

거리측정이 가능한 단동형 수중 스테레오 카메라의 제어

이판목 · 진봉환 · 이종무

한국해양연구소 선박해양공학분소 해양개발시스템연구본부

Control of an Underwater Stereo Camera Embedded in a Single Canister Capable of Measuring Distance

PAN-MOOK LEE, BONG-HWAN JEON AND CHONG-MOO LEE

Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, KORDI, P.O. Box 23, Yusung, Taejeon 305-600, Korea

KEY WORDS: Underwater camera 수중카메라, Stereo image 스테레오 영상, Distance measurement 거리측정, Mechanical amplifier 기계적 증폭장치, ROV 원격무인잠수정

ABSTRACT: This paper presents the control of the image disparity of a parallel stereo camera and its application to an underwater stereo camera to enhance the working efficiency of underwater vehicles that are equipped with manipulators in seabed operation. The stereo camera consists of two parallel lenses mounted on a lateral moving base and two CCD cameras mounted on a longitudinal moving base, which is embedded in a small pressure canister for underwater application. Because the lateral shift is related to the backward shift with a nonlinear relation, only one control input is needed to control the vergence and focus of the camera with a special driving device. We can get clear stereo vision with the camera for all the range of objects in air and in water, especially in short range objects. The control system of the camera is so simple that we are able to realize a small stereo camera system and apply it to a stereo vision system for underwater vehicles. This paper also shows how to acquire the distance information of an underwater object with this stereo camera. Whenever we focus on an underwater object with the camera, we can obtain three-dimensional images and distance information in real-time.

1. 서 론

원격무인잠수정(ROV)은 해저 광물질 개발, 해저 케이블 매설, 폐어선 및 잠수정 구난 등 해양산업에 있어 필수 불가결한 기본 장비이다. 이러한 ROV는 육상이나 해상의 모선으로부터 원격 제어되며 수중음향장치, 위치추적장치, 수중시각장치 등을 이용하여 작업상태 및 해저 환경을 모니터링 한다. ROV의 원활한 조작을 위해서는 수중 로봇의 작업환경에 대하여 신속하고 정확한 인식이 필요하며, 수중 시각장치는 해저작업과 관측에 필수적인 장비이다.

ROV의 시각장치로는 일반적으로 2차원의 평면영상이 이용되고 있다. 그러나 이들 평면영상은 실제 사람이 보고 느끼는 실 영상과는 많은 면에서 차이가 있으므로, 원격지의 오퍼레이터가 2차원의 평면영상을 이용하여 물체를 파악하거나 해저 정밀작업이 가능하도록 ROV를 조작하기에는 상당한 어려움이 있다. 이러한 단점을 극복하기 위한 방편으로 스테레오 카메라를 이용하는 것이 효율적이다(MTS, 1998). 입체영상은 이차원 평면영상의 한계를 극복하여 보다 인간에 가까운 3차원의 실 영상을 확보하는 방안으로 사용되며 거리정보를 포함하고 있으므로, 원격작업에 있어서 평면영상에 비해 30% 이상의 원격조작성을 향상시키는 장점을 지니고 있다.

입체영상장치는 주로 육상 로봇에 활용하는 기술로 개발되

어져 왔다. 수중에서의 시각장치는 여러 대의 카메라를 설치하여 해저를 관측하는 것이 일반적이기는 하나, 수중에서의 3차원 영상 획득을 위한 연구는 다양하지 못한 편이다. Fox와 Radhakrishnan(1995)은 수중 물체의 반사특성과 조명에 대한 정보를 이용하여 수중 물체에 대한 형상을 복원하는 연구를 수행하였다. 최근에 Singh 등(1999)은 두 대의 카메라를 넓은 간격으로 분리 설치하여 해저 용암층과 해저 열수광상의 입체 촬영을 시도하였다. Weast 등(1999)은 화성 탐험선인 Pathfinder의 3차원 영상복원 기술을 ROV에 이용하여 한 대의 카메라를 이용하여 수중에서의 입체영상을 얻고자 시도한 바 있다. 한편, Hobson과 Watson(1999)은 광학적인 홀로그래피를 이용하여 수중 물체의 3차원 정보를 얻는 기술을 제안하였다.

본 논문에서는 ROV에 적용하여 수중작업을 효율적으로 수행할 수 있도록 수중 스테레오 영상을 얻을 수 있는 시스템을 개발하고자 하였다. 일반적인 육상의 스테레오 카메라 시스템은 이동물체를 찾아 이동하고 이를 계속 추적하기 위한 팬/틸트 장치를 갖춘 플랫폼으로 구성된다(Coombs and Brown, 1991). 또한 스테레오 영상을 얻기 위해서 영상처리를 위한 전용 프로세서와 신호처리 알고리즘을 채용하여 구현하고 있다(Ohm et al., 1998; Izquierdo, 1999; Reid and Beardsley, 1996). 이러한 방법들은 수중의 카메라 시스템에 적용하기에 가격면이나 공간적인 제약조건이 크고 실시간으로 처리되기에는 고성능의 컴퓨터를

필요로 하기 때문에 응용에 한계가 있다. 이러한 관점에서 판단하면, 문헌 (Park et al., 1998; 이 et al., 1999; Lee et al., 2000)에서 제안한 평행방식의 스테레오 카메라는 작은 공간내에 장착이 가능하므로 단일 압력챔버에 카메라를 내장하기 용이하고 저렴한 가격으로 제작이 가능한 장점이 있다.

문헌 (Park et al., 1998; 이 et al., 1999; Lee et al., 2000)의 평행방식 스테레오 카메라는 평행하게 장착된 두 대의 카메라와 렌즈를 각각 좌우방향과 전진방향으로 이동시키며, 이들의 이동량에 선형적인 관계를 도입하여 간단한 기계적 장치를 이용하여 스테레오 카메라를 구현하였다. 이 방법은 원거리 물체에 대해서는 양호한 입체영상을 얻을 수 있으나, 근거리 물체에 대해서는 선명한 입체영상을 얻기 어렵다.

수중에서의 작업은 근거리 물체 대한 작업이 주종을 이루므로 ROV에 적용을 위해서는 근거리 물체에 대한 3차원 영상 획득이 필수적이다. 따라서, 본 논문에서는 평행방식의 스테레오 카메라의 렌즈 이동방향을 좌우방향으로, 카메라를 전후방향으로 구동하는 메카니즘으로 변경하였고, 근거리 물체에 대해서도 스테레오 영상을 얻을 수 있도록 카메라와 렌즈의 비선형적인 관계를 구현할 수 있는 기계적인 증폭장치를 설계하였다. 본 논문에서 제안된 방법은 원거리 물체뿐만 아니라 근거리 물체에 대해서도 선명한 입체영상을 얻을 수 있다. 또한 빛이 공기와 관측창과 물을 통과하면서 매질 변화에 따라 회절하는 성질을 고려하여 수중 물체의 거리를 측정할 수 있는 알고리즘을 개발하였다. 따라서, 본 논문에서 개발된 수중용 스테레오 카메라는 단일 내압챔버에 내장이 가능하고 소형이며, 저가로 제작이 가능하고, 원거리 및 근거리 물체에 대해서 입체영상을 획득할 수 있고, 수중 물체의 거리측정이 가능하므로, ROV에 사용하기에 적합하다.

2. 수중 스테레오 카메라

Fig. 1은 수중 스테레오 카메라의 개념도를 나타낸다. 그림에서 두 대의 카메라는 물체에 대해서 전후방향으로 동일한 크기로 이동하여 초점거리를 맞추며, 두 대의 렌즈는 카메라 이동과 수직인 방향인 측면 방향으로 대칭적으로 이동한다. 그림에 나타나 있는 기호는 다음과 같이 정의되었다.

p : 물체와 렌즈 사이의 수직거리

s : 카메라 사이 거리

t : 렌즈 사이 거리

h : 렌즈의 대칭 이동 거리

i : 렌즈와 카메라의 CCD 소자 사이의 수직거리

l : 좌측 카메라에 맺히는 영상의 CCD 중앙으로부터의 거리

r : 우측 카메라에 맺히는 영상의 CCD 중앙으로부터의 거리

그림에서 좌우 카메라에 맺히는 영상의 시차 $l-r$ 은 다음과 같이 계산된다.

$$l-r = 2h - it/p \tag{1}$$

선명한 영상을 얻기 위해서는 시차가 영이 되어야 하므로, 위의 식으로부터 다음의 관계식이 얻어진다.

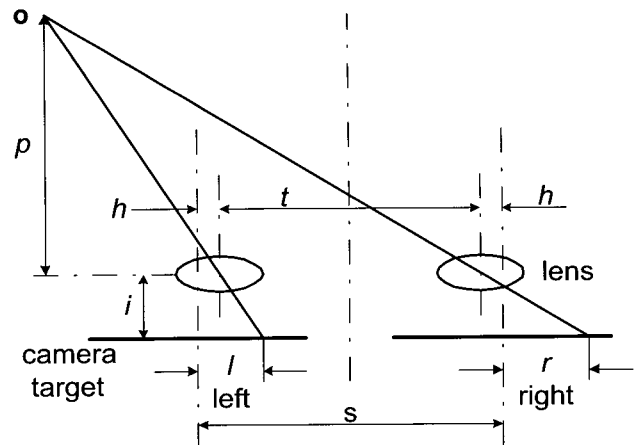


Fig. 1 Geometry of a parallel camera

$$p = it/2h \tag{2}$$

렌즈의 초점거리를 f 로 표기하면, 렌즈 방정식은

$$1/f = 1/i + 1/p. \tag{3}$$

식 (2)와 (3)으로부터 수평방향 이동량 h 는 다음 식으로 얻어진다.

$$h = it/p = fs/2p \tag{4}$$

따라서, 렌즈 이동거리와 카메라 사이의 거리는 다음과 같은 관계가 있다.

$$h = s(1-f/i)/2 \tag{5}$$

여기서, f 는 렌즈의 고정초점(focal length)으로 렌즈선택과 함께 상수로 정해지며, s 는 본 논문에서 카메라 사이의 거리를 고정시키므로 상수이다. 따라서, 렌즈의 수평 이동 거리 h 는 카메라의 전후방향 이동 거리 i 와 일대일 함수 관계에 있다. 본 논문에서는 이와 같은 관계를 이용하여 하나의 제어 입력으로 카메라 초점거리와 렌즈 사이의 거리를 동시에 제어한다.

문헌 (Park et al., 1998; 이 et al., 1999; Lee et al., 2000)에서 제안한 방법은 렌즈가 전후방향으로 움직이며 카메라가 좌우로 이동하는 방식을 취함과 동시에 물체가 카메라에서 멀리 떨어져 있다는 가정을 이용하였다. 이 경우에 h 와 i 는 다음과 같이 선형적인 관계를 갖는다(Park et al., 1998).

$$dh/di \cong s/2f, \text{ if } p \gg f \tag{6}$$

또한 s 가 변화하는 양이므로 $s = t+2h$ 를 식(6)에 대입하고 적분하면,

$$h = t/2[\exp(i/f)-1] \tag{7}$$

관계를 보이므로 식(5)와 다른 관계를 보인다. 한편, 문헌 (이 et al., 1999; Lee et al., 2000)에서 사용한 방법은 선형관계식 (6)을 적분하는 형태로 구동장치를 설계하였으므로, 이동량 관계식은 다음으로 정해진다.

$$h = t/2(i/f-1) \tag{8}$$

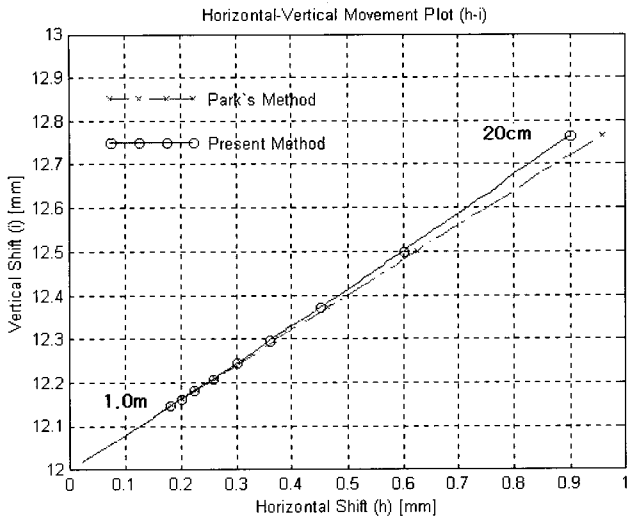


Fig. 2 Relation between the lateral and backward shift of the stereo camera in case of $s=300mm$ and $f=12mm$

Fig. 2는 $f=12mm$ 이고 $s=30mm$ 인 카메라 시스템에 대하여 문헌 (이 *et al.*, 1999)과 본 논문에서 제안된 구동방식에 의한 관계식의 차이를 도표로 나타낸 그림이다. 그림에서 'o'와 'x'마크는 카메라로부터 물체까지의 거리가 20cm에서 1m 사이의 물체에 대하여 10cm 씩 증가될 경우의 $h-i$ 의 관계를 나타낸다. 따라서, 근거리의 물체에 대한 스테레오 영상을 얻기 위해서는 비선형 관계식을 따르는 방식으로 $h-i$ 를 제어하여야 한다.

3. 수중 스테레오 카메라를 이용한 거리측정

수중 물체의 거리측정은 공기중에서의 측정과 다르게 구하여야 한다. 물과 공기의 굴절을 때문에 공기중에서 측정하던 공식을 대입할 경우 오차가 발생할 수 있다. 또한, 일반적으로 수중카메라에 있어서 관측창의 두께를 무시할 수 없으므로 이를 고려한 관계식을 유도하여야 한다.

Fig. 3과 같이 수중에 물체가 놓여 있을 경우 카메라로 관측되는 거리는 p 가 된다. 그러나 빛이 관측창과 물이라는 서로 다른 매질을 통과하여 전파되므로, 물체의 실제거리는 p' 로써 관측거리와 차이를 보이므로 굴절에 의한 거리측정 오차를 보정하여야 한다.

그림에서 실물의 수중카메라를 이용한 수중거리측정을 위한 기하학적 기호 정의를 아래와 같이 표시하였다.

q : 관측창과 렌즈 사이의 거리

T : 관측창의 두께

p : 관측창 밑면으로부터의 물체의 가시적 거리

p' : 관측창을 통과한 빛이 물에 의한 굴절이 없이 중앙선을 만나는 지점의 가상적 거리

p'' : 관측창 밑면으로부터의 물체의 실제 거리

θ_a : 관측창에 입사하는 빛의 입사각

θ_g : 관측창을 투과하는 빛의 굴절각

θ_w : 물을 투과하는 빛의 굴절각

그림에서 가상의 거리 p' 과 p 의 비율을 구하면 다음과 같

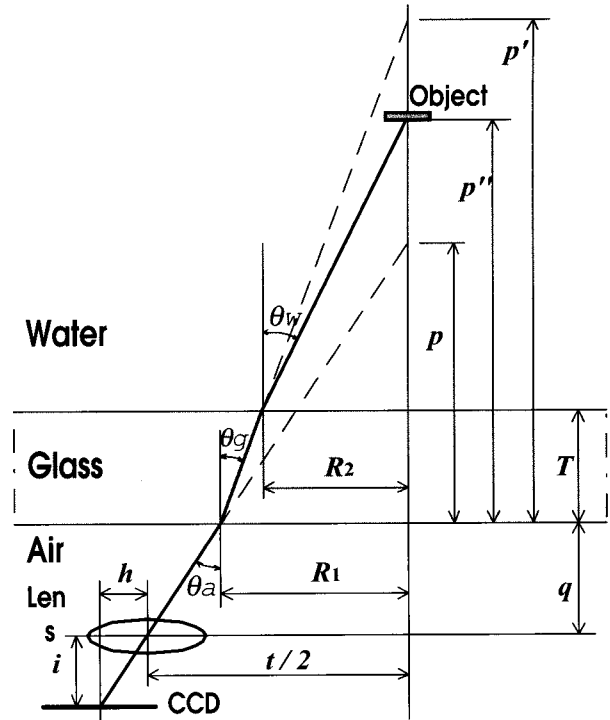


Fig. 3 Distance measurement of an underwater object with the underwater stereo camera

이 얻어진다.

$$\begin{aligned} p'/p &= \frac{\tan \theta_a}{\tan \theta_g} = \frac{\sin \theta_a \cos \theta_g}{\sin \theta_g \cos \theta_a} \\ &= k_1 \frac{p'}{i} \frac{\sqrt{i^2 + h^2}}{\sqrt{p'^2 + (t/2 - q \tan \theta_a)^2}} \end{aligned} \quad (9)$$

여기서, $k_1 = \sin \theta_a / \sin \theta_g$ 은 공기에서 관측창으로 투과하는 빛의 스넬(Snell) 비율이다. 영의 시차를 갖도록 카메라의 거리를 이동시키면 관측거리 p 는 식 (2)~(4)로부터 $p = it/2h - q$ 로 얻어진다. 따라서, 가상의 거리 p' 은 다음과 같이 정리된다.

$$p' = \sqrt{k_1^2 + (k_1^2 - 1)(h/i)^2} \left(\frac{ti}{2h} - q \right) \quad (10)$$

여기서 i, h, t 는 스테레오 카메라가 이동하는 거리량을 계측함으로써 구해지는 값들이므로, p' 은 계산이 가능한 값이다.

Fig. 3에서와 같이 R_1 과 R_2 를 정의하면, 다음과 같이 얻어진다.

$$R_1 = t/2 - qh/i \quad (11)$$

$$\begin{aligned} R_2 &= \frac{\tan \theta_g}{\tan \theta_w} = \frac{\sin \theta_g \cos \theta_w}{\sin \theta_w \cos \theta_g} \\ &= k_2 \frac{(p' - T) / \sqrt{(p' - T)^2 + R_2^2}}{p' \sqrt{R_1^2 + p'^2}} \end{aligned} \quad (12)$$

여기서, $k_2 = \sin \theta_g / \sin \theta_w$ 은 관측창에서 수중으로 투과하는 빛의 스넬(Snell) 비율이다.

식 (12)를 정리하면, 실제거리 p' 은 다음과 같이 얻어진다.

$$p'' = \frac{k_2}{p'} (p' - T) \sqrt{R_1^2 + p'^2 - (R_1/k_2)^2} + T \quad (13)$$

따라서, 관측창으로부터의 렌즈 거리 q 와 관측창 두께 T 는 상수이므로, 렌즈의 측면 이동 거리 h 와 카메라의 CCD 이동 거리 i 를 측정하면, 식 (10), (11), (13)으로부터 수중 물체의 실제 거리 p'' 을 얻을 수 있다.

관측창의 두께 T 가 영이 되는 이상적인 경우의 수중물체의 실제거리 관계식은 문헌 (Lee et al., 2000)에서 이상적인 경우에 대해 유도한 결과와 동일하게 된다.

4. 스테레오 카메라의 설계

본 논문에서는 카메라 초점 거리를 제어함과 동시에 렌즈의 거리를 제어하는 것을 기존의 방법(이 et al., 1999; Lee et al., 2000)과 같이 하나의 전동 모터를 이용하여 구현하며, 초점거리 변화에 따른 렌즈 거리 변화가 미소하게 범위 내에서 작동하므로 이의 실제적인 구현을 위하여 기계적인 증폭장치를 이용하여 제어의 정확도를 높이고, 수중 물체의 실제 거리와 카메라 초점거리 사이에 일대일 함수관계를 갖는 성질을 이용하여 수중 물체의 거리를 측정하는 방법을 개발하였다.

Fig. 4는 제안된 단동형 수중 스테레오 카메라의 작동 개념도로서, 수중 물체에 대한 입체영상을 얻기 위하여 모터와 모터에 연결된 볼 스크류를 회전시켜 카메라 베이스를 전후 방향으로 이동시키고, 카메라 전방부에 부착된 기계적인 슬라이딩 블록을 이용하여 카메라의 전후방향 거리 변화에 상응하는 렌즈의 이동거리를 기계적으로 구현하는 방법이다. 이러한 방법은 슬라이딩 블록의 정밀 가공이 필요하며, 슬라이딩 블록에 카메라 이동 방향으로의 힘이 발생하여 렌즈 베이스가 원활하게 대칭 이동하는 것이 어렵다. 따라서, 본 논문에서는 기계적인 증폭장치를 이용하여 스테레오 카메라 시스템을 구현한다.

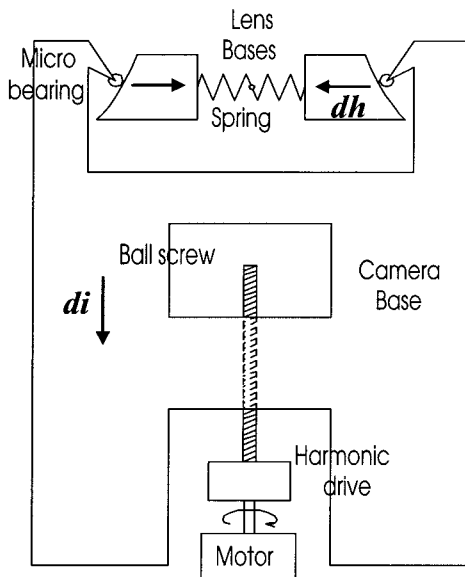


Fig. 4 Conceptual diagram of the under- water stereo camera

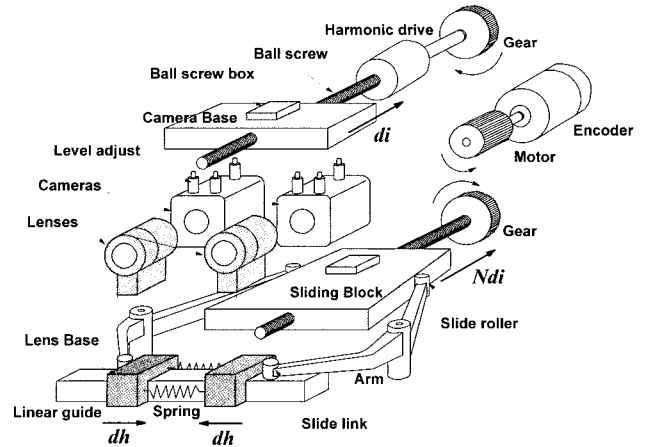


Fig. 5 Structure of the underwater stereo camera

Fig. 5는 원거리뿐만 아니라 근거리 물체에 대해서도 입체영상을 얻을 수 있는 스테레오 카메라의 기계적인 증폭장치의 내부 구성도를 나타낸다. 이 증폭장치는 엔코더가 장착된 모터를 제어함으로써, 모터 축에 연결된 기어를 통하여 상부 축계에 연결된 기어에 동력이 전달되며, 상부의 카메라 구동축은 하모닉 드라이브에 의하여 감속비 N 만큼 감속되고, 이에 연결된 볼 스크류가 볼 스크류 박스를 전진시키면서 카메라 베이스를 전·후진으로 이동시킨다. 이 카메라 베이스에 두 개의 카메라가 높이 조절을 위한 레벨 조정장치를 통하여 장착되므로, 모터를 제어함으로써 카메라의 초점거리가 제어된다.

한편, 하부에 연결된 기어는 볼 스크류를 회전시켜 볼 스크류 박스를 전·후진 시켜 슬라이딩 블록을 전·후진시킨다. 하부의 슬라이딩 블록의 전·후진 속도는 상부 카메라 베이스의 전·후진 속도 보다 N 배만큼 빠르게 움직이게 된다. 이는 카메라의 초점거리 변화에 대하여 하부 구동장치가 N 배 빠르게 움직이는 기계적인 증폭장치 역할을 한다.

이러한 기계적인 증폭장치는 백래쉬(backlash) 또는 기계적이유격에 의한 오차를 N 배만큼 감소시켜 정밀한 위치제어를 가능하게 하며, 슬라이딩 블록의 곡면이 완만한 경사를 가지므로 리니어 가이드 베어링에 수직인 방향으로 작용하는 힘의 크기를 N 배만큼 감소시켜 렌즈의 원활한 측면운동을 유도한다.

슬라이딩 블록의 전후진 운동을 렌즈의 측면방향 운동으로 변환하는 장치는 다음과 같다. 힌지 조인트에 연결된 레버의 양단을 슬라이딩 블록과 렌즈 베이스 사이에 설치하여 운동을 전달한다. 여기서, 슬라이딩 블록 접촉면에는 슬라이딩 롤러를 장착하고, 렌즈 베이스에 접하는 부분에 슬라이딩 링크를 설치하여 운동을 정확하게 전달한다. 이의 전달장치를 좌우의 렌즈 베이스에 대하여 대칭으로 구성한다. 두 개의 렌즈는 각각 리니어 가이드 베어링에서 측면운동을 하는 렌즈 베이스에 고정되어 렌즈 사이 거리가 조정되며, 두 개의 렌즈 베이스 사이에는 스프링을 장착하여 렌즈 베이스가 슬라이딩 링크에 접촉하게 한다.

본 논문에서, 카메라 베이스의 위치 변화량과 렌즈의 측면 위치 변화량은 모터에 장착된 엔코더의 회전 위치를 카운트하여 계산하고, 수중에서의 물체거리는 상술한 방법과 같은 관계

식을 이용하여 계산한다. 또한, 스테레오 카메라가 원거리 물체와 더불어 근거리의 물체에 대해서도 정확하게 작동하여 선명한 입체 영상을 구현할 수 있으므로, 수중에서의 물체 거리 측정도 모든 범위에 있어서 측정 가능하다.

수중에서의 사용을 위하여 Fig. 6과 같이 완성된 스테레오 카메라 시스템을 원통형의 내압 실린더에 내장하며, 전후에 방수 카버를 설치하고 "O" 링으로 방수를 구현한다. 투명 아크릴로 제작된 원추형의 평면 관측창을 카메라 전방에 설치하며, 원추형 실리콘 패드를 아크릴 창 사이에 삽입하여 방수한다. 뒷면의 방수 카버에는 방수 커넥터를 설치하여 모터 및 카메라 구동을 위한 제어 신호와 전원을 공급한다.

Fig. 7은 개발된 수중 스테레오 카메라와 입체영상 모니터를 나타내는 사진이다. 거리측정이 가능한 단동형 수중 스테레오 카메라로부터 얻어지는 수중의 스테레오 영상을 기존의 편광형 입체영상 모니터에 연결하고 편광 안경을 이용함으로써 수중에서의 3차원 입체영상을 구현할 수 있다. 모터에 부착된 엔코더의 위치 결과를 연산하여 수중 물체의 거리를 모니터 상에 디지털 값으로 표시함으로써 오퍼레이터가 수중 물체에 카메라의 초점을 맞추면 자동으로 입체영상과 함께 물체의 거리를 파악할 수 있다. 따라서, 단동형 수중 스테레오 카메라는

실린더 형태의 단일 시스템이므로 수중에서 작업하는 무인잠수정의 전방부 임의의 위치에 설치가 용이하며, 상하 고도와 좌우 각도를 조절할 수 있는 플랫폼에 본 수중 스테레오 카메라를 탑재하면 임의 방향의 수중 물체에 대해서도 수중의 전방위 입체영상장치를 저렴한 가격으로 구현할 수 있다.

5. 결 론

본 논문은 수중작업 시에 인간의 시각기능에 보다 충실한 형태의 영상정보를 제공하는 수중 입체카메라를 설명하였다. 평행하게 설치된 두 대의 카메라와 렌즈 시스템에 대하여, 하나의 전동 모터를 이용하여 두 대의 카메라를 전후 방향으로 제어함과 동시에 두 대의 렌즈를 측면 방향으로 제어함으로써, 수중의 원거리 물체를 비롯하여 근거리의 물체에 대해서도 3차

원의 입체 영상을 획득할 수 있는 장치이다. 초점거리 변화에 따른 렌즈 거리 변화가 미소 범위 내에서 작동하므로 이의 실제적인 구현을 위하여 이층 구조의 기계적인 증폭장치를 이용하여 렌즈 위치 제어의 정확도를 높이고 있다. 또한, 본 논문은 개발된 수중 스테레오 카메라는 관측창과 수중을 통과하면서 굴절되는 빛의 굴절률을 보상하여 수중 물체의 실제 거리 측정법을 유도하였다.

개발된 수중 스테레오 카메라는 ROV 등과 같은 무인잠수정에 장착이 용이하고 운용이 간편하므로, 수중에서의 로봇팔을 이용한 작업에 3차원 실감영상을 제공하여 작업의 효율성을 높일 수 있으며, 심해 과학조사를 위한 원격정밀탐사에 활용 가능성이 높다.

후 기

본 연구결과는 과학기술부 특정연구사업의 일환으로 수행된 "고성능 중작업용 수중 로봇 개발(III)" 연구 내용의 일부임을 밝혀 둔다.

참 고 문 헌

이용범, 권기철, 최영수, 홍석원(1999). "수중작업 성능 고도화를 위한 입체 시각시스템 개발", 한국해양공학회 '99추계학술강연 논문집, pp 113~117.

Coombs D. J. and Brown C. M. (1991). "Cooperative gaze holding in binocular vision", IEEE Control Systems Magazine, pp 24~33.

Fox, J. S. and Radhakrishnan, S. (1995). "Photometric stereovision in the ocean environment, in Underwater Robotic Vehicle: Design and Control", edited by J. Yuh, TSI Press, pp 251~261.

Hobson, P. R. and Watson J. (1999). "Accurate three-dimensional metrology of underwater objects using replayed images from in-line and off-line holograms", Measurement Science & Technology, Vol. 10, No. 12, pp 1153~1161.

Izquierdo, E. (1999). "Disparity/segmentation analysis: matching

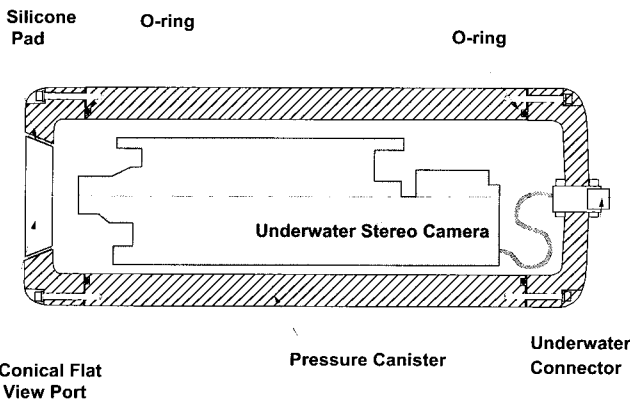


Fig. 6 Schematic diagram of the underwater stereo camera embedded in a single canister

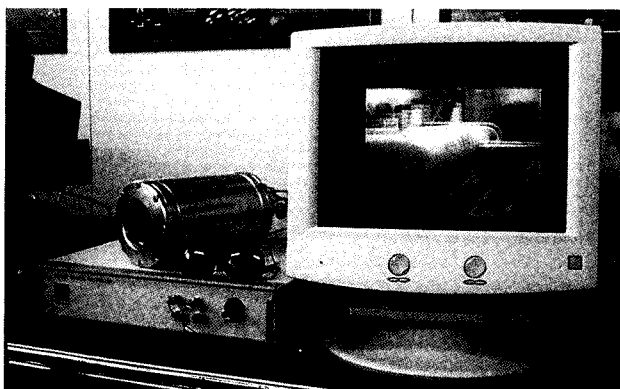


Fig. 7 Underwater stereo camera and stereo monitor.

- with an adaptive window and depth-driven segmentation”, *IEEE Trans. on Circuit and Systems for Video Technology*, Vol. 9, No.4, pp 589~607.
- Lee, P. M., Jeon, B. H., Hong, S. W., Lim Y. K., Lee, C. M., Park J. W. and Lee, C. M. (2000). “System design of an ROV with manipulators and adaptive control of it”, *Proc. of Underwater Technology 2000 Symposium*, May 23~26, Tokyo, Japan, pp 431~436.
- Ohm, J.-R., Gruneberg, K., Hendrick, E., Izquierdo, M. E., Kalivas, D., Karl, M., Papadimitos D. and Redert A. (1998). “A realtime hardware system for stereoscopic video conferencing with viewpoint adaptation, *Signal Processing: Image Communication*”, Vol. 14, pp 147~171.
- Park, S. Y., Lee, Y. B. and Chien, S. I. (1998). “Linear relation for vergence control of parallel stereo camera”, *IEE Electronics Letters*, Vol. 34, No.3, pp 255~256.
- ROV Committee of Marine Technology Society(MTS) (1998). “Operational effectiveness of unmanned underwater systems”, Edited by R. L. Wernli.
- Reid, I. D. and Beardsley, P. A. (1996). “Self-alignment of a binocular robot, *Image and Vision Computing*”, Vol.14, No. 8, pp 635~640.
- Singh, H., Weyer, F., Howland, J., Duester, A., Yoerger, D. and Bradley A. (1999). “Quantitative Stereo Imaging from the Autonomous Benthic Explorer (ABE)”, in *Proc. of Ocean 99*, Sep. 13, Seattle, Vol. 1, pp 52~57.
- Weast, A. B., Ota, J. M., Kitts, C. A., Bulich, C. A., Laurence, A. M., Lwin, V. M., Wigle, T. D., Perkins, W. B. and Cook, J. F. (1999). “Integrating digital stereo cameras with Mars pathfinder technology for 3D regional mapping underwater”, in *Proc. of the 1999 IEEE Aerospace Conference*, California, March 6, Vol. 5, pp 253~259.

2000년 11월 30일 원고 접수

2001년 1월 29일 수정본 채택