

무인잠수정의 퍼지제어

Fuzzy Control of Underwater Robotic Vehicles

이원창 · 강근택

W. Lee and G. Kang

Key Words : Underwater Robotic Vehicles(무인잠수정), Vehicle Dynamics(잠수정 동력학), Fuzzy Controller(퍼지제어기), Fuzzy Model(퍼지모델), Robustness(강인성)

Abstract : Underwater robotic vehicles(URVs) have been an important tool for various underwater tasks such as pipe-lining, data collection, hydrography mapping, construction, maintenance and repairing of undersea equipment, etc because they have greater speed, endurance, depth capability, and safety than human divers. As the use of such vehicles increases, the vehicle control system is one of the most critical subsystems to increase autonomy of the vehicle. The vehicle dynamics are nonlinear and their hydrodynamic coefficients are often difficult to estimate accurately. It is desirable to have an intelligent vehicle control system because the fixed-parameter linear controller such as PID may not be able to handle these changes promptly and result in poor performance. In this paper we described and analyzed a new type of fuzzy model-based controller which is designed for underwater robotic vehicles and based on Takagi-Sugeno-Kang(TSK) fuzzy model. The proposed fuzzy controller: 1) is a nonlinear controller, but a linear state feedback controller in the consequent of each local fuzzy control rule; 2) can guarantee the stability of the closed-loop fuzzy system; 3) is relatively easy to implement. Its good performance as well as its robustness to parameter changes will be shown and compared with those of the PID controller by simulation.

1. 서 론

최근 퍼지집합 이론을 제어 문제에 적용하기 위한 많은 연구가 진행되었다. 시스템의 정확한 동력학 모델을 얻기 어려울 때 퍼지집합 이론은 기존의 모델링과 제어에 대한 하나의 대안을 제시한다¹⁾. 퍼지시스템의 특징은 1) 인간의 경험을 쉽게 집적할 수 있다는 것과 2) 퍼지논리가 소속함수, 규칙, 함의 연산자, 그리고 비퍼지화에 의해 비선형 함수 관계를 제공한다는 것이다^{2,3)}. 문헌상의 대부분의 퍼지 제어기는 시스템에 대한 정확한 모델이 없이 언어적 규칙들에 의해 구성되고, 이러한 접근 방식의 약점은 퍼지제어 시스템의 설계와 해석에 관한 체계적 방법이 없다는 것이다. 많은 규칙들로 이루어지는 복잡한 시스템의 경우 퍼지집합들의 많은 파라미터들을 경험적으로 결정해야 하고, 페루프 시스템을 해석하는 것은 쉬운 일이 아니다.

본 논문에서는 새로운 타입의 퍼지제어기를 설계하기 위해 퍼지집합과 퍼지추론에 근거를 둔 시스템 동력학의 수학적 퍼지모델을 사용한다⁴⁻⁶⁾. 이 퍼지모델은 결론부가 퍼지집합이 아니라 선형방정식인 퍼지 규칙들의 집합으로 이루어진다. 이러한 타입의 퍼지모델은 흔히 Takagi-Sugeno-Kang (TSK) 퍼지모델이라 한다. TSK 퍼지모델의 각 규칙은 그 전제부에서 서술하는 퍼지 부공간(subspace)에서의 선형 입출력 관계를 표현하며, TSK 퍼지모델이 어떤 연속 실수함수도 어느 정도까지 정확하게 근사화할 수 있는 것으로 알려져 있다⁷⁾. 더욱이 이 접근 방식의 이점은 그 해석이 간단하고 적은 노력으로 모델의 구조를 얻을 수 있다는 것이다. 또한 최근에는 TSK 퍼지모델에 근거한 퍼지제어기 설계법에 관해서 활발한 연구가 진행되었다⁸⁻¹¹⁾. 그러나 이들은 모두 각 퍼지 규칙의 결론부에 상수항을 포함하지 않는 특수한 TSK 퍼지모델에 그 초점을 두고 있고, 비선형 시스템을 상수항이 없는 퍼지 규칙들로 이루어진 TSK 퍼지모델로 표현하는 것은 매우 어려운 일이다. 본 논문에서는 상수항을 포함하는

접수일 : 1998년 8월 7일

이원창, 강근택 : 부경대학교 전자공학과

일반적 TSK 퍼지모델을 다루며, 이에 대한 퍼지제어기 설계를 위한 알고리즘을 제시한다. 제안된 TSK 퍼지제어기는 기본적으로 비선형 제어기이며 전체 페루프 시스템의 안정성을 보장할 수 있다.

위에서 언급했던 것처럼, 퍼지제어 시스템은 불확실한 동력학 모델이나 시스템에 대한 정보가 부족한 비선형 시스템의 제어에 적합하다. 따라서 이러한 퍼지제어를 동력학이 비선형적이고 불확실한 무인잠수정(underwater robotic vehicle : URV)의 제어에 응용하였다. 무인잠수정은 해저 건설, 데이터 수집, 해양 지도 작성, 해저 장비의 유지 및 보수 등 해저에서의 다양한 작업에 이용되고 있으며, 이러한 무인 잠수정의 사용이 증가함에 따라, 보다 자율성을 갖는 잠수정의 개발에 대한 요구도 증가하고 있다. 잠수정의 제어 시스템은 이를 위한 매우 중요한 부분중의 하나이다. 많은 연구자들에 의해 논의되었듯이^{12,13)}, 잠수정의 동력학은 비선형적이고 그들의 수력학적 계수들은 종종 정확히 추정하기가 매우 어려우며, 무엇보다도 어떤 작업을 하기 위해 잠수정은 모양과 무게가 다양한 부하를 다룰 필요가 있다. 동작 중의 가변적인 부하는 잠수정의 무게중심과 부력중심 뿐만 아니라 잠수정의 총질량을 변화시킨다. 그러므로, PID 제어기와 같은 기존의 선형 제어기로는 이러한 변화에 즉각적으로 대처할 수 없으며, 따라서 만족스러운 성능을 얻기 어렵다. 무인잠수정에 대한 최근의 연구들로 Yeoger와 Slotine에 의한 슬라이딩 모드 제어기¹⁴⁾, Goheen과 Jefferys에 의한 다변수 자기동조제어기¹⁵⁾, Cristi등에 의한 적응 슬라이딩 모드 제어¹⁶⁾, Yuh에 의한 신경망 제어기¹⁷⁾ 등이 있으며, Kato 등은 잠수정에 대한 정확한 모델 없이, 언어적 규칙에 근거를 둔 퍼지논리 제어기를 설계하였다¹⁸⁾. 본 논문에서는 무인잠수정의 제어를 위해 TSK 퍼지모델에 근거한 제어기를 설계하고 기존의 선형 제어기에 대한 TSK 퍼지제어기의 우수성을 제시한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 2장에서 TSK 퍼지모델에 근거한 새로운 형태의 퍼지제어기의 설계법을 서술한다. 다음 3장에서 무인잠수정에 대한 TSK 퍼지모델과 그 모델에 근거한 제어기를 설계하고 4장에서 시뮬레이션 결과를 제시한 후, 마지막으로 5장에서 결론을 서술한다.

2. TSK 퍼지제어기의 설계

이 단락에서는 TSK 퍼지모델에 근거한 페루프 퍼지 시스템의 안정성을 보장할 수 있는 퍼지제어기를 제안한다. TSK 퍼지모델이 비선형적이므로

제안된 퍼지제어기가 비선형인 것은 당연하다. 그러나 TSK 퍼지모델의 결론부가 선형이기 때문에 현대 제어 이론의 설계 기법을 퍼지제어기의 설계에 그대로 응용할 수 있다. TSK 퍼지모델에 근거한 제어기는 TSK 퍼지모델과 같은 수의 규칙을 가지며 그 전체부 또한 같다. 퍼지모델에 근거한 제어기의 가장 중요한 특징은 그 결론부 구조가 선형 상태 궤환 제어기라는 것이다.

2.1 TSK 퍼지모델의 상태 공간 표현

단일 입출력의 연속 시스템을 기술하는 TSK 퍼지모델은 다음과 같은 퍼지 규칙들로 이루어진다.

$$R^i : \text{ if } z_1 \text{ is } F_1^i, z_2 \text{ is } F_2^i, \dots, z_m \text{ is } F_m^i \\ \text{ then } \frac{d^n y^i}{dt^n} = a_0^i + a_1^i y + a_2^i \frac{dy}{dt} + \dots \quad (1) \\ + a_n^i \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + b_1^i u$$

여기서, 상태 변수들을 $x_1 = y, x_2 = \frac{dy}{dt}, \dots,$

$x_n = \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}}$ 로 선택하면 식(1)은 다음과 같이 결론부가 상태방정식인 규칙으로 변환할 수 있다.

$$R^i : \text{ IF } z_1 \text{ is } F_1^i, z_2 \text{ is } F_2^i, \dots, z_m \text{ is } F_m^i \\ \text{ THEN } \dot{\mathbf{x}}^i = A^i \mathbf{x} + \mathbf{b}^i u + \mathbf{d}^i \quad (2) \\ y = \mathbf{c} \mathbf{x}$$

여기서,

$$A^i = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ a_1^i & a_2^i & a_3^i & \dots & a_n^i \end{bmatrix}, \quad \mathbf{b}^i = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ b_1^i \end{bmatrix}, \\ \mathbf{d}^i = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ a_0^i \end{bmatrix}, \quad \mathbf{c} = [1 \ 0 \ \dots \ 0]$$

이고 상태 벡터 \mathbf{x} 는 다음과 같이 추론된다.

$$\dot{\mathbf{x}} = \sum_{i=1}^k w^i(z) \dot{\mathbf{x}}^i / \sum_{i=1}^k w^i(z) \quad (3)$$

$$w^i(z) = \prod_{j=1}^m F_j^i(z_j) \quad (4)$$

여기서 k 는 규칙의 수이고 $F_j^i(z_j)$ 는 퍼지집합 F_j^i 에 대한 z_j 의 멤버쉽값이다. 두 표현식(1)과 (2)가 같다는 것은 쉽게 확인할 수 있다.

2.2 극점 배치법에 의한 퍼지제어기 설계

TSK 퍼지모델에 근거한 퍼지제어기는 비선형 제어기이며, 그 결론부가 상태 궤환 제어기인 TSK 퍼지 규칙들로 이루어진다. 우리는 시간이 무한히 흘렀을 때 모든 상태들이 점근적으로 0에 수렴하도록 폐루프 퍼지 시스템의 모든 극점을 원하는 어떤 곳에도 위치시킬 수 있으며, 따라서 이 퍼지제어기는 폐루프 시스템의 안정성을 보장할 수 있다.

TSK 퍼지모델에 대한 퍼지제어기의 i 번째 규칙은 다음과 같이 주어진다.

$$C^i: \text{ IF } z_1 \text{ is } F_1^i, z_2 \text{ is } F_2^i, \dots, z_m \text{ is } F_m^i \text{ THEN } u^i = -g^i x + g_0^i \quad (5)$$

퍼지제어 규칙 (5)들로부터 제어 입력 u 를 추론하는 방법은 일반적인 퍼지 시스템의 추론식(3)과는 약간 다르다.

정리 1: 상태 천이 행렬 Φ 의 고유치가 원하는 폐루프 시스템의 극점일 때, 상태 궤환 이득 벡터 g^i 와 스칼라량 g_0^i 가 다음 식

$$\Phi = A^i - b^i g^i \quad (6)$$

$$b^i g_0^i = -d^i \quad (7)$$

에 의해 결정되고, 제어 입력 u 가 다음 조건에 의해 추론된다면 폐루프 퍼지 시스템의 동작은 설계자가 원하는 상태 천이 행렬 Φ 를 갖는 선형 시스템의 동작과 같다.

$$\sum_{i=1}^k w^i(z) b^i u = \sum_{i=1}^k w^i(z) b^i u^i \quad (8)$$

증명 :

식(5) - (8)에 의해 제어되는 폐루프 퍼지 시스템은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \frac{\sum_{i=1}^k w^i(z) \dot{x}^i}{\sum_{i=1}^k w^i(z)} \\ &= \frac{\sum_{i=1}^k w^i(z) (A^i x + d^i) + \sum_{i=1}^k w^i(z) b^i u^i}{\sum_{i=1}^k w^i(z)} \\ &= \frac{\sum_{i=1}^k w^i(z) (A^i - b^i g^i) x}{\sum_{i=1}^k w^i(z)} \quad (9) \\ &= \Phi x \end{aligned}$$

이로써 폐루프 퍼지 시스템 (9)의 구조가 선형 시스템이라는 것은 명백하다. 상태 천이 행렬 Φ 의 고유치가 모두 음의 실수부를 가지도록 선택한다면 식 (9)의 모든 평형 상태는 점근적으로 안정하다. ■

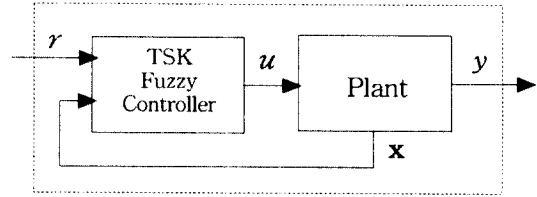


Fig. 1 Block diagram of the fuzzy control system

한편, 단일 입력 단일 출력 시스템이 TSK 퍼지 시스템으로 모델링 될 때, 상태 천이 행렬의 구조는

$$\Phi = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ \phi_1 & \phi_2 & \phi_3 & \dots & \phi_n \end{bmatrix} \quad (10)$$

과 같고 상태 궤환 이득 벡터 g^i , 스칼라량 g_0^i 그리고 제어 입력 u 는 다음에 의해 결정될 수 있다.

$$g_j^i = (a_j^i - \phi_j) / b_1^i \quad (11)$$

$$g_0^i = -d^i / b_1^i \quad (12)$$

$$u = \frac{\sum_{i=1}^k w^i(z) b_1^i u^i}{\sum_{i=1}^k w^i(z) b_1^i} \quad (13)$$

2.3 적분 제어

대상 시스템과 그 퍼지모델 사이에 모델링 오차가 존재하거나 대상 시스템에 지속적인 외란이 가해진다면 정상상태 오차가 발생하게 된다. 이 경우 선형 제어에서와 마찬가지로 정상상태 오차를 없애기 위한 적분 제어를 적용할 수 있다. 다음과 같이 상태 벡터를 정의하면

$$x_a = \begin{bmatrix} x_I \\ x \end{bmatrix}, \quad \dot{x}_I = y = cx \quad (14)$$

퍼지모델 (3)은 식(15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} R^i: \text{ IF } z_1 \text{ is } F_1^i, z_2 \text{ is } F_2^i, \dots, z_m \text{ is } F_m^i \\ \text{ THEN } \dot{x}_a^i = A_a^i x_a + b_a^i u + d_a^i \\ y = c_a x_a \end{aligned} \quad (15)$$

여기서,

$$A_a^i = \begin{bmatrix} 0 & c \\ 0 & A^i \end{bmatrix}, \quad b_a^i = \begin{bmatrix} 0 \\ b^i \end{bmatrix}, \quad d_a^i = \begin{bmatrix} 0 \\ d^i \end{bmatrix},$$

$c_a = [0 \ c]$ 이다. 식(15)에 대한 퍼지제어기는 식 (5) - (8)에 서술된 것과 같은 방법으로 설계할 수 있다.

3. 무인잠수정의 퍼지모델 및 제어기

무인잠수정의 동력학에는 수력학적인 힘, 추진기의 힘, 중력과 부력 등에 의한 다양한 외력과 토오크가 존재한다. Yuh¹²⁾와 Fossen¹³⁾ 등에 의해 무인잠수정의 동력학에 대한 상세한 기술이 이루어졌으며, 잠수정의 동력학 모델은 다음 식으로 표현된다.

$$M(\mathbf{x}) \ddot{\mathbf{x}} + A(\dot{\mathbf{x}}) \dot{\mathbf{x}} + \mathbf{h}(\mathbf{x}) = \mathbf{F} \quad (16)$$

여기서 $\mathbf{x} \in R^6$ 는 잠수정 좌표계에서의 위치와 방향벡터이며; $M \in R^{6 \times 6}$ 는 관성행렬이고, $A \in R^{6 \times 6}$ 는 유체운동, drag force, 토오크에 의해 주행체에 가해지는 힘과 토오크와 관련된 관성 속도항을 갖는 모든 비선형 동력학 요소를 나타내는 행렬이다. 또한 $\mathbf{h} \in R^6$ 는 중력과 부력을 포함하는 벡터이며;

$\mathbf{F} \in R^6$ 는 추진기에 의해 생성되는 힘과 토오크를 표현하는 벡터이다. 그림 2는 무인잠수정의 좌표계를 나타내고 있다.

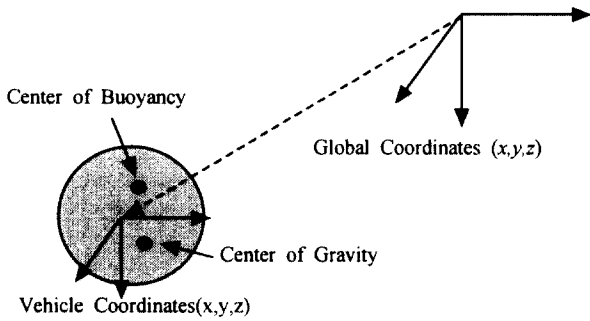


Fig. 2 Coordinate system of an underwater vehicle

3.1 ODIN의 동력학 모델

본 논문에서는 하와이 대학교에서 개발된¹⁹⁾ 자율주행 무인잠수정(autonomous underwater robotic vehicle)인 Omni-Directional Intelligent Navigator (ODIN)의 깊이와 피치 운동에 대한 동력학 모델을 사용한다. 이는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} \alpha(m - z_{w'}) & -mx_c \\ -\alpha mx_c & (I_y - M_q) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{z} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} \alpha^2 z_{ww} |w| & -mz_c q \\ mz_c q & m_{qq} |q| \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ q \end{bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} (\rho V - mg) \cos \theta \\ (x_c mg - x_b \rho V) \cos \theta + (z_c mg - z_b \rho V) \sin \theta \end{bmatrix} \\ & = \begin{bmatrix} \beta F_z \\ \gamma T \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{z} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ q \end{bmatrix} \quad (18)$$

식(17)에서의 시스템 파라미터들의 수치는 다음과 같다. $m = 145 \text{ kg}$, $z_{w'} = 0.675$, $I_y = 0.418$, $M_q = 3.594$, $z_{ww} = 116.96$, $m_{qq} = 4.2034$, $\rho V = 1421.65$, $g = 9.8$, $\alpha = 0.305$, $\beta = 4.45$, $\gamma = 1.35725$, 무게중심 $(x_c, z_c) = (0, 0)$, 부력중심 $(x_b, z_b) = (0, 0)$.

3.2 ODIN의 TSK 퍼지모델

식(19)와 (20)과 같이 ODIN의 깊이와 피치 운동의 TSK 퍼지모델을 구하였다. Fig. 3과 4는 각각 전제부 변수가 \dot{z} 과 θ 인 깊이 운동의 소속함수와 전제부 변수가 θ 인 피치 운동의 소속함수를 보인다. 깊이 운동의 TSK 퍼지모델은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} R_1^1: & \text{ IF } \dot{z} \text{ is } V_1 \text{ and } \theta \text{ is } T_1 \\ & \text{ THEN } \ddot{z} = a_0^1 + a_1^1 \dot{z} + a_2^1 \ddot{z} + b_1^1 F_z + c^1 \theta \\ R_2^1: & \text{ IF } \dot{z} \text{ is } V_1 \text{ and } \theta \text{ is } T_2 \\ & \text{ THEN } \ddot{z} = a_0^2 + a_1^2 \dot{z} + a_2^2 \ddot{z} + b_1^2 F_z + c^2 \theta \\ R_3^2: & \text{ IF } \dot{z} \text{ is } V_2 \text{ and } \theta \text{ is } T_1 \\ & \text{ THEN } \ddot{z} = a_0^3 + a_1^3 \dot{z} + a_2^3 \ddot{z} + b_1^3 F_z + c^3 \theta \\ R_4^2: & \text{ IF } \dot{z} \text{ is } V_2 \text{ and } \theta \text{ is } T_2 \\ & \text{ THEN } \ddot{z} = a_0^4 + a_1^4 \dot{z} + a_2^4 \ddot{z} + b_1^4 F_z + c^4 \theta \end{aligned} \quad (19)$$

여기서

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} a_0^1 & a_1^1 & a_2^1 & b_1^1 & c^1 \\ a_0^2 & a_1^2 & a_2^2 & b_1^2 & c^2 \\ a_0^3 & a_1^3 & a_2^3 & b_1^3 & c^3 \\ a_0^4 & a_1^4 & a_2^4 & b_1^4 & c^4 \end{bmatrix} \\ & = \begin{bmatrix} -0.019 & 0.022 & -0.009 & 0.094 & -0.022 \\ 0.000 & -0.010 & -0.015 & 0.101 & -0.028 \\ 0.003 & 0.032 & -0.062 & 0.097 & 0.047 \\ 0.000 & 0.003 & -0.023 & 0.101 & 0.012 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

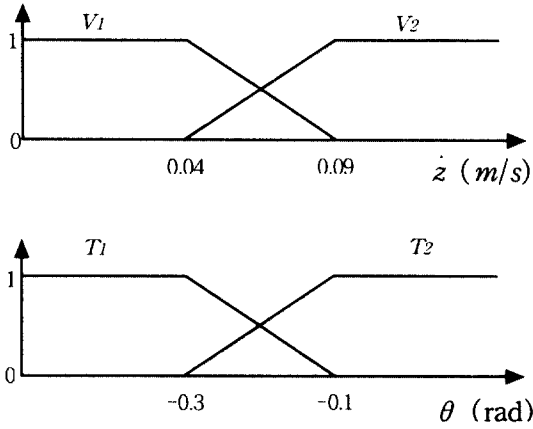


Fig. 3 Membership functions for the premise of the fuzzy model of the depth motion with (a) premise variable \dot{z} and (b) premise variable θ

피치 운동에 대한 TSK 퍼지모델은 다음과 같이 주어진다.

$$R_{\theta}^1: \text{ IF } \theta \text{ is } O_1 \text{ THEN } \ddot{\theta} = \bar{a}_0^{-1} + \bar{a}_1^{-1}\theta + \bar{a}_2^{-1}\dot{\theta} + \bar{b}_1^{-1}T \quad (20)$$

$$R_{\theta}^2: \text{ IF } \theta \text{ is } O_2 \text{ THEN } \ddot{\theta} = \bar{a}_0^{-2} + \bar{a}_1^{-2}\theta + \bar{a}_2^{-2}\dot{\theta} + \bar{b}_1^{-2}T$$

$$\begin{bmatrix} \bar{a}_0^{-1} & \bar{a}_1^{-1} & \bar{a}_2^{-1} & \bar{b}_1^{-1} \\ \bar{a}_0^{-2} & \bar{a}_1^{-2} & \bar{a}_2^{-2} & \bar{b}_1^{-2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.006 & 0.000 & 0.068 & -0.315 \\ 0.000 & 0.000 & -0.067 & -0.315 \end{bmatrix}$$

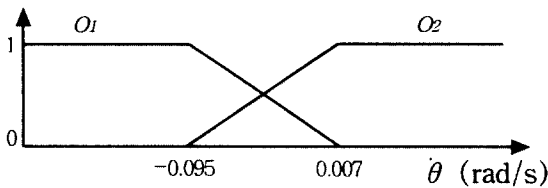


Fig. 4 Membership functions for the premise of the fuzzy model of the pitch motion with premise variable $\dot{\theta}$

3.3 ODIN의 TSK 퍼지제어기

이 단락에서는 ODIN의 깊이와 피치 운동이 각각 원하는 궤적을 추적하도록 하는 TSK 퍼지제어기를 설계한다. 먼저 다음과 같이 상하 운동의 TSK 퍼지모델의 결론부를 상태 공간에서 표현한다.

$$R_z^i: \quad \dot{\mathbf{z}}_a^i = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & a_1^i & a_2^i \end{bmatrix} \mathbf{z}_a + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ b_1^i \end{bmatrix} F_z^i + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ d^i \end{bmatrix} \quad (21)$$

여기서, 상태벡터 \mathbf{z}_a 는 $\mathbf{z}_a = [\tilde{z}_I \ \tilde{z} \ \dot{\tilde{z}}]^T$,

$\tilde{z} = z - z_r$, $\tilde{z}_I = \int \tilde{z} dt$ 이고, $i=1, \dots, 4$, 스칼라

량 $d^i = a_0^i + a_1^i z_r + a_2^i \dot{z}_r - \ddot{z}_r + c^i \theta$, 그리고 z_r 은 원하는 잠수정 깊이의 궤적이다. 이 퍼지모델에 대한 TSK 퍼지제어기의 i 번째 규칙은 다음과 같이 설계된다.

$$C_z^i: F_z^i = -\mathbf{g}^i \mathbf{z}_a + g_0^i \quad (22)$$

여기서 상태 반환 이득 벡터 $\mathbf{g}^i = [g_1^i \ g_2^i \ g_3^i]$ 와 스칼라량 g_0^i 는 페루프 퍼지 시스템의 극점이 $-4 \pm j4, -5$ 가 되도록 다음과 같이 선택한다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{g}^1 \\ \mathbf{g}^2 \\ \mathbf{g}^3 \\ \mathbf{g}^4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1702.13 & 766.19 & 138.20 \\ 1584.16 & 712.77 & 128.56 \\ 1649.48 & 742.60 & 133.38 \\ 1584.16 & 712.90 & 128.49 \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$g_0^i = -d^i/b_1^i$$

피치 운동의 퍼지모델 (21)의 결론부 상태방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$R_{\theta}^i: \quad \dot{\boldsymbol{\theta}}_a^i = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & \bar{a}_1^i & \bar{a}_2^i \end{bmatrix} \boldsymbol{\theta}_a + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \bar{b}_1^i \end{bmatrix} T^i + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \bar{d}^i \end{bmatrix} \quad (24)$$

여기서 $i=1, 2$, 상태 벡터는 $\boldsymbol{\theta}_a = [\ddot{\theta}_I \ \ddot{\theta} \ \dot{\ddot{\theta}}]^T$,

$\ddot{\theta} = \theta - \theta_r$, $\ddot{\theta}_I = \int \ddot{\theta} dt$ 이고 \bar{d}^i 는 스칼라량으

로 $\bar{d}^i = \bar{a}_0^i + \bar{a}_1^i \theta_r + \bar{a}_2^i \dot{\theta}_r - \ddot{\theta}_r$, 그리고 θ_r 는 잠수정의 피치 운동의 원하는 궤적이다. 이 퍼지모델에 대한 TSK 퍼지제어기의 i 번째 규칙은 다음과 같이 설계되고

$$C_{\theta}^i: T^i = -\bar{\mathbf{g}}^i \boldsymbol{\theta}_a + \bar{g}_0^i \quad (25)$$

상태 반환 벡터 $\bar{\mathbf{g}}^i = [\bar{g}_1^i \ \bar{g}_2^i \ \bar{g}_3^i]$ 와 스칼라량 \bar{g}_0^i 는 역시 페루프 퍼지 시스템의 극점이

-4±4, -5가 되도록 다음과 같이 선택한다.

$$\begin{bmatrix} \bar{g}_1 \\ \bar{g}_2 \\ \bar{g}_0^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -228.57 & -41.49 & -509.94 \\ -228.57 & -41.05 & -507.94 \end{bmatrix}, \quad (26)$$

$$\bar{g}_0^i = -\bar{d}^i / \bar{b}_1^i$$

4. 시뮬레이션 결과

제안된 TSK 퍼지제어 시스템의 성능을 분석하기 위하여 PID 제어 시스템을 비교 대상으로 두고 두 경우에 대해 시뮬레이션을 행하였다. 본 시뮬레이션에서는 두 가지의 상황, 즉

- 1) Case 1의 경우에는 부하를 실지 않은 ODIN
- 2) Case 2의 경우는 5kg의 매니퓰레이터가 본체에 부착되어 총질량이 150kg으로 변하고, 무게 중심이 (0, 0)m에서 (0.03, 0)m로 이동된 ODIN을 고려하였다.

한편, 본 시뮬레이션에서 추종하고자 하는 궤적은 다음 네 구간으로 나뉜다. 1) 잠수정이 회전하면서 하강한다; 2) 잠수정이 현재 위치와 자세를 유지한다; 3) 잠수정의 깊이와 피치 각을 원래대로 되돌린다; 4) 다시 잠수정의 현재 위치와 자세를 유지한다. 이러한 일련의 움직임은 무인잠수정의 탐사, 채집, 그리고 자세 유지와 같은 임무 수행 동안의 전형적인 움직임의 좋은 표현이다. Fig. 5는 위치와 피치의 원하는 궤적을 나타낸다.

시뮬레이션에 사용된 PID 제어기는 다음과 같이 표현되며

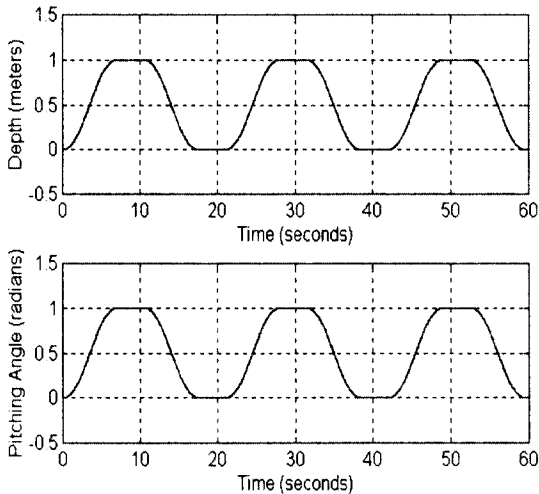


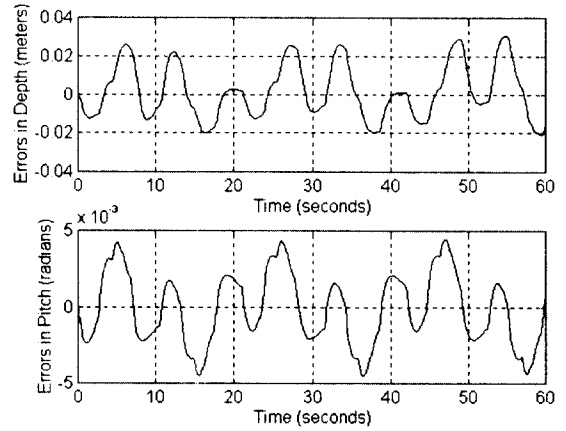
Fig. 5 Desired trajectories for the depth and pitch motions

$$\begin{bmatrix} F_z \\ T \end{bmatrix} = K_P \begin{bmatrix} \dot{z} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + K_D \begin{bmatrix} z \\ \theta \end{bmatrix} + K_I \begin{bmatrix} \dot{z}_I \\ \dot{\theta}_I \end{bmatrix} \quad (27)$$

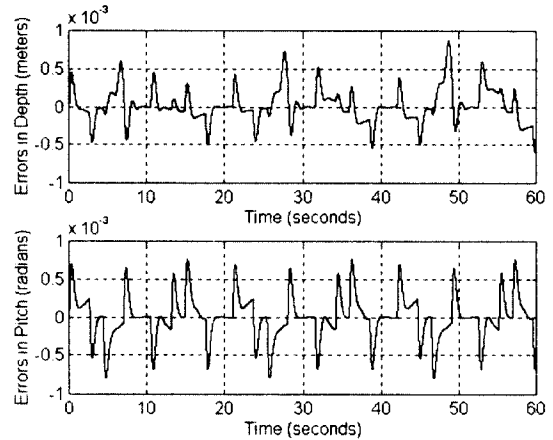
PID 이득은

$$K_P = \begin{bmatrix} 60 & 0 \\ 0 & 60 \end{bmatrix}, \quad K_D = \begin{bmatrix} 20 & 0 \\ 0 & 20 \end{bmatrix}, \quad K_I = \begin{bmatrix} 40 & 0 \\ 0 & 40 \end{bmatrix}$$

로 하였다.



(a)

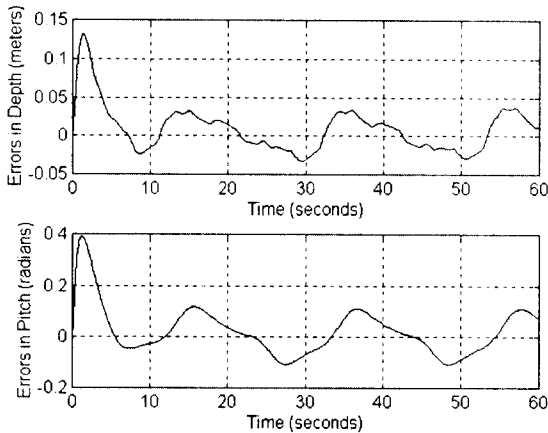


(b)

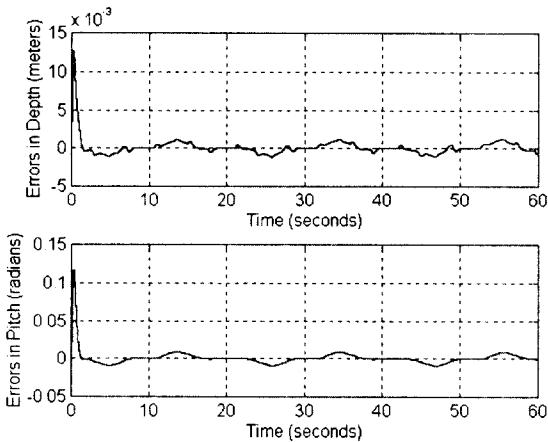
Fig. 6 Simulation results without payload (tracking errors of case 1) (a) PID controller (b) TSK fuzzy controller

Fig. 6은 Case 1에 대한 PID 제어기와 TSK 퍼지 제어기의 시뮬레이션 결과를 보여준다. PID 제어기가 상당히 좋은 결과를 보이고 있지만 퍼지제어기가 보다 적은 오차를 보인다. Fig. 7은 Case 2에 대한 시뮬레이션 결과를 보인다. 그림 7(a)에서 보는 바와 같이 PID 제어기가 여전히 시스템의 안정성을 유지하고는 있지만, 파라미터 변화에 기인한 매우

큰 오차가 발생함을 확인할 수 있다. 그러나 Fig. 7(b)의 결과는 PID 제어기보다 훨씬 나은 결과를 보이고 있다. 무엇보다 잠수정 움직임이 첫 번째 구간 이외에는 Fig. 6(b)와 Fig. 7(b) 사이에 큰 차이가 없다.



(a)



(b)

Fig. 7 Simulation results with the 5kg manipulator on ODIN (tracking errors of case 2) (a) PID controller (b) TSK fuzzy controller

5. 결 론

본 논문에서는 동력학이 비선형적이고 수력학적 계수들이 종종 정확히 추정하기 어려운 무인잠수정의 제어에 퍼지모델에 근거한 새로운 형태의 TSK 퍼지제어기를 적용하였다. 지금까지 TSK 퍼지 시스템의 해석에 관한 대부분의 연구는 퍼지 규칙의 결론부에 상수항을 포함하지 않는 특별한 타입의

TSK 퍼지모델에 그 초점을 두고 있고, 이것은 어떤 시스템을 퍼지 시스템으로 모델링하는데 있어서 매우 큰 제약이 된다.

본 논문에서는 각 퍼지 규칙의 결론부에 상수항을 포함하는 일반적인 형태의 TSK 퍼지모델을 고려하였다. 제안된 TSK 퍼지제어기는 1) 비선형 제어기이지만 각 퍼지제어 규칙의 결론부에서는 선형 상태 궤환 제어기이고, 2) 폐루프 퍼지 시스템의 안정성을 보장할 수 있으며, 3) 다른 비선형 제어 시스템에 비해 상대적으로 구현하기 쉽다. 또한 무인잠수정 ODIN의 TSK 퍼지모델에 근거한 퍼지제어기를 설계하고, 시뮬레이션을 통해 총질량, 무게중심과 같은 파라미터들의 변화에 대한 제안된 TSK 퍼지제어기의 강인성을 보였으며, 기존의 선형 제어기의 제어결과와 비교하여 그 우수성을 검증하였다.

참고문헌

1. L. A. Zadeh, "Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes," *IEEE Trans. on Syst., Man, and Cybern.*, Vol. 3, pp. 28~44, 1973
2. C. C. Lee, "Fuzzy logic in control systems: Fuzzy logic controller-Part I," *IEEE Trans. on Syst., Man, and Cybern.*, Vol. 20, pp. 404~418, 1990
3. Z. Y. Zhao, M. Tomizauka, and S. Isaka, "Fuzzy gain scheduling of PID controllers," *IEEE Trans. on Syst., Man, and Cybern.*, Vol. 23, pp. 1392~1398, 1993
4. T. Takagi and M. Sugeno, "Fuzzy identification of systems and its applications to modelling and control," *IEEE Trans. on Syst., Man, and Cybern.*, Vol. 15, pp. 116~132, 1985
5. M. Sugeno and G. Kang, "Fuzzy modelling and control of multilayer incinerator," *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 18, pp. 329~346, 1986
6. M. Sugeno and G. Kang, "Structure identification of fuzzy model," *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 28, pp. 15~33, 1988
7. J. Buckley, "Sugeno type controllers are universal controller," *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 53, pp. 299~303, 1993
8. K. Tanaka and M. Sugeno, "Stability analysis and design of fuzzy control systems," *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 45, pp. 135~156, 1992

9. G. Kang and W. Lee, "Design of fuzzy parameter adaptive controller," Proc. of International Fuzzy Systems Association World Congress, pp. 609~612, 1995
10. H. O. Wang, T. Tanaka, and M. F. Griffin, "An approach to fuzzy control of nonlinear systems: stability and design issues," IEEE Trans. on Fuzzy Systems, Vol. 4, pp. 14~23, 1996
11. K. Tanaka, T Ikeda., and H. O. Wang, "Robust stabilization of a class of uncertain nonlinear systems via fuzzy control: H control theory, and linear matrix inequalities," IEEE Trans. on Fuzzy Systems, Vol. 4, pp. 1~13, 1996
12. J. Yuh, "Modeling and control of underwater robotic vehicles," IEEE Trans. on Syst., Man, and Cybern., Vol. 20, pp. 1475~1483, 1990
13. T. I. Fossen, Underwater Robotic vehicles: Design and Control, TSI Press, 1995
14. D. N. Yeoger and J. E. Slotine, "Robust trajectory control of underwater vehicles," IEEE J. of Oceanic Engineering, Vol. 10, pp. 4462~470, 1985
15. K. R. Goheen and E. R. Jefferys, "Multivariable self-tuning autopilots for autonomous and remotely operated underwater vehicles," IEEE J. of Oceanic Engineering, Vol. 15, 1990.
16. R. Cristi, F. A. Papoulias, and A. J. Healey, "Adaptive sliding mode control of autonomous underwater vehicles in the dive plane," IEEE J. of Oceanic Engineering, Vol. 15, pp. 462~470, 1991
17. J. Yuh, "Learning control for underwater robotic vehicles," IEEE Control Systems Magazine, Vol. 14, pp. 39~46, 1994
18. N. Kato et al., "Guidance and control of autonomous underwater vehicle AQUA Explorer 1000 for inspection of underwater cables," Proc. of 8th Int'l Sym. on Unmanned, Untethered Submersible Technology, 1993.
19. S. K. Choi and J. Yuh, "Experimental study on a learning control system with bound estimation for underwater robots," IEEE Int'l Conf. on Robotics and Automation, pp. 2160~2165, 1995