

논문 2015-10-30

PID 제어를 이용한 호버링 AUV의 경유점 추적

(A Way-Point Tracking of Hovering AUV by PID control)

김민지, 배설봉, 백운경, 주문갑*, 하경남

(Min J. Kim, Seol B. Bae, Woon-Kyung Baek, Moon G. Joo, Kyoung Nam Ha)

Abstract : For the tracking of the way-points of hovering AUV (HAUV), we suggest a simple PID controller. The way-points are designed to approach to a virtual underwater structure and the heading angles at each way-point are set to look at the structure in the face. The proposed controller consists of a vertical controller to maintain the depth and pitch angle, and a horizontal controller to move to the desired position as well as to adjust the heading angle of the HAUV. In the simulation using Matlab/Simulink, the HAUV with the proposed PID controller is shown to track all the way-points within 1 m range while maintaining proper heading angle at each way-point.

Keywords : PID controller, Exponential filter, HAUV, Way-point tracking, Matlab/Simulink

1. 서론

최근 세계 각국은 자원 고갈로 인한 에너지 부족 문제에 직면하고, 에너지 부족 문제를 해결하기 위한 방안을 모색하고 있다. 아직 개발되지 않은 심해는 자원의 보고로 인류가 직면한 에너지 부족과 지구과학의 문제 극복에 대한 대안이 될 것으로 세계 각국은 예측한다[1, 2]. 해양 자원에 대한 관심이 증가하는 가운데 해양 장비에 대한 필요성도 함께 대두되고 있다. 여러 가지 해양 장비 중 수중로봇은 해양 탐사 및 자원 개발에 있어서 반드시 필요한 장비이다. 이에 따라 수중 로봇 분야는 심해의 탐사, 조사, 연구 활동으로 인하여 빠른 속도로 성장하고 있다[3-6].

수중 로봇은 크게 원격 조정 무인 잠수정 (ROV,

remotely operated vehicle)과 자율 무인 잠수정 (AUV, autonomous underwater vehicle)로 분류된다. ROV는 모선과 동력/신호선으로 연결되어 있고, 모선의 제어 시스템에 의해 원격 조정되는 로봇이다. 반면에 AUV는 컴퓨터와 동력원이 내장되어 있고, 각종 항해용 센서가 장착되어 있어 자체적으로 활동하는 수중 로봇이다. 그리고 ROV는 모선이 필요하고, 고가의 방수케이블이 필요하기 때문에 운영비가 높다는 단점이 있으나, AUV는 동력/신호선 없이 자체의 전원을 이용하여 바다 속을 빠른 속도로 운항하며 임무를 수행할 수 있다[6]. AUV는 임무를 위한 항주 거리에 따라 항주형 (cruising) AUV와 호버링 (hovering) AUV로 나눌 수 있다. CAUV (cruising AUV)는 일반적으로 수백 미터에서 수백 킬로미터까지의 비교적 넓은 영역의 해저를 항주하며 임무를 수행 하는 수중 로봇을 일컫는다.

HAUV (hovering AUV)는 특정 지역의 정밀 조사 및 작업을 수행하는 수중 로봇을 일컫는다. HAUV는 정밀 조사 및 작업 임무를 수행하기 위해 제자리에서 자세 및 위치 제어 기능과 경유점 이동 기능이 필수적이다[7]. PID 제어기와 퍼지 제어기는 해당 수중 로봇과 환경의 동역학적 모델이 없거나 계수가 불확실한 경우, 일정 수준의 제어를 위하여 사용되고 있다[8-10]. 정확한 동역학 모델과 수중 환경의 모델식이 있는 경우는 상태 궤환 제어기,

*Corresponding Author (gabi@pknu.ac.kr)

Received: 15 Mar. 2015, Revised: 23 Apr. 2015, Accepted: 16 May 2015.

M.J. Kim, S.B. Bae, W.K. Baek, M.G. Joo: Pukyong National University

K.N. Ha: Korea Institute of Industrial Technology

※ 이 논문은 산업통상자원부 및 한국산업기술진흥원의 재원으로 산업기술개발기반구축사업의 지원을 받아 수행한 연구임(N0000706)

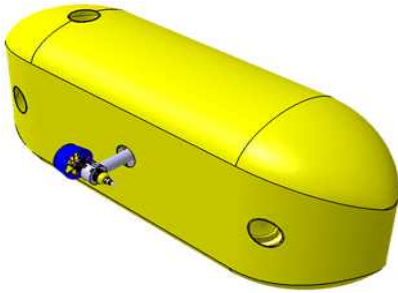


그림 1. 개발중인 HAUV의 형상
Fig. 1 Appearance of the HAUV under development

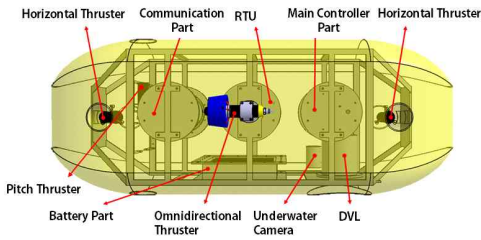


그림 2. 옆에서 본 HAUV의 구조
Fig. 2 Structure of HAUV from the side

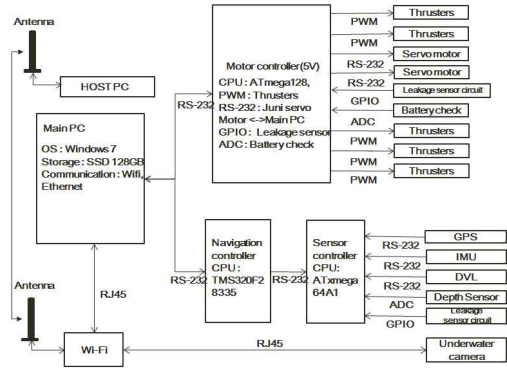


그림 3. HAUV의 블록 다이어그램
Fig. 3 Block diagram of HAUV

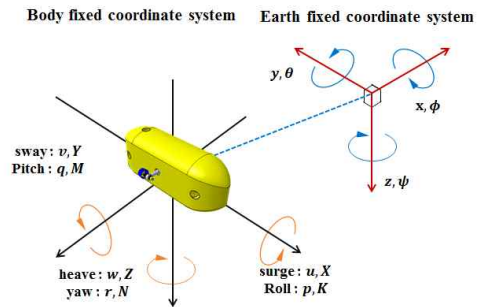


그림 4. HAUV의 좌표계 시스템
Fig. 4 Coordinate system of HAUV

sliding mode 제어, adaptive 제어 등을 사용하여 보다 정밀한 제어가 가능한데, 사용되는 모델식의 정확도에 따라 제어 성능이 결정된다[11-13].

본 논문에서는 그림 1과 같이 본 연구실에서 개발중인 HAUV의 경유점 추적과 자세 제어를 위하여, Matlab/simulink로 PID 제어를 사용한 경유점 추적 시뮬레이션을 다룬다. 논문의 구성은 2장에서 HAUV의 구성에 대하여 기술하고, 3장에서 PID 제어기의 설계에 대하여 제시하며, 4장에서 시뮬레이션 결과, 5장에서 결론을 맺는다.

II. HAUV의 구성

본 논문에서 사용되는 HAUV는 기존에 개발된 HAUV[7]를 수정하여 길이 1,400mm, 폭 400mm, 높이 550mm, 총 중량 66.5kgf으로 재설계한 것이다. 그림 2는 HAUV의 구조이고, 그림 3은 HAUV의 블록 다이어그램이다. HAUV는 그림 2와 같이 알루미늄 프레임의 구조로서, 4개의 기구부와 5개의 추진기로 구성되며 외부에 스킨을 추가한다. 기구부에는 HAUV의 운동을 제어하기 위한 메인 제어부, 추진기의 추력과 각도를 제어하기 위한

RTU(Rotating Thruster Unit), 전장 시스템 및 추진기에 전원 공급을 위한 전장용 배터리부, 모터용 배터리부가 있다. 메인 제어부는 그림 3의 Main PC와 항법용 컨트롤러, 센서 처리부로 구성되며 RTU는 모터 컨트롤러로 구성된다. 추진기는 2개의 전방위 추진기, 2개의 수평 터널 추진기, 1개의 수직 터널 추진기로 구성된다. DVL(doppler velocity log) 센서와 수중 촬영을 위한 수중 카메라를 장착한다. 수중 카메라의 영상과 HAUV의 제어는 WIFI 통신을 통해 외부에서 Host PC가 제어한다. 각 기구부와 추진기는 부력 중심과 무게 중심을 고려하여 대칭으로 배치한다.

III. PID 제어기 설계

수중에서 6자유도를 갖는 HAUV의 PID 제어기를 설계함에 있어서 먼저 좌표계를 정의해야 한다. 좌표계는 그림 4과 같이 HAUV의 위치(x, y, z), 속

도(u, v, w), 자세(ϕ, θ, ψ) 및 각속도(p, q, r)를 나타내기 위한 지구 고정 좌표계와 HAUV에 작용하는 힘(X, Y, Z)과 모멘트(K, M, N)를 계산하기 위한 동체 고정 좌표계를 정의한다[10].

HAUV의 동역학 모델은 12개의 상태변수를 사용한 비선형 미분 방정식으로 표현할 수 있으며, 그중 동체 고정 좌표계와 관련된 속도, 각속도는 다음의 식 (1)~(6)과 같이 표현된다. HAUV의 자세와 위치는 오일러 각을 이용하여 다음 식 (7)과 같이 표현된다[7]. 시뮬레이션에 사용된 변수값은 부록 1에 나타내었다.

$$(m - X_u)\dot{u} + mz_g\dot{q} = m[-qw + rv - rpz_g + (q^2 + r^2)x_g] + X_{u|u}|u| + X_{wq}wq + X_{q|q}|q| + X_{vr}vr + X_{r|r}|r| + X_{HS} + X_{prop} \quad (1)$$

$$(m - Y_v)\dot{v} + (m x_g - Y_r)\dot{r} - mz_g\dot{p} = m[-ru + pv - pqx_g - rqz_g] + Y_{ur}ur + Y_{wq}wq + Y_{pq}pq + Y_{uv}uv + Y_{v|v}|v| + Y_{r|r}|r| + Y_{HS} + Y_{prop} \quad (2)$$

$$(m - Z_w)\dot{w} - (Z_q + m x_g)\dot{q} = m[-pv + qu - prx_g + (p^2 + q^2)z_g] + Z_{uq}uq + Z_{vp}vp + Z_{rp}rp + Z_{uw}uw + Z_{w|w}|w| + Z_{q|q}|q| + Z_{HS} + Z_{prop} \quad (3)$$

$$(I_x - K_p)\dot{p} - mz_g\dot{v} = -I_{xz}r - (I_z - I_y)rq - I_{xz}pq + m[z_g(ru - pv)] + K_{p|p}|p| + K_{HS} + K_{prop} \quad (4)$$

$$(I_y - M_q)\dot{q} - (m x_g + M_w)\dot{w} + mz_g\dot{u} = (-I_x + I_z)pr - I_{xz}(r^2 - p^2) - m[z_g(qw - rv) - x_g(pv - qu)] + M_{uq}uq + M_{vp}vp + M_{rp}rp + M_{uw}uw + M_{w|w}|w| + M_{q|q}|q| + M_{HS} + M_{prop} \quad (5)$$

$$(I_z - N_r)\dot{r} + (m x_g - N_v)\dot{v} = -I_{zx}p - (I_y - I_x)pq + I_{xz}qr - m[x_g(ru - pv)] + N_{ur}ur + N_{\phi\phi} + N_{pq}pq + N_{uv}uv + N_{v|v}|v| + N_{r|r}|r| + N_{HS} + N_{prop} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \dot{\phi} = p + q\sin\phi\tan\theta + r\cos\phi\tan\theta \\ \dot{\theta} = q\cos\phi - r\sin\phi \\ \dot{\psi} = (q\sin\phi + r\cos\phi)/\cos\theta \\ \dot{x} = u\cos\psi\cos\theta + v(\cos\psi\sin\theta\sin\phi - \sin\psi\cos\phi) + w(\cos\psi\sin\theta\sin\phi + \sin\psi\sin\phi) \\ \dot{y} = u\sin\psi\cos\theta + v(\sin\psi\sin\theta\sin\phi + \cos\psi\cos\phi) + w(\sin\psi\sin\theta\cos\phi - \cos\psi\sin\phi) \\ \dot{z} = -u\sin\theta + v\cos\theta\sin\phi + w\cos\theta\sin\phi \end{cases} \quad (7)$$

그림 2의 HAUV는 2개의 전방위 추진기로 X_{prop}, Z_{prop} 을, 2개의 수평 터널 추진기로

Y_{prop}, N_{prop} 을, 1개의 수직 터널 추진기로 M_{prop} 을 각각 구현할 수 있다. 무게 중심을 낮게 설계하고 좌우보다 상하가 긴 형태로 인하여 rolling 요소가 작아 K_{prop} 은 제어 대상에서 제외한다.

1. 깊이 제어기(Z_{prop})

수중에서 HAUV의 깊이를 제어하기 위해 PID 제어기 적용하여 깊이 제어기를 설계한다. 그림 5 깊이 제어기의 블록 다이어그램을 나타낸다. 깊이 제어기는 목표 깊이(z_d)를 현재 깊이(z)와 비교하고, 그 값을 이용하여 PID 제어한다. 제어 결과 값은 HAUV의 z 축에 대한 힘(Z)을 결정한다. 식 (8)은 깊이 제어기의 식을 나타낸다. 깊이 제어기의 이득 값은 시행 착오를 통하여 $K_{Pz} = 10, K_{Iz} = 0.01, K_{Dz} = 100$ 으로 도출하였다. ($T = 1 \text{ sec.}$)

$$Z_{prop}(k) = K_{Pz}z_{err}(k) + K_{Iz}\sum^k z_{err}(i)T + K_{Dz}\frac{z_{err}(k) - z_{err}(k-1)}{T} \quad (8)$$

$$z_{err}(k) = z_d(k) - z(k)$$

2. Pitch 제어기(M_{prop})

HAUV의 자세를 제어하기 위해 PID 제어기를 이용하여 pitch 제어기를 설계한다. 목표 pitch(θ_d)은 0° 로 설정하고 제한된 현재 pitch(θ)와 비교하고, 그 값을 이용하여 PID 제어한다. 제어 결과 값을 이용하여 HAUV의 y 축에 대한 모멘트(M)를 결정한다. 그림 6은 pitch 제어기의 블록 다이어그램을 보여주며, 식 (9)는 pitch 제어기의 식을 나타낸다. Pitch 제어기의 이득값은 시행 착오를 통하여 $K_{P\theta} = 1, K_{I\theta} = 0, K_{D\theta} = 1$ 으로 도출하였다.

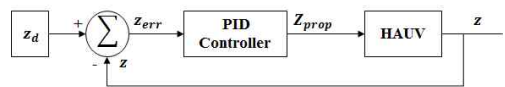


그림 5. HAUV의 깊이 제어기
Fig. 5 Depth controller of HAUV

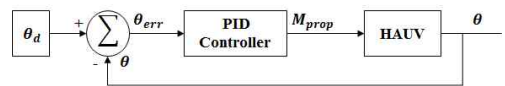


그림 6. HAUV의 pitch 제어기
Fig. 6 Pitch controller of HAUV

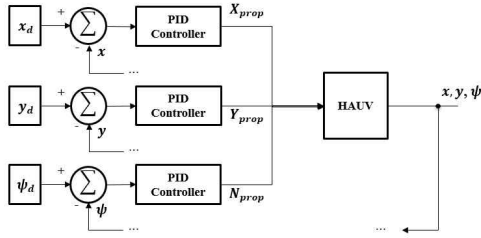


그림 7. HAUV의 방향 제어기

Fig. 7 Direction controller of HAUV

표 1. PID 이득값

Table 1. PID gains

	Direction controller		
	X_{prop}	Y_{prop}	N_{prop}
P	0.5	1	10
I	0.01	0.01	0.01
D	50	50	100

$$M_{prop}(k) = K_{P\theta} \theta_{err}(k) + K_{I\theta} \sum \theta_{err}(i) T + K_{D\theta} \frac{\theta_{err}(k) - \theta_{err}(k-1)}{T} \quad (9)$$

$$\theta_{err}(k) = \theta_d(k) - \theta(k)$$

3. 수평 방향 제어기($X_{prop}, Y_{prop}, N_{prop}$)

HAUV의 xy 평면상의 위치를 제어하고, HAUV의 방향각을 제어하기 위해 제어기를 설계한다. 목표 위치(x_d, y_d), 목표 방향각(ψ_d)를 궤환된 현재 위치(x, y), 현재 방향각(ψ)과 비교하고, 그 값을 이용하여 PID 제어한다. 제어 결과 값을 이용하여 HAUV의 x 축, y 축에 대한 힘과 z 축에 대한 모멘트를 결정한다. 그림 7은 블록 다이어그램을 보여주며, 식 (10)은 수식을 나타낸다. 방향 제어기의 이득값은 시행 착오를 통하여 표 1과 같이 도출하였다.

$$X_{prop}(k) = K_{Px} x_{err}(k) + K_{Ix} \sum_i x_{err}(i) T + K_{Dx} \frac{x_{err}(k) - x_{err}(k-1)}{T}$$

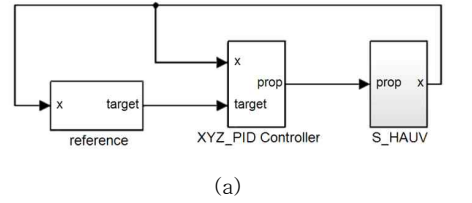
$$Y_{prop}(k) = K_{Py} y_{err}(k) + K_{Iy} \sum_i y_{err}(i) T + K_{Dy} \frac{y_{err}(k) - y_{err}(k-1)}{T}$$

$$N_{prop}(k) = K_{P\psi} \psi_{err}(k) + K_{I\psi} \sum_i \psi_{err}(i) T + K_{D\psi} \frac{\psi_{err}(k) - \psi_{err}(k-1)}{T} \quad (10)$$

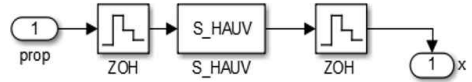
$$x_{err}(k) = x_d(k) - x(k),$$

$$y_{err}(k) = y_d(k) - y(k),$$

$$\psi_{err}(k) = \psi_d(k) - \psi(k)$$



(a)



(b)

그림 8. (a) HAUV의 경유점 추적 시뮬레이터 (b) S_HAUV 블록도

Fig. 8 (a) Simulator of HAUV for way-point tracking (b) S_HAUV block diagram

4. Exponential 필터

HAUV는 내장된 센서 DVL, IMU, GPS를 이용하여 위치, 속도, 자세를 측정하며 이 값에는 센서들의 측정오차를 가지고 있다. 속도 오차는 $\pm 5mm/s$, 자세 오차는 $\pm 1^\circ$, 위치 오차는 $\pm 0.5m$ 이다. 센서 측정 오차를 보완하기 위해 exponential 필터를 구현한다.

식 (11)은 HAUV에 적용한 exponential 필터를 나타낸다. 각 계수들은 가장 최근의 값에 가장 큰 가중치를 두고, 시간이 지남에 따라 감소시켰으며 시행 오차를 통하여 정하였다.

$$\hat{y}(k) = 0.4y(k) + 0.3y(k-1) + 0.2y(k-2) + 0.1y(k-3) \quad (11)$$

IV. 시뮬레이션

HAUV의 수중 운동 시뮬레이션을 위한 시뮬레이터를 개발한다. 시뮬레이터는 다양한 경로를 설정할 수 있으며, Matlab/simulink를 이용하여 구현한다. HAUV는 설계한 PID 제어기를 통하여 설정된 임의의 경유점을 추적한다. 그림 8(a)는 HAUV의 경유점 추적 시뮬레이터의 전체 시스템을 나타낸 것이다. 그림 8(b)는 그림 8(a)의 S_HAUV의 블록의 내부로서 1초의 샘플링 타임을 가진 ZOH를 사용하여 시뮬레이션을 실행하였다.

HAUV의 경유점 추적 시뮬레이션은 해양 플랫폼 구조물을 감시하는 시나리오로 설정한다. HAUV가 약 60m 전방, 깊이가 15m로 이동한 후, 그

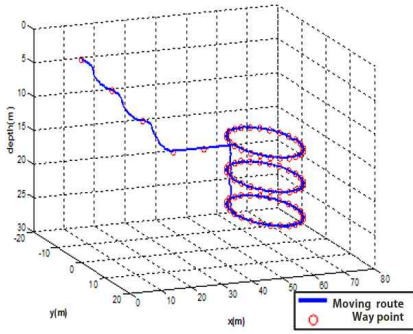


그림 9. HAUV의 이동 경로
Fig. 9 Trajectory of HAUV

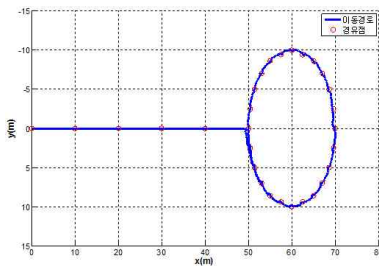


그림 10. HAUV의 수평 제어 결과
Fig. 10 Horizontal control result of HAUV

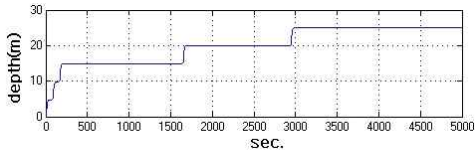


그림 11. HAUV의 깊이 제어 결과
Fig. 11 Depth control result of HAUV

곳에 위치한 기둥을 반경 10m의 원을 그리되, 로봇의 방향이 항상 중심을 향하는 것으로 제어하는 것을 목적으로 한다. 한 바퀴 검사를 마치면 20m 깊이로 잠수하여 중심의 가상 목표물을 검사하고, 다시 25m 깊이에서 반복한다.

이때 HAUV는 곳곳에 설정된 목표 경유점으로 이동하며, 경유점과의 거리가 1m 이내가 되면 다음 목표 경유점으로 목표를 변경한다. 그림 9은 주어진 경유점을 이동한 HAUV의 이동경로이다. 그림 10는 HAUV 경유점 추적의 수평면 제어 결과이며, 그림 11은 HAUV의 깊이 제어 결과를 보여준다.

그림 12은 HAUV의 방향각 제어 결과를 보여준다. 그림 12을 통하여 경유점 추적 중 HAUV는 항

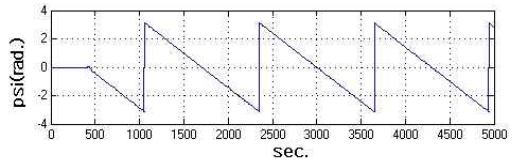


그림 12. HAUV의 방향각 제어 결과
Fig. 12 Heading control result of HAUV

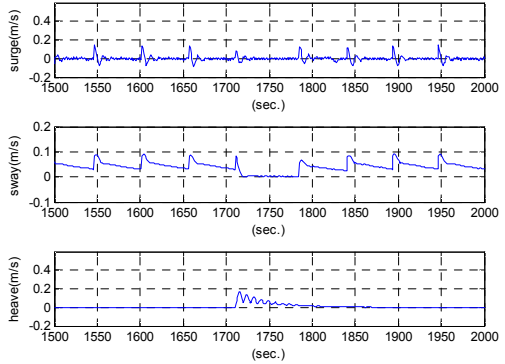


그림 13. HAUV의 방향별 속도
Fig. 13 Directional velocities of HAUV

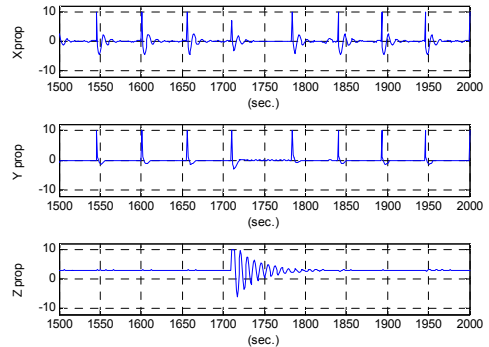


그림 14. 위치 오차에 따른 제어기의 X, Y, Z 방향 추진력
Fig. 14 Controller's propulsion command in X, Y, Z direction caused by position error.

상 중심에 위치한 가상 구조물을 바라보도록 제어되고 있는 것을 확인할 수 있다. 그림 13-15는 시뮬레이션의 1500초부터 2000초의 HAUV의 속도와 제어기의 출력값을 나타낸다. HAUV의 이동과 자세 전환에 따라 발생하는 오차값들이 줄어드는 것을 확인할 수 있다. HAUV의 경유점 추적 시뮬레이션은 해양 플랫폼 구조물 감시를 목적으로 가정하

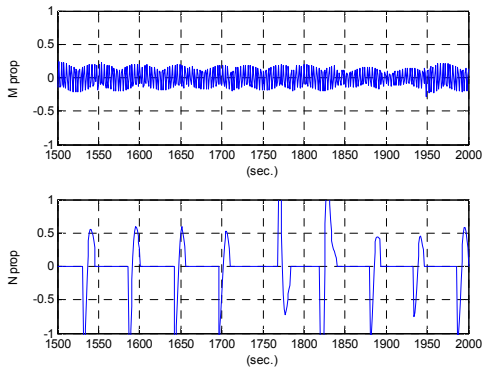


그림 15. 자세 오차에 따른 제어기의 X, Y, Z 방향 토크

Fig. 15 Controller's torque command in X, Y, Z direction caused by posture error

하였기 때문에 천천히 이동한다. 그림 13은 HAUV의 x 축, y 축, z 축의 선속도를 보여준다.

그림 14은 HAUV의 위치 오차에 따른 제어 결과 값을 나타내며, 그림 15는 HAUV의 자세 오차에 따른 제어 결과 값을 보여준다.

V. 결론

본 논문에서는 HAUV의 수중 자율 주행 알고리즘에 적용하기 PID 제어를 제안하였고, Matlab/simulink를 이용한 경유점 추적 시뮬레이션 결과를 통해 PID 제어기의 성능을 검증하였다. 경유점 추적 시뮬레이션은 해양 플랫폼 구조물 감시를 가정하여 이동 경로에 대한 경유점을 설정하였다.

시뮬레이션은 PID 제어기에 의하여 1m 오차 범위 내에서 주어진 여러개의 경유점을 추적하였다. 시뮬레이션을 통해 현재 경유점에서 다음 경유점으로 이동하는 동안, 제어 결과의 오차들이 감소하는 것을 제어기의 출력값을 통해 확인하였다. 이와 같은 시뮬레이션 결과를 통하여 제안한 PID 제어기의 성능을 검증할 수 있었다.

향후 해류, 조류와 같은 자연환경적인 외란을 고려하면 보다 강한 제어가 필요할 것으로 판단되어 LQR 제어기, sliding mode 제어기 등을 설계할 계획이다.

References

- [1] B.H. Jun, P.M. Lee, Y.K. Lim, "Trends in the cruising-type AUVs technologies," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 26, No. 5, pp. 14-22, 2009 (in Korean).
- [2] F. Busby, J.R. Vadus, "Autonomous underwater vehicle R&D trends," Sea Technology, pp. 66-73, 1990.
- [3] M. Brady, L. Gerhardt, H. Davison, Artificial Intelligence and Robotics, Springer-Verlag, 1984.
- [4] T.I. Fossen, Guidance and Control of Ocean Vehicles, John Wiley and Sons, 1994.
- [5] T.I. Fossen, *Marine Control System Guidance, Navigation, and Control of Ships*, Marine Cybernetics, 2002.
- [6] P. Newman, "World AUV market forecast 2012-2016," Douglas Westwood, 2012.
- [7] S.B. Bae, D.H. Shin, M.G. Joo, "A depth control of hovering AUV using PD controller," Journal of KIIT, Vol. 12, No. 6, pp. 1-7, 2014 (in Korean).
- [8] S.T. Kwon, D.H. Shin, M.G. Joo, "Way-point tracking of AUV using sliding mode controller," Journal of KIIT, Vol. 10, No. 10, pp. 17-22, 2012 (in Korean).
- [9] D.H. Shin, S.B. Bae, W.K. Baek, M.G. Joo, "Way-point tracking of AUV using fuzzy PD controller," Journal of Korean Institute of Information Technology, Vol. 11, No. 5, pp. 1-7, 2013 (in Korean).
- [10] D.H. Shin, S.B. Bae, M.G. Joo, "Design and implementation of a hovering AUV with a rotatable-arm thruster," IEMEK J. Embed. Sys. Appl., Vol. 9, No. 3, pp. 165-171, 2014 (in Korean).
- [11] L. Lapierre, "Robust diving control of an AUV," Ocean Engineering, Vol. 36, Issue. 1, pp. 92-104, 2009.
- [12] J.H. Li, P.M. Lee, "Design of an adaptive nonlinear controller for depth control of an autonomous underwater vehicle," Ocean Engineering, Vol. 32, No. 17-18, pp. 2165-2181, 2005.

[13] J.G. Lee, M.T. Roh, J.S. Lee, D.H. Lee, "Clonal selection algorithms for 6-DOF PID control of autonomous underwater vehicles," Proceedings of International Conference on Artificial Immune Systems, Vol. 4628, pp. 182-190, 2007.

부록 1. 시뮬레이션에 사용된 상수

m	$7.259E+01 [kg]$	Mass of AUV
ρ	$1.030E+03 [kg/m^3]$	Seawater Density
W	$+7.121E+02 [N]$	Vehicle Weight
B	$+7.151E+02 [N]$	Vehicle Buoyancy
x_B	$+0 [m]$	Center of Buoyancy
y_B	$+0 [m]$	Center of Buoyancy
z_B	$+0 [m]$	Center of Buoyancy
x_G	$+0 [m]$	Center of Gravity
y_G	$+0 [m]$	Center of Gravity
z_G	$+1.246E-01 [m]$	Center of Gravity
I_{xx}	$+2.539E+00 [kg\cdot m^2]$	Moment of Inertia
I_{yy}	$+7.386E+00 [kg\cdot m^2]$	Moment of Inertia
I_{zz}	$+7.128E+00 [kg\cdot m^2]$	Moment of Inertia
I_{xz}	$-0.016E+00 [kg\cdot m^2]$	Product of Inertia
I_{zx}	$-0.016E+00 [kg\cdot m^2]$	Product of Inertia
X_{uu}	$-0.025E+00 [kg/m]$	Cross Flow Drag
X_u	$-4.638E+00 [kg]$	Added Mass
X_{wq}	$+0 [kg/rad]$	Added Mass Cross Term
X_{qq}	$+0 [kg\cdot m/rad]$	Added Mass Cross Term
X_{ur}	$+0 [kg/rad]$	Added Mass Cross Term
X_{rr}	$+0 [kg\cdot m/rad]$	Added Mass Cross Term
Y_{vv}	$-0.820E+00 [kg/m]$	Cross Flow Drag
Y_{rr}	$+0 [kg\cdot m/rad^2]$	Cross Flow Drag
Y_{uv}	$+0 [kg/m]$	Body Lift Force and Fin Lift
Y_v	$-1.176E+02 [kg]$	Added Mass
Y_r	$+0 [kg\cdot m/rad]$	Added Mass
Z_{ww}	$-2.445E-01 [kg/m]$	Cross Flow Drag
Z_{qq}	$+0 [kg\cdot m/rad^2]$	Cross Flow Drag
Z_{uw}	$-2.950E-02 [kg/m]$	Body Lift Force and Fin Lift
Z_w	$-1.304E+02 [kg]$	Added Mass
Z_q	$+0 [kg\cdot m/rad]$	Added Mass
Z_{uq}	$+0 [kg/rad]$	Added Mass Cross Term and Fin Lift

Z_{vp}	$+0 [kg/rad]$	Added Mass Cross Term
Z_{rp}	$+0 [kg/rad]$	Added Mass Cross Term
K_{pp}	$-9.811E+00 [kg\cdot m^2/rad^2]$	Rolling Resistance
K_p	$-5.409E+01 [kg\cdot m^2/rad]$	Added Mass
M_{ww}	$+0 [kg]$	Cross Flow Drag
M_{qq}	$-1.873E+01 [kg\cdot m^2/rad^2]$	Cross Flow Drag
M_{uw}	$+0 [kg]$	Body and Fin Lift and Mnk Moment
M_w	$+0 [kg\cdot m]$	Added Mass
M_q	$-1.565E+01 [kg\cdot m^2/rad]$	Added Mass
M_{uq}	$+0 [kg\cdot m/rad]$	Added Mass Cross Term and Fin Lift
M_{vp}	$+0 [kg\cdot m/rad]$	Added Mass Cross Term
M_{rp}	$+0 [kg\cdot m^2/rad^2]$	Added Mass
N_{vv}	$+0 [kg]$	Cross Flow Drag
N_{rr}	$-2.514E+02 [kg\cdot m^2/rad^2]$	Cross Flow Drag
N_{uv}	$+1 [kg]$	Body Fin Lift and Mnk Moment
N_v	$+0 [kg\cdot m]$	Added Mass
N_r	$-3.275E+02 [kg\cdot m^2/rad]$	Added Mass
N_{ur}	$+0 [kg\cdot m/rad]$	Added Mass Cross Term and Fin Lift
N_v	$+0 [kg\cdot m/rad]$	Added Mass Cross Term
N_{pq}	$+0 [kg\cdot m^2/rad^2]$	Added Mass Cross Term

Min J. Kim (김민지)

She received B.S. in telecommunication engineering from Pukyong National University, Busan, Korea in 2014. She is currently working toward M.S. degree at

Pukyong National University. Her research interests include factory automation, embedded system, and unmanned vehicle systems.

Email: kaymayjay@pknu.ac.kr

Seol B. Bae (배설봉)

He received B.S. in electronic and telecommunication engineering, his M.S. in telecommunication engineering from Pukyong National University,

Busan, Korea in 2013 and 2015, respectively. He is an associate research engineer at SL corporation. His research interests include factory automation, embedded system, and unmanned vehicle systems.

Email: baesb@slworld.com

Woon-Kyung Baek (백우경)

He received Ph. D. degree of mechanical engineering from the University of Iowa, USA, in 1990. He is a professor at the department of mechanical design engineering at Pukyong National University,

Korea. His current research interest is dynamic system design and analysis for mechatronics systems.

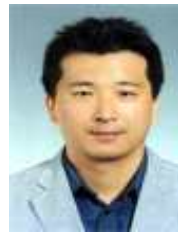
Email: baekwk@pknu.ac.kr

Moon G. Joo (주문갑)

He received B.S. in electronics and electric engineering, an M.S. in computer and communications engineering, and a Ph.D. in electrical and computer engineering from

Pohang University of Science and Technology, Pohang, Korea in 1992, 1994, and 2001, respectively. Dr. Joo was a senior researcher at Research Institute of Industrial Science and Technology, Pohang, Korea from 1996 to 2003. Since 2003, he is a professor of Information and Communications engineering at Pukyong National University, Busan, Korea. His research interests include factory automation and intelligent control.

Email: gabi@pknu.ac.kr

Kyong Nam Ha (하경남)

He received B.S degree in mechanical engineering at the Pusan National University, Busan, Korea, in 2001. Then he worked as engineering staff for

BOSCH and received Ph.D degree of Mechanical Engineering at the Pusan National University in 2010. He is chief officer of the Marine Robot Center at Korea Institute of Industrial Technology. His research interests are network based systems include underwater vehicles. He is a Member of IEEE and Institute of Control, Robotics and Systems and Korea Robotics Society in Korea.

Email: Ovincent@kitech.re.kr