

마스터-슬레이브 조작기의 위치추종-힘반영을 위한 제한 구조 슬라이딩모드 제어

Constrained Structured Sliding Mode Control for Position Tracking-Force Reflection Control of Master-Slave Manipulator

강민석^{1,✉}

Min Sig Kang^{1,✉}

1 경원대학교 기계-자동차공학과 (Department of mechanical and Automotive Engineering, Kyungwon Univ.)

✉ Corresponding author: mskang@kyungwon.ac.kr, Tel: 031-750-5524

Manuscript received: 2010.2.3 / Revised: 2010.7.1,8.25 / Accepted: 2010.10.27

In this study, position tracking and force reflection control of a master-slave manipulator which will be used for handling objects contaminated by radioactivity has been addressed. Since available measurements concerning on dynamic motion of the master-slave manipulator are restricted, a simple constrained control structure was suggested. In the consideration of the uncertain dynamic behaviors of the slave manipulator which is dependent upon mass and shape of work pieces grasped and dynamic properties of the environment contacted, a simple structured sliding mode control was suggested to guarantee robustness with respect to parameter uncertainties and external disturbances. The proposed control was applied to a 1-DOF master-slave link system. The control performances were verified along with some computer simulation results.

Key Words: Telemanipulator (원격조작기), Bilateral Control (양방향제어), Master-Slave (마스터-슬레이브), Sliding Mode Control (슬라이딩모드 제어), Position Tracking (위치추종), Force Reflection (힘반영)

기호설명

α = force reflection ratio

C_e, K_e = environmental contact dynamic parameters

C_h, K_h = hand contact dynamic parameters

J_m, J_s = moment of inertia of master and slave links

θ_m, θ_s = angular positions of master and slave links

θ_h = position angle of hand

τ_{te} = contact torque from environment

τ_{th} = transmitted torque to hand

τ_m, τ_s = control torques of master and slave links

σ = sliding surface

ρ = magnitude of non-linear control input

1. 서론

원격조작기(telemanipulator)는 우주공간, 심해, 원자력발전소 또는 원격수술 등에서 사람 대신 정교한 작업을 위해 사용되고 있다.^{1,2} 본 연구는 방사능 폐기물 처리 장소인 핫셀(hotcell)에서 이용되는 6-자유도 조작기를 대상으로 한다. 이 조작기는 핫셀에서 방사능 폐기물 처리작업을 하는 슬레이브(slave) 조작기와 이를 제어하기 위해 안전한 조종실에 설치되는 마스터(master) 조작기로 이루어진다. 두 조작기는 작업의 정교성과 용이성을 위해 그립퍼(gripper) 부분 이외는 기구학적으로 동일하다. 조작자는 슬레이브 조작기의 작업상태를 카

메라 영상으로 보면서 마스터 조작기를 조종한다.

이 조작기는 양방향제어(bilateral control)를 통해 슬레이브 조작기가 마스터 조작기의 운동을 추종하는 위치추종과 슬레이브 조작기가 주위 환경과 접촉시 전달되는 힘을 조작자가 느끼도록 하는 힘반영이 요구된다.^{3,5} 양방향 제어기는 그 구조에 따라 위치-위치기반제어(position-position based control), 직접힘반향제어(direct force reflection control), 4-채널제어(4-channel control), 컴플라이언스제어(compliance control) 등 여러 제어기 구조가 제안되었다.^{3,6} 힘반영을 위해서는 조작기에 힘센서를 부착하여 직접힘반향제어하는 방식이 일반적이나,⁶ 대상 조작기는 방사능 오염지역에 사용되므로 센서의 고장 확률이 높고, 유지보수에 문제가 있기 때문에 슬레이브 조작기에 센서부착이 제한된다. 따라서 제어에서는 각 링크의 회전각도와 각속도 정보만 가용하므로 적용 가능한 제어기 구조는 또한 한정되어 있다.

슬레이브 조작기는 작업시 파지하는 물체의 질량과 관성이 달라지며, 주위환경과 접촉한 상태와 접촉하지 않은 상태에서의 동적 특성이 달라진다. 그러므로 적용하는 제어기는 이러한 계의 변화에 강인한 특성이 요구된다.

본 연구에서는 이상과 같은 구조적 제한조건을 만족하며, 계의 불확실성에도 불구하고 강인한 위치추종과 힘반영을 구현하기 위해 슬라이딩모드제어(sliding mode control, SMC)를 적용한다. 슬라이딩 모드 제어는 계의 불확실성과 외란에 강인하며, 계의 모델에 관계 없이 낮은 차수의 동특성을 실현할 수 있어 널리 사용되는 제어기 설계방법이다.⁷⁻¹³

현재 6-자유도 조작기는 설계, 제작 중이므로 본 연구에서는 간단한 1-자유도 마스터-슬레이브 링크를 대상으로 하며, 제안된 제어기의 성능은 전산 시뮬레이션을 통해 검증한다. 6-자유도 조작기는 운용시 운동속도가 느리므로 각 링크를 독립적인 1-자유도 모델로 가정할 수 있으며, 따라서 1-자유도에서의 설계 방법은 용이하게 다른 축의 제어에 적용할 수 있다. 단, 원격 양방향제어에서 시간지연은 안정성에 영향을 미치는 주요 요소이나, 본 연구에서는 조작기 제어 전용의 고속컴퓨터를 이용하므로 지연시간은 충분히 짧아 무시토록 한다.

2. 조작기 위치추종-힘반영제어

2.1 조작기 동적 모델

Fig. 1 은 본 연구의 대상인 조작기 중 슬레이브 조작기이며, 총 6-자유도를 갖는다. 마스터 조작기는 슬레이브 조작기와 기구학적으로 동일하나, 단 마스터 조작기의 말단에는 슬레이브 조작기 말단의 그립퍼(gripper)대신 운용자가 손으로 옮겨주고 운용할 수 있도록 핸들이 설치되어 있다.

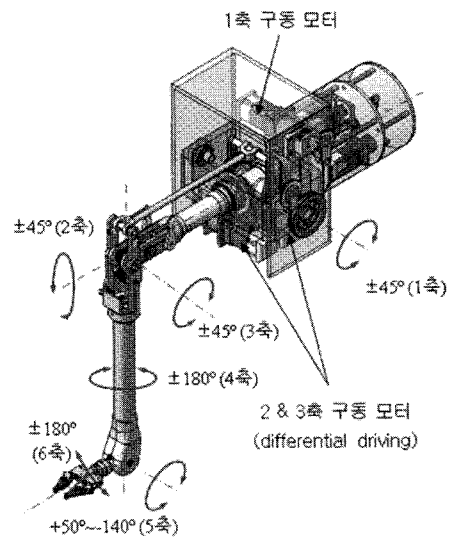


Fig. 1 Schematic of slave manipulator

마스터와 슬레이브 링크는 모두 회전운동을 하지만, 설명의 편의를 위해 Fig. 2 와 같이 등가적 직선운동모델로 나타내도록 한다. Fig. 2 에서 좌측은 운용자가 손으로 마스터 링크를 잡은 경우 동특성, 우측은 슬레이브 링크와 주위환경과의 접촉시 동특성을 나타낸다. 기호에서 아래첨자 m 은 마스터측, s 는 슬레이브측을 의미한다. J_m 과 J_s 는 각각 마스터와 슬레이브 링크의 질량관성모멘트, θ_m 과 θ_s 는 각 링크의 회전각이다. C_h 와 K_h 는 손과 마스터 링크 사이의 동적 특성을 나타내는 댐핑계수와 스프링 상수이며, θ_h 는 손의 회전각이다. τ_m 와 τ_{md} 는 각각 마스터 링크의 제어 토크와 외란 토크를 나타낸다. C_e 와 K_e 는 슬레이브 링크와 환경 사이의 접촉 동역학을 나타내는 댐핑계수와 스프링 상수이며, θ_d 는 슬레이브 링크로부터 주위 환경까지의 각도를 나타낸다. τ_s 과 τ_{sd} 는 각각 슬레이브 링크에 가해지는 제어 토크와 외란 토크이다.

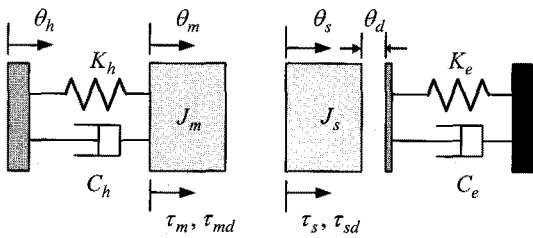


Fig. 2 Master-Slave link model

Fig. 2 에서 환경 스스로의 움직임은 없으며, 초기 각도 θ_d 가 상수일 경우 각 링크의 운동 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 J_m \ddot{\theta}_m + C_h (\dot{\theta}_m - \dot{\theta}_h) + K_h (\theta_m - \theta_h) &= \tau_m + \tau_{md} \\
 J_s \ddot{\theta}_s + \mu (\theta_s - \theta_d) \{ C_e \dot{\theta}_s + K_e (\theta_s - \theta_d) \} &= \tau_s + \tau_{sd}
 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서

$$\mu(\theta) = \begin{cases} 1 & \text{when } \theta > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

이므로 두 번째 식 좌항의 두 번째 요소는 슬레이브 링크가 주위 환경과 접촉이 있을 때만 존재한다. 즉, $\theta_s > \theta_d$ 일 때만 슬레이브 링크와 주위환경의 접촉이 존재함을 나타낸다.

식(1)에서 손과 마스터 링크의 접촉 동역학은 링크를 잡는 힘에 따라 달라지며, 그 특성도 비선형적이다. 또한 슬레이브 링크의 접촉 동역학 역시 접촉하는 환경의 특성에 따라 다르다. 또한 6-자유도 조작기에서는 슬레이브 링크의 그림퍼가 물체를 파지한 경우 링크의 관성 역시 변화하게 된다. 이러한 불확실성을 통합하여 식(1)을 다음과 같이 다시 쓰도록 한다.

$$\begin{aligned}
 J_m \ddot{\theta}_m &= \tau_m + \tau_{md} + \tau_{th} \\
 J_{so} \ddot{\theta}_s &= \tau_s + \tau_{sd} + \tau_{te} + \tau_{su} \\
 \begin{cases} \tau_{th} = -C_h (\dot{\theta}_m - \dot{\theta}_h) - K_h (\theta_m - \theta_h) \\ \tau_{te} = -\mu (\theta_s - \theta_d) \{ C_e \dot{\theta}_s + K_e (\theta_s - \theta_d) \} \\ \tau_{su} = -\Delta J_s \ddot{\theta}_s \end{cases} \\
 J_s &= J_{so} + \Delta J_s
 \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 τ_{th} 는 손에 전달되는 토오크, τ_{te} 는 접촉시 슬레이브 링크에 전달되는 토오크, τ_{su} 는 슬레이브 링크의 관성 변화에 따른 토오크를 나타낸다. J_{so} 는 슬레이브 링크의 공칭회전관성을 나타내며, ΔJ_s 는 부하변화에 따른 회전관성의 변화이다.

2.2 위치추종-힘반영 슬라이딩모드 제어

서론에서 논의한 바와 같이, 연구대상의 마스터-슬레이브 링크는 위치추종과 힘반영이 요구되지만 힘반영을 위한 힘측정 센서를 사용하지 않으며, 각 링크의 위치와 속도 정보만을 측정한다. 이러한 제한 조건에서 힘반영을 위해 다음과 같은 제어입력에 힘반영을 고려하는 간접적인 방법을 적용할 수 있다.

$$\tau_m = -\alpha \tau_s \quad (4)$$

여기서 α 는 상수로 힘반영비이다. 즉, 마스터 링크 제어입력 토오크가 슬레이브 링크 제어입력의 α 배에 해당하도록 한다. 식(4)의 제어기는 링크가 운동하는 중에는 관성, 토크 및 외란 토오크로 인해, 정적평형상태에서는 정적외란토오크 때문에 힘반영 오차가 존재하게 된다.

마스터-슬레이브 위치추종은 손과 마스터 링크, 슬레이브 링크와 주위환경과의 접촉 여부나 슬레이브 링크의 관성변화 및 외란에도 불구하고 정밀하게 유지되어야 하므로 제어기는 강인한 특성이 요구된다. 본 연구에서는 강인한 특성을 갖는 슬라이딩모드 제어를 이용토록 한다.

이상의 논의를 바탕으로 식(3)의 운동방정식을 다음과 같이 상태공간에서 표현토록 한다.

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_1 &= A_1 x_1 + B_{10} \tau_m + B_{10} \{ \tau_{md} + \tau_{th} \} \\
 \dot{x}_2 &= A_2 x_2 + B_{20} \begin{Bmatrix} \tau_m \\ \tau_s \end{Bmatrix} + B_{20} \begin{Bmatrix} \tau_{md} + \tau_{th} \\ \tau_{sd} + \tau_{te} + \tau_{su} \end{Bmatrix} \\
 x_1^T &= [\theta_m \quad \dot{\theta}_m], \quad x_2^T = \begin{bmatrix} t \\ \int e dt & e & \dot{e} \end{bmatrix}, \quad e = \theta_m - \theta_s \\
 A_1 &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_{10} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1/J_m \end{bmatrix} \\
 A_2 &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_{20} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1/J_m & -1/J_{so} \end{bmatrix}
 \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 상태변수벡터 x_1 은 마스터 링크의 회전각과 회전속도로 이루어진 벡터이며, x_2 는 추종 오차 e 와 \dot{e} 의 적분 및 미분으로 구성한다. 여기서 추종오차의 적분을 상태변수에 추가한 이유는 다음 제어기 설계에서 적분제어를 포함시킴으로써 불확실성과 외란에 의한 정상상태 추종오차를 개선하기 위해서이다.

식(4)를 (5)에 대입하고 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= A_1x_1 + B_1u + B_{10}\{\tau_{md} + \tau_{th}\} \\ \dot{x}_2 &= A_2x_2 + B_2u + B_{20}\begin{Bmatrix} \tau_{md} + \tau_{th} \\ \tau_{sd} + \tau_{te} + \tau_{su} \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 $u = \tau_s$ 이며,

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ -\alpha/J_m \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\alpha/J_m - 1/J_{so} \end{bmatrix} \text{ 이다}$$

식(6)에서 실제 외란토크, 전달토크 및 불확실성은 그 크기가 제한되어 있다. 즉, $|\tau_{md} + \tau_{th}| < k_1$, $|\tau_{sd} + \tau_{te} + \tau_{su}| \leq k_2$, $k_1, k_2 \geq 0$. 식(6)에서 위 식은 마스터링크의 운동으로 조작자에 의해 조정되는 운동이며, 아래 식은 위치추종오차 동역학이다.

두 번째 식에서 시스템 행렬 (A_2, B_2) 는 가제어적이며, 행렬 B_2 와 B_{20} 는 $B_{20} = B_2D, D \in R^{1 \times 2}$ 를 만족하는 행렬 D 가 존재하므로 행렬 B_{20} 는 B_2 의 치역(range space)에 해당하여 매칭조건(matching condition)을 만족한다. 따라서 슬라이딩 모드제어를 통해 안정하게 오차응답을 제거할 수 있다.¹³

슬라이딩평면을 다음 식으로 정의한다.

$$\sigma(t) = Sx_2 \quad (7)$$

여기서 함수 σ 는 슬라이딩 평면, $S \in R^{1 \times 3}$ 은 슬라이딩 평면을 정의하는 벡터이다.

슬라이딩 모드제어에서 제어입력은 선형부와 비선형부로 구성된다.¹¹⁻¹³

$$u(t) = u_l(t) + u_n(t) \quad (8)$$

선형부 $u_l(t)$ 은 공칭시스템을 슬라이딩 평면에 유지시키기 위한 입력으로 다음과 같다.¹⁰

$$\begin{aligned} u_l(t) &= Kx_2(t) \\ K &= -(SB_2)^{-1} \{SA_2 + \phi S\} \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 $\phi > 0$ 는 상수이다.

비선형 제어입력 $u_n(t)$ 은 슬라이딩 평면 도달 제어입력으로 다음과 같이 선택할 수 있다.

$$u_n(t) = -\rho(SB_2)^{-1} \text{sgn}[\sigma(t)] \quad (10)$$

여기서 $\text{sgn}[*]$ 는 부호함수이며, 상수 $\rho > 0$ 는 비선형 입력의 크기와 관계된다.

선형제어입력 $u_l(t)$ 을 공칭계에 적용하면 슬라이딩 평면의 동력학은 다음과 같다.

$$\dot{\sigma}(t) + \phi\sigma(t) = 0 \quad (11)$$

따라서 ϕ 는 주어진 계가 초기상태로부터 슬라이딩 평면에 도달되는 빠르기와 관계된다.

제어입력의 도달법칙(reachability) 만족성을 분석하기 위해 함수 $V(t) = 0.5\sigma(t)^2$ 를 정의하고, 이 함수의 도함수를 구한다.¹²

$$\dot{V}(t) = \sigma(t)\dot{\sigma}(t) = -\sigma(t)\{\phi\sigma(t) + \rho \text{sgn}[\sigma] - SB_{20}\xi\} \quad (12)$$

여기서 $\xi = \begin{Bmatrix} \tau_{md} + \tau_{th} \\ \tau_{sd} + \tau_{te} + \tau_{su} \end{Bmatrix}$ 이다.

식(12)의 도함수가 음이 되기 위해서는 ρ 가 다음을 만족해야 된다.

$$\rho > |SB_{20}\xi| \quad (13)$$

식(6)에서 외란과 불확실성은 그 크기가 제한되어 있으므로, ξ 의 Euclidian 노름(norm) 역시 크기가 제한된다. 따라서 식(13)을 만족하는 ρ 를 선정하면 식(12)의 도함수가 음이 되어 도달법칙을 만족하게 된다.

결론적으로 식(13)을 만족하는 ρ 를 갖는 식(10)의 도달제어입력과 식(9)의 선형제어입력으로 이루어진 식(8)의 제어를 적용하면 계의 응답은 어떠한 초기조건에서도 일정 시간 후에 슬라이딩 평면에 도달되며, 슬라이딩 평면에 도달된 후 슬라이딩 평면을 따라 원점으로 수렴하게 된다. 즉, 위치추종성능이 보장된다.

이와 같은 이상적인 슬라이딩모드 제어가 실현 될 경우 식(6)의 첫 번째 식인 마스터 링크의 운동은 다음과 같다.

$$J_m \ddot{\theta}_m + C_h \dot{\theta}_m + K_h \theta_m = -\alpha u + C_h \dot{\theta}_h + K_h \theta_h + \tau_{md} \quad (14)$$

따라서 손과 링크의 접촉 동특성을 나타내는 계수가 $C_h, K_h > 0$ 이면 마스터 링크 시스템은 안정하며, 제어입력과 외란은 크기가 제한되어 있으므로, $|u| \leq k_4, |\tau_{md}| \leq k_5, k_4, k_5 \geq 0$, 마스터 링크 위치는 손 위치를 기준으로 일정 범위 내에 존재한다.

식(4)의 제어는 링크가 운동하는 동안에는 정확한 힘반영이 이루어지지 못하며 특히 운동의 속도와 가속도가 클 경우 힘반영 오차가 커진다. 또한 정적 상태에서는 정적외란에 의한 오차가 존재한다. 정적 평형상태에서 분석하면 다음과 같다.

식(4)를 (1)에 대입하고, 두 식에서 τ_s 를 소거한 다음 정적평형상태에서 식을 정리하면 다음과 같다. 단, $\theta_d = 0$ 으로 가정한다.

$$K_h \{\theta_m(\infty) - \theta_h(\infty)\} = -\alpha \{K_e \theta_s(\infty) - \tau_{sd}(\infty)\} + \tau_{md}(\infty) \quad (15)$$

여기서 $\tau_{md}(\infty), \tau_{sd}(\infty)$ 는 정적평형상태에서의 외란을 의미한다.

계가 슬라이딩 평면에 존재하고 평형상태에 도달하면 $\theta_m(\infty) = \theta_s(\infty)$ 이 되므로, 이 관계를 식(15)에 대입하면 정적평형상태에서 마스터와 슬레이브 링크의 회전각은 다음과 같다.

$$\theta_m(\infty) = \frac{K_h \theta_h(\infty)}{K_h + \alpha K_e} + \frac{\alpha \tau_{sd}(\infty) + \tau_{md}(\infty)}{K_h + \alpha K_e} \quad (16)$$

이 때 슬레이브 링크에 전달되는 토크 τ_{te} 와 조작자의 손에 전달되는 토크 τ_{th} 는 식(3)과 (15)에서 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \tau_{te}(\infty) &= -K_e \theta_s(\infty) \\ \tau_{th}(\infty) &= -\alpha \tau_{te}(\infty) - \alpha \tau_{sd}(\infty) - \tau_{md}(\infty) \end{aligned} \quad (17)$$

즉, 정적평형상태에서 조작자에 전달되는 토크는 원하는 반영힘 $-\alpha \tau_{te}(\infty)$ 에 $-\alpha \tau_{sd}(\infty) - \tau_{md}(\infty)$ 만큼의 오차가 존재한다. 이는 제어입력을 통해 간접적으로 힘반영을 구현하는 제어기의 한계이다. 하지만 위치추종은 정밀하게 구현된다.

식(10)의 비선형 제어입력은 채터링을 야기하므로 다음과 같이 비선형연속함수로 근사화하여 채터링을 감소시킬 수 있다.¹⁰⁻¹²

$$\text{sgn}[\sigma(t)] \approx \begin{cases} \sigma(t)/\delta & \text{when } |\sigma(t)| \leq \delta \\ \text{sgn}[\sigma(t)] & \text{otherwise} \end{cases} \quad (18)$$

이 근사화를 적용하면 식(10)은 $\sigma(t)$ 가 범위 $-\delta \leq \sigma(t) \leq \delta$ 에 존재하는 경우 고이득 선형제어 입력, 이 범위를 벗어나면 포화입력이 된다. 이 경우 이상적인 슬라이딩 운동은 일어날 수 없으며, 계의 상태는 슬라이딩 평면을 중심으로 일정 폭을 갖는 영역 내에 존재하게 된다.

식(18)을 적용한 슬라이딩모드제어를 유사슬라이딩모드제어(Pseudo-SMC, PSMC)로 부른다.¹⁰

3. 시뮬레이션

대상 조작기는 현재 제작 중이므로, 앞에서 제안한 제어알고리즘의 적용성을 검증하기 위해 Fig. 1의 1축(조작기 전체의 피치 운동축)을 대상으로 다음의 두 가지 경우를 시뮬레이션 하였다.

(1) 시뮬레이션 1: Fig. 1과 같은 기준 자세에서 무부하 상태로 1축만 회전하는 경우로, 이 때 1축은 기구적으로 질량균형이 유지됨. 제어기는 이 경우의 파라미터를 공칭값으로 하여 설계됨.

(2) 시뮬레이션 2: Fig. 1과 같은 기준 자세에서 하부의 피치축인 3축과 5축이 회전하여 그리퍼가 1축 회전축으로부터 가장 멀리 있는 자세(3축: -45° , 5축: 70°)에서 18Kg의 부하를 파지한 상태이다. 이 경우는 조작기의 회전관성이 가장 크며, 질량불균형에 의한 외란토크도 가장 큰 경우에 해당된다.

각각의 시뮬레이션에서 적용한 모델 파라미터는 Table 1, 2와 같다. 회전축의 마찰은 Striebeck 효과를 표현한 다음의 Tustin Model을 적용하였다.¹⁴

$$T_f = \begin{cases} T & \text{if } |T| < T_s, \text{ and } \omega = 0 \\ \left\{ T_c + (T_s - T_c) e^{-|\omega|/\omega_s} \right\} \text{sign}(\omega), & \text{otherwise} \end{cases}$$

여기서 T_f 는 마찰토크, T_s, T_c 는 각각 정적마찰과 동적마찰 토크, T 는 외부작용 토크, ω 는 각속도, ω_s 는 상수로 Striebeck 속도이다.

Table 1에서 T_{ms}, T_{mc} 와 T_{ss}, T_{sc} 는 각각 마스터

조작기와 슬레이브 조작기의 정지 및 운동마찰 토 오크이다. 슬레이브 조작기는 마스터 조작기에 비해 견고하게 제작하므로 마찰이 상대적으로 더 큰 것으로 가정하였다.

Table 2 의 시뮬레이션 1 에서는 질량불균형이 없으나, 시뮬레이션 2 에서는 링크가 펼쳐진 자세이므로 질량불균형이 존재하며, 회전관성도 증가한다. ΔJ_s 는 18Kg 의 부하 파지에 의한 슬레이브 조작기의 질량관성 증가를 나타낸다. $m_{un,m}, m_{un,s}$ 는 마스터와 슬레이브 조작기 각각의 불균형 질량이며, $P_{un,m}, P_{un,s}$ 는 각각의 불균형질량의 좌표로 회전축을 기준으로 전방과 하방의 좌표를 순서로 나타낸 것이다.

제어기는 시뮬레이션 1 의 파라미터를 기준으로 설계하였으며, SMC 의 경우 식(7)의 슬라이딩 평면을 정의하는 벡터는 $S = [\omega_n^2 \ 2\zeta\omega_n \ 1]$, $\omega_n = 1\text{Hz}$, $\zeta = 0.8$, $\phi = 50$ 으로 정하였다.

Table 1 Basic Parameters used in simulations

Parameter	Value
C_h, K_h	100Nms / rad, $4.0 \times 10^3 \text{ N m / rad}$
C_e, K_e	0, $5.0 \times 10^4 \text{ N m / rad}$
T_{ms}, T_{mc}	3Nm, 2Nm
T_{ss}, T_{sc}	8Nm, 6Nm
Reflection ratio α	0.1

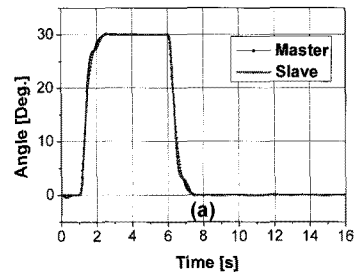
Table 2 Parameters used in simulations

Parameter	Simulation 1	Simulation 2
J_m	8.9 Kg m ²	11.9 Kg m ²
$J_{so}, \Delta J_s$	8.9 Kg m ² , 0 Kg m ²	11.9 Kg m ² , 38.3 Kg m ²
$m_{un,m}, P_{un,m}$	0Kg, 0Kg	3Kg, (0.3m, 0.2m)
$m_{un,s}, P_{un,s}$	(0, 0), (0, 0)	18Kg, (1.4m, 0.6m)

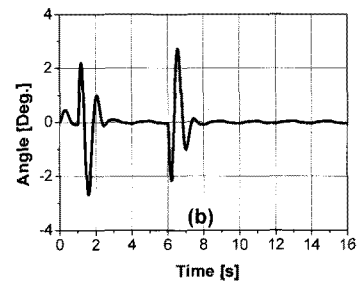
3.1 시뮬레이션 1

Fig. 3(a)는 마스터 조작기를 30° 상방으로 회전 후 다시 원래 위치로 움직일 경우 선형제어 적용 시 슬레이브 조작기의 추종성능을 보인다. 여기서 선형제어는 식(9)의 제어입력 u_l 을 적용한 경우로 PID-제어에 해당한다. Fig. 3(b)는 추종오차 e 로 마스터조작기가 움직이는 동안 최대 2.7° 의 추종오차를 보인다. Fig. 3(c)는 10 초 이후 오차를 확대하여 그린 것으로 0.045° 크기의 Stick-slip 현상을 보인다. 이는 마찰과 적분제어기에 의해 발생하는

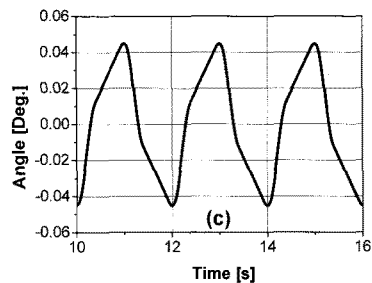
전형적인 불안정성이다.



(a) Master and slave link positions



(b) Position tracking error

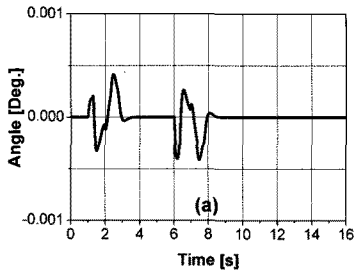


(c) Zoomed position tracking error

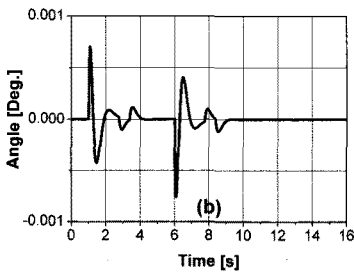
Fig. 3 Tracking performance of linear control

Fig. 4(a)는 앞과 동일한 마스터조작기 움직임에서 SMC 를 적용한 경우 슬레이브조작기의 추종오차를 보인다. 여기서 비선형입력은 $\rho = 260\text{Nm}$ 로 정하였는데, 이는 시뮬레이션 2 에서 질량불균형에 의한 외란토오크와 식(13)의 조건을 고려하여 정하였다. 추종오차는 최대 0.0004° 로 Fig. 3(b)의 선형제어에 비해 뚜렷한 개선을 확인할 수 있다. 특히 정상상태에서 추종오차는 거의 영에 도달되었다. 그러나 제어입력은 SMC 의 특성에 따라 높은 주파수의 스위칭을 보인다. Fig. 4(b)는 SMC 의 단점인 채터링을 완화시키기 위해 식(18)을 적용한 PSMC 를 적용한 경우로 최대추종오차가 0.0008°

로 SMC 에 비해 약간 증가하였으나, 선형제어에 비해 매우 낮은 수준이며, 정상상태에서 추종오차도 거의 영에 도달되었다. 특히 제어입력은 Fig. 5 와 같이 채터링이 제거되었다. 여기서 δ 는 시뮬레이션을 통해 채터링이 없으며 추종성능이 우수한 값인 $\delta = 0.3 \times 10^{-4} [rad]$ 로 선정하였다.



(a) SMC



(b) PSMC

Fig. 4 Tracking performance

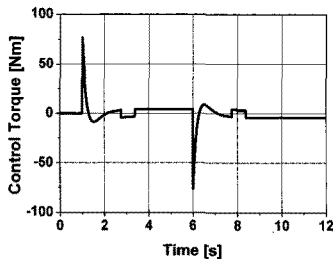
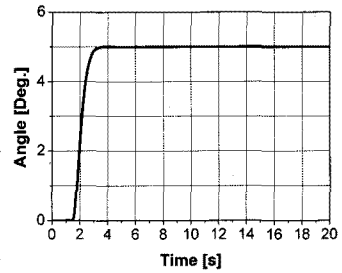


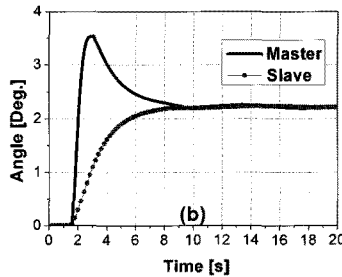
Fig. 5 Control input of PSMC

Fig. 6 은 슬레이브조작기가 환경에 접촉한 상태에서 마스터조작기를 환경방향으로 5° 만큼 밀어주는 경우 선형제어입력을 적용한 위치추종 및 힘반영 시뮬레이션 결과를 보여준다. Fig. 6(a)는 손의 움직임으로, 1.5 초 지점에서 동작이 시작된다. Fig. 6(b)는 이 때의 마스터와 슬레이브 조작기의 회전각으로 초기 마스터조작기의 빠른 움직임을 슬레

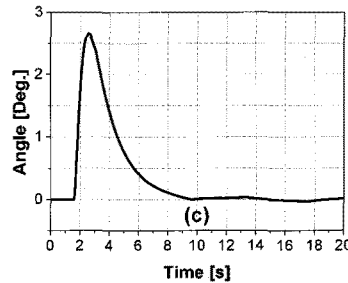
이브조작기가 추종하면서 큰 오차를 보이며, 10 초 부근에서 정상상태에 도달된다. 정상상태에서는 두 조작기 회전각은 2.25° 부근으로 수렴한다. 이 회전각은 손의 탄성과 환경의 탄성에 의해 결정된다. 그러나 정상상태에서 마찰에 의한 stick-slip 현상이



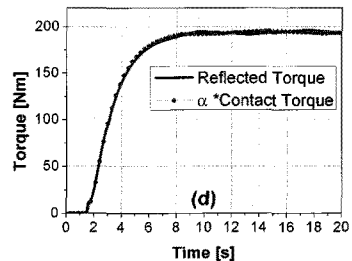
(a) Motion of hand



(b) Link positions



(c) Tracking error



(d) Contact torque and reflected torque

Fig. 6 Control performance when slave contacted environment-linear control case

발생되었다. Fig. 6(c)는 추종오차로 초기에 최대 2.65° 오차를 보이며, 정상상태에서 stick-slip 현상에 의한 오차가 발생됨을 확인할 수 있다. Fig. 6(d)는 접촉토크와 힘반영비 ($\alpha=0.1$)의 곱과 손에 전달되는 토크로, 비교적 힘반영이 잘 이루어지고 있음을 알 수 있다. 그러나 stick-slip 현상에 관계된 토크의 변화로 인해 정확히 일치하지는 못한다.

Fig. 7은 Fig. 6과 같은 조건에서 SMC를 적용한 경우로 선형제어에 비해 응답이 빠르며, 추종오차는 최대 0.024°로 큰 감소를 보인다. 정상상태에서 추종오차는 거의 영에 가깝다. Fig 7(b)는 접촉 및 전달토크로 선형제어에 비해 빠른 반응을 보이며, 정상상태 도달 후 식(17)과 같이 마찰토크에 의한 전달토크 오차를 보인다. 정상상태 힘반영 오차 ($|\tau_{th}(\infty) + \alpha\tau_{te}(\infty)|$)는 2.2Nm로 식(17)에서 마스터와 슬레이브 조작기 최대정지마찰력을 기준으로 한 오차범위 4.8Nm 이내임을 확인할 수 있다.

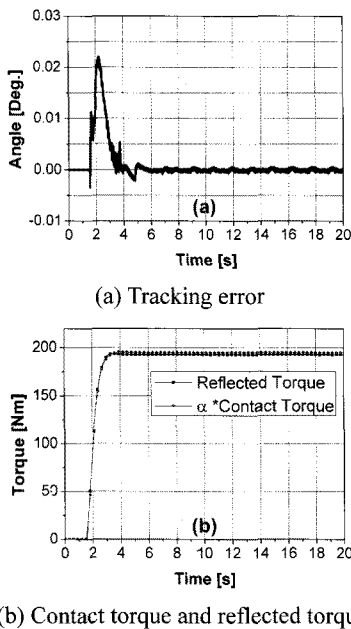


Fig. 7 Control performance when slave contacted environment - SMC case

Fig. 8은 PSMC 적용시 추종오차로 최대 0.025°로 SMC와 거의 유사한 성능을 보이며, 전달토크도 Fig. 7(b)의 SMC와 유사하였다.

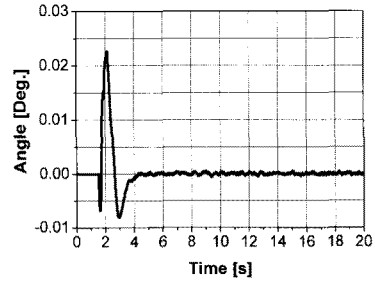


Fig. 8 Tracking error when slave contacted environment - PSMC case

3.2 시뮬레이션 2

앞에서 정의한 시뮬레이션 2 조건에서 Fig. 3(a)와 같은 마스터조작기 운동을 가정하였으며, 시뮬레이션 1에서와 동일한 제어를 사용하여 시뮬레이션 하였다.

Fig. 9는 이 때의 마스터와 슬레이브 조작기의 질량불균형 토크로, 조작기가 0°의 위치에서 가장 큰 불균형 토크 252Nm, 8.8Nm가 작용하며, 조작기가 상방으로 30° 위치까지 회전함에 따라 감소한다.

Fig. 10(a)는 Fig. 9의 질량불균형 토크와 마찰이 작용하는 상태에서 선형제어의 추적오차, (b)와 (c)는 각각 SMC와 PSMC의 추적오차를 보인다.

시뮬레이션 1에 비해 오차가 증가하였다. 이는 Fig. 9의 외관과 질량관성 변화에서 기인된다. Fig. 10에서 선형제어는 3.2°, SMC와 PSMC는 각각 0.0026°, 0.004°의 최대오차가 발생하였다. 선형제어는 시뮬레이션 1에서와 같이 Stick-slip 현상을 보였다. SMC와 PSMC의 경우에는 Stick-slip 현상이 발생하지 않았으며, 정상상태 오차가 제거되었다. 또한 PSMC에서는 채터링이 발생되지 않았다.

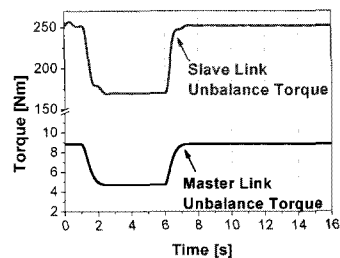


Fig. 9 Unbalance torque of master and slave links

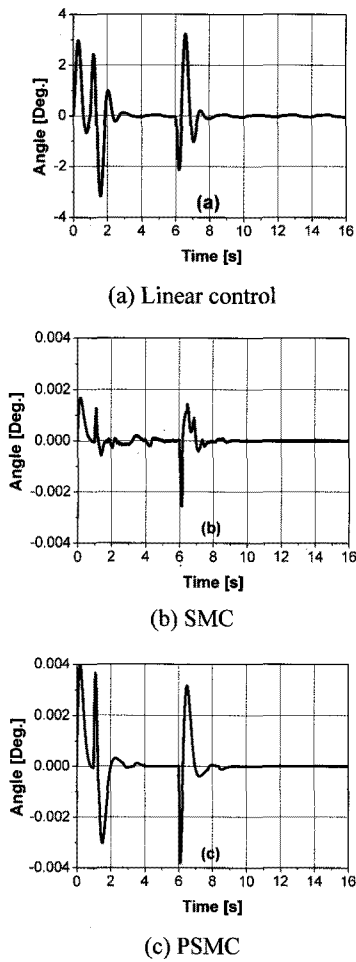


Fig. 10 Tracking errors

Fig. 11 은 슬레이브조작기가 마스터조작기 위치를 추종하는 중 10 초 부근에서 슬레이브조작기가 환경에 접촉한 상태에서 마스터조작기를 환경방향으로 5° 만큼 밀어준 경우 선형제어응답을 보인다. Fig. 11(a)는 조작기의 회전각으로 Fig. 6(b)에서와 같이 초기 큰 오차를 보이며, 18 초 부근에서 정상상태에 도달된다. 정상상태에서는 두 조작기 회전각은 2° 부근으로 수렴한다. 이 회전각은 손의 탄성과 환경의 탄성 및 조작기 질량불균형에 의해 결정된다. 정상상태의 stick-slip 현상은 Fig. 6에서와 같이 발생되었다. Fig. 11(b)는 추종오차로 초기에 최대 3.12° 오차를 보이며, 정상상태에서 stick-slip 현상에 의한 오차가 발생됨을 확인할 수 있다. Fig. 11(c)는 접촉토크에 힘반영비 ($\alpha=0.1$)을 곱한 값과 손에 전달되는 토크

로, stick-slip 현상에 관계된 토크의 변화뿐 아니라 정상상태오차가 존재한다. 이 정상상태 전달토크 오차는 다음의 SMC 적용의 경우에서 분석토록 한다.

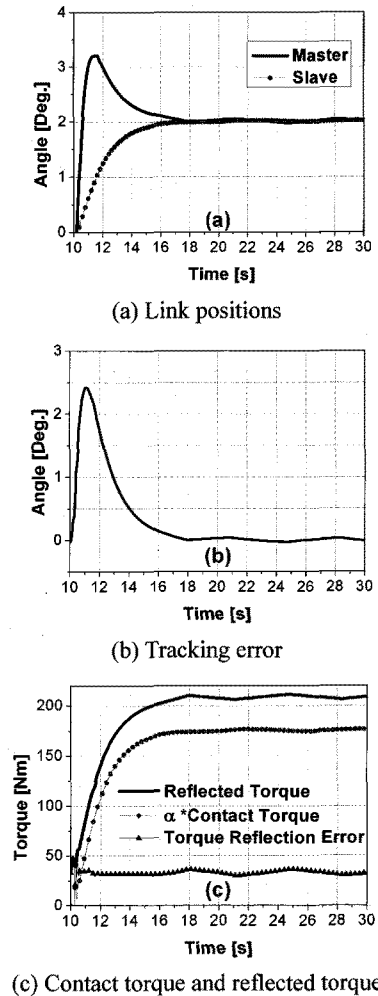
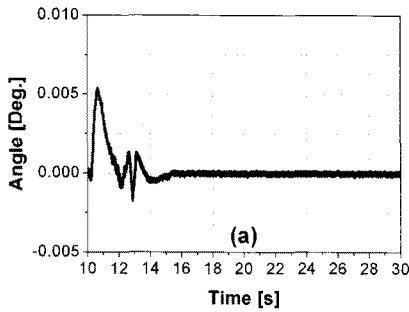
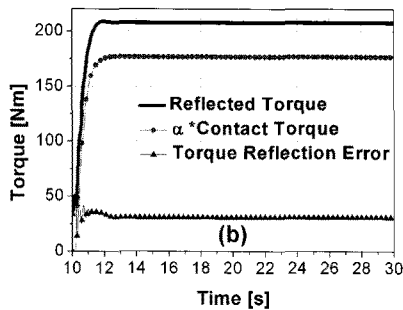


Fig. 11 Control performance when slave contacted environment-linear control case

Fig. 12(a)는 SMC 를 적용한 경우 추종오차, (b)는 접촉토크와 전달토크이다. 최대 추종오차는 0.0054° 로 선형제어에 비해 큰 감소를 보였다. 정상상태에서의 힘반영 오차($|\tau_{rh}(\infty) + \alpha\tau_{re}(\infty)|$)는 $31Nm$ 로 식(17)에서 마스터와 슬레이브 조작기의 질량불균형 토크, $8.6Nm$ 과 $248.3Nm$ 및 각각의 최대정지마찰력을 기준으로 계산된 최대오차범위 (33.43 ± 3.8)Nm 내에 존재함을 확인할 수 있다.



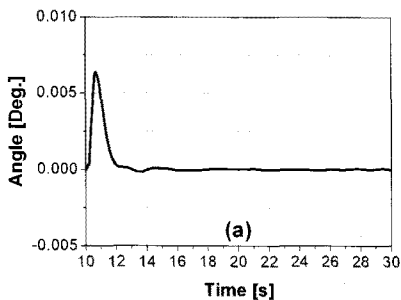
(a) Tracking error



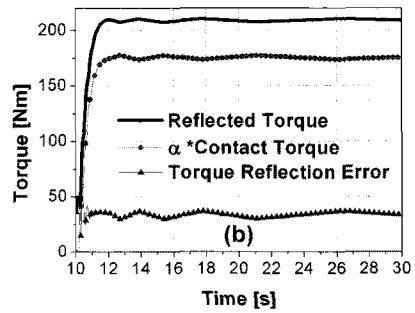
(b) Contact torque and reflected torque

Fig. 12 Control performance when slave contacted environment-SMC case

Fig. 13(a)는 PSMC를 적용한 경우 추종오차, (b)는 접촉토크와 전달토크이다. 최대 추종오차는 0.0064° 로 SMC에 비해 약간 증가하였으나, 선형제어에 비해 큰 감소를 보였다. 정상상태에서 stick-slip 현상이 발생되었으나 그 크기는 선형제어에 비해 매우 작은 값이었다. 정상상태에서 힘반영 오차는 stick slip 현상으로 $30.5 \sim 36.3 Nm$ 범위를 가지며, 이는 앞에서와 같이 식(17)에 의한 최대오차범위 ($33.43 \pm 3.8 Nm$) 내에 존재함을 확인할 수 있다.



(a) Tracking error



(b) Contact torque and reflected torque

Fig. 13 Control performance when slave contacted environment-PSMC case

4. 결론

본 연구에서는 핫셀에 설치되는 마스터와 슬레이브 조작기의 위치추종-힘반영 제어를 대상으로 하였다. 제어기는 측정 가능한 변수가 각 링크의 위치, 속도 정보인 점과, 운용 중 슬레이브 링크의 관성 변화, 마찰 및 질량불균형 외란토크, 링크가 손과 벽에 접촉시 계의 동특성이 변화되는 점등을 고려하여 제한된 구조를 가지며, 계의 불확실성과 외란에 강인한 슬라이딩모드 제어를 제안하였다. 제안된 제어기는 조작기의 1 축의 제어에 적용하였으며, 시뮬레이션을 통해 적용성과 제어 성능을 검증하였다. 그 결과 선형제어에 비해 슬라이딩모드 제어는 계의 파라미터 변화에 강인한 위치추종을 성능을 보였다. 그러나 힘반영은 제어기의 구조적 한계 때문에 오차가 존재하였다.

본 연구의 1-자유도 링크 구조에 적용된 결과는 실제 6-자유도 조작기에 적용할 예정이다.

후 기

이 논문은 2009 년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구(No.2009-0070686)이며, 2009 년도 경원대학교 지원에 의한 결과임.

참고문헌

1. Vertut, J. and Coiffet, P., "Teleoperation and Robotics- Evolution and Development," Kogan Page, Vol. 3A, pp. 153-220, 1985.

2. Lewis, F. L., Abdallah, C. T. and Dawson, D. M., "Control of Robotic Manipulators," MacMillan, 1993.
3. Lawrence, D. A., "Stability and Transparency in Bileteral Teleoperation," IEEE Trans. Robot and Automation, Vol. 9, No. 5, pp. 624-637, 1993.
4. Salcudean, S. E., Zhu, M. and Zhu, W. H., "Transparent Bilateral Teleoperation under Position and Rate Control," Int. J. Robot Res., Vol. 19, No. 12, pp. 1185-1202, 2000.
5. Chopra, N., Spong, M., Ortega, R. and Barabanov, N. E., "On Position Tracking in Bilateral Teleoperation," Proc. of the 2004 American Control Conference, pp. 5244-5249, 2004.
6. Chopra, N., Spong, M. W., Ortega, R. and Barabanov, N. E., "Position and Force Tracking in Bilateral Teleoperation," Advances in Communication and Control Network, Vol. 308, pp. 410-413, 2004.
7. Utkin, V. I. and Sabanovic, A., "Sliding modes applications in power electronics and motion control systems," Proceedings of IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Vol. 1, pp. TU22-TU31, 1999.
8. Utkin, V. I., "Sliding modes in control optimization," Springer-Verlag, Inc., 1992.
9. Young, D. K., Utkin, V. I. and Ozguner, U., "A control engineer's guide to sliding mode control," IEEE Trans. on Control Systems Technology, Vol. 7, No. 3, pp. 328-342, 1999.
10. Edward, C. and Spurgeon, S. K., "Sliding mode control theory and application," Taylor & Francis Ltd., pp. 31-63, 1998.
11. Slotine, J. E. and Li, W., "Applied nonlinear control," Prentice-Hall, pp. 276-310, 1991.
12. Kang, M. S., "Sliding Mode Control for Active Magnetic Bearing System," J. of KSPE, Vol. 25, No. 12, pp. 82-88, 2008.
13. Cheon, J. W., Choi, S. B., Song, H. J. and Ham, J. H., "Position Control of AC Servo Motor Using Sliding Mode Controller," J. of KSPE, Vol. 21, No. 3, pp. 44-50, 2004.
14. Marton, L. and Lantos, B., "Modeling, Identification, and Compensation of Stick-Slip Friction," IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 54, No. 1, pp. 511-521, 2007.