

# 구조화된 수중 환경에서 작업을 위한 PETASUS 시스템 II의 위치 인식 및 자율 제어

## Localization and Autonomous Control of PETASUS System II for Manipulation in Structured Environment

한 종 희<sup>†</sup>, 옥 진 성<sup>1</sup>, 정 완 균<sup>2</sup>

Han Jonghui<sup>†</sup>, Ok Jinsung<sup>1</sup>, Chung Wan Kyun<sup>2</sup>

**Abstract** In this paper, a localization algorithm and an autonomous controller for PETASUS system II which is an underwater vehicle-manipulator system, are proposed. To estimate its position and to identify manipulation targets in a structured environment, a multi-rate extended Kalman filter is developed, where map information and data from inertial sensors, sonar sensors, and vision sensors are used. In addition, a three layered control structure is proposed as a controller for autonomy. By this controller, PETASUS system II is able to generate waypoints and make decisions on its own behaviors. Experiment results are provided for verifying proposed algorithms.

**Keywords:** Underwater manipulation, Localization, Autonomy

### 1. 서 론

무인 수중 잠수정-매니퓰레이터 시스템(UVMS, Underwater Vehicle-Manipulator System)은 물체 조작이 가능한 로봇 팔이 수중 로봇 시스템에 부착된 형태로, 표본 채취, 케이블 매설, 구조물 보수 등에 활용되고 있는 시스템이다. 특히, 멕시코만의 원유 유출 사건에서는 유정을 막는데 4대의 원격 조정 UVMS가 활용되기도 하였다. 국내에서는 해양연구소의 해미래를 비롯하여, 해군, 원자력 연구원 및 KT submarine 등에서 샘플 채취 및 심해저 탐색, 이물질 회수, 해저 케이블 매설 및 보수 등에 운용되고 있다<sup>1-3)</sup>.

현재 대부분의 UVMS는 원격 조종 방식으로 운용되나,

자율 작업을 위해서는 일반적인 탐사용 수중 로봇에 요구되는 위치 인식 및 제어 알고리즘 보다는 좀더 높은 수준의 정확도가 요구된다. 특히, 로봇의 특성 상, 작업 대상으로부터의 상대적인 위치를 정확하게 추정하기 위한 알고리즘이 중요하며, 작업 대상을 인식하기 위한 알고리즘 역시 필요하다.

PETASUS 시스템 I은 UVMS의 운용에 필요한 위치 추정 및 제어 알고리즘을 시험하기 위한 테스트베드로 개발되었다<sup>4)</sup>. 이 시스템은 작업 중 발생하는 외란에 대응할 수 있도록 전방향 구동에 적합한 추진기 배열을 갖도록 설계되었으며, 작업을 위한 5자유도의 로봇 팔을 가지고 있다. 한편, PETASUS 시스템 I에는 3축 각도계, 3축 각속도계, 그리고 압력센서가 부착되어 있으나 이를 통해서는 로봇의 3차원 공간 상에서의 위치를 정확히 추정하는 데는 한계가 있었다.

본 논문에서 소개되는 PETASUS 시스템 II는 기존 시스템의 문제, 특히 센서 시스템을 보완하고, 특정 환경에서는 로봇 스스로 작업을 수행할 수 있도록 고안되었다. 이를 위해 수중에서의 작업, 특히 구조물 유지 보수와 같은 작업에서는 작업하고자 하는 대상의 대략적인 위치를 알고 있

Received : Oct. 21. 2012; Reviewed : Oct. 29. 2012; Accepted : Nov. 20. 2012

※ This work was supported in part by the Engineering Research Center (No. 2011-0030075) and Global Frontier R&D Program (No. M1AXA003-2011-0028358) funded by the National Research Foundation of Korea, and in part by the "Unmanned Technology Research Center at KAIST" funded by the Defense Acquisition Program Administration and Agency for Defense Development.

† Corresponding author: Korea Atomic Energy Research Institute (jhan@kaeri.re.kr)

<sup>1</sup> Daewoo Shipbuilding Marine Engineering (jsok@postech.ac.kr)

<sup>2</sup> Mechanical Engineering, POSTECH (wkchung@postech.ac.kr)

으며, 작업 대상에는 로봇이 인식할 수 있는 인공 표식이 있다고 가정하였다. 즉, 로봇에게 구조화된 작업 영역 내의 지도와 지도 내 대상의 위치, 그리고 인식을 위한 표식이 주어진다고 가정하였다.

본 논문에서는 구조화된 환경, 특히 직사각형의 수중 환경에서 작업을 위한 수중 로봇의 위치 인식 알고리즘을 제안한다. 이를 위해서 로봇의 3차원 위치 추정을 위한 4개의 소나 및 3축 가속도 센서와, 작업 대상의 인식 및 위치 추정의 정확도 향상을 위한 비전 센서가 추가적으로 도입되었다. 또한 이들 센서로부터 3차원 위치 인식을 위한 다중시간 확장 칼만 필터가 개발되었다<sup>5)</sup>. 이와 함께 수중 로봇에 주어진 지도 내에서 작업 위치가 주어졌을 경우, 스스로 작업 위치까지 이동하기 위해 경로지점들을 생성하고, 작업 대상 인식 등 자율 작업을 위한 제어 구조가 개발되었다.

본 논문의 2장에서는 PETASUS 시스템 II을 소개하며, 3장에서는 개발된 UVMS의 제어 및 위치 인식 알고리즘에 대해 설명한다. 4장에서는 수중에서 진행된 위치 인식 알고리즘 및 제어 시스템의 성능 실험 결과를 설명한다.

## 2. PETASUS 시스템 II

PETASUS 시스템 II는 잠수정(PETASUS II)과 수중 로봇 팔(PUM)으로 구성되었다.

### 2.1 PETASUS II 잠수정

PETASUS II는 그림 1과 같이 직육면체 형태이며, 외부의 스테인리스강 프레임과 사각형의 알루미늄 압력 용기로 구성되어 있으며 오링으로 수밀을 유지한다. 6개의 추진기는 직육면체의 각 면에 한 개씩 부착하여 6자유도의 움직임이 가능하도록 배치되었으며, 잠수정의 하단부에는 로봇 팔을 장착하기 위한 알루미늄 프레임이 부착되어 있다. PETASUS II의 주요 제원은 표 1에 정리하였다.

그림 2에는 PETASUS II의 하드웨어 구조를 나타내었

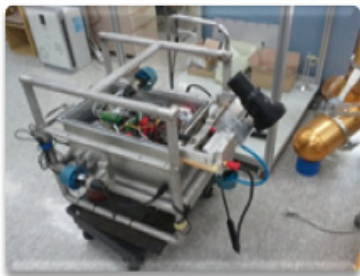


Fig. 1. An underwater vehicle, PETASUS II

Table 1. Specification of PETASUS II

content	specification
size (length x width x height)	647 x 497 x 427 mm
weight in air	75.3 kg
weight in water	13.0 kg
Sensors	4 SONARs , IMU, Gyro, stereo camera
apparatus	underwater light, tilting system

다. PETASUS II는 Navigation PC, Control PC의 두 대의 컴퓨터를 가지고 있으며, Navigation PC는 각 센서로부터 로봇의 위치 인식을 위한 연산을 수행하며, 결과를 Control PC로 전송한다. Control PC는 전달받은 위치를 바탕으로 로봇의 제어를 수행하며, 로봇 팔의 움직임 또한 Control PC를 통해 제어된다.

외부에는 로봇의 상태를 모니터링하기 위한 Monitor PC가 있으며, 이를 통해 운용자는 로봇의 상태를 파악하는 한편, 필요한 경우, 연결된 조이스틱을 통해 원격으로 로봇을 직접 제어할 수 있다.

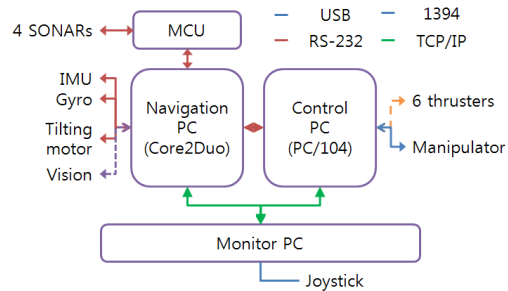


Fig. 2. Hardware structure of PETASUS II

### 2.2 수중 로봇 팔 PUM

그림 3의 수중 로봇 팔은 PETASUS 시스템의 링키지 형태의 5자유도 로봇 팔이 그대로 사용되었다<sup>4)</sup>. 다만 DSP 보드와 CAN을 통해 이루어지던 통신 및 제어는 Maxon motor 사의 EPOS 2 모델로 교체되었으며, USB를 통해

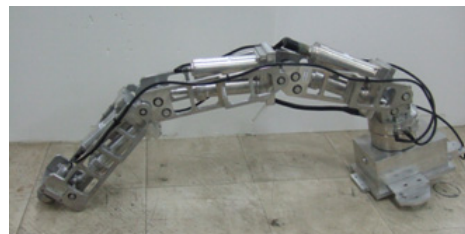


Fig. 3. An underwater manipulator, PUM

Control PC와 통신한다. 교체된 모터 제어기는 위치 서보 뿐만 아니라 전류 제어를 통한 토크 서보가 가능하다.

### 3. 위치 인식 및 제어 시스템

본 장에서는 구조화된 수중 환경에서의 작업을 위한 PETASUS 시스템 II의 제어 및 위치 추정 시스템에 대해 소개한다.

#### 3.1 위치 인식 시스템<sup>(5,11)</sup>

수중 환경에서 로봇이 자율적으로 작업을 수행하기 위해서는 안정적이고 정확한 위치 추정 외에 작업 대상을 인식할 수 있는 센서 시스템이 필요하며, 이를 위해 관성 센서(IMU, Gyro) 외에 소나 센서와 비전 센서가 추가적으로 고려되었다. 개발된 위치 인식 시스템은 그림 4와 같이 크게 두 단계로 나누어 고려되었다. 우선 구조화된 환경이므로 지도 정보와 작업할 물체의 위치, 그리고 물체를 인식할 수 있는 특징점을 알고 있다고 가정한다. 물체가 인식되기 전에는 비전센서를 활용할 수 없으므로 소나와 관성센서, 그리고 주어진 지도 정보를 이용하여 위치인식을 하며, 비전센서에 의해 물체가 인식된 후에는 카메라로부터 들어온 이미지를 사용하여 위치 인식의 정확도 및 안정성을 높인다. 그리고 각각의 경우 위치 인식 알고리즘은 센서 데이터 유무에 따라서 유연하게 데이터가 처리가 되어야 하므로, 센서 측정 모델에 기반을 둔 다중 시간 확장 칼만 필터 알고리즘을 사용하였으며, 그림 5에 그 순서도를 나타내었다. 필터의 업데이트 주기는 가장 빠른 관성 센서의 측정 주기와 같으며, 다른 센서들은 데이터가 획득될 경우에만 위치 추정에 사용되었다.

또한 신뢰도가 높은 데이터만을 위치 추정에 사용하기 위해 데이터 처리 알고리즘 또한 고려되었다. 소나 데이터의 경우, 장애물이나 노이즈, 반사파 등에 의해 신뢰할 수 없는 값이 측정될 수 있으며, 이는 현재 상태의 공분산을 이용하여 신뢰성을 판단할 수 있다. 즉, 측정된 센서 값이

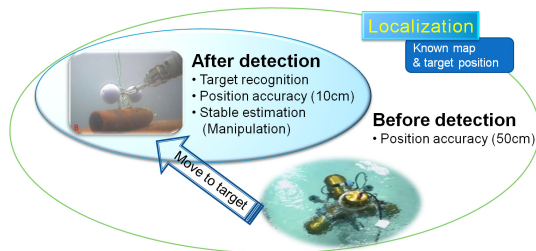


Fig. 4. Localization strategy of PETASUS system II

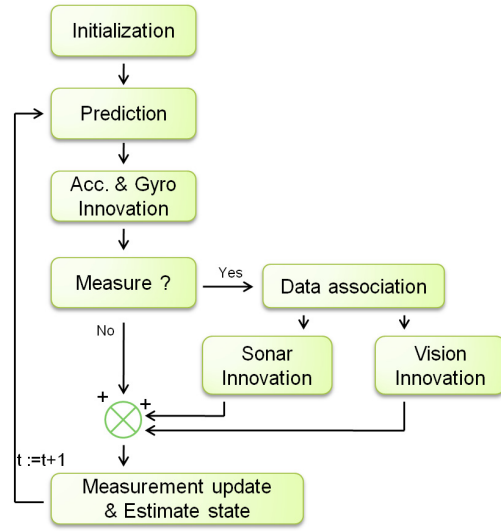


Fig. 5. Flow chart for a multi-rate EKF

로봇이 지도 내의 현재 위치에서 받을 수 있는 센서 값의 범위를 벗어나는 경우는 위치 추정에 사용하지 않으므로써 추정 오차가 발산하는 것을 막을 수 있다. 비전 센서의 경우에도 잘못된 특징점들이 매칭될 가능성이 있으며, 이러한 데이터를 사용하지 않기 위해 투표 방법(voting method)을 통해 매칭율이 높은 특징점을 위치 추정에 사용하였다.

#### 3.2 제어 시스템

수중 무인 잠수정을 위해서 다양한 자율제어 구조가 연구되어 왔다<sup>6,9)</sup>. 현재 개발 중인 PETASUS 시스템 II의 제어 시스템은 한종희 등<sup>6)</sup>이 제안한 제어 구조에 근거하여 그림 6과 같이 하드웨어 계층을 포함하여 크게 세 계층으로 구성하였다. 상위 레벨 제어기는 UVMS가 진수된 후, 여러 임무를 자율적으로 계획 및 감독을 수행하며, 상위 레벨 제어기로부터 계획된 임무는 중간 단계의 제어기에 의해 추진기 등을 위한 명령으로 바뀌어 하드웨어 계층으로

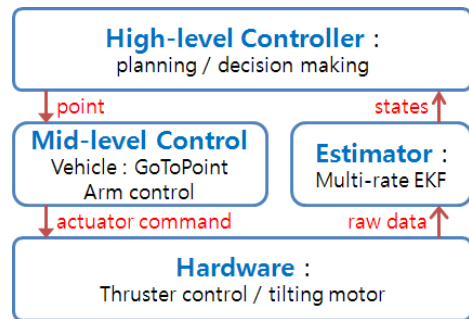


Fig. 6. Control structure of PETASUS system II

전달된다.

일반적으로 상위 레벨 제어기에는 기능적으로 계획 기술, 판단 기술, 지능 등이 고려되어야 한다<sup>[8]</sup>. 이를 위해 PETASUS 시스템 II에는 현재 경로지점 생성 및 임무 달성(경로지점 도달 여부)에 대한 판단 기능이 구현되어 있다. 일반적인 경로 지점 계획은 로봇이 최단 이동 거리를 이동하도록 생성되나, 소나 센서의 제약(방사각 약 9도)으로 인해, 최단 거리로 이동할 경우, 소나 센서 데이터를 활용하지 못하는 상황이 발생할 수 있다. 따라서, 최종 지점이 주어진 경우 상위 레벨 제어기에서는 PETASUS II의 이동 경로가 가능한 벽면과 수평이 되도록 자동적으로 중간 경로 지점들을 생성한다. 수조 내에서 경로 지점은 몇 가지 예외를 제외하고 다음과 같이 생성된다.

- 1) 작업 위치(Pe)로부터 최종 경로 지점(P1) 생성
- 2) Pe와 P1을 잇는 가상의 직선 L1 생성
- 3) 로봇 중심으로부터 L1에 수직인 직선 L2를 생성 (교점 P2)

여기서, 로봇은 초기 위치로부터 P2 → P1 → Pe의 순서로 이동하게 되며, 선수각은 L2와 L1과 평행하도록 생성된다. 이 때 최종적으로 로봇은 P2로부터 L1 방향으로(즉, 정면으로) 작업 대상에 접근하게 되므로, 비전센서로부터 측정된 데이터를 위치 추정에 충분히 사용할 수 있게 된다. 이후 상위 레벨 제어기는 생성된 경로 지점과 선수각으로부터 세부 임무를 작성한다.

계획된 경로 지점들을 따라 로봇을 이동시키기 위해 상위 레벨 제어기는 경로 지점에 대한 도착 여부, 작업 대상의 인식 여부 등에 대한 판단을 통해 임무의 달성 여부를 판단할 수 있어야 한다. 따라서 PETASUS II의 상위 레벨의 제어기는 위치 인식 시스템에 의해 추정된 센서 데이터에 근거하여 판단을 수행하도록 개발되었다.

한편 중간 단계의 제어기 또한 구조적으로 행위 기반 제어 기법<sup>[6]</sup>이 적용되었으며, 수조 내에서 로봇을 이동시키기 위한 GoToPoint 행동이 구현되었다. GoToPoint는 경로 지점들을 전달 받아, optimal PID 제어기<sup>[10]</sup>에 의해 제어 입력(각 추진기의 회전 속도)을 생성하며, 제어 입력은 하드웨어에 의해 입력 신호로 전환된다.

#### 4. 성능 검증을 위한 수조 실험

3차원 위치 인식 성능을 확인하기 위한 직선 운동과,

경로 지점 생성 및 임무 수행 능력, 그리고 판단 성능을 확인하기 위한 실험이 고려되었다. 실험은 그림 7의 포항지능로봇연구소 수조 (폭 12 m, 길이 7.5 m, 깊이 6.4 m)에서 수행되었다.

실험에서 주어진 지도 정보는 수조 내 구조물(수중 조명, 카메라, 사다리 등)이 생략된 직육면체로 단순화한 형태로 주어졌으며, 작업 물체의 위치와 기본이미지가 저장된 데이터베이스를 추가적으로 제공되었다. 그리고 관성센서는 100Hz, 소나는 10Hz, 비전은 25 Hz의 속도로 측정되었다.

##### 4.1 3차원 위치 인식 성능 실험 결과

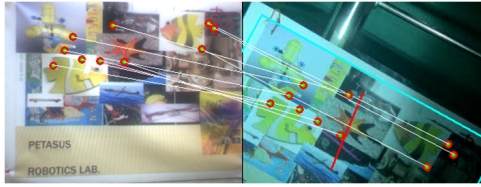
위치 인식 성능을 확인하기 위해 로봇을 물체가 인식되지 않는 곳부터 작업 영역까지 이동한 뒤 다시 초기 장소로 돌아오는 실험을 하였다. 작업 영역에서는 로봇이 가상의 작업 시간 동안 머물도록 하였으며, 작업 대상이 인식되는 동안에는 카메라의 피치 각도를 유지하기 위해 서보모터를 활용하여 물체를 일정하게 인식할 수 있게 하였다.

실험 결과는 그림 8과 같다. 약 4m 지점부터 그림 8(a)와 같이 특징점(Surf)이 인식되기 시작하였으며, 4 m를 벗어나는 170초 후까지 특징점들이 인식되었다.

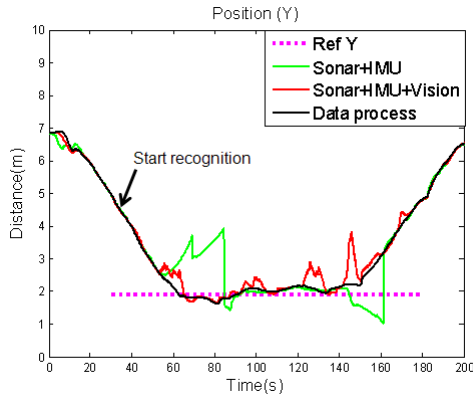
그림 8(a)에서 좌측 그림은 로봇의 데이터베이스에 저장된 인공표식이며, 개발된 알고리즘의 성능을 확인하기 위해 특징점이 충분히 추출되도록 선정되었다. 실제 작업 환경에서도 특징점 추출에 효과적인 인공표식을 선정함으로써, 작업 대상 인식 확률을 향상시킬 수 있다. 그림 8(a)의 우측은 실험 중 얻은 이미지이며, 두 그림에서 흰 실선으로 연결된 적색 원은 서로 매칭된 특징점을 나타내며, 우측 이미지에서 하늘색 선은 추정된 인공표식의 외곽선이다. 계산 효율을 위해 매칭된 특징점 중 투표 방법에 의해 선정된 10개만 로봇의 위치 및 자세를 추정하는데 사용되었다.



Fig. 7. Test tank in PIRO



(a) Matched SURF feature



(b) Estimation result

Fig. 8. Estimation result of PETASUS system II

그림 8(b)에는 로봇의 위치 추정 결과를 나타내었다. 소나와 관성센서만을 이용한 융합 데이터의 결과 값(녹색 실선)은 추정 오차가 크고 오랫동안 수렴하지 못하는 것을 확인할 수 있으며, 이는 소나의 음파가 수조 내의 구조물(수중 조명, 사다리 등)에 의해 불규칙하게 반사되어 부정확한 값이 나오거나 음파의 수신 각도를 벗어나는 경우로 추정된다.

한편, 비전 데이터를 추가하여 융합한 결과(적색 실선)는 소나와 관성센서만을 사용한 경우보다 좋은 결과를 보여주나, 여전히 작업 대상(2m)을 인식하는 과정 동안에도 추정 오차가 큰 경우가 발생하였으며, 이를 보완하기 위해 측정된 소나 및 비전 데이터 중 신뢰도가 높은 데이터만을 사용함(흑색 실선)으로써 안정적이고 정확한 위치 정보를 추정할 수 있었다.

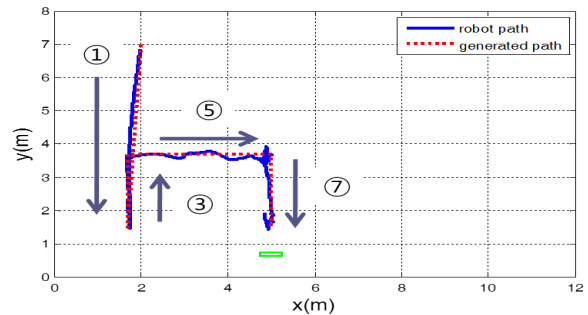
#### 4.2 자율제어 성능 시험

개발된 자율제어기의 경로지점 생성 및 임무 수행 능력, 그리고 판단 능력을 평가하기 위해 시작점 (x, y, yaw): (2, 7, -90)과 작업 대상의 위치가 (1.7, 1.5)과 (5, 1.5)로 주어졌을 경우, 목표 지점으로 이동하는 임무에 대한 실험을 수행하였다. 또한, 실험에서는 (1.7, 1.5)의 위치에는 인식을 위한 표식을 놓지 않았으며, 인식되지 않은 경우에 대해 로봇이 스스로 다음 임무로 이행하는지 확인하고자 하였으며,

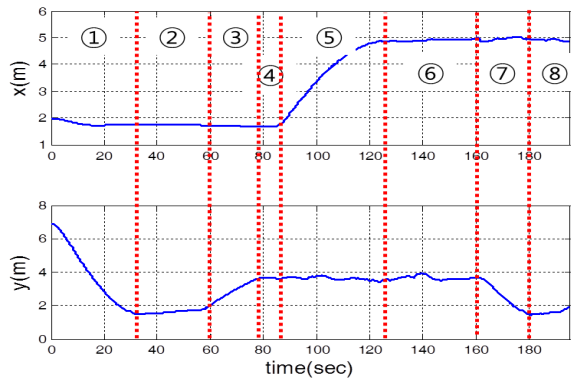
실험 결과는 그림 9와 같다.

그림 9(a)는 수조에서 로봇의 위치를 나타낸 결과로, 적색 점선은 상위 레벨 제어기에 의해 생성된 로봇의 경로를 나타낸다. 생성된 경로지점의 순서는 (x, y, yaw): (1.7, 1.5, -90) → (1.7, 3.7, -90) → (5, 3.7, -90) → (5, 1.5, -90) → (to the target)이며, 이를 바탕으로 총 8개의 세부 임무가 생성되었다 (번호로 표시). 반면 파란 실선은 로봇이 이동한 경로로, 개발된 위치 인식 알고리즘에 의해 실시간으로 추정된 결과이며, 로봇 또한 위치 추정 결과를 바탕으로 제어되었다.

그림 9(b)에는 로봇의 경로를 세부 임무 단계별로 구분하여 나타내었다. ②, ④, ⑥ 과정에서와 같이 각 경로 지점들에서는 도착 여부에 대한 판단이 내려질 때까지 기다린 후, 다음 경로로 이동하였다. 도착 여부를 판단하기 위해 사용된 조건은 위치 오차(0.12m 혹은 6도 이내)에서 일정 시간(5초) 이상 유지하는 것이나, 임무에 맞게 수정될 수 있다. 도착 판정을 받기 위해 제어되는 시간은 로봇이 회전한 후 소나 데이터를 재획득하는 시간을 확보할 수 있게 해준다.



(a) Path of PETASUS system II



(b) Generated waypoints and control result

Fig. 9. Experimental results for performing tasks

## 5. 결론

본 논문에서는 수중 잠수정-매니퓰레이터 시스템인 PETASUS 시스템 II의 3차원 위치 인식 및 자율 제어 알고리즘이 개발되었다. 개발된 위치 인식 알고리즘은 관성 센서 외에 소나 및 비전 센서 데이터 그리고 지도 정보를 활용하였으며, 센서 데이터 유무에 관계없이 유연하게 처리할 수 있도록 다중시간 확장 칼만 필터가 고려되었다. 또한, 추정된 위치 정보를 바탕으로 수중 로봇이 작업 위치로 스스로 이동하기 위해 경로를 생성하고 스스로 판단할 수 있는 자율 제어 알고리즘이 개발되었으며, 수조 실험을 통해 성능을 검증하였다.

## 참고문헌

- [1] H. Choi *et al.*, "Introduction to ROV and Motion Control & Signal Processing for ROV (Remotely Operated Vehicle) Hemire", Journal of the Korean Society of Precision Engineering, vol. 26, no. 5, pp. 41-47, 2009
- [2] Y. Choi *et al.*, "Underwater Robot Technology for the Inspection of Nuclear Power Plant", 2006 Fall Workshop of Korea Unmanned Underwater Vehicle, 2006
- [3] <http://www.ktsubmarine.co.kr/>
- [4] J. Han *et al.*, "Development of a small underwater vehicle/manipulator system for underwater manipulation", 2006 Spring Workshop of Korea Unmanned Underwater Vehicle, 2006
- [5] J. Ok *et al.*, "UUV 3D localization using sensor fusion in structured underwater environment", 2011 Spring Workshop of Korea Unmanned Underwater Vehicle, 2011
- [6] J. Han *et al.*, "Application of Motivation-based Action Selection to Behavior-based Control Architecture for Unmanned Underwater Vehicles", 2010 Spring Workshop of Korea Unmanned Underwater Vehicle, 2010
- [7] W. Hall, M. Adams, "Autonomous vehicle software taxonomy", Proceedings of the 1992 symposium on autonomous underwater vehicle technology, 1992, pp.49-64
- [8] P. Ridao, et al. "Recent trends in control

architectures for autonomous underwater vehicles", International Journal of Systems Science, vol. 30, pp.1033-1056, 1999

- [9] K. Valavanis, et al, "Control architectures for autonomous underwater vehicles," IEEE Control Systems Magazine, vol.17, no.6, pp.48-64, 1997
- [10] Y. Choi and W. K. Chung, PID Trajectory Tracking Control for Mechanical Systems. Springer, 2004.
- [11] J. Ok, UUV 3D Localization in Structured Underwater Environment for Manipulation, MS thesis, POSTECH, 2011



### 한 종 희

2003 포항공과대학교 기계공학과(공학사)  
 2005 포항공과대학교 기계공학과(석사)  
 2011 포항공과대학교 기계공학과(공학박사)

2011~현재 한국원자력연구원  
 관심분야: 수중 로봇



### 옥 진 성

2009 한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부(공학사)  
 2011 포항공과대학교 기계공학과(석사)  
 2011~현재 대우조선해양  
 관심분야: 수중 로봇 위치 인식



### 정 완 균

1981 서울대학교 기계설계학과(공학사)  
 1983 한국과학기술원 기계공학과(석사)  
 1987 한국과학기술원 로봇공학과(공학박사)

1987~현재 포항공과대학교 기계공학과 교수  
 관심분야: 수술로봇, 이동 로봇, 수중 로봇