

모델 불확실성을 갖는 6자유도 원격조종 수중로봇의 외란 관측기 기반 제어

Disturbance Observer-Based Control for 6-DOF Remotely Operated Underwater Vehicle with Model Uncertainties

김준식¹·이동철²·최영진[†]

Junsik Kim¹, Dongchul Lee², Youngjin Choi[†]

Abstract: This paper proposes a disturbance observer-based control for 6-DOF remotely operated underwater vehicles with model uncertainties. The sum of external disturbance and the forces generated from model parameters except for the inertial matrix of the hydrodynamic model is defined as a lumped disturbance in this paper. Then, the lumped disturbance caused by model uncertainties and the external forces is estimated using the disturbance observer. Fortunately, the disturbance observer is constructed as a linear form because all the elements of the inertial matrix of the hydrodynamic model are constants. To verify the proposed control scheme, we show that the actual lumped disturbance is similar to the estimated lumped disturbance obtained by the disturbance observer. Finally, the position tracking performance in the disturbance environment is confirmed through the comparative study with a traditional inverse dynamics PD controller.

Keywords: Remotely Operated underwater Vehicle (ROV), Disturbance Observer (DOB)

1. 서론

최근 수중 환경에서 탐사, 수집 등의 다양한 작업을 수행함에 있어 원격조종 수중로봇(Remotely Operated underwater Vehicle, ROV)의 활용도가 증가 하는 추세이다. 이러한 작업들을 수행하기 위해서는 원격조종 수중로봇이 자세 안정성을

유지하며 동작해야 한다. 비례-적분-미분(Proportional-Integral-Derivative, PID)제어^[1]는 이를 위해 가장 널리 사용되는 제어기법 중 하나이다. 하지만 해류, 난류 등의 외란으로 인해 시스템의 비선형성이 커짐에 따라 성능이 저하되는 단점이 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위해 모델예측제어(Model Predictive Control, MPC)^[2,3], 슬라이딩모드제어(Sliding Mode Control, SMC)^[4,5]등이 제안되었다. 모델예측제어를 위해서는 모델 파라미터 정보가 필요하다. 하지만 지상 환경에서와는 달리 수중 환경에서는 유체의 특성으로 인해 부가 질량계수(added mass coefficient), 부가 코리올리계수(added Coriolis coefficient), 감쇠계수(damping coefficient)에 대한 정보가 추가로 요구되며, 이를 얻기 위한 계산 과정^[6]이 복잡하고 환경에 따른 불확실성이 크다. 또한, 슬라이딩 모드제어는 불연속 스위칭 입력에 의한 채터링(chattering)이 발생한다는 단점이 있다.

따라서 본 논문에서는 모델 불확실성을 갖는 6자유도 원격조종 수중로봇의 외란 관측기(Disturbance Observer, DOB) 기반 제어기법을 제안한다. 이를 통해 모델의 불확실성과 외부의 외란(external disturbance)을 포함하는 덩어리 외란(lumped

Received : Oct. 29, 2022; Revised : Nov. 11, 2022; Accepted : Nov. 11, 2022

※ This work was supported in part by the Technology Innovation Program funded by the Korea Ministry of Trade, Industry and Energy, (20017345), and in part by Institute of Information & Communications Technology Planning & Evaluation (IITP) grant funded by the Korea government (MSIT) (No.RS-2022-00155885, Artificial Intelligence Convergence Innovation Human Resources Development (Hanyang University ERICA)), Republic of Korea

1. Ph.D. Student, Department of Electrical and Electronic Engineering, Hanyang University, Ansan, 15588, Korea (scott9569@hanyang.ac.kr)

2. Principal Researcher, Samsung SDS & Ph.D. Candidate, Department of Electrical and Electronic Engineering, Hanyang University, Ansan, 15588, Korea (ddamjil@hanyang.ac.kr)

† Professor, Corresponding author: Department of Electrical and Electronic Engineering, Hanyang University, Ansan, 15588, Korea (cyj@hanyang.ac.kr)

disturbance)을 추정하여 보상을 할 경우 비선형 시스템을 선형 시스템처럼 제어할 수 있다는 장점을 가진다.

본 논문의 주요 내용 및 구성은 다음과 같다. 2장에서 원격조종 수중로봇의 기구학과 수력학 모델을 기술한다. 3장에서는 제어기 설계를 위한 덩어리 외란 정의 및 외란 관측기의 구성을 논하고, 4장에서는 시뮬레이션을 통해 제안한 제어방법과 기존의 기법을 비교하여 검증한다. 마지막으로 5장에서 결론과 향후 과제에 대해 서술한다.

2. 원격조종 수중로봇(ROV) 모델링

2.1 기준 좌표계

원격조종 수중로봇을 모델링하기 위해 [Fig. 1]에 제시되었듯이 차체 고정 좌표계와 지구 고정 좌표계, 두 가지 기준 좌표계를 사용한다. 지구 고정 좌표계에 대한 원격조종 수중로봇의 위치벡터는 $\eta = [x, y, z, \phi, \theta, \psi]^T$ 로 나타낼 수 있으며, (x, y, z) 와 (ϕ, θ, ψ) 는 각각 위치와 각도를 나타낸다. 차체 고정 좌표계에 대한 속도는 벡터 $\nu = [u, v, w, p, q, r]^T$ 로 나타낼 수 있고, (u, v, w) 와 (p, q, r) 는 각각 선속도와 각속도를 의미한다.

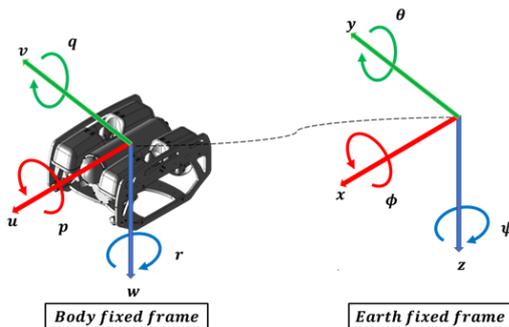
2.2 기구학 모델

원격조종 수중로봇의 기구학 모델은 다음 식 (1)과 같다.

$$\dot{\eta} = J(\eta)\nu \quad (1)$$

여기서, $J(\eta) \in R^{6 \times 6}$ 는 차체 고정 좌표와 지구 고정 좌표 사이의 변환 행렬이며 식 (2)와 같다.

$$J(\eta) = \begin{bmatrix} R(\eta) & 0^{3 \times 3} \\ 0^{3 \times 3} & T(\eta) \end{bmatrix} \quad (2)$$



[Fig. 1] Position of the vehicle in the earth fixed reference frame is denoted by η , and velocity of the vehicle in the body fixed reference frame is denoted by ν

이 때, $R(\eta) \in R^{3 \times 3}$ 는 선속도 변환 행렬로 식 (3)과 같으며,

$$R(\eta) = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & -s\psi c\theta + c\psi s\theta s\phi & s\psi s\theta + c\psi c\theta s\phi \\ s\psi c\theta & c\psi c\theta + s\psi s\theta s\phi & -c\psi s\theta + s\psi s\theta c\phi \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix} \quad (3)$$

$T(\eta) \in R^{3 \times 3}$ 는 각속도 변환 행렬로 식 (4)와 같다.

$$T(\eta) = \begin{bmatrix} 1 & s\psi s\theta/c\theta & c\phi s\theta/c\theta \\ 0 & c\phi & -s\phi \\ 0 & s\phi/c\theta & c\phi/c\theta \end{bmatrix} \quad (4)$$

2.3 수력학 모델

원격조종 수중로봇의 수력학 모델은 다음 식 (5)와 같다.

$$M\dot{\nu} + C(\nu)\nu + D(\nu)\nu + g(\eta) = \tau + d \quad (5)$$

이 때 $M \in R^{6 \times 6}$ 은 상수로만 구성되는 관성행렬(inertia matrix), $C(\nu) \in R^{6 \times 6}$ 는 속도의 함수로 기술되는 코리올리 행렬(Coriolis matrix), $D(\nu) \in R^{6 \times 6}$ 는 수중환경으로 인한 감쇠행렬(damping matrix), $g(\eta) \in R^{6 \times 1}$ 는 위치의 함수로 기술되는 중력과 부력(gravitation and buoyancy forces), $\tau \in R^{6 \times 1}$ 는 힘과 모멘트(generalized force and moment), $d \in R^{6 \times 1}$ 는 외란(disturbance)을 나타낸다. 여기서 M 과 $C(\nu)$ 는 수중환경으로부터의 부가 질량 행렬(added mass matrix) $M_a \in R^{6 \times 6}$ 와 부가 코리올리 행렬(added Coriolis matrix) $C_a(\nu) \in R^{6 \times 6}$ 가 적용되었기 때문에 $M = M_{rb} + M_a$, $C(\nu) = C_{rb}(\nu) + C_a(\nu)$ 과 같이 표현이 가능하다. 이 때 M_{rb} 는 원격조종 수중로봇 강체의 관성행렬이며 상수로만 구성됨에 유의하자. 또한 $C_{rb}(\nu)$ 는 원격조종 수중로봇의 코리올리 행렬로서 속도의 함수이다.

3. 제어기 설계

3.1 덩어리 외란(lumped disturbance) 정의

본 연구에서는 앞서 언급된 수력학 모델의 M_{rb} 을 제외한 모든 모델 파라미터로부터 생성되는 힘들의 합을 덩어리 외란(lumped disturbance)으로 정의한다. 이는 식 (6)과 같다.

$$d_L = d - M_a \dot{\nu} - (C_{rb}(\nu) + C_a(\nu))\nu - D(\nu)\nu - g(\eta) \quad (6)$$

이제 식 (6)에 식 (5)를 대입하여 정리하면, 다음 식 (7)과 같은 운동방정식을 얻게 된다.

$$M_{rb}\dot{\nu} = \tau + d_L \quad (7)$$

여기서 로봇 강체의 관성행렬 M_{rb} 가 상수행렬이므로 우리는 위의 식을 이용하여 선형 외란 관측기를 설계할 수 있다.

3.2 외란 관측기 기반 제어기 구성

[Fig. 2]는 식 (5)-(7)의 운동방정식을 바탕으로 구성한 본 논문에서 제안하는 외란 관측기 기반 제어기의 블록선도이다. [Fig. 2]에서 사용된 변수들은 다음 식 (8)과 같다.

$$Q(s) = \frac{1}{\alpha s + 1} \text{diag}(1, 1, 1, 1, 1, 1),$$

$$u_c = M_{rb}[K_P J^{-1}(\eta_{des} - \eta) + K_D(\nu_{des} - \nu)],$$

$$u = u_c - \hat{d}_L,$$

$$\hat{d}_L = Q(s)(M_{rb}\dot{\nu} - u)$$

여기서 $\eta_{des} \in R^{6 \times 1}$, $\nu_{des} \in R^{6 \times 1}$ 는 로봇 시스템이 추종해야 하는 위치 및 속도 지령이며, $\eta \in R^{6 \times 1}$, $\nu \in R^{6 \times 1}$ 는 로봇시스템에서 측정되는 위치와 속도이고, $Q(s) \in R^{6 \times 6}$ 는 저역통과 필터(low-pass filter)이다. 또한 $J \in R^{6 \times 6}$ 는 식 (2)의 좌표변환 행렬, K_P , K_D 는 각각 제어기의 비례이득과, 미분이득, 그리고 α 는 저역통과필터의 시상수(time constant)와 관련된 설계 파라미터이며, \hat{d}_L 는 외란 관측기를 통해 얻은 덩어리 외란의 추정 값이다. 이 때 제안된 제어기 구성을 위해 오직 로봇강체 관성행렬 M_{rb} 를 제외한 어떠한 로봇관련 모델 정보도 필요하지 않다.

설계된 외란 관측기로부터 얻은 값 \hat{d}_L 이 d_L 을 잘 추정함을 식 (7)-(8)로부터 다음과 같이 식 (9)를 유도하여 수식적으로 확인할 수 있다.

$$\hat{d}_L = Q(s)d_L$$

$$e = \hat{d}_L - d_L = (Q(s) - 1)d_L \quad (9)$$

이 때, 식 (9)로부터 덩어리 외란의 오차 e 는 $Q(s)$ 가 1일 경우 0이 된다는 것을 알 수 있다. 따라서 $Q(s) \approx 1$ 인 저주파 구간에서 $e \approx 0$ 이다. 제안된 외란 관측기 기반 제어기의 안정도의 증명은 기존의 연구결과^{7,8)}로 대체한다.

4. 실험 및 결과

본 논문에서는 제안된 방법을 검증하기 위해 외란이 있는 환경에서 원격조종 수중로봇을 제어하는 시뮬레이션을 진행한 뒤, 그 결과를 분석한다. 모든 시뮬레이션은 기존의 연구들로부터 잘 알려진 Blue Robotics社의 BlueROV2모델⁹⁾정보를 이용하여 MATLAB 2021b 버전에서 진행되었고, 추력기(thruster)에 대한 모델링은 추가적으로 고려하지 않았다.

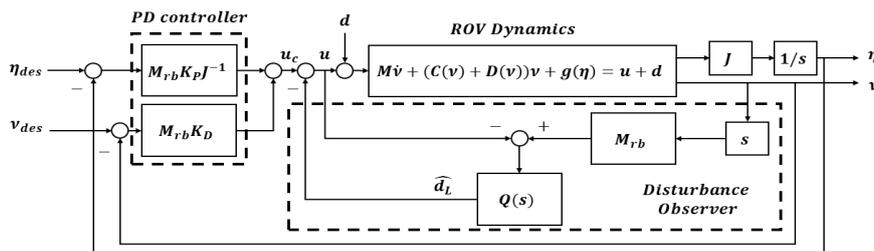
4.1 외란 관측기 성능 검증

외란 관측기의 성능을 실험적으로 검증하기 위해 식 (6)을 통해 계산된 값 d_L 과 외란 관측기를 통해 구한 추정 값 \hat{d}_L 을 비교한다. 제어기 성능 검증을 위한 설계 파라미터인 K_P , K_D , α 는 각각 $500\text{diag}(1, 1, 1, 1, 1, 1)$, $300\text{diag}(1, 1, 1, 1, 1, 1)$, 1.25로 선정하였고, 제어 주기는 100[Hz]로 진행하였다. 또한 로봇이 추종해야 할 시간의 함수로서의 목표 궤적은 수행시간 20초에 [Table 1]의 수치 값을 적용하여 3차 목표 궤적(desired cubic trajectory)을 생성하였다.

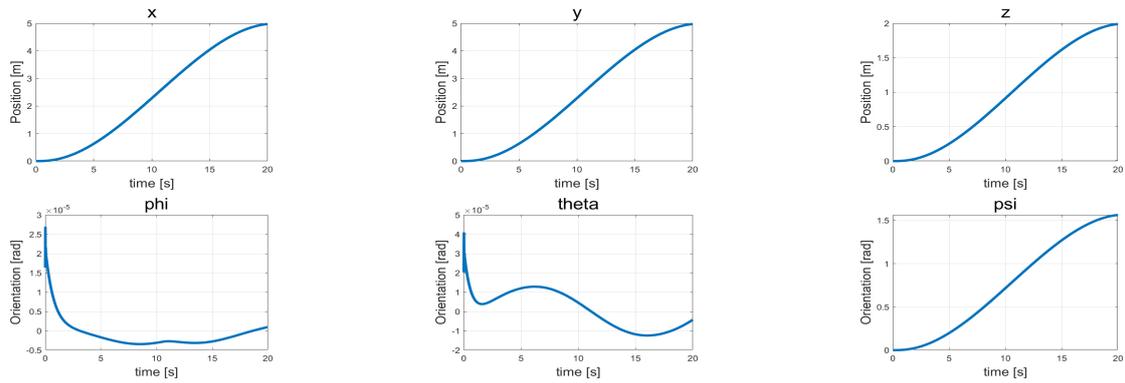
[Fig. 3(a)]는 일정한 외부 외란 $d = \text{diag}(1, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1)$ [N or Nm]이 인가된 환경에서 제안된 제어기에 목표 궤적을 인가

[Table 1] Initial and final value of desired trajectory

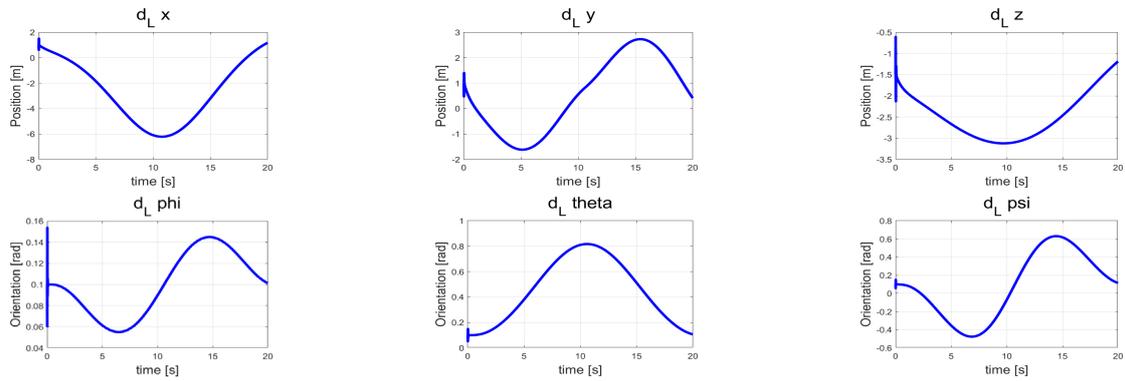
x_{start}	0 [m]	x_{end}	5 [m]	u_{start}	0 [m/s]	u_{end}	0 [m/s]
y_{start}	0 [m]	y_{end}	5 [m]	v_{start}	0 [m/s]	v_{end}	0 [m/s]
z_{start}	0 [m]	z_{end}	2 [m]	w_{start}	0 [m/s]	w_{end}	0 [m/s]
ϕ_{start}	0 [rad]	ϕ_{end}	0 [rad]	p_{start}	0 [rad/s]	p_{end}	0 [rad/s]
θ_{start}	0 [rad]	θ_{end}	0 [rad]	q_{start}	0 [rad/s]	q_{end}	0 [rad/s]
ψ_{start}	0 [rad]	ψ_{end}	1.57 [rad]	r_{start}	0 [rad/s]	r_{end}	0 [rad/s]



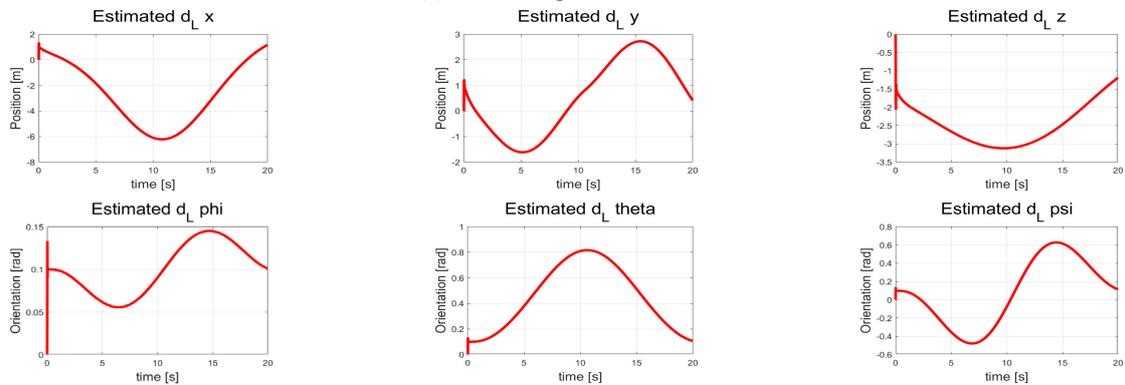
[Fig. 2] Block diagram of the Disturbance Observer-based controller



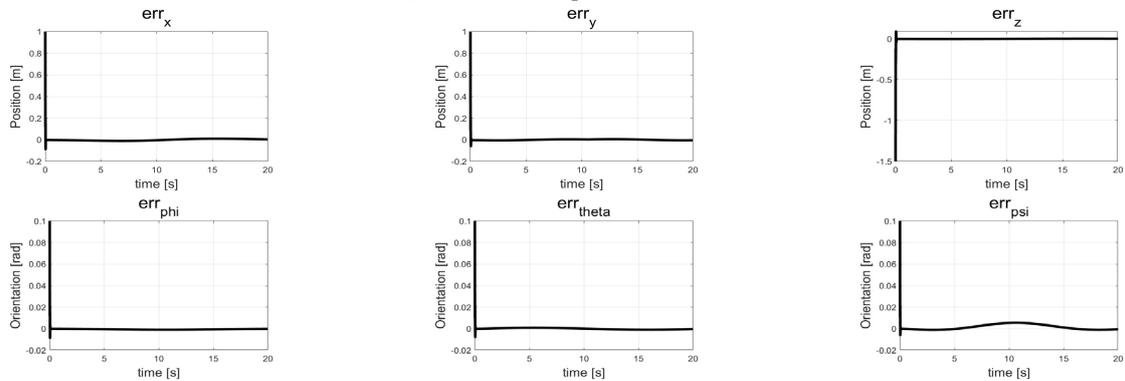
(a) Actual positions of ROV



(b) Actual lumped disturbances



(c) Estimated lumped disturbances



(d) Estimation errors of the lumped disturbances

[Fig. 3] Performance of position tracking and the lumped disturbance estimation of the proposed controller in the constant disturbance environment

하여 얻은 로봇시스템의 위치 및 속도 출력을 나타낸 그래프이며, 이 때 [Fig. 3(b)], [Fig. 3(c)]는 각각 20초 동안의 덩어리 외란 d_L 과 이를 추정한 \hat{d}_L 의 값을 나타낸 그래프이다. 외란이 있는 환경에서 상수들로만 구성된 로봇강체 관성행렬 M_{rb} 를 제외한 어떠한 동역학 모델 정보도 사용하지 않았음에도 불구하고 목표 값을 잘 추종하는 모습을 볼 수 있다. 이는 [Fig. 3(d)]의 추정 오차 그래프를 통해서도 확인 할 수 있다.

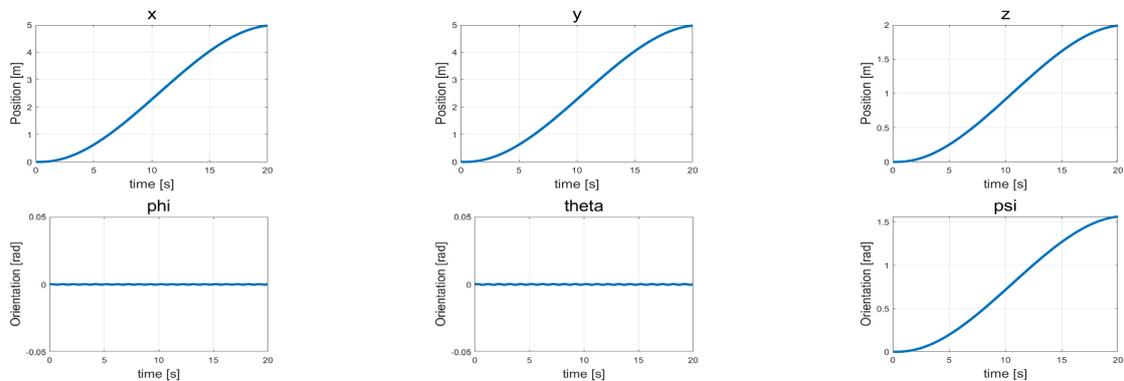
4.2 기존 제어기와의 성능 비교

정현과 형태의 외부외란 $d=10\sin(2\pi t)*diag(1,1,1,0.1,0.1,0.1)$ [N or Nm]가 있는 환경에서 4.1절과 동일한 목표 궤적을 인가하여 각각 제안한 방법으로 구성된 제어기와 역동역학 비례-미분 제어기(inverse dynamics PD controller)^[1]의 출력결과를 비교하였다. 역동역학 비례-미분 제어기는 원격조종 수중로봇의 모델 정보를 모두 사용하여 구성하였으며 비례 이득과 미분 이득 값은 각각 $50diag(1,1,1,1,1)$, $30diag(1,1,1,1,1)$ 로 정하였다. [Fig. 4(a)], [Fig. 4(b)]의 비교를 통해 완전한 모델 정보를 이용하여 구성된 기존의 역동역학 비례-미분 제어기보다 본 논문에서 제안한 제어기가 외란이 존재하는 환경에서의

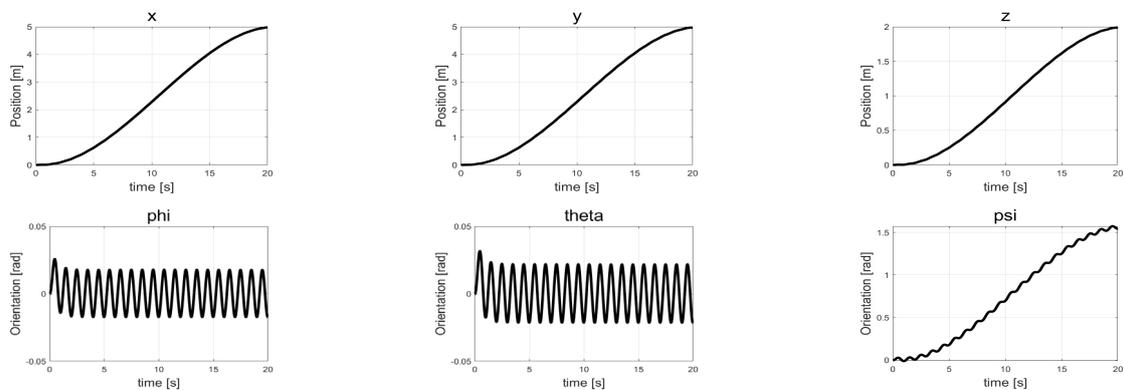
위치 추종 성능이 더욱 뛰어나다는 것을 확인 할 수 있었으며 이는 ϕ, θ, ψ 값(각 그래프의 하단)에서 더욱 명확하게 확인된다. 또한, 이는 추종 궤적과의 RMS(root mean squares)오차 값 $[0.1642, 0.1633, 0.0126, 0.0655, 0.0531]$ (역동역학 비례-미분 제어기), $[0.1636, 0.1637, 0.0655, 1.46242e-04, 2.2007e-04, 0.0514]$ (제안된 외란 관측기 기반 제어기)을 비교하여 수치적으로도 검증이 가능하다.

5. 결론 및 향후과제

본 논문에서는 모델 불확실성을 갖는 6자유도 원격조종 수중로봇의 외란 관측기 기반 제어기법을 제안하였다. 먼저 수력학 모델에서 상수로만 구성되는 로봇강체 관성행렬 M_{rb} 를 제외한 모든 동역학 모델 파라미터로부터 생성되는 힘들의 합을 덩어리 외란으로 정의하였으며, 외란 관측기를 이용하여 앞서 정의한 덩어리 외란의 값을 추정하여 모델의 불확실성으로 인해 생기는 외란을 외부 외란과 함께 상쇄시켰다. 시뮬레이션을 통하여 외란 관측기의 추정 성능을 단독, 비교 실험을 통해 검증하였으며, 실제 원격조종 수중로봇으로의 적용은 제안한 제어기법의 개선과 함께 향후 과제로 남긴다.



(a) Tracking performance of the disturbance observer-based controller in the sinusoidal disturbance environment



(b) Tracking performance of the inverse dynamics PD controller in the sinusoidal disturbance environment

[Fig. 4] Comparisons of the position tracking performances in the sinusoidal disturbance environment

References

- [1] T. I. Fossen, *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*, 1sted. WileyOnlineLibrary, 2011, DOI: 10.1002/9781119994138.
- [2] A. Molero, R. Duina, J. Cappelletto, and G. Fernandez, "Model Predictive Control of Remotely Operated Underwater Vehicles," *2011 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference(CDC-ECC)*, Orlando, USA, 2011, DOI: 10.1109/CDC.2011.6161447.
- [3] Y. Cao, B. Li, Q. Li, A. A. Stokes, D. M. Ingram, and A. Kiprakis, "A Nonlinear Predictive Controller for Remotely Operated Underwater Vehicles with Disturbance Rejection," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 158622-158634, 2020, DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3020530.
- [4] W. M. Bessa, M. S. Dutra, and E. Kreuzer, "Depth control of remotely operated underwater vehicles using an adaptive fuzzy sliding mode controller," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 56, no. 8, pp. 670-677, 2008, DOI: 10.1016/j.robot.2007.11.004.
- [5] L. Qiao and W. Zhang, "Adaptive non-singular integral terminal sliding mode tracking control for autonomous underwater vehicles," *IET Control Theory Applications for Complex Systems*, vol. 11, no. 8, pp. 1293-1306, 2017, DOI: 10.1049/iet-cta.2017.0016.
- [6] Y.-H. Eng, C.-S. Chin, and M. W.-S. Lau, "Added mass computation for control of an open-frame remotely-operated vehicle: Application using WAMIT and MATLAB," *Journal of Marine Science and Technology*, vol. 22, no. 4, pp. 405-416, 2014, DOI: 10.6119/JMST-013-0313-2.
- [7] K.-S. Lee, W. Cho, J. H. Back, and I. Choy, "Design and Verification of Disturbance Observer based Controller for Windturbine with Two Cooperative Generators," *The Journal Of The Korea Institute Of Electronic Communication Sciences*, vol. 12, no. 2, pp. 301-308, 2017, [Online], <http://dx.doi.org/10.13067/JKIECS.2017.12.2.301>.
- [8] J. Back and H. Shim, "An inner-loop controller guaranteeing robust transient performance for uncertain MIMO nonlinear systems," *IEEE Trans. Automatic Control*, vol. 54, no. 7, pp. 1601-1607, Jul., 2009, DOI: 10.1109/TAC.2009.2017962.
- [9] Y. Xu, "Modeling of a Remotely Operated Vehicle and Tuning for Its Roust and Optimal Dynamic Positioning Control," M.S. dissertation, University of Stavanger, Stavanger, Norway, 2021, [Online], <https://uis.brage.unit.no/uis-xmlui/handle/11250/2786261>.



김준식

2020 한양대학교 ERICA 로봇공학과(공학사)
현재 한양대학교 전자공학과(석박사 통합과정)

관심분야: 로봇제어, 시스템 식별



이동철

2009 한양대학교 ERICA 전자정보시스템공학과(공학사)

2011 한양대학교 전자전기제어계측공학과(공학석사)

현재 한양대학교 전자공학과(박사과정)

현재 삼성 SDS 책임연구원

관심분야: 로봇 제어, 수중로봇, 군집로봇



최영진

2002 POSTECH 기계공학과(공학박사)

2005 KIST 지능로봇연구센터 선임연구원

현재 한양대학교 ERICA 전자공학부 교수

관심분야: 로봇제어, 생체신호처리