

속도구속조건을 이용한 수중 이동체의 접안제어

남택근*, 김철승**, 노영오*, 박영산*

* 목포해양대학교 기관시스템공학부 교수 ** 목포해양대학교 해상운송시스템학부 교수

A berthing control for underwater vehicle with velocity constraints.

Taek-Kun Nam*, Chol-Seong Kim**, Young-Oh Roh*, Young-San Park*

* Division of Marine Engineering System , ** Division of Marine Transportation System,

Mokpo National Maritime University, Mokpo, 530-729, Korea

요약 : 본 논문에서는 속도 구속조건을 갖는 수중이동체를 초기위치로부터 목적위치에 접안하는 제어기법에 대해서 논의한다. 단, 수중이동체는 일직방향으로 속도성분을 갖지 않는 즉, 속도구속조건을 가지는 것으로 가정한다. 본 논문에서는 이러한 시스템에 대하여 비 홀로노믹적인 관점에서 시스템을 해석하고 수중이동체를 체인드폼으로 변환한 후 Multi-rate 디지털 제어기법을 적용하여 자세제어를 행하고 수치시뮬레이션을 통하여 제어기법의 유용성을 평가하였다.

핵심용어 : 수중이동체, 비홀로노믹구속, 다중체인드폼, 멀티레이트디지털제어

ABSTRACT : *In this paper, we study the stabilization control of an underwater vehicle from its initial posture to its desired one. We assume that the underwater vehicle has velocity constraint, i.e. it has no velocity component for some direction.*

Our approach is based on the nonholonomic system which can derived from velocity constraints that cannot integrable. We proposed a control strategy for posture control of the underwater vehicle using multi-rate digital control. The proposed control scheme is applied to the berthing control of an underwater vehicle and verified the effectiveness of control strategy by numerical simulation.

KEY WORDS : Underwater vehicle, nonholonomic constraints, multi-chained form, multirate digital control

1. Introduction

본 연구에서는 3차원 공간내를 이동하는 수중 이동체의 초기 위치로부터 도킹위치로의 위치 및 자세제어를 위한 제어기법에 대해서 논의하고자 한다. 본 논문에서의 제어대상물인 수중 이동체는 자세를 제어하는 3개의 각속도와 추진방향을 제어하는 1개의 병진속도 함께 4개의 입력을 갖고 추진방향 이외에는 이동할 수 없는 구속조건을 갖고 있다.

이와 같은 구속조건은 비홀로노믹 구속조건 [8]으로 분류 되고 비홀로노믹적인 특성에 주목하여 다양한 연구가 진행되고 있다. 비홀로노믹 시스템은 연속시간영역의 피드백제어로는 평형 점에의 안정화 제어가 불가능한 특성[9]을 가지고 있는 시스템이기도 하다. Nakamura [11]등은 운동학 모델의 가제어성 및 안정성을 증명하고 있고 목표궤도가 0이 아니라는 가정아래 추종제어를 행하고 있다. Reyhanoglu [1]은 3자유도를 가지는

수면이동체(surface vessel)의 가제어성 및 비홀로노믹적인 특성에 대해 논의하고 있지만 구체적인 제어기설계에 대한 제안이 되지 않고 있다.

Egeland [6]는 수중 이동체의 구속조건으로부터 체인드폼을 유도하고 시변(time-varying)제어기를 제안하여 위치·자세제어에 적용을 하고 있지만 수렴속도가 너무 느리고 제어기 설계과정이 복잡하고 난해한 문제점을 가지고 있다. 위와 같은 제어대상물에 대해서 저자 등은 속도구속조건으로부터 얻어진 비 홀로노믹시스템에 대하여 백스테핑 제어기를 적용한 제어기법을 제안하였다 [12].

본 논문에서는 수중 이동체의 체인드폼으로의 변환결과 [6]를 이용하여 다중 체인드폼(multi-chained form)으로 변환을 행하고 데드비트제어(deadbeat control) 제어기법을 적용하여 초기 위치·자세로부터 접안하고자 하는 목적치로의 안정화 제어기법을 제안한다. 아울러 시뮬레이션을 통하여 제안한 제어기법의 유용성을 확인하고 백스테핑제어기를 적용한 제어결과와 비교 검토를 행하고자 한다.

*대표저자: 남택근

송신회원, tknam@mmu.ac.kr, 061)240-7310

*송신회원,정회원,비회원 {cskimu, mmuroh, seapark@mmu.ac.kr},

061) 240 - 7307, 7095, 7102

2. 수중 이동체의 운동학 모델

본 연구에서의 제어대상물은 그림.1 과 같은 수중이동체이다. 이 수중 이동체는 자세를 제어하는 3개의 각속도와 추진방향을 제어하는 1개의 병진속도 합계 4개의 입력을 가지고 추진방향 이외에는 이동되지 않는다는 속도에 관한 2개의 비 홀로노믹 구속조건을 가지고 있다.

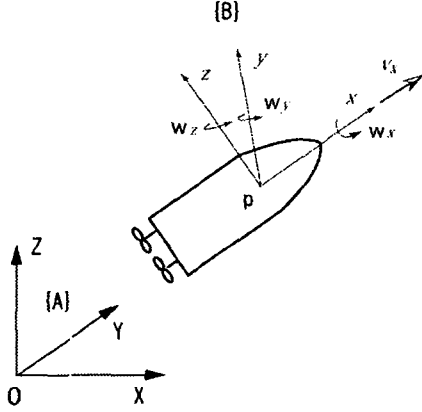


Fig. 1 underwater vehicle

그림 1의 A, B는 각각 기준좌표계와 수중이동체의 물체좌표계를 의미하고 수중이동체의 운동학모델은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \dot{R} &= RS(\omega) \\ \dot{p} &= Rv \end{aligned} \quad (1)$$

단, $R = \{r_{ij}\} \in SO3$ 은 기준좌표계 A에서 본 물체좌표계 B의 회전행렬이고 $\omega := (\omega_x, \omega_y, \omega_z)^T$ 는 물체좌표계에서의 각속도이다. $S(\cdot)$ 는 Skew symmetric matrix를 의미하고 $p = (p_x, p_y, p_z)^T$ 는 수중이동체의 위치를, $v = (v_x, 0, 0)^T$ 는 물체좌표계에서의 이동체의 속도를 나타낸다. 이것은 수중이동체의 병진이동이 물체좌표계의 x 축 방향으로 이동하는 것을 의미한다.

제어목적은 위치 p 를 목표위치 $p_d = 0 \in R^3$ 로, 자세 R 을 목표자세 $R_d = I_3$ 에 안정화시키는 것이다. 단, $I_3 \in R^{3 \times 3}$ 은 단위행렬을 의미한다. 물체의 자세를 표현하는 방법중 하나인 등가회전각, 등가회전축이 주어졌을 경우 회전행렬 R 은

$$R = I_3 \cos \theta + S(\kappa) \sin \theta + \kappa \kappa^T (1 - \cos \theta) \quad (2)$$

와 같이 나타내어진다. 단, $\kappa = (\kappa_x, \kappa_y, \kappa_z)^T \in R^3$ 은 좌표계 A의 기저벡터를 이용하여 표현한 수중이동체의 회전각 방향을 갖는 단위벡터이고 θ 는 κ 를 중심축으로 한 회전각이다. 반대로 회전행렬 R 이

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} \quad (3)$$

로 주어질 경우 등가회전각(θ), 등가회전축(κ)은

$$\begin{aligned} \theta &= \cos^{-1} \left(\frac{\text{trace}(R) - 1}{2} \right) \\ \kappa &= \frac{1}{2 \sin \theta} \begin{pmatrix} r_{32} - r_{23} \\ r_{13} - r_{31} \\ r_{21} - r_{12} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

로 주어진다. (3)의 R 은 오일러 파라미터

$$\epsilon := \sin \left(\frac{\phi}{2} \right) \kappa, \quad \eta := \cos \left(\frac{\phi}{2} \right) \quad (5)$$

를 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$R = (\eta^2 - \epsilon^T \epsilon) I + 2\eta S(\epsilon) + 2\epsilon \epsilon^T \quad (6)$$

단, 오일러 파라미터 ϵ, η 는 $\epsilon^T \epsilon + \eta^2 = 1$ 의 조건을 만족한다. 또한 Euler-Rodriguez파라미터 벡터를

$$\rho = \begin{pmatrix} \rho_x \\ \rho_y \\ \rho_z \end{pmatrix} = \frac{\epsilon}{\eta}, \quad \eta \neq 0 \quad (7)$$

로 정의하고 오일러의 회전벡터 e 를

$$e := 2\eta \epsilon = \kappa \sin \phi = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} r_{32} - r_{23} \\ r_{13} - r_{31} \\ r_{21} - r_{12} \end{pmatrix} \quad (8)$$

로 정의하면, Euler-Rodriguez파라미터 ρ 는

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{\epsilon}{\eta} = \frac{\epsilon}{2\eta^2} \\ &= \frac{1}{\text{trace}(R) + 1} \begin{pmatrix} r_{32} - r_{23} \\ r_{13} - r_{31} \\ r_{21} - r_{12} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (9)$$

가 된다. (9)를 미분하면

$$\dot{\rho} = \frac{1}{2} (I + S(\rho) + \rho \rho^T) \omega \quad (10)$$

가 얻어진다 [7]. 또한 ρ 를 이용하면 회전행렬 R 은

$$\begin{aligned} R &= (\eta^2 - \epsilon^T \epsilon) I + 2\eta S(\epsilon) + 2\epsilon \epsilon^T \\ &= 2\eta^2 (I + S(\rho) + \rho \rho^T) - I \end{aligned} \quad (11)$$

(11)의 양변에 오른쪽으로부터 ω 를 곱해서 (10)을 이용하면

$$(R + I)\omega = 2\eta^2(I + S(\rho) + \rho\rho^T)\omega = 2\eta^2\dot{\rho} \quad (12)$$

이 되고 (10)은

$$\dot{\rho} = \frac{1}{\text{trace}(R) + 1} (R + I)\omega \quad (13)$$

로도 표현할 수 있다. 단, (12)으로부터 (13)으로의 변환은

$$\text{trace}(R) = 4\eta^2 - 1 \quad (14)$$

를 이용하고 있다.

3. 다중 Chained form으로의 변환

(1)로 표현되는 수중 이동체에 대해 Egeland [6]에 의한 좌표변환

$$x_1 = p_r,$$

$$x_2 = \frac{r_{21}}{r_{11}}, x_3 = p_p,$$

$$x_4 = \frac{r_{21}}{r_{11}}, x_5 = p_z,$$

$$x_6 = \frac{r_{32} - r_{23}}{1 + \text{Trace}(R)}$$

과 입력변환

$$u_1 = r_{11}v_r, u_2 = \dot{x}_2$$

$$u_3 = \dot{x}_4, u_4 = \dot{x}_6$$

을 행하면

$$\dot{x}_1 = u_1$$

$$\dot{x}_2 = u_2$$

$$\dot{x}_3 = x_2 u_1$$

$$\dot{x}_4 = u_3$$

$$\dot{x}_5 = x_4 u_1$$

$$\dot{x}_6 = u_4$$

이 얻어진다. (17)에 대하여 $z = (x_1, x_3, x_2, x_5, x_4, x_6)^T$ 와 같은 변수변환을 취하면

$$\Sigma_1 : \dot{z}_1 = u_1$$

$$\Sigma_2 : \dot{z}_2 = z_3 u_1 \quad \Sigma_3 : \dot{z}_4 = z_5 u_1 \quad \Sigma_4 : \dot{z}_6 = u_4 \quad (18)$$

$$\dot{z}_3 = u_2 \quad \dot{z}_5 = u_3$$

과 같은 다중 체인드폼(multi-chained form)이 얻어진다.

3.1 제어

(18)과 같은 시스템에 대하여 데드비트(deadbeat control)제어기를 적용하고자 한다. 실제 제어를 행하는 데 있어서는 (1)을 직접적으로 이용하지 않고 (13)과 (1)의 $\dot{p} = Rv$ 로부터 얻어지는

$$\begin{pmatrix} \dot{\rho} \\ p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\text{trace}(R) + 1} (R + I)\omega & 0 \\ 0 & R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega \\ v \end{pmatrix} \quad (19)$$

를 이용한다. 제어목적은 (19)의 시스템에 대하여 ρ, p 를 원점에 안정화시키는 제어입력 ω, v 를 구하는 것이다. $\rho \rightarrow 0$ 이 달성되면 (7)로부터 $\epsilon \rightarrow 0$ 이 만족되고 오일러 파라미터의 조건 ($\epsilon^T \epsilon + \eta^2 = 1$)로부터는 $\eta^2 = 1$ 을 얻는다.

$\rho \rightarrow 0, \eta^2 \rightarrow 1$ 과 (12)로부터 $R \rightarrow I_3$ 이 되어 원래의 제어목적이 달성되는 것이다.

3.2 데드비트제어에 의한 다중 체인드폼의 제어

본 절에서는 (18)과 같이 표현되는 다중 체인드폼 시스템의 제어에 대해서 논의한다.

(18)의 시스템의 구조를 살펴보면 Σ_2, Σ_3 은

$$\begin{pmatrix} \dot{z}_2 \\ \dot{z}_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & u_1 & z_2 \\ 0 & 0 & z_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} z_2 \\ z_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} u_2 \quad (20)$$

$$\begin{pmatrix} \dot{z}_4 \\ \dot{z}_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & u_1 & z_4 \\ 0 & 0 & z_5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} z_4 \\ z_5 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} u_3$$

과 같은 시스템이 된다. 상기의 시스템에서 u_1 이 상수와 같은 일정한 제어입력이라면 선형시불변 시스템의 가제어 표준형과 같다는 것을 알 수 있다. 즉, u_1 이 일정한 상태에서는 Σ_2, Σ_3 는 잘 알려져 있는 선형제어이론을 적용할 수 있다는 것이다. 본 논문에서는 제어시간동안 일정한 크기의 제어입력을 유지하기 위해 이산시간제어기법을 도입하였다.

먼저, Σ_1, Σ_2 를 이산화 하면

$$z_1(k+1) = z_1(k) + T_1 u_1(k) \quad (21)$$

$$\begin{pmatrix} z_2(k+1) \\ z_3(k+1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & u_1(k)T_{23} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} z_2(k) \\ z_3(k) \end{pmatrix} + \frac{u_1(k)}{2} T_{23}^2 \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix} u_2(k) \quad (22)$$

가 얻어진다. Σ_1 의 z_1 을 안정화시키기 위해서는

$$u_1 = -\frac{z_1(k)}{T} \quad (23)$$

의 제어입력을 고려하고 (22)의 시스템 즉, Σ_2 를 이산화 한 시스템에 대하여 데드비트제어를 행하여 z_2, z_3 을 안정화 시키 고자 한다. 데드비트제어를 행하기 위해서는 피드백제어를 가 하여 시스템의 고유치가 전부 0 이 되도록 극 지정(Pole placement)를 행한다.

즉, $z(k) = [z_2(k) \ z_3(k)]^T$ 라고 하면 $u_2(k) = -fz(k)$ 와 같은 피드백제어를 (22)에 행한 후 얻어지는 시스템

$$\begin{aligned} z(k+1) &= Az(k) - bfz(k) \\ &= (A - bf)z(k) \end{aligned} \quad (24)$$

의 고유치가

$$\lambda(A - bf) = 0 \quad (25)$$

이 되도록 피드백 게인 f 를 구하는 것이다. (25)의 조건을 만족하는 피드백 게인을 구하면

$$f = \frac{1}{u_1(k)T^2} \frac{3}{2T} \quad (26)$$

이 얻어진다. 위에서 언급했던 제어기의 개념을 정리하면 Fig. 2 와 같다.

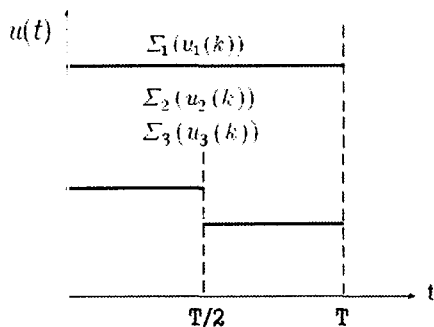


Fig. 2 Multi-rate digital control

시스템 차수가 1차인 Σ_1 에 대하여 샘플주기 T 동안 일정한 제어입력(u_1)으로 제어를 행하고 시스템 차수가 2 차인 Σ_2, Σ_3 에 대해서는 $T/2$ 의 샘플주기로 데드비트제어를 행한다. Σ_4 에 있어서는 Σ_1 과 같은 제어개념을 적용한 제어입력

$$u_4 = -\frac{z_1(k)}{T} \quad (27)$$

을 적용하여 상태변수 z_6 를 안정화 시킬 수 있다.

샘플주기에 따른 제어입력을 정리하면 다음과 같다. 시간 $0 \leq t \leq T/2$ 영역에서의 제어입력은

$$\begin{aligned} u_1(t) &= -z_1(0)/T \\ u_2(t) &= -f [z_2(0) \ z_3(0)]^T \\ u_3(t) &= -f [z_4(0) \ z_5(0)]^T \\ u_4(t) &= -z_6(0)/T \end{aligned} \quad (28)$$

와 같이 되고 $T/2 \leq t \leq T$ 영역에서는

$$\begin{aligned} u_1(t) &= -z_1(0)/T \\ u_2(t) &= -f [z_2(T/2) \ z_3(T/2)]^T \\ u_3(t) &= -f [z_4(T/2) \ z_5(T/2)]^T \\ u_4(t) &= -z_6(0)/T \end{aligned} \quad (29)$$

가 된다. 시간이 최종 샘플링 시간 T 보다 커질 경우에는 제어입력 u 는 0을 유지하도록 한다. (28), (29)의 제어기는 (26)에서 알 수 있는 바와 같이 상태변수 $z \rightarrow 0$ 보다 $u_1(k) = 0$ 이 이루어지면 제어입력은 발산하게 된다. 백스테핑 제어기법[12]에서는 이러한 특이점을 회피하기 위하여 제어게인의 수렴속도를 조정하여야 하는 불편함이 있지만 멀티레이트 디지털제어기법에서는 샘플링 시간만을 고려하므로 제어기설계과정이 간단해진다.

4. 시뮬레이션

수중 이동체에 대하여 본 연구에서 제안한 제어알고리즘을 적용하여 위치·자세제어를 행하였고 제어결과는 Fig. 3 - Fig. 4와 같다. 수중 이동체의 초기위치 및 자세는 각각

$$p_0 = (-1, -2, -3)^T \text{ 와 } R_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.7 & -0.7 \\ 0 & 0.7 & 0.7 \end{bmatrix} \text{ 이고 목적위}$$

치 및 자세는 $p_d = (0, 0, 0)^T$, $R_d = I_3$ 으로 하였다.

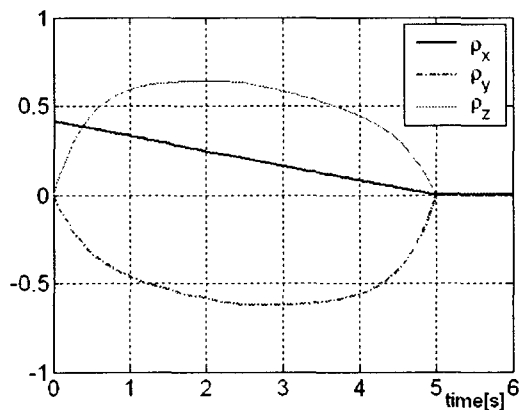


Fig. 3 (a) Time evolution of Euler-Rodriguez parameter(ρ).

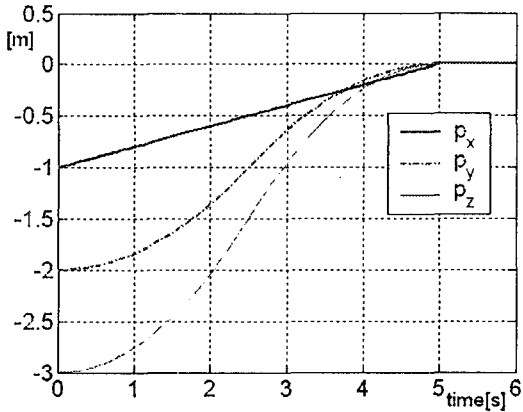


Fig. 3 (b) Time evolution of state variables (p).

제어시간은 5[sec] 이고 본 시뮬레이션에서 목적으로 하는 수중 이동체의 동작은 임의의 초기 위치 및 자세로부터 접안해야 할 목적지에 이동시키는 것이다. Fig. 3 (a), Fig. 3 (b)는 본 논문에서 제안한 제어기를 적용하였을 경우 얻어지는 Euler-Rodriguez 파라미터와 수중 이동체의 병진위치를 나타내고 있다.

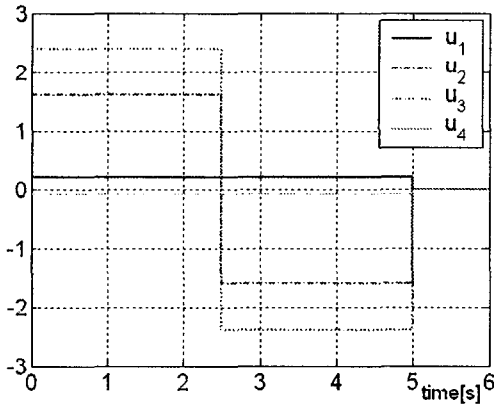


Fig. 4 Time evolution of the control input for multi-chained system.

Fig. 4는 Fig. 2 와 같은 제어개념을 적용한 제어기 (28), (29)를 상기의 제어조건에서 계산한 제어입력을 나타내고 있다. u_1 이 일정한 상태에서 u_2, u_3 의 제어가 행해지는 것을 알 수 있다. Fig. 5 (a)는 Fig. 4의 제어입력을 역 입력변환 (inverse input transformation) 하였을 경우 얻어지는 실제 제어입력이다.

Fig. 5(b)는 같은 시뮬레이션 조건하에 백스테핑 제어기

를 적용하였을 경우의 제어입력 ($v_x, \omega_x, \omega_y, \omega_z$) 을 나타내고 있다. 제어시간은 같은 5[sec]이고 백스테핑 제어기의 게인으로는 $k_1 = 2, k_2 = k_4 = 5, k_3 = k_5 = k_6 = 2$ 와 같이 설정 하였다.

Fig. 5 (a)와 Fig. 5 (b)를 비교하면 본 논문에서 제안한 제어기법 즉, 데드비트제어기법을 적용한 멀티레이트 디지털제어의 경우가 작은 제어입력으로 소기의 제어목적을 달성할 수 있다는 것을 보여주고 있다. 아울러 디지털제어기법은 실제 시스템을 제어할 경우 제어기의 적용이 용이하다는 장점을 들 수 있다.

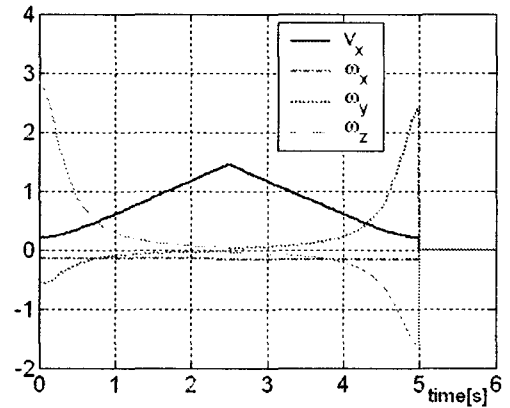


Fig. 5 (a) Time evolution of control input using deadbeat control.

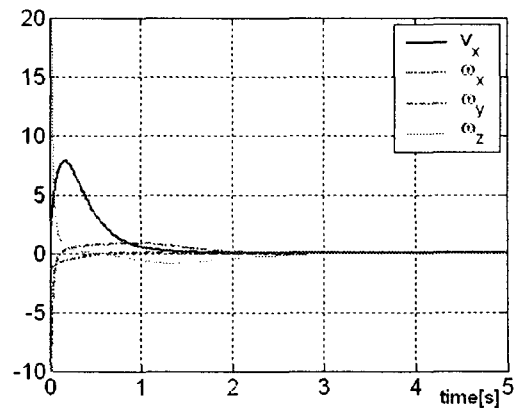


Fig. 5 (b) Time evolution of control input using backstepping control.

Fig. 6(a), Fig. 6(b)는 각각 디지털제어기법을 적용한 경우와 백스테핑 제어기법을 적용한 경우의 수중 이동체의 제어결과를 애니메이션으로 나타낸 것이다. 제어입력의 크기에 있어서는 차이를 나타내었지만 수중이동

체의 이동궤적은 유사한 궤적을 따라 이동하고 있음을 알 수 있다.

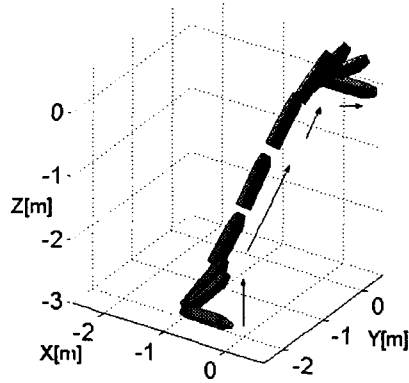


Fig. 5 (b) Time evolution of control input using deadbeat control.

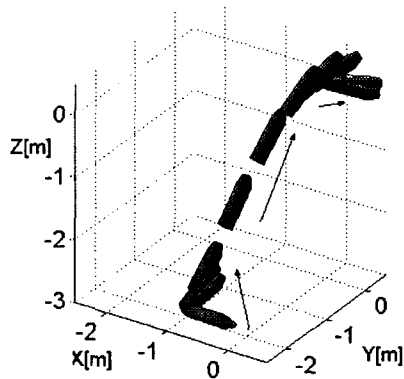


Fig. 5 (b) Time evolution of control input using backstepping control.

5. 결 론

본 연구에서는 비 홀로노믹 구속조건을 가지는 수중 이동체의 초기위치로부터 집안하고자 하는 목적지로의 위치·자세제어에 대해 살펴보았다. 6개의 자유도와 4개의 제어입력으로 구성되는 수중 이동체의 구속조건으로부터 얻어지는 다중 체인드폼에 대해 데드비트 제어기법을 적용한 멀티레이트 디지털 제어기를 제안하여 초기위치로부터 목적지로의 제어를 행하였다. 아울러 역 입력변환을 통하여 제안한 제어기법을 3차원의 수중 이동체에 적용하였고 수치시뮬레이션을 통하여 제어기법의 유용성을 확인하였다.

본 논문에서 제안한 멀티레이트 디지털 제어기법은 작은 제어입력으로 소기의 목적을 달성할 수 있는 제어기 설계가 가능하고 실장할 경우에도 시간파라미터만을 가지고 적용이 가능하다는 장점을 들 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] M. Reyhanoglu, A. van der Schaft, et. al(1996), Nonlinear control of a class of underactuated systems, pp. 1682-1687.
- [2] M. W. Spong, M. Vidyasagar (1989), Robot dynamics and control, Jon Wiley, New York.
- [3] N. E. Leonard (1997), Stabilization of underwater vehicle dynamics with symmetry-breaking potentials, Systems & Control Letters, Vol. 32, pp. 35-42.
- [4] N. E. Leonard (1997), Stability of a bottom-heavy underwater vehicle, Automatica, Vol. 33, No. 3, pp. 331-346.
- [5] O. Egeland, M. Dalsmo, O. J. Sordalen (1996), Feedback control of a nonholonomic underwater vehicle with a constant desired configuration, International Journal of robotics research, pp. 24-35.
- [6] O. Egeland, E. Berglund, O. J. Sordalen (1994), Exponential stabilization of a nonholonomic underwater vehicle with constant desired configuration, IEEE Int. conf on robotics and automation, pp. 20-25.
- [7] P. C. Huges (1994), Spacecraft attitude dynamics, John Wiley.
- [8] R. M. Murray, Z. Li, S. S. Sastry (1994), A mathematical introduction to robotic manipulation, CRC Press.
- [9] R. W. Brockett (1983), Asymptotic stability and feedback stabilization, Differential geometric control theory, pp. 181-208.
- [10] T. Fossen (1994), Guidance and control of ocean vehicles, John Wiley & Sons.
- [11] Y. Nakamura, S. Savant (1991), Nonholonomic motion control of an autonomous underwater vehicles, Proc. of IROS'91, pp. 1254-1259.
- [12] T. K. Nam, C. S. Kim (2004), A Posture control for underwater vehicle with nonholonomic constraint, Journal of KNPR, pp. 469-474.