

논문 2017-12-33

무인수상정을 위한 경로선 추종이 가능한 개선된 Dynamic Window Approach (Improved Dynamic Window Approach With Path-Following for Unmanned Surface Vehicle)

김 호 곤, 윤 성 조, 최 영 호, 이 정 우, 유 재 관, 원 병 재, 서 진 호*

(Hyogon Kim, Sung-Jo Yun, Young-Ho Choi, Jung-Woo Lee,
Jae-Kwan Ryu, Byong-Jae Won, Jin-Ho Suh)

Abstract : Recently, autonomous navigation technology, obstacle recognition, and obstacle collision avoidance technology are actively being developed for an unmanned surface vehicle (USV). The path to move from the current location to the destination should be planned, in order for an USV to autonomously operate safely to its destination. The dynamic window approach (DWA) is a well-known navigation scheme as a local path planning. The DWA algorithm derives the linear velocity and angular velocity by evaluating the destination direction, velocity, and distance from the obstacle. However, because DWA algorithm does not consider tracking the path, when using only the DWA algorithm, the ship may navigate away from the path line after avoiding obstacles. In this paper, we propose an improved DWA algorithm that can follow path line. And we implemented the simulation and compared the existing DWA algorithm with the improved DWA algorithm proposed in this paper. As a result, it is confirmed that the proposed DWA algorithm follows the path line better.

Keywords : Dynamic window approach, Path-following, Unmanned surface vehicle, Local path planning

1. 서 론

무인수상정 (USV, Unmanned Surface Vehicle) 은 원격 조종되거나, 자율적으로 통제되는 선박을 의미한다. 유인선박의 기능을 대체하거나, 위험 지역 또는 항천시에 유인선박이 수행하기 힘든 임무를 위한 무인수상정의 수요가 증가하고 있다. 특히 군사용 무인선 개발의 필요성이 크게 부각되어 미국의 Spartan Scout USV, ASW USV, UISS, 영국

의 C-Sweep, 프랑스의 Mk2, 캐나다의 Dolphin, 이스라엘의 Protector 등이 개발되었다 [1].

기 개발된 무인수상정은 주로 원격 조종 기반의 무인수상정으로, 자율적으로 운용하기 위한 자율 운항 기술, 장애물 인식 및 장애물 충돌회피 기술의 개발이 활발하게 진행되고 있다 [2-5].

무인수상정이 목적지까지 안전하게 자율 운항하기 위해서는 우선 현재 위치로부터 목적지까지 이동할 경로를 먼저 계획해야한다. 경로 계획은 크게 전역 경로 계획과 지역 경로 계획으로 나눌 수 있다. 전역 경로 계획은 자율 이동체가 목적지를 향해 출발하기에 앞서, 주어진 환경 지도를 바탕으로 목적지까지의 전체 이동 경로를 계획하는 것이고, 지역 경로 계획은 예기치 못한 장애물을 회피하기 위해 전역 경로를 크게 벗어나지 않으면서 안전한 회피 경로로 계획하는 것이다 [6].

Dynamic Window Approach (DWA) 알고리즘은 지역 경로 계획에 해당하며 이동체의 동적 상태

*Corresponding Author (suhgang@kiro.re.kr)

Received: Aug. 11 2017, Revised: Aug. 29 2017,
Accepted: Sep. 4 2017.

H. Kim, S.J. Yun, Y.H. Choi, J.W. Lee, J.H. Suh:
Korea Institute of Robot and Convergence
J.K. Ryu, B.J. Won: LIG Nex1

※ 본 연구는 민군기술협력센터 지원 ‘연안 감시정찰 무인수상정’ 과제로 수행되었습니다.

를 반영하는 충돌회피가 가능한 목적지 추종 알고리즘으로, 전역 경로 제어 알고리즘과 융합된 하이브리드 제어 형태로 적용 가능하다 [7].

기존 DWA 알고리즘은 목적지에 대한 방향, 속도, 장애물과의 거리를 평가하여 최적의 선속도와 각속도를 도출하여 장애물을 회피하고 목적지에 도달한다. 하지만 목적지 간의 직선으로 이루어지는 경로선에 대한 추종은 고려하지 않아 충돌 회피 기동 후, 경로선에서 벗어난 운항을 할 수 있다. 따라서 무인수상정의 특정 경로선 추종을 통한 감시 정찰 임무 시, 기존의 DWA 알고리즘만으로는 해당 임무를 달성하기 어렵다.

본 논문에서는 DWA 알고리즘을 보완하여 목적지 간의 경로선에 대한 추종이 가능한 개선된 DWA 알고리즘을 제안하고 시뮬레이션을 통해 이를 검증하였다. 먼저 선박의 운동 모델을 정의하고 기존의 DWA 알고리즘을 설명한 후, 개선된 DWA 알고리즘을 제안하고 시뮬레이션 결과를 통해 기존 DWA 알고리즘과 비교 검증을 수행한다.

II. 선박 운동 모델

경로 생성 알고리즘은 동작 입력 명령 추종에 대한 제어가 아닌 경로 생성에 따른 입력 명령을 만들어내는 과정으로 본 논문에서는 속도 v , ω 에 대한 선박의 위치를 정의하는 기구학만을 고려한다. DWA 알고리즘은 목적지를 추종하고 장애물을 회피하기 위한 선박의 선속도 및 각속도를 도출하는 알고리즘으로 선박의 선속도 (v) 및 각속도 (ω)를 최적화하기 위해, 현위치 x, y 로부터 Δt 시간 후의 위치 x', y' 를 계산해야한다.

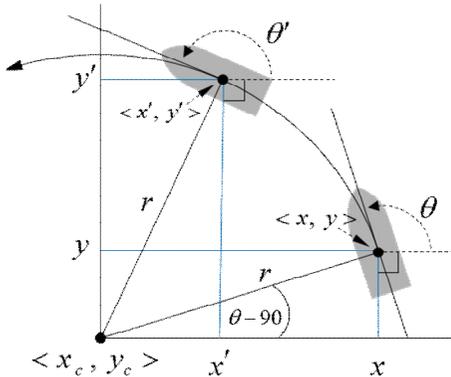


그림 1. 선박의 운동 궤적
Fig. 1 Motion trajectory of ship

선박은 그림 1과 같이 선속도와 각속도에 의해 중심점이 x_c, y_c 이고 반지름이 r 인 원의 궤적을 따라 운동한다. 선속도와 각속도에 대한 선박의 운동 방정식은 식 (1)과 같다.

$$r = \left| \frac{v}{\omega} \right| \tag{1}$$

운동 반경 r 에 의한 원의 중심은 식 (2)와 식 (3)으로 표현된다.

$$x_c = x - r \sin\theta = x - \frac{v}{\omega} \sin\theta \tag{2}$$

$$y_c = y + r \cos\theta = y + \frac{v}{\omega} \cos\theta \tag{3}$$

결과적으로, 선박이 위치 x, y, θ 에서 선속도 (v) 및 각속도 (ω)로 운동할 때, Δt 시간 후의 선박의 위치 x', y', θ' 를 식 (4)와 같이 정의할 수 있다 [6].

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ \theta' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_c + \frac{v}{\omega} \sin(\theta + \omega\Delta t) \\ y_c - \frac{v}{\omega} \cos(\theta + \omega\Delta t) \\ \theta + \omega\Delta t \end{pmatrix} \tag{4}$$

$$= \begin{pmatrix} x \\ y \\ \theta \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -\frac{v}{\omega} \sin\theta + \frac{v}{\omega} \sin(\theta + \omega\Delta t) \\ \frac{v}{\omega} \cos\theta - \frac{v}{\omega} \cos(\theta + \omega\Delta t) \\ \omega\Delta t \end{pmatrix}$$

각속도가 0일 경우, 선속도에 따른 선박의 위치는 식 (5)와 같다.

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ \theta' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ \theta \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} v\Delta t \cos(\theta) \\ v\Delta t \sin(\theta) \\ 0 \end{pmatrix} \tag{5}$$

III. Dynamic Window Approach

DWA 알고리즘은 현재 선박의 속도와 선박의 운동 모델에서 다음 시간까지 취할 수 있는 선박의 제어 입력 범위를 나타내는 Dynamic window를 계산하고 그 범위 내에서 제어 입력을 샘플링하여 사전에 정한 평가 함수가 최대가 되는 제어 입력을 계산한다. 그림 2는 Dynamic window를 나타낸다 [7]. 가로 축이 회전속도를 나타내고 세로축이 직진속도를 나타낸다. Dynamic Window 구간 중 V_s 는

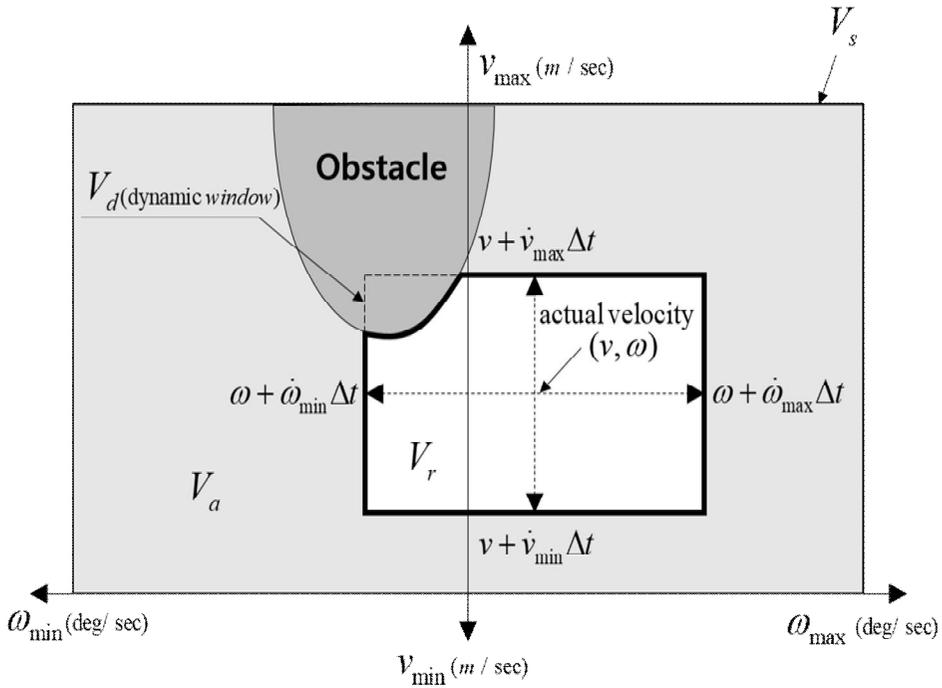


그림 2. Dynamic Window
Fig. 2 Dynamic Window

선박이 취할 수 있는 제어 입력의 최대값과 최소값의 범위이다. 즉 선박의 최고 전진 속도와 최고 회전속도가 반영된다.

V_d 구간은 선박이 다음시간까지 취할 수 있는 최대에서 최소의 제어 입력으로 식 (6)으로 계산한다. V_d 를 통해 선박의 최대 가감 속도 사양이 반영된다 [7].

$$V_d = v, \omega | v \in [v + \dot{v}_{\min} \Delta t, v + \dot{v}_{\max} \Delta t], \omega \in [\omega + \dot{\omega}_{\min} \Delta t, \omega + \dot{\omega}_{\max} \Delta t] \quad (6)$$

V_a 는 장애물 센서에 의한 관측 결과와 로봇의 최대 감속 값에서 계산되는 안전하게 주행 할 수 있는 제어 입력의 범위이다 [7].

식 (7)과 같이 3개의 Window의 교집합에 해당하는 직진속도 및 회전속도 범위에서 제어 입력을 사용한다 [7].

$$V_r = V_s \cap V_a \cap V_d \quad (7)$$

해당 속도 범위에서 선박의 목표 속도 및 목표

각속도를 도출한다. 선박이 목적지를 잘 지향하고 장애물을 회피하는 최적의 목표 속도 및 목표 각속도를 도출하기 위해 기존 DWA 알고리즘의 평가항수는 식 (8)과 같이 정의된다 [7].

$$G(v, \omega) = \sigma(\alpha \times heading(v, \omega) + \beta \times dist(v, \omega) + \gamma \times velocity(v, \omega)) \quad (8)$$

평가항수는 heading, distance, velocity항을 포함하고 각 항에 α, β, γ 의 가중치가 곱해진다. σ 는 Filter를 위한 계수이다.

heading (v, ω) 항은 제어 입력 시 선박의 방향과 목표 방향의 차이이고 $dist(v, \omega)$ 항은 제어 입력 시 Δt 시간 후의 위치 x', y' 에서 장애물까지의 거리이다. 그리고 $velocity(v, \omega)$ 항은 자선의 속도이다. 샘플링된 각 v, ω 쌍 중 목적함수의 값이 가장 큰 값이 제어 입력 값으로 선택되어 진다 [7].

기존 DWA의 평가항수 식 (8)을 통해 장애물 회피 및 목적지 추종은 가능하나 무인수상정 등에서 요구되는 목적지 간의 경로선에 대한 추종은 할 수 없다.

IV. 경로선 추종을 위한 Dynamic Window Approach

본 논문에서는 기존 DWA를 보완하여 경로선에 대한 추종을 위한 항이 추가된 평가함수를 식 (9)와 같이 제안한다.

$$G(v, \omega) = \sigma(\alpha \times \text{heading}(v, \omega) + k \times \beta \times \text{dist}(v, \omega) + \gamma \times \text{velocity}(v, \omega) + |(k-1)| \times \delta \times d_{line}(v, \omega)) \quad (9)$$

$$k = \begin{cases} 0 & \text{if no detecting obstacle} \\ 1 & \text{if detecting obstacle} \end{cases}$$

여기서 k 는 장애물 감지 유무에 대한 계수로, 장애물 감지 시 1, 비감지 시 0으로 값이 결정된다. 그리고 각 항의 $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ 는 가중치이다. 가중치를 조정하여 각 항의 영향력을 달리할 수 있다.

d_{line} 항은 제어 입력 시 Δt 시간 후의 위치 x', y' 에서 경로선 간의 거리(그림 3의 d_i)와 기준 거리 간의 차로, 식 (10)과 같이 정의 된다.

$$d_{line}(v, \omega) = d_{max} - d_i(v, \omega) \quad (10)$$

d_{max} 는 기준 거리로 d_i 가 작을수록 $d_{line}(v, \omega)$ 은 커진다. d_i 는 다음 식 (11)으로 나타낸다.

$$d_i(v, \omega) = \frac{\begin{matrix} x'(v, \omega) \cdot (y_b - y_a) \\ -y'(v, \omega) \cdot (x_b - x_a) \\ -x_a \cdot (y_b - y_a) \\ +y_a \cdot (x_b - x_a) \end{matrix}}{\sqrt{(y_b - y_a)^2 + (x_b - x_a)^2}} \quad (11)$$

따라서 식 (9)의 d_{line} 항은 선박을 Δt 시간 후에 경로에 근접시키는 속도 및 선속도 조합이 최고치가 되게 하여 선박을 경로에 근접하도록 유도한다.

각 항들은 크기와 변동 폭이 다르기 때문에 최소값-최고값 일반화 (min-max normalization)가 필요하다. 다음 식 (12)로 일반화 시킨다.

$$s = \frac{s - Min}{Max - Min} \quad (12)$$

여기서 s 는 특정 v, ω 조합에 의한 해당 평가함수항의 결과 값을 나타내고 Min 과 Max 는 식 (7)의 V_d 에 해당하는 모든 속도 조합에 대한 해당 평가함수의 최소값 및 최고값을 나타낸다. 결과적으로 0에서

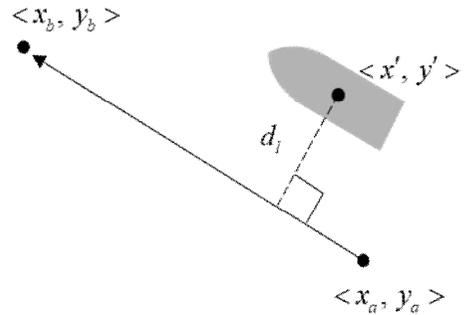


그림 3. 선박과 경로선 간의 거리
Fig. 3 Distance between ship and path line

1 사이 값으로 일반화 된다. 여기에 가중치 인자를 곱하여 각항의 가중치를 설정할 수 있다.

정리하면, 그림 2의 식 (7)에 해당하는 V_r 영역의 선속도 및 각속도 조합을 목적함수 식 (9)에 대입하여 최고값을 갖는 속도 조합을 선박의 목표 선속도 및 목표 각속도로 선정한다. 선박이 도출된 목표 선속도 및 목표 각속도를 잘 추종한다면 목적지를 잘 추종하여 운항하고 장애물을 회피하며, 회피 후, 경로선을 다시 잘 추종하는, 가능한 빠른 속도로 운항할 것이다.

V. 시뮬레이션 검증

제안한 경로선 추종 DWA 알고리즘을 검증하기 위해 그림 4와 같은 C# 기반의 시뮬레이터를 개발하였다. 속도에 따른 Δt 시간 후의 위치 x', y' 를 갱신하여 시간의 흐름에 따른 알고리즘 구동 양상을 확인 할 수 있다. 본 시뮬레이터는 경로 생성 알고리즘의 검증을 위한 것이므로 생성된 경로를 선박이 완벽하게 추종한다고 가정하고 식 (4)와 식 (5)를 적용하여 구현하였다.

화면 구성에서 x 축과 y 축으로 100m 간격의 격자를 생성하였다. 선박의 위치는 점으로 표시하고 점에서 출발하는 Dynamic Window 구간에 해당하는 선속도와 각속도로 정의된 호의 모임으로 부채꼴과 같은 형상을 생성하고, 호의 모임 중에 최적 속도 값에 의한 궤적은 굵은 선으로 표시하였다. 속도에 따른 15초 후의 위치까지 표현된다. 그리고 경로점을 ID로 표기된 점으로 나타내고 경로 간의 경로선을 점선으로 표시하였다. 장애물의 위치는 M으로 표기된 점으로 표현되며 점으로부터 30m 범위를 장애물 영향 반경으로 지정하였다. 선박 거동을

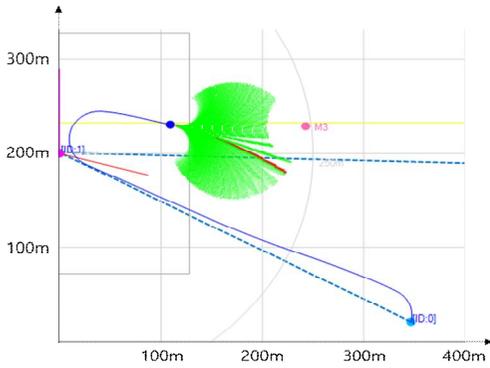


그림 4. 알고리즘 검증 시뮬레이터
Fig. 4 Simulator for algorithm verification

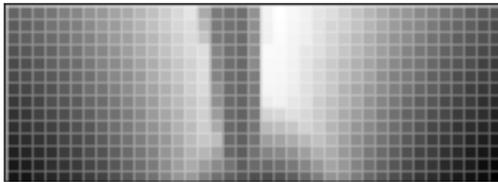


그림 5. 속도 조합별 목적함수 결과 값
Fig. 5 Objective function result by speed combinations

표 1. 가중치 인자 설정
Table. 1. Weighting factor values

Factor	α	β	γ	δ	d_{max}
weight value	1.0	10.0	1.0	10.0	1000

확인하기 위해 선박의 이전 궤적을 실선으로 표현하였다. 그림 4의 상황 시, 14×39 행렬의 속도 쌍에 대한 목적함수의 결과를 일반화하여 나타내면 그림 5와 같다. 가장 흰 부분이 최적의 속도 조합에 해당한다.

먼저 기존 DWA 알고리즘을 시뮬레이션하기 위해 경로점을 ID0에서 4까지 생성하고 경로점 ID3와 4 사이에 총 4개의 장애물 M1~4를 생성시켰다. 그리고 선박의 초기 위치는 ID0으로 설정하였다.

평가함수 각항의 가중치 파라미터를 표 1과 같이 설정하였다. 목표에 대한 방향 및 속도에 대한 항은 줄이고 장애물과의 거리 및 경로선 추종에 대한 항은 영향력이 크게 설정하였다.

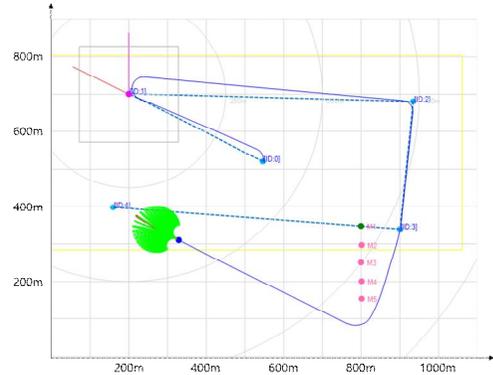


그림 6. 기존 DWA 알고리즘 시뮬레이션 결과
Fig. 6 Simulation results of existing DWA algorithm

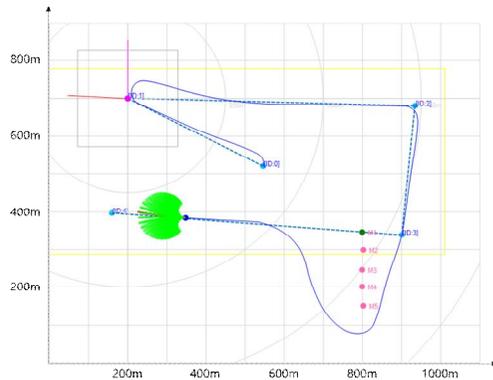


그림 7. 경로선 추종이 가능한 개선된 DWA 알고리즘 시뮬레이션 결과
Fig. 7 Simulation results of improved DWA algorithm with Path-following

먼저, 기존 DWA 알고리즘을 시뮬레이션 한 결과는 그림 6과 같다. ID1에서 ID4의 경로점을 잘 지향하여 추종하였고 ID3에서 ID4구간의 경로에 위치한 장애물 M1, M2, M3, M4, M5를 모두 회피함을 확인하였다. 하지만 경로선에서 벗어난 운항을 보이고 있고 특히 장애물 회피 후 경로점 지향 운항 시 경로선에서 확연히 벗어났음을 그림 6은 보여준다.

기존 DWA 알고리즘의 시뮬레이션과 동일하게 경로, 장애물 및 선박의 초기 위치를 설정하고 본 논문에서 제안한 경로선 추종 DWA 알고리즘을 수행한 결과는 그림 7과 같다. 경로선을 잘 추종함을 확인할 수 있고 장애물도 모두 회피함을 확인 하였

다. 또한 기존 DWA 알고리즘과는 달리 장애물 회피 후 경로선으로 복귀하는 것을 확인 하였다.

따라서 무인수상정과 같은 자율 이동체가 특정 경로선을 추종하는 임무가 요구될 때, 개선된 DWA 알고리즘의 적용가능성이 시뮬레이션을 통해 확인 되었다.

VI. 결 론

Dynamic Window Approach (DWA) 알고리즘은 지역 경로 계획에 해당하며 이동체의 동적 상태를 반영하는 충돌회피 알고리즘이다. 기존의 DWA 알고리즘은 목적지에 대한 방향, 속도, 장애물과의 거리를 평가하여 최적의 선속도와 각속도를 도출하므로 해당 속도 범위에서 선박이 목적지를 잘 지향하고 장애물을 회피하는 구동이 가능하다. 하지만, 경로선에 대한 추종은 고려하지 않아 충돌 회피 기동 후, 경로선에서 벗어난 운항을 할 수 있다. 본 논문에서는 기존의 DWA 알고리즘을 개선하여 경로선을 추종할 수 있는 개선된 DWA 알고리즘을 제안하였고 시뮬레이션을 구현하여 기존의 DWA 알고리즘과 본 논문에서 제안한 개선된 DWA 알고리즘을 비교하였다. 결과적으로 본 논문에서 제안하는 개선된 DWA 알고리즘이 경로선에 대한 추종성이 월등함을 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

References

[1] J. L. Choi, "Development Trend of Unmanned Surface Vehicle for Military," Journal of the

society of naval architects of korea, Vol. 51, No. 2, pp. 3-8, 2014 (in Korean).

[2] S. W. Kim, "A Study on Ship Collision Avoidance and Order of Priority Designation Model," Journal of the Korea Academia Industrial cooperation Society, Vol. 14, No. 11, pp. 5442-5447. 2013.

[3] Y. Zhao, W. Li, P. Shi, "A Real-time Collision Avoidance Learning System for Unmanned Surface Vessels," Neurocomputing, Vol. 182, pp. 255-266. 2016.

[4] A. C. Bukhari, I. Tusseyeva, Y. G. Kim, "An Intelligent Real-time Multi-vessel Collision Risk Assessment System From VTS View Point Based on Fuzzy Inference System," Expert systems with applications, Vol. 40, No. 4, pp. 1220-1230. 2013.

[5] L. P. Perera, J. P. Carvalho, C. G. Soares, "Autonomous Guidance and Navigation Based on the COLREGs Rules and Regulations of Collision avoidance," Proceedings of the International Workshop; Advanced Ship Design for Pollution Prevention, pp. 205-216, 2009.

[6] S. Thrun, W. Burgard, D. Fox, Probabilistic Robotics, MIT press, pp. 99-101, 2005.

[7] D. Fox, W. Burgard, S. Thrun, "The Dynamic Window Approach to Collision Avoidance," IEEE Robotics & Automation Magazine, Vol. 4, No. 1, pp. 23-33, 1997.

Hyogon Kim (김 효 곤)



He received the Ph.D. degree in Mechatronics Engineering from Hanyang University in 2015. He is currently a center director in Smart mobility research center,

Korea Institute of Robot and Convergence (KIRO). His research interests include mobile manipulation, hydraulic systems and exoskeleton systems.

Email: hgkim@kiro.re.kr

Sung-Jo Yun (윤 성 조)



He received M.S. degree in electronic engineering from Kyungpook National University in 2008. His research interests are embedded system for robotics.

Email: yunsj@kiro.re.kr

Young-Ho Choi (최영호)

He received the Ph.D. degree in Electronic and Electrical Engineering from Pohang University of Science and Technology in 2008. He is currently a director in Field Robotics R&D Division, Korea Institute of Robot and Convergence (KIRO). His research interests include mobile manipulation and machine intelligence.

Email: rockboy@kiro.re.kr

Jung-Woo Lee (이정우)

He received the M.S. degree in software engineering from Korea Advanced Institute of Science and Technology in 2015. His research interests are software architecture for field robotics in various environments.

Email: ricow@kiro.re.kr

Jae-Kwan Ryu (유재관)

He received the Ph.D. degree in robotics in 2009 from Japan Advanced Institute of Science and Technology (JAIST). He is currently a senior engineer at Robot R&D Lab. of LIG Nex1. His main research interests are powered exoskeletons, Hydraulic systems, Manipulators, Machine learning, and Unmanned systems (USV, UGV).

Email: jaekwan.ryu@gmail.com

BYONG-JAE WON (원병재)

He is received B.S. degree in computer science from Inha University in 1994.

Email: byongjae.won@lignex1

Jin-Ho Suh (서진호)

He received Ph.D. degree in control engineering from Tokyo Institute of Technology in 2002. He is currently a director of disaster robotics R&D center and an Adjunct Professor of mechanical engineering at Pohang University of Science and Technology (POSTECH). His research interests are machine intelligence, human-robot interaction, and robot system integration.

Email: suhgang@kiro.re.kr