

수중운동체 자동심도제어 시스템의 실시간 구현

이 동 익, 조 현 진, 최 중 락, 이 동 권
국 방 과 학 연 구 소

Real Time Implementation of the Auto Depth Control System for a Submerged Body

Dong-Ik Lee, Hyeon-Jin Cho, Joong-Lak Choi, Dong-Kwon Lee
Agency for Defense Development

ABSTRACT

This paper describes the auto depth control system for underwater vehicle that can be used for both near surface and deeply submerged depthkeeping operations. This controller uses the fuzzy control algorithm and is implemented on the 16 bit microprocessor 8086 and coprocessor 8087. For verifying this system design, the digital simulator using PC-386 based T800 transputer is prototyped and the real time simulations show us satisfactory results.

I. 서론

수중함에서의 조종이라함은 배의 운동방향과 그 속도를 임의로 변화시키거나 유지하는 것으로 정의되며, 이러한 일련의 연속적인 조종으로 한 장소에서 다른 장소로 이동시키는 것을 항해라고 하여 조종과는 구별된다. 이러한 수중운동체의 조종은 항공기 및 유도무기처럼 6자유도 운동역학을 갖고 있으나 이 조종 장치는 항공기와는 달리 함속도가 영에 가까우면 함내해수탱크를 이용하여 호버링, 트리밍 및 밸러스팅으로 심도와 자세를 유지해야 하고 함속도가 증가하면 수직타와 수평타를 이용하여 침로, 심도 및 자세를 제어하여야 하므로 함속도에 따라 제어시스템이 매우 다르게 운용되며, 동시에 항공기의 경우에는 제어응답이 매우 빠르기 때문에 조종사의 감각으로 실시간 제어가 가능하나 수중함의 경우에는 제어응답이 느리기 때문에 조타수에 의한 실시간 제어가 곤란하다. 이와 같이 수중함과 항공기간에 제어특성 및 동적특성이 상이한 관계로 제어시스템의 소프트웨어 및 하드웨어 설계절차가 매우 다르다. 특히 수중함은 자유표면 근처에서 잠망경 항해, 스노클 항해등 여러가지 임무를 수행하기 위해서 심도유지가 중요하다. 초기에는 여러명의 조타수가 수동으로 심도를 조종하므로써 느린 항해 속도로 인해 선체에 전달되는 제어타력이 미약하고 파도의 영향중 조타수가 느낄 수 없는 흡인력(Suction Force) 때문에 정확한 심도유지가 어려웠으나, 최근에는 컴퓨터 기술과 자동제어 기술의 발달로 점차 자동화되면서 심도유지의 정확도가 크게 향상되었다.[1]

본 논문에서는 이러한 수중운동체의 자동심도 제어장치를 위한 퍼지제어 알고리즘과 실시간 구현을 위한 16비트 마이크로프로세서 8086 및 8087을 이용하여 디지털 제어를 설계 제작하였으며, PC-386 Based T800 트랜스퓨터를 이용한 실시간 시뮬레이터를 개발하여 자동심도 제어기의 제어성능 및 설계검증을 수행하고 그 결과를 제시하였다.

II. 적용모델

1. 수중운동체 모델

수중운동체에 미치는 힘과 모멘트는 트림 및 밸러스트 탱크 작동에 따른 함속도와 무관한 정적인것, 추진력 저항 및 양력에 의한 동적인것, 수면파 근처에서의 파도 또는 해류에 의한 외적인것, 제어판 작동에 따른 선체에 전달되는 타력등으로 이루어지며, 이에 따른 수중운동은 수평면운동(Sway/Yaw/Roll)과 연직면운동(Surge/Heave/Pitch)으로 6자유도를 가지며 수학적 인 운동방정식은 다음과 같다.[2]

$$(m-X_{\dot{u}}) \dot{u} = X \quad (\text{surge})$$

$$(m-Y_{\dot{v}}) \dot{v} - (mz_G + Y_{\dot{p}}) \dot{p} + (mx_G - Y_{\dot{r}}) \dot{r} = Y \quad (\text{sway})$$

$$(m-Z_{\dot{w}}) \dot{w} - (z_G + mx_G) \dot{q} = Z \quad (\text{heave})$$

$$-(mz_G + K_{\dot{v}}) \dot{v} + (I_x - K_{\dot{p}}) \dot{p} - (I_{zx} + K_{\dot{r}}) \dot{r} = K \quad (\text{roll})$$

$$(I_y - M_{\dot{q}}) \dot{q} - (M_w + mx_G) \dot{w} = M \quad (\text{pitch})$$

$$(mx_G - N_{\dot{v}}) \dot{v} - (I_{zx} + N_{\dot{p}}) \dot{p} + (I_z - N_{\dot{r}}) \dot{r} = N \quad (\text{yaw})$$

위식에서 X, Y, Z, K, M 및 N은 선체에 미치는 파도의 외력 및 타력을 포함하는 모든 유체역학적인 힘과 모멘트이다.

2. 타구동장치

수중운동체가 연직면에서 임의의 속도를 가지고 운동할 경우 선수 및 선미 수평타 각변위가 비선형 운동방정식의 제어입력으로 작용하며, 본 논문의 구동부는 다음과 같이 1차계를 갖는 모델이다.

$$\dot{\delta s} = (U s - \delta s) / r_s$$

$$\dot{\delta b} = (U b - \delta b) / r_b$$

여기서,

U s = 선미수평타 제어입력
U b = 선수수평타 제어입력
 δs = 선미수평타각 제어입력
 δb = 선수수평타각 제어입력
r s, r b = 시정수

3. 파도 외란 모델

수중운동체가 자유표면하에서 운동할 경우 해파는 선체 및 센서에 외란으로 작용한다. 본 논문에서는 해파에 대한 제어시스템의 성능을 분석하기 위하여 다음식의 파워스펙트럼을 사용하였다.[3]

$$S(\omega) = \frac{A}{\omega^6} \exp[-B/\omega^4]$$

여기서,

- A = 8.1 x 10g
- B = 3.11 x 10/(Hl/3)²
- g = 9.8 [m/sec²]
- Hl/3 = Significant Wave Height [cm]

이때 수중운동체에 미치는 파도의 영향은 심도에 따라 아래식과 같이 지수적으로 감소한다.

$$V(t) = \exp[-\omega_0^2 \cdot Z(t)/g]$$

여기서,

- ω_0 = 조우주파수(Encounter Frequency)
- Z(t) = 심도

III. 제어알고리즘

피제어 시스템은 제어입력이 선수수평타(δb)와 선미수평타(δs), 시스템 출력이 심도(Z)와 피치(θ)으로 각각 2개 이상이므로 다변수 시스템(Multivariable System)이다. 이와 같은 시스템의 경우에는 고전제어기 설계보다 LQ 제어기와 같은 현대 제어이론에 의한 제어기설계가 용이하다. 현대 제어이론에 기본적인 자동심도 제어기설계는 기 제시되었으나[4], 실제 시스템에 대한 비교적 정확한 모델링과 유체계수값들을 필요로 하기 때문에 본 논문에서는 이러한 데이터 획득이 어려운 경우에도 제어기 설계가 용이한 인공지능 제어기법중 퍼지제어기(Fuzzy Logic Controller)를 적용하여 보았다.[5] 퍼지제어기는 단일 입력 출력 시스템에는 적용이 쉬우나 다변수 시스템에는 쉽지 않으므로 다음과 같은 방법으로 적용하였다.

수중운동체가 심도변경을 수행할 경우 Coarse 구간에서는 피치(θ)와 피치변화율($\dot{\theta}$), 원하는 심도부근인 Fine 구간에서는 심도(z)와 심도변화율(\dot{z})에 비례하는 피치($\theta \propto -z/u$)를 각각 이용하였으며 심도유지시 부력의 변화에 의한 정상상태 오차를 제거하기 위하여 적분항을 고려하고 이로 인해 발생하는 공격각(Angle of Attack)에 따른 퍼지제어규칙(Fuzzy Control Rule)이 적용되도록 보강하였다. 이때 멤버십 함수(Membership Function)는 실시간을 위해 삼각형으로 고려하였다.

이 외에 파도의 우세주파수(Dominant Frequency)에 오염된 심도측정 센서를 위해 적응노치필터(Adaptive notch Filter) 설계와 함께 함속도변화에 따라 제어이득이 조정되도록 하였다. 기타 심도센서고장, 선미타 구동장치 고장 및 기타 비정상적인 작동이 발생되면 안전로직(Safety Logic)에 의해 조타수에게 경고할 수 있도록 고장검출 로직도 설계되어 있다.

이와 같이 설계된 퍼지제어 구성도는 그림 1에, 제어규칙은 표 1에 각각 나타내 보였다.

IV. 실시간 구현

앞에서 제안된 제어알고리즘을 Intel 8086 및 8087 마이크로프로세서로 구현하였고, 센서 및 제어신호등의 입.출력 인터페이스를 그림 2와 같이 설계 제작하였다. 적용언어는 PL/M-86이고 실행시간은 0.1초이다. 이와 같이 설계 제작된 자동심도 제어기를 검증하기 위해서 6자유도 수중운동과 센서신호를 재현해 줄 수 있는 PC-386 Based T800 Transputer 를 이용한 실시간 시뮬레이터를 개발하였으며, 개략적인 구성도는 그림 3과 같다. 이때 6자유도 운동방정식은 Euler 방법으로

1차만 고려하였다. 실시간 시뮬레이터는 실행시간이 0.01초로 A/D, D/A, D/S 변환하도록 설계되어 있으며 실험모습은 그림 4에, 전형적인 시뮬레이션 결과는 그림 5에 나타냈다. 적용된 퍼지제어 알고리즘은 시스템 모델과 유체계수를 모르더라도 제어입력에 대한 시스템 응답데이터 만으로도 시행착오적으로 제어규칙을 조정하여 적절한 제어성능을 얻을 수 있음을 보여준다.

V. 결론

본 논문에서는 퍼지를 이용한 자동심도 제어알고리즘 개발과 실시간 구현을 위한 제어장치 및 실시간 시뮬레이션에 관해 소개하였다. 본 실험을 통해서 제어기의 성능 및 설계검증을 성공적으로 수행하였고, 특히 퍼지 제어기는 수중운동체의 정확한 모델과 유체계수 값을 알 수 없는 경우에도 심도제어장치 설계에 유용하게 적용될 수 있음을 확인하였다.

참고 문헌

- [1] Lennart Bystrom, "Adaptive Control of a Submarine in Snorting Condition in Waves", WARSHLP 88 Inter.Sympo.on Conventional Naval Submarines, Paper No.9 ppl-9, May 1988.
- [2] J.Feldman, "DTNSRDC revised Standard Submarine Equation of Motion", DTNSRDC/spp-0393-09, 1979
- [3] Bhattachayya, "Dynamics of Marine Vehicle", John Wiley & Sons, 1978.
- [4] 이동익, 윤형식, 양승윤, 최중락 "수중운동체 자동심도 제어시스템 설계연구", 90 한국자동차제어 학술회의 논문집, Vol.1 pp481-484, Oct.1990.
- [5] H.J.Zimmermann, "Fuzzy Set Theory and Its Applications", Kluwer-Nijhoff Publishing, 1985.



Fig4. Scene of Experiment.

Table 1. Fuzzy Control Rule

(a) Coarse Mode

· Down Δ

θ	PB	PM	ZO	NM	NB
$\dot{\theta}$	PB	PM	ZO	NM	NB
PB	PB	PB	ZO	NB	NB
PM	PB	PM	ZO	NM	NB
ZO	PB	PM	ZO	NM	NB
NM	PM	ZO	ZO	ZO	NM
NB	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO

· Up Δ

θ	PB	PM	ZO	NM	NB
$\dot{\theta}$	PB	PM	ZO	NM	NB
PB	NB	NB	ZO	PB	PB
PM	NB	NM	ZO	PM	PB
ZO	NB	NM	ZO	PM	PB
NM	NM	ZO	ZO	ZO	PM
NB	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO

(b) Fine Mode

θ	PB	PM	ZO	NM	NB
Z	PB	PM	ZO	NM	NB
PB	PB	PB	PB	PM	ZO
PM	PB	PM	PM	ZO	NM
ZO	PB	PM	ZO	NM	NB
NM	PM	ZO	NM	NB	NB
NB	ZO	NM	NB	NB	NB

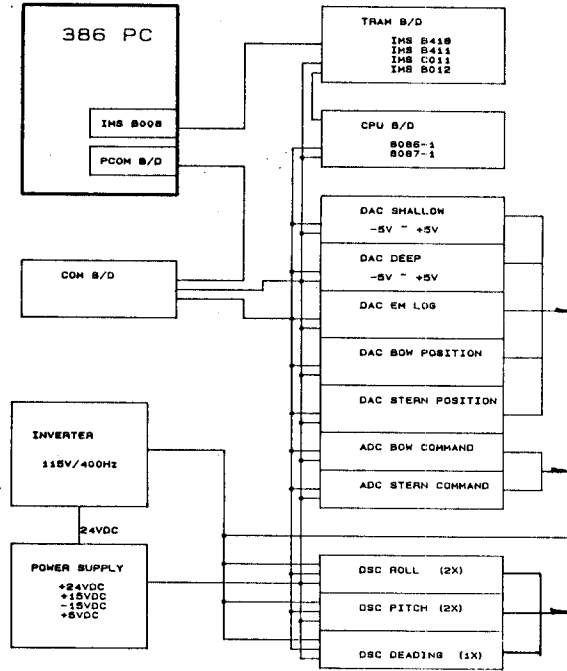


Fig3. Block Diagram of Real Time Simulator Using PC-386 Based T800 Transputer.

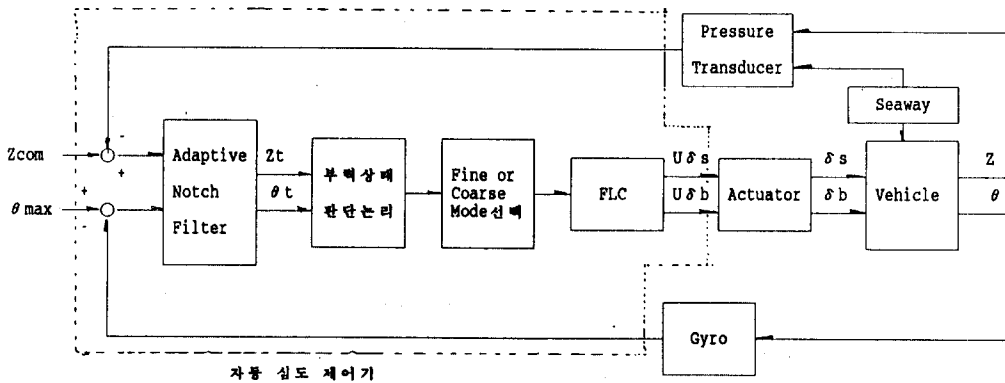


Fig1. Block Diagram of Auto Depth Controller Using Fuzzy Logic Control.

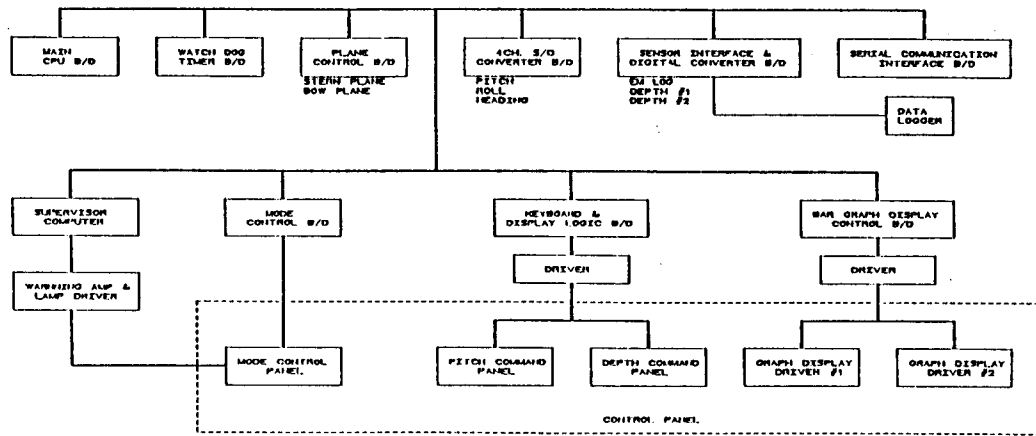


Fig2. Block Diagram of Hardware of Auto Depth Controller.

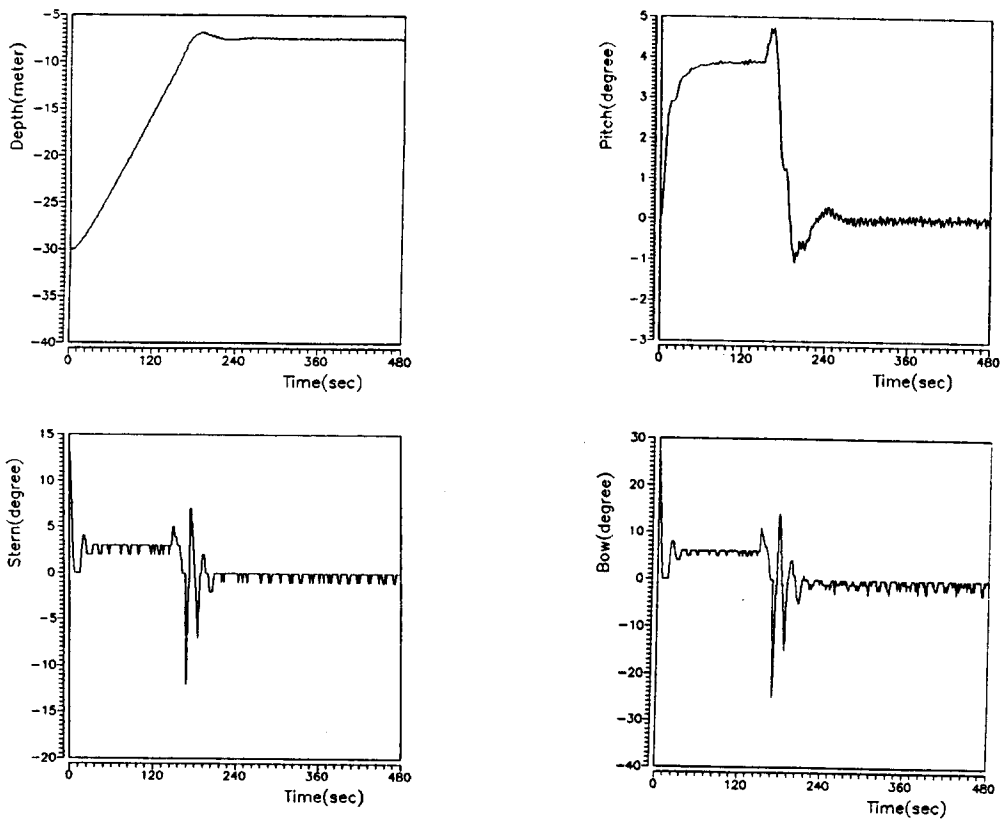


Fig5. Typical Simulation Results (at Boat Speed=4Kts)