

무인 잠수정의 깊이 제어를 위한 T-S 퍼지 모델 기반 H_∞ 제어기 설계: 선형 행렬 부등식 접근법

Design of T-S Fuzzy Model Based H_∞ Controller for Diving Control of AUV: An LMI Approach

전성우* · 김도완* · 이호재**

Sung Woo Jun, Do Wan Kim[†] and Ho Jae Lee

*한밭대학교 전기공학과

**인하대학교 전자전기공학부

요 약

본 논문은 무인 잠수정(Autonomous underwater vehicles: AUVs)의 타카기-수게노 (Takagi-Sugeno: T-S) 퍼지 모델 기반 H_∞ 제어기 설계 기법을 제안한다. 설계 기법은 외란을 갖는 무인 잠수정의 깊이 제어 성능을 보장하는 안정성 있는 제어기 설계에 초점을 맞춘다. 비선형 무인 잠수정 시스템은 Sector nonlinearity 기법을 이용하여 T-S 퍼지 시스템으로 모델링된다. 리아푸노프(Lyapunov) 함수를 이용해 제어 성능을 보장하는 선형 행렬 부등식(linear matrix inequality: LMI) 형태의 H_∞ 제어기 설계 조건을 유도한다. 성공적인 무인 잠수정의 깊이 제어를 위해 선형 행렬 부등식에 심도각과 피치각의 제한 조건을 고려한다. 시뮬레이션을 통해 제안된 기법의 성능을 검증한다.

키워드 : 타카기-수게노(Takagi-Sugeno: T-S) 퍼지 모델, 리아푸노프(Lyapunov) 함수, 선형 행렬 부등식(linear matrix inequality: LMI), 깊이 제어, 무인 잠수정(autonomous underwater vehicles: AUVs)

Abstract

This paper presents a design technique of a Takagi-Sugeno (T-S) fuzzy-model-based H_∞ controller for autonomous underwater vehicles (AUVs). The design procedure aims to render the stabilizing controller which satisfies performance of the diving control for AUVs in the presence of the disturbance. A nonlinear AUV is modeled by the T-S fuzzy system through the sector nonlinearity. By using Lyapunov function, the sufficient conditions are derived to guarantee the performance of robust depth control in the format of linear matrix inequality (LMI). To succeed for diving control of AUV, we add the constraints on the diving and pitch angles in the LMI conditions. Through the simulation, we confirm the effectiveness of the proposed methodology.

Key Words : Takagi-Sugeno (T-S) fuzzy model, Lyapunov function, linear matrix inequality (LMI), depth control, autonomous underwater vehicles (AUVs)

1. 서 론

수중 탐사, 생태 환경 조사, 군사의 목적 등 무인 잠수정 (autonomous underwater vehicles: AUV)은 인간의 탑승 없이 자동 제어가 가능한 자유 수영 로봇이다. 하지만 무인 잠수정의 운동학 및 동역학은 강한 비선형 특성을 갖고 있어 제어에 어려움이 있다 [1].

접수일자: 2012년 1월 13일

심사(수정)일자: 2012년 1월 13일

게재확정일자 : 2012년 7월 17일

† 교신저자

이 논문은 2010년도 한밭대학교 교내학술연구비의 지원을 받았음.

최근까지 선형화 모델을 이용한 기법(linearized model) [1-3]과 슬라이딩 모드 제어 기법(sliding mode control technique) [4-5], 적응 제어 기법(adaptive control technique) [6-7] 등 무인 잠수정의 깊이 제어를 위한 많은 제어 기법들이 개발되었다. [1-3]에서 소개된 선형화 모델을 이용한 기법은 디자인 과정이 간단하다는 장점이 있지만 제어 성능이 동작점 근처에서만 보장되어 전역 안정도를 보장하지 못하는 단점이 있다. 이에 반해 [4-5]에서 소개된 슬라이딩 모드 제어 기법과 [6-7]에서 소개된 적응 제어 기법은 전역 안정도를 보장하는 장점이 있지만 실제 신호 구현을 위해서는 복잡한 계산 과정을 필요로 하는 단점이 있다. 또한 실제 무인 잠수정의 활동 장소인 해양 환경의 특성을 고려하지 않아 외란이 있는 환경에서의 취약점이 있다.

한편 타카기-수게노 (Takagi-Sugeno: T-S) 퍼지 모델 기반 제어 기법은 전역 안정도를 보장하며, 복잡한 비선형 시스템에 대해 간단하면서도 효과적인 성능을 갖는다

[8-16]. 참고문헌 [8]에서는 T-S 퍼지 모델에 의해 표현된 비선형 퍼지 시스템을 안정화시키는 제어를 병렬분산보상(parallel distributed compensation: PDC)과 선형행렬부등식(linear matrix inequality: LMI)을 이용하여 설계하는 기법을 소개하였다. 또한 퍼지 시스템에 대한 안정성뿐만 아니라 외부 외란 감쇠 성능을 갖는 H_∞ 제어기 설계 기법이 개발되어 다양한 비선형 모델에 적용되었다 [10], [17-18]. 최근까지 무인 잠수정의 심도 제어[15]와 수평면 제어[16]에 대한 퍼지 모델 기반 제어 기법이 적용되었다. 하지만 [15]와 [16]은 무인 잠수정의 해양 활동 특성상 가져야 할 외란에 대한 강인성을 포함하지 않았다. 따라서 본 논문에서는 무인 잠수정의 심도 제어에 T-S 퍼지 모델 기반 H_∞ 제어 기법을 적용하여 외란에 대한 강인 안정성을 만족시킬 수 있다고 기대한다.

본 논문은 무인 잠수정의 깊이 제어를 위한 T-S 퍼지 모델 기반 H_∞ 제어기 설계 기법을 다루도록 한다. 설계 기법은 외란이 포함된 무인 잠수정의 깊이 제어 성능을 보장하는 안정성 있는 제어기 설계에 초점을 맞춘다. 이를 위해 비선형 무인 잠수정 시스템은 Sector nonlinearity 기법을 이용하여 T-S 퍼지 시스템으로 모델링된다. 리아푸노프(Lyapunov) 함수를 이용해 제어 성능을 보장하는 선형 행렬 부등식 형태의 제어기 설계 조건을 유도한다. 외란이 추가된 무인 잠수정의 성공적인 깊이 제어를 위해 LMI에 심도각과 피치각의 제한 조건을 추가하였다. 마지막으로 시뮬레이션을 통해 제안된 기법의 성능을 검증한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 무인 잠수정 시스템과 T-S 퍼지 모델을 소개한다. 3장에서는 외란이 추가된 무인 잠수정의 깊이 제어를 위한 새로운 제어기 설계 기법과 피치각 및 심도각의 제한 조건을 제시한다. 4장에서는 시뮬레이션을 통한 제안된 제어기 설계 기법의 성능을 검증한다. 5장에서는 결론을 제시한다.

2. 시스템

2.1 무인 잠수정

본 논문은 그림 1과 같이 6자유도 운동(six degree-of-freedom)을 하는 무인 잠수정을 고려한다. 무인 잠수정의 수직면 모델은 다음의 운동학 및 동역학으로 표현된다 [1]:

$$\begin{aligned} I_{yy}\dot{q} + (I_{xx} - I_{zz})rp + M_q\dot{q} - M_{q|q}|q| + m[z_g(\dot{u} - vr + wq) - x_g(\dot{w} - uq + vp)] &= M_{HS} + M_{u|u}|u| + M_w\dot{w} \\ &+ M_{uq}uq + M_{vp}vp + M_{rp}rp + M_{uw}uw + M_{uu\delta_s}u_0^2\delta_s, \\ \dot{\theta} &= q\cos\phi - r\sin\phi, \\ \dot{z} &= -u\sin\theta + v\cos\theta\sin\phi + w\cos\theta\cos\phi, \end{aligned}$$

만약 수직 축 운동만을 고려하면 운동 모델은 그림 2와 같이 표현할 수 있다. 따라서 피치각 속도 q , 피치각 θ , 깊이 z , 전진 속도 u_0 를 제외한 나머지 항을 0으로 가정하고 외란을 고려한다면 다음과 같은 운동학 및 동역학으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} I_{yy}\dot{q} + m x_g u_0 q &= M_q \dot{q} + M_{uq} u_0 q + M_{uu\delta_s} u_0^2 \delta_s +, \\ \theta &= q, \\ \dot{z} &= -u_0 \sin\theta, \end{aligned} \tag{1}$$

여기서 I_{yy} , m , x_g , u_0 , M_q , M_{uq} , $M_{uu\delta_s}$ 는 잠수정 파라미터,

δ_s 는 심도각, w 는 외란이며, $w \in L_2[0, t_f]$ 이다.

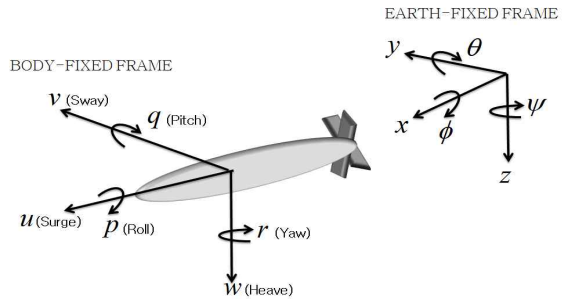


그림 1. 선체 고정 좌표계와 지표 고정 좌표계
Fig. 1. Body-fixed frame and Earth-fixed frame

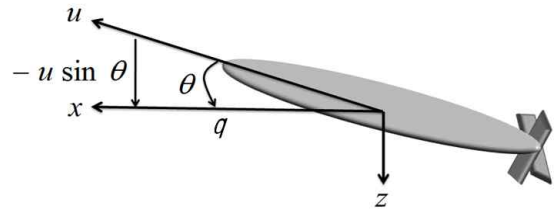


그림 2. 수직면 모델
Fig. 2. A vertical plane model

2.2 T-S 퍼지 모델

다음의 T-S 퍼지 규칙을 고려하자,

$$\begin{aligned} \text{Rule } i : \text{ IF } z_1 \text{ is } \Gamma_{i1} \text{ and } \dots \text{ and } z_p \text{ is } \Gamma_{ip}, \\ \text{ THEN } \dot{x} = A_i x + B_1 u + B_2 w, \end{aligned}$$

여기서 $x \in \mathbb{R}^n$ 은 상태 벡터, $u \in \mathbb{R}^m$ 은 제어 입력 벡터, $w \in \mathbb{R}^m_w$ 는 외란 벡터, Rule i , $i \in \varphi_r = \{1, 2, \dots, r\}$ 는 i 번째 퍼지 규칙, z_h , $h \in \varphi_p = \{1, 2, \dots, p\}$ 는 h 번째 전방부 변수, Γ_{ij} , $(i, j) \in \varphi_r \times \varphi_p$ 는 i 번째 퍼지 규칙에서 z_h 의 퍼지 집합을 의미한다. 따라서 퍼지 시스템은

$$\dot{x} = \sum_{i=1}^r h_i(z) (A_i x + B_1 u + B_2 w) \tag{2}$$

와 같이 나타낼 수 있다, 여기서

$$h_i(z) = \frac{\omega_i(z)}{\sum_{i=1}^r \omega_i(z)}, \quad \omega_i(z) = \prod_{j=1}^p \Gamma_{ij}(z_j).$$

식 (2)에서 h_i 는 다음을 만족한다:

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

병렬 분산 보상 기법[13]을 이용하여 다음의 제어기를 가정한다:

$$u = \sum_{i=1}^r h_i(z) K_i x \tag{3}$$

식 (2)와 (3)을 이용하여 다음의 폐루프 시스템을 얻을 수 있다:

$$\dot{x} = \sum_{i=1}^r h_i(z) ((A_i + B_1 K_i) x + B_2 w) \tag{4}$$

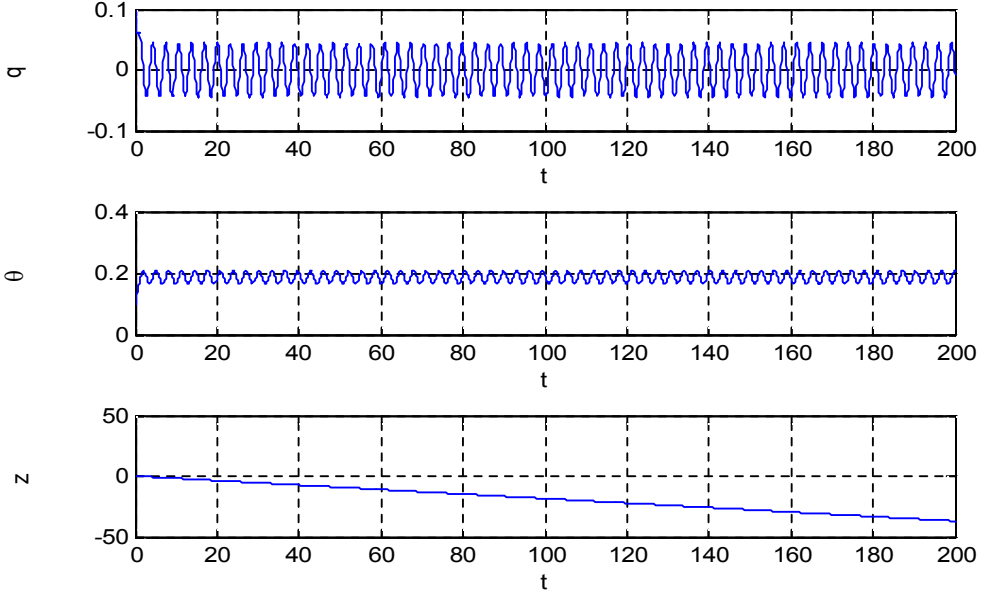


그림 3. 제어가 되지 않은 상태 벡터에 대한 시간응답
Fig. 3. Response of state vectors of the uncontrolled

본 논문에서 고려하는 T-S 퍼지 시스템 (4)에 대한 H_∞ 제어는 다음 정의를 따른다.

정의 1 [10]: 상수 $\gamma \in \mathbb{R}_{>0}$ 에 대해서, T-S 퍼지 시스템 (4)가 다음의 두 가지 조건을 만족할 경우 H_∞ 제어 성능을 만족한다.

- 1) $w(t) = 0$ 일 때, (4)는 점근적 안정하다.
- 2) 초기값 $x(0) = 0$ 에 대하여, 시스템 (4)는

$$\int_0^{t_f} x^T S x dt \leq \gamma^2 \int_0^{t_f} w^T w dt$$

를 만족한다. 여기서 $S = S^T > 0$.

3. 주요 결과

이번 절에서 우리는 제한 조건과 외란이 추가된 무인 잠수정을 T-S 퍼지 시스템으로 모델링하고 퍼지 시스템의 점근적 안정화 문제를 다루도록 하겠다.

본 논문에서 고려하는 깊이 문제는 다음과 같이 표현된다:

- i) $\lim_{t \rightarrow \infty} (q, \theta, z) = (0, 0, z_d)$
- ii) $\|\delta_s\|_2 \leq \mu$
- iii) $\|\theta\|_2 \leq \lambda$

여기서 $z_d \in \mathbb{R}_{>0}$ 는 목표 깊이 값, $\mu \in \mathbb{R}_{>0}$, 그리고 $\lambda \in \mathbb{R}_{>0}$ 이다.

깊이 제어 문제를 안정화 문제로 접근하기 위해 새로운

변수 $z_e = z - z_d$ 를 이용하여 (1)을 정리하면

$$\begin{aligned} \dot{q} &= \left(\frac{M_{uq}u_0 - mx_g u_o}{I_{yy} - M_q} \right) q + \left(\frac{M_{uu\delta_s} u_0^2}{I_{yy} - M_q} \right) \delta_s + \left(\frac{1}{I_{yy} - M_q} \right) w, \\ \dot{\theta} &= q, \\ \dot{z}_e &= \dot{z} = \frac{-u_0 \sin \theta}{\theta} \end{aligned} \quad (5)$$

이 되고,

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{q} \\ \dot{\theta} \\ \dot{z}_e \end{bmatrix}$$

라 정의하면 (5)는

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \begin{bmatrix} \frac{M_{uq}u_0 - mx_g u_o}{I_{yy} - M_q} & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-u_0 \sin \theta}{\theta} & 0 \end{bmatrix} x \\ &+ \begin{bmatrix} \frac{M_{uu\delta_s} u_0^2}{I_{yy} - M_q} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_s + \begin{bmatrix} \frac{1}{I_{yy} - M_q} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} w \end{aligned} \quad (6)$$

으로 나타낼 수 있다. (6)에서 Sector nonlinearity 기법[8]

을 통해 비선형 항인 $\frac{-u_0 \sin \theta}{\theta}$ 은

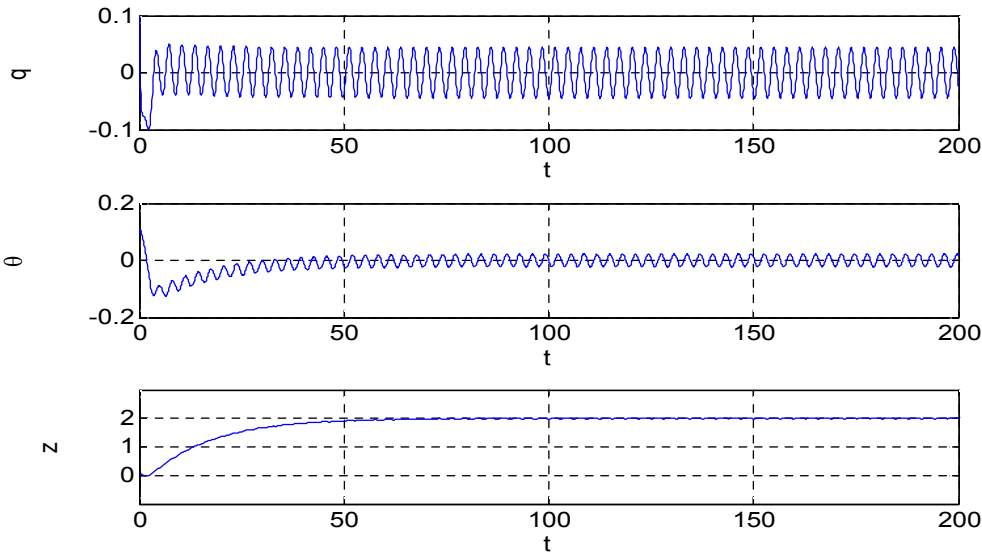


그림 4. 경우 1의 상태 벡터에 대한 시간응답
Fig. 4. Response of state vectors in the case 1

$$\frac{-u_0 \sin \theta}{\theta} = h_1(\theta)a_1 + h_2(\theta)a_2$$

으로 모델링한다. 이때, $\sum_{i=1}^2 h_i(\theta) = 1$ 과 $h_i(\theta) \in \mathbb{R}_{[0,1]}$ 의 성

질을 이용하여

$$h_1(\theta) = \frac{\frac{-u_0 \sin \theta}{\theta} - a_2}{a_1 - a_2},$$

$$h_2(\theta) = 1 - h_1(\theta),$$

을 얻을 수 있다. 여기서

$$a_1 = \max_{\theta \in \mathbb{R}_{[-\lambda, \lambda]}} \frac{-u_0 \sin \theta}{\theta}, a_2 = \min_{\theta \in \mathbb{R}_{[-\lambda, \lambda]}} \frac{-u_0 \sin \theta}{\theta}.$$

따라서 T-S 퍼지 규칙은

Rule1 : IF θ is h_1
THEN $\dot{x} = (A_1 + B_1 K_1)x + B_2 w,$

Rule2 : IF θ is h_2
THEN $\dot{x} = (A_2 + B_1 K_2)x + B_2 w$

으로 나타낼 수 있다. 여기서

$$A_1 = \begin{bmatrix} \frac{M_{uq}u_0 - mx_g u_0}{I_{yy} - M_q} & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & a_1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} \frac{M_{uq}u_0 - mx_g u_0}{I_{yy} - M_q} & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & a_2 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} \frac{M_{uu\delta_s} u_0^2}{I_{yy} - M_q} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

결국, (2)와 (3)의 T-S 퍼지 페루프 시스템은

$$\dot{x} = \sum_{i=1}^2 h_i(\theta)((A_i + B_1 K_i)x + B_2 w) \quad (7)$$

와 같이 구성된다.

H_∞ 외란 감쇠 성능을 가지는 깊이 제어기 설계를 위해 시스템 (5)에 대한 리아프노프(Lyapunov) 함수를 다음과 같이 정의하자:

$$V|_{(\tau)} = x^T P x, \quad (8)$$

여기서 $P = P^T > 0$.

식 (8)의 양변을 미분하면

$$\dot{V}|_{(\tau)} = \dot{x}^T P x + x^T P \dot{x} \quad (9)$$

와 같고 (9)에 식 (7)을 대입하면

$$\begin{aligned} \dot{V}|_{(\tau)} &= \sum_{i=1}^2 h_i(\theta)((A_i + B_1 K_i)x + B_2 w)^T P x \\ &\quad + x^T P((A_i + B_1 K_i)x + B_2 w), \quad (10) \\ &= \sum_{i=1}^2 h_i(\theta) \begin{bmatrix} x \\ w \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \phi_i(\cdot)^T \\ B_2^T P \quad 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ w \end{bmatrix} \end{aligned}$$

를 구할 수 있다. 여기서

$$\phi_i = (PA_i + PB_1 K_i)^T + (PA_i + PB_1 K_i)$$

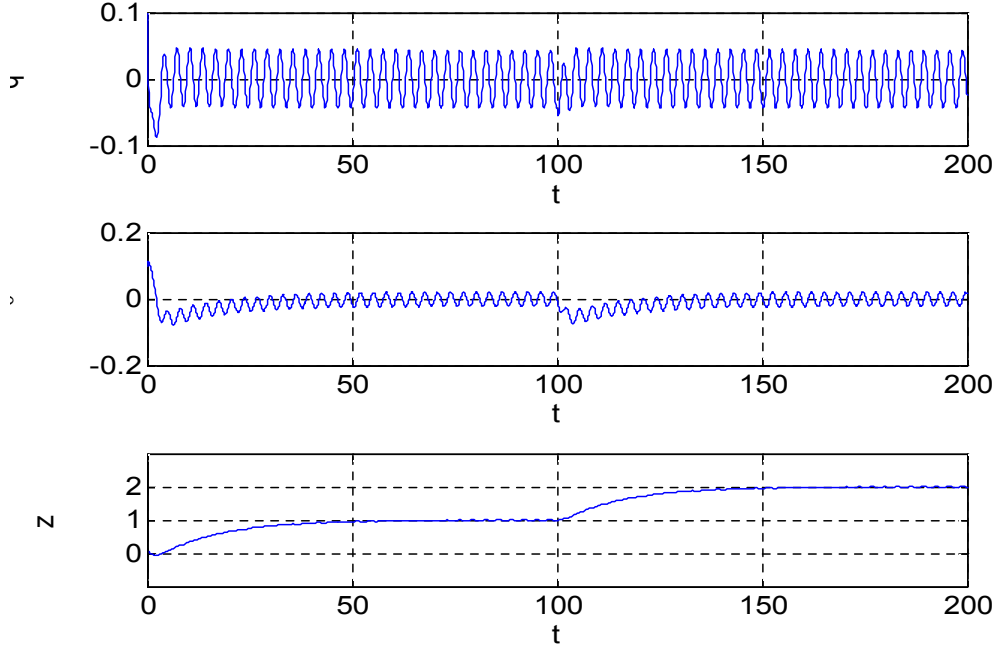


그림 5. 경우 2의 상태 벡터에 대한 시간응답
Fig. 5. Response of state vectors in the case 2

이고, $(\cdot)^T$ 는 대칭행렬의 전치된 요소이다. 정의 1에서 제시한 H_∞ 외란 감쇠 성능을 보장하기 위해 (10)은 다음과 같이 표현 할 수 있다:

$$\dot{V}|_{(7)} = \sum_{i=1}^2 h_i(\theta) \begin{bmatrix} x \\ w \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \phi_i + S (\cdot)^T \\ B_2^T P \quad -\gamma^2 I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ w \end{bmatrix} - \sum_{i=1}^2 h_i(\theta) x^T S x + \gamma^2 w^T w,$$

여기서 $S = PRP$, $R = R^T > 0$ 이다. $\text{diag}\{P^{-1}, I\}$ 을 통한 합동변환(congruence transformation)과 $Q = P^{-1}$, $F_i = K_i P^{-1}$ 을 이용하여, 선형행렬부등식

$$\begin{bmatrix} \psi_i (\cdot)^T \\ B_2^T - \gamma^2 I \end{bmatrix} < 0 \quad (11)$$

이 만족하면

$$\dot{V}|_{(7)} \leq -x^T S x + \gamma^2 w^T w \quad (12)$$

을 보장함을 알 수 있다, 여기서

$$\psi_i = (A_i Q + B_1 F_i)^T + (A_i Q + B_1 F_i) + R.$$

이 때, (12)의 양변을 0부터 tf 까지 적분하면

$$V(t_f) - V(0) \leq - \int_0^{t_f} x^T S x dt + \gamma^2 \int_0^{t_f} w^T w dt$$

이 되고 $V(t_f) > 0$ 과 $x(0) = 0$ 을 이용하면

$$\int_0^{t_f} x^T S x dt \leq \gamma^2 \int_0^{t_f} w^T w dt$$

이 성립함을 알 수 있다. 또한 (12)에서 $w = 0$ 일 때 $S > 0$ 이므로

$$\dot{V}|_{(7)} < -x^T S x < 0$$

을 만족한다. 결국, 선형행렬부등식 (11)을 만족한다면 시스템(7)는 정의 1에서 제시한 H_∞ 외란 감쇠 성능을 가지며 점근적 안정화 된다.

초기 상태 $x(0)$ 가 존재하고 $w = 0$ 일 때, 선형행렬부등식

$$\begin{bmatrix} -1 & x(0)^T \\ x(0) & -Q \end{bmatrix} \leq 0, \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} -Q & F_i^T \\ F_i & -\mu^2 I \end{bmatrix} \leq 0, \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} -Q & QC^T \\ CQ & -\lambda^2 I \end{bmatrix} \leq 0, \quad (15)$$

을 만족한다면 $\|\delta_s\|_2 \leq \mu$ 와 $\|\theta\|_2 \leq \lambda$ 이 보장된다 [14], 여기서 $C = [0 \ 1 \ 0]$.

요약하면, 선형행렬부등식 (11), (13), (14), (15)를 만족하는 $Q = Q^T > 0$, $R = R^T > 0$, F_i 가 존재한다면 (7)은 $\|\delta_s\|_2 \leq \mu$ 와 $\|\theta\|_2 \leq \lambda$ 을 보장하는 동시에 H_∞ 외란 감쇠 성능을 가지고 점근적 안정화 된다.

참고 1: H_∞ 제어기 설계 조건은 선형행렬부등식으로 표현된다. 선형행렬부등식의 해는 LMI tool box를 이용하여 쉽게 구할 수 있다. 결국 LMI가 존재한다면 퍼지 제어기(7)의 이득은 $K_i = F_i Q^{-1}$ 이다.

4. 시뮬레이션

목표 깊이 값은 다음과 같이 두 가지 경우를 가정하였다:

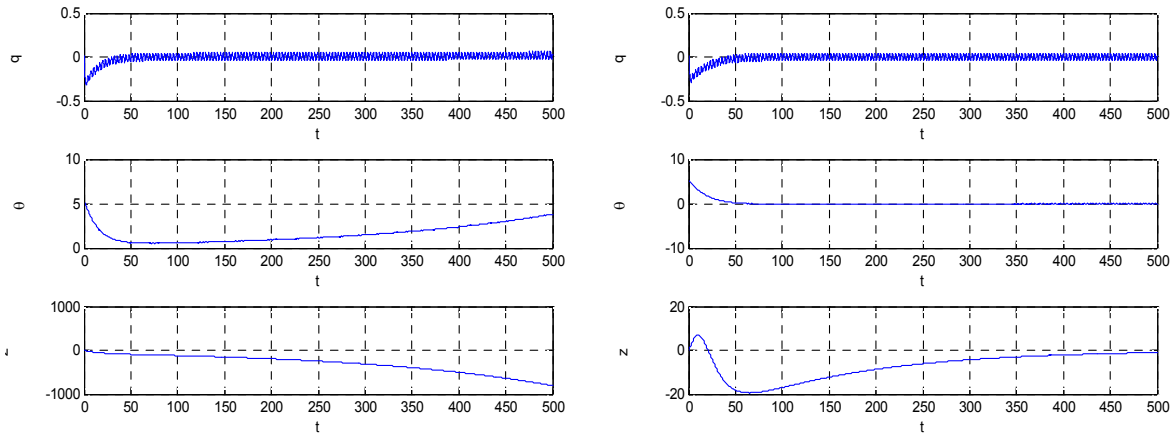


그림 6. 선형화 모델 기반 제어기와 제안된 T-S 퍼지 제어기 비교

Fig. 6. A comparison of a linearized model based controller with a proposed T-S fuzzy controller

경우 1: $z_d = 2$,
 경우 2: $z_d = \begin{cases} 1, & 0s < t \leq 100s \\ 2, & 100s < t \leq 200s \end{cases}$

표 1. 무인 잠수정 파라미터 [1]
 Table 1. Parameters of AUV

파라미터	값
I_{yy}	3.45 kgm ²
M_q	-4.88 kgm ²
M_{uq}	-2.00 kgm/rad
u_0	1.00 m/s
$M_{uu\delta_s}$	-6.15 kg/rad
m	30.5 kg

시뮬레이션에 사용한 REMUS 무인 잠수정의 파라미터[1]는 표 1에 나타나있다.

심도각 및 피치각의 제한 값은 다음과 같다:

$$\mu = 60^\circ, \quad \lambda = 30^\circ.$$

비선형 항의 최대값과 최소값인 a_1 과 a_2 는 각각 $a_1 = -0.5, a_2 = -1$ 으로, H_∞ 상수 γ 는 0.98, 그리고 외란 w 는 다음과 같이 설정하였다:

$$w = \sin(2t).$$

실험 결과 다음의 행렬 P 와 제어 이득을 얻을 수 있다:

$$P = \begin{bmatrix} 1.4359 & 1.9968 & -0.1163 \\ 1.9968 & 7.2636 & -0.3858 \\ -0.1163 & -0.3858 & 0.1211 \end{bmatrix},$$

$$K_1 = [0.8312 \quad 2.1873 \quad -0.1202],$$

$$K_2 = [0.8361 \quad 2.2153 \quad -0.1320].$$

그림 3은 제어가 되지 않은 무인 잠수정 시스템을 나타낸다. 그림 4-5는 무인 잠수정 시스템에 제안된 심도 제어 기법을 적용한 결과를 보여준다. 그림 4는 경우 1일 때의 시스템 응답을 나타내고 그림 5는 경우 2일 때의 시스템 응답을 나타낸다. 모든 경우의 시뮬레이션에서 q 와 θ 의 시간 응답은 0에 수렴함을 알 수 있고 z 는 목표 깊이 값에 도달

하는 것을 알 수 있다. 그림 6은 선형화 모델을 이용한 제어기와 제안된 T-S 퍼지 모델의 성능 비교이다. 실험으로 얻은 선형화 모델 기반 제어기의 제어 이득은 다음과 같다:

$$K = [0.0716 \quad 0.1550 \quad 0.0008].$$

T-S 퍼지 제어기가 선형 제어기보다 보다 넓은 안정도 범위를 갖는다는 것을 증명하기 위해 θ 의 초기값을 5로 설정하였다. 그 결과 선형화 모델 기반 제어기는 발산하는 결과를 얻은 반면 T-S 퍼지 제어기는 0에 수렴하는 결과를 얻었다.

이러한 결과를 토대로 본 논문이 제안한 외란을 고려한 비선형 무인 잠수정에 대한 T-S 퍼지 모델 기반 H_∞ 제어 기법이 탁월한 성능을 가지고 있음을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문은 무인 잠수정의 깊이 제어를 위한 T-S 퍼지 모델 기반 H_∞ 제어기 설계 기법을 제안하였다. Sector nonlinearity 기법을 통해 T-S 퍼지 시스템으로 모델링 된 비선형 무인 잠수정 시스템은 리아푸노프 함수를 통해 LMI 형태의 H_∞ 제어기 설계 조건을 유도하였고 시뮬레이션을 통해 제안된 기법의 성능을 검증하였다.

참고 문헌

- [1] T. Prestero, "Verification of a six-degree of freedom simulation model for the REMUS autonomous underwater vehicle," *Masters Thesis, Department of Ocean Engineering and Mechanical Engineering, MIT, USA, 2001.*
- [2] T. I. Fossen, *Guidance and Control of Ocean Vehicles.* Wiley, New York, 1994.
- [3] B. Jalving, "The NDRE-AUV flight control system," *Ocean Engineering*, vol. 19, no. 4, pp. 497-501, 1994.
- [4] D. Yoerger and J. Slotine, "Robust trajectory control of underwater vehicles," *Ocean*

- Engineering*. vol. 10, no. 4, pp. 462-470, 1985.
- [5] U. Demirci and F. Kerestecioglu, "A re-configuring sliding-mode controller with adjustable robustness," *Ocean Engineering*. vol. 31, no. 13, pp. 1669-1682, 2003.
- [6] J. H. Li and P. M. Lee, "Design of adaptive nonlinear controller for depth control of an autonomous underwater vehicle," *Ocean Engineering*. vol. 32, no. 17-18, pp. 2165-2181, 2005.
- [7] K. D. Do, J. Pan, and Z. P. Jiang, "Robust and adaptive path following for underactuated autonomous underwater vehicles," *Oceanic Engineering*, vol. 31, no. 16, pp. 1967-1997, 2005.
- [8] K. Tanaka and H. O. Wang, "Fuzzy Control Systems Design and Analysis: A Linear Matrix Inequality Approach," *New York: Wiley*, 2001.
- [9] H. J. Lee, J. B. Park, and G. Chen, "Robust fuzzy control of nonlinear systems with parametric uncertainties," *IEEE Trans. fuzzy syst.*, vol. 9, no. 2, pp. 369-379, 2001.
- [10] X. Liu and Q. Zhang, "Approaches to quadratic stability conditions and H_∞ control designs for T-S fuzzy systems," *IEEE Trans. fuzzy syst.*, vol. 11, no. 6, pp. 830-839, 2003.
- [11] 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 Trans. fuzzy syst.*, pp. 251-260, vol. 18, no. 2, 2010.
- [12] 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, 2009.
- [13] H. O. Wang, K. Tanaka, and M. Griffin, "Parallel distributed compensation of nonlinear systems by Takagi-Sugeno fuzzy model," *Fuzzy Sys.*, vol. 2, pp. 531-538, 1995.
- [14] K. Tanaka, T. Ikeda, H. O. Wang, "Fuzzy regulators and fuzzy observers: relaxed stability conditions and LMI-based designs," *Fuzzy Sys.*, vol. 6, no. 2, pp. 250-265, 1998.
- [15] 전성우, 김도완, 이호재, "무인 잠수정의 심도 제어를 위한 T-S 퍼지 모델 기반 제어기 설계", *한국지능시스템학회 논문지*, vol. 21, no. 3, pp. 302-306, 2011.
- [16] 김도완, 이호재, 서주노, "무인잠수정의 T-S 퍼지 모델기반 경로점 유도제어", *제어·로봇·시스템학회 논문지*, vol. 17, no. 6, pp. 526-530, 2011
- [17] Z. Han and G. Feng, "State feedback H_∞ controller design of fuzzy dynamic systems using LMI techniques," *IEEE Trans. fuzzy syst.*, vol. 1, pp. 538-544, 1998.
- [18] K. R. Lee, E. T. Jeung and H. B. Park, "Robust fuzzy H_∞ control for uncertain nonlinear systems via state feedback : an LMI approach," *Fuzzy Sys.*, vol. 120, no. 1, pp. 3-134, 2001.

저 자 소 개



전성우(Sung Woo Jun)

2011년 : 한밭대 전기공학과(공학사).
2011년~현재 : 동 대학원 전기공학과 석사과정

관심분야 : T-S 퍼지 시스템, 퍼지 모델링, 무인 잠수정
Phone : 042-821-1614
Fax : 042-821-1614
E-mail : swjun23@gmail.com



김도완(Do Wan Kim)

2002년 : 연세대학교 기계전자공학부 (공학사)
2004년 : 연세대학교대학원 전기전자공학과 (공학석사)
2007년 : 동 대학원 전기전자공학과 (공학박사)
2008년 : University of California, Berkeley 박사후과정

2009년 : 연세대학교 전기전자공학과 BK 연구교수
2010년~2012년 : 국립한밭대학교 전기공학과 전임강사
2012년~현재 : 국립한밭대학교 전기공학과 조교수

관심분야 : 비선형 디지털 제어, 무인자율주행 제어, 지능 제어, 디지털 재설계.
Phone : 042-821-1097
Fax : 042-821-1097
E-mail : dowankim@hanbat.ac.kr



이호재(Ho Jae Lee)

1998년 : 연세대학교 전기공학과(공학사)
2000년 : 연세대학교대학원 전기컴퓨터 공학과(공학석사)
2004년 : 동 대학원 전기전자공학과(공학박사).
2005년 : University of Houston, Houston 방문조교수

2006년~2012년 : 인하대학교 전자전기공학부 조교수
2012년~현재 : 인하대학교 전자전기공학부 부교수

관심분야 : 비선형 샘플치 제어, 편대비행 제어, 디지털 재설계
Phone : 032-860-7425
Fax : 032-860-7425
E-mail : mylchi@inha.ac.kr