

무인수중로봇을 위한 지능형 자율운항시스템

(An Autonomous Navigation System for Unmanned Underwater Vehicle)

이 영 일[†] 정 희[†] 김 용 기^{**}
 (Young-il Lee) (Hee Jung) (Yong-Gi Kim)

요약 무인수중로봇은 인간의 직접적인 접근이 제한되는 위험한 지역을 운항하기 때문에 인식, 결정, 그리고 행동과 같은 영역전문가의 고유능력을 수행하는 지능형 제어소프트웨어를 반드시 탑재해야한다. 본 논문에서는 다양한 무인항체에 적용 가능한 RVC 지능시스템 모델을 제안하며, 또한 충돌회피시스템, 항해 계획시스템, 그리고 충돌위험도산출시스템으로 구성된 무인수중로봇을 위한 지능형 자율운항시스템을 개발한다. 충돌회피시스템에서는 퍼지관계곱에 기반한 장애물회피 알고리즘을 제안하는데 이는 생성경로 관점의 안전성과 효율성을 보장한다. 그리고 항해계획시스템에서는 폴리선을 이용한 항로계획 알고리즘을 제안한다. 제안된 지능형 자율운항시스템의 성능검증을 위해 환경관리자, 객체, 그리고 3차원뷰어로 구성된 시뮬레이션시스템을 개발하여 시뮬레이션을 수행한다.

키워드 : 자율수중운동체, 자율운항시스템, 충돌회피, 항해계획, 충돌위험도

Abstract UUV(Unmanned Underwater Vehicle) should possess an intelligent control software performing intellectual faculties such as cognition, decision and action which are parts of domain expert's ability, because unmanned underwater robot navigates in the hazardous environment where human being can not access directly. In this paper, we suggest a RVC intelligent system architecture which is generally available for unmanned vehicle and develop an autonomous navigation system for UUV, which consists of collision avoidance system, path planning system, and collision-risk computation system. We present an obstacle avoidance algorithm using fuzzy relational products for the collision avoidance system, which guarantees the safety and optimality in view of traversing path. Also, we present a new path-planning algorithm using poly-line for the path planning system. In order to verify the performance of suggested autonomous navigation system, we develop a simulation system, which consists of environment manager, object, and 3-D viewer.

Key words : AUV, Navigation System, Collision Avoidance, Path Planning, Risk of Collisino

1. 서론

제 2차 세계대전 이후 미국을 선두로 한 선진국들은 경쟁적으로 더욱 깊은 해저를 관찰하고 조사하였다. 이러한 60년대 중반까지의 기간에 개발된 유인잠수정을 제1세대 잠수정이라 한다. 그 후 70년대 초부터 근래에 이르기까지 주로 해양 석유산업의 수요에 의해 발전해 온 유인잠수정과 유선 무인작업정(ROV, Remotely Operated Vehicle)을 제2세대 잠수정이라고 한다. 무인수중

로봇은 가까운 장래에 그 활용도가 크게 늘어날 것으로 기대되는 제 3세대의 잠수정으로 많은 주목을 받고 있다. 해양 선진국들은 이러한 무인수중탐사의 필요성을 인식하고 1970년대부터 꾸준히 무인수중로봇에 관한 연구를 시작하여 현재 군사적, 경제적, 학문적 분야에서 그 응용성을 검증하고 있다.

무인수중로봇이란 자체적인 에너지를 내장하며 다양한 센서를 통해 환경정보를 획득하고 지능적 판단, 행위 및 상호작용을 통하여 인간을 지원하는 수중로봇이다. 이러한 무인수중로봇의 기능과 특성으로 인해 인간의 활동이 제약되는 해저에서 이루어지는 수중케이블 설치, 고장진단 및 유지보수, 해저자원 조사와 채굴과 같은 경제적 분야, 해양환경조사, 어족조사, 지형 탐사와 같은 학술적 분야, 그리고 대잠수함 전투나 기뢰 제거와

[†] 정희원 : 경상대학교 컴퓨터학과
 baram@ailab.gsnu.ac.kr
 jhee@jinju.ac.kr

^{**} 종신회원 : 경상대학교 컴퓨터학과 교수
 ykim@gsnu.ac.kr

논문접수 : 2006년 3월 9일

심사완료 : 2006년 12월 11일

같은 군사적 분야에서 인간을 지원하여 임무를 수행할 수 있다. 실시간 환경정보가 알려지지 않은 해저환경에서 무인수중로봇이 주어진 임무를 원만히 수행하기 위해서는 영역전문가 수준의 임무계획, 계획제어, 그리고 의사결정과 같은 고수준기능을 보유한 지능형 자율운항 시스템을 필요로 한다[1]. 자율운항시스템을 기능적 관점에서 분류하면 크게 항해계획시스템과 충돌회피시스템으로 양분된다. 항해계획시스템이란 임무수행을 위해 무인수중로봇을 임무환경으로 투입하기 이전에 임무지역에 대한 지형적 정보와 여러 가지 제약조건들을 고려하여 적절한 경로설정 기법을 통해 주어진 목표지점까지의 전체경로설정(global path planning)을 수행하는 시스템이다. 충돌회피시스템은 영역전문가의 경험적 정보를 보다 사실적으로 적용하여 고정 및 이동장애물에 대해 계산시간 및 소요메모리 관점의 효율성과, 이동경로관점의 안전성 및 최적성을 고려한 충돌회피를 수행하는 시스템이다.

본 논문에서는 무인수중로봇의 자율적인 운항을 위해 임무계획, 계획제어, 의사결정의 기능을 수행하는 지능형 자율운항시스템의 설계 및 구현에 대해 기술한다. 2장에서는 자율운항시스템을 구성하는 부시스템에 사용되는 상호 이질적인 인공지능기법을 통합할 수 있는 RVC(Reactive Layer-Virtual World-Considerative Layer) 지능시스템 모델을 제안하고, 이 모델에 기반하여 무인수중로봇의 자율운항시스템을 위한 아키텍처를 설계한다. 3장에서는 자율운항시스템을 구성하는 부시스템인 항해계획시스템, 충돌회피시스템, 그리고 충돌위험도산출시스템의 설계 및 구현에 관해 기술한다. 4장에서는 개발된 자율운항시스템의 성능검증을 위한 시뮬레이터 구현 및 결과에 관해 논한다. 마지막으로 5장에서는 본 연구에 대한 결론을 내린다.

2. 지능시스템 아키텍처

무인수중로봇의 자율운항기술에는 많은 문제 영역이 복합적으로 존재하므로 이를 효과적으로 구현하기 위해서는 다양한 기법을 필요로 한다. 각 영역은 복잡하고 불확실한 요인을 내재하고 있는 경우가 대부분이며, 이를 해결하기 위해서는 다양한 인공지능 기법을 적용해야 한다. 인공지능 영역을 분류해보면 지식베이스시스템과 같이 인간의 논리적 사고 체계와 유사한 기호적 인공지능(symbolic AI)과 신경망, 퍼지제어와 같이 인간의 감각적 반응 체계와 유사한 행위기반 인공지능(behaviour-based AI)으로 구분할 수 있다. 이러한 두 인공지능은 매우 다른 특성을 가지고 있으므로 효과적인 상호 융화가 쉽지 않다. 따라서 자율운항시스템의 효과적 구현을 위해서는 기호기반인공지능과 행위기반인

공지능이 조화롭게 상호작용 하는 시스템 모델과, 시스템의 전체적인 통합에 있어 효율성 및 일관성을 극대화 하는 시스템 모형은 필수적이다.

2.1 RVC 지능시스템 모델

20 세기 후반에 들어 하드웨어 기술의 급격한 발달로 자율운항시스템에 관한 연구가 활발해져, 연구자들은 기호기반인공지능 기법을 적용하여 자율운항시스템의 지능제어를 구현하려 하였다. 그러나 자율운항시스템이 동작하는 실세계 정보와 기호기반인공지능 기법의 실세계 표현 방법 간 심각한 괴리현상으로 인하여 실패를 거듭할 수밖에 없었다. 이는 실세계는 잘 정의되기 힘들고(ill-defined) 제약이 거의 없는데 반해, 기호기반인공지능 기법은 잘 정의되고(well-defined) 표현하기 쉬운 문제에 보다 적합하기 때문이다. 연구자들은 비친화적이고 불확실한 특성을 갖는 실세계 문제 해결에 적합한 인공지능기법을 연구하였다. 이와 같은 동기에 인하여 이루어진 대표적인 연구가 animat approach[2], reactive planning[3], computational neuroethology[4], task-oriented subsumption architecture[5] 등이 있는데 이러한 기법을 통칭하여 행위기반인공지능이라 한다[6]. 다양한 연구를 통하여 무인수중로봇을 위한 자율운항제어체계는 기호기반 또는 행위기반 어느 하나만으로는 만족할 만한 결과에 도달할 수 없다고 결론 내리게 되었다[7]. 따라서 최근의 연구동향은 기호기반인공지능과 행위기반인공지능을 적절히 융화하여 자율운항체계의 지능 제어체계를 수립하는 방향으로 진행되고 있다[6-8]. 그러나 두 인공지능은 매우 다른 특성을 가지고 있으므로 효과적인 상호 융화가 쉽지 않다. 본 연구에서는 기존의 모형을 분석하여 기호기반 인공지능기법과 행위기반 인공지능기법의 효율적 융화에 초점을 맞춘 RVC 지능시스템 모델을 제안한다.

그림 1은 RVC 지능시스템 모델의 개념도이다. RVC 지능시스템 모델은 반응형 및 숙고형 기법의 상호융화 극대화와 구성요소의 구조적 및 기능적 독립성 보장에 초점을 맞춘 지능시스템 모델이다. 이 모델은 숙고형 기법들이 주로 기호기반의 환경에 적절하다는 점에 착안하였는데, 반응형 기법들이 존재하는 반응층은 불확실한 실세계 문제를 해결하여 기호화된 형태의 정보를 제공하고, 숙고적 기법이 존재하는 숙고층은 반응형기법들이 처리한 정보를 이용하여 문제를 해결한다. 이때 양 계층의 정보교환을 위하여 공유정보 저장영역을 이용하는데, 이는 반응층에서 생산된 정보를 실시간으로 표현하고, 숙고층은 필요시 표현된 정보를 소비한다. 이러한 공유정보 저장영역은 정보의 장터 역할을 담당한다. 이 공유정보 저장영역은 무수히 존재하는 실세계 정보 중 반응층 의해 추출된 정보만을 표현하므로 항상 실세계 정보

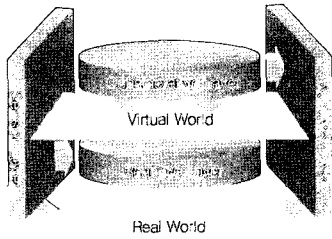


그림 1 RVC 모델

의 부분집합으로 표현된다. 속고층에서 볼 때, 이 공유 정보 저장영역은 실세계를 비추는 축소된 세계를 의미하므로 이를 가상세계(virtual world)라 한다.

2.2 RVC 기반 자율운항시스템 아키텍처

가상세계시스템은 RVC 지능시스템 모델에 기반하며, 실세계로부터 수집된 정보를 각 모듈에 실시간으로 적절히 전달하기 위하여 정보의 생산/소비와 클라이언트/서버 개념에 기초한다. 이를 위하여 가상세계시스템은 메모리 관리, 데이터 통신, 스케줄링 기능을 포함하고 있다. 특히, 데이터 통신에 있어서는 TCP/IP 프로토콜을 적용하므로 플랫폼 독립적인 특성을 갖게 되고 이로부터 자연스러운 로드 밸런싱(load balancing)이 이루어진다. 스케줄링은 자료간 동기화와 에러처리 기능을 구현한다. 그리고 RVC 지능시스템 모델에 기반하므로 구성요소의 독립성이 보장되게 되고 이로부터 병렬 개발이 가능하다. 그림 2는 가상세계시스템의 모형도이다.

3. 지능형 자율운항제어의 구성시스템

3.1 충돌회피시스템

충돌회피시스템(collision avoidance system)은 항해

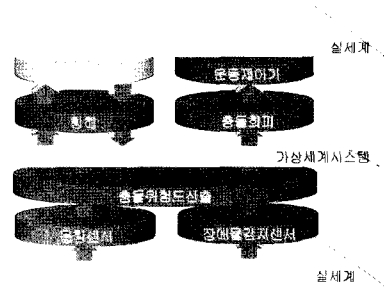


그림 2 가상세계시스템 모델

계획시스템이 산출한 경유점을 가상세계로부터 입력받아 무인수중로봇의 다음이동 목표점으로 설정한다. 무인수중로봇의 경유점 구간 항해에서 예상치 못한 장애물과 조우하거나 임무에 관한 정보의 변화가 발생하였을 경우 경유점 사이의 경로를 재설정하는 상세경로설정(local path planning)기능을 수행하는 시스템을 충돌회피시스템이라 한다.

3.1.1 충돌회피시스템 구조

무인수중로봇의 충돌회피시스템은 그림 3과 같이 가상장애물(virtual obstacle)모듈, 상대격자(relative grid)모듈, 가상면(virtual plane)모듈, 인접셀(adjacent cell)모듈, 그리고 후보셀선정(candidate cell selection)모듈의 5개 하위 구성모듈을 가진다. 가상장애물모듈에서는 가상세계로부터 입력되는 무인잠수정의 정보, 타선의 정보, 그리고 장애물위험도에 기반하여 원뿔 모양의 가상장애물을 생성한다. 상대격자모듈에서는 생성된 가상장애물을 상대격자에 [0,1]의 퍼지값으로 표현한다. 다음으로 가상면모듈에서는 무인잠수정의 진행 방향으로 셀들의 집합인 가상의 면을 생성하고 3차원에 표현되어

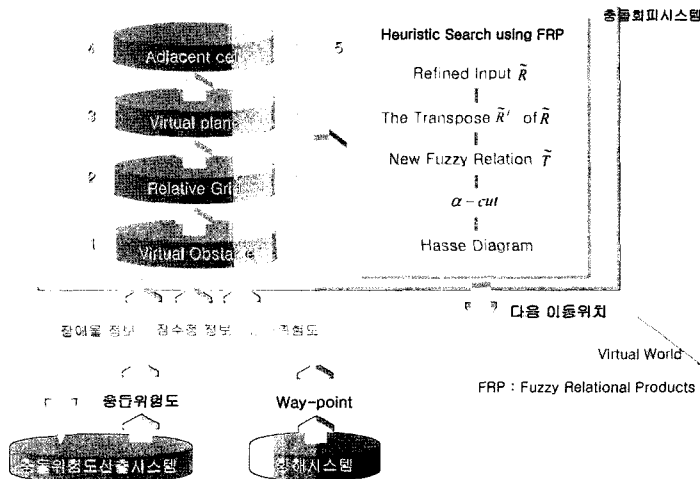


그림 3 충돌회피시스템

있는 장애물 정보를 2차원의 가상면으로 셀 단위로 투영한다. 인접셀모듈에서는 특정한 조건이 만족될 경우 셀과 셀사이에 가상의 셀을 생성하여 무인잠수정이 다음으로 이동할 수 있는 경우의 수를 증가시킨다. 마지막으로 후보셀선정모듈에서는 가상면을 구성하는 다수의 셀들 중 효율성이나 안전성 관점에서 최적의 셀을 선정하여 이를 무인잠수정의 다음 이동노드로 선정한다. 다음으로 이동 가능한 셀들과 장애물을 구성하는 셀들과의 관계성을 표현하기 위해 평가함수(evaluation function)[9]를 사용하며, 다음으로 이동 가능한 각 셀들간의 의미적 관계를 분석하여 최적의 셀을 선정하기 위해 퍼지관계곱(fuzzy relational products)[10-13]을 이용한다.

3.1.2 충돌회피 알고리즘

무인수중로봇의 충돌회피시스템에서는 다음으로 이동 가능한 셀들과 장애물을 구성하는 셀들의 관계성을 표현하기 위해 평가함수를 채용하며, 각 셀들간의 의미적(semantic) 포함관계를 분석하여 합리적인 후보셀 선정을 위해 퍼지관계곱을 이용한다. 평가함수는 충돌회피시스템의 성능을 결정짓는 중요인자이므로 시작위치에서 목표점까지 합리적이고 안전한 항해를 보장할 수 있도록 다음과 같은 영역전문가의 경험적정보를 충실하게 반영하여야 한다.

1. 가능한 한 현재위치로부터 가장 가까운 후보셀로 이동한다.
2. 가능한 현재의 방향과 깊이를 유지한다.
3. 가능한 한 장애물로부터 멀어지는 방향으로 이동한다.
4. 가능한 한 목표지점에 가까운 후보셀로 향하도록 한다.

평가함수는 국지경비함수(LC), 회피거리경비함수(ADC), 잔여거리경비함수(RDC)의 세 부분으로 구성되면 수식 (1)과 같이 표현된다. 수식 (2)의 국지경비함수는 자신의 현재상태 S_n 으로부터 후보노드상태 CS_{n+1} 까지 이동 시 소요되는 경비를 계산하는 것으로 이동경비와 방향 전환경비(RC)의 합으로 표현되며 이는 경험적정보 1과 2를 반영한다. 수식 (4)에 정의된 회피거리경비함수는 장애물벡터와 후보벡터 사이의 회피거리를 계산하며 경험적정보 3을 반영한다. 수식 (5)의 잔여거리경비함수는 각 후보벡터로부터 목표지점까지의 최소잔여거리를 계산하며 경험적정보 4를 반영한다.

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

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

$$TC(P_n, CP_{n+1}) = Horiz_D(P_n, CP_{n+1}) + 1.2 \times Depth_Change(P_n, CP_{n+1}) \quad (3)$$

$$ADC(OS_n, CS_{n+1}) = h_k \times Num_Avoid(OS_n, CS_{n+1}) \quad (4)$$

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

여기서 $S_n, CS_{n+1}, OS_n, P_{goal}$ 은 각각 무인잠수정의 현 상태, 후보셀 상태, 장애물셀상태, 목적지점을 의미한다.

충돌회피시스템의 후보셀선정모듈에서는 각 셀들간의 의미적 포함관계를 분석하여 합리적인 후보셀 선정을 위해 퍼지관계곱을 이용한다. 자연시스템과 인공시스템에 있어, 인지와 행동에 대한 분석과 종합의 새로운 방법론 또는 계산적 방법으로 퍼지관계곱 이론이 제안되었다. Kohout와 Bandler는 이진관계곱연산을 확장하여 두 퍼지관계 내 각 원소들간의 의미적 포함관계를 나타내는 퍼지관계곱을 제안하였는데 이는 충돌회피시스템의 이론적 기반이 된다. 장애물을 포함한 셀과 다음으로 이동 가능한 셀들사이에는 안정성과 경로최적성을 매개로 하는 관계성이 존재한다. 본 논문에서는 이러한 관계성을 퍼지관계곱으로 분석하여 다음으로 이동 가능한 셀들 중 가장 안전하고 효율적인 셀을 선정한다. 다음은 퍼지관계곱을 이용하여 후보셀을 선정하는 절차로서 크게 네 단계로 구성된다. 첫 번째 단계에서는 수식 (6), (7)과 같이 다음으로 이동 가능한 셀집합 S , 장애물을 포함한 셀집합 O , 그리고 다음으로 이동 가능한 셀집합과 장애물 집합의 퍼지관계 \tilde{R} 을 정의한다. 평가함수 EF는 현재지점에서 후보셀로 이동시 소모되는 에너지단위를 추정하고 이를 [0, 1]사이의 퍼지값으로 변환시킨다. 퍼지관계 \tilde{R} 은 이 퍼지값을 입력으로 취한다. 두 번째 단계에서는 수식 (8)과 같이 퍼지관계 \tilde{R} 과 그 전치행렬 \tilde{R}^T 에 삼각서브곱연산 \langle 을 적용하여 새로운 퍼지관계 \tilde{T} 를 생성한다. \tilde{T} 는 다음으로 이동 가능한 셀집합 S 와 다음으로 이동 가능한 셀집합 S 의 관계가 되고 이는 다음으로 이동 가능한 셀집합 원소들간의 의미적 포함관계를 나타낸다. 세 번째 단계에서는 수식 (9)와 같이 퍼지관계 \tilde{T} 를 이진관계행렬로 변환하기 위하여 \tilde{T} 에 알파절단(alpha-cut)을 적용하여 C_α 를 산출한다. 적용되는 알파절단 값에 따라 후보셀 집합 원소들간의 계층구조가 달라지기 때문에 합리적인 결과를 산출하기 위해서는 적절한 알파절단 값을 설정하는 것이 중요하다. 마지막 단계로 후보셀 집합 S 의 원소들간 부분순서(partial order)를 도식화하는 하세 다이어그램(hasse diagram)을 작성한다. 이는 최적성과 효율성 관점에서 의 후보셀 집합 원소들간의 계층적 구조를 의미한다. 그

림 4에서 예시된 하세 다이어그램에서처럼 계층의 최상위 노드를 무인수중로봇의 다음 이동 셀로 선정한다.

$$S = \{s_1, s_2, \dots, s_k\}, \quad O = \{o_1, o_2, \dots, o_i\} \quad (6)$$

$$\tilde{R} = S \times O = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1i} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2i} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{k1} & r_{k2} & \dots & r_{ki} \\ q & o_2 & \dots & o_i \end{bmatrix} \begin{matrix} s_1 \\ s_2 \\ \vdots \\ s_k \end{matrix} \quad (7)$$

$$\tilde{T} = \tilde{R} \triangleleft \tilde{R}^T = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & \dots & f_{1k} \\ f_{21} & f_{22} & \dots & f_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{k1} & f_{k2} & \dots & f_{kk} \\ s_1 & s_2 & \dots & s_k \end{bmatrix} \begin{matrix} s_1 \\ s_2 \\ \vdots \\ s_k \end{matrix} \quad (8)$$

$$C_\alpha = \alpha_cut(\tilde{T}, \alpha) = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1k} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{k1} & b_{k2} & \dots & b_{kk} \\ s_1 & s_2 & \dots & s_k \end{bmatrix} \begin{matrix} s_1 \\ s_2 \\ \vdots \\ s_k \end{matrix} \quad (9)$$

$$H(C_\alpha) \quad (10)$$

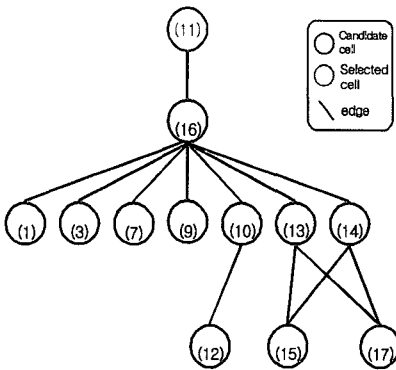


그림 4 하세 다이어그램의 예

3.2 항해계획시스템

무인수중로봇의 항해계획시스템이란 시작점에서 목표지점까지 안전하고 효율적인 항해를 보장하기 위해 오프라인상태에서 전역경로설정을 수행하며, 정해진 경로를 따라 항해하도록 감시 및 제어하는 시스템을 의미한다. 일반적으로 항해계획시스템은 항해계획(path planning)기능[14,15]과 유도 및 제어(guidance and control)기능으로 구성된다. 항해계획은 무인수중로봇이 출발지점부터 목표지점까지 운항하게 될 모든 항로를 경유점을 이용하여 설정하는 기능을 의미하며, 유도 및 제어기

능은 결정된 경로를 따라 무인수중로봇이 항해할 수 있도록 유도 및 제어하는 기능을 의미한다.

3.2.1 항해계획시스템 구조

항해계획시스템의 기능은 크게 합리적인 항해계획기법 선정, 목표점까지의 경로산출 그리고 산출된 경로를 가상세계로 전달하는 것이다. 이러한 기능을 수행하기 위해 항해계획시스템은 그림 5와 같은 계층적 구조를 지닌다. 그림에서 보여지듯 항해계획시스템의 제어는 최상위층의 항로계획제어기에 집중되는데 이는 전체적인 임무계획을 관리하고 하위단계의 수행을 순서적으로 제어하는 역할을 수행한다. 시스템구조는 항로계획제어기 이외에도 항로계획기, 항로구성기, 항로수행기와 같은 구성요소를 가진다. 환경수신기는 사용자가 제공하는 임무와 관련된 정보를 취득하는 역할을 수행한다. 환경수신기가 사용자로부터 필요한 정보를 모두 입력받고 나면 제어가 항로계획제어기로 넘어가고 항로계획제어기는 하위계층의 항로계획기, 경로구성기, 항로수행기를 초기화시킨다.

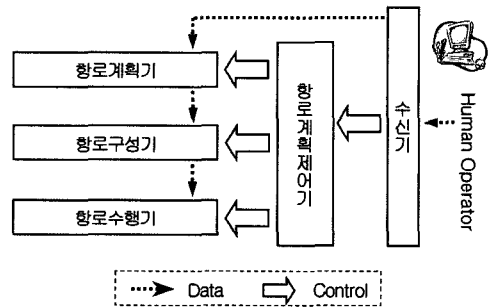


그림 5 항해계획시스템

3.2.2 항해계획 알고리즘

무인수중로봇의 운항환경에는 여러 형태의 고정장애물이 존재하지만 무인수중로봇이 일정한 깊이 이상으로만 항해할 경우 일정깊이보다 더 낮은 장애물은 고려하지 않아도 된다. 이러한 관점에서 본 논문에서는 장애물 접점과 경유점 트리를 이용한 항로계획(IRCT, Intelligent Route planning using the point of obstacle Contact and waypoint-Tree)기법을 제안한다. 이 기법은 전역경로설정을 위해 고정장애물과 임시 경로사이의 접점을 산출하며, 산출된 각 장애물들의 접점들을 연결하여 경유점 트리를 생성한다. 그리고 생성된 경유점 트리는 깊이 우선 탐색을 통해 최적의 항로를 설정한다. 산출된 경유점은 가상세계에 전달되며 이를 충돌회피시스템 및 다른 시스템과 공유하게 된다.

- 1) 장애물접점 산출

출발점과 목표점사이 에 장애물이 존재 할 시 출발점 S와 장애물과의 좌측 접점 Ls와 우측 접점 Rs, 목표점 G와 장애물과의 좌측 접점 Lg와 우측 접점 Rg를 산출한다. 또한 Ls와 Lg사이의 접점을 반복적으로 구하고, 마찬가지로 Rs와 Rg 사이의 접점을 구한다. 그림 6은 장애물 접점을 산출된 좌측향로와 우측향로의 예를 보인다. 산출된 장애물 접점이 저장되는 자료구조 형식은 그림 7에서와 같이 각 접점의 좌표 값이 들어있는 테이블과 다음노드를 가리키는 포인트로 이루어져 있다.

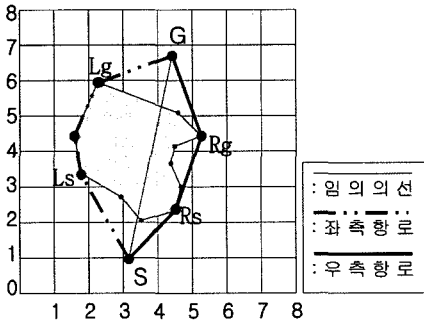


그림 6 폴리선을 이용한 항해계획

P_A	좌측향로	P_B	P_C	우측향로	P_D
-------	------	-------	-------	------	-------

그림 7 노드구조

2) 경유점 트리 생성

출발점과 목표점 사이 에 둘 이상의 고정장애물이 존재할 경우 각 장애물 접점에 대해 경유점 트리(way-point-tree)를 생성한다. 둘 이상의 고정장애물이 존재하는 경우에 대한 경유점 트리는 그림 8과 같다. 경유점 트리를 생성하면 출발지점 S와 목표지점 G사이 에 존재하는 모든 고정장애물들 중 실제 운항에 영향을 미치는

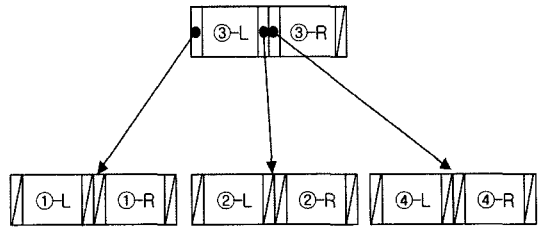


그림 8 경유점 트리

장애물을 추출할 수 있다. 그리고 각 장애물을 회피한 좌측과 우측 향로에 대한 정보들이 경유점 트리 에 저장된다. 즉, 출발지점 S에서 목표지점 G로 갈 수 있는 모든 향로를 산출하기 위한 최소한의 정보만 경유점 트리 에 저장된다는 것이다.

3.3 충돌위험도산출시스템

충돌위험도산출시스템(collision risk computation system)은 주변 환경정보와 장애물정보, 위치정보를 이용하여 무인수중로봇의 운항 환경에 존재하는 다양한 장애물들에 대한 충돌위험도를 산출하는 시스템이다[16,17]. 충돌위험도산출시스템은 장애물이 무인수중로봇과 충돌 위험이 있다고 판별될 때 진로 방향을 수정하여 안정하게 장애물을 회피할 수 있도록 하는 충돌회피시스템의 판단 근거를 제공한다.

3.3.1 충돌위험도산출시스템 구조

충돌위험도산출시스템은 무인수중로봇의 운항 환경에 존재하는 장애물의 충돌위험도를 산출하기 위해 퍼지추론을 이용하며 그림 9와 같이 크게 세 부분으로 구성된다. 첫 번째 모듈은 입력모듈로서 무인수중로봇과 장애물에 대한 벡터정보를 가상세계로부터 읽어들이며 장애물의 DCPA(Distance of the Closest Point of Approach)와 TCPA(Time of the Closest Point of Approach)를 산출한다. 두 번째, 충돌위험도 산출 모듈에서는 퍼지추론을 이용하여 장애물의 충돌위험도를 산출한다. DCPA

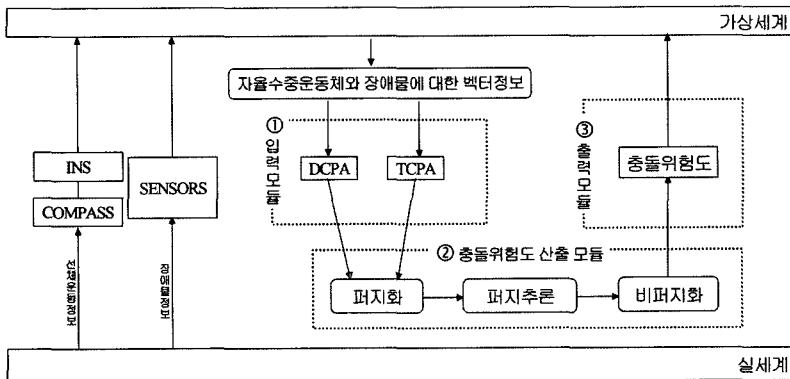


그림 9 충돌위험도산출시스템

와 TCPA의 입력값을 받아들여 퍼지화 시키고, 퍼지 추론을 행한 뒤 비퍼지화 하여 장애물의 충돌위험도값을 산출한다. 세 번째, 출력모듈은 산출된 충돌위험도를 충돌회피시스템에 제공하기 위해 가상세계로 전송한다.

3.3.2 충돌위험도산출

충돌위험도는 DCPA와 TCPA를 입력으로 퍼지추론을 행하여 계산하는데, 추론규칙의 조건부에서는 min 연산을 결론부에서는 곱(product)연산을 사용하였으며 무게중심법을 사용하였다. 입력값으로 들어가는 DCPA와 TCPA, 그리고 출력값인 충돌위험도에 대해 각각의 멤버십함수를 먼저 정의한다. 그림 10은 DCPA, TCPA, 그리고 충돌위험도에 대한 소속함수를 보여준다. 각각의 소속함수에 사용된 언어 레이블은 다음과 같은 의미를 가진다.

충돌위험도 계산을 위한 추론규칙 테이블은 표 1과 같은데 이 추론 규칙은 항해전문가의 지식을 기본으로 해서 만들어졌으며, 운항자의 경험적인 지식에 따라 수정이 가능하다.

표 1 충돌위험도 계산을 위한 추론규칙

DCPA \ TCPA	NB	NM	NS	PS	PMS	PM	PMB	PB
PS	NS	NM	NB	PB	PMB	PM	PMS	PS
PMS	NS	NS	NM	PMB	PM	PMS	PS	PS
PM	NS	NS	NS	PM	PMS	PS	PS	PS
PMB	NS	NS	NS	PMS	PS	PS	PS	PS
PB	NS	NS	NS	PS	PS	PS	PS	PS

If DCPA is PS and TCPA is NB then Collision Risk is NS
 If DCPA is PS and TCPA is NM then Collision Risk is NM

 If DCPA is PB and TCPA is PMB then Collision Risk is PS
 If DCPA is PB and TCPA is PB then Collision Risk is PS

4. 시뮬레이션시스템

시뮬레이션시스템이란 무인수중로봇과 관련된 모든

현상, 요인, 물체, 장치 등을 모델링하고 여기에 자율운항시스템을 가상적으로 장착한 후 무인수중로봇의 전반적인 운항 과정과 운항 중에 등장하는 주변객체들을 컴퓨터를 통해 모의 실험하는 소프트웨어를 의미한다. 시뮬레이션시스템에서는 입력으로 작용하는 각종센서, 속도계, 항법장치와 출력으로 작용하는 추진장치, 조타장치를 적절하게 모델링하여 자율운항시스템과 상호작용하도록 한다.

4.1 시뮬레이션시스템 구조

무인수중로봇의 자율운항시스템은 각종 센서로부터 운항에 필요한 환경정보를 입력 받고, 이러한 정보를 분석하여 추진 장치부나 조타 장치부에 새로운 동작 명령을 전달한다. 본 논문의 2장에서 제안한 가상세계시스템 모형도에서 시뮬레이션시스템의 구현 대상은 그림 11과 같다. 시뮬레이션시스템은 그림 12와 같이 자율운항시스템과 물리적 장치간의 상호작용을 시뮬레이션하고 처리



그림 11 시뮬레이션시스템의 구현대상

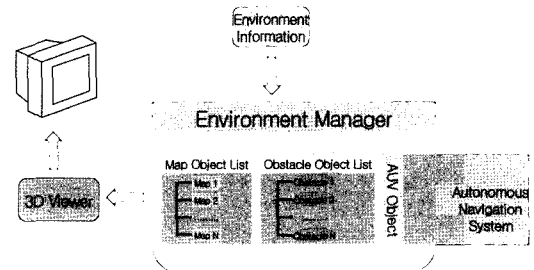


그림 12 시뮬레이션시스템의 구조

P : Positive, N : Negative, S : Small, M : Medium, B : Big

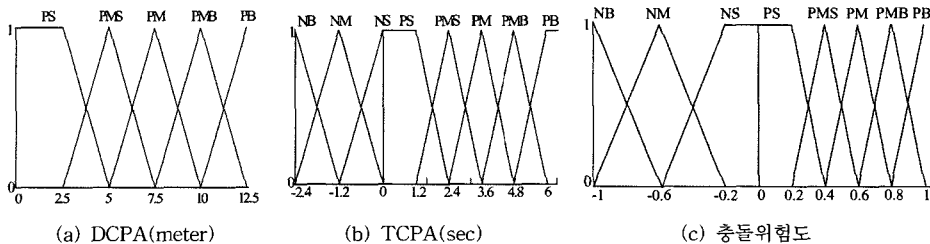


그림 10 멤버십 함수

결과를 3차원으로 디스플레이하며, 크게 환경 매니저 (environment manager), 객체(object), 3차원 뷰어(3D viewer)로 구성된다.

4.2 시뮬레이션시스템의 구성요소

4.2.1 환경관리자

환경관리자는 외부로부터 표 2와 같은 환경정보를 입력받아 무인수중로봇의 운항에 영향을 주는 환경요소와 현상들을 모델링하고 내포된 객체의 상호작용을 가능하게 한다. 시뮬레이션에서 자율운항시스템은 환경관리자가 생성한 각종 정보를 참조하여 임무를 수행하게 된다. 환경관리자의 주된 역할은 시뮬레이션 환경을 구성하고 관리하는 것으로 시뮬레이션에 필요한 각종 객체를 생성하고 속성을 초기화하며 객체들의 상호작용을 조율한다.

표 2 환경정보

대상	시작 기호	입력 내용	예
지역	E	전체지역 범위	E200 200
UUV	A	무인잠수정의 위치값	A-67.3 3.3 81.4
장애물	O	장애물의 위치값	O-7.8 0.0 -29.4
지형	M	격자의 상대적 위치값 격자의 네 꼭지점 높이값 스팟의 높이값 격자의 단위법선 벡터값	M00001317.2 8.6 12.9 17.2 17.2 -0.7 0.1 0.7

4.2.2 객체

객체는 객체지향 기법을 적용하여 표현한 환경정보와 무인수중로봇의 상태를 의미한다. 시뮬레이터는 무인수중로봇의 운항환경을 표현하기 위해 동일한 성향의 대상을 클래스로 만들며, 이러한 클래스들은 환경관리자가 생성하는 객체의 기본 틀이 된다. 환경관리자가 생성한 객체들은 운항환경을 표현하고 주어진 역할에 따라서 개별적인 성질과 동작을 가진다. 환경관리자가 생성하는 객체에는 지도(map), 장애물(obstacle), 무인수중로봇(UUV)이 있다. 지도객체는 무인수중로봇이 운항하는 해저의 지형을 표현하는 객체로 구역(Area), 점(Spot)으로 이루어진 계층적인 구조를 가진다. 장애물객체는 운항 중에 나타나는 모든 장애물을 표현하며 장애물의 운동성에 따라 고정 장애물과 이동장애물로 구분된다. 무인수중로봇객체는 무인수중로봇을 표현하는 객체로 자율운항시스템과 연결되는 객체이다. 그림 13은 전체적인 환경정보 클래스를 보여준다.

4.2.3 삼차원뷰어

삼차원뷰어는 시뮬레이션의 전체적인 수행과정을 그림 14처럼 삼차원으로 디스플레이 하는 구성요소이다. 삼차원뷰어는 환경관리자로부터 정보를 입력받아 OpenGL을 사용하여 시뮬레이션 과정을 삼차원으로 시각화한다.

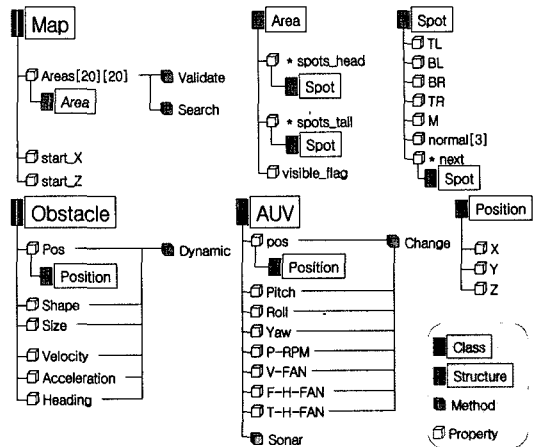
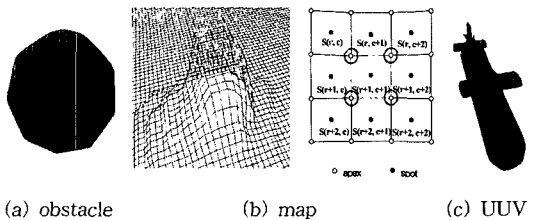


그림 13 환경정보 클래스



(a) obstacle (b) map (c) UUV

그림 14 각 객체에 대한 삼차원뷰어

OpenGL은 그래픽 하드웨어에 대한 소프트웨어 인터페이스로서 삼차원 응용프로그램 제작에 필요한 객체를 구성하거나 연산을 수행한다. OpenGL은 다양한 하드웨어 플랫폼에 구현할 수 있지만 복잡한 객체를 생성하는 명령어는 제공하지 않으며 점, 선, 폴리곤 등의 기하 프리미티브만 생성할 수 있다. 본 논문에서는 지형이나, 장애물, 무인잠수정과 같은 복잡한 대상을 표현하기 위하여 기본적인 프리미티브들을 조합하여 시뮬레이션에 필요한 객체들을 표현한다.

4.3 시뮬레이션 결과

본 논문에서 제안하는 무인수중로봇의 자율운항시스템 대한 성능검증을 위해 충돌회피시스템, 충돌위험도산출시스템, 그리고 시뮬레이션시스템을 연동하여 그림 15처럼 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션을 위해 필요한 무인수중로봇의 제원은 국방과학연구소에서 개발한 UUV[18]를 이용하였으며, 간단한 제원이 표 3에 보여진다. 무인수중로봇을 위한 자율운항시스템은 목표지점까지 안전하고 합리적인 경로를 통한 장애물회피를 수행해야 한다. 이러한 목적달성 여부를 판별하기 위해 표 4와 같이 무인잠수정과 장애물의 여러 가지 조우상황을 적절하게 조합한 여섯 가지의 시나리오를 설정하여 시뮬레이션을 수행시킨다.

표 4 시뮬레이션 시나리오

#	Situation	Num of Obst.	Scenario		
			Description	P_{start}	P_{goal}
s1	No Obstacle	0	No Obstacle Situation	(0, 0, -10)	(65, 210, -35)
s2	One Obstacle	1	Head-on Situation	(0, 0, -10)	(-10, 210, -35)
s3	Two Obst.. I	2	Head-on+Crossing	(0, 0, -10)	(-10, 210, -10)
s4	Two Obst.. II	2	Crossing+Overtaking	(0, 0, -10)	(-20, 210, -17)
s5	Two Obst.. III	2	Crossing I +Crossing II	(0, 0, -10)	(-20, 210, -17)
s6	Three Obst.	3	Head-on I +Head-on II +Overtaking	(0, 0, -10)	(0, 210, -10)

표 3 UUV 제원

구분	내용
외부선체 길이/직경	약 10 (비율)
최대 속도	8.0kts
최대 운용 심도	100m (내압구조형태)
배수톤수	1.380kg(공기중 950kg)

본 절에서는 여섯 가지의 시나리오들 중 시나리오 s3과 s6에 대한 시뮬레이션 결과를 분석하도록 한다. 서로 다른 두 개의 이동장애물이 존재하는 시나리오 s3에서 첫 번째 장애물의 시작점과 목표점은 각각 $O_{s1}(-20, 150, -10)$ 와 $O_{G1}(13, -60, -10)$ 로 무인수중로봇의 좌측 정면에서 정면으로 다가오는 형태로 배치되어 있으며, 두 번째 장애물의 시작점과 목표점은 각각 $O_{S2}(80, 90, -10)$ 와 $O_{G2}(-140, 74, -10)$ 로서 무인수중로봇의 우측에서 횡단하는 형태로 배치되어 있다. 그림 16은 시뮬레이션결과에 대한 이해를 돕기 위해 수행결과를 도식화한 그림이다. 무인수중로봇은 장애물이 소나의 탐지거리인 40m거리 안에 들어왔을 때 이를 인식하고 가장 안전하고 합리적인 후보 셀을 계산하여 다음 경유점으로 선정한다. 무인수중로봇은 $P(0, 62, -10)$ 지점에서 정면으로 다가오는 장애물과 우측에서 횡단하고 있는 장애물을 동시에 탐지하여 목표점이 존재하는

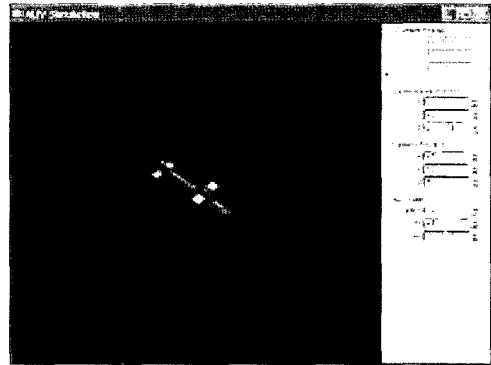
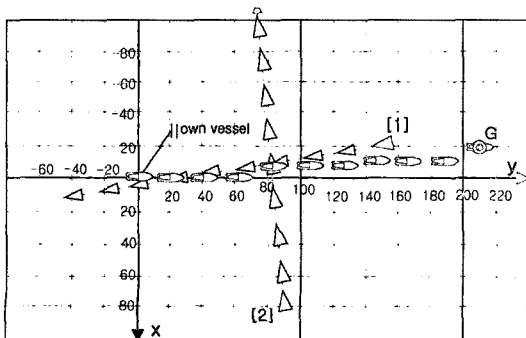


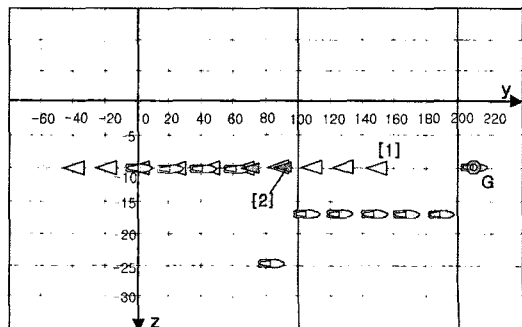
그림 15 시뮬레이션시스템

아래의 방향인 $P(-7, 83, -23)$ 지점으로 회피명령을 내려 두 장애물을 동시에 회피함을 확인할 수 있다.

서로 다른 세 개의 이동장애물이 존재하는 시나리오 s6에서 첫 번째 장애물의 시작점과 목표점은 각각 $O_S(-20, 150, -10)$ 와 $O_G(13, -60, -10)$ 로 무인수중로봇의 좌측 정면에서 정면으로 다가오는 경우이며, 두 번째 장애물의 시작점과 목표점은 각각 $O_S(30, -10, -17)$ 와 $O_G(-2, 160, -17)$ 로서 뒤쪽에서 추월하는 형태이며, 마지막 장애물의 시작점과 목표점은 $O_S(0, 200, -10)$ 와 $O_G(0, -20, -10)$ 로 정

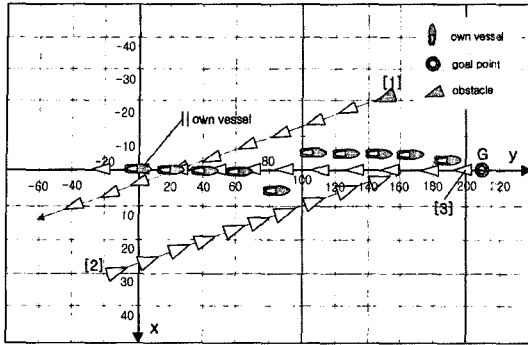


(a) A result in view of X-Y plane

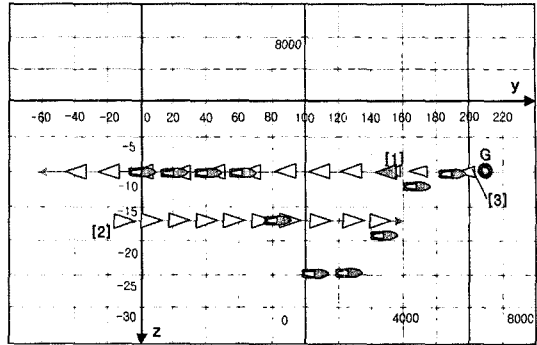


(b) A result in view of Y-Z plane

그림 16 시나리오 s3의 시뮬레이션 결과



(a) A result in view of X-Y plane



(b) A result in view of Y-Z plane

그림 17 시나리오 s6의 시뮬레이션 결과

면에서 무인수중로봇에 접근하는 형태로 배치되어 있다. 그림 17은 시뮬레이션결과에 대한 이해를 돕기 위해 수행결과를 도식화한 그림이다. 시뮬레이션 결과에서 보듯이 무인수중로봇은 $P(0,63,-10)$ 지점에서 접근하는 1번 장애물 $O_1(-11,87,-10)$ 을 탐지하여 $P(7,84,-17)$ 지점으로 회피명령을 내리며, 이어서 탐지되는 2번 장애물 $O_2(18,58,-17)$ 에 대해 $P(-7,105,-24)$ 지점으로 회피하여 합리적이고 효과적인 충돌회피가 수행되었음을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 다양한 무인로봇(unmanned vehicle)에 적용될 수 있는 RVC 지능시스템 모형을 설계하고, 개발된 가상세계시스템 기반 위에 충돌회피시스템과 항해시스템 그리고 충돌위험도산출시스템으로 구성되는 무인수중로봇의 지능형 자율운항시스템을 설계 및 구현하였다. 가상세계시스템은 개발 시 서로 다른 기법의 융화, 시스템 일관성 유지, 실시간 처리 시스템 구현 등의 특성을 고려하였으며, 또한 클라이언트/서버 체계를 따르기 때문에 일관성 유지, 독립성 극대화, 부하배분이라는 장점을 지닌다. RVC 지능시스템 모형은 무인수중로봇뿐만 아니라 무인항공기, 모바일 로봇, 무인함정 등과 같은 다양한 무인로봇에도 적용 가능하다. RVC 지능시스템 모형에 기반하여 설계된 무인수중로봇의 지능형 자율운항시스템 성능검증을 위해 3-D기반 시뮬레이터를 개발하였으며, 서로 다른 여섯 가지의 시나리오를 설정하여 개발된 지능형 자율운항시스템의 타당성 검증을 위한 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과를 안정성 관점에서 분석한 결과 모든 시나리오에서 탐지된 장애물에 대해 충돌 없이 합리적인 장애물회피를 통해 주어진 목표점까지 안전하게 도달하였다. 따라서 제안된 자율운항시스템이 무인수중로봇의 실용적인 실시간 자

율운항시스템으로 적합함을 확인하였다.

참고 문헌

[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] Wilson, S. W., A Mechanism for context-sensitive reasoning, Technical Report 90-68, Department of Computer Science, Univ. of New Hampshire, 1990.

[3] Agre, P. E. and Chapman, D., Pengi, "An Implementation of a theory of activity," In Proceedings of the Sixth National Conference on Artificial Intelligence, 1987.

[4] Cliff, D., Computational neuroethology, "A provisional manifesto," In Meyer, Proceedings of the First International Conference on Simulation of Adaptive Behavior, The MIT Press, 1991.

[5] Brooks, R. A., "A robust layered control system for a mobile robot," IEEE Journal of Robotics and Automation, 1986.

[6] Roy M. Turner, D.Richard Blidberg, Steven G. Chappell, and James C. Jalbert, "Generic behaviors: An approach to modularity in intelligent systems control," Proceedings of the 8th International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology, 1993.

[7] Ronald C. Arkin, "Towards the Unification of Navigational Planning and Reactive Control," the AAAI Spring Symposium on Robot Navigation, Mar. 1989.

[8] Scerri, P. and Reed N. "Requirements for a General Agent Architecture for Agent-Based Simulation Environments," Agents'99 Workshop on Autonomy Control Software. May, 1999.

[9] Lee Y I., Kim Y G., Ladislav J Kohout, "An Intelligent Collision Avoidance System for AUVs

using Fuzzy Relational Products," Information Sciences, Vol. 158, 2004.

[10] 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.

[11] Bandler, W., and Kohout, L. J., "Semantics of Implication Operators and Fuzzy Relational Products," Intl. Journal of Man-Machine Studies, 1980.

[12] 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.

[13] Bandler, W., and Kohout L. J., "Fuzzy Power Sets and Fuzzy Implication Operator," Fuzzy Set and System4, pp. 13-30, 1980.

[14] 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.

[15] 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.

[16] 김은경, "충돌회피를 위한 충돌위험도 결정 시스템", 한국퍼지 및 지능시스템 학회 논문지, vol. 2, pp. 524-527, 2001.

[17] Hara, K. and Hammer, A., "A safe Way of Collision Avoidance Maneuver based on Maneuvering Standard using Fuzzy Reasoning Model," MARSIM 93, St. John's, 1993.

[18] 김현식, 지능 제어를 이용한 Underwater Flight Vehicle의 심도 제어에 관한 연구, 부산대학교 공학박사 논문, 2001.



정 희

1996년 전주산업대학교 산업경제학과(경제학사). 2000년 창원대학교 전자계산학과(이학석사). 2003년~현재 경상대학교 컴퓨터학과(박사과정). 관심분야는 인공지능, 충돌회피시스템, 자율항해시스템



김 용 기

1978년 서울대학교 전기공학과(공학사) 1987년 University of Montana 전산학과(MS). 1991년 Florida State University 전산학과(Ph.D). 1992년~현재 경상대학교 컴퓨터학과 교수. 관심분야는 퍼지 시스템, 지능시스템, 무인수중로봇



이 영 일

1999년 경상대학교 컴퓨터학과(이학사). 2001년 경상대학교 컴퓨터학과(공학석사). 2005년 경상대학교 컴퓨터학과(공학박사). 관심분야 퍼지관계급, 충돌회피시스템, 자율항해시스템, 무인수중로봇