

생체모방형 수중로봇의 해양작전 운용개념 및 핵심소요기술

이 기 영^{*,1)}

¹⁾ 해군사관학교 기계조선공학과

Applications and Key Technologies of Biomimetic Underwater Robot for Naval Operations

Ki-Young Lee^{*,1)}

¹⁾ Department of Mechanical Engineering & Naval Architecture, Korea Naval Academy, Korea

(Received 24 June 2014 / Revised 15 December 2014 / Accepted 27 February 2015)

ABSTRACT

This paper gives an overview on the some potential applications and key technologies of biomimetic underwater robot for naval operations. Unlike most manned underwater naval systems, biomimetic underwater robots can be especially useful in near-land or harbour areas due to their ability to operate in shallow water effectively. Biomimetic underwater robot provide advantages in reaching locations that would be difficult or too dangerous for a manned vehicle to reach, as well as providing a level of autonomy that can remove the requirement for dedicated human operator support. Using multiple or schools of underwater robots would provide increased flexibility for navigation, communication and surveillance ability. And it alleviate some of the restrictions associated with speed and endurance design constraints.

Key Words : Biomimetic Underwater Robot(생체모방 수중로봇), Naval Operation(해양작전), Search and Identification (조사 및 식별), Operation Concept(운용개념), Autonomous Underwater Vehicle(자율무인잠수정)

1. 서론

삼면이 바다인 한반도의 지형 특성상 연안에는 주요 군사시설 뿐 아니라 국가의 기반시설들인 항만, 원자력발전소, 석유 및 가스 저장시설 등과 해상교량을 비롯한 여러 가지 해양플랫폼이 위치하고 있어 비정

규전시 해양으로부터의 침투에 의한 비대칭 공격에 상당히 취약하다. 더욱이 육지에 근접한 연안 해역에서의 해양작전은 대양과 근해의 전환해역이면서 모든 해상세력의 출발지점이면서 도착지점이 되므로 가장 위험한 작전환경에 노출될 수 있다. 현재 북한의 수중전 플랫폼들은 연안지역으로 은밀하게 접근할 수 있는 능력을 신장시키기 위한 소형 잠수함과 잠수정들로 구성되어 있다. 이에 대응하기 위하여 연안에서의 수중 장애물의 위험과 적으로부터의 피탐을 최소화하

* Corresponding author, E-mail: kylee04@hanmail.net
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

면서 아 해군의 수중 플랫폼들이 천해역에서 장기적으로 운용하기에는 매우 어려운 실정이다. 특히 적 화력이 밀집되어 있는 NLL 주변에서의 작전수행은 적 으로부터의 공격 위험이 상존하고 있다. 이와 같은 아 해군의 유인 플랫폼의 접근이 거부되거나 위험한 적 연안 해역에서는 원격센서로서의 수중로봇의 운용이 은밀하게 작전반경을 확장시킬 수 있는 중요한 수단 이 될 수 있다.

우리 해군에서는 2006년 정찰용 무인잠수정 운용개 념을 검토하여, 2008년에 합동개념요구능력서에 수록 하였다. 2011년에는 신개념기술시범사업의 일환으로 수중탐색용 자율무인잠수정 개발이 시작되어 해양작 전에의 활용을 모색하고 있다. 이제는 정부차원의 신 무기체계 투자 확대 정책의 일환으로 국방무인로봇 기술 개발 전략을 수립 시행하고자 하는 의지와 발맞 추어 우리 군에서도 수중로봇 등의 무인체계를 활용 한 작전운용 개념을 정립하고 이에 요구되는 기술들 을 개발해야할 중요한 시점에 와있다^[14].

현재 국내외에서 개발 중인 대부분의 군사용 수중 로봇은 어뢰형태의 무인잠수정이다. 어뢰형은 유체저 항을 최소화하고 추진속도를 극대화하여 넓은 지역의 임무수행이 가능한 장점을 가지고 있다. 우리나라의 경우에는 심해의 수중탐사를 위한 수중로봇이 해양과 학기술원과 같은 연구기관을 중심으로 개발되는 등 어느 정도의 기술 성숙을 이루어 가고 있으나, 극천해 역에 적합한 수중로봇 기술 개발은 상대적으로 출발 이 늦었다. 극천해역은 국지적인 조류 등 예측하기 어 려운 장애물들이 산재하고 있어 성공적인 운용을 위 한 기술 개발이 필요하다. 이는 극천해역과 같은 열악 한 조건에서 생존을 위해 진화해온 해양생물의 모방 기술이 요구되는 영역이다. 수중생물체 모방 기술은 전통적인 프로펠러 추진방식의 어뢰형 수중로봇에 비 해 교란을 덜 발생하는 물고기모양의 외형과 지느러 미 추진방식 및 고효율의 에너지 절약형 수중추진기 의 개발 뿐 아니라 호버링과 좁은 지역에서의 선회, 정밀 위치유지 등 수중생물의 저속에서의 기동성 능 력을 모방하여 국지적인 정밀정찰에 활용할 수 있는 유용한 도구가 될 수 있다^[15].

이에 본 논문은 서해 연안과 같은 천해 및 극천해 해역과 서해 5도 해역과 같이 북한의 수중 침투 전력 이 밀집한 지역에 대한 은밀 감시 정찰 도구의 확대 필요성 제기되고 있는 이때에 생체모방형 수중로봇의 특장점을 활용한 원격센서로의 운용 등 생체모방형 수

중로봇 시스템 및 기술의 군사적 활용 방안을 제시하 였다. 즉, 물고기모양 수중로봇을 포함한 생체모방형 수중로봇의 개발 동향 분석을 통하여 한반도 해양작 전 환경에서 우리 해군의 의미 있는 작전 요소로 진 입할 수 있는 해양작전에의 운용개념 및 이의 효과적 운용방법과 이들 시스템 개발에 요구되는 핵심기술들 을 제시하였다.

2. 생체모방형 수중로봇 개발 동향

Fig. 1은 해양생물 중 가장 효율적인 유영기제로 알 려져 있는 물고기의 일반적인 유영모드와 특성을 보 인 것이다. 뱀장어와 같이 몸통을 좌우로 진동시켜 추 진력을 발생하는 Anguilliform은 저효율의 저속 유영방 식이나 좁은 공간에서의 이동에는 매우 유리한 높은 기동성을 특징으로 한다. Carangiform은 연어, 송어, 참치와 같이 몸통의 후부 1/3을 사용하여 꼬리로 추진 하는 방식으로 고효율의 고속유영이 가능한 반면 기 동성은 낮은 유영방식이다. Thunniform은 주로 꼬리로 추진하는 고속 장거리 유영모드이다.

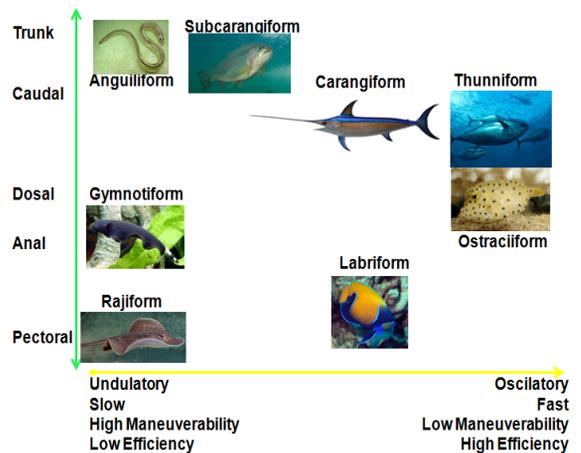


Fig. 1. Fish swimming modes and characteristics (modified and redrawn from Lindsey, 1978)^[7]

Ostraciiform은 꼬리지느러미와 가슴지느러미 등지느 러미 운동만으로 추진력을 얻는 복어와 같이 고속 유 영이 필요 없는 작은 물고기의 유영방식으로 포식자 로부터의 위협에 대피할 수 있는 순간 기동성이 매우 우수한 특성을 갖는다. Labriform은 꼬리지느러미를 러

더로 사용 것을 제외하고는 가슴지느러미로 추진하는 Ostraciiform와 유사하다^[6-8].

Fig. 2는 물고기와 같은 해양생물의 추진과 유영방식을 모방한 여러 형태의 대표적인 수중로봇 개발 사례를 보인 것이다. 초기의 생체모방형 수중로봇 개발은 주로 물고기의 유영을 모방하였다. 이는 해양생물의 추진방식이 프로펠러 추진방식보다 효율적이라는 가정 하에 수행된 것으로 주로 오염물의 추적, 어종 감시, 수질 검사 등의 수중생태 모니터링에 목표를 두었다. 군사용 수중로봇 개발 역시 물고기의 파동형식의 운동에 의한 저소음 고효율의 추진방식에 의한 장시간 임무수행에 초점을 두고 연구 개발되었다.

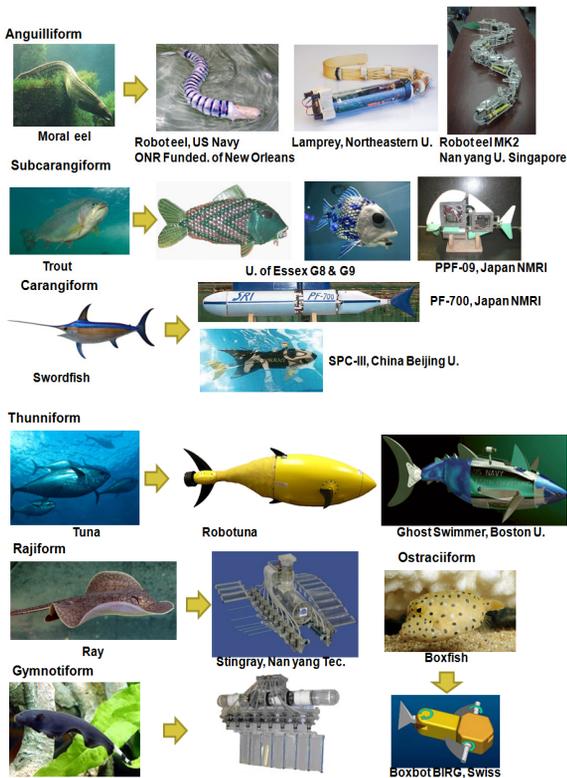


Fig. 2. Various fish type underwater robots

하지만 생체모방 수중로봇에 의한 실제의 임무 성공여부는 대부분 저속에서의 기동성에 달려 있음을 인식하고 가슴지느러미와 배지느러미 추진방식을 모방하여 저속에서 기동성이 우수한 수중로봇의 개발로 전환되는 추세이다. 최근의 연구결과들은 이러한 저속 기동성을 가진 소형의 수중로봇이 기뢰원의 탐색과

수중구조물 조사에 유용하게 활용될 수 있음을 보여 주고 있다. 최근에는 물고기 모양의 수중로봇 이외에도 해파리, 가오리, 오징어 등의 수중생물들과 갯가재와 바다거북과 같은 수륙양용의 해양생물을 모방한 수중로봇들도 연구 개발되고 있다^[10-13].

Fig. 3은 주요 국가별 생체모방형 수중로봇 연구 개발 현황을 특징적으로 보인 것이다. 미국은 다양한 형태의 수중로봇의 연구개발 및 이의 군사적 활용모색에 가장 적극적인 국가이다. 미국의 해양생물 모방 수중로봇의 연구개발은 국방고등연구본부(DARPA)와 해군연구소(ONR) 등의 국방 분야가 큰 역할을 담당하고 있다. 이는 미 해군이 직면해 있는 주요과제 중의 하나인 극천해역에서 활동하고 있는 저소음의 디젤 잠수함을 은밀하게 탐지하기 위한 것으로, 생체모방기술의 효율적 동작 메커니즘을 적용하여 장기간 작전수행 가능한 생물모방 자율무인잠수정(BAUV : Biomimetic AUV)을 연구 개발하고 있다. BAUV는 저동력, 저소음, 저속기동으로 보다 고가치의 원자력 잠수함을 위협에 노출시키지 않고 장기간 얕은 바다 속을 조용히 유영하면서, 사실상 탐지 불가능한 도청망을 통해 지속적인 연안 해저 감시체계 구축을 목표로 하고 있다^[19].

미국은 냉전시대의 종식에 따른 해양작전의 대양에서 연안으로 전이에 따라 군사용 생물체모방 수중로봇의 연구개발도 고속의 순항능력 보다는 저속의 기동성을 제고하는 방향으로 전환되고 있는 추세이다. 예로 참치 모양을 기본으로 한 자율무인잠수정인 GhostSwimmer는 가슴지느러미와 다른 지느러미들의 위치를 적절히 배치함으로써 열악한 환경에서도 높은 기동성을 발휘할 수 있도록 설계되어 있다. GhostSwimmer는 항만이나 부두시설 등의 조사와 수색뿐 아니라 선박의 밑바닥이나 탱크와 같이 접성이 강한 유체로 채워진 선박의 내부공간이나, 추진기, 흡배수구와 같이 사람이 접근하기 어려운 협소한 공간에서도 운용 가능하다(Fig. 2). 미 해군에서 개발되고 있는 수중로봇의 주요임무 중 하나는 기뢰원의 탐색이다. 미 해군에서는 천해 및 극천해역과 같이 기존의 유인 플랫폼에 의한 기뢰원 탐색이 곤란한 해역에서 칠성장어, 갯가재, 바다거북 등 다양한 생체모방형 수중로봇을 활용한 연안해역에서의 기뢰원 탐색이 연구 개발되고 있으며, 잠재적인 적용 가능성들도 점차 실현되고 있다^[15,16].

유럽 국가들의 물고기형 수중로봇 개발은 다양한 센서를 탑재한 소형 로봇이 대부분이다. 영국의 Essex 대

학은 2003년부터 로봇 물고기를 개발하여 G1~G11 물고기 로봇을 계속 업그레이드하며 개발하고 있다. 특히 G9은 실제모양과 거의 유사한 최초의 자율유영 로봇물고기로 수질관리 및 탐사목적으로 개발되었다. 독일의 Festo사는 수중탐사용 펭귄모양 수중로봇과 해파리 모양의 수중로봇을 개발하였다. 해파리 모양 수중로봇인 Aqua Jelly는 해파리의 군집특성을 이용하여 근거리 통신에 의한 군집유영 알고리즘 개발로 군사용에의 적용 가능성을 보여 주었다. 프랑스 Robotswim은 길이 0.2 m, 중량 0.1 kg의 초소형 물고기 로봇으로 인공지능 및 수중통신에 의한 10마리 이상의 군집유영을 시현함으로써 생체모방형 수중로봇의 군집 지능로봇 시스템 운용의 가능성을 열어 두었다(Fig. 3)^[17,18].



Fig. 3. Biomimetic underwater robot developing trend

일본의 해양생물 모방형 수중로봇은 물고기 외양과 가장 유사한 형태의 유영 모방에 초점을 맞추어 개발되어 영화제작 내지는 관광용으로 사용되었을 뿐 민수 내지는 군사용으로의 적용 사례는 보고된 바 없다. 하지만 정교한 물고기 모양의 외관과 고효율의 추진장치 기술은 적 해역에서의 은밀 감시 및 정찰에 적용할 수 있는 매우 유용한 기술들이다. 특히 일본의 국립해양연구소(NMRI)에서 개발한 PF-700은 미래의 군사용으로의 활용을 고려하여 보다 간단화 된 링크 기반의 로봇 물고기라 할 수 있다(Fig. 2, Fig. 3)^[19]. 중국은 지난 30년 전부터 수중로봇에 대한 연구를 상당한 수준으로 진행시켜 오고 있다. 특히 물고기 로봇 연구는 세계 최고 수준에 도달한 것으로 알려져 있다. 베이징대에서 개발한 SPC-II와 SPC-III는 통상적인 자율무인잠수정 형상에 물고기의 꼬리지느러미로 추진하는 보다 실용적인 형상으로 탑재된 카메라로 수중

유물을 촬영하고 수중지도 제작에 활용하였다. 이외에 아시아 국가로는 싱가포르가 다양한 형태의 해양생물 모방 수중로봇의 연구개발이 활발하다. 난양공대의 가오리와 같이 긴 지느러미의 파동운동에 의해 추진하는 해양생물 모방 수중로봇의 개발(Fig. 2)은 추진 및 방향전환, 역추진, 부상, 잠수, 수심유지, 자세유지 등에 필요한 제어기술 연구에 초점을 두고 있다^[20-24].

우리나라의 생체모방 수중로봇은 학계와 연구소를 중심으로 수중생물의 유영메커니즘을 모방하고 해석하는 수준의 연구가 개별적으로 진행되어 왔다. 생산기술연구원의 물고기형 수중로봇 익투스²는 하천의 수중환경 모니터링 센서로 활용할 계획이지만 임무에 적합한 탑재센서의 개발과 병행하면 군에서도 유용하게 활용할 수 있을 것이다. 최근 해양과학기술원에서 개발하고 있는 원격제어 해저보행 수중로봇 CR200은 해저면에 밀착하여 보행하는 개념으로 연안에서의 해저 조류의 극복하면서 기뢰를 탐색 가능성을 제시해 줄 수 있다고 판단된다^[25,26].

3. 생체모방형 수중로봇의 해양작전에서의 적용

3.1 적용 가능 해양작전 임무 유형

생체모방형 수중로봇은 생체모방형 수중로봇만이 지니고 있는 특징점을 활용하면 기존의 유인플랫폼기반의 감시시스템 기능 중 은밀하고 은폐된 지역에 대한 적침투 징후 탐지에 운용할 수 있을 것으로 판단된다. 즉, 작전지역 내 유인플랫폼 접근이 어려운 수심과 수중지형에서 인간이 수행하기 어려운 상시감시가 가능하므로 잠수정, 수명자 이송정, 적 잠수요원 등의 수중침투 징후를 조기에 경보할 수 있다. 생체모방형 수중로봇의 활용은 잠수요원의 투입으로 소요되는 비용 및 위험성 고려하면 비교적 저비용으로 안전하게 임무를 수행할 수 있을 것으로 생각된다. 따라서 비전투시에는 국가 주요기반 시설의 감시경계 및 지원 임무를 수행하고, 전투시에는 대형 유인플랫폼이나 무인잠수정의 접근 불가능한 지역의 은폐 은닉 환경에서 적을 감시·정찰하는 임무를 고려할 수 있다. 또한 유인 플랫폼 접근이 용이하지 않은 해역에서의 조사·식별 임무, 특수재난지역의 정찰임무 등 인간의 접근 자체가 극히 위험한 해역과 적 해역에서의 해양정보수집, 특수작전지원 그리고 아군 전력의 거부해역에서의 기뢰탐색 임무에 활용할 수 있다.

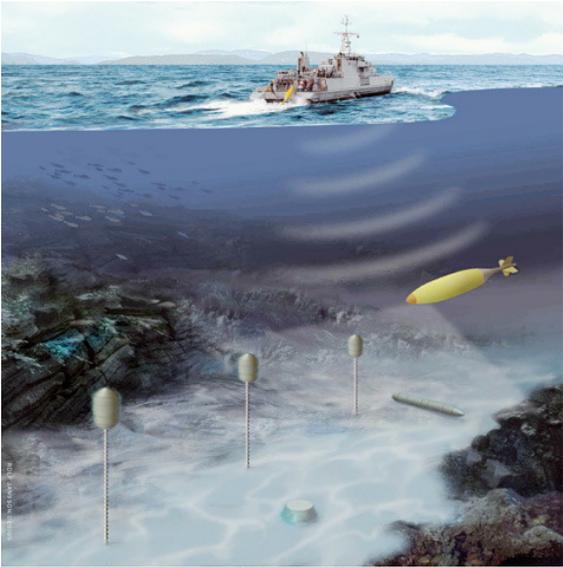


Fig. 4. Boston Engineering's GhostSwimmer and sea route patrol concept^[27]

조사 및 식별 임무는 군전력과 고부가치의 자산, 항로에 위협이 되는 폭발물의 탐지, 조사, 식별 및 제거를 위한 위치를 확인하는 임무이다. 이러한 임무를 수행하기 위해서는 수중선체와 부두 방파제 주변의 제한된 영역을 신속히 정찰하여 조사하여야 한다. 통상 수중 조사 및 식별 임무는 잠수요원에 의해 수행되는 것이 일반적이다. 특히 유인플랫폼의 접근 및 센서운용이 제한되거나 비효과적인 해역인 절벽, 산호초 해역이나 난파선 혹은 침몰선박이나 함정의 수색임무의 대부분은 수중다이버 요원으로 수행되고 있다. 하지만 잠수요원에 의한 임무수행에는 해수온도, 조류와 해류, 수심, 수중시정, 해상상태 등의 해양환경에 의해 작전수행에 많은 위험을 수반한다. 서해와 같이 수중시정이 불량한 해역에서의 임무는 가시거리의 제한으로 잠수요원들의 방향감각 상실 우려가 있고, 인도선의 얽힘 또는 선박과 부두 사이의 끼임 등 임무수행 중 인명 위험 요소가 많이 내재되어 있다. 이러한 잠수요원들의 안전 확보를 위해서는 임무시간 소모가 많아지고, 운용시간이 제한되는 잠수장비체계와 잠수장비도 잠수요원의 위험을 증가시키는 요소가 된다.

미국과 NATO 등의 선진국에서는 항구 연안에서의 대테러작전의 중요성이 인식되어 있고, 이들 해역에서의 적 요원에 의해 부설된 기뢰나 급조폭발물의 조사, 탐색에 소형의 자율무인잠정을 활용하여 기존의

함상전력 및 수중다이버들과의 협동작전으로 그 효과를 꾸준히 시험평가하고 있다. NATO와 미국 ONR이 2002년 이후 지속적 수행하고 있는 실험 프로그램은 소형 수중로봇 기술과 EOD 다이버 및 기뢰탐색함과의 협동작전으로 작전속도와 작전효율 뿐 아니라 작전안전에도 획기적으로 향상시키고 있음을 보고하고 있다.^[28] 이와 같이 유인 플랫폼 접근이 용이하지 않은 해역에 대한 정기적이고 장기적 감시 및 조사 식별 임무는 생체모방형 수중로봇이 잠수요원의 임무를 성공적으로 대체하거나 지원이 가능한 임무이다.



Fig. 5. Information operation concept in the enemy area

특수재난 해역에서의 정찰, 수색 및 조사 임무는 유조선 사고와 같이 원유유출로 인하여 병력이나 유인플랫폼의 접근이 어려운 지역의 수상 및 수중오염에 대한 조사 및 유출 원유 제거를 위한 해난구조 및 재해예방임무이다. 여기에는 작전 해역 내의 해양오염 측정 조사 및 감시, 원유 유출 감시, 수중오염도 측정 및 해저면 폐기물 조사 등의 임무를 포함할 수 있다. 특히 작전해역이 방사능이나 독성물질로 오염된 해역, 독성 폐기물 저장 탱크의 검사 등 인간의 접근이 어려운 해역의 오염도 측정 및 시설물 검사에 유용하다.

생체모방 수중로봇은 제한된 적 지역 내 아군 임무 수행 예정 해역의 오염도, 염도, 유속, CTD 등의 해양정보와 음향정보 수집에도 유용할 것으로 판단된다. 평시에는 적 해역의 해양환경 정보인 해저지형, 암초, 해류 및 조류분포 등의 해양정보수집을 은밀하게 수행할 수 있다. 전시에는 아군 함정을 적으로부터 안전한 거리로 이격시킨 상태에서 해안근처의 극천해 지

역에 대한 해양 및 수중 정찰 임무를 유무인 수중·수상·공중 플랫폼들과 다양한 수준에서 협동 임무를 수행할 수 있다(Fig. 5).

생체모방형 수중로봇은 작전해역의 오염 여부, 강조류 해역, 폭발물 설치 여부, 독성 혹은 위험 해양생물체 존재여부, 저시정 환경 등 수중침투요원의 임무 수행 전 수중환경을 평가함으로써 임무 수행가능 여부 판단에 유용하게 활용할 수 있다. 더욱이 방사능, 화학물질, 혹은 생물오염 지역에서의 임무수행에 있어서는 이러한 임무해역에서의 환경영향 사전 평가는 매우 중요하다. 또한 어망 등 수중작전 장애물의 사전정찰과 집중화된 적 전력지역에 침투하여 아군의 상륙작전 전력 혹은 특수전 요원에게 위치정보를 제공하거나, 위험작전 지역에서의 적 위협을 경보하는 역할을 수행할 수 있다. 아울러 수중작전요원의 임무를 보다 효율적이고 안전하게 수행할 수 있는 보조 수단으로 적 지역으로부터 원거리에서 은밀하고, 신속하게 이동시키거나(DPV : Diver Propulsion Vehicle), 침투경로를 안내하는 역할을 수행할 수 있다. 이는 수중협곡, 수중구조물, 수중동굴 등의 접근 곤란지역과 배관, 하수구, 파이프 내부 등의 수중의 제한적 지역에 유용하게 활용될 수 있다(Fig. 6). 또한 소형폭탄을 탑재한 휴대용 소형공격무기로서의 활용과 적 함정 등 목표물의 탐지, 식별, 추적에 위한 태깅 수단으로의 활용 등 보다 공세적인 활용방안을 고려할 수 있다.

상륙작전시 상륙군 및 상륙정의 해안진입 이전에 해안에 포설된 기뢰와 지뢰의 탐색 및 소해는 매우 중요하지만 어려운 작전이다. 이는 적이 소형, 저가의 기뢰를 항공기 등을 이용하여 다량으로 부설할 수 있고, 매물 혹은 해저에 부설된 기뢰는 소나에 의해 탐지가 매우 어려우며, 더욱이 전통적인 기뢰탐색함은 이러한 극천해역에서의 운용이 곤란하기 때문이다. 해변에서는 음향잡음으로 인한 소나탐색 신호가 방해받으며, 탁도와 버블들이 영상과 레이더 탐색을 방해한다. 이러한 극천해 영역에서의 기뢰탐색 및 소해작전은 현재로는 잠수요원만이 접근 가능한 해역이기 때문에 소형 수중로봇의 장점인 잠수요원의 위협을 감소시키면서, 신속한 진수와 제한된 지역에서의 탐색 능력들을 최대한 활용하면 보다 신속한 기뢰대항전 임무를 수행할 수 있다. 즉, 소형, 저가의 생체모방형 로봇을 다량으로 진수시켜 서로 협력하여 탐색 및 소해함으로써 인명위험의 부담 없이 기뢰에 보다 근접하여 효과적인 임무를 수행할 수 있다.



Fig. 6. DARPA's powerswim program^[29]

3.2 해양작전에서의 운용방안

해양작전과 같이 광대한 해역에서의 작전은 임무영역이 넓고 복잡하여 생체모방형 수중로봇과 같은 소형로봇은 제한된 탑재 센서 및 동력 등으로 임무수행 능력에 한계가 있다. 따라서 유인플랫폼과 상호 연동된 협동작전을 구사하거나 복수의 군집지능 로봇을 활용하는 것이 보다 효율적이고 안정적이다. 즉, 유인플랫폼과 연동하여 다수의 로봇이 동시에 임무를 수행함으로써 감시, 정찰 및 수색에 요구되는 임무 수행 시간을 단축시키고 환경변화나 로봇의 고장 등과 같은 내부의 변화가 존재하는 가변 상황에서도 임무 실패확률을 낮출 수 있으며, 동시에 넓은 지역에서의 보다 효율적으로 임무 수행이 가능해 진다^[30-32].

정교한 고성능 내장 센싱 시스템을 탑재한 고가의 수중로봇은 작전운용에의 보편적 사용을 저해할 수 있는 요소 중 하나이다. 따라서 임무 센서들을 간략화하고, 여러 대의 저가의 수중로봇으로 분산하여 임무수행하는 것이 보다 현실적인 운용방안이 될 수 있다. 이는 프랑스의 SMX-22 소형잠수함 운용개념을 수중로봇 편대군에 원용하여 적용하는 방법이다(Fig. 7). 물고기 로봇과 같은 소형로봇 이동모함으로 보다 대형의 무인잠수정 혹은 무인수상정을 중간 모선으로 활용하여 이들 플랫폼들을 외부 혹은 내부에 탑재하여 임무해역으로 은밀 수송한 후 진수시켜 임무를 수행하는 모선-자선 수중로봇 시스템(mother-son underwater robot system)을 제안할 수 있다. 중간 모선은 수대~수십 대의 저가형 생체모방 수중로봇을 탑재하여 임무 지역으로 수송하며, 소형 수중로봇의 통신중계 플랫폼, 전력공급 기지, 정보 전달 및 재임무 부여 등의 역할을 수행한다. 중간모선은 임무 수행을 위해 필요 시까지 해저 혹은 특정 심도에서 대기하면서 수상 모

함 혹은 육상 모기지와의 통신을 유지하면서, 자체 진수시킨 개별 수중로봇들과의 통신을 유지함으로써 탐지된 정보를 취합하여 송신하며, 임무 명령을 수신하여 수중로봇들에 재송신 한다. 또한 중간모선은 주기적 수상으로 부양하여 GPS 위치정보를 수신 보정함으로써 수중의 개별 수중로봇들에게 정확한 위치 신호를 제공하며, 임무 수행 개별 수중로봇들의 상태를 중간 점검한다.

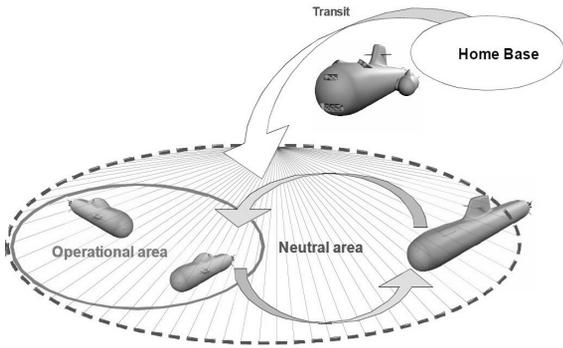


Fig. 7. SMX-22 mini submarine operation concept^[33]

임무해역에 진수된 개별 원격센서 수중로봇들은 동시에 다수의 임무 해역에 분산하여 필요한 정보를 수집한다. 개별 임무 로봇들은 구조를 간단화시켜 저가의 로봇으로 제작하여, 중간모선과의 협력 및 자선로봇간의 군집 임무 수행으로 임무완성도를 제고할 수 있다. 중간 모선 수중로봇에는 항법 및 통신기능과 동력원을 탑재하여 신속한 유영과 장거리, 장시간 운용 능력 보유케 하는 반면, 자선 임무로봇은 링크 하나로 해결할 수 있을 만큼 유영모드를 단순화 하고, 저속유영하면서 임무특성에 알맞은 센서모듈을 탑재하여 군집임무를 수행한다. 따라서 수대의 임무 로봇의 활용으로 동시에 넓은 지역에서의 보다 효율적 임무 수행이 가능해진다. 개별 임무 로봇들은 임무 완수 후에는 전개 위치와 임무의 민감성에 따라 회수 혹은 자폭하는 개념으로 운용한다^[33-36].

4. 핵심 소요 기술

생체모방 수중로봇의 개발과 관련된 기술들은 크게 바이오센싱기술, 생체저동 및 제어기술, 생체신경 및 지능기술 및 다중정보전달기술 등으로 구분할 수 있

다^[37]. 이들 기술요소 중 전술한 운용개념과 같이 소형의 생체모방형 수중로봇의 효과적인 운용을 위해서는 다수의 수중로봇을 사용하는 군집운용을 위한 수중통신 기술과 수중체류시간 확보를 위한 수중동력원기술이 필수적이다. 또한 생체모방 수중로봇에 탑재될 센서 및 프로세서의 크기와 중량이 제한되므로 임무수행과 자율유영에 필요한 정보를 획득할 수 있는 항법센서, 위치인식 센서 장애물 탐지센서, 임무센서 등이 초소형화와 고도화가 요구된다. 아울러 임무수행에 적절한 거동을 공학적으로 구현하기 위해서는 추진메커니즘 단순화를 위한 인공근육기술이 요구된다.

군집운용은 로봇들이 협력하고 자원을 공유하면서 주어진 임무를 세부적으로 분담하여 동시에 수행함으로써 보다 효율적이고 신뢰성 있게 신속한 임무수행을 가능하게 한다. 집단 생활하는 생물개체들의 집단지능 알고리즘을 응용하는 연구들의 대표적인 예로서 개미집단최적화(ACO : Ant Colony Optimization)와 물고기 및 새들의 행동양식을 모방한 개체군집최적화(PSO : Particle Swarm Optimization) 등의 알고리즘이 연구되고 있다. ACO 알고리즘은 개미집단의 생물학적 특성을 모델링하여 각각의 개미가 남긴 페르몬 정보를 통해 최적화된 경로를 탐색하는 기법이다. 하지만 ACO 기법은 그래프 탐색기법이기에 해양에서 운용되는 수중로봇들 간의 무수히 많은 노드와 간선으로 구성된 그래프로 인하여 효과적인 군집제어에 활용하기에는 한계가 있다^[38,39]. 수중로봇의 군집제어에 적용 가능한 개체군집 최적화 알고리즘은 군집 물고기와 같이 생체영감기반의 사회적 행동양식에 기반을 둔 알고리즘으로 각각의 particle들이 자신과 이웃 간의 간격 유지 경험에 의해 최적위치로 이동하면서 최적의 위치정보를 기억하는 방식이다^[40,41]. 군집제어기술은 단순대형유지 또는 leader-follower간의 소규모 개체제어가 현재 수준이나 향후 동적 환경적응형 군집제어로 발전될 것으로 보인다.

수중로봇의 에너지원은 임무시간과 작전반경 등의 임무 요구사항에 의해 결정되는 핵심 설계제한 사항 중의 하나이다. 생체모방 수중로봇과 같이 제한된 공간과 크기에 내장할 수 있는 동력원의 한계를 극복하기 위해서는 고밀도의 에너지원 기술과 동력공급을 위한 수중, 혹은 수상에서의 유무선 동력공급기술이 요구된다. 현재 가용할 수 있는 에너지 기술 중 리튬기반의 배터리는 상대적으로 작은 셀로 포장될 수 있어 수중로봇의 선체 형상에 그 형태를 용이하게 적용

할 수 있으며, 저장 에너지당 가장 크기가 작고 경량으로 생체모방형 수중로봇과 같은 소형 수중로봇에 적합하다. 하지만 현재의 배터리 기술은 낮은 에너지 밀도로 인하여 수중로봇의 운용시간을 제한한다. 이에 화석연료와 같은 고밀도 열원을 사용한 스틸링 엔진을 수중로봇에 적용하고자 하는 연구가 진행된 바 있다.^[42] 이외에도 조류로부터 에너지를 수확하는 기술 등 자연적으로 사라지는 에너지를 취하는 에너지 수확기술도 생체모방 수중로봇에 적합한 에너지원 기술이다. 예로, 탄소나노튜브 구동기가 해수에서 저주파로 작동하여 해양의 기계적 에너지를 전기적 에너지로 변환시킬 수 있어 물고기형 수중로봇의 지느러미 근육에 유용하게 사용될 수 있다^[43]. Fig. 8은 Virginia 공대에서 개발한 해파리 모양의 Robojelly로 바닷물의 산소와 수소의 화학반응에 의한 에너지로 로봇을 작동하는 에너지 수확기술을 보여준다. 로봇젤리의 몸체는 형상기억합금으로 되어 있어 해파리와 같이 몸체의 수축 팽창과정을 통해 유평하는 방식을 모방하고 있다^[18,44]. 이와 같은 에너지 하베스트기술은 경량·저전력 소자를 활용한 기술로 발전될 것으로 판단된다.

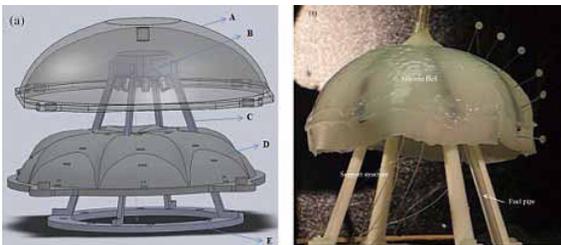


Fig. 8. Virginia Tech's robojelly^[41]

현재의 생체모방형 수중로봇은 정상상태 유체력 메커니즘에 기반을 둔 플랫폼을 연구 개발해 왔지만 순간기동성과 저속기동성을 구현하기 위해서는 고양력을 생성할 수 있는 비정상 유체력 생성 메커니즘의 연구개발이 요구된다. 이러한 메커니즘의 공학적 플랫폼으로의 구현은 제어구동을 위한 인공근육과 신경과학기반의 공학적 모사가 요구된다. 생체모방형 수중로봇의 구현은 아직은 수중생물의 유체역학적 제어면의 이용 정도에 머물러 있는 수준으로 수중생물의 제어면 자유도와 비교하면 그 성능은 대단히 제한적이다. 하지만 적절한 인공근육과 신경과학기반의 제어면의 개발은 향후 상당한 기술적 도약이 있을 것으로 판단된다.

수중생물체 근육의 요구능력을 모방할 수 있는 인공근육의 개발은 생물체 모방 수중로봇의 안정성과 강한 생물체모방 수중로봇 개발의 주요 요구 기술 중의 하나이다. 인공근육의 사용은 종래의 모터-피스톤 기반의 구동기에 비해 보다 소형 경량의 수중로봇제작이 가능해진다. 인공근육 구동에 사용되는 신소재 구동기로는 형상기억합금(SMA : Shape Memory Alloys), 전자구동폴리머(EAP : Electroactive Polymer)와 압전구동(PZT : Lead Zirconate & Titanate) 등이 있다. Table 1에 특성을 비교하여 보인 바와 같이 여기전압과 구동주파수 등의 구동특성에 따라 구동방식에 적합한 생물체 모방 로봇을 적용할 수 있다. 즉, 여기전압 측면에서 보면, PZT는 높은 구동요구전압이 요구되기 때문에 소형 수중로봇 단독 시스템으로의 적용은 적합하지 못하다. 반면에 SMA와 IMPC는 구동요구 전압이 비교적 낮아 소형수중로봇에 적합하다. 구동주파수 측면에서는 SMA와 같이 비교적 낮은 주파수로 작동되는 소재는 진동형 구동(oscillatory actuation) 보다는 파동형 구동(undulatory actuation)에 적합하며, IMPC와 PZT는 진동형 구동과 파동형 구동 모두 활용 가능하다. 아울러 SMA와 IMPC의 구동특성은 외부온도와 습도에의 영향이 커서 오히려 수중에서의 작동에 큰 이점이 있다.

Table 1. Comparison of artificial muscle materials^[45]

구분	SMA	IPMC	PZT
여기 전압	Low (> 2 V)	Low (> 1 V)	High (> 100 V)
변형율	Medium (> 5 %)	Large (> 40 %)	Small (0.2 %)
응력	Large (> 200 MPa)	low (0.3 MPa)	Large (110 MPa)
구동 주파수	Slow (~1 Hz)	Fast (< 1000 Hz)	Very fast (~10,000 Hz)
적용	Undulatory Actuator	Undulatory, Oscillatory Actuator	단독시스템 부적합

일본의 EAMEX에서 개발된 polypyrrole 구동기는 불과 1~2 V의 낮은 전압의 전기적 자극으로 큰 응력 및 변형율을 발생하며, 재질도 부드러운 생물체의 근

육과 유사하다(Fig. 9). 이와 같은 생체거동기술은 현재는 초소형 모터기반의 구동메커니즘을 구현하는 수준이지만 최근 연구개발이 활발히 진행되고 있는 IPMC 등 새로운 폴리머 중합체의 개발은 Ionic EAP의 단점들을 보완해 나가며, 초소형 모터 및 인공근육 하이브리드 또는 인공근육기반의 구동 메커니즘으로 발전되어 아갈 것이다. 아울러 아직은 더디지만 신경과 학기반 제어 기술의 세그먼트 제작이 진전된다면 인공근육 기술 능력은 실현될 수 있을 것이다^[45-48].

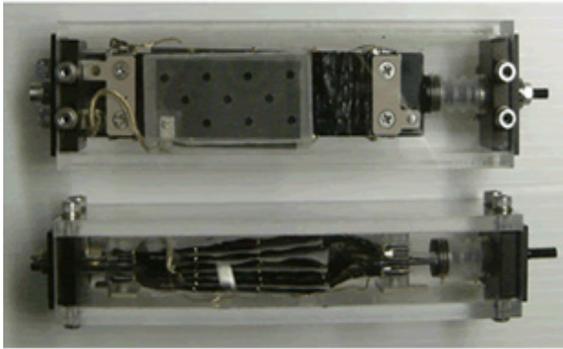


Fig. 9. EAMEX's Polypyrrole artificial muscle cell^[45]

수중로봇의 임무수행 능력은 대부분 탑재 센서의 효율적인 사용에 달려있다. 특히 생체모방형 수중로봇과 같은 소형 수중로봇에는 센서 성능의 저하 없이 저가의 소형으로 강건하면서 에너지 소모가 적은 수중센서가 요구된다. 수중로봇의 탑재센서는 음향기반 센서와 비음향기반 센서 및 영상기반 센서로 구분할 수 있다. 음향기반 센서의 대표적인 센서는 소나(Sonar)로서, 통상적인 생체모방형 수중로봇의 크기와 유연능력을 감안하면 저전력, 저중량의 소나를 선수부에 장착하여 능동소나로 경로안내 및 장애물회피, 타도가 높은 환경에서의 목표물 탐지 등에 활용할 수 있으나 자신의 위치가 노출되는 단점이 있다. 수동소나는 대잠전 등 정찰 모드에서 적의 음향신호를 수신하여 목표물을 탐지하는 방식으로 감시 수중로봇의 은밀성을 유지하는 중요한 능력이다. 음향탐지 능력은 수동소나 배열의 크기에 좌우되므로 현재는 수동소나를 소형 수중로봇에 적용하는 것은 현실성이 떨어진다. 하지만 소형 수중로봇에도 탑재 가능한 10 cm 이하의 극소형 음향센서인 벡터소나가 개발되고 있다. 벡터형 음향센서는 통상 2개 이상의 속도 하이드로폰과 압력 하이드로폰을 함께 사용하기 때문에 4채널의 벡터음향센

서는 스칼라 음향센서에 비하여 크기도 작을 뿐 아니라 적은 수의 센서로 보다 좁은 빔폭을 생성이 가능하다(Fig. 10). 최근 보다 소형의 콤팩트한 벡터음향센서가 개발되어 수중센서에 적용되고 있어 생체모방형 수중로봇과 같은 경량 플랫폼에 적용할 수 있을 것으로 생각된다. 이외에 광빔을 사용하여 음향펄스를 생성하는 광섬유기반 음향센서도 최근 활발히 연구되고 있는 분야로 소형 수중로봇들의 군집운동을 위한 다중통신에 매우 유용할 것으로 생각된다. 최근에 활발하게 연구 개발되고 있는 수중폭발물 탐지를 위한 탄소기반의 전압전류센서는 대테러작전에 유용할 것이다^[49,50].

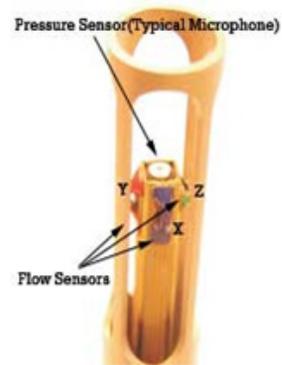


Fig. 10. Vector hydrophone sensor^[50]

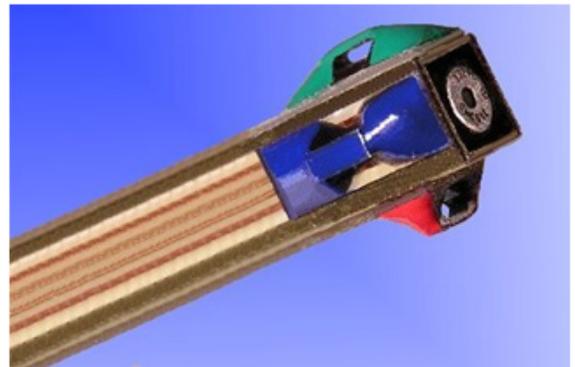


Fig. 11. MEMs based underwater robot sensor^[51]

생체특성 기반의 생체인식 및 지능판단 원리를 적용한 새로운 개념의 생체모방형 인식기술은 현재의 음향기반 센서 시스템을 대체하거나 성능을 증강할 수 있는 강력한 도구이다. 초소형, 초경량, 고감도 능동형 저음파 센서인 MEMs 유도센서는 몇몇 어류의 항법에 사용되고 있는 표면 신경 센서를 기반으로 개

발되고 있다(Fig. 11). 이는 물고기의 상생체를 이용한 명암 인식과 물고기의 옆줄을 통한 떨림 감지방식과 같이 자신의 위치, 물체와의 거리, 다른 물고기의 접근 등을 감지하는 방식이다. 이러한 기술들은 1 nV/m 급의 수중전기장센서, 10 nT급의 자기장 탐지센서 등의 첨단센서의 개발과 함께 소형수중로봇의 탐지센서와 프로세서의 크기와 중량의 제한을 크게 완화시켜 줄 수 있는 유망한 기술들이다^[51-53]. 현재의 초소형 센싱 기술은 수동형의 단순 접촉 혹은 비접촉 감지 수준이나, 향후 능동형 다중 접촉 및 비접촉 물리량을 감지할 수 있는 수준으로 발전시켜 나갈 것이다.

5. 결 론

본 논문은 생체모방형 수중로봇을 아 해군의 유인 플랫폼의 접근이 거부된 연안 해역에서 원격센서로 은밀하게 작전반경을 확장시키는 유용한 수단으로 해양 작전에 활용할 수 있는 운용개념들과 이를 구현하기 위한 핵심 기술들을 제시하였다. 생체모방 수중로봇은 대부분 1 m 내외의 소형급 수중로봇으로 해양작전 임무 수행에 요구되는 항속시간과 탐지능력이 현재의 기술수준으로는 매우 제한적이다. 따라서 기술적 한계를 극복할 수 있는 기술의 개발과 소형급의 수중로봇 운용에 적합한 운용개념 개발이 병행되어야 한다.

생체모방 수중로봇의 해양작전에서의 적용은 가까운 미래에는 어려울 것이라는 것이 보편적인 판단이며 적어도 향후 20~30년이 더 소요될 것으로 예측된다. 이는 기술적 난제들을 해결해 나가는데 많은 시간과 노력이 필요함과 더불어 많은 연구개발에도 불구하고 수중로봇의 군사적 활용에 대한 아직 충분하지 않은 확신으로 인한 심리적 거부감을 극복하는 것도 중요한 과제이다. 따라서 생체모방 수중로봇이 갖는 상당한 특징점들을 지속적인 연구개발을 통하여 해양작전에서의 효용성을 입증하고, 동시에 임무수행에 필요한 센서 페이로드의 탑재, 체류시간의 증대 및 운용 안정성 등 임무성능 향상을 위한 노력이 필요하다.

후 기

본 논문은 해사 해양연구소의 지원을 받아 게재되었습니다.

References

- [1] ROK Joint Chiefs of Staff, Joint Unmanned Operations, 2008.
- [2] Lee, K., and Joo, S., "Roles of UUVs in the Korean Peninsula Anti-Submarine Warfare Environments," Naval Strategy of Joint Forces Military University, Vol. 154, pp. 78-103, 2012.
- [3] Moon, K., Kim, I., Lee, Y., Lee, S., Lee K., and Yoon, K., Defense Unmanned Robot Technology, DAPA/ADD, 2013.
- [4] Kim, Y., and Kim, J., "Trend of Maritime Unmanned Combat System Development," Defense Science and Technology Plus, Vol. 150, May 1, 2012.
- [5] Kho, H., Hong, H., Park, Y., and Kim, Y., Foreseeable Future Weapons, Defense Agency for Technology and Quality, 2011.
- [6] Fish, F. F. and Lauder, G. V., "Passive and Active Flow Control by Swimming Fishes and Mammals," Annu. Rev. Fluid Mech. Vol. 38, pp. 193-224, 2006.
- [7] Triantafyllou, M. S., Triantafyllou, G. S. & Yue, D. K. P., "Hydrodynamics of Fishlike Swimming," Annu. Rev., Fluid Mech, Vol. 32, p. 3553, 2000.
- [8] Barrett, D., Grosenbaugh, M., and Triantafyllou, M., "The Optimal Control of a Flexible Hull Robotic Undersea Vehicle Propelled by an Oscillating Foil," Proc. IEEE AUV Symp., p. 109, 1996.
- [9] Lindsey, C. C., "Form, Function and Locomotory Habits in Fish," in Fish Physiology, Vol. VII Locomotion, Academic, New York, pp. 1-100, 1978.
- [10] Sitorus, P. E., Nazaruddin, Y. Y., Leksono, E. and Budiyo, A., "Design and Implementation of Paired Pectoral Fin locomotion of Labriform Fish Applied to a Fish Robot," J. of Bionic Engineering, Vol. 6, No. 1, pp. 37-45, 2009.
- [11] Toda, Y., Danno, M., Sasajama, M., and Miki, S., "Model Experiments on the Squid-like Underwater Vehicle with Two Undulating Side Fins," The 4th International Symposium on Aero Aqua Bio-mechanisms, China, 2009.

- [12] Wang, W., Yu, J., Ding, R., and Tan, M., "Bio-inspired Design and Realization of a Novel Multimode Amphibious Robot," IEEE international Conference on Automation and Logistics, pp. 140-145, 2009.
- [13] Yu, J., Su, Z., Wang, M., Tan, M., and Zhang, J., "Control of Yaw and Pitch Maneuvers of a Multilink Dolphin Robot," IEEE Transactions on Robotics, Vol. 28, No. 2, pp. 318-329, 2012.
- [14] Singer, P. W., *Wired for War*, Penguin Press Inc, USA, 2009.
- [15] Witting, J. H., Ayers, J., and Safak, K., "Development of a Biomimetic Underwater Ambulatory Robot: Advantages of Matching Biomimetic Control Architecture with Biomimetic Actuators," Proc., of SPIE Vol. 4196, 2000.
- [16] Licht, S., Polodora, V., Flores, M., Hover, F. S., and Triantafyllou, M. S., "Design and Projected Performance of Flapping Foil AUV," IEEE Journal of Engineering, Vol. 39, 2004.
- [17] Liu, J., "Modelling and Online Optimization of Robotic Fish Behaviors," Ph.D. Thesis, University of Essex, 2007.
- [18] Hu, H., "Biologically Inspired Design of Autonomous Robotic Fish at Essex," Proc. IEEE SMC UK-RI, 2006.
- [19] Hirata, K., "A Semi Free Piston Stirling Engine for a Fish Robot," Proc. of 10th Intl' Stirling Engine Conference, 2001.
- [20] Liang, J., Wang, T., Wang, S., Zou, D., Sun, J., "Experiment of Robot Fish Aided Underwater Archeology," Proc. of International Conference on Robotics and Biomimetics, 2005.
- [21] Liang, J., Wang, T., Wang, S., Zou, D., and Sun, J., "Experiment of Robofish Aided Underwater Archaeology," Proc. of IEEE ROBIO 2005, 2005.
- [22] Liang, J., Wang, T., Zou, D., Wang, S., and Wang, Y., "Trial Voyage of SPC-II Fish Robot," Transaction of Beijing University, Vol. 31, No. 7, pp. 709-713, 2005.
- [23] Weng, J. et al, "Research on Robot Learning and Development in China," Proc. International Conference on Development and Learning, 2006.
- [24] Wang, T., Wen, L., Liang, J. Wu, G., "Fuzzy Vorticity Control of Biomimetic Robotic Fish Using Flapping Lunate Tail," J. Bionic Engineering, 2010.
- [25] Chung, C., Lee, S., Cha, Y., Kim, K., and Ryuh, Y., "Mechanical Design of Biomimetic Fish Robot," Proc. of Korean Society of Precision Engineering and Manufacturing, pp. 611-612, 2009.
- [26] Jun, B., Lee, P., Kim, B., and Shin, H., "Development of Seabed Walking Robot CR200 and It's Application Strategy in the Underwater Exploration," Proc. of RAOSTAS, pp. 1738-1742, 2013.
- [27] Atherton, E., "Autonomous Fish; Swarms, Surveillance, and Swimming," Boston Engineering, TS1166-ROBO, 2009.
- [28] Vagancy, J., Gurfinkel, L., Jankins, K., Wagner, T., and Summit, S., "HAUV System Performance Enhancement for Use by EOD Units," 8th Intl' Symposium on Technology and Mine Problem, NPGS, 2008.
- [29] Beard, J., "DARPA's Bio-revolution," Biologybiomedical_service(online), 2008.
- [30] Shao, J., Wang, L., and Yu, J., "Development of an Artificial Fish-like Robot and Its Application in Cooperative Transportation," Control Engineering Practice, Vol. 16, pp. 569-584, 2008. et al, 2007.
- [31] Budiyo, A., "Advances in Unmanned Underwater Vehicles Technologies: Modeling, Control and Guidance Perspectives," Indian Journal of Marine Science, Vol. 38, No. 3, pp. 282-295, 2009.
- [32] Curcio, J., Leonardo, J., Vaganay, J., Patrikalakis, A., Bahr, A., Battle, D, Schmidt, H., & Grund, M., "Experiments in Moving Baseline Navigation Using Autonomous Surface Craft," OCEANS, 2005, Proc. of MTS/IEEE, Vol. 1, pp. 730-735, 2005.
- [33] Scott, R., "New Coastal Submarine Concepts Get Ready to Break the Surface," Jane's Intl' Defence Review, May, 2008.
- [34] Rui, G., and Chitre, M., "Cooperative Positioning using Range-Only Measurements Between Two AUVs," Oceans 2010 IEEE, Sydney, 2010.
- [35] Koay, T. B., Tan, Y. Y., Eng, Y. H., Gao, R., Chitre, M., Chew, J. L., Chandhavarkar, N., Khan,

- R. R., Taher, T., & Koh, J., "STARFIS- A Small Team of Autonomous Robot Fish," *Indian Journal of Geo-Marine Sciences*, Vol. 40, No. 2, pp. 157-167, 2011.
- [36] Chitre, M., "Teamwork among AUVs," *AUV Sensors & Subsystem Workshop*, Hawaii, 2010.
- [37] Kim, C., Kang, S., Hur, G., Kim, J., Jeon, M., and Yang, W., "The Course of Technology Development of Biomimetic Autonomous Robots," *ADDR-115-110490*, 2011.
- [38] Aghababa, M. P., Amrollanhi, 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.
- [39] 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.
- [40] Ayers, J., Witting, J., "Biomimetic Approaches to the Control of Underwater Walking Machines," *Phil. Trans., R. Soc., A*, Vol. 365, pp. 273-295, 2007.
- [41] Dias, M., Zlot, R., Kalra, N., & Stentz, A., "Market-based Multirobot Coordination: A Survey and Analysis," *Proceedings of the IEEE*, Vol. 94, No. 7, pp. 1257-1270, 2006. et al, 2006.
- [42] Hirata, K., "A semi Free Piston Stirling Engine for a Fish Robot," *Proc. of 10th Intl' Stirling Engine Conference*, 2001.
- [43] Taylor, G., Burns, J., Kammann, S., Powers, W., and Welsh, T., "The Energy Harvesting Eel: A Small Subsurface Ocean/River Power Generator," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 26, No. 4, pp. 539-547, 2001.
- [44] Tadesse, Y., Vilanueva, A., Hainess, C., Novitski, D., Baughman, R., and Priya, S., "Hydrogen-Fuel Powered Bell Segments of Biomimetic Jellyfish," *Smart Materials and Structures*, Vol. 21, pp. 1-17, 2012.
- [45] Chu, W., Lee, K., Song, S., Han, M., Lee, J., Kim, H., Kim, M., Park, Y., Cho, K., and Ahn, S., "Review of Biomimetic Underwater Robots Using Smart Actuators," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 13, No. 7, pp. 1281-1292, 2012.
- [46] Bandyopadhyay, P. R., "Trends in Biorobotic Autonomous Undersea Vehicles," *IEEE J., Oceanic Engineering*, Vol. 30, pp. 109-139, 2005.
- [47] Wang, Z., Hang, G., Li, J., Wang, J., & Xiao, K., "A micro-Robot Fish with Embedded SMA Wire Actuated Flexible Biomimetic Fin," *Sensors and Actuators A*, Vol. 144, pp. 354-360, 2008.
- [48] Guo, S., Fukuda, T. & Asaka, K., "A New Type of Fish-like Underwater Microrobot," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 8, pp. 136-141, 2003.
- [49] Aravamudhan, S. and Bhansali, S., "Reinforced Piezoelectric Pressure Sensor for Ocean Depth Measurements," *Sensors and Actuators A*, Vol. 142, pp. 111-117, 2008.
- [50] Ito, M., Okada, N., Takabe, M., Otonari, M., Akai, D., Sawada, K., and Ishida, M., "High Sensitivity Ultrasonic Sensor for Hydrophone Applications Using an Epitaxial Pb(Zr, Ti)O₃ Film Grown on SrRuO₃/Pt/γ-Al₂O₃/Si," *Sensor and Actuators A*, Vol. 145, pp. 278-282, 2008.
- [51] Zhou, Z., and Liu, Z., "Biomimetic Cilia Based on MEMS Technology," *Journal of Bionic Engineering*, Vol. 5, pp. 358-365, 2008.
- [52] Johnson, E. A. C., Bonser, R. H. C., and Jeronimidis, G., "Recent Advances in Biomimetic Sensing Technologies," *Phil. Trans., R. Soc., A*, Vol. 367, pp. 1559-1569, 2009.
- [53] Van Barr, J. J., Wiegierink, R. J., Iammerink, T. S. J., Krijnen, G. J. M., and Elwenspoek, M., "Micromachined Structures for Thermal Measurements of Fluid and Flow Parameters," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 11, pp. 311-318, 2001.