

선회각 정보를 반영한 이산 칼만 필터 기반 연해 내 선박 실시간 위치 추정

신영하*

*씨드로닉스 연구원

Real-time Position Estimation of Ships in Coast Area Based on Discrete Kalman Filter Reflecting Turning Angle Information

Yeong-Ha Shin*

*Researcher, Seadronix Corp, Seoul, Korea

요 약 : 선박의 항적 및 선박 간 충돌 가능성을 평가하기 위해 선박자동식별시스템(AIS)이 중요하게 활용되고 있다. 하지만 전송 주기에 대한 한계로 인해 실시간 정보 제공이 어렵다. 이를 개선하기 위한 대부분의 연구는 이상적인 데이터를 기반으로 진행되어, 실제 상황에 대응하기 어려운 문제가 있다. 따라서 본 논문에서는 실상황에서의 실시간 정보 제공을 위해서, 항적의 유형에 따라 선회각을 반영한 이산 칼만 필터 기반 위치 추정 방법을 제안한다. 또, 실제 데이터를 사용한 실험을 통해서 제안 알고리즘에 대한 정확도 평가를 진행한다.

핵심용어 : 선박자동식별시스템(AIS), 이산 칼만 필터, 선회각

Abstract : The Automatic Ship Identification System(AIS) is importantly used to evaluate the trajectory of ships and the possibility of collision between ships. However, it is difficult to provide real-time information due to the limitation of the transmission intervals. Most of the studies to improve this are conducted based on ideal data, so there is a problem that it is hard to respond to the actual situation. Therefore, in this paper, we propose a discrete Kalman filter-based method that reflects the turning angle according to the type of trajectory, to provide real-time position information on real-time data. In addition, the accuracy evaluation of the proposed algorithm is conducted through experiments using actual data.

Key words : Automatic Ship Identification System(AIS), Discrete Kalman Filter, Turning Angle

1. 서 론

선박 간 충돌 가능성을 평가하기 위해서는 선박의 정보가 실시간으로 제공되어야 한다. 이를 위해 선박에는 레이더, 선박자동식별시스템(AIS), 전자해도 정보시스템과 같은 항해 장비가 탑재되어 있다. 이 중에서도 선박자동식별시스템은 기상 악화와 같은 외부 환경 변화에 대한 수신 감도 변화가 작고, 선박자동식별시스템 기기가 탑재되어 있다면 소형 물체라도 탐지가 가능하다는 장점이 있어, 널리 사용되고 있다. 선박자동식별시스템 정보는 크게 정적 정보, 항해 정보, 동적 정보로 구분되는데, Table 1에서처럼 동적 정보는 선박의 항해 상태와 속도에 따라서 전송 주기를 달리한다. (김, 2014, IEC 61993-2, 2001) 특히, 속도가 느릴수록 전송 주기의 간격은 길어진다. 선박의 속도는 항만 부근에서 상대적으로 낮게 분포하기 때문에 이러한 점은 선박의 안전 운항을 저해한다.

선박자동식별시스템 정보의 불연속성을 극복하기 위해서 다양한 연구가 진행되어왔다. 최근에는 무향 칼만 필터(Unscented Kalman Filter)를 사용하여 정보를 추정하고 충돌 회피를 진행하는 알고리즘이 제안되었다. (B. Cole, M.

Benjamin, S. Randeni, 2021) 그 외에도 장단기 메모리 방식(LSTM)이나 과거 항적 데이터 모델링 기반 추정과 같은 방법도 고안되었다. (F. Scholler, T. Enevoldsen, J. Becktor et al, 2021, E. Tu, G. Zhang, S. Mao et al. 2020) 반면, 해상 사고에 대한 대응이나 교통량의 파악을 위해 과거의 항적을 운동학적으로 보간하는 연구도 이뤄졌다. (S. Guo, J. Mou, L. Chen et al. 2021) 연해 내에는 많은 장애물과 지형이 존재하기 때문에, 원양 수역보다 선박의 이동 추이를 위치 정보 추정에 반영하는 것이 절대적으로 중요하다. 따라서 선회각과 같은 정보의 역할이 크다. 하지만, 실제 인천항, 울산항에서 약 2일 동안 자체적으로 수집한 정보와 “SPIRE”사에서 제공하는 남중국해에서 10일간 수집한 선박자동식별시스템 데이터(SPIRE, 2022년 04월 25일) 중, 선회각 값이 비어있는 값으로 수신된 경우는 Table 2에서 정리된 것처럼 50% 이상의 비율을 보였다. 그런데도, 대부분의 연구는 이상적인 정보를 기준으로 진행되었다. 따라서 이동 추이를 반영한 선박의 위치를 실시간으로 제공할 수 있는 알고리즘 개발이 필요하다.

Table 1 Class A AIS 동적 정보 전송 주기

선박의 동적 상태	전송 주기
투묘 중이거나 계류 중이며, 선속이 3노트 미만임	3분
투묘 중이거나 계류 중이며, 선속이 3노트 이상임	10초
선속이 0 - 14노트임	10초
선속이 0 - 14노트이며, 침로가 변화함	$3\frac{1}{3}$ 초
선속이 14 - 23노트임	6초
선속이 14 - 23노트이며, 침로가 변화함	2초
선속이 23노트 이상임	2초
선속이 23노트 이상이며, 침로가 변화함	2초

Table 2 수집 정보별 선회각의 정확도 비율

항만	인천항	울산항	남중국해
전체 정보[개]	497,324	607,407	1,048,576
부정확 정보 비율[%]	64.8	52.8	51.7

본 논문에서는 선회각 정보를 보정하고, 이산 칼만 필터를 기반으로 선박의 위치를 추정하는 방법을 제안한다. 또한, 선회각 정보 반영에 따른 제안 알고리즘의 성능을 실 환경 데이터를 이용하여 평가한다.

2. 이산 칼만 필터 기반의 데이터 추정 방법

2.1 이산 칼만 필터

칼만 필터는 피드백 제어 형태를 사용하여, 이전의 결과에 따라서 현재의 가능성 있는 데이터를 예측하고, 다시 측정값이 수신되면 갱신의 단계를 반복하여 정확도를 향상한다. 그 중에서도 이산 칼만 필터는 평균 제공근 오차를 감소시키는 방법을 사용하며, 운동 상태 또는 위치를 추정하는데 효과적인 방법이다. (G. Welch, G. Bishop, 2006) 이러한 이유로 선박의 운동 추정에 많이 사용되어왔다. (K. Jaskólski, 2017) 또한, 본 논문에서는 위치 추정에 대해 초점을 두고 있으므로, 선박의 운동을 선형 모델로 가정하여 이산 칼만 필터를 적용하였다.

본 논문에서는 시간 t 에서의 상태 변수 X_t 와 가속도 a_λ , a_φ 는 다음과 같이 설정하였다.

$$X_t = \begin{bmatrix} \lambda_t \\ \varphi_t \\ v_t \cdot \cos(\psi_t) \\ v_t \cdot \sin(\psi_t) \\ a_\lambda \\ a_\varphi \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$a_t = \frac{v_t \cdot \{ \cos(\psi_t + \omega_t \cdot \Delta T) - \cos(\psi_{t-1}) \}}{\Delta T} \quad (2)$$

$$a_\varphi = \frac{v_t \cdot \{ \sin(\psi_t + \omega_t \cdot \Delta T) - \sin(\psi_{t-1}) \}}{\Delta T} \quad (3)$$

여기서, λ_t 는 경도[m], φ_t 는 위도[m], v_t 는 속도[m/s], ψ_t 는 침로[°]를 의미하며, ω_t , a_λ , a_φ 는 선회각[°/s], 경도 방향 가속도[m/s²], 위도 방향 가속도[m/s²]를 각각 의미한다. 또한, 실험 잡음 공분산 행렬 Q 와 센서 잡음 공분산 행렬 R 은 선박의 운동 모델을 고려한 값으로 구성된 단위행렬로 설정하였으며, 수신 간격 ΔT 에 대한 시스템 행렬 A 는 다음과 같다.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \Delta T & 0 & \frac{\Delta T^2}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \Delta T & 0 & \frac{\Delta T^2}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \Delta T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \Delta T & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

2.2 선회각의 부정확성 보완

선박자동식별시스템을 통해 해당 선박으로부터 선회각 정보를 수신하지 못한 경우, IMO (International Maritime Organization)의 MSC (Maritime Security Committee) 에서 작성한 MSC. 137 (76) "Standards for Ship Maneuvability" (MSC.137(76), 2002) 에서 정의된 바에 따라, 선회 반경 R 을 선박자동식별시스템에서 수신한 선박 길이 정보의 5배로 설정하였으며, 선박의 선회각 r 은 다음과 같은 수식으로 계산하여 상태 변수 및 가속도 계산을 위해 사용하였다.

$$r = \frac{V}{R} \quad (5)$$

여기서, V 는 AIS에서 수신한 선박의 속도를 나타낸다.

2.3 선박 항적 유형 판단

선회각 정보를 선박 운동 변화에 적합하게 반영하기 위해서 항적 유형의 판단이 필요하다. 이를 위한 원형 항적의 반지름 r 과 이에 따른 곡률 k 은 다음과 같은 공식을 기반해, 위치값을 이용하여 계산할 수 있다. (A. Czapiewska & J. Sadowski, 2015)

$$\begin{cases} a^2 - 2a\lambda_{t-2} + \lambda_{t-2}^2 + \varphi_{t-2}^2 - 2b\varphi_{t-2} + b^2 = r^2 \\ a^2 - 2a\lambda_{t-1} + \lambda_{t-1}^2 + \varphi_{t-1}^2 - 2b\varphi_{t-1} + b^2 = r^2 \\ a^2 - 2a\lambda_t + \lambda_t^2 + \varphi_t^2 - 2b\varphi_t + b^2 = r^2 \end{cases} \quad (6)$$

여기서, r 을 구하기 위한 계수 a, b, c, d 는 아래와 같이 계산된다.

$$a = c \cdot b + d \quad (7)$$

$$c = \frac{\varphi_{t-2} - \varphi_t}{\lambda_t - \lambda_{t-2}} \quad (8)$$

$$d = \frac{\lambda_t^2 - \lambda_{t-2}^2 - \varphi_{t-2}^2 + \varphi_t^2}{2(\lambda_t - \lambda_{t-2})} \quad (9)$$

$$b = \frac{-2d(\lambda_{t-1} - \lambda_{t-2}) - e}{2[c(\lambda_{t-1} - \lambda_{t-2}) + \varphi_{t-1} - \varphi_{t-2}]} \quad (10)$$

$$e = \lambda_{t-2}^2 - \lambda_{t-1}^2 + \varphi_{t-2}^2 - \varphi_{t-1}^2 \quad (11)$$

$$k = \frac{1}{r} \quad (12)$$

현재 수신된 값을 제외하고 직전까지 수신된 AIS $t-1$ 개의 정보로 계산된 곡률 $k_{(1...t-1)}$ 의 평균 k_{t-1} 및 표준편차 σ_{t-1} 를 계산한 후, 현재 수신된 값의 곡률 k_t 가 $k_{t-1} \pm \sigma_{t-1}$ 밖이라면 곡선형의 항적을 갖는다고 평가했다.

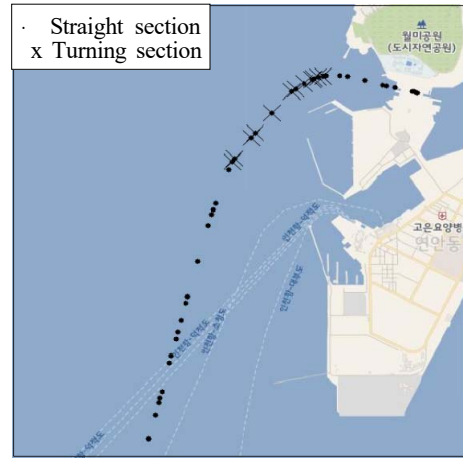
결론적으로, 선박자동식별시스템의 부정확한 선회각 정보가 수신된 경우, 곡률을 계산해 직선형의 항적이라면 0으로, 곡선형의 항적이라면 조종 성능에 따라서 계산된 선회각 정보를 반영하였다.

3. 실험 결과

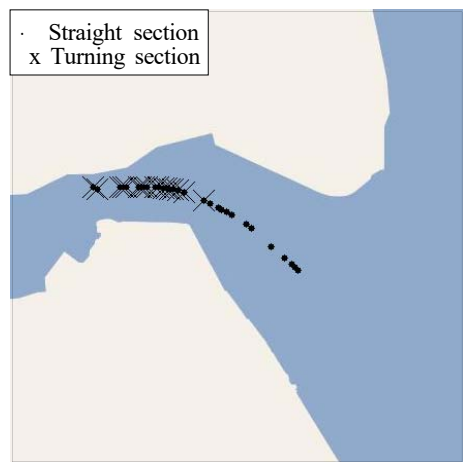
본 연구의 실험은 인천항, 울산항에서 2022년 04월 09일부터 10일까지 2일간 수집된 선박자동식별시스템의 실제 데이터 중 선정한 시나리오로 수행되었다. 정확도의 평가를 위해 추정한 위치와 실제 수신한 위치 정보의 차이를 확인하였다. 또한, 직전 단계에서 수신한 속도와 침로에 추정 시간을 단순히 곱하는 선형적 알고리즘과 선회각이 반영되지 않는 이산 칼만 필터 알고리즘과도 비교하였다.

Table 3 시나리오별 특징

시나리오	시나리오 A	시나리오 B
선박 길이[m]	98.0	19.0
선회각 정보 수신 여부	X	O
선회각 추정 오차[°/sec]	-	3.1
데이터 개수[개]	32	35
곡선형 항적 분포[%]	25.0	65.7
평균 곡률[m]	8.9×10^{-6}	5.1×10^{-7}



(a)

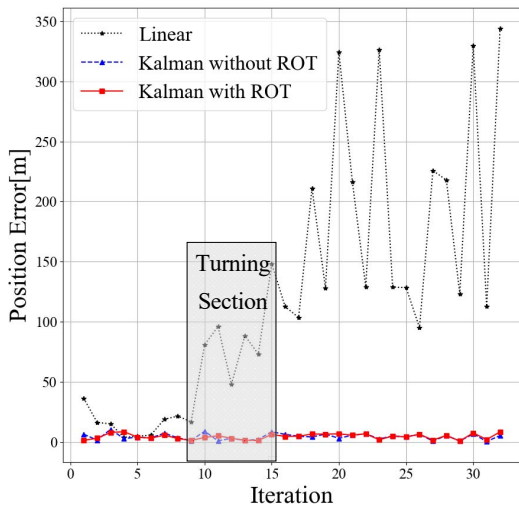


(b)

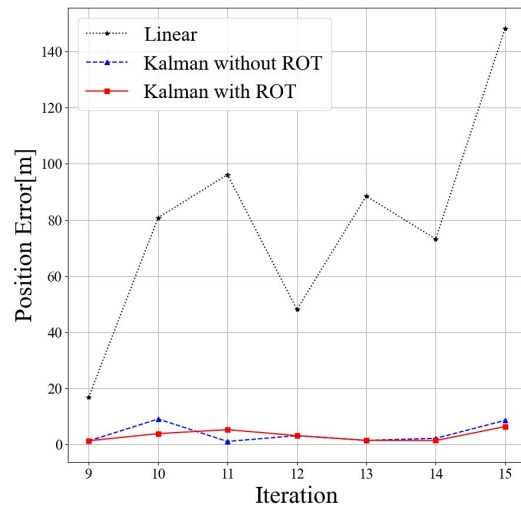
Fig. 1 시나리오별 항적. (a)는 시나리오 A, (b)는 시나리오 B에 대한 항적임. (a)는 곡선 항적의 비율이 적지만, 평균 곡률값이 크고, (b)는 곡선 항적의 비율이 높고, 평균 곡률이 작음.

각 시나리오별 특징은 Table 3과 같다. 시나리오 A는, 선회각 정보가 모두 수신되지 않았으며, 시나리오 B의 경우, 선회각 정보가 수신되지 않았다는 가정을 하였다. 분석 결과, 시나리오 B의 선회각의 추정값과 실제값의 오차는 $3.1^\circ/\text{sec}$ 였다. 또한, 시나리오 A는 곡선형 구간이 25%로 짧았으나, 평균 곡률이 시나리오 B보다 컸다. 반대로 시나리오 B는 곡선 항적 구간이 상대적으로 길다, 완만한 곡선의 특징을 가졌다.

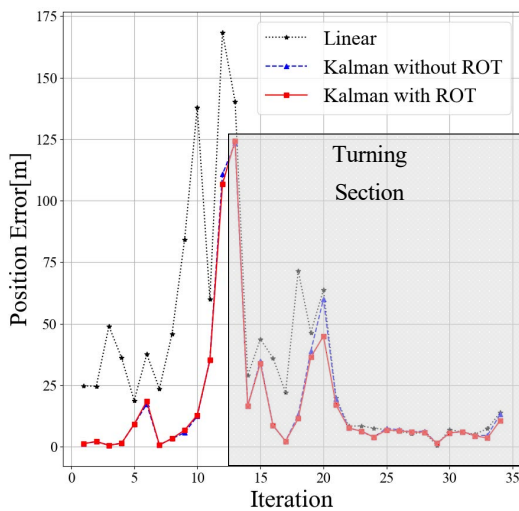
Fig. 1는 시나리오별 항적을 지도상에 표시한 것이며, X자 표시는 곡선형 항적으로 판단한 지점을 나타냈다. 곡선형 항적은 그래프상 사각형의 관심 구역으로 나타났다. 또한, 제안된 알고리즘의 특성상, 과도하게 수신 주기가 길어지게 되면 추정값이 발산할 가능성을 갖는다. 따라서, 본 논문에서는 Table 1을 기준으로, 계류 중인 상황을 제외하고 적정 수신 간격에 대한 분석을 진행했다. 이를 통해 결정된 시간인 30초를 넘게 된다면 추정을 중단하였다.



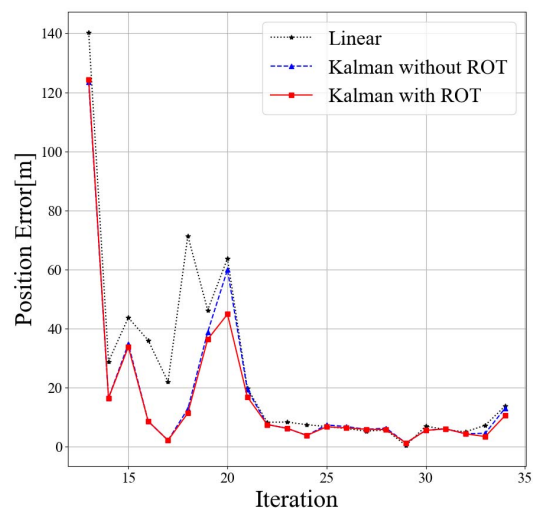
(a) 시나리오 A의 전 구간 위치 오차



(b) 시나리오 A의 곡선 구간 위치 오차



(c) 시나리오 B의 전 구간 위치 오차



(d) 시나리오 B의 곡선 구간 위치 오차

Fig. 2 시나리오별 위치 오차. 사각형의 관심 구역은 곡선 항적 구간을 나타냄. 시나리오 A는 제안한 알고리즘은 선회각을 고려하지 않은 이산 칼만 필터 알고리즘 보다 평균 0.5m 향상되었으며, 시나리오 B는 1.2m 향상되었음.

Fig. 2에는 각 알고리즘에 대해서 추정값과 수신값의 오차를 계산해 그래프로 나타낸 것이다. 시나리오 A의 경우, 속도와 침로 변화가 적은 직선구간에는 3개의 알고리즘 모두, IMO에서 정한 GPS 오차(MSC. 115(73))인 35m 이내의 오차를 보였으나, 곡률값이 1.1×10^{-6} 보다 커지는 10번째 추정부터 선형적 알고리즘은 35m를 초과했다. 이산 칼만 필터 기반인 2개의 알고리즘은 전 구간 동안 DGPS 오차범위인 10m 이내에 분포했다. 한편 곡선 구간에서는, 선회각을 고려하지 않은 이산 칼만 필터 알고리즘은 약 평균 위치 오차가 3.8m였으며, 선회각을 고려한 경우는 약 3.3m으로 0.5m 향상되었

다. 한편 시나리오 B 선박의 결과를 살펴보자면, 직선구간에서 수신 간격이 일정했음에도 불구하고 선형적 알고리즘은 35m 이상의 오차를 보였다. 이는 선형적 알고리즘은 속도와 침로만으로 단순히 위치를 추정하기 때문에 발생할 수 있는 부정확성을 보여준다. 그 외 이산 칼만 필터 기반 2개의 알고리즘은 곡선 구간에서는 선회각을 고려하지 않은 경우보다 고려한 경우 약 1.2m 향상되었다. 하지만 계산된 선회각의 범위를 벗어나는 침로 변화를 보이는 구간에서는 DGPS 오차 범위를 벗어나는 값을 보였다. 이것은 선박 길이에 따른 선회각 계산의 세분화가 필요한 것을 보여준다.

결론적으로, 실험을 통해서 제안한 알고리즘은 곡선형 구간에서 향상된 결과를 보였다. 하지만 수신 주기가 적정값을 넘는 경우 위치 오차가 최대 6배 증가할 가능성이 있음을 분석을 통해 확인했으며, 정확한 선회각 정보를 획득하기 위해서 선박 길이에 따른 알고리즘 세분화가 필요하다.

4. 결론

본 논문에서는 연해 내 선박자동식별시스템의 실제 데이터에 대해서 실시간 위치 정보 제공을 위한 알고리즘을 제안하였다. 운동 변화량이 많은 연해의 특성에 대응하기 위해서 선회각 정보를 반영한 이산 칼만 필터 알고리즘을 적용하였다. 또한, 인천항, 울산항의 수집 데이터를 사용하여 실험을 진행하였다. 결과적으로 제안된 알고리즘이 곡선형 항적에서 적합한 것을 확인했다. 추후에는 긴 전송 주기의 발산에 대응할 방안을 모색할 것이며, 선박 길이에 따른 선회각 계산 세분화 및 곡률의 변화량에 따른 선회각 계산 방법 정확도 향상에 관해서 연구할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 김병옥 (2014), “선박의 AIS 동적정보 전송주기에 관한 연구”, 한국정보통신학회 2014년도 추계학술대회, pp. 305-308.
- [2] IEC61993-2 (2001), “International Standard, Automatic identification system (AIS)”
- [3] B. Cole, M. R. Benjamin , S. Randeni (2021) , “AIS - Based Collision Avoidance in MOOS-IvP using a Geodetic Unscented Kalman Filter,” OCEANS 2021: San Diego - Porto, 2021, pp. 1-10.
- [4] F. Schöller, T. Enevoldsen, J. Becktor, P. Hansen (2021), “Trajectory Prediction for Marine Vessels using Historical AIS Heatmaps and Long short-Term Memory Networks” IFAC-PapersOnLine, pp. 83-89.
- [5] E. Tu, G. Zhang, S. Mao, L. Rachmawati, G. Huang, (2020), “Modeling Historical AIS Data For Vessel Path Prediction: A Comprehensive Treatment”
- [6] S. Guo, J. Mou, L. Chen, P. Chen,(2021), “Improved kinematic interpolation for AIS trajectory reconstruction” Ocean Engineering, Volume 234, 109256
- [7] SPIRE website, <https://spire.com/maritime/solutions/historical-ais/>, Apr 25, 2022
- [8] G. Welch, G. Bishop(2006), “An Introduction to the Kalman Filter”, Proc. Siggraph Course. 8.
- [9] K. Jaskólski, (2017), “Automatic Identification System (AIS) Dynamic Data Estimation Based on Discrete Kalman Filter (KF) Algorithm”, Maritime Technical Journal, vol.211, no.4, 2017, pp.71-87.
- [10] RESOLUTION MSC.137(76) (2002), “STANDARDS FOR SHIP MANOEUVRABILITY”
- [11] J. Sadowski, A. Czapiewska(2015), “Algorithms for Ship Movement Prediction for Location Data Compression”, TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. 9. pp. 75-81.
- [12] RESOLUTION MSC.115(73)(2000), “ADOPTION OF THE REVISED PERFORMANCE STANDARDS FOR SHIPBORNE COMBINED GPS/GLONASS RECEIVER EQUIPMENT”