

논문 2018-13-08

## 환경이동혼잡조건을 고려한 자율무인잠수정의 이동경로생성 방법

(Path Planning Method for an Autonomous Underwater Vehicle  
With Environmental Movement Congestions)

유수정, 김지웅, 지상훈, 우종식\*

(Sujeong You, Ji Woong Kim, Sang Hoon Ji, Jongsik Woo)

**Abstract** : In order to make the underwater vehicle carry out the mission in a submarine environment, it is needed to plan a safe and efficient route to a given destination and prevent the autonomous submersible from colliding with obstacles while moving along the planned route. The function of collision avoidance makes the travel distance of the autonomous submersible longer. Moreover, it should move slowly near to obstacles against their moving disturbance. As a result, this invokes the degradation of the navigation efficiency in the process of collision avoidance. The side effect of the collision avoidance is not ignorable in the case of high congested environments such as the coast with many obstacles. In this paper, we suggest a path planning method which provides the route with minimum travel time considering collision avoidance in congested environment. For the purpose, we define environmental congestion map related to geometric information and obstacles. And we propose a method to consider the moving cost in the RRT scheme that provides the existing minimum distance path. We verified that the efficiency of our algorithm with simulation experiments.

**Keywords** : Autonomous underwater vehicle, Path planner, Environmental movement congestion, Collision-free navigation

### 1. 서론

국내외적으로 해역수중탐사, 해저지도 제작, 해양정찰, 해양환경감시 등의 다양한 분야에서 자율무인잠수정 (Autonomous Underwater Vehicle, 이하 AUV)의 사용이 증가되고 있다. 특히, 최근에는 수심 300m 미만의 연안 해역에서 다이버, 예인센서 플랫폼 등이 수행하였던 수송, 탐색 및 환경정보 수집을 대신할 목적으로 AUV가 개발되었다.

그런데, AUV가 임무를 원만히 수행하기 위해서는 안전하고 효율적인 이동 경로를 계획하는 항해 계획 기능과 계획된 이동 경로를 따라 항해하는 도중에 정지 또는 이동 장애물들과 충돌하지 않도록 하는 충돌회피 기능이 필요하다 [1].

임무계획 기능을 통하여 산출되는 최적의 이동 경로 해는 목적에 따라 최소이동거리, 최소이동시간, 최소연료소모 등으로 분류된다. 이 중, 임무계획 기능에 사용되는 전역경로계획 방법은 대부분 최소이동거리를 제공하는 해가 최소이동시간을 제공한다고 가정하여 계산하며, 대표적인 방법으로는 Visibility Planner, Potential Field Path Planner, RRT (Rapidly-exploring random tree) Path Planner 등이 있다 [2].

AUV의 충돌회피 기능은 전역경로계획 방법으로 생성해 놓은 경유점 (Waypoint)들 중에서, 특정 경유점과 경유점 사이의 연결 구간의 항해 도중에서 예상치 못한 장애물과 조우하였을 때에 충돌을 회

\*Corresponding Author (jswoo@koje.ac.kr)

Received: Aug. 31 2017, Revised: Sep. 4 2017,

Accepted: Nov. 30 2017.

S. You, J. Kim, S. Ji: Korea Institute of Industrial Technology

J. Woo: Koje College

※ 본 논문은 산업통산자원부 산업혁신기술개발사업 (10077979)의 지원으로 연구하였음.

피하는 것으로, 경유점 간 이동경로를 재설정하는 방법 [3, 4]과 이동속도를 줄여주어 회피를 하는 방법 [5, 6]이 있다.

그런데, 통상 충돌이 없을 경우에는 경유점 간 이동경로가 직선과 같은 최소이동경로로 설정된다 [7]. 그렇기 때문에, 충돌회피 기능으로 이동경로를 재설정하는 방법의 경우에 AUV의 이동거리를 길어지게 되고 그 결과 이동시간 또한 길어진다.

더욱이 조류와 같은 외란으로 AUV 제어능력이 저하되고 그 결과 AUV가 설정된 이동경로에서 벗어날 위험이 항상 존재하기 때문에, 장애물 근처, 특히 이동장애물을 회피하는 경우에는 안전을 위하여 이동속도를 낮춰 운행하거나 장애물과의 거리를 충분히 떨어뜨려 이동하기 때문에 이동거리와 이동시간은 더욱 길어진다 [7].

경로의 수정 없이 이동 속도를 조정함으로써, 예상되었던 이동장애물과의 충돌을 회피하는 경우는, AUV가 항상 최고의 속도로 운항한다는 가정을 고려하면 이러한 충돌 회피방식 또한 AUV의 이동시간을 길게 만들어 준다.

이동할 거리에 비하여 장애물 수가 적은 경우에는 충돌회피로 인한 효율의 저하가 크지 않지만, 조류 방향과 유속이 다양하고 사전에 알려지지 않은 정지장애물들이 많은 연안에서의 항해에서는 장애물 회피과정에서 발생하는 이동효율의 저하를 무시할 수 없으며, 최소이동거리 경로가 최소이동시간의 임무 경로와 일치하지 않는다.

이러한 이동비용의 불균형을 해소하는 방법으로 최근 스위스 ETH 팀은 비평탄 비정형 환경에서의 안전하고 효율적인 경로를 계획하는 방법으로 2.5D elevation map의 각 셀들에 대해, 경사, 비평탄, 계단 등의 요소를 고려하여 작성한 이동가능 지도 (Traversability map)를 정의하였고 경로생성을 위해서는 RRT\* 알고리즘을 사용하였다 [8]. 그런데, 제안 방법의 이동가능 지도는 이동여부만을 판단하는 것에 한정되었고, 이동의 효율을 저해하는 이동비용의 연속성의 특징을 반영하지 못하였다.

본 논문에서는 장애물들이 많이 존재하는 혼잡한 환경에서 충돌회피기능에서 발생하는 이동시간의 증가가 고려되어 최종 목표지까지 이동하는데 소요되는 이동시간을 최소화시키는 이동경로를 생성하는 임무계획 방법을 제안하고자 한다. 본 논문에서는 기존 최소거리경로를 제공하는 RRT 기법을 확장하여 이동비용을 고려할 수 있도록 하는 방법을 제안한다.

2장에서는 수중환경을 모델링하고 환경혼잡조건을

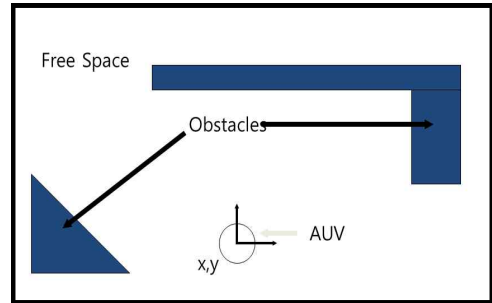


그림 1. 자율무인잠수정과 수중환경 모델링

Fig. 1 Modeling of AUV and underwater environment

정의하였고 3장에서는 환경혼잡조건을 고려한 안전이동경로계획방법을 설명한다. 그리고 4장에서는 시뮬레이션 실험을 통하여 제안한 기법의 효율성을 입증한다.

## II. 수중환경 모델링

### 1. 수중환경 모델링

수중환경은 비록 3차원 공간이지만, 본 논문에서는 자율무인수중잠수정이 2차원 평면공간을 움직인다고 가정하였기에, 수중환경을 다음과 같은 격자모양의 2차원 셀 (Cell)의 집합공간으로 모델링한다. 장애물이 존재하는 셀은 1, 장애물이 없는 셀은 0으로 표시된다. AUV는 그림 1에서와 같이 원으로 모델링 하였다.

### 2. 환경혼잡조건

장애물  $O_i$ 에 의한 주변 셀들의 혼잡도 계수는 식 (1)과 같이 장애물  $O_i$ 와 특정 셀 ( $C(x,y)$ )의 거리의 제곱에 반비례하는 값으로 정의하였다.

그리고 일정 거리 이상으로 멀리 떨어져 있는 셀의 혼잡 계수는 0으로 설정함으로써, 혼잡도 계수를 계산하는데 있어서 불필요한 계산량의 증가를 방지하였다. 이 값은 식 (1)에서는  $d$ 로 표현하였다.

$$U(p, q_i) = \begin{cases} \frac{1}{\|p - q_i\|^2} & \text{if } \|p - q_i\| \leq d \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

여기서  $q_i$ 는 장애물  $O_i$ 의 중심위치이고  $p$ 는 셀의 위치로 두 변수 모두  $R^2$ 의 형태로 정의된다.

예로써, 그림 2에서 셀  $p$ 의 혼잡도 계수는 셀과 장애물  $O_1, O_2, O_3$ 와의 거리가 각각 2, 1, 5이고,

식 (1)의  $d$ 가 3으로 설정되면,  $U(p, q_i) = 0.25$ ,  $U(p, q_j) = 1.0$ ,  $U(p, q_k) = 0$ 이 된다.

환경 혼잡도가 0과 1사이의 값이 되도록 식 (2)와 같은 특정 구간에 대한 스케일 조정 함수를 사용하였다. 여기서  $k_1$ 과  $k_2$ 는 혼잡도 계수의 합의 상한과 하한으로 임의로 설정된다.

$$f(x) = \begin{cases} \frac{x - k_1}{(k_2 - k_1)} & \text{if } k_1 \leq x \leq k_2 \\ 0 & \text{else if } x < k_1 \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

셀  $p$ 의 환경 혼잡도는 다음과 같이 정의되어 0에서 1사이의 값을 가지게 된다. 여기서  $N$ 은 환경에서의 장애물의 총 수이다.

$$M(p) = f\left(\sum_{i=1}^N U(p, q_i)\right) \quad (3)$$

2차원 이동환경에 대한 환경이동혼잡지도는 다음과 같이 결정된다.

$$M: R^2 \rightarrow [0, 1] \quad (4)$$

그림 2의 경우에서 식 (2)의 값을  $k_1$ 을 1,  $k_2$ 를 6으로 설정하면,  $M(p)$ 의 값은  $f(0.25+1+0)$ 로 표시되며, 그 결과 0.05의 값을 가지게 된다.

### III. 환경혼잡조건을 고려한 이동경로계획방법

환경혼잡도를 고려한 AUV의 안전속도를 다음과 같이 설정하였다. 여기서  $M$ 은 환경복잡도 지도로,  $M(x, y)$ 는 셀  $(x, y)$ 의 환경복잡도 계수이다. 그리고  $V_{max}$ 는 AUV가 이동가능한 최대속도이다.

$$v_{safe}(x, y) = (1 - M(x, y)) * V_{max} \quad (5)$$

본 논문에서 제안하는 경로생성 방법은 이동비용이 낮은, 즉 혼잡도 계수가 낮은 공간을 최대한 활용하되 이동 비용이 높은 공간(혼잡도 계수가 높은 공간)에서도 지속적으로 이동 경로를 생성하기 위하여 시도를 하는 방식이다. AUV가 이동할 수 있는 노드들을 임의의 샘플링 기법으로 생성하되, 트리의 확장, 즉, 생성된 노드와 현재 노드를 잇는 경로를 어떻게 생성할지는 표 1의 알고리즘에서와 같이 이동비용(환경복잡도 계수)을 사용한다.

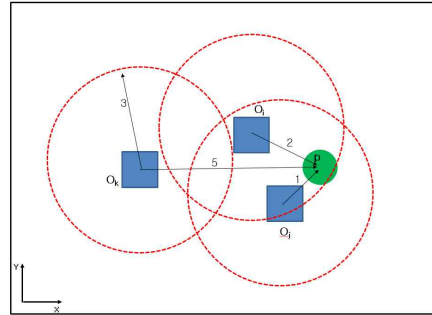


그림 2. 혼잡도 계수  
Fig. 2 Congestion index

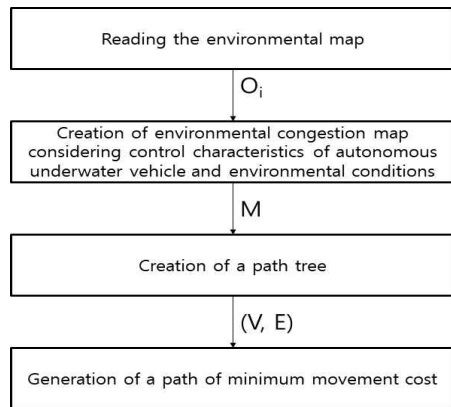


그림 3. 경로계획의 제안된 절차  
Fig. 3 Proposed procedure of path planning

후보 상태 노드와 샘플을 잇는 경로가 정지 장애물과 충돌이 발생하지 않더라도 무조건 추가되는 것이 아니라 확률적인 방법으로 추가되는데, 경로의 이동 비용(환경 복잡도 계수의 합)이 낮을수록 추가할 확률이 높아진다. 이렇게 작성된 최종 경로 트리를 활용하여 최소의 이동비용을 가지는 경로를 생성한다.

환경혼잡조건을 고려한 경로계획 과정을 정리하면, 그림 3의 두 번째 절차가 식 (1)~식 (4) 과정이고, 세 번째 절차가 표 1의 과정이다.

### IV. 모의실험 결과

실험은 표 1과 같이 환경복잡도계수, 즉 이동비용의 특성을 가지는 5종의 환경 지도에 대해 AUV의 출발점과 도착점을 다르게 하여 10회씩 진행하였다. 지도 1은 매우 복잡한 환경이고 지도 3은 단조로운 환경을 나타내고 있다.

표 1. 경로계획 알고리즘

Table 1. Path Planning Algorithm

<b>Algorithm:</b> Path planner Considering Congestion Index ( $\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_{goal}, N$ )	
1	$V \leftarrow \{\mathbf{x}_s\}$
2	$E \leftarrow \phi$
3	<b>for</b> $i=1, \dots, N$ <b>do</b>
4	$\mathbf{x}_{rand} \leftarrow Sample$
5	$\mathbf{x}_{\neq w,arest} \leftarrow FindNearest(V, \mathbf{x}_{rand})$
6	$(\mathbf{x}_{\neq w}, \sigma) \leftarrow Steer(\mathbf{x}_{rand}, \mathbf{x}_{\neq w,arest})$
7	<b>if</b> $IsAcceptable(\sigma)$ <b>then</b>
8	$V \leftarrow V \cup \{\mathbf{x}_{\neq w}\}$
9	$E \leftarrow E \cup \{(\mathbf{x}_{\neq w,arest}, \mathbf{x}_{\neq w})\}$
10	<b>end</b>
11	<b>end</b>
12	<b>return</b> $ExtractPath(V, E, \mathbf{x}_{goal})$

표 2. 실험 환경 지도의 특성

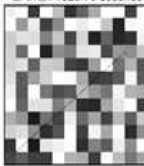
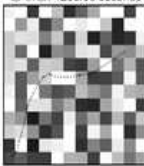

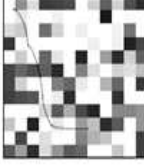
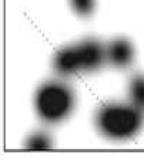
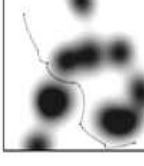

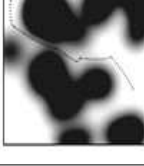


Table 2. Feature of Test Environment Map

Test Map	Feature
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 12x12 Grid Map with 10% Empty grids and 90% Occupied grids               <ul style="list-style-type: none"> <li>- Empty grid : congestion index is 0</li> <li>- Occupied grid : congestion index is a random number between 0 and 0.9</li> </ul> </li> </ul>
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 12x12 Grid Map with 50% Empty grids and 50% Occupied grids</li> </ul>
3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 12x12 Grid map with 10 normal distributions               <ul style="list-style-type: none"> <li>- amplitude is 0.9 and deviation is a random number</li> </ul> </li> </ul>
4	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 12x12 Grid Map with 30 normal distributions               <ul style="list-style-type: none"> <li>- amplitude is 0.9 and deviation is a random number</li> </ul> </li> </ul>
5	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 12x12 Office shaped Grid Map</li> </ul>

비교 편의를 위하여, 모든 지도들의 내부에는 이동이 불가능한 공간, 즉 정지 장애물이 없는 것으로 가정하였다. 따라서 제안된 방법과 비교를 목적으로 사용되는 경로계획 방법들을 적용하면 출발점으로부터 도착점까지 직선인 경로가 생성된다. 지도 종류에 대한 충돌회피 경로계획 알고리즘과 개발한 환경혼잡도를 고려한 경로계획 알고리즘의 경로 계획 결과는 아래와 같다.

표 3. 경로계획의 정성결과

Table 3. Result of path planning

Test Map	Planned Paths ((Left) Conventional RRT (Right) Our Proposed Path Planner)	
1		
2		
3		
4		
5		

지도 1의 경우에는 제안된 방법으로 도출된 이동경로가 직선에서 벗어나기 때문에 총 이동거리는 기존방법으로 도출된 직선의 이동경로보다 길어지게 설정되었지만, 생성된 경로를 보면 복잡한 지역 표 3의 그림들에서는 짙은 색으로 표시된 셀들을 피하고 상대적으로 여유로운 공간(얇은 색을 가지는 셀)을 통과하는 것을 확인할 수 있다.

지도 2의 경우에는 지도 1에 비하여 여유 공간이 많은 경우이다. 지도 1의 경우와 다른 것은 제안된 방법으로 생성된 이동경로가 지도 1에 대하여 생성된 이동경로와 달리 직선에 가까워진 것을 확인할 수 있다. 이것은 RRT 기법이 장애물이 없는

자유공간에서 생성되는 이동경로가 직선에 가까워지는 것과 비슷한 결과로, 생성된 이동경로가 이동비용과 이동거리 측면에서 유리한 이동 경로를 도출할 가능성이 높다는 것을 나타내고 있다.

지도 3과 지도 4의 경우도 지도 1과 지도 2의 경우와 비슷하다. 두 지도 모두 이동시간이 줄어드는 것을 확인할 수 있으며, 상대적으로 복잡한 지도 4에서 생성된 경로는 직선에서 벗어나는 형상의 이동경로를 갖는다. 지도 3과 지도 4는 연속적인 환경복잡도 계수의 환경이므로 지도 1과 지도 2의 경우보다 현실에 가깝게 모델링 된 경우이다.

지도 5의 경우에는 매우 열악한 이동환경으로 장애물들이 넓게 분포된 환경이다. 이 경우 제안방법이 혼잡도 계수가 높은 지역을 통과하는 이동경로를 생성하는 것을 확인할 수 있다. 복잡한 지역, 즉 이동비용이 높아서 AUV의 이동속도가 낮더라도 먼 지역으로 돌아서 가는 것보다 유리하다고 판단된 경우이며, 제한된 시간 내에서 이동경로를 생성해야만 하는 조건과도 관련이 있다.

정량적 결과로 총 50번의 실험에 대한 이동비용은 그림 4와 같다. 여기서의 이동비용은 생성된 이동경로를 따라 AUV가 이동하는 셀들의 환경 혼잡도 계수의 총 합으로 정의하였다. AUV가 최대속도로 이동한다고 가정하였을 때, 이 비용은 이동시간과 비례한다.

그림 4에서 제안된 방법에 의하여 생성된 이동경로의 이동비용 (실선)은 기존의 경로계획방법으로도 출된 이동경로의 이동비용 (점선)보다 모든 경우에 줄어들었음을 확인할 수 있다. 특히, 환경의 복잡도가 높을수록 (지도 1의 경우가 지도 2보다 복잡하고 지도 4가 지도 3보다 복잡) 이득 되는 이동비용이 커짐을 확인할 수 있다.

그리고 각 지도 종류에 대하여 제안한 알고리즘의 기존 충돌회피 알고리즘 대비 이동비용 감소율은 표 4와 같다.

비용 감소율은 백색잡음과 같은 형태의 random 격자 지도에서 상대적으로 낮았지만, 보다 현실적인 비용지도의 형태에서는 비용감소율이 40% 내외로 매우 높게 나타났다. 평균 비용 감소율은 38.55%로 나타났고, 비용 감소율이 20% 이상인 경우를 성공으로 간주했을 때 성공률은 94%로 나타났다.

이것을 통하여 제안된 경로계획 방법이 혼잡한 환경에서 기존의 경로계획 방법보다 이동비용, 즉 이동시간을 기준으로 유리한 이동경로를 제공하고 있음을 확인하였다.

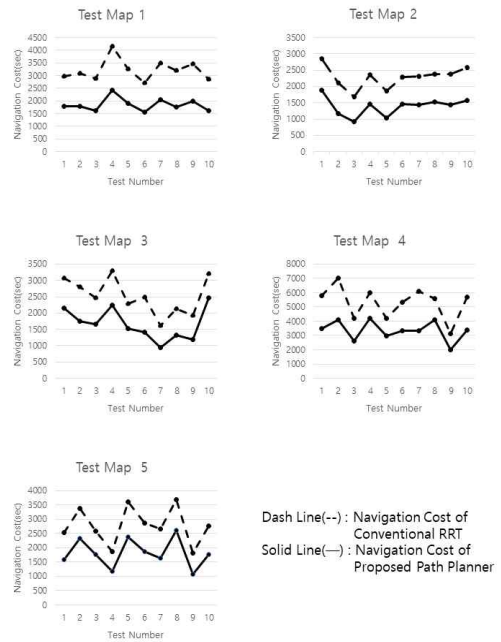


그림 4. 이동비용 비교 (시간기준)  
Fig. 4 Comparison of navigation cost

표 4. 이동비용 감소율 (이동시간 기준)

Table 4. Reduction rate of navigation cost

Test Map	Navigation Cost of Conventional RRT (sec)	Navigation Cost of Proposed Path Planner (sec)	Profit of Navigation Cost (sec)	Profit Ratio of Navigation Cost (%)	Success Ratio of Reducing Navigation Cost (%)
1	1854.6	1353.24	501.36	26.88	90
2	1391.41	891.29	500.12	34.16	90
3	1667.8	861.65	806.15	45.19	100
4	3357.21	1950.17	1407.04	41.47	90
5	1816.51	962.75	853.76	45.03	100

## V. 결론

본 논문에서는 환경의 혼잡 정도를 고려하여 AUV를 장애물이 적은 지역으로 향해하도록 유도하는 전역경로계획 방법을 제안하였다.

시뮬레이션 실험 결과 제안한 방법이 평균적으로 기존 알고리즘보다 30% 이상의 비용감소 효과를 보였다. 향후 연구에서는 장애물의 혼잡도 외의

항해에 영향을 주는 요소들을 고려할 예정이다. 또한, 본 논문의 제안 방법은 장애물의 유무와 별도로 AUV의 이동의 유/불리함을 연속적인 값으로 유연하게 표현하고 종합적으로 고려할 수 있다는 점에서 활용성 측면에 큰 이점이 있을 것으로 판단된다.

또한, 본 논문에서 제안한 경로계획 방법은 자율이동을 하는 청소로봇이나 물류이송로봇들이 이동시간 기준으로 효율적인 이동경로를 생성하는데 활용될 수 있을 것으로 예상된다.

## References

- [1] H. Kim, S.J. Yun, Y.H. Choi, J.W. Lee, J.K. Ryu, B.J. Won, J.H. Suh, "Improved Dynamic Window Approach With Path-Following for Unmanned Surface Vehicle," IEMEK J. Embed. Sys. Appl., Vol. 12, No. 5, pp. 295-301, October, 2017 (in Korean).
- [2] Siciliano, Bruno, Khatib, Oussama, Handbook of Robotics, Springer, 2008.
- [3] Y.I. Lee, H. Jung, Y.G. Kim, "An Autonomous Navigation System for Unmanned Underwater Vehicle," Journal of KIISE, Vol. 34, No. 3, pp. 235-245, 2007 (in Korean).
- [4] K.Y. Lee, S.B. Kim, C.H. Song, "Global Path Planning for Autonomous Underwater Vehicles in Current Field With Obstacles", Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol. 26, No. 4, pp. 1-7, 2012(in Korean).
- [5] Y.S. Jung, S.H. Ji, W.H. Ko, B.H. Lee, "On-line Motion Planner for Multi-AUVs in The Dynamic Environments," Proceedings of International Conference on Advanced Robotics, pp. 1226-1231, 2007.
- [6] S.H. Ji, J.S. Choi, B.H. Lee, "A Computational Interactive Approach to Multi-agent Motion Planning," International Journal of Control, Automation and Systems, Vol. 5, No. 3, pp. 295-306, 2007.
- [7] Lekkas, M. Anastasios, "Guidance and Path-planning Systems for Autonomous Vehicles," Thesis of Ph.D., Norwegian University of Science and Technology, 2014.
- [8] M. Wermelinkger, P. Fankhauser, R. Diethelm, P. Krusi, R. Siegwart, M. Hutter, "Navigation Planning for Legged Robots in Challenging Terrain," in Proceedings of Intelligent Robots and Systems, pp. 1184-1189, October 2016.

### Su Jeong You(유수정)



She received BS and MS in Control and Instrumentation Engineering and Ph.D in Electrical Engineering and Computer Sciences from Seoul National University in 1993, 1995 and 2013, respectively. Her research interests include computer vision, machine learning, robot S/W platform.  
Email: sjyou21@kitech.re.kr

### Ji Woong Kim(김지웅)



He received BS and MS degree in Electrical Engineering and Computer Science from Seoul National University in 2012 and 2015.  
Email: kjw116@kitech.re.kr

**Sang Hoon Ji (지 상 훈)**



He received his BS and MS in Control and Instrumentation Engineering and Ph.D in Electrical Engineering and Computer Sciences from Seoul National University, Seoul, Korea in 1995, 1997 and 2007, respectively. His research interests include multi-agent robot systems, robotics, robot navigation.

Email: robot91@kitech.re.kr

**Jong Sik Woo (우 종 식)**



He received B.E. degree in mechanical engineering from Seoul National University in 1980. And after receiving the MSc degree in mechanical engineering from KAIST in 1982, he received the doctoral degree at IIT in USA in 1990. He developed the 6,000m depth rate AUV 'OKPO-6000' in 1996 and is interested in the deep seabed survey.

Email: jswoo@koje.ac.kr