

# 무인잠수정의 T-S 퍼지 모델기반 경로점 유도제어

## T-S Fuzzy Model-based Waypoints-Tracking Control of Underwater Vehicles

김도완, 이호재\*, 서주노  
(Do wan Kim<sup>1</sup>, Ho Jae Lee<sup>2</sup>, and Joono Sur<sup>3</sup>)

<sup>1</sup>Hanbat National University

<sup>2</sup>Inha University

<sup>3</sup>Naval Academy

**Abstract:** This paper presents a new fuzzy model-based design approach for waypoints-tracking control of nonlinear underwater vehicles (UUVs) on a horizontal plane. The waypoints-tracking control problem is converted into the stabilization one for the error model between the given nonlinear UUV and the waypoints. By using the sector nonlinearity, the error model is modeled in Takagi-Sugeno's form. We then derive stabilization conditions for the error model in the format of linear matrix inequality. A numerical simulation is provided to illustrate the effectiveness of the proposed methodology.

**Keywords:** UUV (Underwater Vehicles), T-S (Takagi-Sugeno) fuzzy model, linear matrix inequality, waypoint-tracking control

### I. 서론

최근 무인잠수정(UUV: Underwater Vehicles)의 유도제어를 위한 다양한 제어기법들이 소개되었다[1-5]. 참고문헌 [1,2]에서는 비선형 무인잠수정의 선형화 모델에 기반한 유도제어 기법이 소개되었다. 그러나 이들은 전역 안정도를 보장하지 못하며 유도제어 성능도 동작점 부근에서만 보장되는 단점을 보인다. 이러한 단점을 극복하고자 리아푸노브(Lyapunov) 안정도이론에 기반한 유도제어기법들이 연구되기 시작하였다 [3-5]. 참고문헌 [3]에서는 슬라이딩모드 제어기법을 이용한 무인잠수정의 수직면 유도제어를 연구하였다. 또한 [4]는 후퇴기법(backstepping)을 이용한 수평면에서의 유도제어기 설계기법을 제안하였다. [5]에서도 후퇴기법을 사용하였으며 [4]와 달리 조류의 영향을 고려하였다. [3-5]에서 소개된 비선형 제어기는 [1,2]의 선형 제어기법과 달리 전역안정도를 보장하며 넓은 동작범위에서 우수한 유도제어 성능을 보장한다. 하지만 실제 제어신호를 생성하기 위해서는 많은 계산량을 요구되는 단점을 보인다.

한편 타카기-수게노(T-S: Takagi-Sugeno) 퍼지 모델기반 제어기법은 복잡한 비선형 시스템의 모델링에 매우 효과적이며 제어기의 구조가 단순하여 설계가 용이하다. 또한 여타 비선형 제어기법에 비하여 제어신호 구현에 필요한 계산량이 상대적으로 적다는 장점을 보인다. 다양한 형태의 비선형 시스템에 대해서 T-S 퍼지 모델기반 제어연구가 수행되었다[9-13].

그러나 아직까지 무인잠수정에 대한 퍼지 모델기반 제어연구는 [6-8]을 제외하면 전무한 실정이다. [6,7]에서는 무인잠수정의 비선형 안정도의 고려없이 퍼지논리를 이용한 기법을 제안하였다. [8]에서는 T-S 퍼지 모델기반 제어를 시도하였지만 모델링 오차가 존재하며 유도제어 문제가 아닌 안정화 문제만을 다루었다.

본 논문에서는 무인잠수정의 경로점 유도제어를 위한 새로운 기법을 소개한다. 핵심 발상은 경로점 유도제어 문제를 T-S 퍼지모델의 점근적 안정화문제로 해석한 것이다. 이를 위하여 비선형 무인잠수정의 위치와 경로점 간의 오차 모델을 유도한다. 모델의 간략화와 제어기 설계의 용이성을 위하여 퍼지 모델기반 비선형 제어기를 제안한다. 또한, [9]의 부채꼴 비선형성(sector nonlinearity) 기법을 이용하여 유도된 오차 모델에 대한 T-S 퍼지모델을 제시한다. 점근적 안정화 조건은 선형행렬부등식(linear matrix inequality)의 형태로 유도된다.

이어지는 다음 장은 무인잠수정의 동역학 및 T-S 퍼지 모델을 논의한다. III 장에서는 무인잠수정의 경로점 유도제어를 위한 새로운 제어기 설계기법을 제시하며 IV 장에서 모의실험을 통한 제안된 기법의 타당성을 검증한다. 마지막으로 본 논문은 V 장에서 결론으로 끝맺는다.

### II. 시스템

#### 1. 무인잠수정

무인잠수정의 수평면 운동모델은 다음의 운동학

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \cos(\psi)u - \sin(\psi)v \\ \dot{y} &= \sin(\psi)u + \cos(\psi)v \\ \dot{\psi} &= r \end{aligned} \quad (1)$$

및 동역학

$$\ddot{u} = \frac{m_{22}}{m_{11}}vr - \frac{X_u}{m_{11}}u + \frac{1}{m_{11}}F_u \quad (2)$$

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2011. 2. 20., 수정: 2011. 3. 10., 채택확정: 2011. 3. 29.

김도완: 한밭대학교 전기공학과(dowankim@hanbat.ac.kr)

이호재: 인하대학교 전자공학부(myhchi@inha.ac.kr)

서주노: 해군사관학교 기계조선공학과(joonosur@navy.ac.kr)

※ 본 연구는 국방과학기술연구소가 설립한 무인화 특화 연구센터(UV-22)와 산업기술연구회에서 시행한 협동 연구사업(생체 모방형 수중 로봇 개발)의 지원을 받아 수행되었음을 밝히며, 감사의 뜻을 전한다.

$$v = -\frac{m_{11}}{m_{22}}ur - \frac{Y_v}{m_{22}}v$$

$$r = \frac{m_{11} - m_{22}}{m_{33}}uv - \frac{N_r}{m_{33}}r + \frac{1}{m_{33}}F_r$$

으로 표현할 수 있다 [4,8]. 여기서  $(x, y, \psi)$ 는 잠수정의 지구 고정좌표계에서 위치 및 자세,  $(u, v, r)$ 은 잠수정의 동체좌표계에서 전후, 좌우 및 편향(yaw) 방향의 속도,  $m_{11} = m - X_u$ ,  $m_{22} = m - Y_v$ ,  $m_{33} = I_z - N_r$ ,  $(F_u, F_r)$ 는 제어입력,  $F_u$ 은 전진방향 추진력,  $F_r$ 은 편향 모멘트(moment)이다.

2. T-S 퍼지 모델

다음의 퍼지규칙을 고려하자.

$$R_i : \text{IF } z_1 \text{ is } \Gamma_{i1} \text{ and } \dots \text{ and } z_p \text{ is } \Gamma_{ip}$$

$$\text{THEN } \zeta = A_i \zeta + B_i \tau$$

여기서  $\zeta \in \mathbb{R}^n$ 은 상태변수,  $\tau \in \mathbb{R}^m$ 은 제어입력,  $R_i, i \in \mathcal{S}_Q = \{1, 2, \dots, q\}$ 는  $i$ 번째 퍼지 규칙,  $z_h, h \in \mathcal{S}_P = \{1, 2, \dots, p\}$ 는  $h$ 번째 전반부 변수,  $\Gamma_{ij}, (i, j) \in \mathcal{S}_Q \times \mathcal{S}_P$ 는  $i$ 번째 퍼지 규칙에서  $z_h$ 의 퍼지 집합을 의미한다. 중심값-평균 비퍼지화, 곱셈 추론, 싱글톤 퍼지화를 사용하면 퍼지 규칙의 전역 동특성은

$$\zeta = \sum_{i=1}^q \theta_i(z) A_i \zeta + B \tau \tag{3}$$

이 된다. 여기서

$$\theta_i(z) = \frac{\omega_i(z)}{\sum_{i=1}^q \omega_i(z)}$$

$$\omega_i(z) = \prod_{j=1}^p \Gamma_{ij}(z_j).$$

식 (3)에서  $\theta_i$ 는 다음 두 조건

$$\theta_i(z) \in \mathbb{R}_{[0,1]}, \quad \sum_{i=1}^q \theta_i(z) = 1$$

을 만족한다.

III. 주요 결과

본 논문에서 고려한 경로점 유도제어 문제는 다음과 같이 표현된다.

문제 1: 식 (1)과 (2)로 표현된 무인잠수정을 고려하자. 다음의 조건

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (x, y, \psi, u, v, r) = (x_r, y_r, 0, 0, 0, 0)$$

을 만족하도록  $(F_u, F_r)$ 을 결정하라. 여기서  $(x_r, y_r)$ 은 시불변 목표 경로점이다.

문제 1을 안정화 문제로 다루기 위해 다음의 변수

$$e_x = x - x_r$$

$$e_y = y - y_r \tag{4}$$

와 변환

$$s_1 = \cos(\psi)e_x + \sin(\psi)e_y$$

$$s_2 = -\sin(\psi)e_x + \cos(\psi)e_y \tag{5}$$

$$s_3 = \psi$$

을 고려하자. 식 (4), (5)와 성질  $e_x = x$  및  $e_y = y$ 을 이용하여 면 (1)은

$$s_1 = u + r s_2$$

$$s_2 = v - r s_1 \tag{6}$$

$$s_3 = r$$

이 된다. 식 (6)의 유도과정은 부록에 있다.

참고 1: 식 (5)로부터

$$\begin{bmatrix} e_x \\ e_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix}$$

이 성립하며 양변에 놈을 취하면

$$\left\| \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \end{bmatrix} \right\| \leq \left\| \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) \end{bmatrix} \right\| \left\| \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} \right\|$$

이 된다. 주목할 점은  $|\cos(\psi)| \leq 1$  과  $|\sin(\psi)| \leq 1$ 이 성립함으로

$$\left\| \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \end{bmatrix} \right\| \leq c \left\| \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} \right\|$$

을 만족하는  $t$ 에 독립인  $c \in \mathbb{R}_{>0}$ 는 항상 존재한다. 결국, 시간  $t \rightarrow \infty$ 인 경우  $(s_1, s_2) \rightarrow (0, 0)$ 이면  $(e_x, e_y) \rightarrow (0, 0)$ 을 의미함을 알 수 있다.

이제 문제 1은 다음의 안정화 문제로 다루어질 수 있다.

문제 2: 식 (2), (6)은 다음의 안정화 문제로 다루어질 수 있다. 다음의 조건

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (s_1, s_2, \psi, u, v, r) \rightarrow (0, 0, 0, 0, 0, 0)$$

을 만족하도록  $(F_u, F_r)$ 을 결정하라.

보조정리 1 [9]: 영역  $D \in \mathbb{R}^{n_z}, n_z \in \mathbb{N}$ 와  $\mathcal{B}_{\Delta_z} = \{z \in \mathbb{R}^{n_z} : \|z\| \leq \Delta_z\} \subset D, \Delta_z \in \mathbb{R}_{>0}$ 에서 정의된 연속시간 스칼라 함수  $f : D \rightarrow \mathbb{R}$ 을 고려하자. 만약  $a_1 \in \mathbb{R}_{> \sup_{z \in \mathcal{B}_{\Delta_z}} f(z)}$  과  $a_2 \in \mathbb{R}_{\leq \inf_{z \in \mathcal{B}_{\Delta_z}} f(z)}$ 에 대해서

$$\theta_1(z) = \frac{f(z) - a_2}{a_1 - a_2}, \quad \theta_2(z) = 1 - \theta_1(z) \tag{7}$$

와 같다면, 모든  $z \in \mathcal{B}_{\Delta_z}$ 에 대해서

$$f = \sum_{i=1}^2 \theta_i(z) a_i$$

이다. 여기서  $\sum_{i=1}^2 \theta_i(z) = 1$ 와  $\theta_i(z) \in \mathbb{R}_{[0,1]}$ 을 만족한다.

증명: 식 (7)로부터

$$\sum_{i=1}^2 \theta_i(z) a_i = \theta_1(z) a_1 + (1 - \theta_1(z)) a_2$$

$$= \theta_1(z) (a_1 - a_2) + a_2$$

$$= f(z)$$

이 성립함을 알 수 있다. 또한, 다음 성질들

$$\left. \begin{matrix} \sum_{i=1}^2 \theta_i(z) = 1, \\ a_1 > \sup_{z \in \mathcal{B}_{\Delta_z}} f(z) \\ a_2 \leq \inf_{z \in \mathcal{B}_{\Delta_z}} f(z) \end{matrix} \right\} \Rightarrow \theta_i(z) \in \mathbb{R}_{[0,1]}$$

이 만족된다.

명제 1:  $r \in \mathcal{B}_{\Delta_r} = \{r \in \mathbb{R} : \|r\| \leq \Delta_r\}$ ,  $\Delta_r \in \mathbb{R}_{>0}$ 에 대해서 다음 두 등식

$$r = \sum_{i=1}^2 \theta_i(r) a_i \quad (8)$$

은 성립한다. 여기서

$$\begin{aligned} \theta_1(r) &= \frac{r - a_2}{a_1 - a_2}, & \theta_2(r) &= 1 - \theta_1(r) \\ a_1 &= \sup_{r \in \mathcal{B}_{\Delta_r}} r & a_2 &= \inf_{r \in \mathcal{B}_{\Delta_r}} r. \end{aligned}$$

증명 보조정리 1을 이용하여 (8)이 만족함을 쉽게 보일 수 있다.

문제 2에 대한 본 논문이 제안한 효과적인 해결책을 다음 정리에 요약한다.

정리 1: 제어입력  $(F_u, F_r)$  을

$$F_u = -m_{22}vr + X_u u + m_{11}\tau_u \quad (9)$$

$$F_r = -(m_{11} - m_{22})uv + N_r r + m_{33}\tau_r \quad (10)$$

$$\tau = \sum_{i=1}^2 \theta_i(r) K_i \zeta \quad (11)$$

로 놓자. 여기서  $\tau = (\tau_u, \tau_r)$ 는 퍼지 제어입력이며

$$\zeta = [s_1 \quad s_2 \quad \psi \quad u \quad v \quad r]^T$$

이다. 모든  $i \in \mathcal{I}_2$ 에 대해서 다음의 선형행렬부등식

$$\text{He}\{A_i Q + B F_i\} \prec 0 \quad (12)$$

을 만족하는  $Q = Q^T \succ 0$ ,  $F_i$ 가 존재한다면, (2), (6), (9), (10), (11)로 구성된 페루프 시스템은 점근적으로 안정하다. 여기서  $\text{He}\{X\}$ 는  $X^T + X$ 의 줄임 표기법이며,

$$A_i = \begin{bmatrix} 0 & a_i & 0 & 1 & 0 & 0 \\ -a_i & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{m_{11}}{m_{22}}a_i & -\frac{Y_r}{m_{22}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

이다. 즉

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (x, y, \psi, u, v, r) \rightarrow (x_r, y_r, 0, 0, 0, 0)$$

이 만족된다. 이 때,  $K_i = F_i Q^{-1}$ 다.

증명: 식 (9), (10)을 (2)에 대입하면

$$\begin{aligned} u &= \tau_u \\ v &= -\frac{m_{11}}{m_{22}}ur - \frac{Y_v}{m_{22}}v \\ r &= \tau_r \end{aligned} \quad (13)$$

이 된다. 명제 1을 이용하여, 시스템 (6)과 (13)은 다음의 T-S 퍼지 모델

$$\dot{\zeta} = \sum_{i=1}^2 \theta_i(r) A_i \zeta + B \tau \quad (14)$$

로 변환할 수 있음을 알 수 있다. 식 (11)과 (14)를 이용하여 다음의 페루프 시스템

$$\dot{\zeta} = \sum_{i=1}^2 \theta_i(r) (A_i + B K_i) \zeta \quad (15)$$

을 구성할 수 있다. 식 (15)에 대한 리아푸노브(Lyapunov) 함수를 다음과 같이 정의하자:

$$V|_{(15)} = \zeta^T P \zeta \quad (16)$$

여기서  $P = P^T \succ 0$  다. 식 (15), (16), 합동변환(congruence transformation),  $Q = P^{-1}$ ,  $F_i = K_i P^{-1}$ 을 이용하면

$$\begin{aligned} V|_{(15)} &< 0 \\ &\Leftrightarrow \zeta^T P \zeta + \zeta^T P \zeta + < 0 \\ &\Leftrightarrow \sum_{i=1}^2 \theta_i(r) \zeta^T \text{He}\{P(A_i + B K_i)\} \zeta < 0 \\ &\Leftrightarrow \text{He}\{P(A_i + B K_i)\} \prec 0 \\ &\Leftrightarrow (12) \end{aligned}$$

이 만족함을 알 수 있다. 따라서 페루프 시스템은 점근적으로 안정하다.

#### IV. 모의실험

제안된 기법의 검증을 위해 무인잠수정 모델 (1), (2)에 대한 다음과 같은 경로점 유도제어 모의실험을 수행한다.

$$(x_r, y_r) = \begin{cases} (0, 0), & t = 0 \text{ s} \\ (100, 100), & 0 < t \leq 100 \text{ s} \\ (200, 100), & 100 \text{ s} < t \leq 200 \text{ s} \\ (100, 100), & 200 \text{ s} < t \leq 300 \text{ s} \\ (0, 100), & 300 \text{ s} < t \leq 400 \text{ s} \end{cases}$$

모의실험에 사용한 파라미터는 참고문헌 [4]로부터 차용하였으며 표 1에 제시한다. 정리 1을 이용하여, 다음의 제어 이득

$$K_1 = \begin{bmatrix} -0.7409 & 15.2158 & 0 \\ 0 & 0 & -1.3479 \\ & -0.9682 & 86.3616 & 0 \\ & 0 & 0 & -0.9746 \end{bmatrix}$$

$$K_2 = \begin{bmatrix} -0.7892 & -13.3139 & 0 \\ 0 & 0 & -1.3479 \\ & -0.9529 & -75.5706 & 0 \\ & 0 & 0 & -0.9746 \end{bmatrix},$$

을 계산하였다. 그림 1-6은  $a_1 = 8$ ,  $a_2 = -7$ , 그리고 초기상태  $(x(0), y(0), \psi(0), u(0), v(0), r(0)) = (0, 0, 0, 1, 1, -7)$ 일 때 제안된 경로점 유도제어기 (9), (10), (11)에 의한 무인잠수정 (1), (2)의 유도제어 시뮬레이션 결과를 보인다. 그림 1, 2에서는 무인잠수정이 목표한 경로점으로 잘 유도됨을 알 수 있다. 또한  $(x, y)$  이외의 상태변수  $(\psi_0, u_0, v_0, r_0)$ 는 그림 3-6에서 보듯이 0으로 점근적으로 수렴한다. 이러한 결과들로부터 제안된 제어기 (9), (10), (11)은 목표한 경로점 유도제어에 탁월한 성능을 가지고 있음을 알 수 있다.

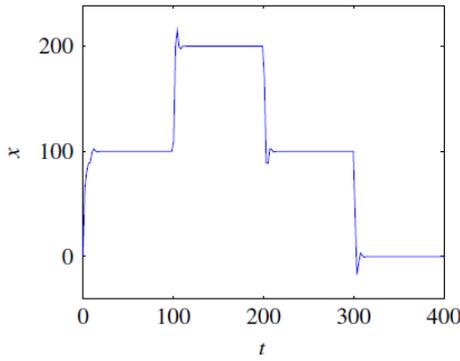


그림 1. 페루프 시스템의  $x$  에 대한 시간응답.  
Fig. 1. Time response of  $x$  in the closed-loop system.

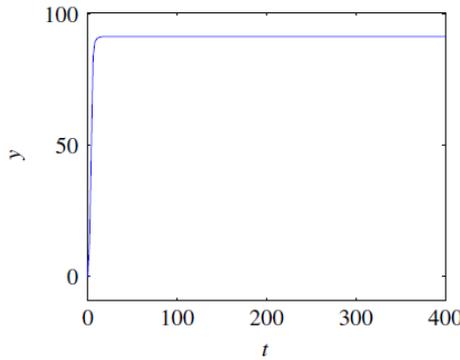


그림 2. 페루프 시스템의  $y$  에 대한 시간응답.  
Fig. 2. Time response of  $y$  in the closed-loop system.

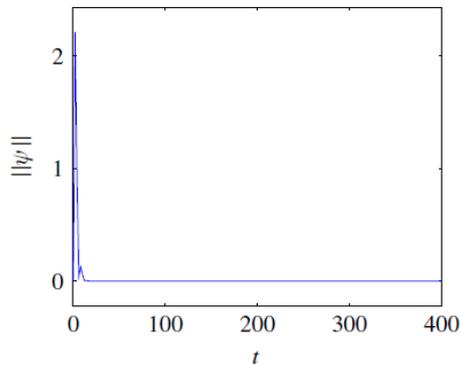


그림 3. 페루프 시스템의  $\psi$  에 대한 시간응답.  
Fig. 3. Time response of  $\psi$  in the closed-loop system.

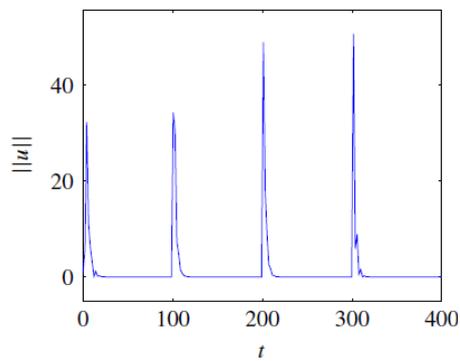


그림 4. 페루프 시스템의  $u$  에 대한 시간응답.  
Fig. 4. Time responses of  $u$  in the closed-loop system.

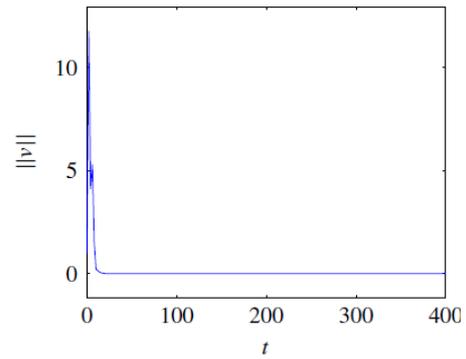


그림 5. 페루프 시스템의  $v$  에 대한 시간응답.  
Fig. 5. Time response of  $v$  in the closed-loop system.

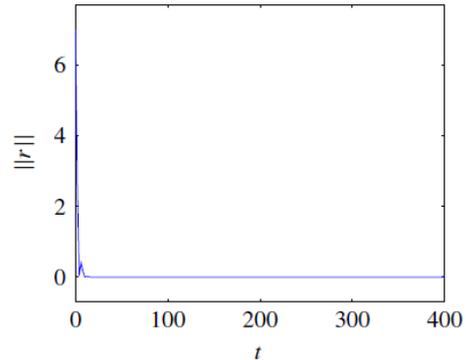


그림 6. 페루프 시스템의  $r$  에 대한 시간응답.  
Fig. 6. Time response of  $r$  in the closed-loop system.

**V. 결론**

본 논문에서는 무인잠수정의 경로점 유도제어를 위한 새로운 제어기 설계기법을 제안하였다. 주된 기여점은 무인잠수정 모델에 대한 퍼지 모델 유도 및 T-S 퍼지 모델기반 비선형 제어기 설계기법 개발에 있다. 마지막으로 모의실험을 통해서 제안된 기법이 경로점 유도제어에 탁월한 성능을 보임을 검증하였다.

**부록**

식 (5)의 양변을 미분하면

$$\begin{aligned} s_1 &= -\sin(\psi)\dot{\psi}e_x + \cos(\psi)\dot{e}_x + \cos(\psi)\dot{\psi}e_y + \sin(\psi)\dot{e}_y \\ s_2 &= -\cos(\psi)\dot{\psi}e_x - \sin(\psi)\dot{e}_x - \sin(\psi)\dot{\psi}e_y + \cos(\psi)\dot{e}_y \\ s_2 &= \dot{\psi} \end{aligned}$$

이 된다. 이때,  $\cos^2(\psi) + \sin^2(\psi) = 1$ d,  $e_x = x$ ,  $e_y = y$ , 및 (1)을 이용하여 (6)이 성립함을 보일 수 있다.

**참고문헌**

[1] T. I. Fossen, *Guidance and Control of Ocean Vehicles*. Wiley, New York, 1994.  
 [2] I. Kaminer, A. Pascoal, E. Hallberg, and C. Silvestre, "Trajectory tracking for autonomous vehicles: an integrated approach to guidance and control," *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, vol. 21, no. 1, pp. 29-38, Jan. 1998.  
 [3] L. Lapiere, "Robust diving control of an AUV," *Ocean Engineering*, vol. 36, no. 1, pp. 92-104, Jan. 2009.  
 [4] F. Repoulia and E. Papadopoulos, "Planar trajectory planning

and tracking control design for underactuated AUVs,” *Ocean Engineering*, vol. 34, pp. 1650-1667, Aug. 2007.

- [5] F. Y. Bi, Y. J. Wei, J. Z. Zhang, and W. Cao, “Position-tracking control of underactuated autonomous underwater vehicles in the presence of unknown ocean currents,” *IET Control Theory and Applications*, vol. 4, no. 11, pp. 2369-2380, Nov. 2010.
- [6] M. Livchitz, A. Abershitz, U. Soudak, and A. Kandel, “Development of an automated fuzzy-logic-based expert system for unmanned landing,” *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 93, no. 2, pp. 145-159, Jan. 1998.
- [7] D. Loebis, R. Sutton, J. Chudley, and W. Naeem, “Adaptive tuning of a Kalman filter via fuzzy logic for an intelligent AUV navigation system,” *Control Engineering Practice*, vol. 12, no. 12, pp. 1531-1539, Dec. 2004.
- [8] W. J. Chang, W. Chang, and H. H. Liu, “Model-based fuzzy modeling and control for autonomous underwater vehicles in the horizontal plane,” *Journal of Marine Science and Technology*, vol. 11, no. 3, pp. 155-163, Mar. 2003.
- [9] K. Tanaka and H. O. Wang, *Fuzzy Control Systems Design and Analysis: A Linear Matrix Inequality Approach*, New York: Wiley, 2001.
- [10] D. W. Kim, H. J. Lee, and M. Tomizuka, “Fuzzy stabilization of nonlinear systems under sampled-data feedback: an exact discrete-time model approach,” *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 18, no. 2, pp. 251-260, Apr. 2010.
- [11] D. W. Kim and H. J. Lee, “Stability connection between sampled-data fuzzy control systems with quantization and their approximate discrete-time model,” *Automatica*, vol. 45, no. 6, pp. 1518-1523, Jun. 2009.
- [12] D. W. Kim, J. B. Park, and Y. H. Joo, “Theoretical justification of approximate norm minimization method for intelligent digital redesign,” *Automatica*, vol. 44, no. 3, pp. 851-856, Mar. 2008.
- [13] D. W. Kim, J. B. Park, and Y. H. Joo, “Effective digital implementation of fuzzy control systems based on approximate discrete-time models,” *Automatica*, vol. 43, no. 10, pp. 1671-1683, Oct. 2007.



### 김도완

2002년 연세대학교 전기공학과(공학사). 2004년 연세대학교대학원 전기전자공학과(공학석사). 2007년 동 대학원 전기전자공학과(공학박사). 2008년 연세대학교 산업기술연구소 연구원 및 University of California at Berkeley, CA, USA 박사 후 과정. 2009년 연세대학교 전기전자공학과 BK 연구교수. 현재 국립한밭대학교 전기공학과 전임강사. 관심분야는 비선형 샘플치제어, 지능제어, 디지털 재설계.



### 이호재

1998년 연세대학교 전기공학과(공학사). 2000년 연세대학교대학원 전기컴퓨터공학과(공학석사). 2004년 동 대학원 전기전자 공학과(공학박사). 2005년 University of Houston, Houston, TX, USA 방문조교수. 현재 인하대학교 전자전기공학부 조교수. 관심분야는 비선형 샘플치제어, 편대비행 제어, 디지털 재설계.



### 서주노

1985년 서울대학교 기계공학과(공학사). 1989년 미 해군대학원 기계공학과(공학석사). 1997년 미국 캘리포니아대학(UCSB) 기계공학과(공학박사). 1997년 미 해군대학원 박사 후 과정. 현재 해군사관학교 기계조선공학과 교수. 관심분야는 무인잠수정 및 무인함정의 수학적 모델링, 비선형 제어기설계, 무인잠수정 항법, 무인시스템의 자율제어.