

AUV의 자율항행을 위한 전문가시스템에서의 휴리스틱추론기법

이영일* · 김창민** · 김용기***

Heuristic Inference in the Expert System for Autonomous Navigation of AUV

Young-il Lee* · Chang-Min Kim** · Yong-Gi Kim***

요 약

자율무인잠수정(AUV, Autonomous Underwater Vehicle)이 해저 속에서 주어진 임무(mission)를 수행하는데 있어 가장 먼저 선행되어야 하는 것은 목표점(Goal Position)까지 안전하고 빠르게 항행할 수 있는 자율항행시스템(Autonomous Navigation System) 관련 기술의 개발이다. 이러한 시스템은 IPMS(Integrated Platform Management System)를 기반으로 하여 자율무인잠수정에 자율성을 부여하는 항행전문가시스템(Navigation Expert System)이 결합된 구조이다. 본 논문에서는 IPMS에 기반 한 자율항행시스템의 개념적 구조를 설계하고 항행전문가시스템의 추론방법으로서 퍼지관계곱(Fuzzy Relational Products) 기반 평가함수를 이용한 항행휴리스틱탐색(navigation heuristic search) 기법을 제안한다

keyword: 자율무인잠수정, 퍼지관계곱, 자율항해시스템, 항행전문가시스템, IPMS

1. 개요

삼면이 바다로 둘러싸인 우리 나라는 효율적인 자원이용과 개발을 위해 해양개발이 시급히 요구된다. 이를 위한 자율무인잠수정(AUV)의 개발 필요성은 해양자원개발 및 해양공간의 확보 차원에서 그 중요성이 증대되고 있다. 자율무인잠수정을 이용한 해양개발은 해양공간의 효율가치 증가를 고려해 볼 때, 다가올 21세기에 경제적, 산업적 기반 확립의 관점에서 반드시 이루어져야 한다. 지난 20여 년간 자율무인잠수정 관련 기술은 심해 탐사에서부터 대잠수함 전투까지 산업적, 군사적으로 이루어진 많은 응용에 기반 하여 괄목할 정도로 크게 진보되었다[1].

자율무인잠수정이란 인간이 활동할 수 없는 극한 환경 속에서 임무계획(planning), 계획조정(planning control), 의사결정(decision-making)과 같은 기능들을 인간전문가를 모방하여 행함으로써 주어진 임무(mission)를 완수하는 잠수정을 말한다.

자율무인잠수정이 주어진 임무를 완수하기 위해 먼저 선행되어야 하는 것은 주어진 목표점(Goal Position)까지 안전하고 신속히 항행 할 수 있는 자율항행시스템(Autonomous Navigation System) 관

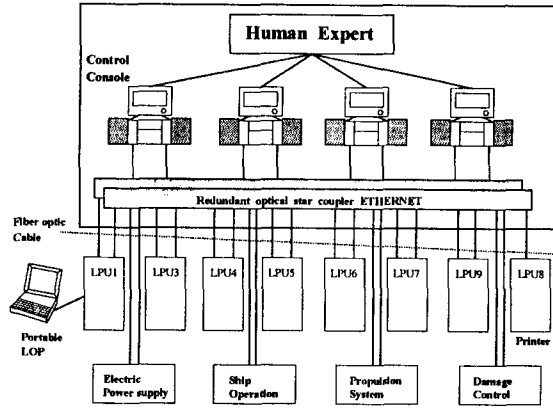
련 기술의 개발이다. 이러한 자율항행시스템은 극한 환경 속에서 자율무인잠수정이 인간의 작업을 대신하게 함으로서 인간의 위험부담 감소 또한, 모든 결정을 인간의 지식과 경험에 기반 한 현 잠수정의 과도한 인간 의존도를 감소시킬 수 있다는 측면에서 그 개발 필요성이 제기된다. 자율항행시스템은 잠수정을 구성하는 4가지의 요소 즉, 추진(propulsion), 전원관리(electric power supply), 조종/조합(ship operation), 그리고 손상관리(damage control)를 안전하게 제어(control)하고 모니터링(monitoring)하는 IPMS(Integrated Platform Management System)를 기반으로 하여 자율무인잠수정에 자율성을 부여하는 항행전문가시스템(Navigation Expert System)이 결합된 구조이다[2].

본 논문에서는 IPMS(Integrated Platform Management System)에 기반 한 자율항행시스템의 개념적 구조를 설계하고 항행전문가시스템의 추론방법으로서 퍼지관계곱(Fuzzy Relational Products) 기반 평가함수를 이용한 개선된 항행휴리스틱탐색(navigation heuristic search) 기법을 제안한다.

2. 관련 연구

인류가 해저를 개척하고 탐사하기 위해 잠수정을 개발한 이후, 그 관련 기술들은 사회적, 경제

* ** *** 경상대학교 컴퓨터과학과, 전산개발연구소



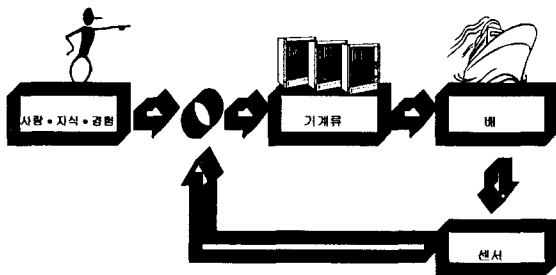
[그림2] IPMS의 구조도

적, 군사적 필요성 증대에 따라 많은 진보를 이루었다. 잠수정 관련 기술 중 항행시스템은 그 발전 과정을 유인잠수정단계, 자동화단계, 지능화단계의 3단계로 나눌 수 있는데 유인잠수정단계에서는 잠수함의 운항을 위한 모든 결정과 제어를 인간전문가에게 의존하는 형태를 취하였다. 유인잠수정단계의 발전된 형태인 자동화단계[그림1]는 인간전문가가 내린 결정을 자동화된 각 구성요소가 제어를 담당하는 구조로서 대부분의 현 잠수정이 이 단계에 속해 있다. 마지막으로 지능화단계는 항행을 위한 결정권을 인간전문가에 의존하지 않고 잠수정에 탑재된 전문가시스템에 부여함으로써 잠수정의 무인화를 구현하는 단계로서 [그림2]와 같다.

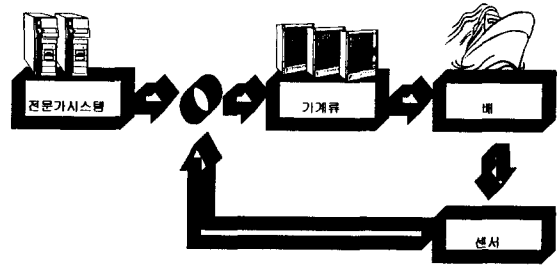
IPMS(Integrated Platform Management System)는 이러한 항행시스템 중 자동화단계의 핵심기술이며 또한, 지능화단계를 위한 구성 기반기술이다. IPMS란 잠수정을 구성하는 4가지의 요소 즉, 추진(propulsion), 전원관리(electric power supply), 조정/조함(ship operation), 그리고 손상관리(damage control)를 안전하게 제어(control)하고 모니터링(monitoring)하는 시스템구조로서 IPMS를 구축하기 위해서는 잠수정의 4가지 구성 요소를 디지털분산구조(digital distributed architecture)로 통합해야 한다[2][3].

3. 자율항행시스템

잠수정의 자율항행시스템 개발은 인간의 지식



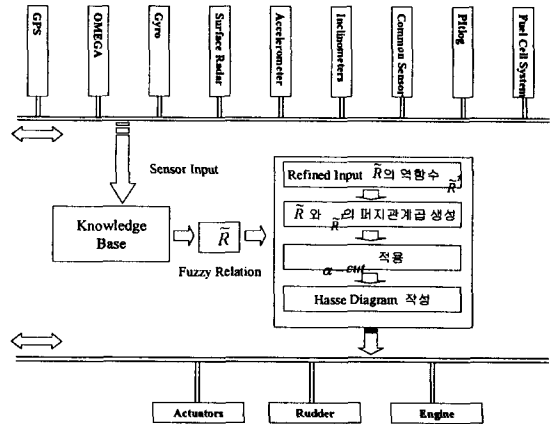
[그림 1] 자동화단계



[그림 2] 지능화 단계

과 경험을 잠수정에게 이식시켜 충돌 회피 및 충돌 방지, 최적화 탐색알고리즘, 항해 제어, 돌발 사태 제어, 작전 제어 등의 문제 해결에 이용되며 잠수정의 지능화, 무인화를 구현하는 것이다.

이러한 자율항행시스템을 구현하기 위해서는 [그림3][2]과 같은 IPMS에 기반 하여 항행을 위한 결정권을 가진 항행전문가시스템(Navigation Expert System)이 결합된다. IPMS에서는 인간전문가가 ETHERNET을 통하여 각각의 제어시스템(추진, 조정/조함, 전원관리, 손상관리)과 연결된 제어 콘솔을 통하여 잠수정의 항행을 제어하는 반면 자율항행시스템에서는 항행전문가시스템이 이를 대신한다. 항행전문가시스템의 개념적 구조도는 [그림4]와 같다.



[그림5] 항행전문가시스템의 개념적 구조도

본 논문에서는 항행전문가시스템의 추론방법으로서 퍼지관계형(Fuzzy Relational Products) 기반 평가함수를 이용한 개선된 항행휴리스틱탐색(navigation heuristic search) 기법을 제안한다.

4. 추론방법

본 장에서는 먼저 항행전문가시스템이 사용하는 추론방법의 이론적 기반이 되는 퍼지관계형에 관해 살펴보고, 다음으로 항행전문가시스템의 환경, 추론절차, 마지막으로 시뮬레이션 결과를 살펴 보

도록 한다.

4.1 퍼지관계급

퍼지관계급은 본 논문에서 제안한 추론방법의 이론적 기반이 된다. 퍼지관계급 연산은 Kohout와 Bandler에 의해 이진관계급이 확장된 개념으로 두 퍼지관계급의 각 원소들간의 의미적 포함관계를 나타낸다.

“퍼지집합 A는 퍼지집합 B의 부분집합이다”는 다음과 같은 수식으로 표현되며,

$$\mu_A \leq \mu_B \text{ 즉, } \forall x \in U, \mu_A(x) \leq \mu_B(x) \quad (1)$$

“퍼지집합 A가 퍼지집합 B의 부분집합이다”의 정도는 다음과 같은 수식으로 표현된다.

$$\frac{1}{|U|} \sum (\mu_A(x) \rightarrow \mu_B(x)) \quad (2)$$

A, B, C는 집합이고, $a_i \in A, c_k \in C$ 이며, $\tilde{R} : A \times B, \tilde{S} : B \times C$ 가 퍼지관계라 가정하면, 다음 세 가지 경우의 퍼지관계논리곱을 가진다.

퍼지삼각서브논리곱: a_i 가 c_k 에 포함되는 정도

$$(\tilde{R} \triangleleft \tilde{S})_{ik} = \frac{1}{|B|} \sum (\tilde{R}_{ij} \rightarrow \tilde{S}_{jk}) \quad (4)$$

퍼지삼각슈퍼논리곱: a_i 가 c_k 를 포함하는 정도

$$(\tilde{R} \triangleright \tilde{S})_{ik} = \frac{1}{|B|} \sum (\tilde{R}_{ij} \leftarrow \tilde{S}_{jk}) \quad (5)$$

퍼지사각논리곱: a_i 와 c_k 가 유사한 정도

$$(\tilde{R} \square \tilde{S})_{ik} = \frac{1}{|B|} \sum (\tilde{R}_{ij} \leftrightarrow \tilde{S}_{jk}) \quad (6)$$

퍼지삼각서브논리곱에 사용될 수 있는 퍼지조건연산자(Fuzzy Implication Operators)는 다음과 같다.

- ① $a \rightarrow b = \begin{cases} 1, & \text{if } a \neq 1 \text{ or } b = 1, \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$
- ② $a \rightarrow b = \begin{cases} 1, & \text{if } a < b, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$
- ③ $a \rightarrow b = \begin{cases} 1, & \text{if } a < b \\ b, & \text{otherwise.} \end{cases}$
- ④ $a \rightarrow b = \min(1, b/a).$
- ⑤ $a \rightarrow b = \min(1, 1 - a + b).$
- ⑥ $a \rightarrow b = (1 - a) \vee b = (\max(1 - a, b)).$

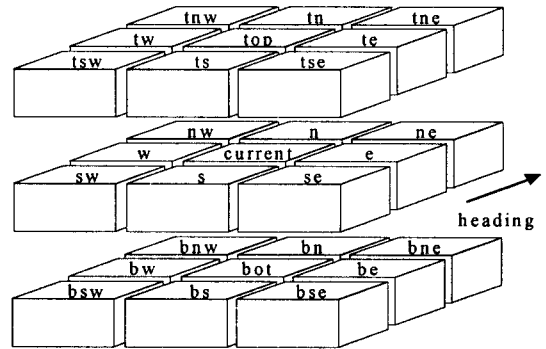
여기서는 ④번 퍼지조건연산자를 사용한다 [4][5][6][7].

4.2 항행전문가시스템 환경

항행전문가시스템의 계획조정(planning control)을 위한 환경모델(environment model)은 [그림5]와 같이 3차원격자단위모델(3-dimensional grid unit model)이며, 선택 가능한 후보노드의 개수는 모두 26개이나 본 프로토타입 시스템에서는 수식(7)과 같이 후진을 제외한 11개의 노드만을 후보노드집합으로 선정한다. 또한 상태노드집합은 수식(8)과 같이 정의한다.

$$S = \{tnw, tn, tne, nw, n, ne, bnw, bn, bne, tw, te\} \quad (7)$$

$$N = \{tnw, tn, tne, nw, n, ne, bnw, bn, bne, tw, top, te, w, e, bw, bot, be, ds, dc, dd, gl, gc, gr\} \quad (8)$$



[그림 5] 후보노드

4.3 항행휴리스틱탐색기법의 절차

본 기법은 퍼지관계급 $\tilde{R} \triangleleft \tilde{S}$ 가 두 퍼지관계 \tilde{R} 과 \tilde{S} 상의 포함정도를 의미한다는 점에 착안하여 퍼지관계 \tilde{R} 과 그 전치행렬 \tilde{R}^T 를 구하고 이 두 퍼지관계의 퍼지관계급 $\tilde{R} \triangleleft \tilde{R}^T$ 에서 얻어진 집합원소들간의 계층구조를 후보노드 선택에 이용하는 것이 항행휴리스틱탐색기법이다.

우선 수식(9),(10)와 같이 후보노드집합(candidate successor set) S와 상태노드집합(state node set) N을 정의하고 수식(11)과 같이 후보노드와 상태노드와의 퍼지관계 \tilde{R} 을 입력으로 받아들인다. 이때 입력되는 퍼지관계 \tilde{R} 의 값은 지식-베이스의 결정에 따른다. 수식(12)는 입력받은 퍼지관계 \tilde{R} 과 그 전치행렬 \tilde{R}^T 를 구하고 이 둘의 퍼지관계급 \tilde{S} 를 작성하는 과정으로서 후보노드집합 S에서 후보노드 집합 S로의 관계 즉, 후보노드집합 원소들간의 포함정도를 구한다. 수식(13)은 퍼지관계급 \tilde{S} 에 α -cut을 적용하는 단계로서 퍼지관계급을 이진관계행렬로 변환시킨다. 마지막으로 수식(14)에서는 이진관계행렬 내에 존재하는 집합 원소들간의

관계성을 도식화하는 핫세다이어그램을 작성하여 선택 가능한 후보노드의 집합 S 에서 하나의 후보노드를 선택한다.

$$S = \{s_1, s_2, \dots, s_k\} \quad (9)$$

$$N = \{n_1, n_2, \dots, n_i\} \quad (10)$$

$$\tilde{R} = \text{knowledge-bade}(S \times N) = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1i} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2i} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{k1} & r_{k2} & \dots & r_{ki} \end{bmatrix} \begin{matrix} s_1 \\ s_2 \\ \vdots \\ s_k \end{matrix} \quad (11)$$

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

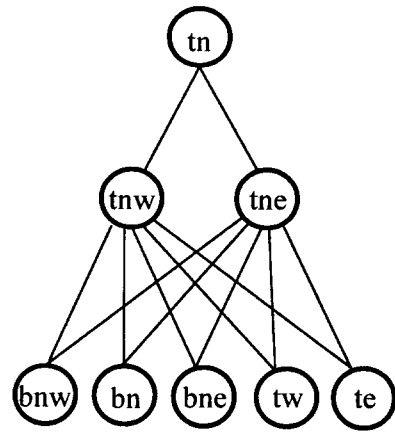
$$O_\alpha = \alpha_cut(\tilde{S}, \alpha) = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1k} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{k1} & b_{k2} & \dots & b_{kk} \end{bmatrix} \begin{matrix} s_1 \\ s_2 \\ \vdots \\ s_k \end{matrix} \quad (13)$$

$$H(O_\alpha) \quad (14)$$

자율무인잠수정이 퍼지관계곱 기반 평가함수를 이용하여 다음 이동경로를 선택하는 과정을 살펴보면 다음과 같다. 자율무인잠수정의 현재노드를 [그림7]의 좌표계(5,8,4)라 하면 이때 입력되는 퍼지관계 \tilde{R} 은 [표1]과 같고 이것이 수식 (12),(13),(14)의 단계를 거쳐 나온 결과인 핫세다이어그램이 [그림6]이다. [그림6]에 의해 다음 이동경로는 tn, 즉 좌표계(5,9,3)이 다음 노드로 선택된다.

S \ N	nw	n	ne	bnw	bn	bne
tnw	0.6	0.6	0.7	0.5	0.5	0.6
tn	0.8	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7
tne	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6	0.5
nw	0	0.9	0.9	0.8	0.8	0.9
n	1	0	1	1	1	1
ne	0.9	1	0	0.9	0.9	0.8
bnw	0.3	0.3	0.4	0	0.3	0.3
bn	0.5	0.5	0.5	0.4	0	0.4
bne	0.4	0.4	0.3	0.3	0.4	0
tw	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.2
te	0.2	0.2	0.1	0.2	0.2	0.1

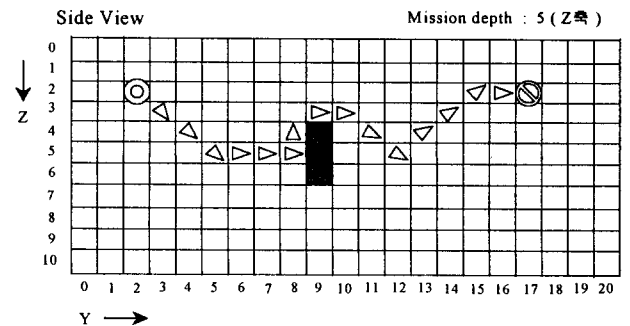
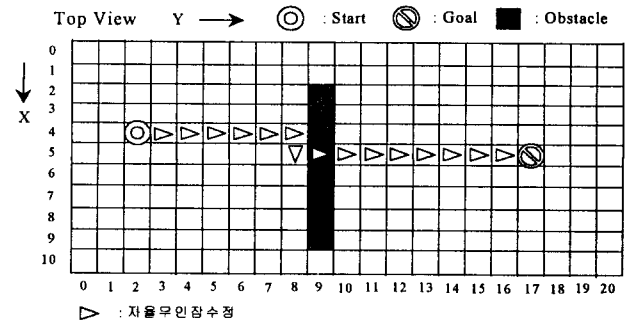
[표 1] 노드(5,8,4)에서의 입력 \tilde{R}



[그림 6] 핫세다이어그램

4.4 시뮬레이션결과

자율무인잠수정이 항행전문가시스템을 이용하여 시뮬레이션 환경에 주어진 넓은 모양의 장애물을 회피(obstacle clearance)하여 항행 한 결과가 [그림7]에 주어져 있다.



[그림 7] 자율무인잠수정의 항행 결과

여기서 작전깊이(mission depth)란 자율무인잠수정이 목표점까지 이동시 유지해야 하는 깊이를 말한다. 또한 1격자단위(grid unit)는 자율무인잠수

정의 크기를 근사한 것으로 X, Y축의 크기는 각각 70 inch이며 z축의 크기는 10 inch로 하였다.

5. 결론 및 향후 과제

자율무인잠수정은 해저에서 인간을 대신하여 다양한 작업들 즉, 해저광물 탐사 및 수색, 해저지형 및 지질 탐사, 그리고 해저면 영상자료 수집 등을 행함으로써 민·군수 분야에 폭넓게 활용될 수 있다. 이러한 자율무인잠수정의 핵심기술분야 중 하나인 항행전문가시스템의 추론방법으로서 본 논문에서는 퍼지관계곱(Fuzzy Relational Products) 기반 평가함수를 이용한 개선된 항행휴리스틱탐색(navigation heuristic search) 기법을 제안한다.

항행휴리스틱탐색기법을 추론의 방법으로 택한 항행전문가시스템은 크게 세 가지 특징을 가진다. 첫째, 후보노드와 상태노드간의 애매한 관계성(relationship)을 퍼지화(fuzzify) 할 수 있다. 둘째, 후보노드와 상태노드와의 관계성을 표현한 퍼지관계에 직접적으로 표현되지 않은 제 3의 요소도 고려하여 후보노드를 선택할 수 있다. 셋째, 장애물 회피 시 주어진 탐색절차를 따르지 않기 때문에 종합적이고 복합적인 관점에서의 후보노드 선택이 가능하다.

본 연구에 이어 함께 이루어져야 할 연구과제는 다음과 같은 것들이 있다.

- 입력되는 퍼지관계 \tilde{R} 을 조정하는 지식-베이스에 관한 연구
- 상태노드집합에 위기관리 관련원소 추가에 관한 연구
- 환경모델에서 상대좌표 이용에 관한 연구
- 자율무인잠수정의 시뮬레이션 시스템에 관한 연구

참고문헌

- [1] Ong, S. M., a Mission Planning Expert System with Three-Dimensional Path Optimization for the NPS Model 2 Autonomous Underwater Vehicle, Master Thesis, Naval Postgraduate School, 1990.
- [2] Lothar Sperl, "Platform Control and Automation," in Naval Forces, International Forum for Maritime Power, p55-p61, 1998.
- [3] Joseph Famme, "Ship Systems Automation Technology," Proceedings of Intelligent Ships Symposium, American Society of Naval Engineers, June 1-2, 1994.
- [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, 308-404, North-Holland, Amsterdam, 1984.
- [5] 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, 341-367, 1980.
- [6] Bandler, W., and Kohout, L. J., "Semantics of Implication Operators and Fuzzy Relational Products", Intl. Journal of Man-Machine Studies, 1980.
- [7] Kim, Yong-Gi and Kohout, L.J., "Use of Fuzzy Relational Products and Algorithms for generating Control strategies in resolution based Automated Reasoning", Proceedings of the fourth International Fuzzy System Association (IFSA) world congress, (Brussels, Belgium), p109-p112, July 7-12, 1991.
- [8] 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.
- [9] Mayer, R., Underbrink, A., Lockledge, J., and Reddy, U., "Situation Based Control Architectures for an AUV," unpublished technical report, Texas A&M University, College Station, Texas.
- [10] 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.