

Development of Nonlinear Control Algorithm for Automatic Berthing of Ships

MOON-CHEOL WON*, SEONG-KUK HONG*, AND YUN-HA JUNG*

SUN-YOUNG KIM**, NAM-SUN SON**, AND HYUN-GYU YOON**

*Dept. of Mechatronics of BK 21 Mechatronics Group, Chungnam National University, Korea

**Maritime and Ocean Engineering Research Institute/KORDI, Korea

KEY WORD: Automatic berthing, Sliding mode control, Non-linear control, Thruster, Multi-input multi-output(MIMO) control algorithm

Abstract: This study develops an automatic berthing control algorithm for ships with a bow thruster and a stern thruster as well as a rudder. A nonlinear mathematical model for low speed maneuvering of ships is used to develop a MIMO(multi-input multi-output) nonlinear control algorithm. The algorithm consists of two parts, which are forward velocity control and heading angle control. The control algorithm is designed based on the longitudinal and yaw dynamic models of ships. The desired heading angle is obtained by the so called "Line of Sight" method. An optimal control force allocation method of the rudder and the thrusters is suggested. The nonlinear control algorithms are tested by numerical simulations using MATLAB, and shows good tracking performances.

1. 서 론

선박의 이접안은 선박의 운항에서 가장 어려운 분야 중 한 부분이다. 그래서 복잡한 항구에서 이접안 중에 발생하는 충돌 사고에 대한 많은 보고를 접할 수 있다. 이러한 이유로 유조선과 같은 대형 선박들은 도선사와 예선(Tug boat)을 사용하여 이접안을 한다. 하지만 이러한 방법은 상당한 시간과 비용이 소모된다.

이접안에서의 시간과 비용을 줄이는 방법으로, 기존 타에 선 수선미 쓰러스터를 장착한 특수한 선박 등에 자동 이접안 제어 기술들[3, 4, 6]이 개발되었다. 본 연구에서는 컨테이너 선박의 저속 비선형 동역학 모델을 비선형 자동 이접안 제어 알고리즘 설계에 사용하였다.

설계된 제어 알고리즘은 기본적으로 주 추진 프로펠러와 타, 선수선미 쓰러스터의 액추에이터를 갖는 선박에의 적용을 목표로 한다. 이러한 선박 제어는 다중입력 및 다중 출력(Multi-Input Multi-Output : MIMO) 시스템 문제가 된다. 개발된 알고리즘은 MATLAB을 이용하여 수학적 시뮬레이션으로 효율성을 증명 하였다. 이 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 시뮬레이션과 제어 알고리즘 설계를 위한 컨테이너선의 저속 비선형 동역학 모델을 설명하였다. 3장에서는 제어기 설계과정을 설명하였다. 수학적 시뮬레이션 결과는 4장과 결론에서 언급하였다.

2. 저속 수학모형

저속 운항 선박의 동역학은 복잡한 비선형 미분 방정식으로 표현할 수 있다. 본 연구에서는, 전형적인 컨테이너 선박의 비선형 모델을 자동 이접안 제어 알고리즘 설계 및 이의 효율성을 시뮬레이션하기 위해 이용하였다.

선박의 운동방정식 기술을 위한 좌표계는 Fig.1과 같이 정의한다. 선박은 일반적으로 6자유도 운동을 하지만 자동 이접안 문제에서는 간단하게 3자유도 운동으로 선박의 surge

sway, 그리고 yaw 운동만을 고려하기로 한다. 이 경우, 선박 운동방정식은 다음 식 (1)~(3)와 같이 나타낼 수 있다.

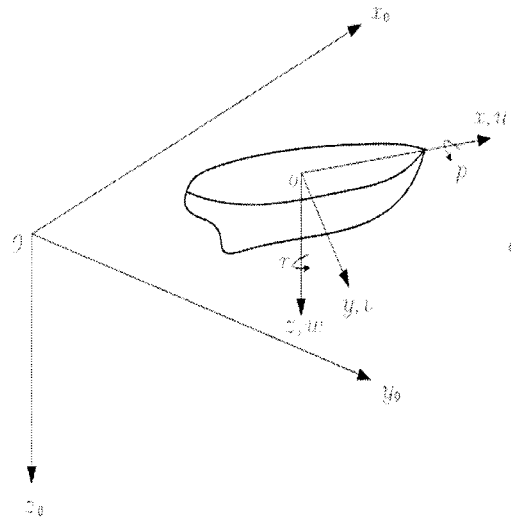


Fig. 1 Coordinate definition for describing ship dynamic equations

$$\dot{x} = u \cos(\psi) - v \sin(\psi) \tag{1}$$

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

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

여기서, (x, y, ψ) 는 surge, sway와 yaw방향의 공간 변위 좌표계이다. 또한 (u, v, r) 는 같은 방향의 공간 속도 좌표계이다.

위와 같은 좌표계 정의에 의하여, 운동방정식은 다음 식 (4)~(6)과 같다.

$$m(\dot{u} - vr - x_C r^2) = X_H + X_R + X_P \tag{4}$$

$$m(\dot{v} + ur + x_G \dot{r}) = Y_H + Y_R + Y_T \quad (5)$$

$$I_z \dot{r} + mx_G(\dot{v} + ur) = N_H + N_R + N_T \quad (6)$$

여기서 선체 주위의 유체에 의해 선체에 작용하는 유체력 (X_H, Y_H, N_H)은 다음 식 (7)~(9)로 주어진다.

$$X_H = X_u \dot{u} + X_{u|u}|u| + X_{vr}vr + X_\alpha \alpha + X_{\alpha|\alpha}|\alpha| \quad (7)$$

$$Y_H = Y_v \dot{v} + Y_p \dot{p} + Y_r \dot{r} + Y_w ur + Y_\beta \beta + Y_{|\beta|}|\beta| |\beta| - \frac{\rho}{2} LC_D \left\{ \int_{-L/2}^{L/2} |v + C_r r x| (v + C_r r x) dx - L |v| |v| \right\} \quad (8)$$

$$N_H = N_v \dot{v} + N_r \dot{r} + N_{|u|}|u| r + N_\alpha \alpha + N_{\alpha|\alpha}|\alpha| - \frac{\rho}{2} LC_D \int_{-L/2}^{L/2} |v + C_r r x| (v + C_r r x) x dx \quad (9)$$

식 (8)에서, β 는 식 (10)과 같이 정의된다.

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{-v}{u} \right) \quad (10)$$

또한 식 (7)에서 α 는 식 (11)로 정의된다.

$$\alpha = \beta - \text{sgn}(\beta) \quad (11)$$

타각(δ)의 변화로 인해 발생하는 유체력 (X_R, Y_R, N_R)은 다음 식 (12)~(14)와 같이 표현할 수 있다.

$$X_R = -(1 - t_R) F_N \sin \delta \quad (12)$$

$$Y_R = -(1 + a_H) F_N \cos \delta \quad (13)$$

$$N_R = -(x_R + a_H x'_H L) F_N \cos \delta \quad (14)$$

여기서 F_N 은 식 (15)으로 정의 한다.

$$F_N = \frac{\rho}{2} A_R f_\alpha U_R^2 \sin \alpha_R \quad (15)$$

식 (15)에서, f_α 와 U_R 는 $f_\alpha = \frac{6.13\lambda}{\lambda + 2.25}$ 와 $U_R = \sqrt{u_R^2 + v_R^2}$ 으로 주어진다. 여기서 u_R 와 v_R 은 각각 타로 유입되는 유체의 전진 방향 및 횡방향 유체의 속도이다.

또한 유입류의 유효영각 α_R 은 $\alpha_R = \delta + \frac{v_R}{u_R}$ 로 산정한다.

주 추진 프로펠러에 의한 힘 X_P 는 식 (16)과 같이 모델 될 수 있다.

$$X_P = (1 - t_p) \rho n |D_p^4 K_T \quad (16)$$

여기서 n 은 프로펠러의 회전수(rps), K_T 는 식 (17)과 같이 전진비(J_P)의 함수로 나타낼 수 있다.

$$K_T = a_1 + a_2 J_p + a_3 J_p^2 \quad (17)$$

쓰러스터에 의한 힘(Y_T, N_T)는 다음 식 (18)~(19)와 같이 간단하게 모델 될 수 있다.

$$Y_T = Y_{T_b} + Y_{T_s} \quad (18)$$

$$N_T = x_{T_b} Y_{T_b} + x_{T_s} Y_{T_s} \quad (19)$$

여기서 Y_{T_b} 와 Y_{T_s} 는 식 (20)~(21)과 같이 모델 된다.

$$Y_{T_b} = b_B n_B |n_B| \quad (20)$$

$$Y_{T_s} = b_S n_S |n_S| \quad (21)$$

식 (20)과 (21)에서, n_B 와 n_S 는 각각 선수 및 선미 쓰러스터의 회전수(rps)이다.

각 액추에이터들의 동적 모델은 모두 1차 선형 시스템으로 간단하게 모델 될 수 있다.

$$\dot{n} = \frac{1}{\tau_p} (n_C - n) \quad (22)$$

$$\dot{\delta} = \frac{1}{\tau_\delta} (\delta_C - \delta) \quad (23)$$

$$\dot{n}_B = \frac{1}{\tau_{tB}} (n_{BC} - n_B) \quad (24)$$

$$\dot{n}_S = \frac{1}{\tau_{tS}} (n_{SC} - n_S) \quad (25)$$

여기서 n_C, δ_C, n_{SC} 와 n_{BC} 는 각 액추에이터들의 명령 값이다.

3. 자동 이접안을 위한 비선형 MIMO제어기

3.1 원하는 지향각 및 전진방향 속도 계산

본 연구에서 이접안 제어기는 미리 설정된 경유점(way points)를 선박이 따라가도록 설계되었다. 그리고 각각의 경유점에서 원하는 v_n 선박속도로 지정된다.

이 경우, "Line Of Sight(LOS)"라 불리는 개념[1]이 각각의 경유점을 선박이 원하는 속도로 운행되기 위해 필요한 선박의 필요 지향각과 전진방향속도를 결정하는데 사용될 수 있다 (Fig.2). Fig.2에서 N은 line of sight의 길이이고 L_{hide} 은 선박의 길이이다.

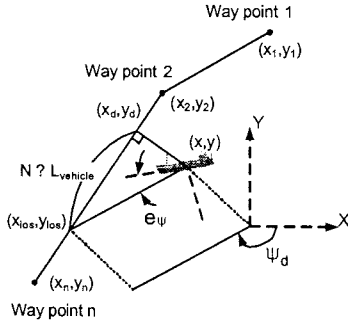


Fig. 2 Calculation of LOS vector

현재 선박 위치 (x, y) 에서 필요한 속도를 구하는 식은 식 (26) 으로 정의된다.

$$u_d = v_n + \delta (v_{n+1} - v_n) \quad (26)$$

여기서 s 는 식 (27)로 주어지는 파라미터이다.

$$s = \frac{(x - x_n)(x_{n+1} - x_n) + (y - y_n)(y_{n+1} - y_n)}{d_n^2} \quad (27)$$

선박의 필요 지향각은 선박과 경유점 연결 선분상의 최소거리점 (x_d, y_d) 에서 $N \times L_{vehicle}$ 떨어진 지점 (x_{los}, y_{los}) 의 연결선의 각도로 정해진다. 따라서 원하는 지향각 (ψ_d) 은 아래 식 (28)과 같이 계산 될 수 있다.

$$\psi_d = \arctan\left(\frac{y_{los} - y}{x_{los} - x}\right) \quad (28)$$

3.2 제어기 설계

비선형 제어기 설계에서, surge와 yaw방향 동역학식이 설계에 사용되었다. 이는 3.1에서 설명한 LOS 개념을 사용할 경우, 선박의 전진방향 속도와 선박의 지향각 만이 적절히 제어되면 되기 때문이다. 또한, 두 동역학식은 제어기 설계에서 독립적으로 사용된다.

식 (4)는 $m_0 = (m - X_u)$ 일 때 식 (29)와 같이 바꿀 수 있다.

$$m_0 \dot{u} = X_h(u, v, r) + X_R(u, v, n, \delta) + X_p(u, n) \quad (29)$$

속도 오차 (e_u) 를 식 (30)과 같이 정의하고,

$$e_u = u - u_d(s) \quad (30)$$

원하는 페루프 동역학식을 식 (31)과 같이 정의한다. 여기에서 λ 는 양의 상수이다.

$$\dot{e}_u + \lambda e_u = 0 \quad (31)$$

이러한 페루프 동역학식을 유지될 경우, 속도오차가 0으로 수렴한다.

식 (29)와 (31)은 식 (32)와 같이 원하는 프로펠러의 추진력으로 표현할 수 있다.

$$X_{Pd} = m_0(\dot{u}_d(s) - \lambda e_u) - X_h(u, v, r) - X_R(u, v, n, \delta) \quad (32)$$

마지막으로 식 (16)을 사용하여, 식 (32)로부터 원하는 프로펠러 속도 n_d 를 구할 수 있다.

다음은 원하는 지향각 제어를 위한 제어기의 설계과정이다. 지향각 오차 (e_ψ) 를 식 (33)과 같이 정의한다.

$$e_\psi = \psi - \psi_d(s) \quad (33)$$

또한 원하는 closed loop 동역학식을 식 (34)와 같이 표현한다.

$$e_\psi'' + \lambda_1 e_\psi' + \lambda_2 e_\psi = 0 \quad (34)$$

양의 λ_1 및 λ_2 값에 대하여 상기 페루프 동역학식은 지향각 오차가 0으로 수렴 되게 한다.

식 (5), (6)과 식 (34)를 이용하여 유체력 Y_R, Y_T, N_R 와 N_T 의 관계를 풀 수 있고 그 관계식은 식 (35)와 같다.

$$\begin{aligned} c(Y_R + Y_T) + d(N_R + N_T) &= \\ -cY_n - dN_n - \lambda_1 \dot{e}_\psi - \lambda_2 e_\psi + \ddot{\psi}_d(s) &= u_{\psi d} \end{aligned} \quad (35)$$

식 (35)에서, c 와 d 는 행렬 M_1 이 식 (36)과 같이 정의할 경우, M_1^{-1} 행렬의 (2.1)와 (2.2)의 요소이다.

$$M_1 = \begin{bmatrix} (m - Y_v) & (mx_G - Y_r) \\ (mx_G - N_v) & (I_{zz} - N_r) \end{bmatrix} \quad (36)$$

식 (35)의 유체력들은 지향각 제어를 위한 제어입력 (δ, n_B, n_S) 에 따라 식 (13),(14),(18) 및 (19)에 의하여 정해지는데, 3개의 제어입력이 식 (35) 1개만 만족하면 된다. 따라서 제어 입력들이 단일하게 결정되지 않는다. 본 연구에서는 선박의 전진방향 속도가 0.4m/sec 보다 작은 경우 쓰러스터만 사용하되 쓰러스터들의 속도가 절대값이 같고 방향이 반대 되도록 즉, $n_S = -n_B$ 를 만족하도록 하였다. 선박의 전진 방향속도가 0.4m/sec보다 크면, 입력을 결정하기 위해 최적화 기법을 사용하였다. 성능지수 $J = n_B^2$ 이 제한 조건인 $n_S = -n_B$ 하에서 최소화되도록 타 및 쓰러스터들의 명령 값들이 정해진다. 이렇게 제어 입력 분배를 하는 이유는 선박이 저속 운행할 경우 쓰러스터가 타보다 효율적이고 고속운행의 경우 타가 쓰러스터보다 효율적이기 때문이다.

4. Simulation Results

두 가지의 시뮬레이션이 설계된 제어 알고리즘을 검증하기 위하여 수행되었다. 첫 번째 수치실험에서는 식 (37)과 같은

함수가 선박의 원하는 궤적을 나타내는데 사용되었다.

$$Y = 50(1 - e^{-0.09X}) \quad (37)$$

경유 점들은 이 궤적 상에 위치한다. 이 시뮬레이션에서, LOS 길이는 L_{vehide} 의 2 배이고 초기조건 벡터를

$X_0 = [u, v, r, x, y, \psi]$ 로 정의할 경우, 초기 조건은 $X_0 = [0.01, 0, 0, 5, 1, 90^\circ]$ 으로 주었다.

Fig 3은 시뮬레이션의 결과이다.

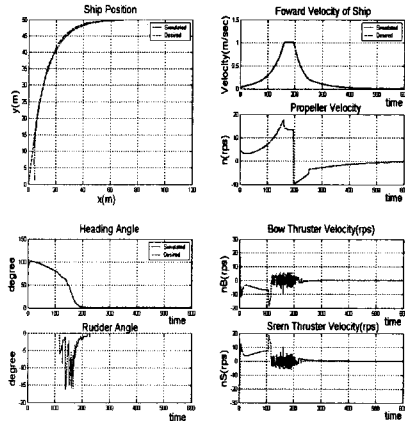


Fig. 3 Simulation result of LOS based Nonlinear Controller for an exponential ship desired trajectory

시뮬레이션 결과를 보면 선박이 원하는 경로를 잘 추종하는 것을 확인할 수 있다. 또한 전진 방향 속도와 지향각의 추종 오차가 거의 없다. 타각과 쓰러스터의 회전속도는 $t=100 \sim 200$ sec.의 범위에서 채터링(chattering)현상을 나타낸다. 이러한 이유는 최적제어 분배 알고리즘에 의한 결과이다.

두 번째 시뮬레이션은 Fig. 4에서 보여지는 폐루프를 추종하는 것이다.

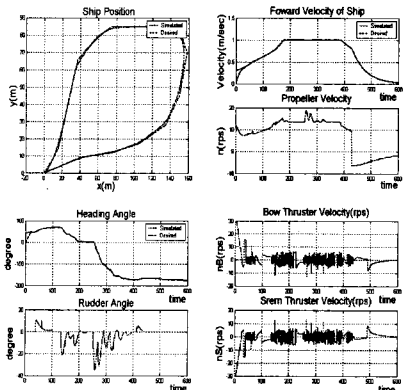


Fig. 4 Simulation result of LOS based Nonlinear Controller for a closed trajectory tracking(LOS=3L)

시뮬레이션에 사용된 실제 경유점의 좌표와 각각의 경유점에서 가져야 할 선박의 속도 벡터는 아래와 같다.

Way V = [0.3, 0.5, 0.8, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 0.8, 0, 0]

Way Y = [0, 14, 66, 79, 85, 85, 85, 70, 45, 28, 17, 12, 9, 0, 0]

Way X = [0, 16, 37, 58, 74, 128, 148, 158, 150, 135, 105, 76, 40, 0, -20]

이때 LOS 길이는 L_{vehide} 의 3배를 사용하였다. Fig.4에서 최대

위치 추종 오차는 3.0m보다 작음을 알 수 있다. 여기서 추종 오차는 경유점들이 연결되는 모서리 점 근처에서 크다. LOS 길이를 L_{vehide} 의 2배로 한 다른 시뮬레이션 결과에서는 이 오차가 1.0m 보다 작음을 확인 하였다.

첫 번째 시뮬레이션에서와 같이 전진방향 속도와 지향각 추종 결과는 거의 0임을 알 수 있다. 역시, 첫 번째 시뮬레이션 결과에서와 같이 최적제어 분배 알고리즘의 결과로 선수/선미 쓰러스터의 time history에서 채터링(chattering) 현상을 볼 수 있다. 약간의 제어 성능의 저하를 감수하면, 이러한 현상을 없애기 위해, 채터링(chattering) 현상이 발생하는 부분에서 쓰러스터 명령을 0으로 해도 무방함을 시뮬레이션을 통해 확인할 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서 타 및 선수/선미 쓰러스터를 갖는 선박의 MIMO (Multi-Input Multi-Output) 자동 이접안 제어 알고리즘을 개발하였다. 이 제어기의 성능은 수치시뮬레이션을 통해 증명되었다. 선박이 주어진 경유점과 주어진 전진속도를 추종하려고 할 때 선박의 비선형 동역학 모델을 이용한 비선형 제어 알고리즘은 좋은 추종성능을 보여준다. 시뮬레이션 결과는 line of sight(LOS)가 위치 추종의 정확도와 연관되어 있음을 보여준다. 모형선 또는 실선을 이용한 실제 실험에서 개발된 제어 알고리즘의 효율성이 확인 되어야 할 것이다.

후 기

본 연구는 한국해양연구원의 기본사업 "네트워크 기반 항만 관제 및 항법체계 기술 개발" 과제에서 수행한 연구 결과의 일부입니다.

참고문헌

- [1] Fossen, T. (1994). "Guidance and Control of Ocean Vehicles.", John Wiley & Sons Ltd. pp 307-321.
- [2] Fossen, T.(2002). "Marine control Systems", Marine Cybernetics.
- [3] Hasegawa, K., Kitera, K.(1993). "Automatic Berthing Control System Using Network and Knowledge-base.", Journal of Kansai Society of Naval Architecture of Japan, pp 144-153.
- [4] Im, N., Hasegawa, K.(2002)."Motion Identification using Neural Networks and Its Application to Automatic Ship", Journal of Ship and Ocean Technology, pp.16-26.
- [5] Slotine, J.J. and Li, W.(1991). "Applied Nonlinear Control", Prentice Hall.
- [6] Yamato, H., Koyama, T.(1992) "Automatic berthing using the expert system", control application in marine systems, pp 173-184.

2006년 10월 16일 원고 접수

2006년 10월 16일 최종 수정본 채택