

비주얼 서보 자율무인잠수정의 수중 도킹에 관한 실험적 연구

이판목* · 전봉환* · 이계홍* · 김시문* · 홍영화**
* 한국해양연구원 해양시스템안전연구소 해양개발시스템연구본부
** 한국과학기술원 기계공학과

Experimental Study on Underwater Docking of a Visual Servoing Autonomous Underwater Vehicle

PAN-MOOK LEE*, BONG-HWAN JEON*, JI-HONG LEE*, SEA-MOON KIM* and YOUNG-HWA HONG**
* Ocean Development System Lab., Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, KORDI
** Dept of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science & Technology

KEY WORDS: Autonomous Underwater Vehicle (AUV) 자율무인잠수정, Visual Servo 비주얼 서보, Underwater Docking 수중 도킹, Underwater Positioning 수중위치추적

ABSTRACT: The Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering (KRISO), the ocean engineering branch of KORDI, has designed and manufactured a model of an autonomous underwater vehicle (AUV) to test underwater docking. This paper introduces the AUV model, ASUM, equipped with a visual servo control system to dock into an underwater station with a camera and motion sensors. To make a visual servoing AUV, this paper implemented the visual servo control system designed with an augmented state equation, which was composed of the optical flow model of a camera and the equation of the AUV's motion. The system design and the hardware configuration of ASUM are presented in this paper. A small long baseline acoustic positioning system was developed to monitor and record the AUV's position for the experiment in the Ocean Engineering Basin of KRISO, KORDI. ASUM recognizes the target position by processing the captured image for the lights, which are installed around the end of the cone-type entrance of the duct. Unfortunately, experiments are not yet conducted when we write this article. The authors will present the results for the docking test of the AUV in near future.

1. 서 론

자율무인잠수정(AUV)은 범용의 선박을 지원모션으로 사용할 수 있고 케이블에 의한 제약조건에 자유스러우므로, 광대역의 해양조사, 심해 해양과학 조사·관측, 해저구조물 추적 조사 등에 활발히 적용되고 있다. 최근에는 AUV가 해저 기지에 도킹하여 전원을 재충전하고 새로운 명령을 수령하며 계속한 신호를 해저기지에 공급할 수 있는 도킹시스템에 관한 연구가 활발히 진행 중이다 (Singh et al., 2001). 해저 도킹장치를 이용함으로써 AUV는 수중에서 장시간 작업이 가능해지며 AUV의 진수·인양을 위한 별도의 지원장치가 없이 해저 탐사작업이 가능해진다.

AUV가 해저기지에 도킹하기 위해서는 해저기지에 호밍하여 도킹장치에 정확히 도달해야 한다. AUV는 주어진 경로를 추적하면서 도킹장치에 도달하며, 도킹장치와 AUV의 상대적인 위치오차를 실시간으로 측정하여 제어입력으로 사용한다. 광학 센서, 관성 운동계측센서 (이판목 등, 1997) 또는 초음파 속도 센서 등 AUV의 위치와 운동 및 속도를 측정할 수 있는

많은 센서가 있다. 이러한 센서의 선택은 계속오차, 크기, 무게, 가격, 주파수 특성 및 AUV의 제어시스템을 어떻게 구성할 것인가에 따라 선택적으로 사용된다.

한국해양연구원에서는 심해의 극한환경에서 인간을 대신하여 다양한 정보를 얻기 위한 심해 무인잠수정의 국내개발을 진행 중이며(이판목 등, 2002), 심해무인잠수정 시스템 내에 소형 AUV의 도킹장치를 내장하도록 계획하였다. 본 연구에서 개발되는 AUV는 작업위치 근방 해역의 조사를 위하여 원통형 도크 장치로부터 진수되며, AUV는 작업수행 후에 런처에 도킹하여 충전 및 데이터 통신을 수행할 수 있다. 이러한 방식은 Remus AUV의 경우에도 사용된 바 있다(Stokey et al., 2001). 본 논문의 AUV는 선수부에 USBL (Ultra-Short Baseline, 초협대역 초음파 항법장치)과 한 개의 광학 카메라를 장착하여, USBL은 호밍을 위한 센서로 활용하고 광학 카메라는 도크에 도킹하는 최종단계에서의 항법·유도에 활용한다.

본 논문의 AUV는 한 개의 광학 카메라를 선수부에 장착하고 이를 이용하여 도킹 시스템을 구현하였다 (이판목 등, 2003). AUV에 장착된 카메라의 광유동 방정식과 AUV의 운동방정식이 혼합된 상태방정식으로부터 수중 도킹을 하는 시험을 수행하고자 한다. AUV 선수에 장착된 카메라는 eye-in-hand와 유사하나, AUV의 동역학이 포함되어 제어기를 구성해야 한다. 매니플레이터의 경우

제1저자 이판목 연락처: 대전시 유성구 장동 171
042-868-7532 pmlee@kriso.re.kr

는 카메라의 6자유도 운동이 직접 제어 가능하지만(Papanikolopoulos et al., 1993; 1995), AUV의 경우는 제어판을 이용하여 간접적으로 AUV 운동을 제어해야하는 점에 차이가 있다. AUV의 도킹을 위한 전략은 AUV가 도킹 과정에서 도킹용 덕트의 센터가 카메라의 센터와 일치하도록 제어판을 구동하는 방식이다.

한국해양연구원은 개발된 비주얼 서보 AUV의 성능 평가를 위하여 수조 내에서 도킹시험을 위한 AUV 모델을 제작하고 있다. 본 논문은 도킹을 위한 실험용 AUV의 구성과 시스템의 제작과정을 소개하고, AUV의 비주얼 서보를 위한 제어 시스템 구성과 이의 하드웨어에 대하여 설명하였다. 제작된 AUV는 단일 카메라를 이용하면서 수중 목표지점 인식을 위한 영상처리 기법에 대하여 기술하며, 수조에서의 AUV 위치추적을 위한 계측시스템에 대하여 간략히 설명하였다. 아쉽게도 본 논문이 만들어질 때까지 수조 실험이 이루어지지 않아 실험 결과는 추후 발표할 예정이다.

2. 비주얼 서보 AUV

선수부 중앙에 카메라를 장착한 AUV의 도킹을 위한 제어 시스템을 설계는 카메라의 광유동 방정식과 AUV의 운동방정식이 융합된 수학 모델로부터 유도된다. 카메라의 CCD 평면에 투영된 점 p 의 이미지 좌표 (y_i, z_i) 라 하고 AUV의 6자유도 운동을 (u, v, w, p, q, r) 라고 하면, AUV의 운동이 고려된 투영점 p 의 광유동 방정식은 다음으로 얻어진다(이판목 등, 2003).

$$\dot{y} = \frac{y}{X_w} u - \frac{f}{s_y X_w} v + \frac{s_z z}{s_y} p + \frac{s_z y z}{f} q - \left(\frac{f}{s_y} + \frac{s_y y^2}{f} + \frac{fL}{s_z X_w} \right) r \quad (1)$$

$$\dot{z} = \frac{z}{X_w} u - \frac{f}{s_z X_w} w - \frac{s_y y}{s_z} p + \left(\frac{f}{s_z} + \frac{s_z z^2}{f} + \frac{fL}{s_z X_w} \right) q - \frac{s_y y z}{f} r \quad (2)$$

여기서 f 는 카메라의 초점거리, s_y 와 s_z 는 CCD평면의 y 와 z 방향 비례 인자, X_w 는 타겟과의 거리를 나타낸다. 본 논문의 AUV는 선미의 수평타와 수직타를 이용하여 제어되므로, 수직면과 수평면에 대해 각각 독립적으로 제어가 가능하다고 가정하였다.

이미지 평면에 투영된 타겟의 변위 y 와 z , AUV의 각운동 성분 q, r 와 롤각 및 선수각 θ, ϕ 를 상태변수로 선정하고 제어입력으로 수직타 각도 δ_r 과 수평타 각도 δ_s 를 정하면, 광유동 방정식과 AUV의 운동방정식을 조합한 상태방정식이 다음으로 얻어진다.

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + Bu(t) + d(t) \quad (3)$$

여기서

$$x = \{y \ z \ q \ r \ \theta \ \phi\}^T$$

$$u = \{\delta_s \ \delta_r\}^T$$

$$A(t) = \begin{bmatrix} \frac{u}{X_w} & 0 & \frac{s_z y z}{f} & -\left(\frac{f}{s_y} + \frac{s_y y^2}{f} + \frac{fL}{s_z X_w}\right) & 0 & 0 \\ 0 & \frac{u}{X_w} & \left(\frac{f}{s_z} + \frac{s_z z^2}{f} + \frac{fL}{s_z X_w}\right) & -\frac{s_y y z}{f} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{M_y}{I_w - M_y} & 0 & \frac{M_\theta}{I_w - M_\theta} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{N_r}{I_z - N_r} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & M_{\delta_s} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & N_{\delta_r} & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

$$d(t) = \begin{bmatrix} -\frac{f y}{s_y X_w} + \frac{s_z z p}{s_y} \\ \frac{f w}{s_z X_w} - \frac{s_y y p}{s_z} \\ \Delta f_q \\ \Delta f_r \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

AUV의 전진속도가 일정하다고 가정하고 식 (3)의 상태방정식을 이산화하면, k -번째 시간 스텝에서 비주얼 서보 AUV의 이산 상태방정식은 다음과 같다.

$$x(k+1) = \Phi(k)x(k) + \Gamma u(k) + d(k) \quad (4)$$

$$y(k) = Cx(k) + w(k) \quad (5)$$

비주얼 서보 AUV가 목표물인 덕트에 도킹하기 위한 전략은 덕트 센터가 카메라의 CCD 평면 중앙에 위치하도록 AUV의 각도를 제어하는 것이다. 온라인으로 타겟 위치를 추정하고 제어하기 위해서는 타겟의 영상을 실시간으로 처리하는 것이 필요하다.

AUV가 천천히 움직인다고 가정하였으므로, 이산 상태방정식 (4)과 (5)를 조합하고 k 번째 시간스텝의 관측값 $y(k)$ 에서 $k-1$ 번째 시간스텝의 관측값 $y(k-1)$ 을 빼면 다음과 같은 관계식이 얻어진다.

$$(A_0 + A_1(k)q^{-1} + A_2(k)q^{-2})y(k) = \Gamma u(k-1) - \Gamma u(k-2) + n(k) \quad (6)$$

여기서, $A_0 = I$, $A_1 = -I - \Phi(k)$, $A_2 = \Phi(k)$ 이고, $n(k)$ 는 계측오차와 모델링 오차를 포함하는 백색잡음이다. 비주얼 서보 AUV의 제어기는 식(6)으로 주어지는 모델에 대하여 설계가 이루어졌다. $k+1$ 번째의 제어입력 $u(k)$ 와 $k+1$ 번째의 측정값 $y(k+1)$ 과 이때에 요구되는 비주얼 서보 AUV의 상태변수 $y_D(k+1)$ 의 차이를 포함하는 가격함수를 최소화하는 방법으로 제어기를 설계하였다. 이에 따라 제어입력은

$$u(k) = -(\Gamma^T Q \Gamma + L_u)^{-1} [\Gamma^T Q \{-A_1(k)y(k) - A_2(k)y(k-1) - y_D(k+1) - \Gamma u(k-1)\}] \quad (7)$$

로 얻어진다. 식(7)에 포함되어 있는 $A_1(k)$ 과 $A_2(k)$ 는 매 시간 스텝마다 변화하는 타겟의 거리 정보를 필요로 하므로, 이의 추정이 필요하다. 본 논문에서는 도킹용 덕트 주변에 설치된 5개의 광원을 설치하여 타겟 거리정보를 추정하였다.

3. 도킹 시험용 AUV 제작 및 실험장치

3.1 도킹 시험용 AUV SAUM 제작

한국해양연구원에서 도킹 알고리즘 개발과 수조 시험용으로 제작중인 AUV는 ASUM (Advanced Small Underwater Model)이라 칭하였다. ASUM은 도킹 시험을 위한 기본 장비들을 장착하고 있다. ASUM의 기본설계사양은 해양연구원의 시설인 해양공학수조나 수심 20m 이하의 호수나 바다에서 한 사람이 다루기에 알맞도록 설정되었다. 도킹시험을 위한 기본 장비들을 탑재할 수 있는 용적과 여유부력을 가지도록 고려하였다. Table 1에 그 기본 설계사양을 나타내었다.

Table 1 Specifications of ASUM

Dimension (L×d)	1,200×170mm
Operating Speed	3 knots (max. 4 knots)
Max. Thrust	9.28N (50W@2.15m/s)
Batteries	Lead Acid >84Wh
Max. Working Depth	20 m
Operating Time (except hotel power)	3 hours@2knots, 2 hours@3knots, 1 hour @4knots

선수코는 도킹시 충격을 가장 먼저 받는 부분으로 충격 흡수를 위해 폴리우레탄으로 제작되었으며 콘 내부에는 물이 채워지는 구조이다. 중앙선체는 O-ring에 의한 방수구조를 갖는 내압실린더이며 축전지를 포함한 각종 전기·전자장비를 탑재한다. 선미코는 프로펠러와 제어판을 구동하기 위한 액츄에이터를 탑재하며, 회전축계의 수밀을 용이하게 하기 위하여 유적식으로 설계하였다. Fig. 1은 3-D로 모델링된 ASUM의 장비배치를 나타내었다.

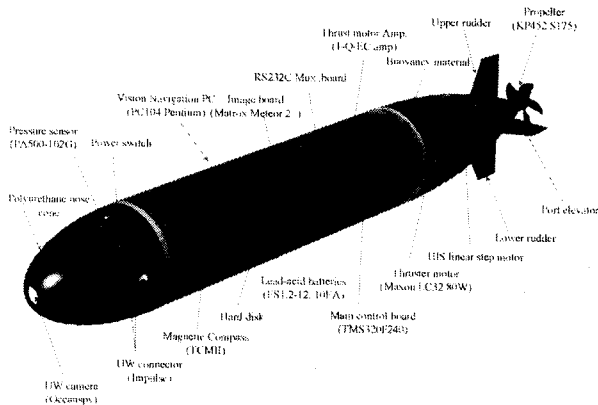


Fig. 1 3-D Allocation of the equipment of ASUM (Front-side view)

ASUM의 3-D 그래픽 모델링을 통하여 총 체적과 부력중심을 구하고, 실측이 어려운 일부 부품의 무게를 추정하였다. 실측이 가능한 장비는 실측하여 총중량과 중량중심의 계산에 이용하였다. 총부력은 20.12kg, 총중량은 19.1kg으로 추정되어 약

1kg의 여유부력을 가지는 것으로 나타났다. 무게중심은 부력중심보다 16.4 mm 앞쪽에 위치하고, 선체의 센터라인으로부터 7.9 mm 아래에 위치한다.

ASUM은 일반적으로 널리 쓰이는 저가의 연속전지를 이용하며, 선정된 축전지는 세방전지의 ES1.2이며 10개를 이용하여 24V 6Ah의 용량을 얻도록 하였다. 선체중 선수코는 폴리우레탄으로 제작되었으며 이외는 모두 알루미늄으로 제작되었다. 가공된 기계부품들 중에서 수중에 노출되는 부분은 모두 아노다이징 처리하였다.

기계조립 이후 ASUM의 수조시험을 위하여 내부 전자 장비를 탑재하였으며 이들의 배선작업이 이루어졌다. Fig. 2는 외형 조립이 완성된 ASUM의 모습을 나타내고 있다.

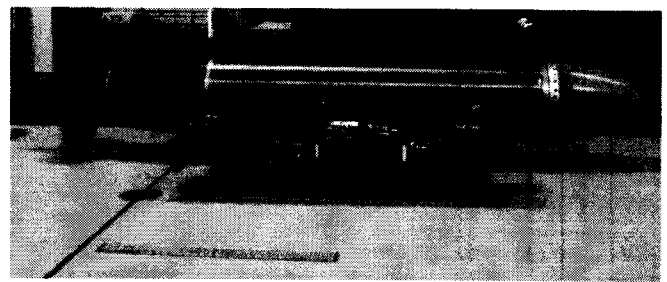


Fig. 2 Assembled ASUM and embedded processors and equipment

조립이 완료된 ASUM에 대하여 선미 구동부 색선에 기름을 채워 넣지 않은 상태에서 중량분포 상태를 점검하였다. Fig. 3는 발라스팅 장면을 보이는 사진이며, 선미부에 500g의 기름을 적재할 경우에 수평이 되도록 중량을 배치하였고, ASUM은 유적할 경우에 약 1kg의 여유부력을 갖는다.



Fig. 3 Ballasting test of ASUM in a basin.

3.2 제어기 하드웨어의 구성

ASUM은 비주얼 서버 도킹알고리즘의 구현을 위하여 영상 신호와 함께 자세 및 수심 신호를 요구한다. 카메라로부터 얻어지는 비전신호, 압력센서로부터의 수심을 나타내는 압력정보, 컴퍼스, 롤, 피치 센서로부터의 정보 등의 신호가 입력되고, 주 추진 모터의 구동을 위한 속도신호 및 수평타와 수직타의 움직임을 제어하기 위하여 출력신호가 생성된다. 이러한 기능들을 포함하는 소형의 컨트롤러를 제작할 필요에 따라 Fig.

4의 구성을 갖는 TMS320F240 마이크로프로세서를 기반으로 하는 주 컨트롤러를 설계·제작하였다.

AUV의 주 컨트롤러의 입력으로 연결되는 장비로는 PC104 버스 방식의 컴퓨터, 컴퍼스, 롤, 피치를 알 수 있는 센서와 수

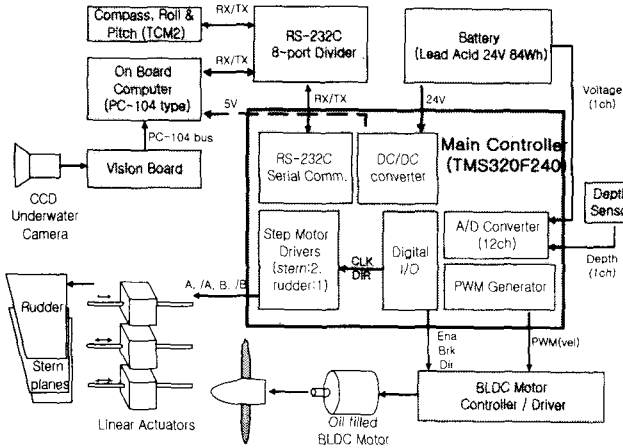


Fig. 4 Block diagram of the visual servoing AUV.

심을 알 수 있는 압력센서가 있다. PC104+ 버스를 갖는 컴퓨터는 비전영상을 처리하기 위한 장비로 사용된다. 카메라로부터 얻어지는 영상신호를 직접 처리하게 되는 비전보드가 동일하게 PC104+컴퓨터에 탑재되어 사용하였다. 운영체제는 Microsoft Windows 98을 채택하였으며, 시스템의 운용을 편리하게 하기 위하여 이더넷을 통하여 프로그램을 다운로드 할 수 있게 설계하였다.

PC104+ 컴퓨터와 비전보드는 PCM-3350 (Geode GX1-300MHz based)와 Matrox Meteor2+/4를 사용하였고, 자기 컴퍼스 신호와 롤, 피치 신호를 센서 내의 마이크로프로세서를 통하여 처리하여, RS-232C 시리얼 통신을 통해 주 컨트롤러에 전달하게 된다. 압력센서는 AUV의 내압선체의 선수부 뚜껑에 장착하였다.

AUV의 주 컨트롤러는 마이크로프로세서부분, 스텝모터 드라이버부분, DC-DC 변환기 부분으로 나눌 수 있으며, 마이크로프로세서부분은 기능별로 다시 나누어 디지털 입/출력 부분 (Digital I/O), PWM(pulse width modulation) 발생부분, RS-232C 통신부분, 그리고 AD 변환기 부분으로 나눌 수 있다. 디지털 입/출력 부분은 리니어 스텝모터의 제어 출력을 내보내고, 원점 센서로부터의 신호를 받도록 설계되었으며, PWM 발생부분은 주 추진 모터의 드라이버의 속도 입력으로 사용되도록 하였다. RS-232C부분은 본 연구를 위해 설계, 제작한 RS-232C 통신 8포트 분배기와 연결되어 컴퍼스, 롤, 피치 센서의 입력과, 비전 신호처리용 컴퓨터와의 데이터 전송 등에 사용되며, AD 변환기 부분은 압력센서의 아날로그 신호나, 배터리의 전압을 측정하도록 설계되었다.

스텝모터 드라이버 부분은 방향타 구동부의 bipolar type 리니어 스텝모터를 구동할 수 있도록 bipolar type으로 설계하였다. Bipolar type 드라이버는 unipolar type의 드라이버 보다 약 1.4배의 토크를 낼 수 있다.

3.3 수조내 위치추적장치

ASUM의 해양공학수조 내에서의 위치추적을 위해서 한 개의 핑어와 네 개의 하이드로폰을 이용한 위치추적 시스템을 Fig. 5와 같이 구성하였다. 하이드로폰은 B&K사의 Type 8103 모델을 이용하였으며 이중 세 개는 표면에서 약 50cm 떨어진 위치에 동일한 수심에서 'ㄱ'자 모양을 이루도록 고정하였으며 나머지 한 개는 수심방향의 해상도를 증가시키기 위하여 수심 약 3m의 위치에 고정하였다. 핑어는 자유로운 이동을 위해서 20m 케이블을 갖는 B&K 8103V 모델을 사용하였다.

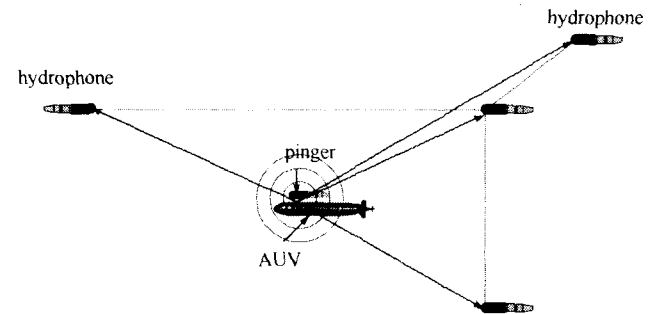


Fig. 5 Conceptual picture of acoustic navigation system for the Ocean Engineering Basin.

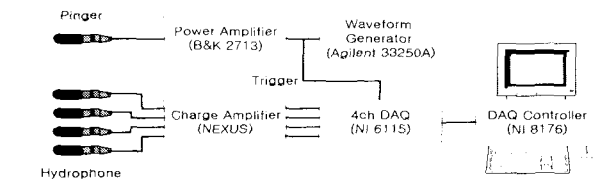


Fig. 6 Detailed configuration of acoustic navigation system for the Ocean Engineering Basin.

Fig. 6는 세부적인 시스템 구성도를 나타낸다. 먼저 파형발생기(Agilent 33250A)에서 펄스폭이 10 μ s인 Hanning window형상의 펄스파를 0.1초(생성 주파수: 10Hz) 간격으로 생성한 후 파워증폭기(B&K 2713)를 통해 증폭시켜 핑어를 구동한다. 수조 내에서 전파된 펄스는 거리차이에 의해서 서로 다른 시간에 하이드로폰에 수신된다. 수신음압 신호는 전하증폭기(NEXUS)에서 증폭된 후 제어컴퓨터(NI 8176)에 연결되어 있는 4채널 데이터 수집장치 (NI PXI-6115)에서 측정된다. 이때 샘플링 주파수는 1MHz이며 신호발생기 신호를 트리거 신호로 입력받아 20ms(거리 약 30m에 해당하는 시간)동안 수집하여 펄스 지연시간을 측정하여 저장한다. 이를 바탕으로 ASUM의 위치를 Matlab 프로그램을 이용하여 계산한다. 상세한 위치추적 알고리즘 및 시뮬레이션에 대한 결과는 별도의 논문으로 발표하였다(김시문 등, 2003).

3.4 도크 제작 및 목표물 인식

한편, ASUM을 이용한 도킹 수조시험을 위하여 시험용 토크를 제작하였다. 도크는 깔대기 형태의 입구 모양을 가져 AUV

가 도킹 중단에 위치오차를 어느 정도 갖게 되는 경우에도 도킹이 이루어질 수 있도록 제작하였다. Fig. 6은 제작된 도크를 보이는 사진이다. 전면부에 비주얼 서보를 적용하기 위해 다섯 개의 수중 라이트를 장착하였으며 라이트의 밝기 조절이 가능하도록 제작하였다.

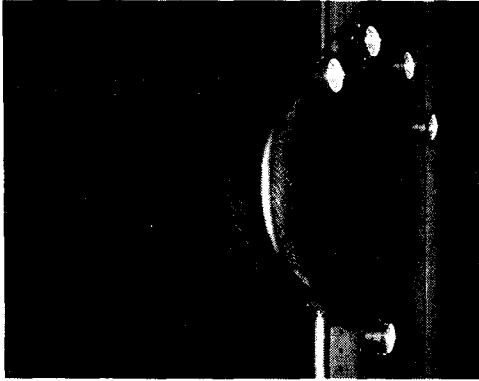


Fig. 7 A funnel with the cone and lights for ASUM docking.

수중 라이트의 위치는 가변적으로 조절이 가능하도록 제작되었으며, 영상처리를 통하여 타겟의 위치추정을 여러 가지 방법으로 시도할 예정이다. Fig. 8은 단순하게 십자형으로 라이트를 덕트 입구 주변에 배치하였을 경우에는 서로 대칭으로 있는 라이트를 지나는 두개의 직선이 교차하는 위치가 타겟의 센터이며, 라이트 사이의 간격과 카메라 CCD평면에 투영된 라이트 이미지로부터 거리를 추정할 수 있다. 여기서 5번 라이트는 덕트의 방향을 찾기 위한 것이다. 아쉽게도 수조 실험이 아직 이루어지지 않았으나, 실험을 수행한 후에 결과를 발표할 예정이다.

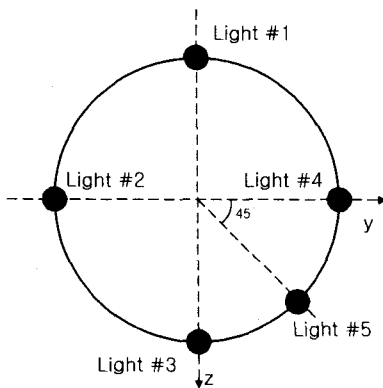


Fig. 8 Lights allocation for the landmark of the target.

5. 결 론

본 논문은 해저기지에 도킹하는 AUV의 비주얼 서보 제어에 관한 실험적 방법을 기술하였다. 수중 도킹을 위하여 AUV의 선수에 한 개의 카메라를 장착하고 AUV의 자세 계측용 센서를 탑재한다. 본 논문은 영상신호와 자세신호를 이용하고 카

메라의 CCD 평면에 투영되는 덕트의 위치정보에 관한 광유동 방정식과 AUV의 운동방정식이 융합된 상태방정식을 이용하여 최적제어를 수행하는 방법을 적용하였다. 수중 목표물의 인식은 목표물 주변에 설치된 라이트 신호를 영상처리하여 얻는 방법을 제안하였다. 수조에서의 수중 도킹 성능시험을 위하여 AUV 모델을 제작하였으며, 본 논문은 제작된 AUV의 시스템 제작과 하드웨어 구성에 대하여 설명하였다. 또한, 수조 실험에서 위치 모니터링을 위한 초음파 위치추적장치에 대하여 간략히 소개하였다. 실험 결과는 추후 발표할 예정이다.

후 기

논문은 한국해양연구원이 해양수산부의 지원으로 수행중인 "차세대 심해용 무인잠수정 개발 (II)" 과제 연구결과의 일부임을 밝히는 바이다.

참 고 문 헌

- 김시문, 이판목, 이종무, 임용곤(2003). "세 개의 트랜스폰더로 이루어진 장기선 위치추적장치의 민감도 해석", 한국해양공학회 2003 춘계학술대회, 제주대학교, 5.23~24.
- 이판목, 양승일, 홍석원 외(2002). "차세대 심해용 무인잠수정개발", 한국해양연구원 연구보고서 UCM0250-2368.
- 이판목, 전봉환, 이종무(2003). "자율무인잠수정의 수중 도킹을 위한 비주얼 서보 알고리즘", 한국해양공학회지 제17권 제1호, pp. 1~7.
- 이판목, 전봉환, 이종식, 오준호, 김도현(1997). "AUV의 운동계측을 위한 스트랩다운형 관성계측장치(IMU)의 개발", 한국해양공학회지, 제11권 1호, pp. 99-105.
- 전봉환, 이판목, 이종무(2003). "AUV의 수중 호밍·도킹 매카니즘에 대한 연구", 한국해양공학회 2002년 춘계학술대회논문집, pp. 263 (별쇄본).
- Papanikolopoulos, N. P. and Khosla, P. K.(1993). "Adaptive robotic visual tracking: Theory and Experiments," *IEEE Trans. Automatic Control*, Vol. 38, No. 3, pp. 429-445, March.
- Papanikolopoulos, N. P., Nelson, B. J. and Khosla, P. K. (1995). "Six degree-of-freedom hand/eye visual tracking with uncertain parameters," *IEEE Trans. Robot. Automat.*, Vol. 11, No. 5, pp. 725-732, Oct.
- Singh, H., Bellingham, J. G., Hover, F., Lerner, S., Moran, B. A., von der Heydt, K. and Yoerger, D.(2001). "Docking for an autonomous ocean sampling network," *IEEE J. of Oceanic Eng.*, Vol. 26, No. 4, pp. 498-514, Oct.
- Stokey, R., Allen, B., Austin, T., Goldsborough, R., Forrester, N., Purcell, M. and von Alt, C. (2001). "Enabling technologies for REMUS docking: An integral component of an autonomous ocean-sampling network," *IEEE J. of Oceanic Eng.*, Vol. 26, No. 4, pp. 487-497, Oct.