

< 논 문 >

자동운항시스템의 제어에 관한 실험적 연구(1)

한봉주* · 배경수* · 김환성** · 김상봉***

(1995년 8월 7일 접수)

Experimental Study on Control of Autopilot System (I)

B. J. Han, K. S. Bae, H. S. Kim and S. B. Kim

Key Words : Autopilot Control(자동운항시스템제어), Servo Control Method(서보제어법), Image Processing Method(이미지프로세싱)

Abstract

This paper presents a design method for autopilot control system in course change to the specified direction based on a robust digital servo control method incorporating the concept of the annihilator polynomial. The mathematical model of ship turning motion is very complex in the view of practical control because it has time varying parameters, nonlinear and dead time terms. To apply the digital servo control method based on computer control, the model is linearized at an equilibrium point and discretized with appropriate sampling time. The control algorithm was evaluated on the basis of computer simulation for a model ship and the practical experiment was carried out with an image processing method for measurement of ship position in a water tank. The results of overall experiments show that the proposed control method will be one of good way to keep a track plotted in the map.

1. 서 론

선박이 대형화, 고속화되고 좁은 해역에서의 해상교통이 과밀화됨에 따라 승무원의 노동력을 감소시키고 심각한 해난사고를 예방하기 위해서 선박의 안정성을 개선하는 것이 매우 중요하게 되었다. 특히 케이블작업선, 해양탐사선, 시추선과 같은 특수한 작업을 하는 선박에서는 궤적을 정확히 추종하거나 고정된 위치를 정확히 유지하는 것이 강하게 요구되고 있다.⁽²⁾

일반적으로 선박의 자동운항시스템의 조종운동성에 대한 연구결과로서, 파라미터 고정 steering 기구(적분요소) 및 파라미터 미지의 선체운동(1차

지연요소 및 적분요소)으로 이루어진 선형3차계로 하여, 좁은 수로를 통과시 특정의 침로를 빠르게 변침하고 싶은 경우에 필요로 하는 최단시간제어설계에 관한 연구가 많다.⁽⁹⁾

또한 선박의 자동조정제어를 위한 제어법으로는 PID이론에 의한 설계법, 최적레귤레이터이론에 의한 설계법⁽¹⁰⁾ 등이 있으나, 이들 설계법은 조류나 바람 등의 외란에 대해 강인한 설계법이라고 할 수 없으므로, 보다 강인한 제어기의 설계법이 요구된다.

제어문제를 해결하기 위하여, 불규칙적인 외란이나 표류력에 대해 일정한 위치를 유지하기 위해 페루프제어이론에 근거를 둔 다양한 종류의 시도가 행해져 왔다.^(5,11) 궤적제어문제에 관한 연구로서 Akasaka는 최적레귤레이터이론을 적용한 궤적추종시스템과 목표치유지시스템을 제시하였고 케이블선에서의 실험을 통해 검증하였다.⁽¹⁾ 또한 Yoo는 스텝목표치와 외란에 대한 궤적제어문제를 강인한

*부산수산대학교 대학원

**부산수산대학교 기계공학과

***회원, 부산수산대학교 기계공학과

서보계설계문제로 고려하여 파이프라인플랫폼에 적용시킨 제적제어시스템을 제시하였다.⁽¹²⁾

본 논문은 특정한 제적을 추종하기 위한 자동운항시스템의 설계법으로 목포치와 외란을 파라볼라 형태로 설계한 강인한 디지털서보계제어법을 제시하고자 한다. 제어알고리즘은 모형선에 대한 시뮬레이션을 근거로 하여 구성되었으며 실험은 수조에서 모형실험을 하였다. 이때 위치계측시스템으로는 수조내의 모형선에 두 지점을 설정하여 그 두 점의 위치를 계측하고 보정을 통하여 실제위치를 구한 뒤 얻어진 자료를 해석하여 모형선의 x, y축 방향의 변위와 선수방위각의 변위를 얻을 수 있는 이미지프로세싱기술을 적용하였다.

2. 모형선의 구조와 운동방정식

실험에 사용된 모델은 4개의 side thruster와 한

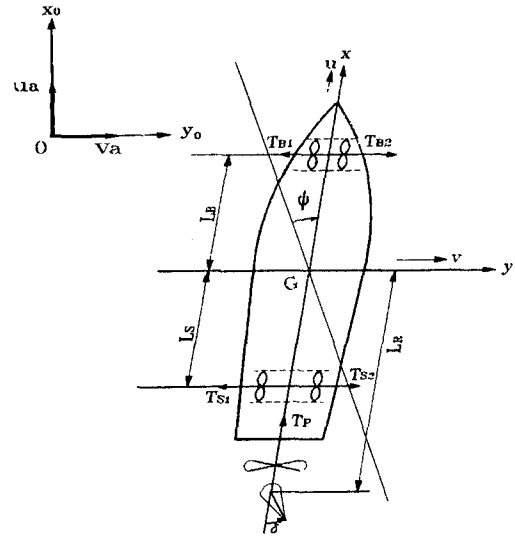


Fig. 1 Coordinate axes and notation of model ship

Table 1 Specification of model ship

Symbol	Description	Value
L	Length of ship	0.65 m
B _L	Breadth of ship	0.25 m
D	Depth of ship	0.10 m
d	Draft of ship	0.06 m
m	Mass of ship	3.50 kg
m _x	Added mass of x axis	0.52 kg
m _y	Added mass of y axis	0.90 kg
I _{zz}	Inertia moment around z axis	27.4 kg·m ²
J _{zz}	Added inertia moment around z axis	2.74 kg·m ²
L _R	Length from x axis to rudder	0.35 m
L _B	Length from x axis to bow thruster	0.25 m
L _S	Length from x axis to stern thruster	0.20 m
ψ(0)	Initial rotation angle of ship	0.01 deg
r(0)	Rotation angle velocity of ship	0.01 deg/sec
u(0)	Velocity of x axis	0.0004 m/sec
v(0)	Velocity of y axis	0.0004 m/sec
T _P (0)	Initial value of main thrust	0.001 kgf
T _B (0)	Initial value of bow side thrust	0.0001 kgf
T _S (0)	Initial value of stern side thrust	0.0001 kgf

개의 추진기로 구성되었다. 모형선의 개략적인 좌표계는 Fig. 1과 같으며, 기본적인 사양은 Table 1에 나타나 있다.

모형선의 운동방정식은 Fig. 1에 보인 좌표계로부터 다음의 식으로 주어진다.

$$(m+m_x)\frac{du}{dt} = (m+m_y) \cdot v \cdot r + X_1 + X_2 + (1-t_r) \cdot T_p - N \cdot \sin \delta - T \cdot \cos \delta + X_A$$

$$(m+m_y)\frac{dv}{dt} = -(m+m_x) \cdot u \cdot r + Y_1 + Y_2 + Y_3 - N \cdot \cos \delta + T \cdot \sin \delta + T_{B1} - T_{B2} + T_{S1} - T_{S2} + Y_A$$

$$(I_{zz}+J_{zz})\frac{dr}{dt} = (m_x-m_y) \cdot u \cdot v + N_1 + N_2 + N_3 + N \cdot L_R \cdot \cos \delta - T \cdot L_R \cdot \sin \delta + 0.83L_B \cdot T_{B1} - 0.83L_B \cdot T_{B2} - T_{S1} \cdot L_S + T_{S2} \cdot L_S + N_A$$

$$u_a = \frac{dx_0}{dt} = u \cdot \cos \psi - v \cdot \sin \psi$$

$$v_a = \frac{dy_0}{dt} = u \cdot \sin \psi + v \cdot \cos \psi$$

$$r = \frac{d\psi}{dt}$$

여기서,

$0(x_0, y_0, z_0)$: 공간고정좌표계

$G(x, y, z)$: 모형선의 고정좌표계

N, T : Rudder의 수직력 및 수평력

$X_i(i=1, 2), Y_i, N_i(i=1, 2, 3)$: 모형선의 x, y축 방향의 유체력 및 z축 주위의 유체모멘트

X_A, Y_A, N_A : 모형선의 x, y축 방향의 풍압력 및 z축 주위의 풍압모멘트

t_r : 추력감쇠율

δ : 타각

그리고, 그의 변수들은 Table 1에 나타낸다.

3. 상태방정식과 모델사양

Table 1에 나타난 파라미터를 이용하여 평형점 근방에서 선형화한 후에 모형선의 상태방정식을 나타내면 다음과 같이 표현될 수 있다.⁽⁷⁻⁹⁾

$$\frac{dx(t)}{dt} = Ax(t) + Bu(t) \tag{1a}$$

$$y(t) = Cx(t) \tag{1b}$$

여기서,

$$x^T(t) = [x_0, y_0, \psi, u_a, v_a, d\psi/dt]$$

$$u^T(t) = [\delta, T_p, T_{B1}, T_{B2}, T_{S1}, T_{S2}]$$

ψ : 선수방위각

u_a, v_a : x_0, y_0 축 방향의 속도

$d\psi/dt$: 선수방위각에 대한 각속도

T_p : 추진력

T_{B1}, T_{S1} : Bow 및 stern thruster의 추력($i=1, 2$)

$$A = E - 03 \times$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & -1.000 & 1000 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1.000 & 0 & 1000 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1000 \\ 0 & 0 & -0.076 & -0.054 & 7.648 & -2.322 \\ 0 & 0 & -0.130 & -13.08 & -0.054 & -3.100 \\ 0 & 0 & -0.093 & 0.788 & 0.804 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = E - 04 \times$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -5.346 & 25.72 & -0.057 & 0.075 & -0.057 & 0.057 \\ 8.026 & 0.257 & 5.718 & -5.718 & 5.718 & -5.718 \\ -0.731 & 0 & 0.246 & -0.246 & -0.370 & 0.370 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

본 논문에서 해결되어야 할 문제는 자동운항시스템이 조류, 바람, 파도 등에 기인한 표류력에도 특정한 목표궤적을 유지할 수 있도록 안정한 피드백제어계를 설계하는 것이다.

4. 서보계 제어기 설계

일반적으로 자동운항시스템의 목표궤적(배가 운항해갈 항로)은 계단(step)이나 경사(ramp)형태가 아닌 임의의 곡선형태가 된다. 그리고 선박이 운항 중에 받는 외란은 그 크기가 일정하지 않고 서로 다른 주파수를 가지는 여러개의 정현파가 합성된 파도, 풍압, 조류 등이 있다. 이러한 의미에서 외란을 곡선형태로 간주할 수 있다. 그러면 설계문제는 내부 모델원리를 적용한 서보계설계방법으로 해결될 수 있다.⁽⁷⁾ 상태방정식 (1)에 대한 디지털서보계 설계문제를 해결하기 위하여 샘플링시간을 T

[0.05sec]로 이산화하면 그 이산상태방정식은 다음과 같이 된다.

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

$$y(k) = Cx(k) \quad (2b)$$

여기서,

$y_d(k)$: 외란벡터

$$\Phi = E - 0.05 \times$$

$$\begin{bmatrix} 100000 & 0 & -5.009 & 5000 & 0.956 & 0.425 \\ 0 & 100000 & -5.016 & -1.635 & 4999 & 0.513 \\ 0 & 0 & 99999 & 0.098 & 0.100 & 4999 \\ 0 & 0 & 0.380 & 100000 & -38.24 & -11.62 \\ 0 & 0 & -0.651 & 65.39 & 99999 & -15.51 \\ 0 & 0 & -0.466 & 3.939 & 4.021 & 99999 \end{bmatrix}$$

$$\Gamma = \begin{bmatrix} -6.68E-7 & 3.21E-6 & 7.06E-9 \\ 1.00E-6 & 3.14E-8 & 7.15E-7 \\ -9.13E-8 & 4.26E-11 & 3.07E-8 \\ -2.67E-5 & 1.29E-4 & -2.81E-7 \\ 4.01E-5 & 1.24E-6 & 2.86E-5 \\ -3.65E-6 & 2.56E-9 & 1.23E-6 \\ 7.06E-9 & -7.05E-9 & 7.05E-9 \\ -7.15E-7 & 7.15E-7 & -7.15E-7 \\ -3.07E-8 & -4.62E-8 & 4.62E-8 \\ 2.81E-7 & -2.81E-7 & 2.81E-7 \\ -2.86E-5 & 2.86E-5 & -2.86E-5 \\ -1.23E-6 & -1.85E-6 & 1.85E-6 \end{bmatrix}$$

일정치 외란 $y_d(k)$ 의 존재하에서, 출력 $y(k)$ 가 일정 목표치 $y_r(k)$ 에 추종하는 제어계를 구성하는 문제를 생각한다. 이 경우 외란과 목표치는 다음과 같은 차분방정식 형태로 나타낼 수 있다.

$$P_{id}(q^{-1})y_d(k) = (\beta_0 + \beta_1 q^{-1} + \dots + \beta_n q^{-n})y_d(k) = 0 \quad (3a)$$

$$P_j^r(q^{-1})y_r(k) = (\beta_0 + \beta_1 q^{-1} + \dots + \beta_n q^{-n})y_r(k) = 0 \quad (3b)$$

$(i, j=1, 2, \dots, n)$

여기에서 $P_i^d(q^{-1})$ 와 $P_j^r(q^{-1})$ 는 외란 $y_d(k)$ 와 목표치 $y_r(k)$ 에 대한 추이연산자 q^{-1} 의 다항식이고, 식 (3)에서 목표치와 외란에 대한 최소공배다항식 $P^*(q^{-1})$ 은 다음과 같이 표현된다.

$$P^*(q^{-1}) = \beta_0 + \beta_1 q^{-1} + \dots + \beta_n q^{-n} \quad (4)$$

식 (4)은 외란에 대한 일반화된 차분방정식이며,

충분히 긴 단위시간내에서 외란은 파라볼라(parabola)형($n=3$)으로 간주될 수 있으며, 목표치도 또한 파라볼라형으로 간주할 수 있다. 따라서, 제어계설계의 목적은 파라볼라형태 외란 $y_d(k)$ 의 존재하에서, 정상상태시 출력 $y(k)$ 가 목표치 $y_r(k)$ 에 일치하고 페루프제를 안정하게 설계하는 것이다. 이 두가지 설계목적은 만족하는 제어계를 구성하기 위해, 오차를 다음과 같이 정의한다.

$$e(k) = y_r(k) - y(k) \quad (5)$$

서보계의 설계는 외란과 목표치와 같은 제어대상을 둘러싼 외부환경의 모델을 만들어 제어대상과 조합한 전체의 시스템, 즉 확장계에 대해서 상태피드백에 의한 제어칙을 구함으로써 행해진다. 따라서 그 확장계를 구하기 위해 최소공배다항식 (4)를 식 (2)와 식 (5)에 적용하면 다음과 같은 확장시스템을 얻을 수 있다.

$$x_e(k+1) = \phi_e x_e(k) + \Gamma_e v(k) \quad (6)$$

여기서,

$$x_e(k) = \begin{bmatrix} P^*(q^{-1})x(k) \\ z(k) \end{bmatrix}$$

$$z(k) = [z_1(k) \ z_2(k) \ z_3(k)]^T$$

$$z_i(k) = e_i(k), \quad i=1, 2, 3$$

$$v(k) = P^*(q^{-1})u(k)$$

$$\phi_e = \begin{bmatrix} \Phi & 0 \\ M_e & N_e \end{bmatrix} \quad \Gamma_e = \begin{bmatrix} \Gamma \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$N_e = \text{diag}\{N \ N \ N\} \quad M_e = [M_x^T \ M_y^T \ M_x^T]^T$$

$$N = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ \beta_0 & \beta_1 & \beta_2 \end{bmatrix} \quad M_x = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$M_y = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad M_z = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

확장시스템 (6)을 안정화하는 제어칙을 구하기 위한 방법으로 페루프제의 극을 임의의 반경으로 설정하는 선형분수변환법을 이용하여 다음과 같은 설계조건(Fig. 2)으로 제어칙을 구하였다.⁽³⁾

Fig. 2에서 γ 는 특정 원판반경이고, α 는 그 중심을 의미한다. 본 제어계 구성에서 설정된 반경과 중심은 $\gamma=0.86$, $\alpha=0.0$ 이다.

이때 확장계를 안정하게 하는 입력은 다음과 같이 주어진다.

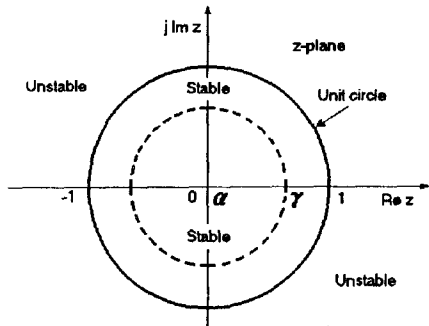


Fig. 2 Pole assignment method using linear fractional transformation method

$$u(k) = -Fx_2 \tag{7}$$

여기서,

$$F = [F_1 [F_{21} F_{22}]]$$

$$F_1 = E + 05 \times$$

$$\begin{bmatrix} -0.0441 & 0.2295 & -8.9426 \\ 0.5316 & 0.0507 & -1.8187 \\ -0.0147 & 0.7683 & 9.7723 \\ -0.0147 & -0.7683 & -9.7723 \\ 0.0341 & 0.2853 & -3.4347 \\ -0.0341 & -0.2853 & 3.4347 \\ -0.0052 & 0.0265 & -1.0370 \\ 0.0615 & 0.0060 & -0.2117 \\ -0.0017 & 0.0891 & 1.1322 \\ 0.0017 & -0.0891 & -1.1322 \\ 0.0039 & 0.0330 & -0.3986 \\ -0.0039 & -0.0330 & 0.3986 \end{bmatrix}$$

$$F_{21} = E + 05 \times$$

$$\begin{bmatrix} -0.0082 & 0.0173 & -0.0091 & 0.0427 \\ 0.0987 & -0.2076 & 0.1093 & 0.0093 \\ -0.0027 & 0.0057 & -0.0030 & 0.1426 \\ 0.0027 & -0.0057 & 0.0030 & -0.1426 \\ 0.0063 & -0.0133 & 0.0070 & 0.0530 \\ -0.0063 & 0.0133 & -0.0070 & -0.0530 \end{bmatrix}$$

$$F_{22} = E + 05 \times$$

$$\begin{bmatrix} -0.0897 & 0.0473 & -1.6583 & 3.4867 & -1.8358 \\ -0.0195 & 0.0103 & -0.3361 & 0.7066 & -0.3720 \\ -0.2998 & 0.1579 & 1.8137 & -3.8135 & 2.0079 \\ 0.2998 & -0.1579 & -1.8137 & 3.8135 & -2.0079 \\ -0.1114 & 0.0587 & -0.6365 & 1.3383 & -0.7046 \\ 0.1114 & -0.0587 & 0.6365 & -1.3383 & 0.7046 \end{bmatrix}$$

오차에 대해 서보계 보상기변수를

$$\xi(k) = P^*(q^{-1})z(k) \tag{8}$$

와 같이 정의하면, 다음과 같은 서보보상기를 얻을 수 있다.

$$\xi(k+1) = N_e \xi(k) + \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} e(k) \tag{9}$$

4. 관측기 설계

실험에서는 x축과 y축 방향의 위치만 측정되므로 나머지 상태들을 측정하기 위해서 최소차원관측기를 이용하였으며, 이에 대한 설계법으로 극배치법을 적용하였다.⁽⁴⁾ 관측기의 극을 $\{-10 \pm 10j, -5\}$ 으로 설정하였으며 샘플링시간 0.05로 이산화하면 그 이산계 관측기는 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} m(k+1) &= \hat{A}_D m(k) + \hat{B}_D y(k) + \hat{J}_D u(k) \\ \bar{x}(k) &= \hat{C}_D m(k) + \hat{d}_D y(k) \end{aligned} \tag{10}$$

$$\hat{A}_D = \begin{bmatrix} 5.322E-01 & -2.909E-01 & -6.925E-05 \\ 2.907E-01 & 5.324E-01 & -7.814E-05 \\ 7.709E-06 & -8.553E-05 & 7.788E-01 \end{bmatrix}$$

$$\hat{B}_D = \begin{bmatrix} -1.768E+00 & -7.591E+00 & 7.142E-04 \\ 7.589E+00 & -1.765E+00 & 4.707E-04 \\ 9.392E-04 & -1.483E-03 & -1.106E+00 \end{bmatrix}$$

$$\hat{J}_D = E - 05 \times$$

$$\begin{bmatrix} -2.7376 & 9.7310 & -0.5277 \\ 2.5713 & 2.3723 & 2.1636 \\ -0.3234 & 0.0001 & 0.1086 \\ 0.5277 & 0.5277 & 0.5277 \\ -2.1637 & 2.1637 & -2.1637 \\ -0.1086 & -0.1638 & -0.1638 \end{bmatrix}$$

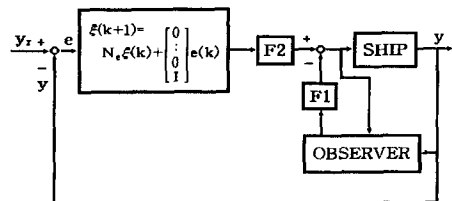


Fig. 3 Block diagram of servo control system with observer

$$\hat{C}_D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\hat{D}_D = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1.0003E-01 & 1.0010E+01 & 1.9487E-04 \\ -1.0010E+01 & 9.9973 & -1.3556E-03 \\ -2.6644E-05 & 3.1870E-03 & 5 \end{bmatrix}$$

이상의 서보제어계 설계법에 의해 구성되는 캐부 프제를 블록선도로 표시하면 Fig. 3과 같이 표현된다.

5. 위치계측장치

위치계측장치의 개략도를 Fig. 4과 같이 나타낸다.

실험장치는 CCD카메라, 이미지그래브카드(image grab card, 분해능 512×512), 멀티싱크모니터(multisink monitor), 모형선과 이차원수조로 구성된다. 모형선의 선수, 선미의 두 지점에 배경과 물체를 구별하기 위해 특이점을 표시한다.

이미지그래브카드는 모형선 위의 두 지점의 특이점을 아날로그 영상에 포착하고 그런 다음 PC에서

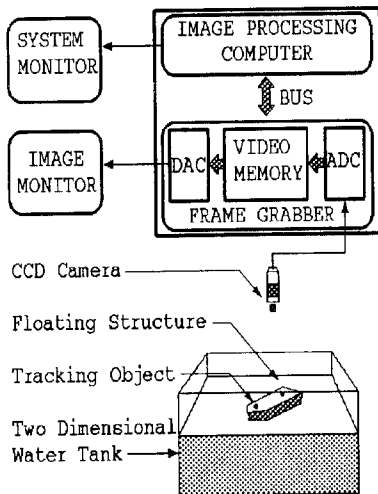


Fig. 4 Schematic diagram of the position measurement device

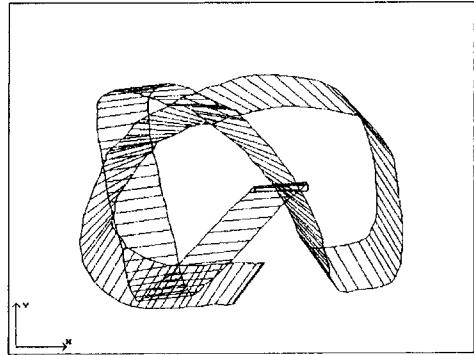


Fig. 5 Motion on the 2nd dimensional coordinate

는 특이점 주위에 임의의 창을 설정한다. 그 창내의 화점(pixel)의 명암레벨(gray level)은 특이점(물체)과 배경의 명암레벨을 threshold의 명암레벨과 비교되어 0과 1로 이산화된다.⁽⁶⁾

위치계측실험은 실시간으로 행해졌고, 그 때의 물체의 두 지점의 운동경로를 2차원 그래픽 처리하여 나타내면 Fig. 5와 같다.

6. 실험장치 및 실험결과

6.1 실험장치

실험의 전체적인 구성도는 Photo 1에 나타낸 것과 같고 모형선의 구조는 Fig. 1과 같다.

수조에 모형선을 띄우고 수조중앙의 수직상단부에 CCD카메라를 설치하였다. CCD카메라는 PC내의 이미지그래브카드에 연결되어 카메라에서 입력되는 아날로그영상을 멀티싱크 모니터상에 Bypass 시켜 그 운동상태를 직접 화면을 통해 알 수 있다. 그리고 그래픽카드에서는 입력된 영상을 디지털처리하여 모형선의 위치를 입력받고 다채널 D/A 변

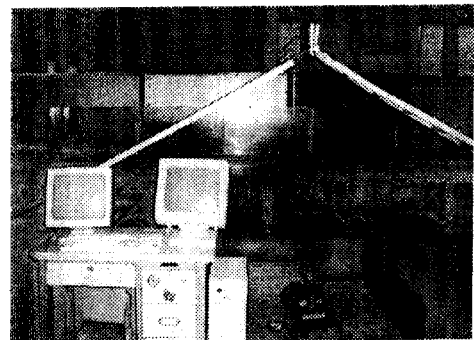


Photo 1 Photograph of the experimental device

환기를 통해 모형선의 각 추진기에 출력한다.

6.2 실험결과

모형선의 목표치 궤적은

$$x_o(kT) = 1.3 * kT + 1.0$$

$$y_o(kT) = 5.7 * (kT)^2 + 1.0$$

$$\phi(kT) = \tan^{-1}(y_o(kT)/x_o(kT)) - \tan^{-1}(y_o(kT-T)/x_o(kT-T))$$

여기에서 T 는 샘플링 시간(50 ms)이다.

Fig. 6은 초기위치 ($x_o=0, y_o=0$)에서 최종위치 ($x_o=120, y_o=50$)까지의 목표궤적에 대한 결과를 보여준다. 실험은 외력과 외란이 없다는 가정하에서 목표궤적의 추종가능성을 판단하기 위한 기초적인 실험을 행하였다. x축 방향의 목표치를 추종함에 있어서는 대략 12초 경과후 최대오차(30 pixel: 1 pixel=1.2 cm)를 보이고 있으며 y축 방향에 대해서는 25초 근방에서 최대오차(25 pixel)를 보이고 있다. 목표궤적에 대한 선수방위각은 비교적 잘

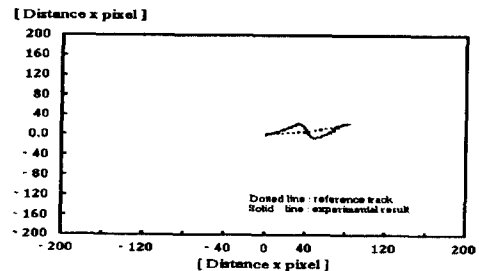
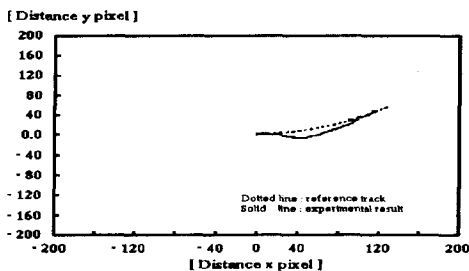
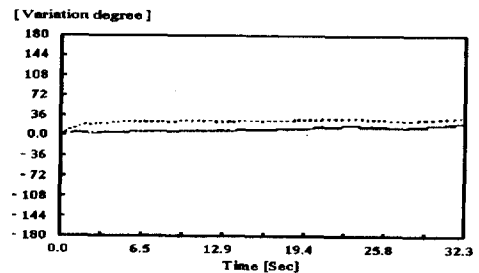
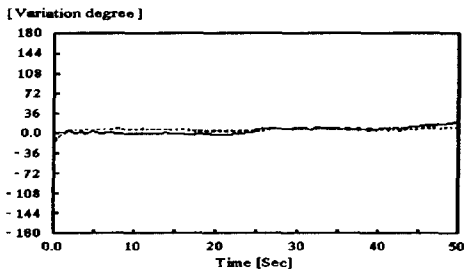
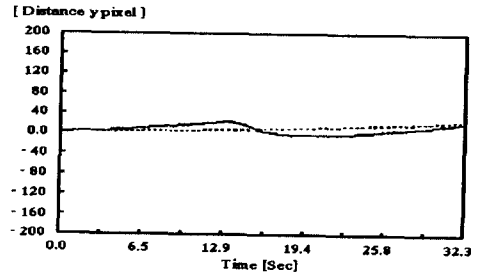
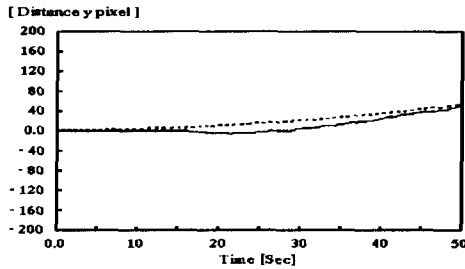
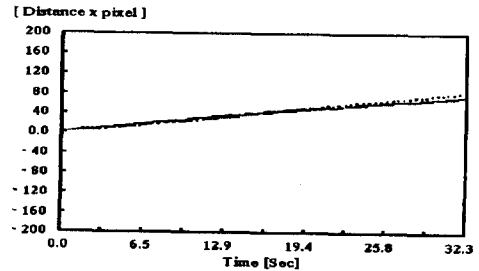
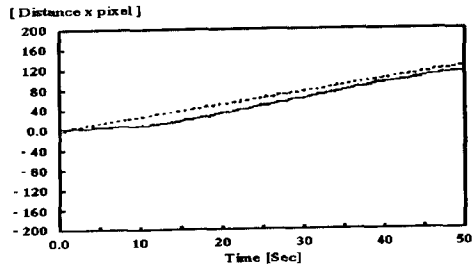


Fig. 6 Experimental results for reference tracks

Fig. 7 Experimental results for reference tracks under random impact forces

제어되고 있음을 알 수 있다. x-y 평면에서 대략 30초 경과후의 실험결과로부터 선박에 대한 제어설계법의 유용성을 검증할 수 있었다.

Fig. 7은 5초 경과시 y축 방향에 임의의 순간의 힘을 가한 경우의 결과를 보여준다. x축 방향에 대해서 외란의 영향을 별로 받지 않은 결과를 나타내었다. y축 방향에 대해서는 순간외란에 의해 발생된 관성력이 13초 근방까지 영향을 미쳤고 목표 궤적에 수렴한 후에는 추진기에 의한 관성력에 의해 야기된 운동을 조사할 수 있다. 선수방위각에 있어서는 약간의 오차를 가지면서 결국에는 목표 궤적을 추종하는 특성을 보인다.

이상의 결과에 따라, 적용된 제어설계법과 위치추정시스템의 성능이 양호함을 확인할 수 있다.

7. 결 론

본 논문에서는 선박에 대해서 강인한 다변수서보설계법을 적용한 자동운항시스템의 설계법을 제시하였고 실험을 통해서 그 유효성을 확인하였다. 실험결과를 통해서 이상의 제어시스템이 임의의 외란이나 선박과 연결된 케이블에 의한 저항에 대해서도 강인한 특성을 보임을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구에 적용된 제어기설계법과 영상처리기술은 실제시스템에 적용할 수 있는 가능성을 제시하였다.

후 기

본 연구는 1994년도 학술진흥재단의 학술연구비에 의해 수행된 연구결과의 일부임을 밝혀두며, 관계자 여러분께 감사의 뜻을 포함한다. 아울러 실험장소를 제공해 준 부산수산대학교 해양공학과 교수님들께도 감사의 마음을 전합니다.

참고문헌

- (1) Akasaka, N. et al., 1980, "Application of the Optimal Regulator Theory to the Automatic Maneuvering System for Cable Laying Ships," *Tech. J. of Mitsubissi Heavy Industry*, Vol. 17, No. 3.
- (2) Akasaka, N. et al., 1981, "Dynamic Positioning of Floating Units with Rotatable Retractable Thrusters," *Tech. J. of Mitsubissi Heavy Industry*, Vol. 18, No. 2.
- (3) Furuta, K. and Kim S.B., 1987, "Pole Assingment in a Specified Disk," *IEEE Trans. Auto. Control*, Vol. 32, No. 5.
- (4) Furuta, K., Sano, A. and Atherton, D., 1988. *State Variable Methods in Automatic Control*, John Wiley & Sons.
- (5) Fung, P. T. and Grimble, M. J., 1983, "Dynamic Ship Position Using a Self-Tuning Kalman Filter" *IEEE Trans. Auto. Control*, Vol. 28, No. 3.
- (6) 지명석, 김성근, 김상봉, 1994, "이미지 프로세싱을 이용한 부유구조물의 2차원 위치계측장치 개발," 한국해양공학회지, 제8권, 제2호, pp. 166~172.
- (7) 김성근, 유휘용, 김상봉, 1993, "부유식 구조물의 동위치제어에 관한 연구(1)," 한국해양공학회지, 제7권, 제2호, pp. 79~90.
- (8) 김성근, 유휘용, 김상봉, 1993, "반잠수식 해양구조물의 동위치제어에 관한 실험적 연구(2)," 한국해양공학회 추계학술대회 강연논문집, pp. 100~106.
- (9) Kushida, N., Nishimura, Y. and Yonezawa, Y., 1991, "A design of Adaptive Time Optimal Autopilot and Its Sea Trial," *J. of Dynamic Systems, Meas. and Control*, Vol. 27.
- (10) Saelid, S., Jenssen N., and Balchen, J. G., 1983, "Design and Analysis of a Dynamic Positioning System Based on Kalman Filtering and Optimal Control," *IEEE Trans. Auto. Control*, Vol. 28, No. 3.
- (11) Tamehiro, M. and Kasai, H., 1980, "Experimental Study on Dynamic Positioning Control for a Semisubmersible Lower hull Type Offshore Platform," *J. of SNAJ*, Vol. 136.
- (12) Yoo R. Y., Kim S. G. and Kim S. B., 1994, "An Experimental Study for Orbital control of Pipelaying Platform," *The Proceedings of Fourth International Society of Offshore and Polar Engineering Conference*, Vol. 2.
- (13) 한봉주, 배경수, 김성근, 김상봉, 1994, "Autopilot 시스템의 제어에 관한 연구," 해양공학회 춘계학술대회 강연논문집, pp. 56~61.

(14) 한봉주, 배경수, 김성근, 김상봉, 1995, “자동운항 시스템의 제어에 관한 실험적 연구.” 대한기계학회 춘계학술대회논문집 (I), pp. 801~804.

부 록

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & a_{13} & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{23} & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & a_{43} & a_{44} & a_{45} & a_{46} \\ 0 & 0 & a_{53} & a_{54} & a_{55} & a_{56} \\ 0 & 0 & a_{63} & a_{64} & a_{65} & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ b_{41} & b_{42} & b_{43} & b_{44} & b_{45} & b_{46} \\ b_{51} & b_{52} & b_{53} & b_{54} & b_{55} & b_{56} \\ b_{61} & 0 & b_{63} & b_{64} & b_{65} & b_{66} \end{bmatrix}$$

$$a_{13} = v_0 - u_0 \sin \phi_0 - v_0 \cos \phi_0$$

$$a_{23} = -u_0 + u_0 \cos \phi_0 - v_0 \sin \phi_0$$

$$a_{43} = \left(\frac{m+m_x}{m+m_y} r_0 (v_0 \sin \phi_0 \cos \phi_0 - v_0 \sin^2 \phi_0) \right. \\ \left. - \frac{m+m_y}{m+m_x} \cdot r_0 (v_0 \sin \phi_0 \cos \phi_0 + u_0 \cos^2 \phi_0) \right) r_0 u_0 \\ + (v_0 \sin \phi_0 \cos \phi_0 - v_0 \sin^2 \phi_0) \\ - u_0 r_0 \cos \phi_0 + v_0 r_0 \sin \phi_0$$

$$a_{44} = \left(\frac{m+m_x}{m+m_y} - \frac{m+m_y}{m+m_x} \right) \cdot r_0 \sin \phi_0 \cdot \cos \phi_0$$

$$a_{45} = \left(\frac{m+m_x}{m+m_y} \cdot \sin^2 \phi_0 + \frac{m+m_y}{m+m_x} \cdot \cos^2 \phi_0 - 1 \right) \cdot r_0$$

$$a_{46} = \frac{m+m_y}{m+m_x} \cdot v_0 \cos \phi_0 + \frac{m+m_x}{m+m_y} \cdot u_0 \cdot \sin \phi_0 \\ - (u_0 \cdot \sin \phi_0 + v_0 \cos \phi_0)$$

$$a_{53} = -\frac{m+m_y}{m+m_x} \cdot r_0 (v_0 \sin^2 \phi_0 + u_0 \sin \phi_0 \cos \phi_0) \\ - \frac{m+m_x}{m+m_y} \cdot r_0 \cdot (v_0 \cos^2 \phi_0 - u_0 \sin \phi_0 \cos \phi_0) \\ + r_0 v_0 - (u_0 r_0 \sin \phi_0 + v_0 r_0 \cos \phi_0)$$

$$a_{54} = \left(\frac{m+m_y}{m+m_x} \cdot \sin^2 \phi_0 + \frac{m+m_x}{m+m_y} \cos^2 \phi_0 + 1 \right) \cdot r_0$$

$$a_{55} = \left(\frac{m+m_y}{m+m_x} - \frac{m+m_x}{m+m_y} \right) \cdot r_0 \cdot \sin \phi_0 \cdot \cos \phi_0$$

$$a_{56} = \left(\frac{m+m_y}{m+m_x} \cdot v_0 \cdot \sin \phi_0 - \frac{m+m_x}{m+m_y} \cdot u_0 \cdot \cos \phi_0 \right. \\ \left. + (u_0 \cos \phi_0 - v_0 \sin \phi_0) \right)$$

$$a_{63} = \frac{m_x - m_y}{I_{zz} + J_{zz}} (v_0^2 \cos^2 \phi_0 - 2v_0 u_0 \cdot \sin \phi_0 - u_0^2 \cos^2 \phi_0)$$

$$a_{64} = \frac{m_x - m_y}{I_{zz} + J_{zz}} \cdot (v_0 \cdot \cos \phi_0 - u_0 \cdot \sin \phi_0)$$

$$a_{65} = \frac{m_x - m_y}{I_{zz} + J_{zz}} \cdot (u_0 \cdot \cos \phi_0 + v_0 \cdot \sin \phi_0)$$

$$b_{41} = \frac{T_0 \sin \delta_0 \cos \phi_0 - N_0 \cos \delta_0 \cos \phi}{m + m_x} \\ - \frac{N_0 \sin \delta_0 \sin \phi_0 + T_0 \cos \delta_0 \sin \phi_0}{m + m_y}$$

$$b_{42} = \frac{1 - T_\tau}{m + m_x} \cdot \cos \phi_0$$

$$b_{43} = \frac{-1}{(m + m_y)} \cdot \sin \phi_0$$

$$b_{44} = \frac{1}{(m + m_y)} \cdot \sin \phi_0$$

$$b_{45} = -\frac{1}{(m + m_y)} \cdot \sin \phi_0$$

$$b_{46} = \frac{1}{(m + m_y)} \cdot \sin \phi_0$$

$$b_{51} = \frac{T_0 \sin \delta_0 \sin \phi_0 - N_0 \cos \delta_0 \sin \phi_0}{m + m_x} \\ + \frac{N_0 \cos \phi_0 \sin \delta_0 + T_0 \cos \phi_0 \cos \delta_0}{m + m_y}$$

$$b_{52} = \frac{(1 - t_\tau)}{m + m_x} \cdot \sin \phi_0$$

$$b_{53} = \frac{1}{(m + m_y)} \cdot \cos \phi_0$$

$$b_{54} = -\frac{1}{(m + m_y)} \cdot \cos \phi_0$$

$$b_{55} = \frac{1}{(m + m_y)} \cdot \cos \phi_0$$

$$b_{56} = -\frac{1}{(m + m_y)} \cdot \cos \phi_0$$

$$b_{61} = \frac{1}{I_{zz} + J_{zz}} \cdot (T_0 \cdot L_R \cos \delta_0 - N_0 \cdot L_R \sin \delta_0)$$

$$b_{63} = \frac{0.83}{(I_{zz} + J_{zz})} \cdot L_B$$

$$b_{64} = -\frac{0.83}{(I_{zz} + J_{zz})} \cdot L_B$$

$$b_{65} = \frac{-L_s}{(I_{zz} + J_{zz})}$$

$$b_{66} = \frac{L_s}{(I_{zz} + J_{zz})}$$