

# 수중비행체의 자율제어를 위한 지능형 장애물회피 알고리즘

## Intelligent Obstacle Avoidance Algorithm for Autonomous Control of Underwater Flight Vehicle

김현식\* · 진태석\*\*

Hyun-Sik Kim and TaeSeok Jin

\* 동명대학교 로봇시스템공학과

\*\* 동서대학교 메카트로닉스공학과

### 요 약

실제 시스템 적용에 있어서, 수중비행체(Underwater Flight Vehicle : UFV)의 자율제어(autonomous control)를 위한 장애물회피(obstacle avoidance) 시스템은 다음과 같은 문제점들을 가지고 있다. 즉, 소나(sonar)는 지역적 탐색영역 내의 장애물 정보만을 제공할 수 있으므로 지역적 정보를 가지며, 에너지 소비 및 음향학적 소음이 적은 시스템이 필요하므로 연속적인 제어입력을 요구한다. 나아가, 구조와 파라미터의 관점에 있어서 용이한 설계 절차를 요구한다. 이 문제를 해결하기 위해서 진화 전략(Evolution Strategy : ES) 및 퍼지논리 제어기(Fuzzy Logic Controller : FLC)를 이용하는 지능형 장애물회피 알고리즘이 제안되었다. 제안된 알고리즘의 성능을 검증하기 위해 UFV 장애물회피가 수행되었다. 시뮬레이션 결과는 제안된 알고리즘이 실제 시스템에 존재하는 문제점들을 효과적으로 해결하고 있음을 보여준다.

**키워드** : 수중비행체, 자율제어, 장애물회피, 진화 전략, 퍼지기저함수 확장

### Abstract

In real system application, the obstacle avoidance system for the autonomous control of the underwater flight vehicle (UFV) operates with the following problems: it has local information because the sonar can only offer the obstacle information in a local detection area, it requires a continuous control input because the system that has reduced acoustic noise and power consumption is necessary, and further, it requires an easy design procedure in terms of its structures and parameters. To solve these problems, an intelligent obstacle avoidance algorithm using the evolution strategy (ES) and the fuzzy logic controller (FLC), is proposed. To verify the performance of the proposed algorithm, the obstacle avoidance of UFV is performed. Simulation results show that the proposed algorithm effectively solves the problems in the real system application.

**Key Words** : Underwater flight vehicle, Autonomous control, Obstacle avoidance, Evolution strategy, Fuzzy basis function expansion

## 1. 서 론

최근에는 에너지 자원 확보, 수중 감시 및 방어 등의 다양한 요구를 효과적으로 충족시키기 위한 하나의 방법으로서 변화무상한 해양 환경에서 신속하고 정확한 정보처리/이동/조작이 가능한 수중로봇(underwater robot)[1]의 개발이 필수적으로 요구된다.

일반적으로 수중로봇은 그 목적 및 운용 방법에 따라서 다양한 형태를 가질 수 있지만, 수중비행체(Underwater Flight Vehicle : UFV)[2]를 기반으로 한 형태가 매우 바람직하다. 왜냐하면, UFV는 몸체 형상에 기인한 적은 유체 저항을 가지고 있으면서도 여러 개의 추진기가 아닌 하나의 추진기와 여러 개의 제어판(control plane)을 가지고 있으므로 동적(dynamic) 제어 측면에서는 추진에너지 소모 및 음향학적인 소음이 적다. 또한, 여러 개의 제어탱크(control tank)를 가지고 있으므로 정적(static) 제어 측면에서는 미

세한 위치/자세 제어 및 긴급부상이 가능하다. 결론적으로, UFV는 추진에너지 소모, 음향학적인 소음, 동적/정적 제어성 측면에서 우수한 조건들을 가지고 있으므로 민수(civil) 뿐만 아니라 군수(military) 적용이 가능한 특성들을 모두 가지고 있다.

이러한 UFV의 실제 적용에 있어서 인적/물적 손실을 줄이고 더욱 다양한 임무의 수행이 가능하도록 하기 위해서는 무인화 측면에서 자율수중운동체(Autonomous Underwater Vehicle : AUV) 형태의 개발/구현이 요구된다. 여기서, AUV 시스템은 표적 탐지/추적/식별, 센서/항법, 추진/자동조종 등을 통한 성공적인 임무의 수행을 가능하게 하는 자율제어[3] 기술을 핵심으로 하는데, 그 구성 기술 중에서 장애물회피(obstacle avoidance)에 대한 연구는 지상운동체에 비해서 매우 부족한 현황이다.

기존의 연구로서 potential field[4], 스트림라인(stream line)[5], 휴리스틱(heuristic)[6] 등의 기법들이 적용되고 있으나, 탐체센서 특성, AUV 운용특성, UFV 고유특성 등의 관점을 모두 고려하지 못했다. 다시 말하면, 실제 시스템 적용에 있어서 UFV의 자율제어를 위한 장애물회피 시스템은

접수일자 : 2009년 6월 2일

완료일자 : 2009년 10월 15일

다음과 같은 문제점들을 가지고 있다. 즉, 소나(sonar) 센서는 지역적 탐색영역 내의 장애물 정보만을 제공할 수 있으므로 지역적 정보를 가지며, AUV의 에너지 용량 및 UFV의 은닉성을 반영하기 위해서 에너지 소비 및 음향학적 소음이 적은 시스템이 필요하므로 연속적인 제어입력을 요구한다. 나아가, 구조와 파라미터의 관점에 있어서 용이한 설계 절차를 요구한다.

이 문제를 해결하기 위해서, 본 논문에서는 진화 전략(Evolution Strategy : ES)[7] 및 퍼지논리 제어기(Fuzzy Logic Controller : FLC)[8]를 이용하는 지능형 장애물회피 알고리즘이 제안되었다.

장애물회피 시스템의 수학적 모델은 2장에서, 장애물회피 알고리즘의 설계는 3장에서 설명되며, 시뮬레이션 결과는 4장에 기술된다. 마지막으로, 결론은 5장에 요약된다.

## 2. 장애물회피 시스템의 수학적 모델

본 논문에서 고려된 UFV는 침로(course) 제어 등과 같은 수평면 제어를 위해서 수직 제어판이 필요한데, 수직 제어판으로서는 선미 수직타  $\delta_r$ 을 1개 가지고 있다. 이를 표현한 그림은 다음과 같다.

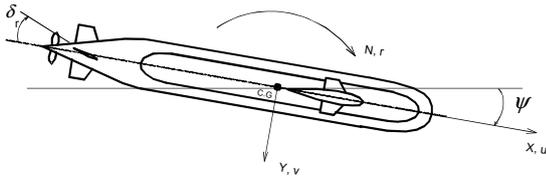


그림 1. 수직 제어판의 배치.  
Fig. 1. Location of vertical control plane.

일반적인 6 자유도(DOF : Degree Of Freedom) 운동은 병진(translation) 성분인  $x, y, z$ 와 회전(rotation) 성분인  $\phi, \theta, \psi$ 를 포함한다. 이와 관련하여 속도 성분이  $u, v, w$  (surge, sway, heave), 각속도 성분이  $p, q, r$  (roll, pitch, yaw)이고, 힘 및 모멘트 성분이  $F = [X \ Y \ Z]$ ,  $G = [K \ M \ N]^T$ 일 때[9], Gertler 방정식[10]에 기초한 UFV 운동 방정식은 다음과 같이 정의 된다.

$$[m + m_a]a = - \begin{bmatrix} F_I \\ G_I \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_R \\ G_R \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_H \\ G_H \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_P \\ G_P \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서,  $m$  질량 행렬,  $m_a$ 는 부가 질량 행렬이고,  $a = [\ddot{u} \ \ddot{v} \ \ddot{w} \ \ddot{p} \ \ddot{q} \ \ddot{r}]^T$ 는 가속도 행렬이다.  $F_I = [X_I \ Y_I \ Z_I]^T$ 는 관성(inertia) 힘 벡터,  $G_I = [K_I \ M_I \ N_I]^T$ 는 관성 모멘트 벡터이고,  $F_R = [X_R \ Y_R \ Z_R]$  및  $G_R = [K_R \ M_R \ N_R]$ 은 부력 및 무게(weight)와 관련된 복원(restoring) 힘 및 모멘트 벡터이고,  $F_H = [X_H \ Y_H \ Z_H]$  및  $G_H = [K_H \ M_H \ N_H]$ 은 선체(hull) 형상과 관련된 힘 및 모멘트 벡터이고, 추진기 및  $F_P = [X_P \ Y_P \ Z_P]$  및  $G_P = [K_P \ M_P \ N_P]$ 은 추진기 및 제어판과 관련된 추진 힘 및 모멘트 벡터이다.

본 연구에서의 장애물회피는, AUV 운용특성 및 UFV 고유특성으로서의 에너지 소비 및 음향학적 소음의 최소화를 이루기 위한 운용 개념적 접근으로서 일정한 속도와 심

도(depth)를 가정하였다.

식 (1)의 힘 및 모멘트 가운데에서, 장애물회피를 위한 침로 제어의 정상상태에서 지배적인 힘은  $Y_H$ 인데, 이 힘은 다음과 같이 정의된다.

$$Y_H = \frac{\rho}{2} l^4 [Y'_{p|p} |p| |p| + Y'_{pq} pq + Y'_{qr} qr] + \frac{\rho}{2} l^3 [Y'_{vq} vq + Y'_{wp} wp + Y'_{wr} wr] + \frac{\rho}{2} l^3 [Y'_r ur + Y'_p up + Y'_{v|r} \frac{v}{|v|} | \sqrt{(v^2 + w^2)} | |r|] + \frac{\rho}{2} l^2 [Y'_\star u^2 + Y'_v uv + Y'_{v|v} v | \sqrt{(v^2 + w^2)} |] \quad (2)$$

여기서,  $\rho$ 는 물의 밀도,  $l$ 은 UFV의 길이, 프라임 기호(')를 갖는 값들은 유체력 계수(hydrodynamic coefficient)이다. 장애물회피에 있어서 침로의 결정에 영향을 미치는 조류(current)의 영향은 유체력 계수(hydrodynamic coefficient)  $Y'_\star$ 가 존재하는 형태로 모델링될 수 있으나, 문제를 단순화하기 위해서 본 연구에서는  $Y'_\star$ 의 영향은 무시하였다. 식 (1)~(2)에 근거한 그림 1의 UFV를 대상으로 하는 장애물회피 시스템은  $\delta_r$  및  $\psi$ 를 각각 1개씩 가지고 있는 SISO 시스템임을 알 수 있다.

## 3. 장애물회피 알고리즘의 설계

이 장에서는 침로 제어에 있어서 ES 및 FLC를 사용하는 지능형 장애물회피 알고리즘이 설계된다. 즉, 침로명령 생성 및 침로 제어를 주요 내용으로 한다.

### 3.1 침로명령 생성

설계의 첫 번째 단계로서, 침로명령 생성에 있어서는 ES를 이용하는 침로명령의 실시간(realtime) 생성법을 제안하였다. 이를 통하여 소나 정보의 지역성, 에너지 소비, 음향학적 소음, 용이한 설계 등의 문제를 해결하고자 한다.

장애물회피와 관련하여 침로명령을 생성하기 위해서는 장애물의 위치를 정확히 예측하여 회피시간을 충분히 갖도록 해 주는 것이 바람직한데, 위치 예측을 위해서는 상태추정(state estimation) 기법[11]을 적용하는 것이 일반적이거나 정확도를 높이기 위해서는 다수의 예측 모델이 필요하며 이로 인해 연산량이 가중되는 문제가 있다.

그런데, 수중에서는 장애물의 기동이 급격한 변화를 보이지 않으므로 이러한 예측 기법은 비용 대 효과의 관점에서 바람직하지 않다. 또한, 소나는 지역적 탐색영역내의 장애물 정보만을 제공할 수 있으므로 지역적 정보를 가지며, 전형적인 거리(range)/방위(bearing) 계측 센서이므로 계측된 정보를 위치정보로 변환하는 과정에서는 편향(bias) 값을 가진다[12].

이러한 관점에서 실시간 극좌표(polar coordinate) 기법은 매 샘플링주기(sampling period) 마다 거리/방위 정보를 직접적으로 활용하므로 편향 값을 가지지 않을 뿐만 아니라, 이동 장애물도 고정 장애물로 고려할 수 있어서 소나 정보에 주로 의존하는 수중 장애물회피의 실제 적용에 매우 적합하다.

따라서, 이후부터는 극좌표 기법에 기반한 침로명령의 실

시간 생성법을 제안하는데, 기존의 휴리스틱[6] 기법의 경험적 정보를 선택적으로 사용한다.

장애물에 대한 극좌표를 결정하는 방법은 다음의 그림과 같다.

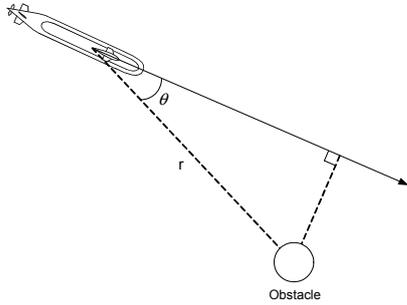


그림 2. 장애물에 대한 극좌표 결정.

Fig. 2. Polar coordinate decision of obstacle.

위 그림에서,  $r$  및  $\theta$ 는 각각 소나 제공의 장애물 거리 및 방위 정보이다. 이들 값은 충돌 가능성을 나타낼 수 있는 2개의 지표다.

그리고, 휴리스틱 기법에 기반하여 시작위치에서 목표위치까지 최적의 침로명령 생성을 보장하기 위해서 다음과 같은 경험적 정보를 선택하여 활용하였다.

- 첫째, 현재의 방향과 깊이를 유지
- 둘째, 목적지(goal) 침로와 가까운 침로를 선택
- 셋째, 장애물과 거리가 먼 침로를 선택한다.

앞서 언급한 휴리스틱 기법의 경험적 정보를 모두 반영한 구체적인 내용은 다음과 같다.

첫 번째 경험적 정보의 반영은 다음과 같다. 즉, 회피구간을 동시에 UFV의 동적안정성을 높이고, 에너지 소비 및 음향학적 소음을 줄이기 위해서 심도 변화는 없다고 가정하였다.

두 번째 경험적 정보 및 세 번째 경험적 정보의 반영은 다음과 같다.

그림 3에서와 같이, 소나 정보의 지역성을 표현한 소나 탐지영역은 UFV 전방부의 부채꼴 형상으로 고려하였다.

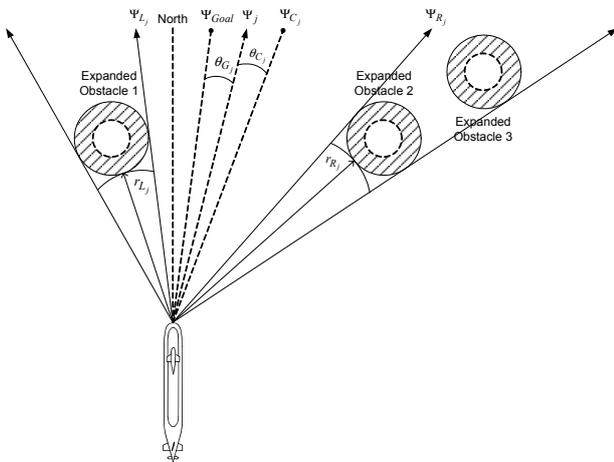


그림 3. UFV 침로명령 생성.

Fig. 3. Generation of UFV course command.

위 그림에서 점선으로 표시된 원을 장애물이라고 고려하면, 빗금을 포함하며 실선으로 표시된 원은 확장(expanded) 장애물이 된다. 확장 장애물은 UFV 몸체의 직경, 센서 오차 등을 포함한 개념으로서, 이를 도입하여 UFV를 하나의 점으로 고려하여 문제 해결을 위한 해석적 접근을 용이하게 하였다.

UFV 침로를 나타내는  $\Psi$ 는 그림 2와 같이 CG(center of gravity)를 중심으로 표현하여야 하지만, 편의상 소나 장착 위치를 기준으로 표현하였다.

실제적인 침로 제어의 관점에서는 장애물 보다는 회피구간에 관심이 많고, 목적지 침로는 알고 있으므로 목적지 침로와 가장 가까운 회피구간은 목적지 침로와 가장 가까운 장애물 경계 침로를 구함으로써 쉽게 해결할 수 있다.

이후에, 장애물이 존재하지 않는  $j$ 번째 회피구간의 폭인  $\Delta\Psi_j$ 와 중심 침로인  $\Psi_{C_j}$ 는 그 좌우 경계 부분에 존재하는 침로에 의해서 각각 다음과 같이 정의된다.

$$\Delta\Psi_j = \Psi_{R_j} - \Psi_{L_j} \quad (3)$$

$$\Psi_{C_j} = \frac{\Psi_{R_j} + \Psi_{L_j}}{2} \quad (4)$$

여기서,  $\Psi_{R_j}$  및  $\Psi_{L_j}$ 는 각각  $j$ 번째 회피구간의 우측 및 좌측 경계 부분을 의미하는 침로로서, 소나의 방위 정보를 나타낸다. 만일,  $\Psi_{R_j}$  또는  $\Psi_{L_j}$ 이 하나밖에 존재하지 않는 경우에는  $\Psi_{R_j} = \Psi_{L_j}$ 으로 가정하여 식 (3)을 적용하면 된다. 더불어, 소나의 거리 정보 측면에서는  $j$ 번째 회피구간의 우측 및 좌측 장애물과의 최단 거리는 각각  $r_{R_j}$  및  $r_{L_j}$ 이다. 그런데, 회피구간의 수는 장애물의 수보다 배치 상태에 의해 결정되므로 제안된 방법은 문제의 복잡도(complexity)를 줄이는 방법이므로, 장애물의 수를 고려하는 방법에 비해서는 상대적으로 효율적이고 현실적이다.

식 (4)를 이용하면, UFV의 장애물 회피를 위한 침로명령 생성의 문제를 전역 탐색 문제가 아닌 지역 탐색 문제로 전환할 수 있다. 이는 본 논문에서의 ES 사용의 타당성을 입증해 준다.

$\Psi_j$ 가  $j$ 번째 후보(candidate) 침로명령일 때, 앞의 내용을 바탕으로 하여 장애물 회피와 관련하여 실시간으로 침로명령을 생성하는 문제는 다음과 같이 본 논문에서 정의된 적합도(fitness) 함수  $J \in [0,1]$ 를 최대화하는 침로명령을 구하는 문제로 변환할 수 있다.

$$J = \frac{1}{1 + C_1|\theta_{G_j}| + C_2|\theta_{C_j}|} \quad (5)$$

여기서,  $C_1$  및  $C_2$ 는 상수들이고,  $\theta_{G_j}$ 는  $\Psi_j$ 가 목적지 침로와 이루는 각으로서, 이와 관련된 항은 목적지 침로와 가까운 침로를 선택하는 것이 바람직하다는 휴리스틱 기법의 경험적 정보를 반영한 것이다. 관련식은 다음과 같다.

$$\theta_{G_j} = |\Psi_j - \Psi_{Goal}| \quad (6)$$

그리고,  $\theta_{C_j}$ 는  $\Psi_j$ 가 회피구간의 중심 침로와 이루는 각으로서, 이와 관련된 항은 장애물과 거리가 먼 침로를 선택하는 것이 바람직하다는 휴리스틱 기법의 경험적 정보를 반영한 것이다. 관련식은 다음과 같다.

$$\theta_{C_j} = |\Psi_j - \Psi_{C_j}| \quad (7)$$

식 (5)의 적합도 함수를 최대화하기 위해서, 본 논문에서는 ES를 사용하였다. ES는 자연 진화의 원리를 모방한 것으로, 가우시안(Gaussian) 랜덤 변수에 의한 돌연변이(mutation)만을 기본 연산자(operator)로 사용하고 있다[7]. 제안된 후보 침로명령  $\Psi_j$ 을 추정하기 위한 돌연변이 연산은 다음과 같다.

$$\Psi_{offspring}(g+1) = \Psi_{parent}(g) + N(0, \sigma(k)) \quad (8)$$

여기서,  $g$ 는 세대(generation) 수이며,  $\sigma(k)$ 는  $k$ 번째 스텝에서의 랜덤 변수의 표준편차이다.  $k$ 번째 스텝에서는 설정된 세대 수를 만족할 때까지 진화가 반복된다. 즉, 본 논문에서는  $\mu$ 개의 부모(parent)로부터  $\lambda$ 개의 자손(offspring)을 발생시키고,  $\mu + \lambda$ 개의 개체들(individuals) 가운데서 적합도가 높은  $\mu$ 개를 다음 세대의 새로운 부모로 선택하는  $(\mu + \lambda)$ -ES를 고려하였는데, 그 중에서도 최대 적합도를 갖는 부모만을 사용하는  $\mu = 1$ 인 형태로 접근하였다.  $k$ 번째 스텝에서의 초기 부모는  $k-1$ 번째 스텝에서 최대 적합도를 갖는 침로명령을 사용하였는데, 이 또한 현재의 방향을 유지하는 것이 바람직하다는 휴리스틱 기법의 첫 번째 경험적 정보를 반영한 것이다.

본 논문에서는 최적 침로명령 생성의 관점에서 국부 및 전역 탐색을 통하여 탐색의 효율성을 높이기 위해서 다음과 같이 돌연변이 연산자를 변형하였다.

$$\sigma(k) = \begin{cases} 0, & \text{if } p = 1 \\ \Psi_{res}, & \text{if } p < C_p \\ \Delta\Psi_j/2, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

여기서,  $p$ 는 집단(population)을 구성하는 개체의 번호이며,  $C_p$ 는 집단 상수이다. 식 (9)의 첫 번째 조건식의 경우는 현재 세대의 최고 적합도 값을 갖는 개체를 다음 세대에 그대로 유지시키는 엘리티즘(elitism)을 의미하는데, 이는 현재의 방향과 침로를 유지하는 것이 바람직하다는 휴리스틱 기법의 첫 번째 경험적 정보를 반영한 것이다. 두 번째 조건식은 침로각 해상도인  $\Psi_{res}$ 로 설정된 최소 탐색 구간을 갖는 지역적 탐색을 의미하며, 세 번째 조건식은 최대의 탐색 구간을 갖는 전역적 탐색을 의미하는데, 이들은 탐색의 정확도와 효율성을 높이기 위한 방법이다.

추가적으로, 앞서 언급한 ES 설계의 과정은 제안된 알고리즘의 구조와 파라미터의 선택에 있어서 용이한 설계 절차를 갖는다.

### 3.2 침로 제어

설계의 두 번째 단계로서, 침로 제어에 있어서는 FLC를 이용하는 침로 제어법을 제안하였다. 이를 통하여 에너지 소비, 음향학적 소음, 용이한 설계 등의 문제를 또 다른 관점에서 해결하고자 한다.

제안된 침로 제어기는 퍼지 기술을 사용하는데, 구체적으로 언급하면, min-max inference 및 삼각형 멤버십 함수로 구성된 퍼지 시스템이다. 또한, 추론법은 단순화(simplified) 방법[13]을 도입하고 있는데, 이들을 이용한 퍼지룰은 다음과 같이 표현된다.

$$R^m: \text{if } E_r \text{ is } A_1^m \text{ and } \dot{E}_r \text{ is } A_2^m \text{ then } \hat{f} = w^m \quad (10)$$

여기서,  $E_r$  및  $\dot{E}_r$ 는 각각 오차 신호  $e_r$ , 그 미분치  $\dot{e}_r$ 의 정규화 값들인데, 이는 퍼지 제어입력을 사용하여 에너지

소비, 음향학적 소음 문제를 해결하기 위한 것이다.  $A_1^j$  및  $A_2^j$ 는 해당 멤버십함수들이다. 제안된 퍼지룰은 표 1과 같은데, 매우 단순하면서도 기본적인 형태를 가지고 있다.

표 1. 퍼지룰 정의.

Table 1. Definition of fuzzy rule.

$E_r \backslash \dot{E}_r$	PB	PM	ZO	NM	NB
PB	-1	-1	-0.5	-0.25	0
PM	-1	-0.5	-0.25	0	0.25
ZO	-0.5	-0.25	0	0.25	0.5
NM	-0.25	0	0.25	0.5	1
NB	0	0.25	0.5	1	1

따라서, FLC 기반의 침로 제어기의 출력인 UFV의 선미 수직타  $\delta_r$ 은 다음과 같이 정의된다.

$$\delta_r = C_r \hat{f}(\mathbf{x}) \quad (11)$$

여기서,  $C_r$ 는 스케일 상수이고,  $\mathbf{x} = [E_r, \dot{E}_r]$ 는 입력 벡터이고,  $\hat{f}$ 는 식 (10)의 출력부이다.

추가적으로, 앞서 언급한 FLC 설계의 과정 또한 제안된 알고리즘의 구조와 파라미터의 선택에 있어서 용이한 설계 절차를 갖는다.

최종적인 장애물 회피 시스템의 블록선도는 다음의 그림과 같다.

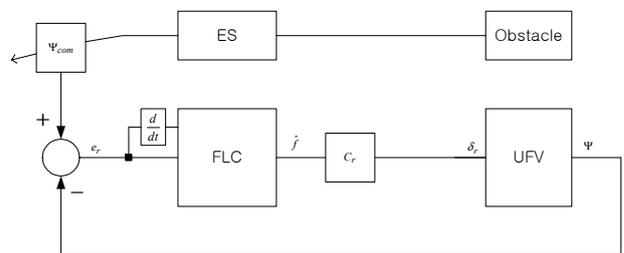


그림 4. 장애물회피 시스템 블록선도.

Fig. 4. Block diagram of obstacle avoidance system.

위의 과정으로부터 침로 제어에 있어서 ES 및 FLC를 사용하는 지능형 장애물회피 알고리즘의 설계가 완료되었다.

## 4. 시뮬레이션 결과

제안된 장애물 회피 알고리즘의 성능 검증은 UFV의 6 자유도 방정식을 적용하여, 수직면에서의 심도 변화 없이 수평면에서의 침로 제어 문제에 대해서 이루어 졌다. 여기서는 소나 신호처리 과정은 생략하고 그 결과만을 고려하는 형태로 구현하였다.

소나의 장애물 탐지 결과를 나타내기 위한 방정식은 다음과 같이 정의된다.

$$(\xi - \xi_o)^2 + (\eta - \eta_o)^2 \leq r^2 \quad (12)$$

여기서,  $\xi$ ,  $\eta$  및  $r$ 는 각각 UFV의 x축 위치, y축 위치,

탐지 반경이고,  $\xi_o$  및  $\eta_o$ 는 각각  $o$ 번째 장애물의 x축 및 y축 위치인데, 전방 주시(forward looking) 소나의 특성을 반영하여  $\xi < \xi_o$  및  $\eta < \eta_o$ 인 경우에 대해서만 본 식을 적용하였다. 장애물 탐지 반경은 150m이고, UFV의 초기 침로 각은 0도이다. 목적지는 (500,500) 및 (750,750)이다.

표 2. 장애물 생성.

Table 2. Generation of obstacles.

	x축 위치	y축 위치	반경
장애물 #1	300	200	10
장애물 #2	300	250	10
장애물 #3	300	300	10

표 2에서 장애물 간의 거리는 50m이므로, 탐지 반경 보다 작음을 알 수 있다. 이는 장애물 탐지 반경을 고려해 볼 때, UFV의 위치에 따라서 장애물의 개수가 0~2 개로 변화할 수 있음을 의미한다. 이를 통하여 실제적인 수중운동체의 장애물 회피 문제를 구현하고자 한다.

샘플링 주기는  $T=0.02$ 로 정하였고, 진화 전략 파라미터는 표 3과 같다. 이들 파라미터 값들을 살펴 보면, 본 알고리즘은 파라미터 설정이 매우 용이함을 알 수 있다.

표 3. 진화 전략 파라미터.

Table 3. Parameters for ES.

	기호	값
침로각 해상도	$\Psi_{res}$	0.1
침로각 변화폭	$\Delta\Psi_j$	장애물 위치에 의해 결정
집단 상수	$C_p$	5
개체 수	$\mu + \lambda$	10
세대 수	$g$	5

침로 제어 성능 및 장애물 탐지 시뮬레이션 결과는 그림 5~8에 보여 진다.

그림 5는 장애물 #1 및 #3에 대한 침로 제어 성능을 보여 주며, 그림 6은 그림 5와 관련된 장애물 탐지 결과이다. 장애물 탐지를 반영하여 장애물 회피가 잘 이루어지고 있음을 알 수 있다. 즉, UFV는 초기 침로각 0도에서 침로 제어를 통하여 목적지를 향해 진행한다. 이후에, 좌측 장애물이 먼저 탐지 되므로 식(3)에서  $\Psi_{R_i} = \Psi_{L_j}$ 인 경우를 적용하여 좌측 장애물의 왼쪽 경계부분에 존재하는 침로를 유지하고 있다가, 2개의 장애물이 탐지되어 ES에 의해서 최적 경로를 추정한다. 그 이후에, 우측 장애물이 탐지 되지만 식(12)가 적용되어 목적지를 향해 진행한다.

그림 7는 장애물 #1 및 #2에 대한 침로 제어 성능을 보여 주며, 그림 8은 그림 7와 관련된 장애물 탐지 결과이다. 장애물 탐지를 반영하여 장애물 회피가 잘 이루어지고 있음을 알 수 있다. 즉, 2개의 장애물이 탐지되어 ES에 의해서 최적 경로를 추정하기까지는 그림 5의 경우와 동일하다. 그 이후에는, 우측 장애물만 탐지되고, 식(3)에서  $\Psi_{R_i} = \Psi_{L_j}$ 인 경우를 다시 적용하여 우측 장애물의 오른쪽 경계부분에 존재하는 침로를 향하고 있다가, 식(12)가 적용되어 목적지를 향해 진행한다.

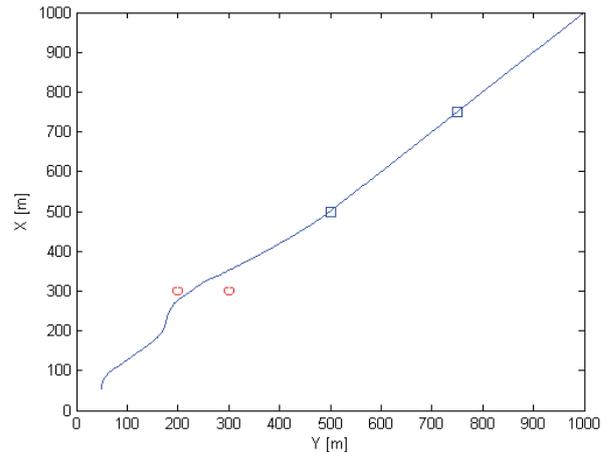


그림 5. 침로 제어 성능 1.

Fig. 5. Performance of course control 1.

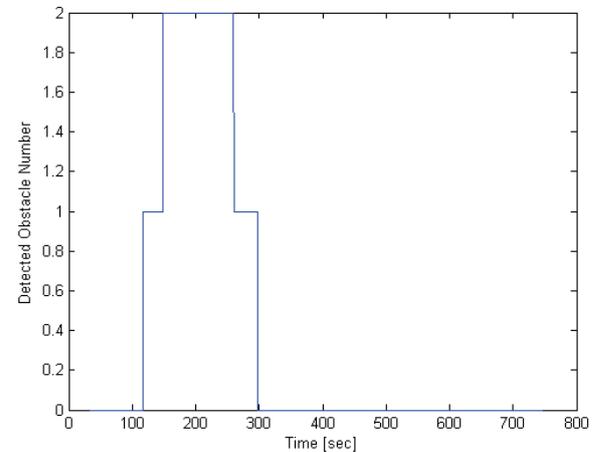


그림 6. 장애물 탐지 결과 1.

Fig. 6. Result of obstacle detection 1.

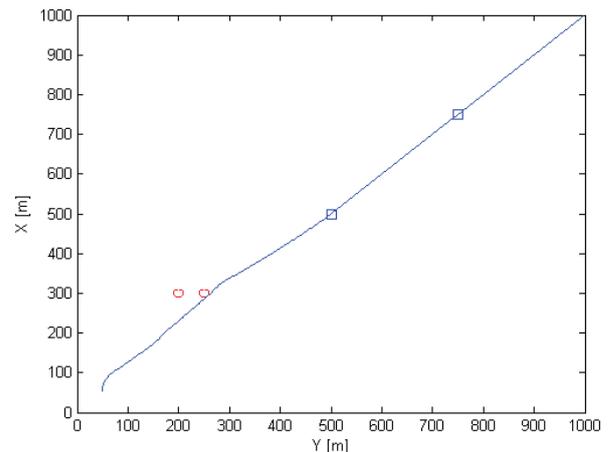


그림 7. 침로 제어 성능 2.

Fig. 7. Performance of course control 2.

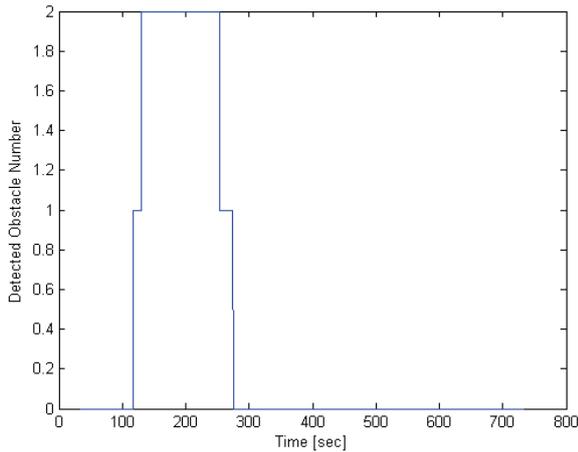


그림 8. 장애물 탐지 결과 2.  
Fig. 8. Result of obstacle detection 2.

비록 앞의 결과들은 기존 연구와의 비교 제시를 포함하지는 못하지만, 제안된 극좌표 기법에 기반한 침로명령의 실시간 생성법이 장애물의 위치에 무관하게 적절하게 동작하고 있음을 확인하였다. 즉, 제안된 침로 제어 알고리즘이 주어진 AUV 형 UFV의 침로 제어 문제의 해결에 적합함을 확인할 수 있었다.

### 5. 결 론

본 논문에서는 침로 제어에 있어서 ES 및 FLC를 사용하는 지능형 장애물회피 알고리즘이 제안되었다.

제안된 알고리즘은 앞서 언급한 소나 정보의 지역성, 에너지 소비, 음향학적 소음, 용이한 설계 등의 문제를 모두 고려한 실제적인 해법을 갖는다. 즉, ES를 사용하는 침로명령 생성법을 통해서 소나 정보의 지역성, 에너지 소비, 음향학적 소음, 용이한 설계 등의 문제를 해결하였고, FLC를 사용하는 침로 제어법을 통해서 에너지 소비, 음향학적 소음, 용이한 설계 등의 문제를 해결할 수 있음을 확인하였다.

시뮬레이션 결과는 장애물의 거리/방위 정보를 직접적으로 활용하는 제안된 알고리즘이 실시간 시스템 적용에서 존재하는 문제들을 효과적으로 해결할 수 있음을 보여 준다.

### 참 고 문 헌

[1] G. Antonelli, *Underwater Robots*, Springer, 2006.  
 [2] R. K. Lea, R. Allen and S. L. Merry, "A comparative study for control techniques for an underwater flight vehicle," *International Journal of System Science*, vol. 30, pp. 947-964, 1999.  
 [3] D. Barnet and S. McClaran, "Architecture of the Texas A&M autonomous underwater vehicle controller", *Proc. IEEE Int. Symp. on Intelligent Control*, pp. 231-237, 1996.  
 [4] D. Fu-Guang, J. Peng, B. Xin-Qian and W. Hong-Jian, "AUV local path planning based on virtual potential field", *Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics &*

*Automation*, pp. 1711-1716, 2005.  
 [5] 김문환, 서주노, "무인함정의 자율항해를 위한 장애물 회피 경로계획 기법", *수중로봇기술연구회 2008년 추계워크샵*, pp. 38-42, 2008.  
 [6] 이영일, 김용기, "퍼지관계망을 이용한 수중운동체의 고수준 자율항행기법", *정보과학회논문지:소프트웨어 및 응용*, vol. 29, no. 2, pp. 91-97, 2002.  
 [7] D. B. Fogel, *Evolutionary Computation : Toward a New Philosophy of Machine Intelligence*, IEEE Press, 1995.  
 [8] C. T. Leondes, *Fuzzy Theory Systems*, Academic Press, 1999.  
 [9] J. Yuh, "Modeling and control of underwater robotic vehicles," *IEEE Transactions on Man and Cybernetics*, vol. 20, no. 6, pp. 1475-1483, 1990.  
 [10] M. Gertler and G. R. Hagen, "Standard equation of motion for submarine simulation," *Naval Ship Research and Development Center Report 2510*, 1967.  
 [11] Y. Bar-Shalom and X.-R. Li, "Estimation and tracking principles, techniques and software," Artech House, Inc, 1993.  
 [12] E. Sviestins, "On-line bias estimation for multi-sensor tracking," *Proceedings of Information, Decision and Control*, pp. 221-226, 1999.  
 [13] T. Takagi and M. Sugeno, "Fuzzy identification of system and its applications to modeling and control," *IEEE Transactions on Man and Cybernetics*, vol. SMC-15, pp. 116-132, 1985.

### 저 자 소 개



#### 김현식(Hyun-Sik Kim)

1994년 : 부산대학교 전기공학과 졸업.

1996년 : 부산대학교 전기공학과 졸업  
(공학석사)

2001년 : 부산대학교 전기공학과 졸업  
(공학박사)

1998년~2007년 : 국방과학연구소 연구원/  
선임연구원

2007년~2009년 : 동명대학교 로봇시스템공학과 전임강사

2009년~현재 : 동명대학교 로봇시스템공학과 조교수

관심분야 : 인공지능/퍼지이론/진화연산, 로봇틱스, 수중운  
동체 제어, 수중표적 탐지/추적/식별, 정보융합,  
협력무인체계

Phone : 051-629-1565

Fax : 051-629-1559

E-mail : hyunskim@tu.ac.kr

#### 진태석(TaeSeok Jin)

제17권 제3호 참조