

## 선박 자동 운항 제어기의 설계

곽문규<sup>(1)</sup>, 서상현<sup>(2)</sup>

### Design of Automatic Ship Maneuvering Control System

by

Moon Kyu Kwak<sup>(1)</sup> and Sang-Hyun Suh<sup>(2)</sup>

#### 요 약

본 논문은 선박자동 항로 추적제어기와 자동접이안 제어기를 포함하는 선박자동운항시스템 설계와 관련이 있다. 자동항로 추적제어기의 설계를 위해서는 최적제어기가 사용되었는데 선형화된 선박조종식이 사용되었다. 수치예는 자동항로 추적제어기가 선장이 미리 정한 way point를 추적할 수 있음을 보여주고 있다. 자동접이안 제어기의 설계를 위해서는 비중양화 방식의 제어기가 사용되었다. 자동접이안 제어기는 자동 항로 추적 제어기에 전진속도에 대한 퍼지 로직 제어기가 추가 되어 실현되었다. 수치예는 자동접이안 제어기가 성공적으로 사용되었음을 보여준다.

#### Abstract

This paper is concerned with the design of automatic ship maneuvering system including automatic path tracking controller and automatic berthing controller. The optimal control technique is employed to design the automatic path tracking controller, which is based on the linearized equations of ship motion. The numerical example shows that the automatic path tracking controller is capable of tracking the line between way points which are determined by pilot a priori. The decentralized control technique is employed to design the automatic berthing controller. In addition to the automatic path tracking controller, the fuzzy logic controller is used to control the forward speed. The numerical example shows that the automatic berthing controller can be successfully implemented.

Keywords : automatic ship maneuvering(선박자동운항), automatic berthing(자동접이안)

---

(1) 동국대학교 기계공학과

(2) 정회원, 한국기계연구원 선박해양공학센터

## 1. 서론

선박을 통한 해상 운송량의 증가는 연해와 근해 해상 사고 증가의 한 원인이 되고있다. 이러한 해상사고는 바로 인근해역의 해상오염으로 이어져 심각한 경제적, 사회적, 환경 적인 문제를 유발하고있는데 이와 같은 해난사고를 미연에 방지하기 위해서는 선박의 안전운항을 보장할 수 있는 항해 장비의 개발이 필수적이다. 최근에 개발된 최신 항해 보조 장비로는 GPS(Global Positioning System)와 같은 정확한 위치감지기와 중이해도를 대체할 수 있는 전자해도(ECDIS) 시스템을 예로 들 수 있는데 이들을 토대로 선박의 충돌 방지 장치, 최적 항로 설계, 선박 자동운항제어 시스템 등이 개발되고 있다.

선박 자동 운항 제어 시스템은 세 가지로 분류할 수 있는데 선박 자동 조타 장치, 자동 항로 추적 장치, 자동 접이안 제어기로 각각 분류할 수 있다. 자동 조타 장치는 선박의 선수각만을 제어하는 것으로 방위각을 계측할 수 있는 감지기만이 필요하기 때문에 가장 기초적인 선박 자동 운항 제어시스템이다. 자동 항로 추적 장치를 위해서는 선수각 뿐만 아니라 선박의 절대 위치 좌표를 감지할 수 있는 감지기가 필요하다. 값싼 GPS 장비의 개발 이전에는 이와 같은 감지기가 제공되지 않았기 때문에 자동 항로 추적 장치에 대한 제어 시스템이 제안되었어도 실제 적용은 불가능하였다. 자동 접이안은 항구내의 도선사의 역할을 대체할 수 있는 제어시스템을 가리키는데 선박 자동 운항 제어 시스템 중 난이도가 가장 높은 제어 문제이다. 본 연구에서는 자동 접이안을 자동 항로 추적 장치와 퍼지 로직에 근거한 전진 속도 제어를 결합하여 설계할 수 있음을 보이고 있다.

선박의 자동조타장치에 사용되는 제어기법중의 하나는 고전적인 제어이론중의 하나인 PID (Proportional Integral Derivative) 제어방법[20]이다. 선박의 자동조타장치는 선수각에 대한 정보를 타각의 제어에 입력하여 타각을 수정하여 원하는 방향을 유지하도록 만드는 제어시스템이다. 따라

서 제어시스템 자체는 SISO (Single-Input Single-Output)시스템을 근거로 설계되는데 일반적으로 Nomoto가 제안한 일차모델을 대상으로 한다. SISO 제어기는 선형모델을 바탕으로 설계되기 때문에 비선형 항과 불확실성에 대처할 수 있는 제어기의 개발이 동시에 요구된다. 그러나 보다 정확한 항로유지와 항구 내에서의 정밀한 조종을 위해서는 선수각과 선박의 절대 위치 좌표와 각각의 속도성분을 입력으로 하고 타각과 프로펠러 회전수를 출력으로 하는 MIMO (Multi-Input Multi-Output) 제어시스템이 필요하게 된다. 선박의 절대 위치 좌표를 정확하게 계측할 수 있는 GPS 장비의 개발은 자동 항로 추적 장치와 같은 좀더 개선된 형태의 선박 자동 운항 제어 시스템을 실제로 적용할 수 있는 길을 열어 놓았다고 말할 수 있다. 이러한 이유로 현재 구미 각국에서는 예정된 항로를 정확하게 추적할 수 있는 자동 항로 추적 제어기와 항구 내에서 선박의 접이안을 도선사의 도움 없이 수행할 수 있는 제어시스템이 개발되고 있다.

선박의 자동운항 제어시스템의 구현을 위해서 여러 가지 최신 제어기법이 시도되고 있는데 수로에서의 선박 조종을 위한 퍼지 제어기의 설계[1], 선박 접이안을 위한 퍼지 제어기의 설계[2], 기준 모델을 추적하도록 만든 퍼지 제어기의 설계[21]가 시도되었으며 신경망을 이용한 System Identification[3]과 자동조타 신경망 제어기의 설계 [4]에 관한 연구가 시도되었다. 또한 자동 항로 추적을 위한 신경망 제어기의 설계는 [23,8,9]에서 다루었으며 자동 접이안을 위해 신경망 제어기의 설계는 [10]에서 다루었다. 선박 조종 모델에 불확실성이 포함되어있기 때문에 이와 같은 불확실성에 대처할 수 있는 것으로 알려진 Sliding Mode 제어기가 선박 자동 항로 추적 제어기의 설계에 적용되었다[11,12]. 또한 강인제어기인  $H-\infty$  제어기를 자동 조타 장치에 적용한 결과도 보고되고 있다[13]. 그 외에 여러 가지 최신제어기법[14-19]이 선박에 적용되고 있다.

선박 자동 운항 제어 시스템의 설계 및 성공적

인 적용을 위해서는 정확한 선박 조종 모델의 유도가 필수적이다. 정확한 선박 조종 모델의 유도에 관해서는 많은 연구가 수행되어왔는데 [20,21,22] 특히 자동 접이안의 경우 선박이 지속 항진을 하기 때문에 저속 조종 모델에 관한 연구 [23,24]가 필요하다. 또한 항구내의 선박 조종 모델에는 천수효과가 포함되어야 하는데 유체력의 계산이 어렵기 때문에 정확한 선박 조종 모델의 유도는 사실상 불가능하다.

GPS는 인공위성의 라디오 항법 시스템으로 위치, 속도 및 시간을 제공한다. GPS는 해양에서의 항해를 위한 정확도를 개선하고 항해에 필요한 비용을 절감시켜줄 것으로 기대된다. 일반 운용조건 하에서 위치정확도가 15-20 미터인 것으로 보고 [25]되고 있으나 군사목적 외로 사용되는 경우 Selective Availability (SA)라는 고의적인 오차로 인하여 100 미터 이상의 오차를 가지게 된다. 100 미터 이상의 오차라 하더라도 선박의 대양 항해에 대해서는 큰 문제가 없을 것으로 예상된다. 그러나 항구내의 정밀 제어를 위해서는 충분하지 못한데, GPS의 정확도를 높이는 대안으로 제시된 것이 Differential GPS (DGPS)이다. DGPS는 국소지역에 위치가 알려진 GPS 수신처를 구축하고 수신처의 GPS 오차를 그 지역에 속한 GPS 수신기에 송신하여 GPS의 신호 오차를 수정하도록 하는 시스템인데 이 경우 오차는 5 미터 내로 된다고 보고되고 있다[25]. 이외에 위치 감지 장치로 고주파수 레이더와 레이저 거리 계측 감지기가 있는데 고주파수 레이더를 사용하는 경우 10 - 12 미터, 레이저를 사용하는 경우 2000 미터의 계측 범위 내에서 0.01%의 오차를 가지는 것으로 알려져 있다[25]. 이와 같은 감지 기술의 개발로 인하여 자동 항로 추적 제어기와 자동 접이안 제어기와 같은 정밀한 선박 제어가 가능하게 되었다.

본 논문은 GPS와 같은 정확한 위치감지기와 ECDIS 시스템과 같이 디지털화된 해양자료를 바탕으로 선박 자동 운항 제어 시스템을 설계하는 방법에 관한 연구 결과를 제시하고 있다. 본 연구에서 고려한 선박 자동 운항 제어 시스템은 선박

자동 항로 추적 제어기와 선박 자동 접이안 제어기이다. 본 연구에서는 먼저 선박 조종 방정식의 유도에 대하여 설명하고 이를 바탕으로 자동 항로 추적 제어기와 자동 접이안 제어기를 최적제어기법과 퍼지로지크 제어기법을 이용하여 개발하였고 이를 수치모사를 통하여 검증하였다. 본 연구에서 개발한 선박 자동 운항 제어시스템이 실제로 적용된다면 선박의 운항에 필요한 인원의 저감은 물론 선박의 안전 운항을 도모할 수 있을 것으로 예상되어 경제적인 효과가 매우 클 것으로 기대된다.

## 2. 선박 조종 방정식

선박의 조종 성능은 항해 안전성 뿐만 아니라 운항경제성과도 밀접한 관계가 있어 선박의 설계시 고려해야할 중요한 요소이다. 정확한 선박 조종 모델의 유도는 성공적인 제어기의 설계를 위해서 필수적이다. 이를 위하여 시스템 동정기법(System Identificati -on) 등이 사용되기도 하지만, 유체 동역학적 계수들의 이론적 추정에는 한계가 있고 여러 가지 요인에 대한 정확한 평가가 어렵기 때문에 선박 조종 모델에는 비선형성과 불확실성이 필연적으로 내포되어 있다고 간주해야 한다.

### 2.1 선박 조종 방정식의 유도

조종 운동 방정식에서 표현하고자 하는 물리적인 현상은 관성력, 조타력, 그리고 천수효과와 제한수역의 영향을 포함하는 외력들이 작용하는 6자유도 운동이다. 그러나 본 연구에서는 이력효과를 무시하고 정수 중에서 낮은 Froud 수와 작은 횡요를 가정하여 수상선의 조종방정식을 전후 동요(surge), 좌우동요(sway), 선수요(yaw)의 3자유도 연성 운동방정식으로 가정한다.

선박 조종 운동방정식의 유도를 위한 좌표계는 Fig. 1 과 같다. 공간에 고정된 관성 좌표계와 선체에 고정되어 선박과 같이 움직이는 국소 좌표계를 이용하면 다음과 같은 식을 유도할 수 있다[5].

$$\dot{R}_x = u \cos \phi - v \sin \phi, \quad \dot{R}_y = u \sin \phi + v \cos \phi, \quad \dot{\phi} = r \quad (1a-c)$$

여기서  $R_x$ 와  $R_y$ 는 XY 관성좌표계의 좌표값(m)이고  $u, v, r, \phi$ 는 각각 전진속도(m/s), 횡방향속도(m/s), 선수각속도(rad/s)와 선수요(rad)를 나타낸다.

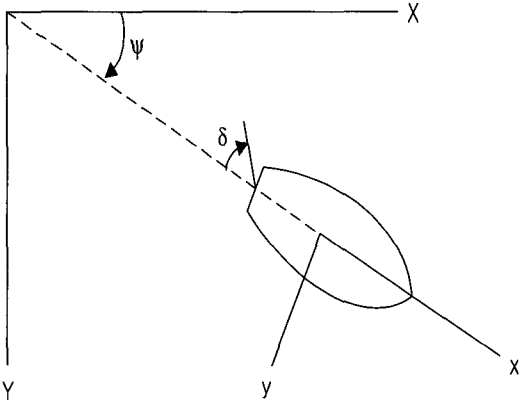


Fig. 1 The Coordinate System for Ship Maneuvering

선체에 고정된 좌표계의 원점이 무게중심과 일치한다고 가정하고 파도, 바람에 의한 영향을 무시하면 선체에 고정된 국소 좌표계에 대한 운동방정식은 뉴턴 제 2 법칙을 적용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$m(\dot{u} - vr) = X_{HR} + X_P, \quad m(\dot{v} + ur) = Y_{HR}, \quad I_{zz} \dot{r} = N_{HR} \quad (2a-c)$$

여기서 식(2a)는 전후동요, 식(2b)는 좌우동요, 식(2c)는 선수요를 표현하는 운동방정식이다. 또한 아래첨자 HR은 선체와 타, 아래첨자 P는 프로펠러를 나타낸다. 각각의 항은 다시 다음과 같이 표현된다.

$$m = \left(\frac{1}{2} \rho L^3\right) m', \quad I_{zz} = \left(\frac{1}{2} \rho L^5\right) I'_{zz} \quad (3)$$

은 선체의 질량과 선수요 질량관성모멘트를 나타내며 '은 무차원화된 양을 나타낸다. 그리고 선체의 전후 방향으로 작용하는 힘은 선체와 타에 관한 힘인데 다음과 같이 가정한다.

$$X_{HR} = X_{u'} \dot{u} + X_{vr} vr + X_{\delta\delta} \delta^2 + X(u) \quad (4)$$

각각의 항은 다시 다음과 같이 무차원 상수를 이용하여 표현된다.

$$X_{u'} = \left(\frac{1}{2} \rho L^3\right) X'_{u'}, \quad X_{vr} = \left(\frac{1}{2} \rho L^3\right) X'_{vr}, \quad X_{\delta\delta} = \left(\frac{1}{2} \rho L^2 U^2\right) X'_{\delta\delta} \quad (5a-c)$$

여기서  $\rho$ 는 해수의 질량밀도이고  $L$ 은 선체의 길이이며  $U = \sqrt{u^2 + v^2}$ 로 나타나는 합속도이다.  $X(u)$ 는 선속  $u$ 의 함수로 표시되는 선체 저항인데 본 연구에서 고려한 실선에 대해서는 다음과 같이 표현된다. 선체 저항의 단위는 N이다.

$$X(u) = -(-116.384 + 3507u + 29032.5u^2 + 51.1u^3 - 180u^4 + 20u^5) \quad (6)$$

프로펠러 추력은 다음과 같이 표현되는데

$$X_P = (1-t) \rho n^2 D^4 K_T(J) \quad (7)$$

여기서  $n$ 은 프로펠러의 rps(revolution per second)를 나타내며 본 연구에서 고려한 선체는  $t=0.180$ ,  $D=9.1$  m의 값을 가지고 있다. 그리고

$$K_T(J) = \begin{cases} 0.34958 - 0.33759J - 0.13948J^2 & n \geq 0 \\ -0.33500 & n < 0, J \geq -0.6 \\ 0.19000 + 0.51000J & n < 0, J < -0.6 \end{cases} \quad (8)$$

로 표현되는데 접이안을 위해서 역회전이 필요하기 때문에 역회전에 관한 식은 참고문헌 [7]의 식

Table 1 Ship Parameters and Nondimensionalized Coefficients

|                     |                            |                       |                            |                       |                            |
|---------------------|----------------------------|-----------------------|----------------------------|-----------------------|----------------------------|
| $\rho$              | 1025 kg/m <sup>3</sup>     | $L$                   | 325 m                      | $t$                   | 0.180                      |
| $D$                 | 9.1 m                      | $w$                   | 0.314                      | $m'$                  | 1815.0 × 10 <sup>-5</sup>  |
| $\dot{I}_{zz}$      | 113.4 × 10 <sup>-5</sup>   | $X'_{u'}$             | -138 × 10 <sup>-5</sup>    | $X'_{vr}$             | 1530.1 × 10 <sup>-5</sup>  |
| $X'_{\delta\delta}$ | -134.0 × 10 <sup>-5</sup>  | $Y'_{v'}$             | -1423.5 × 10 <sup>-5</sup> | $Y'_{r'}$             | 39.7 × 10 <sup>-5</sup>    |
| $Y'_{v'}$           | -1930.9 × 10 <sup>-5</sup> | $Y'_{r'}$             | 561.4 × 10 <sup>-5</sup>   | $Y'_{v v }$           | -4368.1 × 10 <sup>-5</sup> |
| $Y'_{r r }$         | 206.5 × 10 <sup>-5</sup>   | $Y'_{vrr}$            | -3428.2 × 10 <sup>-5</sup> | $Y'_{r v }$           | 321.8 × 10 <sup>-5</sup>   |
| $Y'_{\delta}$       | 326.7 × 10 <sup>-5</sup>   | $Y'_{\delta \delta }$ | 0                          | $N'_{v'}$             | -29.1 × 10 <sup>-5</sup>   |
| $N'_{r'}$           | -47.5 × 10 <sup>-5</sup>   | $N'_{v'}$             | -761.2 × 10 <sup>-5</sup>  | $N'_{r'}$             | -322.0 × 10 <sup>-5</sup>  |
| $N'_{v v }$         | 118.2 × 10 <sup>-5</sup>   | $N'_{r r }$           | -113.6 × 10 <sup>-5</sup>  | $N'_{vrr}$            | 338.2 × 10 <sup>-5</sup>   |
| $N'_{r v }$         | -361.7 × 10 <sup>-5</sup>  | $N'_{\delta}$         | -147.6 × 10 <sup>-5</sup>  | $N'_{\delta \delta }$ | 0                          |

을 이용하였다. 여기서  $J = u(1-w)/nD$  이고 본 연구에서 고려한 선체는  $w = 0.314$ 의 값을 갖는다.

선체의 좌우방향으로 작용하는 힘은 다음과 같이 표현된다.

$$Y_{HR} = Y_{v'}\dot{v} + Y_{r'}\dot{r} + Y_{v'}v + Y_{r'}r + Y_{v|v|}v|v| + Y_{r|r|}r|r| + Y_{vrr}vr^2 + Y_{r|v|}r|v| + Y_{\delta}\delta + Y_{\delta|\delta|}\delta|\delta| \quad (9)$$

여기서

$$Y_{v'} = \left(\frac{1}{2} \rho L^3\right) Y'_{v'}, \quad Y_{r'} = \left(\frac{1}{2} \rho L^4\right) Y'_{r'}, \\ Y_{v'} = \left(\frac{1}{2} \rho L^2 U\right) Y'_{v'}, \quad Y_{r'} = \left(\frac{1}{2} \rho L^3 U\right) Y'_{r'} \quad (10a-d)$$

$$Y_{v|v|} = \left(\frac{1}{2} \rho L^2\right) Y'_{v|v|}, \quad Y_{r|r|} = \left(\frac{1}{2} \rho L^4\right) Y'_{r|r|}, \\ Y_{vrr} = \left(\frac{1}{2} \rho L^4 U^{-1}\right) Y'_{vrr} \quad (10e-g)$$

$$Y_{r|v|} = \left(\frac{1}{2} \rho L^3\right) Y'_{r|v|}, \quad Y_{\delta} = \left(\frac{1}{2} \rho L^2 U^2\right) Y'_{\delta}, \\ Y_{\delta|\delta|} = \left(\frac{1}{2} \rho L^2 U^2\right) Y'_{\delta|\delta|} \quad (10h-j)$$

선수요에 작용하는 힘은 다음과 같이 표현된다.

$$N_{HR} = N_{v'}\dot{v} + N_{r'}\dot{r} + N_{v'}v + N_{r'}r + N_{v|v|}v|v| + N_{r|r|}r|r| + N_{vrr}vr^2 + N_{r|v|}r|v| + N_{\delta}\delta + N_{\delta|\delta|}\delta|\delta| \quad (11)$$

여기서

$$N_{v|v|} = \left(\frac{1}{2} \rho L^3\right) N'_{v|v|}, \quad N_{r|r|} = \left(\frac{1}{2} \rho L^5\right) N'_{r|r|}, \\ N_{vrr} = \left(\frac{1}{2} \rho L^5 U^{-1}\right) N'_{vrr} \quad (12e-g)$$

$$N_{r|v|} = \left(\frac{1}{2} \rho L^4\right) N'_{r|v|}, \quad N_{\delta} = \left(\frac{1}{2} \rho L^3 U^2\right) N'_{\delta}, \\ N_{\delta|\delta|} = \left(\frac{1}{2} \rho L^3 U^2\right) N'_{\delta|\delta|} \quad (12h-j)$$

본 연구에서 고려한 선박의 최대 타각은  $\delta_{\max} = 35.0^\circ$ 이며 최대 타각 속도는  $\dot{\delta}_{\max} = 2,340^\circ/s$ 이다. 조종모델의 시험시 이와 같은 타의 동역학적 모델을 고려하였으나 선박의 운동이 타의 운동에 비하여 상대적으로 느리기 때문에 제어기 설계시에는 무시되었고 최대 타각은 제한 조건으로 사용되었다. Table 1은 본 연구에서 고려한 선박에 대한 제원 및 무차원 상수들에 대한 값을 보여주고 있다.

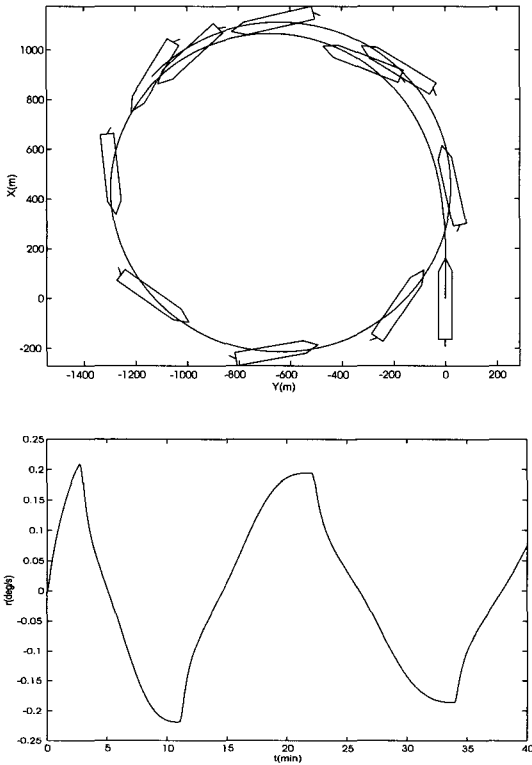


Fig. 2(a-b) Turning Trajectory for 35° Port Rudder Turn (7 knot) and Time History of Yaw Velocity for 20°/20° Zig-Zag Maneuver

## 2.2 수치 계산 결과

비선형 조종 운동 방정식, (1)과 (2)를 이용하여 수치 모사를 수행하였는데 실선시험에 적용하는 Turning 과 Zig-Zag Maneuver를 고려하였다. 진입속도 7 knots 인 경우의 35° Port Rudder Turn에 대한 궤적, 전후동요, 좌우동요의 시간 변화를 보여주는 것이 Fig. 2(a-b) 이고 20°/20° Zig-Zag Maneuver 에 대한 선수요 속도의 시간 변화를 보여주는 것이 Fig. 2d 이다. 이들 그림은 한국 기계연구원 보고서[5]의 결과와 선회궤적이 약간 차이를 보이고 있으나 비교적 잘 일치하고 있다.

## 3. 선박 자동항로 추적 제어기의 설계

앞에서 지적하였듯이 선박 자동 조타 장치는 선수요에 관한 식 (2c)를 바탕으로 설계되어 선박 자동 조타 제어시스템은 SISO가 된다. 본 장에서는 식(1)과 (2)를 동시에 고려한 선박 자동 항로 추적 제어기의 설계방법을 제시하고자 한다. 자동항로 추적 제어기의 입력변수는 선박의 기준 항로에 대한 위치의 벗어남과 선수각이 되며 출력은 타각이 된다. 따라서 제어시스템은 MISO (Multi-Input Single-Output) 시스템이다. 여기서 고려한 선박조종모델이 사실상 비선형이어서 비선형계 다자유도 시스템에 대하여 제어기를 설계해야 하는데 이는 현재의 기술로 매우 어려운 문제이다. 본 연구에서는 운용점에 관하여 조종방정식을 선형화하고 선형화된 모델을 바탕으로 제어기를 설계하고자 한다. 이렇게 설계된 제어기를 비선형계에 적용하여 그 효용성을 입증하는 것이 본 연구의 목적이다.

### 3.1 자동항로 추적 제어기의 설계

2절에서 고려한 조종운동방정식은 비선형인데 비선형 시스템에 대한 제어기의 설계는 어렵다. 선박이 주어진 항로에 대하여 많이 벗어나 있지 않고 운동이 작다고 가정할 경우 비선형 조종운동방정식을 선형화하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{z} = Az + B\delta \quad (13)$$

여기서  $z = [R_y \ \psi \ v \ r]^T$ 는 상태변수이며 계수행렬은 다음과 같다.

$$A = M^{-1}C^*, \quad B = M^{-1}B^* \quad (14)$$

그리고

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & (m - Y_{\dot{v}}) & -Y_r \\ 0 & 0 & -N_{\dot{v}} & (I_{zz} - N_r) \end{bmatrix},$$

$$C^* = \begin{bmatrix} 0 & u & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & Y_v & Y_r \\ 0 & 0 & N_v & N_r \end{bmatrix}, \quad B^* = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ Y_{\delta} \\ N_{\delta} \end{bmatrix} \quad (15a-c)$$

식(13)이 선형식이기는 하지만 계수들에는 전진 속도  $u$  가 포함되어 있어 실제로는 전진 속도에 따라 계수행렬이 변하게 된다. 본 연구에서는 전진 속도가 일정한 경우에 대하여 제어기를 설계하는데 만일 전진속도가 설계시 고려한 전진속도와 많은 차이가 있는 경우에는 제어기의 계산식을 바꾸어야 한다. 그러나 수치계산 결과 제어기의 이득에 대한 영향은 크지 않은 것으로 판명되었다. 식(13)이 암시하듯이 자동 항로 추적 제어기는 타를 조종하여 좌우동요와 선수요를 제어하게 된다. 실제 제어를 위해서는 속도항도 필요하게 되는데 본 논문에서는 이들 상태변수가 모두 계측 가능하다고 가정하였다. 만일 상태변수의 일부만이 계측 가능하다고 한다면 observer 설계도 고려하여야 하는데 본 연구에서는 제어기 설계에 초점을 맞추어 그 타당성을 먼저 조사하였다.

일정한 전진 속도에 대하여 선형화 된 조종 방정식을 근거로 최적제어기법을 설계하기 위하여 다음과 같은 성능지수(Performance Index)를 고려해 보자.

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (z^T Q z + R \delta^2) dt \quad (16)$$

여기서  $Q$  와  $R$  은 설계자가 임의로 설정할 수 있는 가중치 행렬이다. 성능 지수를 최소화하는 해는 다음과 같은 Riccati 방정식의 해로 얻어지며

$$KA + A^T K + Q - KBR^{-1}B^T K = 0 \quad (17)$$

이 경우 최적제어기는 다음과 같이 표현된다.

$$\delta = -R^{-1}B^T K z = -Gz \quad (18)$$

본 연구에서는 다음과 같은 계수 행렬들이 최적제어기 설계를 위하여 제시되었다.

$$Q = \text{diag}([1 \ 10^6 \ 1 \ 10^6]) , \quad R = 10^6 \quad (19)$$

제시된 계수 행렬들의 값은 수치 계산을 통하여 여러 가지 계수 행렬들 중에서 가장 합당한 시간

응답을 보여주는 것이다.  $\phi$ 와  $r$ 의 가중치가  $R_y$  와  $v$ 에 비하여 큰 이유는 실제의 값이 상대적으로 작기 때문이다. 또한  $R$  값을 낮출 경우 타의 거동이 부드럽어지며 반대로 이 값을 높일 경우 타의 거동이 격해진다.

이와 같은 최적제어기를 타의 제어에 바로 적용할 수는 없는데 그 이유는 상태변수의 입력시 Way Point 들을 고려하는 국소 좌표계를 사용하여야 하기 때문이다. 먼저 Way Point, A 와 B 점을 고려해 보자. 선박이 A에서 B로 이동하고 있다고 가정할 때 선박이 따라가야 하는 항로는 A 와 B를 연결하는 직선이 된다. 따라서 최적제어기에 입력될 상태변수는 이 직선이 국소  $x$  좌표계를 근거로 해야 한다. 이를 위하여 A 와 B를 있는 좌표계로 좌표변환이 필요한데 본 연구에서는 다음 식을 사용하였다.

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{B_y - A_y}{B_x - A_x} \right) ,$$

$$d = [0 \ 1] \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_x - A_x \\ R_y - A_y \end{bmatrix} \quad (20)$$

여기서  $R_x, R_y$ 는 선박의 절대 위치 좌표이다. 그러므로 최적 제어기에 관한 식 (26)은 다음과 같이 수정되어 표현된다.

$$\delta = -G*[d \ \phi - \theta \ v \ r] \quad (21)$$

실제 적용의 경우 타각이 35도를 넘지 못하기 때문에  $|\delta| \leq 0.6109$  를 수치모사를 수행할 때 적용하였다. 선박이 Way Point 에 근접하게 되는 경우 다음 Way Point 로 진행하게 되는 조건이 필요하게 되는데 본 연구에서는 Way Point 의 허용 반경을 지정하고 선박이 허용 반경 내에 진입하면 다음 Way Point를 향하도록 제어시스템을 설계하였다.

### 3.2 수치 계산 결과

본 연구에서 설계한 최적 항로 추적 제어기의 성능 평가를 위해서 Fig. 3(a)에 보이는 바와 같이 4

개의 Way Point를 설정하였다. Fig. 3(a)에서 원으로 나타나있는 점은 각각의 Way Point들을 나타내는데 각각의 Way Point들의 허용 반경은 0, 1000, 1000, 100 m 이다. 선박은 초기에 10 knot의 속력으로 진행하고 있으며 이 속도에 맞추어 프로펠러 회전수를 고정시키고 타각을 조정하여 미리 설정한 Way Point 들을 거처가도록 하는 수치 계산을 수행하였다. 선박이 다음 Way Point의 허용 반경 내에 진입하면 다음 Way Point를 향하여 진행하도록 되어 있는데 그림에서 보이듯이 첫 번째 Way Point에 도달하기 전에 다음 Way Point로 향하여 선수를 회전하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 3(b)는 선수요 및 타각의 시간변화를 보여주고 있다.

#### 4. 선박 자동 접이안 제어기의 설계

선박의 자동 운항 중 가장 어려운 문제중의 하나가 항구 내에서의 접이안이다. 항구 내에서의 접이안은 경험이 많은 도선사에게도 어렵고 복잡한 문제인데 접이안은 주어진 속도를 유지하면서 접안 지점에 선박이 접근하는 경우 멈추게 만드는 과정을 일컫는다. 대형 선박의 경우에는 예선의 보조를 받아 최종적인 접안이 이루어지게 되며 소형 선박은 자체적으로 최종 접안이 이루어진다. 도선사의 도움 없이 이루어지는 자동 접이안을 위해서는 선결되어야 할 문제들이 있는데 참고문헌 [26,27]에서 지적되었듯이 자동제어시스템의 구축, 접안루트의 설계, 제어기의 설계 등이다. 또한 이와 같은 자동접이안 시스템의 구축을 위해서는 선박의 정확한 위치를 계측할 수 있는 위치 감지장치가 필요하며[25] 바람이나 조류와 같은 외부교란의 정확한 예측, 천수와 저속에서의 선박운동에 대한 정확한 모델 등이 필요하다[23,24,28]. 즉 하드웨어 문제와 동적모델링 문제로 분류할 수 있다. 하드웨어문제는 현재 GPS(Global Positioning System)와 같은 정확한 위치 감지기의 출현으로 해결되었으나 동적모델링 문제는 유체력과 외력의 정확한 산정이 어려워 연구가 진행중이다.

자동 접이안은 자동 항로 추적제어기에서 한 단계 진보된 제어기로서 앞에서 고려하지 않았던 전진 속도제어를 필요로 하게 된다. 일반적으로는

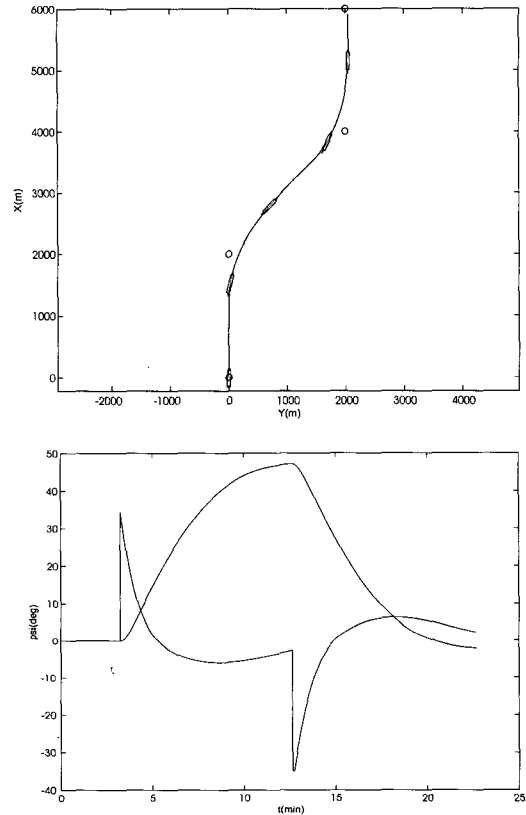


Fig. 3(a-b) Time History of Trajectory, Yaw and Rudder Angles for Automatic Path Tracking Control

타각 제어와 전진 속도제어를 동시에 수행하게 되는데 따라서 제어 시스템은 MIMO (Multi-Input Multi-Output) 시스템이 된다. 본 연구에서는 비중앙화제어, 즉 타각제어와 속도제어가 서로 비연성화되어 있는 경우를 고려하였다. 따라서 타각제어는 앞에서 고려한 최적제어기로 수행하고 전진 속도제어는 퍼지로지직에 근거한 제어기를 사용하였다.

#### 4.1 자동 접이안 최적 퍼지 혼합 제어기의 설계

퍼지로지직 제어기가 통상적인 제어 방법에 대하여



Table 2 Fuzzy Rule

| l<br>u | ZE | PS | PM | PB | PG | PF |
|--------|----|----|----|----|----|----|
| NS     | PS | PS | PM | PM | PB | PB |
| ZE     | ZE | ZE | PS | PS | PM | PM |
| PS     | NS | NS | ZE | ZE | PS | PS |
| PM     | NM | NM | NS | NS | ZE | ZE |
| PB     | NB | NB | NM | NM | NS | NS |
| PG     | NB | NB | NB | NB | NM | NM |
| PF     | NB | NB | NB | NB | NB | NB |

대안으로 제시된 이후 여러 가지 응용문제에서 그 성능이 입증되고 있다. 그러나 퍼지로지 제어기의 적용에 있어 퍼지로직에 사용되는 Membership 함

수의 선택과 안정성 및 수렴성에 관한 수학적인 증명이 매우 어려워 현재 많은 연구가 진행중이다.

선박의 접이안 문제에 대하여 퍼지로직을 적용하기 위해서는 여러 개의 입력, 즉 선속, 선박의 위치, 선수각, 선수요 등과 같은 상태변수를 계측하여야 하며 이를 바탕으로 타각과 프로펠러 속력을 결정하여야 한다. 본 논문에서는 이와 같이 여러 개의 입력에 대하여 퍼지로직을 설계한다는 것이 매우 어렵기 때문에 선속제어를 선수각과 횡동요 제어로부터 분리하여 비중양화 제어기를 설계하였다. 선속제어를 퍼지로직 제어기를 사용하여 수행한다면 입력변수는 선속과 선박의 위치가 된다. 본 연구에서는 선박의 위치를 접이안 점에서부터의 직선거리를 퍼지로직 제어기의 입력으로 간주하였다. 이 경우에 퍼지로직 제어기는 다음과 같이 표현된다.

if 선속이  $u_i$  이고 직선거리가  $l_i$  이면

프로펠러 rpm은  $n_i$  가 된다.

이상과 같은 퍼지법칙(fuzzy rule)의 집합을 적용하여 퍼지제어를 계산하게 되는데 본 연구에서는 다음과 같은 종합 표를 이용하였다. 종합 표의  $l$  은 다음과 같이 표현된다.

$$l = \text{sgn}(d^o - d^*) d \tag{22}$$

$$d = \sqrt{(R_x - P_x)^2 + (R_y - P_y)^2},$$

여기서

$$d^* = \sqrt{(R_x - A_x)^2 + (R_y - A_y)^2}$$

$$d^o = \sqrt{(P_x - A_x)^2 + (P_y - A_y)^2} \tag{23}$$

인데  $d$  는 현재 위치와 정선 위치 사이의 직선거리이며  $d^*$  와  $d^o$  는 정선위치에서 벗어난 정도를 나타내기 위하여 도입된 거리이다. 여기서  $R_x, R_y$  는 선박의 위치 좌표,  $P_x, P_y$  는 접안 점의 좌표,  $A_x, A_y$  는 시작 Way Point의 좌표이다.

## 4.2 수치 계산 결과

선박의 직선 항해시 5 knot 의 속력으로 진입하여 반원형태의 항로를 따라 접안 하는 문제를 수치모사를 통하여 검증하였다. Fig. 4(a)의 궤적에서 원으로 보여지는 것이 Way Point들인데 6개의 Way Point들이 설정되었다. 각각의 Way Point들의 허용반경은 0, 400, 400, 400, 400, 200m로 주어졌는데 그림에서 알 수 있듯이 선박은 비교적 주어진 접안 항로를 잘 추적하고 있음을 알 수 있으며 최종적으로 접안 허용 범위 내에 선박이 접근하게 됨을 확인할 수 있다. Fig. 4(b)부터 Fig. 4(c)는 전후동요, 선수요 및 타각의 시간변화를 보여주고 있다.

## 5. 고찰 및 결론

선박의 항로 유지 및 접이안 문제를 해결하기 위해서는 여러 개의 입력, 즉 선속, 선박의 위치, 선수각, 선수요 등과 같은 상태변수를 계측하여야 하며 이를 바탕으로 타각과 프로펠러 속력을 결정하여야 한다. 또한 현재 상황에 대한 정확한 인식을 위해서는 선박 주위의 지형 지물 데이터가 제공되어야 한다. GPS나 DGPS와 같이 급속하게 발전하고 있는 위치감지기의 개발은 선박의 자동 항을 위한 정확한 위치계측을 가능하게 하여 앞으로 항로이탈 방지 및 충돌방지를 위한 연구가 활

## 선박 자동 운항 제어기의 설계

발해될 것으로 전망된다. 이와 더불어 해도의 디지털화는 선박운항에 대한 자동화를 가속화할 수 있을 것으로 예상된다. 구미 각국에서는 이미 이러한 기술발전을 염두에 두고 선박자동운항에 대한 연구가 활발하게 진행중이다. 매년 수백 건에 이르는 해난사고가 우리 나라 연근 해에서 발생하고 있는 점과 해상을 통한 물류이동이 매년 증가하고 있다는 점은 선박 운항 자동화가 시급함을 암시해주고 있다.

본 연구에서는 이와 같이 21세기 선진국으로 진입하기 위한 기반 기술로서 해양을 통한 물류이동의 증가에 대처하고 해난사고 예방을 위하여 디

지탈 전자 해도 시스템인 ECDIS 와 선박 자동운항 제어 시스템을 연계하는 문제에 대하여 조사하였다. 아울러 선박 자동운항 제어시스템의 설계를 위한 제어방법을 개발하고 이를 수치해석을 통하여 검증하였다. 본 연구에서 고려한 제어 방법은 선박의 항로유지를 위한 최적제어방법과 자동접이안을 위한 퍼지 최적 혼합제어방법이다. 비선형성으로 표현되는 선박조종모델에 대하여 이를 선형화한 모델을 바탕으로 설계된 최적제어기가 강인성을 가지고 있음을 입증하였고 미리 설정된 항로를 잘 추적하고 있음을 확인하였다. 자동 접이안을 위해서 비중앙화제어기법을 고려하였는데 이는

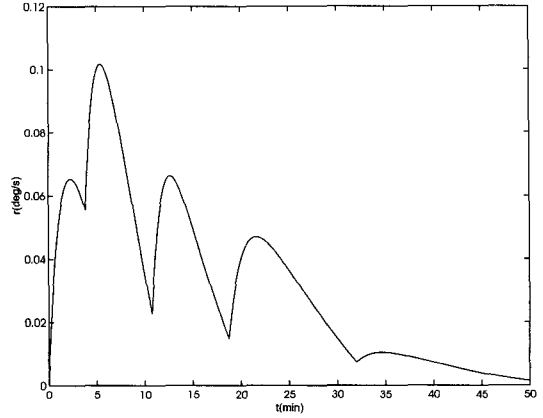
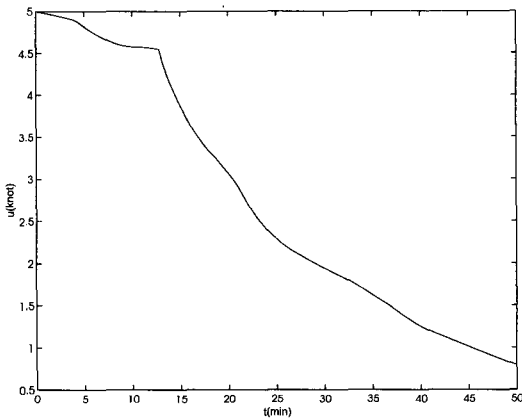
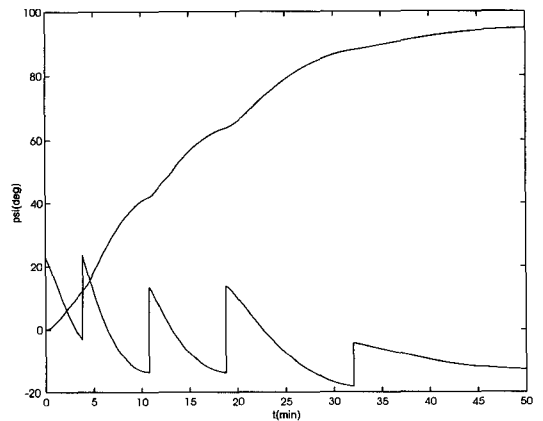
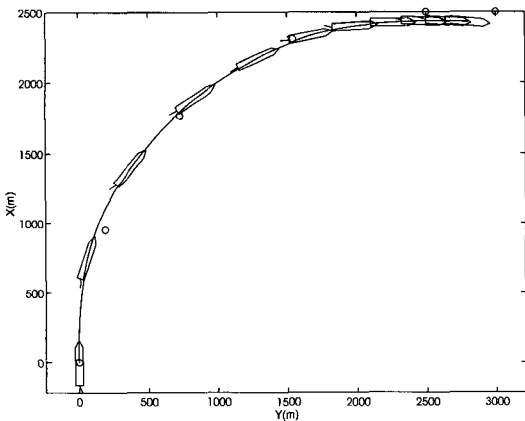


Fig. 4(a-b) Time History of Trajectory and Ship Speed for Automatic Berthing Control

Fig. 4(c-d) Time History of Yaw, Yaw Velocity and Rudder Angles for Automatic Berthing Control

선속제어와 선수각 및 횡요를 분리하여 제어기를 설계하는 것을 말한다. 본 연구에서는 선속제어를 위해서는 퍼지제어기를 고려하였는데 선박의 선속제어가 매우 어려운 점을 고려할 때 퍼지제어기가 다른 제어기에 비하여 쉽게 설계될 수 있다. 또한 도선사의 경험을 퍼지제어기로 쉽게 변환할 수 있다는 점에서 그 효용성이 입증된다.

본 연구에서 고려한 이들 제어기는 수치모사를 통하여 그 효용성이 입증되었다. 그러나 실제 적용을 위해서는 해결해야할 문제점들이 많은데 먼저 제어기의 입력으로 선박 조종 모델의 상태변수를 계측할 수 있는 감지기의 개발이 필요하다. 만일 이들 상태변수들을 모두 계측할 수 없는 경우에는 observer 설계를 고려해 보아야한다. 또한 선박의 저속 운항에 대한 정확한 조종모델이 개발되어야 하며 천수 효과에 대한 연구도 필요하다. 프로펠러 역회전에 대한 조종모델이 필요하고 선박이 옆으로 진행되는 경우에 대한 조종모델이 필요하다. 다시 말하면 선박의 정확한 조종모델이 필요하다. 만일 이론적으로 조종모델을 유도할 수가 없다면 실험을 통한 system identification이 필요하다. 이 경우 신경망을 이용한 system identification이 유효할 것으로 예상된다.

## 후 기

본 연구는 한국기계연구원 선박해양공학연구센터의 위탁과제로 수행되었다. 관계자 여러분께 감사의 말을 전한다.

## 참고 문헌

- [1] 구자윤, 이철영, 1993, "수로에 있어서 선박조정의 퍼지학습제어", 한국항만학회지 제17권 제2호, 61-68.
- [2] 구자윤, 이철영, 1994, "선박접이안의 퍼지학습제어", 한국항해학회지 제 18권 제 2호, 61-68.
- [3] 곽문규, 서상현, 1997, "신경망을 이용한 선박용 자동조타 장치의 제어시스템 설계(I)", 대한조선학회지, 34권 2호, 56-63.
- [4] 곽문규, 서상현, 1997, "신경망을 이용한 선박용 자동조타 장치의 제어시스템 설계(II)", 대한조선학회지, 34권 3호, 19-26.
- [5] 김선영외, 1988, "조정성능 추정기법 개발 (I)", 한국기계연구소 보고서, UCE 337-1082 D.
- [6] 서상현외, 1993, "선박용 Auto-Pilot시스템 개발(I)", 한국기계연구원 선박해양 공학연구센터 보고서, UCN 295-1725 D.
- [7] 구자윤, 이철영, 1995, "저속시 선체운동모델을 이용한 FNN 선박접이안 시스템의 유용성 검증", 해양안전학회지 창간호, 39-55.
- [8] Mort, N., Derradji, D.A., 1993, "Application Of Neural Networks To Marine Vehicle Control", Proceedings of 10th Ship Control Systems Symposium, Canada, 2-287 - 2-305.
- [9] Poznyak, A.S. and Sanchez, E.N., 1996, "Nonlinear System Identification And Trajectory Tracking Using Dynamic Neural Networks", Proceedings of the 35th Conference on Decision and Control Kobe, Japan, 955-960.
- [10] Yamato, H., Uetuski, H. and Koyama, T., 1990, "Automatic Berthing by the Neural Controller", Proceedings of the Ninth SCSS, Vol. 2.
- [11] Papoulias, F.A. and Chism, S.R., 1992, "Path Keeping Of Autonomous Underwater Vehicles Using Sliding Mode Control", Int. Shipbuild. Progr., Vol. 39, No. 419, 215-246.
- [12] Papoulias, F.A. and Healey, A.J., 1992, "Path Control of Surface Ships Using Sliding Modes", Journal of Ship Research, Vol. 36, No. 2, 141-153.
- [13] Grimble, M.J., Zhang, Y. and Katebi, M.R., 1993, "H $\infty$ -Based Ship Autopilot Design", Proceedings of 10th Ship Control Systems Symposium, Canada, 2-25 - 2-66.
- [14] Chinn, N.L. et al., 1993, "Robust Control Design For Motion Control Of Swath Vessels", Proceedings of 10th Ship Control Systems Symposium, Canada, 1-198 - 1-212

- [15] Farbrother, H. N. R., 1993, "Trajectory Control Of A Mine-Counter-Measures UnderWater Unmanned Vehicle Using Cascade Control", Proceedings of 10th Ship Control Systems Symposium, Canada, 3-401 - 3-409.
- [16] Fossen, T.I., 1993, "High Performance Ship Autopilot with Wave Filter", Proceedings of 10th Ship Control Systems Symposium, Canada, 2-271 - 2-285.
- [17] Källstaröm, C.G. and Theorén, K., 1993, "Dynamic Compensation System", Proceedings of 10th Ship Control Systems Symposium, Canada, 2-379 - 2-407.
- [18] Reid, R.E. and Moore, J.W., 1982, "A Steering Control System to Minimize Propulsion Losses of High-Speed Containerships. Part I: System Dynamics", Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol. 104.
- [19] Reid, R.E. and Moore, J.W., 1982, "A Steering Control System to Minimize Propulsion Losses of High-Speed Containerships. Part II: Controller Design", Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol. 104.
- [20] Minorsky, N., 1992, "Directional Stability of Automatically Controlled Steered Bodies", J. Amer. Soc. Nav. Eng., Vol. 34.
- [21] Layne, J.R. and Passino, K.M., 1993, "Fuzzy Model Reference Learning Control for Cargo Ship Steering", IEEE Control Systems, 23-34.
- [22] Biancardi, C.G., 1988, "On a Simplified Mathematical Model for an Onboard Maneuvering Simulator and its Potential Applications to Ship Control", International Shipbuilding Progress, Vol. 35, 401.
- [23] Burns, R.S. and Polkinghorne, M., 1993, "A Neural Network Controller For Optimal Guidance Of Surface Ships", Proceedings of 10th Ship Control Systems Symposium, Canada, 2-195 - 2-209.
- [24] Hasegawa, K. and Kitera, K., 1993, "Mathematical Model of Maneuverability at Low Advance Speed and its Application to Berthing Control", Proceedings of the Second Japan-Korea Joint Workshop on Ship and Marine Hydrodynamics, 144-153.
- [25] Kremer, G. T. et al., 1990, "The Effect of Selective Availability on Differential GPS Corrections," Journal of the Institute of Navigation, Vol. 37, No. 1.
- [26] Kasabeh, Y.A., Pourzanjani, M.M. and Dove, M.J., 1993, "The Navigational Problems In Auto-Pilot Design For Automatic Berthing Of Ships", Proceedings of 10th Ship Control Systems Symposium, Canada, 3-79 - 3-106.
- [27] Koyama, T. and Shimizu, K., 1984, "Fundamentals of Automatic Harbour Maneuvering". Proceedings of the 7th Ship Control systems Symposium, Bath, U.K.
- [28] Fabiani, P., 1993, " Control Of A Ship Course Turning Under Roll Constraints", Proceedings of 10th Ship Control Systems Symposium, Canada, 2-255 - 2-269.