

퍼지 이득 스케줄링 기법을 이용한 무인 잠수정의 심도제어기 설계 - HILS 검증

Depth Controller Design using Fuzzy Gain Scheduling Method of a Autonomous Underwater Vehicle - Verification by HILS

황 종 현, 박 세 원, 김 문 환, 이 상 영, 홍 성 경*

(Jong-Hyon Hwang¹, Sewon Park¹, Moon-Hwan Kim¹, Sang-Young Lee¹, and Sung Kyung Hong²)

¹Maritime R&D Lab, LIG Nex1 Co. Ltd

²Aerospace Engineering, Sejong University

Abstract: This paper proposes a fuzzy logic gain scheduling method for depth controller of the AUV (Autonomous Underwater Vehicle). Gains of depth controller are calculated by using multi-loop root locus technique. Fuzzy logic based gain scheduling approach is used to modify multi-loop gains as control condition. It is illustrated by simulations that the proposed fuzzy logic gain scheduling method yields smaller rising time and overshoot compared to the fixed-gain controller. Finally, being implemented on real hardwares, all the proposed algorithms are validated with integrations of hardware and software altogether by HILS.

Keywords: AUV, fuzzy supervisor, depth control, HILS, gain scheduling

I. 서론

최근 MEMS 관성센서 및 고효율 추진시스템의 발전과 더불어 이를 기반으로 하는 소형/자율 무인 잠수정의 연구가 활발히 진행되고 있으며[1,2], 그에 대한 제어시스템의 통합적이고 체계적인 설계기술이 요구되고 있다. 뿐만 아니라 수중 정찰, 기뢰탐지 등을 위한 방위산업용 소형/자율 무인 잠수정의 경우에는 민간용으로 개발되고 있는 다른 무인 잠수정들에 비하여 높은 안정성과 신뢰도를 보장할 수 있어야 한다.

무인 잠수정에서 널리 사용되고 있는 고전제어기법을 이용한 제어기 설계방법은, 6자유도로 표현되는 비선형 운동방정식을 일정한 속도의 평형점에서 선형화 과정을 거친 후, 단일입출력 시스템으로 분리 모델링하여 제어기를 설계하는 방법이다. 그러나 입수 후, 혹은 초기 거동 후 수평비행까지의 운동특성은 매우 복잡하고 비선형 요소가 많다.

또한 해파와 같은 불확실성의 요소에 대해서 매우 민감한 특성을 지니며[3], 측정오차 및 불확실성이 존재하는 유체계수들의 부정확성으로 인하여, 정확한 수학적 모델링이 불가능하기 때문에 일반적으로 정밀한 제어기 설계가 용이하지 않다[4].

본 논문에서는 퍼지 이득 스케줄링을 이용한 무인 잠수정의 종방향 심도제어기를 설계하였다. 이득 스케줄링은

시변 혹은 비선형 시스템에서 제어기를 설계하는데 통상적으로 사용되는 방법으로서, 일반적인 이득 스케줄링 기법은 적당한 수의 동작점을 선택하고 시스템을 선형 시불변 시스템으로 근사화 한 후, 각 동작점에서 각각의 선형 제어기를 설계하여 혼합하는 과정을 거친다. 하지만 이 과정에서 적당한 동작점의 선정 및 적절한 보간법의 선택과 같은 긴 시행착오과정이 요구된다. 이런 맥락에서, 주어진 시스템의 거동과 비선형성의 영향력에 대한 경험적인 지식이 도움을 줄 수 있다. 하지만 일반적인 이득 스케줄링은 이러한 경험적인 지식의 획득과 표현을 위한 수단이 부족하기 때문에, 제어기의 설계과정을 반복하는 잠재적 유용수단으로서 퍼지로직이 고려되어 왔다[5-7]. 퍼지 이득 스케줄링 기법을 적용하면 명령에 대한 추종에러 및 에러의 미분항 등 외부 매개변수와 미리 설계된 제어기의 이득 사이의 상호관계를 언어적인 서술로써 묘사하여 그에 따라 제어기의 이득을 조율하는 방법을 사용하였다. 이를 통하여 미리 규정된 영역 내에서 퍼지 규칙과 추정에 의해 제어기의 이득을 실시간으로 변화시킴으로써 외란이나 시스템의 모델링 오차가 존재한다 하더라도 좋은 제어 결과를 기대할 수 있다.

본 논문에서는, 균궤적법을 이용하여 다중루프 제어기를 선형 설계 후[8-10], 퍼지 추론 시스템을 이용하여 다중루프 제어기에서의 이득을 실시간으로 변경을 함으로써 제어기 성능 향상을 이루도록 하였다[11-13]. 한편 설계된 제어기의 검증을 위하여 HILS (Hardware In the Loop Simulation)을 수행하였다. HILS는 3축 운동재현 장치와 연동하여 무인 잠수정에 실제 탑재되는 하드웨어 환경을 그대로 보존한 상태에서 무인 잠수정 동역학의 일부만을 수학적 모델로 대체하는 실시간 실물 지상 모의시험을 의미한다. 이는 단

* 책임저자(Corresponding Author)

Manuscript received May 15, 2013 / revised June 10, 2013 / accepted June 30, 2013

황종현, 박세원, 김문화, 이상영: LIG 넥스원(주)

(jonghyon.hwang@lignex1.com/sewon.park@lignex1.com/moonanikim@lignex1.com/sangyoung.lee@lignex1.com)

홍성경: 세종대학교 항공우주공학과(skhong@sejong.ac.kr)

순 소프트웨어적인 시뮬레이션 환경이 가져다주는 제한된 상황을 뛰어넘어, 실제 하드웨어의 불확실성을 보존한 상태에서 다양한 환경하의 제어시스템 성능을 분석할 수 있는 개발시스템이다[14]. HILS를 수행하여 무인 잠수정의 유도 제어 알고리즘 및 실물에 탑재된 소프트웨어의 성능을 확인할 수 있을 뿐 아니라, 체계 전체의 하드웨어 및 소프트웨어를 검증하고 실제 시험에서의 위험요소를 제어하는 동시에 시스템 전체의 신뢰도를 향상시킬 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 II 장에서는 무인 잠수정의 비선형 6자유도 운동방정식을 유도하고, 평형상태에서의 테일러 전개를 이용하여 선형화를 수행하여 선형 상태공간 방정식을 유도하였다. III 장에서는 선형화된 종방향 상태공간 방정식을 기반으로 근궤적법을 이용하여 다중루프 제어기를 설계하였다. 심도 명령을 외부루프로, 퍼치각(θ) 및 퍼치각속도(q)는 내부 루프로 하는 다중루프 제어기를 설계하여 시스템의 안정성을 확보하였다. IV 장에서는 심도 명령에 대한 오차와 오차의 미분항을 입력으로 하는 퍼지 추론 시스템을 추가하여 실시간으로 제어이득이 변경될 수 있도록 하였다. 미리 규정된 영역 내에서 퍼지 규칙과 추정에 의해 제어기의 파라미터들이 변경될 수 있도록 함으로써, 외란이나 시스템의 모델링 오차가 존재하는 경우에도 안정적인 제어기 성능을 기대할 수 있도록 하였다. V 장에서는 시뮬레이션을 수행하여 일반적인 다중루프 제어기와 퍼지 이득 스케줄을 추가한 제어기의 시뮬레이션 결과를 비교하였으며, VI 장에서는 HILS를 통해 설계된 제어기의 성능을 검증하였다.

II. 무인 잠수정 모델링

1. 운동방정식 유도

일반적으로 무인 잠수정은 뉴턴의 제2법칙을 사용하여 6자유도 비선형 운동방정식으로 나타낼 수 있으며, 이때 사용되는 좌표계는 관성좌표계 및 동체고정좌표계이다.

이때 관성좌표계에서는 무인 잠수정의 위치와 오일러각이 표현되고, 동체고정좌표계에서는 무인 잠수정의 선속도 및 각속도를 표현한다. 그림 1은 무인 잠수정의 좌표계 및 각 좌표계에서의 표현성분들을 나타낸다.

뉴턴의 제2법칙 및 이동정리(transport theory)를 이용하여 무인 잠수정에 작용하는 힘과 모멘트에 관하여 정리하면식 (1)과 같다.

또한 외부로부터 받는 힘들(부력과 중력차이, 부가질량, 항력 및 추력, 제어판의 변화)을 고려하여 운동방정식을 정

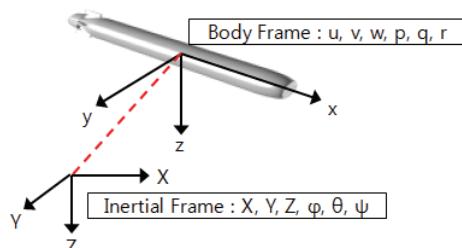


그림 1. 동체고정좌표계 및 관성좌표계.

Fig. 1. Body-fixed & inertial coordinate.

리한 후, 무인 잠수정의 운동모드를 종방향 및 횡방향, 롤운동으로 나눌 수 있다. 속도가 명령속도에 수렴하여 속도의 변화가 크게 없다고 가정하면 종방향 운동은 상하로 움직이는 z 축의 병진운동과 y 축을 중심으로 움직이는 회전운동으로 나타낼 수 있으며 그에 대한 비선형 운동방정식은 식 (2), (3)과 같다. 무인 잠수정의 형상은 그림 1과 같이 xy , xz 평면에 대칭인 형상으로 관성곱은 무시할 수 있다.

$$\begin{aligned}\Sigma X &= m[\dot{u} - vr + wq - x_g(q^2 + r^2) + y_g(pq - \dot{r}) \\ &\quad + z_g(pr + \dot{q})] \\ \Sigma Y &= m[\dot{v} - wp + ur - y_g(r^2 + p^2) + z_g(qr - \dot{p}) \\ &\quad + x_g(qp + \dot{r})] \\ \Sigma Z &= m[w - uq + vp - z_g(p^2 + q^2) + x_g(rp - \dot{q}) \\ &\quad + y_g(rq + \dot{p})]\end{aligned}\quad (1)$$

$$\begin{aligned}\Sigma K &= I_{xx}p + (I_{zz} - I_{yy})qr - (\dot{r} + pq)I_{xz} + (r^2 - q^2)I_{yz} \\ &\quad + (pr - \dot{q})I_{xy} + m[y_g(\dot{w} - uq + vp) - z_g(\dot{v} - wp + ur)]\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Sigma M &= I_{yy}\dot{q} + (I_{xx} - I_{zz})rp - (\dot{p} + qr)I_{xy} + (p^2 - r^2)I_{xz} \\ &\quad + (qp - \dot{r})I_{yz} + m[z_g(\dot{u} - vr + wq) - x_g(\dot{w} - uq + vp)]\end{aligned}$$

$$\Sigma N = I_{zz}\dot{r} + (I_{yy} - I_{xx})pq - (\dot{q} + rp)I_{yz} + (q^2 - p^2)I_{xy}$$

$$\begin{aligned}(m - Z_w)\dot{w} - my_g\dot{p} - (mx_g + Z_q)\dot{q} &= m[uq - vp + z_g(p^2 + q^2) - x_grp - y_grq] \\ &\quad + (W - B)\cos\theta\cos\phi + Z_ww + Z_qq \\ &\quad + Z_{w|w}|w| + Z_{q|q}|q| + Z_{\delta_e}\delta_e\end{aligned}\quad (2)$$

$$\begin{aligned}mz_g\dot{u} - (mx_g + M_w)\dot{w} + (I_{yy} - M_q)\dot{q} - I_{xy}\dot{p} - I_{yz}\dot{r} &= (I_{zz} - I_{xx})rp + mz_g(vr - wq) + mx_g(vp - uq) \\ &\quad + I_{xy}qr - I_{xz}(p^2 - r^2) - I_{yz}pq - z_gW\sin\theta \\ &\quad - x_gW\cos\theta\cos\phi + M_ww + M_qq \\ &\quad + M_{w|w}|w| + M_{q|q}|q| + M_{\delta_e}\delta_e\end{aligned}\quad (3)$$

이때, m 은 무인 잠수정의 질량, W 는 무게, B 는 부력, x_g, y_g, z_g 는 무게중심과 부력중심과의 각 축의 거리를 나타낸다. 또한 조종미계수($Z_{\delta_e}, M_{\delta_e}$) 및 안정미계수($Z_w, Z_q, Z_w, Z_q, Z_{w|w}, Z_{q|q}, M_w, M_q, M_w, M_q, M_{w|w}, M_{q|q}$)는 수조모형시험을 통하여 구하였다.

2. 종방향 상태 공간 방정식

무인 잠수정의 성능 분석 및 제어기 설계를 위하여 운동방정식을 선형방정식으로 단순화 하여야 한다. 운동속도는 명령속도에 수렴한 상태에서 수직면 운동만 존재하는 평형 상태를 가정한다. 테일러 1차급수로 전개하여 트립방정식과 선형방정식을 도출해 낼 수 있으며, 이를 이용하면 상태공간 방정식을 유도 할 수 있다. 평형상태를 가정하면 상태변수 w, q, θ, z 에 관하여 아래의 식 (4)과 같은 관계를 도출 할 수 있다.

$$\begin{aligned}\dot{\theta} &= q \\ z &= -\theta u_0 + w\end{aligned}\quad (4)$$

식 (2)-(4)에서 상태변수(x)를 w, q, θ, z 로, 입력변수(u)를 δ_e 로 설정하고 등식의 왼쪽에 미분항을, 나머지는 오른쪽에 배치하여 정리한다. 미분항들에 관한 행렬에 역행력을 취하면 최종적인 종방향 상태공간 방정식 및 상태행렬, 입력행렬, 출력행렬은 식 (5), (6)과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A_{Long}x + B_{Long}u \\ y &= C_{Long}x \end{aligned} \quad (5)$$

$$A_{Long} = \begin{bmatrix} -2.7714 & 3.5153 & -0.0074 & 0 \\ 14.1640 & -13.8152 & 0.0011 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -8.2300 & 0 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$B_{Long} = \begin{bmatrix} -2.9032 \\ -13.0777 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad C_{Long} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

III. 다중루프 심도 제어기 설계

기본 심도 제어기는 근제적법을 이용하여 다중루프 구조로 설계하였다. 시스템의 안정성 증대를 위하여 내부루프로 퍼치각속도(q)와 퍼치각(θ)정보를 피드백 하였고, 최종적으로 심도(z)를 외부루프로 피드백하여 명령을 추종하도록 하였다. 그 블록선도는 그림 2와 같으며, 최종적인 제어법칙은 식 (7)와 같다.

$$\delta_e = K_q K_\theta K_z (z_c - z) - K_q K_\theta \theta - K_q q \quad (7)$$

먼저, q / δ_e 를 구하여 균제적을 그린 다음, 충분히 안정성을 확보할수 있도록 K_q 를 결정한다. 결정된 K_q 를 이용하여 피드백 한 시스템을 적분하여 θ / q_c 로 만든 다음 K_θ

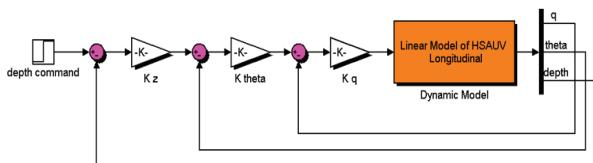


그림 2. 기본 심도제어기 블록 선도.

Fig. 2. Block diagram of depth controller.

표 1. 제어기 설계 전, 후의 극점 비교.

Table 1. Comparison of Pole. before(left) and after(right).

	제어기 설계 전	제어기 설계 후
극점	0	-1.08
	0.00897	-0.504+1.07i
	0.658	-0.504-1.07i
	-17.3	-23.7

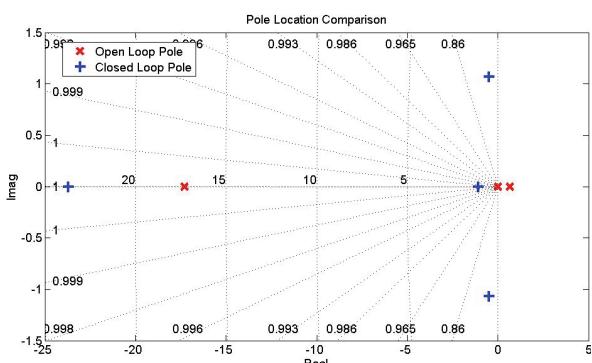


그림 3. 제어기 설계 전, 후의 극점 위치 비교.

Fig. 3. Comparison of pole location.

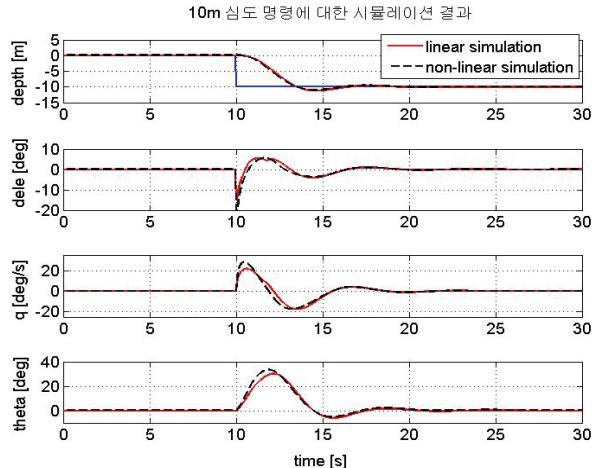


그림 4. 10m 심도 명령에 대한 선형, 비선형 시뮬레이션 결과.

Fig. 4. Simulation result for 10m depth command.

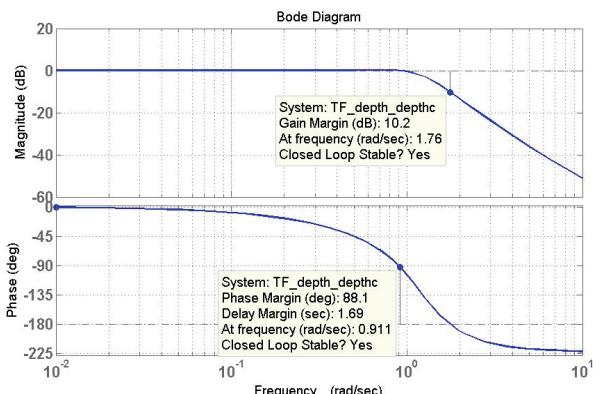


그림 5. 보데 선도.

Fig. 5. Bode plot.

를 결정하고, 같은 방법으로 K_z 를 결정하고 나면 제어기가 포함된 최종적인 시스템의 z / z_c 를 구할 수 있다. 그러나 실제의 시스템에서는 구동기의 δ_e 에 대하여 제한이 있기 때문에 이를 고려하여 적정한 이득을 설정하는 것이 매우 중요하다. 제어기의 이득은 Mathworks사의 matlab toolbox 중 'sisotool'을 이용하여 설계하였다.

제어기가 없는 시스템의 극점의 위치와 제어기를 설계한 후의 종방향에 대한 극점의 위치를 비교해보면 그림 3과 같으며, 제어기에서 계산되어 나오는 구동기의 δ_e 는 $\pm 15^\circ$ 로 한정하고, 그때의 단위계단 입력에 대한 시뮬레이션 결과는 그림 4와 같다.

제어기 설계 후 보데 선도를 통한 제어기의 여유를 살펴보면, 설계된 제어기의 이득여유는 10.2 dB이며, 위상여유는 88.1° 이다. 그림 5는 제어기 설계 후의 보데 선도이다.

IV. 퍼지 이득 스케줄링 기법

그림 6은 퍼지 이득 스케줄을 이용한 Multiloop 제어 시스템을 나타낸다. 일반적으로 알려진 퍼지 제어기는 퍼지 추론 시스템을 이용하여 출력을 낸 후 이 출력을 제어 대상에 대한 직접 입력으로 사용하나, 퍼지 이득 스케줄 기법

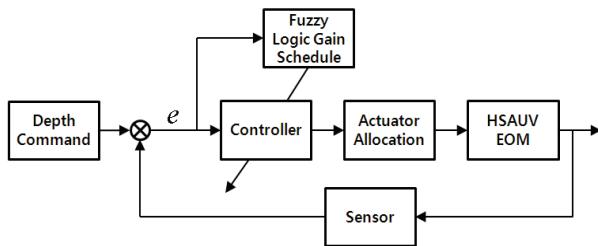


그림 6. 퍼지 이득 스케줄러의 블록 다이어그램.

Fig. 6. Block diagram of fuzzy gain scheduler.

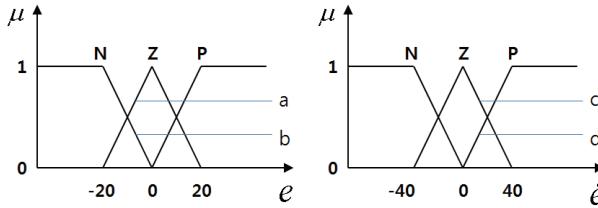


그림 7. 입력 멤버십 함수.

Fig. 7. Membership function.

표 2. 퍼지 제어 규칙.

Table 2. Fuzzy rule.

Δe	N	Z	P	Δe	N	Z	P
N	BB	SM	BB	N	BB	SM	BB
Z	BM	MM	BM	Z	MM	SS	MM
P	BB	SM	BB	P	BB	SM	BB

은 퍼지 추론 시스템에 의한 출력을 제어기의 이득을 조절하게 된다. 이득 스케줄의 퍼지 제어 규칙은 식 (8)과 같다.

$$\text{If } e_{z(k)} \text{ is } A_i \text{ and } \Delta e_{z(k)} \text{ is } B_i \\ \text{then } K_z \text{ is } C_i \text{ and } K_\theta \text{ is } D_i, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (8)$$

과도상태에서의 출력오차와 출력오차의 증분이 클 경우에는 K_z 를 크게 하여 시스템의 응답시간을 빠르게 하고, 오차 및 오차의 증분이 작을 경우에는 K_z 를 작게하고, K_θ 를 크게하여 큰 오버슛을 피하도록 하였다. 그때의 입력 멤버십 함수는 그림 7과 같다.

이득 스케줄을 위한 입력 멤버십 함수로부터의 퍼지 제어 규칙은 표 2와 같으며, 최종적인 비퍼지화 추론은 식 (9)와 같이 설정하였다.

$$y_1(K_z) = \frac{acMM + adSM + bcBM + bdBB}{ac + ad + bc + bd} \quad (9)$$

$$y_2(K_\theta) = \frac{acSS + adSM + bcMM + bdBB}{ac + ad + bc + bd}$$

따라서 최종적인 제어법칙은 다음과 같이 변형될 수 있다.

$$\delta_e = y_1(K_z) \times K_q K_\theta K_z (z_c - z) \\ - y_2(K_\theta) \times K_q K_\theta \theta - K_q q \quad (10)$$

V. 시뮬레이션

심도 명령을 10초에 10m로 인가하고, 그때의 구동타이

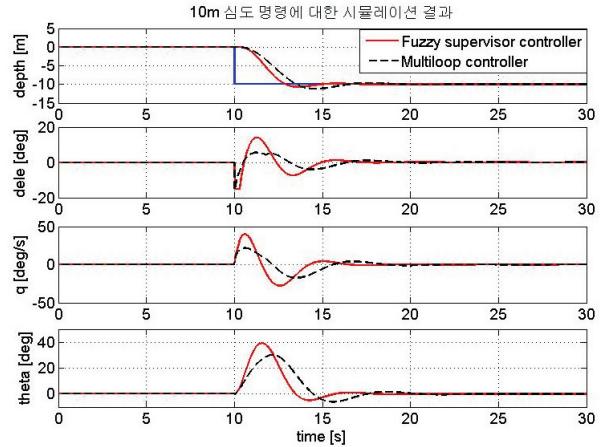


그림 8. 시뮬레이션 결과.

Fig. 8. Simulation result.

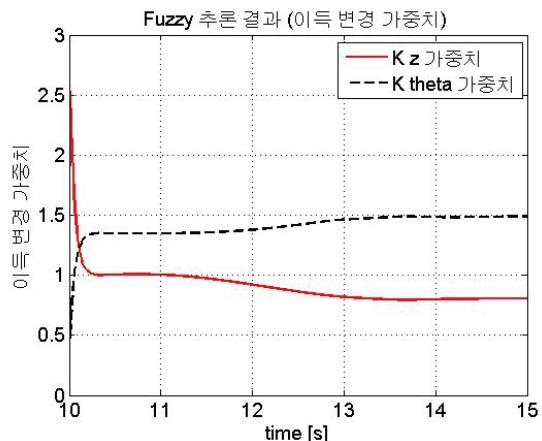


그림 9. 제어 이득의 가중치 변경.

Fig. 9. Control gain change.

제한은 15° 로 하여 다중루프 제어기와 퍼지 이득 스케줄링 기법을 추가한 제어기의 성능을 시뮬레이션을 통하여 비교하였다.

명령 인가 후 초기 반응은 퍼지 추론 시스템을 통하여 K_z 가 증가되어 반응이 빨라지게 되고, 명령에 수렴시에는 K_z 가 작아지고, K_θ 가 커짐으로써 시스템의 오버슛을 억제할 수 있다.

그림 8은 다중 루프 제어기와 퍼지 이득 스케줄링 기법을 추가한 제어기의 시뮬레이션 결과이다.

또한 그림 9는 심도 명령 인가 후의 5초까지의 제어기 이득의 변화를 나타낸 그래프이다. 명령 인가 초기에는 오차가 크기 때문에 K_z 가 순간적으로 크게 변하여 명령에 빨리 추종하도록 하고, 일정 오차 범위 이내로 들어가면 K_θ 가 커짐으로써 맵핑을 크게 향상 시킴을 보인다.

VI. HILS

HILS는 3축 운동재현 장치와 연동하여 수중 운동체에 실제 탑재되는 제어컴퓨터, 센서, 추진기등의 하드웨어 환경을 그대로 보존한 상태에서 수중 운동체 동역학의 일부만을

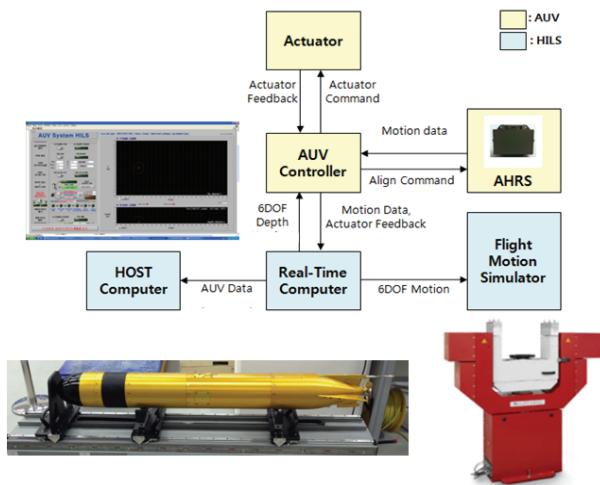


그림 10. HILS 구성.

Fig. 10. HILS system.

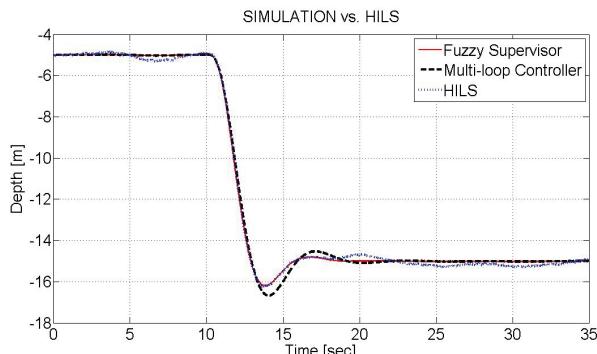


그림 11. 10m 심도 명령에 대한 HILS 결과.

Fig. 11. HILS result for 10m depth command.

수학적 모델로 대체하는 실시간 실물 지상 모의시험을 의미한다. 개발하고자하는 HILS의 운용개념은 그림 10과 같다.

무인 잠수정의 동역학 모델은 Lab-view Real-Time Computer에서 계산되고, 계산된 운동 모델의 각속도 및 각도에 의해 3축 운동재현 장치가 작동하게 된다. 3축 운동재현 장치는 Acutronic사의 AC3337을 사용하였다. 운동재현 장치의 운동은 실제 수중 운동체에 탑재되는 MI사의 MEMS (Micro-Electro-Mechanical System) AHRS (Attitude Heading Reference System)가 측정하게 되며, 측정된 자세 및 각속도, 자속도, 방위는 전자제어부의 중앙통제컴퓨터에 전송하게 된다. 중앙통제컴퓨터에서는 센서값을 입력받아 이식된 제어 알고리즘을 계산하여 작동타(승강타 및 방향타)를 움직이게 된다. 작동타의 움직임에 의해 다시 무인 잠수정의 동역학 운동 모델이 계산되는 순환 구조로 이루어져 있다. 이러한 일련의 과정에서 이루어지는 계산값 및 측정값, 명령값들은 Lab-view 호스트 컴퓨터에서 GUI 화면에서 확인할 수 있으며, 이 결과를 바탕으로 제어기 및 시스템상의 문제점을 확인할 수 있고 설계된 시스템을 검증할 수 있다.

5m 수심으로 주행하던 무인 잠수정을 10초후에 15m 명령을 인가하였을 때, 최종적인 HILS 수행 결과는 그림 11

과 같다. 시뮬레이션과 거의 유사한 결과를 보이는데, 이는 설계된 제어 알고리즘이 실제 탑재될 전자제어부의 중앙통제컴퓨터에 잘 이식되었음을 나타낸다. 또한 그 외의 하드웨어(MEMS AHRS 및 구동기)와의 통신 및 연동이 잘 이루어졌음을 확인하였다.

VII. 결론

본 논문에서는 퍼지 이득 스케줄링을 이용한 무인 잠수정의 종방향 심도제어기를 설계하였다. 무인 잠수정의 운동방정식을 기반으로 평형상태를 가정하고, 선형화를 수행하였으며, 선형화된 종방향 운동 모델을 기반으로 극궤적법을 이용하여 다중루프 제어기를 먼저 설계하였으며 그 제어 결과를 선형, 비선형 시뮬레이션을 통하여 각각 비교하였다. 또한 퍼지 추론 시스템을 이용하여 다중루프 제어기에서의 이득을 실시간으로 변경하도록 하는 퍼지 이득 스케줄 기법을 사용하여 설계된 제어기의 과도응답 성능 향상을 이루도록 하였다. 외란이나 시스템의 모델링 오차가 존재하는 경우에도 응답반응의 오차 및 오차의 미분값을 이용한 퍼지 이득 스케줄링을 통한 이득 변경으로 안정적인 제어기 성능을 기대할 수 있도록 하였다. 설계된 제어기는 HILS를 통하여 검증하였다. HILS를 수행하여 설계된 제어 알고리즘이 실제 탑재될 전자제어부의 중앙통제컴퓨터에 잘 이식되었음을 확인할 수 있었으며 그 외의 하드웨어와의 연동 및 체계적인 관점에서도 그 성능을 검증하였다.

REFERENCES

- [1] J. Yuh, "Design and controlled autonomous underwater robots: A survey," *Kluwer Academic Publishers, Printed in Netherlands, Autonomous Robots*, pp. 7-24, 2000.
- [2] S. Showalter, "The legal status of autonomous under vehicles," *The Marine Technology Society Journal*, Spring, vol. 38, no. 1, pp. 80-83, 2004.
- [3] S. Y. Yang, " H_{∞} Depth and Course Controllers Design for Autonomous Underwater Vehicles," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A (in Korean)*, vol. 24, no. 12, pp. 2980-2988, Oct. 2000.
- [4] J. H. Hwang, S. K. Hong, and H. J. Cho, "Integrated simulator design of the autonomous underwater vehicle - HILS verification," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 14, no. 4, pp. 1-9, Dec. 2008.
- [5] S. K. Hong, K. H. Shim, and S. S. Park, "Gain scheduled fuzzy control on aircraft flight control," *Journal of Control, Automation, and Systems Engineering (in Korean)*, vol. 10, no. 2, pp. 125-130, Feb. 2004.
- [6] T. Chaiyatham and I. Ngamroo, "Optimal fuzzy gain scheduling of PID controller of superconducting magnetic energy storage for power system stabilization," *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, vol. 9, no. 2, pp. 651-666, Feb. 2013.

- [7] S. J. Baek, D. J. Lee, J. H. Park, and K. T. Chong, "Design of lateral fuzzy-PI controller for unmanned quadrotor robot," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 19, no. 2, pp. 164-170, 2013.
- [8] T. Salgado-Jimenez and B. Jouvencel, "Using a high order sliding modes for diving control a torpedo autonomous underwater vehicle," *Proc. OCEANS 2003*, pp. 934-939, 2003.
- [9] J. H. Hwang, S. Hwang, S. K. Hong, and M. G. Yoo, "Stabilization performance improvement of the Quadrotor flying robot," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 18, no. 6, pp. 608-611, 2012.
- [10] S. Hwang, J. Park, and S. K. Hong, "Control system design for a UAV-Mounted camera gimbal subject to coulomb friction," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 18, no. 7, pp. 680-687, 2012.
- [11] R. P. Copeland and K. S. Rattan, "A fuzzy logic supervisor for PID control of unknown systems," *IEEE International Symposium on Intelligent Control*, pp. 22-226, Aug. 1994.
- [12] S. K. Hong and R. Langari, "Gain scheduled fuzzy control with application to aircraft flight control," *Advances in Systems Science and Applications*, vol. 3, no. 1, pp. 393-401, Apr. 1997.
- [13] R. Park, E. J. Hwang, H. Lee, and M. Park, "Motion control of an AUV (Autonomous Underwater Vehicle) using fuzzy gain scheduling," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 16, no. 6, pp. 592-600, Oct. 2010.
- [14] S. H. Baek and S. K. Hong, "A study on flight trajectory generations and guidance/control laws : validation through HILS," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 14, no. 12, pp. 1238-1243, 2008.



황 종 현

2007년 세종대학교 항공우주공학과 졸업. 2009년 동 대학원 석사. 2012년 동 대학 박사 수료. 2013년~현재 LIG넥스원 Maritime 연구소 근무. 관심분야는 무인 시스템의 유도 항법 및 제어.



박 세 원

2010년 광운대학교 컴퓨터공학과 졸업. 2010년~현재 LIG넥스원 Maritime 연구소 근무. 관심분야는 무인 시스템의 HILS.



김 문 환

2004년 연세대학교 전자공학과 졸업. 2006년 동 대학원 석사. 2006년~2009년 해군사관학교 교수사관. 2009년~현재 LIG넥스원 Maritime 연구소 근무. 관심분야는 무인 수중운동체의 유도제어.



이 상 영

1988년 서강대학교 물리학과 졸업. 1990년 동 대학원 석사. 1990년~1998년 국방 과학연구소 선임연구원. 1999년~현재 LIG넥스원 근무. 관심분야는 무인 수중 시스템.



홍 성 경

1987년 연세대학교 기계공학과 졸업. 1989년 동 대학원 석사. 1998년 Texas A&M Univ. 공학 박사. 1989년~2000년 국방과학연구소 선임연구원. 2000년~현재 세종대학교 항공우주공학과 교수. 관심분야는 무인시스템의 유도항법 제어시스템.