

추진기의 동역학을 고려한 무인잠수정의 슬라이딩 모드 제어

최형식¹ · 박한일² · 노민식³ · 소명옥[†]

(원고접수일 : 2009년 9월 11일, 원고수정일 : 2009년 9월 24일, 심사완료일 : 2009년 11월 11일)

A Sliding Mode Control of an Underwater Robotic Vehicle under the Influence of Thrust Dynamics

Hyeung-Sik Choi¹ · Han-Il Park² · Min-Shik Roh³ · Myung-Ok So[†]

요 약 : 무인잠수정의 동역학은 추진체의 동력학에 의해 큰 영향을 받는다. 무인잠수정의 호버링 또는 저속 상태의 움직임을 제어하는 것은 자동 도킹 혹은 잠수정의 매니플레이터의 제어에 있어서 매우 중요하다. 모터기반의 추진체 동역학은 비선형적이며 불확실한 매개변수를 가지고 있다. 결국, 추진기와 동적 커플링을 이루는 무인잠수정의 운동역학도 매우 비선형적이며 불확실한 매개변수를 가지고 있기 때문에 강인제어기가 무인잠수정의 모션제어에 있어서 효과적이라고 할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 전기 추진체에 의해 추진되는 무인잠수정의 저속 또는 호버링 상태를 제어하기 위한 강인제어 기법을 보인다. 또한, 비선형성과 불확실한 매개변수가 결합된 무인잠수정의 상태도 강인제어를 이용하여 동시에 제어한다. 강인제어 방법 중에서 슬라이딩 모드 제어를 설계하여 추진체와 무인잠수정의 불확실한 변수와 비선형성들을 보상하며 원하는 위치를 유지하는 제어방법을 제안하였다. 모의실험을 통하여 제안한 슬라이딩 모드 제어기는 선형제어기인 PD제어기 보다 성능이 우수함을 확인할 수 있었다.

주제어 : 무인잠수정, 슬라이딩모드제어, 추진체 동역학

Abstract : The dynamics of underwater vehicles can be greatly influenced by the dynamics of the vehicle thrusters. The control of the state of the hovering or very slow motion of the underwater vehicle is most important for automatic docking or control of the manipulator of the vehicle. The dynamics of the thruster based on the electric motor is nonlinear and has uncertain parameters. Since the dynamics of the vehicle coupled with the dynamics of the thruster is nonlinear and has uncertain parameters, a robust control is very effective for a desired motion tracking of the uncertain and nonlinear vehicle. In this paper a study was performed on the robust control scheme of the very slow motion or hovering motion of the underwater vehicle actuated by the electric motor. Also, a concurrent control on the state of the vehicle with nonlinearity and uncertain parameters was performed. A sliding mode control algorithm out of robust controllers was designed and applied, which compensates the nonlinear forces and uncertain parameters of the vehicle and actuator. Through a computer simulation, the proposed control scheme was compared with a linear PD controller and its superior performance was validated.

Key words : ROV, sliding mode control, thruster dynamics

[†] 교신저자(한국해양대학교 선박전자기계공학부, E-mail:smo@hhu.ac.kr, Tel: 051-410-4248)

¹ 한국해양대학교 기계정보공학부

² 한국해양대학교 해양공학과

³ 수중운동체특화센터

1. 서 론

최근, 해양 자원 탐사나 발굴을 위한 무인잠수정의 연구가 활발하게 진행되고 있다. 대부분의 무인잠수정은 구동을 위해서 프로펠러 추진기를 사용한다. 이러한 프로펠러 구동 무인잠수정은 잠수정 자체 및 프로펠러의 비선형성과 불확실성을 갖는다. 무인잠수정은 일반적으로 유체역학적인 비선형성, 관성력의 비선형성, 그리고 자유도간의 커플링에 의한 문제를 가지고 있다[1-3]. 추진기의 운동역학은 비선형적이며 시변 시스템으로 이러한 특성은 특히 저속에서의 동작에 심대한 영향을 주는 것으로 알려져 있다. 이것은 도킹이나 매니플레이터를 동작시키기 위한 제자리 기동을 하는데 걸림돌로서 반드시 해결되어야 하는 과제이다. 추진기의 동역학적 특성은 무인잠수정의 되먹임의 대역폭을 제한하고 계속 일정 위치 내에서 진동하는 리밋사이클을 생성한다. 이러한 리밋사이클은 일반적으로 프로펠러 추진기를 사용하는 대형 선박 및 서보로 제어되는 소형의 무인잠수정의 동적 위치제어의 되먹임 제어에서 나타난다[4].

모터기반의 추진기의 운동역학은 비선형적이며 불확실한 매개변수를 가지고 있다. 또한, 추진기와 동적 커플링을 이루는 무인잠수정의 운동역학도 매우 비선형적이며 불확실한 매개변수를 가지고 비선형성과 불확실성을 보상하며 원하는 경로나 위치로 이동시키는 제어기의 설계는 매우 중요하다. 이러한 비선형적이며 매개변수를 가지고 있는 모터 기반 추진 무인잠수정의 제어에 대한 연구가 소수의 연구자에 의하여 수행되어 왔으며 수중 로봇의 추진체에 대한 연구로는 선형 리드 넷트워 방법과 추진체의 적응 슬라이딩 모드 제어를 적용한 연구가 있었다[4]. 그리고, 불확실한 매개변수를 가지고 비선형성을 갖는 추진체와 잠수정의 제어에 퍼지 제어모델을 적용한 연구가 있었다[5]. 하지만, 추진기와 동적 커플링을 이루는 무인잠수정의 운동역학도 매우 비선형적이며 불확실한 매개변수를 가지고 있어서 이 둘을 동시에 제어하는 방법이 매우 효과적일 것이다.

본 연구에서 제어 시스템의 설계는 추진기의 동역학적 영향을 줄이는 방향으로 진행하였으며, 불확실한 시스템의 경로제어를 위하여 슬라이딩 모드

제어기를 적용하였다. 슬라이딩 모드 제어기는 비선형 강인제어에 널리 쓰이는 제어방식 중의 하나로 시스템의 상태변수를 미리 정의된 슬라이딩 평면상에서 움직이도록 제한한다. 슬라이딩 평면은 시스템에 대하여 독립적으로 선택가능하며 선택된 슬라이딩 평면에 의하여 시스템의 동역학적 거동이 결정된다. 시스템의 상태변수가 슬라이딩 평면상에 위치하면 동역학적 모델링 오차나 외란 파라미터의 변화에 영향을 받지 않는다. 그러므로 비선형 슬라이딩 모드 제어기는 추진기의 성능이 저하되거나 비교적 큰 불확실성이 있다고 하더라도 우수한 성능을 나타낸다.

목표 경로에 추종하는 건설 슬라이딩모드 제어기 설계법으로서는 Slotine이 제안한 슬라이딩 모드 제어[6] 이외에 제어기 적분형 가변구조 제어[7], 적응 명령 추종형 슬라이딩모드 제어[8], 그리고 모델 규범형 슬라이딩 모드[9] 등이 제안되어 있으나, 여기서는 Slotine이 제안한 슬라이딩 모드 제어를 이용하여 서보 제어기를 설계하였다.

2. 무인잠수정의 추진기 및 동역학 모델

무인잠수정의 추진체 모델은 여러 형태가 고안되어 발표되었는데 기본적으로 다음과 같은 벡터식으로 나타낼 수 있다.

$$M(x)\ddot{x} + A(\dot{x})\dot{x} + g(x) = F_T \quad (1)$$

여기서 $x \in R^6$ 는 위치와 방향, $M \in R^6$ 은 관성행렬, $A \in R^{6 \times 6}$ 는 비선형 동역학 항을 포함하는 속도항, $g \in R^6$ 는 중력과 부력 및 외란을 포함하고 있으며 $F_T \in R^6$ 는 추진기에 의해 발생하는 힘과 토크를 나타낸다. 본 논문에서는 Yoeger의 논문[4]에 소개된 Jason Jr. ROV의 1자유도 운동방정식을 사용하여 제어기의 비교연구를 수행하였다. 무인잠수정의 1자유도 운동방정식은 다음과 같다.

$$M\ddot{x} + C_D\dot{x}|x| = F_T \quad (2)$$

여기서 M 은 질량이며 C_D 는 저항계수를 나타낸다. 대부분의 중소형 무인잠수정은 전기식 모터로

구동되는 덕티드 프로펠러를 추진기로 사용한다. Yoeger에 의해 에너지기반 물리 시스템 접근법을 사용하여 집중 파라미터(lumped parameter) 동역학 모델이 고안되었다. 이것은 프로펠러의 각속도인 Ω 가 추진기 동역학의 상태변수이며 모델은 다음과 같다.

$$\dot{\Omega} = -\alpha\Omega|\Omega| + \beta\tau \quad (3)$$

$$F_T = C_t\Omega|\Omega| \quad (4)$$

여기서 τ 는 입력 토크를 나타내며 α 와 β 는 모델 파라미터 계수이고 C_t 는 추력계수를 나타낸다.

이 모델은 상수 모델 파라미터를 결정하는 동역학 모델의 내부에서 동작하며 궁극적으로 추진기의 동역학적 영향을 보상하는 제어 시스템 설계에 사용된다. 식 (2)의 무인잠수정 모델과 식 (3)의 추진체 모델은 비선형 함수이며 불확실한 파라미터를 갖는다. 이들 모델은 서로 동역학적 연관을 가지므로 본 연구에서는 불확실한 변수를 갖는 비선형 모델의 제어에 적합한 강인 제어의 일종인 슬라이딩 모드 제어를 이용한 동시제어를 수행하였다.

3. 슬라이딩모드 제어

추진기의 영향을 줄이기 위해서 비선형 강인제어에 널리 사용되는 기법인 슬라이딩 모드 제어를 사용하였다. 슬라이딩 모드 제어기는 슬라이딩 평면 상에 시스템의 거동을 한정시켜 시스템의 차수를 낮추어 주는 효과를 기대할 수 있다. 무인잠수정의 동역학 모델은 추진기로 말미암아 차수가 높아지므로 이로 인한 영향을 줄이는데 슬라이딩 모드 제어가 적절하다.

잠수정과 추진체의 동역학이 서로 연계되어 효과적인 제어를 위해서 Figure 1과 같이 제어를 외부 루프(outer loop)와 내부 루프(inner loop)로 나누어서 제어를 설계하였다.

불확실한 시스템의 파라미터 M, C_D, α, β 는 다음과 같이 한정된다고 가정한다.

$$M_{\min} \leq M \leq M_{\max}$$

$$C_{D_{\min}} \leq C_D \leq C_{D_{\max}}$$

$$a_{\min} \leq \alpha \leq a_{\max}$$

$$b_{\min} \leq \beta \leq b_{\max}$$

3.1 외부 루프 제어기

외부 루프의 제어기는 위치제어 루프로써 무인잠수정에 작용해야 하는 힘을 출력으로 갖는다. 잠수정의 운동식 (2)에서 오차 $e = x_d - x$ 라 두고 슬라이딩 평면을 $s_1 = \dot{e} + ce$ 라 두었을 때 $s_1 = 0$ 이고 $x_d =$ 일정이면

$$\ddot{x} = -c\dot{x} \quad (5)$$

이다. 이것을 식 (2)에 적용하고 시스템의 불확실성을 고려하여 슬라이딩 모드제어기를 설계하기 위해 리아푸노프 함수를 다음과 같이 설정한다.

$$V = \frac{1}{2}Ds_1^2 \quad (6)$$

여기서 식 (6)을 시간에 관해 미분하면, $\dot{V} = Ds_1\dot{s}_1$ 이 되고 $\dot{V} < 0$ 이 되기 위한 제어기를 설계하면 다음과 같다.

$$F_T = -c\hat{M}\dot{x} + \hat{C}_D\dot{x}\dot{x} + (-c\Delta M\dot{x} + \Delta C_D\dot{x}|x| + D)\text{sign}(s_1)K_D s_1 \quad (7)$$

여기서 $\hat{M}, \Delta M, \hat{C}_D, \Delta C_D$ 는

$$\hat{M} = \frac{M_{\max} + M_{\min}}{2}$$

$$\Delta M = \frac{M_{\max} - M_{\min}}{2}$$

$$\hat{C}_D = \frac{C_{D_{\max}} + C_{D_{\min}}}{2}$$

$$\Delta C_D = \frac{C_{D_{\max}} - C_{D_{\min}}}{2}$$

이며 D 는 외란의 크기이다.

3.2 내부 루프 제어기

내부 루프의 제어기는 추진기 제어루프로 필요한 힘으로부터 프로펠러에 가해져야 할 토크를 출력으로 갖는다.

오차를 $e = F_{T_d} - F_T$ 라 두고 슬라이딩 평면을 $s_2 = \dot{e} + ce$ 로 두었다. 프로펠러의 각속도를 추진기의 상태변수 측정값으로 두면 추진기의 동역학 모델은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\dot{\Omega} = \beta\tau - \alpha\Omega|\Omega| \tag{8}$$

혹은

$$h\dot{\Omega} = \tau - c\Omega|\Omega| \tag{9}$$

여기서 τ 는 입력 토크이며 α 와 β 는 추진기의 상태변수이다. 슬라이딩 면 s_2 는 다음의 선형 식을 바탕으로 선택된다.

$$s_2 = \tilde{\Omega} = \Omega - \Omega_d \tag{10}$$

여기서 Ω_d 는 원하는 회전각속도이다. 이의 완벽한 추적은 슬라이딩 점 ($s_2 = 0$) 일 때 이루어진다. 이를 위해서는 슬라이딩 점의 조건이 원하는 경로를 따라 만족되어야 한다. 슬라이딩 조건은 다음의 리야푸노프 함수인 제곱 형태의 식으로 표현되고, 이를 시간에 대해 미분한 식이 식 (12)와 같이 0보다 적은 것을 만족해야 한다.

$$V = \frac{1}{2}hs_2^2 \tag{11}$$

$$\dot{V} = hs_2\dot{s}_2 < 0 \tag{12}$$

추진체 운동식을 만족하는 슬라이딩 조건은

$s_2 = \dot{\Omega}$ 의 식을 만족한다. 이에 따라 다음의 식이 도출된다.

$$hs_2 = h\dot{\Omega} = h(\dot{\Omega} - \dot{\Omega}_d) \tag{13}$$

이 시스템을 만족하는 슬라이딩 모드 제어기의 제어입력을 표현하면 다음과 같다.

$$\tau = \frac{1}{\beta}\dot{\Omega} + \hat{\gamma}|\Omega|\Omega + \left(\frac{1}{\Delta\beta}\dot{\Omega} + \Delta\gamma|\Omega|\Omega + D\right)sign(s_2) + K_\sigma s_2 \tag{14}$$

여기서 γ , $\hat{\gamma}$, $\Delta\gamma$ 는 각각 다음과 같다.

$$\gamma_{min} = \frac{a_{min}}{b_{max}} \leq \gamma = \frac{\alpha}{\beta} \leq \frac{a_{max}}{b_{min}} = \gamma_{max}$$

$$\hat{\gamma} = \frac{\gamma_{max} + \gamma_{min}}{2} \quad \Delta\gamma = \frac{\gamma_{max} - \gamma_{min}}{2}$$

무인 잠수정의 몸체를 제어하는 외부 루프와 추진기를 제어하는 내부 루프의 제어를 동시에 적용하는 제어 방법을 적용하였다. 제한한 제어기의 성능을 검증하기 위하여 모의실험을 행하였다. 모의실험은 Figure 1과 같이 Matlab의 Simulink를 이용하여 행하였다.

Figure 2는 본 연구에 사용한 내부루프 슬라이딩 모드 제어기의 시뮬링크 모델이다.

4. 모의실험

모의실험은 내부 루프와 외부 루프에 슬라이딩 모드 컨트롤러를 사용한 것과 슬라이딩 모드 제어

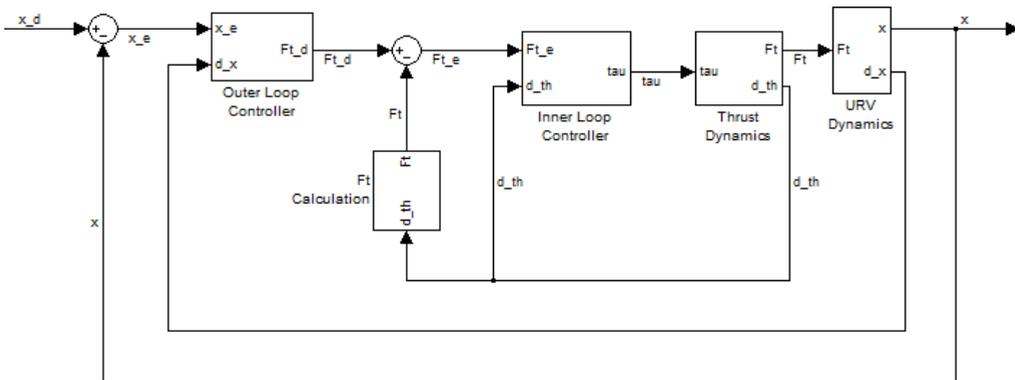


Figure 1: Simulink model of underwater robotic vehicle

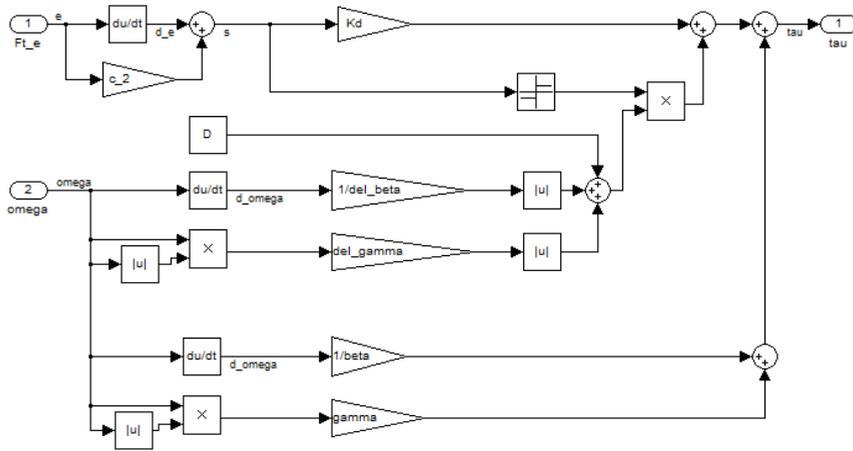


Figure 2: Simulink model of inner loop sliding mode controller

기와 같은 입출력을 갖는 두 개의 PD제어기를 사용했을 때의 결과를 비교하였다.

각 실험은 모든 운용조건에서 성능을 만족하는지 확인하기 위해 3가지 상황에서 진행하였는데 첫째로 통상적인 위치오차와 반응성능을 보기위한 계단 응답, 둘째로 한정된 일정 위치 범위 내에서의 PD 제어기와 슬라이딩모드 제어기의 정현파 응답, 마지막으로 한정된 일정 위치 범위 내에서의 PD제어기와 슬라이딩모드 제어기의 정현파 응답을 비교하는 순서로 진행하였다. 모의 실험에 사용한 로봇의 질량 M 은 340kg이며 저항계수를 나타내는 C_D 는 $67Ns^2/m^2$ 를 사용하였고 모델 파라미터 계수로 각각 $\alpha = 0.037$, $\beta = 42N^{-1}s^{-1}$ 이고 추력계수 C_t 는 $0.022Ns^2$ 이다. 이들은 Jason Jr. ROV의 실제 데이터이다. 여기서 파라미터의 범위는 다음과 같다.

$$306kg \leq M \leq 374kg$$

$$0.033 \leq \alpha \leq 0.041$$

$$37.8N^{-1}s^{-1} \leq \beta \leq 46.2N^{-1}s^{-1}$$

모의실험에서 슬라이딩 평면을 정의하는 계수 c 는 외부루프에서 2.3을 내부루프에서 7.2를 사용했다.

Figure 3과 Figure 4는 각각 PD제어기와 슬라이딩 모드 컨트롤러의 계단응답 그래프이다. Figure 5를 슬라이딩 모드 컨트롤러의 과도응답 성능이 더욱 우수한 것을 확인할 수 있다. Figure

6은 슬라이딩 모드 컨트롤러의 슬라이딩 라인을 보여준다.

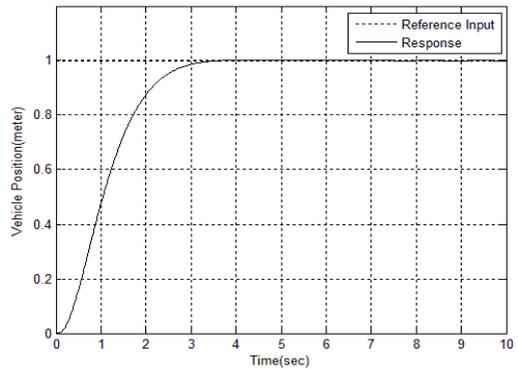


Figure 3: Step response of PD controller

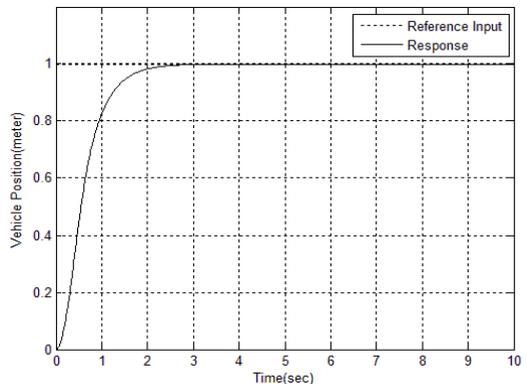


Figure 4: Step response of Sliding Mode controller

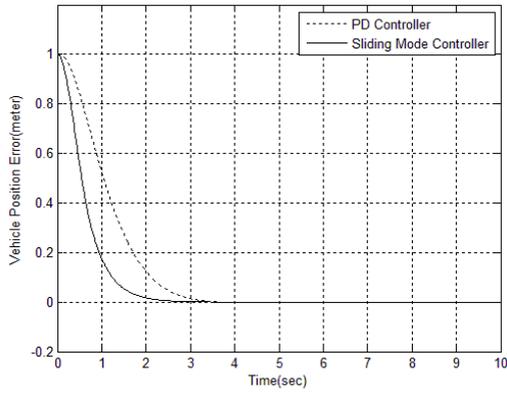


Figure 5: Position error of the controllers

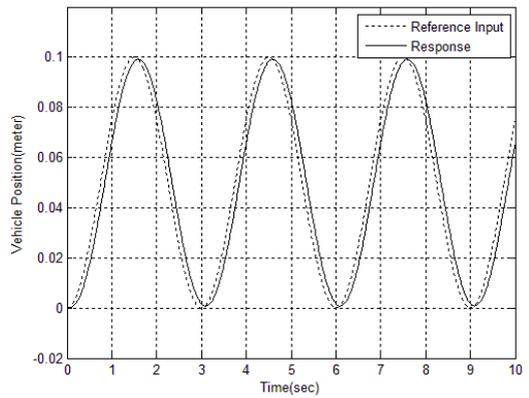


Figure 8: Hovering control of sliding mode controller

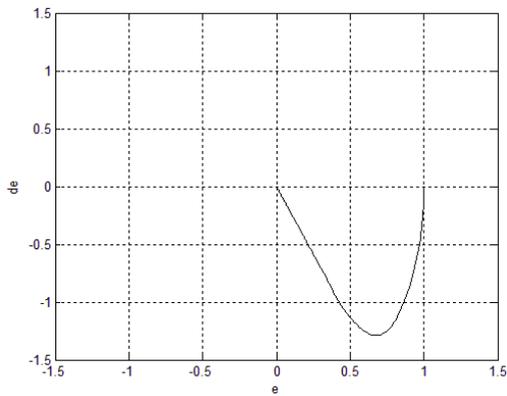


Figure 6: Sliding line

Figure 9는 이때의 슬라이딩모드 제어기의 제어 명령이며 Figure 10은 각 제어기의 동적 위치오차

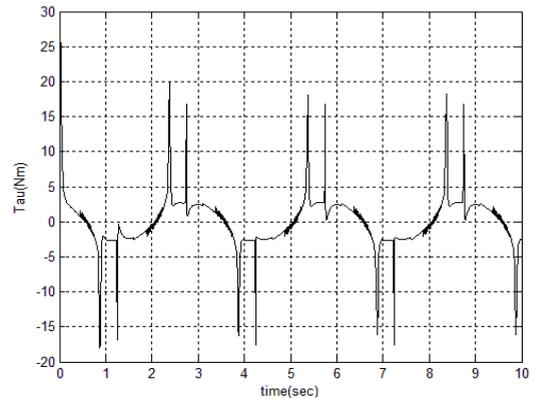


Figure 9: Hovering control input of sliding mode controller

Figure 7과 Figure 8은 각각 한정된 일정 위치 범위 내에서의 PD제어기와 슬라이딩모드 제어기의 정현파 응답그래프이다.

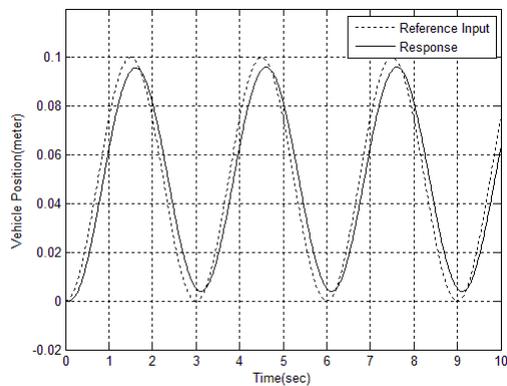


Figure 7: Hovering control of PD controller

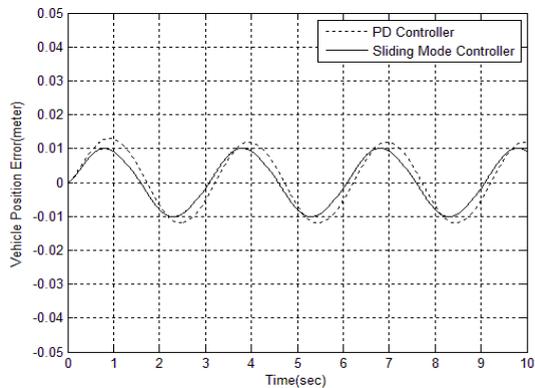


Figure 10: Position error of the controllers

인데 PD 제어기에 비해서 슬라이딩 모드 제어기의 오차와 제어입력에 대해 응답의 위상차가 작음을 알 수 있다.

Figure 11과 Figure 12는 각각 매우 한정된 일정 위치 범위 내에서의 매우 저속 동작에 대한 PD제어기와 슬라이딩모드 제어기의 정현파 응답 그래프이며 Figure 13은 이때의 슬라이딩모드 제어기의 제어명령이다.

Figure 14는 각 제어기의 동적 위치오차를 보여준다. 고속에서의 정현파와 위치오차에 비해 슬라이딩 모드 제어기의 위치오차가 뚜렷하게 작음을 확인할 수 있다.

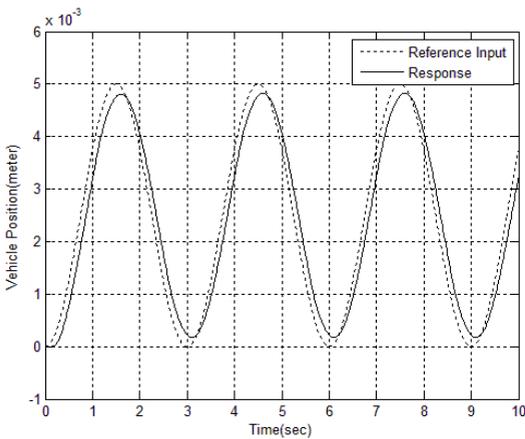


Figure 11: Very Limited Position Controller of PD Controller

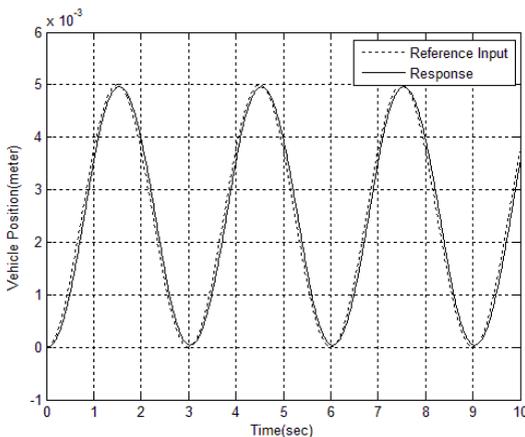


Figure 12: Very Limited Position Controller of Sliding Mode Controller

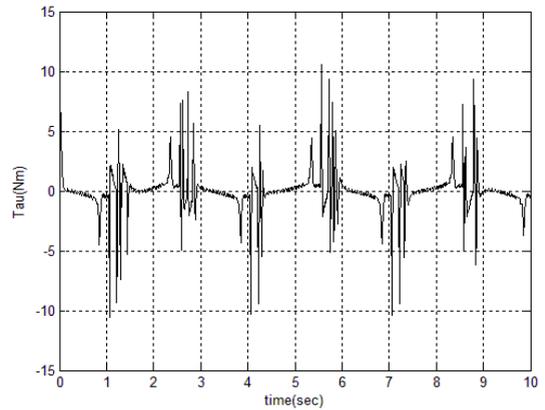


Figure 13: Very Limited Position Control Input of Sliding Mode Controller

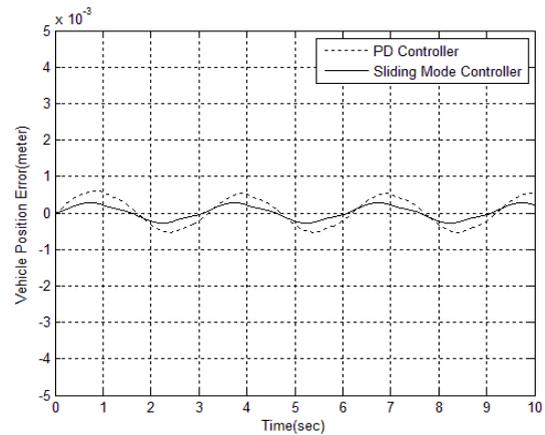


Figure 14: Position Error of the Controllers

5. 결론

모터기반의 추진체의 운동역학은 비선형적이며 불확실한 매개변수를 가지고 있으며 추진체와 동적 커플링을 이루는 무인잠수정의 운동역학도 매우 비선형적이며 불확실한 매개변수를 가지고 있다. 저속이나 호버링 상태의 무인잠수정의 제어는 자동도킹이나 무인잠수정의 매니플레이터 제어를 위해서 매우 중요한 이슈이다.

본 논문에서는 토크제어방식 추진체의 비선형적 변수를 갖는 무인잠수정의 저속 및 호버링 상태의 강인제어에 대한 연구를 수행하였다. 또한, 역학적으로 연결된 무인잠수정의 상태도 강인제어를 이용하여 동시에 제어하는 연구를 수행하였다. 비선형

강인제어 방법 중에서 슬라이딩 모드 제어를 설계하여 추진체와 무인잠수정의 불확실한 변수와 비선형력들을 보상하며 원하는 위치를 유지하는 제어 방법을 적용하였다.

모의실험을 통하여 제안한 슬라이딩 모드 제어가 추진기의 비선형적이며 불확실한 영향을 보상할 수 있음을 보였다. 동시에 수중무인잠수정의 비선형과 불확실성의 영향을 보상하며 매우 저속과 제자리 유지제어가 가능함을 보였다. 특히, 선형제어기인 PD제어기와 성능 비교에서 제안한 슬라이딩모드 제어기의 성능이 우수함을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 국토해양부 지역MT특성화사업의 연구비지원(해양산업고도화를 위한 핵심 해양장비 개발 - 전기모터 기반의 해중 매니플레이터 및 추진 시스템 개발)에 의해 수행되었음.

참고문헌

- [1] M. Abkowitz, Stability and Motion Control of Ocean Vehicles. Cambridge, MA: MIT Press, 1969.
- [2] M. Gertler and G. R. Hagen, Standard Equations of Motion for Submarine Simulations, Naval Ship R&D Center, Bethesda, MD, NSRDC Rep. No. 2510, 1967.
- [3] J. G. Cooke, Incorporating Thruster Dynamics in the Control of an Underwater Vehicle, Engineers degree thesis, MIT-WHOI Joint Program in Oceanogr. Eng., Woods Hole, MA, Sept. 1989.
- [4] D. Yoerger, J.G. Cooke, and J.J.E. Slotine, "The influence of thruster dynamics on underwater vehicle behavior and their incorporation into control system design", IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. 15, no. 3, 1990.

- [5] W.C. Lee and G Kang, "A fuzzy model-based controller of an underwater robotic vehicle under the influence of thruster dynamics", Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, 1998.
- [6] T. Chern and Y. Wu, "Integral variable structure control approach for robot manipulators", IEE Proc. Pt. D, 139-2 pp. 161~166, 1992.
- [7] C. Y. Su, T. P. Leung and Y. Stepanenko, "Real-time implementation of regressed-based sliding mode control algorithm for robotic manipulators", IEEE Trans. Ind. Electron., 48-1 pp. 71-79, 1993.
- [8] C. Y. Su, and T. P. Leung, "A Sliding mode controller with bond estimation for robot manipulators", IEEE Trans. Robotics & Automation, 9-2, pp. 208-214, 1993.
- [9] J. J. E. Slotine and W. Li, Applied Nonlinear Control, Prentice-Hall, 1991.

저 자 소 개



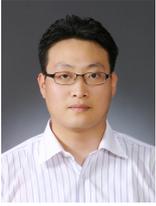
최형식(崔炯植)

1989년 5월 미국 University of South Carolina 기계공학과에서 석사, 1993년 2월 North Carolina State University 기계 및 항공 공학과 박사로 협조로봇의 제어, 보행로봇 개발, 수중 운동체 시스템 연구 및 공장자동화에 대한 연구를 수행



박한일(朴漢一)

1957년생, 1981년 한국해양대학교 기관학과 졸업(학사), 1988년 서울대학교 대학원 해양학과 졸업(석사), 1992년 런던 대학 대학원 조선해양공학과 졸업(박사), 1987.9~현재 한국해양대학교 해양공학과 교수



노민식(盧珉植)

1957년생, 1981년 한국해양대학교 기관학과 졸업(학사), 1988년 서울대학교 대학원 해양학과 졸업(석사), 1992년 런던대학 대학원 조선해양공학과 졸업(박사), 1987.9~현재 한국해양대학교 해양공학과 교수



소명옥(蘇明玉)

1980년 한국해양대학교 기관학과(학사), 1989년 한국해양대학교 대학원 기관학과 석사, 1997년 동 대학원 박사. 한국항만·운송노동연구원 연구위원. 2005~2006년 University of Wales Cardiff 파견교수. 현재 한국해양대학교 선박전자기계공학부 교수. 관심분야 : 퍼지제어 등