

수중비행체의 자율제어를 위한 지능형 3-D 장애물회피 알고리즘

Intelligent 3-D Obstacle Avoidance Algorithm for Autonomous Control of Underwater Flight Vehicle

김현식* · 진태석** · 서주노***

Hyun-Sik Kim*, TaeSeok Jin** and Joono Sur***

* 동명대학교 로봇시스템공학과

** 동서대학교 메카트로닉스공학과

*** 해군사관학교 기계조선공학과

요 약

실제 시스템 적용에 있어서, 수중비행체(Underwater Flight Vehicle : UFV)의 자율제어(autonomous control)를 위한 3-D 장애물회피(obstacle avoidance) 시스템은 다음과 같은 문제점들을 가지고 있다. 즉, 소나(sonar)는 지역적 탐색영역 내에서 장애물의 거리(range)/방위(bearing) 정보를 제공하며, 자율수중운동체(Autonomous Underwater Vehicle : AUV) 관점에서 에너지 소비 및 음향학적 소음이 적은 시스템을 필요로 하며, 최대 피치 및 심도와 같은 UFV 운용 제약조건을 가진다. 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 3-D 장애물회피 알고리즘이 제안되었다. 제안된 알고리즘의 성능을 검증하기 위해 UFV의 3-D 장애물회피가 수행되었다. 시뮬레이션 결과는 제안된 알고리즘이 실제 시스템에 존재하는 문제점들을 효과적으로 해결하고 있음을 보여준다.

키워드 : 수중비행체, 자율제어, 3-D 장애물회피, 진화 전략, 퍼지 논리

Abstract

In real system application, the 3-D obstacle avoidance system for the autonomous control of the underwater flight vehicle (UFV) operates with the following problems: the sonar offers the range/bearing information of obstacles in a local detection area, it requires the system that has reduced acoustic noise and power consumption in terms of the autonomous underwater vehicle (AUV), it has the UFV operation constraints such as maximum pitch and depth, and it requires an easy design procedure in terms of its structures and parameters. To solve these problems, an intelligent 3-D 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 3-D 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, 3-D obstacle avoidance, Evolution strategy, Fuzzy logic

1. 서 론

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

수중로봇의 모바일(mobile) 플랫폼 가운데에서, 수중비행체(Underwater Flight Vehicle : UFV)[2]는 몸체 형상에 기인한 적은 유체 저항을 가지고 있으면서도 여러 개의 추

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

앞서 언급한 UFV의 실제 적용에 있어서 인적/물적 손실을 줄이고 더욱 다양한 임무의 수행이 가능하도록 하기 위해서는 무인화 측면을 고려한 자율수중운동체(Autonomous Underwater Vehicle : AUV) 형태의 개발/구현이 요구된다. 여기서, AUV 시스템은 임무 계획, 임무 제어, 항해, 자동조종 등으로 구성되는 자율제어 기술을 필요로 하는데,

접수일자 : 2011년 4월 18일

완료일자 : 2011년 6월 1일

본 연구는 한국과학기술원 국방무인화기술 특화연구센터를 통한 국방과학연구소 연구비 지원으로 수행되었습니다.

항해 기술의 세부기술로서 장애물회피(obstacle avoidance)에 대한 연구는 지상/공중 운동체에 비해서 상대적으로 부족한 실정이다.

수중 운동체를 대상으로한 장애물회피의 기존 연구로서 potential field[3], 스트림라인(stream line)[4], 휴리스틱(heuristic)[5] 등의 기법들이 연구되고 있으나, 3-D 회피, 탐재센서 특성, AUV 운용 특성, UFV 운용 제약조건, 구현성 등의 관점을 동시에 고려하지는 못했다. 다시 말하면, 실제 시스템 적용에 있어서 UFV의 자율제어를 위한 3-D 장애물회피 시스템은 다음과 같은 문제점들을 가지고 있다. 즉, 소나(sonar)는 지역적 탐색영역 내에서 장애물의 거리(range)/방위(bearing) 정보를 제공하며, AUV 운용 관점에서 에너지 소비 및 음향학적 소음이 적은 시스템을 필요로 하며, 최대 피치(pitch) 및 최대 심도(depth)와 같은 UFV 운용 제약조건을 가진다. 나아가, 구조와 파라미터의 관점에서 용이한 설계 절차를 요구한다.

이 문제를 해결하기 위해서 본 논문에서는 진화 전략(Evolution Strategy : ES)[6] 및 퍼지논리 제어기(Fuzzy Logic Controller : FLC)[7]를 이용하는 지능형 3-D 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 수평면에서의 침로(course) 제어 및 수직면에서의 심도 제어를 위해서 수직 제어판 및 수평 제어판이 각각 필요한데, 수직 제어판으로는 선미 수직타 δ_r 을 1개 가지고 있으며, 수평 제어판으로는 선수 수평타 δ_b 및 선미 수평타 δ_s 를 각각 1개씩 가지고 있다. 이와 관련된 형상/표기법은 참고문헌[8]에 잘 나타나 있다.

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

$$[m + m_a] \mathbf{a} = - \begin{bmatrix} \mathbf{F}_I \\ \mathbf{G}_I \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{F}_R \\ \mathbf{G}_R \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{F}_H \\ \mathbf{G}_H \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{F}_P \\ \mathbf{G}_P \end{bmatrix} \quad (1)$$

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

식 (1)의 힘 및 모멘트 가운데에서, UFV의 3-D 장애물회피를 위한 침로 및 심도 제어의 정상상태에서 지배적인 힘은 각각 Y_H 및 Z_H 인데, 이 힘들은 프라임(prime) 표시를 갖는 기호들인 유체력 계수(hydrodynamic coefficient)들을

포함하여 다음과 같이 정의된다.

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

$$\begin{aligned} Z_H &= \frac{\rho}{2} l^4 [Z'_{pp} p^2 + Z'_{rr} r^2 + Z'_{rp} rp] \\ &+ \frac{\rho}{2} l^3 [Z'_{vr} vr + Z'_{vp} vp] \\ &+ \frac{\rho}{2} l^3 [Z'_q uq + Z'_{w|q} \frac{w}{|w|} | \sqrt{(v^2 + w^2)} | | q |] \\ &+ \frac{\rho}{2} l^2 [Z'_\star u^2 + Z'_w uw + Z'_{w|w} | \sqrt{(v^2 + w^2)} |] \\ &+ \frac{\rho}{2} l^2 [Z'_{|w|} u|w| + Z'_{ww} |w| \sqrt{(v^2 + w^2)} | + Z'_{vv} v^2] \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, ρ 는 물의 밀도, l 은 UFV의 길이이다. 침로 및 심도 제어의 정상상태와 관련된 유체력 계수는 Y'_\star 및 Z'_\star 인데, 본 논문에서 고려된 UFV는 수평면 형상이 대칭이고 수직면 형상은 비대칭이므로 Y'_\star 의 영향은 없으나, Z'_\star 의 영향은 존재 한다. 하지만, 제어판 편향값 δ_{NLF} 을 사용하면 Z'_\star 의 영향도 효과적으로 제거할 수 있다.

본 논문에서 고려된 UFV에 탑재된 소나는 전방 주시 소나(Forward Looking Sonar : FLS)인데, FLS의 장애물 탐지를 나타내기 위한 방정식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$(x - x_o)^2 + (y - y_o)^2 + (z - z_o)^2 \leq r_d^2 \quad (4)$$

여기서, x_o, y_o, z_o 는 각각 o 번째 장애물의 위치이고, r_d 는 소나의 탐지반경인데, FLS의 특성을 반영하여 $x < x_o, y < y_o, z < z_o$ 인 경우에 대해서만 본 식을 적용하였다. 본 연구에서는 소나의 빔폭(beam width)은 무시하였다.

3. 장애물회피 알고리즘의 설계

이 장에서는 ES 및 FLC를 이용하는 지능형 3-D 장애물회피 알고리즘이 설계된다. 즉, ES를 이용하는 경로 명령 생성 및 FLS를 이용하는 경로 제어를 주요 내용으로 한다.

설계의 첫 번째 단계로서, 경로 명령 생성에 있어서는 정확도 및 효율성을 높이는 것이 가능한 ES를 이용하는 침로/심도 명령의 실시간(realtime) 생성법을 제안하였다. 이를 통하여 소나 정보의 특성, 에너지 소비/음향학적 소음, 운용 제약조건, 용이한 설계 등의 문제를 해결하고자 한다.

침로/심도 명령을 생성하기 위해서는 장애물의 위치를 정확히 예측하여 회피시간을 충분히 갖도록 해 주는 것이 바람직한데, 소나는 지역적 탐색영역 내에서 잡음이 포함된 장애물의 거리/방위 정보를 제공하므로 계속된 정보를 위치 정보로 변환하는 과정에서 편향(bias) 값을 가진다. 이러한 관점에서 극좌표계(polar coordinate system)는 거리/방위 정보를 직접적으로 활용하므로 시간 소모적이면서도 오차

유발적인 변환과정이 요구되지 않는 장점이 있다. 따라서, 극좌표계는 소나 정보에 주로 의존하는 UFV의 수중 장애물회피에 매우 적합하다[5]. 3-D 공간에 존재하는 장애물에 대해서 극좌표를 결정하는 방법은 다음의 그림과 같다.

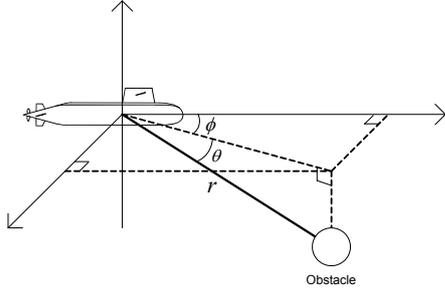


그림 1. 장애물에 대한 극좌표 결정.
Fig. 1. Polar coordinate decision of obstacle.

위 그림에서, r 은 장애물 거리이고, ϕ 및 θ 는 방위 정보들이다. 극좌표계를 사용하면 장애물회피를 위한 침로/심도 명령 생성의 문제는 스위칭 심도 Z_s 를 고려한 침로/피치 명령 생성의 문제로 변환할 수 있는데, 피치 제어 후 스위칭 심도에서 심도 제어로 변환하는 UFV 심도 제어법[8]을 도입하면 매우 효과적이다.

그리고, 휴리스틱 기법에 기반하여 시작위치에서 목표위치까지 최적의 침로/피치 명령 생성을 보장하기 위해서는 다음과 같은 경험적 정보를 활용하였다. 첫째, 목적지(goal)와 가까운 방향을 선택한다. 둘째, 장애물과 거리가 먼 방향을 선택한다. 셋째, 현재의 방향을 유지한다.

앞서 언급한 경험적 정보를 모두 반영한 구체적인 침로/피치 명령 생성 내용은 다음과 같은데, 우선적으로 침로 명령 생성과 관련한 개념도는 다음의 그림과 같다.

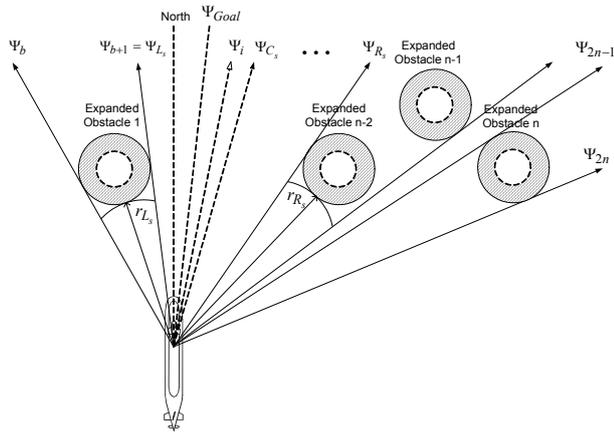


그림 2. 침로명령 생성.
Fig. 2. Generation of course command.

위 그림에서 점선으로 표시된 원은 장애물이라고 고려하면, 빗금을 포함하며 실선으로 표시된 원은 확장(expanded) 장애물이 된다. 확장 장애물은 센서 계측 오차, 충돌 확률, UFV 회전 반경 등을 포함한 개념으로서, 극좌표계와 동시에 사용하면 문제의 복잡도(complexity)를 매우 효과적으로 줄일 수 있다. 즉, 극좌표계를 사용하면 회피구간의 개념을 도입할 수 있고, 확장 장애물을 사용하면 회피구간의 수를

줄일 수 있다. 실제적인 침로 명령 생성에 있어서는 장애물의 수보다 배치 상태에 의해 결정되는 회피구간에 관심이 많고, 최근접 회피구간은 목적지 침로와 가장 가까운 장애물 경계 침로를 이용하여 쉽게 해결할 수 있다[5]. 장애물이 존재하지 않는 최근접 회피구간으로서 s 번째 회피구간의 폭 $\Delta\Psi_s$ 와 중심 침로 Ψ_{C_s} 는 다음과 같이 정의된다.

$$\Delta\Psi_s = \Psi_{R_s} - \Psi_{L_s} \quad (5)$$

$$\Psi_{C_s} = \frac{\Psi_{R_s} + \Psi_{L_s}}{2} \quad (6)$$

여기서, 소나의 방위 정보로서 Ψ_{R_s} 및 Ψ_{L_s} 는 각각 s 번째 회피구간의 우측 및 좌측 경계 침로이고, 소나의 거리 정보로서 r_{R_s} 및 r_{L_s} 는 각각 s 번째 회피구간의 우측 및 좌측 장애물과의 최단 거리이다.

Ψ_i 가 i 번째 후보 침로 명령이고 Ψ_{res} 가 침로각 해상도 일 때, 경험적 정보를 만족하는 $\Psi_{com}(k) = \Psi_i \in [\Psi_{res}, \Delta\Psi_s(k)]$ 를 찾는 것은 다음의 적합도(fitness) 함수 $J_\Psi \in [0,1]$ 를 최대화하는 문제로 변환할 수 있다.

$$J_\Psi = \frac{1}{1 + C_1|\Psi_{G_i}| + C_2|\Psi_{C_i}| + C_3|\Psi_{com_i}|} \quad (7)$$

여기서, C_1 , C_2 및 C_3 는 상수들이고, 경험적 정보를 반영한 부분인 Ψ_{G_i} , Ψ_{C_i} 및 Ψ_{com_i} 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Psi_{G_i} &= |\Psi_i - \Psi_{Goal}(k)| \\ \Psi_{C_i} &= |\Psi_i - \Psi_{C_s}(k)| \\ \Psi_{com_i} &= |\Psi_i - \Psi_{com}(k-1)| \end{aligned} \quad (8)$$

다음으로, 피치 명령 생성과 관련하여 식 (7)에서 Ψ 대신에 θ 를 사용하면, $J_\theta \in [0,1]$ 를 정의할 수 있는데, θ_i 가 i 번째 후보 피치 명령이고 θ_{res} 가 피치각 해상도 일 때, 경험적 정보를 만족하는 $\theta_{com}(k) = \theta_i \in [\theta_{res}, \Delta\theta_s(k)]$ 를 찾는 피치 명령 생성 개념도는 다음의 그림과 같다.

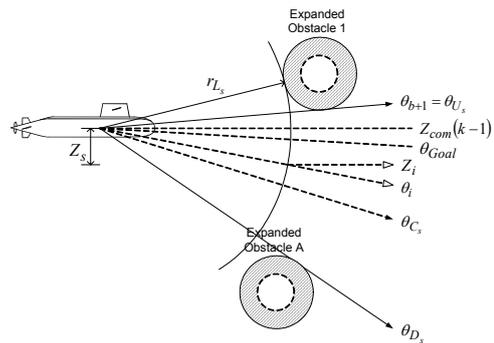


그림 3. 피치 및 심도명령 생성.
Fig. 3. Generation of pitch and depth command.

앞의 그림에서 스위칭 심도 Z_s 는 다음과 같이 정해진다.

$$Z_s = r_{L_s} \sin\theta_j \quad (9)$$

여기서, r_{L_s} 는 장애물 1의 아래에 장애물 A가 존재하는

경우에 대한 장애물과의 최단 거리이다.

최근접 침로 및 피치 회피구간으로서 $\Delta\Psi_s(k)$ 및 $\Delta\theta_s(k)$ 을 이용하면, UFV의 3-D 장애물 회피를 위한 침로 및 피치 명령 생성의 문제를 전역 탐색 문제가 아닌 지역 탐색 문제로 전환할 수 있다. 이는 본 논문에서의 ES 사용의 타당성을 입증해 준다.

적합도 함수 J_ψ 및 J_θ 를 각각 최대화하기 위해서, 본 논문에서는 변형된 ES[5]의 확장 형태를 사용하였다. 제안된 후보 침로명령 Ψ_i 및 θ_i 를 각각 추정하기 위한 돌연변이 연산은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Psi_{offspring}(g+1) &= \Psi_{parent}(g) + N(0, \sigma_\psi(k)) \\ \theta_{offspring}(g+1) &= \theta_{parent}(g) + N(0, \sigma_\theta(k)) \end{aligned} \quad (10)$$

여기서, g 는 세대(generation) 수이며, $\sigma_\psi(k)$ 및 $\sigma_\theta(k)$ 는 k 번째 스텝에서의 랜덤 변수의 표준편차이다. k 번째 스텝에서는 설정된 세대 수를 만족할 때까지 진화가 반복된다. 즉, 본 논문에서는 μ 개의 부모(parent)로부터 λ 개의 자손(offspring)을 발생시키고, $\mu + \lambda$ 개의 개체들(individuals) 가운데에서 적합도가 높은 μ 개를 다음 세대의 새로운 부모로 선택하는 ($\mu + \lambda$)-ES를 고려하였는데, 그 중에서도 최대 적합도를 갖는 부모만을 사용하는 $\mu = 1$ 인 형태로 접근하였다. 본 논문에서는 최적 침로 명령 생성의 관점에서 탐색의 정확도와 효율성을 높이기 위해서 다음과 같이 돌연변이 연산자를 변형하였다.

$$\sigma_\psi(k) = \begin{cases} 0, & \text{if } p = 1 \\ \Psi_{res}, & \text{if } p < C_p \\ \Delta\Psi_s(k)/2, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

여기서, p 는 집단(population)을 구성하는 개체의 번호이며, C_p 는 집단 상수이다. 첫 번째 조건식은 현재 세대의 최고 적합도 값을 갖는 개체를 다음 세대에 그대로 유지시키는 엘리트즘(elitism)을 의미하고, 두 번째 조건식은 최소 탐색 구간(stepsize)을 갖는 지역 탐색을 의미하며, 세 번째 조건식은 최대 탐색 구간을 갖는 전역 탐색을 의미하는데, 최적 피치 명령 생성과 관련해서는 식 (11)에서 Ψ 대신에 θ 를 사용하면 된다. 후보 침로 및 피치 명령들의 경계 조건식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Psi_{L_s}(k) &\leq \Psi_i \leq \Psi_{R_s}(k) \\ \theta_{D_s}(k) &\leq \theta_i \leq \theta_{U_s}(k) \end{aligned} \quad (12)$$

그런데, 식 (12)의 후보 피치 명령 및 이와 관련된 스위칭 심도 결정의 경우에는 추가적으로 $\theta_i \in [-\theta_{max}, \theta_{max}]$ 및 $Z_s \in [0, Z_{red}]$ 를 고려하여야 한다. θ_{max} 는 최대 피치각으로서 과도한 피치로 인한 저항력(drag force)이 발생하는 것을 방지하기 위한 한계값이고, Z_{red} 는 최대 심도로서 UFV의 몸체가 수압을 견딜 수 있는 한계값이다.

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

설계의 두 번째 단계로서, 경로 제어에 있어서는 연속적인 제어입력 및 쉬운 파라미터 설정이 가능한 FLC를 이용하는 침로/심도 제어법을 제안하였다. 이를 통하여 에너지 소비/음향학적 소음, 용이한 설계 등의 문제를 또 다른 관점에서 해결하고자 한다.

제안된 제어기는 기 검증된 침로 제어법[5] 및 심도 제어법[8]을 활용하였는데, 표 1~3은 각각 제어기 비교, 침로

제어를 위한 퍼지룰, 피치/심도 제어를 위한 퍼지 슬라이딩룰을 나타낸다.

표 1. 제어기 구성.

Table 1. Composition of controllers

	침로제어기	피치제어기	심도제어기
Fuzzifier	singleton	singleton	singleton
Membership function	triangle	gaussian	gaussian
Inference	min-simplified	product-simplified	product-simplified
Control	PD	sliding mode	sliding mode
Parameters	fixed	auto-tuning	auto-tuning

표 2. 침로 제어를 위한 퍼지룰.

Table 2. Fuzzy rule for course control.

$E \backslash \dot{E}$	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

표 3. 피치/심도 제어를 위한 퍼지 슬라이딩룰.

Table 3. Fuzzy sliding rule for pitch/depth control.

$S \backslash \dot{S}$	NB	NM	ZO	PM	PB
NB	-1	-0.7	-0.5	-0.3	0
NM	-0.7	-0.5	-0.3	0	0.3
ZO	-0.5	-0.3	0	0.3	0.5
PM	-0.3	0	0.3	0.5	0.7
PB	0	0.3	0.5	0.7	1

$X = [x \ y \ z]$ 일 때, FLC 출력인 δ_r 및 $\delta_s = \delta_b$ 를 포함하는 3-D 장애물 회피 시스템의 블록선도는 다음의 그림과 같다.

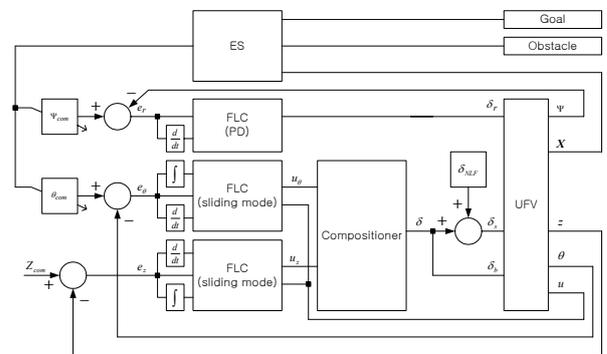


그림 4. 3-D 장애물회피 시스템 블록선도.

Fig. 4. Block diagram of 3-D obstacle avoidance system.

위의 과정으로부터 ES 및 FLC를 사용하는 지능형 3-D 장애물회피 알고리즘의 설계가 완료되었다.

4. 시뮬레이션 결과

제안된 3-D 장애물 회피 알고리즘의 성능 검증은 UFV의 6 자유도 방정식 전체를 적용하여, 정상운항속도 2m/s 하에서 수평/수직면에서의 침로/심도 제어 문제에 대해서 이루어 졌다. 여기서는 소나 신호처리 과정은 생략하고 그 결과인 거리/방위 만을 고려하는 형태로 구현하였는데, 소나의 탐지 반경은 150m이고, UFV의 초기 위치는 (50,50,1) 이고 침로각은 0도이다. 전역 경로계획이 결과로서 경유지는 (100,100,10)이고, 목적지는 (800,800,110)이다.

표 4. 장애물 생성.

Table 4. Generation of obstacles.

	x축 위치	y축 위치	z축 위치	반경
장애물 #1	300	200	10	10
장애물 #2	300	300	60	10
장애물 #3	300	250	35	10

표 4에서 장애물 간의 거리는 탐지 반경에 비해서 작음을 알 수 있는데, 이는 탐지 반경을 고려하면 UFV의 위치에 따라서 장애물의 개수가 0~2 개로 변화할 수 있음을 의미한다. 이를 통하여 소나 정보의 특성을 반영한 실제적인 수중운동체 3-D 장애물 회피 문제를 구현하고자 한다.

샘플링 주기는 $T=0.02$ 로 정하였고, ES 파라미터는 표 5과 같다. 이들 파라미터 값들을 살펴 보면, 본 알고리즘은 파라미터 설정이 매우 용이하고 연산 과정도 단순함을 알 수 있다.

표 5. 진화 전략 파라미터.

Table 5. Parameters for ES.

	기호	값
침로각 해상도	Ψ_{res}, θ_{res}	0.1
침로각 변화폭	$\Delta\Psi_i(k), \Delta\theta_i(k)$	장애물 위치에 의해 결정
집단 상수	C_p	5
개체 수	$\mu+\lambda$	10
세대 수	g	5

제안된 3-D 장애물 회피 시뮬레이션 결과는 그림 5~8에 보여 진다.

그림 5는 장애물 #1 및 #2에 대한 장애물 회피 성능을 보여 주며, 그림 6은 그림 5와 관련하여 소나의 지역성 반영 여부를 증명해주는 장애물 탐지 결과를 보여주는데, UFV의 3-D 장애물 회피가 정상적으로 이루어지고 있음을 알 수 있다. 즉, UFV는 장애물이 탐지되지 않은 경우에는 전역 경로계획에 의한 경유지 및 목적지를 향해 진행한다. 이후에, 1개의 장애물이 탐지된 경우에는 $\Psi_{R_s} = \Psi_{L_s}$ 및 $\theta_{D_s} = \theta_{U_s}$ 를 적용하여 경로 명령 생성 및 경로 제어를 수행하고, 2개의 장애물이 탐지된 경우에는 제안된 ES에 의해서 최적 경로 명령 생성 및 경로 제어를 수행한다.

그림 7은 그림 5에 비해서 가까워진 장애물 #1 및 #3에 대한 장애물 회피 성능을 보여 주며, 그림 8은 가까워진 장애물로 인하여 그림 6에 비해서 2개의 장애물이 탐지된 구간이 늘어났음을 알 수 있는데, 장애물 위치 변화에도 UFV의 3-D 장애물 회피가 정상적으로 이루어지고 있음을 알 수 있다.

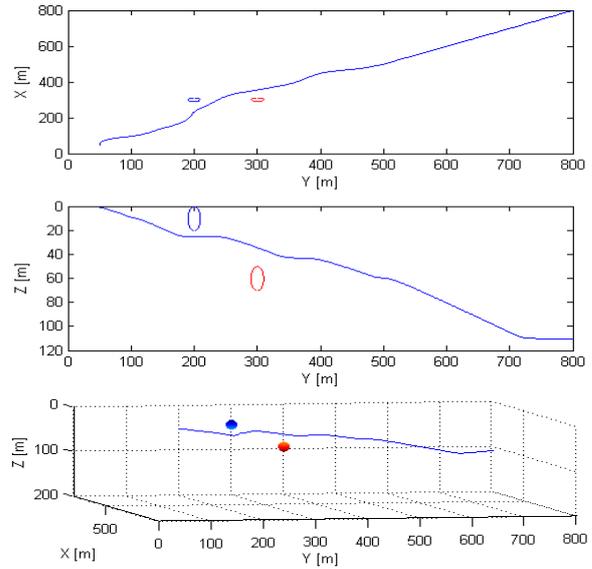


그림 5. 3-D 장애물 회피 성능 1.

Fig. 5. Performance of 3-D obstacle avoidance 1.

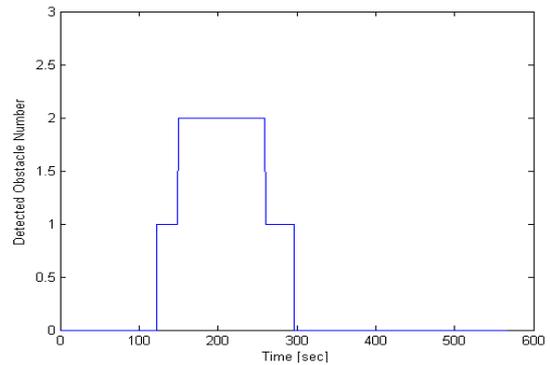


그림 6. 장애물 탐지 결과 1.

Fig. 6. Result of obstacle detection 1.

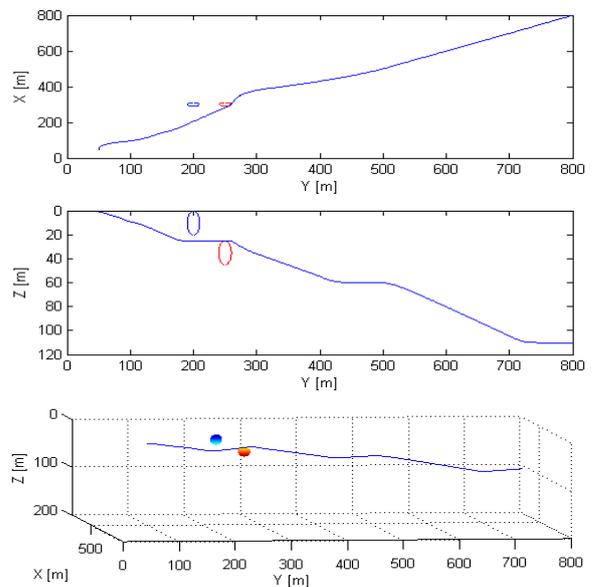


그림 7. 3-D 장애물 회피 성능 2.

Fig. 7. Performance of 3-D obstacle avoidance 2.

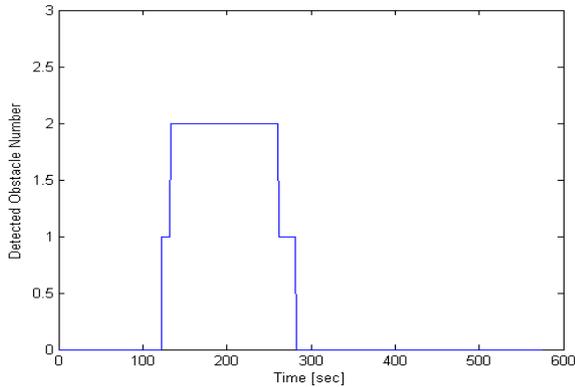


그림 8. 장애물 탐지 결과 2.
Fig. 8. Result of obstacle detection 2.

비록 앞의 결과들은 연구 현황 상, 기존 연구와의 비교 제시를 포함하지는 못하지만, 제안된 극좌표 기법에 기반한 침로명령의 실시간 생성법이 장애물의 위치에 무관하게 적절하게 동작하고 있음을 보여주었다.

5. 결 론

본 논문에서는 ES 및 FLC를 사용하는 지능형 3-D 장애물회피 알고리즘이 제안되었다.

제안된 알고리즘은 앞서 언급한 소나 정보의 특성, 에너지 소비/음향학적 소음, 운용 제약조건, 용이한 설계 등의 문제를 모두 고려한 실제적인 해법을 갖는다. 즉, ES를 이용하는 경로 명령 생성법을 통해서 소나 정보의 특성, 에너지 소비/음향학적 소음, 운용 제약조건, 용이한 설계 등의 문제를 해결하였고, FLC를 이용하는 경로 제어법을 통해서 에너지 소비/음향학적 소음, 용이한 설계 등의 문제를 추가적으로 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. 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.

[4] 김문환, 서주노, "무인함정의 자율항해를 위한 장애물회피 경로계획 기법", *수중로봇기술연구회 2008년 추계워크샵*, pp. 38-42, 2008.
 [5] 김현식, 진태석, "수중비행체의 자율제어를 위한 지능형 장애물회피 알고리즘", *한국지능시스템학회 논문지*, 제19권, 5호, pp. 635-640, 2009.
 [6] D. B. Fogel, *Evolutionary Computation : Toward a New Philosophy of Machine Intelligence*, IEEE Press, 1995.
 [7] C. T. Leondes, *Fuzzy Theory Systems*, Academic Press, 1999.
 [8] H. S. Kim and Y. K. Shin, "Expanded adaptive fuzzy sliding mode controller using expert knowledge and fuzzy basis function expansion for UFV depth control," *Ocean Engineering*, vol. 34, pp. 1080-1088, 2007.
 [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.

저 자 소 개

김현식(Hyun-Sik Kim)

제19권 제5호 참조

진태석(TaeSeok Jin)

제19권 제5호 참조



서주노(Joono Sur)

1981년 : 해군사관학교 기계공학과 졸업.
 1985년 : 서울대학교 기계공학과 졸업
 1989년 : 미 해군대학원 기계공학과 졸업 (공학석사)
 1997년 : Univ. of California 기계공학과 졸업(공학박사)
 1985년~현재 : 해군사관학교 교수

관심분야 : 무인체계, 수중로봇, 제어이론, 함정스텔스
 Phone : 055-549-1261
 Fax : 055-542-0033
 E-mail : joonosur@navy.ac.kr