

RAVEN 을 이용한 북극항로 선박 운항 관리를 위한 ICT 시스템 개발에 관한 연구

류시명¹, 김동완², 심다솔³, 양병호⁴, 전찬혁⁵

¹경희대학교 응용물리학과 학부생

²경희대학교 산업경영공학과 학부생

³경희대학교 산업경영공학과 학부생

⁴경희대학교 전자공학과 학부생

⁵한국정보산업연합회 연구원

simy1025@khu.ac.kr, tomo2398@khu.ac.kr, dasolshimkh@khu.ac.kr, yangbw11134@khu.ac.kr, jeonch@fkii.org

A Study on the Development of ICT System for the Operation Management of Arctic Ocean Vessels Using RAVEN

Si-Myeong Ryu¹, Dong-Wan Kim², Da-Sol Sim³, Byeong-Ho Yang⁴, Chan-Hyuk Jeon⁵

¹Dept. of Applied Physics, Kyung-Hee University

²Dept. of Industrial & Management Engineering, Kyung-Hee University

³Dept. of Industrial & Management Engineering, Kyung-Hee University

⁴Dept. of Electronic Engineering, Kyung-Hee University

⁵Researcher, The Federation of Korean Information Industries

요 약

북극 항로의 상업 운항이 현실화되면서 해빙과 기상의 급격한 변동성은 기존 방식의 항로 선택 시의 위험을 구조적으로 높이고 있다. 본 논문은 관측-예측-의사결정을 하나의 파이프라인으로 통합하기 위해, RAVEN의 시간의존 불확실성 정량화 기능(HistorySet, HistorySetSync, 표본화, 시간별 통계·민감도)을 핵심 분석 엔진으로 채택하고, 그 위에 가중 그래프 탐색과 강화학습 기반 경로탐색 등을 결합한 정보통신기술(ICT) 시스템을 제안한다. 시뮬레이션과 관측의 두 부분에서 제공되는 데이터는 지속적인 시스템의 개선을 위한 기반이 된다. 위성 SAR 딥러닝 분류, 해빙-해양 결합모델, AIS·선박 자율센서(SSICR)로부터 수집되는 시공간 데이터를 표준 시계열 구조로 정리한 뒤, 확률적 제약(ETA·연료·안전)을 만족하는 경로를 산출한다. 모든 과정에서 산출되는 데이터는 기계학습 모델의 학습 데이터로 이용되어 Surrogate model 생성의 기초가 된다.

1. 서론

최근 수십 년간의 기후변화는 계절적 해빙 개방성을 확대하여 북극항로의 항해시간 단축 가능성을 현실적인 대안으로 부상시켰다. 그러나 해빙 농도와 두께, 빙편 크기, 바람과 파랑, 해류 등의 환경 요인은 시간과 공간에 따라 비정상적으로 변화하며, 작은 편(bias)과 지연된 관측만으로도 경로 선택은 크게 왜곡될 수 있다. 기존 항로계획은 정적 비용함수를 이용하거나 단일 예측장에 의존하는 경우가 많아, 시간의존 불확실성과 관측오차를 동시 반영하는 체계적 접근이 제한적이었다.

본 연구는 이러한 한계를 해결하기 위해 데이터-분석-의사결정의 각 계층을 정합시키는 ICT 아키텍처를

제안한다. 데이터 계층에서는 SAR 기반 해빙 분류, 해빙-해양 결합모델 생산장, AIS 와 SSICR 센서를 취합하여 표준화된 시계열 자료로 축적한다. 분석 계층에서는 RAVEN 을 활용해 상이한 해상도의 시간축을 정렬하고, 몬테카를로 또는 라틴 하이퍼큐브 표본화를 통해 시간의존 시나리오 집합을 생성하며, 시각별 평균·분산과 민감도를 평가한다. 의사결정 계층에서는 확률적 제약을 포함하는 비용함수를 정의하고, 그래프 탐색 또는 강화학습을 통해 다목적 + 리스크 균형을 이루는 경로를 산출한다. 이와 같은 계층적 설계는 실제 운항지원 시스템에 요구되는 재현성, 설명가능성, 대체경로 확보라는 운영적 요구를 동시에 만족시킨다.

2. 관련연구

해빙 연계 항로계산은 해빙-해양 결합모델(예: ROMS)에서 생산된 해빙 농도·두께·빙력과 대기·파랑장을 격자화하여, 각 간선에 시간의존 비용을 부여하는 방식으로 발전해 왔다. Dijkstra 또는 A* 알고리즘이 주로 사용되며, 격자 해상도와 경계조건(ETOPO, HYCOM/NCODA, ERA 재분석)의 선택이 경로 민감도에 유의미한 영향을 미친다는 점이 거듭 보고되었다. 딥러닝과 강화학습을 결합한 최근의 흐름에서는 SAR 영상으로부터 U-Net 계열의 분류기로 빙·수역을 추정하고, 이를 보상설계에 반영하여 온라인으로 최적 경로를 갱신하는 사례가 제시되었다. 이러한 접근은 관측 지연과 분류오차라는 현실적 제약 하에서도 정책의 강건성을 높일 수 있음을 보여준다. 더불어 선박성능모델과 얼음 항로 알고리즘을 개관한 리뷰들은 POLARIS 등 안전지표의 운용 방식, 파랑-유빙-선박 상호작용 모델의 정확도-계산비용 트레이드오프를 체계적으로 정리하며, CMIP6 기반 항행가능성 추정의 과소/과대평가 문제를 지적한다.

3. ICT 아키텍처와 데이터 표준화

제안하는 프레임워크는 관측-예측-결정을 관통하는 데이터-투-디지전 흐름을 갖는다. 먼저 센싱 단계에서 SAR(U-Net 분류 결과), 해빙-해양 예측장, AIS 항적, SSICR 관측이 수집되며, 데이터 레이크에서는 좌표계와 격자, 시간해상도를 통일하고 품질관리와 메타데이터 버전 관리를 수행한다. 분석 단계에서 핵심은 RAVEN의 HistorySet과 HistorySetSync이다. 입력(환경상태와 제어)과 출력(시간별 이동시간·연료·안전지표)을 하나의 시계열 사전으로 저장하고, 서로 다른 자료원의 시간축을 정렬해 공통 시간축으로 변환한다. 이후 표본화로 생성된 시나리오들에 대해 시각별 평균·분산과 민감도가 계산되며, 제약을 만족할 확률을 조건부로 추정하여 성공확률 맵을 만든다. 최종 의사결정 단계에서는 확률적 제약을 비용함수에 통합한 그래프 탐색으로 기본 경로를 선정하고, 필요 시 강화학습을 통해 지연·누락 관측 상황에서도 안정적으로 작동하는 정책을 학습한다. 이러한 일련의 과정은 결과를 파레토 전선과 리스크 기여도 분해로 시각화하여 설명가능성과 운영 투명성을 높인다.

4. 방법론: 시간의존 UQ와 확률제약 경로탐색

시간의존 불확실성 정량화는 환경 파라미터 벡터(해빙 농도와 두께, 유빙지표, 풍속, 유의파고, 해류)를 다변량 확률과정으로 모델링하는 데서 출발한다. RAVEN의 몬테카를로나 라틴 하이퍼큐브 샘플러를 통해 시간상관을 가진 시나리오 집합을 생성하고, 각 시점에 대해 출력 변수의 평균과 분산을 평가한다. 분산기여를 이용한 민감도 분석은 구간별로 어떤 요인이 시간 손실과 연료 초과, 안전지표 악화를 주도하는지 진단하도록 한다. 그 결과는 확률적 제약을 포함하는 비용함수로 흡수된다. 본 연구에서의 간선 비용은 시간·연료·위험의 가중합으로 구성되며, 운영

목적에 따라 가중치는 조정 가능하다. ETA, 연료한도, 안전임계에 대해서는 지정된 신뢰수준 이상으로 제약을 만족해야 하며, 경로탐색은 기대비용 또는 분위수 기반의 강건 비용을 사용해 결정된다. 강화학습을 도입하는 경우 상태는 환경 상태이고 행동은 침로와 속력이며, 보상은 음의 비용으로 정의된다. 학습 안정화를 위해 위험 패널티 스케일링과 커리큘럼 설계를 적용하며, 분포강화학습을 통해 Tail-risk에 민감한 정책을 마련한다.

5. 랜덤 생성 시뮬레이션 예시

본 프레임워크의 본래 목적을 달성하기 위해서는 csv 실테이터를 시뮬레이션과 학습에 활용해야 하지만, 현실용 변수를 생성할 수도 있다. 시뮬레이션은 3번 진행하였으며, 40 세대/440 limits 기준의 유전알고리즘 기반 raven 시뮬레이션을 통한 분기점을 추출하였다. 아래는 사용한 연료와 무차원 변수 위험 간의 관계를 나타낸 계산 1개 결과의 그래프이다.

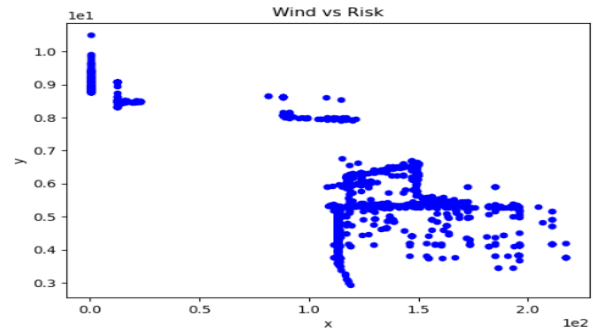


그림 1.) x 축은 소모연료, y 축은 무차원 위험도이다. 빙상이 두꺼운 운항 불가 지역을 지나는 경우 위험도가 높게 계산되어 분기점 도출에서 탈락하는 경로군이 될 것임을 예상할 수 있다.

6. 결론

본 논문은 RAVEN의 시간의존 불확실성 정량화 기능을 북극 해역 항로계획에 결합하여, ETA·연료·안전 제약을 확률적으로 보장하는 ICT 융합 의사결정 프레임워크를 제시하였다. 향후 연구에서는 SSICR/AIS 융합 데이터를 이용한 선박 성능 보정, 파랑-유빙-선박 상호작용의 경량 고충실도 모델 통합, 다목표·확률제약 최적화의 내재화를 통해 완전 자동화된 실시간 운항지원으로의 확장을 추진할 것이다.

(사사문구) 본 논문은 해양수산부 스마트 해운물류 융합인재 및 기업지원(스마트해운물류 x ICT 멘토링)을 통해 수행한 ICT 멘토링 프로젝트 결과물입니다.

참고문헌

- [1] Akihisa Konno 외, Sustainable arctic sea routes in a rapidly changing environment, Polar Science, 2025
- [2] Jong-Ho Nam 외, Simulation of optimal arctic routes using a numerical sea ice model based on an ice-coupled ocean circulation method, Int. J. Naval Archit. Ocean Eng, 5:210-226, 2013
- [3] Adan Wu 외, Routeview: an intelligent route planning system for ships sailing through Arctic ice zones based on big Earth data, International Journal of Digital Earth, VOL. 15, NO. 1, 1588-1613, 2022
- [4] Quanhong Liu 외, Arctic weather routing: a review of ship performance models and ice routing algorithms, Sec. Marine Affairs and Policy, Volume 10, 2023