

수중 로봇 팔의 원격조종 제어기 설계

(Design of a Teleoperation Controller for an Underwater Manipulator)

유지환* (한국과학기술원 기계공학과 대학원), 권동수 (한국과학기술원 기계공학과),
이판목 (한국해양연구소 선박해양공학분소), 홍석원 (한국해양연구소 선박해양공학분소)

Jee-Hwan Ryu* (Graduate School, KAIST), Dong-Soo Kwon (KAIST),

Pan-Mook Lee (KORDI), Suk-Won Hong (KORDI)

Key Words : Teleoperation, transparency, underwater manipulator, adaptive sliding mode control, disturbance observer, uncertainties.

ABSTRACT : This paper presents a Teleoperation controller design method for an underwater manipulator. Added mass, Added inertia, buoyancy, hydraulic drag and friction effect on the underwater manipulator dynamics. These uncertainties are very difficult to model and obtain magnitude information of the uncertainties. To achieve transparency for teleoperation in known or time-varying environments, adaptive sliding mode control is applied for robust position tracking control of slave manipulator. To guarantee a transparency in the master side, disturbance observer is used as a local controller of a master manipulator and, measured force from the slave force/torque sensor is transmitted to the operator. Numerical simulations are worked out to demonstrate the transparency and robustness of the controllers.

1. 서론

수중작업 기술은 우리 나라의 해양 기술 자립에 핵심적인 기술이며, 이중에서도 인간의 접근이 어려운 열악한 환경에서 각종 작업을 할 수 있는 수중로봇기술은 매우 중요한 기술이라 할 수 있다. 즉 해양 시설물 및 구조물의 보수, 점검, 정비, 해난 사고로 인한 구난과 침몰선의 인양 작업 지원, 수중 오염원의 조사, 관측 및 오염 염 제거 작업, 광통신 케이블 보수 유지, 심해 자원의 개발 등 인간의 접근이 어려운 열악한 환경에서 작업을 할 수 있는 수중로봇 기술에 대한 연구가 많이 행하여지고 있다 [1,2].

심해에서의 작업은 ROV에 장착되는 매니퓰레이터(Manipulator)에 의해 수행되기 때문에 매니퓰레이터의 원격제어 기술은 수중작업의 성공여부, 정류, 정도, 등이 결정되는 중요 기술이라 하겠다. 수중 매니퓰레이터는 산업용 로봇과 그 구조는 유사하나 운동방정식은 판이하게 다르다. 수중 작업용 매니퓰레이터는 부가질량, 부가관성모멘트, 부력, 관절마다의 실링으로 인한 마찰력, 그리고 해류, 파도와 로봇의 상대속도에 기인한 항력 등에 의해 영향을 받게된다. 더군다나, 이러한 수중에서의 여러 가지 요인들은 시간에 따라 변하는 불확실한 변수들이며 모델링이 매우 어려우며 이로인해 정밀한 경로제어가 힘들게 된다[3,4,5].

수중에서 매니퓰레이터의 원격제어 기술은 지상에서와는 달리 부가질량, 부가관성모멘트, 부력,

항력 그리고 증가된 마찰력에 대한 고려가 필수적이다. 외부 외란이나 시스템 변수의 변동을 갖는 시스템의 강인 제어를 위해 슬라이딩 모드 제어기가 많이 사용되고 있다. 하지만, 슬라이딩 모드 제어기는 이러한 불확실성에 대한 크기 정보를 미리 알고 있어야 한다는 단점이 있다. 수중 작업 매니퓰레이터의 동작 환경은 매우 큰 불확실성을 가지고 있으며, 따라서 불확실한 정보의 크기 한계를 정확히 예측하기란 매우 어렵다. 시스템 변수의 변동이나 외부 외란에 대한 추정치 없이 제어기를 설계하는 방법이 Slotine과 Li에 의해 소개되었다 [6]. 하지만, 이 방법은 시스템의 파라미터가 정해져 있을 경우에만 한정된다. 그리고, 파라미터가 수렴하기 위해서는 원하는 위치 입력이 여러 주파수의 정보를 포함하고 있어야만 한다. Chong은 적응 제어기와 슬라이딩 모드 제어기를 혼합한 적응 슬라이딩 모드 제어기를 제안하였다 [7]. 이 제어기는 시스템의 정해진 변하지 않는 파라미터는 적응 제어기를 사용하여 추정하고 크기가 변하는 불확실한 요소들은 Leung[8]에 의해 제안된 슬라이딩 모드 제어기를 사용하여 보상하는 방법이다.

본 논문에서는 수중 슬레이브 매니퓰레이터가 마스터에서 전달되어오는 위치 명령을 수중에서의 불확실한 환경을 극복하며 정확하게 추종하며 작업자가 작업환경을 좀더 현실감 있게 느끼게 하기 위하여, 적응 슬라이딩 모드 제어기와 외란 관측기를 이용하여 수중 로봇의 원격제어기를 설계하였다.

2. 수중 작업용 마스터/슬레이브 로봇 시스템

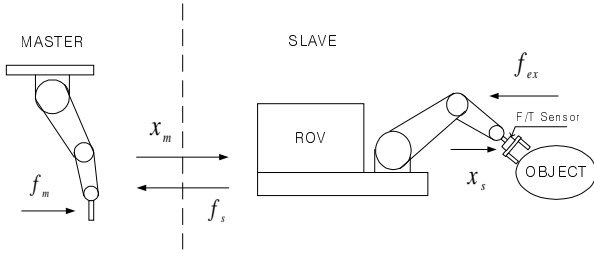


Fig. 1 Master/Underwater slave schematic diagram

Fig. 1는 본 논문에서 다루고자 하는 수중 작업용 마스터/슬레이브 시스템의 개념도이다. 작업자와 마스터 로봇의 상호작용에 의해 발생한 힘 f_m 은 마스터 로봇의 변위 x_m 을 유발시키고, 수중 슬레이브는 마스터에서 전달되는 위치 신호 x_m 을 추종해야 한다. 수중 슬레이브 로봇은 작업환경과의 접촉을 통하여 f_s 의 힘을 발생하며, 이 힘은 수중로봇의 말단에 부착된 힘/토크 센서에 의해 측정된 후 마스터 로봇을 경유하여 작업자에게 전달된다. 이때, 작업자는 마스터 로봇을 통하여 슬레이브 로봇의 접촉 힘을 느낄 수 있기 때문에 매우 섬세하고 정교한 작업을 수행할 수 있어서, 작업성을 크게 향상시킬 수 있다. x_s 는 수중 슬레이브 로봇의 변위이다.

해저에서 로봇 매니퓰레이터의 운동은 부력, 마찰력, 부가질량 및 부가관성모멘트, 항력과 같은 불확실한 요인들과 작업물체와의 상호작용에 의한 영향에 의해 지배된다. n 개의 관절을 가진 수중 로봇 매니퓰레이터의 동역학식은 다음과 같다.

$$H(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + F(q, \dot{q}) + D = \tau_s - J_s^T f_s \quad (1)$$

여기서 $q(t)$ 는 로봇 관절의 각도를 나타내는 크기 $n \times 1$ 의 벡터이고, $H(q)$ 는 부가질량 및 부가관성모멘트를 포함하는 크기 $n \times n$ 의 대칭이며 양의 한정인 관성행렬이다. $C(q, \dot{q})$ 는 부가질량을 포함하는 $n \times 1$ 의 코리올리력, 원심력을 나타내는 벡터이다. $G(q)$ 는 부력을 포함하는 $n \times 1$ 중력벡터이다. $F(q, \dot{q})$ 는 실링으로 인한 각 관절의 마찰력이다. D 는 파도와 해류의 운동에 대한 매니퓰레이터의 상대운동에서 기인하는 항력이다. 매니퓰레이터가 작업물체나 불확실한 외부환경과 접촉을 하며 작업을 수행할 때에는 접촉 힘 f_s 가 슬레이브 매니퓰레이터의 운동에 크게 영향을 미치게 된다. τ_s 는 슬레이브 매니퓰레이터의 입력 토크 벡터이다.

3. 외란 관측기 설계

지난 수년간 외란 관측기는 로봇 시스템의 강인성을 향상시키고 힘, 위치 제어 알고리즘을 간단히 하는데 많이 사용되어져 왔다 [9,10,11]. 본 논문에서는 마스터 매니퓰레이터의 마찰력과 비선형적으로 연결된 동적 특성을 제거하여 알고 있는 선형모델로 근사화 시켜 원격 제어 시 투명성을 보장하기 위해 쓰여졌다.

다음 그림은 마스터 매니퓰레이터의 각 축에서의 외란 관측기의 구조이다.

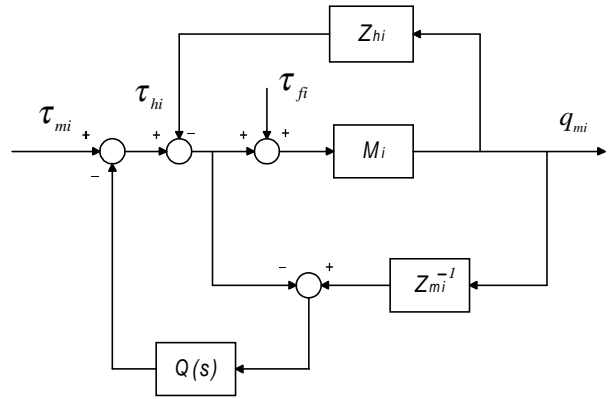


Fig. 2 Structure of disturbance observer of master

M_i 은 실제 마스터 매니퓰레이터의 시스템이고, Z_{mi} 은 우리가 알고 있는 선형의 공칭 모델이며, Z_{hi} 는 사람의 임피던스 모델이다.

외란 관측기의 외란 보상 기능은 가진 입력과 외란으로부터 출력까지의 전달함수를 구해 봄으로써 알 수 있다. 마찰에 의한 외란 τ_{fi} 와 입력 τ_{mi} 그리고 접촉력 τ_{hi} 로부터 마스터 매니퓰레이터의 위치 출력 q_{mi} 까지의 전달함수를 구해 보면 다음과 같다.

$$q_{mi} = G_{fq}\tau_f(s) + G_{\tau q}\tau_m(s) + G_{hq}\tau_h(s) \quad (2)$$

여기서

$$G_{fq} = \frac{M_i Z_{mi} (1 - Q)}{Z_{mi} + Q(M_i - Z_{mi})} \quad (3)$$

$$G_{\tau q} = \frac{M_i Z_{mi}}{Z_{mi} + Q(M_i - Z_{mi})} \quad (4)$$

$$G_{hq} = \frac{-M_i Z_{mi}}{Z_{mi} + Q(M_i - Z_{mi})} \quad (5)$$

$Q(s)$ 는 정상상태 게인이 1이 되는 저역통과 필터

터로 설계된다. 저주파 영역에서 $Q(s) \approx 1$ 이므로 $G_{fq} \approx 0$, $G_{\tau q} \approx Z_m$ 그리고 $G_{hq} \approx -Z_h$ 이 되는 결과를 얻을 수 있다. 이 결과는 외란 관측기에 의해 저주파 영역의 외란이 보상될 수 있음과 실제 플랜트가 알고있는 공칭 모델로 근사화 될수 있으며 고주파 영역에서는 $Q(s) \approx 0$ 이므로 측정 잡음이나 미분에 의한 잡음의 영향을 없앨 수 있음을 의미한다 [9,11]. 본 논문에서는 다음과 같은 3차의 저역 통과 필터를 사용하였다.

$$Q(s) = \frac{3(\tau_c s + \frac{1}{3})}{(\tau_c s + 1)^3} \quad (6)$$

4. 적응 슬라이딩 모드 제어기 설계

본 절에서는 수중에서의 작업이라는 특수한 상황을 고려하여, 수중 작업 매니퓰레이터가 해저의 불확실한 상황을 극복하고 마스터에서 전달되어 오는 위치 명령을 강인하게 추종하기 위한 제어기를 적응 슬라이딩 모드 제어법칙에 기초하여 제안하고자 한다.

위 2절에서 언급된 수중 슬레이브 로봇의 운동방정식 (1)에서 부가질량, 부가 관성모멘트 그리고 부력에 의한 불확실한 항은 다음과 같이 모델링 되어질 수 있는 항과 구별되어 표현되어질 수 있다.

$$\begin{aligned} H &= H_0 + \Delta H \\ C &= C_0 + \Delta C \\ G &= G_0 + \Delta G \end{aligned} \quad (7)$$

식 (2)를 식 운동방정식 (1)에 대입하면 다음과 같은 식이 얻어진다.

$$\begin{aligned} H_0(q)\ddot{q} + C_0(q, \dot{q})\dot{q} + G_0(q) \\ = \tau_s + \rho - J_s^T f_s \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 $\rho = -F - D - \Delta H\ddot{q} - \Delta C\dot{q} - \Delta G$ 로서 모든 불확실성을 나타낸다.

제어기의 전개를 위하여 몇 가지의 가정을 들도록 하자. 이 가정들은 실제로 만족되는 가정이다.

가정

1. 일반적으로 마찰력은 $F_v \dot{q} + F_c \text{sgn}(\dot{q})$ 로 모델링 될 수 있으므로 다음의 조건을 만족한다.

$$\|F\| < v_0^f + v_1^f \|q\| + v_2^f \|\dot{q}\|^2 \quad (9)$$

2. 항력은 파도와 해류의 운동에 대한 매니퓰레이터의 상대 속도의 제곱근에 비례하므로 다음과

같이 바운드 될 수 있다.

$$\|D\| < v_0^d + v_1^d \|q\| + v_2^d \|\dot{q}\|^2 \quad (10)$$

3. 행렬 $H(q)$ 는 다음과 같이 바운드 되어진고

$$\|H(q)\| < v^h \quad (11)$$

$H^{-1}(q)$ 가 존재한다.

4. 벡터 $C(q, \dot{q})\dot{q}$ 와 $G(q)$ 는 다음 식을 만족한다.

$$\|C(q, \dot{q})\dot{q}\| < v_0^c + v_1^c \|q\| + v_2^c \|\dot{q}\|^2 \quad (12)$$

$$\|G(q)\| < v_0^g + v_1^g \|q\| \quad (13)$$

$v_0^f, v_1^f, v_2^f, v_0^d, v_1^d, v_2^d, v^h, v_0^c, v_1^c, v_2^c, v_0^g, v_1^g$ 는 양의 상수이다.

5. 제어입력 τ_s 는 다음조건을 만족하도록 선택 되어진다.

$$\|\tau_s\| < \lambda_0 + \lambda_1 \|q\| + \lambda_2 \|\dot{q}\|^2 \quad (14)$$

여기서 $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2$ 는 임의의 양의 상수이다.

위의 가정을 토대로 모든 불확실성 항을 포함하는 ρ 는 다음과 같이 바운드 되어진다.

$$\|\rho\| < b_0 + b_1 \|q\| + b_2 \|\dot{q}\|^2 \quad (15)$$

b_0, b_1, b_2 는 양의 상수이다.

위의 전개에서 알 수 있듯이 수중 슬레이브 매니퓰레이터는 지상에서의 매니퓰레이터 운동방정식으로 표현 가능한 항들과 수중에서의 부가질량, 부가 관성모멘트, 부력, 항력 그리고 실링에 의한 마찰력 등의 불확실한 항으로 표현되어진다. 즉, 크기는 크지만 변하지 않는 요소들과 그 크기는 정해져 있지 않지만 작고 바운드 되어질 수 있는 요소들로 이루어져 있다. 그리고, 매니퓰레이터가 작업물체나 작업환경과 접촉 시 상호작용에 의한 접촉력이 매니퓰레이터의 운동에 영향을 미치게 된다.

본 논문에서는 수중 슬레이브 매니퓰레이터가 마스터로부터 전달되어 오는 위치 명령을 강인하게 추종하게 하기 위하여 Chong[7]에 의해 제안된 강인한 적응 슬라이딩모드 제어기에 기초하여 원격조종 제어기를 설계하였다. 이 제어기는 매니퓰

레이터의 원하는 위치 추종을 위하여 크기가 정해져 있는 파라미터를 다루기 위해 Slotine, Li가 제안한 Composite Adaptive Controller [6]를 사용하고, 크기가 정해져있지는 않지만 작고 변하는 파라미터를 다루기 위하여 Su와 Leung에 의해 제안된 불확실성의 바운드를 추정하는 슬라이딩 모드제어를 사용하였다.

슬라이딩 평면은 다음과 같이 정의되어 진다.

$$s = \dot{e} + \Lambda e = \dot{q} - \dot{q}_r \quad (16)$$

여기서, $\dot{q}_r = \dot{q}_d - \Lambda e$, q_d 는 원하는 위치 입력 즉, 마스터에서 전달되어 오는 위치이다. $e = q - q_d$ 이고 Λ 는 양의 상수이다.

시간에 따라 변하지 않는 매니퓰레이터의 파라미터들은 다음과 같이 선형으로 추출할 수 있다.

$$\begin{aligned} H_0(q) \ddot{q}_r + C_0(q, \dot{q}) \dot{q}_r + G_0(q) \\ = Y_r(q, \dot{q}, \ddot{q}_r) a \end{aligned} \quad (17)$$

$a \in R^m$ 는 모르는 상수 벡터이고, $Y_r \in R^{n \times m}$ 는 모르는 상수 벡터와는 독립적인 regressor 행렬이다.

제안된 제어기의 입력과 갱신 법칙은 다음과 같다.

$$\tau_s = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3, \quad (18)$$

$$\tau_1 = Y_r(q, \dot{q}, \ddot{q}_r) \hat{a} - Ks, \quad (19)$$

$$\tau_2 = \frac{-\hat{\eta}_1 s - \hat{\eta}_2 \|q\| s - \hat{\eta}_3 \|\dot{q}\|^2 s}{\|s\|}, \quad (20)$$

$$\tau_3 = J_s^T f_s, \quad (21)$$

$$\hat{a} = -\Gamma [Y_r^T s + W^T W \hat{a}], \quad (22)$$

$$\hat{\eta}_1 = \Omega_1 \|s\|, \quad (23)$$

$$\hat{\eta}_2 = \Omega_2 \|q\| \|s\|, \quad (24)$$

$$\hat{\eta}_3 = \Omega_3 \|\dot{q}\|^2 \|s\|, \quad (25)$$

K 와 Γ 는 양의 한정인 행렬이고, $\tilde{a} = \hat{a} - a$ 이다. $\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3$ 는 η_1, η_2, η_3 의 양의 학습계수이다. W 는 $Y(q, \dot{q}, \ddot{q})$ 을 저역 통과 필터를 통과시켜 나온 신호이다.

위의 제어법칙의 안정성의 증명과 슬라이딩 평면으로의 수렴에 대한 자세한 증명은 참고문헌 [7] 을 참고하기 바람.

5. 원격제어기 설계

본 절에서는 위에서 언급된 외란 관측기와 적응 슬라이딩 모드 제어기를 마스터와 수중 슬레이브 매니퓰레이터 시스템에 적용하여 원격조종 시스템을 구성하였다. 이 경우에 $q = q_s$, 슬레이브의 위치이고, $q_d = q_m$, 마스터에서 전달되어 오는 위치 명령이다. 그러므로, $\dot{q}_r = \dot{q}_m - K(q_s - q_m)$ 이고, 슬레이브의 위치 추종을 위한 제어입력은 식 (18) ~ (25)에 의해 표현된다.

지금까지는 마스터에서 전달되어지는 위치 명령을 수중 슬레이브 매니퓰레이터가 주위의 외란과 작업환경과의 접촉이 존재할 경우에도 강인하게 추종할 수 있는 제어기의 설계에 대하여 주로 논의를 하였다. 지금부터는 작업자에게 슬레이브가 작업물체와 접촉시에 발생하는 힘을 전달하기 위한 마스터의 힘 반사기능에 대해 논의하고 전체적인 원격조종 시스템의 투명성에 대하여 다루겠다. Fig. 3은 외란 관측기와 적응 슬라이딩 모드 제어기가 적용된 전체적인 원격조종 시스템의 블록 선도이다.

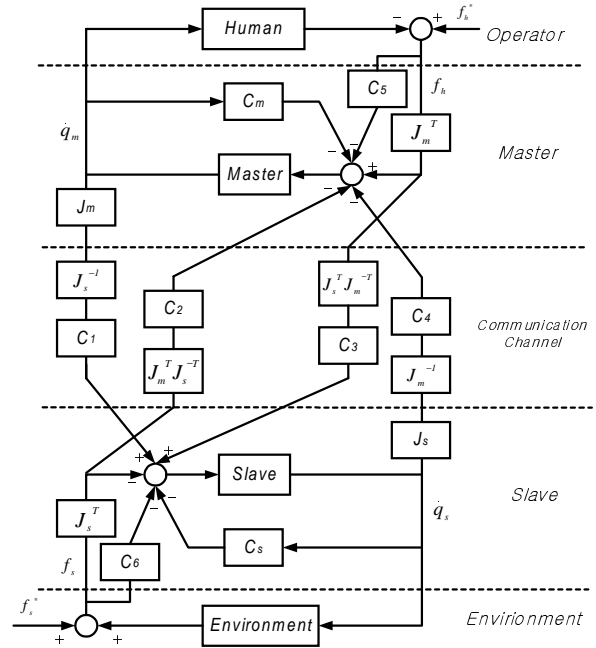


Fig. 3 General block diagram of a bilaterally controlled system (Including local force feedback)

$C_1, C_2, C_3, C_4, C_m, C_s$ 는 원격조종 시스템에 투명성을 부여하기 위한 피드백과 피드포워드 제어기들이고 C_5 와 C_6 는 마스터와 슬레이브의 로컬 힘 피드백 제어기이다. $f_h^* f_s^* f_s^*$ 는 각각 작업자가 마스터를 움직이기 위해 내는 힘, 작업자에 의해 마스터에 직접적으로 가해지는 힘, 슬레이브가 작업환경에 가하는 힘, 작업환경에서 받

생하는 외력 이다.

C_1 과 C_5 그리고 C_6 는 3절에서 제안된 적응 슬라이딩 모드 제어기에 의해서 정해지게 되고, C_m 과 C_5 는 2절에서 제안된 외란 관측기에 의해 정해지게 된다.

원격지에서 수중 슬레이브와 작업환경과의 접촉에 의한 힘을 작업자에게 느끼게 하기 위하여, 슬레이브에서 측정된 힘 신호를 작업자에게 전달하여야 한다. 본 논문에서 마스터 매니퓰레이터는 외란 관측기에 의해 마찰과 비선형성이 제거된 admittance 형태의 마스터로 만들 수 있었으므로 슬레이브 측의 힘/토크 센서에서 측정된 힘을 마스터에 전달해 줌으로서 힘 반향을 구현하였다. 즉, $C_2 = n_f I$ 로 설정하였다. n_f 는 힘 스케일링 계인이다.

6. 모의실험

제안된 수중 작업용 원격제어기의 성능을 시험하기 위하여 모의실험을 수행하였다. 간단한 시험을 위하여 1-자유도의 마스터/슬레이브 시스템에 대하여 모의실험을 수행하였다. 모의실험을 수행한 마스터와 작업자의 모델은 다음과 같다.

$$m_m \ddot{q}_m + b_m \dot{q}_m = \tau_m - f_r \operatorname{sgn}(\dot{q}_m) + f_h \quad (26)$$

$$f_h^* - f_h = m_h \ddot{q}_m + b_h \dot{q}_m + k_h q_m \quad (27)$$

여기서,

$$m_m = 2, b_m = 0.2, m_h = 1, b_h = 50, k_h = 2000 \quad \text{이}$$

고, $f_r = 1.5$ 로 마스터에 존재하는 쿨롱마찰 계수이다. 외란 관측기는 마스터에 존재하는 마찰만을 없애도록 설계되었다.

수중 슬레이브와 작업환경의 모델은 다음과 같다.

$$(m_s + m_{ad}) \ddot{q}_s + b_s \dot{q}_s = \tau_s - d - f_s \quad (28)$$

$$f_s = m_e \ddot{q}_s + b_e \dot{q}_s + k_e q_s \quad (29)$$

$m_s = 20, b_s = 2, m_e = 0, b_e = 50, k_e = 1000$ 이고, 부가질량, $m_{ad} = 10 \cos(2\pi t)$, 조류나 파도에 인한 항력, $d = 10 \sin(2\pi t)$ 로 가정하였다.

작업자가 마스터에 가해주는 힘 f_h^* 는 다음과 같이 주어진다.

$$f_h^* = 200(1 - \cos(\pi/2t)) + 50(\sin(\pi/4t) + \sin(\pi/8t)) \quad (N) \quad (30)$$

사람의 입력신호를 위와 같이 복잡한 형태로 가하는 이유는 실제 사람의 입력을 모사하기 위한

면도 있지만 적응제어기의 파라미터 수렴성을 좋게 하기 위해서 여러 주파수의 입력을 함께 넣어 주는 것이다.

적응 슬라이딩 모드 제어기의 각각의 파라미터들은 다음과 같이 선정되었다.

$$K = 50, \Lambda = 100, \Gamma = \operatorname{diag}[0.01, 0.01, 1]$$

$$\Omega_1 = 1000, \Omega_2 = 2000, \Omega_3 = 2000$$

저역통과 필터의 주파수는 $100(\operatorname{rad/s})$ 로 정하였다.

6.1 자유운동 모의실험

수중 슬레이브 매니퓰레이터가 수중에서 자유로운 운동, 즉, 외부 환경과의 접촉없이 마스터의 위치 명령을 추종하는 경우에 대한 모의 실험이다. 위에서 언급하였듯이 수중 슬레이브는 부가 질량과 항력이 외란으로 작용하고 있다. Fig. 4는 자유운동시의 모의실험 결과이다. 이러한 부가 질량과 항력이 존재함에도 불구하고 마스터의 위치 명령을 슬레이브가 잘 추종하고 있음을 볼 수 있다. 작업환경과의 접촉이 없이 운동을 하고 있기 때문에 슬레이브 측에서 전달되는 힘은 없지만, 작업자가 느끼는 힘이 존재하게 되는데 이는 마스터 매니퓰레이터 자체의 임피던스에 기인한 힘이다.

6.2 연속적인 접촉 모의실험

수중 슬레이브 매니퓰레이터가 수중에서 작업환경과 접촉을 끊이지 않고 연속적으로 접촉하면서 작업을 수행할 때를 시뮬레이션 하였다. Fig. 5는 마스터와 수중 슬레이브의 위치와 힘 추종 곡선을 나타낸다. 비교적 소프트한 환경과 접촉하고 있기 때문에 슬레이브의 위치 추종에는 오차 없이 잘 추종하고 있는 것을 볼 수 있다. 힘의 추종 면에 있어서도 좋은 성능을 보이고 있다.

6.3 접촉-비접촉 모의실험

슬레이브 매니퓰레이터가 작업환경과 접촉 비접촉을 반복하는 경우에 제안된 제어기의 위치 힘 추종 성능을 시험하였다. Fig. 6에 그 결과를 나타내었다. 슬레이브 매니퓰레이터는 초기 위치 $q_s(0) = 0$ 에서 출발하고 작업환경은 $q_s = 0.1$ 이 되는 위치에 존재하게 된다. 그러므로, $q_s(t) \geq 0.1$ 이 되면 슬레이브는 환경과 접촉하게 되고 접촉 힘이 마스터에 전달되게 된다. 그럼에서 알 수 있듯이 접촉하는 순간과 비접촉이 일어나는 순간에 떨림 현상이 나타나는 것을 볼 수 있다. 이러한 접촉과 비접촉의 전이순간에서의 떨림 현상을 없애는 것은 앞으로 해결해야될 문제로 남아있다.

7. 결론

본 논문에서는 불확실성이 존재하는 수중 작업용 마스터/슬레이브 매니퓰레이터의 안정하고 투명성이 보장되는 원격제어기의 설계를 제안하였다. 부가질량, 부가관성모멘트, 부력 그리고 항력 등의 불확실한 요소들이 존재하는 수중에서 슬레이브 매니퓰레이터가 마스터에서 전달되는 위치 명령을 강인하게 추종하게 하기 위하여 적응 슬라이딩 모드 제어기가 적용되었다. 마스터 측에는 외란 관측기를 이용하여 마찰 등의 비선형적인 항들을 소거하고 슬레이브 측에서 측정되는 힘 신호를 마스터에 전달해주어 작업환경의 정보를 왜곡 없이 전달될 수 있게 만들었다. 모의실험을 통하여 제안된 제어기가 시간에 따라 변하는 불확실성이 존재하고 접촉과 비접촉운동 모두에서 강인 안정성과 투명성이 보장됨을 보였다.

참고문헌

- (1) M. W. Dunnigan, D. M. Lane, A. C. Clegg and I. Edwards, "Hybrid position/force control of a hybrid underwater manipulator," *IEE Proc-Control Theory Appl.*, vol. 143, no. 2, pp. 145-151, march, 1996.
- (2) W. M. Timothy and M. R. Stephen, "Development and Experimental Validation of an Underwater Manipulator Hydrodynamic Model," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 17, no. 7, pp. 748-756, July, 1998.
- (3) E. S. Kang, J. S. Song, J. H. Kim and H. S. Cho, "Dynamic Characteristic and Control of Submerged Working Robot manipulator," *KSME*, vol. 5, no. 2, pp. 488-496, 1991.
- (4) H. S. Choi, "Modeling of robot manipulators working under the sea and the design of a robust controller," *Int. J. Robotica*, vol. 14, pp. 213-218, 1996.
- (5) V. F. Falaretov and E. V. Koval, "Autonomous Stabilization of Underwater Robotics in the time Manipulation Operations," *Proc. Int. O.P.E.C.*, Oskas, Japan, April, pp. 382-388, 1994.
- (6) J. J. E. Slotine and W. Li, *Applied Nonlinear Control*, Prentice Hall, New York, 1991
- (7) S. S. Chong, X. Yu and M. Zhihong, "Robust adaptive sliding mode control with modified regressor matrix and composite adaptation for robotic manipulators," *Advanced Robotics*, vol. 12, no. 1, pp. 53-66, 1998.
- (8) C.-Y. Su and T.-P. Leung, "A sliding mode controller with bound estimation for robot

manipulators," *IEEE Trans. Robotics & Automation*, vol. 9, no. 2, pp. 208-214, 1993.

(9) R. J. Bickel and M. Tomizuka, "Design of Robust Tracking Controller in the Discrete Time Domain," *In Proc. of the 3rd International Workshop on Advanced Motion control*, Berkeley, CA, Mrach, 1994.

(10) Y. Horri, K. Shimura and M. Tomizuka, "Position/Force Control of Multi-Axis Robot controller for Each Joint," *In Proc. of the ACC*, 1992.

(11) S. Komada, K. Onishi and T. Hori, "Hybrid Position/Force Control of Robot Manipulators Based on Acceleration Controller," *In Proc. of the IEEE Int. Conf. On Robotics and Automation*, Sacramento, California, 1991.

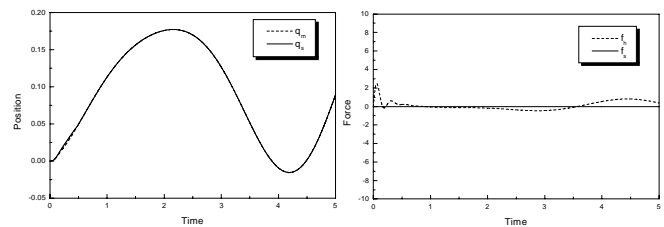


Fig. 4 Free motion simulation

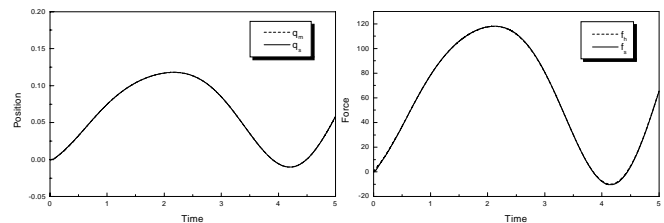


Fig. 5 continuous contact simulation

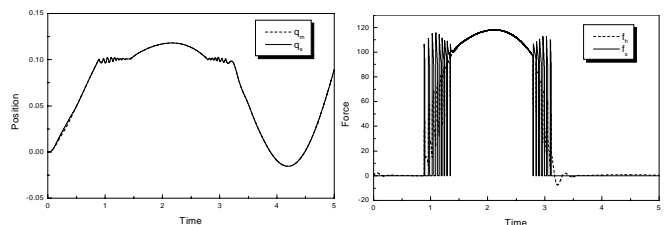


Fig. 6 Intermittent contact simulation