

무인잠수정의 적분 상태 궤환 제어기 설계 및 경유점 추적 연구

A Study on an Integral State Feedback Controller for Way-point Tracking of an AUV

배 설 봉, 신 동 협, 박 상 흥, 주 문 갑*

(Seol B. Bae¹, Dong H. Shin¹, Sang H. Park², and Moon G. Joo¹)

¹Dept. Information and Communications Engineering, Pukyong National University

²Dept. Electronics Engineering, Pukyong National University

Abstract: A state feedback controller with integration of output error is proposed for way-point tracking of an AUV (Autonomous Underwater Vehicle). For the steering control on the XY plane, the proposed controller uses three state variables (sway velocity, yaw rate, heading angle) and the integral of the steering error, and for the depth control on the XZ plane, it uses four state variables (pitch rate, depth, pitch angle) and the integral of the depth error. From the simulation using Matlab/Simulink, we verify that the performance of the proposed controller is satisfactory within an error range of 1m from the target way-point for arbitrarily chosen sets of consecutive way-points.

Keywords: integral state feedback, AUV, way-point tracking, matlab/simulink, line-of-sight

I. 서론

세계 각국의 무인잠수정(autonomous under water vehicle, AUV) 보유 대수는 증가하고 있으며, 그 수요도 2016년까지 꾸준히 확대될 것으로 전망된다. 2012년 이후에는 해양 신재생 에너지 생산 프로젝트의 실패역 조사, 해양 석유·가스 FEED (Front End Engineering Design) 시스템 등 무인잠수정의 새로운 응용 분야가 부상할 것이다[1].

해저의 탐사를 위한 무인잠수정은 운동학적, 동역학적인 비선형성의 특성으로 인하여 제어기 설계가 어렵다. 따라서 여러 연구들은 무인잠수정에 대한 선형화 모델을 무인잠수정의 경로 추적제어기 설계에 사용하였다[2-6]. 무인잠수정의 경로 추적에 사용되는 제어기에는 sliding mode, PID, 상태 궤환, 퍼지 제어기 등이 개발 되고 있다. 상태 궤환 제어기는 상태 공간에서 극점 배치가 임의적으로 가능함으로서 시스템을 완전히 제어 할 수 있고, 상태 궤환 제어기에 적분기를 추가하여 정상상태 오차를 보완할 수 있다.

그림 1은 본 연구실에서 개발한 무인잠수정을 나타낸다. 선수부에는 DVL (Doppler Velocity Logger)과 깊이센서가 장착되었고, 선체에는 GPS (Global Positioning System), DC/DC converter, IMU (Inertial Measurement Unit), battery, main control 및 motor/sensor control이 장착되어 무인잠수정

의 자세 및 위치를 측정한다. 선미부에는 rudder/stern actuator와 propulsion motor가 장착되어 무인잠수정을 운용한다.

본 논문에서는 무인잠수정의 깊이 및 방향 오차의 적분기를 구현하여, 이를 상태 변수로 이용한 상태 궤환 제어기를 제안한다. 제안한 제어기의 시뮬레이션은 Matlab/Simulink를 사용하여 제어기의 성능을 검증하였다.

논문의 구성은 다음과 같다. II 장에서는 제안하는 제어기 설계에 대하여 기술하고 III 장에서는 제안한 제어기의 시뮬레이션 결과를 제시하고 IV 장에서 결론으로 논문을 맺는다.

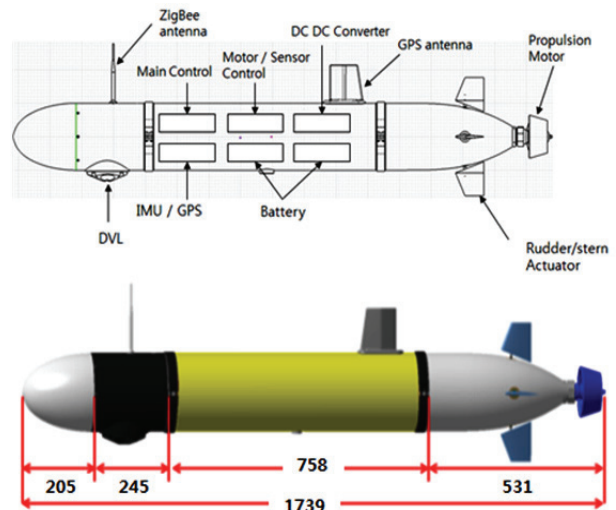


그림 1. 무인잠수정의 구성.
Fig. 1. Configuration of AUV.

* 책임저자(Corresponding Author)

Manuscript received May 15, 2013 / revised June 10, 2013 / accepted June 30, 2013

배설봉, 신동협, 주문갑: 부경대학교 정보통신공학과
(bsb362@nate.com/squallkor@naver.com/gabi@pknu.ac.kr)

박상흥: 부경대학교 전자공학과(radar@pknu.ac.kr)

※ 본 연구는 2011학년도 부경대학교의 지원을 받아 수행된 연구임(PK-2011-0844).

II. 본론

1. 무인잠수정의 운동좌표계

무인잠수정은 IMU와 GPS를 상호 보완하여 결합한 INS (Inertial Navigation System)를 이용하기 때문에 동체고정좌표계와, 경로추적과 항법을 위한 지구고정좌표계를 함께 사용한다. 그림 2는 동체고정좌표계와 지구고정 좌표계를 나타내며 각 변수는 다음과 같다[7].

• 기호체계

u : surge velocity (m/s).

v : sway velocity (m/s).

w : heave velocity (m/s).

ϕ : roll angle (rad).

θ : pitch angle (rad).

ψ : heading angle (rad).

z : depth (m).

p : roll rate (rad/s).

q : pitch rate (rad/s).

r : yaw rate (rad/s).

$\delta_s(t)$: stern plane deflection (rad).

$\delta_r(t)$: rudder plane deflection (rad).

그림 3은 지구고정좌표계에서 XY 평면의 경로 추적을 위한 ψ_e 와 Z 축의 경로 추적을 위한 z_e 를 나타낸 그림이다. ψ_e 는 조류 등으로 인한 로봇의 이동방향을 고려한 LOS(line of sight) 알고리즘을 사용하며 다음 식 (1)과 같다. z_e 는 깊이 오차를 나타낸다.

$$\psi_e = \left(\text{atan} \left(\frac{y_r - y}{x_r - x} \right) - \text{asin} \left(\frac{v}{\sqrt{v^2 + u^2}} \right) \right) - \psi \quad (1)$$

$$z_e = z_r - z$$

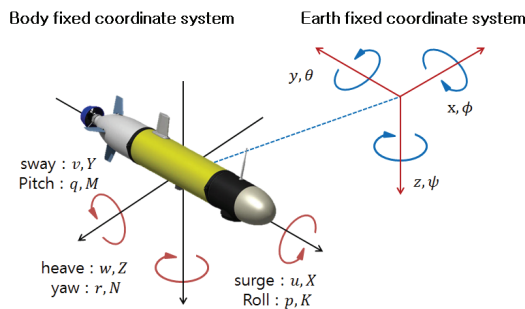


그림 2. 무인잠수정의 좌표계.

Fig. 2. Coordinate system of AUV.

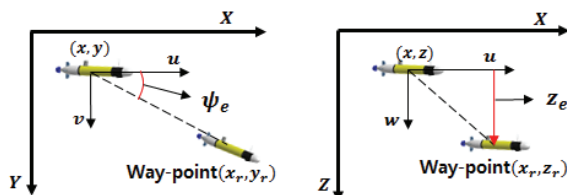


그림 3. 경로 추적 좌표.

Fig. 3. Path tracking coordinate.

위에서 구한 ψ_e 와 z_e 는 적분 상태 궤환 제어기의 상태 변수 η_ψ, η_z 에 사용된다.

2. 깊이 제어를 위한 제어기 설계

무인잠수정의 수직면 운동에서의 상태 변수 다음과 같이 정의한다.

$$x_z = [q, z, \theta]^T \quad (2)$$

Z 축 무게중심이 부력중심과 일치하고, $u = U$ (정속)라는 가정 하에, 무인잠수정의 수직면 운동은 아래와 같이 3개의 상태 변수를 가진 선형 시스템 식 (3)으로 간략화 및 선형화 된다[8-11].

$$\begin{bmatrix} I_{yy} - M_q & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q} \\ \dot{z} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -m x_g U + M_q & 0 & M_\theta \\ 0 & 0 & -U \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q \\ z \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_{\delta_s} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_s \quad (3)$$

여기에서 δ_s (stern plane deflection)은 수평꼬리 날개의 각도를 나타내고, 기호체계는 [8]에 따른다.

그림 4는 깊이 제어를 위한 적분 상태 궤환 제어기이다. 무인잠수정 진행방향속도를 $u = 1.2m/s$ 라고 가정하고, 식 (2)에 깊이 오차를 제거하기 위한 적분동작에 필요한 상태 변수 η_z 를 아래의 그림 4같이 추가한다.

적분 상태 궤환 제어기의 상태방정식은 [11,12]에서 사용된 상수 값을 사용하여 식 (4)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{\bar{x}}_z(t) &= \bar{A}_z \bar{x}_z(t) + \bar{B}_z \delta_s(t) \\ \bar{\eta}_z &= \int_0^t z_e dt \\ \bar{x}_z(t) &= [q, z, \theta, \eta_z]^T \end{aligned} \quad (4)$$

식 (4)의 상태방정식 행렬 $\bar{A}_z, \bar{B}_z, \bar{C}_z$ 는 다음과 같다.

$$\bar{A}_z = \begin{bmatrix} -0.9539 & 0 & -0.6966 & 0 \\ 0 & 0 & -1.2000 & 0 \\ 1.0000 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1.0000 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \bar{B}_z = \begin{bmatrix} -1.028 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\bar{C}_z = [0 \ 1 \ 0 \ 0]. \quad (5)$$

Desired pole 값은 2개의 우세근이 critically damping이 되도록 중근을 취하고, 열세근은 더 좌반구의 좌측에 위치하도록 $[-0.3, -0.3, -1.5 - 0.125i, -1.5 + 0.125i]$ 로 선택하였고, K_z 와 적분 상태 궤환 제어기의 출력 δ_s 는 다음 식 (6)과 같다.

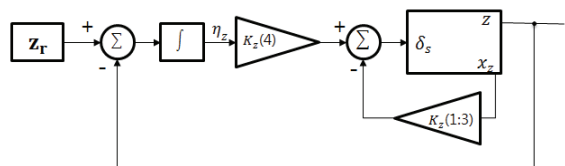


그림 4. 깊이 제어를 위한 적분 상태 궤환 제어기.

Fig. 4. Integral state feedback controller for depth control.

$$K_z = [-2.4629, 1.1960, -3.0339, -0.1492]$$

$$\delta_s = -K_z \bar{x}_z(t)$$

$$= 2.4629q - 1.196z + 3.0339\theta + 0.1492\eta_z$$
(6)

3. 수평면 제어를 위한 제어기 설계

무인잠수정의 수평면 운동에서의 상태 변수를 다음 식 (7)과 같이 정의한다.

$$x_{xy}(t) = [v, r, \psi]^T$$
(7)

Z 축 무게중심이 부력 중심과 일치하고 $u = U$ (정속), $\phi \approx 0$, $\theta \approx 0$ 의 가정 하에, 무인잠수정의 수평면 상의 운동은 대략적으로 아래와 같이 3개의 상태 변수를 가진 선형 시스템 식 (8)로 간략화 및 선형화할 수 있다[8-11].

$$\begin{bmatrix} m - Y_v & m x_g - Y_r & 0 \\ -N_v & I_{zz} - N_r & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_v & Y_r - mU & 0 \\ N_v & N_r & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Y_{\delta_r} \\ N_{\delta_r} \\ 0 \end{bmatrix} \delta_r$$
(8)

여기에서 δ_r (rudder plane deflection)은 수평꼬리 날개의 각도를 나타내고, 기호체계는 [8]에 따른다.

그림 5는 방향 제어를 위한 적분 상태 궤환 제어기이다. 무인잠수정의 진행방향속도를 $u = 1.2m/s$ 라고 가정한 후, 그림 5의 제어기와 같이 적분 상태변수 η_ψ 를 추가한다. 적분 상태 궤환 제어기의 상태 방정식은 [11,12]에서 사용된 상수값을 사용하여 식 (9)와 식 (10)으로 나타낸다.

$$\dot{\bar{x}}_{xy}(t) = \bar{A} \bar{x}_{xy}(t) + \bar{B} \delta_r(t)$$

$$\bar{\eta}_\psi = \int_0^t \psi_e dt$$

$$\bar{x}_{xy}(t) = [v, r, \psi, \eta_\psi]^T$$
(9)

$$\bar{A}_{xy} = \begin{bmatrix} -0.5252 & -1.2490 & 0 & 0 \\ -3.579 & -0.5775 & 0 & 0 \\ 0 & 1.0000 & 0 & 0 \\ 0 & -1.0000 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \bar{B}_{xy} = \begin{bmatrix} 0.1516 \\ -1.028 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$
(10)

$$\bar{C}_{xy} = [0 \ 0 \ 1 \ 0]$$

위 식의 desired pole을 $[-1.7, -1.7, -0.5 + 0.1i, -0.5 - 0.1i]$ 으로 하는 K_{xy} 와 적분 상태 궤환 제어기의 출력 δ_r 은 다음 식 (11)과 같다.

$$K_{xy} = [3.4812, -2.6042, -2.6192, 0.6391]$$

$$\delta_r = -K_{xy} \bar{x}_{xy}(t)$$

$$= -3.4812v + 2.6042r + 2.6192\psi - 0.6931\eta_{xy}$$
(11)

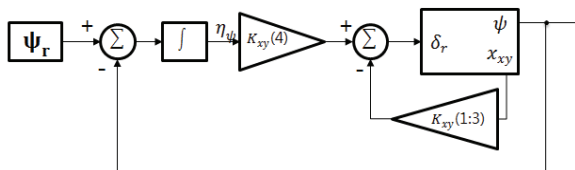


그림 5. 수평면 제어를 위한 적분 상태 궤환 제어기.
Fig. 5. Integral state feedback controller for steering control.

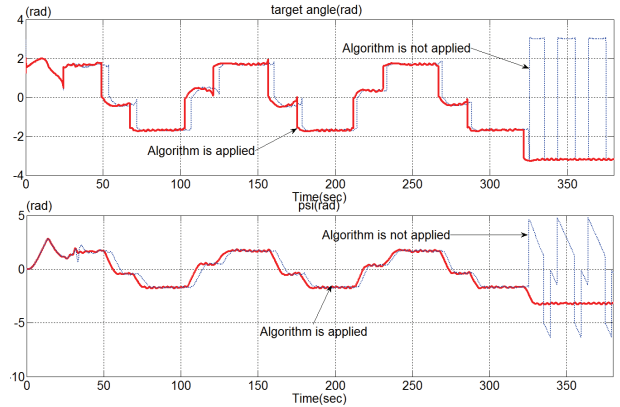


그림 6. (a) 목표 각도 그래프, (b) ψ 각도 그래프.
Fig. 6. (a) Target angle graph, (b) ψ angle graph.

4. 경로추적을 위한 추가 알고리즘

오일러 좌표계에서 무인잠수정 ψ 값의 범위는 $-\pi \leq \psi \leq \pi$ 이다. 이때 무인잠수정의 진행방향이 $-\pi$ 또는 π 근처인 경우 채터링 현상으로 인해 무인잠수정의 방향 제어를 하지 못한다. 다음의 알고리즘을 통해 이전 target_angle값과 비교하여 가장 변화가 작은 각도를 다시 target_angle에 대입함으로써 채터링 현상을 제거한다.

• 정의

- target_old : 이전 목표 방향
- target_angle : 현재 목표 방향 (LOS)
- angle[i] : target_angle 값 후보
- ψ_e : 식 (1)

• 알고리즘

1. π , $-\pi$ 에서 채터링 현상이 발생하므로 target_angle값에 $\pm 2\pi$ 만큼 더한 값들을 함께 고려한다;

- angle[1] = target_angle;
- angle[2] = angle[1] + 2π ;
- angle[3] = angle[1] - 2π ;

2. 채터링 현상을 제거한 후 target_Old와 angle[i]의 차이가 가장 작은 절대 값을 구하여 target_angle에 대입한다;

- $i^* = \arg_i(\min(|\text{target_old} - \text{angle}[i]|))$;
- target_angle = angle[i^*]
- $\psi_e = \text{target_angle} - \psi$;

그림 6(a), (b)는 알고리즘 미적용과 적용 후의 목표 heading angle (target_angle) 값과 AUV의 현재 heading angle (ψ)값을 나타내며, 굵은 선은 알고리즘을 적용한 결과, 실선은 알고리즘을 적용하지 않은 결과를 나타낸다. 그림 6(a)의 약 325초에서 target_angle 값의 채터링 현상이 생겨 ψ 값 또한 채터링 현상이 발생한다.

III. 경로 추적 시뮬레이션

제안한 적분 상태 궤환 제어기의 성능을 평가하기 위해 Matlab/Simulink를 이용하여 시뮬레이션을 하였다. 그림 7은

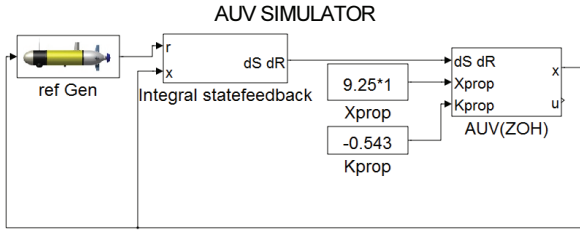


그림 7. Matlab/Simulink 시뮬레이터.
Fig. 7. Matlab/Simulink simulator.

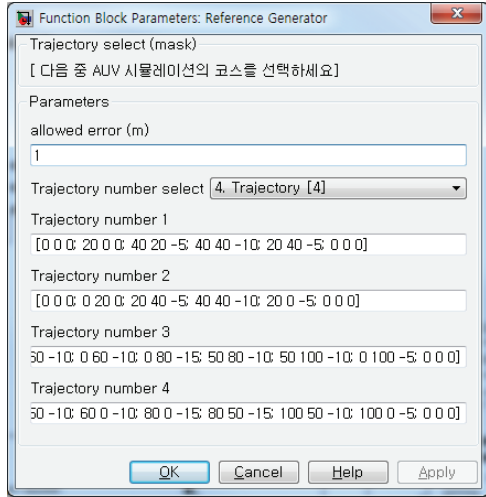


그림 8. 경로 설정 마스크.
Fig. 8. Configuration path mask.

Matlab/Simulink의 시뮬레이터를 나타냅니다. 무인잠수정의 방향별 속도 및 각속도 측정 센서의 오차범위는 측정값에 최대 $\pm 0.005 m/s$, $\pm 15^\circ/s$ 이기에, 임의로 추가되는 잡음을 오차의 범위로 설정하였고, 수평과 수직의 방향기는 최고속도의 $60^\circ/s$ 의 속도로 $\pm 40^\circ$ 까지 동작하는 것으로 가정하였다. 그림 7의 $X_{prop} = 9.25 [N]$ 은 추진기의 설정된 추력 값이며, $K_{prop} = -0.543 [Nm]$ 은 추진기의 설정된 토크 값이다[6].

그림 8은 Matlab/Simulink의 경로 설정 마스크이다. 표 1의 기본 경로와 경유점 허용오차 1m를 입력한 상태를 나타낸다. 원하는 경로를 생성하여 시뮬레이션 하거나, 이미 만들어진 경로를 선택할 수 있다. 또한 상황에 따라 경유점의 허용 반경을 조절 가능하도록 설정하였다.

표 1의 4가지의 무인잠수정 경로 추적 시뮬레이션을 수행하였다. 4가지의 경로 시뮬레이션 모두 무인잠수정이 약 $u = 1.2 m/s$ 를 유지하도록 추진기의 추력과 토크를 설정하였다.

그림 9는 무인 잠수정의 경로 4에 대한 채터링 알고리즘 적용과 미적용의 시뮬레이션 결과 그래프이다. 알고리즘을 적용하지 않았을 경우 그림 9(b) 그래프의 경유점 (0,100)에서 경유점을 추적하지 못하고 맴도는 것을 확인할 수 있다. 그림 9(a) 그래프는 채터링 현상을 제거하는 알고리즘을 적용한 결과 (0,100) 이후에 다음 경유점을 추적하여 경로를 모두 경유하는 것을 알 수 있다.

표 1. 기본 경로.
Table 1. Basic path.

경로	목표좌표 (좌측부터 순서대로)
1	(0,0,0), (0,20,0), (20,40,-5), (40,40,-10), (40,20,-5), (0,0,0)
2	(0,0,0), (20,0,0), (40,20,-5), (40,40,-10), (0,20,-5), (0,0,0)
3	(0,0,0), (0,10,0), (0,50,-10), (15,50,-10), (20,0,-10), (40,0,-15), (40,50,-10), (60,50,-10), (60,0,-10), (80,0,-15), (80,50,-10), (100,50,-10), (100,0,-5), (0,0,0)
4	(0,0,0), (20,0,0), (50,0,-10), (50,20,-10), (0,20,-10), (0,40,-10), (50,40,-10), (50,60,-10), (0, 60,-10), (0,80,-15), (50,80,-15), (50,100,-10), (0,100,-5), (0,0,0)

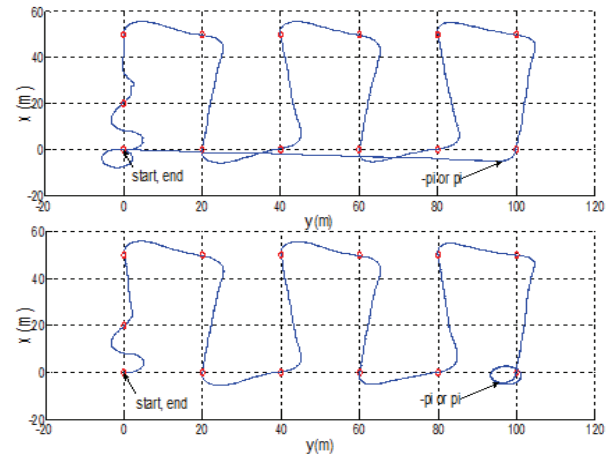


그림 9. (a) 채터링 현상 제거 후 경로 추적 성공 (b) 채터링 현상으로 인한 경로 추적 실패.
Fig. 9. (a) Successful path tracking after removal of chattering (b) Tracing failure caused by chattering.

그림 10-13은 순서대로 표 1의 경로 1-4의 시뮬레이션 결과 값이다. 각각 그림의 작은 원은 목표좌표를 나타내고 실선은 이동경로를 나타낸다. 4가지 시뮬레이션 모두 임의의 목표 경유점을 추적하여 원점으로 복귀함을 확인할 수 있다.

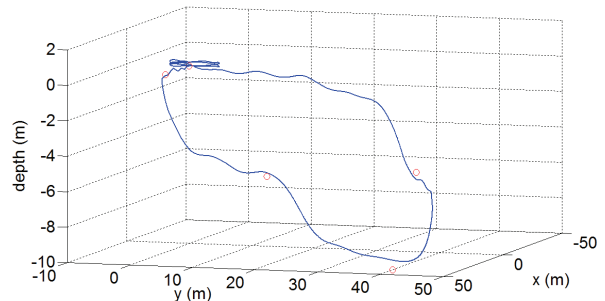


그림 10. 경로 1.
Fig. 10. Path 1.

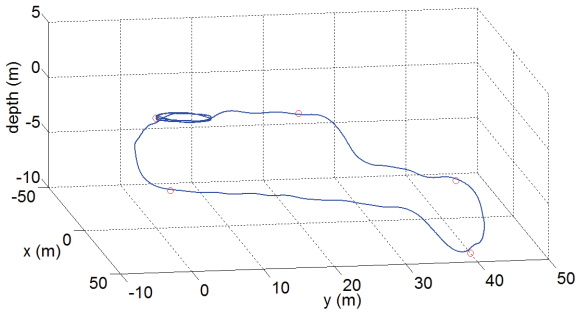


그림 11. 경로 2.
Fig. 11. Path 2.

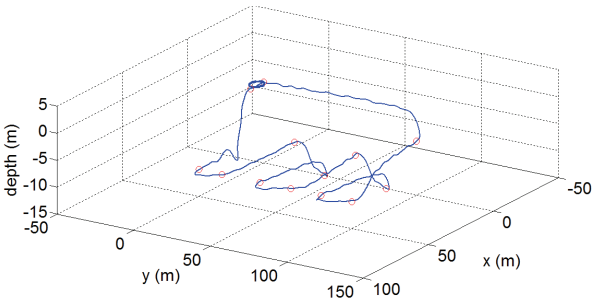


그림 12. 경로 3.
Fig. 12. Path 3.

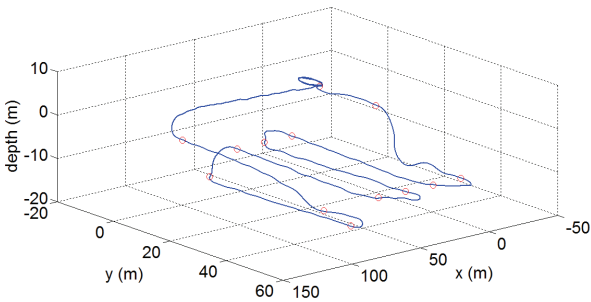


그림 13. 경로 4.
Fig. 13. Path 4.

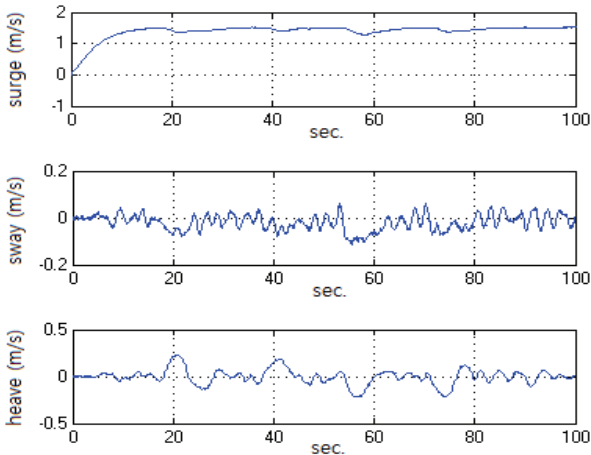


그림 14. 경로 1의 AUV 방향별 속도.
Fig. 14. Surge, sway, and heave of AUV for path 1.

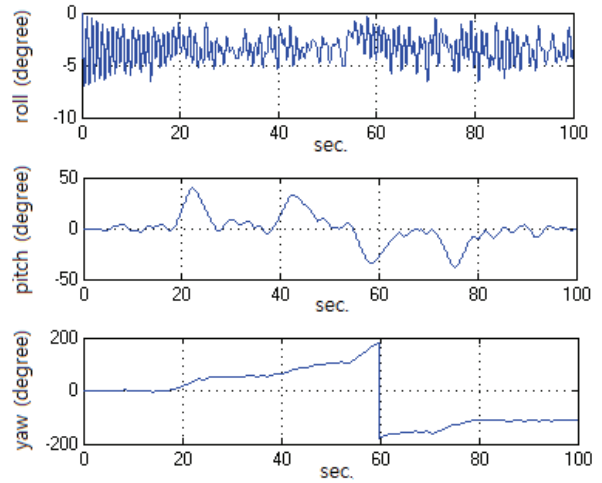


그림 15. 경로 1의 AUV roll, pitch, yaw 각도.
Fig. 15. Roll, pitch, and yaw of AUV for path 1.

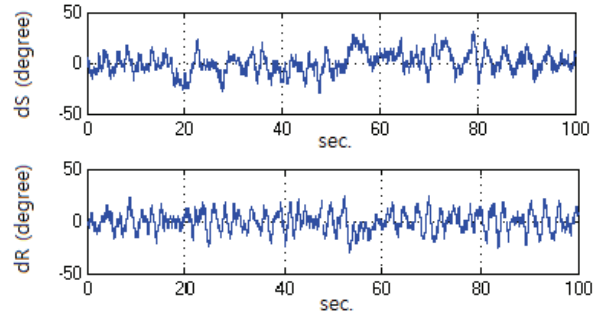


그림 16. 경로 1의 AUV에 인가되는 제어 입력.
Fig. 16. Control input of AUV for path 1.

경로 1의 경우에 대하여 AUV의 방향별 속도는 그림 14와 같다. 전진속도(surge) u 는 제어기의 설계시 가정한 값으로 약 1.2 m/s 이다. 또한 프로펠러 추력 및 토크를 일정한 값으로 가정했기 때문에 AUV의 방향 및 깊이 변화에 따라 전진속도의 변화가 발생하는 것을 알 수 있다. AUV의 roll, pitch, yaw는 그림 15와 같다. AUV의 경유점이 바뀔 때마다 yaw, pitch가 변하는 것을 알 수 있다. AUV에 인가되는 꼬리날개의 제어각(δ_s, δ_r)은 다음 그림 16과 같다. AUV의 이동에 따라 수평 꼬리날개와 수직 꼬리날개의 제어각이 $\pm 40^\circ$ 범위에서 동작됨을 알 수 있다.

IV. 결론

소형 무인잠수정 운동체가 임의로 주어진 경로를 추적하도록 수직면 깊이제어와 수평면 방향제어에 AUV의 특성 및 상수들을 이용한 적분 상태 궤환 제어기를 제안하였다. 임의로 주어진 4가지 경로에 대해 Matlab/Simulink 시뮬레이션을 통하여 제어기의 성능을 확인하였다. 설계된 제어기에는 적분 제어기가 포함되어 4가지 경로에 대하여 오차 범위 1m 내에서 경유점을 추적하는 결과를 보여주었다.

본 논문에서 적분 상태 궤환 제어기 설계시 AUV의 전진속도(u)를 1.2 m/s 로 가정하였다. 모델링된 AUV 속도에서 경로추적 시뮬레이션 결과는 적분제어기가 상태 궤환 제어

기의 특성으로 발생하는 정상상태 오차를 감소시켜 주기 때문에 AUV가 정확하게 경로추적을 할 수 있었다. 제한한 적분 상태 궤환 제어기는 AUV의 전진속도의 범위가 제한적이기 때문에 향후 넓은 범위의 운용속도를 보장할 수 있는 강인한 제어기 설계를 계획하고 있다.

REFERENCES

- [1] P. Newman, *World AUV Market Forecast 2012-2016*, Douglas Westwood, 2012.
- [2] M. Nakamura, H. Kajiwara, and W. Koterayama, "Development of an ROV operated both as towed and self-propulsive vehicle," *Ocean Engineering*, vol. 28, no. 1, pp. 1-43, 2001.
- [3] T. I. Fossen, *Guidance and Control of Ocean Vehicles*, John Wiley and Sons, 1994.
- [4] I. Kammer, A. Pascoal, E. Hallberg, and C. Silvestre, "Trajectory tracking for autonomous vehicles: an integrated approach to guidance and control," *Journal Guidance, Control and Dynamics*, vol. 21, no. 1, pp. 29-38, 1998.
- [5] R. C. Robinson, "National defense applications of autonomous underwater vehicles," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. IE-11, no. 4, pp. 462-467, 1986.
- [6] S. T. Kwon, D. H. Shin, M. G. Joo, "Way-point tracking of AUV using sliding mode controller," *The Journal of Korean Institute of Information Technology (in Korean)*, vol. 10, no. 10, pp. 17-22, 2012.
- [7] T. I. Fossen, *Marine Control System, Marine Cybernetics*, 2002.
- [8] T. Prestero, "Verification of a six-degree of freedom simulation model for the REMUS autonomous underwater vehicle," M. S. thesis, MIT/ WHOI, 2001.
- [9] K. M. Fauske, F. Gustafsson, and Ø. Hegrenæs, "Estimation of AUV dynamics for sensor fusion," *Proc. of the 10th Conference Information Fusion*, pp. 1-6, 2007.
- [10] D. W. Kim, H. J. Lee, and J. N. Sur, "T-S fuzzy model-based waypoints-tracking control of underwater vehicles," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 17, no. 6, pp. 526-530, 2011.
- [11] S. T. Kwon, W. K. Baek, I. P. Kang, H. S. Choi, and M. G. Joo, "A study on way-point tracking of AUV using state feedback," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 17, no. 12, pp. 1266-1272, 2011.
- [12] S. T. Kwon, D. H. Shin, W. K. Baek, and M. G. Joo, "Fuzzy controller with state feedback modules for tracking way -points of autonomous underwater vehicle," *15th International Conference on Mechatronics Technology*, 2011.



배 설 봉

2013년 부경대 전자정보통신전공 졸업. 2013년~현재 부경대 정보통신공학과 석사과정. 관심분야는 지능제어 시스템, 임베디드 시스템.



신 동 협

2012년 부경대 전자정보통신전공 졸업. 2012년~현재 부경대 정보통신공학과 석사과정. 관심분야는 지능제어 시스템, 임베디드 시스템.



박 상 홍

2004년 포항공대 전자전기공학과 졸업. 2007년 포항공대 전자전기공학과 공학석사. 2010년 포항공대 전자전기공학과 박사. 2010년~현재 부경대학교 전자공학과 조교수. 관심분야는 레이더 표적인식, 레이더 영상, 레이더 신호처리, 패턴인식, 스펙트럼 추정 등.



주 문 갑

1992년 포항공대 전자전기공학과 졸업. 1994년 포항공대 정보통신학과 공학석사. 2001년 포항공대 전자컴퓨터공학부 공학박사. 2003년~현재 부경대학교 정보통신공학과 교수. 관심분야는 지능제어 및 공장 자동화.