

# A Modelling and Control Method for a Hybrid ROV/AUV for Underwater Exploration

Nak Yong Ko, Jiyoun Moon<sup>†</sup>

Department of Electronics Engineering, Chosun University, Gwangju 61452, Korea

## ABSTRACT

As interest in underwater structures and ocean exploration increases, many researchers are proposing methods for modeling and controlling various remotely operated vehicles (ROVs). Recently, hybrid systems composed of an autonomous underwater vehicle and an ROV capable of remote control and autonomous navigation are being developed. In this study we introduce a method that models Ariari-aROV, an ROV consisting of five thrusters, and performs navigation. The proposed ROV can be controlled manually and by autonomous navigation when given a target point. An extended Kalman filter is utilized for sensor measurement correction for more precise navigation. The proposed method is verified through a simulation.

**Keywords:** underwater robot, remotely operated vehicle, Ariari-aROV, control, navigation, extended Kalman filter, underwater exploration

## 1. INTRODUCTION

바다는 우리의 생활에 직접 또는 간접적으로 영향을 주며 중요한 역할을 하고 있다. 하지만 그 범위가 광범위하며 인간이 직접 관리 및 탐사하기는 어렵기 때문에 해양로봇에 대한 관심은 꾸준히 이어지고 있다. 관련하여, 지상에서 화학성분을 추적하는 기술을 수중 로봇에 적용하여 바다에서의 화학적 흔적을 찾는 방법 (Ishida et al. 2012)을 연구하기도 하며, 해양 재생 에너지 상업을 위한 해양 remotely operated vehicle (ROV)를 운영 (Rémoit et al. 2018)하기도 하며, 난파선 탐사를 위한 해양 로봇을 운영 (Eldred et al. 2021) 하기도 한다. 특히, 수심 깊은 곳에서 작업이 이루어지는 수중 구조물 검사 및 수중 환경 탐색에 ROV가 많이 이용되고 있다 (Kim & Lee 2012, Kim & Lee 2013, Aguado et al. 2021). Ryu et al. (2020)는 잠수부가 접근하기 어려운 탁도가 높은 바다에서 이용할 수 있는 ROV 시스템을 설계하고 검증하였다. Nicolaus & Katlein (2013)은 빙하로 구성된 환

경에서 운용할 수 있는 ROV를 제안하였다. 이와 같이 다양한 환경 또는 서로 다른 분야에 다양하게 활용되고 있음에 따라 다양한 형태의 ROV가 설계되었다. Joochim et al. (2015)는 DC 모터와 프로펠러로 구성된 4개의 구동시스템을 설계하고 초음파 거리 측정기, 압력 센서, 수위 센서와 같은 센서를 이용하여 수중을 탐사하였다. Miao & Pang (2015)는 저가의 부품들로 구성된 중량 10 kg ROV를 모델링하여 최대 수심 150 m에서 최대속도 4 knots로 안정적으로 운용하였다. Elaff (2022)는 수중 검사 및 유지 보수 작업을 위해 최대 300 m에서 작동할 수 있는 ROV를 제안하였다. ROV를 자유롭게 운용하기 위해서 다양한 내비게이션 방법들이 제안되었다. García et al. (2015)는 VR을 활용한 ROV 원격 제어 시스템을 소개하였으며, Aras et al. (2013)은 압력 센서 피드백을 이용해 ROV를 제어하였다. 하지만 이러한 기존의 시스템들은 원격으로 모든 제어가 이루어지기 때문에, 운영자의 능력 및 상황에 많은 영향을 받는다는 단점을 가지고 있다. 이에, 자율 내비게이션 및 원격 조정이 가능한 하이브리드 ROV/AUV 시스템에 대한 연구가 이루어지고 있다 (Siesjoe 2018). Lee et al. (2017)은 ultra-short baseline (USBL), doppler velocity log (DVL) 및 heading 측정값을 이용하여 심해에서 ROV 내비게이션을 수행하였다. Sani et al. (2019)은 robot operating system (ROS) 기반의 하이브리드 ROV/AUV 시스템을 설계해 simultaneous localization and mapping (SLAM)을 수행하며 정확한 motion control을 할 수 있도록 하였다. 본 논문에서는 원격 조정 및 자

Received Feb 16, 2023 Revised Mar 08, 2023 Accepted Mar 10, 2023

<sup>†</sup>Corresponding Author

E-mail: jymoon@chosun.ac.kr

Tel: +82-62-230-7068 Fax: +82-62-608-5203

Nak Yong Ko <https://orcid.org/0000-0003-4277-3450>

Jiyoun Moon <https://orcid.org/0000-0002-5208-7836>

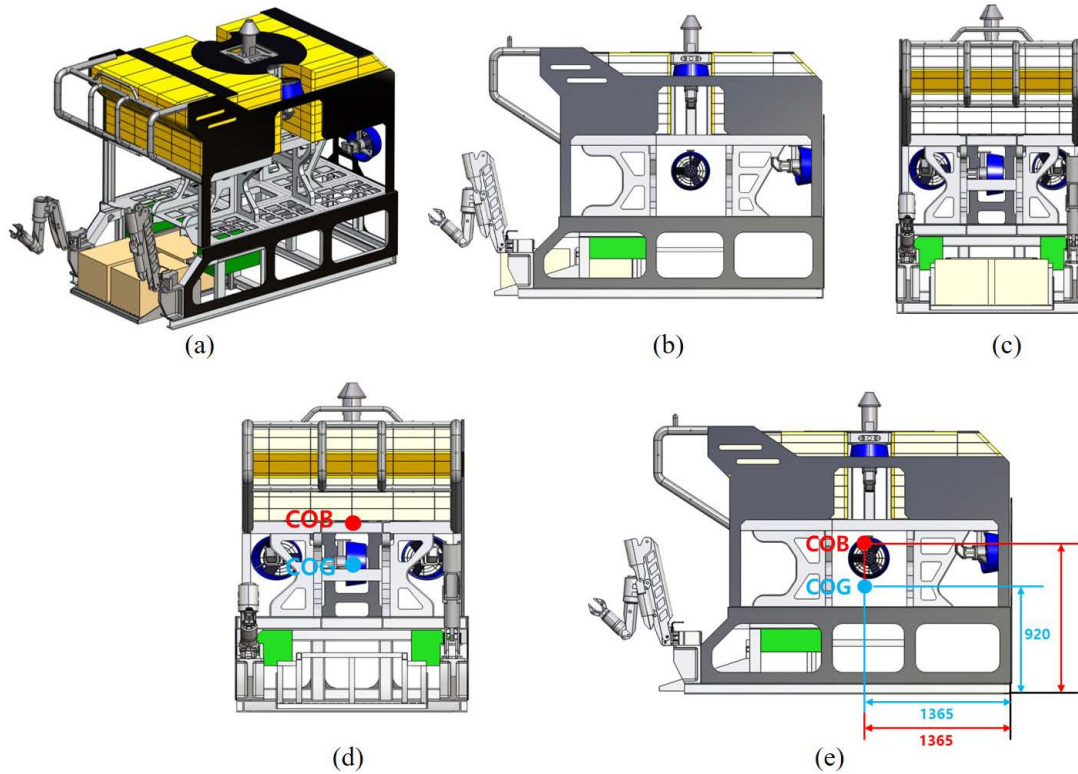


Fig. 1. ROV configuration (a) ROV concept (b) Side view (c) Front view (d) COB and COG from front view (e) COB and COG from side view.

을 내비게이션 가능한 하이브리드 ROV/AUV 시스템인 Ariari-aROV를 제안한다. 제안한 시스템의 내비게이션을 위해 USBL, DVL 및 inertial measurement unit (IMU) 센서를 활용한다. ROV의 동역학 관계식을 이용하여 항법을 모델링하였으며, 확장 칼만 필터를 이용해 측정 값을 보정한다. 시뮬레이션 실험을 통해 제안한 시스템을 검증한다.

## 2. MAIN TOPICS

본 시스템은 크게 Ariari-aROV를 모델링하는 부분과 control 하는 부분으로 구성된다. 먼저 모델링 부분에서는 Ariari-aROV의 구성 및 dynamics를 다루고 control 부분에서는 extended Kalman filter (EKF)를 이용한 로봇의 내비게이션 방법에 대해 설명한다.

### 2.1 Modelling of Ariari-aROV

Ariari-aROV는 총 5개의 thruster로 구성되며 surge, sway, heave, roll, pitch, yaw 운동을 할 수 있다. Ariari-aROV는 수심 약 6000 m에서 운용 가능하며 forward로는 2.5 knots를 lateral 및 heave로는 2 knots 속도로 움직일 수 있다. 제안한 ROV가 안정적으로 운영할 수 있도록 center of gravity (COG)는 center of buoyancy (COB) 보다 아래에 있도록 설계한다. 전체 ROV의 모습과 세부 정보는 Fig. 1과 Table 1을 통해 확인할 수 있다. Ariari-

Table 1. Details of ROV configuration.

Configuration	Details
Dimension	(L) 2800 mm (W) 1700 mm (H) 2300 mm
Weight	3500 kg
Depth rating	6000 m
DOF	6 (Surge, Sway, Heave, Roll, Pitch, Yaw)
Speed	Forward: 2.5 knots, Lateral/Heave: 2 knots
Thruster	Horizontal (x3), Vertical (x2)
Sensor	Altimeter, Depth, IMU, DVL

aROV의 센서는 altimeter, depth, IMU, DVL로 구성된다.

Ariari-aROV의 추진기는 수평 방향으로 3개 수직 방향으로 2개로 구성되어 있으며 Fig. 2에서와 같이 위치하고 있다. 각 thruster의 location vector  $\vec{r}^n$ 와 direction vector  $\vec{d}^n$ 는 식 (1)과 같고 단위는 mm이다.

$$\begin{aligned}
 \vec{r}^1 &= (-65, 0, -380)^T \times 10^{-3}, \vec{d}^1 = (0, -1, 0)^T \\
 \vec{r}^2 &= (-1195, -530, -380)^T \times 10^{-3}, \vec{d}^2 = (\cos 10^\circ, -\sin 10^\circ, 0)^T \\
 \vec{r}^3 &= (-1195, 530, -380)^T \times 10^{-3}, \vec{d}^3 = (\cos 10^\circ, \sin 10^\circ, 0)^T \\
 \vec{r}^4 &= (-65, -585, -1280)^T \times 10^{-3}, \vec{d}^4 = (0, -\sin 10^\circ, \cos 10^\circ)^T \\
 \vec{r}^5 &= (-65, 585, -1280)^T \times 10^{-3}, \vec{d}^5 = (0, \sin 10^\circ, \cos 10^\circ)^T \quad (1)
 \end{aligned}$$

이와 같이 5개로 구성된 thruster 입력이  $\vec{u} = [f^1, f^2, f^3, f^4, f^5]^T$  일 때, Ariari-aROV의 힘  $\vec{T}^t = [f_x^t, f_y^t, f_z^t, m_x^t, m_y^t, m_z^t]^t$  은  $\vec{T}^t = T \cdot \vec{u}$ 에 따라 결정된다. 이때,  $f_n$ 는 thruster의 힘이며 Ariari-aROV의 configuration 행렬 T는 식 (2)와 같다.

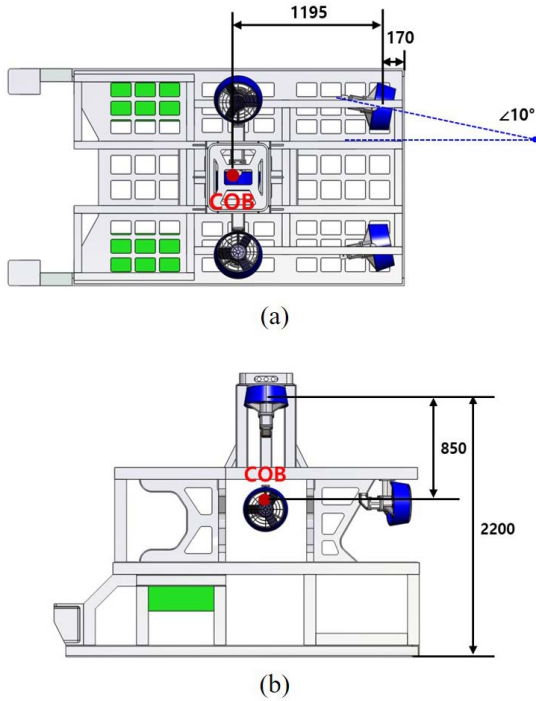


Fig. 2. Thruster configuration (a) Top view (b) Side view.

$$T = \begin{bmatrix} 0 & 0.985 & 0.985 & 0 & 0 \\ -1 & -0.174 & 0.174 & -0.174 & 0.174 \\ 0 & 0 & 0 & 0.985 & 0.985 \\ -0.38 & -0.066 & 0.066 & -0.798 & 0.798 \\ 0 & -0.374 & -0.374 & 0.064 & 0.064 \\ 0.065 & 0.729 & -0.729 & 0.011 & -0.011 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Surge 운동은 수직 방향으로 있는 2개의 thruster에 동일한 힘을 인가해서 구현하며, Sway 운동은 수평 방향의 윗부분에 있는 thruster를 이용하여 생성한다. Heave 운동은 수평 방향에 있는 thruster에 동일한 힘을 인가해서 이루어진다. Roll과 yaw 운동은 해당 방향에 해당하는 thruster에서 서로 다른 힘을 입력해 가능하게 한다. 이때, pitch 수직 방향에 있는 thruster에 동일한 힘을 준다. 정리하면 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Surge : } f^2 = f^3 &= \frac{f_x^t}{2 \times 0.985} \\ \text{Sway : } f^1 &= -f_y^t \\ \text{Heave : } f^4 = f^5 &= \frac{f_z^t}{2 \times 0.985} \\ \text{Roll : } f^4 = f^5 &= \frac{m_x^t}{-2 \times 0.798}, f^5 = \frac{m_x^t}{2 \times 0.798} \\ \text{Pitch : } f^2 = f^3 &= \frac{m_y^t}{-2 \times 0.374} \\ \text{Yaw : } f^2 = f^3 &= \frac{m_z^t}{2 \times 0.729}, f^5 = \frac{m_z^t}{-2 \times 0.729} \end{aligned} \quad (3)$$

총 6개의 추진기를 이용하여, 6 자유도의 운동을 가능하게 한다. 하지만 pitch 운동은 ROV를 운영하는데 거의 사용되지 않는다.

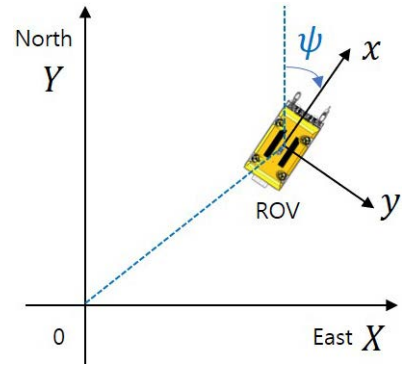


Fig. 3. Reference coordinate and ROV coordinate

## 2.2 Control of Ariari-aROV

ROV를 제어하기 위한 좌표계는 전역 좌표계와 로봇 좌표계 두가지로 구성된다. Fig 3를 통해 ROV의 각 좌표계를 확인할 수 있다. 전역 좌표계는 지구 좌표계를 따른다. Ariari-aROV의 제어 구조는 Fig. 3와 같다. 로봇이 움직이고 싶은 target velocity profile이 주어졌을 때, inverse kinematics, inverse dynamics, inverse thruster allocation model (TAM), inverse thruster propulsion model (TPM)을 통해 추진기의 rpm을 구한다. Inverse kinematics 모듈에서는 전역 좌표계의 속도에서 로봇 좌표계의 속도를 구하며, inverse dynamics 로봇 속도로부터 로봇에 인가해야 할 힘을 구한다. Inverse TAM에서는 로봇의 힘으로부터 추진기에 인가해야 하는 propulsion을 구하며, inverse TPM은 로봇 추진기의 추력으로부터 추진기의 rpm을 구한다.

해저에서의 로봇에 움직임에 따른 물과의 상호작용 및 강체의 운동에 따라 로봇의 상태가 결정된다. 영향을 주는 요소로는 강체 관성 행렬  $M_{RB}$ , 추가 질량에 따른 관성 행렬  $M_a$ , 코리올리 힘 행렬  $C(v)$ , damping 영향 행렬  $D(v)$ , 중력과 부력에 따른 영향 행렬  $g(\eta)$ 가 있다. 추진기의 입력에 따른 로봇의 가속도를 간단히 표현하면  $\dot{v} = M^{-1}(\tau - D(v)v - g(\eta))$ 와 같다.  $\tau$ 는  $[X, Y, Z, K, M, N]^T$ 으로 외력과 모멘트 벡터이며 ROV는 해저에서 빠른 속도가 아닌 천천히 움직이기 때문에,  $C(v)$ 는 제거하도록 한다. 각 요소들에 따른 ROV의 가속도의 세부 내용은 아래의 식과 같다.

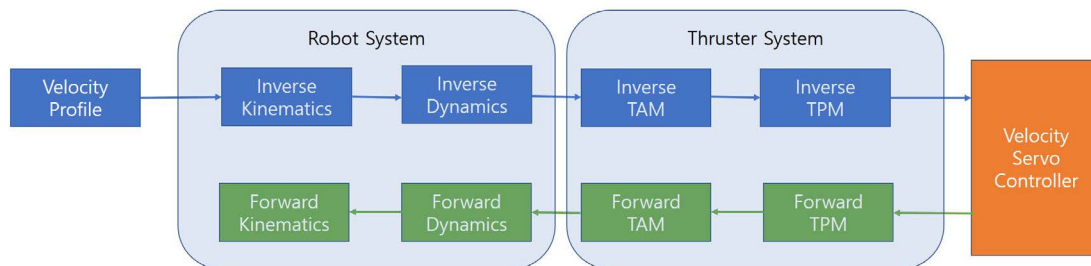
$$\dot{v} = M^{-1} \begin{bmatrix} X - (X_u + X_{u|u}|u|)u - (W - B)\sin\theta \\ Y - (Y_v + Y_{v|v}|v|)v + (W - B)\sin\phi\cos\theta \\ Z - (Z_w + Z_{w|w}|w|)w + (W - B)\cos\phi\cos\theta \\ K - (K_p + K_{p|p}|p|)p - y_b B\cos\phi\cos\theta + z_b B\sin\phi\cos\theta \\ M - (M_q + M_{q|q}|q|)q + z_b B\sin\theta + x_b B\cos\phi\cos\theta \\ N - (N_r + N_{r|r}|r|)r - x_b B\sin\phi\cos\theta - y_b B\sin\theta \end{bmatrix} \quad (4)$$

이때,  $X, Y, Z, K, M, N$ 은 전역 좌표계를 따르며,  $u, v, w, p, q, r$ 은 로봇의 고정 좌표계를 따른다.

더 정확한 내비게이션을 위해 EKF를 이용한다. EKF의 state variable  $\vec{x}(t_n) = [x(t_n), y(t_n), z(t_n), \phi(t_n), \theta(t_n), \psi(t_n), u(t_n), v(t_n), w(t_n), p(t_n), q(t_n), r(t_n)]^T$ 이다.  $x, y, z, \phi, \theta, \psi$ 는 global 좌표계에서의 로봇의  $x$ 축,  $y$ 축,  $z$ 축의 좌표이며, roll, pitch, yaw이다.  $u, v, w$ 는 각각

**Table 2.** Process of EKF applied to Ariari-aROV.

1	Set initial time: $t = t_0, t_k = t_0$ Set initial value for the state variables: $\vec{x}(t_0) = [x(t_0), y(t_0), z(t_0), \phi(t_0), \theta(t_0), \psi(t_0), u(t_0), v(t_0), w(t_0), p(t_0), q(t_0), r(t_0)]^T$ Set initial value for covariance of state variables: $P(t_0)$ : $12 \times 12$ matrix Set covariance of process model: $Q$ : $12 \times 12$ matrix Set covariance of measurement model: in case of USBL, IMU, and DVL are all available: $R$ : $12 \times 12$ matrix in case of IMU and DVL are available: $R$ : $9 \times 9$ matrix in case of only IMU is available: $R$ : $6 \times 6$ matrix
2	Update $\vec{x}(t_k)$ to $\vec{x}(t_{k+1})^-$ Calculate $\dot{\eta}(t_k), \dot{v}(t_k)$ Update $\eta(t_k)$ to $\eta(t_{k+1})^-$ : $\eta(t_{k+1})^- = \eta(t_k) + \dot{\eta}(t_k) \cdot (t_{k+1} - t_k)$ Update $v(t_k)$ to $v(t_{k+1})^-$ : $v(t_{k+1})^- = v(t_k) + \dot{v}(t_k) \cdot (t_{k+1} - t_k)$ $\vec{x}(t_{k+1})^- = \begin{bmatrix} \eta(t_{k+1})^- \\ v(t_{k+1})^- \end{bmatrix}$
3	Update $P(t_k)$ to $P(t_{k+1})^-$ $P(t_{k+1})^- = F(t_k) \cdot P(t_k) \cdot F(t_k)^T + Q$
3	Calculate Kalman gain $K(t_{k+1})$ $K(t_{k+1}) = P(t_{k+1})^- \cdot H(t_{k+1}) (H(t_{k+1}) \cdot P(t_{k+1})^- \cdot H(t_{k+1})^T + R)^{-1}$
4	Update $\vec{x}(t_{k+1})^-$ to $\vec{x}(t_{k+1})$ $\vec{x}(t_{k+1}) = \vec{x}(t_{k+1})^- + K(t_{k+1}) \cdot (z(t_{k+1}) - H(t_{k+1}) \cdot \vec{x}(t_{k+1})^-)$
5	Update $P(t_{k+1})^-$ to $P(t_{k+1})$ $P(t_{k+1}) = P(t_{k+1})^- - K(t_{k+1}) \cdot H(t_{k+1}) \cdot P(t_{k+1})^-$



**Fig. 4.** Control architecture for Ariari-aROV.

local 좌표계에서의 로봇의  $x$ 축,  $y$ 축,  $z$ 축으로의 속도이며,  $p, q, r$ 은  $x$ 축,  $y$ 축,  $z$ 축으로의 각속도이다.  $x, y, z$ 의 값은 USBL 센서를 이용해서,  $u, v, w$ 은 DVL 센서를 이용해서  $u, v, w, p, q, r$ 은 IMU 센서를 이용해서 측정한다. 본 논문에서는 Fig. 3과 같은 과정을 통해 구한 값이 센서로부터 획득한 데이터라고 가정한다. EKF는 크게 초기화, 상태 값 업데이트, 측정 값 업데이트로 구성된다. 하지만 각 센서는 심해의 위치 및 상황에 따라 사용 가능할 때와 그렇지 않을 경우로 나뉜다. 따라서, 내비게이션은 모든 센서가 가능할 때와, DVL과 IMU가 가능할 때, IMU만 가능할 때로 나누어서 수행한다. 그 과정은 Table 2와 같다. Ariari-aROV의 내비게이션은 target velocity profile에 따라 thrust에 힘이 입력된 이후, 측정된 각 measurement는 correction되어 수행된다. EKF에 적용된 process model  $Q$ 와 measurement model  $R$ 은 Aili & Ekelund (2016)를 따른다.

### 3. EXPERIMENT RESULT

시뮬레이션을 통해 제안한 방법을 수평면 운동에 대해 검증해 보았다. 제안한 ROV는  $x$ 축,  $y$ 축,  $z$ 축, roll, pitch, yaw와 같이 6 자유도 운동이 가능하다. 하지만 ROV를 이용한 작업들은 대부분

느린 속도 진행되며 roll, pitch 운동이 크게 생기지 않는다면, 수직면에 따른 운동과 수평면에 따른 운동을 나누어 해석 가능하다 (Lee et al. 2017). 이에 본 논문에서는 수평면 운동을 하는 2가지 경로에 대해 실험을 진행하였다. 경로 1은  $x$ 축 방향으로 움직이는 경로이며, 경로 2는 6각형 형태로 4방향으로 모두 움직이는 경로이다. Target velocity로는 translation velocity (tv) 만 입력한 경우와 tv 및 rotation velocity (rv)를 모두 입력한 경우로 나누어 실험을 진행하였다.

실제 로봇을 구동한 것은 아니기 때문에 Fig. 4에서와 같이 추진기 회전속도로 추진기 추력을 구하는 forward TPM 모듈, 추진기 추력으로부터 로봇에 인가된 힘을 구하는 forward TAM 모듈, 로봇에 인가된 힘으로부터 로봇의 속도 프로파일을 알 수 있는 forward dynamics 모듈, 로봇 좌표계 속도로부터 reference 좌표계의 속도를 구하는 forward kinematics 모듈을 구현하였다. 각 모듈들은 인가된 thruster 입력에 따른 ROV의 움직임을 출력해 주는 역할을 한다. 이와 같은 과정을 통해 구한 measurements의 값들은 ideal한 상태이므로 임의로 노이즈를 인가하여 EKF를 통해 measurements를 업데이트하여 로봇을 움직인다.

실험 결과는 Fig. 5를 통해 확인할 수 있다. Fig. 5a는 경로 1에 대해 tv만 target으로 주어졌을 때이며, Fig. 5b는 경로 2에 대해 tv만 target으로 주어졌을 때의 실험 결과이다. Fig. 5c는 경로 2에

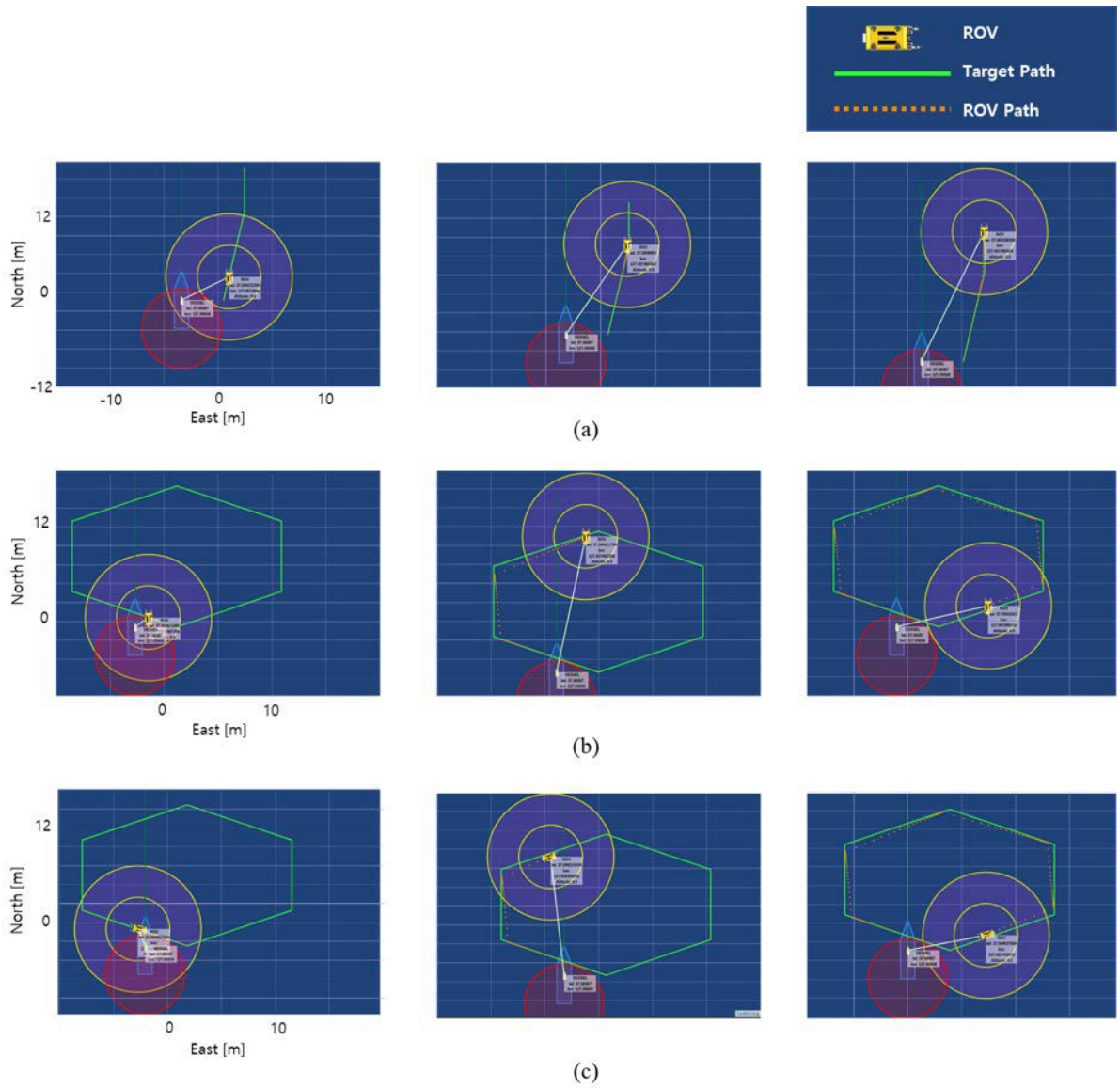


Fig. 5. Simulation results: (a) Path 1 with translation velocity (b) Path 2 with translation velocity (c) Path 3 with translation velocity and rotation velocity.

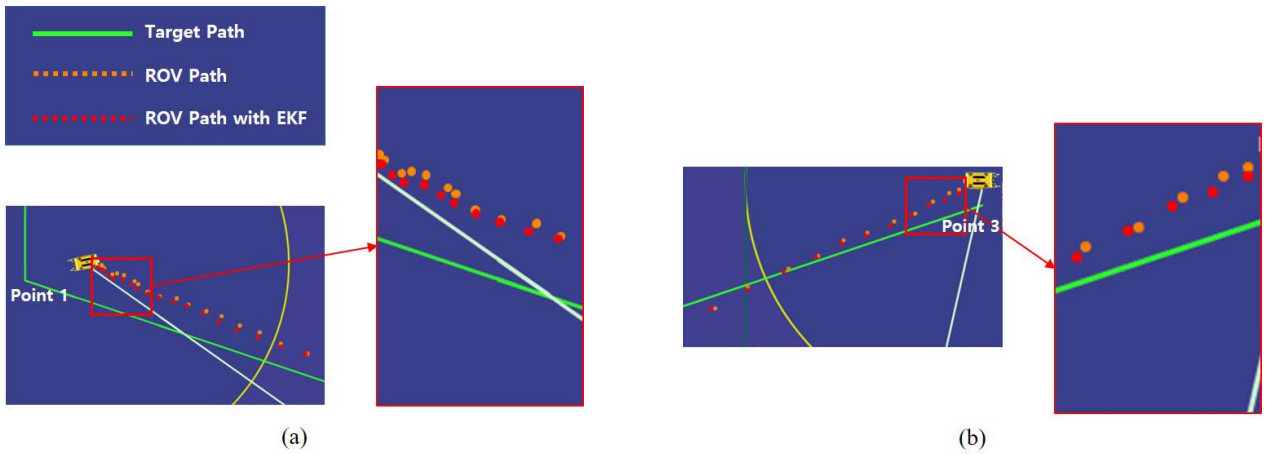


Fig. 6. ROV path with and without EKF: (a) Target point 1 of path 3 (b) Target point 3 of path 3.

**Table 3.** Accumulated path error with and without EKF (unit: mm).

Path	Without EKF	With EKF
2	5513	4996
3	9621	7764

대해 tv와 rv 모두 target으로 주어졌을 때의 결과이다. Fig. 5에서의 초록색 선은 reference가 되는 경로이며 주황색 점선은 실제로 로봇이 움직인 경로이다. 결과를 보면 로봇이 target 경로를 따라 성공적으로 내비게이션을 수행함을 확인할 수 있다.

Fig. 6는 EKF를 수행했을 때와 수행하지 않았을 때의 실험 결과이다. 그림에서의 주황색 점선은 EKF 없이 내비게이션한 결과이며, 빨강색 점선은 EKF를 통해 measurement를 correction해 내비게이션한 결과이다. 그림을 보면, EKF를 적용하였을 때, target 경로와의 오차가 적용하지 않았을 때보다 작음을 확인할 수 있다. 이때, Fig. 5에서의 경로 2와 경로 3에 대해 EKF를 적용했을 때와 적용하지 않았을 때의 누적 오차는 Table 3과 같다. 누적된 경로 오차는 동일한 경로에 대해 tv만 고려하였을 때보다 tv와 rv를 모두 고려하였을 때, 오차가 조금 더 커졌음을 확인할 수 있다.

#### 4. CONCLUSIONS

ROV는 인간이 작업하기 어려운 열악한 수중환경에서 다양한 작업에 활용되고 있다. 이에 최근에는 인간이 직접 원격으로 ROV를 제어하는 것만이 아닌 AUV와 같이 내비게이션도 할 수 있는 하이브리드 ROV/AUV 시스템에 대한 관심이 높아지고 있다. 본 논문에서는 하이브리드 AUV/ROV 시스템 모델링 및 내비게이션 방법을 제안하고 설계해 보았다. 시뮬레이션 실험을 통해 제안한 시스템을 이용하여 6 자유도 운동 중 수평면에 대한 3자유도 운동이 가능함을 검증하였으며 확장 칼만 필터를 이용하여 내비게이션 정확도를 높일 수 있었다.

#### ACKNOWLEDGMENTS

이 논문은 2022학년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

#### AUTHOR CONTRIBUTIONS

Methodology, validation, review, editing, N. Y. Ko, software, implementation of the algorithm, investigation, J. Moon.

#### CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

#### REFERENCES

- Aguado, E., Milosevic, Z., Hernández, C., Sanz, R., Garzon, M., et al. 2021, Functional self-awareness and meta-control for underwater robot autonomy, *Sensors*, 21, 1210. <https://doi.org/10.3390/s21041210>
- Aili, A. & Ekelund, E. 2016, Model-based design, development and control of an underwater vehicle, Master of Science Thesis in Automatic Control Department of Electrical Engineering, Linköping University.
- Aras, M. S. M., Abdullah, S. S., Rashid, M. Z. A., Rahman, A. A., & Aziz, M. A. A. 2013. Development and modeling of unmanned underwater remotely operated vehicle using system identification for depth control, *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 56, 136-145. <http://eprints.utm.my/id/eprint/49664/>
- Elaff, I. 2022, Design and development of Spaiser remotely operated vehicle, *Journal of Engineering and Applied Science*, 69, 1-15. <https://doi.org/10.1186/s44147-022-00068-6>
- Eldred, R., Lussier, J., & Pollman, A. 2021, Design and testing of a spherical autonomous underwater vehicle for shipwreck interior exploration, *Journal of Marine Science and Engineering*, 9, 320. <https://doi.org/10.3390/jmse9030320>
- García, J. C., Patrão, B., Almeida, L., Pérez, J., Menezes, P., et al. 2015, A natural interface for remote operation of underwater robots. *IEEE computer graphics and applications*, 37, 34-43. <https://doi.org/10.1109/MCG.2015.118>
- Ishida, H., Wada, Y., & Matsukura, H. 2012, Chemical sensing in robotic applications: A review, *IEEE Sensors Journal*, 12, 3163-3173. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2012.2208740>
- Joochim, C., Phadungthin, R., & Srikitsuwan, S. 2015, Design and development of a Remotely operated Underwater Vehicle, In 2015 16th International Conference on Research and Education in Mechatronics (REM), IEEE, Bochum, Germany, 18-20 November 2015, pp.148-153. <https://doi.org/10.1109/REM.2015.7380385>
- Kim, D. & Lee, J. 2012, Optimal Swimming Motion for Underwater Robot, Crabster, *The Journal of Korea Robotics Society*, 7, 284-291. <https://doi.org/10.7746/jkros.2012.7.4.284>
- Kim, H. J. & Lee, J. 2013, Swimming plans for a bio-inspired articulated underwater robot, *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, 19, 782-790. <https://doi.org/10.5302/J.ICROS.2013.13.9023>
- Lee, P. M., Shim, H., Baek, H., Kim, B., Park, J. Y., et al. 2017. Navigation system for a deep-sea ROV fusing USBL, DVL, and heading measurements, *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 31, 315-323. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.05.010>

org/10.26748/KSOE.2017.08.31.4.315

- Miao, R. & Pang, S. 2015, Development of a low-cost remotely operated vehicle for ocean exploration, In OCEANS 2015-MTS/IEEE Washington, IEEE, Washington, DC, 19-22 October 2015, pp.1-7. <https://doi.org/10.23919/OCEANS.2015.7404468>
- Nicolaus, M. & Katlein, C. 2013, Mapping radiation transfer through sea ice using a remotely operated vehicle (ROV), *The Cryosphere*, 7, 763-777. <https://doi.org/10.5194/tc-7-763-2013>
- Rémouit, F., Chatzigiannakou, M. A., Bender, A., Temiz, I., Sundberg, J., et al. 2018, Deployment and maintenance of wave energy converters at the lysekil research site: A comparative study on the use of divers and remotely-operated vehicles, *Journal of Marine Science and Engineering*, 6, 39. <https://doi.org/10.3390/jmse6020039>
- Ryu, J., Nam, K., & Ha, K. 2020, A Basic Study of ROV System Design for Underwater Structure Inspection, *Journal of the Korean Society of Industry Convergence*, 23, 463-471. <https://doi.org/10.21289/KSIC.2020.23.3.463>
- Sani, A. Y. M., He, T., Zhao, W., & Yao, T. 2019, Hybrid underwater robot system based on ros, *Proceedings of the 2019 International Conference on Robotics, Intelligent Control and Artificial Intelligence*, pp.396-400. <https://doi.org/10.1145/3366194.3366264>
- Siesjoe, J. 2018, An Underwater Robotics Platform for Hybrid AUV/ROV Systems, In *Offshore Technology Conference*, Houston, Texas, USA, April 30-May 3, 2018. <https://doi.org/10.4043/28900-MS>



**Nak Yong Ko** received the Doctor's degree in Department of Control & Instrumentation Engineering from Seoul National University in 1993. He is currently working at department of Electronics Engineering, College of IT Convergence, Chosun University. His research interests include robotics, navigation, and localization.



**Jiyou Moon** received the Doctor's degree in Electrical and Computer Engineering from Seoul National University in 2020. She is currently working at department of Electronics Engineering, College of IT Convergence, Chosun University. Her research interests include artificial general intelligence, collective intelligence planning, big data, cognitive robotics, semantic scene understanding, mission planning, and human-robot cooperation.