

# 수중 구조물 진단용 원격 조종 로봇의 자세 제어를 위한 비전 기반 센서 융합

## Vision-based Sensor Fusion of a Remotely Operated Vehicle for Underwater Structure Diagnostication

이재민, 김곤우\*  
(Jae-Min Lee<sup>1</sup> and Gon-Woo Kim<sup>2,\*</sup>)

<sup>1</sup>Control and Robot Engineering, Chungbuk National University

<sup>2</sup>School of Electronics Engineering, Chungbuk National University

**Abstract:** Underwater robots generally show better performances for tasks than humans under certain underwater constraints such as. high pressure, limited light, etc. To properly diagnose in an underwater environment using remotely operated underwater vehicles, it is important to keep autonomously its own position and orientation in order to avoid additional control efforts. In this paper, we propose an efficient method to assist in the operation for the various disturbances of a remotely operated vehicle for the diagnosis of underwater structures. The conventional AHRS-based bearing estimation system did not work well due to incorrect measurements caused by the hard-iron effect when the robot is approaching a ferromagnetic structure. To overcome this drawback, we propose a sensor fusion algorithm with the camera and AHRS for estimating the pose of the ROV. However, the image information in the underwater environment is often unreliable and blurred by turbidity or suspended solids. Thus, we suggest an efficient method for fusing the vision sensor and the AHRS with a criterion which is the amount of blur in the image. To evaluate the amount of blur, we adopt two methods: one is the quantification of high frequency components using the power spectrum density analysis of 2D discrete Fourier transformed image, and the other is identifying the blur parameter based on cepstrum analysis. We evaluate the performance of the robustness of the visual odometry and blur estimation methods according to the change of light and distance. We verify that the blur estimation method based on cepstrum analysis shows a better performance through the experiments.

**Keywords:** ROV, visual odometry, sensor fusion, blur estimation, cepstrum analysis

### I. 서론

수중 환경은 바다의 형태로 지구의 표면을 70% 이상 차지하고 있고 우주와 같은 다른 미 탐사 환경에 비해 인간에게 친숙하다. 수중로봇은 인류의 해양 탐사에 대한 노력과 함께 빠른 속도로 발전되고 있다. 수중 환경에 대한 유인 탐사는 제한된 조광, 높은 수압, 호흡 제한 등의 다양한 어려움이 있어 무인 로봇의 활용도가 각광받고 있는 상황이다. 로봇을 활용할 경우 수압에 대해 발생하는 제약이 적고 사람보다 긴 작업 가능 시간과 작업 연속성, 빠른 유속에서의 구동 가능성 등 수중 작업에서의 한계를 효율적으로 극복할 수 있다는 점에서 인간이 수행하는 작업을 수중로봇을 이용한 작업으로 빠르게 대체하고 있다. 수중로봇은 조작자의 유무에 따라 AUV (Autonomous Underwater Vehicle)와 ROV (Remotely Operated Vehicle)로 나눌 수 있

다. AUV는 미지의 수중 환경에 대해 자율적으로 주어진 임무를 해결해야 하는 분야에서 사용된다. 사람이 수행하기에는 광범위하고 장기적인 탐사가 필요한 해저 자원 탐사, 기뢰제거, 위험 해역 감시 등의 임무가 그 예시이다[1]. ROV는 조작자가 직접 로봇을 조작하며 세밀한 제어와 판단이 필요한 경우에 사용된다. 국내에서는 한국해양연구원의 해미래 ROV와 한국로봇융합연구원의 P-SURO II가 개발되어 운용 중에 있다[2,3,17].

수중로봇에 의한 점검 및 진단은 조작자가 ROV에 부착된 카메라 영상을 원격지에서 보고 수행하게 되는데, 물의 흐름과 같은 외란이 지속적으로 영향을 주기 때문에 이를 보조하기 위한 별도의 제어기가 없을 경우 조작과 구조물 점검을 동시에 수행해야 하므로 효율적이지 않고 작업 피로를 가중시킨다. 이를 해결하기 위해 별도의 조작 없이 원격지의 사람이 구조물을 진단할 수 있도록 로봇이 자율적으로 자세를 유지하도록 해야 한다. 이를 위해서는 적절한 센서를 이용해 로봇의 위치와 자세를 추정하여 폐루프 제어를 구성하는 것이 일반적이다. 지상과 다르게 수중 환경에서는 조류, 부력 등 다양한 외부 요인이 존재한다. 이 요인들은 로봇의 제어 관점에서 무시할 수 없는 외란으로 작용하여 지상이나 공중 또는 우주 공간 등 다른 이동로봇

\* Corresponding Author

Manuscript received November 15, 2014 / revised January 15, 2015 / accepted February 25, 2015

이재민: 충북대학교 제어로봇공학(ljm6525@gmail.com)

김곤우: 충북대학교 전자공학부(gwkim@chungbuk.ac.kr)

※ 본 논문은 2014 ICROS 대전충청지부 학술대회에서 초안이 발표되었음.

보다 가혹한 환경에서 원하는 자세로 제어를 할 수 있는 능력을 요구한다. 본 연구에서는 수중에 기반이 있는 항만 구조물이나 교량 구조물의 점검 및 진단을 수행하는 ROV 플랫폼의 조작 보조 제어기를 위한 센서 융합 시스템을 제안한다.

물속에서는 전자기파의 도달 범위가 굉장히 짧아지므로 GPS등 이를 이용한 여러 가지 센서를 사용할 수 없다. 전통적으로는 음향, 광학, 관성 센서를 활용하여 수중 로봇을 제어하는 여러 방법에 대해 연구되어 왔다[4]. 음향을 이용한 위치 추정 방법 중 USBL (Ultra-Short BaseLine) acoustic positioning system, SBL (Short BaseLine) acoustic positioning system, LBL (Long BaseLine) acoustic positioning system과 같이 모션, 해저면, 로봇에 측정 기준이 되는 transponder를 부착하여 위치와 자세를 추정하는 방법이 있다[5]. 또한 수중에서 영상 정보를 이용하는 여러 방안도 연구되어 왔다 [16]. 수중에서 영상 정보를 이용하는 경우 가시거리 제한, 부유물, 인공조명에 의한 영상 정보 왜곡 등 다양한 어려움이 있다. 이에 수중로봇에서 영상정보는 다른 센서의 보조적인 역할을 하는 경우가 많다. 카메라를 이용한 수중로봇의 위치 및 자세 추정에 관한 연구로는 인공 구조물을 이용해 위치 및 자세 추정을 하는 연구와 임의의 자연 구조물에 대해 상대 위치를 추정하는 방식이 있다[6]. 또한 기존의 관성 센서 기반의 시스템에 단안 카메라를 융합하여 상대 위치의 변화를 알아내고자 한 연구가 수행되었다[7].

수중로봇의 자세와 방위 추정에 사용되는 AHRS (Attitude Heading Reference System)는 magnetic compass를 사용하므로 이 센서를 부착한 ROV가 진단을 위해 철골을 사용한 교량 구조물이나 항만 구조물을 근접할 경우 센서의 정보가 왜곡될 수 있음을 알 수 있다[15]. 위에서 소개한 acoustic positioning system은 음파 이와 같은 복잡한 구조물이 산재되어 있는 환경에서는 음파가 난반사되기 쉬워 사용에 어려움이 있다.

본 논문에서는 근접한 구조물이 촬영된 영상을 입력받아 특징점 추출을 이용해 고정된 구조물과 카메라의 상대 자세를 추정하는 visual odometry [8]기법을 기반으로 수중에서의 로봇 자세를 추정하고자 하고 입력 영상을 분석하여 추정된 자세가 신뢰할 수 있는 데이터인지 실시간으로 판단하여 자세 추정 시스템에 적용하는 일련의 시스템을 제안한다.

II. 시스템 구성

1. 수중 구조물 진단용 원격 조종 로봇 플랫폼

수중 구조물 진단용 원격 조종 로봇 플랫폼은 그림 1의 형태로 제작되었다. 진단용 원격 조종 수중 로봇으로 엄빌리컬 케이블을 통해 전원, 제어 신호 등이 로봇에 전달되고 모니터링에 필요한 센서 출력, 영상 신호 등이 조작자 또는 제어기에 전달된다. 수중 로봇의 운동은 수중에서의 6자유도를 가진 강체로 모델링 할 수 있다. 이 플랫폼은 로봇 상부에 부력체가 장착되어 있어 roll, pitch에 대한 흔들림을 억제할 수 있도록 구성되어 있다. 따라서 제어기는 x, y, z, yaw에만 대응하면 원활한 제어가 가능하도록 설계되었다.

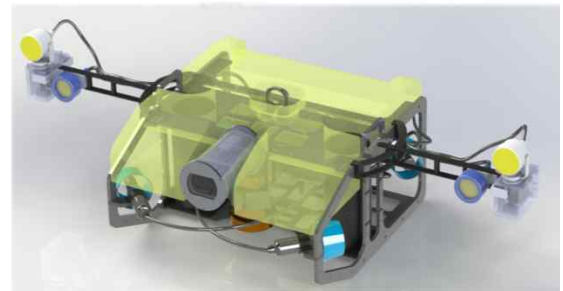
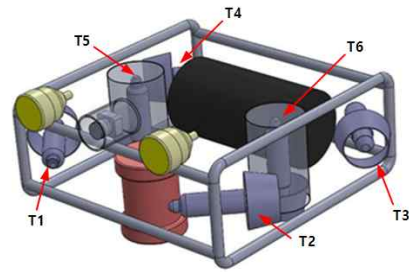


그림 1. 수중 구조물 진단용 ROV.

Fig. 1. ROV for the underwater structure diagnosis.

표 1. ROV에 부착된 센서 규격.

Table 1. The specification of the sensors attached on ROV.

Camera	Resolution : 640 * 480 Frame rate : ~30FPS
AHRS	Model : Microstrain 3DM-GX3-25 Resolution : < 0.1° Static accuracy : ±0.5°(pitch, roll) Dynamic accuracy : ±2.0°
DVL	Model : NavQuest 600 Micro Frequency : 600 Hz Accuracy : 1% ±1 mm/s Maximum Velocity : ±20 knots Maximum Ping Rate : 5 Hz

이에 따라 구성된 추진기 T1, T2, T3, T4는 평면운동을 위한 것으로 모든 추진기의 축이 로봇의 몸체와 수평을 이루는 하나의 평면에 위치하고 마름모의 형태를 이루도록 배치하여 평면에 대해 무지향성 운동을 할 수 있도록 설계되었다. 추진기 T5, T6는 수직방향의 운동을 위한 것으로 로봇 몸체의 중심을 기준으로 좌우에 수직 방향으로 배치되었다. 이는 로봇의 수평방향 운동에 대해서는 관여하지 않으며 수면으로부터의 높낮이를 제어하는 목적으로만 사용된다.

2. 수중 구조물 진단용 원격 조종 로봇 센서

지상에서 동작하는 차륜형 이동 로봇의 위치 및 자세 제어에서는 바퀴 엔코더를 제어기의 궤환 입력으로서 사용할 수 있다. 그러나 수중 로봇에서는 추진기의 비선형 특성, 다양한 오차 요인 때문에 지상에서의 경우와 달리 추진기의 상태를 출력하는 센서를 로봇의 제어를 위한 센서로 사용하는 것은 극히 제한적이다. 많은 경우 로봇의 상태를 관성 센서, 음향 센서 등을 이용해 측정하여 제어에 사용하고 자 한다. 이 플랫폼에서는 수중 카메라, 깊이 센서, DVL

(Doppler Velocity Log), AHRS (Attitude Heading Reference System)가 부착되어 있다. DVL센서는 음파와 도플러 효과를 이용하여 속도를 측정하는 센서이다. 구체적으로는 음파를 발사하여 돌아온 음파신호에서 반사체와 로봇과의 상대 속도에 의해 생기는 편향 정도를 측정하여 속도를 반환하는 원리이다. AHRS는 정적인 상태에서 roll, pitch의 추정을 위한 가속도계와 yaw의 추정을 위한 magnetic compass, 동적인 상태에서 roll, pitch, yaw의 추정을 위한 gyroscope를 융합하여 일반적인 상황에서 자세를 추정하는 센서이다. 추가로 자연 조명이 제한되어 있는 수중 환경에서 카메라를 보조하기 위해 할로젠, LED 인공조명이 설치되어 있다.

### III. 자세 추정을 위한 비전 시스템

#### 1. Visual odometry

자세 추정을 위해 AHRS를 사용하는 경우 magnetic compass의 hard-iron effect는 센서의 정확도에 큰 영향을 줄 수 있는 오차 요인 중 하나이다. hard-iron effect는 magnetic compass가 철과 같은 강자성체 근처에서 작동할 때 발생하는 비선형성 왜곡을 말한다. ROV가 철 구조물에 접근해야 하거나 금속 성분이 많은 해저 면을 근접 탐사할 때와 같은 경우에는 이 효과에 의해 센서로부터 정상적인 측정치를 얻을 수 없을 것이다.

본 논문에서는 수중 카메라로부터 얻어진 영상을 visual odometry기법을 이용하여 ROV의 자세를 추정하는데 이용하는 것을 제안한다. Visual odometry란 연속적인 이미지를 분석하여 카메라의 자세 변화를 추정하는 방법을 의미한다. 이 기법은 일반적으로 다음과 같은 단계를 기반으로 이루어진다. 첫 번째로 단일카메라나 스테레오 카메라로 입력 이미지를 습득하고 이 습득 이미지로 특징점 추출, 특징점 매칭, 움직임 추정 단계를 거쳐 카메라 움직임을 추정한다. 두 개 이상의 이미지에서 얻은 특징점의 변화량을 바탕으로 카메라의 움직임을 추정하기 때문에 정상 동작을 위해서는 프레임 간 임계치 이상의 움직임이 요구된다. 또한 물의 탁도나 카메라의 초점, 부유물 등에 의해 특징점의 추출과 매칭이 정상적으로 수행되지 않을 수 있고 이에 visual odometry의 정확도가 낮아질 수 있다.

먼저 특징점 추출은 원본 영상에 blob, corner, Sobel 필터를 적용하여 강인한 특징점을 얻어내고자 한다. 5x5 크기의 horizontal, vertical Sobel 필터와 그림 2에서 정의하고 있는 blob, corner 필터의 응답을 비교하여 특징점을 추출한다.

필터링 결과로 얻어지는 응답영상들의 예시는 그림 3에 제시되어 있다. blob, corner 필터 응답과 Sobel 필터 응답을 비교하여 에지 위의 특징을 추출하고 non-maxima suppression을 사용하여 적절한 특징점만을 선택한다[9].

특징점 매칭 단계는 과거 프레임과 현재 프레임의 각 특징점들에 대해 11x11 feature descriptor matrix와 유사도 측정 방법의 일종인 SSD (Sum of Squared Difference)를 사용하여 연속된 이미지에서 추출된 특징점들을 매칭한다. 이렇게 매칭된 특징점 쌍을 이용하여 optical flow를 생성한다. 생성된 optical flow를 RANSAC 방법을 이용해 inlier만을 추출하여 카메라의 자세를 추정한다[10].

-1	-1	-1	-1	-1
-1	+1	+1	+1	-1
-1	+1	+8	+1	-1
-1	+1	+1	+1	-1
-1	-1	-1	-1	-1

-1	-1	0	+1	+1
-1	-1	0	+1	+1
0	0	0	0	0
+1	+1	0	-1	-1
+1	+1	0	-1	-1

(a) Blob detector. (b) Corner detector.

그림 2. 특징점 추출에 사용되는 필터.  
Fig. 2. Filters for the feature extraction.

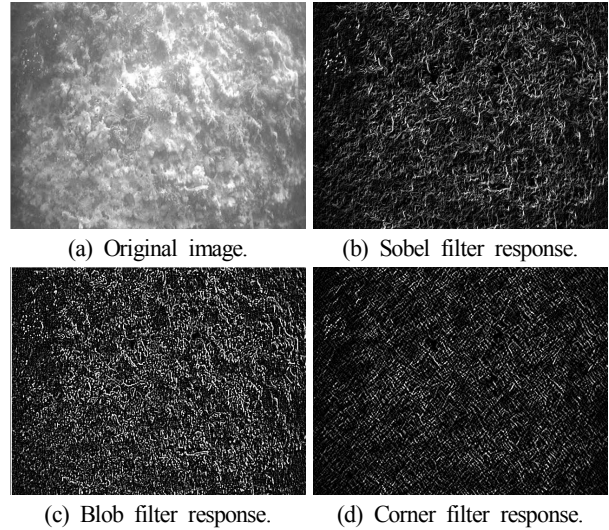


그림 3. 입력 영상에 대한 Sobel, blob, corner 필터 응답.  
Fig. 3. Filter responses of Sobel, blob, corner of the input image.

#### 2. 영상 흐림 정도 판별을 위한 Cepstrum Domain 해석

Visual odometry는 영상에서 특징점 추출을 거쳐 카메라의 움직임을 추정한다. 이 때 영상의 흐림으로 인하여 특징점 추출에 영향을 주어 데이터의 신뢰도가 떨어질 수 있다. 따라서 수중 영상의 탁도, 조명 불량, 부유물 등의 정도를 판단하고 센서의 신뢰도를 결정하는 것이 필요하다.

AHRS의 yaw 값을 대신하기 위하여 어느 정도까지의 흐린 영상을 신뢰할 수 있는지에 관한 정의가 필요하다. 영상의 흐림 정도를 수치적으로 나타내기 위해 blur 추정 기법을 사용한다. Blur 추정을 위해 2D-DFT를 이용해 주파수 영역에서 분석하는 방법과 blur model을 정해서 cepstrum 영역에서 model의 파라미터를 분석하는 두 가지 방법을 이용하였다[11,12].

2D-DFT 은 (1)과 같이 정의되며 2차원의 진폭 및 위상 스펙트럼의 형태로 표현이 가능하다.

$$X[k, l] = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} x[n, m] e^{-i2\pi(kn/N + lm/M)} \quad (1)$$

진폭 스펙트럼을 이용하여 고주파 성분의 밀도를 분석하여 흐림 척도로 사용한다. 여기에는 고주파 성분이 특징 후보들의 정량적인 표현이라는 가정이 포함되어 있다. 그림 4는 실험 영상에 대한 2D-DFT의 진폭 스펙트럼이다.



그림 4. 2D-DFT를 이용한 주파수 영역 분석.  
Fig. 4. Frequency-domain analysis using 2D-DFT.

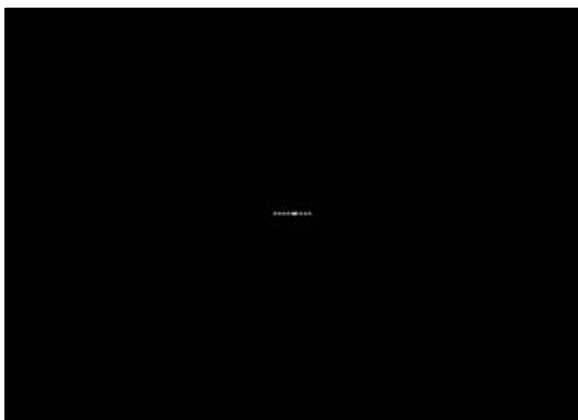


그림 5. Cepstrum domain에서의 blur model 실험 결과.  
Fig. 5. Blur model reconstruction in cepstrum domain.

두 번째 방법으로 cepstrum domain으로 변환하여 blur model의 parameter를 추정하는 방법이 있다. 아래의 (2)는 흐린 영상에 대한 모델이다.  $g$ 는 흐린 영상을 나타내고  $f$ 는 선명한 이미지,  $d$ 는 blur model에 대응하는 PSF (Point Spread Function)을 의미한다. Defocus 영상에 대한 PSF의 정의는 아래의 (3)과 같이 정의한다[13].

$$g(x,y) = f(x,y) \otimes d(x,y) \quad (2)$$

$$d(x,y) = \begin{cases} 0 & \sqrt{x^2+y^2} > R \\ 1/(\pi R^2) & \sqrt{x^2+y^2} \leq R \end{cases} \quad (3)$$

Cepstrum 변환 수식은 아래 (4)에 정의된다.  $G(u, v)$ 는  $g(x, y)$ 의 푸리에 변환을 의미한다. 다시 말해 (4)은 log spectrum의 inverse Fourier Transformation을 의미하는 연산이다. 실제 구현 시  $\log(0)$ 의 연산에 문제가 생길 수 있으므로 아래와 같이 1을 더해주는 형태로 사용한다.

$$C_g(p,q) = F^{-1} \log |1 + G(u,v)| \quad (4)$$

식 (2)에 대해 cepstrum 변환을 적용하면 아래와 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$C_g(p,q) = C_f(p,q) + C_d(p,q) \quad (5)$$

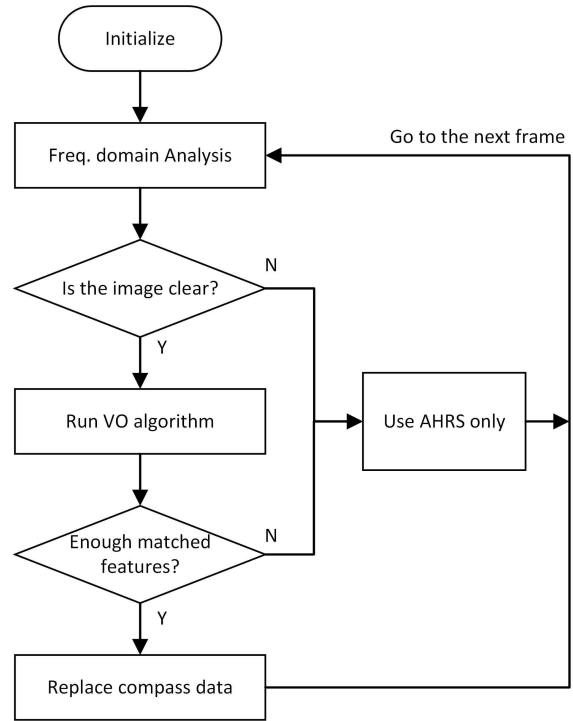


그림 6. 흐림 분석을 적용한 비전 시스템.  
Fig. 6. Vision sensor system applied blur analysis.

여기서 spatial-domain의 convolution은 cepstrum-domain에서 덧셈 꼴로 표현되며 잡음을 무시할 때, cepstrum-domain에서 blur model과 영상이 분리할 수 있게 된다.

위에서 정의한 defocus blur model의 (3)을 (4)를 이용해 cepstrum-domain의 blur model로 변환하면 다음과 같은 결과를 얻는다.

$$D(u,v) = J_1(\pi Rr) / \pi Rr \quad (6)$$

그림 5는 (4-6)의 blur model을 이용하여 2D power spectrum을 출력한 영상이다. cepstrum domain의 spectral pattern을 이용해 blur model의 파라미터를 얻을 수 있음을 [14]에서 보여주었다. 결과로서 뚜렷한 직선 특징이 출력되며 high-pass filtering을 통해 작은 신호를 제거한 후 그 크기를 측정하였다.

### 3. 영상 흐림 정도 판별을 적용한 비전 센서 융합

ROV가 구조물에 근접할 때 AHRS에서 생길 수 있는 이상 측정에 대응하기 위해 영상의 흐림정도를 분석하고 visual odometry를 작동한다. 또한 특징점 매칭쌍의 수가 충분히 많을 경우에만 처리에 적합한 영상이 입력되었다고 가정하고 visual odometry의 출력값이 AHRS를 대체한다. 그림 6에 알고리즘의 흐름도가 간략하게 제시되어 있다.

## IV. 실험

### 1. 실험 영상

실험에 사용될 데이터는 수중에서 카메라는 정지된 상태로 벽면을 촬영한 영상으로 그림 7에 나타나 있다. 다양한 조건에서 비전 시스템의 성능 변화를 보기 위해 같은 거리에서 할로겐 조명과 LED 조명을 사용한 영상을 비교하는





(a) Day, Halogen illumination, Distance from wall=1.0m.



(b) Day, LED illumination, Distance from wall=0.5m.



(c) Night, Halogen illumination, Distance from wall=0.5m.

그림 7. 다양한 조건하에서 획득한 수중 영상.

Fig. 7. Underwater images acquired under the various conditions.

실험과 같은 할로겐 조명을 사용하고 두 배의 거리를 두고 실험을 하였다.

### 2. Visual odometry 실험

그림 8은 거리는 1.0과 0.5로, 조명은 할로겐 조명과 LED를 각각 사용한 환경에서 visual odometry를 구동했을 때의 실험 영상이다. 그림 9에서는 visual odometry를 이용해 정지상태에서 얻은 optical flow의 평균 크기 변화량을 보여주고 있다. 이로부터 얻은 로봇의 자세 변화량은 표 2에 나타나 있다. 카메라와 벽면은 고정된 상태이므로 가능한 적은 변화량을 가질수록 실제 운동을 정확하게 측정한다고 할 수 있다. 실험 결과는 프레임 간 최대 0.03 rad 이하의 오차만을 보여주어 visual odometry가 효과적으로 자세 제어를 위한 궤환입력으로서 사용할 수 있음을 보여준다. 최대 특징점 검출을 260개 제한하여 실험한 결과 inlier비율이 각각 61.19%, 93.65%, 75.93%로 나타났다.

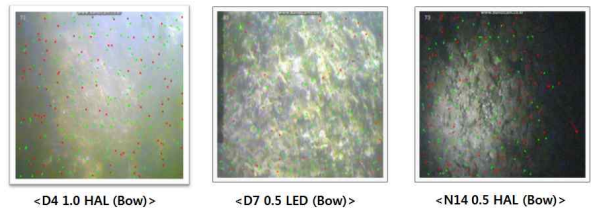


그림 8. 조명과 거리에 따른 visual odometry 실험 영상.

Fig. 8. Experimental results of various lighting and distance.

표 2. 프레임 간 자세 변화량의 평균과 최대치.

Table 2. The specification of the sensors attached on ROV.

	D4 1.0 HAL	D7 0.5 LED	N14 0.5 HAL
Average (rad)	0.0019	0.0005	0.0013
Peak (rad)	0.003	0.0023	0.0053

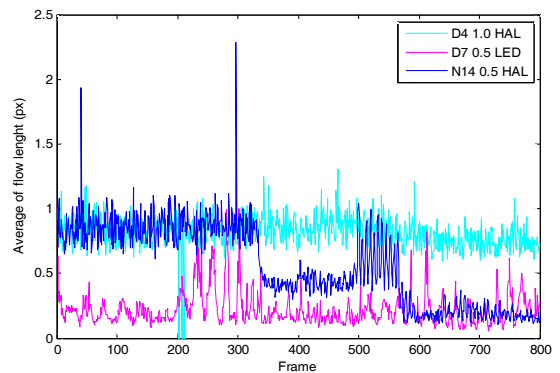


그림 9. 영상에서 측정된 optical flow의 평균 크기 변화량.

Fig. 9. Average length of detected optical flows for each images.

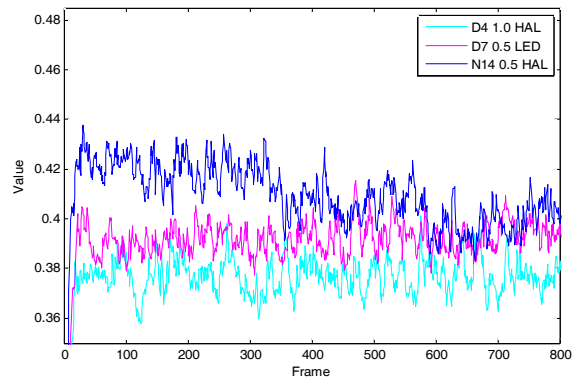


그림 10. 각 영상의 주파수 영역 진폭 스펙트럼의 강도.

Fig. 10. Signal strength of each image in frequency domain.

### 3. 2D영상 흐림 정도 분석

주파수 영역의 진폭 스펙트럼을 이용한 흐림 정도 분석 실험은 원본 영상을 2D-FFT를 거쳐 얻어진 진폭 스펙트럼의 평균 세기를 구하여 이 결과를 흐림의 척도로 사용하였다. 그림 10의 분석 결과는 잡음에 굉장히 민감하고 조명에 따라 값이 크게 바뀌는 것을 볼 수 있다.

Cepstrum domain으로의 변환을 이용해 blur model을 추정하여 영상의 흐림 정도를 분석하는 실험은 추출된 선분 특

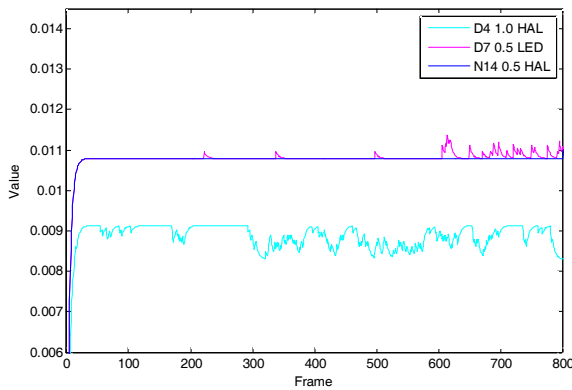


그림 11. Cepstrum domain 분석으로 얻은 blur 파라미터.

Fig. 11. Values of blur parameter from cepstrum domain analysis.

징의 길이를 흐림의 척도로 사용하였다. 그림 11의 실험분석 결과 달라지는 환경에 강인하게 흐림 정도를 추출할 수 있음을 보여준다.

### V. 결론

이 논문에서는 수중 ROV의 자세 추정을 위한 비전 시스템을 제안하였다. 자세 추정을 위한 주된 알고리즘은 연속된 영상의 특징점을 추출, 매칭하여 카메라의 자세 변화를 얻는 알고리즘인 visual odometry이다. 이 알고리즘을 수중 환경에 적합하도록 하기 위해서는 영상 내 크고 작은 부유물의 출현, 열악한 조명상태에 대한 대처가 필수적이다. 이에 영상의 흐림 정도를 정량적으로 측정하고 능동적으로 visual odometry의 신뢰성을 판단하기 위한 방안으로 주파수 영역의 진폭스펙트럼의 평균 세기를 이용하는 방법과 cepstrum domain 변환을 통해 영상에서 blur model의 파라미터를 추출하여 이를 이용하는 방법을 제시하였고 실험적으로 cepstrum을 이용한 분석이 효과적임을 입증하였다.

### REFERENCES

- [1] J. N. Seo and J. R. Choi, "Autonomy levels for underwater vehicles and development trends," *Journal of Electroincs Engineering (in Korean)*, vol. 38, no. 7, pp. 20-29, 2011.
- [2] P. Lee, et al., "System design and development of a deep-sea unmanned underwater vehicle 'HEMIRE' for oceanographic research," *The 16th International Offshore and Polar Engineering Conference*, vol. 2, 2006.
- [3] J. H. Li, et al., "Development of P-SURO II hybrid AUV and its experimental study," *MTS/IEEE OCEANS-Bergen*, pp. 1-6, 2013.
- [4] J. C. Kinsey, R. M. Eustice, and L. L. Whitcomb, "A survey of underwater vehicle navigation: Recent advances and new challenges," *IFAC Conference of Manoeuvring and Control of Marine Craft*, 2006.
- [5] K. Vickery, "Acoustic positioning systems. A practical overview of current systems," *The Workshop on Autonomous Underwater Vehicles*, pp. 5-17, 1998.

- [6] N. Gracias and S. V. José, "Underwater video mosaics as visual navigation maps," *Computer Vision and Image Understanding*, vol. 79, no. 1, pp. 66-91, 2000.
- [7] A. Huster, E. W. Frew, and S. M. Rock, "Relative position estimation for AUVs by fusing bearing and inertial rate sensor measurements," *MTS/IEEE OCEANS*, vol. 3, pp. 1863-1870, 2002.
- [8] D. Nistér, O. Naroditsky, J. Bergen, and D. Nist, "Visual odometry," *The Computer Vision and Pattern Recognition*, vol. 1, pp. 652-659, 2004.
- [9] A. Geiger, J. Ziegler, and C. Stiller, "Stereoscan: Dense 3d reconstruction in real-time," *Intelligent Vehicles Symposium*, pp. 963-968, 2011.
- [10] D. Scaramuzza, F. Fraundorfer, and R. Siegwart, "Real-time monocular visual odometry for on-road vehicles with 1-point ransac," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 4293-4299, 2009.
- [11] R. C. Gonzalez and R. E. Woods, *Digital Image Processing*, 2002.
- [12] R. Rom, "On the cepstrum of two-dimensional functions (Corresp.)," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 21, no. 2, pp. 214-217, 1975.
- [13] M. Cannon, "Blind deconvolution of spatially invariant image blurs with phase," *IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing*, vol. 24, no. 1, pp. 58-63, 1976.
- [14] S. Wu, Z. Lu, E. P. Ong, and W. Lin, "Blind image blur identification in cepstrum domain," *16th International Conference on Computer Communications and Networks*, pp. 1166-1171, 2007.
- [15] J. M. Lee and G. W. Kim, "Vision based sensor fusion algorithms for underwater ROV," *Proc. of ICROS (Institute of Control, Robotics and Systems) 2014 Daejeon-Chungchung Branch Conference (in Korean)*, pp. 51-54, 2014.
- [16] D. H. Kim, D. H. Lee, H. Myeong, and H. T. Choi, "Vision-based localization for AUVs using weighted template matching in a structured environment," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 19, no. 8, pp. 667-675, 2013.
- [17] J. H. Li, et al., "Development of P-SURO II hybrid autonomous underwater vehicle and its experimental studies," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 19, no. 9, pp. 813-821, 2013.



이재민

2011년~현재 충북대 제어로봇공학 학석사통합과정 재학중. 관심분야는 지능형 이동 로봇, Visual SLAM.

**김 곤 우**

2006년 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학박사). 2006년~2008년 한국생산기술연구원 로봇기술본부 위촉연구원, 2008년~2012년 원광대학교 전기전자 및 정보공학부 조교수. 2012년~현재 충북대학교 전자공학부 부교수. 관심

분야는 Mobile Robot Navigation, Sensor Fusion, Map Building and Localization. Remote Operation.