

무인수상선의 자율운항을 위한 단안 카메라 기반의 근거리 선박 자동 탐지

Automatic Detection of Nearby Ships using Monocular Vision for Autonomous Navigation of USVs

박 정 홍, 한 정 욱, 김 진 환*, 손 남 선, 김 선 영
(Jeonghong Park¹, Jungwook Han², Jinwhan Kim^{2,*}, Nam-sun Son³, and Sun Young Kim³)

¹Marine Robotics Laboratory, Ocean System Engineering Research Division, Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering

²Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology

³Maritime Safety Research Division, Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering

Abstract: Automatic detection and tracking of nearby ships are important capabilities for the autonomous operation of unmanned surface vehicles (USVs). This study focuses on achieving such capabilities in the framework of vision-based perception and sensor fusion. Reliable detection and tracking processes using a monocular camera are designed to automatically detect maneuvering targets with no prior information on the motion of targets. For a reliable trajectory estimation in low observability situations, the proposed vision-based approach uses bearing information in both the horizontal and vertical directions. In addition, the measurement by an onboard lidar is integrated into the vision-based tracking filter when the targets are in close range. The performance of the proposed method was assessed by field experiment data obtained in a real-sea environment to show the feasibility of the developed algorithms for the autonomous navigation of USVs.

Keywords: monocular vision, lidar, tracking filter, unmanned surface vehicles (USVs)

I. 서론

최근 자동차, 항공분야 뿐만 아니라 해양분야에서도 해양 사고대응, 수색구조·구난, 해양조사, 해양방위 목적으로 활용하기 위한 무인시스템의 필요성이 크게 대두되고 있다 [1]. 특히, 해상에서 수행되는 대부분의 임무들은 많은 위험이 따르며, 장시간 연속 작업을 요하는 경우가 많아 피로 누적에 의한 해양 안전사고와 인명 손실의 위험이 크다. 따라서 무인수상선(USVs: unmanned surface vehicles)의 활용이 효과적일 수 있으며, 관련 연구를 통해서 기존 유인선을 활용한 해상 임무를 대체하기 위한 수단으로 무인수상선의 활용 범위를 확대하기 위한 노력이 활발하다.

기존에 국내·외에서 개발되어 운용되고 있는 대부분의 무인수상선들은 원격조종에 의해 제한적인 상황에서 주어진 임무를 수행하고 있으며, 자율 운항이 가능한 기술의 성숙도(TRL: technology readiness level)는 무인자동차 및 무인항

공기에 비해서 상대적으로 낮은 실정이다. 무인수상선을 활용하여 다양한 해상 임무를 수행하기 위해 앞서 목적지까지 자율적으로 운항하며 무인수상선의 운항 상태 및 주변 환경을 스스로 인식함으로써 접근하는 해상 장애물 혹은 선박과의 예기치 못한 충돌과 같은 사고를 피하기 위해서는 인식 기술 개발이 필요하다. 이와 같은 기술 개발을 위해 국내·외에서 무인수상선의 자율 인식 시스템에 관한 연구들을 활발히 수행하고 있으며[1-3], 국내에서는 대표적으로 선박해양플랜트연구소(KRISO)에서 개발한 무인수상선의 자율 인식 시스템을 활용한 충돌회피에 관한 연구를 수행하고 있다[4].

일반적으로 무인수상선에서 해상 장애물을 자동으로 탐지하기 위해서는 레이더(radar), 라이다(lidar), 카메라 시스템이 활용될 수 있다. 레이더는 주로 원거리에서부터 장애물 또는 선박들을 탐지할 수 있으나, 탐지 물체의 재질 및 크기에 따라 레이더 신호의 반사 세기와 레이더 반사 면적(RCS: radar cross section)이 다르며, 추출된 레이더 반사 면적을 하나의 표적으로 인식하므로 물체를 직관적으로 식별하는데 어려움이 있다. 또한, 레이더의 근거리 영역에서는 해수면 반사로 인한 신호 잡음이 심하기 때문에 근접한 해상 물체를 탐지할 수 없는 음영영역이 존재하기도 하며, 신호의 업데이트 주기가 다른 탐지 센서들에 비해 상대적으로 느리므로 고속으로 접근하는 선박의 운동정보를 정확하게 추정하는데 어려움이 있다[2,3].

라이다는 근래에 무인자동차분야에서 주변 환경 인식을 위해 활용도가 급증하고 있는 센서이며, 레이더에 비해 상대적으로 빠른 신호 업데이트 주기로 근거리에서 있는 물체와의 상대 거리와 방위정보를 정확하게 측정할 수 있다[5].

* Corresponding Author

Manuscript received February 21, 2017 / revised April 5, 2017 / accepted April 19, 2017

박정홍: 선박해양플랜트연구소 해양시스템연구부
(jeonghong@kriso.re.kr)

한정욱, 김진환: 한국과학기술원 기계공학과
(governor625@kaist.ac.kr/jinwhan@kaist.ac.kr)

손남선, 김선영: 선박해양플랜트연구소 해양안전연구부
(nsson@kriso.re.kr/sykim@kriso.re.kr)

* 이 논문은 2017년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(다목적 지능형 무인선 국산화 개발(6/8), PMS3490).

하지만, 빛에 의한 수면 반사효과, 후류항적, 해무와 같은 해상환경 고유의 잡음으로 인해 라이다의 신호 잡음이 발생하므로 이러한 잡음을 최소화하여 해상 물체의 탐지 성능을 향상시키기 위한 필터링 및 탐지 기법을 개발할 필요가 있다.

카메라는 인간의 시각정보를 대체할 수 있는 핵심 인식 센서로 주변 환경에 대해 직관적인 정보를 제공할 수 있으며, 근래에 무인자동차분야에서 컴퓨터 비전 기법을 이용한 보행자, 차량, 차선, 신호 등과 같은 정보를 인식하기 위한 연구들이 활발하게 수행됨에 따라 비약적인 기술 발전을 보이고 있다[6,7]. 해양분야에서도 카메라를 이용하여 운항하는 선박 혹은 물체들을 자동으로 탐지하는 연구들이 수행된 바 있으며[8-11], 해상 환경 고유의 잡음 영향을 효과적으로 줄이기 위한 연구들이 진행되고 있다[12,13]. 근래에 무인수상선의 자율운항을 위해 스테레오 카메라와 레이더 정보를 융합하여 접근하는 선박을 자동으로 탐지하는 연구가 성공적으로 수행된 바 있다[14]. 스테레오 카메라는 레이더와 라이다처럼 탐지한 물체와의 상대 거리 및 방위정보를 직접적으로 계측할 수 있지만, 두 카메라 사이의 기선(baseline) 길이에 따라 물체를 탐지할 수 있는 유효 탐지 거리가 제한된다. 단안 카메라는 상대적인 거리를 직접적으로 계측할 수 없으며, 상대 방위정보만 계측이 가능하나 단안 카메라의 운동정보를 활용하여 상대 거리정보를 추출하는 것이 가능하다. 특히, 직접적인 기선 길이의 제약이 없으므로 적절한 탐색 기동을 통해 비교적 원거리에 있는 물체의 위치정보 추정이 가능하다.

본 연구에서는 무인수상선의 자율운항을 위해 단안 카메라를 이용하여 해상 고유의 잡음을 최소화하고, 근거리에서 접근하는 선박을 자동으로 탐지하기 위한 방법을 제안하였다. 그리고 영상처리에 의해 계측된 탐지 선박과의 상대 정보를 활용하여 선박의 운항 경로를 추정하기 위한 추적필터를 설계하였다. 특히, 가관측성(observability)이 낮은 상황에서도 안정적으로 경로를 추정하기 위해 단안 카메라 영상 내에서 탐지 선박과 수평선간의 떨어진 픽셀정보를 추가적으로 활용하였다. 또한, 탐지된 선박이 근접 거리에서 카메라의 화각을 벗어나는 경우에는 라이다의 탐지 정보를 융합하여 경로를 추정하였다. 제안한 영상기반의 자동 탐지 및 경로 추정 기법의 유용성을 검증하기 위해 선박해양플랜트연구소에서 개발한 무인수상선을 이용하여 실험역에서 획득한 실험 데이터에 적용하였고, 그 결과를 기술하였다.

II. 근거리 선박 자동 탐지 알고리즘

본 연구에서는 무인수상선에 장착된 단안 카메라와 라이다를 각각 이용하여 접근하는 선박 혹은 장애물과 같은 해상 물체를 자동으로 탐지하기 위한 알고리즘을 설계하였다. 카메라는 빛의 세기와 변화에 민감한 센서로 해상 환경 고유의 잡음인 빛의 산란에 의한 난반사, 해수면 반사효과, 선박의 운항에 의한 후류항적 등에 의한 영향으로 신호의 잡음이 발생하므로 이를 최소화하기 위한 전처리 과정을 포함하였다. 특히, 해상 물체에 대한 사전정보가 없는 상태에서 근접 선박을 효과적으로 탐지하기 위해 특징점 기반

의 영상처리 기법을 이용하여 잠정적으로 선박이 있을 가능성이 높은 영역을 영상 내에서 검출하고, 해당 영역 내에서 최종적으로 해상 물체를 탐지하였다. 또한, 라이다를 이용하여 무인수상선에 근접하거나 카메라의 화각을 벗어난 상황에서도 해상 물체를 탐지하기 위한 알고리즘을 설계하고, 영상기반의 추적필터에 함께 적용함으로써 추적필터의 안정성을 향상시키고자 하였다.

1. 영상기반 탐지 알고리즘

단안 카메라를 이용한 선박의 자동 탐지 알고리즘은 해상 잡음의 최소화 및 수평선 검출 기법을 이용하여 관심영역을 설정하는 전처리 단계, 해상 물체가 있을 잠정적 탐지 영역(CDR: coarse detection region) 및 미세 탐지 영역(FDR: fine detection region)의 설정 단계 그리고 상대적인 거리 및 방위정보를 추출하는 단계로 구성된다(그림 1).

첫 번째 단계에서는 효율적인 연산을 위해 영상 크기를 1/2로 축소하여 단일 채널 영상으로 변환하고, 변환된 영상의 관심영역(ROI: region of interest)내에서 해상 고유의 잡음을 최소화하기 위해 모폴로지(morphology) 필터를 적용하였다. 일반적으로 해상 물체가 무인수상선에 근접할수록 영상 내에서 수평선보다 아래에 존재하므로 케니 에지 검출기(Canny edge detector)와 허프 변환(Hough transform)을 통해 수평선을 검출하였고, 이를 기준으로 관심영역을 재설정하였다(그림 2). 재설정된 관심영역 내에서 이차적으로 해상 고유의 잡음을 최소화하기 위해 양방향(bilateral) 필터를 적용하였다.

두 번째 단계에서는 영상 내에서 해상 물체의 잠재적인 영역을 우선적으로 추출하기 위해 빠른 연산 속도로 특징점들을 추출하는 FAST(features from accelerated segment test) 코너 검출 기법을 적용하였다[15]. 영상 내에서 해상 물체로부터 추출된 특징점들은 밀도있게 분포되는 특성이 있으며, 해상 잡음에 의해 추출된 특징점들은 산발적으로 분포되므로 추출된 특징점들 간의 유클리디안(Euclidean) 거리 비교를 통해 일정 범위 내에 밀집된 특징점들을 단일 그룹으로 설정하였다. 연산처리의 효율을 높이기 위해서

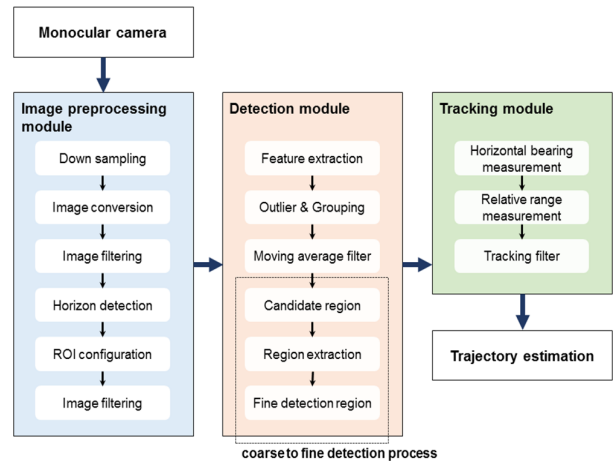


그림 1. 단안 카메라를 이용한 선박 자동 탐지 및 경로 추정 기법의 흐름도.

Fig. 1. A systematic procedure for the automatic ship detection and trajectory estimation using a monocular camera.

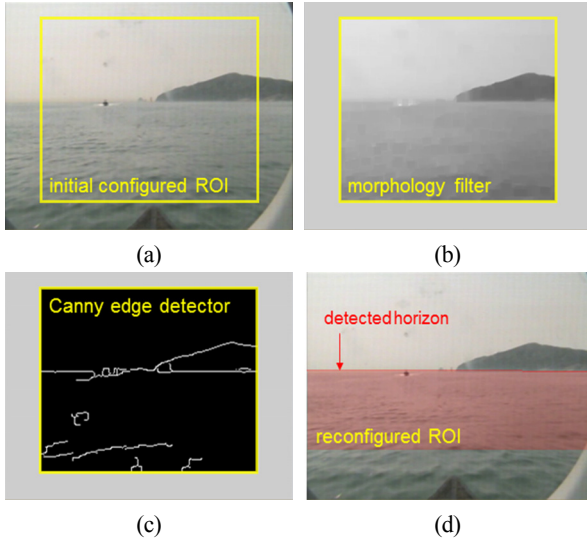


그림 2. 수평선 검출 및 자동 관심영역 설정 과정: (a) 입력영상, (b) 모폴로지 필터 적용 결과, (c) 케니 에지 검출기 적용 결과, (d) 수평선 탐지 및 관심영역 재설정 결과.

Fig. 2. An image preprocessing procedure for the automatic horizon detection and reconfiguration of ROI: (a) input image; (b) morphology filtering result; (c) Canny edge detector result; (d) result image for horizon detection by Hough transform and reconfigured ROI.

그룹으로 설정된 특징점들을 이진영상으로 변환시키고, 단일 영상만으로는 설정된 그룹이 해상 물체 혹은 해상 잡음 인지를 구분하기 어려우므로 그림 3과 같이 연속적으로 이미지들을 누적시켜서 중복되는 그룹을 최종적으로 선별하고자 이동평균필터(MAF: moving average filter)를 설계하여 구현하였다. 이를 적용함으로써 영상 내의 해상 잡음을 최소화하는 동시에 영상 내에서 탐지할 해상 물체가 잠재적으로 위치할 가능성이 상대적으로 높은 영역을 추출하고, 이 영역을 잠정적 탐지 영역으로 정의하였다.

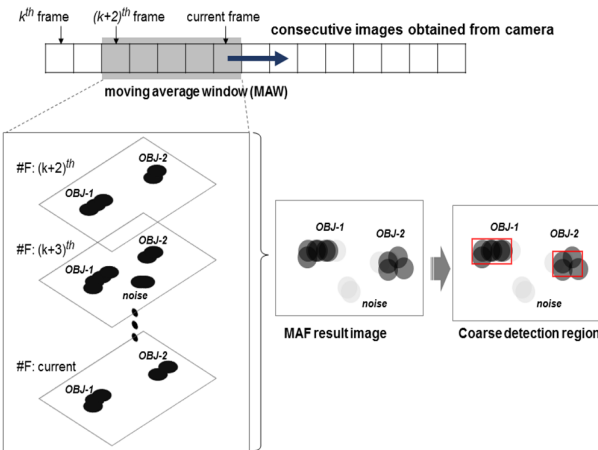


그림 3. 해상 잡음 제거를 위한 이동평균필터.

Fig. 3. Moving average filter for eliminating inherent noise in a marine environment.

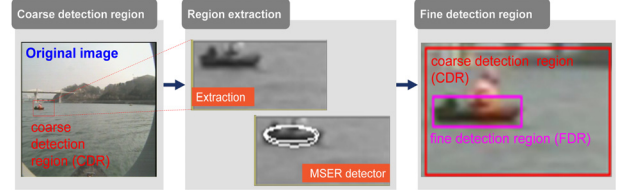


그림 4. MSER을 이용한 미세 탐지 영역의 설정 과정.

Fig. 4. Configuration procedure of fine detection region (FDR) using MSER.

이전 영상처리 과정을 통해 영상 내에 투영된 동일한 해상 물체에 대한 주변 화소(pixel)의 명암값(intensity)은 유사한 특징을 갖고 있으며, 해상 물체의 윤곽선 부분에서 상대적으로 명암값의 변화량이 큰 특성이 있다. 따라서 잠정적 탐지 영역 내에서 해상 물체의 중심을 찾기 위해 영역 검출기 중 하나인 MSER(maximally stable extremal regions) 기법을 적용하였다[16]. 이 기법은 잠정적 탐지 영역 내에서 각 화소의 명암값에 따라 정렬하고, 임계값을 변화시키면서 명암값의 변화율이 작은 영역들을 점진적으로 그룹화하여 최종적으로 명암값의 변화에 강인한 영역(extremal region)을 선별한다. 그림 4와 같이 MSER 기법에 의해 추출된 영역을 미세 탐지 영역으로 정의하였다.

2. 라이다를 이용한 선박 탐지 알고리즘

라이다는 근거리의 주변 환경 및 장애물의 3차원 정보를 획득하기 위해 활용되는 센서이며, 물체로부터 반사되어 수신된 포인트 클라우드(point cloud) 정보들은 상대 거리, 방위 및 반사 강도 정보를 포함하고 있다. 먼저, 획득한 포인트 클라우드를 장애물별로 분류하기 위해 군집화 알고리즘인 가우시안 평균 클러스터링 알고리즘(G-means)을 적용하였다. 이 방법을 통해 군집화된 데이터의 개수와 중심점을 동시에 예측할 수 있다. 하지만, 군집화된 데이터에는 해상 고유의 잡음이 포함되어 있기 때문에 이를 최소화시키기 위한 절차가 추가적으로 적용되었다. 해수면 반사에 의한 잡음의 특성은 간헐적으로 넓게 퍼진 형태로 나타나므로 군집화된 데이터들의 밀도를 고려하여 잡음을 최소화하였다. 결과적으로 잡음이 제거된 군집 데이터들의 중심점을 예측하여 자선을 기준으로 상대 거리와 방위정보를 추출하였다[17].

III. 탐지 선박의 경로 추정을 위한 영상기반 추적필터

단안 카메라의 탐지 거리는 영상 내에 투영된 해상 물체의 크기에 의존적이지만, 라이다보다는 상대적으로 원거리에서 탐지가 가능하다. 단안 카메라에 의해 먼저 탐지된 선박의 운항 경로를 정확하게 추정하기 위해서는 탐지된 선박과의 상대적인 정보를 정확하게 예측해야 한다. 단안 카메라의 특성상 상대 방위정보만 직접적인 예측이 가능하므로 정보의 변화량이 크지 않은 가관측성이 낮은 상태에서는 추적필터의 성능이 크게 저하된다[18]. 이를 개선시키기 위해서는 무인수상선의 급격한 변침운동이 필요하지만, 본 연구에서는 별도의 변침운동 없이, 영상처리에 의해 탐지된 수평선을 기준으로 수직방향에 대한 방위정보로부터 개략

적으로 추정된 상대 거리정보를 추적필터의 계측모델에 추가하여 활용하는 방법을 제안하였다[11]. 그리고 라이다의 탐지 범위 내에서는 카메라와 라이다의 정보 융합을 통해 지속적으로 탐지된 선박의 운항 경로를 추정하였다.

1. 영상처리를 이용한 상대 정보 추출

단안 카메라로부터 계측한 상대 정보의 정확성과 신뢰성은 추적필터의 성능에 큰 영향을 미치므로 앞 절에서 정의한 미세 탐지 영역과 탐지된 수평선 정보를 이용하여 수평 및 수직 성분으로의 상대 방위정보를 계측하였다. 카메라 이미지 좌표계(그림 5(a))를 기준으로 계측한 수평 성분에 대한 상대 방위정보는 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$\beta_T = (F_c / \omega_p^l) \beta_T^l \cos \phi \quad (1)$$

여기서, F_c 는 카메라의 화각을 나타내며, ω_p^l 는 카메라 영상의 폭(width)을 나타내고, β_T^l 는 영상처리를 통해 최종적으로 탐지된 미세 탐지영역의 중심점과 이미지 좌표계의 중심점간의 픽셀거리를 의미하며, ϕ 는 이미지 좌표계에서 수평선의 기울어진 정도를 나타낸다.

특히, 영상 내에서는 탐지된 물체와의 상대적인 거리가 멀어질수록 수평선에 근접하는 특성을 이용하여 간접적으로 상대 거리정보를 추정할 수 있다. 그림 5(b)와 같이

미세 탐지 영역의 바닥면을 타선의 가장 낮은 바닥점으로 가정하고 수평선까지 떨어진 픽셀거리를 이용하여 식 (2)와 같이 상대 거리를 추정하였다.

$$\rho_T = h_c / (\tan \delta_T \cos \beta_T) \quad (2)$$

여기서, h_c 는 수평면에서 무인수상선에 탑재된 카메라까지의 높이를 나타내며, δ_T 는 다음 식 (3)을 통해서 구할 수 있다.

$$\delta_T = \begin{cases} \gamma_T + \alpha + \epsilon \approx \gamma_T + \alpha & \text{if } y_h^l \leq y_c^l \\ \gamma_T - \alpha + \epsilon \approx \gamma_T - \alpha & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

여기서, $\gamma_T = \tan^{-1}(b_T^l/f)$ 와 $\alpha = \tan^{-1}(h_p^l/f)$ 는 영상 내의 픽셀정보를 통해 계산할 수 있으며, f 는 초점거리를 나타내며, b_T^l 와 h_p^l 는 각각 이미지의 중심점에서 투영된 물체와 수평선간의 픽셀거리를 각각 의미하고, ϵ 는 둥근 지구표면에 의한 지평면과 수평선간의 각도를 나타내지만 본 연구에서는 매우 작은 값이므로 무시하였다.

2. 영상기반 추적필터

영상처리에 의해 계측한 상대 정보를 이용하여 탐지 선박의 운항 경로를 추정하기 위해 확장형 칼만필터(EKF: extended Kalman filter)기반의 추적필터 모듈을 설계하였다. 카메라와 라이다의 탐지 범위가 각각 다르므로 목표 선박은 카메라에 의해 상대적으로 라이다보다 원거리에서부터 미리 탐지되며, 근거리에서는 카메라와 라이다 동시에 탐지된다. 그리고 목표 선박이 근거리에서 카메라의 화각을 벗어나면 라이다에 의해서 탐지될 수 있으므로 이러한 상황을 고려한 추적필터 모듈을 설계하였다.

카메라에 의해 초기에 탐지된 목표 선박은 추적필터의 상태벡터, 공분산 행렬 및 계측 행렬에 상태변수를 자동으로 추가 등록하고, ID를 새롭게 할당하였다. 그리고 각 센서들로부터 계측된 정보와 이미 등록되어 추적되는 선박에 대한 오차공분산(error covariance)값과의 마할라노비스 거리(Mahalanobis distance)를 순차적으로 계산하고, 최근접이웃(nearest-neighbors) 알고리즘을 통해 추정치의 업데이트 여부를 판단하였다. 또한, 각 센서로부터 일정 시간동안 계측된 정보가 업데이트되지 않으면, 추적하던 선박에 대한 오차공분산이 급격하게 증대되는 점을 감안하여 불확실성 수준(uncertainty level)을 정의하고, 일정한 범위 이상으로 증가하면, 추적하던 선박을 추적필터에서 제외하였다. 이처럼 추적필터의 크기를 가변화함에 따라 연산 효율의 증대를 통해 다중 선박을 동시에 탐지 및 추적할 수 있으며, 무인수상선의 단일 보드 컴퓨터 내에서 처리할 수 있도록 구현하였다.

2.1 운동모델

본 연구에서는 탐지된 선박의 운항 경로를 추정하기 위해 등속운동모델로 가정하였으며, 설계한 추적필터의 시스템 모델은 다음 식 (4-6)과 같다.

$$\dot{\mathbf{x}} = [\dot{\mathbf{x}}_0 \dot{\mathbf{x}}_T]^T + \mathbf{w} \quad (4)$$

$$\dot{\mathbf{x}}_0 = [\dot{x}_0 \dot{y}_0 \dot{\psi}_0 \dot{V}_0]^T \quad (5)$$

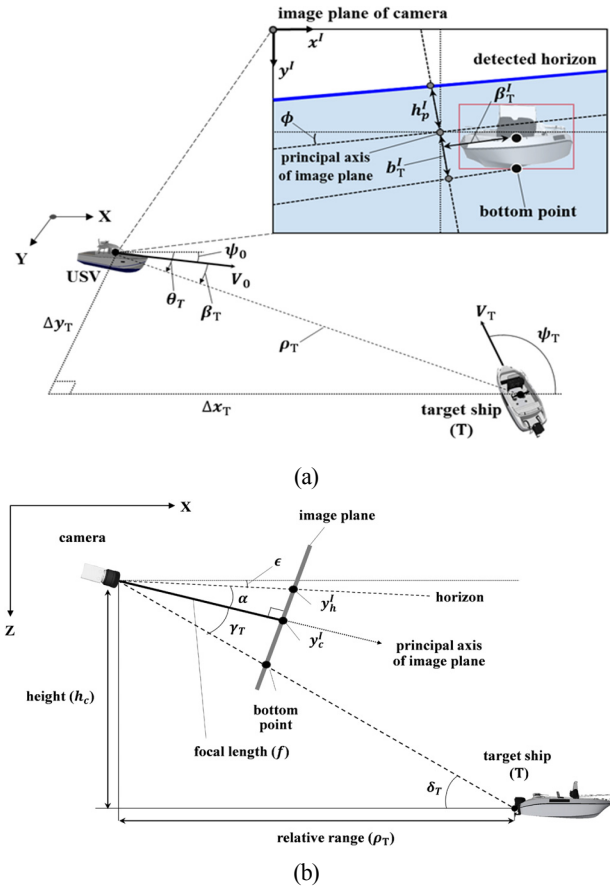


그림 5. 카메라 이미지 및 전역 좌표계: (a) 수평면에서의 좌표계; (b) 수직면에서의 좌표계.

Fig. 5. Camera image geometry and coordinate systems: (a) horizontal plane; (b) vertical plane.

$$\dot{\mathbf{x}}_{T_i} = [\dot{x}_{T_i} \dot{y}_{T_i} \dot{\psi}_{T_i} \dot{V}_{T_i}]^T \quad (6)$$

여기서, $\dot{\mathbf{x}}_0$ 와 $\dot{\mathbf{x}}_{T_i}$ 는 무인수상선과 탐지 선박에 대한 속도, 각속도, 가속도 벡터를 각각 나타내며, \mathbf{w} 는 환경의란을 고려한 프로세스 잡음(process noise) 벡터이다. 그리고 \mathbf{x}_0 와 \mathbf{x}_{T_i} 는 각각 상태변수로 이루어진 상태벡터를 의미하며, 무인수상선과 목표 선박에 대한 위치, 방위, 속도를 나타내는 상태변수는 $\mathbf{x}_0 = [x_0 y_0 \psi_0 V_0]^T$, $\mathbf{x}_{T_i} = [x_{T_i} y_{T_i} \psi_{T_i} V_{T_i}]^T$ 로 표현된다.

2.2 계측모델

라이다뿐만 아니라 제안하는 영상처리 기법을 통해 카메라로부터 상대 방위 및 거리정보를 각각 계측할 수 있으므로 제안하는 추적필터의 계측모델은 다음과 같이 표현하였다.

$$\mathbf{z} = [\mathbf{z}_0 \mathbf{z}_{T_i}]^T + \mathbf{v} \quad (7)$$

$$\mathbf{z}_0 = [x_0 y_0 \psi_0 V_0]^T \quad (8)$$

$$\mathbf{z}_{T_i} = [\beta_{T_i} \rho_{T_i}]^T \quad (9)$$

여기서, \mathbf{z} 는 계측치의 행렬을 나타내며, \mathbf{z}_0 는 무인수상선의 항법 센서의 계측치를 의미하고, \mathbf{z}_{T_i} 는 카메라와 라이다에 의해 탐지된 선박에 대한 계측치를 나타낸다. $\beta_{T_i} = \theta_{T_i} - \psi_0$ 는 무인수상선과 탐지 선박간의 상대 방위각을 나타내며, $\theta_{T_i} = \tan^{-1}(\Delta y_{T_i} / \Delta x_{T_i})$ 는 무인수상선과 탐지 선박간의 위치에 대한 고정 좌표계에서의 각도를 나타낸다. 상대 거리는 $\rho_{T_i} = \sqrt{\Delta x_{T_i}^2 + \Delta y_{T_i}^2}$ 와 같으며, Δx_{T_i} 와 Δy_{T_i} 는 무인수상선과 각 탐지 선박과의 좌표축에 대한 상대 거리 차이를 의미한다. 그리고 \mathbf{v} 는 측정 잡음(measurement noise) 벡터이며, 카메라와 라이다의 계측 특성을 고려하여 적용하였다.

V. 실험실 실험 결과

선박해양플랜트연구소에서 개발한 무인수상선을 이용하여 부산 수영만 인근 해역에서 획득한 실험 데이터에 제안한 알고리즘을 적용하고, 그 결과를 분석하였다.

1. 시스템 소개

무인수상선의 외형 및 탑재된 센서들과 실험실에서 원격 제어를 통해 무인수상선을 운용하기 위한 육상제어차량은 그림 6과 같다. 그리고 무인수상선의 제원 및 탑재된 카메라와 라이다의 사양은 표 1과 같으며, 무인수상선의 내부 시스템은 그림 7과 같이 개발되었다[4]. 무인수상선에 대한 정확한 위치정보를 획득하기 위해 RTK-GPS(real-time kinematic global positioning system)를 사용하였으며, 자세 정보를 AHRS(attitude heading reference system)로부터 취득하였다. 다만 카메라는 영상처리의 효율적인 연산을 위해 640×480 해상도로 변환하고 5fps로 영상을 수신하였다. 제안한 영상처리 알고리즘은 3.4GHz의 Quad-Core 프로세서에서 OpenCV 라이브러리를 이용한 C++기반으로 구현되었다. 최상단에 탑재된 라이다는 32개의 빔이 장착된 Velodyne

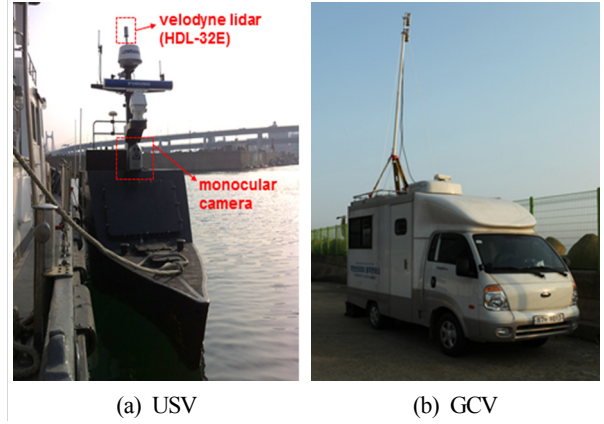


그림 6. 무인수상선 및 육상제어차량.

Fig. 6. Unmanned surface vehicle (USV) and ground control vehicle (GCV).

표 1. 개발한 무인수상선의 제원 및 탑재 센서 사양.

Table 1. Principal specifications of USV and perception sensors.

Item	Description	Value
Length	meter	7.5
Breadth	meter	2.0
Draft	meter	0.472
Speed	knot	> 35
Displacement	ton	2.6
Engine (Propulsion)	E/G HP (Propulsion)	315 (single water-jet)
Monocular camera	image size: 788×494 (pixel) frame rate: 5 (fps) field of view (H/V): $61.22^\circ / 47.16^\circ$	
Velodyne lidar (HDL-32E)	range scales: 1 ~ 100 (m) update frequency: 10 (Hz) field of view(H/V): $360^\circ / -30.67^\circ \sim +10.67^\circ$	

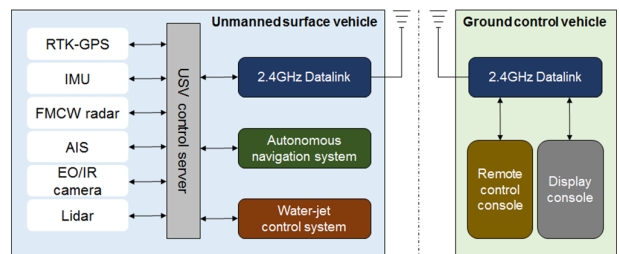


그림 7. 무인수상선의 탑재 센서 및 시스템 구성도.

Fig. 7. Perception sensors and system configuration of USV.

사의 HDL-32E 모델로서 이를 사용하여 근접한 해상 물체들을 탐지하고, 이더넷(ethernet) 인터페이스를 통해 초당 최대 700,000 포인트 클라우드를 인식용 PC로 전송하여 10Hz 주기로 주변 환경을 탐색하였다.

2. 센서별 탐지 기법 적용 결과

2.1 단안 카메라의 탐지 결과

단안 카메라를 이용하여 전방 및 좌/우현에서 접근하는



그림 8. 전방 및 좌/우현에서 접근하는 선박의 영상기반 자동 탐지 결과.

Fig. 8. Vision-based automatic ship detection results for head-on and crossing situations.

소형 보트를 탐지한 결과는 그림 8과 같다. 탐지 선박으로 사용된 소형 보트는 길이가 약 8m이며, 소형 보트와 무인 수상선의 운항 속도는 6kts이다. 제안하는 알고리즘의 탐지 성능을 정량적인 지표로 평가하기 위해 각 시나리오에 대해서 정확률(precision), 재현률(recall), 그리고 정확률과 재현률을 이용한 F1 score를 평가한 결과, 각각 87.6%, 91.0%, 89.3%의 성능을 보였으며, 한 프레임에 대한 이미지 전처리 과정을 포함한 영상기반 탐지 알고리즘의 연산 소요시간은 평균 25.34msec로 평가되었다.

2.2 라이다의 탐지 결과

라이다를 이용한 근거리에서의 소형 보트 탐지 결과는 그림 9와 같다. 좌측 그림은 라이다로부터 계측된 3차원 원시 데이터이며, 무인수상선의 자세 정보를 활용하여 3차원 데이터를 운동평면으로 투영시킨 결과를 가운데 그림에 나타내었고, 최종 탐지 결과를 우측 그림에 나타내었다. 본 연구에서는 무인수상선의 후류항적과 알고리즘의 연산속도 향상을 위해 전방($\pm 90^\circ$) 데이터만 활용하였으며, 라이다로부터 지속적인 탐지가 가능한 거리는 장애물의 형상 및 크기 등 환경 조건에 따라 달라지는 것을 확인하였다. 일례로 일반 소형 어선의 경우 55m 이내로 접근해야 지속적인 탐지가 가능한 것을 확인하였다.

3. 영상기반의 탐지 선박 경로 추정 결과

목표 선박의 경로를 추정하기 위한 실험 시나리오에서는 무인수상선의 전방을 향해 약 20kts의 속도로 운항하는 소형 보트 1척을 목표 탐지 선박으로 사용하였으며, 무인수상선은 약 15kts의 속도로 정해진 궤도를 따라 자율적으로 운항하도록 제어되었다. 그리고 무인수상선에 탑재된 카메라와 라이다를 이용하여 제안한 탐지 알고리즘을 통해 접근하는 목표 선박을 자동으로 탐지하고, 상대적인 정보를 계측함으로써 탐지 선박의 운항 경로를 추정하였다. 추적필터에

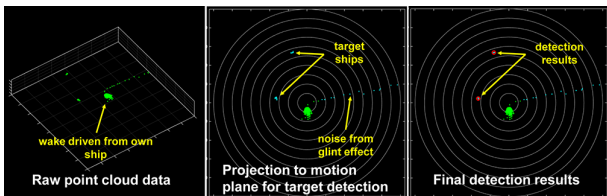
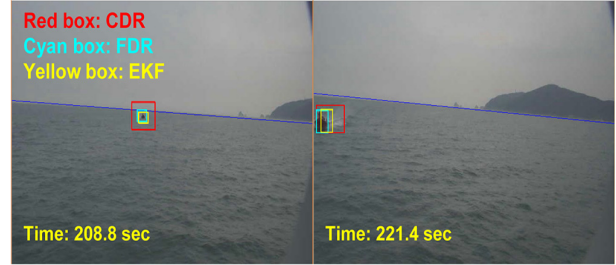
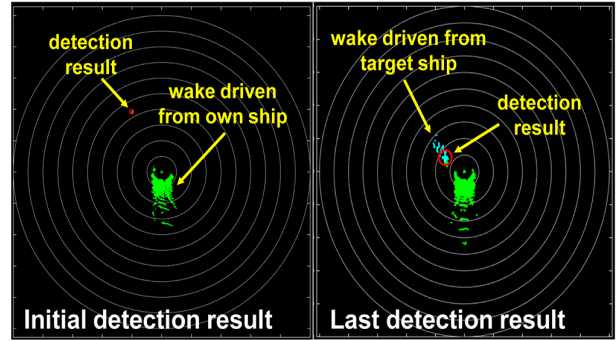


그림 9. 라이다를 이용한 근거리 선박 자동 탐지 결과(10m ring).

Fig. 9. Automatic ship detection results of approaching ships using lidar (left: side view, middle and right: top view).



(a) Result images for detected target ship by the monocular camera



(b) Detection results using the lidar (10m ring)

그림 10. 전방에서 고속으로 접근하는 선박에 대한 카메라 및 라이다의 탐지 결과.

Fig. 10. Detection results for approaching ship at high speed using the proposed method.

의해 추정된 경로의 정확도를 비교하기 위해 탐지 선박에 장착된 GPS로부터 획득한 위치 정보와 함께 비교하였다. 그림 10은 전방에서 고속으로 접근하는 선박을 제안한 방법으로 카메라와 라이다에 의해 탐지된 결과이며, 추정한 탐지 선박의 위치를 카메라의 영상 내에 함께 표기하였다.

그림 11과 같이, 탐지 선박은 카메라에 의해 약 243m 정도 떨어진 거리에서 초기에 탐지되어 경로가 추정되기 시작하였으며, 카메라의 탐지 정보가 지속적으로 업데이트됨에 따라 실제 탐지 선박의 경로에 수렴함과 동시에 추정한 경로에 대한 오차공분산의 크기가 증대되지 않고 수렴하는 특성을 보였다. 그리고 상대 거리가 약 46m 정도 떨어진 시점부터는 제안한 라이다의 탐지 알고리즘에 의해 탐지되기 시작하였으며, 이 시점부터는 카메라의 탐지 정보와 융합되어 경로가 추정되었다. 상대 거리가 점차 가까워짐에 따라 탐지 선박과의 충돌을 피하기 위해 무인수상선의 선수각을 우현으로 변침하는 순간에 탐지 선박이 무인수상선의 좌현으로 지나가며 카메라의 화각을 벗어난 시점부터는 라이다에 의해서만 경로가 추정되었다. 무인수상선의 침로가 급변하는 시점 이후부터 고속으로 운항하는 탐지 선박의 후미에서 발생하는 후류항적에 의해 라이다의 계측 정보에 잡음이 추가됨에 따라 그림 11과 12에서 보는 바와 같이 오차공분산과 추정된 경로 오차가 다소 증대되는 것을 볼 수 있다. 이처럼 탐지 센서의 계측 정보에 대한 신뢰성에 따라 추적필터의 오차공분산 결과가 달라지며, 추정된 경로 오차는 탐지 센서 및 GPS의 계측 오차와 무인수상선의 운동정보에 대한 오차를 모두 내포하고 있다.

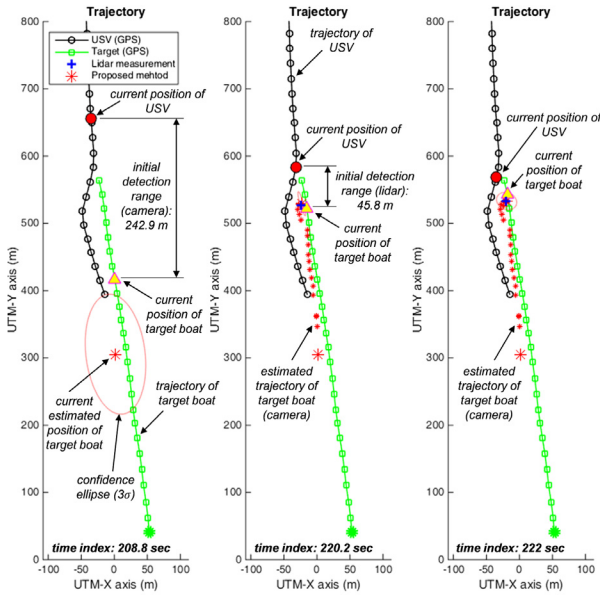


그림 11. 제안한 영상기반 추적필터를 이용한 탐지 선박의 경로 추정 결과.

Fig. 11. Results of trajectory estimation for detected target ship using the proposed vision-based tracking filter.

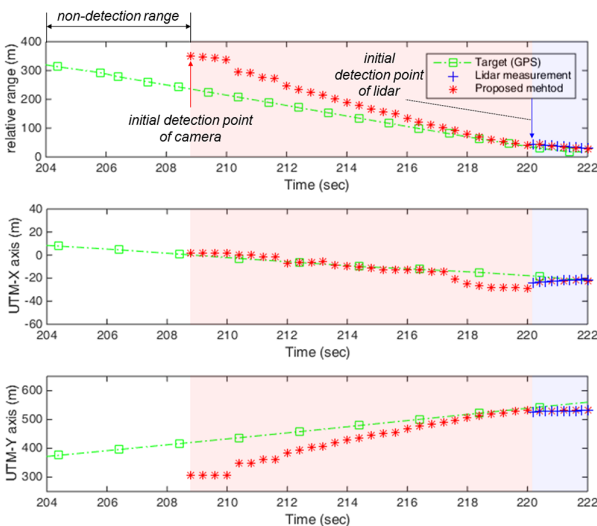


그림 12. 추정한 경로 추적 결과의 상대 거리 및 축별 거리 비교.

Fig. 12. Comparison results of actual and estimated trajectory of target ship with respect to the relative range and each axis.

VI. 결론

본 논문에서는 무인수상선에 장착된 단안 카메라를 이용하여 고속으로 접근하는 선박을 자동으로 탐지하기 위한 영상처리 알고리즘을 제안하였으며, 가관측성이 낮은 상황에서도 탐지 선박의 경로를 안정적으로 추정하기 위한 방법을 제시하였다. 또한, 탐지 센서의 특성 및 탐지 범위를 상호 보완하기 위해 단안 카메라와 라이다의 탐지 정보를 융합하여 근거리에서도 안정적으로 탐지 선박의 경로를 추정하기 위한 추적필터를 설계하고 구현하였다. 제안한 알고리즘의 성능을 검증하기 위해 선박해양플랜트연구소에서

개발한 무인수상선을 이용하여 부산 수영만 인근 해역에서 실험을 수행하였고, 실험 데이터를 확보하였다. 다양한 방향에서 접근하는 선박에 대한 영상기반 자동 탐지 알고리즘의 성능을 분석하였으며, 가관측성이 낮은 상태에서 탐지 선박의 추정된 경로와 탐지 선박에 장착된 GPS로부터 획득한 경로의 오차를 비교하였다. 이상의 절차를 통해 제안하는 알고리즘의 적용 타당성을 검증하였다.

REFERENCES

- [1] Z. Liu, Y. Zhang, X. Yu, and C. Yuan, "Unmanned surface vehicles: An overview of developments and challenges," *Annual Reviews in Control*, vol. 41, pp. 71-93, Apr. 2016.
- [2] J. Larson, M. Bruch, R. Halterman, J. Rogers, and R. Webster, "Advances in autonomous obstacle avoidance for unmanned surface vehicles," DTIC Document, Tech. Report, 2007.
- [3] L. Elkins, D. Sellers, and W. R. Monach, "The Autonomous Maritime Navigation (AMN) project: Field tests, autonomous and cooperative behaviors, data fusion, sensors, and vehicles," *Journal of Field Robotics*, vol. 27, no. 6, pp. 790-818, 2010.
- [4] N. S. Son, "On the collision avoidance of unmanned surface vehicle, ARAGON," *AUVSI's Unmanned Systems 2015*, pp. 375-384, May. 2015.
- [5] T. H. Fang, J. Han, N. S. Son, and S. Y. Kim, "Track initiation and target tracking filter using LiDAR for ship tracking in marine environment," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 22, no. 2, pp. 133-138, 2016.
- [6] S. Sivaraman and M. M. Trivedi, "Looking at vehicles on the road: A survey of vision-based vehicle detection, tracking, and behavior analysis," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 41, no. 4, pp. 1773-1795, Dec. 2013.
- [7] Y. J. Lee, J. H. Yang, and N. Kwak, "A lane change recognition system for smart cars," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 21, no. 1, pp. 46-51, 2015.
- [8] M. T. Wolf, C. Assad, Y. Kuwata, A. Howard, H. Aghazarian, D. Zhu, T. Lu, A. Trebi-Ollennu, and T. Huntsberger, "360-degree visual detection and target tracking on an autonomous surface vehicle," *Journal of Field Robotics*, vol. 27, no. 6, pp. 819-833, 2010.
- [9] T. Huntsberger, H. Aghazarian, A. Howard, and D. C. Trotz, "Stereo vision based navigation for autonomous surface vessels," *Journal of Field Robotics*, vol. 28, no. 1, pp. 3-18, 2011.
- [10] J. Woo and N. Kim, "Vision-Based obstacle collision risk estimation of an unmanned surface vehicle," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 21, no. 12, pp. 1089-1099, Nov. 2015.

- [11] J. Park, J. Kim, and N. S. Son, "Passive target tracking of marine traffic ships using onboard monocular camera for unmanned surface vessel," *Electronics Letters*, vol. 51, no. 13, pp. 987-989, 2015.
- [12] O. Gal, "Automatic obstacle detection for USV's navigation using vision sensors," *Proc. of the 4th International Robotic Sailing Conference*, vol. 79, pp. 127- 140, 2011.
- [13] H. Wang and Z. Wei, "Stereo vision based obstacle detection system for unmanned surface vehicle," *Proc. of in Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2013 IEEE International Conference on. IEEE*, pp. 917-921, Dec. 2013.
- [14] Y. Kuwata, M. T. Wolf, D. Zarzhitsky, and T. Huntsberger, "Safe maritime autonomous navigation with COLREGS, using velocity obstacles," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 39, no. 1, pp. 110-119, 2013.
- [15] E. Rosten and T. Drummond, "Machine learning for high-speed corner detection," *Proc. of European Conference on Computer Vision (ECCV)*, pp. 430-443, May 2006.
- [16] J. Matas, O. Chum, M. Urban, and T. Pajdla, "Robust wide-baseline stereo from maximally stable extremal regions," *Image and Vision Computing*, vol. 22, no. 10, pp. 761-767, Sept. 2004.
- [17] J. Han, J. Kim, and N. S. Son, "Autonomous obstacle detection using a 3D lidar for unmanned surface vehicles," *Annual Spring Meeting of the Society of Naval Architects of Korea (in Korean)*, pp. 501-504, May. 2014.
- [18] P. Shar and X. R. Li, "Practical approach to observability of bearings only target tracking," *SPIE's International Symposium on Optical Science, Engineering, and Instrumentation*, pp. 514-520, 1999.



박 정 홍

2005년 충남대학교 메카트로닉스공학과 졸업. 2007년 동 대학원 석사. 2016년 한국과학기술원 기계공학과 공학박사. 현재 한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 선임연구원. 관심분야는 해양로봇의 자율운항 및 영상기반 센서융합기술.



한 정 옥

2009년 아주대학교 기계공학과 졸업. 2013년 한국과학기술원 해양시스템공학전공 석사. 현재 동 대학원 박사과정. 관심분야는 해양로봇의 SLAM, 3차원 형상복원, 센서융합기술.



김 진 환

1993년 서울대학교 조선해양공학과 졸업. 1995년 동 대학원 석사. 2007년 스탠포드대학교 항공우주공학과 공학박사. 현재 한국과학기술원 기계공학과 교수. 관심분야는 해양로봇의 항법, 자율운항기술.



손 남 선

2001년 서울대학교 조선해양공학과 대학원 석사. 2009년 일본 큐슈대학교 공학박사. 현재 한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 선임연구원. 관심분야는 무인수상선의 자율운항, 선박 충돌 회피.



김 선 영

1993년 일본 히로시마대학교 공학박사. 현재 한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 책임연구원. 관심분야는 무인수상선 개발 및 조종성능 분석.