

수중운동체의 충돌회피시스템에 대한 연구

손남선*, 이기표**, 이상무***, 여동진****

A Design of Collision Avoidance System of an Underwater Vehicle

Nam-Sun Son*, Key-Pyo Rhee**, Sang-Mu Lee*** and Dong-Jin Yeo****

요 약

본 연구에서는 수직·수평면 회피를 분리한 수중운동체의 충돌회피시스템을 구성하였다. 가상 지시선(Imaginary Reference Line) 개념을 고안하여 기존의 수직면 충돌회피알고리즘을 수평면에 확장, 적용하였으며 회피각 결정에 장애물의 경사각뿐만 아니라 경사 변화율도 고려하여 보다 원활한 회피가 이루어질 수 있도록 하였다. 제어기의 경우 운동방정식의 비선형성을 고려하고 회피시스템의 강인성을 확보하기 위해 슬라이딩모드 제어를 적용하였다. 수중운동체의 임무 수행 중 임의의 3차원 장애물에 대한 회피상황을 가정하고 수치모사를 통해 구성된 충돌회피시스템의 성능을 검증하였다. 또한, 충돌회피알고리즘의 구성 인자인 소나 성능변수들과 보정 계수의 변화에 따른 충돌회피시스템의 성능변화를 살펴보았다.

*Keywords: Underwater Vehicle(수중운동체), Collision Avoidance System(충돌회피시스템), Imaginary Reference Line(가상지시선), Sliding Mode Control(슬라이딩모드 제어)

Abstract

An Obstacle Avoidance System(OAS) of Underwater Vehicle(UV) in diving and steering plane is investigated. The concept of Imaginary Reference Line(IRL), which acts as the seabed in the diving plane, is introduced to apply the diving plane avoidance algorithm to the steering plane algorithm. Furthermore, the distance to the obstacle and the slope information of the obstacle are used for more efficient and safer avoidance. As for the control algorithm, the sliding mode controller is adopted to consider the nonlinearity of the equations of motion and to get the robustness of the designed system. To verify the obstacle avoidance ability

접수일자: 2001년 7월 10일, 승인일자: 2001년 8월 20일

* 정회원, 한국해양연구원 해양시스템안전연구소 연구원(E-mail: namsun11@chollian.net)

** 정회원, 서울대학교 조선해양공학과 교수(E-mail: kprhee@snu.ac.kr)

*** 정회원, 동양대학교 컴퓨터응용기계공학부 교수(E-mail: smlee@phenix.dyu.ac.kr)

**** 정회원, 서울대학교 조선해양공학과 박사과정(E-mail: lonepier@snu.ac.kr)

of the designed system, numerical simulations are carried out on the cases of some presumed three-dimensional obstacles. The effects of the sonar and the clearance factor used in avoidance algorithm are also investigated. Through these, it is found that the designed avoidance system can successfully cope with various obstacles and the detection range of sonar is proven to be a significant parameter to the performance of the avoidance.

1. 서론

수중을 자율 항행하는 수중운동체에 있어 충돌 회피시스템은 안전한 임무 수행을 위해 반드시 필요하다. 충돌회피시스템은 장애물 감지를 위해 소나를 사용하며, 일반적으로 거리계측 소나가 많이 사용된다. 충돌회피시스템은 거리계측 소나를 통해 탐지된 장애물까지의 거리 정보를 바탕으로 세 단계를 거쳐 충돌회피 기동을 수행하게 된다. 첫 번째 단계는 회피알고리즘 부분으로 소나에 의해 계측된 거리 정보를 바탕으로 장애물에 대한 형상 정보를 추정하고 이를 회피하기 위한 목표점을 계산한다. 두 번째 단계는 유도 알고리즘 부분으로 주어진 목표점에 도달하기 위한 기준 입력을 계산하는 부분이며, 세 번째 단계는 제어 알고리즘 부분으로 기준 입력을 바탕으로 제어관을 구동하기 위한 제어명령을 계산하는 부분이다. 현재까지 대다수의 충돌회피시스템은 수직면에 대한 회피에 국한되어 있으나 (Barros 1995) (KRISO 1997), 미지의 수중환경과 예기치 못한 상황에 대처하기 위해서는 확장된 개념의 충돌회피시스템이 필요하다. 본 논문에서는 수평면 충돌회피 알고리즘을 개발하고, 기존의 충돌회피 알고리즘을 개선하여 보다 효과적이고 안전한 충돌회피시스템을 설계하였고, 충돌회피시스템의 설계와 관련

하여 충돌회피시스템의 구성인자 변화에 따른 회피성능 변화를 연구하여 효과적인 설계에 도움이 되도록 하였다.

2. 소나 배치

장애물 탐지는 거리계측 소나를 사용하는 것으로 설정하였으며 충돌회피시스템의 설계를 위하여 Fig.1과 같은 소나 배치를 적용하였다. 즉, 장애물의 수직면 정보 탐지를 위해 수중운동체의 수직 면상에 3개의 소나($R_1(V), R_2(V), R_3$)를 45° 간격으로 배치하였다. 장애물의 수평면 정보 탐지를 위해 수평면에 좌($R_1(H,L), R_2(H,L)$), 우($R_1(H,R), R_2(H,R)$) 각 2개씩의 소나를 45° 간격으로 배치하였으며, R_3 는 공통으로 사용한다.

3. 충돌회피시스템의 구성

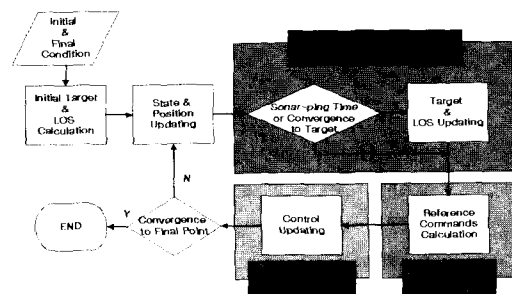


Fig.2 Flow chart of collision avoidance system

충돌회피시스템은 소나를 작동하여 회피를 위한 목표점을 계산하는 회피알고리즘 부분, 계산된 목표점의 정보로부터 유도명령을 계산하는 유도알고리즘 부분, 그리고 수중운동체의 회피기동을 위한

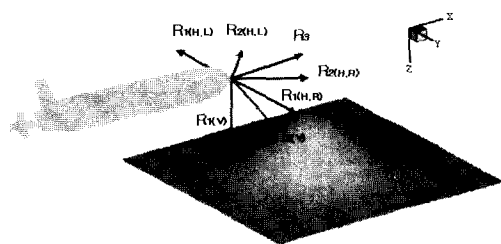


Fig.1 Sonar arrangement

제어입력을 계산하는 부분으로 나누었다. Fig.2에 전체적인 충돌회피시스템의 구성을 나타내었다.

3.1 회피알고리즘

회피알고리즘은 세 단계를 거쳐 목표점을 계산하게 된다.

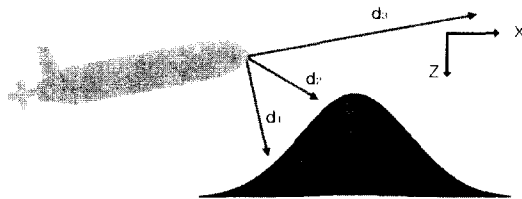


Fig.3 Calculation of obstacle slope in the diving plane

제 1 단계

제 1 단계에서는 거리계측 소나에 의해 측정된 정보로 장애물의 경사각이 계산된다. Fig.3에서 나타난 것과 같이 수직면에서 각 방향 소나에 의해 측정된 수중운동체와 장애물 사이의 거리 정보를 d_1, d_2, d_3 라 할 때 측정된 지역에서 장애물의 경사각 φ_i 는 식 (1)과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= \tan^{-1} \left(\frac{d_1 \cos \theta - d_2 \cos(\frac{\pi}{4} + \theta)}{d_1 \sin \theta - d_2 \sin(\frac{\pi}{4} + \theta)} \right), \\ \varphi_2 &= \tan^{-1} \left(\frac{d_2 \cos(\frac{\pi}{4} + \theta) - d_3 \cos(\frac{\pi}{2} + \theta)}{d_2 \sin(\frac{\pi}{4} + \theta) - d_3 \sin(\frac{\pi}{2} + \theta)} \right), \\ \varphi_3 &= \tan^{-1} \left(\frac{d_3 \cos(\frac{\pi}{2} + \theta) - d_1 \cos \theta}{d_3 \sin(\frac{\pi}{2} + \theta) - d_1 \sin \theta} \right). \end{aligned} \quad (1)$$

여기에서 θ 는 수중운동체의 종동요각이다.

제 2 단계

제 2 단계에서는 소나에서 측정된 거리정보와 1 단계에서 계산된 경사각 정보를 바탕으로 회피각을 결정한다. 상황에 따른 회피각 결정은 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Decision of avoidance angle

| Sonar information | Avoidance angle |
|--|---|
| $(\forall R_i = \infty) \cup (R_1 \neq \infty \text{ only})$ | Full bow-down |
| $R_3 \neq \infty \text{ only}$ | Full bow-up |
| $R_2 \neq \infty \text{ only}$ | Current azimuth angle |
| $R_1 \neq \infty \text{ only}$ | $\varphi = \varphi_2$ |
| $R_2 = \infty \text{ only}$ | $\varphi = \varphi_3$ |
| $R_3 = \infty \text{ only}$ | $\varphi = \varphi_1$ |
| $\forall R_i \neq \infty$ | $\begin{matrix} \varphi < 0 & \rightarrow \varphi_2, \\ \varphi > 0 & \rightarrow \varphi_1 \end{matrix}$ |

제 3 단계

제 3단계에서는 최종적으로 목표점이 계산된다. 목표점 계산에 사용되는 변수로는 소나 작동간격, 장애물의 경사각, 수중운동체의 현재 위치와 속도 정보, 그리고 고도유지를 위한 유도입력인 가상 경사각을 설정하기 위한 보정계수(λ)등을 들 수 있다. 수직면의 목표점은 식 (2)와 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} X_T \\ Z_T \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} V(\varphi) \cdot Dt \cos \varphi + X_G \\ V(\varphi) \cdot Dt (\sin \varphi + \sin \Phi) + Z_G \end{bmatrix}, \quad (2) \\ \Phi &= \tan^{-1} \left(\frac{H_{ref} - H}{\lambda} \right), \\ V(\varphi) &= -\frac{u_0/2}{90^\circ} \cdot \varphi + u_0. \end{aligned}$$

식 (2)에서 하첨자 T는 목표점, 하첨자 G는 수중운동체의 무게중심 위치를 나타내며 $V(\varphi), Dt, H_{ref}, H, u_0, X_G, Z_G$ 는 각각 명령속도, 소나 작동간격, 회피 설정고도, 장애물로부터의 고도, 정상 항주속도를 의미한다.

수평면에서는 가상 지시선(Imaginary Reference Line) 개념을 고안하여 사용하였다. 가상 지시선은 수직면에서의 해저면과 같은 역할을 하는 가상의 선으로, 수직면의 경우 해저면으로부터의 고도 정보를 이용하는 것과 유사하게 수

평면의 경우에는 가상 지시선으로부터 떨어진 거리 정보를 이용하여 목표점을 계산하게 된다. 가상 지시선의 개념은 Fig.4에 나타나 있다. 가상 지시선을 도입하여 수평면에서의 목표점을 계산하면 식 (3)과 같이 나타난다.

$$\begin{bmatrix} X_T \\ Y_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V(\varphi) \cdot Dt \cos \varphi + X_G \\ V(\varphi) \cdot Dt (\sin \varphi + \sin \Psi) + Y_G \end{bmatrix}. \quad (3)$$

$$\Psi = \tan^{-1} \left(\frac{l_{ref} - l}{\lambda} \right),$$

$$V(\varphi) = -\frac{u_0/2}{90^\circ} \cdot \phi + u_0.$$

식 (3)에서 $V(\varphi)$, l_{ref} , l 는 각각 명령속도, 회피 설정 거리, 회피면과의 거리를 의미한다.

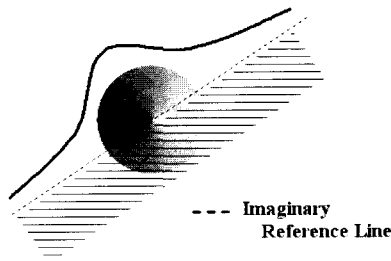


Fig.4 Imaginary Reference Line(IRL) in the steering plane

3.2 유도알고리즘

앞 절에서 계산된 목표점은 소나가 작동되는 시간에 계산이 되는 것이므로 다음 소나 작동 시간까지 제어기를 구동하기 위한 기준점이 필요하게 된다. 유도 알고리즘에서는 현재 수중운동체의 위치와 목표점간을 연결하는 직선을 시간적으로 내분하는 경유점을 지정하게 된다. 지정된 경유점을 바탕으로 주시선 유도(Line of Sight Guidance) 방법을 적용하여 회피 기동을 위한 기준 입력을 결정하게 된다. 전진속도, 중동요 각도, 선수동요 각도에 대한 기준 입력은 식 (4)와 같이 나타난다.

$$u_{com} = -\frac{u_0/2}{90^\circ} \cdot (\Delta LOS_{\phi \text{ or } \theta}) + u_0,$$

$$\theta_{ref} = \Delta LOS_{\theta}, \quad (4)$$

$$\phi_{ref} = \Delta LOS_{\phi}.$$

where $u_0 = 1.832m/s$, initial speed

ΔLOS_{θ} , ΔLOS_{ϕ} 는 수중운동체의 종, 선수동요 각과 목표점의 LOS각과의 차이를 의미한다.

3.3 제어 알고리즘

제어 알고리즘에서는 회피기동을 위해 제어명령을 계산하게 된다. 운동방정식의 비선형성에 대처하고 회피시스템의 강인성을 확보하기 위해 비선형 강인제어기의 일종인 슬라이딩 모드 제어기를 적용하였다.

슬라이딩 모드 제어기를 구성하는 방법에는 몇 가지가 있으나 본 논문에서는 Healey/Lienard (1993)의 방법을 적용하였다.

수중운동체의 비선형 운동방정식이 다음 식 (5)와 같이 나타내어 질 때,

$$\begin{aligned} M(t) \dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), \mathbf{z}(t)) + \mathbf{g}(\mathbf{x}(t), \mathbf{z}(t)) \mathbf{u}(t), \quad (5) \\ \dot{\mathbf{z}}(t) &= \mathbf{h}(\mathbf{x}(t), \mathbf{z}(t)), \end{aligned}$$

where,

$$\begin{aligned} M(t) &: \text{inertia matrix,} \\ \mathbf{x}(t) &= [u(t), v(t), w(t), p(t), q(t), r(t)]^T, \\ \mathbf{z}(t) &= [X(t), Y(t), Z(t), \phi(t), \theta(t), \psi(t)]^T, \\ \mathbf{u}(t) &= [n(t), \delta_s(t), \delta_r(t)]^T. \end{aligned}$$

주어진 비선형 운동방정식을 전후방향, 수평, 수직면의 운동 모드로 분리한 후 적절한 선형화를 통해 식 (6)과 같은 선형운동방정식을 얻어낸다.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{b}u(t) + \mathbf{d}f(t). \quad (6)$$

슬라이딩면을 식 (7)과 같이 상태변수 오차의 선형 합으로 설정할 때,

$$\sigma(t) = \mathbf{s}^T \cdot \tilde{\mathbf{x}}(t), \quad (7)$$

선형화된 시스템이 제어가능하고 $[s^T \mathbf{b}]$ 가 0이 아니라면, 슬라이딩면 계수는 pole-placement법으로 원하는 지점에 극점이 설정된 폐회로 시스템의 좌고유벡터가 된다. 슬라이딩면을 구성하는 식을 시간에 대해 미분했을 때 좌변이 0이 된다는 사실을 바탕으로 제어입력을 계산하면 식 (8)과 같이 나타나게 된다.

$$u(t) = [s^T \mathbf{b}] [-s^T \mathbf{A} \mathbf{x}(t) - s^T \mathbf{d} \dot{\mathbf{x}}(t) + s^T \dot{\mathbf{x}}_{com}(t) - \eta \tanh(\frac{\sigma(t)}{\phi})], \quad (8)$$

where $\eta > |S| \cdot |d\dot{\mathbf{x}} - \dot{\mathbf{d}}\dot{\mathbf{x}}|$, $\phi: 0.02 \sim 0.2$

본 논문에서는 수중운동체의 6자유도 운동을 전후방향, 수직면, 수평면으로 나누어 각각에 대해 제어를 설계하였다. 개별적인 제어명령은 다음과 같다.

속도제어

속도제어는 추진기의 회전수 변화를 통해서 이루어지며 제어 명령은 식 (9)와 같이 계산된다.

$$\eta \dot{\omega} = (a\beta)^{-1} [a u \dot{u} + \dot{u}_{com} - \eta_1 \tanh(\frac{\sigma_1}{\phi_1})], \quad (9)$$

where $a = \frac{\rho L^2 C_d}{2m - \rho L^3 X_u}$,

$\beta = (\frac{u}{n})^2 = (\frac{u_0}{n_0})^2 = 0.012, C_d = 0.0034.$

수직면제어

수직면제어의 제어면은 증강타이며 제어명령은 식 (10)과 같이 계산된다.

$$\delta_s = -\mathbf{k}_{D1} \mathbf{x}_D - \mathbf{k}_{D2} (d\dot{\mathbf{x}}_D - \dot{\mathbf{x}}_{D,com}) - \mathbf{k}_{D3} \tanh(\frac{\sigma_D}{\phi_D}), \quad (10)$$

$\mathbf{k}_{D1} = [s_D^T \mathbf{b}_D]^{-1} s_D^T \mathbf{A}_D, \mathbf{k}_{D2} = [s_D^T \mathbf{b}_D]^{-1} s_D^T,$

$\mathbf{k}_{D3} = [s_D^T \mathbf{b}_D]^{-1} \eta_D.$

수평면제어

수평면제어의 제어면은 타이머 제어명령은 식 (11)과 같이 계산된다.

$$\delta_r = -\mathbf{k}_{S1} \mathbf{x}_S - \mathbf{k}_{S2} (d\dot{\mathbf{x}}_S - \dot{\mathbf{x}}_{S,com}) - \mathbf{k}_{S3} \tanh(\frac{\sigma_S}{\phi_S}), \quad (11)$$

$\mathbf{k}_{S1} = [s_S^T \mathbf{b}_S]^{-1} s_S^T \mathbf{A}_S, \mathbf{k}_{S2} = [s_S^T \mathbf{b}_S]^{-1} s_S^T,$

$\mathbf{k}_{S3} = [s_S^T \mathbf{b}_S]^{-1} \eta_S.$

4. 수치 모사 결과

본 논문에서는 NPS AUV II (Healey/Lienard 1993) 모델에 대하여 Fig.5, 6에 보여진 것과 같이 해산, 쌍봉해산, 급경사면, 절벽 등의 장애물 형상을 대상으로 충돌회피 상황을 가정하고 수치모사를 통해 충돌회피시스템의 성능을 살펴보았다. 장애물로부터의 설정 고도, 설정 심도는 모두 5m로 하였다. 또한, 충돌회피알고리즘의 구성인자인 소나 탐지거리(R), 소나 작동간격(Dt), 그리고 보정 계수(λ)의 변화에 따른 충돌회피시스템의 성능변화를 살펴보았다. Figs.5.6의 결과로부터 충돌회피시스템이 매우 훌륭한 충돌회피 성능을 보이는 것을 확인할 수 있다. 또한, 수직면에서의 회피 상황에서 수평면의 경로를 유지하고, 수평면 회피 상황에서 수직면의 심도를 유지하여 회피기동 후의 임무 수행에 도움이 될 수 있음을 확인할 수 있다. Figs.7-9에는 소나

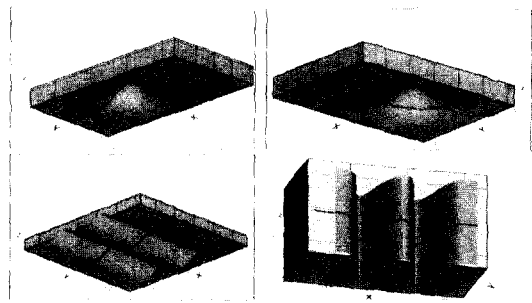


Fig.5 Trajectories of UV at the single mount and double mount (R = 100m, Dt = 0.5sec, $\lambda = 10$)

탐지거리(R), 소나 작동간격(Dt), 그리고 보정 계수(λ)의 변화에 따른 충돌회피시스템의 회피성능 변화를 도사하였다. 수치모사 결과를 살펴보면 충돌회피알고리즘의 구성인자중 소나 탐지거리에 의한 영향이 가장 크며 다른 인자들에 의한 영향은 크지 않은 것을 확인할 수 있다.

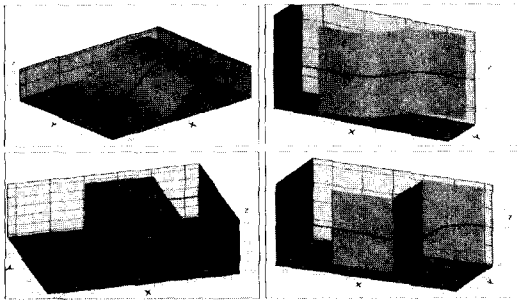


Fig.6 Trajectories of UV at the steep hill and cliff ($R = 100m$, $Dt = 0.5sec$, λ (Steep Hill) = 10, λ (Ver. Cliff) = 90, λ (Hor. Cliff) = 30)

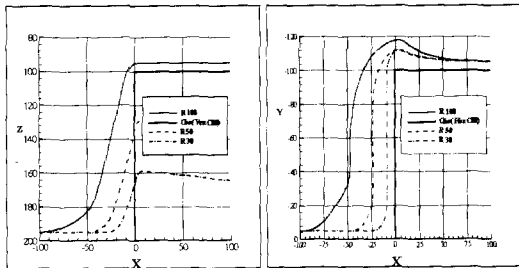


Fig.7 Effects of sonar range on the trajectories($Dt = 0.5sec$, $\lambda_D = 90$, $\lambda_S = 30$)

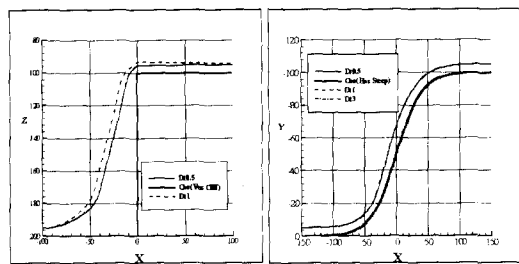


Fig.8 Effects of sonar ping interval on the trajectories($R = 100m$, $\lambda_D = 90$, $\lambda_S = 10$)

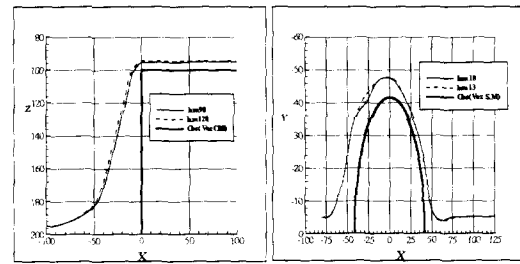


Fig.9 Effects of correction factor λ on the trajectories ($R = 100m$, $Dt = 0.5sec$)

5. 결론

본 논문에서는 수중운동체의 충돌회피시스템을 구성하고 그 성능을 검증하였다. 임의의 장애물 회피 상황을 가정하여 회피성능을 살펴본 결과 다양한 상황에 대한 대처 능력을 확인할 수 있었으며, 회피 기동 후의 임무 수행에 도움이 되도록 회피 기동이 이루어지는 것을 확인할 수 있었다. 충돌회피시스템의 성능에 관계하는 인자들의 회피성능에 대한 영향을 살펴본 결과, 소나 탐지거리가 가장 중요한 요소인 것을 확인할 수 있었다.

본 연구에서 개발한 충돌회피시스템의 경우 장애물 발견 초기에 수직, 또는 수평면의 회피 기동이 결정되는 형태이나 향후 매 시간마다 회피 기동이 이루어지는 면(수직, 수평)을 결정하는 형태의 시스템 혹은 3차원 회피 알고리즘을 적용한 시스템으로의 확장도 가능할 것으로 보여진다.

후 기

본 논문은 서울대학교 해양시스템공학연구소, BK 21 사업, 목적기초 사업의 지원으로 수행되었습니다. 지면을 빌어 감사의 말씀을 드립니다.

참 고 문 헌

- 박문규, 서상현, 1997 "신경망을 이용한 선박용 자동조타장치의 제어시스템 설계(1)," 대한조선학회 논문집, 제34권 제2호, pp.56-63.
- 박문규, 서상현, 1997 "신경망을 이용한 선박용

자동조타장치의 제어시스템 설계(II)," 대한조선학회 논문집, 제34권 제3호, pp.19-26.

- 김찬기, 1998 "물수체 모형 시험 해석을 위한 운동방정식의 구조 선택 및 계수 식별 결합법," 대한조선학회 논문집, 제35권 제2호, pp.20-28.
- 박찬욱, 허보현, 송준태, 1994 "만잠수 쌍동선의 최적 운동제어기 설계," 대한조선학회 논문집, 제31권 제2호, pp.65-77.
- 서상현, 송용규, 1994 "Auto-Pilot 시스템에 적용되는 제어 알고리즘에 대하여," 대한조선학회 논문집, 제31권 제2호, pp.38-44.
- 여동진, 1999 "슬라이딩모드제어와 최적제어이론을 이용한 AUV의 추적제어시스템 설계," 서울대학교 석사학위논문.
- 양승윤, 이만형, 1996 "수중운동체의 조종제어기 설계연구," 대한기계학회논문집(A), 제20권 제3호, pp.850-860.
- 한국기체연구원 KRISO, 1997 "200m 급 탐사 AUV 개발 IV," 최종보고서, UCN038-2064.D
- Anthony J. Healey, David Lienard, "Multivariable sliding mode control autonomous diving and steering of unma underwater vehicles," IEEE J. of O Engineering, Vol. 18, No. 3, pp. 327-339
- E.A. de Barros, 1995 "Application of a cooperative control system to the collision avoidance guidance of AUVs," J. of society of naval architects of Japan, Vol. 178.

- Jean-Jacques E. Slotine, Weiping Li, 1991. Applied Nonlinear Control, Prentice Hall International, Inc., pp.276-309.
- Thor I. Fossen, 1994, Guidance and Con Ocean Vehicles, John Wiley & Sons, pp.93-161.



〈 손 남 선 〉



〈 이 기 표 〉



〈 이 상 무 〉



〈 여 동 진 〉