

해저작업 로봇 매니퓰레이터의 슬라이딩 모드 제어

최형식*, 박한일**

A Sliding Mode Control of Robot Manipulator Operated Under the Sea

H. S. Choi*, H. I. Park**

ABSTRACT

This paper presents a modeling of undersea robot manipulators and a control scheme appropriate for manipulating the manipulators working under the unstructured sea water environment. Under the sea, the added mass and added moment of inertia, buoyancy, and drag forces should be considered in modeling the dynamics of the robot manipulators. Due to the complexity of them, the desired dynamics of manipulators can not be accomplished by the conventional control schemes. Hence, a sliding mode control is applied to control the modeling error.

Key Words : Added mass(부가질량), Added moment of inertia(부가관성모멘트), Sliding mode control(슬라이딩 모드 제어), Unstructured

1. 서론

해저에 존재하는 광물자원의 채굴이나 석유의 수송을 위한 송유관의 설치 및 보수 그리고 대륙간 통신을 위한 광케이블의 설치 및 보수유지를 위한 작업이 많아지고 그 의미를 더하여 가고 있다. 하지만 해저작업은 깊은 위험한 지역에서 행하여지는 수가 많아서 인간이 직접 작업하기에는 어렵고 위험한 경우가 많다. 따라서 이러한 작업을 할 수 있는 로봇 매니퓰레이터의 활용이 그 의미를 더해가고 있다. 이미 산업용 로봇 매니퓰레이터의 구조 및 운동에 대해서는 많은 연구가 행해졌고 또한 행해지고 있

지만 해저작업 로봇 매니퓰레이터에 대한 연구는 별로 많지 않다. 해저에서도 구조적으로 이와 유사한 형태의 매니퓰레이터가 운용되지만 유체속에서 운동하므로 육상과 달리 부력과 부가질량(added mass) 및 부가관성 모멘트(added moment of inertia) 그리고 각 관절의 실링 등으로 인한 정적 및 동적 마찰력의 증가와 매니퓰레이터 자체속도와 해류와 파도의 영향으로 인한 항력도 고려하여야 하기에 운동방정식은 보다 복잡하다. 그리고 이러한 부가질량, 부가관성 모멘트, 마찰력 및 항력의 정확한 모델링은 매우 어렵고 복잡하여 제어시에 매우 불확실한 변수로 남게된다. 이러한 매니퓰레이터의 원하는 운동을 위

* 한국해양대학교 기계시스템공학부

** 한국해양대학교 조선해양공학부

하여 불확실성을 고려하지 않은 제어방법을 적용하면 원활한 성능을 얻기가 어렵다. 따라서 해저에서 작업하는 매니플레이터의 작업수행을 위해서는 제시된 문제점들을 해결하면서 원하는 경로를 추적할 수있는 제어 알고리즘의 적용이 요구된다.

해저 로봇 매니플레이터의 연구에 관한 논문으로는 특수한 형태의 3 자유도 로봇 매니플레이터의 모델링이 있었으나 모델링 오차나 파도와 해류등과 같은 가능한 교란은 고려하지 않은 완전한 모델을 가정하고 따라서 이의 제어에 계산 토크 방식의 제어를 적용하였다⁽¹⁾. 해저 로봇 매니플레이터 대한 또 다른 논문에서는 운동방정식에서 단지 일반적인 경우의 항력에 관한 고려만을 하였다⁽²⁾. 한편 해저에서 운동시 존재하는 부력 외에도 부가질량 및 부가관성 모멘트와 매니플레이터 자체속도와 해류와 파도로 인한 항력을 포함한 로봇 매니플레이터의 일반적인 모델링과 제어시에 실제 로봇 운동식과 이의 모델링간의 오차를 전실하게 제어하며 원하는 경로제어를 성취하는 제어기에 대한 연구가 있었다⁽³⁾.

본 논문은 해저 로봇 매니플레이터의 모델링과 이의 불확실한 변수들을 전실하게 제어하는 슬라이딩 모드 제어기에 관하여 연구하였다. 매니플레이터를 제어할때 불확실한 부가질량 및 부가관성 모멘트 그리고 항력과 마찰력의 추정치를 갖는 계산 토크 형태의 제어기의 적용으로 인한 추정오차는 매니플레이터의 운동을 방해하는 교란으로 정의되고 이 교란을 전실하게 대처하며 원하는 경로를 따르는 슬라이딩 모드 제어가 제안된다. 제안된 제어방식의 적합성을 확인하기 위하여 2 자유도 수평관절 로봇을 이용한 시물레이션을 행하였다.

2. 로봇 매니플레이터의 운동방정식

매니플레이터의 각 링크는 강체라고 가정하면 운동방정식은 뉴턴과 오일러의 방정식에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$F = m\dot{v}_c \quad (1)$$

$$N = I\dot{\omega} + \omega \times I\omega \quad (2)$$

여기서 m : 질량, ω : 각속도, $\dot{\omega}$: 각가속도, 그리고 I : 관성텐서이다. n 자유도 로봇 매니플레이터에 작용하는 힘과 토크는 식 (1)과 (2)를 사용함으로써 문헌

(4,5)에서 나타난 것과 같이 $i = 1, \dots, n$ 에 대하여 다음 방정식으로 표현된다.

$$f_{i-1,i} - f_{i,i+1} - m_i \dot{v}_{ci} + m_i g = 0 \quad (3)$$

$$N_{i-1,i} - N_{i,i+1} + r_{i,ci} \times f_{i,i+1} - r_{i-1,ci} \times f_{i-1,i} - I_i \dot{\omega}_i - \omega_i \times (I_i \omega_i) = 0 \quad (4)$$

여기서 m_i : 링크 i 의 질량, g : 중력 가속도, v_{ci} : 매니플레이터의 기저 좌표계에 준한 링크 i 의 무게중심의 속도, ω_i : 각속도 벡터, I_i : 링크 i 의 관성텐서이다. $f_{i-1,i}$ 와 $-f_{i,i+1}$ 는 각각 링크 $i-1$ 와 $i+1$ 로부터 링크 i 에 적용된 한 쌍의 힘이다.

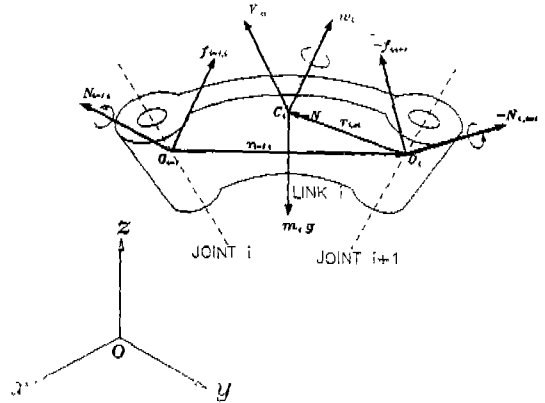


Fig. 1 Free body diagram of link i

모든 링크 ($i = 1, \dots, n$)에 대하여 식 (3)과 (4)를 순차적으로 적용하여 정리하면 n 자유도 매니플레이터의 운동방정식은 다음과 같다.

$$H(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau \quad (5)$$

여기에서 q : $n \times 1$ 관절각 벡터, τ : $n \times 1$ 관절토크 벡터, $H(q)$: $n \times n$ 관성행렬, $C(q, \dot{q})$: 원심력을 포함하는 $n \times 1$ 비선형 벡터이다.

3. 해저로봇 매니플레이터의 운동방정식

해저에서 로봇 매니플레이터의 활용은 Fig. 2와 같이 산업용 로봇 매니플레이터 형태를 ROV에 부착하여 작업 장소에 도착하여 작업을 수행한다.

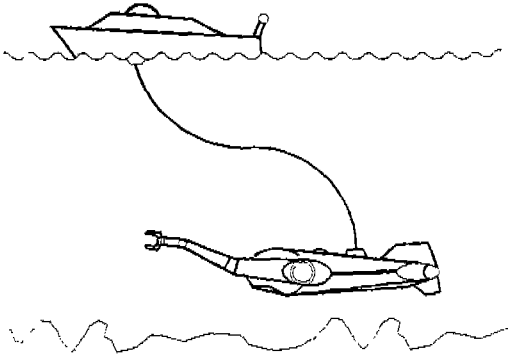


Fig. 2 Configuration of a robot manipulator operated under the sea

해저에서 로봇 매니플레이터의 운동방정식은 부력, 부가 질량 및 부가관성 모멘트, 항력과 같은 요인에 의하여 많은 변화를 가져온다. 로봇 각 링크의 질량과 관성모멘트는 매니플레이터의 운동으로 인하여 가속화된 유량만큼 증가된다. 증가된 질량과 관성 모멘트는 부가질량과 부가관성 모멘트라 부른다. 이에 더하여 로봇 매니플레이터가 동작할 때 매니플레이터 자체의 속도와 파도 및 해류의 상대속도로 인한 항력은 로봇 매니플레이터의 운동을 방해한다.

해저에서 매니플레이터에 작용하는 중력은 i 번째 링크의 전체 V_i 에 비례하는 부력에 의해 감소되며 따라서 매니플레이터의 링크에 걸리는 중력 방향의 힘은 다음과 같다.

$$m_i^0 g = (m_i - \rho_s V_i) g \quad (6)$$

여기에서 ρ_s 는 해수의 밀도이다. 로봇 매니플레이터가 가속될 때 링크의 질량과 관성 모멘트는 부가질량과 부가관성 모멘트에 의하여 증가된다. 따라서 i 번째 링크에서 부가질량 m_i' 와 부가관성 모멘트 I_i' 를 포함하는 실제 운동에 고려하여야 할 질량 m^* 와 관성 모멘트 I^* 는 각각 다음과 같다.

$$m_i^* = m_i + m_i' \quad (7)$$

$$I_i^* = I_i + I_i' \quad (8)$$

여기에서 $m_i' = C_A \rho_s A_i l_i$, C_A : 부가질량 계수, A_i : i 번째 링크의 운동방향의 수직면에 대한 i 번째 링크의 투사 면적, l_i : i 번째 링크의 길이이다. 여기서 비선형적

인 매니플레이터 운동과 비선형적인 파도와 해류의 운동으로 인하여 링크의 속도 분배는 선형이 아니어서 A_i 는 정확히 측정하기 어렵고 단지 i 번째 링크의 실제 투사면적 A_i' 에 비해 $A_i \leq A_i'$ 과 같이 유계된다. I_i' 는 i 번째 링크가 회전축을 중심으로 회전할 때 이동한 유체로 인한 부가관성모멘트이다. 따라서 I_i' 는 링크의 형상과 회전 중심의 함수이며 수학적 모델링은 어렵다. 부가질량과 관성 모멘트를 고려하여 식(3)을 표현하면 뉴우튼과 오일러 방정식이 다음과 같다.

$$f_{i-1,i} - f_{i,i+1} - m_i^* \dot{v}_{ci} + m_i^0 g = 0 \quad (9)$$

$$N_{i-1,i} - N_{i,i+1} + r_{i,ci} \times f_{i,i+1} - r_{i-1,ci} \times f_{i-1,i} - I_i^* \dot{\omega}_i - \omega_i \times (I_i^* \omega_i) = 0 \quad (10)$$

오일러-뉴우튼 방정식 (9)와 (10)을 폐형식(closed form) 운동방정식으로 나타내기 위하여 관절토크 $\tau_i = N_{i-1,i}$ 라 정의하고 식 (9)와 (10)을 $i = 1, \dots, n$ 에 대하여 연속으로 계산하면 n -자유도 매니플레이터의 폐형식 운동방정식은 행렬 형태로 다음과 같다.

$$H^*(q)\ddot{q} + C^*(q, \dot{q})\dot{q} + G^*(q) = \tau \quad (11)$$

여기에서 $H^*(q)$ 는 부가질량 및 관성 모멘트를 포함하는 링크의 질량과 관성 모멘트로 구성된 $n \times n$ 관성 행렬이다. $C^*(q, \dot{q})$ 는 $n \times 1$ 부가질량을 포함하는 코리올리력, 원심력인 비선형 힘 벡터이다. $G(q)^*$ 는 부력을 포함하는 $n \times 1$ 중력 벡터이다.

해저에서 부가질량, 부가관성 모멘트, 및 부력 외에도 로봇 매니플레이터의 운동을 방해하는 항력이 존재한다. 항력은 매니플레이터의 주위의 파도와 해류의 운동에 대한 상대운동으로 인한 매니플레이터의 운동을 방해하는 힘이다. 항력은 해수에 대한 로봇 매니플레이터의 상대속도의 제곱근에 비례한다. 본 논문에서 항력을 야기하는 요소 중에서 파도의 파형은 사인 함수로 가정되었고 속도, 길이, 깊이, 물결의 주기 등의 관계로부터 사인 함수에 대한 속도 방정식은 아래와 같이 표현되어진다⁽¹⁰⁾.

$$\begin{cases} u = \xi_a v_w k \frac{\cosh k(-z+h)}{\sinh kh} \cos k(x - v_w t) \\ \omega = \xi_a v_w k \frac{\cosh k(-z+h)}{\sinh kh} \sin k(x - v_w t) \end{cases} \quad (12)$$

여기에서 ξ_n 는 파도의 진폭, $k = \frac{2\pi}{L_w}$ 는 파수, L_w 는 파장이다. z 는 기준점이 해수면이며 아래 방향이 양의 좌표로 정의된다. 물 깊이 h 는 양의 성분이다. u 와 w 는 각각 수평과 수직 파속(wave velocity)을 나타내므로 파속벡터 $u_w = [u^T \ w^T]^T$ 로 정의된다. 또한 파형의 속도 v_w 는 다음과 같다.

물깊이가 얇을 경우: ($h < L_w/20$): $v_w = \sqrt{gh}$,
 물깊이가 깊을 경우: ($h > L_w/20$): $v_w = (gL_w/2\pi)^{1/2}$.

로봇 매니플레이터의 운동을 방해하는 항력에 영향을 미치는 다른 한 요소는 해류이다. 해류의 속도는 v_c 로 정의하고 그것의 정확한 모델링은 정의되어 있지 않으나 방향과 크기의 상한은 정의된다고 가정한다. 위에 정의한 파속과 해류의 속도에 더하여 매니플레이터 주위의 유체에 대한 상대 속도 v_{ri} 는 매니플레이터 그 자체의 속도 v_{mi} 파도의 속도 u_{wi} 와 해류의 속도 v_{ci} 로 구성되어 다음과 같이 표현된다.

$$v_{ri} = v_{mi} - u_{wi} - v_{ci} \quad (13)$$

매니플레이터의 상대속도에 의해 i 번째 링크에 가해지는 항력은 다음과 같다.

$$D_{fi} = -C_D(1/2)\rho v_{ri}|v_{ri}|A_i \quad (14)$$

여기에서 A_i 는 i 번째 링크의 v_{ri} 방향의 수직방향에 대한 투사된 면적이다. 항력계수 C_D 는 레이놀즈수와 로봇 링크의 거칠기에 따라서 변한다. 일반적으로 수중에서 매니플레이터의 속도는 느리고 따라서 $1(m/s)$ 이하로 가정하고 해수밀도 $\rho_s = 1025(kg/m^3)$ 로 가정하면 C_D 의 상한 치는 원통실린더의 경우 다음의 조건하에서 문헌(9)의 레이놀즈수에 따른 C_D 의 값을 정의한 표를 이용하여 상한치를 구할 수 있다.

$$10^3 < Re < 10^5 \text{의 경우: } C_D \leq 1.3, R_e = \frac{\rho_s |v| l_i}{\mu} \quad (15)$$

이와 같이 여러 불확실한 요소로 인하여 항력의 정확한 값을 구하기는 매우 어렵다. 매니플레이터에 가해지는 항력은 오일러 방정식에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$D_{di} - D_{di+1} + r_{i,ci} \times D_{fi,i+1} - r_{i-1,ci} \times D_{fi-1} = 0 \quad (16)$$

식 (16)을 $i = 1, \dots, n$ 에 대해 반복하여 계산하면 항력 $D_{fi,i+1}$ 와 $D_{fi-1,i}$ 로 인한 로봇 매니플레이터의 각 링크에 가해지는 토크를 산출한다. 이는 $D(q, \dot{q}) = (D_{d1}, D_{d2}, \dots, D_{dn})^T$ 와 같은 관절각과 각속도의 함수인 벡터로 표현된다. 이 토크를 식 (11)에 대입하면 다음의 행렬식을 구할 수 있다.

$$H^*(q)\ddot{q} + C^*(q, \dot{q})\dot{q} + G^*(q) + F(q, \dot{q}) + D(q, \dot{q}) + D_w = \tau \quad (17)$$

여기서 D_w 는 파도로 인한 유체가속도에 의한 관성력 항이다. $F(q, \dot{q})$ 는 정적 및 Coulomb 마찰력을 나타내는 $n \times 1$ 벡터로 해저로봇 매니플레이터의 각 관절의 실링으로 인하여 무시할 수 없고 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$F(q, \dot{q}) = c \operatorname{sgn}(\dot{q}) + v\dot{q} \quad (18)$$

여기에서 $c \operatorname{sgn}(\dot{q})$ 는 $n \times 1$ Coulomb 마찰력 벡터이고 $v\dot{q}$ 는 $n \times 1$ 점성 마찰력 벡터이며 c 와 v 는 각각 Coulomb 마찰상수와 점성 마찰상수를 나타낸다. 식 (18)은 일반적인 로봇 매니플레이터의 운동방정식에 부가질량, 부가관성 모멘트, 부력, 관절간의 마찰력, 및 항력을 포함하여 모델링된 해저로봇 매니플레이터의 운동방정식이다.

4. 슬라이딩 모드 제어기의 설계

3장에서 나타난 것 같이 해저 로봇 매니플레이터 운동의 정확한 모델링은 어렵고 따라서 운동방정식은 불확실하다. 본 논문에서는 이러한 해저 로봇 매니플레이터의 원하는 궤적추적을 위하여 계산 토크 형태의 제어기를 제안하고 이 제어기로 인한 부가질량, 부가관성 모멘트, 부력, 관절간의 마찰력, 및 항력의 추정오차는 Slotine⁽¹¹⁾과 유사한 슬라이딩모드 제어기로 견실하게 제어한다. 이를 위해 계산 토크 형태의 제어기를 다음과 같이 설계한다.

$$\tau = \hat{H}^*(q)\ddot{u}_r + \hat{C}^*(q, \dot{q})\dot{u}_r + \hat{F}(q, \dot{q}) + \hat{D}(q, \dot{q}) + G^*(q) - K_D \operatorname{sgn}(s) \quad (19)$$

여기서

$$\dot{u}_r = \dot{q}_a - \Lambda_e, \quad \ddot{u}_r = \ddot{q}_a - \Lambda \dot{e}, \quad s = \dot{e} + \Lambda e, \quad e = q - q_a$$

또한 $\text{sgn}(s)$ 의 정의는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{sgn}(s) &= +1 \quad \text{if } s > 0 \\ \text{sgn}(s) &= -1 \quad \text{if } s < 0 \end{aligned}$$

여기서 $\hat{H}^*(q)$, $\hat{C}^*(q, \dot{q})$ 는 각각 부가질량과 부가관성을 포함하는 $H^*(q)$, $C^*(q, \dot{q})$ 의 추정치이고 $\hat{F}^*(q, \dot{q})$, $\hat{D}^*(q, \dot{q})$ 는 각각 마찰력과 항력의 추정치이며 부력 항 G^* 는 유체의 비중과 매니플레이터의 형상치수에 관계됨으로 비교적 정확히 측정할 수 있다. 또한 q_a 는 원하는 관절 각이며 제어기 이득 K_D 와 Λ 는 각각 $n \times n$ 행렬이다. 로봇 매니플레이터에 (19)의 제어기를 적용하여 정리하면 다음과 같은 식이 유도된다.

$$H^* \dot{s} = \hat{H}^* \ddot{u}_r + \hat{C}^* \dot{u}_r - C^* s + \bar{F} + \bar{D} - D_w - K_D \text{sgn}(s) \quad (20)$$

여기서

$$\hat{H}^* = \hat{H}^* - H^*, \quad \hat{C}^* = \hat{C}^* - C^*, \quad \bar{D} = \hat{D} - D, \quad \bar{F} = \hat{F} - F$$

식 (20)을 이용하여 적용된 제어기의 안정도를 검사하기 위하여 리아푸노프 함수를 다음과 같이 정의한다.

$$V = \frac{1}{2} s^T H^* s \quad (21)$$

여기서 에너지 함수인 V 는 $V \geq 0$ 이다. 식 (22)가 안정하기 위해서는 $\dot{V} \leq 0$ 이어야 한다. 이를 위하여 식 (21)을 시간에 관하여 미분하면

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s^T (H^* \dot{s} + \frac{1}{2} \dot{H}^* s) \\ &= s^T (\hat{H}^* \ddot{u}_r + \hat{C}^* \dot{u}_r - C^* s + \bar{D} + \bar{F} - D_w - K_D \text{sgn}(s) + \frac{1}{2} \dot{H}^* s) \end{aligned} \quad (22)$$

일반적인 매니플레이터의 운동 식에서 구조적으로 skew-symmetric 성분은 다음과 같다.

$$s^T (\dot{H} - 2C(q, \dot{q}))s = 0, \quad \forall s \in R^n \quad (23)$$

이를 이용하면 식 (23)은 다음과 같이 된다.

$$\dot{V} = s^T (\hat{H}^* \ddot{u}_r + \hat{C}^* \dot{u}_r - C_{ad} s + \frac{1}{2} \dot{H}_{ad} + \bar{D} + \bar{F} - D_w) - \sum_{i=1}^n k_i |s_i| \quad (24)$$

여기서 $H_{ad} = H^* - H$, $C_{ad} = C^* - C$ 이고 부가질량과 관성모멘트는 유체의 가속으로 인한 반발력이 매니플레이터에 작용하는 것으로 skew-symmetric 성질이 없어서 단순화되지 않았다. 식 (24)에서 $\dot{V} \leq 0$ 이기 위해서는 K_D 행렬의 대각성분인 k_i 를 다음과 같이 선택하고

$$k_i \geq |[\hat{H}^* \ddot{u}_r + \hat{C}^* \dot{u}_r - C_{ad} s + \frac{1}{2} \dot{H}_{ad} + \bar{D} + \bar{F} - D_w]_i| + \sum_1^n \eta_i, \quad \eta_i > 0 \quad (25)$$

여기서 $\hat{H}^* \ddot{u}_r$, $\hat{C}^* \dot{u}_r$, C_{ad} , \dot{H}_{ad} , \bar{D} , \bar{F} 의 각 상한치는 추정할 수 있고 따라서 이를 이용하여 k_i 가 식(25)의 조건을 만족하도록 설계되면 다음의 슬라이딩 조건이 만족된다.

$$\dot{V} \leq - \sum_1^n \eta_i |s_i| \quad (26)$$

식 (26)의 슬라이딩 조건은 유한한 시간 안에 $s=0$ 가 이루어지며 일단 슬라이딩 면에 도착하면 원하는 경로에 지수 함수적으로 근접한다. 하지만 식(26)과 같은 슬라이딩제어기는 상태의 오차는 상당히 감소시킬 수 있으나 진동(chattering)을 유발하여서 모델링에서 생략한 불확실한 고주파운동(high frequency unmodeled dynamics)을 자극할 수도 있다. 이와 같은 진동을 완화 혹은 제거하기 위하여 불연속적인 제어입력을 유화(smoothing)시키는 부분 연속적인 슬라이딩제어기를 제안해야 하고 이를 위해서 다음과 같은 경계 층을 정의한다.

$$B(t) = \{x, |s(x, t)| \leq \Phi\} \quad \Phi > 0 \quad (27)$$

여기서 Φ 는 경계층두께(boundary layer thickness)이다.

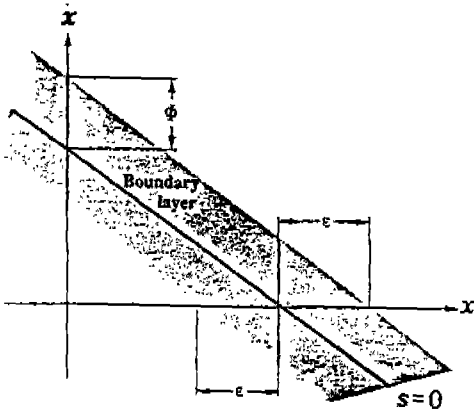


Fig. 3 Boundary Layer

Fig. 3에서 $\varepsilon = \Phi / \Lambda^{n-1}$ 이고 $n = 2$ 일 경우이다. 경계 층을 포함한 제어 부의 정의는 다음과 같다.

$$\begin{cases} \text{sat}(s/\Phi) = s/\Phi & \text{if } |s| \leq \Phi \\ \text{sat}(s/\Phi) = \text{sgn}(s/\Phi) & \text{else} \end{cases} \quad (28)$$

식 (27)을 이용하면 제어입력식 (19)은 다음과 같은 부분 연속적인 식으로 표현된다.

$$\tau = \hat{H}^*(q)\ddot{u}_r + \hat{C}^*(q,\dot{q})\dot{u}_r + \hat{F}(q,\dot{q}) + \hat{D}(q,\dot{q}) + G^*(q) - K\text{sat}(s/\Phi) \quad (29)$$

5. 2축 수평관절 해저 로봇 매니플레이터의 운동식

모의실험에서 슬라이딩 모드 제어를 위한 2축 수평관절 매니플레이터의 운동식은 다음과 같다.

$$H^*(q)\ddot{q} + C^*(q,\dot{q})\dot{q} + D + F(q,\dot{q}) = \tau \quad (30)$$

식 (30)의 구성은

$$\begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -c\dot{q}_2 - c(\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \\ c\dot{q}_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} \quad (31)$$

여기서

$$\begin{aligned} h_{11} &= a_1 + 2a_3 \cos(q_2), & h_{12} &= h_{21} = a_2 + 2a_3 \cos(q_2) \\ h_{22} &= a_2, & c &= a_3 \sin(q_2) \end{aligned}$$

또한

$$\begin{aligned} a_1 &= m_1^* L_{c1}^2 + m_2^* (L_1^2 + L_{c2}^2) + I_1^* + I_2^* \\ a_2 &= m_2^* L_{c2}^2 + I_2^*, & a_3 &= m_2^* L_1 L_{c2} \end{aligned}$$

식(31)에서 m_1^* , m_2^* 과 I_1^* , I_2^* 는 각각 링크1과 2의 질량과 관성모멘트에 부가 질량과 부가 관성모멘트를 더한 것을 나타내고 L_{c1} 은 링크길이 L_1 의 무게중심까지의 길이를 나타낸다. 또한 식(31)에서 각 링크에 작용하는 항력 d_1 , d_2 는

$$\begin{aligned} d_1 &= -b_1 v_1 |v_1| (L_{c1}) + b_2 v_2 |v_2| (L_1 + L_{c2}) \\ d_2 &= -b_2 v_2 |v_2| (L_{c2}) \end{aligned}$$

이고 여기서 $b_1 = \frac{1}{2} C_d \rho A_1$, $b_2 = \frac{1}{2} C_d \rho A_2$ 이고 각 관절에 작용하는 마찰력은

$$f_1 = c_1 \text{sgn}(\dot{q}_1) + v_1 \dot{q}_1, \quad f_2 = c_2 \text{sgn}(\dot{q}_2) + v_2 \dot{q}_2$$

여기서 v_1, v_2 는 직교좌표계에서의 링크 1과 2의 질량 중심의 속도이다. 식(31)에서 유체 가속도로 인한 항의 영향은 생략하였다. 한편 $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, c_1, c_2, v_1, v_2$ 는 정확히 모델링 하기 어려운 변수들이어서 이로 인한 오차항들을 상쇄하기 위하여 식 (19) 형태의 슬라이딩 모드 제어를 적용한다.

$$\tau = \hat{H}^*(q)\ddot{u}_r + \hat{C}^*(q,\dot{q})\dot{u}_r + \hat{D} + \hat{F}(q,\dot{q}) - K_D \text{sgn}(s/0.4) \quad (32)$$

6. 모의실험 및 고찰

5장에서 설명된 2축 수평관절 매니플레이터제어의 모의실험에 사용된 변수들의 수치는 다음과 같다.

Table 1. Link parameters for numerical simulation

No. of Link	mass m_i	moment of inertia I_i	radius r_i	length L_i	centroid L_{ci}
link 1	8(kg)	0.172(kg-m ²)	0.05(m)	0.5(m)	0.25(m)
link 2	5(kg)	0.067(kg-m ²)	0.03(m)	0.4(m)	0.2 (m)

링크들의 형상은 원통실린더이며 따라서 관성은 $I_1 = (1/12)m_1(3r_1^2 + L_1^2)$ 와 $I_2 = (1/12)m_2(r_2^2 + L_2^2)$ 를 사용하여 계산되었다. 링크관절에 점성 마찰력이 존재한다고 가정하였고 각 링크의 점성계수는 $c_1 = 1.5(Nm)$ $c_2 = 1.5(Nm)$, $v_1 = 1.5(Ns)$, $v_2 = 1.5(Ns)$ 로 가정하였다. 부가질량과 부가관성 모멘트의 실제치는 다음과 같이 가정되었다.

$$m_{ad1} = 2(Kg), \quad m_{ad2} = 1.5 \cos(q_2)(Kg),$$

$$I_{ad1} = 0.1(Kgm^2), \quad I_{ad2} = 0.04 \cos(q_2)(Kgm^2)$$

또한 b_1 , b_2 는 링크의 운동방향에 따라 투사 면적이 달라지므로

$$b_1 = 1.17, \quad b_2 = 0.34 \cos(q_2), \quad c_1 = c_2 = v_1 = v_2 = 5$$

로 가정하였다. 매니플레이터의 주위의 상태는 다음과 같다. 해류의 속도는 $0.1(m/s)$ 로 가정되고 파도에 기인하는 해수의 속도는 다음과 같이 가정된다.

$$L_w = 10(m), \quad k = 2\pi/L_w = 0.628(rad/m), \quad h_w = 1(m),$$

$$h(\text{수심}) = 5(m).$$

위의 수치를 파도의 속도의 정의에 적용하면 심해파도로 정의되고 따라서 파속 $v_w = (gL_w/2\pi)^{1/2} = 3.949(m/sec)$ 또한 파도의 진폭 $\xi_a = 0.5$ 이고 매니플레이터는 $z + h = 0$ 인 바닥에서 작동한다고 가정한다. 위의 모든 가정에 의하여 5(m)의 수심에서 수평방향의 유속의 상한 유계치는 다음과 같다.

$$\xi_a v_w k \cosh k(-z + h) / \sinh kh = 0.107(m/s)$$

식 (32)의 제어기에 사용된 이득은 각각 $K_i = 50$, $\Lambda_i = 10$ 이다. 불확실한 변수인 $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, c_1, c_2, v_1, v_2$ 의 추정치는 가정치의 70%로 하였다.

위에서 가정한 모든 변수와 이득의 값을 식 (32)에 대입하여 2축 로봇 매니플레이터에 적용하면 Fig.4, 5, 6과 같은 결과들을 얻을 수가 있다. 이 결과들은 해저로봇 매니플레이터에 제안된 제어기를 적용한 후 3초 동안의 운동의 결과이다. 이들은 페루프 운동식을

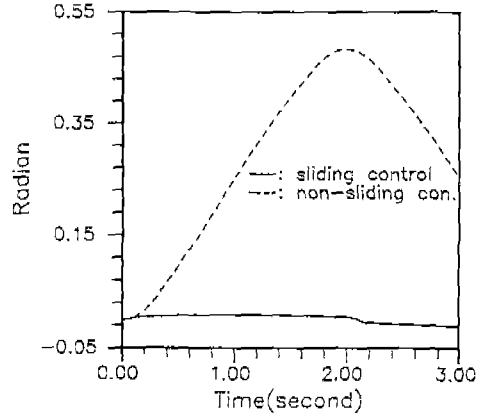


Fig. 4 The position error of the link #1

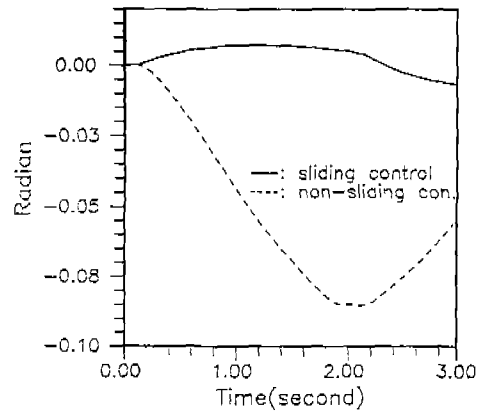


Fig. 5 The position error of the link #2

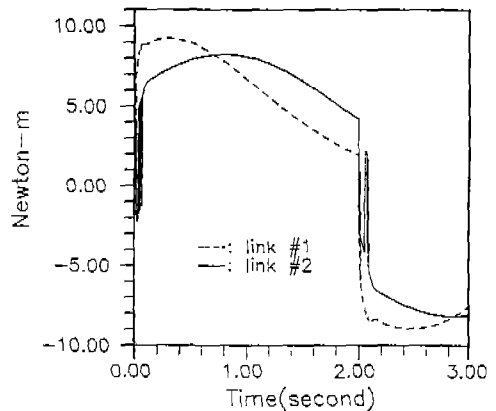


Fig. 6 The control inputs to link #1 and #2

참고 문헌

Runge-Kutta 4차식으로 수치적으로 적분한 결과이다. 매니퓰레이터의 원하는 경로는 1축과 2축에 각각 $(\pi/6)(1 - \cos(\pi/2))$, $(\pi/4)(1 - \cos(\pi/2))$ 로 설정되었다. 속도와 가속도는 이 경로함수를 시간에 관해서 일차 및 이차 미분을 하면 구할 수 있다.

Fig. 4와 5는 링크 1과 2의 관절 각의 궤도추적오차를 각각 나타낸다. 점선은 제어기 식(32)에서 슬라이딩 모드 제어를 사용하지 않고 계산 토크 형태의 제어기를 적용한 경우의 원하는 관절각과 실제 관절각간의 추적오차이고 실 선은 슬라이딩 모드 제어를 동시에 적용한 경우의 추적오차이다. 즉, 점선은 매니퓰레이터의 운동식에 부가질량, 부가관성 모멘트 및 항력과 같은 불확실한 요인을 고려하지 않고 제한한 경우인 반면 실 선은 위의 모든 불확실한 요인들을 고려하여 부가질량, 부가관성 모멘트, 마찰력, 및 항력의 모델링 오차를 슬라이딩 모드 제어로 견실하게 제어하며 원하는 경로를 따르도록 제한한 결과이다. 나타난 바와 같이 슬라이딩 모드 제어를 적용한 경우 오차가 현저히 줄어들음을 알 수있다. Fig. 6은 슬라이딩모드를 포함하는 제어기의 제어입력을 나타낸다. 점선은 링크 1의 제어입력 실 선은 링크 2의 제어입력을 나타낸다

7. 결론

본 논문에서는 해저에서 로봇 매니퓰레이터의 운동에 영향을 주는 부가질량/부가 관성모멘트, 항력, 마찰력 등이 고려된 로봇 매니퓰레이터의 운동방정식의 모델링과 제어에 관하여 연구하였다. 모델링의 복잡성과 이로 인한 불확실한 변수들로 인하여 로봇 매니퓰레이터의 제어에 적합한 견실제어기로 슬라이딩 모드 제어기가 제안되었다. 제어기는 불확실한 요인들에 견실하게 대처하면서 매니퓰레이터를 원하는 궤도로 제어함을 모의실험을 통하여 잘 보여준다. 따라서 불확실성과 교란의 가능성이 많은 해저 로봇 매니퓰레이터의 운동제어에 제안된 제어기의 적용은 효과적임을 알 수있다.

1. Kang, E. S., Kim, J. S., Song, J. H., and Cho, H. S., "Dynamic Characteristic and Control of Submerged Working Robot Manipulator," *KSMEE*, Vol.5, 2, pp. 488-496, 1991.
2. Filaretov, V. F. and Koval, E. V., "Autonomous Stabilization of Underwater Robots in the Time Manipulation Operations," *Proc. Int. O.P.E.C.*, Osaka, Japan, April, pp. 382-388, 1994.
3. 최 형식, "해저 로봇 매니퓰레이터의 모델링 및 견실 제어기의 설계", *KACC*, pp.1088-1094, 1994.
4. Craig, J. J., "Introduction to Robotics, Mechanics & Control," Addison-Wesley and Sons, 1986.
5. Asada, H. and Slotine, J. J. E., "Robot Analysis and Control," John Willey and Sons, 1985.
6. Leitmann, G., "Guaranteed Asymptotic Stability for Some Linear Systems with Bounded Uncertainties," *J. of Dynamic Sys., Measur., and Cont.*, vol. 101, Sep. 1979.
7. Spangelo, I. and Egeland, O., "Generation of energy-optimal trajectories for an autonomous underwater vehicle," *IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 2107-2112, 1992.
8. Goheen, K. R., "Modeling Methods for Underwater Robotic Vehicle Dynamics," *J. of Robotic Systems* 8(3), 295-317, 1991.
9. John, J.E.A. and Haberman, W. L., "Fluid Mechanics," Prentice Hall, 1980.
10. Bhattacharyya, R., "Dynamics of Marine Vehicles," John Willey & Sons, 1978.
11. Slotine, J. J. E., "Sliding controller design for nonlinear systems," *Int. J. of Control.*, 40, 2, 1984.