar{\tau}^* \quad (2)$$

수식 (2)에 대한 가정은 많은 문헌에서 활용되고 있다[19]. 복잡한 수식 (1)을 간단하고 압축된 형태로 표현하게 되면

$$\tau = (M(q) - \bar{M})\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + F(q, \dot{q}) - \tau_d + \bar{M}\ddot{q} \quad (3) \\ = w + \bar{M}\ddot{q}$$

이다. 수식 (3)에서 사용된 w 는

$$w = (M(q) - \bar{M})\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + F(q, \dot{q}) - \tau_d \quad (4)$$

로 정의된다. 다시 말해, 수식 (4)에서는 로봇 머니플레이터의 불확실성 및 외란 등을 모두 w 로 간략히 표현한 것이다. 수식 (4)에서의 \bar{M} 은 시간 지연 제어 이득이라 불리며, 양의 값으로 추적성능을 조절할 때 사용된다. 수식 (3)을 \ddot{q} 로 정리해보면

$$\ddot{q} = -\bar{M}^{-1}w + \bar{M}^{-1}\tau \quad (5) \\ = -\bar{w} + \bar{M}^{-1}\tau$$

이며, \bar{w} 는 $\bar{M}^{-1}w$ 로 정의된다. 수식 (5)에서 나타낸 \bar{w} 의 바로 직전 정보를 \bar{w}_L 로 정의하였을 때, 우리는 \bar{w} 를 추정하고자 \bar{w}_L 을

$$\bar{w}_L = -\ddot{q}_L + \bar{M}^{-1}\tau_L \quad (6)$$

로 정의하며, 본 논문에서 사용된 모든 변수 \cdot_L 는 변수 \cdot 의 바로 직전 정보로 나타낸다. 그리고 L 은 샘플링 시간 (Sampling Time)을 의미한다. 수식 (6)의 \bar{w}_L 로 수식 (5)의 w 를 추정할 수 있다면,

$$\bar{w}_L \cong \bar{w} \quad (7)$$

으로 해석할 수 있고, 수식 (7)을 이용하여 제어 입력 τ 를 정의해보면,

$$\begin{aligned} \tau &= \bar{M}\bar{w}_L + \bar{M}(\ddot{q}_d + \gamma_d \dot{e} + \gamma_i e + \gamma_s s) \\ &= -\bar{M}\ddot{q}_L + \tau_L + \bar{M}(\ddot{q}_d + \gamma_d \dot{e} + \gamma_s s) \end{aligned} \quad (8)$$

로 표현된다. 수식 (8)에서 사용된 e 는 추적 오차를 의미하고 원하는 추적 궤도 q_d 와 실제 추적 궤도 q 의 차이로 정의된다. 또한, \dot{e} 은 추적 오차 e 의 미분 값으로 표현된다. 수식 (8)에서 사용된 $s = \dot{e} + \gamma_d e + \gamma_i \int e$ 는 적분 슬라이딩 변수라 명명하며, 수식 (8)에서 사용된 γ_d 와 γ_i 는 양의 상수로써 슬라이딩 변수가 평형점에 머무를 때 추적 오차 e 를 0으로 보내는 속도를 조절하게 된다. 수식 (8)에서 사용된 γ_s 는 역시 양의 상수를 의미하며, 극점 배치에 도움을 제공하게 된다. \bar{M} 역시 γ_d , γ_i 와 γ_s 처럼 양의 이득을 제공하며, 다른 이득들과 달리 추적성능을 높이고자 [17]에서 소개된 안정성 기준 ($\|I - M(q)\bar{M}\| < 1$)을 위배하도록 설정된다면 시스템에 불안정성을 유발할 여지가 있다. 또한, 수식 (8)은 과거의 정보를 활용하고 있으므로 \bar{w}_L 을 사용하여 수식 (3)에서 표현되는 \bar{w} 를 정확하게 추정할 수 없다. 다시 말해, 반드시 두 변수의 차이 $|\bar{w} - \bar{w}_L|$ 에는 오차가 발생하게 됨을 의미하며, 이 오차를 시간 지연 추정 오차라 명명한다. 이 오차의 상한값은

$$|\bar{w} - \bar{w}_L| \leq \bar{k}_{d0}^* + \bar{k}_{c1}^* |\dot{q}|^2 + \bar{k}_{c2}^* |\ddot{q} - \ddot{q}_L| + \bar{k}_{c3}^* |\ddot{q}| \quad (9)$$

으로 [18]에서 증명되었고, 본 논문에서는 수식 (9)처럼 정의될 수 있다. \bar{k}_{d0}^* , \bar{k}_{c1}^* , \bar{k}_{c2}^* 및 \bar{k}_{c3}^* 은 알려지지 않은 양의 상수를 나타낸다. 요약하면, 수식 (9)로부터 시간 지연 추정 오차가 안정성 기준 [17]을 만족하는지와 관련 없이 시간 지연 추정 오차의 상한값을 가질 수가 있다. 이때, 상한값을 항상 임의의 상숫값으로 유지하기 위해서는 [17]에서 소개된 안정성 기준을 만족해야 하는데, 수식 (1)에서 소개된 $M(q)$ 에 대한 모델을 명확하게 알아야 하므로 \bar{M} 을 선택하는 것은 여간 어려운 일이 아니다. 다시 말해, 로봇 머니플레이터의 명확한 모델 정보를 얻고 추적성능을 향상하고자 \bar{M} 를 선택하는 것은 사용자에게 매우 어려운 과정이라 말할 수 있다. 이와 같은 문제를 완화하고자, 수식 (8)을 보완하여 보조 제어 기술을 설계하게 되면 다음과 같다:

$$\begin{aligned} \tau &= -\bar{M}\ddot{q}_L + \tau_L + \bar{M}(\ddot{q}_d + \gamma_d \dot{e} + \gamma_i e + \gamma_s s) \\ &\quad + \bar{M}(\bar{k}_0 + \bar{k}_1 |\dot{q}|^2 + \bar{k}_2 |\ddot{q} - \ddot{q}_L| + \bar{k}_3 |\ddot{q}|)sgn(s). \end{aligned} \quad (10)$$

여기서 \bar{k}_0 , \bar{k}_1 , \bar{k}_2 및 \bar{k}_3 은 스위칭 이득을 조절하는 양의 상수로 정의되며,

$$\bar{k}_0 \geq \bar{k}_{d0}^*, \bar{k}_1 \geq \bar{k}_{c1}^*, \bar{k}_2 \geq \bar{k}_{c2}^*, \bar{k}_3 \geq \bar{k}_{c3}^* \quad (11)$$

의 관계를 맺도록 설정된다. [18]에서 증명된 바와 같이 섹

플링 시간이 짧을수록 \bar{k}_{d0}^* , \bar{k}_{c1}^* , \bar{k}_{c2}^* , \bar{k}_{c3}^* 는 연속적인 함수로 구성되었기 때문에 매우 작은 값을 가지게 된다. 이와 같은 이유로, 수식 (11)에서의 부호 관계는 쉽게 성립될 수 있다. 수식 (10)에서 사용된 함수 $sgn(s)$ 는

$$sgn(s) = \begin{cases} 1 & \text{if } s \geq 0 \\ -1 & \text{if } s < 0 \end{cases}$$

로 정의된다 [13]. 수식 (10)에서 사용된 스위칭 이득 형태는 [18]에서 제안된 형태를 사용하고 있다. 이 형태는 시간지연 추정 오차의 상한값을 보장하기 위함이며, 본 논문에서는 [18]에서 수학적으로 증명된 스위칭 이득 형태 외에 실질적으로 사용이 가능한 형태를 적용하였다. 수식 (10)에 대한 추적성능은 다음 장에서 소개되며, 제안된 제어 기술에 대한 안정성 증명은 리아푸노프 함수를 사용하여 다음과 같이 증명되었다.

증명: 리아푸노프 함수는 다음과 같이 V 로 정의되며,

$$V = \frac{1}{2}s^2 \quad (12)$$

로 표현된다. 이때, 수식 (12)를 시간에 대해 미분하게 되면

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s\dot{s} \\ &= s(\ddot{e} + \gamma_d \dot{e} + \gamma_i e) \\ &= s(\ddot{q}_d + \ddot{w} - \bar{M}^{-1}\tau + \gamma_d \dot{e} + \gamma_i e) \\ &= s(\ddot{w} - \ddot{w}_L - \gamma_s s \\ &\quad - (\bar{k}_0 + \bar{k}_1 |\dot{q}|^2 + \bar{k}_2 |\ddot{q} - \ddot{q}_L| + \bar{k}_3 |\ddot{q}|)sgn(s)) \end{aligned} \quad (13)$$

으로 나타낼 수 있다. 수식 (13)은 수식 (9)에 따라

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq |s| |\ddot{w} - \ddot{w}_L| \\ &\quad - |s| (\bar{k}_0 + \bar{k}_1 |\dot{q}|^2 + \bar{k}_2 |\ddot{q} - \ddot{q}_L| + \bar{k}_3 |\ddot{q}|) \\ &\quad - \gamma_s s^2 \end{aligned} \quad (14)$$

으로 전개가 가능하며, 수식 (9)와 수식 (11)을 수식 (14)에 적용하게 되면

$$\dot{V} \leq -\gamma_s s^2 \quad (15)$$

가 된다. [19]에서 소개된 보조 정리 $\lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t \phi_\tau d\tau = 0$ 에 따라 수식 (15)은 점진적으로 안정성이 보장함을 알 수 있고, 수식 (10)이 로봇 머니플레이터에 적용되었을 때의 안정성 역시 보장됨을 증명할 수 있다.

III. 시뮬레이션

1. 시뮬레이션 설정 및 설명

본 장에서는 제안된 제어 기술의 추적성능을 입증하고자, 그림 1과 같은 단일 입•출력 로봇 머니플레이터 시뮬레이션을 진행하였고, 시스템 모델은 다음과 같다:

$$M\ddot{q} + C\dot{q} + gl\sin(q) + f\operatorname{sgn}(\dot{q}) = \tau. \quad (16)$$

수식 (16)에서 사용된 상수 M, C, l, g 및 f 는 각각 로봇 매니퓰레이터의 질량, 댐퍼 (Damper), 링크 (Link) 길이, 중력 및 쿨롱 (Coulomb) 마찰력의 크기를 의미한다. τ 는 제어 입력을 의미하며 수식 (10)이 적용된다. 이 상수들은 $M = 1, C = 5, l = 1, g = 9.81$ 및 $f = 500$ 으로 설정되었으며, 샘플링 시간은 $L = 0.001$ 로 설정되었다. 제안된 제어 기술은 $\bar{M} = 1, \gamma_d = 400, \gamma_i = 40000, \gamma_s = 2000, \bar{k}_0 = 200, \bar{k}_1 = 0.1, \bar{k}_2 = 0.1$ 및 $\bar{k}_3 = 0.1$ 으로 적용되었다.

2. 시뮬레이션 설명

본 장에서 진행될 시뮬레이션은 원하는 추적 궤도 (그림 2)를 얼마나 빠르고 안정적으로 따라가는지를 확인하는 추적 성능을 관찰하고자 하며, 집중적으로 확인하고자 하는 부분은 그림 2에서 P1~P3 지점이다. P1 지점은 로봇 매니퓰레이터가 모션의 방향을 바꿀 때이며, 실제로 마찰력이 로봇 매니퓰레이터에 가장 크게 영향을 주는 부분이라 할 수 있다 [15]. 그래서 이 지점에서의 평형점으로 향하는 수렴속도를 확인하고자 한다. P2 지점은 미분 불가능한 지점으로 원하는 추적 궤도가 이탈되었다고 가정하였을 때의 성능을 확인하고자 한다. P3 지점은 잔류 편차를 보기 위함으로 6.28 초를 기점으로 원하는 추적 궤도가 물리적으로 동적에서 정적으로 바뀌어도 동적에서 설정된 제어 기술 파라미터가 정적에서도 잘 적용되는지를 확인함에 있다.

모든 제어 기술은 6.28 초 이전의 원하는 추적 궤도를 기준으로 설정되었으며, 최근 제안된 존재하는 제어 기술은 공정한 추적성능 비교를 위해 제안된 제어 기술과 같은 방법으로 제어 파라미터가 설정되었다. 또한, 제안된 방법의

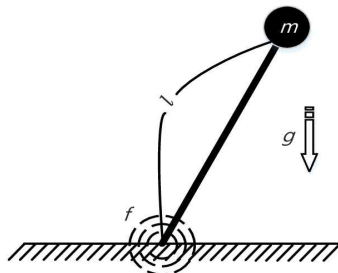


그림 1. 1축 로봇 매니퓰레이터 구성도.
Fig. 1. A schematic diagram of 1-DOF robot manipulator.

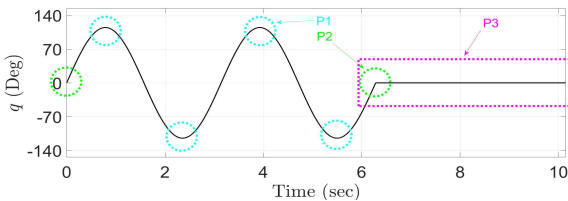


그림 2. 원하는 추적 궤도.
Fig. 2. Desired reference trajectory.

이점을 확인하고자 비교된 제어 기술 ([18]에서 제안된 제어 기술 중 \bar{M} 가 상수인 제어 기술)에서의 제어 파라미터를 제안된 제어 기술의 파라미터보다 정밀하게 설정되었고, 그것은 시뮬레이션 결과에서 확인할 수 있다.

3. 시뮬레이션 결과

그림 3는 제안된 제어 기술에서 안정성 조건에 구속되지 않더라도 로봇 매니퓰레이터의 안정성을 항상 보장하는 방법으로 사용된 스위칭 이득을 보여주고 있다. 그림 3에서 표현된 \hat{K} 는 수식 (10)에서 사용된

$$\hat{K} = \bar{k}_0 + \bar{k}_1 |\dot{q}|^2 + \bar{k}_2 |\ddot{q} - \ddot{q}_L| + \bar{k}_3 |\ddot{q}| \quad (17)$$

을 의미한다. 수식 (17)에서 볼 수 있듯이 스위칭 이득은 4개의 항으로 이뤄져 있다. \bar{k}_0 은 하한값을 가지도록 도와주며, \bar{k}_1, \bar{k}_2 및 \bar{k}_3 항은 변수 \dot{q}, \ddot{q}_L 및 \ddot{q} 의 영향에 따라 적절하게 변화하게 되는 것을 돕는다. 그림 3에서 표현된 것처럼, P1 지점에서는 다른 부분에서보다 더 크게 증가하는 모습을 확인할 수 있다. 이는 그림 2의 P1 지점으로 로봇 매니퓰레이터에서 발생하는 마찰력에 의한 악영향을 보상하기 위해 발생하는 현상이다. 이 방법에 관한 결과는 다음에 소개될 추적 오차에서 확인할 수 있다.

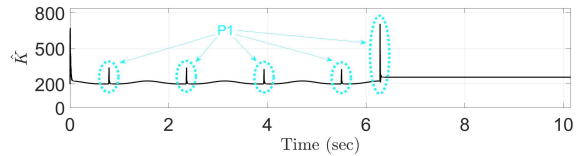
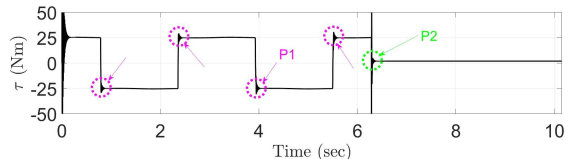
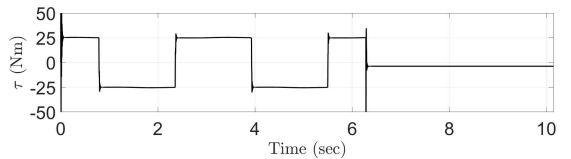


그림 3. 제안된 제어 기술의 스위칭 이득.

Fig. 3. Switching gain of the proposed control approach.



(a)



(b)

그림 4. 모든 제어 기술에 대한 제어 입력:

- (a) 존재하는 제어 기술에 대한 입력.
- (b) 제안된 제어 기술에 대한 입력.

Fig. 4. The control inputs of all control approaches:
(a) The control input of the existing control approach.
(b) The control input of the proposed control approach.

그림 4은 제안된 제어 기술과 존재하는 제어 기술의 제어 입력을 비교하고 있다. 그림 4에서 볼 수 있듯이, 그림 4 (a)의 P1과 P2 지점은 그림 2의 P1과 P2 지점과 같다. 제안된 제어 기술과 비교하기 위해 사용된 존재하는 제어 기술은 다음 그림에서 설명될 추적 오차를 줄이고자 더욱 정밀 파라미터 튜닝을 하였음에도 불구하고 채터링 (Chattering) 또는 신호 흔들림이 발생하고 있음을 알 수 있다. 다시 말해, 이 현상은 추적 오차를 줄이기 위해 초과적인 입력이 활용되고 있다고 해석할 수 있으며, 상호보완적 관계를 가진 추적 성능이 향상될 것임을 예측할 수 있다.

그림 5는 제안된 제어 기술의 추적 성능을 확인하기 위해 최근에 소개된 존재하는 제어 기술과의 추적 성능을 비교하여 나타내고 있다. 그림 5에서 볼 수 있듯이, P1 지점에서는 제안된 제어 기술과 비교된 제어 기술의 점두치가 비슷하다는 것을 알 수 있다. 그런데도, P2 지점에서는 비교된 제어 기술이 제안된 제어 기술보다 수렴속도가 2배 이상 저하되는 것을 확인할 수 있다. 또한, 비교된 제어 기술이 제안된 제어 기술보다 정밀 조절되었음에도, 6.28 초 이후의 구간 (P3 지점)에서 제안된 제어 기술은 비교된 제어 기술보다 평형점에 수렴하는 정도가 높다는 것을 그림 5를 통해 직관적으로 확인할 수 있고, 6.28 초 전후에 따른 평균 제곱근 편차는 표 1에 명시하였다. 결과적으로 제안된 제어 기술은 최근에 소개된 제어 기술에 비해 높은 추적 성능 및 강인성을 모두 갖추고 있음을 알 수 있다.

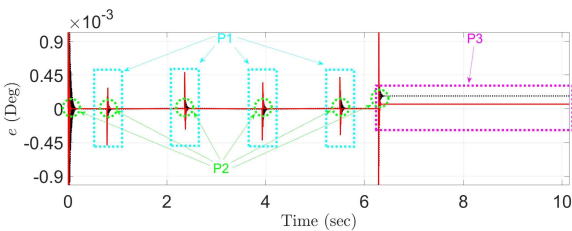


그림 5. 모든 제어 기법들에 대한 추적 성능 비교: (점선, 검정) 비교된 제어 기술. (실선, 빨강) 제안된 제어 기술.

Fig. 5. Comparison of the tracking performance in the all control approaches:
(Dashed-line) The existing control approach.
(Solid-line) The proposed control approach.

표 1. 기존 제어 기법과 제안된 제어 기법의 추적 오차 비교
Table 1. Comparison of the tracking errors in the existing control and the proposed control

	Joint (Deg)	
	0 ~ 6.28 sec	6.28 ~ 10.1 sec
Existing control	0.012×10^{-2}	0.019×10^{-2}
Proposed control	0.010×10^{-2}	0.012×10^{-2}

IV. 결론

본 논문은 적분 슬라이딩 모드에 근간을 둔 적응 시간 지연 제어 기술을 제안했다. 제안된 제어 기술은 시간 지연 제어 기술의 안정성 조건을 위배하더라도 항상 안정성을 보장할 수 있도록 설계되었고, 슬라이딩 단계에서의 수렴 속도를 향상시키고자 적분 슬라이딩 변수를 적용하였다. 이 제어 기술에 대한 안정성은 리야푸노프 안정성 판별법을 활용하여 증명하였으며, 이 제어 기법의 이점들은 시뮬레이션을 통해 입증하였다.

앞으로 알려지지 않은 내부 및 외부 외란에 대한 강인성을 더욱 강화하고, 추적 성능 역시 더욱 향상시킬 목적으로 제안된 제어 기법과 학습 기법들을 활용한 연구를 진행하고자 하며, 이 연구 결과는 제어 기술 연구 방향을 넓히는 데 일조할 수 있으리라 믿는다.

References

- [1] M. Zhang, S. Xie, X. Li, G. Zhu, W. Meng, X. Huang, A. Veale, "Adaptive Patient-cooperative Control of a Compliant Ankle Rehabilitation Robot (CARR) with Enhanced Training Safety," IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 65, No. 2, pp. 1398-1407, 2017.
- [2] C. Yang, G. Peng, L. Cheng, J. Na, Z. Li, "Force Sensorless Admittance Control for Teleoperation of Uncertain Robot Manipulator Using Neural Networks," IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. Syst., 2019.
- [3] O. Kermorgant, F. Chaumette, "Dealing with Constraints in Sensor-based Robot Control," IEEE Trans. Robot., Vol. 30, No. 1, pp. 244-257, 2013
- [4] H. Xiao, Z. Li, C. Yang, L. Zhang, P. Yuan, L. Ding, T. Wang, "Robust Stabilization of a Wheeled Mobile Robot Using Model Predictive Control Based on Neurodynamics Optimization," IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 64, No. 1, pp. 505-516, 2016.
- [5] L. Santos, R. Cortesão, "Computed-torque Control for Robotic-assisted Tele-echography Based on Perceived Stiffness Estimation," IEEE Trans. Autom. Sci. Eng., Vol. 15, No. 3, pp. 1337-1354, 2018.
- [6] V. Utkin, J. Guldner, J. Shi, "Sliding Mode Control in Electro-Mechanical Systems". Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2009.
- [7] T. Hsia, L. Gao, "Robust Independent Joint Controller Design for Industrial Robot Manipulators," IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 38, No. 1, pp. 21 - 25, 1991.
- [8] K. Youcef-Toumi, O. Ito, "A Time Delay Controller for Systems with Unknown Dynamics," Trans. ASME, J. Dyn. Syst. Meas. Control, Vol. 112, No. 1, pp. 133 - 142, 1990.
- [9] Y. Wang, D. Yu, Y. Kim, "Robust Time-delay Control

- for the DC-DC Boost Converter," IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 61, No. 9, pp. 4829-4837, Sep. 2014.
- [10] J. Baek, J. Jung, "A Model-Free Control Scheme for Attitude Stabilization of Quadrotor Systems," Electronics, Vol. 9, No. 10, pp. 1586, 2020.
- [11] B. Park, T. Kim, M. Tahk, "Time-delay Control for Integrated Missile Guidance and Control," Int. J. Aeronaut. Space Sci., Vol. 12, No. 3, pp. 260-265, 2011.
- [12] J. Baek, H. Baek, "Adaptive Time-delayed Control Approach with Non-singular Sliding-mode for Robot Manipulators," J. Institute Control Robot. Syst., Vol. 25, No. 10, pp. 896-901, 2019.
- [13] J. Baek, M. Jin, S. Han, "A new Adaptive Sliding-mode Control Scheme for Application to Robot Manipulators," IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 63, No. 6, pp. 3628-3637, 2016.
- [14] G. Cho, P. Chang, S. Park, M. Jin, "Robust Tracking Under Nonlinear Friction Using Time-delay Control with Internal Model," IEEE Trans. Control Syst. Technol., Vol. 17, No. 6, pp. 1406-1414, 2009.
- [15] J. Baek, W. Kwon, C. Kang, "A new Widely and Stably Adaptive Sliding-mode Control with Nonsingular Terminal Sliding Variable for Robot Manipulators," IEEE Access, Vol. 8, pp. 43443-43454, 2020.
- [16] B. Brahmi, M. Saad, C. Ochoa-Luna, H. Rahman, A. Brahmi, "Adaptive Tracking Control of an Exoskeleton Robot with Uncertain Dynamics Based on Estimated Time-delay Control," IEEE/ASME Trans. Mechatronics, Vol. 23, No. 2, pp. 575-585, 2018.
- [17] J. Baek, S. Cho, S. Han, "Practical Time-delay Control with Adaptive Gains for Trajectory Tracking of Robot Manipulators," IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 65, No. 7, pp. 5682-5692, 2018.
- [18] J. Baek, W. Kwon, B. Kim, S. Han, "A Widely Adaptive Time-delayed Control and its Application to Robot Manipulators," IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 66, No. 7, pp. 5332-5342, 2019.
- [19] H. Khalil, A. Saberi, "Adaptive Stabilization of a Class of Nonlinear Systems Using High-gain Feedback," IEEE Trans. Automat. Control, Vol. 32, No. 11, pp. 1031-1035, 1987.

Jaemin Baek (백재민)



2012 Department of Mechanical Engineering from Korea University (B.S.)
 2018 Department of IT Engineering from POSTECH (Ph.D.)
 2020~Department of Mechanical Engineering at Gangneung-Wonju Nat'l University (Assistant Professor)

Career:

2018~2020 Senior Researcher, Agency for Defense Development
 Field of Interests: Nonlinear control, Adaptive/Robust control, Attitude control, Robotic, Gimbal, Missile, Synthetic aperture radar (SAR) satellite systems, and Artificial intelligence (AI)
 Email: jmbaek@gwnu.ac.kr

Minseok Kang (강민석)



2013 Division of Electrical and Computer Engineering from Ajou University (B.S.)
 2015 Division of Electrical and Electronic Engineering from POSTECH (M.S.)
 2019 Division of Electrical and Electronic Engineering from POSTECH (Ph.D.)
 2020~Division of Electrical, Electronic, and Control Engineering at Kongju Nat'l University (Assistant Professor)

Career:

2019~2020 Senior Researcher, Agency for Defense Development
 Field of Interests: Radar signal processing, Antenna pattern synthesis, InSAR processing, Compressive sensing and its application
 Email: mskang@kongju.ac.kr