

유전자 알고리즘을 이용한 무인잠수정의 와조류장에서의 전역경로계획

Global Path Planning for an Autonomous Underwater Vehicle in a Vortical Current Field by Using Genetic Algorithm

이 기 영*
Ki-Young Lee

김 수 범**
Subum Kim

송 찬 희*
Chan-Hee Song

ABSTRACT

The purpose of this paper is to demonstrate that the genetic algorithm can be useful for the global path planning when the obstacles and current field data are given. In particular, the possibilities for a novel type small AUV mission deployment in tidal regions, which experience vortical currents, were examined. Experimental simulations show feasibility and effective in generate the global path regardless of current and obstacles. By choosing an appropriate path in space, an AUV may both bypass adverse currents which are too fast to be overcome by the vehicle's motor and also exploit favorable currents to achieve far greater speeds than motors could otherwise provide, while substantially saving energy.

Keywords : Autonomous Underwater Vehicle(자율무인잠수정), Global Path Planning(전역경로계획), Genetic Algorithm(유전자 알고리즘), Vortical Current Field(와조류장)

1. 서론

현재 우리 군에서 사용되고 있는 무인잠수정은 기뢰 탐색 및 소해에 사용되고 있는 원격제어무인잠수정(ROV : Remotely Operated Vehicle) 형태의 무인기뢰소해정(MDV : Mine Disposal Vehicle)이 유일하다. 하지만 걸프전에서의 Remus 100 자율무인잠수정(AUV :

Autonomous Underwater Vehicle)의 기뢰탐색에의 성공적 활용사례는 AUV가 미래의 해양전장에서의 감시정찰(ISR : Intelligence, Surveillance, Reconnaissance), 기뢰대항전(MCM : Mine Countermeasure) 뿐 아니라 대잠전(ASW : Anti Submarine Warfare)에 이르기까지 확대될 수 있음을 예측하게 한다. 이에 미국 및 유럽의 해양 선진국을 중심으로 다양한 크기와 형태의 무인잠수정 개발과 군작전에의 적용연구가 활발히 진행되고 있다. 우리나라에서도 ROV형 무인기뢰제거정의 개발에 이어 ISR용 소형 AUV의 연구개발이 신개념기술개발(ACTD : Advanced Concept Technology Development) 과제로 진행 중에 있어 무인잠수정에 대한 개발 여건

† 2013년 3월 18일 접수~2013년 6월 21일 게재승인

* 해군사관학교(Korea Naval Academy)

** 해군 최영함(ROK Navy)

책임저자 : 이기영(kylee04@hanmail.net)

이 점차 성숙되고 있다¹¹⁾.

전장 2m 내외의 소형 AUV는 통상 수심 60m 이내의 천해역 혹은 극천해역에서 운용된다. 따라서 한반도 연안에서는 서해와 남해의 대부분의 해역과 동해의 항구 인근 해역이 임무해역이 된다. 보다 현실적으로는 북한의 비대전력들의 원격감시가 요구되는 서해의 NLL 인근 해역에서의 활용을 적극적으로 고려할 수 있다. 하지만 서해 해역에서의 소형 무인잠수정 운용상 가장 큰 난점 중의 하나는 3~7kts에 이르는 강한 조류이다. 특히 강한 와조류는 무인잠수정의 임무해역으로의 이동에 큰 장애요소로, 이를 극복하기 위한 운용속도의 증가는 임무운용시간을 제한한다. 따라서 효율적인 임무계획관리 차원에서 적정 임무운용시간을 확보하기 위해서는 조류를 극복하고 장애물을 회피하면서 임무해역에 최단시간에 도달할 수 있는 최적 전역경로계획이 요구된다.

무인잠수정의 전역경로계획은 고정장애물을 회피하고 위험지역을 우회하여 도착점에 도달하는 것을 목표로 퍼텐셜필드 알고리즘(potential field algorithm), A* 알고리즘, 케이스 기반 추론(case-based reasoning) 기법, 개미군집최적화(ACO : Ant Colony Optimization) 알고리즘 및 유전자 알고리즘(genetic algorithm) 등이 사용되고 있다^{2~7)}. A* 알고리즘은 최소비용 경로탐색기법으로 노드와 노드 간의 가중치가 부여된 간선을 갖는 그래프를 사용한다. 하지만 해양의 넓은 공간에서 목적 지점까지의 최소비용 경로를 구하기 위해 장애물이 없는 공간상의 위치를 모두 노드로 하고 인접 노드들 사이에 가중치를 부여한 간선이 준비되어야 하므로 공간복잡도가 높아지고 실행시간이 길어지는 단점이 있다⁸⁾. ACO 알고리즘은 개미집단의 생물학적 특징을 모델링하여 각각의 개미가 자신의 이동경로에 남긴 페르몬 정보를 통해 최적화된 경로를 탐색하는 기법이다. 그러나 ACO 알고리즘도 A* 알고리즘과 마찬가지로 그래프기반 탐색 기법이기에 때문에 해양에서 운용되는 무인잠수정의 경로계획에 적용하려면 무수히 많은 노드와 간선으로 구성된 가중 그래프로 인하여 효과적인 탐색 전략으로 사용하기에는 한계가 있다.

반면에 유전자 알고리즘은 개념과 이론이 비교적 단순하여 거의 모든 종류의 최적화 문제에 적용시킬 수 있으며, 해의 탐색능력이 우수하여 변수와 제약이 많은 대형 수리문제를 해결하는데 적합한 기법이다. 또한 모형에 대한 유연성이 높아 문제에 따라 염색체 구조와 유전연산자 및 적합도 평가함수를 적절하게 설계

함으로써 최적의 해를 쉽게 구할 수 있다. Fig. 1은 유전자 알고리즘을 이용한 무인잠수정의 3차원 경로계획을 수행한 Sugihara & Yuh⁴⁾의 예로, 출발점과 도착점을 포함하는 3차원 격자를 설정하고 각축을 n등분하여 작은 큐브로 이루어진 장애물 회피경로를 도출한 바 있지만 조류는 고려되지 못하였다. 조류환경에서 유전자 알고리즘을 사용한 경로계획 연구로는 Alvarez 등⁹⁾이 있지만 제한적인 1차원의 최적경로를 갖는 에너지를 계산하였기 때문에 결정 자유도의 부족으로 인하여 조류에 전적으로 부합하는 에너지 경로를 생성에는 미흡하였다. 최근에 보다 효율적인 알고리즘을 사용하여 장애물과 조류환경 모두를 고려한 무인잠수정의 경로계획에 관한 연구가 일부 진행되고 있으나 여전히 제한적이다^{10,11)}.

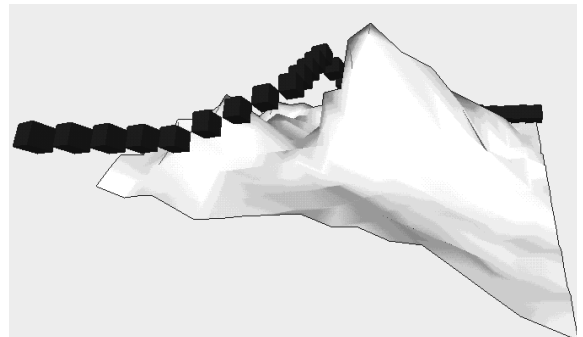


Fig. 1. An example of the 3D path planning by using genetic algorithm⁴⁾

이에 본 논문은 유전자 알고리즘을 사용하여 조류 방향과 강도 등의 조류장 특성에 부합하면서 고정 장애물을 회피하는 무인잠수정의 전역경로계획을 수행하였다. 통상 최적의 전역경로 생성을 위해서는 조류 등의 해양환경외란과 무인잠수정의 동특성을 고려한 동역학 모델을 사용하는 것이 이상적이나 이를 실제로 알고리즘으로 구현하는 것은 적합도 함수의 복잡도가 증가하여 최적경로 도출을 위한 연산시간이 급격하게 증가되어 작전현장에서의 적용에는 제한이 된다. 또한 생성된 경로에 대해서는 통상 별도의 추종제어가 수행되기 때문에 경로생성 단계에서는 단순한 기구학적 모델로도 현실적인 무인잠수정 운동궤적을 표현하는데 큰 무리가 없다고 가정할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 단위시간에 변화시킬 수 있는 최대 변침가능 침로를 설정 가능하도록 단순한 모델로 구현하였다. 모

의실험을 통하여 섬과 같은 고정장애물의 회피와 와조류가 존재하는 서해의 조류를 극복 혹은 이용하여 임무해역에 최단시간에 도달할 수 있는 최적 전역경로계획을 수행함으로써 실제 작전환경에서의 적용 가능성을 보였다. 아울러 MATLAB이 제공하는 ‘Genetic Algorithm Toolbox’를 사용하여 유전자 알고리즘 구현함으로써 작전현장에서의 운용자가 해양조건에 따라 유전연산자와 유전파라미터들을 쉽게 수정하여 활용할 수 있게 하였다. 본 논문에서 사용된 소스코드는 참고문헌 [12]에 제시되어 있다.

2. 전역경로계획 문제 설계

본 논문은 임무해역에서 조류와 고정 장애물의 정보가 사전에 제공된 상태에서 유전자 알고리즘을 이용한 진수지점에서 임무지점까지의 이차원 최적경로계획을 목표로 한 오프라인에서의 전역경로계획이다. 최적의 경로는 출발지점에서 진수되어 설정된 수심과 속도로 고정장애물을 회피하고, 조류의 방향에 부합하여 최소한의 항주시간으로 임무지점에 도달하는 조건을 경로를 의미한다. 이와 같은 조건을 충족하는 전역경로계획을 위하여 경로를 염색체화 하고, 이들의 적합도 평가함수를 정의한 후, 진화 과정을 통해 적합도가 우수한 경로를 점차 증가시켜 최적경로를 도출하였다. Fig. 2는 이와 같은 경로생성과정의 개념도이다.

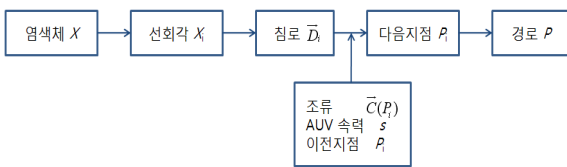


Fig. 2. Concept diagram of path planning

염색체의 설계는 자율무인잠수정의 선회각 정보를 염색체화하여 경로를 생성하였다. 선회각은 현 침로각에서의 타각으로 정의하였으며, 염색체의 길이 N_v 는 $N_v = T_o/T_u$ 로 무인잠수정의 운용시간 T_o 와 단위시간 T_u 로 계산된다. 경로는 Fig. 3과 같이 선회각 정보를 갖고 있는 염색체 $X = [X_1, X_2, X_3, \dots, X_{N_v}]$ 를 통해서 $P = [P_1, P_2, P_3, \dots, P_{N_v+1}]^T$ 와 같이 생성된다. 경로상의 점 $P_i (i = 1, \dots, N_v)$ 에서 무인잠수정이 속력 $s(\text{knot})$ 로 침로단위벡터 \vec{D}_i 로 항주할 때 점 P_i 에서의 조류 $\vec{C}(P_i)$

를 고려하면 다음 위치 P_{i+1} 는 Fig. 4과 같다. 아울러 P_i 에서 염색체 X_i 에 의해 결정되는 침로단위벡터 \vec{D}_i 는 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\vec{D}_i = \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{2\pi}{360}X_i\right) - \sin\left(\frac{2\pi}{360}X_i\right) \\ \sin\left(\frac{2\pi}{360}X_i\right) \cos\left(\frac{2\pi}{360}X_i\right) \end{bmatrix} \vec{D}_{i-1}^T, \quad i = 2, \dots, N_v \quad (1)$$

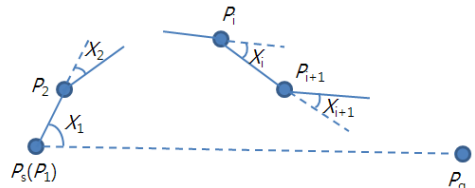


Fig. 3. Created path by chromosome

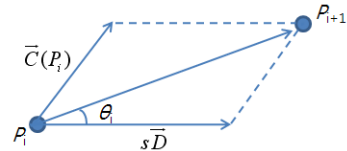


Fig. 4. AUV maneuvering path caused by current

무인잠수정의 목적지점에의 도달여부는 식 (2)와 같이 인덱스 cut 을 정의하여 평가하였다. 즉, 생성된 경로가 목적지점 P_g 를 허용오차 범위 ϵ 이내로 지나가지 않으면 cut 의 값은 N_v+1 , 목적지점 P_g 를 허용오차 범위 ϵ 이내로 지나가면 N_v 과 같거나 작게 된다. 따라서 Fig. 5와 같이 P_{cut} 은 P_g 에서 허용오차 범위 ϵ 이내에 존재하는 점이 되며, P_{cut} 을 경로의 마지막 지점으로 사용함으로써 목적지점에로의 도달조건을 만족하는 경로를 얻을 수 있다.

$$\begin{array}{l} cut = 1 \\ \text{while } \|P_g - P_{cut}\| > \epsilon \text{ and } cut \leq N_v \\ \quad cut = cut + 1 \\ \text{end} \end{array} \quad (2)$$

목적지점 도달여부의 평가값 A_g 는 식 (3)과 같이 정의하여 경로가 목적지점에 도착하는 경우에는 $A_g = 0$, 목적지점의 미도착시에는 $A_g = \infty$ 가 되며, 목적지점에 도착하지 못하는 경로는 진화과정을 통해 도태시킨다.

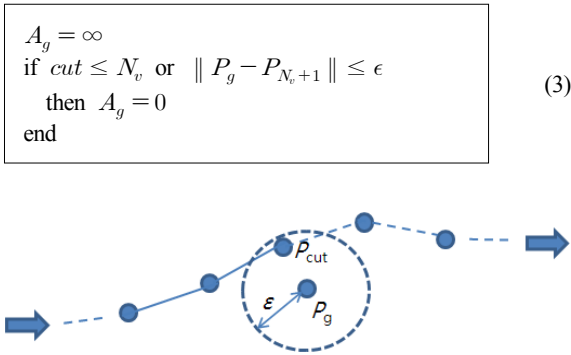
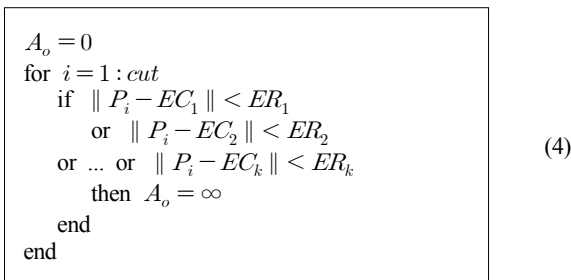


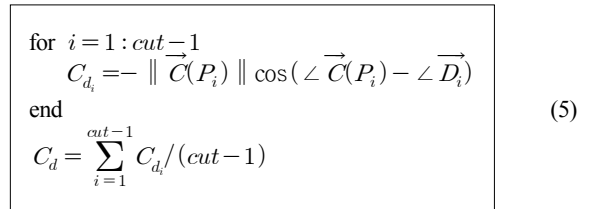
Fig. 5. Evaluation of arrival at the target point

경로상의 고정장애물의 회피여부는 중심이 $EC_i (i = 1, \dots, k)$, 반지름을 $ER_i (i = 1, \dots, k)$ 인 k 개의 원을 고정장애물로 가정하고, 식 (4)와 같이 평가값 A_o 를 정의하여 평가하였다. 경로가 고정장애물들을 회피하면 $A_o = 0$, 회피하지 못하면 $A_o = \infty$ 가 되어, 고정장애물을 회피하지 못하는 경로는 도태시켰다. 탐색체 설계 단계에서 탐색체 $X = [X_1, X_2, X_3, \dots, X_N]$ 는 단위시간 T_u 마다의 선회각으로 정의되어 경로상의 위치 P_i 에서 $P_{i+1} (i = 1, \dots, cut-1)$ 로의 이동시간은 T_u 이므로 출발 지점에서 목적지점까지 총소요시간은 $S_t = (cut-1) \times T_u$ 으로 계산할 수 있다.



탐색체로부터 경로가 생성되는 과정에서 경로상의 위치 P_i 에서 다음 위치 $P_{i+1} (i = 1, \dots, cut-1)$ 을 결정할 때 조류 $\vec{C}(P_i)$ 의 영향이 고려되었다. 따라서 이동 소요시간을 평가함수에 포함시킴으로써 유전자 알고리즘의 진화과정을 통해 조류의 영향을 고려한 에너지 효율적인 경로가 남게 된다. 무인잠수정의 침로 \vec{D}_i 와 조류 $\vec{C}(P_i)$ 가 이루는 각을 θ_i 라고 했을 때, $\theta_i = 0^\circ$ 이면 침로와 조류 방향이 정확히 일치하며 $\theta_i =$

180° 이면 침로와 조류 방향이 정반대가 된다(Fig. 3). 따라서 코사인 함수를 이용하면 침로와 조류 방향이 부합하는 상황인 $0^\circ < \theta_i < 90^\circ$ 또는 $270^\circ < \theta_i < 360^\circ$ 의 경우에 $\cos\theta_i > 0$ 이 되어 해당되는 각도에 부합하는 양(+)의 값을 얻을 수 있고, 침로와 조류방향이 반대되는 상황인 $90^\circ < \theta_i < 270^\circ$ 의 경우에 $\cos\theta_i < 0$ 이 되어 해당되는 각도에 부합하는 음(-)의 값을 얻을 수 있다. 침로와 조류 방향이 이루는 각을 평가하는 코사인 함수에 조류의 크기를 곱하고 이 값들을 경로상의 위치 $P_i (i = 1, \dots, cut-1)$ 에서 모두 구한 후, 이 값들의 평균으로 식 (5)와 같이 조류 방향과의 부합도 평가값 C_d 를 정의하였다.



이상의 네 가지 조건을 만족하는 경로에 대한 평가 함수 z 를 식 (6)과 같이 정의할 수 있다. 식 (6)에서 S_t 와 C_d 의 상수 100은 모의실험 수행시 함수값의 크기 가늠을 보다 용이하게 하기 위하여 사용한 것이다.

$$z = A_g + A_o + 100S_t + 100C_d \tag{6}$$

3. 유전연산자 및 유전파라미터의 설정

유전자 알고리즘의 기본구조는 Fig. 6과 같이 초기화, 적합도 평가와 재생산, 교배 및 돌연변이 4단계로 수행된다^[13]. 유전연산자 및 유전파라미터의 설정은 유전자 알고리즘의 구현에서 중요한 요소 중의 하나이다. 본 논문에서는 재생산 연산자(reproduction operator), 교배 연산자(crossover operator), 돌연변이 연산자(mutuation operator)를 모두 포함시켰다. 재생산 연산자는 룰렛휠 선택(roulette wheel selection)으로 하였으며, 선택과정에서의 최적자를 반드시 선택하지 못하는 단점을 엘리트 전략으로 보완하였다. 교배 연산자는 가장 간단하면서도 일반적으로 사용되는 일점교배를 사용하였다. 교배확률은 적합도가 높은 경로를 보다 신

속하게 탐색하기 위하여 0.8로 하였다. 진화과정에서 유전자의 다양성 결핍으로 인한 준최적해나 사점에 빠지는 것을 방지하기 위한 돌연변이 구현 방법으로 균등돌연변이를 선택하였다. 최적경로 탐색시 고정장애물이 존재하는 경우 지역해에 수렴하는 경향을 방지하기 위하여 다소 높은 돌연변이 확률인 0.4로 설정하였다.

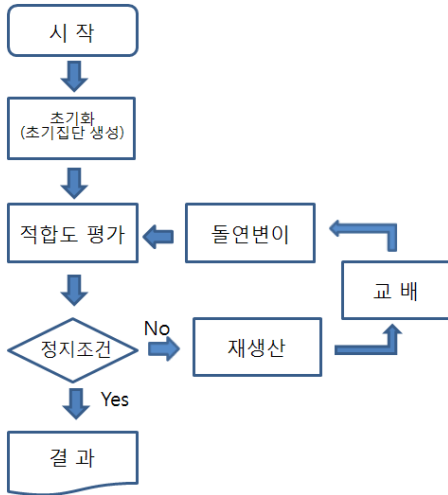


Fig. 6. Genetic algorithm structure

유전파라미터들은 문제의 특성을 잘 반영하면서, 효율적인 해공간의 탐색이 가능한 값들을 모의실험 반복을 통해 결정했다. 모집단의 크기는 동일 조건하에서 모집단의 크기를 30으로부터 시작하여 1,000까지 변화시켜 수행하였다(Fig. 7). 모집단의 크기가 500보다 작은 경우에는 경로의 다양성 부족으로 고정 장애물을 회피하면서 목적지점의 도달조건을 만족하는 경로 도출에 실패하는 경우가 발생하는 반면, 500보다 큰 경우에도 500일 때의 경로생성 결과와 크게 차이가 없기 때문에 모집단의 크기를 500으로 결정하였다.

세대수 역시 동일 조건에서 30세대부터 500세대까지 증가시키면서 반복하여 실험을 통하여 결정하였다. Fig. 8과 같이 세대수가 100을 넘으면 더 이상의 적합도 값의 진전이 없이 일정 값으로 수렴하는 경향을 보인다. 아울러 30세대 이상의 적합도 값의 진전이 없으면 100세대까지 진화를 반복하여도 적합도 값의 변화가 거의 없었다. 이와 같은 반복 실험결과를 통하여 유전자 알고리즘의 종료조건으로 세대수는 100세대, stall generations은 30세대로 결정하였다.

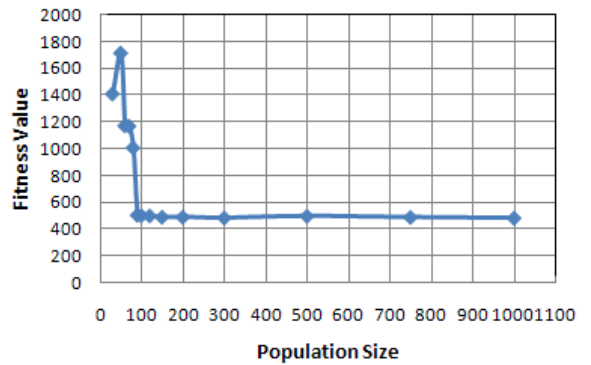


Fig. 7. Variation of fitness value as an increased population size^[14]

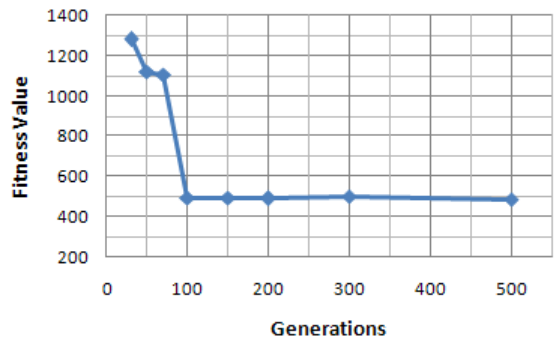


Fig. 8. Variation of fitness value as an increased generations

4. 모의실험 결과 및 토의

제안된 유전자 알고리즘 기반의 최적경로계획 생성을 검증하기 위하여 모의실험을 수행하였다. 모의실험은 20NM×20NM 크기의 해양에서 무인잠수정이 출발지점 $P_s = [0, 0]$ 에서 목적지점 $P_g = [20, 0]$ 으로 도달하는 것을 목표로 했다. 장애물은 총 2개가 존재한다고 가정하며, 계산의 편의성을 고려하여 중심으로부터 일정 반경의 원형 구역으로 하였다. 첫 번째 장애물은 중심 [5, 0]에 반경 1NM, 두 번째 장애물은 중심 [15, 10]에 반경 2NM로 가정하였다. 무인잠수정의 운용시간은 탑재 배터리의 용량을 고려하여 $T_b = 20$ 시간으로 하였다. 따라서 항주시간이 20시간을 초과하면 목적지점에서의 도착 실패로 하였다. 침로를 변경하는 단위시간 T_c 는 설정은 작게 설정할수록 정교한 경로

생성이 가능하지만 유전자의 염색체 길이가 증가에 따른 연산시간 증가와 장애물의 크기를 고려하여 $T_u = 3(\text{min})$ 으로 하였다.

Fig. 9~Fig. 12는 유전자 알고리즘에 의해 생성된 최적경로계획을 정성적으로 확인하기 위하여 단순화된 균일 조류장에서의 수행한 결과를 보인 것이다. 무인 잠수정과 조류속도는 각각 3kts이다. Fig. 9는 무인 잠수정의 항주방향의 90° 방향의 상향 횡조류장(a)과 270° 방향의 하향 횡조류장(b)에서 경로생성 결과로 목표지점까지의 최단경로인 장애물들과의 접선거리에 근접하는 경로를 생성하고 있다. 동일 조건에서의 하향 횡조류의 경우에는 항주 초기에 횡조류로 인한 다소의 편류가 발생하지만 상향 횡조류의 경우와 큰 차이 없는 경로를 생성함을 보인다.

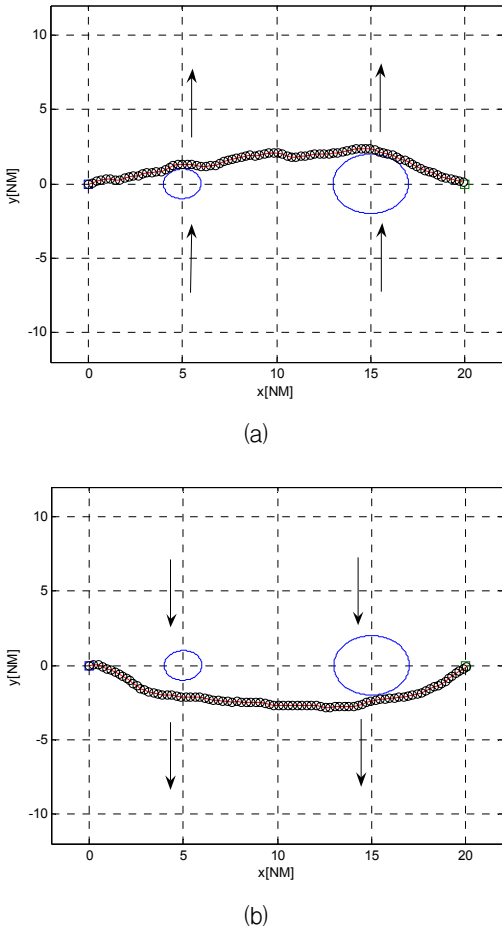


Fig. 9. Optimal path planning in the uniform cross current field

Fig. 10는 좌단에는 상향 횡조류가 우단은 하향 횡조류에 의한 복합횡조류장(a)과 반대로 좌단의 하향 횡조류와 우단의 상향 횡조류의 복합 횡조류장(b)에서의 경로계획 결과이다. 항주초기에 조류방향으로의 다소 편류가 일어나지만, 곧 목표지점 방향으로의 조류에 편승하여 물리적 직관에 가까운 경로를 생성하는 경향을 보여준다.

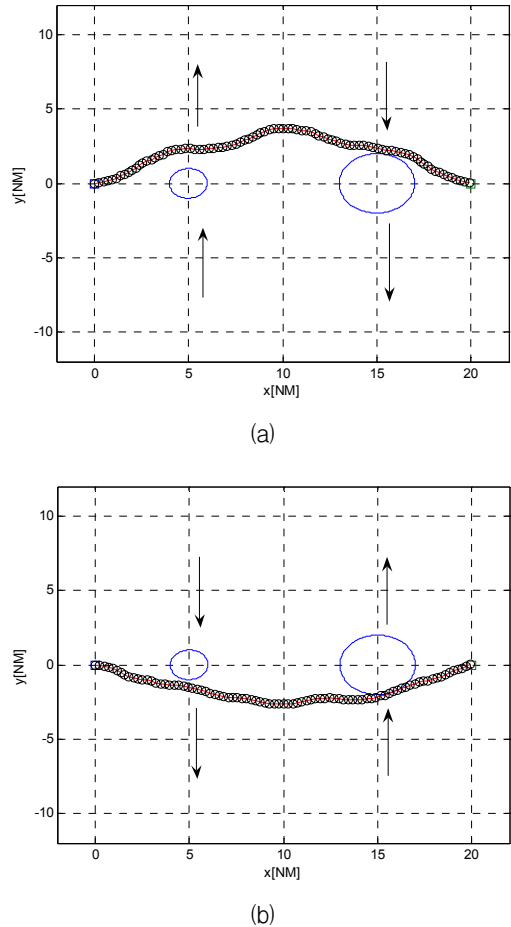
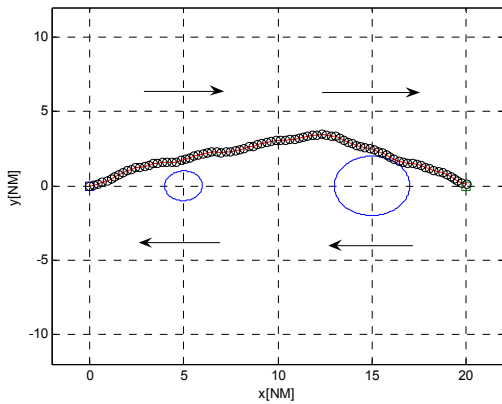
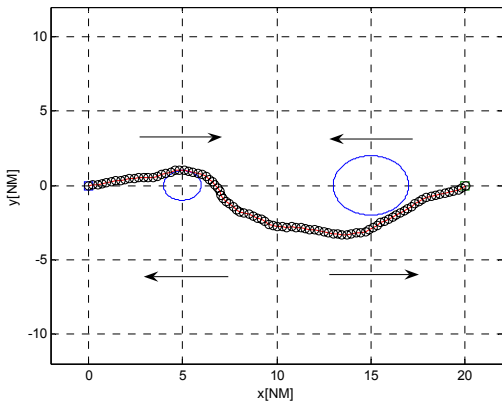


Fig. 10. Optimal path planning in the uniform mixed cross current field

Fig. 11은 상단은 순방향조류와 하단의 역방향조류에 의한 복합조류장(a)과 상·하단에 순방향조류와 역방향조류가 엇갈린 조류장(b)에서의 경로생성 결과를 보인 것으로 항주방향으로의 순방향 조류는 적절하게 편승하면서, 역방향 조류는 회피하는 조류방향 부합성에 일치하는 경로생성을 보여주고 있다.



(a)



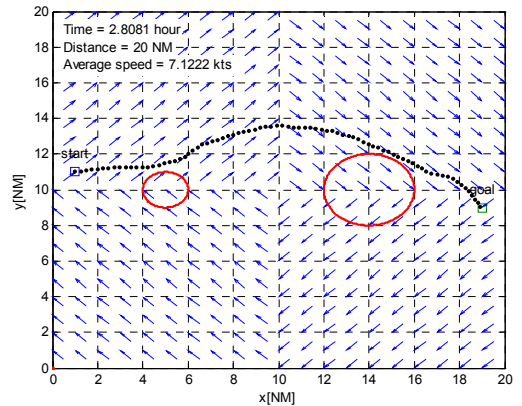
(b)

Fig. 11. Optimal path planning in the uniform favorable and adverse mixed current field

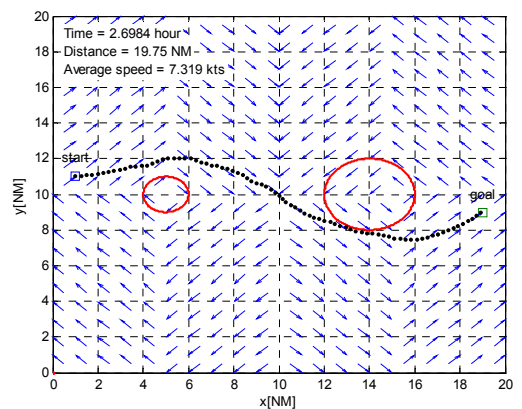
Fig. 12는 이와 같은 모의 실험결과를 보다 실험역에 가깝게 모사하기 위하여 이동해역 중심에 속도 3kts의 하나의 와조류장(a)과 좌우 두 개의 와조류장(b)에서의 경로계획 결과를 보인 것이다. 아울러 와동류에서의 조류 효과를 확인하기 위하여 출발지점과 도착지점의 좌표를 [1, 11]과 [19, 9]로 변경 설정하였다. 또한 자율무인잠수정의 속도는 5kts로 상향시켰으며, 두 개의 고정 장애물은 각각 [5, 10]과 [14, 10]위치 시켰다. 이와 같은 상황에서의 최단경로 길이는 출발지점으로부터 두 장애물의 접선으로 목적지점을 잇는 직선거리인 18.9NM이며, 3.78시간이 소요된다.

Fig. 12(a)의 하나의 와조류장의 경우에는 2상한의 +45° 방향의 와류와 -45° 방향의 조류를 이용하여 경로를 생성함을 보인다. 무인잠수정의 총항주거리는

20NM로 조류가 없는 최단거리 항주거리보다 5.5% 상회하였다. 하지만 평균항주속도는 조류를 이용한 경로 생성으로 인하여 무인잠수정 평균속력인 5kts를 상회하는 7.12kts로 보였다. 따라서 항주시간은 조류가 없는 경우보다 약 26%를 단축한 2.81시간이 소요되었다. Fig. 12(b)의 두 개의 와조류장의 경우에도 항주거리는 최단거리에 거의 근접한 19.75NM을, 평균 7.32kts의 속력으로, 2.70시간이 소요되어 항주시간을 29% 단축할 수 있었다. 이와 같은 이동 항주시간의 단축은 유전자 알고리즘에 의한 경로계획이 조류의 방향과 속도를 적절하게 고려하고 있음을 보여주고 있다. 따라서 본 논문에서 제시하는 기법이 무인잠수정의 임무해역 이동에 소요되는 동력을 절약함으로써 적정 임무시간을 확보에 적절한 경로계획을 수행함을 확인하였다.



(a)



(b)

Fig. 12. Optimized path generation in two circulatory current fields

5. 결론

유전자 알고리즘을 이용하여 고정 장애물을 회피하면서 조류 방향과 부합하는 경로를 생성함으로써 이동 소요시간 최소화하는 최적경로계획을 수행하였다. 제안된 알고리즘의 모의실험을 통하여 빠른 와조류장의 조류환경에 부합하는 경로를 생성함으로써 무인잠수정의 동력으로 극복하기 어려운 역방향의 조류는 적절하게 회피하고, 순방향의 조류는 편승함으로써 결과적으로 에너지를 절약함으로써 임무해역에서의 임무시간을 확보할 수 있음을 보였다. 이는 와동류 형태의 빠른 조류가 편재되어 있는 서해의 작전환경에서도 적용할 수 있음을 보여 주었다. 향후 시공간적 변화환경의 동적 조류모델, 혹은 실험역의 가변 조류장 데이터를 활용한 시뮬레이션의 수행하면 실험역의 적용가능성을 보다 제고할 수 있을 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 한국생산기술연구원으로부터의 지원받아 수행되었습니다.

References

- [1] 이기영, 임세한, 주성열, “연안에서의 무인잠수정 지원 대잠전 운용개념”, 한국군사과학기술학회 종합학술대회, 경주, 2012.
- [2] Carroll, K. P., McClaran, S. R., Nelson, E. L., Barnett, D. M., Friesen, D. K., & Williams, G. N., “AUV Path Planning : An A* Approach”, Proc. Sym. AUV Technology, pp. 3~8, 1992.
- [3] Petillot, Y., Ruiz, I. T., and Lane, D., “Underwater Vehicle Obstacle Avoidance and Path Planning Using a Multi-beam Forward Looking Sonar”, IEEE J. Oceans Engineering, Vol. 26, No. 2, pp. 240~251, 2001.
- [4] Sugihara, K. and Yuh, J., “GA-based Path Planning for Autonomous Underwater Vehicles”, Autonom. Robots, pp. 79~89, 1997.
- [5] Fox, R., Garcia, A., and Nelson, M. L., “A Three Dimensional Path Planning Algorithm for Autonomous Underwater Vehicles”, Proc. 11th International Symposium Unmanned Unthered Submersible Technologies, pp. 546~556, 1999.
- [6] Aghababa, M. P., Amrollahi, M. H., and Borjkhani, M., “Application of GA, PSO, and ACO Algorithmic to Path Planning of Autonomous Underwater Vehicles”, Journal of Marine Science and Application, Vol. 11, No 3, pp. 378~386, 2012.
- [7] Wenjing, Z., Tiedong, Z., Le, W., and Zaibai, Q., “An Improved Association Method of SLAM Based on Ant Colony Algorithm”, Proc. ICIEA 2009, pp. 1545~1548, 2009.
- [8] Garau, B., Alvarez, A., and Oliver, G., “Path Planning of Autonomous Underwater Vehicles in Current Fields with Complex Spatial Variability : An A* Approach”, Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 194~198, 2005.
- [9] Alvarez, A., Caiti, A., and Onken, R., “Evolutionary Path Planning for Autonomous Underwater Vehicles in a Variable Ocean”, IEEE Journal of Ocean Engineering, Vol. 29, No. 2, pp. 418~429, 2004.
- [10] Kruger, D., Stolkin, R., Blum, A., and Brigant, J., “Optimal AUV path Planning for Extended Missions in Complex, Fast Flowing Estuaries Environments”, Proc. IEEE International Conference Robotics and Automation, pp. 4265~4270, 2007.
- [11] Petres, C., Pailhas, Y., Patron, P., Petillot, Y., Evans, J., and lane, D., “Path Planning for Autonomous Underwater Vehicles”, IEEE Transaction on Robotics, Vol. 23, No. 2, pp. 331~341, 2007.
- [12] 이기영, 서주노, 홍순국, 임세한, 김수범, “무인잠수정 정찰임무 수행을 위한 최적경로 생성기법 연구”, Technical Report Y10-032, 해군사관학교, 2011.
- [13] Manikas, T. W., Ashenayi, K., and Wainwright, R. L., “Genetic Algorithms for Autonomous Robot Navigation”, IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, pp. 26~31, December 2007.
- [14] 이기영, 김수범, 송찬희, “조류와 장애물을 고려한 자율무인잠수정의 전역경로계획”, 한국해양공학회지 제26권 제4호, pp. 1~7, 2012.