

## 가변공간 탐색법을 이용한 다중선박의 충돌회피 알고리즘에 관한 연구

손남선<sup>†</sup> · 요시타카 후루카와 · 김선영 · 가쓰로 기지마

한국해양연구원  
큐슈대학교  
한국해양연구원  
나가사키 종합과학대학

## Study on the Collision Avoidance Algorithm against Multiple Traffic Ships using Changeable Action Space Searching Method

N. S. Son<sup>†</sup>, Y. Furukawa, S. Y. Kim and K. Kijima

MOERI/KORDI  
Kyushu University  
MOERI/KORDI  
Nagasaki Institute of Applied Science

### 요 약

자동운항 알고리즘은 인적요인에 의한 해난사고를 방지하고, 보다 효과적이고 안전한 운항을 위해 개발되어 왔다. 그러나, 대부분의 알고리즘이 수많은 선박이 입출항하는 항만근처의 실제 통항상황을 고려하여, 성능을 입증하지 않았기에, 실제 선박에 설치되어 운용된 사례는 거의 없다. 본 연구에서는 충돌사고의 위험성을 줄이고, 안전운항을 지원하기 위하여, 퍼지 이론과 가변공간 탐색법 개념을 사용한 충돌회피 알고리즘을 고안하였다. 충돌회피 알고리즘은 크게 3단계로 구성되어 있다. 첫 번째 단계에서는, 현재시간( $t=t_0$ )에 타선들의 위치 및 속도정보와 자선의 위치 및 속도정보를 이용하여 퍼지 이론에 의한 충돌위험도를 계산하고 이를 바탕으로 회피를 위한, 행동공간을 구성한다. 두번째 단계에서는, 일정시간 이후( $t=t_0+\Delta t$ )의 타선 및 자선의 위치 및 속도를 추정하여, 다시 충돌위험도를 계산하는데, 이때는 변화된 위험도를 바탕으로 행동공간을 다시 재구성하게 된다. 세 번째 단계에서는, 추정된 행동공간들을 대상으로 최적화 기법을 사용하여, 가장 안전하고, 효율적인 회피경로를 결정하게 된다. 이와 같이 3단계로 구성된 충돌회피 알고리즘은 실시간으로 계산되어, 지속적으로 갱신된다. 본 논문에서는 고안된 가변공간 탐색법을 이용한 충돌회피 알고리즘을 한국해양연구원의 선박운항 시뮬레이터에 구현하여, 대양항해 시나리오를 대상으로 성능시험을 수행하였다. 타선박의 항해정보는 AIS 정보를 가정하였고, 최종 선정된 회피경로는 Auto-pilot에 의해 자동운항 되도록 구성하였다. 본 논문에서는 고안된 가변공간 탐색법을 이용한 충돌회피 알고리즘의 특징과 성능시험 결과에 대해 소개한다.

**Abstract** – Auto-navigation algorithm have been studied to avoid collision and grounding of a ship due to human error. There have been many research on collision avoidance algorithms but they have been validated little on the real coastal traffic situation. In this study, a Collision Avoidance algorithm is developed by using Fuzzy algorithm and the concept of Changeable Action Space Searching (CAS). In the first step, on a basis of collision risk calculated from fuzzy algorithm in the current time( $t=t_0$ ), alternative Action Space for collision avoidance is planned. In the second step, next alternative Action Space for collision avoidance in the future( $t=t_0+\Delta t$ ) is corrected and re-planned with re-evaluated collision risk. In the third step, the safest and most effective course among Action Space is selected by using optimization method in real time. In this paper, the main features of the developed collision avoidance algorithm (CAS) are introduced. CAS is implemented in the ship-handling simulator of MOERI. The performance of CAS is tested on the situation of open sea with 3 traffic

<sup>†</sup>Corresponding author: namsun76@moeri.re.kr

ships, whose position is assumed to be informed from AIS. Own-ship is fully autonomously navigated by auto-pilot including the collision avoidance algorithm, CAS. Experimental results show that own-ship can successfully avoid the collision against traffic ships and the calculated courses from CAS are reasonable.

**Keywords:** Collision Avoidance(충돌회피), Fuzzy theory(퍼지 이론), Changeable Action Space Searching (가변 행동공간탐색), Auto-Navigation(자동운항), Ship Handling Simulator(선박운항 시뮬레이터)

## 1. 서 론

레이더와 전자해도, AIS 등 첨단 항해 장비들이 개발되어, 선박의 안전한 운항을 지원하고 있으나, 여전히 선박의 충돌 사고는 줄어들지 않고 있다. 다양한 항해지원 장비들이 설치되어 운용되고 있으나, 항해자가 이들 항해장비에 전시되는 결과를 이용하여 충돌, 좌초 위험을 판단하는 데까지는 많은 주의와 인내력이 요구되며, 충돌 위험을 확인하였다고 하더라도, 올바르게 대처하기까지 역시 상당한 시간과 절차가 요구된다. 전체 해난사고의 70% 이상이 연근해에서 발생하며, 그 중의 70% 이상이 인적과실로 인한 사고인 점도 또한 이를 입증하고 있다(공인영 [2002]). 또한, 이러한 선박간 충돌사고는 단순한 인적과실이 돌이킬 수 없는 광범위한 해양오염사고로 연결되는 경우가 많다. 최근에 발생한 태안 허베이스피리트호 사고의 예를 보더라도, 선박간의 충돌위험도를 자동으로 사전에 인지하여 경보하거나, 충돌회피경로를 자동으로 추정하여 안내하거나 회피기동을 수행할 수 있는 항해지원시스템의 필요성을 알 수 있다.

기존에 선박의 충돌회피에 대한 연구는 주로 퍼지 이론(Fuzzy theory) 및 블록영역 이론(Blocking Area theory)을 이용하여 발전하여 왔다. 퍼지 이론은 주로 충돌위험도 추정에 사용하거나, 회피기동시 제어알고리즘으로 사용하기 위해 도입되었으며(Hasegawa [1989]), 블록영역 이론은, 자선과 타선의 운항특성을 고려한 안전영역의 개념으로 사용하기 위해 도입되었다(Kijima [2003]). 퍼지 이론은 수많은 선박의 운항정보를 이용하여, 최대의 충돌위험도를 가진 타선 및 그 위험도를 추정해 내는 장점이 있으나, AIS 등과 같이 디지털화된 선박정보를 사전에 입력받아야 하는 어려움이 있다. 블록영역 이론에서는, 근접한 몇몇의 선박의 위험도를 인지하여, 회피하는 데는 효과적이거나, 수많은 선박이 통항하는 실제 연안항로 적용하기에는 한계가 있다. 기존에 퍼지이론은, 자선 및 타선의 위치 및 속도정보를 바탕으로, 계산한 TCPA와 DCPA 정보를 이용하여, 충돌위험도를 추정하는 데 사용되었으며, 추정된 위험도 결과를 바탕으로, 회피 공간을 구성하여, 최적의 회피경로를 계산하기도 하였다(Lee [2001]). 회피경로를 계산하는 탐색법이 사용되기도 하였는데, 가지(branch)와 노드(node)개념을 이용한 A\* 탐색법(Lee [2001])과 위험수준에 따라 회피 방향의 범위를 변화시키는 탐색법이 적용되기도 하였다(Kijima [2002]). 그러나, A\* 탐색법은 위험수준에 따라, 가지(branch)의 수를 조절할 필요가 있으며, 방향의 범위도 변화시킬 필요가 있다. 위험수준에 따라 회피 방향의 범위를 변화시킨 탐색법은 위험수준의 변화에 능동적

인 결과를 제공할 수는 있으나, 일정시간 이후의 행동공간을 모색하거나, 현재의 행동공간과 이후의 행동공간 사이의 변화를 고려하기 힘든 문제점이 있다.

본 연구에서는, 퍼지이론을 사용하되, 공간탐색법의 문제점들을 극복하기 위하여, 위험수준의 변화를 고려한 가변공간 탐색법(Changeable Action Space Searching Method)을 고안하였다. 충돌회피 알고리즘은 크게 3단계로, 구성되어 있다. 첫 번째 단계에서, 현재시간( $t=t_0$ )에 타선들의 위치 및 속도정보와 자선의 위치 및 속도정보를 이용하여 퍼지 이론에 의한 충돌위험도를 계산하고 이를 바탕으로 회피를 위한, 행동공간을 구성한다. 두 번째 단계에서는, 일정시간 이후( $t=t_0+\Delta t$ )의 타선 및 자선의 위치 및 속도를 추정하여, 다시 충돌위험도를 계산하는데, 이때는 변화된 위험도를 바탕으로 행동공간을 다시 재구성하게 된다. A\* 탐색법에서는, 3개의 가지(branch)를 사용한 반면, 위험도에 따라, 3개 혹은 5개의 가지(branch)를 구성하도록 하였고, 가지(branch)간 각변위 역시 위험도에 따라 30도에서 60도로 변화될 수 있도록 구성하였다. 세 번째 단계에서는, 추정된 행동공간들을 대상으로 최적화기법을 사용하여, 가장 안전하고, 효율적인 회피경로를 결정하게 된다. 최종 회피 경로에서도, 위험에 따라, 가장 위험한 상황에서는 DCPA가 최소가 되는 경로를 선택하고, 중간위험에서는 위험도의 합이 최소가 되는 경로를, 위험이 덜한 상황에서는 위험도의 시간 적분값이 최소가 되는 경로를 결정하도록 구성하였다. 이러한 3단계로 구성된 충돌회피 알고리즘은 실시간으로 계산되어, 지속적으로 갱신된다. 타선박의 항해정보는 AIS 정보를 가정하였고, 최종 선정된 회피경로는 Auto-pilot에 의해 자동 운항되도록 구성하였다.

본 논문에서는 고안된 가변공간 탐색법을 이용한 충돌회피 알고리즘을 한국해양연구원의 선박운항 시뮬레이터에 구현하여, 대양항해 시나리오를 대상으로 성능시험을 수행하였다. 본 논문에서는 고안된 가변공간 탐색법을 이용한 충돌회피 알고리즘의 특징과 성능시험 결과에 대해 소개한다.

## 2. 다중 선박 충돌 회피 알고리즘의 설계

다중 선박 충돌 회피 알고리즘의 목적은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 항만근처에서 통항하는 선박들간에 충돌 위험도를 추정하여, 자선의 회피 경로를 결정하는 것이다. 선교에서 운항자에게 충돌 위험상황을 인지하여 표시하는 목적 이외에, 운항자가 충돌 위험상황을 인지하기 어려운 상황이거나, 회피기동이 불가능한 상황에

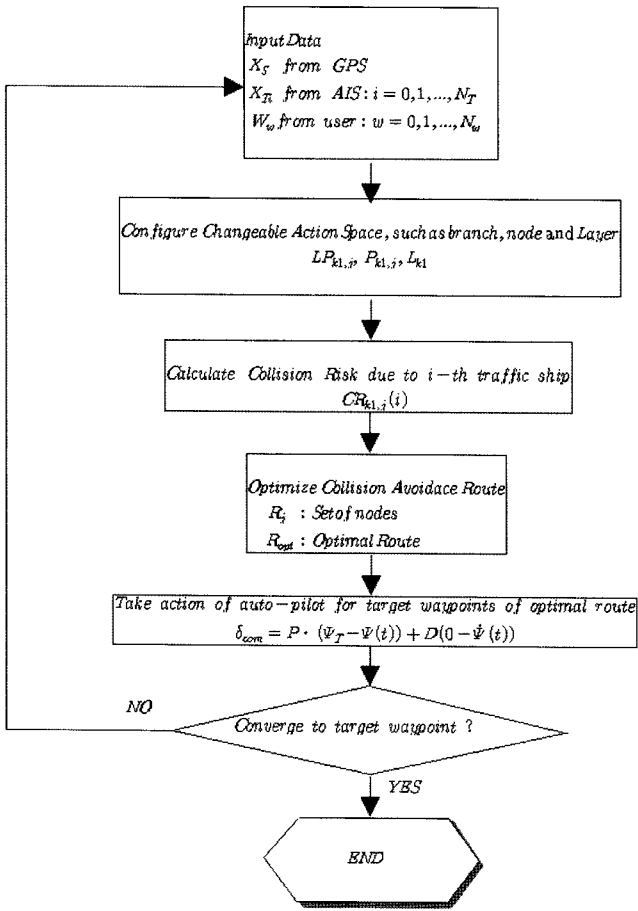


Fig. 1. Flowchart of collision avoidance algorithm using changeable action space searching method.

서 자동으로 회피경로를 표시하거나, 회피기동까지 수행할 수 있도록 Auto-pilot과 연계되도록 구성하였다.

본 연구에서 고안한 충돌회피 알고리즘의 과정을 살펴보면 다음과 같다. 우선, 자선 및 타선의 정보는 각각 GPS 및 AIS를 통해 취득되고, 자선의 목표점에 해당하는 경유점은 사용자에게 의해 입력된다. 입력된 정보를 바탕으로, 충돌상황시 가능한 회피 공간이라고 할 수 있는, 가지(branch)와 노드(node), 그리고 레이어(layer)로 이루어진 행동공간을 구성한다. 이는 2.1절에서 상세히 기술할 것이다. 결국, 회피경로를 구성하게 될 노드의 정보를 계산하는 것이 중요하며, 노드 정보 중 경로선택의 기준이 되는 충돌위험도 정보는, 퍼지이론에 의해 추정된다. 이는 2.2절에서 기술될 것이다. 위험도 정보를 포함한 노드의 정보가 모두 계산되면, 각 레이어에서 노드를 순차적으로 배치하여 회피경로의 후보집합을 구성하게 되며, 이 집합들 가운데, 즉 회피경로 후보들 가운데, 비용함수가 최소가 되는 경로를 결정한다. 이러한, 회피경로 최적화는 2.3절에서 자세히 기술될 것이다. 결정된 회피경로는 목표 노드, 즉 목표 경유점을 의미하며, 자선은 선택된 목표 경유점을 향하여, 자동운항을 수행하게 된다. 이러한 일련의 과정은 최종 목표점에 도달할 때까지 반복되며, 모든 과정은 실시간으로 갱신된다.

### 2.1 가변 행동 공간의 구성

Fig. 2에서 보는 바와 같이, 가변 행동 공간은 입력 데이터와 행동공간으로 나눌 수 있다. 입력데이터는 자선 정보( $X_S$ ), 타선 정보( $X_{Ti}$ ), 그리고 경유점 정보( $W_w$ )가 있다. 타선은 총  $N_T$ 개로 구성되고, 경유점은  $N_w$ 개로 구성된다. 행동공간은 레이어( $L_{kl}$ ), 노드( $P_{kl,j}$ )로 나눌 수 있다. Fig. 2는 가변 행동 공간의 개념을 보여주고 있는데, 그림에서는 레이어는 2개층, 첫번째 레이어상의 가지(branch)는 5개, 2번째 레이어에서 가지(branch)는 3개를 예로, 보여주고 있다.

노드는 결국 향후 회피기동의 목표 경유점 후보가 될 수 있다. 레이어의 간격(LY)은 기존 연구에서는 500 m로 선박과 상관없이 설정하였으나(Lee [2001]), 본 연구에서는 자선의 길이특성을 반영하여, 현재의 선박의 위험도(CR)에 따라  $3L(CR < 0.6)$  혹은  $2L(CR \geq 0.6)$ 로 설정하였다. 또한, 가지의 갯수도 현재 선박의 위험도(CR)에 따라 3개( $CR < 0.6$ ) 혹은 5개( $CR \geq 0.6$ )로 설정하였다. 각 입력데이터 및 행동공간의 상세 정보는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 X_S &= \{X_S(t), Y_S(t), \psi_S(t), V_S(t)\} \\
 X_{Ti} &= \{X_{Ti}(t), Y_{Ti}(t), \psi_{Ti}(t), V_{Ti}(t)\}, i = 0, 1, 2, \dots, N_T - 1 \\
 W_w &= \{X_w(t), Y_w(t), \theta_w(t)\}, \theta_w(t) = \tan^{-1}\left(\frac{Y_w - Y_S}{X_w - X_S}\right) \\
 w &= 0, 1, 2, \dots, N_w - 1 \\
 P_{kl,j} &= \{X_{kl,j}, Y_{kl,j}, \theta_{kl,j}, \Delta T_{kl,j}, CR_{kl,j}, i_{\max kl,j}\}, j = (h \cdot k2 + k3) \\
 L_{kl}: Y &= -\frac{1}{\tan(\theta_{w-1,w})} \cdot ((x - X_{L_{kl}}) + Y_{L_{kl}}) \\
 X_{L_{kl}} &= X_{w-1} + LY \cdot (tot_i + k1 + 1) \cdot \cos(\theta_{w-1,w}) \\
 Y_{L_{kl}} &= Y_{w-1} + LY \cdot (tot_i + k1 + 1) \cdot \sin(\theta_{w-1,w}) \\
 \theta_{w-1,w} &= \tan^{-1}\left(\frac{Y_w - Y_{w-1}}{X_w - X_{w-1}}\right)
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서, h는 노드에서 나갈 수 있는 가지(branch)의 갯수이며,  $tot_i$ 는 이전 경유점에서 현재 자선위치 사이에 놓일 수 있는 레이어의 갯수이다. h값은 이전노드의 위험도의 수준에 따라, 3개( $CR < 0.6$ ) 혹은 5개( $CR \geq 0.6$ )로 변화될 수 있도록 구성하였다. 노

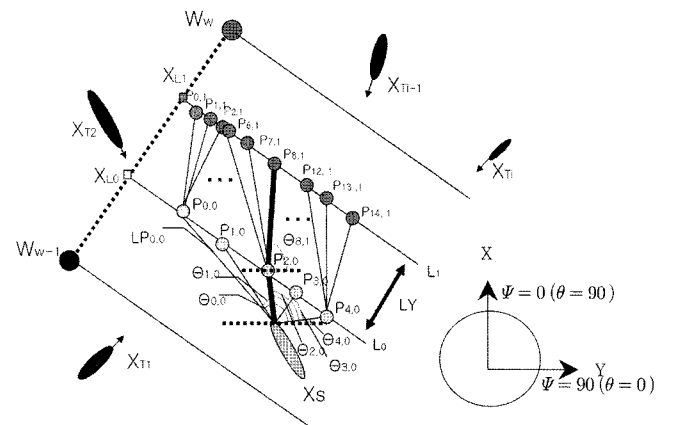


Fig. 2. Concept of changeable action space searching.

드 정보 중, 시간정보( $\Delta T_{k1,j}$ )는 이전 노드(root node)에서 현재 노드까지의 진행시간을 의미하며, 위험도 정보( $CR_{k1,j}$ )는 이전 노드에서 현재 노드로 출발 후 발생하는 충돌위험도로 2.2절에서 상세히 논의될 것이다. 최대 위험 타선 번호( $i_{\max k1,j}$ )는 자선이 이전노드에서 현재노드로 진행할 경우, 가장 충돌위험도가 높은 타선의 순번을 의미한다.

노드의 방향( $\theta_{k1,j}$ )은 이전 노드(root node)로부터 현재노드로 연결된 가지(branch)의 방향을 의미하는데, 이전 노드에서의 위험도 정보(CR)에 따라 가지 사이의 각 간격이 결정된다. 최초의 이전 노드(root node)는 자선의 현재 위치가 된다. 가지의 함수(branch function) 및 노드 방향을 기술하면 다음과 같다. 여기서,  $\theta_{wk-1,k2}$ 는 이전 노드에서의 경유점 방향을 의미한다.

$$\begin{aligned} LP_{k1,j}: Y &= \tan(\theta_{k1,j}) \cdot (X - X_{k1-1,k2}) + Y_{k1-1,k2} \\ \theta_{k1,j} &= \theta_{wk1-1,k2} - (k3-1) \cdot \alpha_{wk1-1,k2} \\ \alpha_{wk1-1,k2} &= 30deg \text{ for } CR_{k-1,k2} < 0.6 \\ &= 60deg \text{ for } CR_{k-1,k2} \geq 0.6 \end{aligned} \quad (2)$$

가변 행동 공간을 구성하는 것은 결국 전체 레이어와 전체 노드 정보를 계산하는 과정이다. 이를 흐름도로 나타낸 것이 Fig. 3

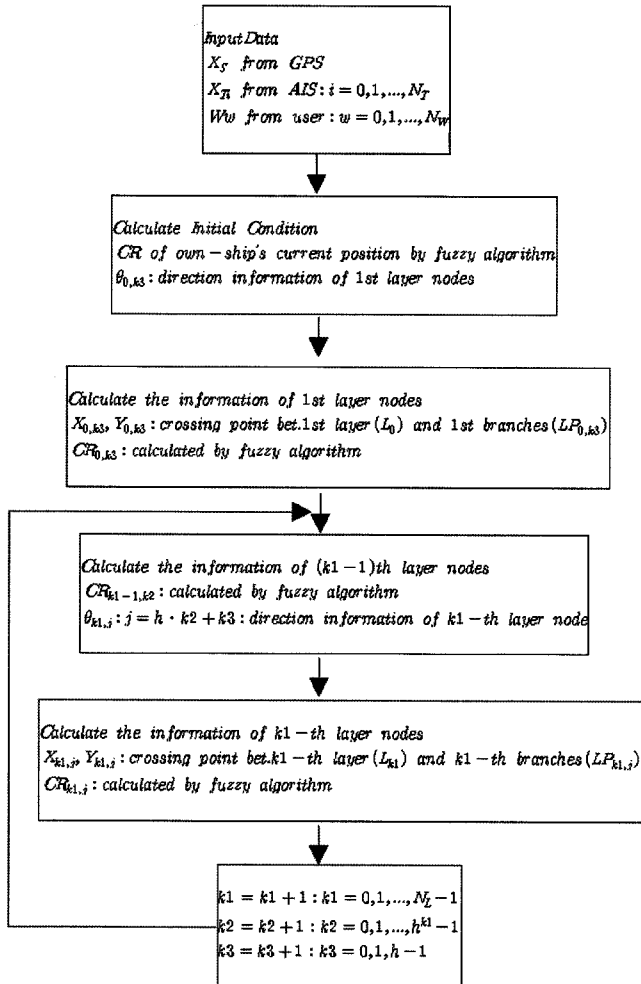


Fig. 3. Calculation of changeable action space.

이다. 초기 노드(root node)에 해당하는 자선의 위치정보를 바탕으로, 타선 전체에 대한 위험도(CR)를 계산하고, 위험도의 크기에 따라 식 (2)와 같이, 1차 레이어상의 노드들의 방향, 즉 초기 가지들(branches)의 방향을 계산한다. 1차 가지들의 방향이 결정되면, 가지들의 함수가 결정되고, 1차 레이어 함수와의 교차점이 결국 1차 레이어상의 노드들이 된다. 1차 레이어상의 노드들의 위치정보가 계산되고, 이를 바탕으로, 충돌위험도가 추정된다. 이러한 방법으로, 레이어를 증가시켜 가면서, 전체 행동공간의 정보를 모두 계산할 수 있다.

## 2.2 충돌 위험도의 추정

다중 선박의 충돌회피 알고리즘을 구성하는 두번째 부분은, 충돌 위험도를 추정하는 과정이다. 앞절에서, 가변 행동공간, 즉 레이어상의 노드들의 정보( $P_{k1,j}$ ) 중 충돌위험도( $CR_{k1,j}$ )와 최대 위험 선박순번( $i_{\max k1,j}$ )을 제외한, 위치( $X_{k1,j}$ ,  $Y_{k1,j}$ ) 및 방향( $\theta_{k1,j}$ ), 경유 시간( $\Delta T_{k1,j}$ ) 정보는 모두 계산되었다. 이제, 계산된 노드에서 자선이 출발한다고 가정하고, 타선 전체에 대한 충돌위험도와 최대 위험선박 순번을 계산하게 된다. 이를 흐름도로 나타내면 Fig. 4와 같다.

여기서, TCPA와 DCPA를 구하는 과정은 다음과 같다. 우선, 대상 노드에 자선이 위치해 있을 것으로 추정되는 시각(실제로는, 현재시각으로부터  $\Sigma \Delta T_{k1,k2}$  경과한 시각임)을 다시 0으로 가정하고, 이 때부터  $t$  시간 후의 자선 및 타선의 위치와 속도정보를 가정하여, TCPA와 DCPA를 계산한다. 즉, 현재의 노드에서 자선이 출발

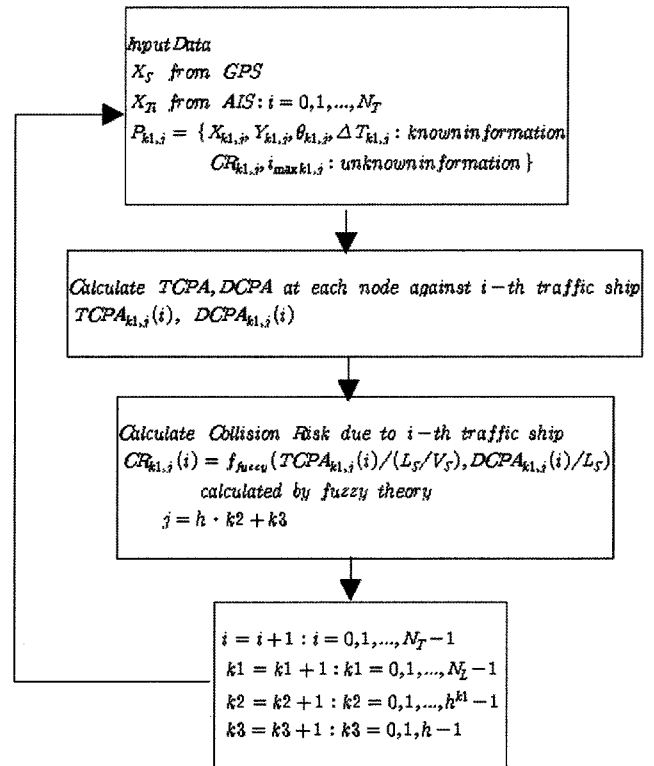


Fig. 4. Calculation of collision risk.

할 경우, 발생하게 될 타선과의 충돌위험이 계산된다. 식 (3)은  $t'$  시간 후의 자선 및 타선의 예상위치이다.

$$\begin{aligned} X_{S_{k1,j}}(t') &= X_{k1-1,k2} + V_S \cdot \cos(\theta_{k1,j}) \cdot t' \\ Y_{S_{k1,j}}(t') &= Y_{k1-1,k2} + V_S \cdot \sin(\theta_{k1,j}) \cdot t' \\ X_{T_{k1,j}}(t') &= X_{T_i}(0) + V_{T_i}(0) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \psi_{T_i}(0)\right) \cdot (t' + \Sigma \Delta T_{k1-1,k2}) \\ Y_{T_{k1,j}}(t') &= Y_{T_i}(0) + V_{T_i}(0) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - \psi_{T_i}(0)\right) \cdot (t' + \Sigma \Delta T_{k1-1,k2}) \end{aligned} \quad (3)$$

이로부터, 식 (4)와 같이, 거리함수를 구성할 수 있으며, 자선과 타선의 거리가 최소가 되는 충돌여유시간(TCPA) 및 충돌여유거리(DCPA)를 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} DF_{k1,j}(i,t') &= \sqrt{(X_{T_{k1,j}} - X_{S_{k1,j}})^2 + (Y_{T_{k1,j}} - Y_{S_{k1,j}})^2} \\ &= \sqrt{At'^2 + Bt' + C} \\ TCPA_{k1,j}(i) &= \frac{B}{2A} \\ DCPA_{k1,j}(i) &= DF_{k1,j}(i, TCPA_{k1,j}(i)) \end{aligned} \quad (4)$$

이제, 계산된 충돌여유시간 및 충돌여유거리를 이용하여, 충돌 위험도를 계산하는 퍼지함수에 적용하면, 해당 노드에서 충돌 위험을 계산할 수 있다. 본, 퍼지함수를 이용한 충돌위험도의 계산부는 이미 이전 연구에서 논의된 바 있다(Son [2007]). 충돌위험 각 노드에서 각 타선별로 충돌 위험도를 모두 계산할 수 있으며, 충돌위험도가 최대가 되는 타선의 순번이  $i_{\max k1,j}$ 가 되며, 이 때 충돌위험도가 노드의 충돌위험도 정보가 된다.

$$CR_{k1,j} = CR_{k1,j}(i_{\max k1,j}) = \max\{CR_{k1,j}(i), i=0, 1, \dots, N_T-1\} \quad (5)$$

### 2.3 충돌 회피 경로의 최적화

앞의 두가지 과정을 거쳐, 노드의 위치, 방향, 경유시간 및 충돌 위험과 최대위험타선 정보 등 모든 정보를 계산하였다. 계산된 가변 행동공간을 배치하는 것, 즉 현재의 자선의 위치로부터, 각 레이어에서 적절한 노드를 하나씩 연결하면, 회피 경로의 후보를 구성할 수 있다. 결국, 충돌회피 알고리즘의 최종적인 목표는, 계산된 가변 행동 공간, 즉 각 레이어상의 노드들을 최적으로 배치하여, 회피경로를 최적화 하는 것이다.

$$R_j = \{\{X_S, \dots, X_{k1-1,k2}, X_{k1,j}\}, \Sigma CR_{k1,j}, \Sigma CR_{k1,j} \cdot \Delta T_{k1,j}, \Sigma DCPA_{k1,j} \cdot \Delta T_{k1,j}\},$$

$$j = h \cdot k2 + k3 \quad (6)$$

식 (6)에서 보는 바와 같이, 회피경로 집합  $R_j$ 는 총  $h^{k1+1}$ 개의 종류로 구성되며, 각 회피 경로집합  $R_j$ 는 경로점 집합( $X_S, \dots, X_{k1-1,k2}, X_{k1,j}$ )과 3개의 비용성분, 즉 충돌위험도 합( $\Sigma CR_{k1,j}$ ), 충돌위험도의 시간적분값( $\Sigma CR_{k1,j} \cdot \Delta T_{k1,j}$ ), DCPA 시간적분값( $\Sigma DCPA_{k1,j} \cdot \Delta T_{k1,j}$ ) 등으로 구성된다.

최종 충돌 회피 경로는 첫번째 레이어의 충돌위험도 수준에 따라 비용함수를 달리하여 결정된다. 이는 초기의 충돌위험도의 수준을 반영하기 위한 것으로, 현재 자선의 위치에서의 충돌위험도에 따라 첫번째 가지(branch)의 방향의 각간격이 반영되었으므로, 현재 상태의 위험도로부터 첫번째 레이어로 가면서 충돌위험도 수준이 변화하는 상황을 고려하기 위한 것이다. 첫번째 충돌위험도의 수준을 식 (7)과 같이, 3종류로 나눠 각 비용함수가 최적값이 되는 회피경로를 최종 충돌회피경로로 결정하였다.

$$\begin{aligned} R_{opt} &= R_{j(\min CR)} = \{\{X_S, \dots, X_{k1,j \min CR}\}, \min(\Sigma CR_{k1,j}), \dots\} \\ &\quad \text{if } \exists CR_{0,k3} < 0.6, \\ R_{opt} &= R_{j(\min CRT)} = \{\{X_S, \dots, X_{k1,j \min CRT}\}, \dots, \min(\Sigma CR_{k1,j} \cdot \Delta T_{k1,j}), \dots\} \\ &\quad \text{if } 0.6 \leq \exists CR_{0,k3} < 1.0, \\ R_{opt} &= R_{j(\min DCPAT)} = \{\{X_S, \dots, X_{k1,j \max DCPAT}\}, \dots, \max(\Sigma DCPA_{k1,j} \cdot \Delta T_{k1,j})\} \\ &\quad \text{if } \forall (CR_{0,k3} = 1.0). \end{aligned} \quad (7)$$

## 3. 시뮬레이터 실험 결과 및 토의

### 3.1 시뮬레이터 실험 시스템 구축

이상에서 고안된 가변행동 공간 탐색법을 이용한 충돌회피 알고리즘을 한국해양연구원의 선박운항 시뮬레이터와 연결하여 성능시험 시스템을 구축하였으며, Fig. 5는 그 구성을 보여준다.

선박운항 시뮬레이터는 본래 운항자를 통하여, 유인 운항하는 장비인데, 본 시험을 위하여, Instructor console 상에 충돌회피를 위한 자동운항 모듈을 구축하여, 무인으로 자동운항되도록 수정하여 구성하였다. Fig. 5에서 보는 바와 같이, 자선 및 타선의 정보는 각기 GPS, AIS 정보를 가정하여, 운동계산기(Motion Solver)를 통하여 받아 이용하였고, 경유점 정보는 Instructor console 상에서 사용자가 입력하도록 구성하였다. 매시간 입력되는 자선 및 타선정보를 바탕으로, 가변공간 탐색법을 이용한 충돌회피 알고리즘은 레이어와 노드가 포함된 행동공간 정보를 0.1초 간격으로 계산하고, 이를 토대로 최적의 충돌회피 경로를 실시간 계산한다. 계

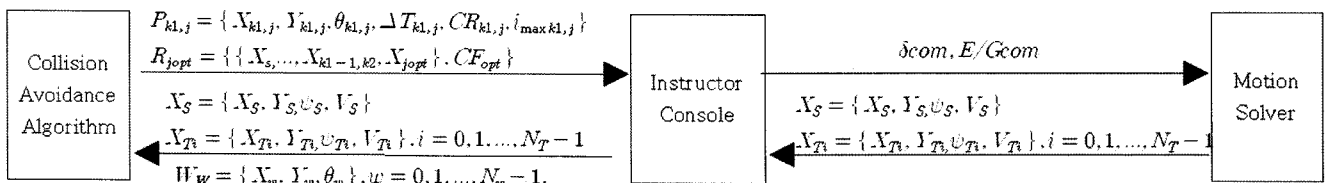


Fig. 5. Configuration of collision avoidance test-bed against multiple traffic ships.

산된 충돌회피 경로를 PD 제어를 이용한 Auto-pilot을 이용하여, 자동운항 되도록 구성하였다(손남선 [2004]).

### 3.2 시뮬레이션 시나리오

시나리오는 대양과 같은 개방수역에서의 시나리오로서, Fig. 6 과 같이, 자선 및 타선의 경로를 계획하였다. 개방수역에서의 경로는 타선의 속도방향의 차이에 따른 충돌위험도의 변화를 살펴 보기 위해, 자선의 좌현로부터 접근하는 타선(A), 선수에서 접근하는 타선(B), 선미로부터 자선을 추월하는 타선(C), 그리고 좌현, 우현에서 접근하는 타선 2척과 선수에서 접근하는 타선, 총 3척의 타선이 포함된 시나리오(D)까지 총 4가지를 계획하였다. 선박은 Table 1에 보는 바와 같이, 길이 약 136 m의 군함이 자선으로 사용되었고, 타선은 크게 3종류 가정하였다. 단, 시나리오 C에서는 타선이 자선을 추월하여야 하므로, 예외적으로 빠른 속도를 가정하였다.

각 시나리오의 자선과 타선의 충돌 상황시, 본 연구에서 고안된 가변공간 탐색법을 이용한 충돌회피 알고리즘이 정상적으로 작동하는지, 그리고 이를 통해 자선이 안전하게 충돌 회피기동을 수행하는지 살펴보았다. 시뮬레이션은 실시간으로 이루어지며, 충돌회피 알고리즘과 Auto-pilot에 의하여 무인으로 자동운항 방법으로 진행된다.

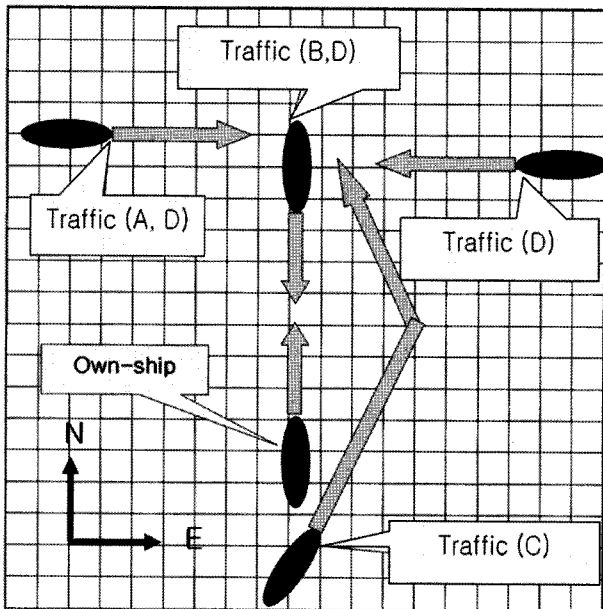


Fig. 6. Route planning in open sea.

Table 1. Scenarios for simulator experiments.

해역	자선			타선		
	종류	길이(m)	속도(kt)	종류	길이(m)	속도(kt)
대양, 개방수역	군함 I	135.5	10 이하	컨테이너	260	10 이하
				컨테이너	320	
	군함 II	135.5	10 이하	컨테이너	260	10 이하
				군함 II	135.5	

### 3.3 시뮬레이션 결과 및 토의

Fig. 7은 4가지 시나리오에 대한 시뮬레이터 실험결과를 보여준다. 좌현 상단으로부터, 시계방향으로, 각각 시나리오 A, B, C, D의 제적결과를 보여준다. Fig. 7에서 보듯이, 개방수역에서 자선은 타선과 충돌 없이 충돌회피 및 자동운항을 잘 수행하였다.

Fig. 7의 좌현 상단 그림에서 보는 바와 같이, 시나리오 A 즉, 좌현에서 타선이 접근하는 시나리오에서는, 자선이 우현으로 회피 기동을 하였다. 회피기동을 하여 타선과의 조우상황이 종료된 후에는 위험이 사라져, 원래의 경로로 복귀하는 것을 함께 확인할 수 있다. 좌현에서 타선이 접근하는 충돌상황시, 해상충돌방지규칙([막용섭 (1988)])에서는 우현변침을 요구하고 있는데, 이를 잘 만족하고 있다.

Fig. 7의 우현 상단 그림은, 시나리오 B, 즉 타선이 전방에서 접근하는 상황의 결과를 보여주고 있다. 자선은 전방 타선과의 충돌을 피하기 위해, 우현으로 회피기동을 수행하였다. 역시 전방타선이 자선 좌현 뒤쪽으로 진행한 이후에는 자선이 원래의 항로로 돌아오고 있는 것을 확인할 수 있다. 전방 타선 접근시, 해상충돌방지규칙에서는 우현 변침을 요구하고 있는데, 이를 잘 만족하고 있다.

앞의 두 시나리오와는 달리 후방에서 접근하는 시나리오 C의 경우는 조금 다른 패턴을 가진다. Fig. 7의 좌현 하단 그림에서 보는 바와 같이, 우현 후방에서 추월하는 타선과의 충돌을 막기위해, 자선은 약간 좌현으로 선회하는 듯 하다가, 원래의 경로로 복귀하는 패턴을 보여주고 있다. 후방 150도에서 210도 사이에서 접근하는 타선과의 충돌상황시, 해상충돌방지 규칙에서는 좌현 변침을 요구하고 있는데, 본 결과는 이러한 규칙을 잘 만족하고 있음을 알 수 있다.

시나리오 D는 앞의 두 시나리오(A,B)의 상황을 포함하면서, 추가적으로 우현에서 접근하는 선박이 추가되었다. Fig. 7의 우현 하단에서 보는 바와 같이, 선박은 전방타선 추월 후에 우현에서 접근하는 타선을 회피한다. 그러나, 좌현에서 접근하는 선박과의 충돌상황은 위험도가 높기 때문에 시간과 거리상으로, 우현으로 멀리 회피하는 상황을 볼 수 있다. 시나리오는 3종류의 타선과의 충돌위험이 순차적으로 포함된 상황으로, 각 타선과의 충돌상황 및 회피상황, 그리고 위험의 해제이후 원래 경로로의 복귀상황이 잘 구현되어 있다. 본 시나리오 역시, 해상충돌방지규칙을 잘 만족하고 있다.

## 4. 결 론

본 연구에서는, 가변공간 탐색법을 이용한 다중선박 충돌회피 알고리즘을 설계하였다. 타선들과 조우한 자선의 현재 위험도 수준에 따라, 레이어와 노드, 그리고 가지들의 방향을 변화시킬 수 있도록 하였고, 구성된 행동공간, 즉 회피경로 후보집합 중에서, 초기 위험도의 수준을 고려하여, 비용함수를 최소화하는 최적의 회피경로를 결정할 수 있도록 구성하였다.

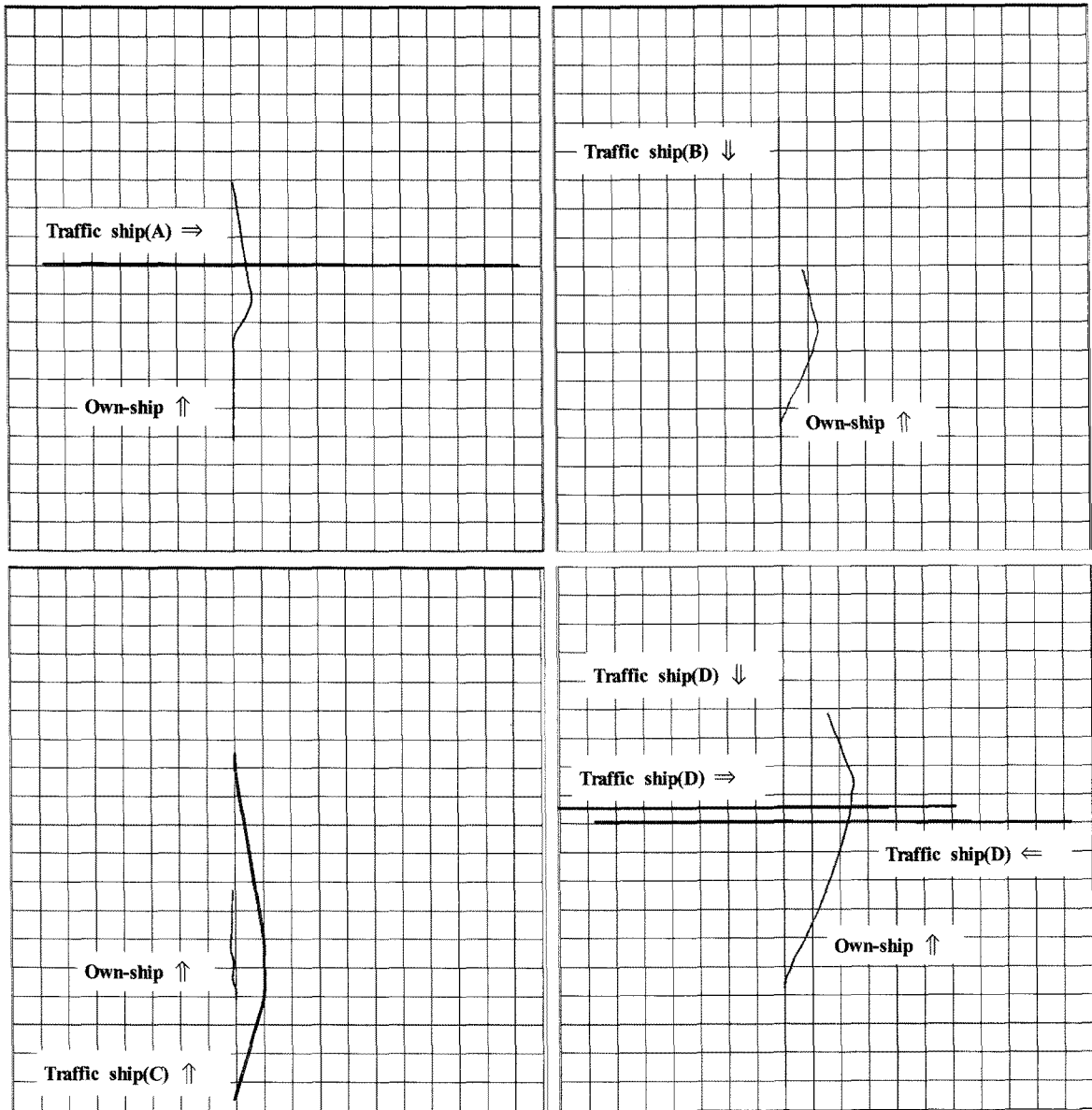


Fig. 7. Simulation results (left upper: Scenario A, right upper: Scenario B, left lower: Scenario C, right lower: Scenario D).

설계된 충돌회피 알고리즘의 성능검증을 위해 시뮬레이터 기반 검증시험을 수행하였다. 대양항해 시나리오로서, 타선 1척이 좌현, 전방, 후방 등에서 접근하는 충돌상황 시나리오와, 좌현과 우현 그리고 전방에서 타선 3척이 동시에 접근하는 충돌상황에 대한 시나리오에 대해 시뮬레이션을 수행하였다. 시험결과, 설계된 가변공간 탐색법을 이용한 다중선박 충돌회피 알고리즘은 정상적으로 작동하여, 타선과의 충돌없이 안전하게 회피기동을 수행하였고, 충돌상황이 사라진 후에는 원래의 경로로 복귀하였다. 또한, 이러한 시뮬레이션 결과는 해상충돌 방지규칙에서 요구하는 회피 규칙을 만족하고 있는 것도 함께 확인하였다. 향후, 제한수호가 포함된 부두 근처의 연안 항해에 대한 시나리오에 대해 검증시험을 수행할 필요가 있다.

#### 4. 후 기

본 연구는 “네트워크 기반 항만관제 및 항법체계기술 개발 (PES124A)” 및 “무인선 제어시스템 알고리즘 최적화 기술 개발 (PNS110A)” 과제의 지원에 의해 수행되었음.

#### 참고문헌

- [1] 공인영 외, 2002, “해양위해도 저감 핵심기술 개발”, 연구보고서, 한국해양연구원.
- [2] 박용섭, 1988, 해상교통법론, 한국선원선박문제연구소.
- [3] 손남선 외, 2004, “근거리용 무인탐사선의 자동운항시스템 개

- 발”, 대한조선학회 추계학술대회 논문집, 63-68.
- [4] Lee, H. J. and Rhee, K. P., 2001, “Development of collision avoidance system by using expert system and search algorithm”, *Journal of International Shipbuilding Progress*, Vol. 48, No. 3, 197-212.
- [5] Hasegawa, K. *et al.*, 1989, “Ship auto-navigation fuzzy expert system (SAFES)”, *Journal of the Society of Naval Architecture of Japan*, Vol. 166.
- [6] Kijima, K. and Furukawa, Y., 2002, “Development of collision avoidance algorithm using fuzzy inference”, *Proceeding of ISOPE PACOMS*.
- [7] Kijima, K. and Furukawa, Y., 2003, “Automatic collision avoidance system using the concept of blocking area”, *Proceeding of MCMC 2003*.
- [8] Son N. S. *et al.*, 2007, “Study on the real-time monitoring system of collision risk contour for ship”, *Proceedings of ICCGS 2007*.

---

2008년 11월 12일 원고접수

2008년 12월 22일 심사완료

2008년 12월 30일 수정본 채택