수중무인잠수정의 자율운항기술 소개

정 완 균 | 포항공과대학교 기계공학과, 교수 | e-mail : wkchung@postech.ac.kr

이 글에서는 수중무인잠수정(Unmanned Underwater Vehicle)을 위한 무인화기술로서 현재 국방무인화기술 특화센터를 통해 개발되고 있는 자율운항기술을 소개하고자 한다.

일반적으로 UUV가 미지의 3차원 수중 공간에서 주어진 임무를 수행하기 위해서는 임무에 대한 계획 및 집행, 작업 공간의 환경 정보를 이용한 장애물 회피와 같은 지역 경로 계획, 획득 정보 및 임무의 송수신, 안전한 진수 및 귀환 등의 일련의 과정이 스스로 이루어져야 한다. 이를 위해 필요한 세부 기술로는 자율제어(Autonomy) 기술, 에너지(Energy) 기술, 센서 및 센서 데이터 처리(Sensors and sensor processing) 기술, 통신 및 네트워킹(Communication and Networking) 기술, 항법(Navigation) 기술 등으로 분류될 수 있다. 그러나 현 기술의 보유 수준으로는 UUV가 다양한 임무를 독자적으로 수행하기는 무리가 있는 수준이며, 따라서 선진 각 국에서는 활용하고자 하는 목적 및 임무에 맞게 다양한 크기 및 형태의 UUV 및 관련 기술 개발을 진행하고 있다.

국내에서도 한국해양연구소에서 개발된 이심이, 대우조선해양의 옥포 6000 등 다양한 UUV 플랫폼을 개발하였으며, 다수의 산/학/연 기관에서 자율제어 기술, 센서 기술, 통신 기술, 항법 기술을 중심으로 UUV 관련 연구가 진행되고 있다. 특히 국방무인화기술 특화센터 자율운항기술 연구실에서는 UUV에 필요한 기반 기술에 대한 연구를 진행하고 있으며, 어뢰 형상의 UUV의 진수/회수를 위한 도킹 기술(참여기관: 포항지능로봇연구소, 서울과학기술대학교), 3차원 경로 계획 및 실시간 수중 회피 제어 기술(해군사관학교, 제주대학교), 학습기반 자율운항 제어 기술(POSTECH, 고려대학교) 등 운용에 관련된 기술과, 장애물 회피용 고분해능 능동 소나 신호처리 기술(KAIST, 서울대학교), 해저 포설/매설 기뢰 탐지 기술(POSTECH, 연세대학교) 등 센서와 관련된 기술 등에 대한 연구를 진행하고 있다. 본고에서는 현재 국방무인화기술 특화센터 자율운항기술 연구실의 개발 과제를 중심으로 수중 로봇의 무인화기술에 대해 소개하고자 한다.

UUV 진수/회수를 위한 도킹 기술

UUV를 이용하면 잠수함의 작전 거리를 크게 확대할 수 있고, 안전하게 수중 정찰 작업을 할 수 있다는 장점으로 인해 해군의 많은 주목을 받고 있다. 이러한 UUV 임무 수행 능력을 극대화하기 위해서는 완전히 회수되지 않고 수중에서 에너지를 공급받거나 임무 중 수집한 정보를 전달하고 새로운 임무를 부여받는 등의 데이터 교환이 가능해야 한다. 이를 위해서 UUV는 모함/모선으로 접근하여 도킹과 같은 방법을 통해 필요한 에너지 및 정보를 공급받거나 완전 회수될 수 있어야 하며, 이때 각각의 크기와 주 임무 목적에 맞게 모함/모선으로부터 다양한 방식으로 진수/회수될 수 있어야 한다. 이 중 국방무인화기술 특화센터 자율운항연구실에서는 기존의 잠수함 어뢰 발사관에서의 발진 및 회수를 위한 기술 개발을 진행하고 있다.

UUV가 잠수함에서 운용되기 위해서는 발진 시 운동하고 있는 모함과의 상호 작용에 의한 영향을 극복하고 모함에서 안전하게 벗어나 임무를 수행할 수 있어야 하며, 회수 시에도 모함의 유동 영역 안으로 유도되

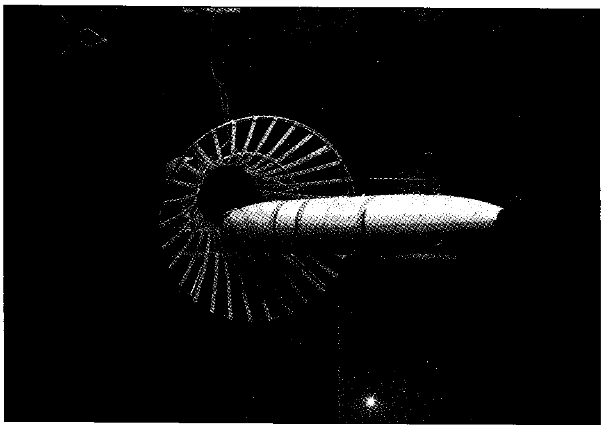

그림 1 도킹 콘을 이용한 UUV 도킹(MBARI 자료)

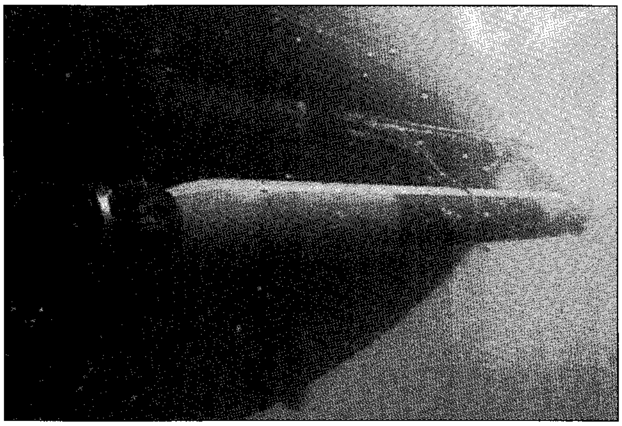

그림 2 로봇 팔을 이용한 UUV의 회수(Boeing 자료)

어 안전하게 선체 내로 회수 될 수 있는 기술의 개발이 선행되어야 한다. 이를 위해 필요한 요소 기술로는 크게 진수/회수를 위한 도킹 구조물 및 도킹 기법, 유도 제어 기술(원거리/근거리)로 나눌 수 있다.

현재까지 개발된 UUV 도킹 방식 중 잠수함 어뢰발사관으로 회수하는 방법과 가장 유사한 것은 해저에 설치된 커다란 깔때기 모양의 도킹 콘(docking cone)에 UUV가 들어가는 방식이다(그림 1). 어뢰 형상의 UUV는 제자리에서 정지 상태를 유지하는 스테이션 키핑(station-keeping)이나 수평 이동(sway) 제어가 안 되므로, 도킹 콘을 크게 만들어 UUV의 위치 제어 오차에 상관없이 도킹할 수 있도록 하고 있다. 그러나 이러한 커다란 도킹 콘은 잠수함 어뢰 발사관 앞에 설치할 수가 없으므로, 미국 Boeing 사에서는 잠수함에 약 18m 길이의 로봇 팔을 이용해 UUV를 어뢰 발사관에 회수하는 방식을 개발하였다(그림 2). 이 방식은 잠수함에 커다란 로봇 팔을 붙여야 하고, 로봇 팔 때문에 한 개의 발사관을 사용할 수 없다는 단점이 있으나 현재까지 나온 방법 중 유일하게 잠수함에 직접 적용된 방법이다.

UUV의 회수를 위한 유도 제어는 크게 두 단계로 나눌 수 있다. 첫 번째는 원거리에 있는 UUV를 잠수함 근처까지 유도하는 원거리 유도 제어 기술이고, 두 번째는 잠수함 근처로 유도된 UUV를 안전하게 도킹시키기 위한 근거리 유도 제어 기술이다. 원거리 유도에는 음파 발진기와 같은 단순 방향 신호로 UUV를 유도하거나, USBL(Ultra Short Base Line)과 같은 APS (Acoustic Positioning System)를 사용하여 계산된 상대 위치를 바탕으로 잠수함에 최종 접근하기 위한 자세 및 위치를 계산하고 계산된 위치로 UUV를 유도 제어하고 있다. 반면, 근거리 유도 제어는 광학 카메라, 레이저, 자계 센서등의 근거리용 정밀 센서를 사용하여 UUV를 안전하게 도킹 콘이나 잠수정에 도킹할 수 있도록 하는 기술이다. 정밀 유도 제어에 주로 사용하는 레이저와 광학 카메라는 두 센서를 서로 일직선으로 맞춘 후 사용해야 한다는 단점이 있으므로, 자계 센서 등을 추가하여 두 센서의 상대 각도를 넓힐 수 있도록 한다. 두 단계 모두 빠른 신호 처리 기술을 바탕으로 한 정확한 위치 및 자세 추정 알고리즘이 필요하며, 상대 위치 변화에 따라 강인하게 유도/도킹할 수 있는 실시간 제어 시스템이 필요하다. 또한 근접하여 도킹을 하는 시점에서 두 시스템과 유체에 의한 동역학적 특성을 파악하여 충돌이 발생하지 않도록 해야 하며, 느리게 접근하는 과정에서도 정밀한 위치 제어가 가능해야 한다.

3차원 경로계획 및 실시간 수중 회피 제어 기술

UUV가 3차원의 알려지지 않은 공간에서 주어진 항해임무를 성공적으로 수행하기 위해서는 경로계획(guidance), 무인잠수정의 정확한 위치계산(navigation), 그리고 계획된 경로를 정확히 추적할 수 있는 경로제어(tracking control)가 이루어져야 한다.

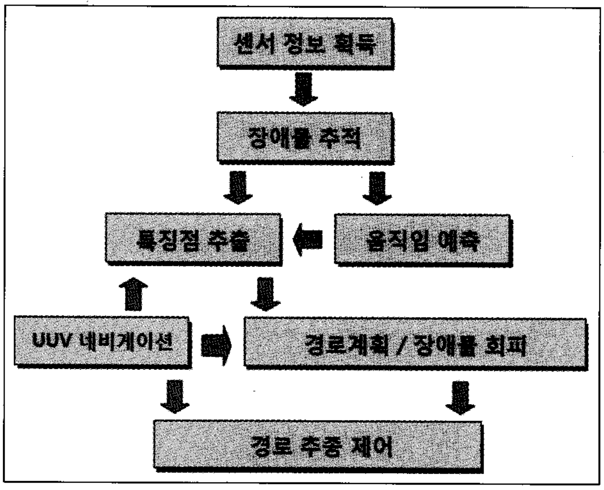

그림 3 수중무인잠수정의 경로계획 과정 도식도

이 중 경로계획은 무인잠수정이 운항하는 주변 환경 특히 장애물에 대한 정보와, 잠수정 자신에 대한 정보를 바탕으로 이루어진다. 주변 환경에 대한 인식은 대개 무인잠수정 전방의 FLS(Forward Looking Sonar)에 의해서 이루어지는데, 센서로부터 감지되는 거리와 범위, 오차 등은 수중음향환경 특성과 소나센서의 특성에 따라 달라진다. 이러한 소나 센서의 음파 특성 외에, UUV의 경로계획을 위해서는 수중 운동체의 비선형성과 시변 특성, 3차원 회피 경로 분석, 그리고 수중 항법의 오차 등이 복합적으로 고려되어야 한다.

무인잠수정의 경로계획과 실시간 장애물 회피 제어 기술은 소나센서와 소나 영상신호로부터 얻어지는 정보의 가공, 전시, 그리고 경로계획을 위한 연산을 통해 이루어지며, 구체적으로 다음의 6단계를 걸쳐 이루어진다.(그림 3)

UUV의 경로계획 기법으로는 미 해군대학원 등 많은 연구 기관에서 적용 중인 Potential field approach(PF) 외에 Genetic algorithm(GA), A* algorithm, Constrained optimization(CO) 등이 적용되어 기초적인 고정 장애물 회피 및 경로계획 기법이 실 해역에서의 운용을 통해 검증되고 있다. 그러나 현재 개발된 대부분의 방법은 실시간 장애물 회피에 적합하지 않거나, 3차원으로 확장하였을 경우 최적해를 찾기 어렵다는 점 등 여전히 한계를 가지고 있다.

현재 본 연구실에서는 UUV의 경로계획 기법으로 지역 경로계획 기법과 전역 경로계획 기법으로 나누어 개발을 진행하고 있다. 지역 경로계획 기법은 실시간 장애물 회피를 위한 경로계획 기법으로 수중 운동체의 특성을 고려한 스트림 함수를 개발하였으며, 전역 경로계획을 위해서는 수중 환경 변화에 유동적으로 대처할 수 있도록 ant colony 최적화 기법을 개발하였다. 또한 계획된 경로를 따라 UUV를 제어하기 위해 sliding mode 제어기를 설계하였으며, 경로계획 기법과 설계된 제어기와의 연동을 통해 성능을 향상시키고 있다.

수중 무인 잠수정을 위한 자율제어기술

UUV가 운용되는 수중 환경은 모선과의 통신이 제한될 수 있으며, 조류의 영향 등으로 급격히 변하는 환경이다. 또한 GPS와 같이 위치 보정을 위해 사용될 수 있는 센서 시스템이 제약되어 있어 UUV의 위치를 정확히 얻는 것이 거의 불가능한 상황이다. 이러한 환경에서 UUV는 발생할 수 있는 각종 상황에 대해 자신의 행동을 스스로 결정하고, 또한 미리 정의되어 있지 않은 예외 상황에 대해서도 최선의 행동을 결정하여 주어진 임무를 성공적으로 수행할 수 있어야 하는데 이때 필요한 기술이 바로 자율제어 기술이다. 현재 무인잠수정의 자율제어 기술의 수준은 정의된 상황 하에서만 자율적으로 움직일 수 있으며 예외적인 상황에서는 운용자와의 통신을 통해 행동을 지시 받는 수준이다. 그리고 운용 중 모니터링을 통해 임무 지속 여부를 결정하는 기술 등은 대부분 개발되었으나 자율적인 임무수행이 가능한 임무는 극히 제한되어 있으며, 미리 프로그램 된 계획을 수행하는 것이 대부분이다.

수중 무인잠수정을 위한 자율제어 기술 연구는 자율시스템의 제어 구조 연구와 관련되어 진행되어 왔으며, 현재까지 발표된 제어 구조는 크게 직렬형 구조, 병렬형 구조, 그리고 혼합형 구조로 분류할 수 있다. 직렬형 구조는 하향식(top-down)의 순차(serial) 구조로서 상위 레벨일수록 임무 전체에 관여하며, 하위 레벨일수록 특정 행동과 관련되도록 제어 구조가 설계된다.

반면 병렬형 구조는 모든 기능 모듈들이 병렬로 구성되어 있는 제어 구조로 구조 자체의 특성으로 유연함이 특징이며, 계산 시간 등을 줄일 수 있는 장점이 있는 반면, 임무 전체를 관장하는 임무 계획기가 없으므로 활성화된 행동들 간의 우선순위 결정 등이 문제가 될 수 있다. 혼합형 구조는 위의 구조를 결합한 제어 구조로 대개 상위 레벨은 직렬형 구조로 하위 레벨은 병렬형 구조로 구성하여 각각의 장점을 모두 취하는 구조이다. 즉 상위 레벨의 구현 및 시스템 검증이 쉬우며, 하위 레벨에서는 빠른 응답 속도와 구조의 유연성을 기대할 수 있으나 전체 구조의 복잡성 때문에 전체 시스템의 성능 검증이 쉽지 않다는 단점이 있다.

현재 본 연구실에서는 자율제어를 위해 임무를 전반적으로 관장하는 자율시스템과, 학습을 통한 임무 수행 성능을 향상시키는 학습시스템으로 나누어 개발하고 있다. 자율시스템은 혼합형 제어 구조로 구성되어 있으며, 주어진 지형 정보를 바탕으로 임무의 우선순위에 따라 임무 계획을 수립하고, 동기 기반 행위 기반 제어 기법을 통해 임무를 수행하도록 개발되었다. 학습시스템은 동역학 파라미터 학습은 물론 지형지도 작성을 위한 학습 알고리즘을 포함하고 있다.

본적으로 시간에 따른 변동을 가지게 된다. 특히 소형 무인 잠수정에서 장애물 회피 등으로 사용되는 능동 소나 경우 음파 방사 시간과 수신 시간 사이의 표적의 이동으로 인한 거리 변화 효과로 인하여 발생하는 음선 경로 및 다중 경로의 시간 변동성이 수동 소나에 비해 크게 나타나며, 이는 능동 소나 시스템의 성능에 많은 영향을 미치게 된다.

이를 위해서는 우선 다중 음선 경로 및 잔향음의 시간 변동 특성 분석 기법에 대한 개발이 필요하다. 또한 UUV와 표적의 위치에 대한 시간 변화를 고려한 개구면 합성 기법을 통해 능동 소나의 해상도를 향상시킬 수 있는 기술에 대한 연구가 필요하며, 이와 더불어 이러한 개구면 빔형성 방법으로 얻어진 장애물에 대한 정보를 정확하게 분석해내기 위한 영상잡음 신호처리 기술 또한 필요하다.

해양 환경에 대한 음향 현상 모델링에 대한 연구는 미국의 ONR, WHOI, Scripps, 유럽의 NATO SACLANT 센터, 일본의 JAMSTEC과 KDDI를 중심으로 여러 수중음향관련 대학/연구소에서 활발하게 진행되고 있다. 1990년대부터 수중음향 관련 연구소 및 대학에서 음향 모델 및 가상 유체 모델을 이용한 해양 환경에 대한 음향 시뮬레이션 모델을 개발하려고 시도하고 있고 연구

장애물 회피용 고분해능 능동 소나 신호처리 연구

해양 환경에서 음파는 반사, 굴절, 산란 등에 의하여 잔향음이 발생하게 되고, 해수면과 수온구조의 시변동 등에 의하여 음선 경로가 변하게 되므로, 기

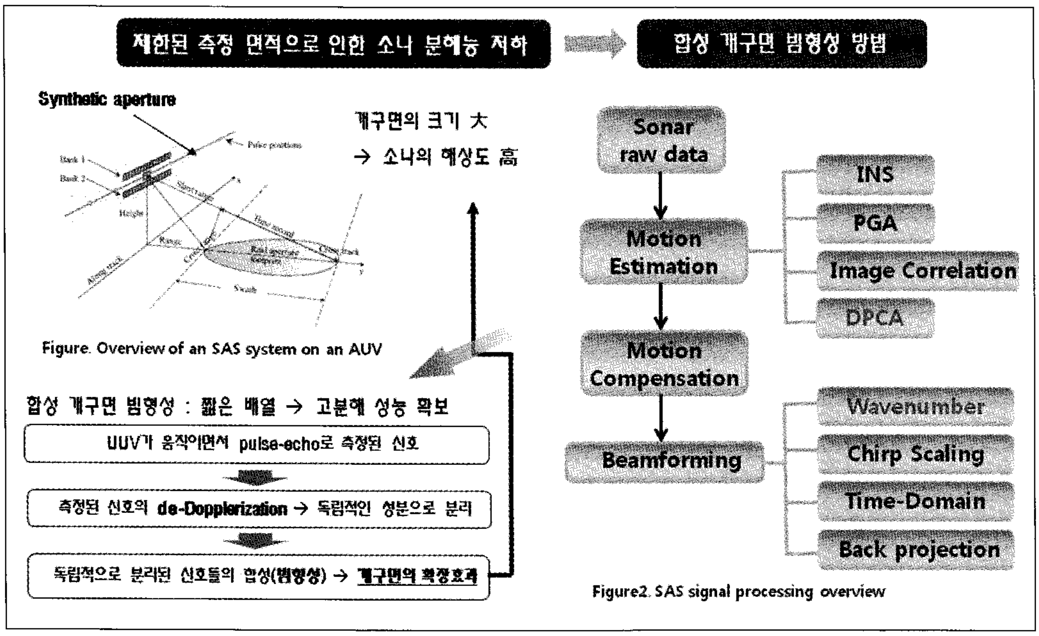

그림 4 고분해능 능동 소나 신호처리 도식도

성과가 꾸준히 발표되고 있다. 또한 UUV의 위치를 추정하고 보상하기 위한 다중경로 위상 정합 기법에는 DPCA(Displaced Phase Center Antenna)나 시간 지연 빔형성 기법, 위상 이동 빔형성 기법, 외부 센서를 활용한 SLAM 등이 연구되고 있다. 그리고 잡음 환경에서 표적 정보를 정확히 얻어 내기 위해서 적응 빔형성 기법, MVDR(Minimum Variance Distortionless response), MUSIC, 음향 대조 최대화 기법, 유사도 비교 방법 등이 제안된 바 있다.

해저 포설/매설 기뢰 탐지 기술

지금까지의 기뢰탐지 및 제거에는 숙련된 잠수부나 돌고래를 이용한 방법 등이 사용되어 왔다. 하지만 이와 같은 기존의 기뢰 탐지 및 제거 방법은 기뢰 탐지 효율이 낮을 뿐 아니라 인명 피해가 예상되며 제어에도 어려움이 있다. 따라서 향후에는 원격 무인화기술이 적용된 무인 잠수정을 이용한 기뢰 탐지와 제거 기술이 채택될 것으로 예상된다. 또한 미래에는 포설 기뢰의 탐지 및 제거뿐만 아니라 해저 퇴적층에 매설된 기뢰의 탐지와 제거도 무인잠수정을 이용하여 실시할 것으로 예상된다. 이와 같이 무인 잠수정을 이용한 포설 및 매설 기뢰의 탐지 및 제거가 실현되기 위해서는, 탐지소나의 소형화, 고효율성이 필수적이다. 또한, 미세한 수중음향신호를 높은 신호/잡음비로 탐지하고, 해저지층의 감쇄효과의 영향을 줄이기 위한 센서배열 기술을 필요로 하며, 기뢰의 자동인식을 위하여 신호처리 영상화 기술과 자동인식 알고리즘 연구가 필수적이다.

현재 기뢰를 탐지하기 위한 센서 배열에 관한 연구는 크게 Florida Atlantic 대학의 BOSS와 같이 많은 청음기 배열을 이용하여 청음기의 지향성을 향상시켜서 탐지하는 방식과 프랑스 GESMA Lab과 같이 파라메트릭 어레이(Parametric acoustic array)로부터 생성되는 저주파 지향성 음파를 이용하여 이미지를 얻는 방식의 두 가지로 요약될 수 있다. 한편 매설 물체를 음향학적으로 탐지하기 위해서는 sediment 내에서의 음파의 감쇄를 줄이기 위해 기존의 측면 주사 소나의 작동 주파수 보다 훨씬 낮은 주파수의 음파가 사용되어야 하며, 따라서 고해상도의 확보를 위하여 transducer의 크기가 매우 커져야 한다. 이러한 이유로 인해 Synthetic Aperture Sonar(SAS)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. SAS는 비교적 작은 크기의 transducer를 이용하면서도 저주파 음파의 효과적인 수신/송신과 높은 신호/잡음비 및 높은 분해능을 얻는 데에 유용한 방법이라 할 수 있다.

영상자동인식 알고리즘으로는 물체의 영상을 그대로 이용하는 영상 정합 방법이 널리 쓰이고 있으며, 가우시안 분포를 소나에서 측정한 이미지와 비교하는 방법이나, 기뢰 모양의 이미지 사이의 반향음의 픽셀당 차이의 분산을 이용한 인식 방법 등이 제안된 바 있다.

맺음말

이상에서 살펴본 기술 외에도, 센서 및 신호처리 기술, UUV의 수중 항법 기술, 넓은 지역 탐사 임무를 위한 다수 UUV의 협업 기술, 장시간 운용을 위한 에너지 기술, SLAM, 통신 기술 등이 자율운항기술과 관련되어 주로 연구되는 무인화기술이라고 할 수 있다. 이와 관련하여 미국을 비롯한 선진국에서는 목적에 따라 주요 요소 기술들을 개발하고 있으며, 다양한 운용 실적 및 실해역 실험 경험 등을 보유하고 있는 실정이다. 이에 반해, 일부 기술들을 제외하고는 국내의 기술 수준은 미흡한 실정이나 국방무인화기술 특화센터 자율운항기술 연구실 및 기타 국내 연구 기관에서는 선진국의 기술 수준에 도달하기 위해 관련 연구가 진행되고 있다.