Journal of Korean Institute of Intelligent Systems, Vol. 22, No. 2, April 2012, pp. 218-224
http://dx.doi.org/10.5391/JKIIS.2012.22.2.218

장애물회피소나 빔 모델링 기반의 국부경로제어 기법 연구

Study on Local Path Control Method based on Beam Modeling of Obstacle Avoidance Sonar

김현식†

Hyun-Sik Kim†

동명대학교 로봇시스템공학과

요 약

최근에는, 초소형 AUV(Autonomous Underwater Vehicle)의 개발에 대한 요구가 증가하고 있으므로 그 요소 기술의 확보가 시급하다. 요소 기술의 하나로서 국부경로제어의 기존 연구에서는 주로 전방감시소나(Forward Looking Sonar : FLS)의 정보를 활용하고 있는데, FLS의 크기는 초소형 AUV에 적합하지 않으므로 장애물회피소나(Obstacle Avoidance Sonar : OAS)를 이용하는 것이 바람직하다. 요약하면, 초소형 AUV를 위한 OAS 기반의 국부경로제어 시스템은 다음과 같은 문제점들을 가지고 있다. 즉, OAS는 낮은 방위(bearing) 분해능 및 지역적인 거리(range) 정보를 제공하며, 임무시간을 증대하기 위해서 에너지 소비가 적은 시스템을 필요로 한다. 나아가, 구조 및 파라메터 관점에서 용이한 설계 절차를 요구한다. 이 문제를 해결하기 위해서 OAS 빔 모델링을 기반으로 진화 전략(Evolution Strategy : ES) 및 퍼지논리 제어기(Fuzzy Logic Controller : FLC)를 이용하는 지능형 국부경로제어 기법이 제안되었다. 제안된 기법의 성능을 검증하고 특성을 분석하기 위해서 수중비행체(Underwater Flight Vehicle : UFV)의 수평면 침로(course) 제어가 수행되었다. 시뮬레이션 결과는 제안된 기법에 있어서 실제 적용의 가능성과 추가 연구의 필요성을 보여준다.

키워드 : 장애물회피소나, 빔 모델링, 국부경로제어, 진화 전략, 퍼지 논리

Abstract

Recently, as the needs of developing the micro autonomous underwater vehicle (AUV) are increasing, the acquisition of the elementary technology is urgent. While they mostly utilizes information of the forward looking sonar (FLS) in conventional studies of the local path control as an elementary technology, it is desirable to use the obstacle avoidance sonar (OAS) because the size of the FLS is not suitable for the micro AUV. In brief, the local path control system based on the OAS for the micro AUV operates with the following problems: the OAS offers low bearing resolution and local range information, it requires the system that has reduced power consumption to extend the mission execution time, and it requires an easy design procedure in terms of its structures and parameters. To solve these problems, an intelligent local path control algorithm based on the beam modeling of OAS with the evolution strategy (ES) and the fuzzy logic controller (FLC), is proposed. To verify the performance and analyze the characteristic of the proposed algorithm, the course control of the underwater flight vehicle (UFV) is performed in the horizontal plane. Simulation results show that the feasibility of real application and the necessity of additional work in the proposed algorithm.

Key Words : Obstacle avoidance sonar, Beam modeling, Local path control, Evolution strategy, Fuzzy logic

1. 서 론

해양 분야에서의 탐사, 작업, 감시/방어 등의 글로벌적 요구의 충족을 위한 하나의 해법으로서 수중로봇(underwater robot)[1]의 연구개발 추세와 관련하여, 최근에는, 수중임무 수행에 있어서 협소지역 운항가능 및 저렴한 운용비용을 장점으로, 플랫폼(보트, 선박, 항공기 등) 및 탑재센서(다중/이종/분산) 다양화가 가능하여 그 운용성이 우수한 초소형 AUV(Autonomus Underwater Vehicle)의 개발에 대한 요구가 증가하고 있으므로 에너지, 추진, 항법[2], 제어, 통신 등의 요소 기술의 확보가 시급하다. 그런데, 초소형 AUV는 몸체의 공간적 제약으로 인하여 탑재장비의 소형화를 필요로 한다.

요소 기술의 하나로서 국부경로제어 기술이 있는데, 국부경로제어는 장애물회피가 핵심이 된다. 장애물회피의 기존 연구로서 potential field[3], 스트림라인(stream line)[4], 휴

접수일자: 2012년 3월 5일
심사(수정)일자: 2012년 3월 29일
게재확정일자 : 2012년 3월 29일
†교신저자
본 연구는 교육과학기술부 및 부산광역시의 지원으로 수행된 지방과학연구단지육성사업 R&D역량강화 지원사업의 연구비 지원 및 한국과학기술원 국방무인화기술 특화연구센터를 통한 국방과학연구소 연구비 지원으로 수행되었습니다.

리스틱(heuristic)[5], 3-D 회피[6] 등의 기법들이 연구되고 있으나, 대부분 전방감시소나(Forward Looking Sonar : FLS)에 의한 장애물 정보를 활용하고 있는데, FLS의 센서 크기는 초소형 AUV에 적합하지 않으므로 소형화가 가능한 장애물회피소나(Obstacle Avoidance Sonar : OAS)에 의한 장애물 정보를 활용하는 것이 바람직하다. 또한, 기존 연구들에서는 비현실적인 접근으로서 장애물의 위치 정보를 활용할 수 있다고 가정하거나, 비교적 현실적인 접근으로서 소나의 거리/방위 정보를 활용하였다. 하지만, 보다 현실적인 접근으로서 소나의 모델링 요소로서 빔형상을 고려하고 있지는 않으므로, 해당 기법들의 실제 적용 측면에서 여러 가지 문제점을 가지고 있다.

따라서, 본 논문에서는 OAS 빔형상 모델링, 초소형 AUV 운용 특성, 구현성 등의 관점을 동시에 고려하여 보다 현실성 있는 국부경로제어 기술을 확보하고자 한다.

요약하면, 초소형 AUV를 위한 OAS 기반의 국부경로제어 시스템은 다음과 같은 문제점들을 가지고 있다. 즉, OAS는 낮은 방위(bearing) 분해능 및 지역적인 거리(range) 정보를 제공하며, 임무시간을 증대하기 위해서 에너지 소비가 적은 시스템을 필요로 한다. 나아가, 구조 및 파라메터 관점에서 용이한 설계 절차를 요구한다.

이 문제를 해결하기 위해서 본 논문에서는 OAS 빔형상 모델링을 기반으로 진화 전략(Evolution Strategy : ES)[7] 및 퍼지논리 제어기(Fuzzy Logic Controller : FLC)[8]를 이용하는 지능형 국부경로제어 기법이 제안되었다.

국부경로제어 시스템의 수학적 모델링은 2장에서, 국부경로제어 기법의 설계는 3장에서 수행되며, 시뮬레이션 결과는 4장에 기술된다. 결론은 5장에 요약된다.

2. 국부경로제어 시스템의 수학적 모델링

본 논문에서 수행된 국부경로제어 시스템의 수학적 모델링은 AUV 모델 소개 및 탑재 소나로서 OAS의 탐지 모델링으로 구성된다.

먼저, 본 논문에서 고려된 초소형 AUV의 형태는 수중비행체(Underwater Flight Vehicle : UFV)[9]인데, 이는 유선형 몸체, 하나의 추진기 및 여러 개의 제어판(control plane)을 가지고 있으므로 추진에너지 소모가 적다. 따라서, 초소형 AUV 운용 특성 관점에서 매우 적합한 형태이다.

일반적인 6 자유도(DOF : Degree Of Freedom) 운동은 병진(translation) 성분인 x,y,z와 회전(rotation) 성분인 ϕ,θ,ψ를 포함한다. 이와 관련하여 속도 성분이 u,v,w, 각속도 성분이 p,q,r이고, 힘 및 모멘트 성분이 $\boldsymbol{F} = [X\ Y\ Z]$, $\boldsymbol{G} = [K\ M\ N]^T$일 때[10], Gertler 방정식[11]에 기초한 UFV 운동 방정식은 다음과 같이 정의 된다.

$$[\boldsymbol{m}+\boldsymbol{m}_a]\boldsymbol{a} = -\begin{bmatrix}\boldsymbol{F}_I\\ \boldsymbol{G}_I\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\boldsymbol{F}_R\\ \boldsymbol{G}_R\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\boldsymbol{F}_H\\ \boldsymbol{G}_H\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\boldsymbol{F}_P\\ \boldsymbol{G}_P\end{bmatrix} \qquad (1)$$

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

본 논문에서의 국부경로제어는 초소형 AUV의 임무시간을 늘리기 위해서 에너지 소비를 최소화하기 위한 운용개념적 접근으로서 일정한 속도와 심도(depth)를 가정하였으므로, 수평면에서의 침로(course) Ψ의 제어를 위해서 수직 제어판으로서 선미 수직타 δ_r을 1개 가지고 있다. 관련 형상 및 표기법은 참고문헌[12]에 잘 나타나 있다.

식 (1)의 힘 및 모멘트 가운데에서, 국부경로제어를 위한 침로 제어의 정상상태에서 지배적인 힘은 Y_H인데, 이 힘은 프라임(prime) 표시 기호들인 유체력 계수(hydrodynamic coefficient)들을 포함하여 다음과 같이 정의된다.

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

여기서, ρ는 물의 밀도, l은 UFV의 길이이다. 침로 제어의 정상상태와 관련된 유체력 계수는 $Y'_\star$ 인데, 본 논문에서 고려된 UFV는 수평면 형상이 대칭이므로 $Y'_\star$의 영향은 없다. 식 (1)~(2)에 근거한 국부경로제어 시스템은 δ_r 및 Ψ를 각각 1개씩 가지고 있는 SISO 시스템임을 알 수 있다.

다음으로, UFV에 탑재된 소나는 OAS인데, OAS는 장애물의 탐지확률을 높이기 위해 빔폭(beam width)을 크게 하면 분해능(resolution)이 낮아지고, 분해능을 높이기 위해 빔폭을 작게 하면 탐지확률이 낮아지는 특성을 가지고 있다. 이러한 특성을 고려하여 UFV의 경로제어 시에 충돌 확률이 높은 정면 장애물에 대해서 휴리스틱을 적용한 OAS 탐지 패턴은 다음과 같다.

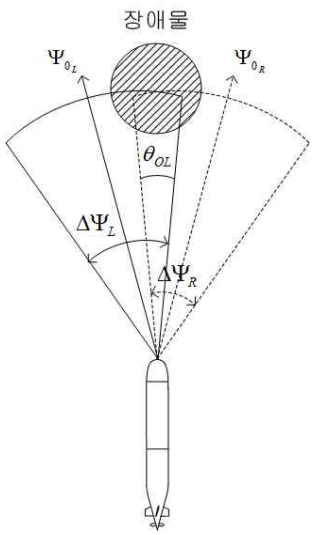

그림 1. OAS 탐지 패턴
Fig. 1. Detection pattern of OAS.

앞의 그림에서는 최소한의 분해능을 가지고 효과적으로 장애물 탐지 및 회피를 수행하기 위해 빔중심(beam center) Ψ_{0_L}, Ψ_{0_R} 및 빔폭 $\Delta\Psi_L$, $\Delta\Psi_R$을 갖는 2개의 빔을 중첩시켰는데, 회피방향 결정 및 회피구간 확대가 가능한 빔 배치이다. 빔 배치와 관련해서 빔중심을 결정하기 위한 식은 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$\begin{aligned}\Psi_{0_R} &= \frac{\Delta\Psi_R}{2} - \frac{\theta_{OL}}{2} \\ \Psi_{0_L} &= -\left(\frac{\Delta\Psi_L}{2} - \frac{\theta_{OL}}{2}\right)\end{aligned} \tag{3}$$

여기서, 좌측 빔폭 $\Delta\Psi_L$과 우측 빔폭 $\Delta\Psi_R$이 같은 경우에는 빔중첩부 $\theta_{OL} \in [0, \Delta\Psi_R]$ 이다.

OAS의 장애물 탐지를 구현하기 위한 OAS 탐지 방정식의 경우에는 기존[5, 6]에는 빔형상을 고려하지 않은 이유로 실제 적용에서 문제가 있었다. 따라서, 본 논문에서는 이를 극복하기 위해서 빔형상을 고려하였는데, 문제의 단순화를 위하여 수평면에서의 침로제어를 가정하고 있으므로 원뿔이 아닌 부채꼴 형상의 빔을 고려하였다.

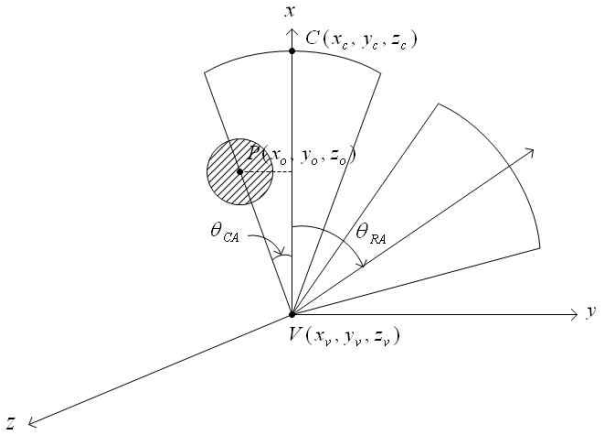

그림 2. OAS 빔형상
Fig. 2. Beam form of OAS

앞의 그림과 관련하여, 부채꼴의 꼭지점 V 및 중심 C가 주어질 때, 장애물의 중심 P와 관련한 OAS 탐지 조건식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$(y_o - y_v)^2 \le ((x_o - x_v)\tan\theta_{CA})^2, \quad x_o \in [x_v, x_c] \tag{4}$$

여기서, 부채꼴의 탐지각은 $\theta_{CA} \in \left(0, \frac{\pi}{2}\right)$인데, 실제 장애물은 중심 및 반경을 고려하여 탐지여부를 판단하여야 한다. 본 논문에서는 연산량 측면을 고려하여 장애물의 반경 r_o을 고려할 때 P가 아닌 P_D, P_L, P_R에 대해서 식(4)를 적용한 후, 조건을 만족하는 점이 적어도 하나가 존재하면 탐지가 되었다고 가정하였다.

$$\begin{bmatrix} P_D \\ P_L \\ P_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_o - r_o & y_o & z_o \\ x_o & y_o - r_o & z_o \\ x_o & y_o + r_o & z_o \end{bmatrix} \tag{5}$$

여기서, 빔 배치와 관련한 빔중심의 회전각 θ_{RA}를 적용하여야 하는데, 다음의 변환식을 적용하였다.

$$\begin{bmatrix} x^* \\ y^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\Psi + \theta_{RA}) & \sin(\Psi + \theta_{RA}) \\ -\sin(\Psi + \theta_{RA}) & \cos(\Psi + \theta_{RA}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \tag{6}$$

여기서, Ψ는 UFV의 침로각이다. 회전행렬의 경우 장애물의 반시계 방향 회전을 기준으로 하고 있다. 그림 2에서 빔 배치를 위해서는 Ψ_{0_L}, Ψ_{0_R}를 시계 방향으로 각각의 θ_{RA} 만큼 회전해야 하는데, 빔의 장애물 탐지와 관련하여 식(4)를 그대로 적용하기 위해서 장애물을 반시계 방향으로 각각의 θ_{RA} 만큼 회전시켰다. 즉, 장애물의 반시계방향 회전과 관련한 $P_D^{'}$, $P_L^{'}$, $P_R^{'}$을 2개의 빔에 각각 적용하여 빔의 장애물 탐지를 판단하였다.

앞의 과정을 통하여 보다 현실적인 소나 모델링이 가능하였다. 이후에는 본 모델링을 전제로 하여 실제 적용성이 높은 국부경로제어 알고리즘을 설계하고자 한다.

3. 국부경로제어 기법의 설계

이 장에서는 ES 및 FLC를 이용하는 국부경로제어 알고리즘이 설계된다. 즉, ES를 이용하는 경로 계획 및 FLC를 이용하는 경로 추종을 주요 내용으로 한다.

설계의 첫 번째 단계로서, ES를 이용하는 경로 계획에 있어서는 초소형 AUV를 위한 OAS 기반의 국부경로제어 시스템의 문제점과 관련하여 초소형 AUV 운용 특성, 구현성 등의 문제를 해결하고자 한다.

OAS기반의 국부경로제어 문제에 있어서 일반적인 충돌확률은 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$p_{collision} = f(c_{AUV}, c_{OAS}, c_{obstacle}) \tag{7}$$

여기서, c_{AUV}는 AUV 특성이고, c_{OAS}는 OAS 특성이고, $c_{obstacle}$은 장애물 특성이다.

본 논문에서는 AUV특성을 반영하기 위해서 UFV의 기동특성이 고려된 장애물 회피가 가능한 최소 거리를 고려하였으며, OAS특성을 반영하기 위해서 빔형상 및 탐지반경 $r_d = x_c - x_v$을 고려하였다. 그리고, 장애물특성을 반영하기 위해서는 r_o를 고려하였다.

그림 1의 OAS 탐지 패턴을 분석해 보면, r_d가 큰 경우에는 충돌확률이 낮으므로 Ψ_{0_L}, Ψ_{0_R}을 일치시켜 분해능을 높이는 것이 바람직하고, r_d가 작은 경우에는 충돌확률이 높으므로 Ψ_{0_L}, Ψ_{0_R}을 멀리하여 탐지확률을 높이는 것이 바람직하다. 분해능이 높으면 최적의 침로 변경을 할 수 있고, 탐지확률이 높으면 안전한 침로 변경을 할 수 있다.

2개의 빔에 장애물이 탐지되면. 해당 빔폭을 제외한 회피구간 내에서 침로를 최적화하여야 하는데, 이를 위해서는 우선적으로 회피구간의 좌측 및 우측 경계침로를 결정하여야 한다. 본 논문에서는 $\Psi = 0$을 기준으로 좌측 경계 침로 $\Psi_{LB} \ge 270^\circ$ 및 우측 경계 침로 $\Psi_{RB} \le 90^\circ$를 가정한 후 그림 1을 분석하여, $\Delta\Psi_L$ 및 $\Delta\Psi_R$의 탐지여부에 따른 Ψ_{LB} 및 Ψ_{RB}는 표 1과 같이 제안하였다.

표 1. 경계 침로의 결정
Table 1. Boundary courses decision

	$\Delta\Psi_L$	$\Delta\Psi_R$	Ψ_{LB}	Ψ_{RB}
Case 1	탐지		$\Psi+270$	$\Psi+\Psi_{0_L}-\Delta\Psi_L/2$
Case 2	탐지	탐지	$\Psi+270$	$\Psi+\Psi_{0_L}-\Delta\Psi_L/2$
			$\Psi+\Psi_{0_R}+\Delta\Psi_R/2$	$\Psi+90$
Case 3		탐지	$\Psi+\Psi_{0_R}+\Delta\Psi_R/2$	$\Psi+90$

앞의 표에서 $\Psi_{LB},\Psi_{RB}\in[0,360]$인데, Case 1 및 Case 3에서는 1개의 회피구간이 존재하고, Case 2에서는 2개의 회피구간이 존재한다. 침로 최적화의 효과적인 구현을 위해서 Case 2의 경우에는 2개의 회피구간 중에서 목적지와 가까운 회피구간을 선택하면 문제가 단순화되어 연산부하(computational load)를 효과적으로 줄일 수 있다.

앞의 내용에 근거하여 최적의 침로 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 명령 생성 내용은 다음과 같은데, 우선적으로 침로 명령 생성과 관련한 개념도는 다음의 그림과 같으며, 초소형 AUV의 중심$X(x,y,z)$을 그림 2와 연관을 지으면 $x=x_v$, $y=y_v$, $z=z_v$이 된다.

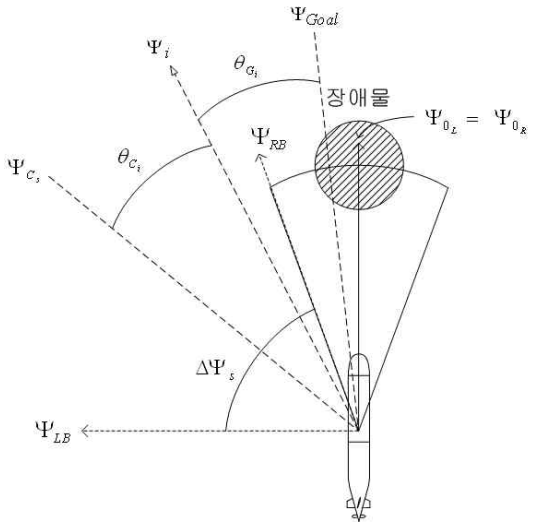

그림 3. 침로명령 생성

Fig. 3. Generation of course command

표 1에 의해 결정된 s번째 회피구간의 폭 $\Delta\Psi_s$와 중심 침로 Ψ_{C_s}는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned}\Delta\Psi_s&=\Psi_{RB}-\Psi_{LB}\\ \Psi_{C_s}&=\frac{\Psi_{RB}+\Psi_{LB}}{2}\end{aligned}\tag{8}$$

Ψ_i가 i번째 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[6].

$$J_\Psi=\frac{1}{1+C_1|\Psi_{G_i}|+C_2|\Psi_{C_i}|+C_3|\Psi_{com_i}|}\tag{9}$$

여기서, C_1, C_2 및 C_3는 상수들이고, 경험적 정보를 반영한 부분인 Ψ_{G_i}, Ψ_{C_i} 및 Ψ_{com_i}는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\Psi_{G_i}&=|\Psi_i-\Psi_{Goal}(k)|\\ \Psi_{C_i}&=|\Psi_i-\Psi_{C_s}(k)|\\ \Psi_{com_i}&=|\Psi_i-\Psi_{com}(k-1)|\end{aligned}\tag{10}$$

s번째 회피구간으로서 $\Delta\Psi_s(k)$를 이용하면, 초소형 AUV를 위한 OAS 기반의 국부경로제어와 관련한 침로 명령 생성의 문제를 전역 탐색 문제가 아닌 지역 탐색 문제로 전환할 수 있다. 이는 본 논문에서의 ES 사용의 타당성을 입증해 준다. 적합도 함수 J_Ψ를 최대화하기 위해서, 본 논문에서는 변형된 ES의 확장 형태를 사용하였다[5, 6]. 제안된 후보 침로명령 Ψ_i를 각각 추정하기 위한 돌연변이 연산은 다음과 같다.

$$\Psi_{offspring}(g+1)=\Psi_{parent}(g)+N(0,\sigma_\Psi(k))\tag{11}$$

여기서, g는 세대(generation) 수이며, $\sigma_\Psi(k)$ 및 $\sigma_\theta(k)$는 k번째 스텝에서의 랜덤 변수의 표준편차이다. k번째 스텝에서는 설정된 세대 수를 만족할 때까지 진화가 반복된다. 즉, 본 논문에서는 μ개의 부모(parent)로부터 λ개의 자손(offspring)을 발생시키고, $\mu+\lambda$개의 개체들(individuals) 가운데에서 적합도가 높은 μ개를 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.

$$\sigma_\Psi(k)=\begin{cases}0, & \text{if } p=1\\ \Psi_{res}, & \text{if } p<C_p\\ \Delta\Psi_s(k)/2, & otherwise\end{cases}\tag{12}$$

여기서, p는 집단(population)을 구성하는 개체의 번호이며, C_p는 집단 상수이다. 첫 번째 조건식은 현재 세대의 최고 적합도 값을 갖는 개체를 다음 세대에 그대로 유지시키는 엘리티즘(elitism) 적용을 의미하고, 두 번째 조건식은 최소 탐색 구간(stepsize)을 갖는 지역적 탐색을 의미하며, 세 번째 조건식은 최대 탐색 구간을 갖는 전역적 탐색을 의미하는데, 후보 침로 명령의 발생과 관련한 경계 조건식은 $\Psi_{LB}(k)\le\Psi_i\le\Psi_{RB}(k)$이다.

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

설계의 두 번째 단계로서, FLC를 이용하는 경로 추종에 있어서는 초소형 AUV를 위한 OAS 기반의 국부경로제어 시스템의 문제점과 관련하여 초소형 AUV 운용 특성, 구현성 등의 문제를 해결하고자 한다.

제안된 제어기는 기 검증된 침로 제어법[5, 6]을 활용하였는데, singleton fuzzifier, triangle membership function, min-max inference로 구성된 퍼지 시스템이다. 표 2는 침로 제어를 위한 퍼지룰을 나타낸다.

표 2. 침로 제어를 위한 퍼지룰

Table 2. Fuzzy rule for course control

E \ $\dot{E}$	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

FLC 출력인 $\delta_r = f(X)$을 포함하는 제안된 국부경로제어 시스템의 블록선도는 다음의 그림과 같다.

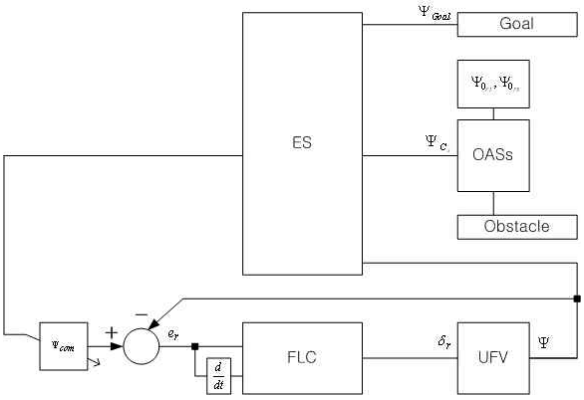

그림 4. 제안된 국부경로제어 시스템 블록선도

Fig. 4. Block diagram of proposed local path control system

위의 과정으로부터 ES 및 FLC를 사용하는 국부경로제어 기법의 설계가 완료되었다.

4. 시뮬레이션 결과

실제적인 OAS 빔 모델링 기반의 국부경로제어 기법의 성능 검증 및 특성 분석은 다음과 같다. 제안된 기법의 성능 검증은 식 (1)의 6 자유도 UFV 운동방정식에 소형급 UFV의 제원 및 유체력 계수를 적용하여, 정상운항속도 2m/s 하에서 수평면에서의 침로 제어 문제에 대해서 이루어 졌다.

OAS 빔 모델링과 관련하여 탐지 반경은 60, 100m이고, UFV의 초기 침로각은 0도이다. 목적지 도달 이후에는 출발점으로 복귀하도록 하였다. 경로 계획과 관련된 파라메터는 표 3과 같다.

표 3. 경로 계획 파라메터

Table 3. Parameters for path planning

	x축 위치	y축 위치	z축 위치	반경
출발점	50	50	10	-
장애물 #1	300	300	10	10
장애물 #2	450	500	10	10
목적지	800	800	10	-

샘플링 주기는 $T = 0.02$로 정하였고, ES 파라메터는 표 4와 같다. 이들 파라메터 값들을 살펴 보면, 본 알고리즘은 구조와 파라메터 관점에서 설정이 용이함을 알 수 있다.

표 4. 진화 전략 파라메터

Table 4. Parameters for ES

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

표 3 및 표 4의 적용에 따른 시뮬레이션 결과는 그림 5~8에 보여 진다.

그림 5는 OAS의 탐지반경이 100m인 경우에 대한 UFV의 장애물 #1 및 #2의 회피 성능을 보여 주는데, 장애물 회피가 정상적으로 이루어지고 있음을 알 수 있다. 즉, UFV는 장애물이 탐지되지 않은 경우에는 전역 경로계획에 의해 목적지를 향해 진행하다가 장애물 #1이 탐지된 경우에는 표 1을 적용한 ES의 경로 계획 및 표 2를 적용한 FLC의 경로 추종을 수행하고 있으며, 장애물 #2가 탐지된 경우에도 변함없는 성능을 보여주고 있다. 점선은 $\theta_{OL} = 0$으로 빔폭이 넓은 경우이고 실선은 $\theta_{OL} = 45$로 빔폭이 좁은 경우인데, 이는 r_d가 큰 경우에는 Ψ_{0_L}, Ψ_{0_R}을 일치시켜 분해능을 높임으로써 최적의 침로 변경을 하는 것이 바람직함을 보여준다. 그림 6은 그림 5와 관련하여 장애물이 탐지된 빔 수의 변화를 보여주는데, 점선의 경우 빔폭이 넓으므로 장애물이 탐지된 빔의 수가 작고, 실선의 경우 빔폭이 좁으므로 장애물이 탐지된 빔의 수가 많다. 이는 OAS 빔 모델링이 정상적으로 수행되었음을 보여준다.

그림 7은 고려된 UFV의 장애물 회피가 가능한 최소 거리로서 OAS의 탐지 반경이 60 m인 경우에 대한 UFV의 장애물 회피 성능인데, 이는 r_d가 작은 경우에는 Ψ_{0_L}, Ψ_{0_R}을 멀리하여 탐지확률을 높임으로써 안전한 침로 변경을 하는 것이 바람직함을 보여준다. 그림 8도 OAS 빔 모델링이 정상적으로 수행되었음을 보여준다.

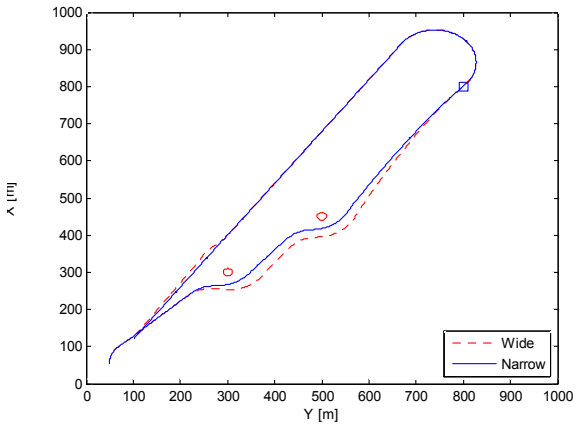

그림 5. 장애물 회피 성능 1

Fig. 5. Performance of obstacle avoidance 1

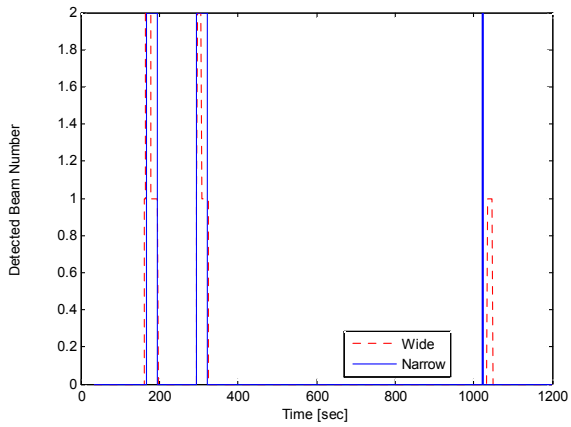

그림 6. 장애물 탐지 결과 1

Fig. 6. Result of obstacle detection 1

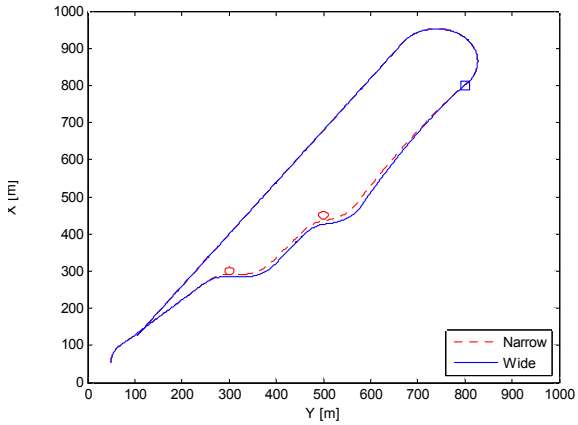

그림 7. 장애물 회피 성능 2

Fig. 7. Performance of obstacle avoidance 2

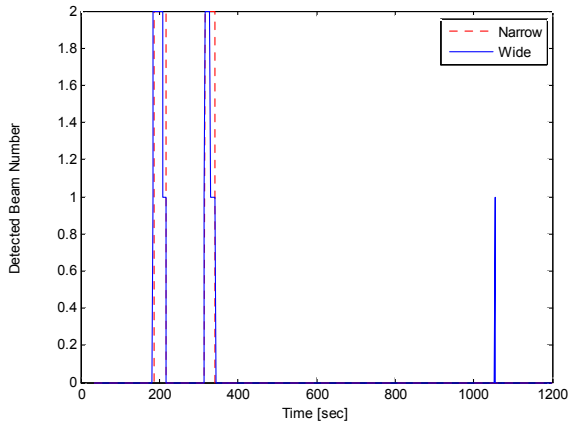

그림 8. 장애물 탐지 결과 2

Fig. 8. Result of obstacle detection 2

앞의 결과들을 분석해 보면, 제안된 OAS 빔 모델링 기반의 국부경로제어 기법이 초소형 AUV를 포함한 일반적인 AUV를 위한 OAS 기반의 국부경로제어에 적합함을 알 수 있었으며, r_d가 작은 경우에는 빔폭을 넓게 하여 안전한 침로 변경을 하는 것이 중요하고 r_d가 큰 경우에는 빔폭을 좁게하여 최적의 침로 변경을 하는 것이 중요함을 알 수 있었다. 또한, r_d가 큰 경우에는 갑자기 근접 출현하는 이동 장애물에 대한 심층 분석을 바탕으로 빔폭을 가변하는 기법에 대한 연구도 필요함을 알 수 있었다.

5. 결 론

본 논문에서는 OAS의 빔 모델링을 기반으로 ES 및 FLC를 이용하는 국부경로제어 기법이 제안되었다.

제안된 기법은 OAS 빔형상 모델링, 초소형 AUV 운용특성, 구현성 등의 관점을 동시에 고려한 현실성 있는 국부경로제어 기술이다. 즉, OAS 빔형상 모델링을 우선적으로 수행하였고, 이를 바탕으로 ES 및 FLC를 이용하는 경로계획 및 경로 추종 기법을 통해서는 초소형 AUV 운용특성, 구현성 등의 문제를 해결할 수 있음을 확인하였다.

시뮬레이션 결과는 제안된 기법에 있어서 실제 적용의 가능성과 추가 연구의 필요성을 보여준다. 즉, OAS 빔 모델링을 통하여 AUV를 위한 OAS 기반의 국부경로제어 분야 적용 가능한 요소기술을 확보하였으며, 이를 토대로 관련 분야의 지속적인 연구 및 적용이 기대된다.

참 고 문 헌

[1] G. Antonelli, *Underwater Robots*, Springer, 2006.

[2] D. Ribas, P. Ridao and J. Neira, *Underwater SLAM for Structured Environments Using an Imaging Sonar*, Springer, 2010.

[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] 김현식, 진태석, 서주노, "수중비행체의 자율제어를 위한 지능형 3-D 장애물회피 알고리즘", *한국지능시스템학회 논문지*, 제21권, 3호, pp. 323-328, 2011.

[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] 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.

[10] J. Yuh, "Modeling and control of underwater robotic vehicles," *IEEE Transactions on Man and*

Cybernetics, vol. 20, no. 6, pp. 1475-1483, 1990.
[11] M. Gertler and G. R. Hagen, "Standard equation of motion for submarine simulation," *Naval Ship Research and Development Center Report 2510*, 1967.
[12] 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.

저 자 소 개

김현식(Hyun-Sik Kim)
1994년 : 부산대학교 전기공학과 공학사
1996년 : 부산대학교 전기공학과 공학석사
2001년 : 부산대학교 전기공학과 공학박사
1998년～2007년 : 국방과학연구소 연구원
2007년～현재 : 동명대학교 로봇시스템공학과 교수
2010년～현재 : 한국지능시스템학회 이사

관심분야 : 인공 지능, 로보틱스, 해양 로봇, 표적 처리
Phone : 051-629-1565
E-mail : hyunskim@tu.ac.kr