

비-어파인 비선형 동특성을 갖는 무인 자율 이동 보트의 속도 제어를 위한 적응 퍼지 제어 계통

An Adaptive Fuzzy Control System for the Speed Control of the Autonomous Surface Vehicle with Nonaffine Nonlinear Dynamics

박 영 환, 이 재 경*
(Young-Hwan Park¹ and Jae-Kyung Lee¹)
¹Chungju National University

Abstract: In this paper, an adaptive fuzzy control system is proposed for the speed control of the ASV (Autonomous Surface Vehicle) with nonaffine nonlinear system dynamics. We consider the turning speed of the screw propeller to be the control input instead of thrust so that we do not have to know the exact function between turning speed and thrust. But in this case, the ASV becomes a nonaffine nonlinear system because thrust is a nonlinear function of the turning speed. To solve this problem, we propose a Takagi-Sugeno fuzzy-model-based control system and simulation studies are performed. Simulation results show the effectiveness of the proposed control scheme.

Keywords: ASV (Autonomous Surface Vehicle), adaptive fuzzy control system, nonaffine nonlinear system

I. 서론

본 논문에서는 무인 자율 이동 보트(ASV: Autonomous Surface Vehicle)의 방향각(heading angle)과 속도를 제어하기 위한 적응 퍼지 제어 계통을 제안하고자 한다. 일반적으로 자율 이동 보트와 같은 선박의 동특성식은 선박의 질량, Coriolis와 원심력, 유체역학 관련 계수들이 개입되어 복잡하고 불확실한 파라미터들을 포함한다[1]. 따라서 Fossen은 이러한 불확실성에 대처하기 위하여 선형, 비선형 선박 모델에 대한 적응제어 기법과 비선형 제어기법을 제안하였다 [1]. 동특성식 파라미터의 불확실성과 더불어 선박의 제어와 관련된 또 다른 중요한 문제는 선박의 제어입력을 추력(thrust)으로 생각할 경우 스크류 프로펠러 회전수와 발생하는 추력과의 관계식을 실험을 통해 정확히 알아내야 한다는 점이다. 선박의 속도, 방향각 제어에 관한 여러 연구들 [1-6]에서 스크류 회전수 대신 추력을 제어입력으로 사용하고 있으나 이 경우 스크류 회전수와 추력과의 관계식이 정확하지 않으면 원하는 제어 성능을 이론적으로 보장 받을 수 없다는 문제가 발생된다.

본 논문에서는 이 문제를 해결하기 위하여 스크류 회전수를 직접 제어 입력으로 사용함으로써 회전수와 추력의 관계를 알 필요가 없도록 하였다. 그러나 추력이 회전수의 비선형 함수이므로 이 경우, 속도 동특성식은 계통 입력 스크류 회전수에 대한 비어파인 비선형 계통으로 모델링 되어지며 이에 대처할 수 있는 제어기법이 필요하다. 따라서

본 논문에서는 비어파인 비선형 계통을 제어할 수 있는 Takagi-Sugeno 퍼지논리계통을 이용한 적응 퍼지 제어 계통 [7]을 통하여 이 문제를 해결하고자 한다. 제한한 제어기법의 유용성을 확인하고자 무인 자율 이동 보트의 축소 모델인 모델 보트에 대하여 시뮬레이션 연구를 수행하였다. 시뮬레이션 결과, 모델 보트에 대한 속도와 방향각 제어가 만족할 만한 성능으로 이루어짐을 확인할 수 있었다.

II. 모델 보트의 동특성식

그림 1은 모델 보트의 개략적인 그림과 사진이며 관련된 파라미터들은 표 1과 같다. 표 1의 파라미터를 갖는 모델 보트의 동특성식은 다음과 같다[3].

$$(m - X_u)\dot{u} - X_u(u - u_o) - (m - Y_v)vr - (mx_g - 0.5N_v - Y_r)r^2 = \tau_u \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} m - Y_v & mx_g - Y_r \\ mx_g - N_v & I_z - N_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -Y_v & -Y_r + (m - X_u)u \\ -N_v + (X_u - Y_v)u & -N_r + (mx_g - 0.5N_v - 0.5Y_r)u \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_v \\ \tau_r \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서

m : 보트 질량 [kg]

I_z : 그림 1에서 보트의 body fixed frame Z_b 축에 대한 moment of inertia [kgm^2]

x_g : 그림 1에서 body fixed frame 원점(cp)과 무게중심 (cg)과의 거리 [m]

u : surge 방향 보트 속도 [m/s]

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2011. 4. 20., 수정: 2011. 8. 24., 채택확정: 2011. 11. 4.

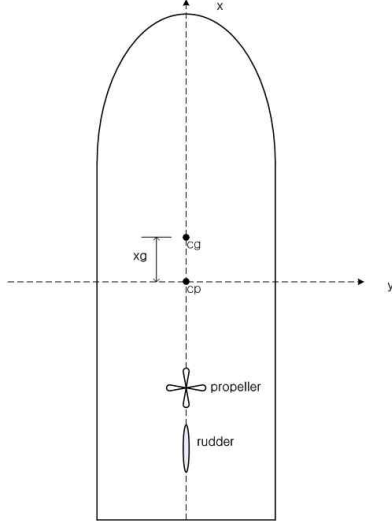
박영환, 이재경: 충주대학교 제어계측공학과

(pyh@cjnu.ac.kr/jkleel@cjnu.ac.kr)

※ 본 논문은 2009년도 충주대학교 교내학술연구과제 지원에 의하여 연구되었음.



(a) Boat picture.



(b) Boat drawing (top view).

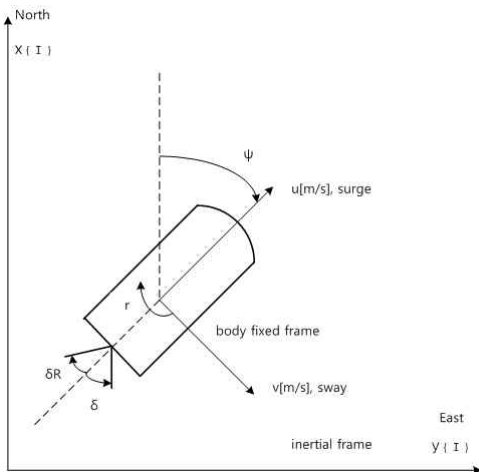
그림 1. 보트 사진과 그림.

Fig. 1. Boat picture and drawing (top view).

표 1. 보트 파라미터.

Table 1. Boat parameters.

m	23.8 kg	X_u	-0.72253
I_z	1.76 kgm ²	Y_v	-0.88965
x_{cg}	0.046 m	N_v	0.0313
X_u	-2	Y_r	-7.25
Y_v	-10	N_r	-1.9
Y_r	0	N_r	-1
N_v	0	-	-

그림 2. u, v, r, δ_R, ψ .Fig. 2. u, v, r, δ_R, ψ .

v : sway 방향 보트 속도 [m/s]

r : 보트의 yaw 회전 속도 [rad/s]

ψ : 보트의 방향각 [rad]

τ_u : 추력, external surge force [kgm/sec²]

$\tau_v = -Y_\delta \cdot \delta_R = 0.1\delta_R$: external sway force

$\tau_r = -N_\delta \cdot \delta_R = -\delta_R$: external yaw moment

$X(\cdot), Y(\cdot), N(\cdot)$: hydrodynamic derivatives

δ_R : 방향타 각도(rudder angle) [rad]

δ : rudder deflection [rad], ($\delta = -\delta_R$)

n : 스크류 프로펠러 회전수 [rpm]

이고 음의 δ_R ($\delta_R < 0$)은 양의 r ($r > 0$)을 발생시키며 (1), (2)에 표 1의 파라미터를 대입하여 정리하면 (3), (4), (5)를 얻는다.

$$\dot{u} = -0.028u + 1.31vr + 0.04243r^2 + 0.0042 + 0.03876\tau_u \quad (3)$$

$$\dot{v} = -0.0271v + 0.0952uv - 0.2401r - 0.7627ur + 0.0149\delta_R \quad (4)$$

$$\dot{r} = 0.0221v - 2.936uv - 0.611r - 0.0424ur - 0.3682\delta_R \quad (5)$$

그리고 (3)에서 추력 τ_u 는 표 1. 파라미터를 갖는 보트에 대해 (6)과 같이 가정할 수 있다[3].

$$\tau_u = 0.01 \text{sgn}(n)|n| + 10^{-5} \text{sgn}(n)n^2 \quad (6)$$

그림 2는 (1), (2), (3), (4), (5)에서의 변수들 u, v, r, δ_R, ψ 을 나타내고 있다[1,2]. 여기서 r 은 보트의 yaw 회전 속도이다. (1)-(6)에서 제어목적은 보트 속도 $u(t)$ 가 원하는 속도함수 $u_d(t)$ 를 추종하도록 회전수 $n(t)$ 를 결정하고 방향각 $\psi(t)$ 가 원하는 방향각 $\psi_d(t)$ 를 추종하도록 방향타 각도 $\delta_R(t)$ 를 결정하는 것이다. (3)과 (6)에서 $n(t)$ 를 제어입력으로 생각하면 (3)은 비-어퍼인 계통이 된다.

III. 제어기 설계

1. 방향각 제어

(5)는 (7)과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$2.7159\dot{r} + 1.6594r + 0.1152ur - 0.06v + 7.9739uv = \delta \quad (7)$$

여기서 $r = \dot{\psi}$, δ (rudder deflection) = $-\delta_R$ (rudder angle)이고 (7)을 다시 쓰면 (8)과 같다.

$$m\dot{r} + d_1r + d_2ur + d_3v + d_4uv = \delta \quad (8)$$

여기서 (8)에 표현된 보트의 실제 파라미터들은 다음 값을 가진다.

$$m = 2.7159, \quad d_1 = 1.6594, \quad d_2 = 0.1152, \\ d_3 = -0.06, \quad d_4 = 7.9739$$

(8)의 파라미터를 모른다고 가정하면 (9)-(14)와 같은 적응제어기를 사용할 수 있다[1].

$$\delta = \hat{m}a_\psi + \hat{d}_1r + \hat{d}_2ur + \hat{d}_3v + \hat{d}_4uv \quad (9)$$

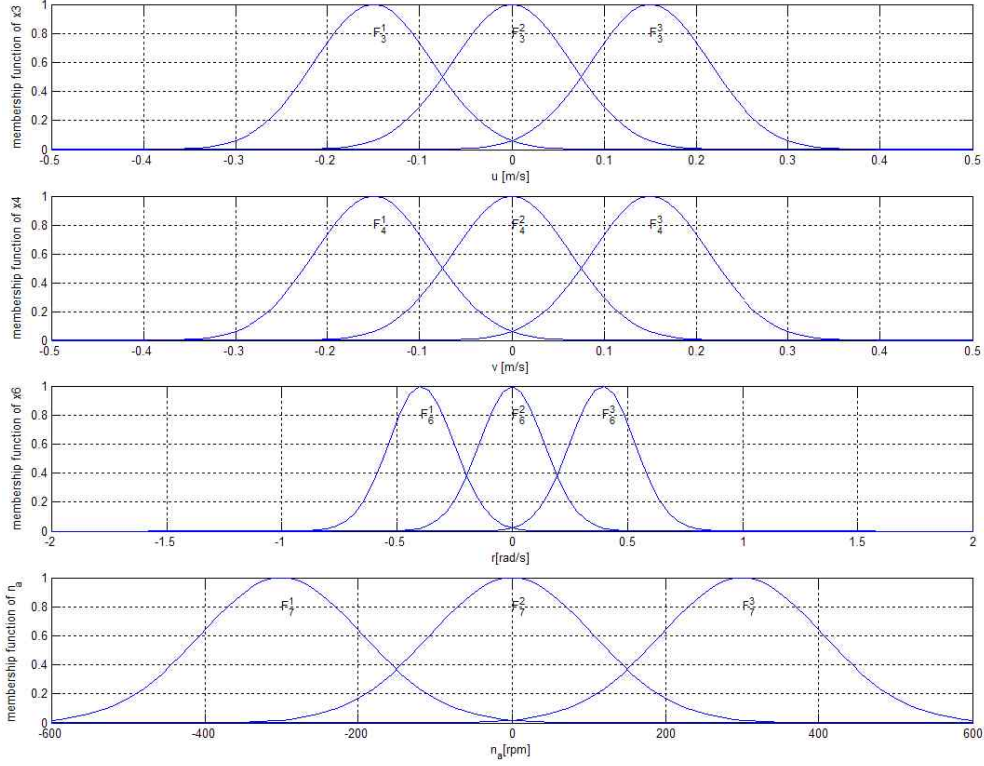


그림 3. 퍼지 소속 함수.

Fig. 3. Fuzzy membership functions.

$$a_\psi = \ddot{\psi}_d(t) - K_d \dot{\tilde{\psi}}(t) - K_p \tilde{\psi}(t) - K_i \int_0^t \tilde{\psi}(\tau) d\tau \quad (10)$$

$$\tilde{\psi} = \psi - \psi_d \quad (11)$$

$$K_p = 3\lambda^2, \quad K_d = 3\lambda, \quad K_i = \lambda, \quad \lambda > 0 \quad (12)$$

$$s = \dot{\tilde{\psi}} + 2\lambda\tilde{\psi} + \lambda^2 \int_0^t \tilde{\psi}(\tau) d\tau \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \dot{\hat{m}} &= -\gamma_1 a_\psi s, & \dot{\hat{d}}_1 &= -\gamma_2 \dot{\psi} s, \\ \dot{\hat{d}}_2 &= -\gamma_3 u r s, & \dot{\hat{d}}_3 &= -\gamma_4 v s, \\ \dot{\hat{d}}_4 &= -\gamma_5 u v s, & \gamma_i &> 0, \quad i = 1, \dots, 5 \end{aligned} \quad (14)$$

2. 속도 제어

(3)을 상태방정식 (15)와 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_3 \cos x_5 - x_4 \sin x_5 \\ \dot{x}_2 &= x_3 \sin x_5 + x_4 \cos x_5 \\ \dot{x}_3 &= -0.028x_3 + 1.31x_4x_6 + 0.024243x_6^2 + 0.042 \\ &\quad + 0.03876\tau_u \\ \dot{x}_4 &= -0.0271x_4 + 0.0952x_3x_4 - 0.2401x_6 \\ &\quad - 0.7627x_3x_6 + 0.0149\delta_R \\ \dot{x}_5 &= x_6 \\ \dot{x}_6 &= 0.0221x_4 - 2.936x_3x_4 - 0.611x_6 - 0.0424x_3x_6 \\ &\quad - 0.3682\delta_R \end{aligned} \quad (15)$$

여기서 $x_1 = x_{\{I\}}$, $x_2 = y_{\{I\}}$, $x_3 = u$, $x_4 = v$, $x_5 = \psi$, $x_6 = r = \dot{\psi}$ 이며, $x_{\{I\}}$, $y_{\{I\}}$ 는 관성좌표계(inertial frame)상의 보트 좌표이고 속도제어가 목적이므로 (15)에서 출력을

$y \equiv x_3$ 로 선정하면 출력방정식은 (16)과 같다.

$$\dot{y} = -0.028x_3 + 1.31x_4x_6 + 0.04243x_6^2 + 0.0042 + 0.03876(0.01\text{sgn}(n)|n| + 10^{-5}\text{sgn}(n)n^2) \quad (16)$$

적응퍼지제어 기법을 사용하기 위해 (16)을 다시 쓰면 (17)과 같다[7].

$$\dot{y} = F(x, n) + d(t) \quad (17)$$

$$= cn + \{F(x, n) - cn\} + d(t) \quad (18)$$

$$= cn + \Delta(x, n) + d(t) \quad (19)$$

여기서

$$\begin{aligned} F(x, n) &\equiv -0.028x_3 + 1.31x_4x_6 + 0.04243x_6^2 \\ &\quad + 0.03876(0.01\text{sgn}(n)|n| + 10^{-5}\text{sgn}(n)n^2) \\ d(t) &\equiv 0.0042 \\ \Delta(x, n) &\equiv F(x, n) - cn, \quad c > 0 \\ x &\equiv [x_3, x_4, x_6]^T \end{aligned}$$

이고 (20)과 같이 제어입력 n 을 선정한다.

$$n = \frac{1}{c} (n_{dc} - \hat{n}_{ad} + n_{ro}) \quad (20)$$

여기서

$$\begin{aligned} n_{dc}: & \text{선형화된 계통에 대한 제어입력 성분} \\ \hat{n}_{ad}: & \Delta(x, n) \text{을 없애기 위한 퍼지제어 입력 성분} \\ n_{ro}: & \text{외란을 보상하는 제어입력 성분} \end{aligned}$$

이고 (20)을 (19)에 대입하면 (21)과 같이 쓸 수 있다.

$$\dot{y} = n_{dc} + \{\Delta(x, n) - \widehat{n}_{ad}\} + n_{ro} + d(t) \quad (21)$$

(20)에서 n_{dc} 는 (22)와 같이 선정한다.

$$n_{dc} = \dot{y}_d + k_{11}e_1 \quad (22)$$

여기서

$$\begin{aligned} y_d(t) &\equiv u_d(t) \\ e_1(t) &\equiv y_d(t) - y(t) \end{aligned}$$

이고 k_{11} 은 특성방정식 $s + k_{11} = 0$ 가 Hurwitz가 되도록 선정한다. (21)에서 $\widehat{n}_{ad} = \Delta(n, x)$ 이고 n_{ro} 가 $d(t)$ 를 보상하면 (21)은 안정한 계통이 된다. (19)의 $\Delta(x, n)$ 을 다시 쓰면 (23)과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta(x, n) &= F(x, n) - cn \\ &= -0.028x_3 + 1.31x_4x_6 + 0.04243x_6^2 \\ &\quad + 0.03876(0.01\text{sgn}(n)|n| \\ &\quad + 10^{-5}\text{sgn}(n)n^2) - cn \\ &= \Delta(x_3, x_4, x_6, n) \end{aligned} \quad (23)$$

이제 $\Delta(x, n) - \widehat{n}_{ad}(X, \theta) \approx 0$, $X = [x^T, n]^T$ 을 만족시키는 퍼지 제어 계통 출력 $\widehat{n}_{ad}(X, \theta)$ 를 만들어 내기 위하여 다음과 같이 퍼지논리계통을 구성한다. 먼저, (23)의 $\Delta(x_3, x_4, x_6, n)$ 를 추정하기 위한 퍼지논리계통 구성에 필요한 퍼지 소속 함수를 그림 3과 같이 제안한다. 이때 소속 함수의 값이 1이 되는 x_3, x_4, x_6, n 의 값은 보트의 운전 범위를 고려하여 정한다. Wang [8]에 의하면 \widehat{n}_{ad} 를 추정하는 Tagaki-Sugeno 구조의 퍼지 논리 계통에 대한 언어적 퍼지 규칙(IF-THEN rules)은 다음과 같다.

x_3 가 F_3^1 , x_4 가 F_4^1 , x_6 가 F_6^1 , n_α 가 F_7^1 이면

$$\widehat{n}_{ad} = F_{\theta_{1,1,1,1}}$$

x_3 가 F_3^1 , x_4 가 F_4^1 , x_6 가 F_6^1 , n_α 가 F_7^2 이면

$$\widehat{n}_{ad} = F_{\theta_{1,1,1,2}}$$

⋮

x_3 가 F_3^3 , x_4 가 F_4^3 , x_6 가 F_6^3 , n_α 가 F_7^3 이면

$$\widehat{n}_{ad} = F_{\theta_{3,3,3,3}}$$

여기서 $\theta_{i,j,k,l}$ 은 퍼지 시스템의 출력에 대한 퍼지 집합 $F_{\theta_{i,j,k,l}}$ 의 소속 함수 값이 최대가 되는 값이다. 그러면 center average defuzzifier, product inference rule, singleton fuzzifier를 사용한 적응 퍼지 논리 계통의 출력 $\widehat{n}_{ad}(X, \theta)$ 는 (24)와 같이 표현할 수 있다[8].

$$\widehat{n}_{ad}(X, \theta) = \theta^T \xi(X) \quad (24)$$

여기서 $\theta = (\hat{\theta}_{1,1,1,1}, \dots, \hat{\theta}_{3,3,3,3})$, $\xi(X) = (\xi_{1,1,1,1}(X), \dots, \xi_{3,3,3,3}(X))$ 이고 $\hat{\theta}_{1,1,1,1}, \dots, \hat{\theta}_{3,3,3,3}$ 는 $\theta_{1,1,1,1}, \dots, \theta_{3,3,3,3}$ 의 추정치이다. 또한 $3^4 \times 1$ 차원 벡터 $\xi(X)$ 의 원소인 퍼지 기저 함수(fuzzy basis function)는 다음과 같다.

$$\xi_{l_3, l_4, l_6, l_7} = \frac{\prod_{i=3,4,6,7} \mu_{F_i^{l_i}}(x_i)}{\sum_{l_3=1}^3 \sum_{l_4=1}^3 \sum_{l_6=1}^3 \sum_{l_7=1}^3 \left(\prod_{i=3,4,6,7} \mu_{F_i^{l_i}}(x_i) \right)}$$

여기서 x_7 은 그림 3 퍼지 소속 함수의 n_α 이고 $\theta_{i,j,k,l}$, $i=1,2,3$, $j=1,2,3$, $k=1,2,3$, $l=1,2,3$ 은 x_3 가 F_3^i , x_4 가 F_4^j , x_6 가 F_6^k , n_α 가 F_7^l 퍼지 함수 각각에 최대 소속 함수 값 1로 소속될 때의 \widehat{n}_{ad} 값이고 θ 는 모든 $\theta_{i,j,k,l}$ 들을 원소로 하는 $3^4 \times 1$ 차원 벡터이다. 그리고 $\mu_{F_i^{l_i}}(x_i)$ 는 x_i 가 퍼지 소속 함수 $F_i^{l_i}$ 에 소속되는 정도를 나타내는 소속 함수 값이고 $l_3=1,2,3$, $l_4=1,2,3$, $l_6=1,2,3$, $l_7=1,2,3$ 이다.

(21)에서 $\Delta(x, n)$ 을 보상하는 \widehat{n}_{ad} 이 필요한데 Park [7]은 (25)를 만족하는 \widehat{n}_{ad} 를 n_{ad}^* 라 할 경우 n_{ad}^* 는 n_α 와 x 의 함수임을 보였다.

$$\begin{aligned} \Delta(x, (n_\alpha - n_{ad}^*)/c) - n_{ad}^* &= 0 \\ n_\alpha &\equiv n_{dc} + n_{ro} \end{aligned} \quad (25)$$

따라서 $n_{ad}^*(X)$, n^* 의 정의를 다음과 같이 하면

$$\begin{aligned} n_{ad}^*(X), X &= [x^T, n_\alpha]^T \\ n^* &= (n_\alpha + n_{ad}^*)/c \end{aligned}$$

(25)는 (26)과 같이 쓸 수 있고

$$\Delta(x, n^*) - n_{ad}^*(X) = 0 \quad (26)$$

(27)과 같이 속도 추종 오차 e_1 을 정의하면

$$e_1(t) \equiv y_d(t) - y(t) \quad (27)$$

e_1 의 시간 미분은 (28)과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{e}_1 &= \dot{y}_d(t) - \dot{y}(t) \\ &= -k_{11}e_1 - \{\Delta(x, n) - \widehat{n}_{ad}(X, \theta)\} - n_{ro} - d(t) \\ &= -k_{11}e_1 - \{\Delta(x, n) - \Delta(x, n^*) + n_{ad}^*(X) \\ &\quad - \widehat{n}_{ad}(X, \theta)\} - n_{ro} - d(t) \\ &= -k_{11}e_1 - \{\Delta(x, n) - \Delta(x, n^*) + \widehat{n}_{ad}(X, \theta^*) \\ &\quad - \widehat{n}_{ad}(X, \theta) + \delta\delta(X)\} - n_{ro} - d(t) \\ &= -k_{11}e_1 - \{\Delta(x, n) - \Delta(x, n^*)\} + \theta^T \xi(X) \\ &\quad - \delta\delta(X) - n_{ro} - d(t) \end{aligned} \quad (28)$$

여기서

$$\begin{aligned} \tilde{\theta} &\equiv \theta - \theta^* \\ n_{ad}^*(X) &= \widehat{n}_{ad}(X, \theta) + \delta\delta(X) \\ &= \theta^{*T} \xi(X) + \delta\delta(X) \end{aligned}$$

이고 θ^* 는 (29)를 만족하는 최적 파라미터 벡터이다.

$$\theta^* = \arg \min_{\theta} \left[\sup_X (\widehat{n}_{ad}(X, \theta) - n_{ad}^*(X)) \right] \quad (29)$$

이제 건설 입력 성분 n_{ro} 와 ϕ , θ 의 적응칙으로 (30), (31), (32)를 사용한다.

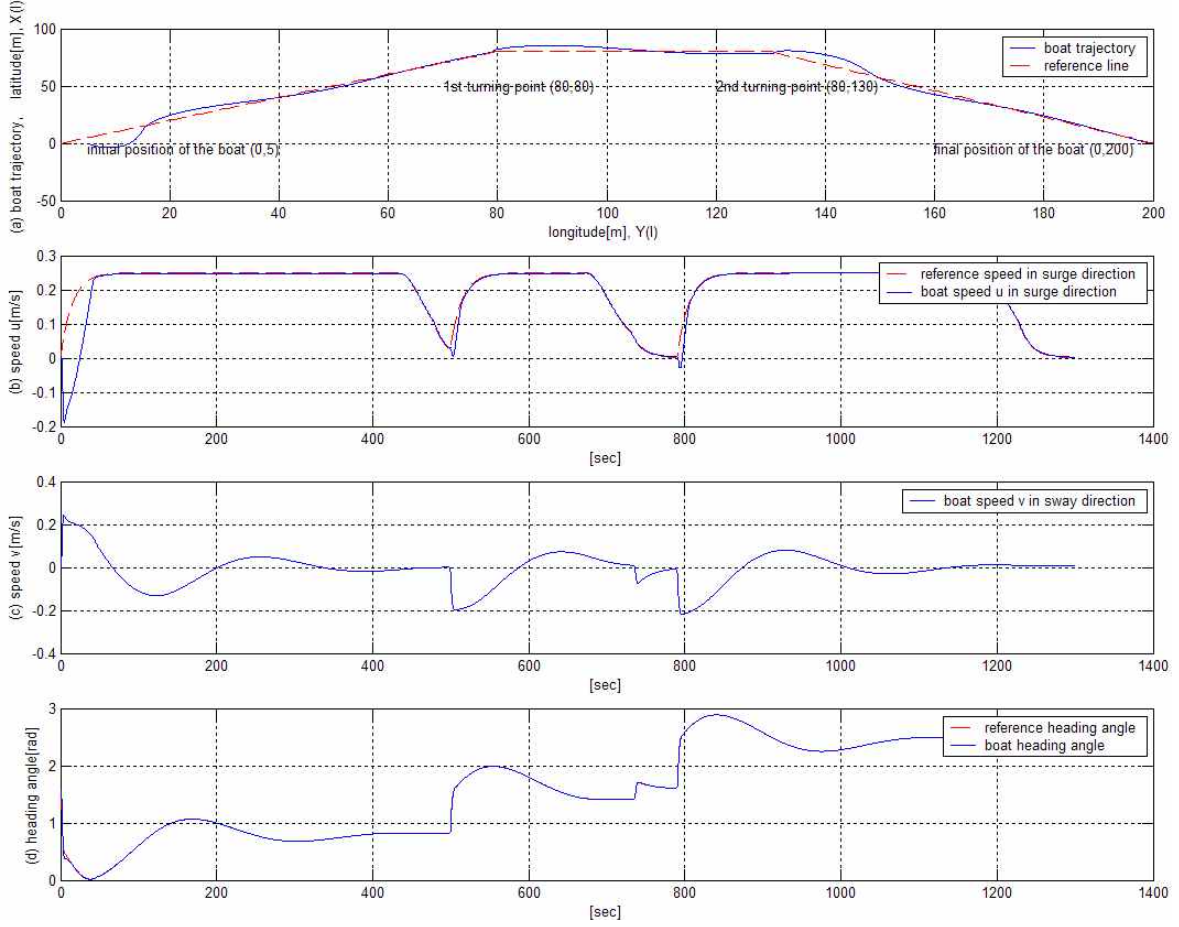


그림 4. 시뮬레이션 결과.

Fig. 4. Simulation results.

$$n_{ro} = \phi \operatorname{sgn}(e_1) \quad \text{또는} \quad n_{ro} = \phi \tanh\left(\frac{e_1}{\epsilon}\right), \quad \epsilon > 0 \quad (30)$$

$$\dot{\phi} = \gamma_\phi |e_1|, \quad \gamma_\phi > 0 \quad (31)$$

$$\dot{\theta} = -\gamma_\theta (e_1 \xi(X) + \sigma |e_1| \theta), \quad \gamma_\theta > 0, \quad \sigma > \frac{1}{2} \quad (32)$$

그리고 (33)과 같은 Lyapunov 후보함수를 선정한다.

$$L = \frac{1}{2} e_1^2 + \frac{1}{2\gamma_\theta} \tilde{\theta}^T \tilde{\theta} + \frac{1}{2\gamma_\phi} \tilde{\phi}^2 \quad (33)$$

(33)에서 $\tilde{\phi}, \phi^*$ 는 (34), (35), (36)의 가정하에서 (37), (38)과 같이 정의된다[7].

$$\delta\delta(X) \leq c_1, \quad c_1 > 0 \quad (34)$$

$$|\Delta(x, n) - \Delta(x, n^*)| \leq c_2 |\tilde{\theta}| + c_3, \quad c_2 > 0, \quad c_3 > 0 \quad (35)$$

$$|d(t)| \leq \bar{d} \quad (36)$$

$$\tilde{\phi} = \phi - \phi^* \quad (37)$$

$$\phi^* = c_1 + c_2^2 + c_3 + \frac{\sigma}{2} |\theta^*|^2 + \bar{d} \quad (38)$$

그러면 (38)의 ϕ^* 정의식과 (32)의 $\sigma \geq \frac{1}{2}$, (30)의 $n_{ro} = \phi \operatorname{sgn}(e_1)$ 을 이용하면 e_1, θ, ϕ 의 변화에 따른 L 의 시간 미분을 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{L} &= -k_{11} e_1^2 + e_1 [\tilde{\theta}^T \xi(X) - \delta\delta(X) - \{\Delta(x, n) - \Delta(x, n^*)\} \\ &\quad - n_{ro} - d(t)] + \frac{1}{\gamma_\theta} \tilde{\theta}^T \dot{\tilde{\theta}} + \frac{1}{\gamma_\phi} \tilde{\phi} \dot{\tilde{\phi}} \\ &= -k_{11} e_1^2 + e_1 \tilde{\theta}^T \xi(X) + e_1 [-\delta\delta(X) - \{\Delta(x, n) \\ &\quad - \Delta(x, n^*)\} - n_{ro} - d(t)] + \frac{1}{\gamma_\theta} \tilde{\theta}^T \{-\gamma_\theta (e_1 \xi(X) \\ &\quad + \sigma |e_1| \theta)\} + \frac{1}{\gamma_\phi} \tilde{\phi} \dot{\tilde{\phi}} \\ &= -k_{11} e_1^2 - \sigma |e_1| \tilde{\theta}^T \theta + e_1 [-\delta\delta(X) - \{\Delta(x, n) \\ &\quad - \Delta(x, n^*)\} - d(t)] - e_1 n_{ro} + \frac{1}{\gamma_\phi} \tilde{\phi}^T \dot{\tilde{\phi}} \\ &\leq -k_{11} e_1^2 - \sigma |e_1| \tilde{\theta}^T \theta + |e_1| [c_1 + c_2 |\tilde{\theta}| + c_3 + \bar{d}] - e_1 n_{ro} \\ &\quad + \frac{1}{\gamma_\phi} \tilde{\phi} \dot{\tilde{\phi}} \\ &\leq -k_{11} e_1^2 - \frac{\sigma}{2} |e_1| |\tilde{\theta}|^2 + \frac{1}{4} |e_1| |\tilde{\theta}|^2 + |e_1| [c_1 + c_2^2 + c_3 \\ &\quad + \frac{\sigma}{2} |\theta^*|^2 + \bar{d}] - e_1 n_{ro} + \frac{1}{\gamma_\phi} \tilde{\phi} \dot{\tilde{\phi}} \\ &\leq -k_{11} e_1^2 - |e_1| \phi + |e_1| \phi^* + \frac{1}{\gamma_\phi} \tilde{\phi} \dot{\tilde{\phi}} \\ &= -k_{11} e_1^2 \end{aligned} \quad (39)$$

(33)과 (39)는 $|e_1|, |\theta|, |\phi|$ 가 유계인(bounded) 것을 보장한다. 또한 (28)로부터 \dot{e}_1 가 유계된다. 그리고 (39)의 양변을 적분

하면 (40)과 같다.

$$\int_0^{\infty} |e_1(t)|^2 dt \leq L(0) - L(\infty) < \infty \quad (40)$$

(40)으로 부터 $|e_1(t)| \in L_2$ 이고 Barbalat's Lemma [9]를 사용하면 $\lim_{t \rightarrow \infty} e_1(t) = 0$ 가 되어 속도 추종 제어가 이루어짐을 알 수 있다.

IV. 시뮬레이션

그림 4는 표 1의 파라미터를 갖는 보트에 대해 II, III 장에서 제안된 제어알고리즘을 이용하여 수행한 시뮬레이션 결과이다. $\psi_d(t)$ 와 $u_d(t)$ 는 Fossen [1]을 참고로 하여 표 1 파라미터값을 갖는 보트의 동특성식으로 부터 얻었으며 정속도 운항 중의 $u_d(t)$ 는 그림 4(b)와 같이 0.25 m/s가 되도록 하였다. 그림 4(a)에서 보트의 초기 위치는 (0, 5)이고 최종 위치는 (0, 200)이다. 그림의 보트는 초기 위치를 출발하여 점선으로 표시된 기준선을 따라 첫 번째 전환점 (80, 80)과 두 번째 전환점 (80, 130)을 지나 최종 목표 위치 (0, 200)에 잘 도착함을 알 수 있다.

그림 4(b)는 보트의 surge 속도 $u(t)$ 와 기준 속도의 궤적 $u_d(t)$ 를 보여주고 있는데 $u(t)$ 가 $u_d(t)$ 를 잘 추종함을 알 수 있고 전환점 (80, 80)과 전환점 (80, 130) 지점을 도착할 때에는 $u(t)$ 가 0으로 떨어졌다가 0.25 m/s로 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 최종 목표점 (0, 200)에 도달할 때의 속도는 0으로 감소되는 것을 알 수 있다.

그림 4(c)는 보트의 sway 속도 $v(t)$ 의 변화를 보여주고 있다. 출발점과 전환점들에서 $v(t)$ 의 변화가 생기지만 정속도 운전시와 도착시에는 $v(t)$ 가 0이 되는 것을 알 수 있다. 그림 4(d)는 보트 방향각 $\psi(t)$ 와 $\psi_d(t)$ 의 변화를 보여주고 있으며 $\psi(t)$ 가 $\psi_d(t)$ 를 잘 추종함을 알 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 동특성식의 파라미터 불확실성을 갖는 ASV의 속도 제어를 위한 적응 퍼지 제어를 제안하였다. 본 연구에서는 보트의 속도 제어를 위한 입력으로 추력을 사용하지 않고 스크류 프로펠러 회전수를 사용함으로써 스크류 회전수와 추력과의 관계식을 실험적으로 정확히 구해야 하는 어려움을 피할 수 있었다. 단, 이 경우 추력이 스크류 회전수의 비선형 함수인 관계로 스크류 회전수와 보트 속도 사이의 동특성식은 비어파인 비선형 함수 형태가 된다. 일반적으로 퍼지 제어기는 불확실성을 포함하는 비선형 계통의 제어에 장점을 발휘하며 따라서 본 연구에서는 Park 이 제안한 비어파인 비선형 계통을 위한 적응 퍼지 제어 계통을 도입하였다.

제안한 방법의 유용성을 확인하기 위하여 모델 보트에 대한 시뮬레이션 연구를 수행하였으며 시뮬레이션 결과 제안된 방법에 의해서 보트의 속도와 방향각이 만족할 만한 수준으로 제어됨을 확인할 수 있었다. 향후 본 연구에서 제안한 방식을 사용하여 실제 자율 이동 무인 보트를 제작함으로써 제안된 방식의 유용성을 실증할 계획이다.

참고문헌

- [1] T. I. Fossen, *Guidance and Control of Ocean Vehicles*, John Wiley and Sons Ltd., 1994.
- [2] T. I. Fossen, *Marine Control Systems*, Marine Cybernetics AS, 2002.
- [3] R. Skjetne, Øyvind N. Smogeli, and T. I. Fossen, "A nonlinear ship maneuvering model: identification and adaptive control with experiments for a model ship," *Modeling, Identification and Control*, vol. 25, no. 1, pp. 3-27, 2004.
- [4] K.-P. Lindegaard and T. I. Fossen, "Fuel-efficient rudder and propeller control allocation for marine craft: experiments with a model ship," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 11, no. 6, pp. 850-862, Nov. 2003.
- [5] R. Ghaemi, S. Oh, and J. Sun, "Path following of a model ship using model predictive control with experimental verification," *2010 American Control Conference*, Baltimore U.S.A., pp. 5236-5241, June-July 2010.
- [6] Y. Yang and C. Zhou, "Adaptive fuzzy control of ship autopilots with uncertain nonlinear systems," *Proc. of the 2004 IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent Systems, Singapore*, pp. 1323-1328, Dec. 2004.
- [7] J.-H. Park, G.-T. Park, S.-H. Kim, and C.-J. Moon, "Direct adaptive self-structuring fuzzy controller for nonaffine nonlinear systems," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 153, pp. 429-445, 2005.
- [8] L.-X. Wang, *Adaptive Fuzzy Systems and Control: Design and Stability Analysis*, Prentice-Hall Inc., 1994.
- [9] K. S. Narendra and A. M. Annaswamy, *Stable Adaptive Systems*, Prentice-Hall Inc., 1989.



박영환

1986년 고려대학교 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 석사. 1998년 동 대학원 박사. 1998년~현재 충주대학교 제어계측공학과 교수. 관심분야는 제어 이론, Autonomous Surface Vehicle.



이재경

1980년 서울대학교 기계공학과 졸업. 1982년 KAIST 석사. 1996년 동 대학원 박사. 1997년~현재 충주대학교 제어계측공학과 교수. 관심분야는 로봇릭스 및 자동화.