

◆ 특집 ◆ UUV(수중로봇) 기술

UUV(수중로봇)의 소개와 요소기술

Introduction to UUV and Key Technology

이판목¹, 유선철²✉
Pan-Mook Lee¹ and Son-Cheol Yu²✉

¹ 해양연구원 해양시스템 안전연구소(Moeri)

² 부산대학교 기계공학부(School of Mechanical Engineering, Pusan National Univ.)

✉ Corresponding author: scyu@pusan.ac.kr, Tel: 051-510-3058

Key Words: Underwater Investigation (수중탐사), UUV (수중로봇), AUV (자율형 수중로봇), ROV (원격조종 수중로봇), Tether (수중 케이블)

1. 서론

최근 들어 사람에게 위험한 극한 환경의 활동이 로봇에 의해 급격히 자동화되고 있다. 하늘에서는 UAV(Unmanned Aerial Vehicle: 무인 항공기)가 전쟁터에서의 정찰 및 폭격임무를 수행하고 있고, 육상에서는 AGV(Autonomous Ground Vehicle, 무인 이동차량)가 사막의 운송이나 우주 탐사임무들을 수행하고 있다. 수중에서도 다양한 UUV(Unmanned Underwater Vehicle: 수중로봇 혹은 무인잠수정)이 활약하고 있으나, UAV 나 AGV 에 대해 널리 알려져 있지 않다.

UUV 는 최근 군사적 용도에서부터 자원탐사, 환경감시까지 다양한 용도로 사용되면서 세계적인 각광을 받고 있다. 정밀가공기술과 로봇기술의 결정체인 UUV 는, UAV 이상의 고가에 산업적 파급효과가 매우 크다. 현재로는 미국과 일본, 영국등의 몇몇 선진국들이 기술을 독점하여 제작하고 있다.

UUV 개발에 핵심기술은 정밀가공 및 로봇, 전자, 조선 관련기술들로, 우리나라의 이런 기술들이 세계적인 수준인 것을 감안하면, UUV 분야에서도 선진기술을 확보할 충분한 여건을 이미 갖추고 있다.

UUV 분야는 국내에서 10 여년전부터 본격적인 연구가 시작되었으나, 아직 연구의 기반을 다지고 있는 상황이다.

본 특집호에서는 국내외의 UUV 의 소개 와 기술동향, 응용분야 등을 소개하여, UUV 의 저변을 확대하고, UUV 개발에 정밀공학기술을 적극적으로 활용할 수 있는 계기를 마련해보고자 한다.

UUV 분야는 소수의 전공서적^{1,2} 만 있는 상향으로, 체계적인 정보를 얻기가 수월하지 않다. 이러한 점을 감안하여, UUV 의 이해를 돕기 위하여 기본적인 내용과 요소기술들을 쉽게 설명한다.

특집의 구성은, 각각의 해설들이 모여 하나의 내용이 되도록 기획하였다. 본 해설이 UUV 의 전반적인 내용을 소개하고, 다른 해설들이 세부적인 내용을 소개하는 형식이다.

UUV 분야는 아직 용어나 분류가 통일되어 있지 않다. 본 특집에서는 일반적인 분류나 용어를 사용한다.

2. UUV 의 종류

UUV 는 수중에 완전히 잠수한 상태로 이동하는 Vehicle 로, 수면에서 이동하는 ASV(Autonomous Surface Vehicle)와는 구별된다. ASV 는 무인보트,

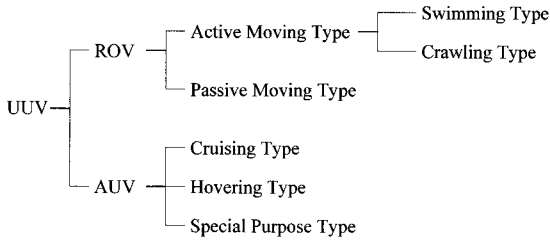


Fig. 1 Classification of UUV

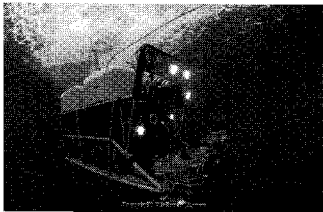


Fig. 2 ROV in Mission

UUV 는 무인잠수정이라 할 수 있다. UUV 는 Fig. 1 과 같이 분류해 볼 수 있다. 크게 케이블의 부착여부에 따라 유선로봇, 무선로봇으로, 나누어진다. 수중은 전파가 통하지 않아, 통신의 제약이 많으므로, 유선은 원격조정로봇, 무선은 자율로봇임을 뜻한다.

모선(Support ship)에서 케이블로 원격 조종하는 UUV 는 ROV(Remotely Operated Vehicle: 원격조종 수중로봇)라고 하며, 통신선이 없는 자율형 UUV 를 AUV(Autonomous Underwater Vehicle)라고 한다.

ROV^{3,4} 는 모선과 케이블로 연결되어서 원격으로 조정하는 형태로 이동형태에 따라서 두 가지로 나눌 수 있다. Fig. 2 와 같이 프로펠러 등 추진기를 부착하여 스스로 이동이 가능한 능동 이동형과 모선에서 로프로 연결해 끌고 다니는 수동 이동형이 있다.

능동 이동형 ROV 은 다시 유영형과 해저 주행형으로 나누어진다. 유영형은 가장일반적인 형태로, 프로펠러를 이용하여 수중에서 이동하는 형태이다. 해저 주행형은 무한케도⁵ 나 바퀴, Fig. 3 과 다리등을 부착하여 해저의 바닥을 이동하는 형태이다.

모선과 ROV 를 연결하는 케이블은 전문용어로 Tether 혹은 umbilical cable 이라고 부르며, 이 케이블안에 통신선뿐 아니라 전원선, 로봇을 모선에 회수하기 위한 강철 와이어, 염수나 담수중에 중성부력을 유지하기 위한 부력재까지 들어있으므로, 직경이 최하 1cm 부터 십수 cm 정도로 굵다.

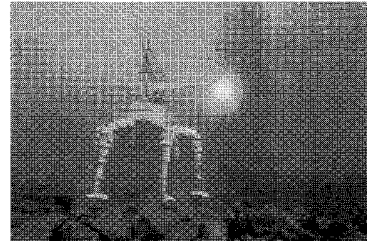


Fig. 3 ROV with Underwater Walking Function, Wrecked Ship Disassembly Task in Underwater Scrapping (Japan Port and Airport Research Institute)

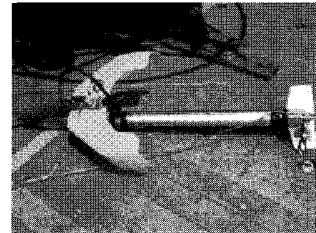


Fig. 4 Towed Vehicle

ROV 는 수중에서 이러한 굵은 케이블을 부착한채 이동해야함으로, 이동가능 거리가 짧고, 자세 유지등에 제약이 많다. 이러한 특성으로인해, 특정 영역의 샘플채취나 중작업용으로 주로 사용된다. 또한 원격조종이 가능하기 때문에 복잡한 작업을 수행할 수 있도록, 매니플레이터나 샘플 채취 장비등 각종 수동 조작기구들이 발달하여있다.

수동 이동형 ROV 는 Fig. 4 와 같은 형태로 Underwater Towed Vehicle⁶ 혹은 Towing Body, Towed Fish 라고 불리 운다. 모선에서 로프로 연결하여 끌고 다닌다. 마치 연을 날리는 것과 비슷하다. Underwater Towed Vehicle 에는 작은 Fin 이 부착되어 자세를 제어 할수 있는 것도 있다. 용도는 주로 광범위한 영역 데이터수집에 사용된다. 예를 들어 해저지도 작성시, 선박으로 수백-수천 Km 끌고 다니면서, 해저지형 데이터를 수집 할때 사용한다.

자율형 UUV 인 AUV(Autonomous Underwater Vehicle)는 케이블의 제약이 없어 이동과 자세제어가 용이하다. 그러나 제한된 전원인 밧데리를 사용하여 이동과 자세제어를 수행함으로, 효율을 극대화 하기 위해 다양한 형태로 분화 하였다.

AUV 는 크게 항주형, 호버링형, 특수 목적형으로 나눌 수 있다.

항주형(Cruising type)^{7,8} 은 어뢰형(Torpedo type)이라고도 불리운다. Fig. 5 와 같이 유체저항을 최소화

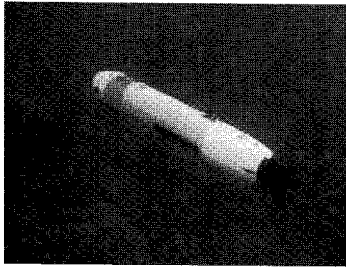


Fig. 5 Cruising Type AUV REMUS, WHOI

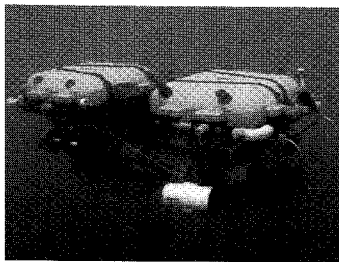


Fig. 6 Hovering Type AUV Twin-burger, Univ. of Tokyo

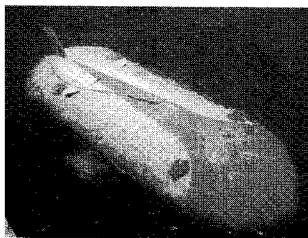


Fig. 7 Manipulation AUV SAUVIM, ONR/ Univ. of Hawaii

하고 장거리 항해능률을 높이기 위하여 어뢰와 같이 원통형 모형을 하고 있다. Fig. 5 는 WHOI (Woods Hole Oceanography Institution)에서 개발된 대표적인 주행형 UUV REMUS 의 모습이다. 고속주행을 위해 후미에 1 개의 대형프로펠러를 달고, 방향 전환은 Fin 을 이용한다.

호버링형⁹ 은 수중관 헬리콥터이다. 이동을 원하는 방향마다 추진기를 부착하여 정점지지(Station keeping)와 거의 모든 방향으로 이동 할 수 있다. 주로 안전검사나 매니플레이션¹⁰ 같이 고도의 자세 제어나 이동 정밀도가 요구되는 임무에 사용된다. Fig. 6 은 동경대학에서 개발된 호버링형 로봇인 Twin-Burger 이다. 정밀 위치제어의 장점을 활용한 대표적인 시각 인식형 로봇이다.

특수 목적형은, 요구되는 임무를 위해 추진방

식통신등이 특화되어 건조된 UUV 을 뜻한다. Fig. 7 은 심해의 자동물체 회수를 위한 특수목적형 UUV SAUVIM 의 모습이다.

3. 수중 로봇의 주요 요소기술

UUV 의 제작에는 공통적으로 들어가는 주요 요소기술들은 다음과 같다.

3.1 제어

UUV 은 3 차원 공간에서 움직이기 때문에 6 자유도의 제어를 고려해야 하며, 제어방법은 추진기 혹은 날개와 같은 Fin 을 조정하는 방법이다.

일반적인 UUV 의 수학적 모델은 6 자유도의 운동방정식으로 표현되며, 유체동역학 계수에 의한 힘과 모멘트로 모델링 되어 있다.

UUV 의 모델링에 관한 대표적인 연구로는, Gertler 와 Hagen,¹¹ Feldman¹² 의한 운동방정식 연구와 Fossen¹³ 에 의한 UUV 의 비선형 제어시스템 설계를 위한 모델식, Healey 와 Lienard¹⁴ 에 의한 6 자유도의 비선형 운동방정식과 유체동역학 계수에 대한 연구 등이 있다. UUV 제어에서 가장 어려운 점은 입력과 출력의 불확실성이다. 센서들의 노이즈가 크고 신뢰도가 낮으며, 추진기들의 추력 출력에 변수가 많은 것이다. 또한 외형이 표준화되어 있지 않아서, 정확한 모델링을 위해서는 개발되는 UUV 마다 유체역학적 계수들을 수조실험으로 구해내야 하는 등의 어려움이 있다.

3.2 센싱

수중에서의 센싱의 종류는 아래와 같이 세가지로 나눌 수 있다.

1) 육상과 같이 방법으로 사용 가능한 것: 자기장이 대표적이다. 수중의 자기장은 육상과 같이 자력계(Magnetometer)로 측정 가능하다. 이러한 특성을 이용하여 Fig. 8 과 같이 해저 광케이블을 관리하는 방법이 있다. 광케이블과 함께 전류가 흐르는 전선을 넣으면, 주변에 자기장이 형성된다. 만일 광케이블이 절단되면, 자력계가 부착된 UUV 으로 광케이블을 따라가게 하여 절단된 위치를 찾아낸다. 해저케이블은 선박에서 내린 닻 등으로 인해 종종 절단되며, 절단된 위치를 찾아내는 로봇으로는 일본 미쯔이 조선의 AE2000 AUV¹⁵가 있다.

2) 사용가능하나 특성이 다른 것: 초음파와 광

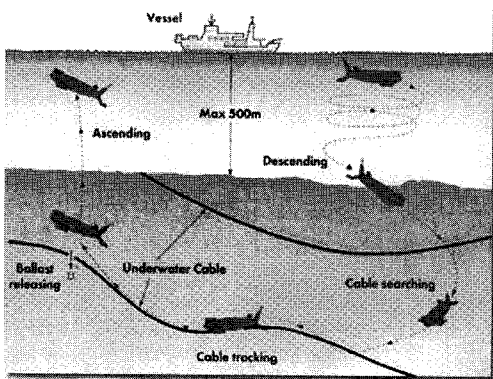


Fig. 8 Ocean Fiber Optic Communication Cable Maintenance by AE2000 AUV, KDDI

학¹⁶이 대표적이다. 음파의 수중 전달속도는 공기 중의 약 3 배인 1000m/sec 정도이다. 수중 전달속도는 수온약층 등의 영향을 받는다. 광학의 경우, 빛의 흡수율이 공기중에 비해 매우 높고, 색상이 공기중과 달라지는것, 부유물등에 의한 노이즈등의 특성이 있다.

3) 사용이 불가능한 것: 전파와 적외선, 열화상등이 대표적이다. 이러한 센싱 방법들은 수중에서 거리에 따른 감쇄율이 너무 높아서 현실적으로 사용이 불가능하다. 전파의 경우, 수중감쇄는 주파수에 비례한다. 예를 들어 2.4GHz 전파의 경우, 안테나 주변 약 1cm 이내 거리에서만 사용이 가능함으로, 실용성이 거의 없다. 적외선이나 열화상도 비슷한 상황이다.

3.3 통신

수중에서 사용 가능한 통신 방법은 다음과 같은 것들이 있다.

1) 초음파에 의한 통신: 초음파¹⁷는 현재 가장 많이 수중에서 사용되고 있는 통신수단이다. 실험역에서의 초음파 통신은 잡음이 많고, 전달속도가 제한되어 있다.

2) 레이저에 의한 통신: 레이저 통신은 두쌍의 레이저의 송수신기가 정확히 Alien 을 맞추어서 있는 상태에서, 장거리에서 고속으로 통신하는 방식으로, 육상용으로는 이미 상용화되어 제품이 나와 있다.¹⁸ 수 Km 범위에서, 수 Gbps 의 통신이 가능할 정도이다. 레이저 통신은 수중에서도 사용 가능한 것이 실험으로 입증되었다.¹⁹ 그러나 고속통신을 위해서는 두 레이저 통신기들이 수중에서 정확히 Aline 을 맞추고 있어야 하며, 수중 부유물에 의한

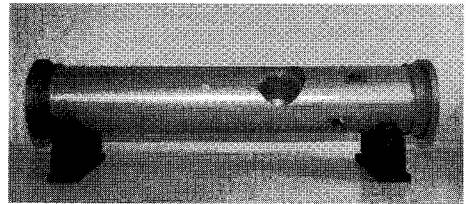


Fig. 9 Cylinder Type Pressure Vessel, Vehicle Body

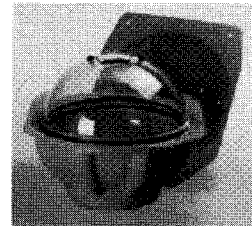


Fig. 10 Glass Sphere Type Pressure Vessel

레이저 차단 등의 문제점이 있어 수 cm 이내의 거리에서의 비 접촉 통신등 매우 제한된 용도로만 사용된다.

군사적인 용도로 잠수함과의 교신을 위해서 레이저통신을 사용하고 있다. 잠수함이 레이저 Beam 을 통해 비행기나 인공위성과 통신을 위한 SLC (Submarine Laser Communication)이 있다. 수중의 통신이 아니라, 잠수함이 수면근방에서 하늘쪽으로 레이저를 쏘서 비행기혹은 인공위성과 통신하는것이다. 레이저로서는 수중의 감쇄율이 적은 강력한 블루 레이저를 사용한다.

3) 자장에 의한 통신: 수중에서 자장을 이용한 통신이 물리적으로는 가능하다.²⁰ 그러나 통신의 신뢰도나 정보량의 문제로 아직 실용화 되지 않았다.

3.4 제작

1) 구조 및 가공: UUV 의 동체제작은 두 가지 방법이 있다.

a) 동체 전체가 방수용기인 경우: 수백 미터 이하의 연안에 잠수하는 중소형의 UUV 에 쓰이는 방식이다. 일반적으로 Fig. 9 와 같은 실린더형태의 방수용기 안에, 모든 장비를 탑재하는 방식이다. 장비의 탑재 및 수리가 쉬우며, 유체저항이 적고 신뢰도가 높으나, 심해에서는 방수용기의 제작이 어려운 단점이 있다.

b) 동체의 일부분만 압력용기인 경우: 필요한 장비들을 여러 개의 소형 압력용기들에 나누어서



Fig. 11 Underwater Connector

로봇의 Frame 에 붙인 다음, Frame 의 외부에 Fairing 용 외관을 붙이는 방식이다. 압력용기로는 금속실린더 혹은 Fig. 10 과 같은 강화유리재질의 반구형이 있다. 압력용기들이 소형화됨으로 높은 수압에 사용 가능하므로, 심해로봇 제작에 효과적이다. 그러나 압력용기간의 연결배선에 쓰는 다량의 방수케이בל들은 접속 불량등의 문제를 발생시킬수 있으며, 로봇의외관내부와 압력용기사이의 수중저항을 증가시키고, 장비의 수리 및 개조가 어려운 단점이 있다.

2) 소재 및 가공: UUV 의 소재는 수압에 견디면서도, 가벼워야 한다. UUV 은 대부분 중성부력이다. 무거운 소재는 추진효율이 낮고, 중성부력으로 맞추기 위해 추가적인 부력재료가 부착됨으로 운동성능이 나빠진다. 표면은 담수나 염수에서 녹이 쏠지 않는 내부식 처리가 필요하고, 방수용 Sealing 부분은 정밀, 연마다듬질이 필요하다.

일반적으로는 알루미늄이 가장 많이 쓰인다. 부식방지를 위해 표면 처리를 한다.

그러나 수천미터급의 심해용으로선 티타늄계열 합금이 사용되며, 최근에는 일본에서 새라믹을 사용하는 1 만미터급 압력용기도 개발되고 있다.

현재 대부분의 압력용기는 단괴로부터 실린더 형태의 용기를 가공해내는 형태로, 제작비용의 부담이 크다.

3) 수중커넥터: 수중의 커넥터는 Fig. 11 과 같이, 플러그와 커넥터 부분이 모두 고무재질로 되어 있는 것이 일반적이다. 연결편수가 많은경우, 금속재질의 하우징에, 고무링을 사용하여 방수하는 것도 있다.

4) 전원: 일반적으로는 충전식 배터리를 사용한다. 납축전지와 Li-Cd 전지, Li-Ion, Li-H, Li-Polymer 등 거의 모든 충전식 배터리를 사용한다. 배터리는 UUV 내부에서 흔들리거나 기울어도 정상적으로 사용할수 있는것들이 사용된다.

특수한 전원으로는 CCDE(Close Cycle Diesel

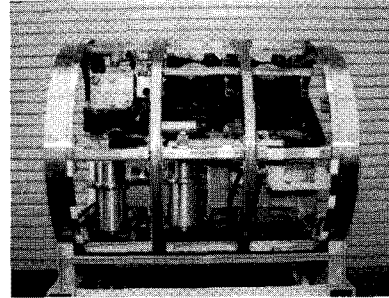


Fig. 12 CCDE on R-One AUV, Univ. of Tokyo

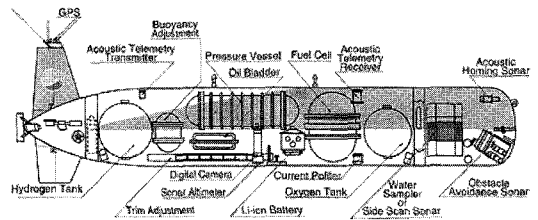


Fig. 13 Layout of Urashima AUV with Fuel Cell, JAMSTEC

Engine)방식과 와 Fuel Cell 이 있다. CCDE 는 디젤 엔진을 사용하여 수중에서 배터리를 충전하는 방식이다. 엔진을 구동하기 위해서는 공기의 공급과 배기가스의 배출이 필요 한다. 수중에서 공기는 고압탱크로 쉽게 공급 할 수 있으나, 배기는 수압이 높아 분출이 어려운 문제점이 있다. 해결책으로 화학물질로 배출가스를 액화시켜 탱크에 저장하는 방식이 있다. CCDE 가 탑재된 UUV 으로는 일본 Mistuii 조선과 동경대학에 의해 개발된 R-One²¹ 이 있다. Fig. 12 와 같은 CCDE 를 사용하여 수중에서 발전해가며 12 시간의 장거리 항해에 성공하였다.

최근 각광받고 있는 Fuel Cell 을 UUV 에 탑재하기도 한다. Fuel Cell 의 탑재할 경우의 문제점은 Sloshing 이다. UUV 은 수중에서 6 자유도로 흔들린다. 특히 조류를 만나거나, 수면에 부상하였을 경우, 로봇을 Launch 하거나 회수 하는 경우 극심하게 움직인다. 화학반응으로 전기를 만들어내는 Fuel Cell 의 화학물질을 내압용기(Pressure Vessel)에 넣어 흔들 경우 Sloshing 이 발생하여 내압이 급격하게 상승하거나, 전기반응이 급변해 발전제어가 어려워지는 문제점이 있다.

JAMSTEC(Japan Marine Science and Earth Technology)에서 개발된 Urashima²² 에는 Fig. 13 과

같이 구형의 Fuel Cell 이 탑재되어 300Km 이상의 장거리이동에 성공하였다.

3.5 위치파악

UUV 이 위치를 파악하는 방법은 크게 다음의 2 가지로 나누어진다.

1) Deadreckoning(추측항법): UUV 이 사용하는 추측항법에는 DVL(Doppler Velocity Log)과 Gyro 를 사용하는 방법이 일반적이다. DVL 은 음파의 Doppler 효과를 이용하여 상대속도를 재는 방법이다. 로봇주변의 물에 대한 상대속도와 해저면(Seabed)에 대한 상대속도를 XY 방향으로 잴 수 있다. 해저 면의 상대속도가 신뢰성이 높아 일반적으로 사용된다. Fig. 14 와 같은 DVL 의 음파송수신부를 해저 쪽으로 향하게 로봇에 부착하여 사용한다. DVL 로 구한 속도를 적분하여 XY 위치를 구한다. Z 축 위치(Depth)는 압력계로 측정한다. 수압은 수심에 비례하므로 압력계를 사용하면 1cm 이하의 정밀도로도 측정할 수 있다.

Gyro 를 이용하여 로봇의 Yaw(Heading Angle)에 대한 정보를 얻는다. Gyro 의 정밀도는 Deadreckoning 의 오차를 좌우하는 가장 중요한 센서로 실해역 사용에는 로봇의 경우, Ring Laser Gyro 나 정밀 Fiber Optic Gyro 를 사용한다.

수조에서 사용되는 연구 개발용 로봇의 경우, 요구되는 정밀도가 낮음으로, IMU 와 magnetic compass 를 사용하는 경우가 많다.

2) 기지국에 의한 방법: 가장 고전적이며 위치 정밀도가 높은 방법으로는 기지국을 이용한 LBL(Long Base Line)이 있다. 해저의 기지(Known) 위치에 특정 음파를 발신하는 Beacon 을 3 개 이상 설치한다. 이 Beacon 들은 GPS 용 위성과 같은 역할로, Fig. 15 와 같이 UUV 는 삼각측량에 의해 자신의 위치를 측정할 수 있다. 그러나, LBL 의 이용범위는 수-수십 Km 이며, 해저의 특정위치에 음파를 발신하는 기지국을 미리 설치하고 관리해야 하는 부담이 따른다.

다른 방법으로는 모선(Support Ship)과 UUV 와의 상대위치를 측정하는 USBL(Ultra-Short Base Line)방법이 있다. UUV 에 Beacon 을 설치하여 특정 초음파를 발신하면, 모선에서 음파로 로봇의 위치를 파악하여 초음파 통신을 통해 로봇에게 위치를 알려주는 방법이다. 모선이 수면에서 흔들리므로 위치오차가 크고, 초음파 통신이 불안정한 단점이 있다.

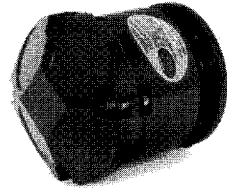


Fig. 14 DVL(Doppler Velocity Log)

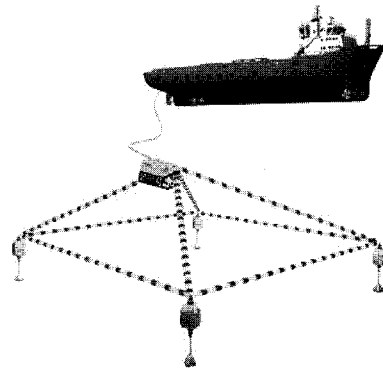


Fig. 15 LBL based Position Estimation

4. 결론

본 해설에서는 UUV 의 종류와 공통적으로 사용되는 요소기술들에 대하여 설명하였다.

수중은 대표적인 극한 환경으로 거의 모든 작업들은 인간에게 매우 위험하여 자동화가 필요하다. 교량, 댐, 항만등의 수중구조물의 건설부터, 안전관리, 잠수함에 의한 수중전등 UUV 의 응용분야는 매우 다양하다.

UUV 분야는 기술적으로 새로운 분야로, 아직 경쟁이 치열하지 않으며 수요가 안정적으로 늘고 있는 유망한 분야이다. UUV 개발에 필수인 정밀가공 및 제작분야를 발전시키면, 현재까지 해결하지 못했던 수많은 난제를 극복 할 수 있다. 그럼으로써 다양한 분야에 UUV 을 사용한 자동화가 기대된다.

후 기

본 연구는 2008 년도 부산대학교 교내학술연구비(신임교수연구착급)의 지원을 받았음.

참고문헌

1. Yuh, J., "Underwater Robotic Vehicles," PSI Press,

- 1994.
2. Fossen, T. I., "Guidance and Control of Ocean Vehicles," John Wiley & Sons Ltd., 1994.
 3. Lee, P. M., Lee, C. M., Jun, B. H., Choi, H. T., Li, J. H., Kim, S. M., Kim, K., Lim, Y. K., Yang, S. I., Hong, S. W., Han, S. C., Gu, B. M., Lee, S. R., Seo, Y. W., Aoki, T. and Bowen, A., "System Design and Development of a Deep-Sea Unmanned Underwater Vehicle HEMIRE for Oceanographic Research," Proc. of International Society of Offshore and Polar Engineering Conference, 2006.
 4. Yoerger, D. R., Kelley, D. S. and Delaney, J. R., "Fine-Scale Three-Dimensional Mapping of a Deep-Sea Hydrothermal Vent Site Using the Jason ROV System," International Journal of Robotics Research, Vol. 19, No. 11, pp. 1000-1014, 2000.
 5. Douglas, M. W. and Dean, B. E., "Multiple Autonomous Underwater Crawler Control for Mine Reacquisition," Proc. of ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 2005.
 6. Koterayama, W., Yamaguchi, S., Yokobiki, T., Yoon, J. H. and Hase, H., "Space continuous measurements on ocean current and chemical properties with the intelligent towed vehicle "Flying Fish"," Journal of IEEE Oceanic Engineering, Vol. 25, Issue 1, pp. 130-138. 2000.
 7. Jun, B. H., Park, J. Y., Lee, F. Y., Lee, P. M., Lee, C. M., Kim, K., Lim, Y. K. and Oh, J. H., "Development of the AUV 'ISIMI' and a free running test in an Ocean Engineering Basin," Journal of IEEE Ocean Engineering, Vol. 36, Issue 1, pp. 2-14, 2009.
 8. Farrell, J. A., Pang, S., Li, W. and Arrieta, R., "Chemical plume tracing experimental results with a REMUS AUV," Proc. of IEEE/MTS Oceans, Vol. 2, pp. 962-968, 2003.
 9. Fujii, T. and Ura, T., "Development of an autonomous underwater robot "Twin-Burger" for testing intelligent behaviors in realistic environments," Autonomous Robots, Vol. 3, No. 2-3, pp. 285-296, 1996.
 10. Yuh, J., Choi, S. K., Ikehara, C., Kim, G. H., McMurty, G., Ghasemi-Nejhad, M., Sarkar, N. and Sugihara, K., "Design of a semi-autonomous underwater vehicle for intervention missions (SAUVIM)," Proc. of International Symposium on Under Water Technology, pp. 63-68, 1998.
 11. Gertler, M. and Hagen, G. R., "Standard Equation of Motion for Submarine Simulations," NSRDC Report No. 2510, 1967.
 12. Feldman, J., "DTNSRDC Revised Standard Submarine Equations of Motion," DTNSRDC Report SPD-0393-09, 1979.
 13. Fossen, T. I., "Underwater Robotic Vehicle Dynamics," Workshop on Future Research Directions in Underwater Robotics, 1994.
 14. Healey, A. J. and Lienard, D., "Multivariable Sliding Mode Control for Autonomous Diving and Steering of Unmanned Underwater Vehicles," IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 18, No. 3, pp. 327-339, 1993.
 15. Kojima, J., "Cable tracking by autonomous underwater vehicle," Proc. of International Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies, pp. 171-174, 2003.
 16. Jules, S. J., "Computer Modeling and the Design of Optimal Underwater Imaging System," IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 15, No. 2, pp. 101-111, 1990.
 17. Josko, A. C., "Performance Limitations in Underwater Acoustic Telemetry," IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 15, No. 3, pp. 205-216, 1990.
 18. Laser Comm. Website, www.aeiwireless.com
 19. Bales, J. W. and Chryssostomidis, C., "High Bandwidth Low Power Short-Range Optical Communication in Underwater," Proc. of Unmanned Unthethered Submergible Technology, Vol. 9, pp. 406-415, 1995.
 20. Sojodehei, J. J., Wrathall, P. N. and Dinn, D. F., "Magneto-Inductive Communications," Proc. of IEEE/MTS Oceans, pp. 513-519, 2001.
 21. Ura, T. and Obara, T., "Twelve Hour Operation of Cruising Type AUV "R-One Robot" equipped with a Closed Cycle Diesel Engine System," Proc. of IEEE/MTS OCEANS, Vol. 3, pp. 1188-1193, 1999.
 22. Hyakudome, T., Aoki, T., Murashima, T., Tsukioka, S., Yoshida, H., Nakajoh, H., Ida, T., Ishibashi, S. and Sasamoto, R., "Key technologies for AUV "URASHIMA"," Proc. of IEEE/MTS Oceans, Vol. 1, pp. 162-166, 2002.