

# 퍼지관계곱을 이용한 수중운동체의 고수준 자율항행기법

(High-level Autonomous Navigation Technique of AUV  
using Fuzzy Relational Products)

이 영 일<sup>†</sup> 김 옹 기<sup>\*\*</sup>

(Young-il Lee) (Yong-Gi Kim)

**요약** 본 논문에서는 자율수중운동체(AUVs, Autonomous Underwater Vehicles)의 실시간 충돌회피를 위한 휴리스틱 탐색기법을 논한다. 퍼지관계곱(fuzzy relational products)은 항행 환경에서 발생하는 장애물과 다음으로 이동 가능한 후보노드들과의 관계관 분석, 종합하는 수학적 도구로 사용된다. 본 논문은 영역전문가가 보유한 장애물회피 관련 경험적 정보(heuristic information)를 반영하여 보다 효율적인 평가함수(evaluation function)를 고안하며 지능항행시스템의 상세경로설정(local path-planning)에 퍼지관계곱을 적용하여 보다 개선된 휴리스틱 탐색기법을 제안한다. 제안된 탐색기법의 성능검증을 위해 수행시간(cpu time), 경로의 최적화(optimization) 정도, 그리고 사용 메모리 환경에서 시뮬레이션을 통해 A\* 탐색기법과 비교한다.

**키워드** : 자율수중운동체, 상세경로 설정, 퍼지관계곱, 충돌회피

**Abstract** This paper describes a heuristic search technique carrying out collision avoidance for Autonomous Underwater Vehicles(AUVs). Fuzzy relational products are used as the mathematical implement for the analysis and synthesis of relations between obstacles that are met in the navigation environment and available candidate nodes. In this paper, we propose a more effective evaluation function that reflects the heuristic information of domain experts on obstacle clearance, and an advanced heuristic search method performing collision avoidance for AUVs. The search technique adopts fuzzy relational products to conduct path-planning of intelligent navigation system. In order to verify the performance of proposed heuristic search, it is compared with A\* search method through simulation in view of the CPU time, the optimization of path and the amount of memory usage.

**Key words** : AUVs, Local path-planning, Fuzzy relational products, obstacle clearance

## 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 지능항행

시스템(intelligent navigation system) 관련기술을 필요로 한다. 대부분의 지능항해시스템은 주어진 목표점까지의 안전하고 최적화된 경로산출을 위해 전체경로-상세경로에 기반한 항행경로 설정방식을 사용한다[1]. 전체경로설정(global path-planning)이란 알려져 있는 환경 기반정보에 근거하여 시작점에서 목표점까지의 경유점(way-point)을 결정하는 것이며, 상세경로설정(local path-planning)은 각 경유점 사이에서 알려지지 않은 장애물을 만나거나 예상치 못한 임무변경이 발생할 경우 새로운 경로를 재산출하는 것이다. 실시간 항행시스템을 위한 다양한 상세경로설정 기법들이 연구되었으며, 대표적인 기법으로는 사건기반 행동계획(case-based motion planning)기법[2], 학습시계도표(learned visibility graphs)

· 본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(2001-1-30300-001-3) 지원으로 수행되었음

† 학생회원 : 경상대학교 컴퓨터과학과  
baram@ailab.gsnu.ac.kr

\*\* 종신회원 : 경상대학교 컴퓨터과학과 교수  
ygtkim@nongae.gsnu.ac.kr

논문접수 : 2001년 5월 14일

심사완료 : 2001년 11월 7일

를 이용한 기법[3], 벽추적(wall-following) 기법[4] [5], 가상역장(virtual force field)기법[6], 벡터장 히스토그램(vector field histogram) 기법[7] 그리고 휴리스틱 탐색 기법[1]이 있다.

특히 휴리스틱 탐색기법은 탐색기준으로 평가함수를 사용하는데, 이것은 다음으로 이동 가능한 노드들에 대해 그 적합성을 수치화하여 되돌려주는 함수로써 탐색기법의 성향을 결정짓는 중요한 척도이다. 대부분의 평가함수들이 목표점까지의 거리, 소모되는 연료로만 구성되기 때문에 효율적인 장애물회피를 위한 판단기준으로는 부적합하다. 이러한 기존의 평가함수를 이용한 탐색기법은 평가함수 값에 따른 우선 순위에 기반하여 후보노드를 선택하는 일차원적인 선정방법을 사용한다. 결과적으로 후보노드들간의 미묘한 평가함수값 차이에서 발생할 수 있는 경비증가를 간과했다는 점, 또한 Ong, S. M[1]의 경우 장애물회피 시 고정된 탐색절차(search sequence)를 따르기 때문에 모든 상황에 적용 될 수 있는 절대적 탐색 절차를 고려하지 못한다는 문제점을 내포하고 있다.

본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 영역전문가가 보유한 장애물회피 관련 경험적 정보를 반영하여 보다 효율적인 평가함수를 고안하며 후보노드들간의 관계성을 장애물 회피에 적용시킨 퍼지관계급 기반 휴리스틱 탐색기법을 제안한다.

2. 퍼지관계급

자연시스템과 인공시스템에 있어, 인지(cognition)와 행동(action)에 대한 분석(analysis)과 종합(synthesis)의 새로운 방법론(methodology) 또한 계산적 방법(computational methods)으로 퍼지관계급 이론이 제안되었다. Kohout와 Bandler는 이진관계급(crisp relational products)연산을 확장하여 두 퍼지관계 내 각 원소들간의 의미적 포함관계를 나타내는 퍼지관계급[8] [9] [10] [11]을 제안하였는데 이는 본 논문에서 제안한 항행 휴리스틱 탐색기법의 이론적 기반이 된다.

잠수함에 탑승한 영역전문가는 잠수함이 항해중인 환경에서 실시간으로 발생하는 다양한 정보와 사건을 인지하여 이들 사이에 존재하는 관계 구조나 특성을 분석한다. 이에 근거하여 영역전문가는 주어진 임무에 부합하는 적절한 대응책을 결정하고 실질적으로 잠수함을 조정하여 행동으로 옮긴다. 영역전문가와 환경의 상호작용-인지, 결정, 행동-에 대한 구조적 분석이 가능한 수학적 도구(mathematical implement)가 주어지면 이 상호작용을 모방하는 시스템, 즉 인간의 탐승과 개입이 배제될 수 있는 자율수중운동체의 지능항행시스템을 개발할 수 있다.

본 논문에서는 지능항행시스템의 상세경로설정을 위한 휴리스틱 탐색기법에 퍼지관계급을 적용하여 항행 환경에서 발생하는 장애물들과 다음으로 이동 가능한 후보노드들과의 관계를 분석, 종합하는 수학적 도구로 이용하며 이를 통해 자율수중운동체의 충돌회피를 구현한다.

$\tilde{R}$ 을 유한 전체집합(finite crisp universe)  $A$ 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 퍼지관계급은  $A$ 의 원소  $a_i$ 와  $C$ 의 원소  $c_k$ 의 의미상 포함관계를 나타내는 것으로 수식 (1)(2)(3)과 같이 세 가지 퍼지관계급 연산자를 이용하여 표현될 수 있다.

$$(\tilde{R} < \tilde{S})_k = \frac{1}{|B|} \sum (\tilde{R}_y \rightarrow \tilde{S}_{yk}) \tag{1}$$

$$(\tilde{R} > \tilde{S})_k = \frac{1}{|B|} \sum (\tilde{R}_y \leftarrow \tilde{S}_{yk}) \tag{2}$$

$$(\tilde{R} \tilde{S})_k = \frac{1}{|B|} \sum (\tilde{R}_y \leftrightarrow \tilde{S}_{yk}) \tag{3}$$

$$a \rightarrow b = \min(1, 1 - a + b) \tag{4}$$

수식 (1)의  $(\tilde{R} < \tilde{S})_k$ 는 퍼지 후집합(afterset)  $a_i \tilde{R}$ 이 퍼지 선집합(foreset)  $\tilde{S}c_k$ 에 포함되는 정도를 의미한다. 그림 1은 이러한 의미적 포함관계를 도식화한 것이다. 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. 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 수 십여 가지의 다양한 형태로 존재하며, 또한 각기 서로 다른 특징을 가지므로 이를 적용시킬 분야의 특성에 최적한 퍼지조건연산자를 선택하는 것이 중요하다. 본 논문에서는 퍼지삼각서브논리곱(fuzzy triangle sub-product)  $(\tilde{R} < \tilde{S})_k$ 의 계산을 위해 수식 (4)에서 정의된 Lukasiewicz 조건연산자를 사용한다.

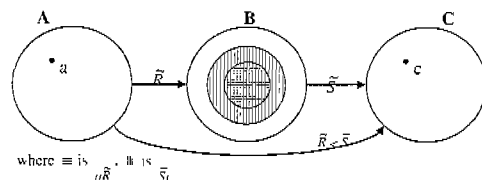


그림 1 퍼지삼각서브논리곱

### 3. 퍼지관계공 기반 항행 휴리스틱 탐색기법

휴리스틱 탐색기법은 다양한 장애물이 존재하는 해저 환경에서 항행되는 자율수중운동체를 위해 설계된다. 이 탐색기법은 정보가 있는 탐색(informed search) 전략으로서 자율수중운동체를 주어진 목표지점까지 인도하는 준최적경로(semi-optimizing solution)를 산출한다[1]. 이름에서도 나타나듯이, 본 탐색기법은 경험적 정보(heuristic information)에 기반하는데 이는 잠수함이 장애물회피를 수행하는 정책(policy)을 반영한다.

#### 3.1 환경모델

지능항행시스템을 위해 사용되는 항행환경은 가상의 3차원 직교좌표계(3-dimensional cartesian coordinate system)로서 좌표계를 구성하는 각각의 격자단위(grid unit)는 자율수중운동체의 길이를 근사한 것으로 X, Y 축이 70 inch 그리고 Z축이 10 inch의 크기를 가진다. 자율수중운동체는 'NPS Model 2 AUV'를 모델로 삼는다[1]. 3차원의 수중환경에서 자율수중운동체는 그림 2와 같이 현재위치로부터 이동 가능한 총 26개의 후보노드를 가진다. 하지만 본 연구에서 사용하는 후보노드 모델은 수식(5)와 같이 후진을 제외한 17개의 노드만을 후보노드집합 S로 선정한다. 또한 장애물 집합 O는 3차원 격자후보노드 상에 존재하는 장애물들의 모임으로 최소 0에서 최대 17개까지의 원소를 멤버로 가지며 수식(6)의 부분집합으로 표현된다. 본 논문에서 거론되는 모든 장애물은 가상장애물(virtual obstacle)을 의미하는데, 이는 장애물의 모든 주변을 실제보다 한 격자단위만큼 확장하는 장애물-확장(obstacle-growing) 개념을 적용시킨 것이다[12].

$$S = \{nw, tn, ne, nw, n, ne, bnw, bn, bne, tw, top, te, w, e, bw, bot, be\} \quad (5)$$

$$O = \{mw, m, me, nw, n, ne, bnw, bn, bne, tw, top, te, w, e, bw, bot, be\} \quad (6)$$

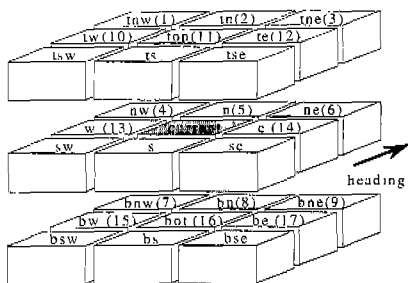


그림 2 후보노드모델

휴리스틱 탐색기법이 시작지점에서 목표지점까지의 합리적인 경로를 산출하기 위해서는 적절한 에너지경비 측정방법이 요구되는데, 본 논문에서는 거리단위인 인치(inch)를 에너지단위(energy unit)로 환원하여 사용한다.

#### 3.2 평가함수

평가함수(EF)는 현재위치에서 이동 가능한 모든 후보 노드들의 경로최적성과 안전성을 소요경비 관점, 즉 에너지단위(energy unit)로 변환시킨다. 이들 각 후보노드의 평가함수값은 퍼지관계공에 기반한 휴리스틱 탐색기법의 입력으로 사용된다. 평가함수는 휴리스틱 탐색기법의 성능을 결정짓는 중요한자이므로 시작위치에서 목표 위치까지 합리적이며 안전한 항행을 보장할 수 있도록 다음과 같은 경험적 정보(heuristic information)를 충실하게 반영하여야 한다.

-가능한 한 현재위치로부터 가장 가까운 후보노드로 이동한다.

-가능한 한 현재의 방향과 깊이를 유지한다.

-가능한 한 장애물로부터 거리가 먼 후보노드로 이동한다.

가능한 한 목표지점으로 향한다.

평가함수는 국지경비함수(LC), 회피거리경비함수(ADC), 잔여거리경비함수(RDC)의 3부분으로 구성되며 수식 (7)과 같이 표현된다. 본 평가함수는 각 후보노드들의 경로최적성과 안전성을 소요경비 관점으로 변환한 것이므로 작은 평가함수값의 후보노드가 높은 우선 순위(priority)를 가진다. 그림 3은 평가함수란 구성하는 모든 요소들의 제충적 구조를 보여준다.

$$EF(CS_{n+1}) = LC(S_n, CS_{n+1}) + ADC(O_n, CP_{n+1}) + RDC(CP_{n+1}, P_{goal}) \quad (7)$$

$$LC(S_n, CS_{n+1}) = TC(P_n, CP_{n+1}) + RC(S_n, CS_{n+1}) \quad (8)$$

$$TC(P_n, CP_{n+1}) = Horiz\_Dist(P_n, CP_{n+1}) + 1.2 * Depth\_change(P_n, CP_{n+1}) \quad (9)$$

$$ADC(O_n, CP_{n+1}) = k_{avoid} * Horiz\_Num(O_n, CP_{n+1}) + k_{avoid} * Vert\_Num(O_n, CP_{n+1}) \quad (10)$$

$$RDC(CP_{n+1}, P_{goal}) = k_{horiz} * \sqrt{(X_{goal} - X_{n+1})^2 + (Y_{goal} - Y_{n+1})^2} + k_{depth} * (Z_{goal} - Z_{n+1}) * 1.2 \quad (11)$$

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

수식(8)의 국지경비함수(LC)는 자율수중운동체가 현재상태  $S_n$ 로부터 후보노드상태  $CS_{n+1}$ 까지 이동시 소요되는 에너지단위(energy unit)를 계산하는 것으로 병진이동경비

(TC)와 방향전환경비(RC)의 합으로 표현된다. 이는 가능한 한 자율수중운동체의 방향과 깊이를 유지하며 가장 가까운 후보노드로 이동하려는 경험적 정보를 반영한다. 수식(9)는 자율수중운동체의 현재위치  $P_n$  으로부터 후보노드위치  $CP_{n+1}$  까지의 TC를 계산한다. TC란 특정 지점 A에서 지점 B로 이동시 소모되는 에너지를 의미하는데, 이 경비는 수직 이동과 수평이동에 있어 다르게 적용되어야 한다. 본 논문에서는 수직이동시 소모되는 경비가 수평이동시 소모되는 경비보다 1.2배 많이 소모된다고 가정한다[1]. RC는 이동 중 방향전환에 소모되는 에너지의 합계를 의미하며 표 1에 다양한 방향전환 각에 대한 RC가 정의되어 있다. 수식(10)에 정의된 회피거리경비함수(ADC)는 장애물집합  $O$  상의 특정원소와 후보노드집합  $S$ 의 원소들 사이의 회피거리를 계산하여 에너지단위로 변환하는 역할을 하는데 이는 자율수중운동체를 가능한 한 장애물로부터 멀어지게 하려는 경험적 정보를 반영한다. ADC는 LC와 결합하여 합리적인 경로산출과 안전성이라는 서로 이율배반적인 문제에 대한 타협점을 제시할 수 있다. 그림 4는 수평면내에 존재하는 장애물에 대한 회피거리를 보여준다. 수식(11)의 잔여거리경

비함수(RDC)는 각 후보노드로부터 목표지점까지의 최소 잔여거리를 계산하여 에너지 단위로 변환하는 역할을 하는데 이는 가능한 한 자율수중운동체를 목표지점에 가까운 후보노드로 향하도록 하는 경험적 정보를 반영한다. 매개변수(parameter)  $k_{avoid}$ ,  $k_{turn}$ ,  $k_{depth}$ 는 상수로서 최상의 결과가 산출되도록 실험에 의해 조율(tuning)된다.

3.3 휴리스틱 탐색기법의 절차

환경정보가 알려지지 않은 해저환경에서 자율수중운동체가 영역전문가의 인식·결정·행동을 모방하여 항행하기 위해서는 영역전문가의 경험적 정보를 표현, 적용할 수 있는 도구가 필요하다. 이러한 목적으로 퍼지관계 기반 휴리스틱 탐색기법을 사용한다. 본 논문에서 제안한 휴리스틱 탐색기법은 크게 네 단계로 구성된다. 첫 번째 단계에서는 수식 (12)(13)과 같이 후보노드 집합  $S$ , 장애물 집합  $O$ , 그리고 후보노드와 장애물의 퍼지관계  $\tilde{R}$ 을 정의한다. 평가함수 EF는 현재노드에서 후보노드로 이동시 소모되는 에너지단위(energy unit)를 추정하고 이를 [0, 1]사이의 퍼지값으로 변환시킨다. 퍼지관계  $\tilde{R}$ 은 이 퍼지값을 입력으로 취한다. 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  $\tilde{F}$ 를 생성한다.  $\tilde{F}$ 는 후보노드 집합  $S$ 와 후보노드 집합  $S$ 의 관계가 되고 이는 후보노드 집합 원소들간의 의미적 포함관계를 나타낸다. 세 번째 단계에서는 수식 (15)와 같이 퍼지관계  $\tilde{F}$ 를 이전관계행렬로 변환하기 위하여  $\tilde{F}$ 에 알파절단( $\alpha$ -cut)을 적용하여  $C_\alpha$ 를 산출한다. 적용되는 알파절단 값에 따라 후보노드 원소들간의 계층구조가 달라지기 때문에 합리적인 결과를 산출하기 위해서는 적절한 알파절단 값을 설정하는 것이 중요하다. 마지막 단계로 후보노드 집합  $S$ 의 원소들간 부분순서(partial order)를 도식화하는 하세 다이어그램(hasse diagram)을 작성한다. 이는 최적성(optimality)과 효율성(efficiency) 관점에서의 후보노드 집합 원소들간의 계층적 구조를 의미한다. 작성된 계층의 최상위 노드를 자율수중운동체의 다음 이동노드로 선정한다. 그림 5는 제안된 휴리스틱 탐색기법의 전 수 행절차를 보여준다.

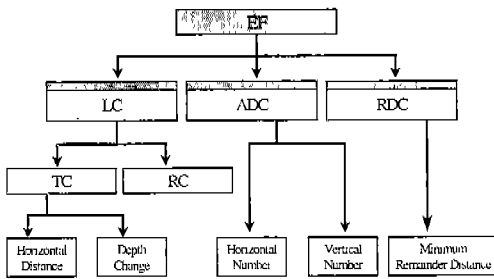


그림 3 평가함수의 계층적 구조도

표 1 방향전환경비[1]

Turning Angle	0	45	90	135	180
RC	0	7	35	70	140

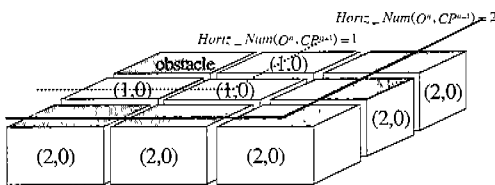


그림 4 수평면내에서의 회피거리

$$S = \{s_1, s_2, \dots, s_k\}, O = \{o_1, o_2, \dots, o_l\} \quad (12)$$

$$\tilde{R} = S \times O = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1k} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{k1} & r_{k2} & \dots & r_{kk} \end{bmatrix} \begin{matrix} s_1 \\ s_2 \\ \vdots \\ s_k \end{matrix} \quad (13)$$

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

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

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

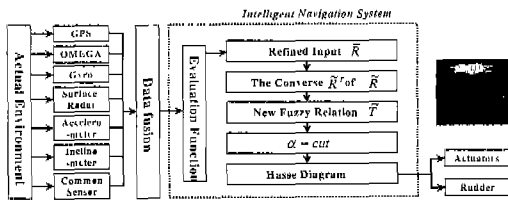


그림 5 휴리스틱 탐색기법의 절차

#### 4. 시뮬레이션 및 효율성 분석

제안된 휴리스틱 탐색기법의 성능을 검증하기 위해 경로의 최적화(optimization)정도, 수행시간(cpu time), 사용 메모리 관점에서 A\* 알고리즘[13][14]과 비교·분석한다. 두 기법의 공정한 비교를 위해 시뮬레이션은 동일한 환경조건(environmental condition)과 장애물배치 아래에서 이루어진다.

##### 4.1 측정척도

자율수중운동체의 경로설정을 수행하는 두 탐색기법의 성능비교는 다음과 같은 세 가지 측정기준에 기반하여 이루어진다.

- a) 경로경비(Cost of the path)
- b) 경로설정에 소요되는 시간(Time required to find the path)
- c) 경로설정에 이용되는 최대 OPEN노드 개수(Maximum number of OPEN nodes)

성능비교를 위한 측정척도는 시스템 효율성(efficiency)과 경로의 최적화(optimality)라는 두 관점으로 집약된다. 경로설정 시 소요되는 계산시간과 사용되는 최대 OPEN노드의 개수는 시스템 CPU와 메모리 자원의 효율성을 측정하는 기준이 된다. 경로 탐색(traverse)에 소모되는 에너지단위(energy unit)의 총합을 경로경비라 정의하며, 이것은 탐색기법의 최적화를 측정하는 기준이 된다.

##### 4.2 시나리오

두 탐색기법의 성능비교를 위해 총 18가지의 서로 다른 시나리오를 정의한다. 시나리오 1a~9a는 효율성 관점에서의 성능비교를 위한 것으로 100×1000×100 크기의 환경에서 장애물 비율을 5%씩 증가시키며 무작위로 배치한 후 성능을 테스트한다. 시나리오 1b~9b는 최적화 관점에서의 성능비교를 위한 것으로 11×21×11 크기의 환경에 특정 장애물을 다양하게 배치하고 두 기법을 적용한 후 항행 시 소모된 경비를 비교한다. 표 2는 시나리오 1b~9b에 대한 상세정보를 보여준다. 개개의 시나리오는 각기 다른 형태의 장애물배치를 가지며 시작지점 P\_start와 목표지점 P\_goal은 장애물의 반대편에 놓인다.

표 2 최적화 관점에서의 시뮬레이션 시나리오

SN	Description	P_start	P_goal
1b	No Obstacle I	(3,3,-3)	(8,17,-7)
2b	Basic Obstacle I (3×1×3)	(4,1,-3)	(4,7,-3)
3b	Basic Obstacle II (2×1×2)	(4,1,-3)	(4,7,-3)
4b	Wide Obstacle I (5×1×3)	(4,2,-3)	(4,11,-3)
5b	Wide Obstacle II (3×1×2)	(6,6,-5)	(8,17,-5)
6b	High Obstacle I (3×1×5)	(4,1,-4)	(4,8,-4)
7b	High Obstacle II (2×2×3)	(4,2,-3)	(5,11,-3)
8b	Random Obstacle I	(4,2,-3)	(7,17,-5)
9b	Random Obstacle II	(5,2,-3)	(5,17,-3)

##### 4.3 시뮬레이션 결과와 성능 분석

CPU시간과 최대 OPEN노드 개수에 대한 효율성(efficiency) 관점에서의 시뮬레이션 결과가 그림 6과 그림 7에 보여진다. CPU시간은 두 탐색기법이 시작점에서 목표점까지의 경로를 산출하는데 소요하는 계산시간을 의미하며 OPEN노드는 탐색트리에서의 잎(leaf)노드를 의미[13]하는 것으로 사용된 메모리측정의 기준이 된다. 그림 6의 결과에서 알 수 있듯, 퍼지관계곱에 기반한 휴리스틱 탐색기법이 A\* 탐색기법에 비해 월등히 뛰어난 CPU시간 성능을 보인다. 이는 두 탐색기법이 가지는 특성에 기인하는데, A\* 탐색기법의 경우는 항행환경에 놓인 모든 장애물을 고려한 전역최적화(global optimization)를 수행하며 본 논문에서 제안한 휴리스틱 탐색기법은 현재 발견된 장애물만을 고려하는 지역최적화(local optimization)를 수행하기 때문이다. 또한 제안된 휴리스틱 탐색기법은 그림 7에 보여지듯 탐색을 수행하는 전 과정에서 단 하나만의 OPEN노드를 가진다. 이것은 제

안된 휴리스틱 기법이 A\* 기법과는 달리 OPEN노드의 정보를 이용한 역행(backtracking)을 하지 않기 때문이다. 지역최적화와 비역행성이라는 두 특성들이, 언제나 최적경로를 산출한다고 알려진 A\* 탐색기법보다 본 논문에서 제안한 휴리스틱 탐색기법을 자율수중운동체의 지능항행시스템으로 더욱 우수하게 만드는 요소이다.

성능비교를 위한 두 번째 측정척도인 경로의 최적화(optimality)는 탐색기법이 산출한 병진이동경비(TC)의 에너지단위 차이에 의해 측정할 수 있다. 본 논문에서는 제안된 휴리스틱 탐색기법에 의해 계산된 경로의 최적화정도를 측정하기 위해 A\* 탐색기법의 것과 비교한다. 언제나 최적경로를 산출하는 탐색기법을 '허용가능(admissible)하다' 라고 하는데 A\* 탐색기법의 허용성(admissibility)은 이미 증명되어있다[14]. 따라서 A\* 탐색기법은 다른 탐색기법이 산출한 경로의 최적성을 측정하는 기준으로 이용할 수 있다. 그림 8에서 보여지듯, 제안된 휴리스틱 탐색기법이 생성한 병진이동경비는 A\* 탐색기법의 경로경비와 동일하거나 7.5%이내의 증가치를 보였다.

자율수중운동체는 실시간 항행을 위한 짧은 경로설정 시간, 적은 메모리 요구량 그리고 제한된 에너지원으로 인한 경로최적성을 중시하는 특성이 있다. 시뮬레이션 결과에 대한 분석을 통해, 제안된 휴리스틱 탐색기법이 바로 이러한 특성을 모두 만족시켜 자율수중운동체의 지능항행시스템으로 매우 적합함을 확인하였다.

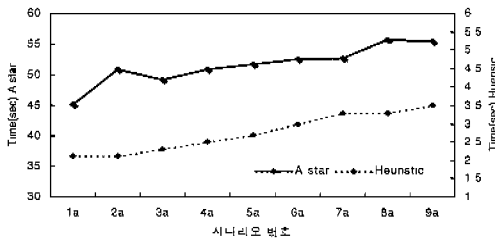


그림 6 두 탐색기법의 CPU Time 비교

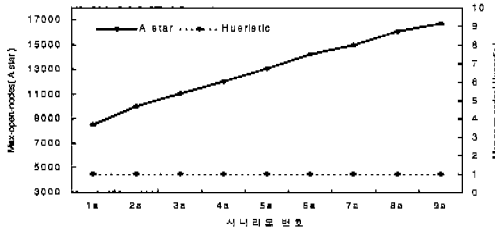


그림 7 두 탐색기법의 최대 OPEN 노드개수 비교

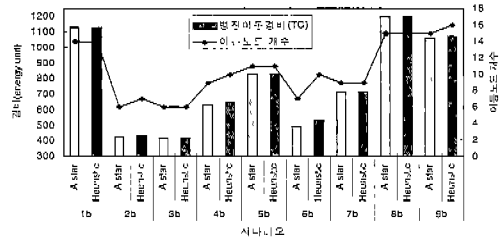


그림 8 최적화 관점의 시뮬레이션 결과 비교

### 5. 결론

본 논문에서는 영역전문가가 보유한 장애물회피 관련 경험적 정보(heuristic information)를 반영하여 보다 효율적인 평가함수(evaluation function)를 고안하고 지능항행시스템의 상세경로설정(local path-planning)에 퍼지관계망을 적용하여 개선된 휴리스틱 탐색기법을 제안하였다. 또한 시뮬레이션을 통해 제안된 기법과 A\* 탐색기법을 비교함으로써 경로의 최적성, 시스템자원의 효율성을 검증하였다. 시뮬레이션 결과에 대한 분석을 통해 제안된 휴리스틱 탐색기법은 메모리자원의 한계성과 탐색 속도, 그리고 에너지경비 관점의 경로최적성을 중시하는 자율수중운동체의 장애물회피 탐색기법으로 적합함을 확인하였다. 특히 CPU시간과 사용 메모리 측면에서의 높은 효율성, 사전 환경정보(priori environment information)에 무관한 수행능력은 제안된 휴리스틱 탐색기법을 지능항행시스템의 실시간 경로설정을 위한 실용적이고 효과적인 기법으로 만들었다. 자율수중운동체의 장애물회피 시스템으로 퍼지관계망 기반 휴리스틱 탐색기법을 적용할 경우 다음과 같은 세 가지 특징을 가진다.

- 후보노드와 장애물간의 애매한 관계성을 퍼지화(fuzzify) 할 수 있다.

- 후보노드 선정에 있어 평가함수 값에 기반한 우선순위에 의해 후보노드를 선택하는 일차원적인 선정방법이 아니라 후보노드들간의 관계성을 고려한 복합적이고 이차원적인 선정방법이다.

- 장애물회피 시 판단기준이 되는 평가함수 구현방식이 현재 탐색된 각 장애물 단위로 후보노드들의 평가함수값을 구하는 것이 아니라 장애물을 구성하고 있는 각 단위격자에 대한 후보노드들의 평가함수값을 산출하는 방식이므로 더욱 세분화되고 간략한 평가 함수 구현이 가능하다.

## 참고문헌

- [1] Ong, S. M., "A Mission Planning knowledge-based system with Three-Dimensional Path Optimization for the NPS Model 2 Autonomous Underwater Vehicle," Master's Thesis, Naval Postgraduate School, 1990.
- [2] C. Vasudevan and K. Ganesan, "Case-Based path Planning for Autonomous Underwater Vehicles," *Underwater Robots*, Yuh, Ura and Bekey (Eds.), Kluwer Academic Publishers, Boston, pp. 1-15, 1996.
- [3] Oommen, B. J., Iyengar, S. S., Rao, S. V. N., and Kashyap, R. L., "Robot Navigation in Unknown Terrains Using Learned Visibility Graphs. Part I: The Disjoint Convex Obstacle case," *IEEE journal of Robotics and Automation*, v. RA-3(6), pp. 672-681, 1987.
- [4] Bauzil, G., Briot, M. and Ribes, P., "A Navigation Sub-System Using Ultrasonic Sensors for the Mobile Robot HILARE," *1st Int. Conf. on Robot Vision and Sensory Controls*, Stratford-upon-Avon, UK., pp. 47-58 and pp. 681-698, 1981.
- [5] Iijima, J., Yuta, S., and Kanayama, Y., "Elementary Functions of a Self-Contained Robot," *Proc. of the 11th Int. Symp. on Industrial Robots*, Tokyo, pp. 211-218, 1983.
- [6] J. Borenstein and Y. Koren, "Real-time obstacle avoidance for fast mobile robots," *IEEE Trans. System, Man, and Cybernetics*, vol. 19, no. 5, pp. 1179-1187, 1989.
- [7] J. Borenstein and Y. Koren, "The vector field histogram-fast obstacle avoidance for mobile robots," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, vol. 7, no. 3, pp. 278-288, 1991.
- [8] 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.
- [9] Bandler, W., and Kohout, L. J., "Semantics of Implication Operators and Fuzzy Relational Products," *Intl. Journal of Man-Machine Studies*, 1980.
- [10] 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.
- [11] Bandler, W., and Kohout L. J., "Fuzzy Power Sets and Fuzzy Implication Operator," *Fuzzy Set and System*, pp. 13-30, 1980.
- [12] Lozano-Perez, T., and Wesley, M. A., "An Algorithm for Planning Collision Free Paths among Polyhedral Obstacles," *Communications, v. ACM-22(10)*, pp. 560-570, 1979.
- [13] Stuart, R., Peter, N., *Artificial Intelligence-A Modern Approach*, Prentice-Hall Inc., 1995.
- [14] George, F. L., William, A. S., *Artificial Intelligence and the Design of Expert System*, The Benhamin/Cummings Publishing Company, Inc., 1989.

## 이영일



1999년 경상대학교 컴퓨터과학과 이학사.  
2001년 경상대학교 컴퓨터과학과 공학석사.  
2001년 ~ 현재 경상대학교 컴퓨터과학과 박사과정 재학 중. 관심분야는 인공지능, 자율수중운동체(AUV)의 무인제어, 자율항행시스템, 퍼지관계음

## 김용기



1978년 서울대학교 공과대학 공학사.  
1987년 University of Montana 전산학 석사.  
1992년 Florida State University 전산학박사.  
1982년 ~ 1984년 KIST 시스템공학연구소 연구원.  
1992년 ~ 현재 경상대학교 컴퓨터과학과 교수. 관심분야는 인공지능, 지식기반시스템, 자율무인잠수정, 지능항해시스템