
BK곱과 COLREGs에 기반한 지능형 선박의 충돌회피시스템

강성수* · 이영일 · 정희 · 김용기**

A Collision Avoidance System for Intelligent Ship using BK-products and COLREGs

Sung-Soo Kang* · Young-il Lee · Hee Jung · Yong-Gi kim**

요 약

본 논문에서는 지능형 선박의 실시간 장애물회피를 위한 충돌회피시스템을 논한다. 다른 무인자율항체들의 충돌회피시스템과는 달리 지능형 선박의 충돌회피시스템은 목적지까지의 합리적이고 안전한 경로를 통한 충돌회피뿐만 아니라 해양을 항해하는 모든 선박이 준수해야하는 국제해상충돌예방규칙(COLREGs, International Regulations for Preventing Collisions at Sea)을 반영해야한다. 목적지까지의 합리적이고 안전한 경로를 통한 충돌회피라는 일반적인 충돌회피시스템의 목표를 달성하기 위해 BK-곱에 기반한 휴리스틱 탐색기법을 채용하며, 또 다른 목표인 COLREGs의 준수를 위해 충돌회피를 위한 규칙을 적용하는 지식기반시스템을 채용한다. 제안된 충돌회피시스템의 성능검증을 위해 COLREGs에 명시된 여러 가지 조우상황을 설정한 시나리오를 이용하여 최적성과 안정성 관점에서 시뮬레이션을 수행하고 그 결과를 A* 탐색기법과 비교한다. 시뮬레이션을 통해 제안된 충돌회피시스템이 지능형 선박의 실용적이고 효율적인 실시간 충돌회피시스템으로 적합함을 확인하였다.

ABSTRACT

This paper presents a collision avoidance system for intelligent ship. Unlike collision avoidance system of other unmanned vehicles, the collision avoidance system for intelligent ship aims at not only deriving a reasonable and safe path to the goal but also keeping COLREGs(International Regulations for Preventing Collisions at Sea). The heuristic search based on the BK-products is adopted to achieve the general purpose of collision avoidance system; deriving a reasonable and safe path. The rule of action to avoid collision is adopted for the other necessary and sufficient condition; keeping the COLREGs. The verification of proposed collision avoidance system is performed with scenarios that represent encounter situations classified in the COLREGs, then it is compared with A* search method in view of optimality and safety. The analysis of simulation result reveals that the proposed collision avoidance system is practical and effective candidate for real-time collision avoidance system of intelligent ship.

키워드

BK곱, 자율수준운동체, 충돌회피, 상세경로설정, 지능항행시스템, 평가함수

I. 서론

선박의 대형화와 선박교통의 빈도 증가로 인한 해난

사고의 점진적 증가는 인적·물적 손실은 물론 해양 환경오염의 주원인으로 부각되었다. 이러한 선박의 해난 사고는 건조 및 항해기술의 낙후나 해도의 불확실성 또

* 진주산업대학교 컴퓨터공학부

** 경상대학교 컴퓨터과학과, 교신저자

는 기상정보의 부재에 기인하는 ‘좌초와 침몰’, 그리고 기후악화나 부주의에 기인하는 ‘선박간의 충돌’로 구분된다. 근래에 들어 건조 및 항해기술의 발전과 기상학의 발달로 인해 좌초나 침몰 등의 해난사고는 현저히 줄어든 반면, 선박교통의 빈도 증가로 인한 선박간의 충돌사고는 더욱 빈번해졌다[1]. 영역전문가의 고유능력이인 장애물 탐지, 충돌위험도 산출, 그리고 장애물회피를 위한 의사결정과 같은 능력을 전산화해 통해 자동화함으로써 해상에서의 선박간 충돌을 감소시키기 위한 연구는 충돌회피시스템의 발전을 초래하였다.

일반적인 무인항체의 충돌회피시스템은 목적지까지 소비에너지 관점에서 합리적이고 최적화된 경로를 통해 탐지된 장애물을 회피하는 것을 목적으로 한다. 이에 반해, 해상을 운항환경으로 가지는 지능형 선박의 충돌회피시스템은 최적화된 경로를 통해 장애물 회피를 수행해야함은 물론, 해상을 운항하는 모든 선박이 반드시 준수해야만 하는 국제해상충돌예방규칙(COLREGs, International Regulations for Preventing Collisions at Sea)[2]을 반영한 충돌회피를 수행해야 한다. 이러한 목적을 달성하기 위해 현재까지 연구·개발된 선박의 충돌회피시스템은 크게 두 가지 형태로 양분된다. 첫 번째 형태는 지식기반시스템 형태의 충돌회피시스템으로 COLREGs에 명시된 조우상황과 충돌을 회피하기 위한 규칙을 지식베이스로 구축한다[3][4][5][6][7]. 또 다른 형태는 공간탐색기법을 이용한 충돌회피시스템으로 현 시점에서 선박이 행할 수 있는 모든 행동에 대한 정의를 내리고, 평가함수를 이용해 각 행동에 대한 타당성을 수치화 하여 이중 가장 합리적인 행동을 선택하는 방식이다[8][9][10][11][12].

지식기반시스템 형태의 충돌회피시스템은 장애물회피에 COLREGs를 적용할 수 있다는 장점이 있는 반면, 여러 선박들과 동시에 조우하는 경우 모든 선박을 고려한 충돌회피가 불가능하다는 단점을 지닌다. 이러한 사실은 법제화되어 있는 국제해상충돌예방규칙이 일반적으로 두 선박이 조우하는 경우에 대한 피항 행위를 기술하고 있기 때문이다. 이에 반해 공간탐색기법을 이용한 충돌회피시스템은 탐지된 모든 장애물을 고려하여 최적화된 충돌회피를 수행한다는 장점을 지니는 반면, 모든 선박이 준수하여야 하는 COLREGs를 적용할 수 없어 비현실적인 피항 행위를 생성하게 되고 이는 COLREGs를 준수하는 상대편과의 충돌로 이어지게 된다는 문제

점을 지닌다. 따라서 가장 합리적인 선택은 두 방법의 장점만을 취하여 새로운 형태의 충돌회피시스템을 설계하는 것이다.

본 논문에서는 이러한 필요성에 의해 지능형 선박을 위한 BK-곱 및 COLREGs 기반 충돌회피시스템을 제안한다. 기존 충돌회피시스템의 장점을 취하기 위해 충돌회피시스템을 후보섹터집합 선정모듈(CSSM, Candidate Sector set Selection Module)과 지식기반시스템 모듈(KBSM, Knowledge-Based System Module)로 구성한다. CSSM은 공간탐색기법을 이용한 기존의 충돌회피시스템이 가지는 장점을 구현하기 위한 모듈이며, KBSM은 지식기반시스템 형태의 기존 충돌회피시스템이 지니는 장점을 구현하기 위한 모듈이다. CSSM에서는 다음 단위시간에 이동해갈 수 있는 섹터와 장애물에 포함된 섹터 사이에 존재하는 최적성 관점의 관계성을 표현하기 위해 평가함수를 이용하며, 섹터들간의 의미적 포함관계를 분석하여 합리적인 후보섹터 선정을 위해 BK-곱을 채용한다. KBSM에서는 해상을 운항하는 모든 선박이 반드시 지켜야하는 COLREGs를 지식베이스로 구축하고, 타선과의 조우상황을 고려하여 현 상황에 맞는 충돌회피를 위한 규칙을 적용하는 지식기반시스템을 채용한다.

II. Bandler-Kohout 곱

자연시스템과 인공시스템에 있어, 인지와 행동에 대한 분석과 종합의 새로운 방법론 및 계산적 방법으로 BK-곱 이론이 제안되었다. Bandler와 Kohout는 이진관계 연산을 확장하여 두 퍼지관계 내 각 원소들간의 의미적 포함관계를 나타내는 BK-곱[13][14][15][16]을 제안하였는데 이는 본 논문에서 제안한 지능형 선박을 위한 충돌회피시스템의 이론적 기반이 된다. \tilde{R} 을 유한 전체집합 A 에서 B 로의 퍼지관계, \tilde{S} 를 B 에서 C 로의 퍼지관계라 하면, 즉 $\tilde{R}: A \times B$ 과 $\tilde{S}: B \times C$ 가 주어지고 $a_i \in A, b_j \in B, c_k \in C$ 라 할 때, \tilde{R} 과 \tilde{S} 의 BK-곱은 A 의 원소 a_i 와 C 의 원소 c_k 의 의미상 포함관계를 나타내는 것으로 수식 (1)(2)(3)과 같이 세 가지 BK-곱 연산자를 이용하여 표현될 수 있다.

$$(\tilde{R} \triangleleft \tilde{S})_{ik} = \frac{1}{|B|} \sum (\tilde{R}_{ij} \rightarrow \tilde{S}_{jk}) \quad (1)$$

$$(\tilde{R} \triangleright \tilde{S})_{ik} = \frac{1}{|B|} \sum (\tilde{R}_{ij} \leftarrow \tilde{S}_{jk}) \quad (2)$$

$$(\tilde{R} \leftrightarrow \tilde{S})_{ik} = \frac{1}{|B|} \sum (\tilde{R}_{ij} \leftrightarrow \tilde{S}_{jk}) \quad (3)$$

$$a \rightarrow b = \min(1, 1 - a + b) \quad (4)$$

수식 (1)의 $(\tilde{R} \triangleleft \tilde{S})_{ik}$ 는 퍼지 후집합 $a_i \tilde{R}$ 이 퍼지 선집합 \tilde{S}_{jk} 에 포함되는 정도를 의미한다. 단위구간으로 [0, 1]의 값을 가지는 다치논리에서 기존의 조건연산자를 확장한 퍼지조건연산자 ‘→’를 정의 할 수 있다. 이 퍼지조건연산자는 두 퍼지관계들간의 새로운 퍼지관계를 생성시키는 연산에 적용된다. 사실상 새롭게 생성된 퍼지관계의 실질적 가치는 계산 시 사용되는 퍼지조건연산자의 선택에 달려 있다. 그러나 퍼지조건연산자는 현재 수십여 가지의 다양한 형태로 존재하며, 또한 각기 서로 다른 특징을 가지므로 이를 적용시킬 분야의 특성에 최적한 퍼지조건연산자를 선택하는 것이 중요하다. 본 논문에서는 퍼지삼각서브논리곱 $(\tilde{R} \triangleleft \tilde{S})_{ik}$ 의 계산을 위해 간결함(brevity)에 목적을 둔 수식 (4)의 Lukasiewicz 조건연산자를 사용하는데, 이 연산자는 가장 널리 알려져 사용되는 퍼지조건연산자이다.

III. 지능형 선박을 위한 충돌회피시스템

항해중인 지능형 선박이 접근하는 장애물을 식별하였을 경우, 충돌회피시스템은 충돌회피를 위한 적절한 행동을 결정함에 있어 최적성과 안정성이라는 두 가지 목적을 반드시 고려해야한다. 회피경로의 최적성은 충돌회피시스템에 의해 설정된 목표점까지의 경로가 소비에너지 관점에서 합리적이고 효율적이어야 함을 의미한다. 회피경로의 안정성은 충돌회피시스템에 의해 선정된 이동경로가 해상을 항해중인 모든 선박이 반드시 준수해야 하는 COLREGs를 준수함을 의미한다. 본 논문에서 제안하는 지능형 선박을 위한 충돌회피시스템은 그림 1과 같이 최적성의 구현을 위해 후보섹터집합 선정모듈(CSSM, Candidate Sector set Selection Module)

을, 그리고 안정성의 구현을 위해 지식기반시스템 모듈(KBSM, Knowledge-Based System Module)을 구성모듈로 가진다.

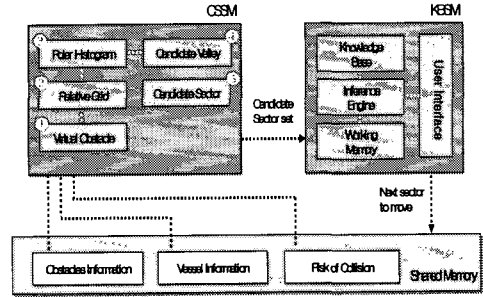


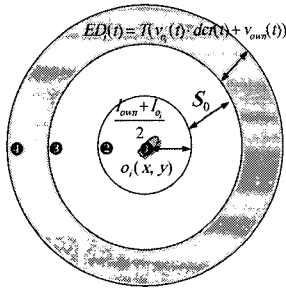
그림 1. 충돌회피시스템의 구성모듈
Fig. 1. The Component Module of Collision Avoidance System

3.1. 후보섹터집합 선정모듈(CSSM)

CSSM은 각 후보계곡을 구성하는 여러 섹터들 중 경로 최적성과 효율성을 보장하는 섹터들을 선정하여 후보섹터집합(candidate sector set)을 생성하는 것을 목적으로 하는 모듈이다. 그림 1과 같이 CSSM은 가상장애물, 상대격자, 플라히스토그램, 후보계곡, 그리고 후보섹터와 같은 다섯 개의 하위 모듈을 가진다.

3.1.1 가상장애물(virtual obstacle)과 상대격자(relative grid)

가상장애물모듈은 지능형 선박의 충돌회피 구현을 위한 첫 번째 단계로 레이더나 GPS와 같은 입력센서에서 획득한 장애물의 속력이나 추정길이 같은 ‘장애물 정보’와, 자신의 길이, 속력, 한계안전거리 같은 ‘자선의 정보’, 그리고 장애물이 자선에 미치는 ‘충돌위험도’에 기반하여 가상장애물을 그림 2와 같이 생성한다[17]. 가상장애물 생성은 수식 (5)와 같이 자선 및 타선의 길이 정보, 그리고 장애물에 대한 안전거리 정보가 반영된다. 장애물에 대한 안전거리는 수식 (6)과 같이 장애물과 자선의 속력 및 방향을 고려하여 충돌을 회피할 수 있는 최소거리와 수식 (7)에 표현된 단위시간 동안의 예상이동거리의 합으로 표현된다.



Virtual Obstacle $EO(t)$

그림 2. 가상장애물
Fig. 2. Virtual Obstacle

$$VO_i(t) = \frac{l_{omn} + l_{\alpha_i}}{2} + SD_i(t) \quad (5)$$

$$SD_i(t) = S_0 + ED_i(t) \quad (6)$$

$$ED_i(t) = T \cdot (v_{\alpha_i}(t) \cdot dcr(t) + v_{omn}(t)) \quad (7)$$

상대격자모듈은 크게 두 가지 역할을 수행하는데 첫 번째로는, 절대격자(fixed grid)에 표현된 장애물과 경유점의 위치값을 현시점에서 자선의 진행방향을 중심으로 매번 새롭게 설정되는 상대격자(relative grid)의 위치값으로 변환하는 것이며 둘째로는, 전 단계의 모듈에서 계산된 원형의 가상장애물을 상대격자에 표현(mapping)하는 것이다.

3.1.2 폴라히스토그램(polar histogram)

충돌회피시스템의 CSSM은 휴리스틱 탐색을 수행하는 모듈이다. 휴리스틱 탐색기법을 수행하기 위해서는 먼저 지능형 선박이 현시점에서 취할 수 있는 모든 행동에 대한 정의가 선행되어야 한다. 다시 말해, 지능형 선박이 다음 단위시간에 이동할 수 있는 섹터를 원소로 가지는 집합이 폴라히스토그램이라는 의미이다. 폴라히스토그램은 그림 3과 같이 자선의 현재위치를 중심으로 생성되는데 α 각도 크기의 n개의 섹터들로 구성된다. 각각의 섹터들은 해당 섹터에 포함되는 장애물의 위험정도를 의미하는 극장애물밀도(POD, Polar Obstacle Density)값을 가진다[18][19]. 특정 섹터가 높은 POD값을 가진다는 것은 지능형 선박이 다음 이동섹터로 해당 섹터를 선정하기에는 높은 위험도를 가진다는 것을 의미한다.

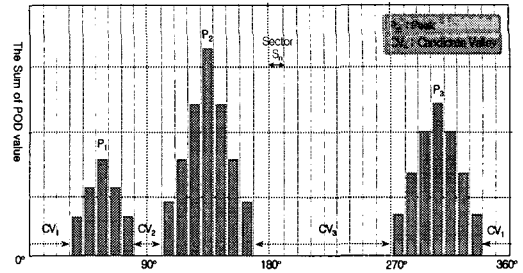


그림 3. 폴라히스토그램 모델
Fig. 3. Polar Histogram Model

3.1.3 후보계곡(candidate valley)

앞 단계에서 지능형 선박을 중심으로 생성된 폴라히스토그램에는 $360/\alpha$ 개의 섹터들이 존재한다. 특정 섹터는 그 섹터가 자선에 대해 가지는 위험도를 반영하는 POD값을 가진다. 어떤 섹터들은 낮거나 0의 POD값을 가지는 반면, 어떤 섹터들은 높은 POD값을 가진다. 그림 3에서처럼 높은 POD값을 가지는 섹터들의 모임을 ‘봉우리(peak)’라 하며 낮은 POD값을 가지는 섹터들의 모임을 ‘계곡(valley)’이라 정의한다. 여기서 봉우리는 지능형 선박이 이동할 경우 장애물과의 충돌을 야기할 수 있는 섹터들의 모임을 의미하며 계곡은 자선이 다음 이동섹터로 선택 가능한 안전한 섹터들의 모임을 의미한다. 특히 계곡들 중 특정값(threshold) 이하의 POD를 가지는 섹터들의 모임을 후보계곡이라 한다[19][20].

3.1.4 후보섹터(candidate sector)

후보계곡을 구성하는 섹터들과 봉우리를 구성하는 섹터들 사이에는 최적성과 회피안정성 관점의 에너지 단위를 매개로 하는 특정한 관계성이 존재한다. 즉, 후보계곡을 구성하는 섹터들은 자선이 선택 가능한 다음 이동경로들이고 봉우리를 구성하는 섹터들은 장애물의 사상(mapping)이므로, 이들 사이의 관계성을 분석·종합하면 후보계곡을 구성하는 섹터들 중 경로최적성과 회피안정성을 만족시키는 섹터가 존재한다는 의미이다. 바로 이러한 관계를 표현하고 분석할 수 있는 도구가 주어지면 ‘합리적이고 최적화된 경로를 통한 충돌회피’라는 지능형 선박을 위한 충돌회피시스템의 첫 번째 목적을 만족시킬 수 있다. 후보섹터 모듈의 역할은 각 후보계곡을 구성하는 여러 섹터들 중 경로최적성과 효율성을 보장하는 섹터를 선정하여 후보섹터집합을 생성하

는 것으로, 관계성 표현을 위해 전문가의 경험적 정보를 반영한 평가함수를 이용하며, 후보계곡을 구성하는 각 섹터들간의 의미적 포함관계를 분석하여 합리적인 다음이동경로 선정을 위한 도구로써 BK-곱에 기반한 알고리즘을 설계한다[21].

1) 평가함수(evaluation function)

평가함수는 현시점의 현재위치에서 지능형 선박이 다음단위시간에 이동 가능한 모든 섹터들의 경로최적성과 회피안전성을 소요경비 관점으로 변환시키는 역할을 하며 휴리스틱 탐색기법의 성능을 결정짓는 중요 요소이다. 평가함수는 국지경비함수(local cost function), 회피거리경비함수(avoidance distance cost function), 잔여거리경비함수(remainder distance cost function)의 세 부분으로 구성되며 수식 (8)과 같이 표현된다.

$$EF(CS_{n+1}) = LC(S_n, CS_{n+1}) - ADQ(CP_{n+1}) + RDQ(CP_{n+1}, P_{goal}) \quad (8)$$

$$LC(S_n, CS_{n+1}) = Horz_Dis(P_n, CP_{n+1}) + RC(S_n, CS_{n+1}) \quad (9)$$

$$ADQ(CP_{n+1}) = (Avoid_L(CP_{n+1}) + Avoid_R(CP_{n+1})) \times k_{avoid} \quad (10)$$

$$RDQ(CP_{n+1}, P_{goal}) = k_{horiz} * \sqrt{(X_{goal} - X_{n+1})^2 + (Y_{goal} - Y_{n+1})^2} \quad (11)$$

여기서, P_n : 해양자율항체의 현재위치, S_n : 해양자율항체의 현재상태(= P_n, θ), CP_{n+1} : 섹터의 위치, CS_{n+1} : 섹터의 상태, P_{goal} : 목표지점이다.

2) BK-곱을 이용한 휴리스틱 탐색기법의 절차

본 논문에서 제안하는 퍼지관계곱 기반 휴리스틱 탐색기법은 크게 네 단계로 구성된다. 첫 번째 단계에서는 수식 (12), (13)과 같이 봉우리섹터 집합 P , 후보계곡섹터 집합 V , 그리고 봉우리섹터 집합과 후보계곡섹터 집합의 퍼지관계 \tilde{R} 을 정의한다. 두 번째 단계에서는 수식 (14)와 같이 퍼지관계 \tilde{R} 과 그 전치행렬 \tilde{R}^T 에 삼각서브곱연산(triangular sub-product) \triangleleft 을 적용하여 새로운 퍼지관계 \tilde{T} 를 생성한다. 세 번째 단계에서는 수식 (15)와 같이 퍼지관계 \tilde{T} 를 이진관계행렬로 변환하기 위하여 \tilde{T} 에 알파절단을 적용하여 C_α 를 산출한다. 마지막 단계는 수식 (16)에서처럼 후보계곡섹터 집합 S 의 원소

들간 부분순서를 도식화하는 하셋 다이어그램을 작성하여 계층의 최상위 섹터를 후보섹터집합의 원소로 선정한다.

$$V = \{s_1, s_2, \dots, s_k\}, \quad P = \{o_1, o_2, \dots, o_i\} \quad (12)$$

$$\tilde{R} = V \times P = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1i} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2i} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{k1} & r_{k2} & \dots & r_{ki} \\ q & o_2 & \dots & o_i \end{bmatrix} \begin{matrix} s_1 \\ s_2 \\ \vdots \\ s_k \end{matrix} \quad (13)$$

$$\tilde{T} = \tilde{R} \triangleleft \tilde{R}^T = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & \dots & f_{1k} \\ f_{21} & f_{22} & \dots & f_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{k1} & f_{k2} & \dots & f_{kk} \end{bmatrix} \begin{matrix} s_1 \\ s_2 \\ \vdots \\ s_k \end{matrix} \quad (14)$$

$$C_\alpha = \alpha_cut(\tilde{T}, \alpha) = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1k} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{k1} & b_{k2} & \dots & b_{kk} \end{bmatrix} \begin{matrix} s_1 \\ s_2 \\ \vdots \\ s_k \end{matrix} \quad (15)$$

$$H(C_\alpha) \quad (16)$$

3.2. 지식기반시스템 모듈(KBSM)

KBSM 모듈은 후보섹터집합의 원소 중 국제해상충돌예방규칙에 가장 적합한 섹터를 선정하여 지능형 선박의 다음 이동섹터로 사용한다. 선박간의 충돌방지를 위한 체계 있는 법규는 1863년 영국이 처음으로 제정하였고 그것은 “해상에서의 충돌 예방을 위한 규칙(Regulation for Preventing Collisions at Sea)”이었다. 이후 많은 개정을 거쳐 1972년 10월에 영국의 런던에서 국제해사기구의 초청에 의하여 각국 정부대표가 개정회의를 개최하고 새로운 “국제해상충돌예방규칙”을 약정하여 현재까지 실시하고 있다[2]. 공간탐색방법에 기반한 충돌회피는 자선의 주위에 존재하는 모든 장애물을 고려할 수 있는 장점을 지니는 반면 모든 선박이 준수하여야 하는 COLREGs를 적용하지 못하여 비현실적인 피항행위를 생성하게 되는 문제점을 지닌다. 이러한 이유로, 본 논문에서는 지능형 선박을 위한 충돌회피시스템에 COLREGs를 적용할 수 있는 KBSM 모듈을 추가한다.

3.2.1 조우상황(encounter situation)

국제해상충돌예방규칙을 장애물회피를 위한 의사결

정에 사용하기 위해서는 각각의 선박이 서로 조우하는 형태에 대한 정의가 선행되어야 한다. 본 논문에서는 Koyama가 지식기반시스템[3] 개발에 사용한 두 선박의 조우 상황들을 참조하여 그림 4에서처럼 ‘정면으로 마주치는 상태(head-on situation)’, ‘추월상태(overtaking situation)’, 그리고 ‘횡단상태(crossing situation)’로 자신과 타선의 조우상황을 정의한다.

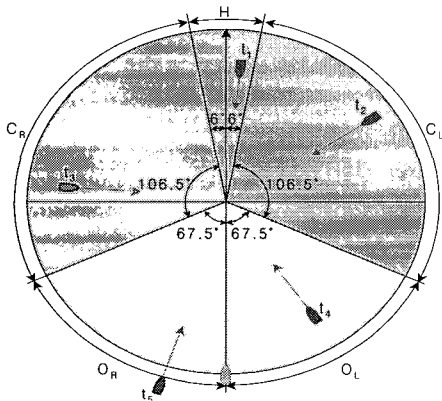


그림 4. 두 선박의 조우상황
Fig. 4. Encounter Situation of Two Vessels

3.2.2 COLREGs에 의거한 선박의 행동방침

영역전문가가 보유한 전문지식, 즉 COLREGs를 지능형 선박의 충돌회피에 적절하게 적용하기 위해서는 타선과 조우한 선박이 취해야 하는 충돌회피를 위한 동작에 대한 규정이 필요하다. COLREGs 제13조에는 ‘추월에 관한 규칙’이, 제14조에는 ‘정면으로 마주치는 상태에 관한 규칙’이, 그리고 제15조에는 ‘횡단상태에 관한 규칙’이 명시되어 있는데 표 1에 이러한 규칙들을 정리하였다[2]. 추월상태에서 다른 선박의 정황후 22.5도 후방에서 타선에 접근하는 선박을 추월선(overtaking vessel)이라 하며 추월 당하는 선박을 피추월선(overtaken vessel)이라 한다. 또한 횡단상태에서 타선을 우현으로 보는 선박을 피항선(give-way vessel)이라 하며, 타선을 좌현으로 보는 선박을 유지선(stand-on vessel)이라 한다.

표 1. 충돌회피를 위한 선박의 행동방침
Table 1 Action to Avoid Collision

Situation	Bearing	Action to avoid collision	
Overtaking (Rule 13)	More than 22.5° abaft beam	Overtaking vessel	Keep out of the way of overtaken vessel
		Overtaken vessel	Keep the current course
Head-On (Rule 14)	Less than 6° on the bow	Each vessel	Alter course to starboard
Crossing (Rule 15)	More than 6° & Less than 106.5°	Give-way vessel	Alter course to starboard
		Stand-on vessel	Keep the current course

표 2. 시뮬레이션 시나리오
Table 2 Simulation Scenarios

#	Situation	Num. of Obst.	Scenario		
			Description	P_{start}	P_{goal}
S1	No Obstacle	0	No Obstacle Situation	(0, 0)	(-5100, 6000)
S2	Head-on	1	Head-on Situation	(0, 0)	(-1000, 10000)
S3	Crossing	1	Crossing Situation	(0, 0)	(-1000, 10000)
S4	Complex	2	Head-on + Overtaking	(0, 0)	(-1000, 10000)
S5	Random I	3	Focused to One-point	(0, 0)	(500, 8000)
S6	Random II	5	Random Situation	(0, 0)	(1000, 10000)

IV. 시뮬레이션 및 분석

제안된 충돌회피시스템의 성능검증을 위해 COLREGs에 명시된 여러 가지 조우상황을 설정한 시나리오를 이용하여 '최적성'과 '안정성' 관점에서 시뮬레이션을 수행하고 그 결과를 A^* 탐색기법과 비교한다. 두 기법의 공정한 비교를 위해 시뮬레이션은 동일한 환경 조건과 장애물배치 아래에서 이루어진다.

4.1. 측정척도 및 시나리오

성능검증을 위한 측정척도는 경로의 최적성'과 안정성이라는 두 관점으로 집약된다. 시작점에서 목표점까지의 경로 탐색에 소모되는 경비의 총합을 경로경비라 정의하며, 이것은 탐색기법의 최적성을 측정하는 기준이 된다. 동일한 경로를 탐색할 경우 보다 적은 경로경비가 소모되는 경로를 산출하는 탐색기법이 보다 최적화된 기법이다. 제안한 충돌회피시스템의 최적성 검증을 위해 A^* 알고리즘을 이용한 시스템과 경로경비를 비교하여 최적화 정도를 분석한다. 또 다른 성능 검증의 척도인 안정성 검증을 위해서는 산출된 선박의 경로가 COLREGs에 명시되어 있는 충돌을 회피하기 위한 규칙을 준수하는지를 조사한다. 이러한 시뮬레이션을 수행하기 위해 표 2와 같이 COLREGs에 명시되어 있는 3가지의 조우상황인 정면으로 마주치는 상태, 횡단상태, 그리고 추월상태를 적절하게 조합한 여섯 가지의 시나리오를 설정하였다.

4.2. 평가 결과 및 성능분석

시나리오 S1에서 S6에 대해 제안된 충돌회피시스템과 A^* 알고리즘에 기반한 시스템이 산출한 각각의 경로를 국지경비(LC)와 방향전환경비(RC) 관점에서 정리한 결과가 표 3에 보여진다. 국지경비는 지능형 선박의 현재상태 S_n 으로부터 다음 단위시간에 선택 가능한 섹터 상태 CS_{n+1} 까지 이동시 소모되는 에너지경비를 계산한다. 시작지점에서 목표지점까지 각 단위시간별 국지경비의 합계를 구하면 지능형 선박이 시작점 P_{start} 에서 목표점 P_{goal} 까지 향하는데 소모되는 경비의 총합을 구할 수 있고 이를 충돌회피시스템의 최적성 판단에 이용한다. 방향전환경비는 지능형 선박이 목표점까지 향해를 하면서 방향전환에 얼마만큼의 에너지를 소모하였

는가를 판별할 수 있는데, 이것은 얼마나 빈번하게 해당 각의 변화가 발생했는지를 평가할 수 있는 기준이 된다. 전반적인 시뮬레이션 결과를 살펴보면 제안된 충돌회피시스템이 생성한 국지경비는 A^* 알고리즘 기반 시스템의 경로경비와 거의 동일하거나 최대 20.7%이내의 감소치를 보였다. 제안된 충돌회피시스템의 국지경비가 대부분 적다는 이러한 흥미로운 사실은 두 시스템이 가지는 후보노드모델의 다른 형태에 기인한다. A^* 알고리즘이 이차원의 격자모델에 기반한 후보노드를 채용하는데 반해, 제안된 충돌회피시스템은 플라히스토그램 모델에 기반한 후보노드를 채용하기 때문이다. 방향전환경비 관점에서는 시나리오 S6을 제외하고는 제안한 충돌회피시스템의 경비가 최대 118.9%의 증가치를 보였다.

성능비교를 위한 두 번째 측정척도인 안정성은 탐색기법이 산출한 경로가 COLREGs를 준수하는지의 여부를 판별하여 평가할 수 있다. 그림 5와 6은 시나리오 S3에 대한 두 충돌회피시스템의 피항행위 결과를 보여준다. 횡단하는 타선에 대해 이루어지는 충돌회피시스템의 첫 번째 결정은 그림 5처럼 오른쪽에 존재하는 섹터를 다음이동섹터로 선정하는 것이다. 목표지점을 왼편에 두고 이루어진 이러한 결정은 COLREGs 제15조에 명시되어 있는 규칙을 준수하는 적절한 선택이다. 반면 그림 6에 보여지는 A^* 알고리즘 기반 시스템의 시뮬레이션 결과를 보면 COLREGs를 전혀 반영하지 못하여 목표지점이 존재하는 왼쪽으로 변침하는 것을 볼 수 있다. 그림 7과 8은 시나리오 S4에 대해 두 충돌회피시스템의 피항행위 결과를 보여준다. P_{start} 에서 이루어지는 충돌회피시스템의 첫 번째 결정에서 선택 가능한 섹터는 침로변경이 없는 12시 방향의 섹터와 정면으로 마주치는 상태에 놓여있는 장애물_2를 회피하기 위한 오른쪽의 섹터이다. 시나리오 S4와 같이 여러 조우상황이 조합된 경우에는 충돌위험도가 높은 장애물에 대해 국제해상충돌예방규칙을 적용한다. 이러한 이유로 제안된 충돌회피시스템은 충돌위험도가 더욱 높은 장애물_1에 대해 국제해상충돌예방규칙 제13조를 적용하여 침로변경이 없는 정면의 섹터를 다음이동섹터로 선정한다. 반면 그림 8에 보여지는 A^* 알고리즘 기반 시스템의 시뮬레이션 결과를 보면 목표지점이 존재하는 왼편으로 변침을 하여 후방에서 추월하는 장애물_1과 충돌하는 것을 볼 수 있다.

표 3. 최적성 관점의 시뮬레이션 결과

Table 3 The Result of Simulation in view of Optimality

#	Type of CA	Measures			
		LC		RC	
		Cost	%	Cost	%
S1	A^*	19186.3	7.4	632.4	
	proposed	17863.9		817.2	29.2
S2	A^*	10783.1	12.8	286.0	
	proposed	9559.5		496.0	73.4
S3	A^*	11626.0	2.5	264.0	
	proposed	11341.2		578.0	118.9
S4	A^*	Collision with Overtaking Vessel			
	proposed	8790.8		96.0	
S5	A^*	8451.7	5.8	286.0	
	proposed	7992.1		538.0	88.1
S6	A^*	10783.1	20.7	286.0	
	proposed	8931.1		211.0	-35.5

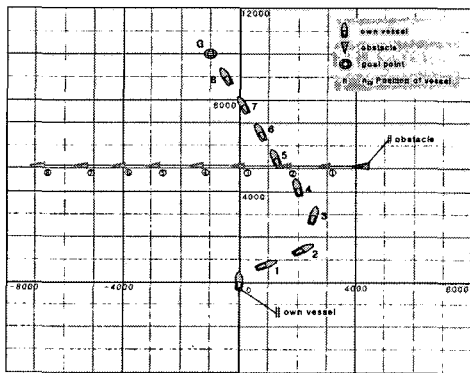


그림 5. S3에 대한 제안된 CA의 회피경로
Fig. 5. Avoidance Path of Proposed CA for S3

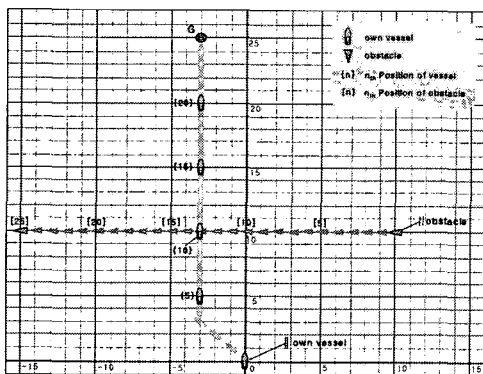


그림 6. S3에 대한 A^* CA의 회피경로
Fig. 6. Avoidance Path of A^* CA for S3

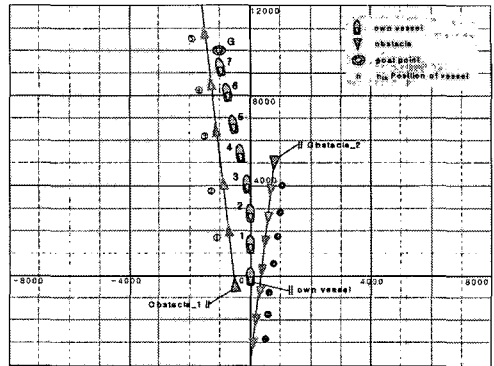


그림 7. S4에 대한 제안된 CA의 회피경로
Fig. 7 Avoidance Path of Proposed CA for S4

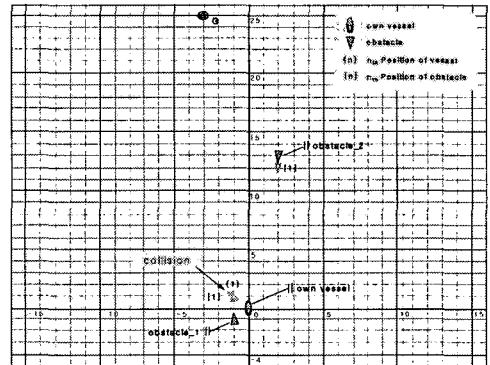


그림 8. S4에 대한 A^* CA의 회피경로
Fig. 8 Avoidance Path of A^* CA for S4

V. 결론

본 논문에서는 최단의 경로를 통한 항해로 최소의 에너지 소비를 추구하는 ‘최적성’과 COLREGs를 반드시 준수하여 선박간의 충돌을 방지하는 ‘안정성’을 동시에 만족시키기 위해 후보색터집합 선정모듈과 지식기반시스템 모듈로 구성된 지능형 선박을 위한 충돌회피시스템을 제안하였다. 또한 시뮬레이션 결과에 대한 분석을 통해 BK-곱 및 COLREGs 기반 충돌회피시스템은 ‘최적성’과 ‘안정성’이라는 두 가지 목표를 모두 만족함을 알았다. 최적성 관점의 시뮬레이션 결과분석에서는 제안한 충돌회피시스템이 플라히스토그램이라는 특수한 후보노드 모델을 채용함으로써 2차원 격자모델을 사용하는 A^* 알고리즘 보다 최대 20.7% 더욱 최적화된 경로를

통한 충돌회피를 보였다. 또한 안정성 관점의 시물레이션 결과분석에서는 COLREGs를 반영하지 못하는 A* 알고리즘이 시나리오 S4에서 장애물과 충돌을 일으킨 반면, 제안한 충돌회피시스템은 모든 시나리오에 있어 COLREGs를 준수하며 합리적이고 안전한 충돌회피를 수행하였다. 본 논문에서 제안한 지능형 선박을 위한 충돌회피시스템은 다음과 같은 특징을 가진다.

- 후보계곡을 구성하는 섹터와 봉우리를 구성하는 섹터 간의 관계성을 고려하여 다음이동섹터를 선정할 수 있다.

- 폴라히스토그램을 후보노드 모델로 채용함으로써 A* 알고리즘 기반 시스템보다 더욱 최적화된 경로를 통한 충돌회피가 가능하다.

- 충돌회피를 위한 의사결정에 해상을 항해하는 모든 선박이 준수해야 하는 COLREGs를 적용할 수 있어 보다 사실적인 충돌회피가 가능하다.

- A* 알고리즘이 모든 장애물을 고려한 전역최적화를 수행하는 반면 제안한 충돌회피시스템은 현재 위치에서 탐지된 장애물만을 고려하는 지역최적화를 수행하기 때문에 실시간 충돌회피시스템으로 활용 가능하다.

참고문헌

- [1] Samuelides, E. and Frieze. P., "Experimental and Numerical Simulation of Ship Collisions," Proc. 3rd Int. Congress on Marine Technology, Vol. 1, Greece, 1984.
- [2] 윤점동, 국제해상충돌예방규칙 및 관련된 국내법규해설, 세종출판, 서울, 2000.
- [3] Koyama, T. and Yan, J., "An Expert System Approach to Collision Avoidance," 8th Ship Control System Symposium, Hague, 1987.
- [4] Hasegawa, K., Kouzuki, A., Muramatsu, T., Komine, H. and Watabe, Y., "Ship Auto-navigation Fuzzy Expert System (SAFES)," Journal of the Society of Naval Architecture of Japan, Vol. 166, 1989.
- [5] Zhao, J., Tan, M., Price, W. G., and Wilson, P. A., "DCPA Simulation Model for Automatic Collision Avoidance Decision Making Systems using Fuzzy Sets," Proceedings of OCEANS'94, Vol. 2, pp. 244-249, 1994.
- [6] Yang, C., Phan, S., Kuo, P., and Lin, F. O., "Applying Collision Avoidance Expert System to Navigation Training System as an Intelligent Tutor," LNCS, No. 2070, pp. 941-948, 2001.
- [7] Lee, H. J., and Rhee, K. P., "Development of collision avoidance system by using expert system and search algorithm," International shipbuilding progress, Vol. 48, No.3, pp. 197-212, 2001.
- [8] Imazu, H. and Koyama, T., "The Optimization of the Criterion for Collision Avoidance Action," Journal of Japan Institute of Navigation, Vol. 71, 1984.
- [9] Lee, H. J., Yoo, W. J., and Rhee, K. P., "Development of Collision Avoidance System by Fuzzy Theory," The Second Japan-Korea Joint Workshop on Ship & Marine Hydrodynamic, Osaka, 1993.
- [10] Hong, X., Harris, C. J., and Wilson, P. A., "Autonomous Ship Collision Free Trajectory Navigation and Control Algorithms," Proceedings ETFA'99, Vol. 2, pp. 923-929, 1999.
- [11] Zeng, X. M., and Ito, M., "Planning a Collision Avoidance Model for Ship using Genetic Algorithm," Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man & Cybernetics, Vol. 4, pp. 2355-2360, 2001.
- [12] Harris, C. J., and Hong, X., "Neurofuzzy Approaches to Intelligent Collision Avoidance Problems in (semi)Autonomous Transportation," IFSA World Congress and 20th NAFIPS International Conference, Vol. 1, pp. 517-512. 2001.
- [13] Bandler, W., and Kohout, L. J., "Fuzzy Relational Products as a Tool for Analysis and Synthesis of the Behaviour of Complex natural and Artificial System," in: Wang, S. K, and Chang, P. P. eds., Fuzzy Sets: Theory and Application to Analysis and Information Systems, Plenum Press, New York, pp. 341-367, 1980.
- [14] Bandler, W., and Kohout, L. J., "Semantics of Implication Operators and Fuzzy Relational Products," Intl. Journal of Man-Machine Studies, 1980.

[15] Kohout, L. J., Keravnou, E., and Bandler, W., "Automatic Documentary Information Retrieval by Means of Fuzzy Relational Products," In Gaines, B. R., Zadeh, L. A. and Zimmermann, H. J., editors Fuzzy Sets in Decision Analysis, pp. 308-404, North-Holland, Amsterdam, 1984.

[16] Bandler, W., and Kohout L. J., "Fuzzy Power Sets and Fuzzy Implication Operator," Fuzzy Set and System Vol. 4, pp. 13-30, 1980.

[17] Lozano-Perez, T., and Wesley, M. A., "An Algorithm for Planning Collision Free Paths among Polyhedral Obstacles," Communications, Vol. ACM-22(10), pp. 560-570, 1979.

[18] Borenstein, J., and Koren, Y., "Real-time Obstacle Avoidance for Fast Mobile Robots," IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics, Vol. 19, Oct., 1989.

[19] Borenstein, J., and Koren, Y., "The Vector Field Histogram - Fast Obstacle Avoidance for Mobile Robots," IEEE Journal of Robotics and Automation, 1991.

[20] Borenstein, J., and Koren, Y., "Real-Time Obstacle Avoidance for Fast Mobile Robots in Cluttered Environments," IEEE Internatioal Conference of Robotics and Automation, pp. 572-577. 1990.

[21] Lee, Y. I. and Kim, Y. G., "An Intelligent Collision Avoidance System for AUVs using Fuzzy Relational Products," Information Sciences, Vol. 158, pp. 209-232, 2004.

저자소개

강 성 수(Sung-Soo Kang)



1981년 홍익대학교 전자계산학과 (이학사)
1987년 부산대학교 전산학전공 (공학석사)

2007년 경상대학교 컴퓨터학과(공학박사)
1988년~현재 진주산업대학교 컴퓨터공학부 교수
※ 관심분야: 인공지능, 퍼지, 전문가시스템, ERP

이 영 일(Young-il Lee)



1999년 경상대학교 컴퓨터학과 (이학사)
2001년 경상대학교 컴퓨터학과 (공학석사)

2005년 경상대학교 컴퓨터학과(공학박사)
※ 관심분야: 퍼지관계곱, 충돌회피시스템, 자율항해시스템, 무인수중로봇

정 희(Hee Jung)



1996년 진주산업대학교 산업경제학과 (경제학사)
2000년 창원대학교 전자계산학과 (이학석사)

2003년~현재 경상대학교 컴퓨터학과(박사과정)
※ 관심분야: 인공지능, 충돌회피시스템, 자율항해시스템

김 용 기(Yong-Gi Kim)



1978년 서울대학교 전기공학과 (공학사)
1987년 University of Montana 전산학과(MS)

1991년 Florida State University 전산학과(Ph.D)
1992년~현재 경상대학교 컴퓨터학과 교수
※ 관심분야: 퍼지시스템, 지능시스템, 무인수중로봇