



자율무인잠수정의 비선형 PD심도제어

안종갑 · 고 건* · 소명옥†

시워드십메니지먼트(기술이사) · **한국선급(연구원) · †한국해양대학교(교수)

Nonlinear PD Depth Control for Autonomous Underwater Vehicle

Jong-Kap AHN · Geon KOH* · Myoung-Ok SO†

SEAWARD Ship Management(technical director) · *Korean Register(researcher) ·

†Korea Maritime & Ocean University(professor)

Abstract

The purpose of this research is to study AUV (Autonomous Underwater Vehicle) depth control using a nonlinear controller which is more adaptive and robust than existing linear controllers. For depth control of AUV, nonlinear P controller is designed as pitch controller in the outer loop and nonlinear PD controller is designed as pin controller in the inner loop. The parameter gains of each controllers are tuned through RCGAs (Real-Coded Genetic Algorithms), one of the optimization techniques, and ITAE (Integral of Time-weighted Absolute Error) is used as an evaluation function. By using the proposed nonlinear controller, depth control of AUV nonlinear model is performed through computer simulation. The designed nonlinear controller shows satisfied performance for target depth tracking, continuous disturbance, and noise.

Key words : Autonomous underwater vehicle, Nonlinear controller, PID, RCGAs, ITAE

I. 서론

AUV(Autonomous Underwater Vehicle)는 심해 중에서의 운동 및 위치제어 성능을 보장할 수 있는 안정된 성능의 제어가 어렵다. 그래서 이를 개선하고 보완하는 연구들이 현재도 활발하게 수행되고 있는 추세이다. Chen et al.(2009)은 AUV의 운동제어를 위해서 유전알고리즘을 최적화 도구로 사용하는 PID(Proportional Integral Derivative) 제어를 제안하였고, Pakare et al.(2013)은 AUV의 조타제어를 위해 유전알고리즘으로 동조한 PD(Proportional Derivative) 및 PID제어를 사용하는 연구를 하였다. Park et al.(2015)은 PD제어 기법을 적용하여 어뢰형 무인잠수정의 순사각 및 심도제어기 설계와 실험적 성능을 검증하였다.

기존의 선형 PID(Linear PID: LPID)제어기는 이들 파라미터를 정확하게 동조하였다 하더라도 AUV 운용 중 AUV의 질량, 부력 등의 변화로 제어대상이 변하면 제어를 재동조해야 하는 단점이 있다. 또한, 외란으로 작용하는 파도, 조류 등의 환경변화에도 파라미터들의 재동조 또는 추가적인 제어기가 필요하게 된다. 그렇기 때문에 비선형성과 시변성을 가지는 AUV를 제어할 때에 LPID제어기의 성능을 개선하기 위해 적응성과 강인성을 향상시키는 다양한 방법 중에서 간단하면서도 효과적인 방법 중 하나인 비선형 PID(Nonlinear PID: NPID)제어기를 설계하여 적용시키고자 한다.

기존의 LPID제어기에는 상반관계가 존재한다. 즉, 빠른 응답속도를 얻기 위해 이득을 크게 하

† Corresponding author : 051-440-4248, smo@kmou.ac.kr

면 오버슈트가 증가하고, 반대로 오버슈트를 줄이기 위해 이득을 감소시키면 응답속도가 느려진다. 이런 이유 때문에 실제 적용시 빠른 응답속도 요구와 작은 오버슈트 발생 요구 간에 적절한 타협이 요구된다(Aidan, 2009; Åström and Hägglund, 1995). 이런 근원적인 문제를 해결하기 위해 LPID제어기의 구조에 비선형 요소를 도입하고 온라인으로 변경하는 일련의 연구들이 수행되어 왔고, 이들은 크게 오차신호를 비선형적으로 스케일링한 후 사용하는 방법(Jiang and Gao, 2001; Seraji, 2000)과 제어기의 이득을 비선형 함수로 구현하는 방법(Chen and Lu, 2011; Isayed and Hawwa, 2007; Korkmaz et al., 2012; Zhang and Hu, 2012)으로 구분될 수 있다.

본 논문에서는 AUV의 심도제어를 위한 NPID 제어기 중 제어기의 세 이득을 비선형 함수로 구현하는 설계기법을 다룬다. AUV의 외부루프 피치(pitch)제어기로는 비선형 P제어기를 사용하며, 내부루프 핀(fin)제어기로는 비선형 PD제어기를 사용한다. 각 제어기 파라미터들은 목표심도인 설정치를 추종하는데 시간곱절대오차적분(ITAE) 함수가 최소가 되도록 실수코딩유전알고리즘(RCGAs : Real-Coded Genetic Algorithms)을 통해 최적 동조된다.

II. AUV의 운동방정식 및 모델링

AUV의 운동방정식은 동체의 움직임과 관련된 기하학적 요소인 운동역학, 관성행렬로 나타내는 강체동역학, 운동을 일으키는 힘과 모멘트인 기계역학적 요소로 구성된다. 동체의 일반 기구학적 방정식을 다루는 것에 대해서는 Fossen(1994)을 참조하였다.

1. AUV의 비선형 운동방정식

<Table 1>과 [Fig. 1]은 AUV를 SNAME(Society of Naval Architects and Marine Engineers) 형식의

물체고정좌표계에 따라 표현한 것이다. 일반적으로 AUV의 6자유도 운동은 식 (1)로 표현이 가능하다.

$$\begin{aligned} \eta_1 &= [x \ y \ z]^T & \eta_2 &= [\phi \ \theta \ \psi]^T \\ \mathbf{v}_1 &= [u \ v \ w]^T & \mathbf{v}_2 &= [p \ q \ r]^T \dots\dots\dots (1) \\ \boldsymbol{\tau}_1 &= [X \ Y \ Z]^T & \boldsymbol{\tau}_2 &= [K \ M \ N]^T \end{aligned}$$

여기서 η 은 관성 또는 지구고정좌표계를 기준으로 AUV의 위치와 방향을 나타낸다. \mathbf{v} 는 물체 고정좌표계 기준으로 AUV의 나아가는 변위와 회전속도를 나타내고, $\boldsymbol{\tau}$ 는 물체고정좌표계 기준으로 선박에 작용하는 총 힘과 운동모멘트를 나타낸다. 물체고정좌표계와 지구고정좌표계에 대해서 식 (2)는 병진속도에 관한 것이고, 식 (3)은 회전속도에 관한 것이다.

$$\dot{\eta}_1 = \mathbf{J}_1(\eta_1) \mathbf{v}_1 \dots\dots\dots (2)$$

$$\dot{\eta}_2 = \mathbf{J}_2(\eta_2) \mathbf{v}_2 \dots\dots\dots (3)$$

$\mathbf{J}_1(\eta_1)$ 과 $\mathbf{J}_2(\eta_2)$ 는 아래의 식 (4), 식 (5)와 같이 나타낸다.

$$\mathbf{J}_1(\eta_1) = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & -s\psi c\theta + c\psi s\theta s\phi & s\psi s\theta + c\psi s\theta c\phi \\ s\psi c\theta & c\psi c\theta + s\psi s\theta s\phi & -c\psi s\theta + s\psi s\theta c\phi \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix} \dots (4)$$

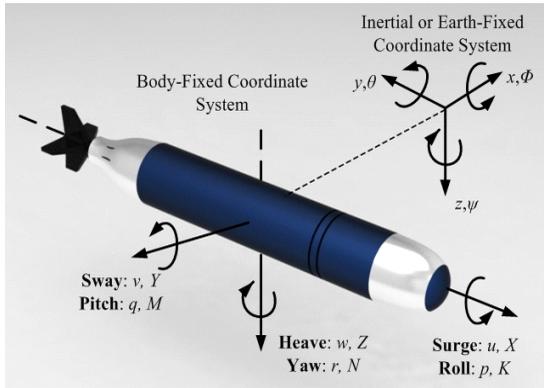
$$\mathbf{J}_2(\eta_2) = \begin{bmatrix} 1 & s\phi t\theta & c\phi t\theta \\ 0 & c\phi & -s\phi \\ 0 & s\phi/c\theta & c\phi/c\theta \end{bmatrix} \dots\dots\dots (5)$$

AUV의 운동방정식은 모델링 과정에서 다음과 같은 가정이 이루어졌다(Prestero, 2001).

- AUV는 질량이 일정한 강체이다. 즉, 운용 중 AUV의 질량 및 질량분포가 변경되지 않는다.
- AUV의 핀이 움직이는 어느 각에서도 받음 각(angle of attack)에 관계없이 실속(失速, stall)하지 않는다. 또한 핀 응답은 즉각적이라고 가정하는데, 이는 핀 액추에이터의 응답시간이 AUV가 움직이는 자세에 대한 응답시간과 비교하여 작다는 것을 의미 한다.
- AUV는 균질하고 파도, 파랑 또는 강체 파동 하중이 없는 제한되지 않은 유체에 깊이 잠기게 된다. 즉, 자유표면, 벽 및 바닥에서 멀리 떨어져 위치한다.

<Table 1> The Notation for AUV

DOF	Motion and rotation	Forces & moments	Linear & angular velocities	Positions & angles
1	Motions in x-direction (Surge)	X	u	x
2	Motions in y-direction (Sway)	Y	v	y
3	Motions in z-direction (Heave)	Z	w	z
4	Rotation about x-axis (Roll)	K	p	ϕ
5	Rotation about y-axis (Pitch)	M	q	θ
6	Rotation about z-axis (Yaw)	N	r	ψ



[Fig. 1] Body-fixed and inertial coordinate

- 시뮬레이션에서는 메모리 효과가 발생하지 않도록 AUV가 움직이면서 발생시키는 자체 후류를 통과할 때 발생하는 효과는 무시한다.
- 물체고정좌표계의 중심은 부력의 중심에 위치한다.
- I_{xy}, I_{xz}, I_{yz} 가 I_{xx}, I_{yy}, I_{zz} 에 비해 매우 작고, y_g 값을 매우 작다고 가정한다. I_{xy}, I_{xz}, I_{yz} 은 xy 축에 대한 관성모멘트, yz 축에 대한 관성모멘트, xz 축에 대한 관성모멘트이다. I_{xx}, I_{yy}, I_{zz} 은 x 축에 대한 관성모멘트, y 축에 대한 관성모멘트, z 축에 대한 관성모멘트이다.

힘과 모멘트를 구성하는 요소들은 동체의 기하학적 형태 및 동작조건에 따라 값이 변할 수 있다. 이러한 구성요소들에 대한 설명은 이 연구의 범위를 벗어나기 때문에 생략하고 Prestero(2001)의 문헌을 인용한다. AUV의 강체동역학에 대한 방정식을 AUV의 힘과 모멘트에 대한 방정식과

결합하면 AUV의 6자유도 운동에 대한 비선형 운동방정식 (6) ~ (11)을 얻을 수 있다. AUV의 비선형 운동방정식은 물체고정식 AUV좌표계 지정을 위한 SNAME 규칙을 따른다.

$$(m - X_{\dot{u}})\dot{u} + m z_g \dot{q} - m y_g \dot{r} = X_{HS} + X_{u|u}|u| \dots\dots\dots (6)$$

$$+ (X_{uq} - m)wq + (X_{qq} + m x_g)q^2$$

$$+ (X_{vr} + m)vr + (X_{rr} + m x_g)r^2$$

$$- m y_g pq - m z_g pr + X_{vrop}$$

$$(m - Y_{\dot{v}})\dot{v} - m z_g \dot{p} + (m x_g - Y_{\dot{r}})\dot{r} = Y_{HS} + Y_{v|v}|v| \dots\dots\dots (7)$$

$$+ Y_{r|r}|r| + m y_g r^2 + (Y_w - m)vr$$

$$+ (Y_{wp} + m)wp + (Y_{pq} - m x_g)pq$$

$$+ Y_{uv}uv + m y_g p^2 + m z_g qr + Y_{u\delta_s} u^2 \delta_r$$

$$(m - Z_{\dot{w}})\dot{w} + m y_g \dot{p} - (m x_g + Z_{\dot{q}})\dot{q} = Z_{HS} \dots\dots\dots (8)$$

$$+ Z_{w|w}|w| + Z_{q|q}|q| + (Z_{wq} + m)uq$$

$$+ (Z_{vp} - m)vp + (Z_{rp} - m x_g)rp + Z_{uw}uw$$

$$+ m z_g (p^2 + q^2) - m y_g r q + Z_{u\delta_s} u^2 \delta_s$$

$$- m z_g \dot{v} + m y_g \dot{w} + (I_{xx} - K_{\dot{p}})\dot{p} = K_{HS} + K_{p|p}|p| \dots\dots\dots (9)$$

$$- (I_{zz} - I_{yy})qr + m (uq - vp)$$

$$- m z_g (wp - ur) + K_{vrop}$$

$$m z_g \dot{u} - (m x_g + M_{\dot{w}})\dot{w} + (I_{yy} - M_{\dot{q}})\dot{q} = M_{HS} \dots\dots\dots (10)$$

$$+ M_{w|w}|w| + M_{q|q}|q| + (M_{wq} - m x_g)uq$$

$$+ (M_{vp} + m x_g)vp + [M_{rp} - (I_{xx} - I_{zz})]rp$$

$$+ m z_g (vr - wq) + M_{uw}uw + M_{u\delta_s} u^2 \delta_s$$

$$- m y_g \dot{u} + (m x_g - N_{\dot{v}})\dot{v} + (I_{zz} - N_{\dot{r}})\dot{r} = N_{HS} + N_{v|v}|v| \dots\dots\dots (11)$$

$$+ N_{r|r}|r| + (N_w - m x_g)ur$$

$$+ (N_{wp} + m x_g)wp + [N_{pq} - (I_{yy} - I_{xx})]pq$$

$$- m y_g (vr - wq) + N_{uv}uv + N_{u\delta_s} u^2 \delta_r$$

식 (6)은 써지(surge, x 축에 따른 운동)에 관한 식, 식 (7)은 스웨이(sway, y 축에 따른 운동)에 관한 식, 식 (8)은 히브(heave, z 축에 따른 운동)에 관한 식, 식 (9)는 롤(roll, x 축에 대한 회전)에 관한 식, 식 (10)은 피치(pitch, y 축에 대한 회전)에 관한 식, 식 (11)은 요(yaw, z 축에 대한 회전)에 관한 식이다.

2. AUV의 선형 운동방정식

AUV의 비선형 운동방정식으로부터 다음의 절차를 통해 선형 운동방정식을 유도할 수 있다. 심도제어에 영향을 미치는 요인들 u, w, q, θ 만 고려한다. 다른 모든 속도 값들은 0으로 설정하고 평면 외 항목들에 대한 방정식은 제외한다 (Prestero, 2001; Fossen, 1994). AUV의 깊이 방향 동작에 대해서만 고려된 운동방정식은 식 (12)이다. 이 때 AUV가 정상상태에서 일정한 속도로 이동하고 있다면, 동체는 작은 움직임으로만 구성되고 히브와 피치는 거의 움직임이 없기 때문에 각각의 속도가 0라고 가정하여 선형화를 하게 되면 식 (13), 식 (14)와 같이 간단히 표현된다.

$$\begin{aligned} (m - X_{\dot{u}})\dot{u} + m z_g \dot{q} - X_{\dot{u}}u - X_{\dot{q}}q - X_{\dot{\theta}}\theta = 0 \quad \dots\dots\dots (12) \\ (m - Z_w)\dot{w} - (m x_g + Z_q)\dot{q} - Z_w w \\ - (m U + Z_q)q = Z_{\delta_s} \delta_s \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m z_g \dot{u} - (m x_g + M_w)\dot{w} + (I_{yy} - M_q)\dot{q} \\ - M_w w + (m x_g U - M_q)q - M_{\theta}\theta = M_{\delta_s} \delta_s \\ \dot{z} = w - U\theta \quad \dots\dots\dots (13) \\ \dot{\theta} = q \quad \dots\dots\dots (14) \end{aligned}$$

만약 식 (12)에서 무게중심 z_g 가 다른 조건들에 비교하여 매우 작다고 가정하면, 식 (15)와 같이 써지를 히브와 피치로부터 분리시킬 수 있다.

$$\begin{aligned} (m - Z_w)\dot{w} - (m x_g + Z_q)\dot{q} - Z_w w \\ - (m U + Z_q)q = Z_{\delta_s} \delta_s \quad \dots\dots\dots (15) \\ - (m x_g + M_w)\dot{w} + (I_{yy} - M_q)\dot{q} - M_w w \\ + (m x_g U - M_q)q - M_{\theta}\theta = M_{\delta_s} \delta_s \end{aligned}$$

식 (13), 식 (14), 식 (15)를 사용하여 상태방정식으로 나타내면 식 (16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{x}} - \mathbf{C}_d \mathbf{x} = \mathbf{D} \mathbf{i} \quad \dots\dots\dots (16)$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m - Z_w & - & (m x_g + Z_q) & 0 & 0 \\ - & (m x_g + M_w) & I_{yy} - M_q & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C}_d = \begin{bmatrix} z_w & \mu + Z_q & 0 & 0 \\ M_w & -m x_g u + M_q & 0 & M_{\theta} \\ 1 & 0 & 0 & -U \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} Z_{\delta_s} \\ 0 \\ M_{\delta_s} \\ 0 \end{bmatrix}$$

여기서, \mathbf{x} 는 $[w \ q \ z \ \theta]^T$ 인 상태벡터이고, w 는 z 방향 속도를 나타내고, q 는 y 축 피치각속도

를 의미하며, z 는 z 방향 위치를 나타내고, θ 는 y 축 피치각을 의미한다. \mathbf{i} 는 입력벡터로 $[\delta_s]^T$ 이다. δ_s 는 핀각 명령으로써 핀제어기의 출력값이다.

식 (16)을 일반적인 상태방정식 표현인 식 (17)로 나타낼 수 있다.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{B} \mathbf{u} \quad \dots\dots\dots (17)$$

$$\mathbf{A} = \mathbf{M}^{-1} \mathbf{C}_d, \quad \mathbf{B} = \mathbf{M}^{-1} \mathbf{D}$$

한편, 히브속도가 다른 조건들과 비교하여 매우 작기 때문에 0으로 가정하고 일반적인 상태방정식으로 표현하게 되면, 운동방정식은 식 (18)과 같이 간단하게 표현이 가능하다.

$$\begin{bmatrix} \dot{q} \\ \dot{z} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{M_q}{I_{yy} - M_q} & 0 & \frac{M_{\theta}}{I_{yy} - M_q} \\ 0 & 0 & -U \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q \\ z \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{M_{\delta_s}}{I_{yy} - M_q} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} [\delta_s] \quad \dots\dots (18)$$

III. 심도제어용 비선형 PD제어기 설계 및 파라미터 추정

1. 심도제어용 비선형 PD제어기 설계

[Fig. 2]와 같이 AUV의 심도제어를 위해 NPID 제어기에 대한 설계를 하였다. 내부제어시스템인 핀제어기로는 식 (19)의 비선형 PD제어기를 사용하였고, 외부제어시스템인 피치제어기로는 식 (20)의 비선형 P제어기를 사용하였다(Lee et al., 2015).

$$\begin{aligned} \frac{\delta_s(s)}{e_{\theta}(s)} = K_p(e_{\theta}) + K_d(e_{\theta}, \dot{e}_{\theta})s \quad \dots\dots\dots (19) \\ = K_p g_p(e_{\theta}) + K_d g_d(e_{\theta}, \dot{e}_{\theta})s \end{aligned}$$

$$g_p(e_{\theta}) = 1 - \frac{1}{a_p + (c_p e_{\theta})^6}$$

$$g_d(e_{\theta}, \dot{e}_{\theta}) = \begin{cases} 1 - \frac{1}{a_d + (c_d e_{\theta})^6}, & e_{\theta} \dot{e}_{\theta} > 0 \\ 1 - \frac{1}{a_d}, & \text{elsewhere} \end{cases}$$

여기서, δ_s 는 비선형 PD제어기의 출력으로써 핀의 입력각도이고, e_{θ} 는 핀의 목표각 θ_d 와 현재 핀각 θ 의 오차값이다. K_p 는 핀제어기용 비례제어

이득이고 K_d 는 편제어기용 미분이득이다.

$$\frac{\theta_d(s)}{e_z(s)} = K_\gamma(e_z) = K_\gamma g_\gamma(e_z) \dots\dots\dots (20)$$

$$g_\gamma(e_z) = 1 - \frac{1}{a_\gamma + (c_\gamma e_z)^6}$$

여기서, e_z 는 심도오차 $Z_d - Z$ 이고, θ_d 는 비선형 P제어기의 출력으로 피치의 입력각도이며, K_γ 는 피치제어기용 비례제어이득이다.

$K_p(e_\theta)$, $K_d(e_\theta, \dot{e}_\theta)$, $K_\gamma(e_z)$ 는 오차 e 와 오차 변화율 \dot{e} 에 대한 비선형함수로서 시변이득이다.

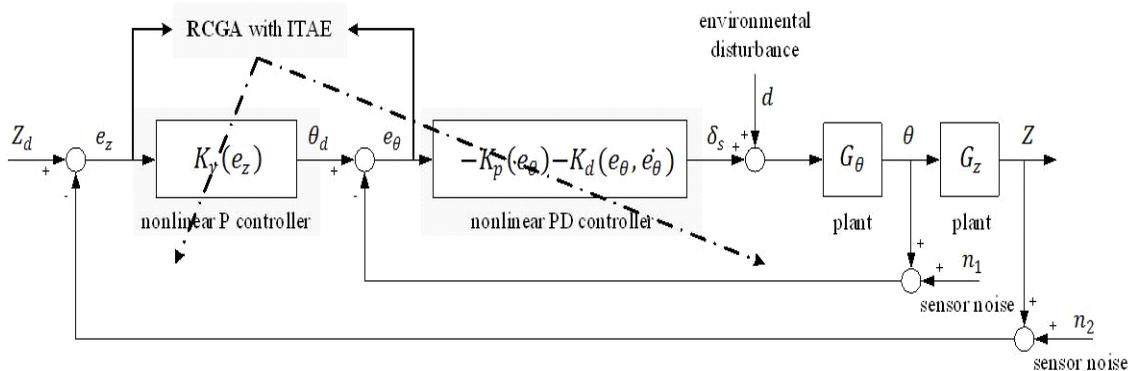
비선형 비례동작은 비례이득 또는 현재의 오차에 비례해서 커지며, 비례동작이 너무 커지게 되면 과도한 제어로 인하여 오버슈트가 발생하고, 진동이 일어나게 된다. 빠른 응답속도를 위해서 오차가 클 때 비례이득도 적절히 커질 필요가 있다. 하지만 정상상태에 도달한 후 오차가 작을 때에도 큰 비례이득 값을 유지하면 오차의 영향이 커지게 되어 진동이 일어날 수가 있고, 또는 경우에 따라서 불안정해질 수도 있다. 이러한 점을 기반으로 비례이득의 크기는 오차에 따라서 적절히 조절될 수 있게 설계된다. $K_{p,\gamma}$ 는 양의 상수, $g_{p,\gamma}(e_{\theta,z})$ 는 두 매개변수 $a_{p,\gamma}(\geq 1)$ 와 $c_{p,\gamma}(>0)$ 를 갖게 되는 비선형함수이다. 오차가 무한대로 커지게 되면 $g_{p,\gamma}(e_{\theta,z})$ 는 상한값 1로 수렴하고, 반대로 오차가 0이면 하한값 $(1 - \frac{1}{a_{p,\gamma}})$ 로 수

렴한다. 하한값으로 수렴할 때의 크기는 $a_{p,\gamma}$ 값에 따라 달라진다.

비선형 미분동작은 오차의 변화율과 미분이득에 비례해서 커지고, 비례동작이 커지면 출력도 같이 커지게 될 것을 미리 예측하고 제동을 걸게 된다. 전체 제어기간 동안 필요이상의 제동이 걸리게 되면 응답속도가 느려질 수 있다. 그러나 특정 사이클만 제동을 걸게 되면 비례동작을 더 과감하게 활용할 수 있게 되고 오버슈트도 줄일 수 있다. 따라서 응답이 $e_\theta \dot{e}_\theta (>0)$ 영역의 사이클에 있을 경우 큰 제동이 걸리도록 미분이득의 크기를 변경할 수 있다. K_d 는 양의이득, $g_d(e_\theta, \dot{e}_\theta)$ 는 두 매개변수 $a_d(\geq 1)$ 와 $c_d(>0)$ 를 갖는 비선형함수이다. 비선형함수 $g_d(e_\theta, \dot{e}_\theta)$ 또한 0과 1사이의 값을 갖는다.

2. 비선형 PD제어기의 파라미터 추정

[Fig. 2]는 RCGAs를 이용하여 편제어기인 비선형 PD제어기, 피치제어기인 비선형 P제어기의 이득 $K_p(e_\theta)$, $K_d(e_\theta, \dot{e}_\theta)$, $K_\gamma(e_z)$ 를 최적으로 동조하게 된다. 제어기 파라미터 동조시 발생하는 다변수 최적화 문제를 풀기 위해 사용되는 RCGAs는 실수코딩을 채용함으로써 RCGAs의 염색체는 제어기에 사용되는 9개의 파라미터를 유전자로 가지게 된다. 한편, 집단 내 염색체들의 성능이 좋



[Fig. 2] Depth Plane Control System Block Diagram with RCGAs

고 나뭇은 적합도 평가를 통해 계량되며, 적합도는 성능지수(목적함수)로부터 계산되어진다. 본 논문에서는 식 (21)의 시간곱절대오차적분 (ITAE : Integral of the Time-weighted Absolute Error) 성능지수를 고려한다.

일반적으로 제곱오차적분 ISE(Integral of the Square Error)는 해석이 용이하여 최적제어기 설계 등에 자주 이용되나 오차가 클 때는 큰 벌점을, 작을 때는 작은 벌점을 주는 결과를 초래해 최적해 부근에서 계수의 변화에 둔감하다. 한편 절대오차적분 IAE(Integral of the Absolute Error)는 오차의 절대크기를 취함으로써 양이나 음의 오차에 균등한 벌점을 부여하는 효과를 주므로 ISE보다 나은 감도를 나타낸다. ITAE는 장시간의 과도현상에 대해 벌점을 주는 매우 유용한 기준으로 IAE나 ISE보다 훨씬 더 변별력이 있으며, 이 적분의 최소값은 시스템의 파라미터들이 변하는 경우에 훨씬 더 잘 정의될 수 있다(Ahn et al., 2018; Kim et al., 2007).

$$J(\psi) = \int_0^{t_f} t (|e_z(\psi_\gamma, t)| + |e_\theta(\psi_p, t)|) dt \dots\dots\dots (21)$$

여기서 $\psi_\gamma = [K_\gamma]^T \in R$ 는 비선형 피치제어기 파라미터로 구성되는 것이고, $\psi_p = [K_p, K_d]^T \in R^2$ 는 비선형 편제어기 파라미터로 구성되는 벡터이다. $e_{z, \theta}$ 는 설정치와 출력간의 오차이며, t_f 는 이후의 적분값이 무시될 수 있도록 충분히 큰 시간이다. 그리고 RCGAs의 탐색성능을 높이기 위해 선형 스케일링(linear scaling)을 사용하였고, 이전 세대의 최적개체를 생존시키기 위한 엘리티즘(elitism) 전략을 사용하였다(Ahn et al., 2007).

IV. 모의실험 및 검토

1. 모의실험용 데이터와 제어기 파라미터

본 논문의 제어대상인 AUV의 심도제어기 설계 및 모의실험을 위해 비선형 운동방정식 (6) ~

(11)을 사용한다. AUV의 파라미터 일부는 <Table 2>와 같으며 나머지는 Prestero(2001)를 참조한다. 제어기 파라미터 추정을 위한 RCGAs의 제어변수로 집단의 크기는 30, 재생산 계수를 1.8로 사용하는 구배와 유사한 재생산, 교배확률이 95%인 수정단순교배, 돌연변이 확률이 20%인 동적돌연변이를 선택하였다.

<Table 2> Parameters of Non-linear AUV model

Parameter	Value	Unit	Description
I_{xx}	0.1769	$kg.m^2$	Inertia Moment
I_{yy}	3.4500	$kg.m^2$	Inertia Moment
I_{zz}	3.4500	$kg.m^2$	Inertia Moment
K_p	-0.0707	$kg.m^2/rad$	Added Mass
$K_{p p }$	-0.1304	$kg.m^2/rad^2$	Rolling Resistance
K_{prop}	-0.5428	$N.m$	Propeller Torque
m	30.4695	kg	Vehicle Weight
M_q	-4.8786	$kg.m^2/rad$	Added Mass
$M_{q q }$	-1.8792	$kg.m^2/rad^2$	Cross-flow Drag
M_{rp}	4.86455	$kg.m^2/rad^2$	Added Mass Cross Term
M_{rq}	-2.0018	$kg.m/rad$	Added Mass Cross Term and Fin Lift
$M_{w\delta_r}$	-6.1538	kg/rad	Fin Lift Moment
M_{wv}	23.9666	kg	Body and Fin Lift and Munk Moment
M_{wp}	-1.9261	$kg.m/rad$	Added Mass Cross Term
M_w	-1.9261	$kg.m$	Added Mass
$M_{w w }$	3.1803	kg	Cross-flow Drag
N_{pq}	-4.8645	$kg.m^2/rad^2$	Added Mass Cross-term
N_r	-4.8786	$kg.m^2/rad$	Added Mass
$N_{r r }$	-93.9599	$kg.m^2/rad^2$	Cross-flow Drag
N_w	-2.0018	$kg.m/rad$	Added Mass Cross Term and Fin Lift
$N_{w\delta_r}$	-6.1538	kg/rad	Fin Lift Moment
N_{wv}	-23.9666	kg	Body and Fin Lift and Munk Moment
N_v	1.9261	$kg.m$	Added Mass
$N_{v v }$	-3.1803	kg	Cross-flow Drag
N_{vp}	-1.9261	$kg.m/rad$	Added Mass Cross Term
x_g	0	m	Gravity Center
X_{prop}	3.8604	N	Propeller Thrust
X_{qq}	-1.9261	$kg.m/rad$	Added Mass Cross-term
X_{rr}	-1.9261	$kg.m/rad$	Added Mass Cross-term
X_u	-0.9301	kg	Added Mass
$X_{u u }$	-1.6214	kg/m	Cross-flow Drag

X_{vr}	35.5177	kg/rad	Added Mass Cross-term
X_{uq}	-35.5177	kg/rad	Added Mass Cross-term
y_g	0	m	Gravity Center
Y_{pq}	1.9261	kg.m/rad	Added Mass Cross-term
Y_r	1.9261	kg.m/rad	Added Mass
$Y_{r r }$	0.6319	kg.m/rad ²	Cross-flow Drag
Y_{wv}	5.2237	kg/rad	Added Mass Cross Term and Fin Lift
$Y_{u\delta_v}$	9.6413	kg/(m.rad)	Fin Lift Force
Y_{uv}	-28.6041	kg/m	Body Lift Force and Fin Lift
Y_v	-35.5177	kg	Added Mass
$Y_{v v }$	-1.3109	kg/m	Cross-flow Drag
Y_{wp}	35.5177	kg/rad	Added Mass Cross-term
z_g	0.0195	m	Gravity Center
Z_q	-1.9261	kg.m/rad	Added Mass
Z_{qq}	-0.6319	kg.m/rad ²	Cross-flow Drag
Z_{rp}	1.9261	kg/rad	Added Mass Cross-term
Z_{uq}	-5.2237	kg/rad	Added Mass Cross-term and Fin Lift
$Z_{u\delta_v}$	-9.6413	kg/(m.rad)	Fin Lift Force
Z_{uv}	-28.6041	kg/m	Body Lift Force and Fin Lift
Z_{vp}	-35.5177	kg/rad	Added Mass Cross-term
Z_w	-35.5177	kg	Added Mass
$Z_{w w }$	-1.3109	kg/m	Cross-flow Drag

미지의 파라미터 행렬을 탐색하기 위한 탐색구간은 $-80 < K_p < 80$, $0.01 < T_d < 10$, $-10 < K_\gamma < 10$, $0.1 < a_p < 50$, $0.1 < c_p < 50$, $0.1 < a_d < 50$, $0.1 < c_d < 50$, $0.1 < a_\gamma < 50$, $0.1 < c_\gamma < 50$ 으로 설정하였다.

이 때 초기의 AUV는 수면 0[m]에서 일정속도 1.54[m/s]로 운항하고 있으며, 목표심도를 수심 1[m]로 명령한다. <Table 3>의 제어기 파라미터들은 Prestero(2001)가 제시한 극배치법에 의해 선정된 것과 본 연구의 RCGAs에 의해 동조된 결과를 나타낸 것이다.

<Table 3> Parameters of Non-linear Controllers

gain	K_p	T_d	K_γ	a_p	c_p	a_d	c_d	a_γ	c_γ
Proposed	-42.579	0.114	-1.085	24.34	48.282	13.152	36.296	33.257	33.382
Prestero T.	-10.345	0.210	-0.772						

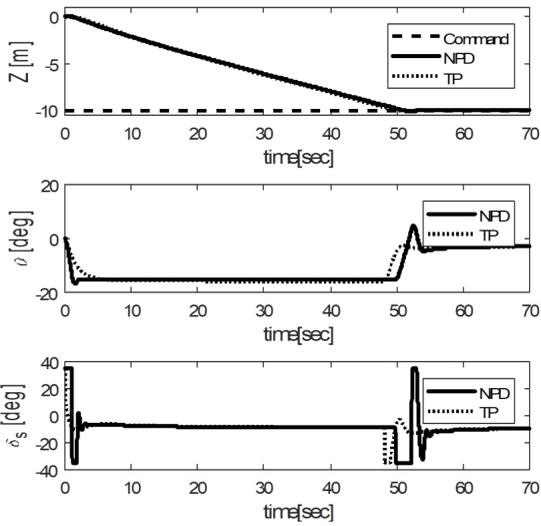
2. 비선형 PD제어기를 이용한 비선형 AUV 모델의 심도제어

Prestero(2001)가 극배치법을 통해 제안한 선형 제어기와 본 논문에서 제안하는 비선형제어기를 AUV 비선형모델에 적용하여 그 결과를 비교한다.

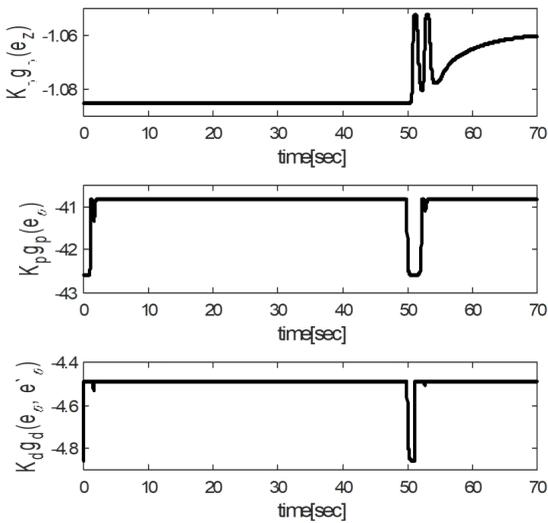
- 1) 목표심도에 대한 설정치 추종
- 2) 과도상태에서 지속적인 바이어스 형태의 피치각 외란
- 3) 정상상태에서 지속적인 바이어스 형태의 피치각 외란
- 4) 측정용 센서에 잡음이 섞였을 경우

여기서 지속적인 바이어스 형태의 외란이란 AUV가 잠수하는 중에 수중에서 물방울이나 외부 환경 변화에 의해 피치각의 변화가 있는 경우 등이다. 제안한 비선형제어기의 추종성능을 알아보기 위해 목표심도를 0[m]에서 -10[m]로 변경시켰다. 핀각의 작동범위는 $\pm 35^\circ$, 피치각의 작동범위는 $\pm 15^\circ$ 로 제한하는 포화기가 설치되어 있다. 초기 상태 u 는 1.54[m/s](약 3[knots]), ϕ 는 -0.0873 [rad]이며, 나머지 $v, w, p, q, r, \theta, \psi$ 는 0이다.

가. 목표심도에 대한 설정치 추종제어
 [Fig. 3]에서 제안된 비선형 PD제어기와 Prestero(2001)의 선형 PD제어기는 거의 동일한 추종 성능을 보이고 있다. 두 제어기 모두 정상 상태 오차값 0.04[m]로 심도 -9.96[m]에 수렴하였다. 비선형 PD제어기는 명령 초기 오차가 클 때는 오차를 줄이기 위해 빠른 응답성능을 보이고, 설정치에 도달하게 되면 오차가 작아지기 때문에 제어기 이득값을 조절하여 설정치 부근에서 제어 대상의 급격한 움직임이 없도록 하고 있다. [Fig. 4]는 비선형 PD제어기 파라미터가 오차에 따라 변화되는 것을 보여준다.



[Fig. 3] Depth Tracking Response for Non-linear AUV Model

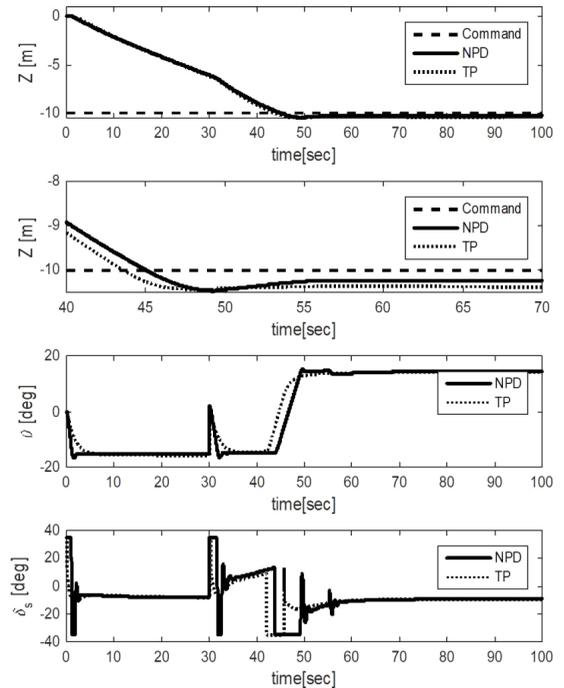


[Fig. 4] Changed Parameters of Non-linear Controllers

나. 과도상태에서 지속적인 바이어스 형태의 피치각 외란 제어

비선형 AUV모델에 대한 심도제어 도중 과도 상태인 30[s]부터 피치각에 +0.3[rad]에 해당하는 외력이 지속적으로 작용한다고 가정하여 시뮬레이션을 실시하였다. [Fig. 5]는 각각의 제어기를

시뮬레이션 한 것이다. [Fig. 5]의 2번째 그림은 Z, depth[m]에 대하여 x축인 time을 40[s] ~ 70[s] 범위로 확대시킨 그래프이다. Prestero(2001) 선형 PD제어기를 사용하였을 때 목표 설정치의 2[%] 내에 도달하지 못하였다. 그러나 비선형 제어기를 사용한 경우 -10.25[m]에 수렴하였지만 Prestero(2001) 선형 PD제어기를 사용한 경우 목표심도값에서 점차 벗어나는 것을 확인하였다.

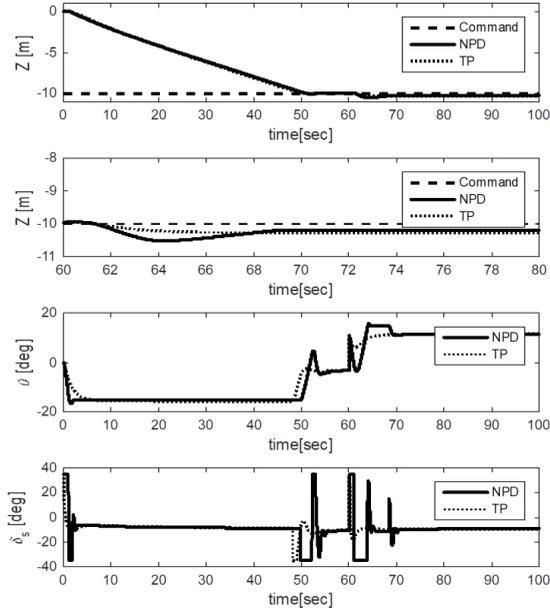


[Fig. 5] Disturbance response of Non-linear AUV Model (at 30[s], transient state)

다. 정상상태에서 지속적인 바이어스 형태의 피치각 외란 부가

비선형 AUV 모델에 대한 심도제어 도중 정상 상태인 60[s]부터 피치각에 +0.25[rad]에 해당하는 외력이 지속적으로 작용한다고 가정하여 시뮬레이션을 실시하였다. [Fig. 6]은 각각의 제어기를 사용했을 때의 그래프를 나타낸 것이다. [Fig. 6]의 2번째 그림은 Z, depth[m]에 대하여 x축인 time을 60[s] ~ 80[s] 범위로 확대 시킨 그림이다.

비선형 PD제어기를 사용한 경우 회복시간 (Recovery Time) 8.9061[s] 후 목표 심도값의 2[%] 이내에 도달하였지만, Prestero(2001) 선형 PD제어기를 사용한 경우에는 도달하지 못하였다.

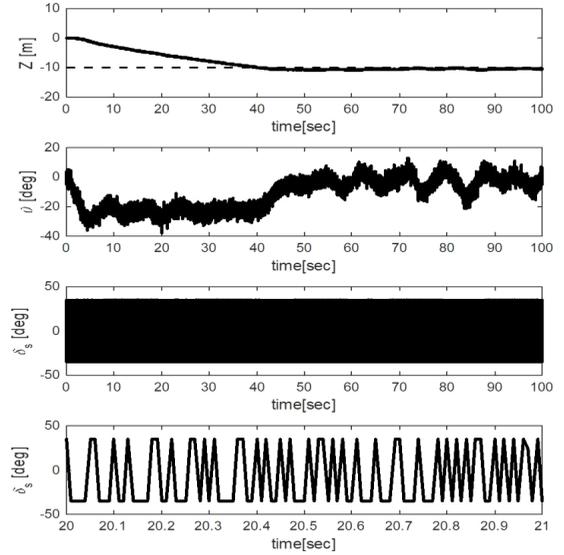


[Fig. 6] Disturbance response of Non-linear AUV Model (at 60[s], steady state)

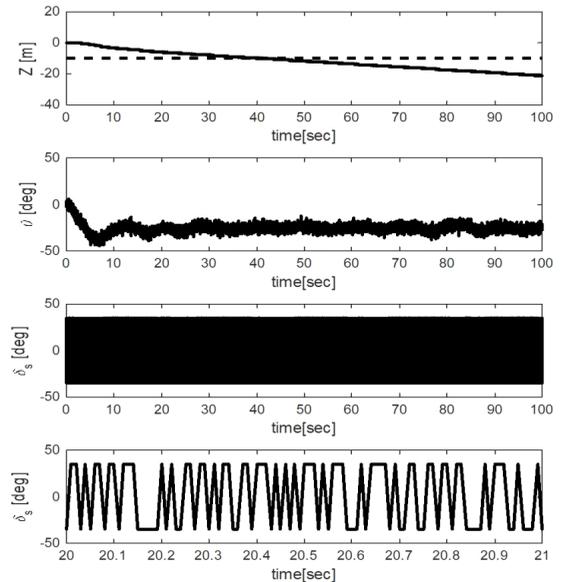
라. 심도 측정용 센서 및 피치각 측정용 센서에 잡음이 섞였을 경우

심도제어 도중 심도 측정용 센서 및 피치각 측정용 센서에 잡음이 섞였을 경우를 가정하여 시뮬레이션 한다. 심도 측정용 센서 및 피치각 측정용 센서의 잡음(noise)은 모두 평균이 0이고 분산이 0.05인 정규잡음이라고 가정하였다. [Fig. 7]과 [Fig. 8]은 각각 이러한 잡음이 있는 경우에 제안한 비선형 PD제어기와 Prestero(2001) 선형 PD제어기에 의한 응답을 나타낸 것이다. [Fig. 7]에서 비선형 PD제어기는 미분필터가 없음에도 불구하고 충분히 추종성능을 보이고 있는 것을 나타내고 있다. 반면에 [Fig. 8]에서 Prestero(2001) 선형 PD제어기는 잡음에 의해 명령심도를 추종하지 못하고 있다. 즉, 비선형 PD제어기만으로도

측정잡음이 약간 섞이는 시스템에서 충분히 만족할 만한 제어성능을 얻을 수 있다.



[Fig. 7] Depth Tracking response of Non-linear AUV Model with sensor noise using Non-linear Controller



[Fig. 8] Depth Tracking response of Non-linear AUV Model with sensor noise using Prestero T. Linear Controller

[Fig. 7]과 [Fig. 8]의 4번째 그림은 δ_s , 편각[°]에 대하여 x 축인 time을 20[s] ~ 21[s] 범위로 확대시킨 그림이다.

V. 결론

본 논문에서는 수중운동체인 AUV의 심도제어를 위한 비선형제어기를 제안하였다. 편각을 제어하기 위한 비선형 PD제어기는 내부루프에 있고, 피치각을 제어하기 위한 비선형 P제어기는 외부루프에 있다. 이들 비선형제어기의 파라미터들은 최적화 도구인 RCGAs를 이용하여 동조하였으며 이때 평가함수는 ITAE를 사용하였다.

제안한 비선형제어기를 AUV의 비선형모델에 적용하여 심도제어 시뮬레이션을 수행하였으며 아래와 같은 결과를 얻을 수 있었다.

(1) 제안한 비선형제어기에 의한 응답은 적정 시간 이내에 목표심도에 잘 추종하고 있음을 확인하였다.

(2) 지속적인 바이어스 형태의 외란에서도 충분히 만족할만한 제어성능을 나타냄을 확인할 수 있었다.

(3) 측정잡음이 섞이는 시스템에서 미분필터가 없어도 충분히 만족할만한 제어성능을 얻을 수 있는 것을 확인할 수 있었다.

이후에는 AUV의 성능인 최대오버슈트, 지연시간, 상승시간, 정정시간 등을 RCGAs의 제약조건으로 고려한 제어기설계와 측정잡음을 좀 더 효과적으로 제거할 수 있는 필터설계에 대한 연구가 진행되어야 할 것으로 사료된다.

References

Ahn JK, Kang SY and So MO(2018). PD controller based on genetic algorithms for depth control of an autonomous underwater vehicle. *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, 42(1),

24~30.
<https://doi.org/10.5916/jkosme.2018.42.1.24>
 Ahn JK, Lee YH, Jin GG and So MO(2007). System Identification by Real-Coded Genetic Algorithm. *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, 31(5), 599~605.
<https://doi.org/10.5916/jkosme.2007.31.5.599>
 Aidan O(2009). *Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules* (3rd Edition), World Scientific.
 Åström K J and Häggglund T(1995). *PID Controllers: theory, design and tuning*. ISA Press.
 Chen JP, Lu BC, Fan F, Zhu SC and Wu JX(2011). A Nonlinear PID Controller for Electro-Hydraulic Servo System Based on PSO Algorithm. *Applied Mechanics and Materials*, vol. 141, 157~161.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.141.157>
 Chen Q, Chen T and Zhang Y(2009). Research of GA-based PID for AUV Motion Control, 2009 International Conference on Mechatronics and Automation, 9-12 Aug. 2009.
<http://doi.org/10.1109/ICMA.2009.5246715>
 Fossen T I(1994). *Guidance and control of ocean vehicles*. John Wiley & Sons.
 Isayed B M and Hawwa M A(2007). A Nonlinear PID Control Scheme for Hard Disk Drive Servo systems. *Proc. of the 15th Mediterranean Conf. on Control and Automation*, pp. T16~014, Greece.
<https://doi.org/10.1109/MED.2007.4433790>
 Jiang F and Gao Z(2001). An Application of Nonlinear PID Control to a Class of Truck ABS Problems. *Proc. of the 40th IEEE Conference on Decision and Control*, 516~521.
<https://doi.org/10.1109/CDC.2001.980154>
 Kim MJ, Lee YH, So MO, Ha YS, Hwang SW and Jin GG(2007). Tuning Rules of the PID Controller Using RCGAs, *Journal of Korean Society of Marine Engineering*, Vol.31, No.4, 448~454.
<http://doi.org/10.5916/jkosme.2007.31.4.448>
 Korkmaz M, Aydogdu O and Dogan H(2012). Design and performance comparison of variable parameter nonlinear PID controller and genetic algorithm based PID controller. *Proc. of 2012 IEEE Int. Symp. on Innovations in Intelligent Systems and Applications (INISTA)*, 1~5.
<https://doi.org/10.1109/INISTA.2012.6246935>

Lee JY, So GB, Lee YH, So MO and Jin GG(2015), Temperature Control of a CSTR using a Nonlinear PID Controller. Journal of Institute of Control, Robotics and Systems. 21(5):482~489
<http://doi.org/10.5302/J.ICROS.2015.14.0125>

Pakhare AA, Tiwari KN and Chile RH(2013). PID/PD tuning for Steering Control of Autonomous Underwater Vehicle : Genetic algorithm Approach, Proceedings of National conference on Instrumentation, Control and Signal Processing, August 2013.

Park SK, Lee PY, Park SW, Kwon ST, Jung HS and Park MS(2015). Design and Field Test of Heading and Depth Control Based on PD Control of Torpedo Type AUV, HW200. Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, 21(10), 951~957.
<https://doi.org/10.5302/j.icros.2015.15.0093>

Prestero TJ(2001). Development of a six-degree of freedom simulation model for the REMUS autonomous underwater vehicle, MTS/IEEE Oceans 2001. An Ocean Odyssey. Conference Proceedings

(IEEE Cat. No.01CH37295).
<http://doi.org/10.1109/OCEANS.2001.968766>

Prestero TJ(2001). Verification of a six-degree of freedom simulation model for the REMUS AUV. Master's thesis, Massachusetts Institute of Technology/Woods Hole Oceanographic Institution, Department of Ocean and Mechanical engineering.

Seraji H(2000). A New Class of Nonlinear PID Controllers. Proc. of 2000 IFAC Workshop on Digital Control, Terrassa, Spain.
[https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)44245-5](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)44245-5)

Zhang H and Hu B(2012). The Application of Nonlinear PID Controller in Generator Excitation System. Energy Procedia, vol. 17, 202~207.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.02.084>

-
- Received : 09 April, 2018
 - Revised : 07 July, 2019
 - Accepted : 11 July, 2019