

프로펠러와 부가추력장치를 갖는 특수선의 모델링 및 통합제어기 개발

이병걸† · 김종화* · 임재권**

(원고접수일 : 2004년 8월 9일, 심사완료일 : 2005년 1월 11일)

Modeling and Development of an Integrated Controller for a Ship with Propellers and Additional Propulsion Units

Byung-Kyul Lee† · Jong-Hwa Kim* · Jae-Kwon Lim**

Abstract : Dynamic positioning(DP) system maintains ship's position (fixed location or predetermined track) exclusively by means of CPPs and thrusters. To generate the control input adequate to various situation an integrated controller for CPPs and thrusters is required. The integrated controller is composed of a thrust calculation algorithm and a thrust allocation algorithm. The thrust calculation algorithm generates thrusts in the surge direction and the sway direction from the desired forward and lateral speed and generates a moment about the yaw axis from desired heading angle. The thrust allocation algorithm allocates the generated thrusts and moment to each CPP and thruster. Computer simulations are executed to confirm the effectiveness of the suggested controller.

Key words : DP(자동위치조정), CPP(가변피치 프로펠러), Integrated controller(통합제어기)

1. 서 론

해저 석유개발, 광물채광, 케이블 포설과 같은 해양개발이 진행됨에 따라 안정적인 작업을 위해 특수선의 위치를 고정하거나 유지하는 동적 위치 유지시스템(DP)이나 정의된 항로를 추종하는 항로 추종제어에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다^[1]. 이러한 특수선은 조종능력 향상을 위해 고정

피치 프로펠러 대신 가변피치 프로펠러와 같은 주 추력장치와 쓰러스터와 같은 부가 추력장치를 사용하고 있다^{[2],[3]}. 따라서 선박의 주 추력장치와 보조 추력장치를 상황에 맞게 통합적으로 제어하는 제어가 요구되고 있다. 본 연구는 특수선의 주 추력장치와 부 추력장치를 통합적으로 제어하는 통합제어기를 설계한다.

통합제어기는 추력계산 알고리즘과 추력할당 알

† 책임저자(한국해양대학교 대학원 제어계측공학과), E-mail : ybk1124@hanmail.net, Tel : 051)410-4894

* 한국해양대학교 IT공학부

** 한국해양대학교 대학원 제어계측공학과

고리즘으로 구성된다. 추력계산 알고리즘은 목표 회두각과 속도를 추종하기 위한 전진방향과 횡방향의 추력과 선수방향의 모멘트를 계산하고, 추력할당 알고리즘은 계산된 추력과 모멘트를 각 프로펠러와 쓰러스터가 생성해야할 추력으로 할당한다.

2. 선박 모델링

2.1 좌표계와 변수들

선박운동에 관련된 좌표계와 변수는 Fig. 1과 같다. $X_0Y_0Z_0$ 좌표계는 고정절대 좌표계로 항해중 선박의 위치를 묘사하는 데 사용되고, $x_b y_b z_b$ 좌표계는 원점이 선박의 무게중심 O에 고정되어 선박과 함께 움직이는 운동좌표계로 선박운동의 주요 변수를 묘사하는 데 사용된다^{[4],[5]}.

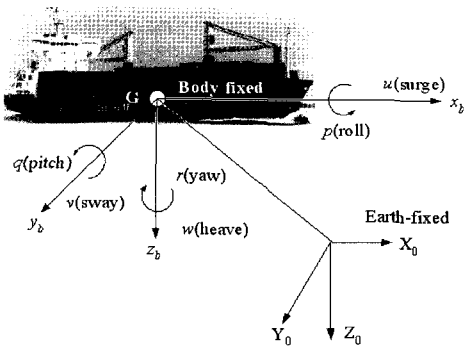


Fig. 1 The coordinate systems and motion variables for a marine vessel

선박운동에서 사용하는 변수는 Table 1과 같다.

Table 1 The notation of SNAME for marine vessels

DOF		forces and moments	linear and angular velocities	positions and Euler angles
1	surge	X	u	x
2	sway	Y	v	y
3	heave	Z	w	z
4	roll	K	p	ϕ
5	pitch	M	q	θ
6	yaw	N	r	ψ

2.2 비선형 선박 운동 방정식

6차원 선박운동 방정식은 다음과 같다^{[4],[6]}.

$$M\dot{\nu} + C(\nu)\nu + D(\nu)\nu + g(\eta) = \tau \quad (1)$$

여기서, $\nu = [u \ v \ w \ p \ q \ r]^T$ 는 선속도와 각속도, M 은 관성행렬(부가질량 포함), $C(\nu)$ 는 코리올리스 및 구심력 행렬(부가질량 포함), $D(\nu)$ 는 감쇠행렬, $g(\eta)$ 는 복원력, $\eta = [x \ y \ z \ \phi \ \theta \ \psi]^T$ 는 위치와 오일러각, τ 는 제어입력벡터이다.

해수면을 운항하는 선박의 복원력항은 선박의 메타센터 높이, 부심, 무게중심의 위치와 관련되므로 조종운동에는 영향력을 미치지 않는다. 다음을 가정하면

- 1) 선박조종운동과 전진방향 속도 분리
- 2) 선박의 heave, roll, pitch 무시
($w = p = q = \dot{w} = \dot{p} = \dot{q} = 0$)
- 3) 선체 고정좌표계의 원점을 선체 중심선에 위치
($y_G = 0$)
- 4) 선박의 좌우 대칭 ($I_{xy} = I_{yz} = 0$)

(2)와 같은 3차원 비선형 선박 운동 방정식을 유도할 수 있다.

$$M\dot{\nu} + C(\nu)\nu + D\nu = \tau \quad (2)$$

여기서, $\nu = [u \ v \ r]^T$.

$$M = \begin{bmatrix} m - X_u & 0 & 0 \\ 0 & m - Y_v & mx_G - Y_r \\ 0 & mx_G - N_v & I_z - N_r \end{bmatrix}$$

$$X_u = \frac{\partial X}{\partial u}, \quad Y_v = \frac{\partial Y}{\partial v}, \quad Y_r = \frac{\partial Y}{\partial r},$$

$$N_v = \frac{\partial N}{\partial v}, \quad N_r = \frac{\partial N}{\partial r},$$

$$C(\nu) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -c_{13} \\ 0 & 0 & c_{23} \\ c_{13} & -c_{23} & 0 \end{bmatrix}$$

$$c_{13} = (m - Y_v)v + \left(mx_G - \frac{Y_r + N_v}{2} \right) r,$$

$$c_{23} = (m - X_u)u,$$

$$D = \begin{bmatrix} -X_u & 0 & 0 \\ 0 & -Y_v & -Y_r \\ 0 & -N_v & -N_r \end{bmatrix}$$

이다. $X_u; Y_v; Y_r; N_v; N_r$ 은 부가 질량력과 모멘트의 유체력 미계수이고, X_u, Y_v, Y_r, N_v, N_r 은 감쇠의 유체력 미계수이다.

2.3 추력장치

본 연구에서 사용하는 선박은 주 추력장치로서 2개의 가변피치 프로펠러와 부가 추력장치로서 4조의 쓰러스터를 갖는다. 선박에서 추력장치와 선박에 인가되는 추력 사이의 관계는

$$\tau = Bu \tag{3}$$

이 된다. 여기서, B 는 추력장치와 추력사이의 변환행렬이고, u 는 제어입력(추력장치의 추력)으로 다음과 같다.

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_{23} & b_{24} & b_{25} & b_{26} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & b_{34} & b_{35} & b_{36} \end{bmatrix}$$

$$u = [C_{ppL} \ C_{ppR} \ Th_1 \ Th_2 \ Th_3 \ Th_4]^T \tag{4}$$

여기서, C_{ppL}, C_{ppR} 은 CPP의 추력, Th_1, Th_2, Th_3, Th_4 는 4조의 쓰러스터의 추력이다.

2.3.1 쓰러스터

Fig. 2는 쓰러스터에 대한 전진계수(advance number) J_0 에 따른 선박 전진, 후진시의 추력과 토크 특성 곡선이다. 이를 이용하여 (5)와 같이 모델링한다^[4].

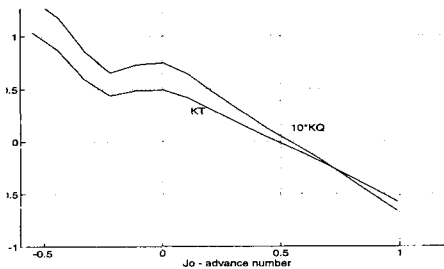


Fig. 2 Thrust and torque curves for thruster in ahead and astern conditions

$$T_{Th} = \rho D^4 K_T(J_0) |n| n = \rho D^4 (\alpha_1 + \alpha_2 J_0) |n| n \tag{5}$$

여기서 ρ 는 해수 밀도, D 는 프로펠러 지름, K_T 는 추력 계수, n 은 프로펠러 회전수(rps)이고, 전진계수 J_0 는 다음과 같이 정의된다.

$$J_0 = \frac{V_a}{nD} \tag{6}$$

여기서, V_a 는 프로펠러 속으로 흘러들어가는 물의 속도로 $V_a = (1 - w_a)V$ 가 된다. w_a 은 반류계수(0.1~0.4)이고, $V = \sqrt{u^2 + v^2}$ 는 선체의 속도이다.

2.3.2 가변 피치 프로펠러

가변피치 프로펠러는 스크루 날개의 피치를 유압서보 시스템에 의해 조정하는 프로펠러로 선박의 조종성 향상이 요구되는 곳에 사용한다. 가변피치 프로펠러는 정속 샤프트 속도가 필요하고 일반적으로 쌍으로 구성된다. Fig. 3은 가변피치 프로펠러에 대한 추력 특성 곡선이다. 선박의 속도와 추력 방향이 동일할 때는 비교적 정확하지만, 상태가 변화하는 과정에는 그렇지 못하다. 가변피치 프로펠러에 대한 추력식은 Fig. 3을 통해 선형 관계를 구하면 (7)과 같다^[4].

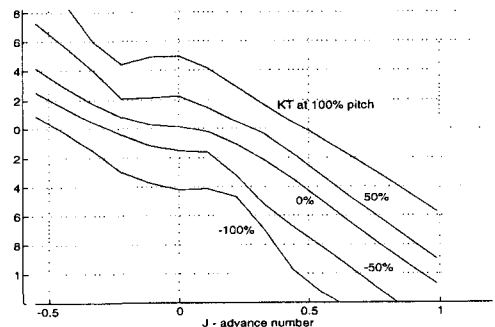


Fig. 3 KT characteristic for CPP for medium speed application

$$T_{C_{pp}} = \rho D^4 K_T(\theta, J) |n| n = \rho D^4 (\alpha_1 \theta + \alpha_2 J) |n| n \tag{7}$$

여기서, θ 는 가변피치 프로펠러의 피치각이고, J 는 전진계수이다.

3. 통합제어기

제안하는 프로펠러와 부가추력장치를 갖는 선박의 통합제어기 구조는 Fig. 4와 같다. 통합제어기는 명령에 따른 추력과 모멘트를 계산하여 각 추력 장치에 할당하고 각 추력장치를 제어하는 개별 제어기에 제어신호를 전송한다. 개별제어기는 전송 받은 제어신호에 따라 각 추력 장치를 제어한다. 선박의 위치정보와 회두각정보를 피드백하여 실시간으로 명령을 추종하는 피드백 제어신호를 생성한다^{[7] - [10]}.

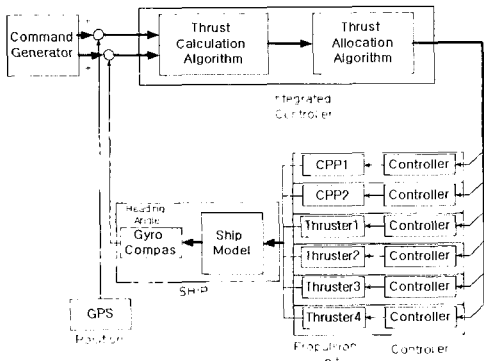


Fig. 4 The block diagram of an integrated controller for a ship with CPPs and thrusters

3.1 추력 계산 알고리즘

선박의 항해 방향이나 속도 등을 명령하게 되면 추력 계산알고리즘은 선박의 전진 방향과 횡방향에 대한 추력과 선수방향에 대한 모멘트를 계산한다. 추력 계산 알고리즘은 다음과 같은 선형 PD 제어기를 이용하여 구성한다.

$$\begin{aligned} X &= k_{pX}(u_d - u) + k_{dX}(\dot{u}_d - \dot{u}) \\ Y &= k_{pY}(v_d - v) + k_{dY}(\dot{v}_d - \dot{v}) \\ N &= k_{pN}(\psi_d - \psi) + k_{dN}(\dot{\psi}_d - \dot{\psi}) \end{aligned} \quad (8)$$

여기서, X, Y, N 은 선박의 전진방향과 횡방향에 대한 힘과 회두방향에 대한 모멘트, u_d, v_d, ψ_d 는 선

박의 목표 전진방향과 횡방향 속도와 목표 회두각, k_p, k_d 는 선형 PD제어기의 비례, 미분 이득이다.

3.2 추력 할당 알고리즘

계산된 X, Y, N 추력에 따라 각 가변피치 프로펠러와 쓰러스터가 내야할 추력을 계산하는 추력 할당 알고리즘은 (9)와 같다.

$$\begin{bmatrix} CppL \\ CppR \\ Th_1 \\ Th_2 \\ Th_3 \\ Th_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_{23} & b_{24} & b_{25} & b_{26} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & b_{34} & b_{35} & b_{36} \\ 1 & 1 - \frac{2}{\pi} \times (\psi_d - \psi) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ N \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

여기서, 첫 세 행은 추력계수행렬이고, 넷째 행은 목표 회두각에 비례하여 CPP의 추력을 조정하는 항, 그리고 마지막 두 행은 선수 2조와 선미 2조의 쓰러스터 추력 크기를 배분하는 항이다.

3.3 개별 제어기

가변피치 프로펠러와 쓰러스터를 제어하는 개별 제어기는 선형 P제어기를 이용하여 구성한다. 가변피치 프로펠러의 개별제어기는 제어 입력인 피치각을 (10)과 같이 생성한다.

$$\begin{aligned} \theta_{CppL} &= k_{pCppL} (T_{CppLd} - T_{CppL}) \\ \theta_{CppR} &= k_{pCppR} (T_{CppRd} - T_{CppR}) \end{aligned} \quad (10)$$

여기서, $\theta_{CppL}, \theta_{CppR}$ 는 가변피치 프로펠러의 명령 피치각, T_{CppLd}, T_{CppRd} 는 가변피치 프로펠러의 목표 추력, T_{CppL}, T_{CppR} 는 가변피치 프로펠러의 현재 추력, k_{pCppL}, k_{pCppR} 은 제어기의 비례 이득이다. 쓰러스터 개별제어기는 (11)과 같고, 제어 입력의 단위는 rps(revolution per second)이다.

$$\begin{aligned} n_{Th1} &= k_{pTh1} (T_{Th1d} - T_{Th1}) \\ n_{Th2} &= k_{pTh2} (T_{Th2d} - T_{Th2}) \\ n_{Th3} &= k_{pTh3} (T_{Th3d} - T_{Th3}) \\ n_{Th4} &= k_{pTh4} (T_{Th4d} - T_{Th4}) \end{aligned} \quad (11)$$

여기서, $n_{Th1}, n_{Th2}, n_{Th3}, n_{Th4}$ 는 쓰러스터의 명령 회전수(rps), $T_{Thd}, T_{Th2d}, T_{Th3d}, T_{Th4d}$ 는 쓰러스터의 목표 추력, $T_{Th1}, T_{Th2}, T_{Th3}, T_{Th4}$ 는 쓰러스터의 현재 추력, $k_{pTh1}, k_{pTh2}, k_{pTh3}, k_{pTh4}$, 제어기의 비례 이득이다.

4. 시뮬레이션

4.1 시뮬레이션에 사용한 선박의 제원

시뮬레이션에 사용한 선박의 제원은 Table 2와 같다.

Table 2 The Specification of a ship used for simulations

parameters	dimensions	values
length	m	76.2
DWT	ton	3461.5
thruster diameter	m	2
CPP diameter	m	3

선박 모델은 (12)와 같다.

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} 1.1274 & 0 & 0 \\ 0 & 1.8902 & -0.0744 \\ 0 & -0.0744 & 0.0308 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{r} \end{bmatrix} \\
 & + \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1.8902v + 0.0744r \\ 0 & 0 & 1.1274u \\ 1.8902v - 0.0744r & -1.1274u & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ r \end{bmatrix} \\
 & + \begin{bmatrix} 0.0358 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1183 & -0.0124 \\ 0 & -0.0041 & 0.0308 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ r \end{bmatrix} = \tau \quad (12)
 \end{aligned}$$

추력에 관한 식은 (13)과 같다.

$$\begin{aligned}
 \tau &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0.0472 & -0.0472 & -0.4108 & -0.3858 & 0.4100 & 0.4554 \end{bmatrix} \mathbf{u}^T \\
 \mathbf{u} &= [C_{ppL} \ C_{ppR} \ Th_1 \ Th_2 \ Th_3 \ Th_4]^T \quad (13)
 \end{aligned}$$

쓰러스터와 가변피치 프로펠러에 대한 선형식은 (14), (15)와 같고,

$$T_{Th} = \rho D^4 (0.5 - J_0) |n| n \quad (14)$$

$$T_{CPP} = \rho D^4 \left(\frac{0.4}{fullpitch} \theta - J_0 \right) |n| n \quad (15)$$

추력계산 알고리즘, CPP 제어기, 쓰러스터 제어기는 (16), (17), (18)과 같다.

$$\begin{aligned}
 X &= 4.5 \times 10^5 (u_d - u) + 1.25 \times 10^8 (\dot{u}_d - \dot{u}) \\
 Y &= 7.5 \times 10^5 (v_d - v) + 3.75 \times 10^7 (\dot{v}_d - \dot{v}) \\
 N &= 3.75 \times 10^6 (\psi_d - \psi) + 1.25 \times 10^9 (\dot{\psi}_d - \dot{\psi}) \quad (16)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \theta_{C_{ppL}} &= 1.745 \times 10^{-5} (T_{C_{ppLd}} - T_{C_{ppL}}) \\
 \theta_{C_{ppR}} &= 1.745 \times 10^{-5} (T_{C_{ppRd}} - T_{C_{ppR}}) \quad (17)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 n_{Th1} &= 2 \times 10^{-3} (T_{Th1d} - T_{Th1}) \\
 n_{Th2} &= 2 \times 10^{-3} (T_{Th2d} - T_{Th2}) \\
 n_{Th3} &= 2 \times 10^{-3} (T_{Th3d} - T_{Th3}) \\
 n_{Th4} &= 2 \times 10^{-3} (T_{Th4d} - T_{Th4}) \quad (18)
 \end{aligned}$$

4.2 시뮬레이션

시뮬레이션은 Way Point Mode, Auto Mode, Manual Mode에 대하여 실시하였다. 시뮬레이션 그림의 왼쪽은 선박의 항해경로와 항해시의 선박의 방향을 도시적으로 나타내었다. 오른쪽 위에는 애니메이션을 이용해 선박의 회두방향을 실시간으로 표현하였고, Manual Mode에서 실시간 항행명령을 내릴 수 있도록 키패드를 구성하였다. 오른쪽 아래에는 전진방향 속도, 횡방향 속도, 회두 각속도와 회두각을 나타내고, 그 오른쪽은 두개의 가변피치 프로펠러와 4조의 쓰러스터에 대한 추력을 나타낸다.

4.2.1 Way Point Mode

Way Point Mode는 항해사가 전자해도에서 임의의 변침점을 선택하고, 선택된 변침점을 따라 선박의 전진방향과 회두방향이 일치하도록 항해하는 제어모드이다. 먼저 풀다운 메뉴의 시뮬레이션에서 'Way Point 선정'에서 화면상에 순차적으로 변침점을 선택한 후 'Way Point Mode'를 선택하면 정해진 변침점을 따라 선박의 운항이 이루어진다. 시뮬레이션 결과는 Fig. 5와 같다.

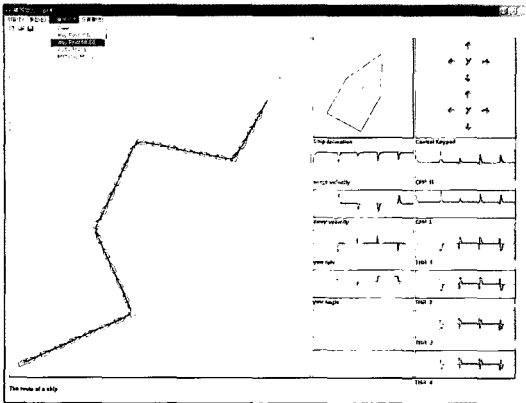


Fig. 5 A way-point mode simulation

4.2.2 Auto Mode

Auto Mode는 항해전에 전진방향, 횡방향, 회두각에 대한 명령을 프로그래밍하여 이를 선박이 추종하도록 제어하는 모드이다. 전진방향 속도와 횡방향 속도를 설정하고, 회두각을 결정함으로써 선박의 자동 위치조정에도 응용가능하다. 운항 시뮬레이션 결과는 Fig. 6과 같다.

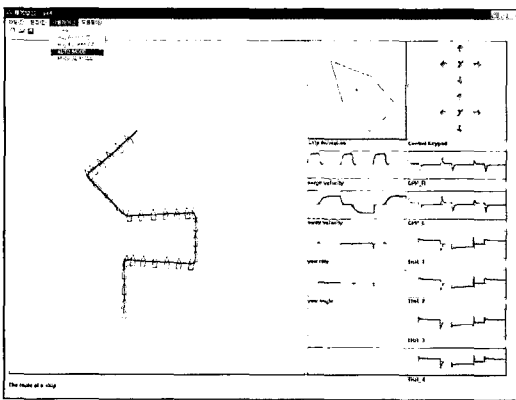


Fig. 6 An auto mode simulation

4.2.3 Manual Mode

Manual Mode는 조이스틱이나 스크린 상에서 실시간 항해 명령을 내리고 이 명령에 따라 선박을 제어하는 모드이다. Fig. 7의 우측 상단을 보면 18개의 키패드를 볼 수 있다. 위에 있는 9개의 키패드는 선박의 전진방향과 횡방향 명령을 내리는 부분이고, 아래 9개의 키패드는 회두각 명령을

내리는 부분이다. 회두각을 설정하지 않는 경우에는 전진방향과 횡방향에 따라 회두각이 자동으로 조정되어 운항된다. 이 모드에서도 전진방향과 횡방향 속도를 설정하고 회두각 명령을 내림으로써 선박의 자동 위치조정에도 응용 가능하다. 시뮬레이션 결과는 Fig. 7과 같다.

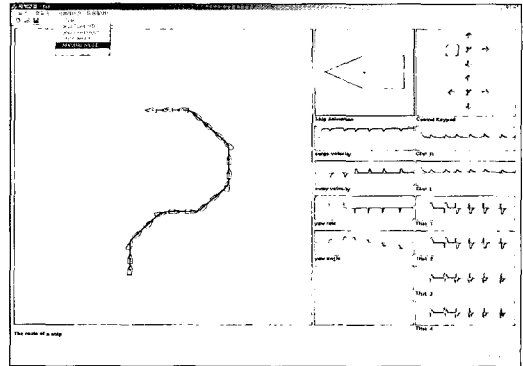


Fig. 7 A manual mode simulation

5. 결 론

본 연구는 프로펠러와 부가추력장치를 갖는 특수선에 대한 3차원 비선형 선박모델을 구하고 이를 제어하는 통합제어기를 설계하였다. 설계된 통합제어기를 이용하여 선박의 자동위치 조정, 항로 추적제어 등의 특수운항을 제어하는 지능형 시스템을 구성하였다. 몇 가지 경우에 대한 시뮬레이션을 통하여 설계한 통합제어기의 성능을 확인하였다. 연구 결과는 탐사선, 광케이블 포설선, 해저 광물 채굴선 등의 특수선박에 적용하여 DP 제어, 항로 추종제어 등에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] T. I. Fossen and A. Grøvlen, "Nonlinear Output Feedback Control of Dynamically Positioned Ships Using Vectorial Observer Backstepping," IEEE Transactions on Control Systems Technology, pp. 121-128, January 1998.

- [2] J. P. Strand and T. I. Fossen, "Nonlinear Output Feedback and Locally Optimal Control of Dynamically Positioned Ships: Experimental Results," Proceedings of the IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems, pp. 89-95, October 1998.
- [3] J. P. Strand, A. J. Sørensen and T. I. Fossen, "Design of Automatic Thruster Assisted Position Mooring Systems for Ships," Modeling, Identification and Control, 1998.
- [4] T. I. Fossen, Guidance and Control of Ocean Vehicles, John Wiley & Sons Ltd., University of Trondheim, Norway, 1994.
- [5] T. I. Fossen, Marine Control Systems, Marine Cybernetics, Trondheim, Norway, 2002.
- [6] E. V. Lewis, Principles of Naval Architecture (2nd Revision), The Society of Naval Architects and Marine Avenue, 1989.
- [7] 이병결, 정경열, 김종화, "선박자동항로 추종 제어 알고리즘에 관한 연구," 박용기관학회지, Vol. 22, No. 6, pp. 920-928, 1998.
- [8] 이병결, 김종화, "적응 퍼지 방식을 이용한 선박 자동 항로 추적제어에 관한 연구," Proceedings of the 14th Korea Automatic Control Conference, 1999.
- [9] 이병결, 김종화, 김대영, 김태훈, "유전 알고리즘을 이용한 선박의 최적 항로 결정에 관한 연구," Proceedings of the 15th Korea Automatic Control Conference, 2000.
- [10] 이병결, 김종화, "선박자동항로 추적을 위한 회두각 명령의 생성과 적응 퍼지제어," 박용기관학회지, Vol. 25, No. 1, pp. 199-208, 2001.

저 자 소 개



이병결 (李丙結)

1993년 한국해양대학교 제어계측공학과 졸업, 1998년 동대학원 석사(제어계측공학과), 2005년 동대학원 박사(제어계측공학과).



김종화 (金鍾和)

1981년 부산대학교 기계공학과 졸업, 1985년 동대학원 석사(제어공학), 1989년 동대학원 박사(제어공학), 1990~현재 한국해양대학교 IT공학부 교수, 1996~1997 University of Wales, Cardiff 연구교수.



임재권 (林在權)

2002년 한국해양대학교 제어계측공학과 졸업, 2004년 동대학원 석사(제어계측공학과), 2004년~현재 동대학원 박사 과정.