

접촉 위치 불확실성 환경에서 어드미턴스 필터와 ASMC를 이용한 초기 힘 오버슈트 억제

오세직*, 권남규**

Suppressing Initial Force Overshoot using Admittance Filter and ASMC under Contact Location Uncertainty

Sejik Oh*, Nam Kyu Kwon**

본 과제(결과물)는 2025년도 교육부 및 경상북도의 재원으로 경북RISE센터의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심
대학지원체계(RISE)의 결과입니다(2025-RISE-15-115)

요 약

본 논문은 접촉면 위치 추정 오차로 인해 발생하는 초기 힘 제어 구간의 오버슈트를 완화하기 위한 제어 방법을 제안한다. 제안하는 기법은 기존 어드미턴스 기반 외부 힘 제어 구조에 ASMC(Adaptive Sliding Mode Control) 기반 보상 항을 추가하여 충격을 완화한다. 또한, 모델 불확실성이 존재하는 환경에서도 정밀한 위치 추종을 보장하기 위해 TDC(Time-Delay Control) 기반 내부 위치 제어기를 결합한 계층적 제어 구조를 설계한다. 시뮬레이션 결과, 제안 기법은 기존 방식 대비 최대 오버슈트를 76.6 %에서 32.1 %로 감소시키고, 피크 타임은 0.254 s에서 0.126 s로 단축하였다. 또한, 정착시간은 2% 기준 3.51 s에서 1.467 s, 5 % 기준 2.113 s에서 0.832 s로 단축하여 과도응답 특성과 수렴 속도를 향상시켰다.

Abstract

This paper proposes a control method to mitigate initial force overshoot caused by contact surface position estimation errors. The proposed method adds a compensation term based on Adaptive Sliding Mode Control (ASMC) to a conventional admittance control structure. Also, to maintain position tracking performance under model uncertainty, a hierarchical control structure is designed by combining a Time-Delay Control (TDC)-based internal position controller. Simulation results show that the proposed method reduces the maximum overshoot from 76.6% to 32.1% compared to conventional admittance control, and shortens the peak time from 0.254 s to 0.126 s. Furthermore, the settling time is reduced from 3.51 s to 1.467 s at the 2% criterion and from 2.113 s to 0.832 s at the 5% criterion, improving transient response stability and convergence speed.

Keywords

robot arm force control, admittance control, time-delay control, adaptive sliding mode control

* 영남대학교 로봇AI융합학과 석사과정
- ORCID: <http://orcid.org/0009-0004-6873-9634>
** 영남대학교 전자공학과 교수(교신저자)
- ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9071-4837>

· Received: Feb. 09, 2026, Revised: Apr. 08, 2026, Accepted: Apr. 11, 2026
· Corresponding Author: Nam Kyu Kwon
Dept. of Electronic Engineering, Yeungnam University, 280
Daehak-ro, Gyeongsan-si, Gyeongsangbuk-do, 38541, Korea
Tel.: +82-53-810-3095, Email: namkyu@yu.ac.kr

1. 서 론

최근 산업용 로봇과 협동 로봇은 단순 반복 작업을 넘어서 조립 자동화, 사람과의 상호작용을 통한 서비스 기능 등 사람이나 환경과의 직접 접촉이 수반되는 작업으로 확장되고 있다[1][2]. 이러한 접촉 작업에는 로봇 엔드이펙터의 위치 추종 성능뿐 아니라, 작업 대상에 가해지는 접촉 힘을 원하는 값으로 정밀하게 제어하는 것이 필수적이다. 특히 취약한 대상이나 사람과 근접 협동이 필요한 상황에서는 순간적인 힘 오버슈트가 안전과 직결된다[3]-[5]. 따라서, 접촉 초기 과도 응답을 억제하면서 목표 힘을 추종하는 제어 구조가 요구된다.

힘 제어를 위한 대표적 방법에는 임피던스 제어(Impedance control)와 어드미턴스 제어(Admittance control)가 널리 사용된다. 임피던스 제어는 원하는 동역학적 특성을 질량, 감쇠, 강성으로 설정하고, 위치 오차로부터 출력 힘을 생성하는 방식으로, 토크 제어형 로봇에 주로 활용된다. 반면, 대부분의 협동 로봇은 위치 제어형 구조를 내부 제어기로 사용하기 때문에, 원하는 힘 응답을 얻기 위한 위치 명령을 도출하는 어드미턴스 제어가 실용적인 접근법으로 주목받아 왔다[6][7]. 어드미턴스 제어는 힘 오차를 입력으로 하는 2차 필터를 통해 위치 보상량을 생성하고, 이를 목표 위치 궤적에 합함으로써, 내부 위치 제어기 구조를 크게 변경하지 않고도 힘 제어 기능을 부여할 수 있다는 장점이 있다.

그러나, 기존 어드미턴스 기반 힘 제어 연구는 대체로 접촉 환경의 기하학적 위치를 정확히 아는 것으로 가정하는 경우가 많다. 실제 현장에서는 센서 오차, 자세 추정 오차, 작업물 편차 등으로 인해 접촉면 위치 추정에 불확실성이 존재하며, 이때 엔드이펙터가 실제 접촉면에 필요 이상으로 더 깊은 위치를 추종하게 되면 목표 힘을 초과하는 접촉 힘이 발생하게 되는 문제가 있다. 기존 연구에서도 환경 위치 x_e 에 대한 추정 오차가 존재하는 경우, 초기 접촉 시 힘 오버슈트를 근본적으로 억제하기 어렵다는 한계를 보여준다[8].

한편, 로봇의 동역학에 존재하는 불확실성과 외란 등의 요소들로 인해, 모델 기반 위치 제어기만으로는 충분한 추종 성능을 확보하기 어렵다. 이를 보

완하기 위해 TDC(Time-Delay Control)와 같은 비모델 기반 강인 제어 기법이 활발히 연구되어 왔다[9]. TDC는 이전 시점의 토크 및 상태 정보를 이용하여 미지의 동역학을 등가 외란으로 추정하고 보상함으로써, 복잡한 모델 식을 사용하지 않고도 우수한 위치 추종 성능을 달성할 수 있는 기법이다. 또한, TDC 기반 내부 위치 제어기와 어드미턴스 제어를 결합하여, 동역학과 접촉 환경 강성의 불확실성이 존재하는 환경에서 힘과 위치 동시 추종 제어를 수행하는 구조도 제안되었다[8]. 다만, 이러한 결합 구조는 동역학 불확실성에 초점이 맞춰져 있으며, 접촉면 위치 추정 오차로 인한 접촉 초기 힘 오버슈트를 줄이기 위한 추가적인 기법이 필요하다.

비선형 강인 제어 관점에서는 슬라이딩 모드 제어(SMC, Sliding Mode Control)가 확실한 시스템에서 강인성을 확보하는 대표적인 기법으로 알려져 있으며, 특히, ASMC(Adaptive SMC) 기법은 외란 상계나 모델 파라미터를 사전에 정확히 알지 못하더라도, 슬라이딩 이득을 온라인으로 조정함으로써 슬라이딩 조건을 만족시키고, 슬라이딩면 근방의 작은 영역으로 수렴시킬 수 있다는 장점을 가진다[10]. 이러한 특성 때문에 ASMC는 로봇 매니퓰레이터의 관절 공간 토크 제어, TDC의 잔여 오차 보상, 마찰 및 모델링 오차 보상 등에 적용되어 동역학적 특성의 불확실성과 외란에 대한 강인성을 향상하는 데 활용되어 왔다[11][12].

본 연구에서는 이러한 배경을 바탕으로, 접촉면 위치 추정 오차로 인해 발생하는 초기 힘 오버슈트를 완화하기 위해, 어드미턴스 필터 기반 외부 힘 제어 구조에 ASMC 기반 보상 항을 추가한 계층적 구조를 제안한다. 어드미턴스 필터가 생성한 위치 보상 $x_a(t)$ 에 힘 오차를 슬라이딩 변수로 사용하는 ASMC를 통해 추가 보상 항 $x_s(t)$ 을 생성하고, 이를 접촉 방향 명령 위치에 반영하여 접촉 초기 과도응답을 빠르게 완화한다. 내부 위치 제어기는 기존 위치 제어형 로봇의 구성을 고려하여 역기구학을 통해 생성된 목표 관절각을 입력으로 하는 PID와 TDC 기반의 구조를 유지함으로써, 모델 불확실성 하에서도 위치 추종 성능이 저하되지 않도록 한다.

마지막으로, 시뮬레이션을 통해 제안된 구조를 기존 어드미턴스 기반 방법과 비교하여, 초기 접촉 힘 오버슈트 감소와 힘과 위치 동시 추종 성능을 검증한다.

II. 제안된 제어 구조

2.1 로봇 및 환경 모델

본 논문에서는 n 자유도를 갖는 로봇 매니퓰레이터를 고려하며, 관절각 벡터를 $q_t \in \mathbb{R}^n$, 관절 속도와 가속도를 각각 $\dot{q}_t, \ddot{q}_t \in \mathbb{R}^n$ 로 정의한다. 관절 공간에서 로봇의 동역학은 식 (1)과 같이 표현된다.

$$M(q_t)\ddot{q}_t + C(q_t, \dot{q}_t)\dot{q}_t + G(q_t) + F(\dot{q}_t) = \tau_t \quad (1)$$

여기서 $M(q_t), C(q_t, \dot{q}_t) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 는 각각 관성, 코리올리 행렬이며, $G(q_t), F(\dot{q}_t) \in \mathbb{R}^n$ 는 중력, 마찰 벡터, $\tau_t \in \mathbb{R}^n$ 는 입력 토크 벡터를 나타낸다.

로봇 엔드이펙터의 위치 $p_t = (x_t, y_t, z_t)$ 에서 엔드이펙터가 환경과 접촉하는 방향을 x_t 라 두고, 접촉 힘을 $f_{t,ext} = K_e(x_t - x_e)$ 로 나타낸다. K_e 는 환경 강성으로, 시뮬레이션을 위해 알려진 값으로 설정한다. 그리고, 접촉 환경의 실제 위치 x_e 를 추정하는

데에는 오차가 존재한다고 가정하여, 접촉 구간에서 오버슈트가 발생하도록 유도한다.

2.2 내부 위치 제어기 구조

본 연구에서 제안하는 제어 시스템은 그림 1과 같이 외부 루프에서 힘 제어를 수행하고, 내부 루프에서는 관절 공간 위치 제어를 수행하는 계층 구조를 갖는다.

우선 내부 제어기는 외부 루프에서 생성된 카르테시안 공간상의 최종 명령 위치 $p_{t,d}$ 를 목표 관절각 궤적 $q_{t,d} \in \mathbb{R}^n$ 로 변환하는 역기구학 연산을 수행한다. 이후, 위치 제어기는 $q_{t,d}$ 를 입력으로 받아, 실제 관절각 q_t 가 이를 추종하도록 제어한다.

하지만, 식 (1)에서 정의된 각 항에 대한 정확한 모델링이 현실적으로 불가능하고, 외란 및 비모델 동역학이 존재하기 때문에, 모델 기반 제어만으로는 원하는 추종 성능을 확보하기 어렵다. 따라서, 이 과정에서 TDC 기법을 적용한다. 우선 식 (1)의 로봇 동역학을 TDC 적용에 적합한 형태로 재정의하면 식 (2)와 같다.

$$\ddot{q}_t = H_t + \hat{M}^{-1}\tau_t \quad (2)$$

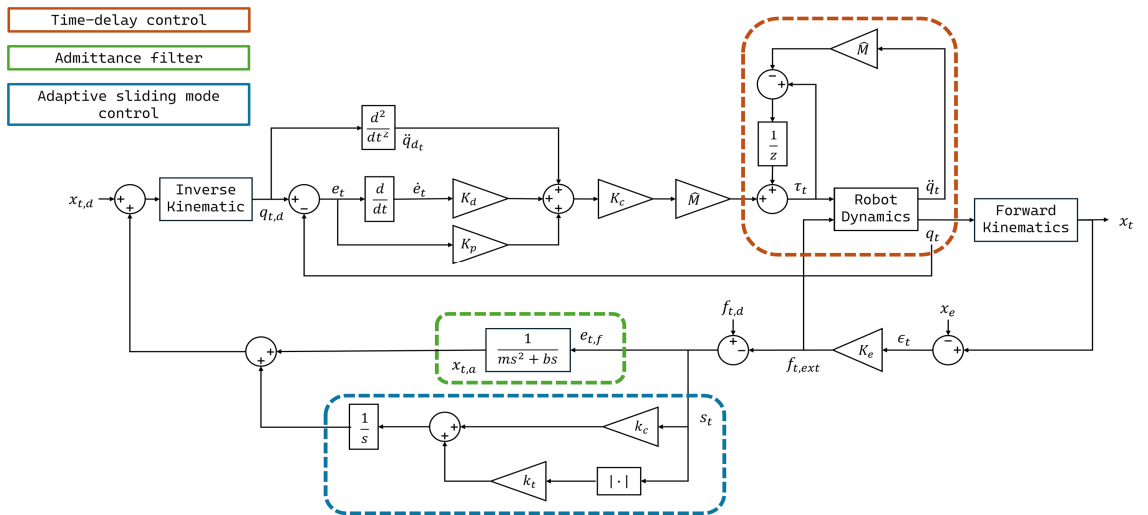


그림 1. 오버슈트 억제를 위한 제안된 제어 시스템 구조

Fig. 1. Proposed control system architecture for overshoot suppression

여기서 $\hat{M}$ 은 양의 대각 행렬 형태의 제어 이득 행렬이며, H_t 는 실제 동역학과 외란을 포함한 비선형 항이다. TDC에서는 H_t 를 직접 모델링하지 않고, 이전 시점의 정보로부터 등가 외란을 추정하는 방식을 사용한다. 샘플링 주기를 L 이라 하면, 이전 시점의 정보로부터 H_t 는 식 (3)과 같이 근사할 수 있다.

$$\hat{H}_t = \ddot{q}_{t-L} - \hat{M}^{-1}\tau_{t-L} \quad (3)$$

이때, $L \approx 0$ 일수록 추정 오차 $\delta_t = H_t - \hat{H}_t$ 는 작아지며 유계가 된다.

이후, $q_{t,d}$ 에 대한 추종 오차를 $e_t = q_{t,d} - q_t$, $\dot{e}_t = \dot{q}_{t,d} - \dot{q}_t$ 로 정의하면, TDC 기반 제어기의 입력 토크 τ_t^{TDC} 는 식 (4)와 같이 설계할 수 있다.

$$\tau_t^{TDC} = -\hat{M}\ddot{q}_{t-L} + \tau_{t-L} + \hat{M}(\ddot{q}_{t,d} + K_d\dot{e}_t + K_p e_t) \quad (4)$$

여기서 K_d, K_p 는 양의 대각 이득 행렬이다. 식 (2)에 (4)를 대입하면, 관절 오차 동역학은 식 (5)와 같이 표현된다.

$$\ddot{e}_t + K_d\dot{e}_t + K_p e_t + \delta_t = 0 \quad (5)$$

이상적으로 $\delta_t = 0$ 인 경우, K_p 와 K_d 는 각 성분이 양수인 대각 행렬이므로, 식 (5)는 안정한 2차 선형 시스템의 형태를 갖는다.

2.3 어드미턴스 기반 외부 힘 제어기 구조

외부 루프에서는 환경과의 접촉 방향 x_t 에 대해 원하는 접촉 힘 $f_{t,d}$ 와 $f_{t,ext}$ 을 입력으로 받아, 내부 위치 제어기에 전달되는 $p_{t,d}$ 를 생성한다.

우선 힘 오차 $e_{t,f} = f_{t,d} - f_{t,ext}$ 를 정의하며, 이는 어드미턴스 필터의 입력으로 사용된다. 어드미턴스 필터는 힘 제어를 위한 위치 보상항 $x_{t,a}$ 를 생성하는 2차 시스템이며, 식 (6)과 같이 설계한다.

$$e_{t,f} = m\ddot{\epsilon}_t + b\dot{\epsilon}_t + k\epsilon_t \quad (6)$$

여기서 m, b 와 k 는 각각 가상 관성, 감쇠와 강성 계수이며, $\epsilon = x_t - x_e$ 이다. 식 (6)에 라플라스 변환을 적용하여, 어드미턴스 필터의 전달함수는 식 (7)과 같이 얻어진다.

$$X_a(s) = \frac{1}{ms^2 + bs + k} E_f(s) \quad (7)$$

여기서 $X_a(s)$ 는 힘 오차에 기반한 위치 보상 항의 라플라스 변환이며, $E_f(s)$ 는 힘 오차의 라플라스 변환이다. [8]에서 언급된 것처럼, $k \neq 0$ 이면, 정상 상태에서 힘 추종 값에 오프셋이 발생할 수 있다. 그러므로 정상 상태 오프셋을 방지하기 위해, 식 (8)과 같이 $k = 0$ 인 어드미턴스 필터 형태를 채택한다.

$$X_a(s) = \frac{1}{ms^2 + bs} E_f(s) \quad (8)$$

이에 따라, 기존 어드미턴스 필터 기반 힘 제어기를 통한 최종 목표 궤적은 식 (9)와 같이 정의된다.

$$x_{t,d} = x_{t,cmd} + x_{t,a} \quad (9)$$

즉, 힘 오차가 발생하는 경우, 어드미턴스 필터에서 생성된 보상 항 $x_{t,a}$ 가 기본 위치 명령 $x_{t,cmd}$ 에 더해져, 로봇이 접촉 방향으로 더 깊거나 덜 깊게 이동함으로써 $f_{t,d}$ 를 추종하도록 한다.

2.4 ASMC + 어드미턴스 기반 힘 제어기 구조

앞에서 소개한 어드미턴스 기반 힘 제어 구조에 ASMC를 결합하여, 환경 위치 오차가 존재하는 경우에 접촉 구간에서 발생하는 힘 오버슈트를 완화하는 구조를 제시한다. ASMC의 기본 구조와 적용 법칙은 선행 연구에서 제안된 형태를 참고하되, 본 연구에서는 외부 힘 제어 루프에 적용하는 형태로 재구성한다.

기존 어드미턴스 기반 힘 제어기의 접촉 방향 명

령 위치는 식 (9)와 같으며, 내부 제어기의 입력으로는 $p_{t,d} = (x_{t,d}, y_{t,d}, z_{t,d})$ 가 사용된다. 여기서, 초기 접촉 힘 오버슈트를 억제하기 위해, 접촉 방향 명령을 식 (10)과 같이 확장한다.

$$x_{t,d} = x_{t,cmd} + x_{t,a} + x_{t,s} \quad (10)$$

$x_{t,s}$ 는 ASMC에 의해 생성되는 비선형 보상으로, 힘 오차를 줄이는 방향으로 명령 위치를 빠르게 조정하는 역할을 한다. 내부 위치 제어기의 추종 성능이 충분히 빠르다고 가정하면, x_t 는 식 (11)과 같이 정의할 수 있다.

$$x_t = x_{t,cmd} + x_{t,a} + x_{t,s} + \delta_t \quad (11)$$

여기서 δ_t 는 위치 추종 오차를 의미한다. 식 (11)으로 $e_{t,f} = f_{t,d} - K_e(x_t - x_e)$ 를 표현하면 힘 오차는 식 (12)와 같이 표현된다.

$$e_{t,f} = -K_e x_{t,s} + [f_{t,d} - K_e(x_{t,cmd} + x_{t,a} - x_e)] - K_e \delta_t \quad (12)$$

따라서 $e_{t,f}$ 와 $x_{t,s}$ 의 관계는 식 (13)과 같이 표현되며

$$e_{t,f} = -K_e x_{t,s} + \Delta_t + \omega_t \quad (13)$$

이때, $\Delta_t = f_{t,d} - K_e(x_{t,cmd} + x_{t,a} - x_e)$, $\omega_t = -K_e \delta_t$ 이다. 제어 입력 $u_t = \dot{x}_{t,s}$ 로 정의하고, 식 (13)를 미분하면, 식 (14)와 같이 정리된다.

$$\dot{e}_{t,f} = -K_e u_t + d_t \quad (14)$$

여기서, $d_t = \dot{\Delta}_t + \dot{\omega}_t$ 를 외란 및 추종 오차를 포함하는 항으로 정의하며, $|d_t| \leq \bar{d}$ 를 만족한다고 가정한다.

슬라이딩 변수를 $s_t = e_{t,f}$ 로 정의하면 식 (14)는 $\dot{s}_t = -K_e u_t + d_t$ 로 쓸 수 있다. u_t 는 식 (15)와 같은 ASMC 형태로 설계한다.

$$u_t = k_c s_t + k_t \text{sgn}(s_t) \quad (15)$$

여기서 $k_c > 0$ 는 선형 피드백 이득, $k_t \geq 0$ 는 시간에 따라 조정되는 적응 이득이다. 식 (15)를 식 (14)에 대입하면, s_t 의 동역학은 식 (16)과 같이 얻어진다.

$$\dot{s}_t = -k_c s_t - k_t \text{sgn}(s_t) + d_t \quad (16)$$

적응 이득 k_t 는 선행 연구[12]의 구조를 참고하여, 식 (17)과 같이 설정한다.

$$\dot{k}_t = \begin{cases} \psi |s_t|, & |s_t| \geq \gamma \\ -\frac{0.1}{L} k_t \frac{|s_t|}{\gamma}, & |s_t| < \gamma \end{cases} \quad (17)$$

여기서 $\psi > 0$ 는 적응률, γ 는 $|s_t|$ 의 경계층을 나타내는 양수이다. 경계층 밖 구간에서는 k_t 가 증가하여 강인한 슬라이딩 동작을 유도하고, 경계층 안 구간에서는 k_t 가 감소하여 과도한 이득에 의한 진동을 억제한다.

제안한 ASMC에서 $k_c > 0$ 는 경계층 내부에서의 선형 수렴 속도를 결정한다. 적응 법칙 $\dot{k}_t$ 에서 γ 는 경계층 두께로서 채터링 억제와 정상 상태 안정도의 균형을 조절하고, ψ 는 경계층 밖에서 k_t 가 증가하는 속도를 결정한다. 이에 따라, γ 는 접촉 힘 신호의 정상 상태 측정 잡음보다 충분히 크게 설정하여 불필요한 이득 변동과 진동을 억제하고, ψ 는 접촉 초기 구간에서 요구되는 오버슈트 억제 속도에 맞추어 증가시키되, 과도한 값에서는 진동이 유발될 수 있으므로 단계적으로 조정한다. 최종적으로, u_t 를 적분하여 얻어지는 $x_{t,s}$ 와 함께 $x_{t,d}$ 를 생성한다.

가정 1. $|d_t| \leq \bar{d}$ 를 만족한다.

정리 1. 유한 시간 내에 s_t 는 경계층 안 구간으로 진입하며, 그 궁극적 유계성은 식 (18)과 같이 나타낼 수 있다:

$$|s_t| \leq \sqrt{\gamma^2 + \frac{\bar{k}}{\psi}} \quad (18)$$

여기서 $\bar{k}^* \geq (k_t - \bar{k})^2$

증명

Lyapunov 함수 후보를 식 (19)와 같이 정의한다.

$$V_t = \frac{1}{2}s_t^2 + \frac{1}{2\psi}(k_t - \bar{k})^2 \quad (19)$$

여기서 $\bar{k} > 0$ 은 임의의 양의 상수이다. V_t 는 s_t 와 k_t 에 대해 양의 정부호를 갖는다. 식 (19)를 시간에 대해 미분하면 $\dot{V}_t$ 는 식 (20)과 같이 주어진다.

$$\dot{V}_t = s_t^T s_t + \frac{1}{\psi}(k_t - \bar{k})\dot{k}_t \quad (20)$$

식 (16)을 식 (20)에 대입하면, $\dot{V}_t$ 는 식 (21)과 같이 정리된다.

$$\dot{V}_t = -k_c s_t^2 - k_t |s_t| + s_t d_t + \frac{1}{\psi}(k_t - \bar{k})\dot{k}_t \quad (21)$$

가정 1에 의해 $|s_t d_t| \leq |s_t| \bar{d}$ 가 되며, 식 (21)은 식 (22)와 같은 상계 형태로 정리된다.

$$\dot{V}_t \leq -k_c s_t^2 - k_t |s_t| + |s_t| \bar{d} + \frac{1}{\psi}(k_t - \bar{k})\dot{k}_t \quad (22)$$

경계층 밖, $|s_t| \geq \gamma$

이 영역에서는 식 (17)의 적응 법칙에 의해 $\dot{k}_t = \psi |s_t|$ 이므로, 이를 식 (22)에 대입하면 식 (23)을 얻는다.

$$\dot{V}_t \leq -k_c s_t^2 - k_t |s_t| + |s_t| \bar{d} + (k_t - \bar{k}) |s_t| \quad (23)$$

여기서 $\bar{k} = \bar{d}$ 로 선택하면 식 (23)은 식 (24)와 같이 단순화되며, 이를 통해 경계층 밖에서는 V_t 가 단조 감소함을 알 수 있다.

$$\dot{V}_t \leq -k_c s_t^2 \leq 0 \quad (24)$$

경계층 안, $|s_t| < \gamma$

이 영역에서 $\dot{k}_t = -\frac{1}{L} k_t \frac{|s_t|}{\gamma} \leq 0$ 인데, 이 경우에 $\dot{V}_t$ 의 부호가 항상 음수임이 보장될 수 없다. 따라서, UUB(Uniform Ultimate boundedness) 개념을 이용하여 s_t 에 대한 상한을 유도한다. 우선, 식 (19)으로부터, V_t 와 s_t 의 관계는 식 (25)와 같이 주어진다.

$$\frac{1}{2}s_t^2 \leq V_t \leq \frac{1}{2}s_t^2 + \frac{1}{2\psi}(k_t - \bar{k})^2 \quad (25)$$

또한, 해당 영역에서 $\dot{k}_t \leq 0$ 이므로, k_t 는 유한한 상한을 가지고, $\bar{k}^* \geq (k_t - \bar{k})^2$ 를 정의하면 식 (26)을 얻을 수 있다.

$$\frac{1}{2}s_t^2 \leq V_t \leq \frac{1}{2}s_t^2 + \frac{1}{2\psi}\bar{k}^* \quad (26)$$

따라서 s_t 에 대한 상한은 식 (27)과 같이 정리된다.

$$|s_t| \leq \sqrt{\gamma^2 + \frac{\bar{k}^*}{\psi}} \quad (27)$$

이 부등식으로부터, s_t 는 UUB이다.

III. 실험 결과 및 고찰

3.1 실험 환경 세팅

시뮬레이션 실험은 로봇 엔드이펙터의 위치 추종과 힘 추종 성능을 평가하기 위해 수행된다. 실험 환경은 MATLAB Simulink와 Robotics System Toolbox를 이용하여 구성된다. 이 연구의 실험 환경은 그림 2에서 볼 수 있으며, 로봇 팔 모델은 3-link 구조를 따르고, 각 Link n은 joint n에 연결되어 있다. Link 0의 무게는 30 kg, 길이는 0.66 m이다. Link 1의 무게는 17.4 kg, 길이는 0.43 m이며, Link 2의 무게는 4.8 kg, 길이는 0.43 m이다. 각 joint와 link 사이의 마찰력은 모두 $3\dot{q}_n + 5\text{sgn}(\dot{q}_n)$ 으로 정의한다. 로봇 팔의 초기 관절 각도는 $[0, \pi/4, -\pi/4]^T$ 로 설정되며, 엔

드라이팩터가 x_e 에 위치한 가상의 벽에 접촉한 상태이다. 엔드이펙터는 z 축을 따라 $\sin(t)$ 함수의 궤적을 따라가도록 $p_{t,cmd}$ 가 설정되며, x 축을 따라 10 N의 힘을 가하도록 f_d 가 설정된다. 여기서, 환경 위치 추정 오차에 의한 오버슈트를 발생시키기 위해, $x_{t,cmd}$ 를 $x_e + 0.01$ m로 설정한다.

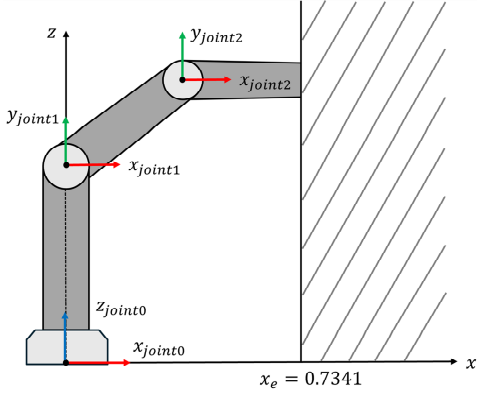


그림 2. 로봇 팔과 가상의 접촉 환경에 대한 묘사

Fig. 2. Description of a robotic arm and a virtual contact environment

3.2 실험 결과 비교

실험은 기존 어드미턴스 필터 기반 힘 제어 기법, 어드미턴스 필터와 PD 제어기 결합 기법, 그리고 제안된 어드미턴스 필터와 ASMC 기반 힘 제어 기법에 대해 진행한다. 우선, 세 가지 기법에 대하여 접촉 힘 추종 성능을 비교하고, 기존 어드미턴스 필터 사용 기법과 제안된 기법에 대해서는 각 세부 성능을 비교한다. 각 실험에서 사용되는 내부 제어기는 식 (4)를 기반으로 하며, 실제 시뮬레이션에서는 제어 입력을 식 (28)과 같이 사용한다:

$$\tau_t^{TDC} = -\hat{M}\ddot{q}_{t-L} + \tau_{t-L} + \hat{M}K_c(\ddot{q}_{d,t} + K_d\dot{e}_t + K_p e_t) \quad (28)$$

여기서, K_c 는 토크 상수 행렬이다, 그리고, $\hat{M} = 0.1I_n$, $K_c = 20I_n$, $K_d = 650I_n$, $K_p = 700I_n$ 로 설정되었다. 또한, 각 실험의 외부 루프에서 모두 사용되는 식 (8)의 어드미턴스 필터 계수는 [8]을 참고하여 $m = 1$, $b = 800$ 로 설정한다.

제안된 어드미턴스 필터와 ASMC 기반 힘 제어 기법을 사용하는 실험에서는 외부 루프에서 식 (10)을 이용하여 힘 제어를 위한 목표 위치를 설정한다. 목표 위치 설정을 위해 사용되는 식 (15)에서 $k_c = 0.002$, 식 (17)에서 $\psi = 0.002$, $\gamma = 0.1$, $L = 0.001$ 로 설정한다.

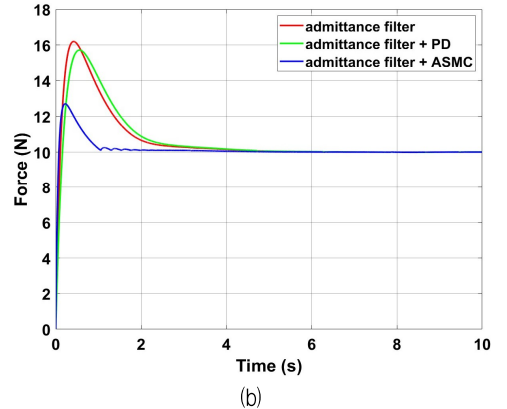
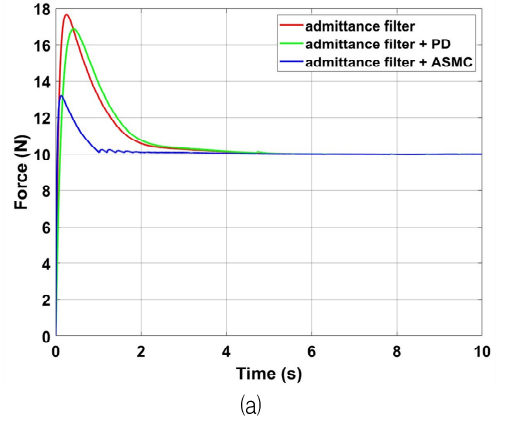


그림 3. 접촉 힘 비교 (a) $k_e = 10000$, (b) $k_e = 5000$

Fig. 3. Comparison of exerted force

(a) $k_e = 10000$, (b) $k_e = 5000$

그림 3(a)와 (b)는 각 기법에 대해, 환경 강성을 10000과 5000으로 설정하여 접촉 힘 추종 성능을 비교한 것이다. 그림 3(a)에서, 기존 기법은 오버슈트가 17.6 N, 어드미턴스 필터에 PD 제어기가 추가된 기법은 16.87 N, 그리고 제안된 기법은 오버슈트가 13.21 N으로, 제안된 기법이 오버슈트를 억제한 결과를 확인할 수 있다. 그림 3(b)의 환경 강성이 다른 경우에서도, 제안된 기법의 오버슈트 억제 성능이 높은 것을 확인할 수 있다. 이는 제안된 기법이 오버슈트를

억제하기 위해 접촉 방향과 반대 방향의 보상 항을 생성하는 속도가 기존의 기법보다 조금 더 빠르기에 나타난 결과이며, 그림 4의 기존 기법과 제안 기법에서 나타나는 각 보상 항의 시점 비교를 통해 확인할 수 있다. 즉, 추정 오차를 가진 목표 위치까지 로봇의 엔드이펙터가 도달하기 전에, 제안된 기법이 목표 위치를 빠르게 수정하여 오버슈트가 크게 발생

하지 않도록 한 것이다. 또한, 그림 5에서, 두 기법을 동시에 사용했을 때, 기존 어드미턴스 필터 대비 ASMC 기법이 힘 오차를 줄이기 위한 보상 항을 더 빠르게 출력하는 것을 확인할 수 있다. 그림 6은 두 실험에서 나온 z축 위치 추정 오차이며, 모두 RMSE가 0.1 mm로 ASMC 기법을 추가하여도 위치 추정 성능을 유지함을 확인할 수 있다.

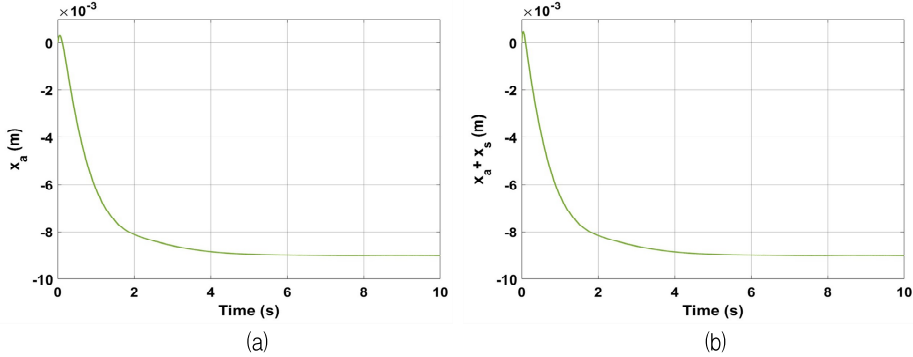


그림 4. 추가 보상 항 비교 (a) Admittance Filter, (b) Admittance Filter + ASMC
Fig. 4. Comparison of additional term (a) Admittance Filter, (b) Admittance Filter + ASMC

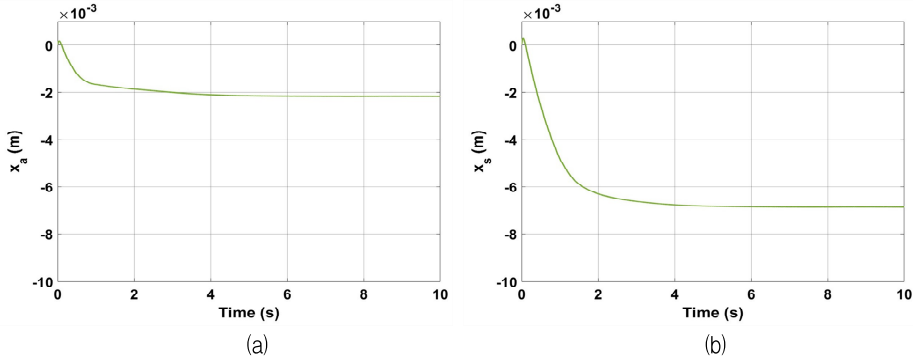


그림 5. Admittance Filter + ASMC 기법 출력 비교 (a) Admittance Filter, (b) ASMC
Fig. 5. Comparison of output of Admittance Filter + ASMC (a) Admittance Filter, (b) ASMC

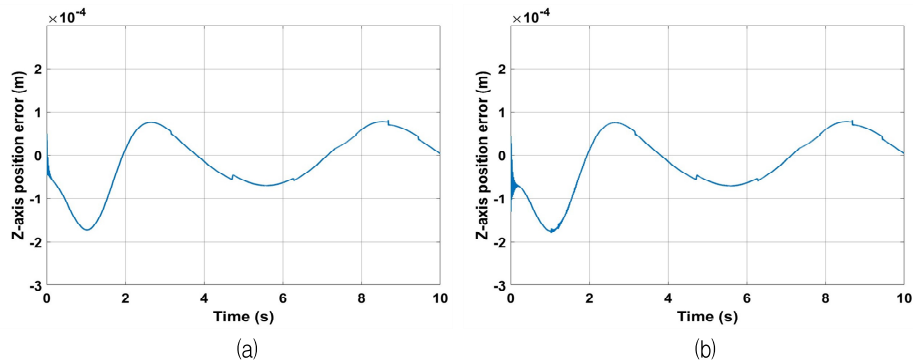


그림 6. Z축 위치 오차 비교 (a) Admittance Filter, (b) Admittance Filter + ASMC
Fig. 6. Comparison of Z-axis position error (a) Admittance Filter, (b) Admittance Filter + ASMC

표 1에서는 오버슈트 성능 지표를 통해 두 실험 결과에서 나타난 최대 오버슈트 비율, 발생 시간, 2 % 및 5 % 기준 정착시간을 비교한다. 최대 오버슈트 비율은 기존 기법에 대비하여 50% 이상 줄어든 것을 확인할 수 있으며, 발생 시간과 정착시간도 모두 단축되어, 과도응답 구간에서의 안정성이 향상되고 목표한 값으로 수렴이 더욱 빠르게 이루어짐을 알 수 있다.

또한, 힘 추종 성능을 정량적으로 평가하기 위해 정상상태 오차와 상승시간을 비교하였다. 정상상태 오차는 기존 기법에서 0.0081 N, 제안된 기법에서 0.0029 N으로 감소하였다. 상승시간은 목표 접촉 힘의 10 %에서 90 %에 도달하는 데 소요된 시간으로 정의하였으며, 기존 기법에서 0.041 s, 제안된 기법에서 0.027 s로 단축되었다.

표 1. 오버슈트 성능 지표를 통한 비교.

Table 1. Comparison using overshoot evaluation metrics

Method	Maximum overshoot	Peak time	Settling time (2 %)	Settling time (5 %)
Admittance control	76.6 %	0.254 s	3.51 s	2.113 s
Admittance control with ASMC (proposed)	32.1 %	0.126 s	1.467 s	0.832 s

IV. 결론 및 향후 과제

본 논문은 접촉면 위치 추정 오차로 인해 힘 제어 초기 구간에서 발생하는 오버슈트 문제를 해결하기 위해 기존 어드미턴스 기반 외부 힘 제어 구조에 ASMC 기반 보상 항을 추가한 기법을 제안하였다. 제안된 구조는 모델 불확실성에 대한 강인성 확보를 위해 TDC 기반 내부 위치 제어기와 결합하여 기존 방법 대비 위치 추종 성능을 유지하였으며, 초기 힘 오버슈트 및 정착시간을 효과적으로 감소시킴을 확인하였다. 특히 시뮬레이션 결과, 제안 기법은 기존 어드미턴스 제어 대비 최대 오버슈트를 76.6 %에서 32.1 %로 감소시키고, 정착시간을 2 % 기준 3.51 s에서 1.467 s, 5 % 기준 2.113 s에서 0.832 s로 감소시켜, 과도 응답 안정성과 수렴 속도 측면에서 유의미한 개선을 보였다.

향후 연구로는 제안한 제어 구조를 실제 협동 로봇과 물리적 접촉 환경에서 구현하여, 초기 접촉 구간에서의 힘 오버슈트 억제 성능과 안정성을 실험적으로 검증하는 과정이 필요하다. 또한, 일반적으로 채택되는 6 자유도 협동 로봇 모델을 기반으로 시뮬레이션 범위를 확장하여, 다양한 접촉 방향과 자세 변화가 존재하는 작업에서도 제안 기법의 일반성을 평가할 필요가 있다.

References

- [1] A. Ajoudani, A. M. Zanchettin, S. Ivaldi, A. Albu-Schäffer, K. Kosuge, and O. Khatib, "Progress and prospects of the human-robot collaboration", *Autonomous Robots*, Vol. 42, No. 5, pp. 957-975, Jun. 2018. <https://doi.org/10.1007/s10514-017-9677-2>.
- [2] M. Farajtabar and M. Charbonneau, "The path towards contact-based physical human-robot interaction", *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 182, pp. 104829, Dec. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2024.104829>.
- [3] P. Chemweno, L. Pintelon, and W. Decre, "Orienting safety assurance with outcomes of hazard analysis and risk assessment: A review of the ISO 15066 standard for collaborative robot systems", *Safety Science*, Vol. 129, pp. 104832, Sep. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104832>.
- [4] L. Roveda, N. Pedrocchi, and L. M. Tosatti, "Exploiting impedance shaping approaches to overcome force overshoots in delicate interaction tasks", *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Vol. 13, No. 5, Oct. 2016. <https://doi.org/10.1177/1729881416662771>.
- [5] A. Bicchi and G. Tonietti, "Fast and "Soft-Arm" Tactics: Dealing with the Safety-Performance Tradeoff in Robot Arms Design and Control", *IEEE Robotics & Automation Magazine*, Vol. 11, No. 2, pp. 22-33, Jun. 2004. <https://doi.org/10.1109/MRA.2004.1310939>.

- [6] A. Q. L. Keemink, H. van der Kooij, and A. H. A. Stienen, "Admittance control for physical human-robot interaction", The International Journal of Robotics Research, Vol. 37, No. 11, pp. 1421-1444, Sep. 2018. <https://doi.org/10.1177/0278364918768950>.
- [7] F. Dimeas and N. A. Aspragathos, "Online Stability in Human-Robot Cooperation with Admittance Control", IEEE Transactions on Haptics, Vol. 9, No. 2, pp. 267-278, Apr. 2016. <https://doi.org/10.1109/TOH.2016.2518670>.
- [8] S. Jung and D.-J. Jeong, "Admittance Force Tracking Control Schemes for Robot Manipulators under Uncertain Environment and Dynamics", International Journal of Control, Automation and Systems, Vol. 19, No. 11, pp. 3753-3763, Nov. 2021. <https://doi.org/10.1007/s12555-020-0959-7>.
- [9] J. Baek, S. Cho, and S. Han, "Practical Time-Delay Control With Adaptive Gains for Trajectory Tracking of Robot Manipulators", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 65, No. 7, pp. 5682-5692, Jul. 2018. <https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2782238>.
- [10] J. Baek, M. Jin, and S. Han, "A New Adaptive Sliding-Mode Control Scheme for Application to Robot Manipulators", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 63, No. 6, pp. 3628-3637, Jun. 2016. <https://doi.org/10.1109/TIE.2016.2522386>.
- [11] H. M. An, J. W. Lee, D. H. Seo, and S. Y. Lee, "An Adaptive Sliding Mode Control With Novel Sliding Variable-Based Adaptive Law for Disturbed Robot Manipulators", IEEE Access, Vol. 12, pp. 165227-165235, Nov. 2024. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3493882>.
- [12] J. Park, W. Kwon, and P. Park, "An Improved Adaptive Sliding Mode Control Based on Time-Delay Control for Robot Manipulators", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 70, No. 10, pp. 10363-10373, Oct. 2023. <https://doi.org/10.1109/TIE.2022.3222616>.

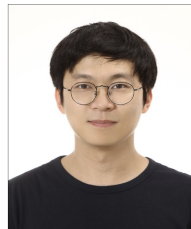
저자소개

오 세 직 (Sejik Oh)



2025년 2월 : 영남대학교
전자공학과(학사)
2025년 3월 ~ 현재 : 영남대학교
로봇AI융합학과 석사과정
관심분야 : 로봇 자동화 기술, 로봇
제어, 강화학습

권 남 규 (Nam Kyu Kwon)



2010년 2월 : 포항공과대학교
전자전기공학과(공학사)
2017년 2월 : 포항공과대학교
전자전기공학과(공학박사)
2017년 2월 ~ 2019년 8월 :
삼성전자 생산기술연구소
책임연구원
2019년 9월 ~ 현재 : 영남대학교 전자공학과 교수
관심분야 : 강인제어, 강화학습