

자율무인잠수정 이심이의 선수각 및 심도 제어기 설계와 외란 특성 분석

마성진* · 전봉환* · 이판목* · 김상봉**

*한국해양연구원 해양시스템기술연구본부
**부경대학교 기계공학부

Design on Yawing And Depth Controller And Analysis of Disturbance Characteristic about the AUV ISiMI

SUNG-JIN MA*, BONG-HUAN JUN*, PAN-MOOK LEE*, AND SANG-BONG KIM**

*Ocean Development System Laboratory, KORDI, Daejeon, Korea
**Pukyong National University, Busan, Korea

KEY WORDS: Autonomous Underwater Vehicle 자율 무인 잠수정, PD control 비례-미분 제어, Sliding mode control 슬라이딩 모드 제어

ABSTRACT: In underwater environment, the control of AUV is difficult, because of the existence of parameter uncertainties and disturbances as well as highly nonlinear and coupled system dynamics. The requirement for the simple and robust controller which works satisfactorily in those dynamical uncertainties, call for a design using the PD or sliding mode controller. The PD controller is very popular controller in the industrial field and the sliding mode controller has been used successfully for the AUV controller design. In this paper, the two controllers are designed for ISiMI(Integrated Submergible Intelligent Mission Implementation) AUV and the performances are compared by numerical simulation under the modeling uncertainty and disturbances. The design process of PD and sliding mode controller for ISiMI AUV and simulation results are included to compare the performances of the two controllers

1. 서 론

최근 심해의 각종 자원 조사를 위한 목적으로 자율 무인 잠수정(AUV, Autonomous Underwater Vehicle)에 대한 연구가 활성화 되고 있다. 그러나 AUV는 심해의 열악한 환경에서 관측 및 항해를 수행하고 도킹장치로 귀환하여야 하므로 외란에 강한 제어기의 설계를 필요로 한다.

이러한 분야에 대한 연구로 현재 한국해양연구원에서 개발된 AUV인 '이심이(ISiMI, Integrated Submergible Intelligent Mission Implementation) AUV'에 대한 적합한 제어기의 설계와 시뮬레이션을 행하였다. 제어기로서는 현재 산업계에서 가장 널리 쓰이고 있는 PD제어와 AUV분야에 있어 많은 성공적인 연구가 이루어진 슬라이딩 모드 제어를 이용하였다.

슬라이딩 모드 제어를 이용한 주요 연구로는 Yoerger등(1997)이 슬라이딩 모드 제어를 이용하여 수중 운동체가 저속에서 항해하는 것을 성공적으로 보였으며, Cristi등(1990)은 슬라이딩 모드 제어기를 이용하여 수직면을 운동하는 것을 연구하였다. 또

한 Healey등(1990)은 수직과 수평면의 제어를 NPS AUV II에 적용하였다.

본 논문에서는 PD와 슬라이딩 모드 제어기를 구성하여 수직과 수평면에 대한 제어를 행하였으며 이심이의 각 계수를 이용하여 시뮬레이션을 하고 각 제어기의 외란에 대한 특성을 분석하였다.

2. 이심이 AUV 모델

한국해양연구원에서 제작된 이심이의 수직모델을 이용하여 이심이 AUV모델에 대하여 수평운동에 대한 모델과 수직운동에 대한 모델을 구한다. 이심이의 구성은 Fig. 1과 같다.

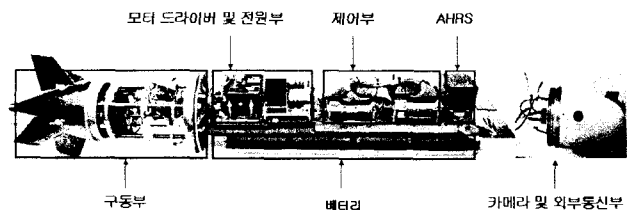


Fig.1 ISiMI Autonomous Underwater Vehicle

마성진 : 대전광역시 유성구 장동 171

042-868-7504 ppokkappokka@moeri.re.kr

AUV의 수평방향과 수직방향 모델을 위하여 6자유도 비선형 모델 중 Yaw방향과 Pitch방향에 대한 모델(이판목, 2003)에서 교차유동(Cross flow)항과 2차이상의 교차항, 입력할 수 없는 항들을 선형화하고 상태방정식을 정리하면 수평과 수직방향의 모델은 다음과 같다.

수평방향 :

$$\begin{bmatrix} I_z - \frac{\rho}{2} l^5 N_r & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\rho}{2} l^4 N_r & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\rho}{2} l^3 U^2 N_{\delta_R} \\ 1 \end{bmatrix} [\delta_R] \quad (1)$$

수직방향 :

$$\begin{bmatrix} I_y - \frac{\rho}{2} l^5 M_q & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q} \\ \dot{\theta} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\rho}{2} l^5 M_q & z_G W & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & -U & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q \\ \theta \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\rho}{2} l^3 U^2 M_{\delta_s} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} [\delta_s] \quad (2)$$

(1), (2)식에서 구한 상태 방정식에 이심이의 유체계수를 대입하면(이판목, 2003)

수평모델 :

$$\begin{bmatrix} \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2.1197 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -4.2603 \\ 0 \end{bmatrix} [\delta_R] \quad (3)$$

수직모델 :

$$\begin{bmatrix} \dot{q} \\ \dot{\theta} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2.1197 & -1.7383 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q \\ \theta \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -4.2603 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} [\delta_s] \quad (4)$$

3. 제어기 설계

3.1 헤딩, 깊이에 대한 PD 제어 시스템 설계

제어기의 성능을 시뮬레이션으로 평가하고 외란에 대한 특성을 분석한다. AUV에 대한 PD 제어 시스템은 모델과 마찬가지로 수평방향과 수직방향으로 나누어 실행한다.(박진영, 2005)

Fig. 2, Fig. 3 는 수평방향과 수직방향에 대한 PD제어기의 블록선도이다. 각 방향에 대하여 스텝과 러더가 최대 움직일 수 있는 각 $\pm 20^\circ$ 의 포화영역을 두었다. 특히 수직방향에 대하여 선수각/스턴(내부루프), 깊이/선수각(외부루프)로 나누어 제어를 수행하여 내부루프에서 PD제어를 행하였으며 외부루프에서 P제어를 사용하였다.

PD제어기의 시뮬레이션을 통하여 수평모델에 대해서 오버슈트 1%, 정착시간 4초를 목표로 하여 $K_p : -5$ $K_d : -3$, 수직모델에 대해서 오버슈트 1%, 정착시간 5초를 목표로 하여 내부루프

PD제어계수는 $K_p : 0.8$, $K_d : 0.1$, 외부루프 P제어 계수는 $K_{zp} : 1$ 로 결정하였다.

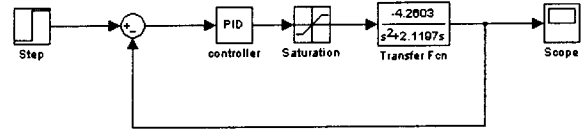


Fig. 2 block diagram about heading control system

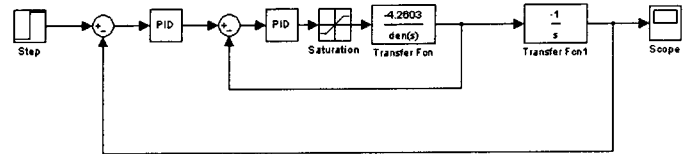


Fig. 3 block diagram about depth control system

3.2 선수각, 심도에 대한 슬라이딩 모드 제어기 설계

다변수에 대한 수직, 수평방향의 슬라이딩 모드의 제어기 설계는 다음과 같다.(Healey and Lienard, 1990) 각 방향 부시스템의 일반적인 상태방정식은

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + bu(t) + \delta f \quad (5)$$

$$x(t) \in R^{n \times 1}; b \in R^{n \times 1}; A \in R^{n \times n}$$

δf 는 시스템의 불확실한 비선형항이다. 만약 (A, b) 가 가제어하고 $[s'b]$ 가 영행렬이 아니라면 슬라이딩 면의 계수는 A_c 를 사용하는 페루프 방정식의 극점이 안정한 면에 있을 때의 게인벡터 k 로 구할 수 있다.(Utkin, 1977)

이때 A_c 는

$$A_c = [A - bk'] \quad (6)$$

불확실한 외란 $\delta f(t)$ 과 그것의 추정값인 $\hat{\delta f}(t)$ 를 포함하는 슬라이딩 제어 법칙의 결과는

$$u(t) = -k'x(t) - [s'b]^{-1} s' \hat{\delta f}(t) + [s'b]^{-1} s' x_{com}(t) - [s'b]^{-1} \eta \tanh(\sigma(t)/\phi) \quad (7)$$

(7)식에 의해서 수평방향에 대한 슬라이딩 제어 법칙을 구하면

$$\delta_r = -0.0281r + 2.58 \tanh[r + 2(\psi - \psi_{com})/1] \quad (8)$$

ψ 는 현재 선수각, ψ_{com} 은 목표 선수각이고 극점은 $[0 -2]$, 스위칭 게인 $\eta(t)$ 는 2.58, 채터링 제거를 위한 Boundary layer

thickness ϕ 는 1로 결정한다. 다시 (7)식에 의하여 수직방향의 슬라이딩 제어 법칙을 구하면

$$\delta_s = 0.4414q + 0.5309\theta + 4\tanh[q + 4\theta - 4(z - z_{com})/0.65] \quad (9)$$

z 는 현재심도, z_{com} 은 목표심도이고, 극점은 $[0 \ -2 \ -2]$, $\eta(t)$ 는 -4 , ϕ 는 0.65로 결정하였다.

4. 시뮬레이션 및 외란 특성 분석

이상의 제어법칙을 이용하여 수평방향 스텝입력 90° 에서 제어사양에 근접하는 슬라이딩 모드 제어와 같은 응답을 보이는 PD제어 계인을 이용한 각 제어기의 응답은 Fig. 4와 같다.

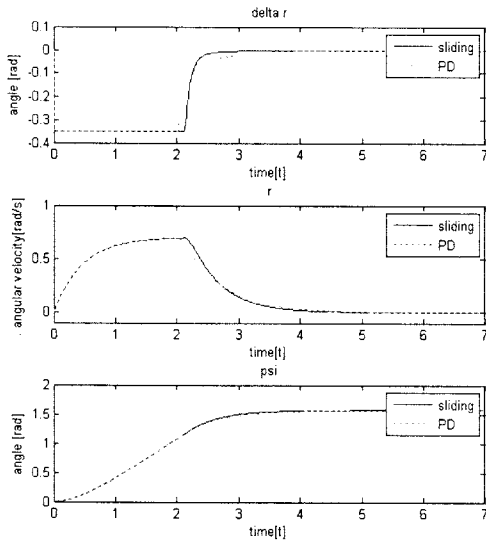


Fig. 4 response of horizontal model

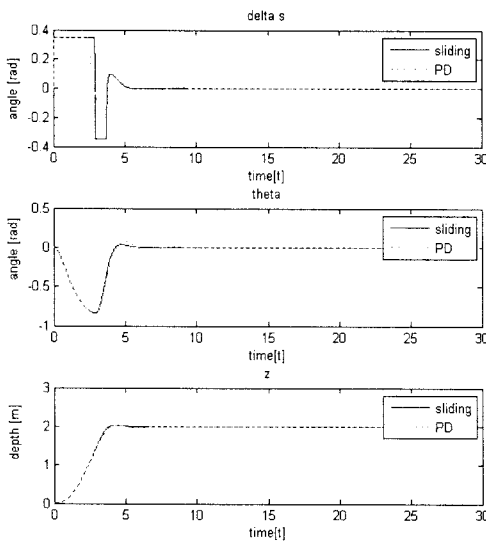


Fig. 5 response of vertical model

유체속도 $1m/s$ 에서 수직방향 입력 $2m$ 가 주어졌을 때 응답은 Fig. 5와 같다. 두 제어기 모두 같은 제어 사양의 계인을 사용한다.

다음으로 외란에 대하여 각 제어기의 응답특성을 모델에 따라 분석한다. 유체속도를 $3m/s$ 로 증가 시켰을 때 각 모델의 응답 곡선이다.

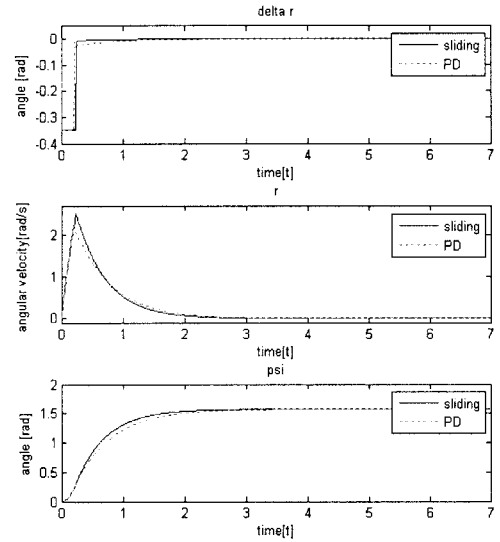


Fig. 8 response of horizontal model about changing velocity

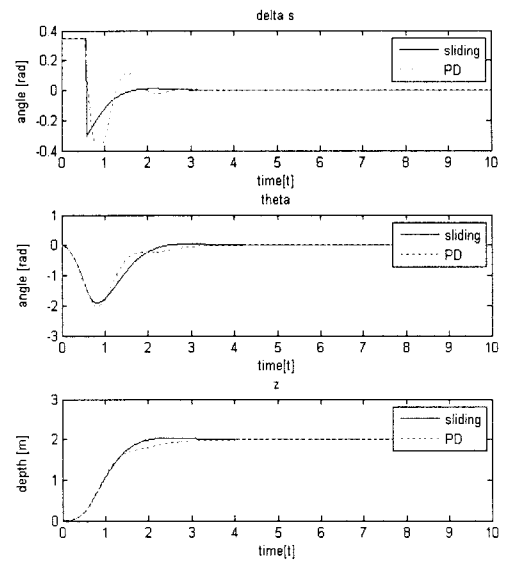


Fig. 9 response of vertical model about changing velocity

수평모델의 경우 두 제어기가 근접한 결과를 보이고 있으며 선체의 최종 상태인 ψ 그래프의 경우 PD제어기에서 약간의 지연이 있을 뿐 거의 비슷한 양상을 보이고 있다. 수직모델 역시 깊이 그래프에서 PD제어가 약간의 지연이 있다.

다음으로 모델 오차가 있을 시 응답결과와 입력속도의 증가 시 반응을 보도록 한다. 시스템에 50%의 모델 오차를 가정 한 후 각 제어 시스템의 응답은 Fig. 6, Fig. 7 과 같다.

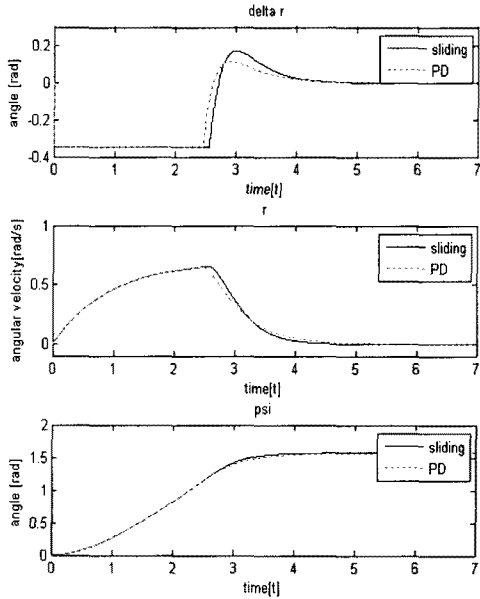


Fig. 6 response of horizontal model about error of modeling

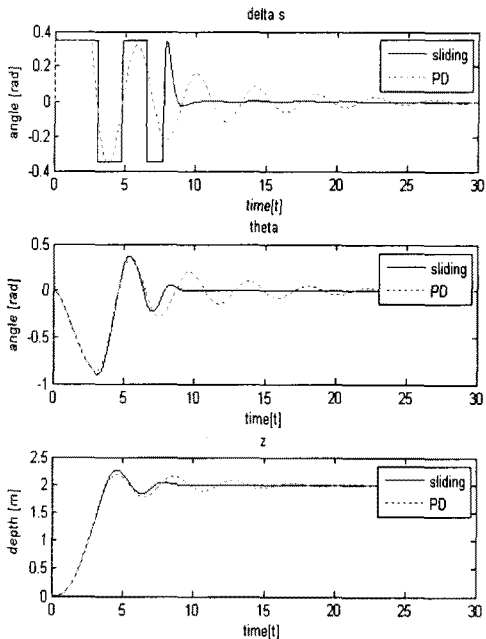


Fig. 7 response of vertical model about error of modeling

수평모델의 경우 큰 차이를 보이지 않으나 수직 모델에서 PD 제어기가 더 수렴시간이 긴 것을 볼 수 있다. 특히 스텐각에 있어 슬라이딩 모드제어의 경우 각이 포화하여 최대한 빠르게 수렴하나 PD제어의 경우 진동이 계속 됨을 볼 수 있다.

5. 결 론

시뮬레이션 결과 같은 모델을 사용하고 초기에 같은 제어사양으로 설계한 제어기에서 외란에 대한 응답을 살펴보면 수평 모델에 있어서는 약간의 지연이외 선수각은 거의 같은 응답특성을 보인다. 그러나 수직 모델에 있어 속도 증가 시 수렴시간의 지연이 있으며 모델 오차 시 슬라이딩 모드 제어와 거의 같은 오버슈트를 가지면서도 수렴시간은 더 긴 것을 볼 수 있다.

수평 모델보다 큰 수직 모델에서 두 제어기 응답 차이는 수평 모델의 경우 단지 영점을 포함하는 2차 시스템에 불과한 모델이었으나 수직 모델의 경우 수평 모델보다 하나의 상태가 더 추가되어 PD제어기로서 한계였다고 생각된다.

따라서 선형화된 모델과 결정된 제어 계수에 크게 의존하는 PD제어기의 경우 다양한 외란과 다변수 시스템에서는 적절한 응답을 얻기 어렵고 시스템을 복잡하게 한다. 그러나 슬라이딩 모드 제어기의 경우 다소의 외란에도 강인한 제어가 가능하므로 심해의 열악한 조건에서도 요구되는 제어성능을 보이기 위해 슬라이딩 모드 제어기가 적합하다.

후 기

본 연구는 해양수산부의 지원으로 수행된 해양연구원 중점연구사업 "U-기반 탐사선단의 스마트 운용기술개발"과제와 "차세대 심해무인잠수정 개발" 과제와 의 연구결과 중 일부분을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 박진영 (2005), "소형 무인 잠수정의 자세 제어 구현에 관한 연구," 한국과학기술원
- 이판목 (2003). 차세대 심해용 무인잠수정 개발(2), 한국해양연구원 보고서, UCM0043A-2442.
- Cristi, R. Papoulias, F.A. and Healey, A.J. (1990). " Adaptive sliding mode control of autonomous underwater vehicle in the dive plane," IEEE J. Oceanic Eng., vol. 15, pp 152-160.
- Healey, A.J. Lienard, D. (1990). "Multivariable sliding-mode control for autonomous diving and steering of unmanned underwater vehicles," IEEE J. Oceanic Eng., vol. 15, pp 152-160.
- Utkin, V.I. (1977). "Variable structure system with sliding modes,"IEEE Trans. Automat. Contr., vol. AC-22, pp 212-222.
- Yoerger, D.R. Cooke, J.G. and Slotine, J.J.E. (1991). "The influence of thruster dynamic on underwater vehicle behavior and their incorporation in design," IEEE J. Oceanic Eng., vol. 15, pp 167-179.

2000년 0월 0일 원고 접수

2000년 0월 0일 최종 수정본 채택