

소형 자율 수중 운동체의 비연성 제어기 설계 및 HILS 기법을 이용한 성능 평가

Decoupled Controller Design of Small Autonomous Underwater Vehicle and Performance Test using HILS

현 철*

Chul Hyun

ABSTRACT

In this paper, decoupled controller design for Autonomous Underwater Vehicle(AUV) and its simulated performance test results and Hardware In the Loop Simulation(HILS) results are presented. Control system design is done using the PD control scheme. Stability analysis and step response of closed loop system under uncertain parameter condition are also presented. The results of full coupled nonlinear model simulation show the well applicability of the designed controller. From the results of HILS, we can verify performance of real time processing and implemented hardware for AUV.

Keywords : AUV(자율 수중 운동체), PID control(PID 제어기법), HILS(Hardware In the Loop 시뮬레이션), Actuator Modeling(구동기 모델링)

1. 서론

자율 수중 운동체(AUV)는 해양 탐사 활동부터 국방 분야까지 다양한 활용 범위를 갖는다. 해양 탐사 활동이나 호밍 어뢰 등의 대표적인 AUV는 목적이나 운용 시간이 각각 다르지만, 모두 정밀한 조종제어 알고리즘이 요구되는 시스템이다. 이에 비해, 적의 호밍 어뢰로부터 아함을 보호하기 위하여 적 호밍 어뢰를 기만하여 아함이 회피 기동할 수 있는 시간을 확보하거

나, 적 어뢰가 추진 연료를 소모하여 자침하도록 사용하는 수중 운동체는 높은 정밀도를 요구하지 않는다^[1]. 이러한 AUV는 소형 저가의 MEMS 관성 센서를 이용하여 조종 제어 시스템을 구성할 수 있다.

AUV의 제어 시스템 중에서 심도제어기와 경로 제어기로 구성되는 자동 조종장치는 AUV의 자율 제어에 있어서 매우 중요한 기능을 하게 된다^[2]. 어뢰 형태의 소형 AUV는 여러 계수의 불확실성, 연성된 형태의 비선형성, 환경적 외란 등의 이유로, 일반적으로 이에 대한 제어기의 설계는 용이하지 않다^[3]. 더구나 AUV의 크기가 소형인 경우는 항체 자체의 안정성이 떨어지기 쉽기 때문에, 목표 성능과 안정성을 충족시킬 수 있도록 충분한 마진을 갖는 제어기가 필수적이다.

† 2012년 11월 12일 접수~2013년 2월 22일 게재승인

* LIGNEX1(LIGNex1)

책임저자 : 현 철(chul.hyun@lignex1.com)

본 논문에서는 10노트 이상의 속력으로 기동하는 소형 AUV에 대하여 비선형과 선형 시스템의 가정 하에서, 가로축과 세로축, 그리고 롤 방향에 대한 제어기를 각각 설계하였다. 설계된 제어기의 기본적인 성능과 유체력 계수 불확실성에 대한 안정성은 비선형 연성 모델을 이용한 시뮬레이션을 통하여 평가하고, 하드웨어 구현 성능과 실시간 처리 능력은 HILS를 이용하여 검증하였다.

2. 운동 방정식

6자유도 운동을 하는 AUV의 운동은 Fig. 1과 같이, 일반적으로 지표고정 좌표계와 동체고정 좌표계를 이용하여 표현된다^[4,5].

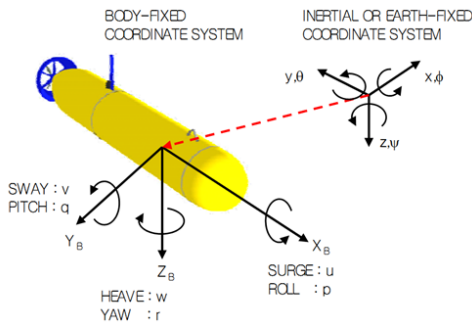


Fig. 1. Body-fixed and earth-fixed reference frames of AUV

이 때 지표고정 좌표계는 AUV의 위치와 오일러각을 표시하고, 동체 고정 좌표계는 선속도 및 각속도를 표현한다^[5]. 본 논문의 AUV 운동방정식은 식 (1)과 같이 뉴턴의 제 2법칙으로부터 유도된 일반 AUV의 비선형 방정식을, xz 평면을 기준으로 대칭인 형상과 평형상태에 대해서 선형화하여 적용하였다.

$$\begin{aligned}
 X &= m(\dot{U} + QW - RV) \\
 Y &= m(\dot{V} + RU - PW) \\
 Z &= m(\dot{W} + PV - QU) \\
 L &= I_x \dot{P} + (I_z - I_y)QR - I_{xz}(\dot{R} + PQ) \\
 M &= I_y \dot{Q} + (I_x - I_z)RP - I_{xz}(R^2 - P^2) \\
 N &= I_z \dot{R} + (I_y - I_x)PQ - I_{xz}(\dot{P} - QR)
 \end{aligned} \quad (1)$$

롤 안정화 제어에 의해 롤각은 0으로 평형상태를 유

지한다는 가정하에, 형상과 질량분포가 수직면과 수평면에 대해 대칭인 운동체가 연직면에서 직선 운동하는 경우에 대해 운동방정식을 정리하면 식 (2), (3)과 같다.

$$\begin{aligned}
 m(\dot{u} + W_0q) &= X_u u + X_u \dot{u} - (W - B)\cos\theta_0\theta \\
 m(\dot{v} - W_0p + U_0r) &= Y_v v + Y_v \dot{v} + Y_r r + Y_r \dot{r} \\
 &\quad + (W - B)\sin\theta_0\psi + (W - B)\cos\theta_0\phi + Y_{\delta_r} \delta_r \\
 m(\dot{w} - U_0q) &= Z_w w + Z_w \dot{w} + Z_q q + Z_q \dot{q} \\
 &\quad - (W - B)\sin\theta_0\theta + Z_{\delta_c} \delta_c
 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned}
 I_x \dot{p} &= L_p p + L_p \dot{p} + L_{\delta_a} \delta_a \\
 I_y \dot{q} &= M_w w + M_w \dot{w} + M_q q \\
 &\quad + M_q \dot{q} - x_B B \sin\theta_0\theta + M_{\delta_c} \delta_c \\
 I_z \dot{r} &= N_v v + N_v \dot{v} + N_r r + N_r \dot{r} \\
 &\quad - x_B B \sin\theta_0\psi - x_B B \cos\theta_0\phi + N_{\delta_r} \delta_r
 \end{aligned} \quad (3)$$

제어기의 설계를 위해 비선형 운동방정식을 가로축과 세로축으로 나누고, 일정 속도와 일정 심도를 가정한 평형조건에서의 선형화된 상태 공간 방정식은 식 (4)와 같다. 식 (4)는 각각 가로축, 세로축, 롤축에 대한 선형화된 상태 공간 방정식이다. 다음 절에서 이를 기반으로 제어기 설계 및 안정성 평가를 하게 된다.

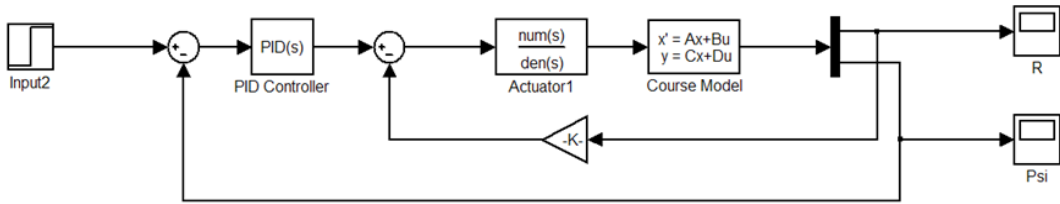
$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -3.1432 & 2.6833 & 0 \\ 10.5197 & -10.4568 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 6.5087 \\ 26.5229 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_r \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{w} \\ \dot{q} \\ \dot{\theta} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -3.1432 & 2.6833 & 0 & 0 \\ 10.5197 & -10.4568 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -8.2304 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ q \\ \theta \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 6.5087 \\ 26.5229 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_c \quad (5)$$

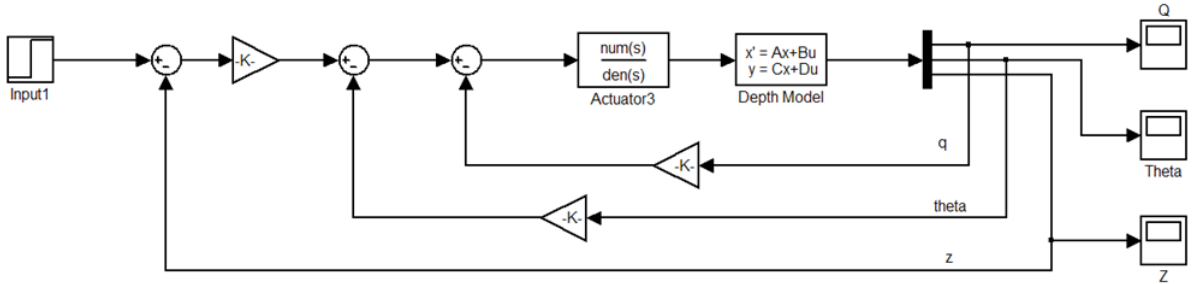
$$\begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -17.0768 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ \phi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 6.492 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_a \quad (6)$$

3. 제어기 설계

AUV의 가로축, 세로축과 롤 방향에 대한 제어기는 PD제어기와 유사한 형태로, 비선형을 가정한 각



(a) Horizontal axis



(b) Vertical axis

Fig. 2. Block diagram of AUV control system

축에서 자세측정장치(AHRS)와 각속도 센서 그리고 심도계의 출력을 이용하여 식 (7)과 같이 설정하였다^[5].

$$\begin{aligned} \delta_r &= K_\psi(\psi_d - \psi) - K_r r \\ \delta_e &= K_z(z_d - z) - K_\theta\theta - K_q q \\ \delta_a &= -K_\phi\phi - K_p p \end{aligned} \quad (7)$$

제어기를 포함한 가로축과 세로축의 블록 다이어그램은 Fig. 2에 도시하였다. 세로축은 가로축과 비슷한 형태이지만, 식 (5)에서와 같이 심도에 대한 상태가 추가되어 있음을 볼 수 있다. 롤축에 대한 블록선도는 입력명령이 0으로 고정되는 것을 제외하면 가로축의 블록선도와 동일하기 때문에, 본 논문에서는 생략하였다.

식 (7)의 $K_\psi, K_z, K_\theta, K_\phi$ 는 비례 이득, K_p, K_q, K_r 는 미분 이득과 관련된 값으로서, 미분폭주(derivative kick)를 방지하는 형태의 구성이다. 이 때의 적절한 이득값은 극점배치기법을 통하여, AUV 기동의 안정성을 유지하면서 비선형 오차, 구동기 특성, 센서 오차 등에 의한 성능 저하 요소를 극복할 수 있도록 충분한 마진을 가질 수 있게 얻어내었다.

다음의 Fig. 3, 4는 식 (7)의 제어기를 이용하여 폐

루프를 구성하였을 때, 각각의 이득의 변화에 대한 폐루프 시스템 극점의 위치 변화를 도시한 결과이다. 각 그림에서 사각형 표시는 이득값이 작을 때의 폐루프 시스템 극점을 나타내고, 이로부터 이득값이 점점 커질 때 극점의 변화 경로를 실선으로 표시하였다. 이득값이 커졌을 때의 극점의 위치는 원으로 표시하였다. 가로축은 대체로 극점이 좌반평면에 위치하여 안정하지만, Fig. 4에 나타나 있듯이 세로축은 이득값에 따라서 극점이 우반평면에 위치하여 시스템이 불안정해지는 경우가 있었다. 적절한 시행착오 과정을 통하여 안정성과 목표 성능을 함께 만족할 수 있도록 최종 선정된 이득에 대한 극점의 위치를 X 마크로 표시하였다.

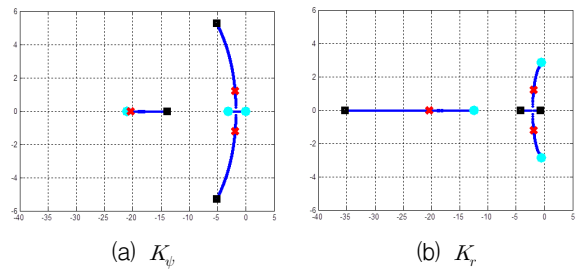


Fig. 3. Pole placement of course control

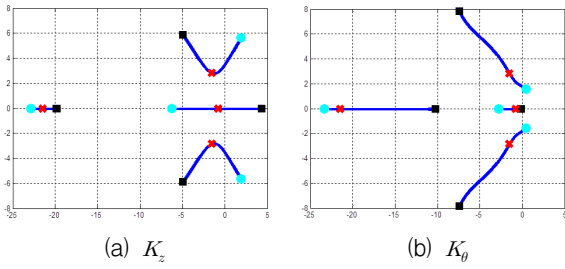
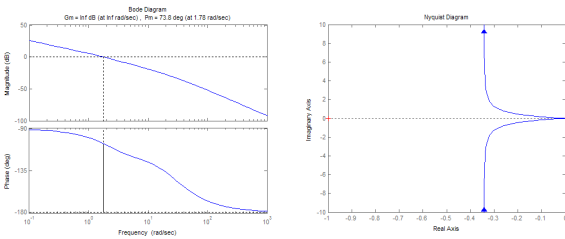
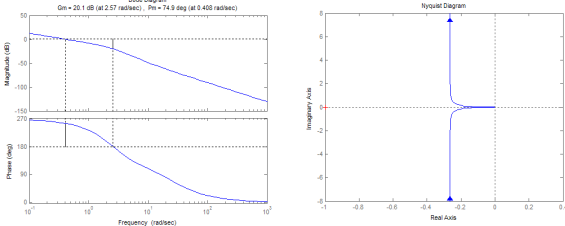


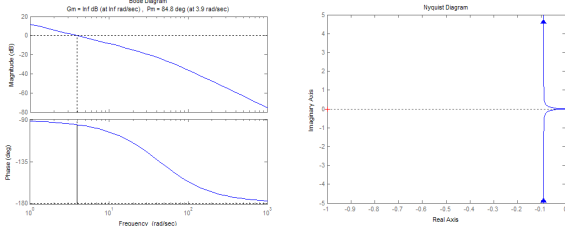
Fig. 4. Pole placement of depth control



(a) Horizontal axis



(b) Vertical axis



(c) Roll axis

Fig. 5. Stability analysis of each decoupled axis

가. 선형제어루프의 안정성 및 성능 평가

위의 극점배치기법을 통하여 설계된 제어 이득에 대하여 각 축 별로 이득여유(GM : Gain Margin) / 위상여유(PM : Phase Margin)와 나이퀴스트 선도(Nyquist Plot)는 Fig. 5의 (a)~(c)에 도시되어 있다. 가로축은 무한대의 GM에 73.8도의 PM을 가졌고, 세로축은

20.1dB의 GM에 74.9도의 PM, 롤축은 무한대의 GM과 84.8도의 PM을 보였다. 이는 일반적인 폐루프 시스템의 기준에서 충분히 안정적인 결과이지만, 여러 가정 하에서의 선형모델에 대한 분석 결과이므로, 실제 안정성과 성능은 비선형 연성모델에 대하여 검증될 필요가 있다.

비연성을 가정한 가로축, 세로축과 롤 방향의 선형 운동방정식의 계수가 30%의 범위에서 랜덤하게 변할 때, 설계된 제어기를 포함한 폐루프의 계단입력에 대한 반응특성은 다음 Fig. 6과 같다. 세 개의 그림은 각각 가로축의 요(yaw)각 출력, 세로축의 심도출력, 롤축의 롤(roll)각 출력을 나타낸다. 세 경우 모두 계수의 불확실성이 있는 경우에도 안정성이 유지됨을 확인할 수 있다. 선형 제어기 적용에 가장 중요한 롤축 제어를 가장 빠르게 수렴하도록 설정하였고, 세로축은 Fig. 5(b)에서 나타나듯이 불안정해질 가능성이 있고, 제어 과정 중 오버슈트(overshoot)가 발생하면 해저면과의 충돌 우려가 있기 때문에, 반응속도가 다소 느리더라도 안정성 확보와 오버슈트 방지에 중점을 두었다. Fig. 6의 두 번째 그림에서 심도출력은 계수 불확실성 조건에서도 위 조건을 충족함을 볼 수 있다.

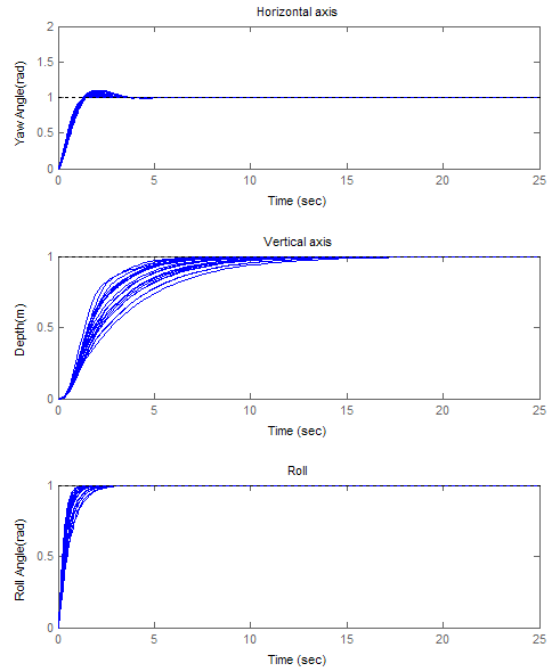


Fig. 6. Performance of linear controller under parameter uncertain condition

4. 구동기 모델

앞의 제어기 설계 및 성능 평가는 이상적인 구동기에 대하여 이루어진 결과이다. 그러나 실제의 구동기는 물리적, 기계적인 특성으로 인하여 제어 타각과 타각구동 속도에 한계가 있고, 명령 전달 과정에서 시간 지연 등도 발생할 수 있다. 이와 같은 구동기의 제한 요인들은, 페루프 제어 시스템의 전체적인 성능 저하를 유발할 수 있고, 심할 경우는 안정성을 해칠 수도 있다. 이러한 견지로, 대상 AUV에 적용되는 구동기의 특성을 파악하고 이를 반영하여 통합적인 제어 성능을 도출하는 것이 필수적이라 하겠다. 본 논문에서는 간이 해상 시험으로부터 획득된 제어 타각 구동기의 특성으로부터 구동기 모델을 유도하고, 이를 시뮬레이션 모델과 HILS에 포함하여 통합 제어성능을 파악할 수 있도록 하였다.

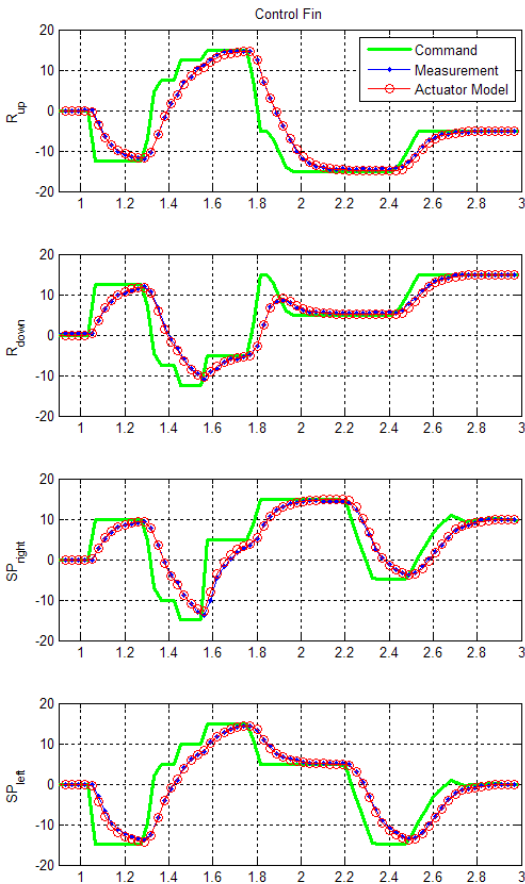


Fig. 7. Actuator response property

간이 해상 시험에서 얻은 구동기 특성은 Fig. 7에 나타나 있다. 초록색 실선의 제어 타각 구동 명령에 대하여 실제 구동기 동작은 파란점과 선으로 표시하였다.

구동기는 식 (8)과 같이 순수 시간 지연(t_d)과 1차 지연 성분(t_c)으로 모델링하였다.

$$Actuator\ Transfer\ Function : e^{-t_d s} \times \frac{1}{t_c s + 1} \quad (8)$$

t_d : pure time delay term

t_c : 1st order delay term

설정된 모델에 최소자승법(Least Square)를 적용하여 각 지연 성분(t_d , t_c)마다 적절한 값을 얻어내었고, 이는 Fig. 7에 빨간색 원과 선으로 함께 표시되어 있다. Fig. 7의 결과로부터 순수 시간 지연과 1차 지연 성분으로 모델링 된 구동기 모델은 간이 해상 시험 결과에 잘 부합함을 확인할 수 있었다.

5. 시뮬레이션

선형 모델에 대하여 설계된 제어기의 실제 안정성과 성능은 비선형 연성 운동 모델에 대하여 검증되어야 한다. Fig. 8은 본 논문의 대상 AUV 시스템에 대한 비선형 운동 방정식을 MATLAB Simulink에서 구현한 운동 모델이다. 6자유도 운동 모델과 중력/부력 모델, 제어타각과 유체력 모델, 추력 모델 등으로 구성되어 있으며, 여기에 앞에서 설계된 제어기와 구동기 모델을 적용하여 AUV 제어 시스템의 특성과 성능을 모사할 수 있다.

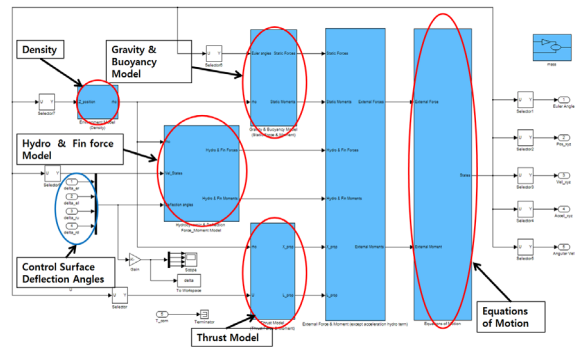


Fig. 8. Nonlinear 6-DOF model for simulation

Fig. 8에 도시한 비선형 연성 운동 모델에 식 (8)의 구동기 모델을 적용하여 10노트 이상의 속력으로 기동하고 있는 정상상태에서 3m의 심도 입력에 대한 결과를 살펴봄으로써 설계된 제어기의 성능을 검증해 보았다. 결과는 Fig. 11, 12와 같다. Fig. 12로부터 정상상태에서 심도 입력이 인가되었을 때, 수 초안에 안정적으로 심도 변화 기동을 수행하는 것을 확인할 수 있고, Fig. 11은 이 때의 각속도와 자세각을 보여준다. 비연성과 선형의 가정하에서 설계한 제어기가 구동기의 제한조건 하에서도 비선형 연성 시스템에서 효과적으로 적용됨을 볼 수 있었다. 참고로 이 시뮬레이션에서는 측정 센서의 잡음을 고려하지 않았기 때문에 상당히 깨끗한 그림을 얻을 수 있었다.

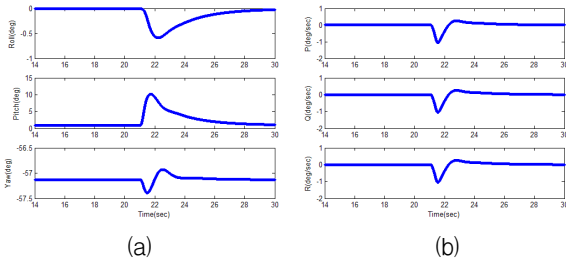


Fig. 9. Euler angle and angular rate(simulation)

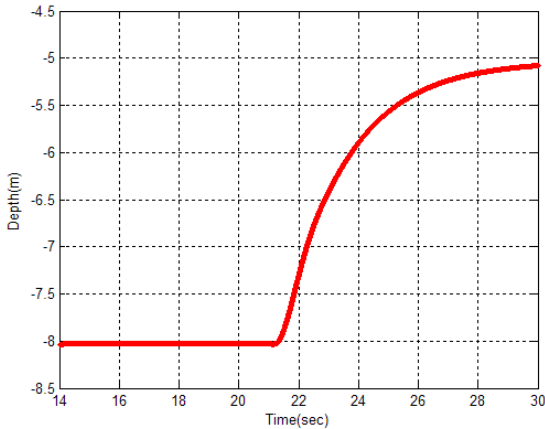


Fig. 10. Depth output(simulation)

6. Hardware In the Loop Simulation

가. HILS 시스템

설계된 제어기 실시간 성능과 구현 기능의 검증을

위해 실제 해상 시험과 유사한 상황을 구성하여 육상 검증 실험인 HILS를 수행하였다. Fig. 11은 구축된 HILS의 구성도이고, Fig. 12는 수중운동을 모사하는 3축 Rate table 사진이다.

HILS의 구성은 Fig. 11과 같이 실시간 컴퓨터(Real Time Computer)에서 시나리오에 따라 운동방정식을 계산하여 운동제원기(3축 Rate Table : FMS)를 작동하고, FMS에 장착된 MEMS AHRS에서 각속도를 측정하고 오일러 각을 추정하여 중앙 통제 장치로 전송한다. 중앙 통제 장치에서는 설계된 제어 알고리즘에 따라 적절한 제어 명령을 작동기(구동기 : Actuator)로 전달하고, 주 컴퓨터(HOST Computer)에서는 데이터 저장 및 전체적인 HILS 모니터링을 수행한다.

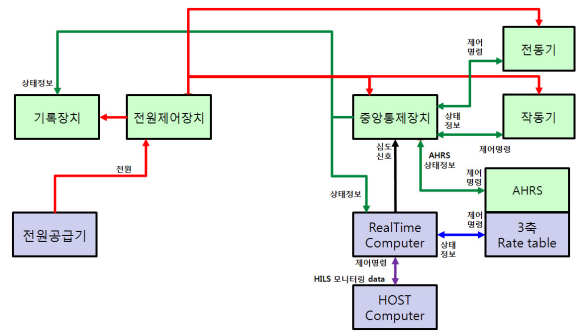


Fig. 11. HILS configuration

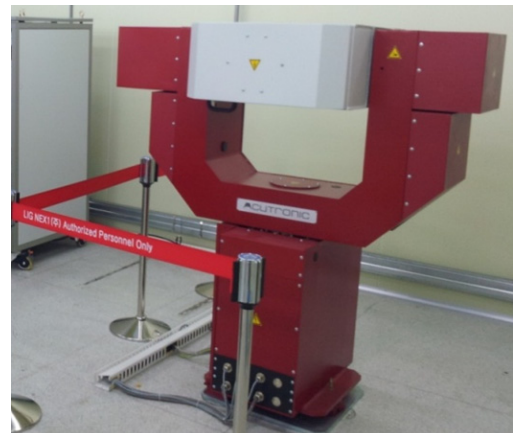


Fig. 12. 3-axis rate table

나. HILS 결과

앞 절과 동일한 시뮬레이션 시나리오 조건에 대하여 HILS를 수행하였다. 이 때 100deg/hr급의 MEMS 관성

센서가 적용된 AHRS를 사용하였다. 그 결과는 Fig. 13, 14와 같다. Fig. 14에서 다소 매끄럽지 않은 구간이 있으나 대체적으로 시뮬레이션 결과인 Fig. 10과 잘 부합하고 있음을 확인할 수 있다. 세부적인 차이는 Fig. 13에 나타난 MEMS 자이로스코프의 잡음과 바이어스의 영향으로 판단된다. 이와 같은 결과로부터, 본 논문에서 설계된 제어기의 실제 구현된 알고리즘이 MEMS AHRS 및 구동기와 잘 연동되어 동작함을 통합적으로 검증할 수 있었다.

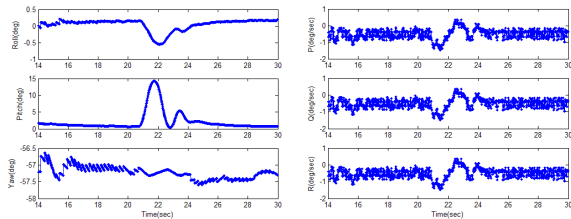


Fig. 13. Euler angle and angular rate(HILS)

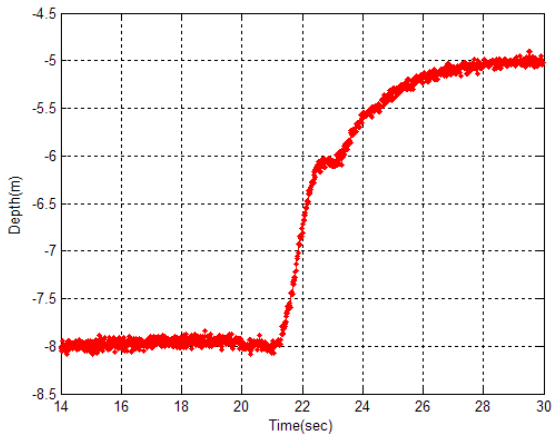


Fig. 14. Depth output(HILS)

7. 결론

본 논문에서는 10노트 이상의 속력으로 정속 기동하는 소형 자율 수중 운동체(AUV)에 대하여 비연성, 선형의 가정하에서 가로축과 세로축, 그리고 롤 방향에 대한 PD제어기를 충분한 마진을 갖도록 설계하였다. 설계된 제어기는 운동방정식의 계수 불확실성이 존재하는 조건에서도 강인한 성능을 보였으며, AUV의 비선형, 연성의 6자유도 모델에 적용한 시뮬레이션 결과,

제한된 구동기 특성 범위 내에서 잘 동작하였다. 추가적으로 설계된 제어기를 HILS에 연동하여 AUV의 하드웨어와 소프트웨어를 통합적으로 검증하였다.

References

- [1] 황아름, 윤선일, 최철호, 조현진, “HILS를 이용한 MEMS 센서 기반 수중 운동체 제어 알고리즘 검증”, 한국군사과학기술학회 2009년 종합학술대회, pp. 1988~1991, 2009
- [2] K. Jung et al., “Autopilot Design of an Autonomous Underwater Vehicle Using Robust Control”, Transaction on Control Automation, and Systems Engineering, ICROS, pp. 264~269, 2002.
- [3] 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.
- [4] B. Jalving, “The NDRE-AUV Flight Control System”, IEEE Journal of Oceanic Engineering, IEEE, pp. 497~501, 1994.
- [5] T. Fossen, Guidance and Control of Ocean Vehicles, John Wiley & Sons Ltd., 1994.
- [6] C. Hyun, “Course and Depth Control of Autonomous Underwater Vehicle”, Proc. of the International Conference on Electronics, Information and Communication, pp. 70~71, 2012.
- [7] J. YUH, “Design and Control of Autonomous Underwater Robots : A Survey”, Kluwer Academic Publishers, Printed in Netherlands, Autonomous Robots, pp. 7~24, 2000.
- [8] S. Showalter, “The Legal Status of Autonomous Underwater Vehicles”, The Marine Technology Society Journal, Spring, Vol. 38, No.1, pp. 80~83, 2004.
- [9] 양승윤, “무인 수중운동체의 H_{∞} 심도 및 방향 제어기 설계”, 대한기계학회논문집 A권, 제24권 제12호, pp. 2980~2988, 2000.
- [10] 황종현, 백동현, 홍성경, 조현진, 김삼수, “MEMS 관성센서를 이용한 무인수중운동체의 통합자세제어기 설계 연구”, 제어자동화시스템공학회, pp. 368~373, 2008

[11] 황중현, 홍성경, 조현진, “소형 자율무인 수중운동체의 제어시스템 설계를 위한 통합 시뮬레이터 구축 - HILS 검증”, 제어·로봇·시스템 공학회지, 제14권 제4호, pp. 42~50, 2008.

[12] 백수호, 홍성경, “무인항공기의 비행경로 생성 및 유도제어 알고리즘 연구 : HILS를 통한 검증”, 제어·로봇·시스템 공학회지, 제14권 제12호, pp. 1238~1243, 2008.