

무인잠수정의 LQR 제어기 설계

An LQR Controller for Autonomous Underwater Vehicle

배 설 봉, 신 동 협, 권 순 태, 주 문 갑*

(Seol B. Bae¹, Dong H. Shin¹, Soon T. Kwon², and Moon G. Joo^{1,*})

¹Dept. Information and Communications Engineering, Pukyong National University

²Hanwha Corporation R&D Center

Abstract: In this paper, An LQR controller is proposed for way-point tracking of AUV (Autonomous Underwater Vehicle). The LQR controller aims at tracking a series of way-points which operator registers arbitrarily in advance. It consists of a depth controller and a steering controller and AUV's surge speed is assumed varying to consider the dynamic environment of the underwater. In order to show the performance, a conventional state feedback controller is compared with the proposed controller by the simulation using Matlab/Simulink. The parameters of AUV developed by the author's laboratory are used. In the simulation, we verify that the LQR controller can track all the way-points within 1 m error range under the varying surge speed, which proves the robustness of the LQR controller.

Keywords: LQR controller, state feedback, AUV, way-point tracking, matlab/simulink

I. 서론

첨단 과학기술의 발전과 미래 전장 환경의 변화에 따라 국방 무인 체계에 대한 소요군의 개발 요구가 증가되고 있다. 이러한 국방 무인 체계는 아프간전, 이라크전에 실제로 운용됨으로써 모함과 인명을 보호하면서 작전을 수행할 수 있는 중요한 미래 병기로써의 그 가능성이 이미 확인된 바 있다. 특히 국내에서는 2010년 서해 천안함 폭침사건 이후 수중 로봇의 국방 무인 체계 필요성이 증대되고 있다[1].

국방 무인 체계 기술은 육, 해, 공의 이동 로봇 개발에 적용되고 있으며, 최근에는 수중 로봇에 무인 체계 기술을 접목시킨 무인 잠수정 개발이 활발히 이루어지고 있다. 무인 잠수정은 크게 자율 무인 잠수정(AUV: Autonomous Underwater Vehivle)과 원격 조정 무인 잠수정(ROV: Remotely Operated Vehicle)로 분류된다. 그 중, AUV는 ROV와 비교하면, 동력/신호선 없이 자체의 전원을 이용하여 바닷속을 빠른 속도로 다니며 임무를 수행할 수 있다. 또한 AUV는 모든 임무를 수중에서 수행하고 음향 및 자기 신호가 거의 발생하지 않기 때문에 적으로부터 발각될 가능성이 거의 없다. 이러한 장점으로 AUV는 적 연안에 침투하여 적군에게 포착되지 않은 채 보낼 수 있다. 궁극적으로 AUV가 군사적으로 가장 민감한 지역에서 위험한 임무를 수행한다면 해군이나 해병대의 전투요원이 위험에 처하는

상황을 줄일 수 있게 될 것이다.

이와 같이 AUV가 수중 무기로서 임무를 수행하기 위해서는 수중 자율 주행 알고리즘이 적용 되어야 한다. 수중 자율 주행 알고리즘에는 다양한 제어기가 적용될 수 있으며, sliding mode, PID, 상태 궤환, 퍼지 제어기 등이 사용되고 있다. 본 논문에서는 AUV의 수중 자율 주행을 위한 LQR 제어기를 제안한다. LQR 제어기는 AUV가 수중에서 운용되면서 받는 복잡한 해양 환경의 영향을 극복할 수 있는 제어기이다[2,3].

이에 저자들은 그림 1과 같이 본 연구실에서 개발한 소형 AUV의 파라미터를 사용하여 제안한 LQR 제어기의 성능을 평가하고자 한다. Matlab/Simulink를 사용하여 기존에 제안된 상태 궤환 제어기와 LQR 제어기의 성능을 비교한다. 논문의 구성은 II 장에서 LQR 제어기 설계에 대하여 기술하고, III 장에서 LQR 제어기의 시뮬레이션 결과를 제시하며, IV 장에서 결론으로 논문을 맺는다.

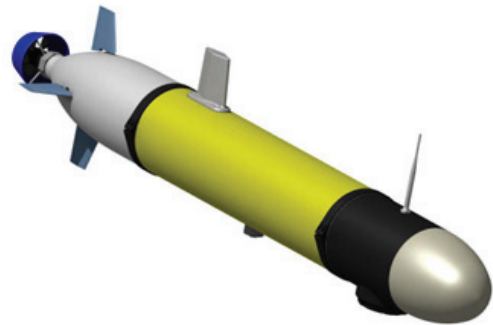


그림 1. 무인잠수정의 형상.
Fig. 1. Appearance of AUV.

* Corresponding Author

Manuscript received November 20, 2013 / revised December 20, 2013 / accepted December 31, 2013

배설봉, 신동협, 주문갑: 부경대학교 정보통신공학과

(bsb362@nate.com/dhshin0407@naver.com/gabi@pknu.ac.kr)

권순태: 한화 종합연구소 무인화센터(happy772@hanwha.com)

* 본 논문은 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2013R1A1A4A01005930).

II. LINEAR QUADRATIC REGULATOR의 설계

수중에서 6자유도를 갖는 AUV는 LQR 제어기를 설계함에 있어서 먼저 좌표계를 정의해야 한다. 좌표계는 AUV의 위치 (x, y, z) 및 방향 (ϕ, θ, ψ) 을 표현하기 위한 지구 고정 좌표계와 AUV의 부력 중심을 원점으로 각 축 방향의 선속도 (u, v, w) 및 각 축 중심의 회전 각속도 (p, q, r) 를 표현하기 위한 동체 고정 좌표계를 정의한다. 그림 2는 정의한 지구 고정 좌표계와 동체 고정 좌표계를 보여준다.

AUV의 동역학 모델은 12개의 상태변수를 사용한 비선형 미분 방정식으로 표현된다. 다음의 식 (1)-(6)은 외력, 유체 정역학적인 힘, 양력, 항력, 부가 질량 등을 고려하여 동체 고정 좌표계와 관련된 AUV의 선속도 (u, v, w) 와 회전 각속도 (p, q, r) 를 표현하고, 식 (7)은 선속도, 회전 각속도와 오일러 각을 이용하여 AUV의 자세 (ϕ, θ, ψ) 와 위치 (x, y, z) 를 표현한다[4,5].

$$\begin{aligned} (m - X_u)\dot{u} + m z_g \dot{q} - m y_g \dot{r} &= X_{HS} + X_{u|u}|u|u| \\ &+ (X_{wq} - m)wq + (X_{qq} + m x_g)q^2 \\ &+ (X_{vr} + m)vr + (X_{rr} + m x_g)r^2 \\ &- m y_g p q - m z_g p r + X_{prop} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} (m - Y_v)\dot{v} - m z_g \dot{p} + (m x_g - Y_r)\dot{r} &= Y_{HS} \\ &+ Y_{v|v}|v|v| + Y_{r|r}|r|r| + m y_g r^2 \\ &+ (Y_{ur} - m)ur + (Y_{wp} + m)wp \\ &+ (Y_{pq} - m x_g)pq + Y_{uv}uv + m y_g p^2 \\ &+ m z_g q r + Y_{u\delta_r} u^2 \delta_r \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} (m - Z_w)\dot{w} + m y_g \dot{p} - (m x_g - Z_q)\dot{q} &= Z_{HS} \\ &+ Z_{w|w}|w|w| + Z_{q|q}|q|q| \\ &+ (Z_{uq} + m)uq + (Z_{vp} - m)vp \\ &+ (Z_{rp} - m x_g)rp + Z_{uw}uw + m z_g (p^2 + q^2) \\ &- m y_g r q + Z_{u\delta_s} u^2 \delta_s \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} -m z_g \dot{v} + m y_g \dot{w} + (I_{xx} - K_p)\dot{p} &= K_{HS} \\ &+ K_{p|p}|p|p| - (I_{zz} - I_{yy})qr \\ &+ m(uq - vp) - m z_g (wp - ur) + K_{prop} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} m z_g \dot{u} - (m x_g + M_w)\dot{w} + (I_{yy} - M_q)\dot{q} &= M_{HS} \\ &+ M_{w|w}|w|w| + M_{q|q}|q|q| \\ &+ (M_{uq} - m x_g)uq + (M_{vp} + m x_g)vp \\ &+ [M_{rp} - (I_{xx} - I_{zz})]rp + m z_g (vr - wq) \\ &+ M_{uw}uw + M_{u\delta_s} u^2 \delta_s \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} -m y_g \dot{u} + (m x_g - N_v)\dot{v} + (I_{zz} - N_r)\dot{r} &= N_{HS} \\ &+ N_{v|v}|v|v| + N_{r|r}|r|r| \\ &+ (N_{ur} - m x_g)ur + (N_{wp} + m x_g)wp \\ &+ [N_{pq} - (I_{yy} - I_{xx})]pq - m y_g (vr - wq) \\ &+ N_{uv}uv + N_{u\delta_r} u^2 \delta_r \end{aligned} \quad (6)$$

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

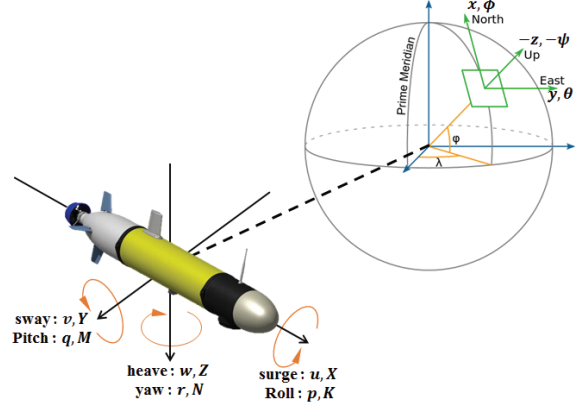


그림 2. 무인잠수정의 좌표계 시스템.

Fig. 2. Coordinate system of AUV.

1. LQR 제어기

LQR 제어는 제어 대상 시스템에 대한 수식 모델을 가지고 있다는 가정 하에 사용할 수 있는 최적 제어 기법의 하나이다. 시스템의 모델링이 부정확한 경우, 성능에 영향을 미치지만, 이 경우에도 어느 정도의 안정도와 강인성을 보장한다.

그림 3은 LQR 제어기의 블록 다이어그램을 나타낸다. AUV가 경로를 추적하기 위해서는 AUV의 자세와 위치가 제어되어야 한다. AUV의 자세와 위치는 수직 꼬리 날개의 각도, 수평 꼬리 날개의 각도, 추진기의 추력과 토크로 제어한다.

본 논문은 타이머 인터럽트마다 실행되는 이산 제어 시스템을 위하여 다음과 같이 잘 알려져 있는 이산 시간 LQR 제어기를 깊이 제어와 방향 제어에 각각 사용하였다.

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \quad (8)$$

$$J = \sum_{k=0}^{\infty} (x(k)^T Q x(k) + u(k)^T R u(k)) \quad (9)$$

식 (8)에서 $x(k)$ 는 상태 변수를 나타내며, $u(k)$ 는 제어 입력을 나타낸다. 식 (9)는 성능 지표를 보여준다. 식 (9)에서 Q 와 R 은 각각 양의 정부호 행렬과 양의 준정부호 행렬이다. 성능 지표인 J 가 최소가 되는 제어기의 출력은 식 (10)과 같다. 식 (10)에서의 K 는 ARE (algebraic Riccati equation)을 사용하여 풀 수 있으며 ARE의 해는 식 (11)과 같다[6,7].

$$u(k) = -Kx(k), \quad K = (R + B^T P B)^{-1} B^T P A \quad (10)$$

$$P = Q + A^T (P - P B (R + B^T P B)^{-1} B^T P) A \quad (11)$$

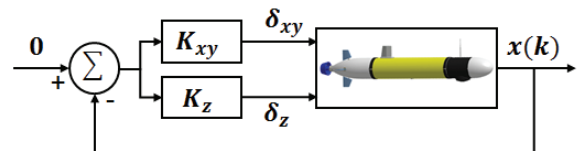


그림 3. LQR 제어기의 블록 다이어그램.

Fig. 3. Block diagram of LQR controller.

2. AUV의 깊이 제어를 위한 LQR 깊이 제어기

AUV의 깊이 제어는 식 (12)와 같이 3개의 상태 변수를 가진 선형 시스템으로 간략화 된다. 상태 공간에서의 운동 방정식의 기호는 [4,5]에 의하고, δ_z 는 AUV의 수평 꼬리 날개의 각도를 나타낸다. 본 논문에서 사용된 상수 값은 [9]와 같다.

$$\begin{bmatrix} I_{yy} - M_q & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q} \\ \dot{z} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_q & 0 & M_b \\ 0 & 0 & -u \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q \\ z \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_{uu\delta} u^2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_z \quad (12)$$

식 (12)의 운동 방정식 기호에 AUV의 상수들을 대입하면 식 (13)과 같다. 여기에 AUV의 속도를 대입한 후, 0.1초의 ZOH로 이산화하여 이산 시간 LQR 제어기를 구성하고, 시행 착오를 통하여 알맞은 Q 와 R 을 식 (14)와 같이 찾았다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_z(t) &= A_z x_z(t) + B_z \delta_z(t) \\ A_z &= \begin{bmatrix} -0.8247 & 0 & -0.6927 \\ 0 & 0 & -u \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ B_z &= \begin{bmatrix} -0.7383u^2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ Q &= \begin{bmatrix} 0.1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.005 & 0 \\ 0 & 0 & 1.5 \end{bmatrix}, \quad R_z = 0.03 \end{aligned} \quad (13)$$

이와 같은 상태 공간에서의 운동 방정식과 LQR 제어기의 가중치 Q 와 R 을 이용하여 수평 꼬리 날개의 각도가 결정되고, 이에 따라 AUV의 깊이가 제어된다[8-11].

3. AUV의 방향 제어를 위한 LQR 방향 제어기

AUV의 방향 제어는 식 (15)과 같이 3개의 상태 변수를 가진 선형 시스템으로 간략화 된다. 식 (15)는 수평면에서 AUV의 방향 제어를 위한 상태 공간에서의 운동 방정식을 나타내며, δ_{xy} 는 AUV의 수직 꼬리 날개의 각도를 나타낸다.

$$\begin{bmatrix} m - Y_v & -Y_r & 0 \\ -N_v & I_{zz} - N_r & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{uv}u & (Y_{ur} - 2m)u & 0 \\ N_{uv}u & N_{ur}u & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Y_{uu\delta r}u^2 \\ N_{uu\delta r}u^2 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_{xy} \quad (15)$$

같은 방법으로 상수들을 대입하면, 식 (16)과 같다. 식 (17)은 방향 제어를 위한 이산 시간 LQR 제어기의 가중치 Q 와 R 을 나타내고, Q 와 R 은 시행착오를 통하여 결정된다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_{xy}(t) &= A_{xy} x_{xy}(t) + B_{xy} \delta_{xy}(t) \\ A_{xy} &= \begin{bmatrix} -0.4377u & -1.0409u & 0 \\ -2.9826u & -0.4813u & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \\ B_{xy} &= \begin{bmatrix} 0.1053u^2 \\ -0.7139u^2 \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (16)$$

$$Q_{xy} = \begin{bmatrix} 0.35 & 0 & 0 \\ 0 & 0.3 & 0 \\ 0 & 0 & 0.35 \end{bmatrix}, \quad R_{xy} = 0.08 \quad (17)$$

식 (16), (17)과 같은 운동 방정식과 LQR 제어기의 가중치 Q 와 R 을 이용하여 수직 꼬리 날개의 각도가 결정되며, 이에 따라 AUV의 방향이 제어된다[8-10].

III. 시뮬레이션 결과

AUV의 경로 추적을 위해 제안한 LQR 제어기의 성능을 검증하기 위하여 상태 궤환 제어 결과와 비교하였으며, 시뮬레이션은 Matlab/Simulink를 사용해 수행되었다. 그림 4는 시뮬레이션을 위해 개발한 AUV의 전체 시뮬레이터이다. 시뮬레이터에서 AUV는 12개의 상태 변수를 사용한 비선형 모델식과 ZOH를 사용하여 표현되었다.

수직 꼬리 날개와 수평 꼬리 날개는 최대 $60^\circ/s$ 속도로 동작하며, 최대 $\pm 40^\circ$ 까지 동작하는 것으로 가정되었는데, 이 값들은 흔히 사용되는 모터의 성능을 감안한 것이다. AUV 추진기의 토크 K_{prop} 는 $-0.543 [Nm]$ 로 일정하다고 가정되었으나, 추진기의 추력 X_{prop} 은 AUV가 변화가 많은 수중에서 운용되는 것을 감안하여 $9.25 [N]$ 에서 $27.75 [N]$ 범위로 변하는 사인파로 설정하여 제안된 시스템의 강인함과 그 효용을 보였다[11,12].

표 1은 AUV가 경유할 기본 경로를 보여준다. 기본 경로는 2가지로 설정하였으며, 기본 경로의 경유점과 AUV 위치의 허용오차는 $1m$ 로 설정하였다. 시뮬레이션은 표 1의 기본 경로인 경로 1과 경로 2에 따라 수행 되었으며, 추진기의 X_{prop} 이 $9.25 [N]$ 로 일정하다고 가정된 경우와 $9.25 [N] \sim 27.75 [N]$ 사이의 값으로 설정한 경우로 수행되었다.

S_AUV SIMULATOR

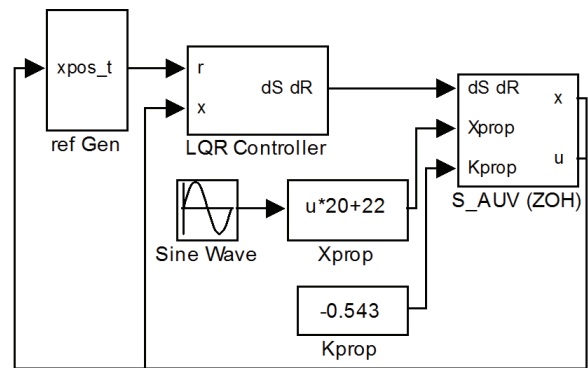


그림 4. Matlab/Simulink 시뮬레이터.

Fig. 4. Matlab/Simulink simulator.

표 1. 기본 경로.

Table 1. Basic path.

경로	경유점
1	(0,0,0), (20,0,0), (40,20,5), (40,40,10), (20,40,5), (0,0,0)
2	(0,0,0), (50,0,10), (50,20,10), (0,20,10), (0,40,10), (50,40,10), (50,60,10), (0,60,10), (0,0,0)

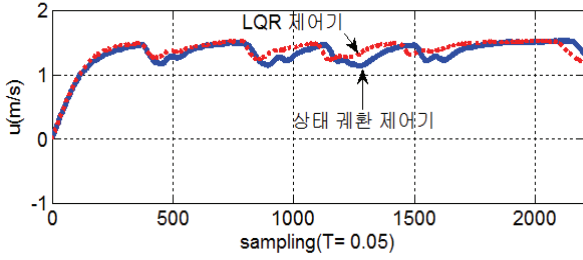


그림 5. 경로 1에서의 u (m/s) (a).

Fig. 5. u (m/s) in the path 1 (a).

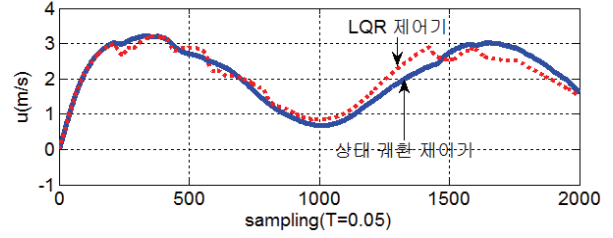


그림 8. 경로 1에서의 u (m/s) 의 변화 (b).

Fig. 8. Variation of u (m/s) in the path 1 (b).

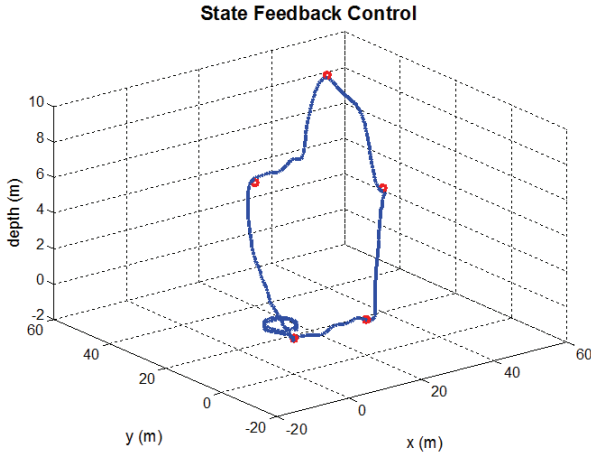


그림 6. 상태 궤환 제어기의 경로 1 시뮬레이션 (a).

Fig. 6. Simulation of path 1 of state feedback controller (a).

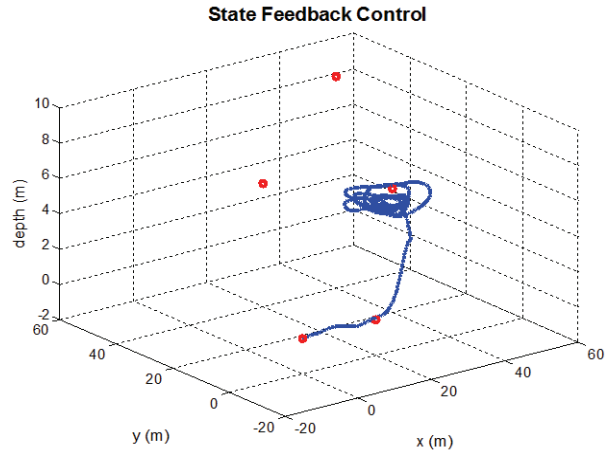


그림 9. 상태 궤환 제어기의 경로 1 시뮬레이션 (b).

Fig. 9. Simulation of path 1 of state feedback controller (b).

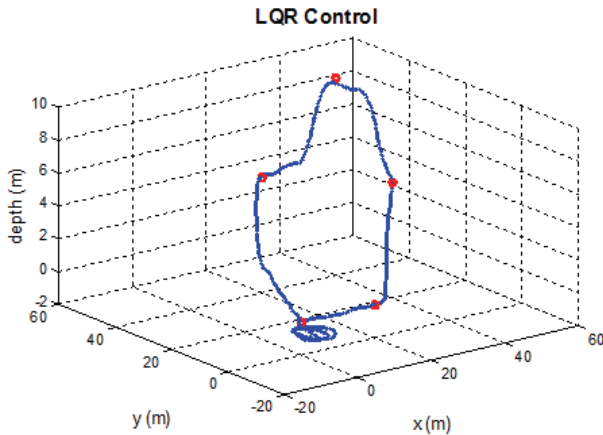


그림 7. LQR 제어기의 경로 1 시뮬레이션 (a).

Fig. 7. Simulation of path 1 of LQR controller (a).

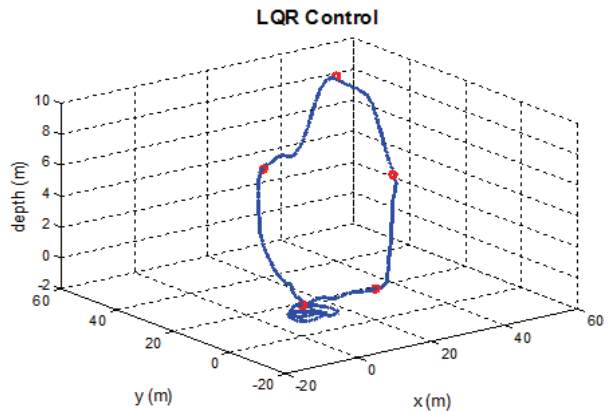


그림 10. LQR 제어기의 경로 1 시뮬레이션 (b).

Fig. 10. Simulation of path 1 of LQR controller (b).

그림 5는 $X_{prop} = 9.25[N]$ 로 설정된 경우 surge의 변화를 보여준다. Surge는 110초 동안 $1.2m/s$ 와 $1.5m/s$ 사이의 값으로 변화한다.

그림 6은 $X_{prop} = 9.25[N]$ 으로 설정하고, 표 1의 경로 1에 대한 상태 궤환 제어기의 경로 추적 결과를 나타낸다. 그림 7은 $X_{prop} = 9.25[N]$ 으로 설정하고, 경로 1에 대한 LQR 제어기의 경로 추적 결과를 나타낸다. 그림 6, 7을 통해서 추진기의 X_{prop} 을 일정한 값으로 설정한 경우, 상태

궤환 제어 결과와 LQR 제어 결과 모두 경로 1에 대한 경로 추적이 잘 수행되었음을 확인 할 수 있다.

그림 8은 X_{prop} 을 사인파로 설정하고 경로 1을 선택한 경우의 surge의 변화를 나타낸다. 사인파는 최대 $27.25[N]$, 최소 $9.25[N]$ 의 크기를 지닌다. Surge는 100초 동안 최대 $3.3m/s$ 까지 변화한다.

그림 9와 그림 10은 표 1의 경로 1에 대한 상태 궤환 제어기와 LQR 제어기의 제어 결과를 나타낸다. 상태 궤환 제어기는 경유점을 경유하는 과정에서 경로 추적이 실패했고, LQR 제어기는 주어진 모든 경유점을 1 m 범위 내에서 성

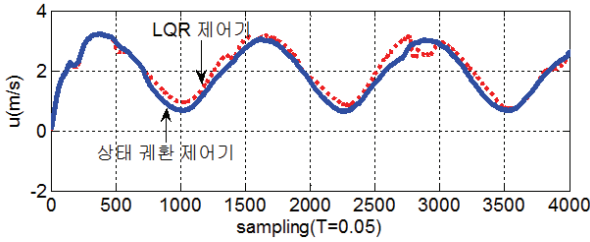


그림 11. 경로 2에서의 u (m/s).

Fig. 11. u (m/s) in the path 2.

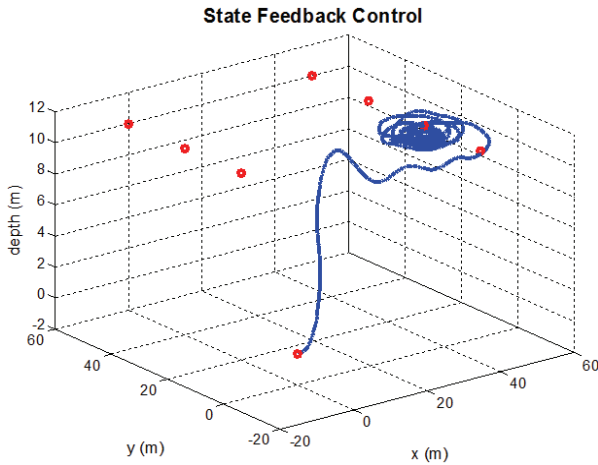


그림 12. 상태 궤환 제어기의 경로 2 시뮬레이션.

Fig. 12. Simulation of path 2 of state feedback controller.

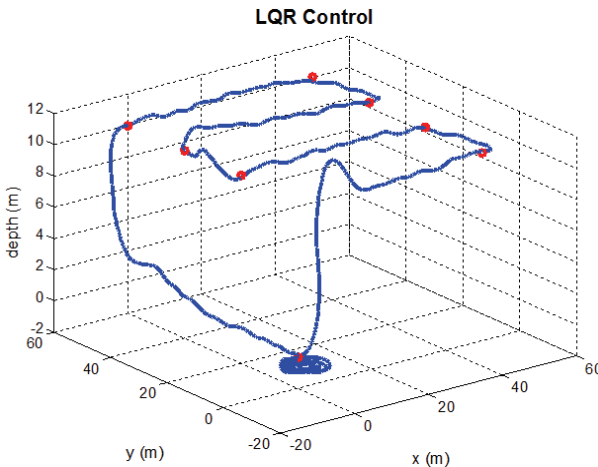


그림 13. LQR 제어기의 경로 2 시뮬레이션.

Fig. 13. Simulation of path 2 of LQR controller.

공적으로 추적하였다.

그림 11은 X_{prop} 을 사인파로 설정하고 경로 2을 선택한 경우의 surge의 변화를 나타낸다. Surge는 200초 동안 최대 3.3m/s까지 변화한다.

그림 12와 그림 13은 표 1의 경로 2에 대한 상태 궤환 제어기와 LQR제어기의 결과를 나타낸다. LQR 제어기가 주어진 모든 경유점을 경유하는 경로 추적을 완수했음을 보여준다.

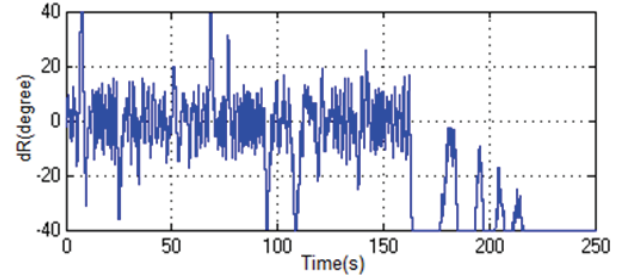
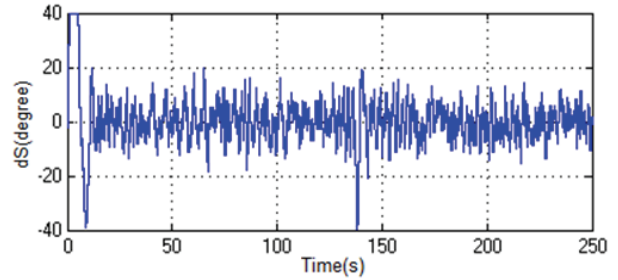


그림 14. 경로 2의 AUV에 인가되는 제어 입력.

Fig. 14. Control input of AUV for path 2.

이 경우, AUV에 인가되는 수직 꼬리 날개와 수평 꼬리 날개의 제어각 (δ_s, δ_r)은 위 그림 14와 같다. AUV의 이동에 따라 수평 꼬리 날개와 수직 꼬리 날개의 제어각이 작은 범위에서 동작되었고 최대각은 $\pm 40^\circ$ 범위로 제한되었음을 알 수 있다.

시뮬레이션 결과들을 통하여 AUV의 surge가 일정한 값을 가진 경우에는 상태 궤환 제어기와 LQR 제어기 모두 주어진 경유점을 모두 통과하는 반면, surge가 가변적인 값으로 설정된 환경에서는 상태 궤환 제어기를 적용한 경우와 LQR 제어기를 적용한 시뮬레이션 결과가 다르게 구분되었다. LQR 제어기는 AUV의 surge의 값이 변화하더라도 임의로 주어진 AUV의 경로 추적을 완수하였다.

IV. 결론

본 논문에서는 AUV의 수중 자율 주행 알고리즘에 적용하기 위한 LQR 제어기를 제안하였고, Matlab/Simulink의 시뮬레이션 결과를 통해 상태 궤환 제어기와 비교하여 성능을 검증하였다. 상태 궤환 제어기의 시뮬레이션 결과는 가변적인 AUV의 surge에 따라 경로 추적이 실패하였으나, LQR 제어기의 시뮬레이션 결과는 AUV의 surge가 변화하더라도 오차 범위 1 m 내에서 경로 추적을 성공하는 결과를 보여준다.

실제 수중에서 운용되는 AUV는 파랑, 해류 등 복잡한 해양 환경에 영향을 많이 받으며 그에 따라 AUV의 surge는 일정하게 유지되지 않고 가변적인 크기를 가진다. 따라서 AUV의 수중 자율 주행 알고리즘에 적용하는 제어기는 상태 궤환 제어기보다 LQR 제어기가 더욱 적합함을 알 수 있다.

반면, LQR 제어기는 제어기가 동작되는 샘플 시간마다 ARE를 풀어야하는 시간적 제약에 의하여 프로세서의 경제적, 성능적 제약이 따를 수 있다. 그러나 관련 기술의 발전에 따라 성능적 제약은 줄어들고 있으며, AUV의 임무 수

행의 승패를 결정하는 제어기의 성능을 고려한다면 경제적 제약은 문제되지 않을 것으로 판단된다.

REFERENCES

- [1] J. R. Choi, C. K. Kim, and D. K. Kim, "Development trends of UUV," *National defense and Technology (in Korean)*, no. 2, 2012.
- [2] S. H. Kim, "Military technology and unmanned technology," *Journal of the KSME (in Korean)*, vol. 47, no. 11, pp. 34-38, 2007.
- [3] J. N. Sur, D. W. Kim, and H. J. Lee, "Navigation technology developments of AUV," *ICROS (in Korean), Institute of Control, Robotics and Systems*, vol. 17, no. 2, pp. 36-46, 2011.
- [4] T. I. Fossen, *Guidance and Control of Ocean Vehicles*, John Wiley and Sons, 1994.
- [5] T. I. Fossen, *Marine Control System*, Marine Cybernetics, 2002.
- [6] D. J. Kim, K. P. Rhee, J. W. Choi, and S. K. Lee, "Depth control of a submerged body near the free surface by LQR control method," *Journal of the Society of Naval Architects of Korea (in Korean)*, vol. 46, no. 4, pp. 382-390, 2009.
- [7] S. B. Jo, S. A. Jang, and K. Y. Choi, "Analysis on dynamic characteristics and LQR control of a Quadrotor aircraft with cyclic pitch," *Journal of The Korea Society of Aeronautical and Space Sciences (in Korean)*, vol. 41, no. 3, pp. 217-225, 2013.
- [8] S. T. Kwon, D. H. Shin, and M. G. Joo, "Way-point tracking of AUV using sliding mode controller," *Journal of Korean Institute of Information Technology (in Korean)*, vol. 10, no. 10, pp. 17-22, 2012.
- [9] 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.
- [10] I. W. Han, J. M. Hwang, S. I. Han, and J. M. Lee, "Dynamic speed control of a unicycle robot," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 19, no. 1, pp. 1-9, 2013.
- [11] S. B. Bae, D. H. Shin, S. H. Park, and M. G. Joo, "A study on an integral state feedback controller for way-point tracking of an AUV," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 19, no. 8, pp. 661-666, 2013.
- [12] D. H. Shin, S. B. Bae, W. K. Baek, and M. G. Joo, "Way-point tracking of AUV using Fuzzy PD controller," *Journal of Korean Institute of Information Technology (in Korean)*, vol. 11, no. 5, pp. 1-7, 2013.



배 설 봉

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



신 동 협

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



권 순 태

2010년 부경대 전자정보통신전공 졸업. 2012년 동 대학원 정보통신 공학 석사. 2012년~현재 (주)한화 종합연구소 무인화체계사업단 연구원. 관심분야는 공장자동화, 임베디드 시스템, 무인기 시스템.



주 문 갑

1992년 포항공대 전자전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 정보통신 공학 석사. 2001년 동 대학원 전자컴퓨터 공학 박사. 2003년~현재 부경대학교 정보통신공학과 교수. 관심분야는 지능제어 및 공장 자동화.