

수중자율무인잠수정의 위치추정 및 경로계획 기술에 관한 연구 A Study on Position Estimation and Path Planning Technology of Autonomous Underwater Vehicle (AUV)

이정우* · 최영호* · 김영복** · 서진호***†

Jung-Woo Lee*, Young-Ho Choi*, Young-Bok Kim** and Jin-Ho Suh***†

(Received 14 March 2020, Revision received 28 May 2020, Accepted 2 June 2020)

Abstract : In recent years, it is strongly required to utilize underwater robots for the management and investigation of various underwater artificial structures as the number of underwater artificial structures for the use of marine resources and military purposes has increased rapidly. For exploration of underwater structures using an underwater robot, navigation that estimates its own position and control creating and following a moving path are very important technologies.

In this paper, we developed a position estimation algorithm that fusions DVL-aiding inertial navigation and a pose recognition in local area using active visible marker. We also implemented a path planning and following algorithm of underwater robot that adapted RRT (Rapidly-exploring Random Tree) and improved LOS (Line of Sight) method. As a result, in the actual marine environment experiment, the combined performance of position estimation and path tracking was measured, and the path following RMS error of the planned moving path was 0.53 m, which satisfied the target following error within 1 m.

Key Words : Autonomous underwater vehicle (AUV), Underwater localization, Path planning, Autonomous navigation, Inertial navigation system (INS)

1. 서 론

수상 또는 수중 등에서 운용되는 모든 로봇을

통칭하여 무인해양로봇(Unmanned Marine Vehicle, UMV)이라 하며, 기존 유인함정, 잠수함, 다이버, 예인 센서 플랫폼 등을 대신해서 운용할 수 있

*** 서진호(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-8673-4528) : 교수, 부경대학교 기계시스템공학과
E-mail : suhgang@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6189
*이정우(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-9091-1729) : 선임 연구원, 한국로봇융합연구원 지능로봇연구본부
*최영호(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-1576-8277) : 책임 연구원, 한국로봇융합연구원 지능로봇연구본부
**김영복(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-6035-6744) : 교수, 부경대학교 기계시스템공학과

*** Jin-Ho Suh(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-8673-4528) : Professor, Department of Mechanical System Engineering, Pukyong National University.
E-mail : suhgang@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6189
*Jung-Woo Lee(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-9091-1729) : Senior Researcher, Intelligent Robotics R&D Division, KIRO.
*Young-Ho Choi(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-1576-8277) : Principal Researcher, Intelligent Robotics R&D Division, KIRO.
**Young-Bok Kim(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-6035-6744) : Professor, Department of Mechanical System Engineering, Pukyong National University.

기 때문에 인간이 수행하기에 단조롭고, 어렵고, 위험한 3D(Dull, Difficult, Dangerous) 작업에 적합하다.

일반적으로 무인해양로봇은 수중로봇(Underwater Robot)으로 불리며, 수중 환경에서 제한적 또는 자율적으로 이동하면서 주어진 임무를 수행할 수 있는 능력을 가진 로봇으로 정의한다. 이러한 수중로봇 개발에 있어서 요구되어지는 필수적 기술 분야 내에서 항법 및 제어(Navigation and Control) 기술이 매우 중요한 요소이다.

수중 인공 구조물의 탐사에는 일반적으로 ROV가 많이 사용되고 있으나 복잡한 수중 환경에서 테더 케이블(Tether Cable)로 인한 구조물 내부 진입이 매우 어렵고 유선으로 인한 작업 거리 제한 등의 한계가 있으므로 이러한 작업 한계를 극복하기 위해서는 수중 환경 내에서 AUV를 활용하기 위한 자기 위치를 추정하여 인식하고 주변 환경을 인지하여 장애물을 회피하며 유연하는 수중 자율유영(Underwater Autonomous Navigation) 기술이 필수적으로 요구된다.

육상 환경에서는 위치추정을 위해 GPS를 이용한 항법이 일반적으로 가능하지만, 수중 환경은 물이라는 매질의 특성으로 인해 전파를 이용하는 GPS나 레이저 기반의 다양한 센서를 사용하지 못하며, 음파를 사용하는 소나 센서와 관성 기반 센서, 일부 영상 센서를 사용하는 항법을 복합적으로 사용하고 있다.

수중로봇 항법의 방법으로는 크게 관성기반 항법(Inertial Navigation)¹⁾과 지구물리기반 항법(Geophysical Navigation)²⁾이 있다. 관성기반 항법은 육상 환경에서도 대중적으로 사용되는 방법으로, 로봇의 물리적인 이동량에 대한 가속도와 각속도의 변화를 각 축별 변위를 측정하는 센서를 사용하여 이전 위치로부터의 상대적 위치를 누적하여 현재 위치를 추정하는 추측 항법(Dead Reckoning)을 수행한다. 이러한 관성기반 센서에 의한 항법은 센서의 정밀도에 큰 영향을 받으며 센서 출력에 포함된 오차가 시간이 흐르면서 적분에 의해 누적되어 추정되는 위치 오차가 발생하게 된다.

지구물리기반 항법은 수중로봇이 운용되는 환경에 대한 고정적인 특징을 이용하는 방법으로, 해저면 또는 수중 자력분포, 지형지물에 대한 맵핑을 통해 위치를 추정한다. 이러한 정보는 소나 또는 광학 영상 센서, 자력계 등을 통해 얻게 되며 센서의 정밀도에 따라 위치 추정의 성능이 좌우된다. 소나 센서는 음파의 주파수에 따라 해상도와 측정 가능 거리가 달라지며, 주파수가 높을수록 해상도가 높아지고 측정 가능 거리는 작아진다. 광학 영상 센서는 수중로봇의 다양한 위치에 장착되어 수중 지형물이나 해저면 등의 영상을 취득하게 되며, 비교적 얇은 수중에서는 빛의 흡수 및 산란과 탁도로 인한 시계 제한 등으로 인한 영상 품질 저하가 발생한다.

본 연구에서는 수중 인공 구조물의 관리 및 조사를 위한 현장 환경 분석을 통한 접근방법을 수립하고, 수중로봇의 다양한 위치추정 기술을 적용하여 경로계획을 통한 실험역에서의 자율 이동 성능을 평가한다. 수중로봇이 실험역 환경에 설치된 자켓 구조물의 외부 및 내부로 진입하기 위해서 관성 센서와 DVL 복합항법을 기반으로 3차원 전방주사 소나 및 2차원 이미지 소나, 능동 가시형 영상 마커에 의한 위치 인식 기술을 융합하여 사용하고, AUV의 동특성을 반영한 RRT(Rapidly-exploring Random Tree) 및 개선된 LOS(Line of Sight) 알고리즘을 통해 계획된 경로를 추종하여 수중 인공 구조물의 탐사를 수행하였으며, 수행한 결과에 대해 수중로봇의 이동 경로에 대한 기준점 대비 위치 오차를 분석하였다.

2. 현장 환경을 고려한 연구개발 접근방법

본 연구에서는 수중 자켓 구조물에 대한 정밀하고 효율적인 유지관리를 위하여 3차원 장애물 회피 및 경로계획 기술, 수중 정밀 위치추정 기술을 개발하고자 하였으며, Fig. 1과 같은 수중 구조물을 제작하여 실험역 환경에 설치하여 개발 기술에 대한 성능시험을 수행하였다.

수중 자켓 구조물에서 탐사가 필요한 여러 지점들을 경유하는 최적의 경로를 생성하기 위해서

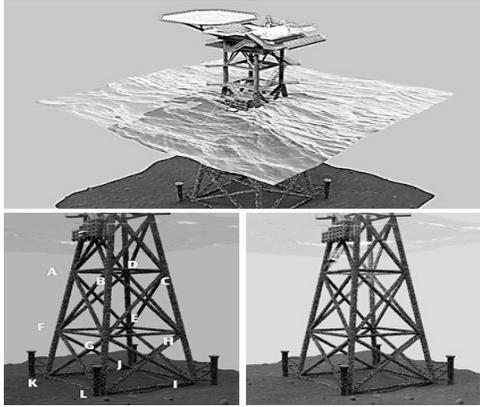


Fig. 1 Shape of the test jacket structure in an underwater environment

수중 환경 내에서 수중 로봇의 동특성을 반영하고 케이블이 얽히지 않도록 이동 경로를 계획하는 것이 필요하다. 또한 수중 위치추정을 위해 관성 측정 유닛과 DVL에 의한 관성기반 항법과 더불어, 수중 지형과 자켓 구조물 및 능동 가시형 마커(Active Visible Marker)에 대한 광학 영상 카메라를 사용한 지구물리기반 항법을 융합하여 정밀한 위치추정을 위한 기술 개발 또한 필요하다.

본 연구에 사용된 수중로봇은 ROV 및 AUV 운용을 전환할 수 있는 하이브리드 타입의 P-SURO II 플랫폼³⁾으로 아래 Fig. 2와 같다. P-SURO II 자율무인잠수정 플랫폼은 전방부에 2차원 Blueview 소나 및 3차원 전방주시 소나를 장착하고 상단에 컬러 카메라와 조명이 있으며, 후방부에는 DVL 센서가 장착되어 있다. 플랫폼의 내부에는 관성 측정 유닛과 수심 센서가 있고, 미션 실행을 위한 고성능 제어기 및 배터리를 내장하고 있다.

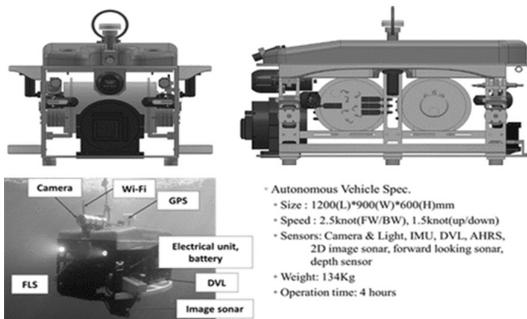


Fig. 2 P-SURO II hybrid underwater robot platform

3. 수중 위치추정 및 경로계획 기술

3.1 수중 위치추정 및 장애물 회피 기술

수중 위치추정을 위해 기본으로 관성 측정 유닛(Inertial Measurement Unit)과 DVL 센서에 의한 관성기반 항법을 사용하며, 수중 컬러 카메라에 의해 수중 지형과 자켓 구조물의 특징점 또는 절대 위치 정보를 가진 능동 가시형 마커를 인식하는 지구물리기반 항법을 Fig. 3과 같이 융합하여 정밀한 위치추정 기술을 구현하였다.

천해의 수중 환경은 날씨와 시간에 따른 탁도와 광량의 변화가 커서 지상에서 사용되는 일반적인 비전 마커를 적용하기 어려웠으며, 이를 극복하여 일정한 인식율을 얻기 위해 마커에 LED 광섬유를 이용하여 패턴을 표현하고 광반사판을 적용하여 수중로봇의 조명을 최대한 이용할 수 있도록 하는 능동 가시형 마커를 Fig. 4와 같이 개발하여 수중 환경에 적용하였다.

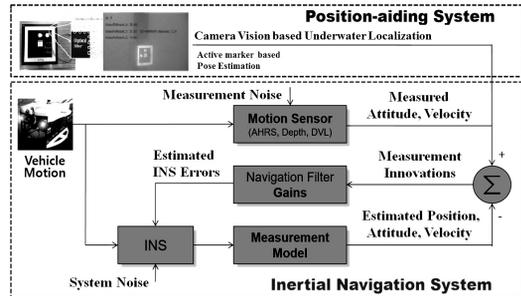


Fig. 3 Proposed fusion positioning system based on the inertial navigation

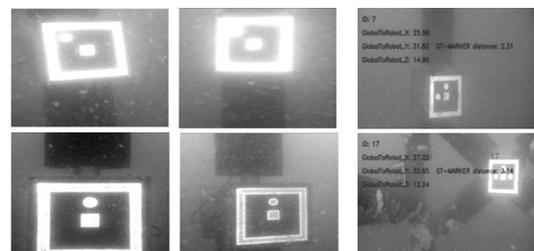


Fig. 4 Light emission of active visible marker(left) and detection of distance and angle from each marker(right)

수중로봇의 운동에 대한 상태벡터 $x(t) \in R^{9 \times 1}$ 는 NED(North East Down) 좌표계에서 수중로봇의 위치(X, Y), 수심(Z), 이동속도(u, v, w), 자세각(ϕ, θ, ψ)으로 구성되며, 다음과 같이 표현된다.

$$x = [X \ Y \ Z \ u \ v \ w \ \phi \ \theta \ \psi]^T \quad (1)$$

시간 t 에 대해 상태벡터는 이전 시간 $t-1$ 의 예측값으로부터 추정되며, 아래 식 (2)와 같은 형태를 따른다.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ u \\ v \\ w \\ \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} X_{k-1} + (u_{k-1}c\theta c\psi + \nu_{k-1}(s\phi s\theta c\psi - c\phi s\psi) + w_{k-1}(c\phi s\theta c\psi + s\phi s\psi))dt \\ Y_{k-1} + (u_{k-1}c\theta s\psi + \nu_{k-1}(s\phi s\theta s\psi + c\phi c\psi) + w_{k-1}(c\phi s\theta s\psi - s\phi c\psi))dt \\ Z_{k-1} - (u_{k-1}s\theta - \nu_{k-1}s\phi c\theta - w_{k-1}c\phi c\theta)dt \\ u_{k-1} + a_{x_{k-1}}dt \\ v_{k-1} + a_{y_{k-1}}dt \\ w_{k-1} + a_{z_{k-1}}dt \\ \phi_{k-1} + (p_{k-1} + q_{k-1}s\phi t\theta + r_{k-1}c\phi t\theta)dt \\ \theta_{k-1} + (q_{k-1}c\phi - r_{k-1}s\phi)dt \\ \psi_{k-1} + (q_{k-1}s\phi \sec\theta + r_{k-1}c\phi \sec\theta)dt \end{bmatrix} \quad (2)$$

a_x, a_y, a_z 와 p, q, r 은 관성측정유닛(IMU)으로부터 획득되는 가속도 및 각속도 정보이다.

수중로봇의 정밀 수중 위치인식을 위해 관성기반 항법을 주로 하여 위치를 추정하고, 수중카메라에 의한 능동 가시형 마커 기반 위치 정보에 의해 보정을 하도록 하고 있다. 이를 반영하는 위치 추정 갱신을 위한 측정 모델은 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_m \\ y_m \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} c\psi_0 & s\psi_0 \\ -s\psi_0 & c\psi_0 \end{bmatrix} - \left\{ \begin{bmatrix} (\hat{\lambda} - \lambda_0)R_\lambda \\ (\hat{L} - L_0)R_L \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} (\lambda_m - \lambda_0)R_\lambda \\ (L_m - L_0)R_L \end{bmatrix} \right\} \\ &= \begin{bmatrix} c\psi_0 & s\psi_0 \\ -s\psi_0 & c\psi_0 \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} (\lambda - \delta\lambda - \lambda_0)R_\lambda \\ (L - \delta L - L_0)R_L \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} (\lambda - \nu_\lambda - \lambda_0)R_\lambda \\ (L - \nu_L - L_0)R_L \end{bmatrix} \right\} \\ &= \begin{bmatrix} -R_\lambda c\psi_0 & -R_L s\psi_0 \\ R_\lambda s\psi_0 & -R_L c\psi_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_\lambda \\ \delta_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_\lambda c\psi_0 & R_L s\psi_0 \\ -R_\lambda s\psi_0 & R_L c\psi_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \nu_\lambda \\ \nu_L \end{bmatrix} \quad (3) \end{aligned}$$

여기서, (\hat{x}, \hat{y}) 는 융합 관성기반 항법에 의한 위치 추정값, (x_m, y_m) 은 능동 가시형 마커 인식에 의한 위치 추정값, ψ_0 는 지면좌표계에서의 수

중로봇의 자세각, λ 는 위도, L 은 경도, (λ_0, L_0) 은 수중로봇의 초기 위치, (R_λ, R_L) 은 위경도에 대한 자오선 및 횡단면의 반지름, (ν_λ, ν_L) 은 가우시안 백색잡음으로 $\nu_\lambda \sim N(0, R_{\nu_\lambda})$, $\nu_L \sim N(0, R_{\nu_L})$ 이다.

3.2 수중 경로계획 및 경로추종 기술

수중로봇의 인공 구조물 외부 및 내부의 이동을 위한 경로계획을 위해, 수중로봇의 유체저항계수를 시뮬레이션을 통해 구하고⁴⁾, 기구학적인 거동 특성⁵⁾과 스러스터 추진 방향, 속도 등을 고려하는 RRT(Rapidly-exploring Random Tree)⁶⁾ 알고리즘을 적용하여 최적 경로를 생성하도록 하였다.

목표로 하는 자켓 구조물을 포함한 폭 8 m, 깊이 6 m, 높이 12 m 범위의 전체 3차원 공간에 대한 광역 탐색은 시간을 많이 소요하여 적합하지 않으며, 따라서 주요 경유점을 기준으로 한 부분 공간 탐색에 의한 경로 생성 결과들을 연결하여 최종의 경로계획을 수행하고 있고, Fig. 5와 같은 환경 내에서 경로계획 시 평균 4.5 sec 정도 시간이 소요된다.

생성된 경로를 추종하기 위해서, 이전 경로와 현재 목표 경로점을 잇는 직선을 추종하는 LOS(Line of Sight)⁷⁾ 기법을 이용하게 되며, 이러한 방법은 위치 오차가 크거나 또는 선회 동작 시에 추종하기 위한 경로의 경사가 커져 인공 구조물에 충돌할 위험이 높다. 따라서 본 연구에서는 수중로봇의 위치 오차가 최소 회전 반경보다 클 때 추종하고자 하는 직선에 대한 범선의 반대방향으로의 headings 제어를 통해 사전에 충돌을 회피하여 경로를 추종하도록 하고 있다.

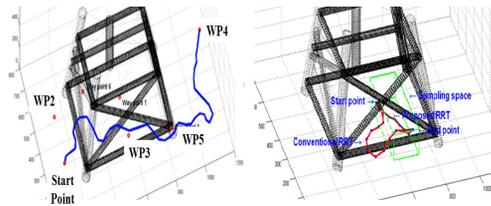


Fig. 5 Result of path generation outside(left) and inside(right) of the artificial jacket structure

Fig. 6에서 수중로봇의 위치 (x, y) , 이전 경로 점 P_k , 다음 경로점 P_{k+1} 에 대해 LOS 벡터 $x_r(t)$ 는 아래 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$x_d(t) = x_p + x_r(t) \quad (4)$$

여기서 $x_p = a_k$ 는 경로 탄젠트 각도이고, 경로 상대 각도 $x_r(t) = \arctan(-e(t)/\Delta(t))$ 이며, $e(t)$ 는 경로와 추정 위치 간 거리 오차, $\Delta(t) = \sqrt{R^2 - e(t)^2}$ 이다.

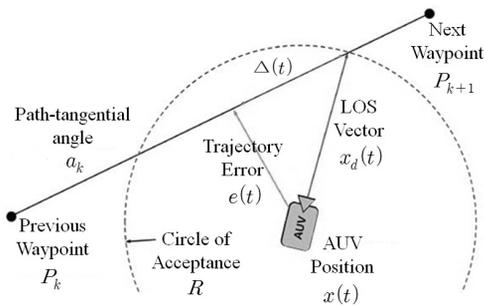


Fig. 6 The alternative heading control of an underwater robot to prevent LOS guidance problems when following path

4. 실험실증 실험 및 성능 검증

수중 자켓 구조물에 대한 수중로봇의 위치인식 및 경로계획 기술의 성능 검증을 위하여 Fig. 7의 경상북도 포항시 영일신항만 부두 실험역 환경에 자켓 구조물을 설치하여 실증실험을 진행하였다. 아래 Fig. 8과 같은 $6 \times 2.8 \times 7.8$ m 크기의 구조물을 제작하여 부두 내 약 16 m 깊이에 고정 설치하였으며, 구조물의 25개 지점에 능동 가시형 마커를 부착하여 위치 정보를 얻을 수 있도록 하였다.

수중 위치인식 및 경로계획으로 생성된 경로를 추종하는 기술에 대한 성능 검증을 위한 실험 방법은 다음과 같다.

- ① 수중로봇이 수중 구조물의 외부 및 내부를 탐색하며 주행하기 위한 경로를 계획
- ② 경로의 경유점을 따라 주행하면서 내부 센

서와 능동 가시형 마커를 이용하여 위치를 추정

③ 전체 경로를 주행하면서, 시간 간격별로 경로와 수중로봇의 추정 위치와의 거리 차이 저장

④ 위 과정을 10회 반복하여, 측정된 거리 차이에 대해 RMSE(Root Mean Square Error)를 계산할 해역 환경에서 경로를 추정하는 실험에 대한 결과는 Table 1 및 Fig. 9와 같으며, 전체 경로에 대한 평균 RMS 오차는 목표치인 1 m보다 작은 약 0.53 m로 위치 추정 및 경로 추종의 복합 성능을 검증하였다.



Fig. 7 Overview of the experimental environment

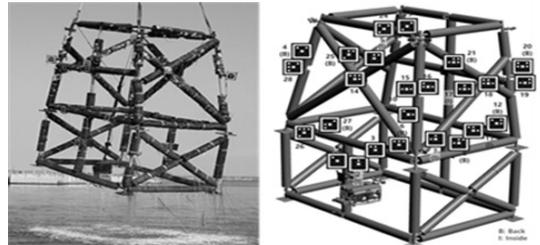


Fig. 8 The structure shape for an underwater artificial jacket and position of attached active markers

Table 1 RMS distance error for the performance test results of a path following

No.	RMSE [m]	No.	RMSE [m]
1	0.529	2	0.519
3	0.488	4	0.469
5	0.472	6	0.563
7	0.622	8	0.521
9	0.476	10	0.625
Average RMSE [m]			0.528

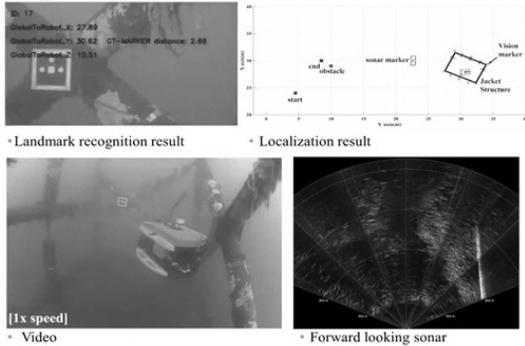


Fig. 9 Visible marker detection and localization results during path following of an underwater robot for exploration of an underwater artificial jacket structure

5. 결 론

본 연구에서는 수중 인공 구조물의 관리 및 조사를 위한 수중로봇의 정밀한 위치추정 및 동특성을 반영한 경로계획 기술을 제안하였다. 수중로봇의 정밀한 수중 위치추정을 위해 관성 측정 유닛과 DVL 센서를 이용한 관성기반 항법과 인공 구조물 상의 능동 가시형 마커에 의한 지구물리기반 항법을 융합한 복합항법을 개발하였으며, 수중로봇의 동특성을 반영한 경로계획을 위해 RRT 기반의 경로 생성과 개선된 LOS 기법에 의한 경로 추종의 방법을 개발하였다. 이렇게 개발된 기술을 실험역 내 설치된 수중 인공 구조물에 대한 경로 추종 오차 측정 실험을 통해 약 0.53 m의 RMS 거리 오차를 보임을 검증하였다.

향후에는 실 해역에서 수중로봇을 장시간 운용하기 위해 필요한 운용 시스템의 안정화 및 조류에 의한 수중로봇의 분실 방지를 위한 비상 대응 기술 적용 등의 실용화를 위한 추가적인 기술 개발이 지속적으로 이루어져야 할 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2018학년도 부경대학교의 지원을 받아 수행된 연구(C-D-2018-0931)이며, 부경대학교

신임교수연구력강화지원사업(2018년도)에 의하여 연구되었음.

Author contributions

J. W. Lee; Writing-original draft and Formal analysis. Y. H. Choi; Conceptualization and Methodology. Y. B. Kim; Supervision and Writing-review. J. H. Suh; Project administration and Writing-review & editing.

References

1. H. T. Choi, 2018, "Robot Navigation and SLAM Technology: An Introduction and Understanding of Underwater Robot Navigation Technology", Korea Robotics Society Review, Vol. 15, No. 2, pp. 5-18.
2. K. M. Alzahrani, 2018, "An Underwater Vehicle Navigation System Using Acoustic and Inertial Sensors", Embry-Riddle Aeronautical University Press
3. J. H. Li, M. J. Lee, S. H. Park, J. T. Kim, J. G. Kim and J. H. Suh, 2013, "Development of P-SURO II Hybrid Autonomous Underwater Vehicle and its Experiment Studies", Journal of Institute of Control Robotics and Systems, Vol. 19, No. 9, pp. 813-821.
4. S. W. Park, M. S. Kim, J.H. Sohn and W. K. Baek, 2016, "Study on the fluid resistance coefficient for control simulation of an underwater vehicle", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 20, No. 1, pp. 24-29.
(<https://doi.org/10.9726/kspse.2016.20.1.024>)
5. K. H. Kim, B. G. Kim and Y. B. Kim, 2018, "A Study on the Optimal Tracking Control System Design for Automatic Ship Berthing", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 22, No. 4, pp. 72-80.

- (<https://doi.org/10.9726/kspse.2018.22.4.072>)
6. Q. Sun, M. Li, T. Wang and C. Zhao, 2018, "UAV path planning based on improved rapidlt-exploring random tree", Chinese Control And Decision Conference, pp. 6420-6424. (<https://doi.org/10.1109/CCDC.2018.8408258>)
7. L. Liu, D. Wang and Z. Peng, 2015, "Predictor-based line-of-sight guidance law for path following of underactuated marine surface vessels", The 6th International Conference on Intelligent Control and Information Processing, pp. 284-288. (<https://doi.org/10.1109/ICICIP.2015.7388184>)