

수중운동체의 자율항행 제어를 위한 휴리스틱 기법

이영일, 김용기
경상대학교 컴퓨터과학과 및 전산개발연구소

A heuristic technique for autonomous control of AUV.

Young-il Lee, Yong-Gi Kim
Dept. of Computer Science, Institute of Computer Research and Development
GyeongSang National University

요 약

실시간 정보가 알려지지 않은 해저환경에서 자율수중운동체(AUV, Autonomous Underwater Vehicle)가 성공적인 임무 수행을 완료하기 위해서는 주어진 목표지점까지의 안전하고 효율적인 경로 설정이 선행되어야 한다. 이를 위해 평가함수(evaluation function)에 기반 한 휴리스틱탐색(heuristic search)이 사용되는데 대부분의 평가함수는 목표점까지의 거리, 소모되는 연료로 구성된다[1]. 본 논문에서는 영역전문가가 보유한 장애물회피 관련 경험적 정보(heuristic information)를 반영하여 보다 효율적인 평가함수를 고안하며 후보노드들간의 관계성을 고려한 퍼지관계곱(Fuzzy Relational Products) 기반 휴리스틱 탐색기법을 제안한다. 제안한 탐색기법의 성능을 검증하기 위해 수행시간(cpu time), 경로의 최적화(optimization)정도, 사용 메모리 관점에서 시뮬레이션을 통해 A* 탐색기법과 비교한다.

1. 개요

대륙자원 고갈현상의 심화와 그 개발비용의 증가로 인해 인류는 자원의 개발 대상을 대륙에서 해양으로 전환하고 있다. 그러나 해양개발에는 막대한 개발비용과 위험이 따른다. 이를 해결하기 위해 여러 방법들이 연구, 시도되었으나 괄목할 만한 결과를 산출하지는 못하는 실정이다. 요즘의 연구 추세는 인간이 직접 탐승할 필요가 없는 자율수중운동체를 이용한 자원 탐사나 자원개발 관련 분야이다.

자율수중운동체란 인간의 직접적인 개입이 불가능하고 실시간 정보가 알려지지 않은 임무지역에서, 안전하고 효율적인 작전 수행을 위해 영역전문가와 환경의 상호작용-인지, 결정, 행동-을 모방하는 무인감수정이다[1].

자율수중운동체가 다양한 위험요소가 존재하는 해저환경에서 원만히 임무를 수행하기 위해서는 영역전문가 수준의 임무계획(mission-planning), 계획제어(planning-control), 의사결정(decision-making)과 같

은 고수준기능(high-level function)을 보유한 지능항행시스템(Intelligent Navigation System)[2][3][4] 관련기술을 필요로 한다.

이를 위해 평가함수에 기반 한 휴리스틱 탐색기법이 사용되는데 대부분의 평가함수는 목표점까지의 거리, 소모되는 연료(energy)로 구성된다. 이러한 기존의 평가함수를 이용한 탐색기법은 평가함수 값의 크기에 따라 후보노드(candidate successor)를 선택하는 일차원적인 선정방법을 사용하여 후보노드들간의 미묘한 평가함수값 차이에서 발생할 수 있는 경비증가를 간과했다는 점, 그리고 주어진 탐색절차를 따르기 때문에 모든 상황에 적용 될 수 있는 절대적 탐색절차를 고려하지 못하는 문제점을 내포하고 있다.

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

2. 퍼지관계곱(Fuzzy relational products)

자연시스템과 인공시스템에 있어, 인지와 행동에 대한 분석과 종합의 새로운 방법론 또한 계산적 방법으로 퍼지관계곱 이론이 대두되었다. Kohout와 Bandler는 이진관계곱연산을 확장하여 두 퍼지관계 내 각 원소들간의 의미적 포함관계를 나타내는 퍼지관계곱 [5][6][7]을 제안하였는데 이는 본 논문에서 제안한 항행 휴리스틱 탐색기법의 이론적 기반이 된다.

집합 A에서 집합 B로의 퍼지관계를 \tilde{R} , 집합 B에서 집합 C로의 퍼지관계를 \tilde{S} 라 할 때, \tilde{R} 과 \tilde{S} 의 논리곱은 집합 A에서 집합 C의 관계를 표현한 것으로서 다음 세 가지 경우의 퍼지관계논리곱을 가진다.

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

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

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

삼각서브관계논리곱(triangle sub-product relation)인 수식(3)은, a_i 가 c_k 에 포함되는 정도를 의미한다.

3. 퍼지관계곱 기반 항행휴리스틱 탐색기법

3.1 시스템환경

자율무인잠수정의 지능항행시스템을 위한 환경모델은 [그림1]과 같이 3차원격자단위모델(3-dimensional grid unit model)[1]이며, 선택 가능한 후보노드의 개수는 모두 26개이나 본 시스템에서는 수식(9)와 같이 후진을 제외한 17개의 노드만을 후보노드집합으로 선정한다. 또한 장애물집합은 후보노드 상에 존재하는 장애물들의 모임이며 최소 0에서 최대 17개까지의 원소를 가지며 수식(10)의 부분집합으로 표현된다.

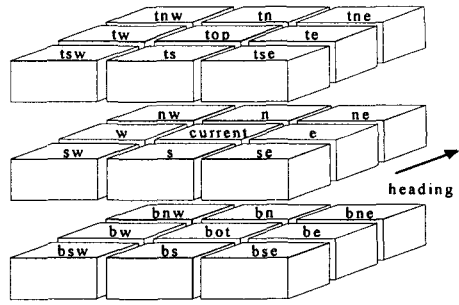
$$S = \{tnw, tn, tne, mw, n, ne, bnw, bn, bne, tw, top, te, w, e, bw, bot, be\} \quad (9)$$

$$O = \{tnw, tn, tne, mw, n, ne, bnw, bn, bne, tw, top, te, w, e, bw, bot, be\} \quad (10)$$

3.2 평가함수

평가함수는 현재위치에서 이동가능한 모든 후보노드들의 경로최적성과 안전성을 소요경비 관점으로 변환시키며 이들 각 후보노드의 평가함수값은 퍼지관계

곱에 기반 한 휴리스틱 탐색기법의 입력으로 사용된



[그림1] 후보노드

다. 평가함수는 휴리스틱 탐색기법의 성능을 결정짓는 중요인자이므로 다음과 같은 경험적 정보를 잘 반영할 수 있도록 설계하는 것이 중요하며 수학적으로 표현하면 수식(4)와 같다.

- 가능한 한 가장 가까운 후보노드로 이동한다.
- 가능한 한 현재의 방향과 깊이를 유지한다.
- 가능한 한 장애물로부터 거리가 먼 후보노드로 이동한다.
- 가능한 한 목표지점으로 향한다.

$$EF(CS_{n+1}) = LC(S_n, CS_{n+1}) - ADC(O_n, CP_{n+1}) + RDC(CP_{n+1}, P_{goal}) \quad (4)$$

$$LC(S_n, CS_{n+1}) = TC(P_n, CP_{n+1}) + RC(S_n, CS_{n+1}) \quad (5)$$

$$TC(P_n, CP_{n+1}) = Horiz_Dist(P_n, CP_{n+1}) + 1.2 * Depth_change(P_n, CP_{n+1}) \quad (6)$$

$$ADC(O_n, CP_{n+1}) = k_{avoid} * Horiz_Num(O_n, CP_{n+1}) + k_{avoid} * Verti_Num(O_n, CP_{n+1}) \quad (7)$$

$$RDC(CP_{n+1}, P_{goal}) = k_{horiz} * \sqrt{(X_{goal} - X_{n+1})^2 + (Y_{goal} - Y_{n+1})^2} + k_{depth} * (|Z_{goal} - Z_{n+1}| * 1.2) \quad (8)$$

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(= (θ, P_n)), 후보노드의 상태, 장애물의 현재위치를 의미한다[1].

수식(5)의 국지경비함수(LC)는 자율수중운동체가 현재상태 S_n 로부터 후보노드상태 CS_{n+1} 까지 이동시 소요되는 경비를 계산하는 것으로 수식(6)의 병진이동경비(TC)와 [표1]의 방향전환경비(RC)[1]의 합이다. 이는 가능한 한 자율수중운동체의 방향과 깊이를 유지하며 가장 가까운 후보노드로 이동하려는 경험적 정보를 반영한다. 수식(7)의 회피거리경비함수(ADC)는 후보노드 상의 장애물과 그 외 다른 후보노드사이

의 회피거리를 계산하여 에너지단위로 변환하는 역할을 하는데 이는 자율수중운동체를 가능한 한 장애물로부터 멀어지게 하려는 경험적 정보를 반영한다. 수식(8)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.

[표 1] 방향전환 경비

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

3.3 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 (11)(12)(13)와 같이 후보노드 집합 S, 장애물 집합 O, 그리고 후보노드와 장애물의 퍼지관계 R을 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 R은 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 (14)와 같이 퍼지관계 R과 그 전치행렬 R^T에 퍼지관계급 연산 <을 적용하여 새로운 퍼지관계 T를 생성한다. T는 후보노드 집합 S와 후보노드 집합 S의 관계가 되고 이는 후보노드 집합 원소들간의 종속정도를 의미한다.

세 번째 단계에서는 수식 (15)와 같이 퍼지관계 T를 이진관계행렬로 변환하기 위하여 T에 알파절단(alpha-cut)을 적용하여 Ca를 산출한다.

네 번째 단계에서는 수식 (16)과 같이 Ca에 하세 다이어그램(hasse diagram)을 적용하여 후보노드들에 관한 계층구조를 작성하고 그 계층의 최상위 노드를 다음 이동노드로 선정한다.

$$S = \{s_1, s_2, \dots, s_k\} \tag{11}$$

$$O = \{o_1, o_2, \dots, o_i\} \tag{12}$$

$$\tilde{R} = S \times O = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1i} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2i} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{k1} & r_{k2} & \dots & r_{ki} \end{bmatrix} \begin{matrix} s_1 \\ s_2 \\ \vdots \\ s_k \end{matrix} \tag{13}$$

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

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

$$H(C_\alpha) \tag{16}$$

4. 시뮬레이션 결과

본 장에서는 제안된 항행 휴리스틱 탐색기법의 성능을 검증하기 위해 경로의 최적화(optimization)정도, 수행시간, 사용 메모리 관점에서 최적화된 경로를 산출한다고 증명된 A* 알고리즘[8][9]과 비교한다.

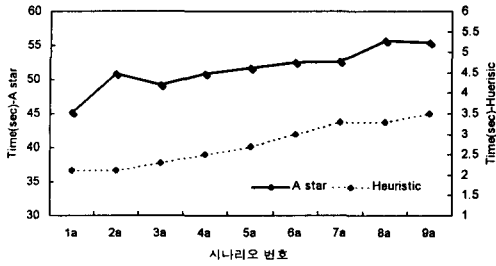
4.1 시나리오

두 탐색기법의 성능비교를 위해 총 18가지의 서로 다른 시나리오를 정의한다. 시나리오 1a~9a는 효율성 관점에서의 성능비교를 위한 것으로 100x1000x100 크기의 환경에서 장애물 비율을 5%씩 증가시키며 무작위로 배치한 후 성능을 테스트한다. 시나리오 1b~9b는 최적화 관점에서의 성능비교를 위한 것으로 11x21x11 크기의 환경에 특정 장애물을 다양하게 배치하고 두 기법을 적용한 후 항행 시 소모된 경비를 비교한다.

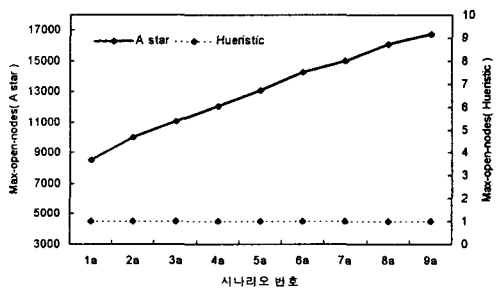
4.2 평가 결과

효율성관점의 CPU시간과 최대 OPEN노드 개수에 대한 시뮬레이션 결과가 [그림2]와 [그림3]에 보여진다. CPU시간은 두 탐색기법이 시작점에서 목표점까지의 경로를 산출하는데 소요하는 계산시간을 의미하며 OPEN노드는 탐색트리에서의 잎(leaf)노드를 의미[9]하는 것으로 사용된 메모리측정의 기준이 된다.

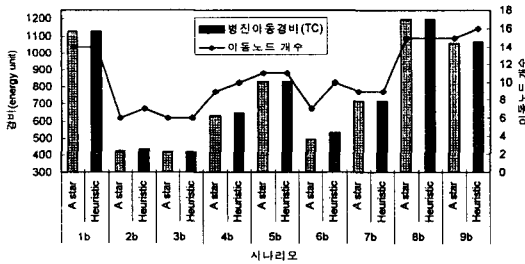
[그림4]는 두 탐색기법의 병진이동경비를 비교한 것으로 이는 두 기법이 생성한 경로의 최적화정도를 측정할 수 있다. 휴리스틱 탐색기법이 생성한 경로경비는 최적화된 경로를 산출한다고 알려진 A* 탐색기법의 경로경비와 동일하거나 7.5%이내의 증가치를 보였다.



[그림 2] 두 탐색기법의 CPU Time 비교



[그림 3] 두 탐색기법의 최대 open노드 개수 비교



[그림4] 최적화관점의 시뮬레이션 결과

5. 결론

시뮬레이션 결과에 대한 분석을 통해 제안된 휴리스틱 탐색기법은 탐색속도와 메모리자원의 한계성, 그리고 에너지소비 관점의 경로최적성을 중시하는 자율수중운동체의 지능항해 시스템으로 적합함을 알았다.

자율수중운동체의 장애물회피 시스템으로 퍼지관계급 기반 휴리스틱 탐색기법을 적용할 경우 크게 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 탐색된 장애물 전체에 대한 각 후보노드의 평가함수값을 구하는 것이 아니라 장애물을 구성하고 있는 각 단위격자에 대한 후보노드들의 평가함수값을 산출하는 방식이므로 더욱 세분화되고 간략한 평가함수 구현이 가능하다.

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] Chappell, S. G., A Blackboard System for Context Sensitive Mission Planning in an Autonomous Vehicle, unpublished technical report, University of New Hampshire, Marine Systems Engineering Laboratory.
- [3] Mayer, R., Underbrink, A., Lockledge, J., and Reddy, U., Situation Based Control Architectures for an AUV, Texas A&M University, College Station, Texas.
- [4] Pugh, G. E., and Krupp J., The Control of Autonomous Underwater Vehicles through a Hierarchical Structure of Value Priorities, Proceedings of the Fifth International Symposium on Unmanned, Untethered Submersible Technology, University of New Hampshire, June 22-24, 1987.
- [5] Bandler, W., and Kohout L. J., Fuzzy Power Sets and Fuzzy Implication Operator, Fuzzy Set and System 4, 13-30, 1980.
- [6] 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, 1980.
- [7] Bandler, W., and Kohout, L. J., Semantics of Implication Operators and Fuzzy Relational Products, Intl. Journal of Man-Machine Studies, 1980.
- [8] Nilsson, N. J., Principles of Artificial Intelligence, Tioga Publishing Co., 1980.
- [9] Stuart, R., Peter, N., Artificial Intelligence-A Modern Approach, Prentice-Hall Inc., 1995.