

무인잠수정의 도킹 과정 평가를 위한 확률 기반 평가지표 개발

Development of Probability-Based Assessment Index for Docking Process Assessment

천승재¹ · 김준영² · 최중락³ · 정성훈³ · 김중화^{4*}

¹한국해양대학교 대학원 제어계측공학과

²한국해양대학교 해양신소재융합공학과

³한국해양대학교 산업기술연구소

⁴한국해양대학교 제어자동화공학과

Seung-jae Chon¹ · Joon-young Kim² · Joong-lak Choi³ · Seong-hoon Jeong³ · Jong-hwa Kim^{4*}

¹Department of Control and Instrumentation Engineering, Graduate School, Korea Maritime and Ocean University (KMOU), Busan 49112, Korea

²Department of Ocean Advanced Materials Convergence Engineering, KMOU, Busan 49112, Korea

³Research Institute of Industrial Technology, KMOU, Busan 49112, Korea

⁴Division of Control and Automation Engineering, KMOU, Busan 49112, Korea

[요 약]

본 논문은 무인잠수정을 도킹스테이션에 성공적으로 안전하게 도킹시키기 위해 확률 기반 평가지표를 설계하여 수중 도킹 과정을 평가하는 방법을 제안한다. 제안하는 방법은 무인잠수정 상태와 수중 도킹을 위한 상태 기준의 일치 정도에 따른 도킹 성공 가능성을 확률로써 평가하는 방법이다. 평가는 무인잠수정의 기구학적 구속조건과 도킹 계획을 고려해 정의된 영역 내부에서 수행한다. 평가 과정은 확률밀도함수의 정의, 위치와 방향각 기준과의 차이에 따른 도킹스테이션 도달확률 계산, 확률지표의 산출 순서이며, 이를 통해 실시간으로 수중 도킹 과정을 평가한다. 수조실험을 통해 획득한 무인잠수정 데이터를 분석하여 제안하는 평가 지표의 유효성을 검토하였다.

[Abstract]

This paper proposes an assessment method using probability-based index for safe and successful underwater docking of autonomous underwater vehicles(AUVs) to the docking stations(DSs). The proposed method assesses the probability of docking according to the degree to which the state of the AUV is consistent with the state criteria for docking. The assessment is performed within a specific area considering the kinematic constraints and docking plans of the AUV. The assessment process is defining probability density function, calculating probabilities for reaching the docking station according to the difference to position and heading criteria, and computing the probability-based index in real-time. We verify the validity of the proposed method through analyzing the data acquired on operation test.

Key word : Autonomous underwater vehicle, Docking process assessment, Docking station, Underwater docking.

<https://doi.org/10.12673/jant.2021.25.3.177>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 15 April; Revised 31 May 2021

Accepted (Publication) 28 June (30 June 2021)

*Corresponding Author; Jong-hwa Kim

Tel: +82-051-410-4343

E-mail: kimjh@kmou.ac.kr

1. 서 론

인간이 접근하기 힘든 수중 환경에서 자유롭게 이동하며 임무를 수행할 수 있는 무인잠수정(AUV; autonomous underwater vehicle)은 연구 분야에서는 환경 데이터 수집, 해저 조사 등의 용도로, 민간 분야에서는 수중 건설, 수색 및 구조 등의 용도로, 군사 분야에서는 감시 및 정찰 등의 용도로 다양한 분야에서 그 응용 가치를 인정받고 있으며 관련 연구가 꾸준히 진행되고 있다[1],[2]. 하지만 현재까지 무인잠수정은 배터리 용량의 제약을 받으며, 이로 인해 일정 시간 운용 후 회수하여 배터리 교체 및 충전, 혹은 수중에서의 전도성 충전 과정을 거친 후 임무에 재투입되는데 이는 지속적인 시간과 비용 소모를 발생시킨다[3].

도킹스테이션은 무인잠수정의 임무 지역 부근에 설치되어 임무 재배치 과정으로 인해 발생하는 시간 지연을 단축하게 하며 무인잠수정의 연속적인 임무 수행을 가능하게 함으로써 운용 효율을 극대화한다. 이에 따라 무인잠수정을 도킹스테이션에 안전하게 도킹하기 위해 수중 도킹 기술을 필요로 한다. 국내의 연구를 보면, 무인잠수정을 도킹스테이션 중심으로 유도하기 위해 도킹스테이션 입구 영역을 퍼지 규칙에 따라 분할하고 이에 따른 중심으로의 유도에 관한 연구[4], 도킹스테이션 입구를 기준으로 포텐셜 필드를 정의하고 이에 따른 중심으로의 유도에 관한 연구[5], 도킹스테이션에 설치한 광원들을 통한 도킹스테이션의 중심 위치 추정에 관한 연구[6], 도킹스테이션에 설치한 EM 발신기에서 발생시키는 전자기장을 수신하여 세기와 위상차 분석을 통한 현재 위치 추정에 관한 연구[7], 카메라의 도킹스테이션 입구 주변에 규칙에 따라 부착된 검출점 인식식을 통한 자세 추정에 관한 연구[8], 확장 칼만 필터를 통해 관성 항법 센서와 도킹 유도 센서를 융합한 무인잠수정의 자세 추정에 관한 연구[9][10], 무인잠수정을 도킹스테이션에 성공적으로 도킹하기 위해 수중 도킹의 단계별 구분과 그에 따른 제어에 관한 연구[11], 무인잠수정의 전방과 후방 축 사이의 각도가 도킹스테이션의 방향각과 일치하게 도킹하기 위한 연구[12] 등의 도킹 전략에 관한 연구들이 수행되었으며 이외에도 수중 도킹 기술에 관한 연구들이 활발히 이뤄지고 있다.

한편, 수중 환경은 조류, 해류 등의 환경 외란으로 인해 도킹 시도 중 뜻하지 않은 상황이 발생할 수 있어서 도킹 과정을 평가할 필요가 있다. 도킹스테이션에 도달할 수 있는 지점을 역으로 분석한 결과와 현재 위치에서부터 도달할 수 있는 지점을 분석한 결과의 비교를 통해 가도 달성을 확인하는 방법에 관한 연구[13], 무인잠수정의 항법 정보와 무인잠수정에 탑재된 도킹 유도 센서들의 오차 성능을 이용한 도킹 성공확률을 계산하는 연구[14],[15]가 이뤄진 바 있지만, 도킹 과정 평가에 관한 연구는 도킹 유도에 관한 연구나 도킹 전략에 관한 연구들에 비해 많이 이뤄지지 않고 있다.

본 논문은, 개발 중인 수중 도킹 기술의 일부본인, 무인잠수정의 항법 정보와 도킹스테이션의 정보를 이용해 도킹 과정의 평가 기준이 될 수 있는 도킹 성공확률을 계산하는 확률 기반의

알고리즘을 제안한다. 2장에서는 도킹 성공확률을 계산할 확률 계산영역과 확률계산에 사용될 확률밀도함수를 정의하고 이를 이용한 확률계산 방법을 설명한다. 3장에서는 수조 시험을 통해 획득한 데이터 로그를 분석함으로써 제안하는 방법의 성능과 타당성을 확인하며 4장에서는 결론을 제시한다.

II. 도킹 성공확률 계산

본 논문이 제안하는 방법에선 무인잠수정이 도킹스테이션과 같은 심도에서 일정한 속도로 도킹스테이션에 접근함을 가정하며, 도킹의 성공은 무인잠수정이 도킹스테이션의 위치에 도달하는 것으로 가정한다. 한편, 무인잠수정의 위치와 방향각은 서로 독립적인 관계이므로 도킹 성공확률 (PD; probability of docking)은 위치에 따른 도킹스테이션 도달확률 (PRP; probability of reaching based on position)과 방향각에 따른 도킹스테이션 도달확률 (PRH; probability of reaching based on heading)을 계산한 후 최종적으로 앞에서 계산한 결과들을 이용해 산출한다.

2-1 확률계산영역

무인잠수정의 PRP, PRH, 그리고 PD를 계산할 확률계산영역(PCA; probability computation area)을 다음과 같은 세 가지 조건에 의해 정의되는 영역들로 둘러싸인 영역으로 정의한다. 첫 번째, PCA는 도킹스테이션의 위치를 중심으로 하는 원에 속한다. 무인잠수정이 도킹스테이션으로부터 일정 거리 이내로 접근했을 때 확률이 계산이 이뤄져 무인잠수정의 운용 과정에서 메모리 부족 현상이 발생하지 않도록 하기 위함이다. 두 번째, PCA는 도킹스테이션의 방향각을 기준으로 양측에 접하는, 반지름이 무인잠수정의 최소선회반경인, 원 밖에 속한다. 여기서 최소선회반경은 무인잠수정이 일정한 속도를 유지한 채 최대 각 속도로 선회를 유지할 때 나타나는 원 궤적의 반지름으로, 무인잠수정이 도킹스테이션의 측면에서 선회하며 접근할 때 궤적의 반지름은 최소선회반경과 일치하거나 더 크기 때문이다. 세 번째, PCA는 도킹스테이션의 위치를 지나며 방향각에 수직인 직선이 도킹스테이션이 위치한 평면을 이등분할 때 도킹스테이션 입구 방향에 위치한다. 첫 번째 조건에서 정의되는 원의 반지름을 무인잠수정의 최소선회반경으로 정의한다면, 세 조건을 모두 충족하는 PCA는 그림 1과 같다.

2-2 도킹 성공확률

PRP는 앞에서 정의된 PCA의 상대 거리에 따른 중심을 기준으로 현재 위치에서 도킹스테이션에 도달할 수 있는 확률을 나타내고 중심에서 멀어질수록 확률이 감소하도록 정의한다. PRP의 계산에 사용할 확률밀도함수는 상대 거리에 따른 PCA의 폭에 대응하여 정의하며, 이때 확률밀도함수의 표준편차를

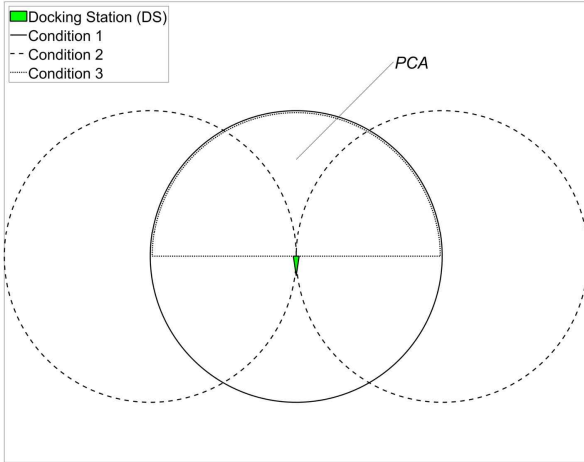


그림 1. 확률계산영역 정의
Fig. 1. Definition of the PCA

결정하는 과정은 아래와 같다. 식 (1)의 w_{PCA} 는 상대 거리에 따른 PCA의 폭을 의미하며 σ_{PRP} 는 정의되는 확률밀도함수의 표준편차이다. k_w 는 설계 파라미터로, 정규분포표를 참고하여 결정함으로써 그림 2와 같이 확률밀도함수의 신뢰구간과 그에 따른 PRP의 최소 확률을 표 1과 같이 결정할 수 있다. k_w 을 결정하여 식 2와 같이 σ_{PRP} 를 결정할 수 있다.

$$w_{PCA} = 2k_w \sigma_{PRP} \tag{1}$$

$$\sigma_{PRP} = \frac{w_{PCA}}{2k_w} \tag{2}$$

σ_{PRP} 을 이용해 PRP를 계산하는 과정은 아래와 같다. PCA를 정의하는 과정에서 도킹스테이션의 입구 넓이를 고려하지 않았기 때문에 확률 계산 과정에서 현재 위치를 기준으로 도킹스테이션 입구 범위 내의 함수 최댓값을 구한 후, 이를 정규화해 PRP를 산출한다. 식 3의 C_{PCA} 는 상대 거리에 따른 PCA의 중심을, d_r 은 C_{PCA} 에서 현재 무인잠수정까지의 거리를 의미하며 e 는 도킹스테이션의 입구 넓이이다.

$$pdf(d_r) = \frac{1}{\sigma_{PRP} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{((p_r + i) - C_{PCA})^2}{2\sigma_{PRP}^2}}, \left(-\frac{e}{2} \leq i \leq \frac{e}{2}\right) \tag{3}$$

$$PRP = \frac{\max(pdf(p_r))}{pdf(C_{PCA})} \times 100\% \tag{4}$$

PRH는 무인잠수정에서 도킹스테이션까지의 방향각을 기준으로 현재 방향각에 대해 도킹스테이션에 도달할 수 있는 확률을 나타내고 두 값의 차이가 클수록 확률이 감소하도록 정의한다. PRH의 계산에 사용될 확률밀도함수는 상대 거리에 따른 PCA 경계선에서 도킹스테이션까지의 방향각 범위에 대해 정의하며 이때 확률밀도함수의 표준편차를 결정하는 과정은 아

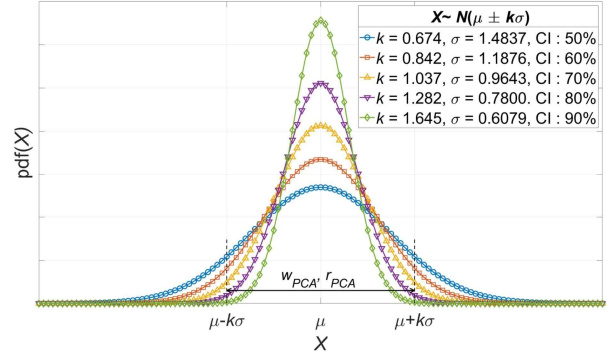


그림 2. 설계 파라미터 k에 따른 확률밀도함수 신뢰구간
Fig. 2. Confidence interval(CI) of the probability density function depending on the k

표 1. 확률밀도함수의 신뢰구간에 따른 최소 확률
Table 1. Minimum probabilities according to confidence interval(CI) of the probability density function.

CI	min(pdf(X)) (A)	max(pdf(X)) (B)	(A/B) × 100%
50%	0.1084	0.2689	40.3123
60%	0.0814	0.3359	24.2334
70%	0.0482	0.4137	11.6510
80%	0.0191	0.5114	3.7348
90%	0.0029	0.6563	0.4437

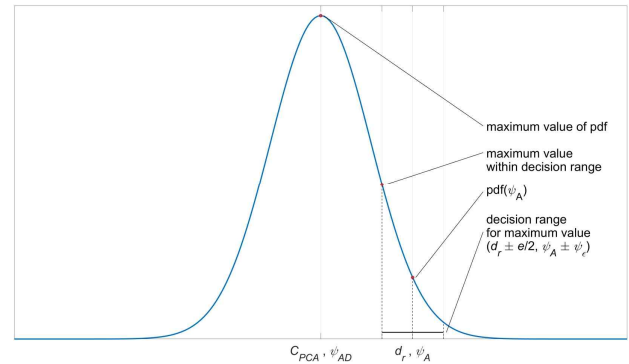


그림 3. 설계 파라미터 k에 따른 확률밀도함수 정의
Fig. 3. Definition of probability density function depending on the k

래와 같다. 식 (5)의 r_{PCA} 는 상대 거리에 따른 PCA 경계선에서 도킹스테이션까지의 방향각 범위, k_r 은 설계 파라미터, σ_{PRH} 는 정의되는 확률밀도함수의 표준편차이다.

$$r_{PCA} = 2k_r \sigma_{PRH} \tag{5}$$

$$\sigma_{PRH} = \frac{r_{PCA}}{2k_r} \tag{6}$$

σ_{PRH} 을 이용해 PRH를 계산하는 과정은 아래와 같다. 현재 무인잠수정의 방향각을 기준으로 선회를 통해 변화 가능한 방향각 범위 내의 함수 최댓값을 구한 후, 이를 정규화해 PRH를 산출한다. 식 (7)의 ψ_A 는 현재 무인잠수정의 방향각을, ψ_{AD} 는 무인잠수정에서 도킹스테이션까지의 방향각을 의미하며, ψ_ϵ 은 무인잠수정이 제어를 통해 최소 시간 단위 안에 변화 가능한 방향각의 크기이다.

$$pdf(\psi_A) = \frac{1}{\sigma_{PRH}\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{((\psi_A + i) - \psi_{AD})^2}{2\sigma_{PRH}^2}}, (-\psi_\epsilon \leq i \leq \psi_\epsilon) \quad (7)$$

$$PRH = \frac{\max(pdf(\psi_A))}{pdf(\psi_{AD})} \times 100\% \quad (8)$$

무인잠수정의 전체적인 도킹 과정을 평가할 PD는 앞에서 계산한 PRP와 PRH를 이용해 산출한다. PRP와 PRH는 서로 독립적인 확률이므로 PD는 두 확률을 곱하는 꼴로 나타내었으며, 두 확률을 곱함으로써 PD가 두 값보다 작아지지 않도록 제곱근을 취하도록 정의하였다.

$$PD = \sqrt{PRP \times PRH} \quad (9)$$

III. 실험 및 분석

제안하는 도킹 성공확률 계산 방법의 성능을 검증하기 위해 한국해양과학기술원 수중로봇복합실증센터에서 수조실험을 수행하였다. 실험을 위해 도킹스테이션을 설치하여 그 위치를 (0, 0)의 기준으로 설정해 무인잠수정의 위치가 도킹스테이션에 대한 상대 위치로 나타나도록 설정하였으며, 수조의 +Y축을 기준으로 도킹스테이션의 방향각이 -Y축과 일치하게 (180°) 설정하였다. 실험은 그림 4와 같이 무인잠수정의 방향각이 도킹스테이션과 일치한 상태로 수조에 설치된 대차에 고정된 후, 무인잠수정의 위치가 사전에 설정한 3개의 직선 경로와 일치하도록 대차를 이동하며 데이터 로고를 획득하는 방식으로 진행하였다. 세 경로에 대해 이동하며 획득한 무인잠수정의 위치 데이터는 그림 5와 같다.

(0, 30)에서 (0, 5)로 이동한 경로 1의 경우, 무인잠수정이 도킹스테이션과 마주 보며 PCA의 중심과 거의 일치하게 이동함에 따라 확률계산을 시작한 상대 거리 15m 지점부터 이동을 마친 5m 지점까지 PRP, PRH, 그리고 PD 모두 그림 6, 7, 8과 같이 100%에 근접한 값을 나타내는 것을 확인하였다. 한편, (-1, 30)에서 (-1, 5)로 이동하는 경로 2와 (-2, 30)에서 (-2, 5)로 이동하는 경로 3은 모두 PCA의 중심으로부터 편향된 이동 경로다. 그림 9, 10, 11, 그리고 그림 12, 13, 14에서 확률계산을 시작한 상대 거리 15m 지점에서는 두 경로에 대한 d_r 이 PRP, PRH, 그리고 PD에 미치는 영향이 작아 높은 확률을 보인다. 하지만 상대 거리가 감소할수록 무인잠수정의 위치가 점

차 PCA의 외곽에 가까워짐에 따라 d_r 이 확률에 미치는 영향이 증가하여 PRP, PRH, 그리고 PD 모두 감소함을 확인하였고, 경로 2와 경로 3 각각 상대 거리 5.5m 지점과 7.76m 지점 부근에서 PCA를 이탈하여 확률계산을 종료하며 0%의 확률을 나타내는 것을 확인하였다. 세 경로에 대한 확률계산 시작 시의 확률과 종료 시의 확률은 표 2, 3, 4와 같다. CPA의 경계선에 무인잠수정이 위치할 때 도킹의 성공과 실패의 경계에 있다고 판단한다면, 경로 2와 3의 확률밀도함수 신뢰구간이 80%일 경우 CPA 이탈 확률이 각각 55.1392%와 49.9797%임을 고려하여, 무인잠수정의 PD를 계산에 적절한 확률밀도함수 신뢰구간은 80% 이상으로 판단할 수 있다.

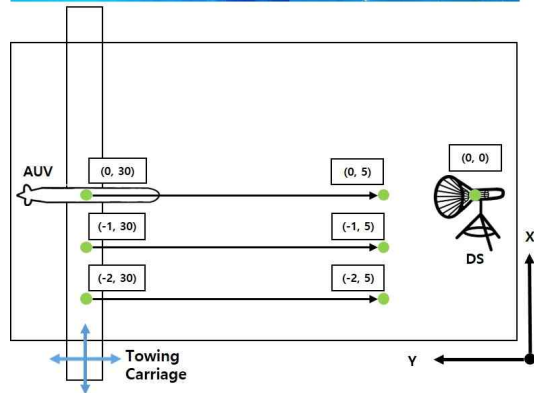
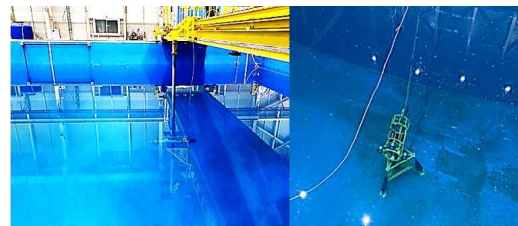


그림 4. 수조실험 환경 및 경로
Fig. 4. Experiment environment and path planning

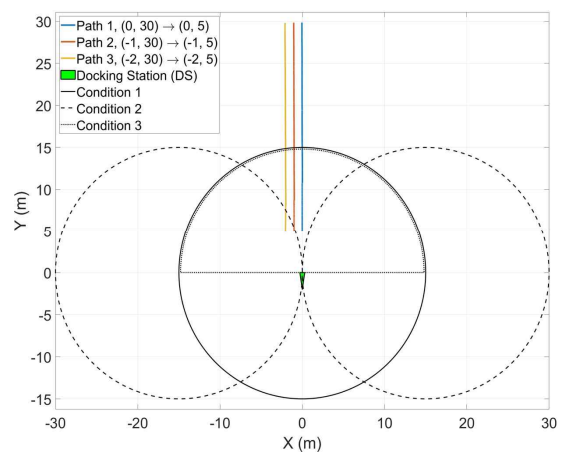


그림 5. 대차를 이동하여 획득한 무인잠수정의 위치 데이터
Fig. 5. Position data of the AUV acquired by moving towing carriage along the path

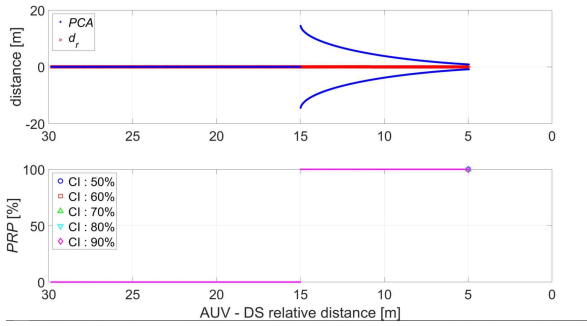


그림 6. d_r 과 그에 따른 PRP(경로 1)
 Fig. 6. PRP according to the d_r (path 1)

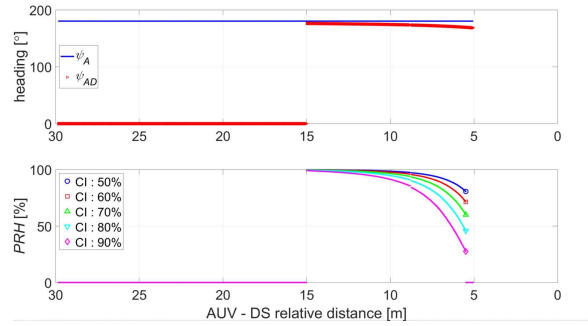


그림 10. ψ_{AD} 와 그에 따른 PRH(경로 2)
 Fig. 10. PRH according to the ψ_{AD} (path 2)

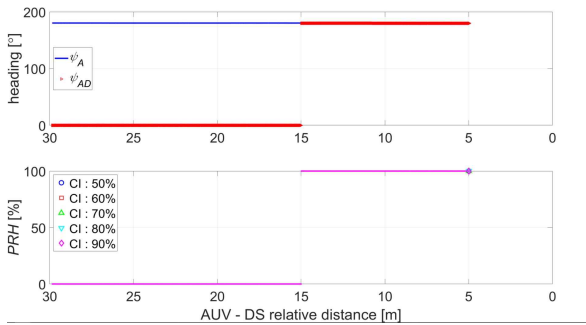


그림 7. ψ_{AD} 와 그에 따른 PRH(경로 1)
 Fig. 7. PRH according to the ψ_{AD} (path 1)

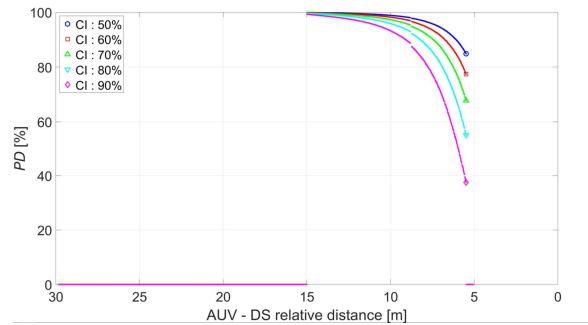


그림 11. PRP, PRH에 따른 PD(경로 2)
 Fig. 11. PD according to the PRP, PRH(path 2)

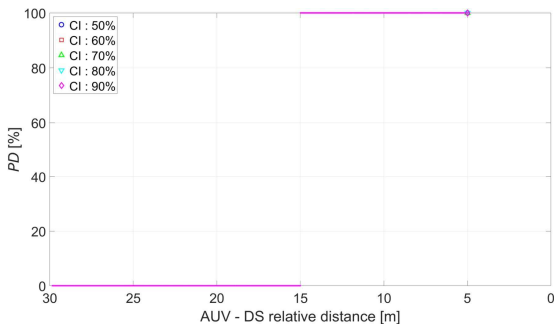


그림 8. PRP, PRH에 따른 PD(경로 1)
 Fig. 8. PD according to the PRP, PRH(path 1)

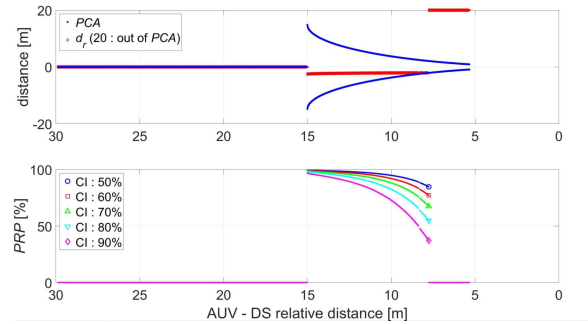


그림 12. d_r 과 그에 따른 PRP(경로 3)
 Fig. 12. PRP according to the d_r (path 3)

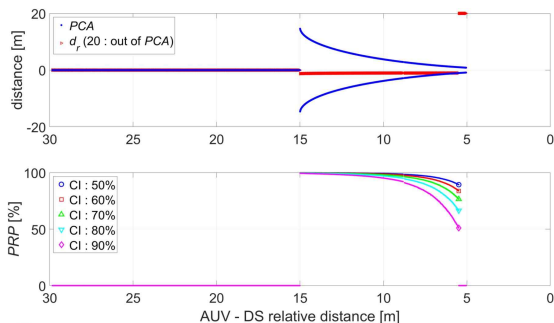


그림 9. d_r 과 그에 따른 PRP(경로 2)
 Fig. 9. PRP according to the d_r (path 2)

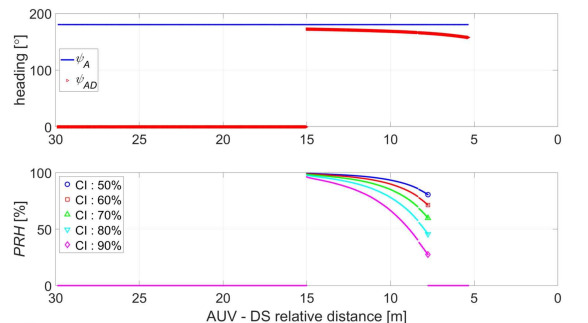


그림 13. ψ_{AD} 와 그에 따른 PRH(경로 3)
 Fig. 13. PRH according to the ψ_{AD} (path 3)

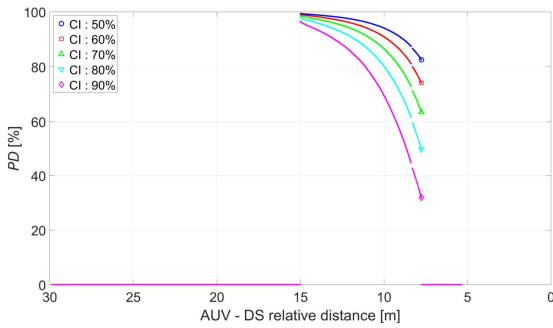


그림 14. PRP, PRH에 따른 PD(경로 3)
 Fig. 14. PD according to the PRP, PRH(path 3)

표 2. 경로 1의 PCA에서 획득한 도달확률 및 도킹 성공확률의 최댓값과 최솟값

Table 2. Maximum and minimum values of the PRP, PRH and PD acquired from PCA of path 1.

CI	50%	60%	70%	80%	90%
max(PRP)	100	100	100	100	100
max(PRH)	100	100	100	100	100
max(PD)	100	100	100	100	100
min(PRP)	100	100	100	100	100
min(PRH)	100	100	100	100	100
min(PD)	100	100	100	100	100

표 3. 경로 2의 PCA에서 획득한 도달확률 및 도킹 성공확률의 최댓값과 최솟값

Table 3. Maximum and minimum values of the PRP, PRH and PD acquired from PCA of path 2.

CI	50%	60%	70%	80%	90%
max(PRP)	99.9021	99.8473	99.7684	99.6463	99.4183
max(PRH)	99.8508	99.7673	99.6472	99.4614	99.1147
max(PD)	99.8765	99.8073	99.7078	99.5538	99.2664
min(PRP)	89.3100	83.8248	76.5191	66.4296	50.9944
min(PRH)	80.5707	71.3799	59.9655	45.7677	27.6133
min(PD)	84.8279	77.3525	67.7385	55.1392	37.5250

표 4. 경로 3의 PCA에서 획득한 도달확률 및 도킹 성공확률의 최댓값과 최솟값

Table 4. Maximum and minimum values of the PRP, PRH and PD acquired from PCA of path 3.

CI	50%	60%	70%	80%	90%
max(PRP)	99.4644	99.1653	98.7367	98.0757	96.8514
max(PRH)	99.3690	99.0170	98.5128	97.7360	96.2998
max(PD)	99.4167	99.0912	98.6247	97.9057	96.5752
min(PRP)	84.6873	77.1525	67.4730	54.8092	37.1560
min(PRH)	80.4772	71.2506	59.8008	45.5757	27.4228
min(PD)	82.5554	74.1428	63.5212	49.9797	31.9205

IV. 결 론

본 논문은 무인잠수정이 도킹스테이션으로 안전하고 성공적으로 도킹하기 위해 도킹 과정의 평가지표가 될 수 있는 도킹 성공확률을 계산하는 알고리즘을 제안하고 실험을 통해 타당성을 검증하였다. 그 결과는 다음과 같다.

(1) 무인잠수정의 최소선회반경을 고려한 확률계산영역을 정의함.

(2) 무인잠수정과 도킹스테이션의 상대 거리에 따른 확률계산영역 정보를 이용해 확률밀도함수를 정의함.

(3) 정의된 확률밀도함수를 이용해 위치 및 방향각에 따른 도킹스테이션 도달확률, 그리고 두 확률을 이용해 도킹 성공확률을 계산하는 방법을 정의함.

(4) 수조 환경에서 무인잠수정 운용을 통해 얻은 데이터 로그를 분석하여 제안하는 알고리즘의 성능과 유효성을 검증함.

향후 실해역에서 실험을 통해 얻은 데이터를 누적하여 제안하는 방법을 통해 계산한 도킹 성공확률의 타당성을 검증하고 이를 기반으로 무인잠수정이 도킹을 시도할 확률 기준을 결정할 것이며, 환경 변수들이 무인잠수정에 미치는 영향을 반영하여 제안하는 평가 방법의 실효성을 제고할 것이다.

Acknowledgments

이 연구는 산업통상자원부와 방위사업청의 재원으로 민군협력진흥원 및 국방과학기술원의 지원을 받아 수행된 연구임 (민군융용기술개발사업 다중센서를 이용한 무인잠수정의 도킹 기술 개발, 17-CM-RB-16).

References

[1] D. Li, P. Wang, and L. Du, "Path planning technologies for autonomous underwater vehicles-a review," *IEEE Access*, Vol. 7, pp. 9745-9768, Jan. 2019.

[2] P. Chen, Y. Li, Y. Su, X. Chen, and Y. Jiang, "Review of AUV underwater terrain matching navigation," *The Journal of Navigation*, Vol. 68, No. 6, pp. 1155-1172, Nov. 2015.

[3] T. Kan, R. Mai, P. P. Mercier, and C. C. Mi, "Design and analysis of a three-phase wireless charging system for lightweight autonomous underwater vehicles," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 33, No. 8, pp. 6622-6632, Aug. 2018.

[4] K. Teo, B. Goh, and O. K. Chai, "Fuzzy docking guidance using augmented navigation system on an AUV," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 40, No. 2, Apr.

- 2015.
- [5] J. H. Woo and N. W. Kim, "Design of guidance law for docking of unmanned surface vehicle," *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 30, No. 3, pp. 208-213, Jun. 2016.
- [6] D. H. Choi, B. H. Jun, P. M. Lee, S. H. Kim, and G. N. Lim, "Study on the docking algorithm for underwater-docking of an AUV using visual guidance device," *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 21, No. 3, pp. 33-39, Jun. 2007.
- [7] G. H. Lee and J. H. Kim, "Docking system for unmanned underwater vehicle using reduced signal strength indicator," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, Vol. 18, No. 9, pp. 830-836, Sep. 2012.
- [8] M. F. Yahya and M. R. Arshad, "Position-based visual servoing for underwater docking of an autonomous underwater vehicle," in *2016 IEEE 6th International Conference on Underwater System Technology: Theory & Applications*, pp. 121-126, 2016.
- [9] G. H. Kim, J. H. Lee, P. Y. Lee, H. S. Kim, and H. S. Lee, "A study on docking guidance navigation algorithm of AUV by combining inertial navigation sensor and docking guidance sensor," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, Vol. 25, No. 7, pp. 647-656, Jul. 2019.
- [10] T. S. Yoo, M. H. Kim, S. I. Yoon, and D. J. Kim, "Design of tightly coupled INS/DVL/RPM integrated navigation system," *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 33, No. 5, pp. 470-478, Oct. 2019.
- [11] R. S. McEwen, B. W. Hobson, L. McBride, and J. G. Bellingham, "Docking control system for a 54-cm-diameter (21-in) AUV," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 33, No. 4, pp. 550-562, Oct. 2008.
- [12] A. Sans-Muntadas, K. Y. Pettersen, E. Brekke, and V. F. Henriksen, "A hybrid approach to underwater docking of AUVs with cross-current," in *OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey*, pp. 1-7, 2016.
- [13] J. W. Park, J. W. Kim, "Autonomous docking of an unmanned surface vehicle based on reachability analysis," in *2020 20th International Conference on Control, Automation and Systems*, pp. 962-966, 2020.
- [14] A. Sans-Muntadas, E. F. Brekke, Ø. Hegrenæs, and K. Y. Pettersen, "Navigation and probability assessment for successful AUV docking using USBL," *IFAC-PapersOnLine*, Vol. 48, No. 16, pp. 204-209, 2015.
- [15] S. J. Chon, J. N. Sur, and S. H. Jeong, "Docking assessment algorithm for AUVs with uncertainties," *Journal of Advanced Navigation Technology*, Vol. 23, No. 5, pp. 352-360, Oct. 2019.



천 승 재 (Seung-Jae Chon)

2018년 2월 : 한국해양대학교 제어계측공학 (공학석사)
 2018년 2월 ~ 현재 : 한국해양대학교 제어계측공학과 박사과정
 ※관심분야 : 지능로봇시스템, 수중도킹시스템, 무인잠수정



김 준 영 (Joon-Young Kim)

1993년 2월 : 인하대학교 조선해양공학 (공학석사)
 1999년 8월 : 한양대학교 정밀기계공학 (공학박사)
 2005년 4월 ~ 2011년 2월: 제주대학교 해양시스템공학과 교수
 2011년 3월 ~ 현재 : 한국해양대학교 해양신소재융합공학과 교수
 ※관심분야 : 선체운동모델링 및 동역학 해석, 무인잠수정 설계 및 제어



최 중 락 (Joong-Lak Choi)

1987년 2월 : 서울대학교 제어계측공학 (공학석사)
 1997년 2월 : 부산대학교 전기공학 (공학박사)
 1978년 ~ 2017년 : 국방과학연구소 연구원
 2017년 ~ 2021년 : 한국해양대학교 초빙교수
 2021년 3월 ~ 현재 : 한국해양대학교 전문위원
 ※관심분야 : 지능제어, 해양로봇



정 성 훈 (Seong-Hoon Jeong)

2004년 2월 : 한국해양대학교 전자통신공학 (공학석사)
2007년 2월 : 한국해양대학교 전자통신공학 (공학박사)
2003년 ~ 2010년 : 부산경상대학교 멀티미디어컴퓨터과 교수
2010년 ~ 현재 : 한국해양대학교 산업기술연구소 산학연구교수
※ 관심분야 : 해양 무인화 시스템, 해양 IoT, 해상통신, ICT 융·복합 기술



김 종 화 (Jong-Hwa Kim)

1985년 8월 : 부산대학교 기계공학 (공학석사)
1989년 8월 : 부산대학교 기계공학 (공학박사)
1990년 ~ 2001년 : 한국해양대학교 제어계측공학과 부교수
2001년 4월 ~ 현재 : 한국해양대학교 제어자동화공학부 교수
※ 관심분야 : 지능로봇시스템, 원격제어 및 모니터링시스템