

# 자율수중운동체의 상세경로설정기법을 위한 퍼지조건연산자의 비교

## Comparison of Fuzzy Implication Operators by means of a Local Path-Planning of AUVs

이영일, 김용기

경상대학교 컴퓨터과학과

Young-il Lee, Yong-Gi Kim

Department of Computer Science, Gyeongsang National University

E-mail : baram@ailab.gsnu.ac.kr

### 요 약

본 논문에서는 자율수중운동체(AUV, Autonomous Underwater Vehicle)의 실시간 충돌회피에 적용되는 휴리스틱 탐색기법에 적합한 퍼지조건연산자와 알파절단(alpha-cut)의 선택에 관해 논한다. 퍼지조건연산자와 알파절단은 두 퍼지관계에서 새로운 퍼지관계를 생성시키는 퍼지삼각논리의 연산에 적용되는데 이것은 휴리스틱탐색기법의 이론적 기반이 된다. 본 논문은 평가함수를 이용한 새로운 휴리스틱탐색기법을 설계하고, 이에 가장 적합한 퍼지조건연산자와 알파절단을 제안한다. 제안된 퍼지조건연산자와 알파절단의 검증을 위해 경로경비와 합리적인 경로를 생성하는 알파절단의 개수 관점에서 모든 경우의 퍼지조건연산자와 알파절단에 대해 시뮬레이션 한다.

### 1. 서론

실시간 환경정보가 알려지지 않은 해저환경에서 자율수중운동체가 주어진 임무를 원만히 수행하기 위해서는 영역전문가 수준의 임무계획(mission-planning), 계획제어(planning-control), 의사결정(decision-making)과 같은 고수준기능(high-level function)을 보유한 지능항해시스템(intelligent navigation system) 관련기술을 필요로 한다. 대부분의 지능항해시스템은 주어진 목표점까지의 안전하고 최적화된 경로산출을 위해 전체경로-상세경로[1]에 기반 한 항해경로 설정 방식을 사용한다. 전체경로설정(global path-planning)이란 알려져 있는 환경 기반정보에 근거하여 시작점에서 목표점까지의 경유점을 결정하는 것이며, 상세경로설정(local path-planning)은 각 경유점 사이에서 알려지지 않은 장애물을 만나거나 예상치 못한 임무변경이 발생할 경우 새로운 경로를 재산출하는 것이다.

본 논문에서는 후보노드들간의 관계성을 장애물회피에 적용시킨 퍼지관계공급[2][3][4][5] 기반 휴리스틱 탐색기법을 제안한다. 사실상, 퍼지관계공급의 실질적 가치는 계산에 사용되는 특정 퍼지조건연산자(fuzzy

implication operator)에 달려 있는데 퍼지조건연산자는 다양한 형태로 존재하며 각각의 개별적 특징을 지닌다. 따라서 특정 응용분야에 적용될 적절한 조건연산자를 선정하는 것은 매우 중요한 요소이다. 다수의 조건연산자들에 대한 유용한 연구가 다양한 관점에서 이루어졌는데, 특히 Sembli와 Mamdani는 조건연산자들간의 특징을 비교하였고[6], Bandler와 Kohout은 각 연산자들의 의미를 분석하고 그들간의 차이점을 규명하였다[3].

본 논문에서는 자율수중운동체의 휴리스틱 탐색기법에 가장 적절한 퍼지조건연산자와 알파절단을 제안하며, 상세경로설정 시뮬레이션을 통하여 최적성(optimality)과 안정성(safety) 관점에서 검증한다.

### 2. 퍼지관계공급 기반 휴리스틱 탐색

휴리스틱 탐색기법은 실시간 정보가 미비한 수중환경에서 운항되는 자율수중운동체를 위해 설계된다. 이 탐색기법은 목표지점까지의 준최적경로를 산출하는 정보가있는 탐색전략(informed search strategy)으로 충돌회피에 적용되는 회피정책을 반영한 경험정보에 기반하여 설계된다.

2.1 평가함수

평가함수는 현재위치에서 이동가능한 모든 후보노드들의 경로최적성과 안전성을 소요경비 관점으로 변환시키며 이들 각 후보노드의 평가함수값은 퍼지관계급에 기반한 휴리스틱 탐색기법의 입력으로 사용된다. 평가함수는 휴리스틱 탐색기법의 성능을 결정짓는 중요한자이므로 다음과 같은 경험적 정보를 잘 반영할 수 있도록 설계하는 것이 중요하며 수학적으로 표현하면 수식 (1)와 같다.

- 가능한 한 가장 가까운 후보노드로 이동
- 가능한 한 현재의 방향과 깊이를 유지
- 장애물로부터 거리가 먼 후보노드로 이동
- 가능한 한 목표지점으로 이동

$$EF(CS_{n+1}) = LC(S_n, CS_{n+1}) - ADC(O_n, CP_{n+1}) + RDC(CP_{n+1}, P_{goal}) \tag{1}$$

$$LC(S_n, CS_{n+1}) = TC(P_n, CP_{n+1}) + RC(S_n, CS_{n+1}) \tag{2}$$

$$TC(P_n, CP_{n+1}) = Horiz\_Dist(P_n, CP_{n+1}) + 1.2 * Depth\_change(P_n, CP_{n+1}) \tag{3}$$

$$ADC(O_n, CP_{n+1}) = k_{avoid} * Horiz\_Num(O_n, CP_{n+1}) + k_{avoid} * Verti\_Num(O_n, CP_{n+1}) \tag{4}$$

$$RDC(CP_{n+1}, P_{goal}) = k_{horiz} * \sqrt{(X_{goal} - X_{n+1})^2 + (Y_{goal} - Y_{n+1})^2} + k_{depth} * (|Z_{goal} - Z_{n+1}| * 1.2) \tag{5}$$

단,  $P_n, CP_{n+1}, S_n, CS_{n+1}, O_n$ 은 각각 현 잠수정의 위치,  $CS_{n+1}$ 의 위치, 현 잠수정의 상태(= $\theta, P_n$ ), 후보노드의 상태, 장애물의 현재위치를 의미한다[1].

수식(2)의 국지경비함수(LC)는 자율수중운동체가 현재상태  $S_n$ 로부터 후보노드상태  $CS_{n+1}$ 까지 이동시 소요되는 경비를 계산하는 것으로 수식(3)의 병진이동경비(TC)와 표 1의 방향전환경비(RC)[1]의 합이다. 이는 가능한 한 자율수중운동체의 방향과 깊이를 유지하며 가장 가까운 후보노드로 이동하려는 경험적 정보를 반영한다. 수식(4)의 회피거리경비함수(ADC)는 후보노드 상의 장애물과 그 외 다른 후보노드사이의 회피거리를 계산하여 에너지단위로 변환하는 역할을 하는데 이는 자율수중운동체를 가능한 한 장애물로부터 멀어지게 하려는 경험적 정보를 반영한다. 수식(5)의 잔여거리경비함수(RDC)는 각 후보노드로부터 목표지점까지의 최소잔여거리를 계산하여 에너지 단위로 변환하는 역할을 하는데 이는 가능한 한 자율수중운동체를 목표지점에 가까운 후보노드로 향하도록 하는 경험적 정보를 반영한다.

회전각도(degrees)	0	45	90	135	180
방향전환경비(RC)	0	7	35	70	140

표 1 방향전환 경비

2.2 휴리스틱 탐색기법의 절차

환경정보가 알려지지 않은 해저환경을 자율수중운동체가 영역전문가의 인식·결정·행동을 모방하여 항행하기 위해서는 영역전문가의 경험적 정보를 표현, 적용할 수 있는 도구가 필요하다. 이러한 목적으로 퍼지관계급 기반 휴리스틱 탐색기법을 사용한다.

휴리스틱 탐색기법은 4단계의 처리절차로 구성된다. 첫 번째 단계에서는 수식 (6)(7)(8)와 같이 후보노드 집합  $S$ , 장애물 집합  $O$ , 그리고 후보노드와 장애물의 퍼지관계  $\tilde{R}$ 을 정의한다. 후보노드 집합은 총 17개의 원소로 구성되며 다음 이동 가능한 노드를 의미한다. 장애물 집합은 17개의 후보노드 중 센서에 의해 장애물이 있다고 탐지된 후보노드들의 집합을 의미한다. 후보노드와 장애물의 퍼지관계  $\tilde{R}$ 은 후보노드 상에 위치한 특정 장애물에 대해 다른 후보노드들이 가지는 위험도를 산출한 평가함수값을 [0, 1]사이의 퍼지값으로 변환한 후 이를 구성요소로 갖는다.

두 번째 단계에서는 수식 (9)와 같이 퍼지관계  $\tilde{R}$ 과 그 전치행렬  $\tilde{R}^T$ 에 퍼지관계급 연산  $\triangleleft$ 을 적용하여 새로운 퍼지관계  $\tilde{T}$ 를 생성한다.  $\tilde{T}$ 는 후보노드 집합  $S$ 와 후보노드 집합  $S$ 의 관계가 되고 이는 후보노드 집합 원소들간의 중속정도를 의미한다.

세 번째 단계에서는 수식 (10)와 같이 퍼지관계  $\tilde{T}$ 를 이진관계행렬로 변환하기 위하여  $\tilde{T}$ 에 알파절단( $\alpha$ -cut)을 적용하여  $C_\alpha$ 를 산출한다.

네 번째 단계에서는 수식 (11)과 같이  $C_\alpha$ 에 하세 다이어그램(hasse diagram)을 적용하여 후보노드들에 관한 계층구조를 작성하고 그 계층의 최상위 노드를 다음 이동노드로 선정한다.

$$S = \{s_1, s_2, \dots, s_k\} \tag{6}$$

$$O = \{o_1, o_2, \dots, o_i\} \tag{7}$$

$$\tilde{R} = S \times O = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1i} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2i} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{k1} & r_{k2} & \dots & r_{ki} \\ q & o_2 & \dots & o_i \end{bmatrix} \tag{8}$$

$$\tilde{T} = \tilde{R} \triangleleft \tilde{R}^T = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & \dots & f_{1k} \\ f_{21} & f_{22} & \dots & f_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{k1} & f_{k2} & \dots & f_{kk} \\ s_1 & s_2 & \dots & s_k \end{bmatrix} \tag{9}$$

$$C_\alpha = \alpha\_cut(\tilde{T}, \alpha) = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1k} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{k1} & b_{k2} & \dots & b_{kk} \\ s_1 & s_2 & \dots & s_k \end{bmatrix} \tag{10}$$

$$H(C_\alpha) \tag{11}$$

### 3. 퍼지조건연산자와 알파절단

단위구간(unit interval)으로  $[0, 1]$ 의 값을 가지는 다치논리(many-valued logic)에서 기존의 조건연산자(classical material implication)를 확장한 퍼지조건연산자 ‘ $\rightarrow$ ’를 정의 할 수 있다. 퍼지 조건연산자는 두 퍼지관계들간의 새로운 퍼지관계를 생성시키는 퍼지삼각논리곱 연산에 적용된다. 사실 이러한 새로운 관계를 생성시키는 의미 있는 다수의 방법이 존재하며, 실질적 가치는 계산 시 사용되는 퍼지조건연산자의 선택에 달려 있다.

Bandler와 Kohout는 퍼지 멱집합 이론의 관점에서 6개의 퍼지조건연산자에 대한 기본특성을 연구하였으며[7][8][9], R. C. Willmott는 Zadeh[10]에 의해 사용된 7번째의 퍼지조건연산자를 조사하고 자신이 고안한 8번째 연산자를 추가하였다. 8개의 다양한 특징을 가진 조건연산자가 퍼지화정도에 따라 수식(12)에서 (20)에 보여진다[11].

연산자 1:S#과 2:S는 퍼지화 된 결론을 도출하지 못하므로 퍼지조건연산자로 보기가 어렵다. 따라서 본 논문에서 이루어지는 시뮬레이션에서는 제외한다.

알파절단은 주어진 퍼지관계를 이진관계행렬로 변환시킨다.  $\tilde{R}$ 을  $X \times Y$ 위에서의 퍼지관계라 하고  $\alpha$ 가  $0 \leq \alpha \leq 1$ 이라면,  $\tilde{R}$ 의 알파절단관계는 수식 (21)와 같다[16]. 알파절단값의 정도에 따라 다양한 이진관계를 생성할 수 있는데 이는 운항 시 소비되는 에너지경비 관점에 기반 한 후보노드들간의 관계성(relationship)이 알파절단의 선정에 달려있음을 의미한다. 따라서 적절한 퍼지관계곱과 알파절단을 선정하는 것은 제안된 휴리스틱탐색기법의 성능을 결정하는 매우 중요한 요소이며 본 논문에서 각 퍼지관계곱에 대해 모든 경우의 알파절단에 대해 모의실험을 수행하는 이유이다.

$$a \rightarrow_1 b = \begin{cases} 1, & \text{iff } a \neq 1 \text{ or } b = 1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (12)$$

$$a \rightarrow_2 b = \begin{cases} 1, & \text{iff } a \leq b \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (13)$$

$$a \rightarrow_3 b = \begin{cases} 1, & \text{iff } a \leq b \\ b, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (14)$$

$$a \rightarrow_4 b = \min\left(1, \frac{b}{a}\right) \quad (15)$$

$$a \rightarrow_4 b = \min\left(1, \frac{b}{a}, \frac{1-a}{1-b}\right) \quad (16)$$

$$a \rightarrow_5 b = \min(1, 1-a+b) \quad (17)$$

$$a \rightarrow_6 b = (1-a) \vee b \quad (18)$$

$$\begin{aligned} a \rightarrow_7 b &= (a \wedge b) \vee (1-a) \\ &= (a \rightarrow_6 b) \wedge ka \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} a \rightarrow_8 b &= ((1-a) \vee b) \wedge (a \vee (1-b) \vee (b \wedge (1-a))) \\ &= (a \rightarrow_7 b) \wedge ka \\ &= (a \rightarrow_6 b) \wedge ka \wedge ka \end{aligned} \quad (20)$$

$$\tilde{R}_\alpha = \{(x, y) : m_{\tilde{R}}(x, y) \geq \alpha\} \quad (21)$$

### 4. 시뮬레이션과 효율성 분석

본 논문에서 제안된 휴리스틱 탐색기법에 적용될 합리적이고 최적화 된 결과를 산출하는 퍼지조건연산자를 선정하기 위해 퍼지조건연산자 3:S\*부터 8:EZ까지 각각에 대해 알파절단값을 0부터 1까지 0.1씩 증가시키며 가능한 모든 경우를 모의실험 한다.

#### 4.1 측정척도

퍼지조건연산자와 알파절단의 성능검증은 다음과 같은 두 가지 측정기준에 기반 하여 이루어진다.

- a) 경로경비(Cost of the path)
- b) 합리적인 경로를 산출한 알파절단 개수

경로 탐색(traverse)에 소모되는 에너지단위(energy unit)의 총합을 경로경비라 정의하며, 이것은 탐색기법의 최적화(optimality)를 측정하는 기준이 된다. 시작지점에서 목적지점까지 합리적인 경로를 산출하는 알파절단의 개수는 자율수중운동체의 안정성(safety)을 측정하는 기준으로 사용된다. 공정한 실험을 위해 시뮬레이션은 동일한 환경조건과 장애물배치 아래에서 이루어진다.

#### 4.2 시나리오

합리적인 퍼지조건연산자와 알파절단을 선정하기 위해 표 2에 보여지듯 9가지의 서로 다른 시나리오를 정의한다. 시나리오 s1~s9는 최적성 관점에서의 충돌 회피 성능비교를 위한 것으로 11×21×11 크기의 환경에 특정 장애물을 다양하게 배치하여 시뮬레이션 한다. 개개의 시나리오는 각기 다른 형태의 장애물배치를 가지며 시작지점  $P_{start}$ 와 목표지점  $P_{goal}$ 은 장애물의 반대편에 놓인다.

SN	Description	$P_{start}$	$P_{goal}$
s1	No Obstacle I	(3,3,-3)	(8,17,-7)
s2	Basic Obstacle I (3×1×3)	(4,1,-3)	(4,7,-3)
s3	Basic Obstacle II (2×1×2)	(4,1,-3)	(4,7,-3)
s4	Wide Obstacle I (5×1×3)	(4,2,-3)	(4,11,-3)
s5	Wide Obstacle II (3×1×2)	(6,6,-5)	(8,17,-5)
s6	High Obstacle I (3×1×5)	(4,1,-4)	(4,8,-4)
s7	High Obstacle II (2×2×3)	(4,2,-3)	(5,11,-3)
s8	Random Obstacle I	(4,2,-3)	(7,17,-5)
s9	Random Obstacle II	(5,2,-3)	(5,17,-3)

표 2 최적화 관점에서의 시뮬레이션 시나리오

### 4.3 평가 결과

경로경비 관점에서의 시뮬레이션 결과에 대한 분석은 다음의 두 가지 사실을 보여준다. 먼저, 조건연산자 4':G43'과 5:L은 그림 1에 보여지듯 목적지점까지의 항행에 소모되는 최소평균경비를 산출한다. 각각의 퍼지조건연산자에 대해 0부터 1까지의 알파절단값의 모든 경우들이 시작점에서 목적지점까지의 경로설정을 위해 시뮬레이션 되어진다. 평균경비란 각 퍼지조건연산자의 모든 알파절단에 대한 시뮬레이션을 통해 산출된 경로경비(cost of the path)들의 평균값을 의미한다. 두 번째로, 각각의 퍼지조건연산자에서 최적화된 경로를 산출하는 알파절단값을 선정하였다. 표 3은 이러한 알파절단값에 대한 정보를 보여준다.

자율수중운동체의 안정성에 대한 보장은 목적지점까지의 합리적인 경로를 산출하는 알파절단의 개수로 측정할 수 있는데, 그러한 알파절단의 개수가 많을수록 다양한 경우의 상황에서 자율수중운동체의 안정성을 보장할 수 있다. 퍼지조건연산자 3:S\*는 31개의 알파절단에 대해 합리적인 경로를 산출하여 이러한 목적에 가장 적합하다.

최적성과 안정성 관점에서의 시뮬레이션 결과에 대한 분석을 통해 다음과 같은 결론에 도달했다. 알파절단 0.94에서 퍼지조건연산자 4:G43은 표 3에 보여지듯 최적화된 경로를 산출하는데, 이는 모든 시나리오에 대한 경로경비 합 의 최소값을 의미한다. 따라서 4:G43은 제한된 임무시간이나 계산시간을 가지는 자율수중운동체에 적합하다. 퍼지조건연산자 4':G43'과 5:L은 대부분의 시나리오에서 최소평균경비를 소비하므로 범용의 자율수중운동체에 적합하다. 마지막으로 퍼지조건연산자 3:S\*는 자율수중운동체의 안정성이 중요시되는 경우에 적합하다.

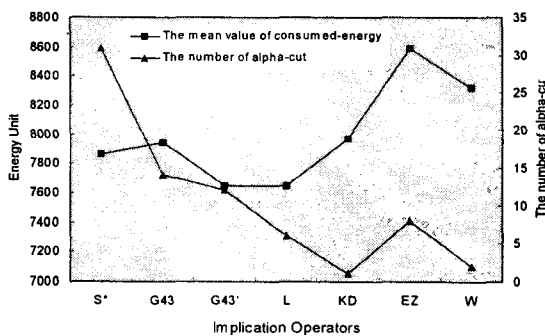


그림 1 최적화관점의 시뮬레이션 결과

Operator	Min-energy	Alpha-cut
3:S*	7646	0.95~1.0
4:G43	7530	0.94
4':G43'	7646	0.89~1.0
5:L	7646	0.95~1.0
6:KD	7970	0.4
7:EZ	7970	0.4
8:W	8320	0.68~0.69

표 3 최적화 된 경로를 산출하는 알파절단

### 5. 결론 및 향후과제

본 논문에서는 자율수중운동체의 실시간 충돌회피를 위해 퍼지관계곱에 기반 한 휴리스틱 탐색기법을 제안하고 제안된 탐색기법에 가장 적절한 퍼지조건연산자와 알파절단값을 제시하였다. 퍼지조건연산자는 현재 수 십여 가지의 다양한 형태로 존재하며, 또한 각기 서로 다른 특징을 가지므로 이를 적용시킬 분야의 특성에 최적한 퍼지조건연산자를 선택하는 것이 중요하다. 시뮬레이션 결과에 대한 분석에서 보여지듯, 조건연산자 4:G43이 최적성 관점의 자율수중운동체에 가장 적합하며, 퍼지조건연산자 4':G43'과 5:L이 범용의 자율수중운동체에 적합하다. 그리고 퍼지조건연산자 3:S\*는 자율수중운동체의 안정성이 중요시되는 경우에 적합하다.

### 6. 참고문헌

- [1] Ong, S. M., a Mission Planning Expert System with Three-Dimensional Path Optimization for the NPS Model 2 Autonomous Underwater Vehicle, Naval Postgraduate School, 1990.
- [2] 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.
- [3] Bandler, W., and Kohout, L. J., "Semantics of Implication Operators and Fuzzy Relational Products," Intl. Journal of Man-Machine Studies, 1980.
- [4] 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, North-Holland, Amsterdam, pp. 308-404, 1984.
- [5] Bandler, W., and Kohout L. J., "Fuzzy Power Sets and Fuzzy Implication Operator," Fuzzy Set and System4, pp. 13-30, 1980.
- [6] Sembi, B. S. and Mamdani, E. H., On the Nature of Implication in Fuzzy Logic, Proceeding of the Ninth International Symposium on Multiple-valued Logic, 1979, pp. 143-151.
- [7] Bandler, W., and Kohout, L. J., Fuzzy Relational Products and Fuzzy Implication Operators, Report No. FRP-1, 1978.
- [8] Bandler, W., and Kohout, L. J., Application of Fuzzy Logics to Computer Protection Structures, Report No. FRP-3, 1978.
- [9] Bandler, W., and Kohout, L. J., Fuzzy Power Sets and Fuzzy Implication Operators, Report No. FRP-7, 1979.
- [10] Zadeh, L. A., Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Process, IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics, 1973, pp. 28-44.
- [11] Willmott, R., Two Fuzzier Implication Operators in the Theory of Fuzzy Power Sets, Rep. No. FRP-2., 1978.