

해류중 직선 항행하는 선박의 LOS 가이드 시스템의 제안과 유전 알고리즘을 이용한 최적화

이병결† · 김종화*

(원고접수일 : 2004년 9월 13일, 심사완료일 : 2004년 10월 18일)

A Proposal of LOS Guidance System of a Ship in Straight-line Navigation under Ocean Currents and Its Optimization Using Genetic Algorithm

Byung-Kyul Lee† · Jong-Hwa Kim*

Abstract : This paper suggests LOS(Line-Of-Sight) guidance system of a surface vessel in straight-line navigation under ocean currents. An LOS vector from the vessel to a point on the path between two way-points is decided and a heading angle is calculated to converge to follow the desired path based on the LOS vector. This guidance system is called LOS guidance system. The suggested LOS guidance law has parameters to be properly chosen according to navigational environment. Parameters of LOS guidance system are optimized to reduce propulsive energy and/or position error between desired position and present position of a ship using genetic algorithm which is a strong optimization algorithm with adaptational random search. The effectiveness of the suggested LOS guidance system is assured through computer simulations.

Key words : LOS guidance system(LOS 가이드 시스템), Way-point(변침점), Genetic algorithm(유전 알고리즘), Path following(항로 추종)

1. 서 론

자동조타시스템에서 시작된 선박 자동화에 대한 연구는 전기, 전자 기술의 발달에 따라 다양한 방향으로 진행되고 있다. 선박 자동화에 있어 주요한 목표는 항해 중 발생할 수 있는 좌초, 침몰, 충돌로부터 선박의 안정성을 확보하는 문제와 정해진 항로를 정확하게 추종하는 문제로 요약할 수

있다. 정확한 항로 추종은 운항 중 추진에너지의 손실을 최소화하고 최단시간에 목적지에 도달하는 것을 목표로 한다.

본 논문은 LOS 가이드 시스템을 이용하여 해류 중 직선 항행하는 선박이 정해진 항로를 추종하도록 하는 문제를 다룬다. 일반적으로 선박의 항로는 항해사나 지능 알고리즘에 의해 결정되는 변침점(way-point)에 의해 표시된다. 변침점 사

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

* 한국해양대학교 IT공학부

이의 선박 운항에서 현재 선박의 위치에서 다음 변침점이나 변침점 사이의 임의의 어느 한점으로의 가시선(line-of-sight)벡터를 결정하고 이 가시선 벡터를 회두각 제어를 위해 사용하는 가이드스 시스템을 LOS 가이드스 시스템이라 한다⁽¹⁾. 만약 선박이 회두각 유지를 위한 오토파일럿(autopilot)시스템과 선박의 위치를 알 수 있는 GPS 시스템을 장착하고 있다면, 변침점 사이의 직선으로 결정되는 항로는 회두각 유지를 위한 오토파일럿의 목표점으로 사용될 수 있고, 이를 통해 선박이 미리 정해진 항로를 추종하도록 제어하는 것이 가능하다. 이러한 이유로 항로 제어에 있어 LOS 가이드스 시스템에 대한 관심이 커지고 있다^{(1),(2)}.

선박 운동에 있어 중요한 외란은 파도, 바람, 조류 등이다. 선박 운항 중 파도에 의한 외란은 강인한 제어기로 보상하고, 조류나 바람에 의한 외란은 가이드스에 의해 보상하는 것이 적합하다. 본 논문은 해류와 같은 외란 하에서 운항하는 선박에서 정해진 항로를 유지하는 LOS 가이드스 시스템을 제안하고, 적응적으로 해를 탐색해 가는 최적화 알고리즘인 유전 알고리즘을 이용하여 원양 항해와 근해 항해에 대하여 상황에 맞는 최적해를 찾는다.

2. 해류 중 항행하는 선박의 모델링

2.1 좌표계와 변수들

선박운동에 관련된 좌표계와 변수들은 Fig. 1과 같다. $X_0Y_0Z_0$ 좌표계는 고정 절대좌표계로 항해중 선박의 위치를 묘사하는 데 사용되고, $X_bY_bZ_b$ 좌표계는 원점이 선박 무게 중심O에 고정되어 선박과 함께 움직이는 운동좌표계로 선박운동의 주요변수를 묘사하는 데 사용된다. X_b 축은 선박의 종축으로 선미에서 선수방향, Y_b 는 선박의 횡축으로 우현 방향, Z_b 는 회전축으로 위에서 아래쪽 방향이 양의 방향이다^{(1),(3)}.

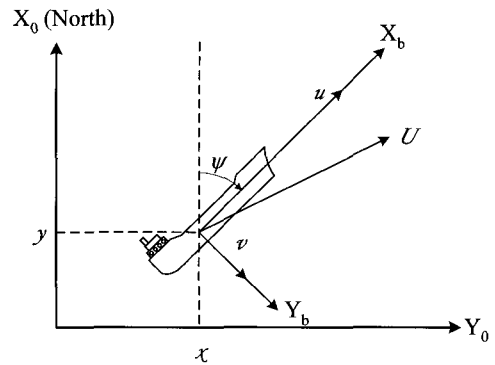


Fig. 1 The coordinate systems and motion variables for a marine vessel

선박 운동에서 사용하는 변수들은 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	yaw	N	r	ψ

2.2 선박 모델

가이드스 시스템에서 항로 계획에 사용되는 모델은 간단한 형태를 취한다. 자주 사용하는 모델은 1차의 저역통과 필터, 2차의 질량-댐퍼-스프링 시스템 등이다⁽¹⁾. 본 논문은 저주파수 영역의 운동에서 근사적으로 간략화한 Nomoto의 1차 응답 모델을 사용한다.

$$\dot{r} = -\frac{1}{T}r + \frac{K}{T}\delta \tag{1}$$

여기서, r 은 회두각속도, δ 는 조타각, K 와 T 는 선박의 특성을 결정짓는 상수이다.

Fig. 1에서 직선항로 항해시 선박의 운동학적 관계는 다음과 같다.

$$\dot{x} = u \cos \psi - v \sin \psi \tag{2a}$$

$$\dot{y} = u \sin \psi + v \cos \psi \tag{2b}$$

직선항로 향해서 전진방향 속도 $u \gg 0$ 이고, 횡방향 속도 $v \approx 0$ 이므로 $U = \sqrt{u^2 + v^2} \approx u$ 가 되고, (1)과 (2)를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{\psi} = r \tag{3a}$$

$$\dot{r} = ar + b\delta \tag{3b}$$

$$\dot{x} = U \cos \psi = u \cos \psi \tag{3c}$$

$$\dot{y} = U \sin \psi = u \sin \psi \tag{3d}$$

여기서, $a = -1/T$ 이고, $b = K/T$ 이다.

2.3 2차원 해류 모델

고정 절대좌표계에서 2차원 해류는 평균 해류속도 V_c 와 해류방향 β 의 2개의 파라미터로 Fig. 2와 같이 묘사될 수 있다^{(1),(3)}.

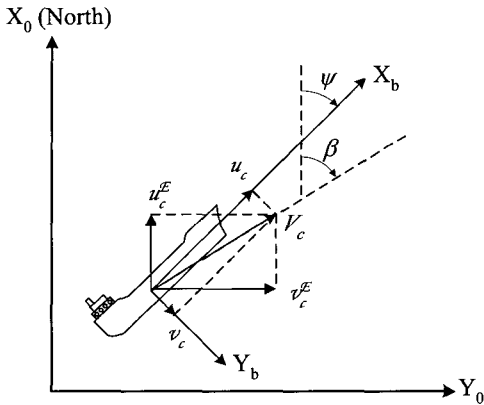


Fig. 2 Definition of average velocity V_c and direction β of the current for a surface vessel.

고정 절대좌표계에서 수상 선박에 대한 2차원 해류의 속도는 (4)와 같이 표현된다.

$$u_c^E = V_c \cos \beta \tag{4a}$$

$$v_c^E = V_c \sin \beta \tag{4b}$$

고정 절대좌표계의 해류 속도를 선체에 고정된 이동좌표계로 변환한 속도는 (5)와 같다.

$$\begin{bmatrix} u_c \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi \\ -\sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_c^E \\ v_c^E \end{bmatrix} \tag{5}$$

(4)를 (5)에 대입하고 정리하면 다음과 같다.

$$u_c = V_c \cos(\beta - \psi) \tag{6a}$$

$$v_c = V_c \sin(\beta - \psi) \tag{6b}$$

2차원 해류모델 (6)과 선박 모델 (3)을 결합하면 다음과 같다.

$$\dot{\psi} = r \tag{7a}$$

$$\dot{r} = ar + b\delta \tag{7b}$$

$$\dot{x} = u \cos \psi + u_c = u \cos \psi + V_c \cos(\beta - \psi) \tag{7c}$$

$$\dot{y} = u \sin \psi + v_c = u \sin \psi + V_c \sin(\beta - \psi) \tag{7d}$$

3. LOS 가이드던스 시스템

본 논문은 LOS 가이드던스 시스템을 이용하여 선박이 정해진 항로를 추종하는 문제를 다룬다. LOS 가이드던스 시스템에 사용되는 LOS 벡터는 Fig. 3과 같다^{(1),(2)}.

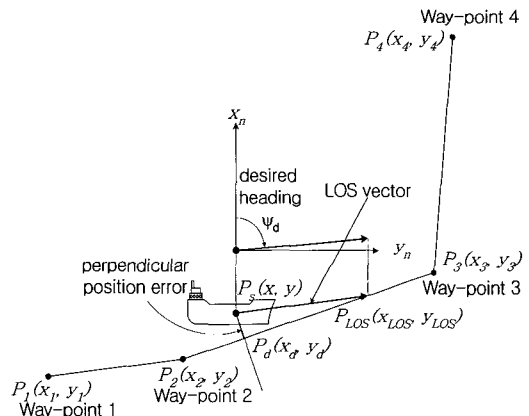


Fig. 3 Definition of LOS vector

LOS 벡터의 기본은 선체 고정 좌표 원점 (x, y) 에서 다음 변침점 좌표 (x_k, y_k) 까지의 벡터이다.

현재 선박 위치에 대한 변침점 사이의 직선항로의 목표위치 (x_d, y_d) 는 다음과 같다^{(4),(5)}.

$$x_d = x_2 + t_h(x_3 - x_2) \quad (8a)$$

$$y_d = y_2 + t_h(y_3 - y_2) \quad (8b)$$

여기서,

$$t_h = \frac{(x_3 - x_2)(x - x_2) + (y_3 - y_2)(y - y_2)}{(x_3 - x_2)^2 + (y_3 - y_2)^2} \quad (9)$$

이다.

이때, 선박의 현재 위치에서 변침점 사이의 직선항로 상의 대응하는 위치에 대한 수직 위치오차는 (10)과 같다^{[4],[5]}.

$$|P_e| = \sqrt{(x - x_d)^2 + (y - y_d)^2} \quad (10)$$

변침점 P_2 에서 P_3 으로의 회두각은 (11)과 같다.

$$\psi_{WP23} = \text{atan2}(y_3 - y_2, x_3 - x_2) \quad (11)$$

선박에서 변침점 P_3 로의 회두각은 (12)와 같고,

$$\psi_{WP3} = \text{atan2}(y_3 - y, x_3 - x) \quad (12)$$

선박의 현 위치에서 LOS 점으로의 회두각은 (13)과 같이 표현된다.

$$\psi_{LOS} = \text{atan2}(y_{LOS} - y, x_{LOS} - x) \quad (13a)$$

$$x_{LOS} = x_d + L \cdot \cos \psi_{WP23} \quad (13b)$$

$$y_{LOS} = y_d + L \cdot \sin \psi_{WP23} \quad (13c)$$

여기에서, L 은 선박의 현재 위치에 대응하는 직선항로상의 목표위치 P_d 로부터 LOS점까지의 거리, 즉 LOS벡터의 변침점 P_2 에서 변침점 P_3 로의 직선항로 성분을 나타낸다. Breivik는 선체 길이 L_{pp} 에 대해서 다음과 같이 표현하였다^[2].

$$L = n \cdot L_{pp} \quad (14)$$

목표 위치 P_d 로부터 LOS점까지의 거리 L 과 수직 위치 오차 P_e 에 대한 식은 Fig. 4를 통해 구할 수 있다.

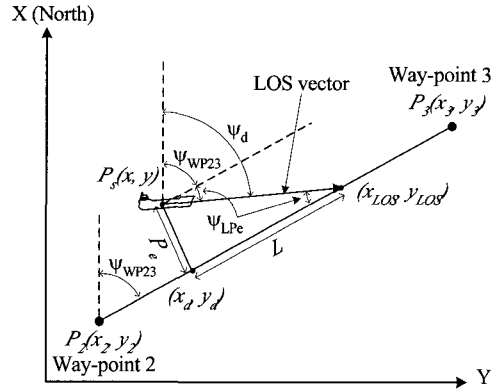


Fig. 4 LOS guidance for a straight line

변침점 2와 3 사이의 직선항로와 LOS 벡터의 만남각은 L 과 P_e 에 대해 다음과 같이 표현된다.

$$\tan(\psi_{LP_e}) = \text{sgn}(P_e) \frac{P_e}{L} \quad (15)$$

여기서,

$$\text{sgn}(P_e) = \frac{\text{sgn}((x_d - x)(y_{LOS} - y_d) - (x_{LOS} - x_d)(y_d - y))}{|P_e|} \quad (16)$$

이다.

수직 위치 오차 P_e 와 선박의 목표 위치에서 LOS점까지의 거리 L 에 대하여 다음과 같이 LOS 가이드 시스템 규칙을 제안한다.

$$\psi_d = \psi_{WP23} + \psi_{LP_e} \quad (17)$$

$$\psi_{LP_e} = \text{atan}\left(-\text{sgn}(P_e) \frac{K_1 \cdot P_e}{L}\right) \quad (18)$$

여기서,

$$L = K_2 u \quad (19)$$

이다.

제안한 가이드 시스템 규칙에서 K_1 은 수직 위치오차에 대한 이득을 나타내고, K_2 는 전진방향 속도에 대한 이득으로 선박의 현재 위치의 직선항로상의 대응하는 목표위치로부터 LOS점까지의 거리를 결정하기 위해 사용되는 파라미터이다. 선박이 대양을 항해하는 경우, 수직 위치오차의 증가에 따른 선박의 안전성 저하가 작으므로 운항 경제성에 중점을 두고 가이드 시스템이 이루어져야 하고, 선박이

연안을 항해하는 경우, 선박의 운항 경제성을 고려함과 동시에 정해진 항로를 정확하게 추종하도록 가이드نس가 이루어져야 한다. 대양 항해시에는 K_1 을 1로 고정하여 운항경제성 향상을 위해 추진 에너지를 최소화하는 K_2 를 구하는 것으로 최적화 문제를 설정하고, 연안 항해시에는 수직 위치오차와 추진에너지를 최소화하는 K_1, K_2 를 동시에 구하는 문제로 LOS 가이드نس 최적화 문제를 설정한다. 이 때 최적화 알고리즘으로 실수코딩 유전 알고리즘을 사용한다.

4. 실수코딩 유전 알고리즘을 이용한 LOS 가이드نس 시스템의 최적화

이 절에서는 제안한 가이드نس 시스템의 파라미터를 실수 코딩 유전 알고리즘을 이용하여 최적화한다. 선박의 대양항해와 연안항해를 구분하여 운항 경제성과 선박의 안정성을 위한 수직 오차를 고려하여 최적 파라미터를 결정한다.

4.1 실수코딩 유전 알고리즘

유전알고리즘은 자연 진화현상을 프로그램 상에서 구현한 것으로 다양한 최적화 문제 해결에 응

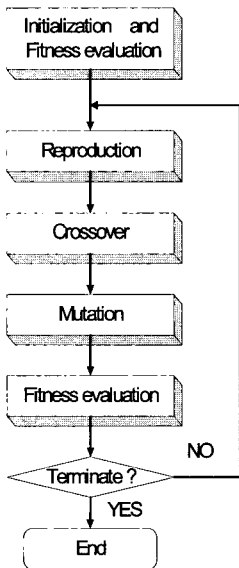


Fig. 5 Operation of a genetic algorithm

용되고 있다⁽⁶⁾⁻⁽⁸⁾. 유전알고리즘은 인위적으로 진화 현상을 일으켜 주어진 문제의 탐색영역(해 공간) 안에서 점진적으로 해를 찾는 적응 알고리즘이다. 재생산, 교배, 돌연변이와 같은 자연 진화기구를 모방한 연산자를 사용한다. 유전 알고리즘의 연산과정은 Fig. 5와 같다.

4.2 염색체 표현과 초기집단의 생성

염색체는 LOS 가이드نس 시스템의 파라미터 정보를 잘 표현할 수 있어야 한다. 그래서, 본 논문은 실수코딩 연산자를 사용하고, 초기집단은 무작위 초기화법을 통해 생성한다⁽⁹⁾.

4.3 유전 연산자

재생산, 교배, 돌연변이가 연산자들에 의해 유전 알고리즘의 성능이 좌우되므로 적합한 연산자의 선택은 매우 중요하다.

본 논문은 재생산 연산자로 일반적으로 많이 사용하는 루울렛휠 선택에 기초한 재생산 연산자를 사용하고, 교배 연산자로 실수코딩에서 사용하는 산술적 블록 교배를 적용하여 사용한다. 지역해나 사점으로부터 벗어나게 하는 돌연변이가 연산자로는 염색체의 요소들을 차례대로 선택하고 이들을 돌연변이 확률에 따라 특정 범위 내에서 발생하는 임의의 실수로 교체하는 균등 돌연변이를 사용한다.

세 가지 유전 연산자의 확률적 속성 때문에 한 세대의 최적 개체가 다음 세대에 살아남지 못하고 소멸되는 경우가 발생할 수 있다. 최적 개체의 소멸은 좋은 특성을 갖는 유전자를 잃는 결과를 야기하여 탐색을 침체시킬 수 있다. 따라서 집단 내에서 가장 강한 개체가 다음 세대로 변경되지 않고 전달되도록 하는 것이 필요한 데 이를 엘리트 전략이라 하며 본 논문은 이를 적용한다.

4.4 적합도 평가

세 연산을 거쳐 새로운 집단이 완성될 때마다 개체들의 적합도가 평가되는데 이는 대개 목적함수로부터 계산된다. 유전알고리즘에서 적합도가

큰 개체가 더 많은 보상을 받을 수 있도록 배려되어야 한다. 그러기 위해 적합도 함수는 최대화 문제의 형태로 기술되어야 하고, 음의 값을 가져서는 안 된다.

본 논문의 최적화 목적은 대양 항해시에는 운항 경제성을 최소화하는 것이고, 연안 항해시에는 운항 경제성과 함께 수직 위치오차를 최소화하는 것이다. 이를 위해 적합도 함수는 운항 경제성을 평가하기 위해 추진에너지 손실량 평가지수를 사용하고, 수직 위치 오차에 대해 벌점 전략을 사용한다.

자동조타에 의한 추진에너지 손실량 평가법에 관해서 Nomoto는 추진 에너지 손실을 조타 저항과 선회 원심력 저항에 의해 평가하였으며^[10], Koyama는 항로 연장과 조타 저항에 의해 평가하였고^[11], Hasegawa는 항로 연장, 조타 저항, 선회 원심력 저항에 의해 평가하였다^[12]. 본 논문은 선형에 관계없이 계수를 구한 Koyama의 다음과 같은 성능 평가지수를 적합도 함수로 채택한다.

$$J = \frac{1}{2} \overline{\psi_e^2} + 4 \overline{\delta^2} \quad (20)$$

여기서,

$$\overline{\psi_e^2} = \frac{1}{T_H} \int_0^{T_H} \psi_e^2 dt \quad (21a)$$

$$\psi_e = \psi_{WP23} - \psi_{rLOS} \quad (21b)$$

$$\overline{\delta^2} = \frac{1}{T_H} \int_0^{T_H} \delta^2 dt \quad (21c)$$

이다. 성능평가지수의 우변 제 1항은 항로 증가에 따른 에너지 손실량을 나타내고, 제 2항은 조타에 의한 타직압력의 선수미 방향 성분에 기인하는 에너지 손실량을 나타낸다.

4.4.1 벌점 전략

연안 항해시 주어진 경로에서 수직 위치 오차가 미리 선정된 위치 오차 범위를 벗어나는 경우 벌점을 적합도 계산에 반영하여 위치 오차 범위 내에서 최적해를 찾도록 한다.

5. 시뮬레이션 및 고찰

제안한 LOS 가이드스 시스템의 파라미터를 유전 알고리즘을 이용하여 최적화하였다. 최적화는 횡과 평균 해류 속도 0.75 [m/s]의 조건 하에서 집단 수 50, 세대수 50, 교배확률 90(%), 돌연변이 확률 2[%]에 대하여 수행하였다. 대양 항해시 선박의 위치 오차는 선박의 안정성에 큰 영향을 미치지 못하므로 운항 경제성에 중심을 두고 (20)의 적합도 함수를 최적화하였다. 연안 항해시 선박의 운항 경제성 뿐만 아니라 안정성을 위해 위치 오차를 고려하여 위치 오차가 10[m]를 벗어나는 경우 벌점을 부여하는 벌점 전략을 통하여 최적화하였다. 시뮬레이션에 사용한 선박 제원은 Table 2와 같고, 회두각 유지 제어기는 (22)와 같은 PD 제어기를 사용한다.

$$\delta = k_p \psi_e + k_d \dot{\psi}_e \quad (22)$$

Table 2 Specification of a cargo ship

	cargo ship (mariner class)
L [m]	161.0
u [m/s]	7.7
▽ [dwt]	16622.0
K [1/s]	0.185
T [s]	107.3

연안 항해시 유전 알고리즘을 통해 구한 최적값은 $K_1=14$, $K_2=54$ 이다. 제안한 가이드스 시스템의 성능을 확인하기 위해 선체길이의 1.5배 위치의 LOS점을 목표로 하는 LOS 가이드스 시스템과 다음 변침점을 목표로 하는 LOS 가이드스 시스템에 대하여 시뮬레이션을 실시하였다. 그 결과는 Fig. 6과 같다.

선체 길이의 1.5배의 위치를 목표로 하는 LOS 가이드스 시스템의 경우 25[m] 정도의 위치 오차를 갖고 운항되지만, 제안한 가이드스 시스템은 선박 운항의 안전 제한 조건인 10m 안에서 운항되도록 가이드스하고 있음을 확인할 수 있다. 이를 위해 제어입력이 지속적으로 인가되고 있음을 확인할 수 있다.

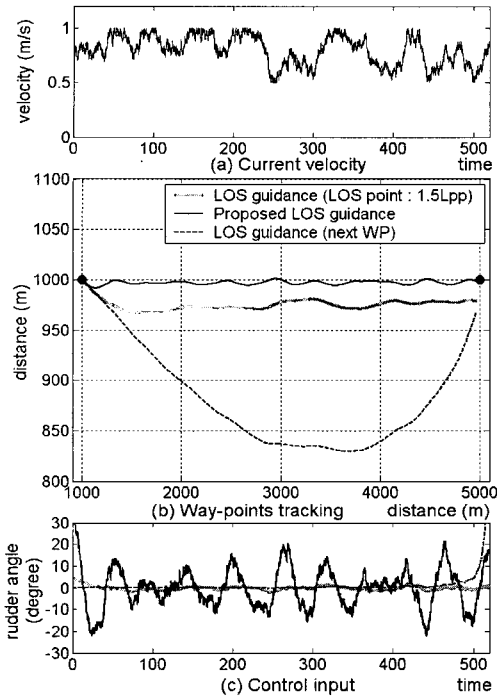


Fig. 6 Simulations of a ship in adjacent seas

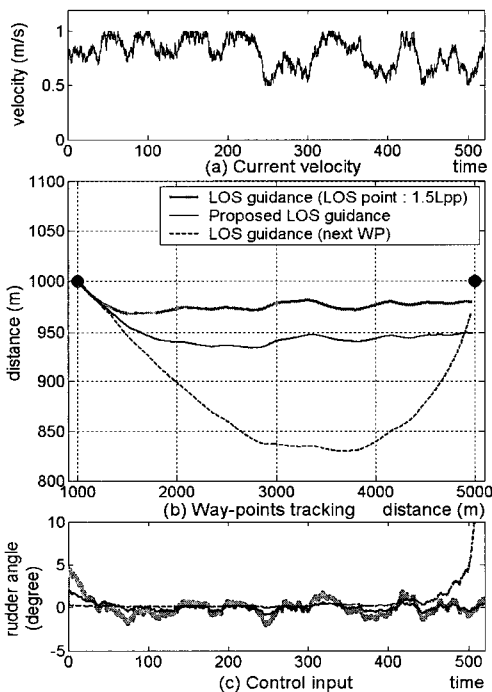


Fig. 7 Simulations of a ship in deep seas

원양 항해시 유전알고리즘을 통해 구한 최적값은 $K_1=1$, $K_2=72$ 이다. 제안한 가이드نس 시스템의 성능을 확인하기 위해 연안 항해시 비교 대상 가이드نس 시스템에 대한 시뮬레이션을 실시하였다. 그 결과는 Fig. 7과 같다.

제안한 가이드نس 시스템은 선체 길이의 1.5배의 위치를 목표로 하는 LOS 가이드نس 시스템에 비해 위치 오차가 크지만 타각 변화가 적어 추진 에너지 손실량이 적게 운항되도록 가이드نس하고 있음을 확인할 수 있다.

6. 결 론

본 논문은 해류 중 직선 항행하는 선박을 정해진 항로를 추종하도록 유도하는 LOS 가이드نس 시스템을 제안하고 연안항해와 원양항해에 대하여 항해 목적에 맞는 파라미터를 유전 알고리즘을 이용하여 최적화하고, 시뮬레이션을 실시하였다. 시뮬레이션 결과를 통해 제안한 LOS 가이드نس 시스템이 연안 항해시 선박이 정해진 항로에 대하여 안전한 거리 이내에서 운항하도록 유도하고 있으며, 원양 항해시, 운항 경제성의 목적에 부합하도록 유도하고 있음을 확인할 수 있다.

참고문헌

- [1] T. I. Fossen, *Marine Control Systems*, Marine Cybernetics, 2002.
- [2] M. Breivik and T. I. Fossen, "Line-of-Sight Path Following for Marine Surface Vessels," Proc. of the IFAC, 2004.
- [3] T. I. Fossen, *Guidance and Control of Ocean Vehicles*, John Wiley & Sons Ltd., 1994.
- [4] 이병걸, 정경열, 김종화, "선박 자동 항로 추종 제어 알고리즘에 관한 연구," 박용기관학 회지, Vol. 22, No. 6, pp. 920-928, 1998.
- [5] 이병걸, 김종화, "선박 자동항로 추적을 위한 회두각 명령의 생성과 적응 퍼지제어," 박용

기관학회지, Vol. 25, No. 1, pp. 199-208, 2001.

[6] D. E. Goldberg, *Genetic Algorithm in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley Co. Inc., N.Y., 1989.

[7] Z. Michaelwicz, *Genetic Algorithms + Data Structures=Evolution Programs*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1992.

[8] M. Gen and R. Cheng, *Genetic Algorithms & Engineering Design*, John Wiley & Sons, Inc., N.Y., 1997.

[9] 진강규, *유전알고리즘과 그 응용*, 교우사, 2000.

[10] K. Nomoto, et al., "Loss of Propulsive Power caused by Yawing with Particular Reference to Automatic steering," *Journal of the society of naval architects of Japan*, Vol. 120, 1966.

[11] T. Koyama, "On the Optimum Automatic Steering System of ships at Sea," *Journal of the society of naval architects of Japan*, Vol. 122, 1967.

[12] K. Hasegawa, "On the Performance Criterion of Autopilot Navigation," *Journal of Kansai Society of Naval Architects, Japan*, No. 178, 1980.

저 자 소 개



이병결 (李丙結)

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



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.