

## 반복 학습을 통한 무인 선박의 제어기 설계에 관한 연구

김민철<sup>\*,1)</sup>

<sup>1)</sup> 육군3사관학교 기계공학과

### A Study on the Controller Design of Unmanned Surface Vessel through Repetitive Learning Method

Mincheul Kim<sup>\*,1)</sup>

<sup>1)</sup> Department of Mechanical Engineering, Korea Army Academy at Yeongcheon, Korea

(Received 10 July 2018 / Revised 22 August 2018 / Accepted 19 October 2018)

#### ABSTRACT

In this paper, a controller based on repetitive learning control is designed to control an unmanned surface vessel with nonlinear characteristics and unknown parameters. First, we define the equations of motion and error system of the unmanned vessel, and then design an repetitive learning controller composed of system error and estimated unknown parameters based on repetitive learning control and adaptive control. The stability of the unmanned vessel model controlled by the designed controller is verified through the analysis of the Lyapunov stability. Simulation shows that the error converges asymptotically to zero with semi-global result, confirming that the unmanned vessel is moving toward a given ideal path, and verifies that the controller is also feasible.

Key Words : Unmanned Surface Vessel(무인선박), Repetitive Learning Control(반복 학습 제어), Lyapunov Stability(리아프노프 안정)

#### 1. 서론

다양한 형태의 자율주행 모델들 가운데 이 연구에서는 비선형적 특성을 지닌 무인 선박을 고려한다. 비선형적 특성은 시스템을 구성하는 요소들의 선형 관계를 통해 운동 방정식을 표현할 수 없으며, 입력과 결과간의 예측이 제한된다. 따라서 선박의 위치는 선박의 선

형속도에 역방향 차이 알고리즘(backward difference algorithm)을 적용하여 추정할 수 밖에 없다. 센서를 통해 측정된 선박의 속도는 오차가 존재하며, 변위를 얻기 위해 측정된 속도를 적분하게 되면 필연적으로 변위 오차가 발생하게 된다. 또한 선박의 체적이나 항력 등과 같은 복잡한 특성요소들이 포함된 비선형적 수학 모델의 제어는 기존의 선형 시스템에서 사용하던 PID 제어기를 적용할 경우, 전체 시스템을 구성하는 입력값들 간의 균형있는 제어가 어려운 점, 과도 응답(transient response)등을 다룰 때 한계가 명확하다

\* Corresponding author, E-mail: minkim@ufl.edu  
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

는 점 등 때문에 적절하지 않았다<sup>[1]</sup>.

따라서 본 연구에서는 비선형적인 무인 선박의 시스템에 종속되지 않고 제어가 가능하도록 하는 반복 학습 제어(iterative/repetitive learning control)<sup>[2,3]</sup>를 다루고 있다. 모델이 일정한 주기로 반복적인 동작을 수행할 때 적용할 수 있는 반복제어는 연속적인 시간에서 수행되는 반복작업에 적용되는 repetitive control, 이산적인 시간에서 처음과 끝이 정해진 반복작업을 수행할 때 적용하는 iterative learning control로 구분할 수 있다. 반복 학습 제어기는 PID 제어기처럼 미리 설계되어 있지 않으며, 시스템의 상황을 실시간으로 관측하면서 이전에 실행되었던 제어 입력의 정보를 바탕으로 새로운 제어 입력을 생성함으로써 보다 나은 제어 성능을 통해 위치 추적의 정확성을 강화한다. 또한 반복 학습제어는 기존의 비선형 제어에서 많이 사용되었던 high frequency나 high gain feedback등과 같은 강인 제어 없이도 오차를 상쇄할 수 있는 장점을 가지고 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 비선형적인 특성을 지닌 무인 선박의 운동 방정식을 유도한다. 3장에서는 선박의 이상적인 경로와 실제 경로간의 차이를 바탕으로 오차 시스템 및 개방-루프 오차 시스템을 설계한다. 또한 반복 학습 제어기를 위한 학습 법칙을 정의한 후 이를 바탕으로 제어기를 설계한다. 이후 제어기와 운동방정식이 결합된 폐쇄-루프 오차 시스템을 정의한다. 시스템의 안정도는 리아브노프 안정(Lyapunov stability)<sup>[4]</sup>를 통해 분석된다. 4장에서는 시뮬레이션 및 결과 분석을 통해 무인 선박 시스템의 안정도 및 얼마나 안정한지를 확인하고, 설계된 제어기의 입력 모멘트의 상한을 분석하여 제어기가 현실적으로 기능할 수 있는지 검증한다. 5장에서는 결론과 추후 연구에 대해 기술한다.

## 2. 운동방정식

무인 선박의 운동방정식은 로봇 매니퓰레이터의 모델을 활용한 Fossen의 연구를 통해 유도할 수 있다. 모델의 기본이 되는 6 DOF의 로봇 매니퓰레이터에서, 수평방향 이동성분인 surge, sway와 yaw 세 요소만 고려하는 3-DOF의 선박모델의 경로추적 및 제어 시스템을 가정한다<sup>[5-7]</sup>.

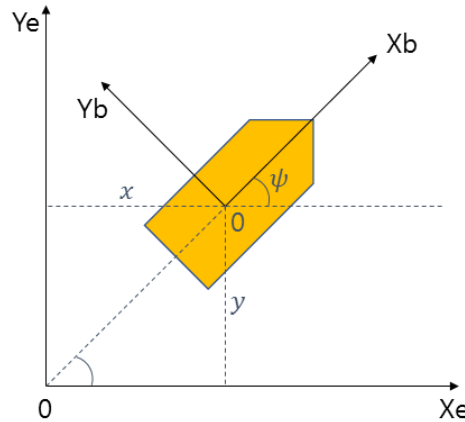


Fig. 1. A ship placed in a two-dimensional plane coordinate system

$$M\dot{v} + C(v) + D(v)v + g(q) + g_0 = \tau + \tau_{wind} + \tau_{wave} \quad (1)$$

식 (1)에서  $M$ 은 선박의 질량-관성 행렬,  $C$ 는 코리올리 행렬,  $D$ 는 감쇠 행렬을 의미한다. 이때 시스템의 단순화를 위해 코리올리력은 생략한다. 남은 두 행렬은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & 0 & 0 \\ 0 & m_{22} & m_{23} \\ 0 & m_{23} & m_{33} \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} d_{11} & 0 & 0 \\ 0 & d_{22} & d_{23} \\ 0 & d_{32} & d_{33} \end{bmatrix} \quad (2)$$

무인 선박의 속도( $v$ ) 및 가속도( $\dot{v}$ )는 선박에 탑재된 센서 및 감지기들을 통해 측정할 수 있으며, 선박의 무게중심이 원점이 되는 국부 좌표계  $\{X_b, Y_b\}$  상에서 표현할 수 있다.

$g$ 는 중력과 부력, 그 모멘트를 의미하며 본 연구에서는 수평성분만을 지니는 선박모델을 가정하므로 생략한다.

선박의 위치( $q$ )는 다음과 같은 상태변수들을 활용하여 표현한다.

- 1) x, y축 방향 위치변수  $x(t), y(t)$
- 2) z축을 기준으로 하여 선박의 앞부분이 향하는 방향을 나타내는 yaw 각도  $\psi(t)$ .

따라서 선박의 현재 속도 및 위치는 서로 다른 3개의 축을 기준으로 하는 지구고좌표계  $\{X_e, Y_e\}$  상에서 아래와 같이 표현한다.

$$\dot{q} = R(\psi)v \quad (3)$$

$$q = [x \ y \ \psi]^T \quad (4)$$

외력( $\tau$ )은 선박의 추진 시스템(프로펠러, 제트 등)의 입력 값이다.  $\tau_{wind}$ ,  $\tau_{wave}$ 는 각각 바람 및 파도에 의한 외력이며 본 연구에서는 무시한다.

### 3. 제어기 설계

#### 3.1 문제 정의(오차 시스템)

앞 절에서 유도한 무인 선박의 운동방정식을 구성하는 매개변수들은 알려져 있지 않고 불확실(uncertainty)하지만, 선박 모델의 출력값인 속도 및 가속도  $v(t)$ ,  $\dot{v}(t)$ 는 측정(measurement) 가능하다고 가정한다. 선박의 경로 추적 성능(tracking performance)을 정량화하기 위해 위치 추적 오차(position tracking error)  $e(t)$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$e = q_d - q \quad (5)$$

$q_d(t)$ 는 선박에 요구되는 위치의 경로(desired position trajectory)를 의미하며 한계가 존재한다(bounded)고 가정한다. 또한  $q_d(t), \dot{q}_d(t), \ddot{q}_d(t) \in \mathcal{L}_2$ 를 만족하며, 상수  $T$ 가 주어졌을 때, 아래와 같은 주기성(periodic)을 만족한다고 가정한다.

$$\begin{aligned} q_d(t) &= q_d(t - T) \\ \dot{q}_d(t) &= \dot{q}_d(t - T) \\ \ddot{q}_d(t) &= \ddot{q}_d(t - T) \end{aligned} \quad (6)$$

제어기 설계 및 시스템 안정도 분석을 위해 위치 추적 오차는 필터링 과정을 요한다. 필터링 과정은 운동방정식의 차수를 낮춤으로써 보다 쉬운 제어기 설계 및 안정도 분석이 가능케하끔 한다. 필터링 된 위치 추적 오차는 아래와 같이 정의한다.

$$r = \dot{e} + ae \quad (7)$$

$a$ 는 제어 이득(control gain)이며 0보다 큰 양수이다.

#### 3.2 개방-루프 오차 시스템 유도

$r(t)$ 에 관한 개방 루프 시스템을 전개하기 위해, 식

(7)의 필터링된 위치 추적 오차를 시간으로 미분한 후 양 변에  $M$ 을 곱한다. 그리고 2장에서 유도한 무인 선박의 운동 방정식에 그 결과를 대입하면 아래와 같은 개방-루프 오차 시스템의 식을 얻을 수 있다.

$$M\dot{r} = M\ddot{q}_d + V_m\dot{q} - \tau + aM\dot{e} \quad (8)$$

식 (8)에서  $V_m$ 은 앞서 운동방정식을 정의할 때 직교행렬인 회전행렬  $R(\psi)$ 에 의해 다음과 같이 정의되었다( $V_m(q, \dot{q}) = RDR^T$ ).

식 (7)에 식 (5)를 대입하여 아래와 같은 변형된 식을 얻는다.

$$\dot{q} = \dot{q}_d - r + ae \quad (9)$$

식 (9)를 식 (8)에 대입한 후 정리하면

$$\begin{aligned} M\dot{r} &= M\ddot{q}_d + V_m(\dot{q}_d - r + ae) - \tau + aM\dot{e} \\ &\quad + M(q_d)\ddot{q}_d + V_m(q_d, \dot{q}_d)\dot{q}_d \\ &\quad - M(q_d)\ddot{q}_d - V_m(q_d, \dot{q}_d)\dot{q}_d \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} M\dot{r} &= -V_m r + W_r + \chi - \tau \\ W_r &= M(q_d)\ddot{q}_d + V_m(q_d, \dot{q}_d)\dot{q}_d \\ \chi &= M(\ddot{q}_d + a\dot{e}) + V_m(\dot{q}_d + ae) - W_r \end{aligned} \quad (11)$$

$W_r$ 은  $q_d$ 들로 구성된 주기성을 갖는 항들을 포함한다.  $\chi$ 는 중간값 정리(mean-value theorem)를 사용하여 아래 식 (12)와 같이 한계를 설정할 수 있는 항들을 포함한다. 이는 추후에 통해 필터링 된 오차가 0으로 수렴하는 semi-global 결과를 얻기 위해 사용된다.

$$\|\chi\| \leq \rho(\|Z\|)\|Z\|, \quad Z = [e^T \ r^T]^T \quad (12)$$

$Z(t)$ 는 보조 위치 벡터이다.  $\rho(\cdot)$ 는 한계가 정해진 0보다 큰 양수 함수이다.

#### 3.3 제어기 설계

폐쇄-루프 오차 시스템 유도 및 안정도 분석을 위해, 선박의 제어 입력  $\tau(t)$ 를 아래와 같이 설계한다.

$$\begin{aligned} \tau(t) &= kr + \widehat{W}_r(t) + e \\ \widehat{W}_r(t) &= \text{sat}_\beta(\widehat{W}_r(t - T)) + k_I r \end{aligned} \quad (13)$$

$$\widetilde{W}_r(t) = W_r(t) - \widehat{W}_r(t) \quad (14)$$

$k, k_L \in R$ 는 강인 제어(robust control)를 위해 사용되는 제어 이득이다.  $\widehat{W}_r(t)$ 는 학습에 기반을 둔 매개변수 추정값이다.  $sat_\beta$ 는 벡터 함수로서 아래와 같이 정의한다.

$$sat_{\beta_i}(\xi) = \begin{cases} \xi_i & , |\xi_i| \leq \beta_i \\ sgn(\xi_i)\beta_i & , |\xi_i| > \beta_i \end{cases} \quad (15)$$

$\beta_i$ 는 아래를 만족한다.

$$|W_{r_i}(t)| \leq \beta_i, \text{ for } i = 1, 2, \dots, m \quad (16)$$

식 (13)에서 설계한 제어기를 식 (11)의 개방-루프 시스템에 대입하면 아래와 같은 폐쇄-루프 오차 시스템을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{M}r &= -V_m r + W_r + \chi - (kr + \widehat{W}_r(t) + e) \\ &= -V_m r - kr - e + \widetilde{W}_r(t) + \chi \end{aligned} \quad (17)$$

### 3.4 안정도 분석

식 (13)에서 설계한 제어기가 적용된 무인 선박 시스템의 안정도를 검증하기 위해 리아브노프 안정도 분석을 실시한다. 먼저 음수가 아닌 함수  $V(t) \in R$ 을 아래와 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} V &= \frac{1}{2} e^T e + \frac{1}{2} r^T M r \\ &+ \frac{1}{2k_L} \int_{t-T}^t (sat_\beta W_r(\sigma) - sat_\beta \widehat{W}_r(\sigma))^T \\ &\quad (sat_\beta W_r(\sigma) - sat_\beta \widehat{W}_r(\sigma)) \end{aligned} \quad (18)$$

식 (18)를 시간으로 미분하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &= e^T (r - ae) + \frac{1}{2} r^T \dot{M} r + r^T (-V_m r - kr \\ &- e + \widetilde{W}_r(t) + \chi) + \frac{1}{2k_L} (sat_\beta W_r(t) - \\ &sat_\beta \widehat{W}_r(t))^T (sat_\beta W_r(t) - sat_\beta \widehat{W}_r(t)) \\ &- \frac{1}{2k_L} (sat_\beta W_r(t-T) - sat_\beta \widehat{W}_r(t-T))^T \\ &\quad (sat_\beta W_r(t-T) - sat_\beta \widehat{W}_r(t-T)) \end{aligned} \quad (19)$$

이때 관성(inertia) 및 구심력(centripetal-coriolis) 행렬들은 아래와 같은 skew-symmetry 관계를 만족하므로<sup>[8]</sup>,

$$\frac{1}{2} r^T \dot{M} r - r^T V_m r = r^T \left( \frac{1}{2} \dot{M} - V_m \right) r = 0 \quad (20)$$

식 (20)을 식 (19)에 적용한 후 중복되는 항을 정리한다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &= e^T (-ae) + r^T (-kr + \widetilde{W}_r(t) + \chi) \\ &+ \frac{1}{2k_L} (sat_\beta W_r(t) - sat_\beta \widehat{W}_r(t))^T \\ &\quad (sat_\beta W_r(t) - sat_\beta \widehat{W}_r(t)) - \frac{1}{2k_L} \\ &\quad (sat_\beta W_r(t-T) - sat_\beta \widehat{W}_r(t-T))^T \\ &\quad (sat_\beta W_r(t-T) - sat_\beta \widehat{W}_r(t-T)) \end{aligned} \quad (21)$$

3.4.1 가정 1:  $W(t) = W(t-T)$ ,  $T$ 가 상수일 때 가정 1에 따르면, 식 (21)의 세 번째 항은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} sat_\beta W_r(t-T) - sat_\beta \widehat{W}_r(t-T) \\ = W_r(t) - \widehat{W}_r(t) + k_L r \\ = \widetilde{W}_r(t) + k_L r \end{aligned} \quad (22)$$

따라서 식 (21)를 다시 정리하면

$$\begin{aligned} \dot{V} &= e^T (-ae) + r^T (-kr + \widetilde{W}_r(t) + \chi) \\ &+ \frac{1}{2k_L} (sat_\beta W_r(t) - sat_\beta \widehat{W}_r(t))^T (sat_\beta W_r(t) \\ &- sat_\beta \widehat{W}_r(t)) - \frac{1}{2k_L} (\widetilde{W}_r(t) + k_L r)^T (\widetilde{W}_r(t) + k_L r) \end{aligned} \quad (23)$$

Properties 1:  $(a-b)^2 \geq (sat(a) - sat(b))^2$ ,  $|a| < \beta$

Properties 1에 따르면 식 (23)의  $-\frac{1}{2k_L} (\widetilde{W}_r(t))^2$ 는

$\frac{1}{2k_L} (sat_\beta W_r(t) - sat_\beta \widehat{W}_r(t))^2$ 보다 우세(dominate)하다.

따라서 식 (23)은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &= e^T (-ae) + r^T (-kr + \widetilde{W}_r(t) + \chi) \\ &- \frac{1}{2k_L} (2\widetilde{W}_r^T(t)k_L r + k_L^2 r^T r) \end{aligned} \quad (24)$$

$$\dot{V} \leq -a\|e\|^2 - k\|r\|^2 + \|r\|\chi - \frac{1}{2k_L}(k_L^2 r^T r) \quad (25)$$

3.4.2 가정 2:  $|W(t)| \leq \beta$

가정 2에 따르면  $\chi$ 는 식 (12)의 중간값 정리를 적용할 수 있다. 따라서 식 (25)에 가정 2를 적용하면

$$\dot{V} \leq -a\|e\|^2 - k\|r\|^2 + \|r\|\rho(\|Z\|)\|Z\| - \frac{k_L}{2}(r^T r) \quad (26)$$

$$\dot{V} \leq -\min(a, k, \frac{k_L}{2})\|Z\|^2 \quad (27)$$

가정 1과 가정 2에 따른 결과 식 (27)을 분석했을 때,  $r, e \in L_2 \cap L_\infty$ 는 명백하다.  $r(t) \in L_2 \cap L_\infty$ 이기 때문에, 식 (7)에 의해  $e(t), \dot{e}(t) \in L_2 \cap L_\infty$ 이다. 식 (13)의  $\hat{W}_r$ 는 한계값을 지니게 되는데, 왜냐하면  $sat_\beta$ 과  $r$ 에 의해 한계가 설정되기 때문이다. 따라서 제어기의 입력  $\tau(t) \in L_\infty$ 역시 한계값을 가지게 된다.

식 (17)의 폐쇄-루프 오차 시스템도  $\dot{r}(t) \in L_\infty$ 을 만족한다. 또한 식 (7)에 의해  $\ddot{e}(t) \in L_\infty$ 이다.  $r(t), \dot{r}(t) \in L_\infty$ 와  $r(t) \in L_2$ 인 사실을 바탕으로 Barbalat's lemma [6]을 적용하면 아래를 유도할 수 있다.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} r(t) \rightarrow 0 \quad (28)$$

따라서 반복 학습 제어가 적용된 무인 선박 시스템은 점근적으로 안정하며, 또한 제어 입력 역시 측정가능하며 실현 가능하다. 하지만 점근적 안정은 semi-global한 결과를 가져오는데, 그 이유는 식 (12)를 만족할 수 있는 최초 상태에서의  $k$ 를 선정해야 하기 때문이다.

## 4. 결과 분석

### 4.1 시뮬레이션 환경

본 논문에서 우리가 설계한 제어기가 적용된 무인 선박의 안정도 및 제어기의 실현가능성을 시각화하기 위해 수치 시뮬레이션이 사용되었다. 시뮬레이션은 식 (1,2)에서 주어진 운동방정식을 바탕으로 아래와 같은 질량-관성 및 감쇄 행렬이 주어진 모델을 적용하여

실행하였다.

$$M = \begin{bmatrix} 1.0852 & 0 & 0 \\ 0 & 2.0575 & -0.4087 \\ 0 & -0.4087 & 0.2153 \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$D = \begin{bmatrix} 0.08656 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0762 & 0.1510 \\ 0 & 0.1510 & 0.0031 \end{bmatrix} \quad (30)$$

시간에 따른 선박의 이상적인 위치 및 최초 위치는 아래와 같이 설정하였다.

$$q_d(t) = \begin{bmatrix} 10\sin(0.2t)[m] \\ 10\cos(0.2t)[m] \\ 5\sin(0.2t)[rad] \end{bmatrix}, \quad q(0) = \begin{bmatrix} 5[m] \\ -5[m] \\ 10[rad] \end{bmatrix} \quad (31)$$

선박의 속도 및 매개변수 추정값의 최초 상태는 모두 0으로 설정하였다.

반복 학습 제어기에 사용된 제어 및 적응 이득은 아래와 같이 설정하였다.

$$k = k_L = 20, \quad a = 1 \quad (32)$$

반복 학습 제어기의 시간 상수는  $T=1$ 이며, saturation function의  $\beta=100$ 으로 설정하였다.

본 연구의 제어기 설계 과정 및 구성에 대한 블록 선도는 아래와 같다.

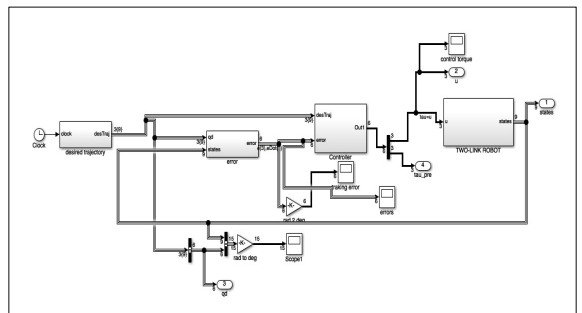


Fig. 2. Position tracking error variation for each axis

### 4.2 결과 분석

#### 4.2.1 링크별 위치 추적 오차

Fig. 3은 시간에 따른 각 축별 위치 추적 오차들을 나타내며, 이 때 위치 추적 오차는 식 (5)에서 이상적

인 위치 요소들과 관측되는 실제 위치간의 차이로 정의하였다. 여기에서 위치 추적 오차들이 시간의 흐름에 따라 점근적으로(asymptotically) 0에 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 설계된 반복 학습 제어기는 무인 선박의 실제 위치가 점근적으로 이상적인 경로에 가까워지게끔 제어하는 것을 확인할 수 있다.

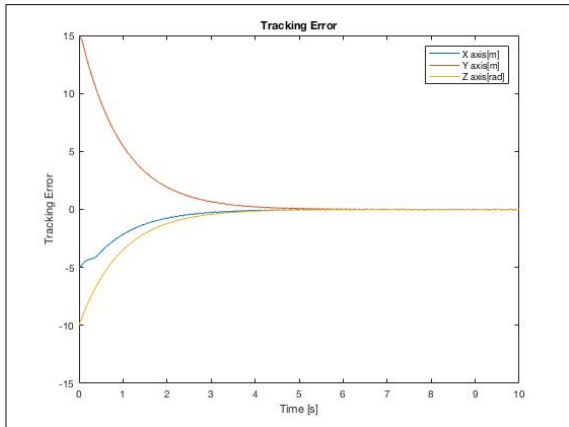


Fig. 3. Position tracking error for each axis

Fig. 4는 시간에 따른 각 축별 위치 추적 오차들의 변화량, 즉 Fig. 3의 그래프를 시간으로 미분한 결과이다. Fig. 3과 마찬가지로 각 오차들의 변화량이 점근적으로 작아지는 것을 알 수 있다. 하지만 식 (11)에서 중간값 정리를 사용하였기 때문에 semi-global 특성에 의해 완전히 0에 수렴하지는 못한다는 것을 알 수 있다.

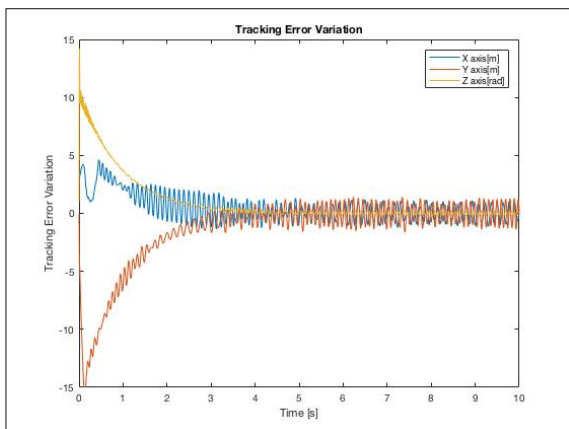


Fig. 4. Position tracking error variation for each axis

#### 4.2.2 제어 입력

Fig. 5는 반복 학습 제어기의 상태별 입력값의 크기를 나타낸다. 여기에서 우리는 각각의 제어 입력값이 상한선과 하한선 내에서 측정되는 것을 알 수 있다. 이는 제어 입력들의 한계범위 내에서 구동되는 것을 보여준다. 하지만 3.3절에 설계한 제어기는 sliding-mode에 기반을 두고 있기 때문에, 단시간 내에 고주파수 형태의 chattering input 이 나타남을 알 수 있다. 따라서 느린 동특성을 지니고 있는 선박의 모델보다는 빠른 동특성을 지니고 있는 모델에 보다 효과적으로 적용할 수 있음을 알 수 있다. Chattering input을 제거하기 위해서는 Integral Sliding Mode Control이나 High Order Sliding Mode에 기반을 둔 제어기 설계가 요구된다.

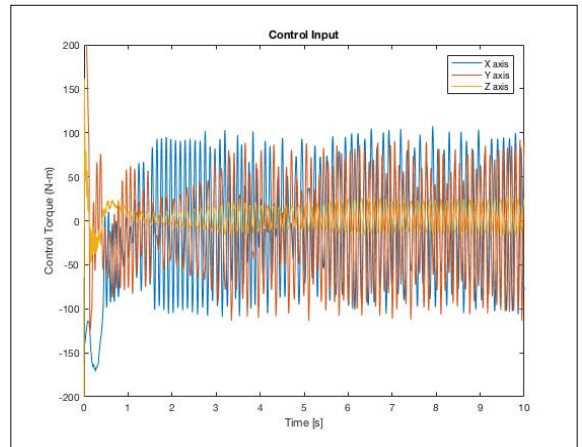


Fig. 5. Control input for each axis

## 5. 결론

본 논문에서는 비선형적 특성을 가진 무인 선박의 안정적인 제어를 위한 반복 학습 제어기를 설계하였다. 선박 모델의 출력값인 위치오차는 제어기 입력 값의 일부분으로서 궤환 제어에 사용되었고, 일정 시간마다 이전 시간대의 입력값을 저장해 두었다가 실시간 제어에 반영함으로써 끊임없이 갱신되는 적응 제어가 이루어졌다. 반복 학습 제어기로 제어되는 선박 모델은 리아브노프 안정도 분석 및 Barbalat's lemma를 통해 위치 추적 오차가 점근적으로 0으로 수렴함을 보임으로써 안정한 것을 확인하였다. 그러나 반복 제

어기의 제어 이득  $k$ 에 의해 좌우되는 semi-global 결과 및 제어 입력의 chattering 문제는 제어기의 현실성을 위해 해결해야 할 과제이다.

또한 본 논문에서 설계한 무인 선박의 운동방정식은 현실에서 고려되어야 하는 중력, 부력 및 관성 등이 간소화된 이상적인 시스템이다. 따라서 위와 같이 다양하고 복잡한 변수들을 고려하는 모델을 설계하고 이에 적합하게 운용될 수 있는 개선된 제어기를 개발하는 것이 향후 과제가 될 것이다.

### References

- [1] E. Zergeroglu, W. Dixon, D. Haste and D. Dawson, "A Composite Adaptive Output Feedback Tracking Controller for Robotic Manipulators," Proc. of the 1999 American Control Conference, Vol. 5, No. 1, pp. 3013-3017, 1999.
- [2] W. E. Dixon, E. Zergeroglu, D. M. Dawson and B. T. Costic, "Repetitive Learning Control : A Lyapunov-Based Approach," IEEE Transactins on Systems, Man, and Cybernetics, Part B(Cybernetics), Vol. 32, No. 4, pp. 538-545, Aug. 2002.
- [3] D. H. Owens and J. Hätönen, "Iterative Learning Control - An Optimization Paradigm," Annual Reviews in Control, Vol. 29, Issue. 1, pp. 57-70, 2005.
- [4] A. M. Lyapunov, "The General Problem of the Stability of Motion," International Journal of Control, Vol. 55, No. 3, pp. 513-773, 1992.
- [5] M. W. Spong and M. Vidyasagar, "Robot Dynamics and Control," John Wiley & Sons, New York, 1989.
- [6] T. I. Fossen, "A Guidance and Control of Ocean Vehicles," John Wiely, Chichester, UK, 1994.
- [7] T. I. Fossen and A. Groveln, "Nonlinear Output Feedback Control of Dynamically Positioned Ships using Vectorial Observer Backstepping," IEEE Transaction on Control Systems Technology, Vol. 6, No. 1, pp. 121-128, 1998.
- [8] W. E. Dixon, A. Behal, D. M. Dawson, S. P. Nagarkatti, "Nonlinear Control of Engineering Systems : A Lyapunov-Based Approach," Birkhäuser, Boston, USA, pp.157, 2003
- [9] F. Lewis, C. Abdallah and D. Dawson, "Control of Robot Manipulators," MacMillan Publishing Co., New York, 1993.