

단일 카메라를 이용한 비주얼 서보 자율무인잠수정의 수중 도킹

이판목*, 전봉환(한국해양연구원), 홍영화, 오준호(KAIST), 김시문, 이계홍(한국해양연구원)

Underwater Docking of a Visual Servoing Autonomous Underwater Vehicle Using a Single Camera

P. M. Lee, B. H. Jeon(Ocean Development Sys. Lab., KRISO-KORDI), Y. H. Hong, J. H. Oh(Mech. Eng. Dept., KAIST), S. M. Kim, J. H. Lee(Ocean Development Sys. Lab., KRISO-KORDI),

ABSTRACT

This paper introduces an autonomous underwater vehicle (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. 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 AUV docking test.

Key Words : Visual Servoing (비주얼 서보), Autonomous Underwater Vehicle(AUV) (자율무인잠수정), Underwater Docking (수중도킹), Optical Flow Equation (광유동방정식), Image Processing (영상처리)

1. 서론

자율무인잠수정(AUV)은 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.^[1] AUV가 해저기지에 도킹하기 위해서는 해저기지에 호밍하여 도킹장치에 정확히 도달해야 한다.

한국해양연구원에서는 심해의 극한환경에서 인간을 대신하여 다양한 정보를 얻기 위한 심해 무인잠수정^[2]의 국내개발을 진행 중이며, 심해무인잠수정 시스템 내에 소형 AUV의 도킹장치를 내장하도록 계획하였다. 이 연구에서 개발되는 AUV는 작업위치 근방 해역의 조사를 위하여 원통형 도킹 장치로부터 진수되며, AUV는 작업수행 후에 런처에 도킹한다.

이러한 방식은 Remus AUV의 경우에도 사용된 바 있다.^[3] 본 논문의 AUV는 선수부에 USBL (Ultra-Short Baseline)과 한 개의 광학 카메라를 장착하여, USBL은 호밍을 위한 센서로 활용하고 광학 카메라는 도킹 최종단계에서의 항법·유도에 활용한다.

본 논문에서 AUV는 한 개의 광학 카메라를 선수부에 장착하고 이를 이용하여 도킹 시스템을 구현하였다. AUV에 장착된 카메라의 광유동 방정식과 AUV의 운동방정식이 혼합된 상대방정식을 이용하여 수중도킹 시험을 수행하고자 한다. AUV의 카메라는 eye-in-hand와 유사하나, AUV의 동력학이 포함된 제이기를 구성해야 한다. 메니플레이터의 경우는 카메라의 6자유도 운동이 직접 제어 가능하지만,^[4] AUV의 경우는 제어관을 이용하여 간접적으로 AUV 운동을 제어해야 하는 점에 차이가 있다.

한국해양연구원은 비주얼 서보 AUV의 성능 평가를 위하여 수조 내에서 도킹시험을 위한 AUV 모델을 제작하였다. 본 논문은 도킹을 위한 실험용

AUV 시스템의 비주얼 서보를 위한 제어 시스템 구성과 이의 하드웨어에 대하여 설명하였다. 단일 카메라를 이용하면서 수중 목표지점 인식을 위한 영상 처리 기법과 위치계측에 대하여 설명하며, 수조 시험결과를 정리할 계획이다.

2. 비주얼 서보 AUV

선수부 중앙에 카메라를 장착한 AUV의 도킹을 위한 제어 시스템의 설계는 카메라의 광유동 방정식과 AUV의 운동방정식이 융합된 수학 모델로부터 유도된다. Fig. 1은 본 논문의 AUV의 좌표계를 나타내

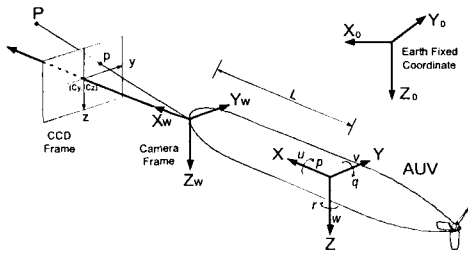


Fig. 1 Coordinate of the visual servoing AUV.

는 그림이다. 카메라의 CCD 평면에 투영된 점 p 의 이미지 좌표 (y, z) 라 하고 AUV의 6자유도 운동을 (u, v, w, p, q, r) 라고 하면, AUV의 운동이 고려된 투영점 p 의 광유동 방정식과 AUV의 운동방정식을 조합한 상태방정식은 다음으로 얻어진다.^[5]

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + B u(t) + d(t) \quad (1)$$

여기서

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

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

$$A(t) = \begin{bmatrix} -\frac{u}{X_w} & 0 & \frac{s_y z}{f} & -(\frac{f}{s_x} + \frac{s_y v^2}{f} - \frac{f l_x}{s_x X_w}) & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{u}{X_w} & (\frac{f}{s_x} + \frac{s_y z^2}{f} + \frac{f l_x}{s_x X_w}) & -\frac{s_y y z}{f} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{M_r}{I_x - M_x} & 0 & \frac{M_p}{I_x - M_x} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{N}{I_x - N_x} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

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

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

여기서 f 는 카메라의 초점거리, s_y 와 s_x 는 CCD평면의 y 와 z 방향비례 인자, X_w 는 타겟과의 거리를 나타내며, y 와 z 는 이미지 평면에 투영된 타겟의 변위, θ 와 ϕ 는 AUV의 물각 및 선수각, δ_r 과 δ_s 는 수직타 및 수평타 각도이다.

AUV의 전진속도가 일정하다고 가정하고 식(1)의 상태방정식을 이산화하면, k -번째 시간 스텝에서 비주얼 서보 AUV의 이산 상태방정식은 다음과 같다.

$$x(k+1) = \Phi(k)x(k) + \Gamma u(k) + d(k) \quad (2)$$

$$y(k) = Cx(k) + w(k) \quad (3)$$

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

비주얼 서보 AUV의 이산 상태방정식 (2)와 (3)을 조합하여 ARMA 모델을 만들고, $k+1$ 번째의 측정값 $y(k+1)$ 과 AUV의 요구되는 상태변수 $y_d(k+1)$ 의 차이를 포함하는 가격함수를 최소화하는 제어입력은

$$u(k) = -(\Gamma^T Q \Gamma + L_u)^{-1} [\Gamma^T Q \{-A_1(k)y(k) - A_2(k)y(k-1) - y_d(k+1) - \Gamma u(k-1)\}] \quad (4)$$

로 얻어진다. 여기서, $A_0 = I$, $A_1 = -I - \Phi(k)$, $A_2 = \Phi(k)$ 이다. 식(4)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 ASUM

3.1 ASUM 및 제어기 제작

한국해양연구원에서 제작중인 비주얼 서보 AUV는 ASUM (Advanced Small Underwater Model)이라 칭하였다. ASUM은 도킹 시험을 위한 기본 장비들을 장착하고 있다. ASUM의 기본설계사양은 수심 20m 이하의 호수나 바다에서 한사람이 다루기에 알맞도록 선정되었다. Table 1에 ASUM의 기본 설계사양을 나타내었다.

ASUM의 총부력은 20.12kg이며 약 1kg의 여유부력을 가진다. 도킹시험을 위한 기본장비들을 탑재할 수 있는 용적과 여유부력을 갖도록 고려하였다. 무게중심은 부력중심보다 16.4 mm 앞쪽에 위치하고, 선체의 센터라인으로부터 7.9 mm 아래이다. 전원은 일반적으로 널리 쓰이는 저가의 연축전선을 이용하

Table 1 Specifications of ASUM

Dimension (L×d)	1,200×170 mm
Weight	20.120 kg
Operating Speed	3 knots (max. 4 knots)
Max. Thrust	9.28 N (50W@2.15 m/s)
Batteries	Lead Acid > 84 Wh
Max. Working Depth	20 m
Operating Time (except hotel power)	3 hours @ 2 knots
	2 hours @ 3 knots
	1 hour @ 4 knots

며, 24V 6Ah의 용량을 갖는다. 선수콘은 도킹시 충격을 가장 먼저 받는 부분으로 충격 흡수를 위해 폴리우레탄으로 제작되었으며 큰 내부에는 물이 채워지는 구조이다. 중앙선체는 O-ring에 의한 방수구조를 갖는 내압실린더이며 축전지를 포함한 각종 전기·전자장비를 탑재한다. 선미콘 색션은 프로펠러와 제어판을 구동하기 위한 액추에이터를 탑재하며, 회전축계의 수밀을 용이하게 하기 위하여 유직식으로 설계하였다. Fig. 2는 외형 조립이 완성된 ASUM의 모습을 나타내고 있다.

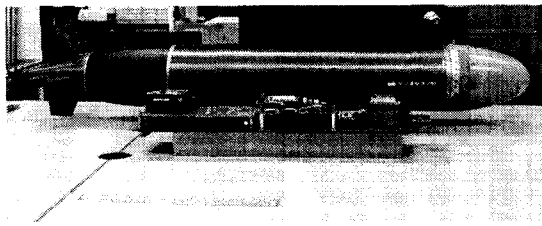


Fig. 2 Assembled ASUM and embedded processors and equipment

ASUM은 비주얼 서보 도킹알고리즘의 구현을 위하여 영상신호와 함께 자세 및 수심 신호를 요구한다. 카메라로부터 얻어지는 비전신호, 압력 신호, 컴퍼스, 물, 피치 센서의 신호가 입력되고, 주추진 모터와 방향타의 구동을 위한 속도신호 및 각도신호가 생성된다. 이러한 기능들을 포함하는 소형의 컨트롤러를 TMS320F240 마이크로프로세서 기반으로 제작하였으며, 확장성을 고려하여 설계하였다.

AUV의 주 컨트롤러는 마이크로프로세서부분, 스텝모터 드라이버부분, DC-DC 변환기 부분으로 나눌 수 있으며, 마이크로프로세서부분은 기능별로 다시 나누어 디지털 입/출력 부분, PWM(pulse width modulation) 발생부분, RS-232C 통신부분, 그리고 AD 변환기 부분으로 나눌 수 있다. RS-232C부분은 본 연구를 위해 설계, 제작한 RS-232C 통신 8포트 분배기와 연결된다. AD는 12채널이며 10bit 해상도로 신호취득이 가능하다.

3.2 수조내 위치추적장치

ASUM의 해양공학수조 내에서의 위치추적을 위해서 한 개의 핑어와 네 개의 하이드로폰을 이용한 위치추적 시스템을 구성하였다. 위치추적 시스템은 LBL (Long baseline) 기법을 이용하였다. 하이드로폰 세 개는 표면에서 약 50cm 떨어진 위치에 동일한 수심에서 '1'자 모양을 이루도록 고정하였으며 나머지 한 개는 수신방향의 해상도를 증가시키기 위하여 수심 약 3m의 위치에 고정하였다.

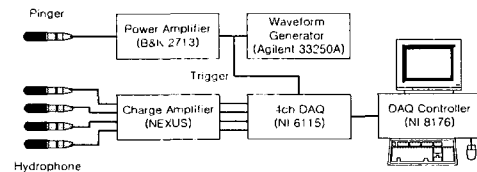


Fig. 3 Detailed configuration of acoustic navigation system for the Ocean Engineering Basin.

Fig. 3은 세부적인 시스템 구성도를 나타낸다. 파형발생기에서 펄스폭이 10μ인 Hanning window형상의 펄스파를 0.1초 간격으로 생성한 후 파워증폭기를 통해 증폭시켜 핑어를 구동한다. 수조 내에서 전파된 펄스는 거리차이에 의해서 서로 다른 시간에 하이드로폰에 수신된다. 수신음압 신호는 진하증폭기에서 증폭된 후 제어컴퓨터에 연결되어 있는 4채널 데이터 수집장치에서 측정된다. 이때 샘플링 주파수는 1MHz이며 신호발생기 신호를 트리거 신호로 입력받아 20ms(거리 약 30m에 해당하는 시간)동안 수집하여 펄스 지연시간을 측정하여 지장한다. 이를 바탕으로 ASUM의 위치를 Matlab 프로그램을 이용하여 계산한다.

3.3 도크 제작 및 수중도킹 시험

ASUM을 이용한 도킹 수중시험을 위하여 시험용 도크를 제작하였다. 도크는 깔대기 형태의 입구 모

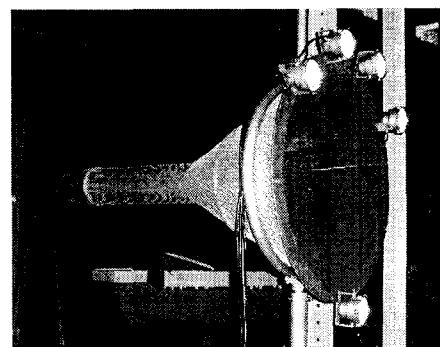


Fig. 4 A funnel with the cone and lights for ASUM docking.

양을 가져 AUV가 도킹 중단에 위치오차를 어느 정도 갖게 되는 경우에도 도킹이 이루어질 수 있도록 제작하였다. Fig. 4는 제작된 도크를 보이는 사진이다. 전면부에 비주얼 서보를 적용하기 위해 다섯 개의 수중 라이트를 장착하였으며 라이트의 밝기 조절이 가능하도록 제작하였다. 수중 라이트의 위치는 가변적으로 조절이 가능하도록 제작되었다.

3.3.1 비전센서를 이용한 도크의 위치 자세 인식

비전센서를 통해 알아내야 할 도크의 3차원 정보는 3개의 위치정보(Translation)와 3개의 자세정보(Rotation)이다. 3차원 공간상의 도크와 카메라, 영상면으로 이루어 지는 비전시스템의 모델은 Fig. 5와 같다.

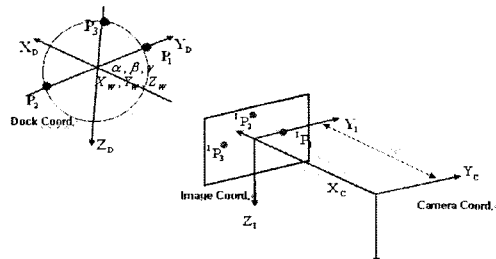


Fig. 5 Coordinates of vision system

본 논문에서는 도크 좌표계상의 도크 원주위에 Fig. 6과 같이 원주의 각을 5등분하도록 발광체를 설치하고, 그 하단에 한 개의 발광체를 설치. 총 6개의 발광체를 설치한 후 카메라로부터 얻어지는 도크상의 발광체의 256 그레이 레벨 영상을 2진화시켜 발광체 부분만을 특성점으로 얻었다. 이렇게 찾아낸 6개의 특성점을 구분하기 위해 각 특성점 영상간의 거리와 각도 정보를 이용하였다.

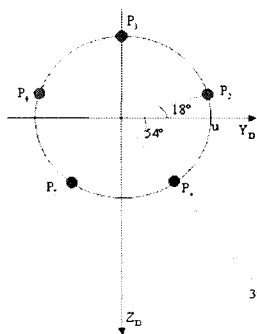


Fig. 6 Arrangement of the lights on dock

3차원상의 임의의 원의 지름과 그 원을 2차원평면상에 평면투영한 타원의 장축의 길이는 같다는 기하학적 사실을 이용하였다. 얻어낸 특성점 중 원주상에 있는 5개의 특성점의 영상좌표를 이용, 특성점

이 이루는 일반적인 타원의 방정식을 설정하였다.

$$y^2 + Az^2 + Byz + Cy + Dz + E = 0 \quad (8)$$

타원의 장축의 길이와 실제 도크의 지름의 길이를 비교하면 카메라와 도크간의 거리(X)를 알 수 있으며 도크 좌표계와 카메라 좌표계간의 원근관계와 Z-Y-X Euler각을 이용한 회전관계를 이용하여 Y, Z, α, β, γ 값을 얻었다. 공기중의 모의 실험을 통해 도크의 위치와 자세인식 알고리즘의 성능을 확인하였으며 그 결과를 Table 2에 나타내었다. Fig. 8에 모의 실험중 경우IV에 해당하는 컴퓨터 모의실험과 이진화를 마친 영상을 나타내었다.

Table 2 Experimental simulation of vision algorithm

		X	Y	Z	α	β	γ
I	True	300	0	0	0	0	0
	Exper	300.99	-0.13	0.91	3.52	3.97	0.79
II	True	300	50	20	0	0	0
	Exper	305.83	48.61	20.40	12.17	4.23	0.25
III	True	300	0	0	30	0	0
	Exper	304.84	5.74	3.17	32.63	2.59	2.32
IV	True	300	0	0	0	30	0
	Exper	295.67	1.47	-3.10	1.08	31.24	1.21
V	True	300	0	0	30	30	30
	Exper	302.93	0.48	2.37	32.36	28.11	28.15
VI	True	300	50	20	30	30	30
	Exper	298.22	51.82	18.36	25.76	24.95	28.91

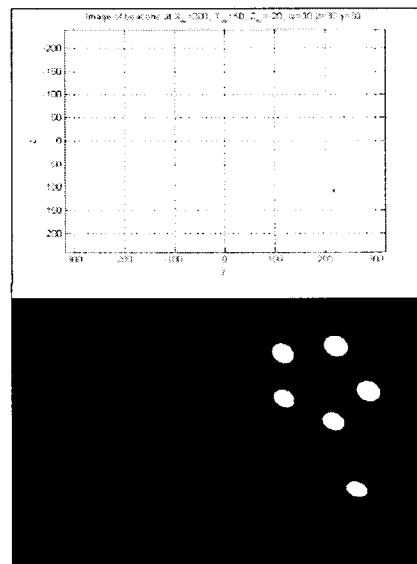


Fig. 7 Comparison of beacon image between computational result and experimental result (Case VI).

3.3.2 비주얼 서보 AUV의 시뮬레이션

Fig. 8과 9는 비주얼 서보 AUV의 도킹 시뮬레이션 결과를 나타낸다. Fig. 8은 방향타 및 수평제어판의 각도 δr 과 δs 를 나타내며, Fig. 9는 CCD 평면에 투영된 p점을 픽셀단위로 나타낸 y와 z 방향의 위치이며, AUV가 도킹장치에 정확히 도달하는 것을 보이고 있다. 세안된 제어기는 도킹 시뮬레이션이 시작할지 5초 후에 원하는 자세와 각속도운동 유지하면서 도킹용 덕트를 향하여 선진하고 있으며, AUV는 약 13초 뒤에 덕트에 정확하게 도달하였다. 피치각은 AUV가 덕트에 가까워짐에 따라 증가하는 방향으로 드리프트하는 경향을 보였다. 이는 AUV의 종방향 복원성분의 영향으로써, 선형화된 모델이 비선형 모델에 대해 갖는 오차성분이 AUV가 덕트에 근접하여 피치 각도오차가 상대적으로 커지는 상황에서 제어입력이 드리프트한 결과이다.

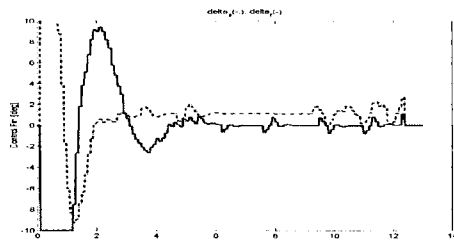


Fig. 8 Simulated control inputs, moments of the visual servoing AUV - δs : dash line, δr : solid line.

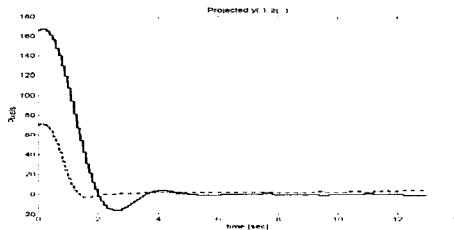


Fig. 9 Projected position of the target on CCD plane - y : solid line, z : dash-dot line.

아쉽게도 수조 실험이 아직 이루어지지 않았으나, 실험을 수행한 후에 결과를 발표할 예정이다.

4. 결론

본 논문은 해저기지에 도킹하는 AUV의 비주얼 시보 제어에 관한 이론과 실험적 방법을 기술하였다. 수중 도킹을 위하여 AUV의 선수에 한 개의 카메라를 장착하고 AUV의 자세 계측용 센서를 탑재한다. 본 논문은 영상신호와 자세신호를 이용하고 카메라의 CCD 평면에 투영되는 덕트의 위치정보에 관

한 광유동 방정식과 AUV의 운동방정식이 융합된 상대방정식을 이용하여 최적제어를 수행하는 방법을 적용하였으며 시뮬레이션을 통하여 유효성을 검토하였다. 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. 수중 목표물의 인식은 목표물 주변에 설치된 라이트 신호를 영상처리하여 얻는 방법을 제안하였으며, 라이트 영상을 타원에 매칭하여 수중 목표지점을 인식하는 시뮬레이션을 수행하였다. 비주얼 서보 실험 결과는 추후 발표할 예정이다.

후기

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

참고문헌

1. H. Singh, J.G. Belligham, F. Hover, S. Lerner, B. A. Moran, K. von der Heydt and D. Yoerger, "Docking for an autonomous ocean sampling network," IEEE J. of Oceanic Eng., Vol. 26, No. 4, pp. 498-514, Oct., 2001.
2. 이관목, 양승일, 홍석원 외, "차세대 심해용 무인잠수정개발," 한국해양연구원 연구보고서 UCM 0250-2368, 2002.
3. R. Stokey, B. Allen, T. Austin, R. Goldsborough, N. Forrester, M. Purcell and C. von Alt, "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., 2001.
4. N. P. Papanikolopoulos and P. K. Khosla, "Adaptive robotic visual tracking: Theory and Experiments," IEEE Trans. Automatic Control, Vol. 38, No. 3, pp. 429-445, March, 1993.
5. 이관목, 전봉환, 이종무, "자율무인잠수정의 수중도킹을 위한 비주얼 서보 알고리즘", 한국해양공학회지 제17권 제1호, pp. 1~7, 2003.