

탄성 케이블로 구동되는 조작기 링크의 외란 관측기 기반 슬라이딩모드 제어

Disturbance Observer Based Sliding Mode Control for Link of Manipulator Driven by Elastic Cable

강 민 식†
Min Sig Kang

(Received May 23, 2012 ; Accepted September 7, 2012)

Key Words : Manipulator(조작기), Link(링크), Elastic Cable(탄성 케이블), Two-mass-system(이질량계), Sliding Mode Control(슬라이딩모드제어), Disturbance Observer(외란 관측기)

ABSTRACT

Position tracking control of a link of a slave manipulator which needed to track the corresponding link of a master manipulator was addressed in this paper. Since driving torque from motor is transmitted through a set of flexible cable to link, the motion control system is modeled by a two-mass model connected with elastic coupling which has finite stiffness. Relative vibration of two-mass resonant system is a serious problem to operate manipulator. This paper proposed sliding mode control to reduce resonant vibration and fine position tracking control. Also, a pseudo-sliding mode control which uses a saturation function instead of a signum function was discussed and showed that the pseudo-sliding mode control can improve disturbance regulation performance as well as guarantees fine command tracking without chattering which is an inherent drawback of basic sliding mode control. In addition, a disturbance observer based sliding mode control has been suggested to improve disturbance regulation performance. The feasibility of the proposed control design was verified along with some simulation results.

기 호 설 명

d_1, \hat{d}_1 : 외란과 외란의 관측치
 g : 외란 관측기 시정수의 역수
 J_m, J_L : 모터와 부하의 관성질량모멘트
 K_d, K_p : 링크 미분, 비례제어이득
 K_{eq} : 등가스프링상수

N : 기어비
 T_m, T_d : 제어 토크와 외란 토크
 σ : 슬라이딩 함수
 ρ : 슬라이딩 모드 제어의 비선형 제어입력 크기
 θ_m, θ_L : 모터와 링크의 회전각
 $\Delta\theta$: 모터와 링크의 상대회전각
 ω_p : 고유진동수

† Corresponding Author ; Member, Gachon University, Dept. of Mechanical & Automotive Engineering
E-mail : mskang@gachon.ac.kr
Tel : +82-31-750-5524, Fax : +82-31-750-5273

‡ Recommended by Editor Moon Kyu Kwak
© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

1. 서 론

원격조작기(telemanipulator)는 우주공간, 심해탐사, 원자력발전소, 원격수술 등 사람이 직접 작업할 수 없는 위험지역 또는 원거리에서 정교한 작업을 수행할 수 있는 로봇의 일종이다. 대표적인 형태가 마스터-슬레이브(master-slave) 조작기로 말단부(end effector)에 해당하는 그립퍼(gripper) 부분을 제외하고는 두 조작기의 기구학적 형태가 거의 동일하며, 마스터 조작기의 동작을 슬레이브 조작기가 재현하도록 운용된다⁽¹⁻³⁾.

이 연구에서는 핫셀(hotcell) 내부에서 방사능 오염물질 처리를 위해 이용되는 6-자유도 조작기를 대상으로 한다. 이 시스템은 핫셀 내부에 설치된 슬레이브(slave) 조작기와 조종실에 설치된 마스터(master) 조작기로 구성된다. 조작자는 핫셀 내부에 설치된 카메라 영상을 보면서 마스터 조작기를 조종하며, 슬레이브 조작기의 각 링크는 마스터 조작기의 해당 링크 운동을 추종한다. 제어 측면에서 마스터 조작기의 각 링크의 위치는 슬레이브 조작기 해당 링크의 위치명령으로 전달되며, 슬레이브 조작기는 이 위치명령의 정밀한 추종이 요구된다.

다자유도 조작기에서 구동장치를 해당링크에 설치하여 링크를 직접구동하는 방법이 일반적이나, 직렬형 조작기의 특성상 하부링크가 상부링크의 부하로 작용하므로, 이러한 직접구동 조작기는 크기 및 무게가 커지는 단점이 있다. 이러한 단점을 고려하여 이 연구 대상 조작기에서는 모든 구동기를 기저부에 설치하고, 모터의 동력을 풀리와 케이블을 통해 해당 링크에 전달한다. 하지만 이러한 케이블 구동방식에서는 케이블의 탄성 때문에 정적 부하에 의한 처짐과 진동 문제가 발생하는 문제가 있다.

케이블 구동 메커니즘을 채용하는 링크 구동계는 유한한 케이블의 탄성 때문에 이질량계(two-mass-system)로 모델링할 수 있다. 이질량계의 제어에서는 모터와 링크의 상대진동의 감쇠와 빠르고 정밀한 위치 또는 속도 제어에 주 관심을 갖고 있다. 대부분의 제어기는 기본적으로 PI 또는 PID-제어와 추가적인 되먹임 구조를 적용하고 있다⁽⁴⁻⁷⁾. 하지만 이 제어는 관성비가 1 이하인 경우 비감쇠 진동이 발생하는 문제점이 존재한다^(8,9). 그 밖에 PID-제어 구

조에 다양한 되먹임 제어를 추가한 제어기, 상태추정기, 외란관측기 등을 적용한 다양한 제어기가 적용된 바 있다⁽¹⁰⁻¹²⁾. 그러나 이러한 제어기는 계의 파라미터 불확실성, 비선형성 및 외란에 의한 성능이 만족스럽지 못할 경우가 있다.

이 연구에서는 케이블로 구동되는 링크 구동계에서 진동의 감쇠 및 정밀한 위치추종을 위해 외란과 시스템 파라미터의 변화에 강인한 슬라이딩모드 제어(SMC: sliding mode control)⁽¹³⁻¹⁸⁾를 적용하며, 슬라이딩 모드 제어에서 체터링 감소를 위해 사용하는 근사화 함수가 제어계에 미치는 영향을 분석하고, 추종성능 향상을 위해 외란관측기 기반 슬라이딩모드 제어를 제안한다.

제안된 제어기 설계 알고리즘은 슬레이브 조작기의 5-축에 적용하여, 적용성과 제어 성능을 검증한다.

2. 조작기 구동 메커니즘 모델

Fig. 1은 슬레이브 조작기로 6-자유도를 갖는다.

이 조작기에서 링크를 구동하는 모든 모터는 유지보수의 편의성 때문에 Fig. 1의 우측 기저부에 설치되며, 링크 중량의 최소화를 위해 케이블을 이용하여 모터 동력을 각 링크에 전달한다. 이 연구에서는 Fig. 1의 그립퍼의 손목에 해당하는 5-번 피치축을 대상으로 한다. 모든 링크는 케이블에 의해 구동되나, 5-번 링크는 구동 모터에서 가장 거리가 멀어

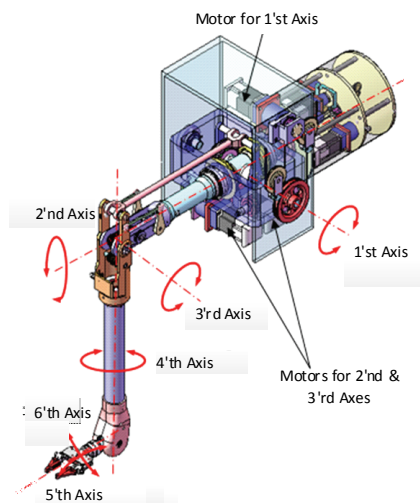


Fig. 1 Schematic of manipulator

케이블 구동 특성이 뚜렷한 특징을 갖는다. 모터에서 5-번 링크까지의 케이블은 Fig. 2와 같이 중단의 조인트 부분에 자유폴리를 설치하여 경로를 바꾸어 준다. 이때 자유폴리는 반경이 다른 2-단폴리를 이용하여 모터축의 각속도와 링크 각속도의 비를 조정할 수 있다.

Fig. 2에서 J_m, J_p, J_L 은 각각 구동모터, 자유폴리, 링크의 질량관성 모멘트, $\theta_m, \theta_p, \theta_L$ 은 각각 모터폴리, 자유폴리, 링크의 회전각, r_m, r_L 은 각각 모터폴리와 링크폴리의 반경, r_a, r_b 은 각각 자유폴리에서 모터폴리와 연결되는 폴리의 반경과 링크폴리에 연결되는 반경으로, 일반적으로 링크의 회전속도를 감소시키기 위해 $r_a > r_b$ 로 정한다. 모터폴리와 자유폴리 사이의 케이블의 탄성을 나타내는 스프링 상수 k_a 는 케이블의 길이 C_a , 단면적 A , 재질의 영계수 (Young's modulus) E 일 때 $k_a = \frac{AE}{C_a}$ 로 표현된다. 따라서 자유폴리와 링크폴리 사이의 케이블의 탄성은 $k_b = \frac{AE}{C_b}$ 이다. 여기서 자유폴리와 링크 사이 케이블 길이가 C_b 이며, 동일한 케이블이 이용된다.

Fig. 2에서 구동계의 운동방정식은 (1)과 같다.

$$\begin{cases} J_m \ddot{\theta}_m + 2k_a r_m (r_m \theta_m - r_a \theta_p) = T_m \\ J_p \ddot{\theta}_p + 2k_a r_a (r_a \theta_p - r_m \theta_m) + 2k_b r_b (r_b \theta_p - r_L \theta_L) = 0 \\ J_L \ddot{\theta}_L + 2k_b r_L (r_L \theta_L - r_b \theta_p) = T_d \end{cases} \quad (1)$$

여기서 T_m 은 모터의 구동 토크, T_d 는 링크에 가해지는 외란 토크이다. 이 외란 토크의 주요 요소로는

링크의 질량 불균형에 의한 중력 토크, 링크의 직선 가속도와 결합된 동적 불균형 토크, 마찰 토크 등을 들 수 있다.

일반적으로 케이블의 경로를 유도하기 위한 자유폴리의 질량관성 모멘트는 모터나 링크의 질량관성 모멘트에 비해 작으므로, 이를 무시하면, $J_p=0$, 식 (1)은 다음과 같이 2-자유도 운동방정식으로 간략화할 수 있다.

$$\begin{cases} J_m \ddot{\theta}_m + K_{eq} \theta_m - NK_{eq} \theta_L = T_m \\ J_L \ddot{\theta}_L + N^2 K_{eq} \theta_L - NK_{eq} \theta_m = T_d \end{cases} \quad (2)$$

여기서 등가스프링 상수 K_{eq} 는 $K_{eq} = \frac{2k_a k_b r_m^2 r_b^2}{k_a r_a^2 + k_b r_b^2}$ 이며, 감속비 N 은 $N = \frac{r_L r_a}{r_m r_b}$ 이다.

식 (2)는 전형인 이질량계(two-mass-system)이다.

만일 모터와 링크의 상대 회전각을 $\Delta\theta$ 라 하면, 즉,

$$\Delta\theta = \theta_m - N\theta_L \quad (3)$$

이 정의를 적용하여 식 (2)는 다음으로 쓸 수 있다.

$$\begin{cases} \ddot{\theta}_L = f\Delta\theta + d_1 \\ \Delta\ddot{\theta} + \omega_p^2 \Delta\theta = v + d_2 \end{cases} \quad (4)$$

여기서 $f = \frac{NK_{eq}}{J_L}$, $\omega_p^2 = \frac{J_L + N^2 J_m}{J_m J_L} K_{eq}$, $v = \frac{T_m}{J_L}$, $d_1 = \frac{T_d}{J_L}$, $d_2 = -N \frac{T_d}{J_L} = -Nd_1$ 이다.

식 (4)에서 두 번째 식은 케이블 동역학으로 모터와 링크의 상대적 진동 모드로, 고유진동수는 ω_p 이며, 첫 번째 식은 링크의 동역학을 나타낸다.

Fig. 3은 식 (4)를 직렬형 블록선도로 나타낸 것으로, 커플링이 존재하는 모델로 표현한 것에 비해

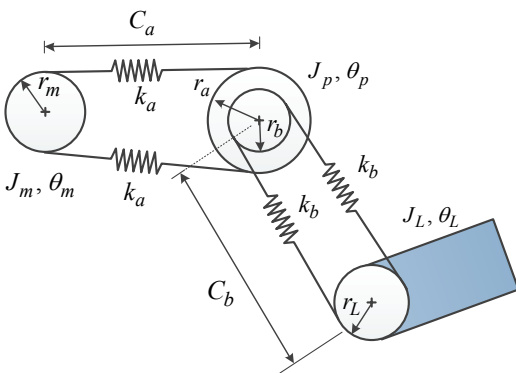


Fig. 2 Schematic of cable driven mechanism

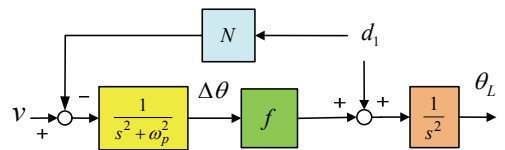


Fig. 3 Block diagram of cable driven system

해석이 편하며, 모터의 토크가 링크에 전달되는 동력 전달 메커니즘의 특성을 잘 나타내고 있다.

3. 슬라이딩 모드 제어기 설계

3.1 슬라이딩 모드 제어

식 (1)의 모델에서 링크의 질량관성 모멘트는 하위 링크의 자세와 부하의 파지 여부에 따라 변화하게 되며, 외란 토크 또한 중력 방향의 변화와 부하의 질량에 따라 변화가 심하다,

슬라이딩 모드 제어는 외란이나 계의 불확실성이 매칭조건(matching condition)을 만족하면 이들의 영향을 완벽하게 제거할 수 있다^(13~18).

식 (4)에서 두 번째 식의 외란 Nd_1 은 매칭조건을 만족하나, 첫 번째 식의 d_1 은 매칭 조건을 만족하지 못한다. 식 (4)의 계에서 다음의 슬라이딩 평면을 정의한다^(17,18).

$$\sigma = \{\dot{\theta}_L + K_d e + K_p [edt]\} + \gamma \{\Delta\dot{\theta} + \alpha\Delta\theta\} \quad (5)$$

여기서 $e(\theta_L - \theta_R)$ 는 링크의 위치오차이며, θ_R 은 링크의 위치명령이다. K_d, K_p, γ, α 는 결정해야 될 계수들이다.

식 (5)에서 슬라이딩 평면은 첫 번째 중괄호 안의 링크 동역학과, 두 번째 괄호 안의 케이블 동역학을 포함하며, 특히 케이블 인장 동역학은 계의 진동 감쇠를 위해 포함되었다. 단, 슬라이딩모드 제어는 계의 상태가 이 평면 내에 존재하도록 하는 제어이므로, 식 (5)는 두 동역학의 합이 영이 되는 평면 상에 계의 상태가 존재하게 된다.

슬라이딩 모드 제어는 식 (5)의 슬라이딩 함수의 미분에서 정규선형시스템을 안정화하는 등가제어입력 v_{eq} 와 계의 상태를 슬라이딩 평면에 도달시키는 비선형 제어입력 v_n 의 합으로 구성된다. 우선 식 (5)를 미분하고, 그 결과에 식 (4)를 대입하여 정리하면,

$$\dot{\sigma} = \{K_d \dot{e} + K_p e\} + \{\gamma\alpha\Delta\dot{\omega} + (f - \gamma\omega_p^2)\Delta\omega\} + \gamma v + (1 - \gamma N)d_1 \quad (6)$$

따라서 등가제어입력은 다음으로 결정되며,

$$\gamma v_{eq} = -\{K_d \dot{e} + K_p e\} - \{\gamma\alpha\Delta\dot{\omega} + (f - \gamma\omega_p^2)\Delta\omega\} \quad (7)$$

식 (7)의 선형제어를 식 (6)에 대입한 결과는

$$\dot{\sigma} = \gamma v_n + (1 - \gamma N)d_1 \quad (8)$$

이므로, 비선형제어를 식 (9)로 정하면

$$\gamma v_n = -\rho \operatorname{sgn}[\sigma], \rho > 0 \quad (9)$$

비선형 제어입력의 크기인 ρ 를

$$\rho > |1 - \lambda N||d_1| \quad (10)$$

가 만족되도록 정하면, $\sigma\dot{\sigma} < 0$ 이므로, 계의 상태는 외란에 관계없이 슬라이딩 평면에 접근하여, 평면 내에 존재하게 된다. 식 (9)에서 $\operatorname{sgn}[*]$ 는 부호함수이다.

계의 상태가 슬라이딩 평면에 존재하는 경우, 식 (5)에서 링크 동역학과 케이블 동역학의 관계를 구할 수 있다.

$$(s^2 + K_d s + K_p)\Theta_L(s) - (K_d s + K_p)\Theta_R(s) + \gamma s(s + \alpha)\Delta\Theta(s) = 0 \quad (11)$$

식 (11)과 식 (4)에서 슬라이딩 평면에서 링크 동역학은

$$\Theta_L(s) = \frac{f(K_d s + K_p)}{P(s)}\Theta_R(s) + \frac{s(s + \alpha)}{P(s)}D_1(s) \quad (12)$$

$$\Delta\Theta(s) = \frac{1}{\gamma} \frac{s^2(K_d s + K_p)}{P(s)}\Theta_R(s) - \frac{1}{\gamma} \frac{(s^2 + K_d s + K_p)}{P(s)}D_1(s) \quad (13)$$

이며, 여기서 $\Theta_L(s), \Theta_R(s), D_1(s)$ 은 각각 $\theta_L(t), \theta_R(t), d_1(t)$ 의 라플라스 변환이고, 폐회로 특성다항식 $P(s)$ 는

$$P(s) = \left[\left\{ s^4 + \alpha s^3 \right\} + \left\{ \frac{f}{\gamma} (s^2 + K_d s + K_p) \right\} \right] \quad (14)$$

논의 1. 식 (11)에서 슬라이딩 평면에서 케이블 동역학에 영향을 주는 외란 d_2 은 비선형 제어입력이 식 (10)을 만족하면 완벽히 제거되지만, 링크 동역학

에 영향을 미치는 외란 d_1 은 여전히 링크 동역학에 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있다. 이는 이 외란이 매칭조건을 만족하지 못하기 때문이다.

식 (11)과 식 (12)의 링크 동역학과 케이블 동역학에서 기준입력 추종성능을 제외한 외란에 의한 영향만을 정리하면 다음으로 나타낼 수 있다.

$$\Theta_L(s)|_{D_1} = \frac{1}{B(s) \left\{ \frac{s^2}{B} + \frac{f}{\gamma} \right\}} D_1(s) \quad (15)$$

$$\Delta\Theta_L(s)|_{D_1} = -\frac{1}{\gamma \left\{ \frac{s^2}{B} + \frac{f}{\gamma} \right\}} D_1(s) \quad (16)$$

여기서 $B(s) = (s^2 + K_d s + K_p) / \{s(s + \alpha)\}$ 이다.

논의 2. 식 (15)와 식 (16)에서 계의 상태가 슬라이딩 평면에 존재할 때 케이블 동역학에 부여된 가중치 γ 가 증가함에 따라 외란 d_1 의 영향으로 케이블의 진동은 링크의 진동에 비해 상대적으로 작아진다. 이는 슬라이딩 평면의 정의 식 (5)에서 가중치 γ 의 정성적 특성과 일치한다.

식 (14)에서 제어기 계수들은 모두 폐회로 극점배치 방법에 따라 결정할 수 있다. 만일 원하는 폐회로 특성다항식을 다음과 같이 정하면

$$P(s) = (s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)^2 \quad (17)$$

식 (14)와 식 (17)에서, 제어기 계수는 다음으로 결정된다.

$$K_d = \frac{2\zeta\omega_n}{2\zeta^2 + 1}, K_p = \frac{\omega_n^2}{2(2\zeta^2 + 1)}, \quad (18)$$

$$\alpha = 4\zeta\omega_n, \gamma = \frac{f}{2\omega_n^2(2\zeta^2 + 1)}$$

3.2 부호함수의 근사화

식 (9)에서 비선형 제어는 부호함수이므로 이론적으로 제어 토크가 무한의 주파수로 스위칭하는 체터링(chattering) 문제가 내재되어 있다. 체터링은 액추에이터에 무리를 가하거나, 구조진동을 야기하므로,

체터링의 제거 또는 완화 방법이 많이 제시되어 있다. 대표적인 예로는 부호함수를 다음의 포화함수로 근사화하는 의사슬라이딩모드제어(PSMC: pseudo-SMC)이다⁽¹³⁻¹⁵⁾.

$$\rho \operatorname{sgn}[\sigma] \cong \begin{cases} \rho & \text{when } 1/k < \sigma \\ k\rho\sigma & \text{when } -1/k < \sigma < 1/k \\ -\rho & \text{when } \sigma < -1/k \end{cases} \quad (19)$$

이 근사함수를 적용할 경우 계의 상태는 슬라이딩 평면을 중심으로 일정폭을 갖는 범위 내에 존재하게 된다.

식 (19)에서 슬라이딩 함수가 $-1/k < \sigma < 1/k$ 인 범위에서는 선형제어가 적용되는데, 이 영역에서 계의 응답 특성을 분석한다. 이 때 제어기는 다음으로 표현되므로,

$$\gamma v = -\{K_d \dot{e} + K_p e\} - K\sigma - \{\gamma\alpha\Delta\dot{\theta} + (f - \gamma\omega_p^2)\Delta\theta\}, K = k\rho \quad (20)$$

이 제어를 적용한 폐회로 링크 동역학은

$$\Theta_L(s) = \frac{f}{\gamma} \frac{(K_d s + K_p)}{P(s)} \Theta_R(s) + \frac{f}{P(s)} \frac{s}{(s+K)} D_2(s) + \frac{s^2 + \alpha s + \frac{f}{\gamma} \frac{s}{(s+K)}}{P(s)} D_1(s) \quad (21)$$

식 (21)을 식 (12)와 비교하면, 근사화에 따른 기준입력 $\Theta_R(s)$ 추종성능은 변화가 없으며, 외란 조정 성능의 차이가 존재함을 알 수 있다. 이를 분석하면 다음과 같다.

논의 3. 부호함수의 포화함수 근사화 영향

(i) $k \rightarrow 0$ 일 경우는 선형제어만을 적용한 경우로 (21)에서

$$\Theta_L(s) = \frac{f}{\gamma} \frac{(K_d s + K_p)}{P(s)} \Theta_R(s) + \frac{f}{P(s)} D_2(s) + \frac{s^2 + \alpha s + \frac{f}{\gamma}}{P(s)} D_1(s) \quad (22)$$

(ii) $k \rightarrow \infty$ 일 경우는 슬라이딩 모드 제어와 동일하며, 식 (21)에서 링크 동역학은 식 (12)가 된다.

식 (21)과 식 (22)에서 외란 d_2 에 대한 조정성능을 보면 식 (21)은 식 (22)에 고대역필터 $\frac{s}{(s+K)}$ 를 적용한 형태이므로, 식 (21)의 성능이 우수하다. 특히 외란이 저주파 대역폭을 가질수록 조정 성능이 더 우수하다. 외란 d_1 에 대한 조정성능은 식 (21)은 식 (22)의 분자의 상수항에 고대역필터 $\frac{s}{(s+K)}$ 를 적용한 형태이므로, 이 역시 식 (21)의 성능이 우수하며, 앞서서와 같이 외란이 저주파 대역폭을 가질수록 조정 성능이 더 우수하다. 즉, 부호함수 대신 포화함수를 적용할 경우 추종성능에는 영향이 없으며, 외란 조정성능은 선형제어를 적용한 경우에 비해 성능이 우수하고, 포화함수의 기울기가 증가할수록 성능이 향상된다. $k \rightarrow \infty$ 이면 슬라이딩모드 제어로 수렴하여 성능이 향상되지만, 체터링의 발생 가능성은 높아진다. 따라서 적절한 기울기를 선택하여 체터링 발생을 완화하면서 외란조정 성능을 극대화 시킬 필요가 있다.

4. 외란 관측기 기반 슬라이딩 모드 제어

4.1 외란 관측기

식 (12)에서와 같이 외란 d_1 은 매칭 조건을 만족하지 못하므로 제어 성능 저하의 요인이 된다. 외란 조정 성능 향상을 위해 외란관측기를 사용하여 외란 d_1 을 관측하여 제어에 이용할 수 있다. Fig. 4의 외란 관측기를 고려한다^(17,18).

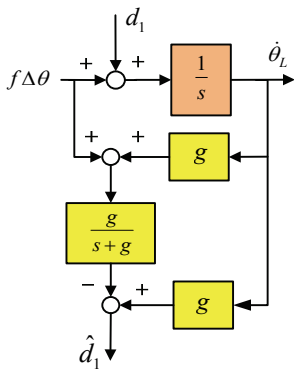


Fig. 4 Block diagram of disturbance observer

Fig. 4에서 g 는 관측기 설계 파라미터이다. 이 외란관측기에서 관측된 외란 \hat{d}_1 은

$$\hat{d}_1 = \frac{g}{s+g} d_1 \tag{23}$$

이 되므로, 관측된 외란 \hat{d}_1 은 외란 d_1 의 저역통과필터링에 해당한다.

4.2 외란 관측기 기반 슬라이딩 모드 제어기 설계

식 (23)에서 관측된 외란을 이용한 확장시킨 슬라이딩 함수를 정의한다.

$$\sigma = \left\{ \dot{\theta}_L + K_d e + K_p \int e dt \right\} + \gamma \left\{ \Delta \theta + \alpha \left(\Delta \theta + \frac{\hat{d}_1}{f} \right) \right\} \tag{24}$$

앞의 슬라이딩모드 제어 유도과정을 적용하여 구한 제어입력은

$$\gamma v_{eq} = - \left\{ K_d \dot{e} + K_p e \right\} - \left\{ \gamma \alpha \Delta \dot{\theta} + \left(f - \gamma \omega_p^2 \right) \Delta \theta + \gamma \alpha \frac{\hat{d}_1}{f} \right\} \tag{25}$$

$$\gamma v_n = -\rho \operatorname{sgn}[\sigma], \rho > 0 \tag{26}$$

이며, 도달법칙을 만족하기 위한 조건은 기본 슬라이딩모드 제어의 조건과 동일하다. 즉,

$$\rho > |1 - \lambda N| |d_1| \tag{27}$$

이 슬라이딩모드 제어를 적용한 경우 슬라이딩 평면 내에서 링크 동역학은 다음과 같다.

$$\Theta_L(s) = \frac{f}{P(s)} (K_d s + K_p) \Theta_R(s) + \frac{s^2 D_1(s) + \alpha s (D_1(s) - \hat{D}_1(s))}{P(s)} \tag{28}$$

식 (28)을 식 (12)와 비교하면, 관측오차가 작을수록 관측기 기반 슬라이딩모드 제어가 기본 슬라이딩모드 제어에 비해 외란조정 성능이 우수함을 알 수

있다.

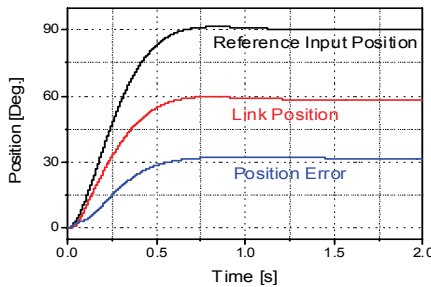
단, 식 (25)에서 제어입력에 외란 관측치의 미분이 필요하므로, 미분에 의한 고주파 잡음의 증폭에 대한 주의가 요구된다. 그러나 식 (23)에서 관측기가 저역필터의 특성을 가지므로, 관측기 설계 파라미터 g 를 적절히 설계하면 미분에 의한 문제를 줄일 수 있다.

5. 시뮬레이션 결과

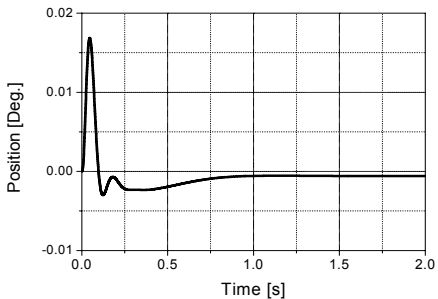
앞에서 제안한 제어 알고리즘을 Fig. 1의 조각기 5-축에 적용하였다. 5-축의 파라미터는 Table 1과 같으며, 모터와 링크의 회전각을 모두 측정 가능한 것으로 가정하였다.

Table 1 System parameters

Variable	Symbol	Value
Inertia, motor	J_m	$41.7 \times 10^{-6} \text{ Kg}\cdot\text{m}^2$
Inertia, link	J_L	$199.6 \times 10^{-6} \text{ Kg}\cdot\text{m}^2$
Stiffness	K_{eq}	$2.07 \times 10^5 \text{ N/m}$
Gear ratio	N	20



(a) Link position



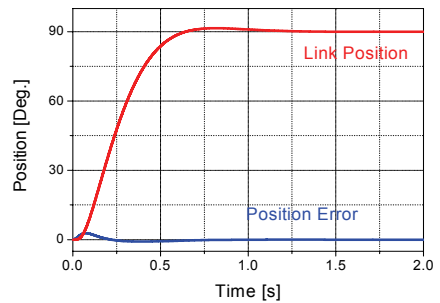
(b) Relative angle

Fig. 5 Position tracking performance - linear control

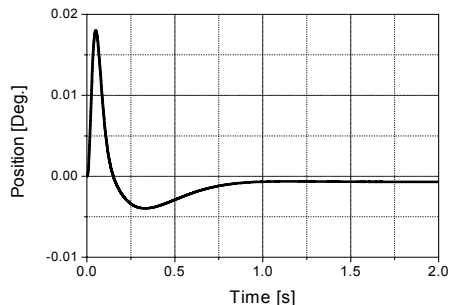
식 (18)의 폐회로 극점배치 방법으로 제어를 설계하였으며, $\zeta=0.9$, $\omega_n=10 \text{ Hz}$ 로 할 때 제어기 계수는 $K_d = 43.17$, $K_p = 753.4$, $\alpha = 226.20$, $\gamma = 10.03$ 로 결정되었다.

우선 링크의 위치추종 성능을 시뮬레이션 하였다. 위치명령은 Fig. 5에서와 같이 링크가 수직위치에서 수평위치로 부드럽게 변하며, 이때 링크 회전축으로부터 10 cm의 거리에 5 kg의 부하를 파지한 상태를 가정하였다. 따라서 링크의 위치에 따라 부하의 중력에 의한 외란이 작용하게 된다. Fig. 5는 슬라이딩 모드 제어의 선형제어부만을 적용한 경우 링크 응답으로 Fig. 5(a)는 위치명령, 링크 회전각 및 위치추종오차를 보인다. 부하의 중량에 의해 큰 위치추종오차가 발생하였으며, 정상상태에서 위치오차는 31.7° 이다. Fig. 5(b)는 모터와 링크축의 상대적 회전각으로 응답 초기 큰 토크 전달을 위해 빠른 증가를 보인 뒤 급격히 감소하며, 정상상태는 부하 중량에 의해 케이블이 인장된 상태이다.

Fig. 6은 Fig. 5와 동일한 조건에서 슬라이딩모드 제어를 적용한 경우이며, 이 때 비선형 입력의 크기는 도달법칙을 만족하는 $\rho=490$ 을 선정하였다.



(a) Link position



(b) Relative angle

Fig. 6 Position tracking performance - SMC

Fig. 6(a)는 링크의 응답으로 위치오차는 초기 최대 0.5°정도이며, 정상상태에서는 영으로 수렴하였다. 이 응답은 Fig. 5(a)와 비교 추종응답의 빠르기와 정밀도가 크게 개선되었음을 알 수 있으며, 이는 외란에 강인한 슬라이딩모드 제어의 장점을 잘 나타내고 있다. Fig. 6(b)는 모터와 링크축의 상대적 회전각으로, 정상상태에서의 응답 -6.77×10^{-4} 도는 케이블 인장을 의미하며, 케이블을 통해 링크에 가해지는 토크가 부하 중력에 의한 토크와 상쇄된 상태에 해당된다.

다음으로 외란에 의한 응답특성을 시뮬레이션 하였다. 외란 주파수에 따른 제어성능을 검증하기 위해 외란 T_d 는 크기는 5 Nm로 일정하고, 주파수는 2 초 동안 0.1 Hz에서 5 Hz로 선형적으로 변화하는 chirp신호로 가정하였다. Fig. 7은 외란 d_1 이다.

Fig. 8은 Fig. 7의 외란 상황에서 선형제어를 적용한 경우 링크의 위치 오차로 외란의 주파수가 증가할수록 커지며, 최대 오차가 약 $\pm 25^\circ$ 에 이를 정도로 매우 큼을 알 수 있다. 이 결과는 식 (22)와 일치한다. Fig. 9(a)는 동일한 외란 상황에서 슬라이딩모드

제어의 성능으로, 외란의 주파수가 증가할수록 선형 제어에 비해 큰 감소를 보였으며, 외란이 5 Hz일 때 약 $\pm 0.042^\circ$ 수준으로 많은 개선을 보였다. 이 결과는 식 (12)와 일치한다. 이때 비선형제어입력의 크기는 $\rho = 550$ 로 도달법칙을 만족하도록 선정하였다. 하지만 이때 제어입력은 비선형 부호함수로 인해 Fig. 9(b)와 같이 매우 빠른 스위칭을 갖는 체터링 현상을 보였다. 이는 슬라이딩모드 제어의 기본 특징이다.

슬라이딩모드 제어의 체터링을 완화하기 위한 부호함수를 포화함수로 근사화하여 적용하였으며, 선형구간의 기울기 $k=6$ 을 적용하였다. Fig. 10(a)는 이때의 외란조정 성능으로 5 Hz일 때 약 $\pm 0.047^\circ$ 수준으로 Fig. 9(a)와 비교 비슷한 수준의 제어성능을 보였으며, 이때의 제어입력은 Fig. 10(b)와 같이 체터링이 없다.

슬라이딩모드 제어의 외란 조정 성능 향상을 위해 외란 관측기 기반 슬라이딩모드 제어를 시뮬레이션 하였다. 외란조건은 Fig. 10에서와 동일하다. Fig. 11(a)는 외란조정성능으로, 5 Hz일 때 약 $\pm 0.014^\circ$ 수준으로 Fig. 9(a)의 슬라이딩모드 제어성능에 비해 개

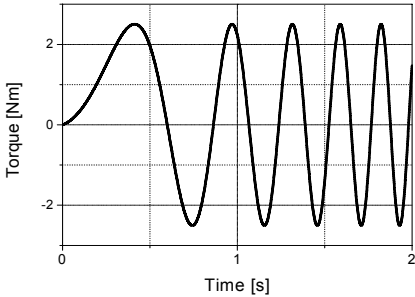


Fig. 7 Disturbance torque d_1

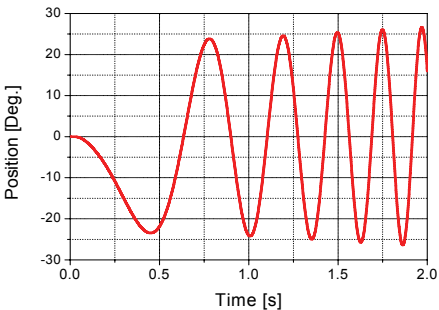
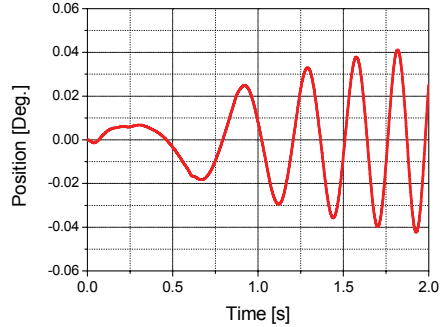
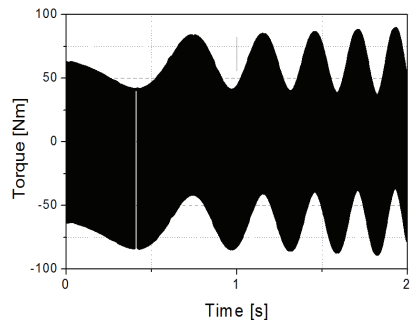


Fig. 8 Disturbance regulation performance - linear control

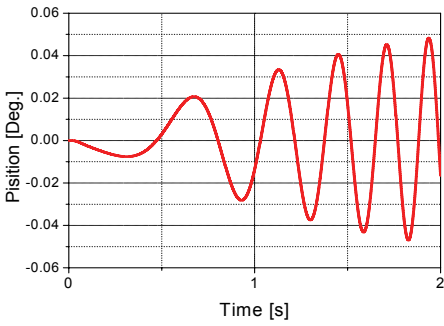


(a) Disturbance regulation performance

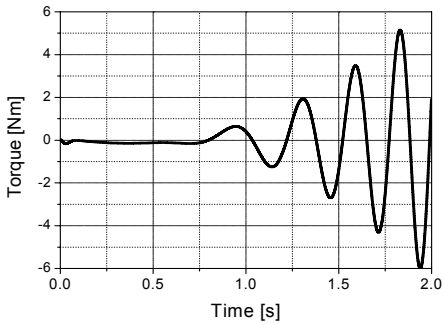


(b) Control torque

Fig. 9 SMC case

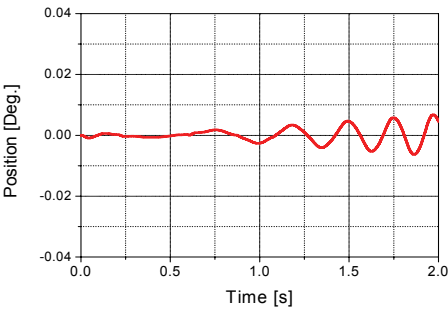


(a) Disturbance regulation performance

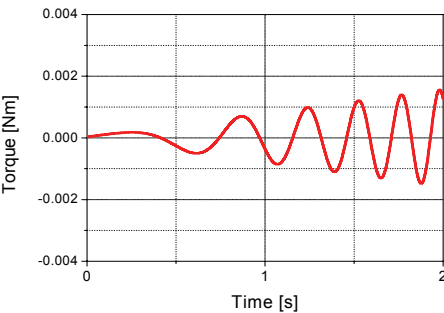


(b) Control torque

Fig. 10 Pseudo SMC case



(a) Disturbance regulation performance



(b) Control torque

Fig. 11 Observer based SMC case

선이 이루어졌음을 확인할 수 있다. Fig. 11(b)는 외란 관측 오차로 외란의 주파수가 낮으므로, 식 (23)에서와 같이 정밀한 관측이 이루어진 것으로 분석된다.

6. 결 론

핫셀 내부에 설치되어 마스터 조작기의 운동을 모사하는 슬레이브 조작기에서 대표적인 5-축 링크의 위치제어 정밀도 향상을 위한 제어기 설계 방법을 제안하였다. 이 링크는 케이블로 구동되어 전형적인 이질량계에 해당된다. 케이블의 탄성을 고려한 모델을 기초로 외란에 강한 슬라이딩모드 제어를 적용하였으며, 체터링 감소를 위해 부호함수 대신 포화함수를 사용하는 의사슬라이딩모드제어의 특성을 분석하였으며, 포화함수의 선형부 기술기는 위치 추종성능에는 무관하며, 외란조정 성능 향상에 영향을 미침을 보였다. 또한 슬라이딩모드 제어의 외란 조정 성능 향상을 위해 외란관측기를 적용한 외란 관측기 기반 슬라이딩모드 제어를 제안하였다. 제시된 제어기 설계 알고리즘은 시뮬레이션을 통해 조작기 5-축 링크에 적용하여 타당성과 성능을 확인하였으며, 특히 의사슬라이딩모드 제어가 외란 조정성능의 큰 차이 없이 체터링 감소에 효과가 있으며, 외란관측기 기반 슬라이딩 모드 제어가 슬라이딩모드 제어의 외란조정 성능 향상에 효과가 있음을 검증하였다. 조작기 각 축은 상호 독립적으로 제어되므로 단일축을 대상으로 한 이 연구의 결과는 다른 축에도 확장하여 적용할 수 있을 것으로 기대한다.

후 기

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(No. 2010-0008252).

참 고 문 헌

- (1) Lewis, F. L., Abdallah, C. T. and Dawson, D. M., 1993, Control of Robotic Manipulators, MacMillan.
- (2) Lawrence, D. A., 1993, Stability and Transparency in Bilateral Teleoperation, IEEE Trans. Robot and Automation, Vol. 9, No. 5, pp. 624-637.

(3) Chopra, N., Spong, M., Ortega, R. and Barabanov, N. E., 2004, On Position Tracking in Bilateral Teleoperation, Proc. of the 2004 American Control Conference, Boston, pp. 5244~5249.

(4) Gang, G. and Furusho, J., 2000, Speed Control of Two-Inertia System by PI/PID Control, IEEE. Trans. Industrial Electronics, Vol. 47, No. 3, pp. 603~609.

(5) Kang, M. S., Yoon, W. H. and Lee, J. B., 2011, LOS Stabilization Control of OTM Antenna Driven by Geared Flexible Transmission, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 21, No. 10, pp. 951~959.

(6) Zhang, G. and Furusho, J., 2000, Speed Control of Two-inertia System by PI/PID Control, IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 47, No. 3, pp. 603~609.

(7) Szabat, K. and Orłowski-Kowalska, T., 2007, Vibration Suppression in a Two-mass Drive System Using PI Speed Controller and Additional Feedback-comparative Study, IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 54, No. 2, pp. 1193~1205.

(8) Yuki, K., Murakami, T. and Ohnishi, K., 1999, Vibration Control of 2-mass Resonant System by Resonant Ratio Control, IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 46, No.1, pp. 162~168.

(9) Kasura, S. and Ohnishi, K., 2007, Force Servoing by Flexible Manipulator Based on Resonant Ratio Control, IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 54, No. 1, pp. 539~547.

(10) Ji, K. I. and Sul, S. K., 1995, Kalman Filter and LQ Based Speed Control for Torsional Vibration Suppression in a 2-mass Motor Drive System, IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 42, No. 6, pp. 564~571.

(11) Beineke, S., Schutte, F. and Grotstollen, H. 1997, Comparison of Methods for State Estimation and On-line Identification in Speed and Position Control Loops, Proc. 7-th EPE, pp. 364~369.

(12) Pan, Y. R., Shih, Y. T., Horng, R. H. and Lee, A. C., 2009, Advanced Parameter Identification for a Linear-motor-driven Motion System Using Disturbance Observer, Int. J. of Precision Engineering and

Manufacturing, Vol. 10, No. 4, pp. 35~47.

(13) Edward, C. and Spurgeon, S. K., 1998, Sliding Mode Control Theory and Application, Taylor & Francis Ltd.

(14) Utkin, V. I., Guldner, J. and Shi, J., 1999, Sliding Mode Control in Electromechanical Systems, New-York: Taylor & Francis.

(15) Young, D. K., Utkin, V. I. and Ozguner, A., 1999, Control Engineer's Guide to Sliding Mode Control, IEEE Trans. on Control Systems Technology, Vol. 7, No. 3, pp. 328~342.

(16) Kawamura, A., Itoh, H., and Sakamoto, K., 1994, Chattering Reduction of Disturbance Observer Based Sliding Mode Control. IEEE Trans. Ind. Application, Vol. 41, No. pp. 456~461.

(17) Hace, A., Jezernik, K. and Sabanovic, A., 2007, SMC with Disturbance Observer for a Linear Belt Drive, IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 54, No. 6, pp. 3402~3412.

(18) Hace, A., Jezernik, K. and Sabanovic, A., 2005, Improved Design of VSS Controller for a Linear Belt-driven Servomechanism, IEEE/ASME Trans. On Mechatronics, Vol. 10, No. 4, pp. 385~389.



Min Sig Kang received a B.S. degree in Department of Mechanical Engineering from Seoul National University in 1980. He then went on to receive M.S. and Ph.D. degrees from KAIST in 1983 and 1987, respectively. After receiving

Ph. D, he worked for Agency for Defence Development during 1987-1998. Dr. Kang is currently a professor of the Department of Mechanical and Automotive Engineering at Gachon University in Sungnam, Korea. His research interests include dynamic systems measurement and control, industrial robotics, and manufacturing systems.