

비주얼 서보 제어기를 이용한 자율무인잠수정의 도킹

이판목* · 진봉환* · 이종무*

* 한국해양연구원 해양시스템안전연구소 해양개발시스템연구본부

Underwater Docking of an AUV Using a Visual Servo Controller

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

* Ocean Development System Lab., Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, KORDI

KEY WORDS: Visual Servoing 비주얼 서보 제어기, AUV (Autonomous Underwater Vehicle) 자율무인잠수정, Underwater Docking 수중 도킹, Optimal Control 최적제어, Optical Flow Equation 광유동 방정식

ABSTRACT: Autonomous underwater vehicles (AUVs) are unmanned underwater vessels to investigate sea environments, oceanography and deep-sea resources autonomously. Docking systems are required to increase the capability of the AUVs to recharge the batteries and to transmit data in real time for specific underwater works, such as repeated jobs at sea bed. This paper presents a visual servo control system for an AUV to dock into an underwater station with a camera mounted at the nose center of the AUV. To make the visual servo control system, this paper derives an optical flow model of a camera, where the projected motions of the image plane are described with the rotational and translational velocities of the AUV. This paper combines the optical flow equation of the camera with the AUVs equation of motion, and derives a state equation for the visual servoing AUV. This paper proposes a discrete-time MIMO controller minimizing a cost function. The control inputs of the AUV are automatically generated with the projected target position on the CCD plane of the camera and with the AUVs motion. To demonstrate the effectiveness of the modeling and the control law of the visual servoing AUV, simulations on docking the AUV to a target station are performed with the 6-dof nonlinear equations of REMUS AUV and a CCD camera.

1. 서 론

자율무인잠수정(AUV)은 원격무인잠수정(ROV)과는 달리 범용의 선택을 지원모션으로 사용 가능하고 케이블에 의한 제약 조건에 자유스러우므로, 광대역의 해양조사, 심해 해양과학 조사·관측, 해저구조물 추적 조사 등에 활발히 적용되고 있다 (이판목 외, 1997; 1998; 2002). 이러한 AUV가 보다 자율적으로 운항하기 위해서는 자체에 내장하는 전원의 성능개선, 장거리 항해를 위한 항법 기술 향상, 및 수중통신에 의한 다중 선체간의 정보교환 기술에 관한 성능향상이 요구된다. 최근에는 AUV가 해저 기지(또는 계류된 수중 스테이션)에 도킹하여 전원을 재충전하고 새로운 명령을 수령하며 계측한 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 도달해야한다. AUV는 주어진 경로를 추적하면서 도킹장치에 도달하며, 도킹장치와 AUV의 상대적인 위치오차를 실시간으로 측정하여 제어입력으로 사용한다. 광학

센서, 관성 운동계측센서 또는 초음파 속도 센서 등 AUV의 위치와 운동 및 속도를 계측할 수 있는 많은 센서가 있다. 이러한 센서의 선택은 계측오차, 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 진행중이며 (이판목 외, 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. 이 AUV는 선수부에 SSBL과 한 개의 광학 카메라를 장착하여, SSBL은 호밍을 위한 센서로 활용하고 광학 카메라는 도크에 도킹하는 최종단계에서의 항법·유도에 활용한다. AUV의 비주얼 서보 방식의 도킹 시스템을 구현하기 위해서 지금까지 발표된 도킹 기술과 비주얼 서보 제어에 관하여 검토하였다.

미국은 AOSN(Autonomous Ocean Sampling Network)의 일환으로 AUV 도킹에 관한 연구를 1993년부터 수행해 오고 있다. WHOI과 MIT는 REMUS와 Odyssey를 이용하여 여러 가지 도

킹 메커니즘을 연구하고 있다 (Stokey et al., 2001; Singh et al., 2001). Singh 등은 3500m 수심에 앵커를, 500m 수심에 도킹스테이션을, 100m 수심과 수면에 각각 부이를 두고 이들을 케이블로 연결하는 시스템으로 AUV 도킹장치에 대한 연구를 수행하였다. 이들은 AUV의 옆쪽에 장착된 기구를 이용하여 계류삭을 잡은 후 자체 추력을 이용하여 계류삭을 중심으로 회전하면서 상승하여 위쪽의 스테이션에 결합하는 형태의 도킹장치를 제안하였다.

Stokey 등은 저가의 소형 AUV REMUS와 도킹장치를 개발하였다(Stokey et al., 1997; 2001). 원뿔형의 유도부와 원통형 격납부가 연결된 형태의 도크를 채택하였고, 비접촉장치 대신 쌍의 수중접점을 이용하여 전원충전과 데이터 통신을 동시에 하도록 고안하였다. 호밍 센서로는 자체 개발되어 있던 RATS라는 USBL 시스템을 이용하였다.

Feezor 등은 호밍의 마지막 단계에서 잠수정의 위치와 각도를 얻어 낼 수 있는 전자기 유도 장치를 제안하였다(Feezor et al. 1997). 이는 초음파센서의 낮은 업데이트 레이트와 각도 정밀도를 보완하기 위한 장치로 도킹장치의 쌍극자에서 발생하는 전자기를 AUV의 선수에 장착된 센싱코일을 이용해 검출함으로써 AUV의 위치와 방위를 얻어낸다.

Cowen 등은 GPS나 LBL(Long Base Line)과 조합을 고려하고, 도킹의 마지막 단계인 유도를 위한 광학유도시스템을 제안하였다(Cowen et al. 1997). 도킹장치에 장착된 광원을 추적하는 이 장치의 계측 범위는 수중의 탁도와 밀접한 관계가 있으며, 실험에서 10~28m 정도였다. 이 장치는 Odyssey에 장착되어 시험되었다. 시험에서 사용된 도킹장치는 원뿔형으로 별도의 추진기 없이 항상 조류의 방향으로 향하도록 회전이 자유롭게 제작되었다. 한편, Lots 등은 한 개의 카메라를 이용하여 ROV의 수중위치를 유지하는 2-1/2 차원의 비주얼 서보 제어를 연구한 바 있다 (Lots et al., 2000).

본 논문의 AUV는 한 개의 광학 카메라를 선수부에 장착하고 이를 이용하여 도킹 시스템을 구현하였다. 한 개의 광학카메라를 이용한 서보 제어기에 관한 연구 사례는 로봇틱스 분야에서 활발하게 연구되어 왔다. Hutchinson et al. (1996)은 매니플레이터의 비주얼 서보 제어에 관한 논문을 분류하였으며, Papanikolopoulos 등은 매니플레이터 종단에 하나의 카메라를 장착한 (eye-in-hand) 비주얼 추적제어를 제안하였으며 (Papanikolopoulos, et al., 1993; 1995), 카메라의 심도를 추정하는 알고리즘을 도입한 적응제어를 구현하였다. Smith 등은 매니플레이터 eye-in-hand 타스크에 관하여 목표물 표면상에 기준점을 정하고 이를 이용하여 카메라 심도를 강인하게 추정하는 기법을 제안하였으며, 이 서보 제어를 이용하여 unstructured 환경에 있는 이동 물체를 잡는 것을 보였다 (Smith, et al., 1997). Kragic과 Christensen (2001)은 연속되는 영상신호로부터 매니플레이터의 위치를 추정하고 물체를 강인하게 인식하는 기법을 제안하였다.

Fig. 1은 한국해양연구원이 개발중인 AUV의 조감도를 나타낸다. 이 AUV는 선미에 하나의 프로펠러로 추진되며, 좌우 수평타가 각각 독립적으로 구동되어 종동요와 횡동요를 제어하며, 상하의 수직 수평타가 일체형으로 구동되어 선수동요를 제어한다.

AUV의 호밍을 위하여 선수부에 4개 센서 어레이로 구성된 SSBL을 장착하며, AUV의 비주얼 서보 도킹을 위하여 선수부 중앙에 하나의 카메라를 장착한다.

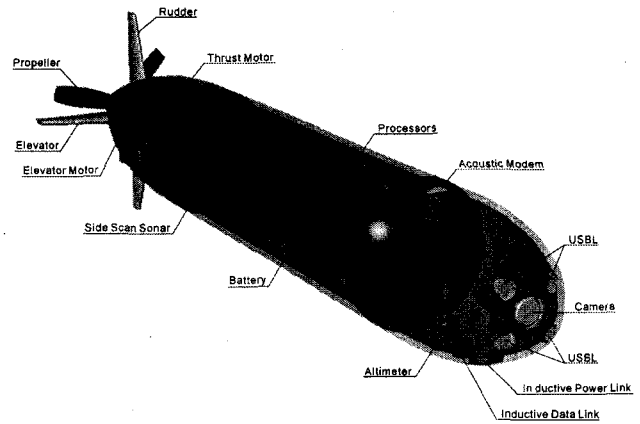


Fig. 1 Perspective view of a visual servoing AUV.

본 논문에서는 AUV의 비주얼 서보 제어를 구현하기 위하여 AUV에 장착된 카메라의 광유동 방정식을 유도하고, 이를 AUV의 운동방정식과 혼합된 상태방정식으로 변환하여 제어를 설계하였다. AUV 선수에 장착된 카메라는 eye-in-hand와 유사하나, AUV의 동역학이 포함되어 제어를 구성해야 한다. 매니플레이터의 경우는 카메라의 6자유도 운동이 직접 제어 가능하지만, AUV의 경우는 제어판을 이용하여 간접적으로 AUV 운동을 제어해야 하는 점이 차이가 있다.

AUV의 도킹을 위한 전략은 AUV가 도킹 과정에서 도킹용덕트의 센터가 카메라의 센터와 일치하도록 제어판을 구동하는 방식이다. 비주얼 서보제어는 가격합수를 최소화하는 기법으로 구현되며, 제어입력은 CCD 평면상에 투영된 목표물의 위치와 AUV의 운동 데이터를 이용하여 생성된다. 목표물에 대한 카메라 심도를 근거리에서는 영상처리로 추정하고, 원거리에 대해서는 초음파 거리계와 속도계를 이용하여 추정 가능하다고 가정하였다. 제안된 비주얼 서보 제어기의 성능을 검증하기 위하여 REMUS의 비선형 수치모델 (Prestero, 2001)에 대하여 선수부에 카메라가 장착된 경우에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. 또한, 본 논문은 한국해양연구원에서 개발중인 도킹 시험용 AUV의 하드웨어 구성에 관하여 개략적으로 소개한다.

2. 비주얼 서보 제어 AUV의 모델링

2.1 AUV에 장착된 카메라 모델

선수부 중앙에 카메라를 장착한 AUV의 도킹을 위한 제어 시스템을 설계하기 위하여 카메라의 광유동 방정식과 AUV의 운동방정식이 융합된 수학 모델이 요구된다. 본 절에서는 AUV의 운동이 연성된 카메라의 광유동 방정식을 유도한다.

Fig. 2는 본 논문의 AUV의 좌표계를 나타내는 그림으로써, AUV 중심에 물체고정좌표계 (X, Y, Z)를 고정하고, 선수방향으로 L 거리만큼 이동하여 카메라 중심에 카메라 좌표계 (X_w, Y_w, Z_w)를 설정하였다.

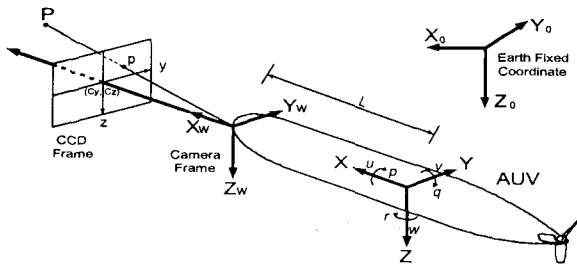


Fig. 2 Coordinate of the visual servoing AUV.

도킹용 덕트 P 는 움직이지 않는 고정물체라고 가정하였으며, 카메라 좌표계 상의 P 점의 좌표는 (X_w, Y_w, Z_w) 이고 지구좌표계 상의 P 점의 좌표는 (X_0, Y_0, Z_0) 이다. 카메라의 CCD 평면에 투영된 점 p 의 이미지 좌표 (y, z) 는 다음과 같다.

$$y_i = \frac{f Y_w}{X_w} \quad (1)$$

$$z_i = \frac{f Z_w}{X_w} \quad (2)$$

여기서 f 는 카메라의 초점거리를 나타낸다. CCD 어레이 중앙의 좌표를 (c_y, c_z) 라고 하면, CCD 프레임에 있어서 p 점의 좌표는 y 축과 z 축의 비례 인자 s_y 와 s_z 를 도입하여 $y_A = y_i/s_y + c_y$ 와 $z_A = z_i/s_z + c_z$ 로 각각 나타낼 수 있다. 이미지 평면의 중앙에 대한 p 점의 좌표 (y, z) 는

$$y = \frac{f Y_w}{s_y X_w} \quad (3)$$

$$z = \frac{f Z_w}{s_z X_w} \quad (4)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서 $y = y_A - c_y$ 이고 $z = z_A - c_z$ 이다.

카메라의 이동 속도와 각속도를 각각 $v_w = (u_c, v_c, w_c)$ 와 $\omega_w = (p, q, r)$ 이라 할 경우에, 카메라의 운동에 의한 P 점의 상대 속도는 다음과 같다.

$$\dot{P} = -v_w - \omega_w \times P \quad (5)$$

따라서, 식(3)과 (4)의 관계를 식(5)에 대입하면, 카메라 운동에 의한 CCD 평면상의 p 점의 이동을 나타내는 광유동 방정식을 다음과 같이 Papanikolopoulos (1993;1995)가 유도한 것과 같은 형태로 얻을 수 있다.

$$\dot{y} = \frac{y u_c}{X_w} - \frac{f v_c}{s_y X_w} + \frac{s_z z}{s_y} p + \frac{s_z y z}{f} q - \left(\frac{f}{s_y} + \frac{s_y y^2}{f} \right) r \quad (6)$$

$$\dot{z} = \frac{z u_c}{X_w} - \frac{f w_c}{s_z X_w} - \frac{s_y y}{s_z} p + \left(\frac{f}{s_z} + \frac{s_z z^2}{f} \right) q - \frac{s_y y z}{f} r \quad (7)$$

카메라가 AUV의 선수에 장착되어 있으므로, 카메라의 속도와 각속도 v_w 와 ω_w 는 AUV의 운동에 따라 결정된다. AUV의 속도와 각속도가 각각 v 와 ω 이고, 카메라가 Fig. 2에 나타낸 것과 같이 AUV의 회전중심에서 $r = (L, 0, 0)$ 만큼 떨어져 있다면, 카메라의 속도는 $v_c = v + \omega \times r$ 로 나타낼 수 있다. 따라

서 AUV의 운동에 의한 카메라의 속도는 다음의 관계를 가지며

$$\begin{aligned} u_c &= u \\ v_c &= v + rL \\ w_c &= w - qL, \end{aligned} \quad (8)$$

각속도는 동일하여 $\omega = \omega_w$ 이다. 식(6)과 (7)에 식(8)을 대입하면, p 점의 속도는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{y} &= \frac{y}{X_w} u - \frac{f}{s_y X_w} v + \frac{s_z z}{s_y} p + \frac{s_z y z}{f} q \\ &\quad - \left(\frac{f}{s_y} + \frac{s_y y^2}{f} + \frac{fL}{s_z X_w} \right) r \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \dot{z} &= \frac{z}{X_w} u - \frac{f}{s_z X_w} w - \frac{s_y y}{s_z} p \\ &\quad + \left(\frac{f}{s_z} + \frac{s_z z^2}{f} + \frac{fL}{s_z X_w} \right) q - \frac{s_y y z}{f} r \end{aligned} \quad (10)$$

따라서, AUV의 운동에 의해 유기되는 이미지 평면상의 p 점의 속도는 식(9)와 (10)의 광유동 방정식으로 나타낼 수 있다.

2.2 비주열 서보 제어를 위한 AUV의 수학 모델

AUV의 6자유도 운동은 비선형 특성을 가지므로 제어기 설계를 위해서 선형 모델링이 필요하다. 본 논문에서는 AUV의 운동에 의한 p 점의 위치는 영상신호 취득 간격에 비해 변화가 빠르지 않다고 가정하였다. AUV는 선미의 수평타와 수직타를 이용하여 제어되므로, 수직면과 수평면에 대해 각각 독립적으로 제어가 가능하다고 가정하였다 (이판목 외, 1997; 1998). 또한, AUV의 직선운동은 측정가능하지 못하다고 가정하여 이에 의한 성분을 모델링 오차로 표현하면, 종운동 p 와 선수운동 r 에 대한 AUV의 선형 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$(I_{yy} - M_q) \dot{q} = M_q q + M_\theta \theta + M_\delta \delta_s + \Delta f_q \quad (11)$$

$$\dot{\theta} = q \quad (12)$$

$$(I_{zz} - N_r) \dot{r} = N_r r + N_\delta \delta_r + \Delta f_r \quad (13)$$

$$\dot{\psi} = r, \quad (14)$$

여기서, M_q 와 N_r 는 부가질량 계수이고, M_q 와 N_r 는 선형화된 항력계수이며, M_θ 는 복원력 계수, M_δ 와 N_δ 는 각각 작동 속도에 대해 선형화된 양력계수이고, θ 는 피치각, ψ 는 선수각, Δf_q 와 Δf_r 은 q 와 r 방향의 AUV 모델링 오차를 나타낸다. AUV는 제어관 δ_s 와 δ_r 의 각도 조절에 의하여 운동이 제어되며, AUV의 운동 결과인 q 와 r 은 광유동 방정식 (9)와 (10)의 입력으로 작용한다.

카메라 영상 신호를 이용한 비주열 서보 시스템을 구성하기 위해서는 AUV의 수학 모델은 광유동 방정식을 포함한 형태의 상태방정식이 요구된다. 이미지 평면에 투영된 타겟의 변위 y 와 z , AUV의 각운동 성분 q, r, θ, ψ 를 상태변수로 선정하면, 식(9)~(14)를 조합하여 상태방정식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + Bu(t) + d(t) \quad (15)$$

여기서

$$x = \{y \ z \ q \ r \ \theta \ \psi\}^T \quad (16)$$

$$u = \{\delta_s, \delta_r\}^T \quad (17)$$

$$A(t) = \begin{bmatrix} \frac{u}{X_w} & 0 & \frac{s_z y z}{f} & -(\frac{f}{s_y} + \frac{s_y y^2}{f} + \frac{f L}{s_y X_w}) & 0 & 0 \\ 0 & \frac{u}{X_w} & (\frac{f}{s_z} + \frac{s_z z^2}{f} + \frac{f L}{s_z X_w}) & -\frac{s_y y z}{f} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{M_x}{I_w - M_x} & 0 & \frac{M_\theta}{I_w - M_x} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{N_x}{I_{zz} - N_x} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & M_\delta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & N_\delta & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (19)$$

$$d(t) = \begin{bmatrix} -\frac{f v}{s_y X_w} + \frac{s_z z \dot{p}}{s_y} \\ -\frac{f w}{s_z X_w} - \frac{s_y y \dot{p}}{s_z} \\ \Delta f_q \\ \Delta f_r \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (20)$$

식(20)의 외란 성분 중에서 롤 운동에 의한 시스템 모델링 오차는 롤 각속도를 계측함으로써 제어과정에서 순방향(feed-forward)으로 보상할 수 있다.

AUV의 각운동에 의한 p 점의 y 와 z 의 위치변화가 영상신호 취득 간격에 비해 변화가 빠르지 않다고 가정하였으므로, 임의의 시간에 있어서 고정된 값을 갖는다고 생각할 수 있다. 하지만, 상태방정식의 시스템 행렬 $A(t)$ 는 도킹 과정에 있어서 타겟과 AUV의 상대거리가 변화하므로, 카메라 심도 X_w 가 변화하게 되어 시변함수이다.

3. 비주얼 서보 AUV의 제어기 설계

AUV에 장착된 카메라를 이용하여 얻어지는 이미지 정보는 영상처리 시간을 포함하여 샘플링 간격 Δt 를 갖는 이산 신호이다. AUV의 전진속도가 일정하다고 가정하고 식(15)의 상태방정식을 이산화하면, k -번째 시간 스텝에서 비주얼 서보 AUV의 이산 상태방정식은 다음과 같다.

$$x(k+1) = \Phi(k)x(k) + \Gamma u(k) + d(k) \quad (21)$$

$$y(k) = Cx(k) + w(k) \quad (22)$$

여기서, $\Phi(k) \in R^{6 \times 6}$ 는 k -번째 시간스텝의 천이행렬이고, $\Gamma \in R^{6 \times 2}$ 는 이득 행렬, $C = I^{6 \times 6}$, $d(k) \in R^6$ 는 외란 벡터, $y(k) \in R^6$ 는 관측치, $w(k)$ 는 k -번째 시간스텝의 계측오차를 나타낸다.

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. 본 논문에서는 도킹용 덕트 주위에 90도 각도를 갖도록 대칭으로 4개의 광원을 설치하여, 이 광원의 위치를 영상처리로 찾고 이의 센터를 덕트의 중심으로 계산하는 방식을 이용한다.

AUV가 천천히 움직인다고 가정하였으므로 CCD 평면에 투

영된 타겟의 위치변화가 작다고 가정할 수 있다. $\Phi(k)$ 는 시변함수이지만 Δt 사이에 연속하는 영상 사이에는 근사적으로 $\Phi(k) \approx \Phi(k-1)$ 이라 가정할 수 있다. 따라서, $\Phi(k)$ 는 k -번째 시간스텝의 위치 $y(k)$, $z(k)$ 및 $X_w(k)$ 를 이용하여 계산할 수 있다. 또한, 외란 성분 $d(k)$ 도 Δt 시간 간격 동안에 일정하다고 할 수 있다.

이러한 조건에서, 비주얼 서보 AUV 모델은 MIMO (multi-input multi-out)을 갖는 ARMA (auto-regressive moving average) 모델로 변환할 수 있다. 이산 상태방정식 (21)과 (22)를 조합하고 k 번째 시간스텝의 관측값 $y(k)$ 에서 $k-1$ 번째 시간스텝의 관측값 $y(k-1)$ 을 빼면 다음과 같은 관계식이 얻어진다.

$$(A_0 + A_1(k)q^{-1} + A_2(k)q^{-2})y(k) = \Gamma u(k-1) - \Gamma u(k-2) + n(k) \quad (23)$$

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(23)으로 주어지는 모델에 대하여 설계가 이루어졌다. $k+1$ 번째의 측정값 $y(k+1)$ 과 이때에 요구되는 비주얼 서보 AUV의 상태변수 $y_D(k+1)$ 의 차이를 포함하는 다음과 같은 가격함수

$$J(k+1) = \{ [y(k+1) - y_D(k+1)]^T Q [y(k+1) - y_D(k+1)] + u(k)^T L_u u(k) \} \quad (24)$$

를 최소화하는 방법으로 제어기를 설계하였다 (Goodwin and Sin, 1984). 여기서 $y_D(k+1)$ 는 도킹을 위하여 필요한 CCD 평면 투영 타겟 위치와 AUV의 자세를 나타내고, Q 와 L_u 는 각각 상태변수 오차와 제어입력에 대한 가중행렬이다.

가격함수 $J(k+1)$ 을 $u(k)$ 에 대하여 미분하고, 이를 영으로 하는 관계식에 식(23) 모델을 대입하여 $u(k)$ 에 대하여 정리하면 제어입력은

$$u(k) = -(\Gamma^T Q \Gamma + L_u)^{-1} [\Gamma^T Q \{ -A_1(k)y(k) - A_2(k)y(k-1) - y_D(k+1) - \Gamma u(k-1) \}] \quad (25)$$

으로 얻어진다. 식(25)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 4개 광원 사이의 거리를 측정하여 다음과 같은 관계식으로 추정한다.

$$\widehat{X}_w(k) = \frac{f L_m}{l_m(k)} \quad (26)$$

여기서, L_m 은 광원 사이의 기준 거리, $l_m(k)$ 는 취득된 영상신호로부터 추정되는 광원 사이의 거리이다. 추정된 타겟 거리를 이용하여 얻어진 행렬식 \widehat{A}_1 과 \widehat{A}_2 를 식(25)에 대입하여 다음과 같이 제어기를 설계하였다.

$$u(k) = -(\Gamma^T Q \Gamma + L_u)^{-1} [\Gamma^T Q \{ -\widehat{A}_1(k)y(k) - \widehat{A}_2(k)y(k-1) - y_D(k+1) - \Gamma u(k-1) \}] \quad (27)$$

타겟의 거리가 먼 경우에는 $l_m(k)$ 값이 대단히 작게 되어 타겟의 거리추정에 큰 오차가 포함된다. 타겟의 거리가 멀 경우에는 거리추정 소나 또는 장애물 회피 소나와 같은 보조적인 센서를 이용하여 타겟 거리를 측정할 필요가 있다.

4. 비주얼 서보 AUV의 도킹 시뮬레이션

설계된 비주얼 서보 AUV의 제어기 성능을 검증하기 위하여 도킹 시뮬레이션이 수행되었다. 한국해양연구원에서 개발중인 AUV의 운동계수가 아직 얻어지지 않은 관계로, 이와 유사한 선형을 가지며 6자유도 비선형 수학 모델의 운동계수가 알려진 REMUS AUV (Prestero, 2001)에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다.

시뮬레이션에 사용된 CCD 카메라는 초점거리 f 가 $6mm$ 이고, 수평방향과 수직방향의 비례인자가 $s_y=s_z=0.0009mm$ 이고, 카메라의 화소는 640×480 이다. 카메라는 AUV의 회전중심으로부터 선수방향으로 $L=0.611m$ 전방 선수부에 설치되었으며, 영상처리 시간간격은 0.1 초로 정하였다.

식(12)와 (14)의 AUV 수직면 선형 운동계수는 Prestero 논문의 선형계수를 인용하고, 수평면 운동계수는 REMUS의 비선형 운동방정식 (Prestero, 2001)으로부터 추정하였다. 시뮬레이션에 사용된 AUV의 운동계수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} I_{yy} &= 3.45e+0, & M_{\dot{q}} &= -4.88e+0, & M_{\dot{q}} &= -6.87e+0, \\ & & M_{\dot{\theta}} &= -5.77e+0, & M_{\dot{\theta}} &= -3.46e+1, \\ I_{zz} &= 3.45e+0, & N_{\dot{r}} &= -4.88e+0, & N_{\dot{r}} &= -3.44e+0, \\ & & & & N_{\dot{\delta}} &= -3.46e+1 \end{aligned}$$

카메라의 CCD 평면에 투영되는 타겟 위치를 모사하기 위하여 타겟과 카메라 사이의 상태위치와 각도를 다음과 같은 관계로 산출하였다.

$$\begin{aligned} (X_w, Y_w, Z_w) &= \vec{CP} = \vec{OP} - \vec{OC} \\ &= J_1^{-1} \vec{OP}_{global} - \vec{OC} \end{aligned} \quad (28)$$

여기서, 벡터로 표현된 CP, OP, OC 는 각각 카메라에서 물체의 방향벡터, 기준좌표에서 물체의 방향벡터, 및 기준좌표에서 카메라의 방향벡터를 나타내며, J_1 은 물체고정좌표계의 오일러 각도에 대한 좌표변환행렬이다. 따라서, 타겟의 CCD 평면 투영점 p 의 위치는 식(28)의 결과를 이용하여 식(3)과 (4)로부터 얻을 수 있다.

AUV의 롤 운동은 투영된 p 점의 위치에 영향을 미치나, 자이로 센서를 이용하여 측정이 가능하므로 순방향 귀환하여 보상하였다. 광원 사이의 기준거리 L_m 은 $1.0m$ 로 정하였고, 시뮬레이션에 사용된 제어입력의 가중행렬은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} Q &= \text{diag}[1.0 \ 1.0 \ 1.0e+3 \ 1.0e+3 \ 1.0 \ 1.0] \\ L_u &= \text{diag}[100 \ 20] \end{aligned}$$

AUV의 초기 전진속도는 $u_0 = 1.54 m/s$ 이며, 초기 속도조건은 $v_0 = w_0 = 0$, $p_0 = q_0 = r_0 = 0$ 으로 정하였다. 도킹용 덕트 P의 초기 위치는 $(X_0, Y_0, Z_0) = (20, 3, 2)$ 미터로 가정하였다. AUV의 초기 위치는 지구고정 기준좌표계의 원점에 위치하며, 초기의 자세각도는 $\psi_0 = -5^\circ$, $\phi_0 = \theta_0 = 0$ 으로 선택하였다.

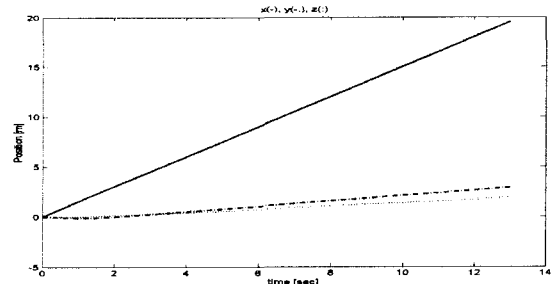
요구되는 상태변수값에 있어서, CCD평면에 투영되는 p 점의 위치는 CCD 평면의 중앙인 영점이며 AUV의 운동은 선수각을 제외한 나머지 성분은 모두 영으로 정하였다. AUV의 요구되는 선수각은 도킹 시작 초기의 선수각

$$\psi_D = \tan^{-1}(Y_w(0)/(X_w(0)+L))$$

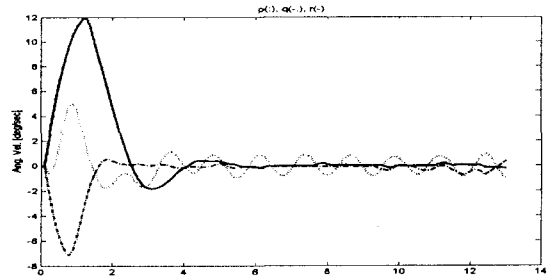
를 도킹 과정에서 유지하도록 설계하였다. AUV의 운동은 Prestero의 6자유도 비선형 운동 모델에 대하여 0.01 초의 적분 시간간격으로 적분함으로써 모사하였다. 제어판의 제어 입력은 0.1 초 간격으로 변환시켰으며, 제어판은 10° 에서 포화되도록 선정하였다.

Fig. 3과 4는 비주얼 서보 AUV의 도킹 시뮬레이션 결과를 나타낸다. Fig. 3에서 (a)는 지구좌표계에 대한 AUV의 x, y, z 방향 위치변화이며, (b)는 AUV의 각속도 운동 p, q, r 이며, (c)는 AUV의 오일러 각도 ϕ, θ, Ψ 를 나타낸다. Fig. 4에서 (a)는 방향타 및 수평제어판의 각도 δ 와 δ_s 를 나타내며, (b)는 시뮬레이션 과정에서 AUV에 작용하는 모멘트를 나타낸다. Fig. 5는 CCD 평면에 투영된 p 점을 픽셀단위로 나타낸 y 와 z 방향의 위치이다.

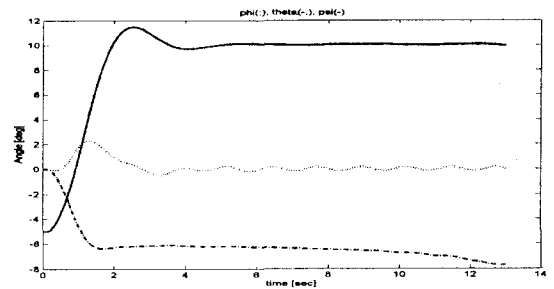
제안된 제어기는 도킹 시뮬레이션이 시작하지 5초 후에 원하는 자세와 각속도운동 유지하면서 도킹용 덕트를 향하여 전진하고 있으며, AUV는 약 13초 뒤에 덕트에 정확하게 도달하였



(a) x : solid line, y : dash-dot line, z : dot line

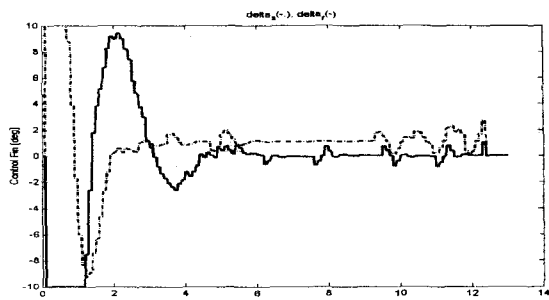


(b) p : dot line, q : dash-dot line, r : solid line

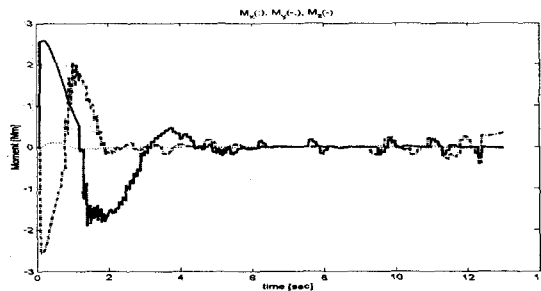


(c) ϕ : dot line, θ : dash-dot line, Ψ : solid line

Fig. 3 Simulated motion of the visual servoing AUV.



(a) Control inputs - δ_s : dash line, δ_r : solid line



(b) M_x : dot line, M_y : dash-dot line, M_z : solid line

Fig. 4 Simulated control inputs, moments of the visual servoing AUV.

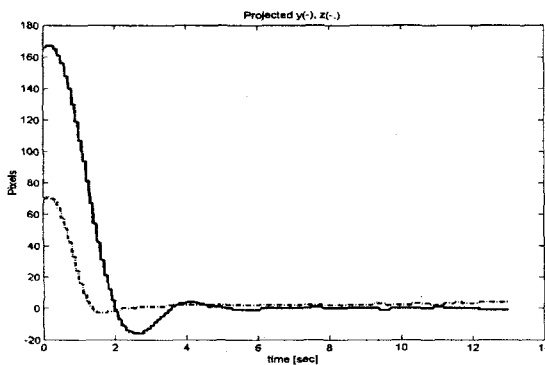


Fig. 5 Projected position of the target on CCD plane - y : solid line, z : dash-dot line.

다. 피치각은 AUV가 덕트에 가까워짐에 따라 증가하는 방향으로 드리프트하는 경향을 보였다. 이는 AUV의 종방향 복원 성분의 영향으로써, 선형화된 모델이 비선형 모델에 대해 갖는 오차성분이 AUV가 덕트에 근접하여 피치 각도오차가 상대적으로 커지는 상황에서 제어입력이 드리프트한 결과이다.

AUV가 덕트에 근접하여 도킹이 이루어지기 바로 전에는 덕트 위치를 추정하기 위한 광원이 CCD 평면 밖으로 벗어나게 된다. 시뮬레이션에 사용된 카메라는 덕트가 1.39m 이내에 들어 오면 광원의 위치가 포화하게 된다. 이에 따라, 시뮬레이션에는 AUV가 Fig. 4 (a)와 같이 이 근접거리 이내에 도달할 경우에는 제어판을 영의 위치로 고정시켰으며, 이의 영향에 의하여

Fig. 4 (b)의 피치 모멘트가 발행하는 것을 알 수 있다

비주얼 서보 AUV의 도킹 시뮬레이션을 통하여 본 논문에서 제안된 제어기법이 유효함을 보였다. 저자는 향후 카메라가 장착된 AUV 모형을 이용하여 수조내에서의 도킹 시험을 계획하고 있다. Table 1은 제작될 모형 AUV의 제원을 나타내며, Fig. 6는 AUV의 하드웨어 구성도를 나타낸다.

Table 1 Specification of the visual servoing AUV.

Description	Value
Total Length/Diameter	1200 / 170 mm
Weight (in Air/Water)	21.5 / -0.3 kg
Operating Speed	3 knots
Maximum Thrust	12N (@4.8knots)
Operating Time (@ 3/2 knots)	1.7 / 3 hours

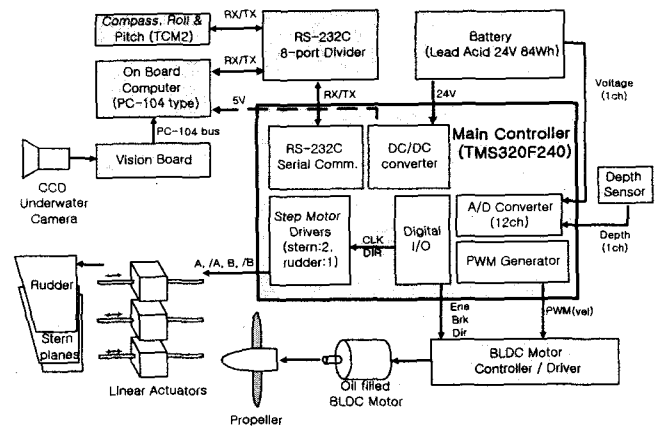


Fig. 6 Block diagram of the visual servoing AUV.

모형 AUV는 (1) SSBI과 카메라가 장착되는 선수부, (2) 이미지 보드 및 제어를 위한 프로세서 및 계측센서가 내장되는 알루미늄 실린더로 제작되는 압력선체부분, (3) 모터, 추진기, 제어판 및 제어판 구동 링크 장치가 내장되고 방수를 위하여 기름이 채워지는 선미부 등 3개의 부분으로 구성된다. AUV의 자세를 계측하는 각도센서, 자이로 및 압력센서가 내부에 탑재될 계획이다. 취득된 카메라 영상신호는 PC104 버스를 통하여 메인 프로세서에 전달되며, 모터 제어를 위하여 전용의 신호처리 보드를 제작하였다.

AUV 모형은 최대 작업 수심은 20m로 설계되고 있으며, 모형 AUV를 통하여 개발되는 비주얼 서보 제어를 이용한 도킹 기법은 향후 6,000m에서도 작동 될 수 있도록 확장될 예정이다.

5. 결 론

본 논문은 해저기지에 도킹하는 AUV의 비주얼 서보 제어에 관한 것으로서, AUV의 선수에 한 개의 카메라를 장착하고 선미의 추진기와 제어판을 이용하여 해저기지의 덕트에 도킹하

는 제어기법을 제안하였다. 카메라의 CCD 평면에 투영되는 덱트의 위치를 이용하여 제어기를 설계하기 위하여 AUV의 운동이 고려된 광유동 방정식을 유도하였으며, AUV의 운동 성분과 함께 투영 좌표를 상태변수로 하는 비주얼 서보 AUV의 수학 모델을 정립하였다. 설정된 가격함수를 최소화하는 최적제어기법을 이용하여 제어기를 설계하였으며, 타겟 거리를 추정하기 위한 방법으로써 덱트 주변에 4개의 광원을 설치하여 영상처리로 추정하는 방법을 제안하였다. 비선형 운동계수가 알려진 REMUS 모델에 대하여 카메라가 장착된 AUV의 도킹 시물레이션이 수행되었으며, 시물레이션 결과로부터 제안된 모델링 기법과 제어방법이 유효함을 확인하였다. 향후 모형 AUV를 이용한 수조 도킹 시험을 통하여 제안된 비주얼 서보 AUV의 도킹 기법을 실험적으로 검증할 예정이다.

후 기

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

참 고 문 헌

- 이판목, 양승일, 홍석원 외 (2002). 차세대 심해용 무인잠수정개발, 한국해양연구원 연구보고서 UCM0250-2368.
- 이판목, 전봉환, 홍석원 (1998). "장주기 샘플링을 갖는 자율무인잠수정의 의사 슬라이딩모드 제어," 한국해양공학회지, 제12권, 2호, pp. 130-138.
- 이판목, 홍석원, 전봉환 (1997). "이산 가변구조제어기를 이용한 자율무인잠수정의 심도제어," 한국해양공학회지, 제11권, 4호, pp. 169-179.
- 전봉환, 이판목, 이종무 (2002), "AUV의 수중 호밍·도킹 매카니즘에 대한 연구," 한국해양공학회 2002년 춘계학술대회 논문집, pp. 263 (별책본).
- Cowen, S., Briest, S. and Dombrowski, J. (1997). "Underwater docking of autonomous undersea vehicles using optical terminal guidance," *Proc Oceans'97 MTS/IEEE*, pp. 1143-1147.
- Hutchinson, S., Hager, G.D. and Corke, P.I. (1996). "A tutorial on visual servo control," *IEEE Trans. on Robot. Automat.*, Vol. 12, No. 5, pp. 651-670, Oct.
- Feezor, M., Blankinship, P., Bellingham, J. and Sorrel, Y. (1997). "Autonomous underwater vehicle homing/docking via electromagnetic guidance," *Proc. Oceans'97 MTS/IEEE*, pp. 1137-1142.
- Goodwin, G.C. and Sin, K.S. (1984). *Adaptive Filtering, Prediction and Control*. Prentice Hall Inc.
- Kragic D. and Christensen, H.I. (2001). "Cue integration for visual servoing," *IEEE Trans. Robot. Automat.*, Vol. 17, No. 1, pp. 18-27, Feb.
- Lots, J.-F., Lane, D.M. and Trucco, E. (2000). "Application of 2 1/2 D visual servoing to underwater vehicle station-keeping," *Proc. Oceans 2000 MTS/IEEE*, pp. 1257-1264.
- Papanikolopoulos, N.P., Nelson, B.J. and Khosla, P.K. (1995). "Six degree-of-freedom hand/eye visual tracking with uncertain parameters," *IEEE Trans. on Robot. Automat.*, Vol. 11, No. 5, pp. 725- 732, Oct.
- 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.
- Prestero, T. (2001). "Verification of a six-degree of freedom simulation model for the REMUS autonomous underwater vehicle," Masters Thesis, Dept. of Ocean Eng. and Mech. Eng., MIT, Sept.
- 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.
- Smith, C.E., Brandt, S.A. and Papanikolopoulos, N.P. (1997). "Eye-in-hand tasks in uncalibrated environments," *IEEE Tr. Robot. Automat.*, Vol.13, No.6, pp.903-914, Dec.
- Stokey, R., Purcell, M., Forrester, N., Austin, T., Goldsborough, R., Allen, B. and von Alt, C. (1997). "A docking system for REMUS, an autonomous underwater vehicle," *Proc. Oceans'97 MTS/IEEE*, pp. 1132-1136.
- 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.