

시간지연제어기법을 이용한 수중로봇의 궤적 제어

박준영[†] · 조병학* · 이재경*

(2008년 3월 11일 접수, 2008년 6월 20일 수정, 2008년 6월 24일 심사완료)

Trajectory Control of Underwater Robot using Time Delay Control

Joon-Young Park, Byung-Hak Cho and Jae-Kyung Lee

Key Words : Underwater Robot(수중로봇), Time Delay Control(시간지연제어기법), Trajectory Control(궤적 제어), 비선형 제어(Nonlinear Control)

Abstract

In this paper, the trajectory control problem of an underwater robot is addressed. From the viewpoint of control engineering, trajectory control of the underwater robot is not an easy task due to its nonlinear dynamics, which includes various hydraulic forces such as buoyancy forces and hydrodynamic damping, the difference between the centers of buoyancy and gravity, and disturbances from a tether cable. To solve such problems, we applied Time Delay Control to the underwater robot. This control law has a very simple structure not requiring the nonlinear plant dynamics, and was proven to be highly robust against disturbances and uncertainties. We confirmed its effectiveness through experiments.

1. 서론

최근 육지의 자원이 고갈되어감에 따라 해양 및 심해 자원의 중요성이 부각되면서 해양 탐사를 위한 수중로봇에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 하지만, 수중로봇은 로봇 자체와 작업환경이 가지는 다음과 같은 동역학적 비선형성으로 인해 제어하기가 매우 어려운 시스템으로 알려져 있다.

- 부가관성력과 수중항력을 포함하는 여러 가지 수중력의 영향
- 로봇 부력 중심과 중력 중심의 불일치
- 수중로봇에 동력을 공급하거나 제어를 위해 사용하는 테더 케이블(tether cable)의 무게와 탄성으로 인해 가해지는 비선형적인 외란(disturbance)
- 추진기(thruster) 간의 동역학적 간섭(dynamic coupling)

상기한 비선형성은 추정하기가 쉽지 않을 뿐만 아니라 로봇의 동작점에 따라 그 파라미터 값들이 변하는 특징을 가지고 있기 때문에, 고전적인 제어 이론에 기반을 둔 제어 시스템으로는 수중로봇을 제어하기가 어려운 것으로 알려져 있다.

이러한 제어 상의 어려움을 해결하기 위하여 수중로봇에 슬라이딩 모드 제어 기법,^(1,2) 적응 제어 기법,^(3~5) 신경망을 이용한 학습 제어 기법^(6~8) 등을 적용하는 연구가 진행되어 왔다. 하지만, 슬라이딩 모드 제어 기법은 슬라이딩 평면 위에서 제어 입력이 떨리는 채터링(chattering) 현상이 발생하고, 적응 제어 기법은 제어 파라미터의 계산을 위하여 많은 계산량을 필요로 한다. 또한, 학습 제어 기법은 학습을 위해 많은 시간과 노력이 소요된다는 단점이 있다.

시간지연제어기법(Time Delay Control, 이하 TDC)⁽⁹⁾은 그 기법의 특성상 전술한 제어상의 문제점을 잘 해결할 수 있을 것으로 기대된다. TDC는 매우 단순하고 효율적인 구조를 가지고 있고, 적용 대상의 비선형 동역학 모델의 실시간 계산을 필요로 하지 않기 때문에 정확한 모델 식을 모르더라도 대상 시스템의 차수와 관성행렬의 변화범위만을 알면 쉽게 적용이 가능하다. 또한, TDC는 외란과

[†] 책임저자, 회원, 한전전력연구원 전략기술연구소

E-mail : asura@kepco.co.kr

TEL : (042)865-7687 FAX : (042)865-7804

* 한전전력연구원 전략기술연구소

파라미터의 변동에 대해서 탁월한 강인성을 가지며, 로봇 매니플레이터,⁽¹⁰⁾ 공압 시스템,⁽¹¹⁾ 유압 굴삭기,⁽¹²⁾ 텔레스코픽 핸들러⁽¹³⁾ 등에 적용되어 좋은 제어 성능을 보여 주었다. 이와 같은 특징으로 미루어 볼 때, TDC 는 정확한 비선형 모델 식과 파라미터를 구하기 어려운 수중로봇의 제어에 적합할 것으로 고려된다. 그러므로, 본 논문에서는 수중로봇의 궤적 제어에 TDC 를 적용하는 연구를 다루었고, 실제 수중로봇 시스템을 이용한 실험을 통하여 그 효용성을 입증하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 다음 장에서는 먼저 수중로봇의 일반적인 모델 식을 구하고, 이 모델에 대하여 궤적 제어를 위한 TDC 를 설계한다. 3 장에서는 본 연구의 실험에 사용된 수중로봇 시스템에 대하여 설명하고, 실제로 TDC 를 적용하기 위해서 필요한 수중로봇 이동방향과 추진기 배치 방향 간의 불일치를 해결한 내용에 대하여 기술한다. 4 장에서는 TDC 에 의한 궤적 제어의 실험 결과를 보이고, 끝으로 5 장에서는 결론을 내린다.

2. 수중로봇의 궤적 제어를 위한 시간지연제어기법의 설계

2.1 수중로봇의 모델링

수중로봇의 일반적인 비선형 모델은 뉴턴 또는 라그랑지 형식화(Newtonian or Lagrangian formalism)에 의해 유도될 수 있다. 수중로봇을 6 자유도의 강체(rigid body)로 간주한다면, Fig. 1 과 같이 수중로봇의 동작을 표현하기 위한 관성 기준 좌표 계

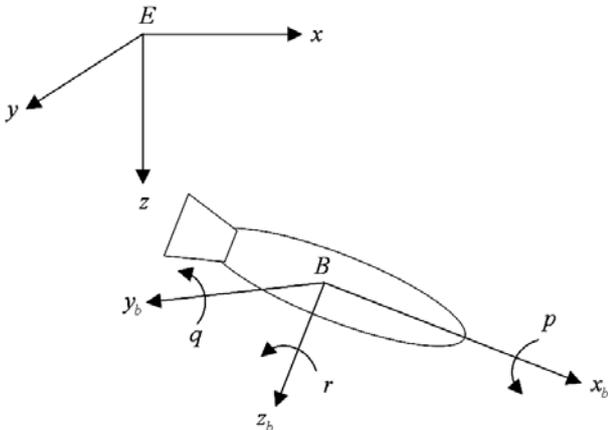


Fig. 1 Adopted coordinate systems : inertial reference frame (E, x, y, z) and body-fixed coordinate frame (B, x_b, y_b, z_b)

(inertial reference frame) (E, x, y, z) 와 동체 고정 좌표(body-fixed coordinate) 계 (B, x_b, y_b, z_b) 를 설정할 수 있다. 이와 같은 좌표축의 설정 하에서 동체 고정 좌표 계에서의 속도 벡터는

$$\mathbf{v} = [\mathbf{v}_1 \quad \mathbf{v}_2]^T \quad (1)$$

로 표현된다. 여기서, $\mathbf{v}_1 = [u \quad v \quad w]^T$ 는 병진(translational) 속도 벡터, $\mathbf{v}_2 = [p \quad q \quad r]^T$ 는 각속도 벡터로 표현되고, 관성 기준 좌표 계에 대한 동체 고정 좌표 계의 위치와 방향은

$$\boldsymbol{\eta} = [x \quad y \quad z \quad \phi \quad \theta \quad \psi]^T \quad (2)$$

로 표현될 수 있다. 여기서, $\boldsymbol{\eta}_1 = [x \quad y \quad z]^T$ 는 위치 벡터이고, $\boldsymbol{\eta}_2 = [\phi \quad \theta \quad \psi]^T$ 는 방향 벡터를 나타낸다. 그리고, 일반화된 유체 속도 (generalized fluid velocity)와 로봇과 유체 사이의 상대 속도는 각각 $\mathbf{v}_c = [\mathbf{u}_c^T \quad \mathbf{0}_{1 \times 3}]^T$ 와 $\mathbf{v}_r = \mathbf{v} - \mathbf{v}_c$ 로 표현된다. 여기서, \mathbf{u}_c 는 동체 고정 좌표 계에서의 비회전(irrotational)으로 가정되는 유체의 선형 속도이다. 그러므로, 동체 고정 좌표 계에서의 수중로봇의 비선형 모델은 다음과 같이 유도될 수 있다.^(14,15)

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{M}\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}(\mathbf{v}_r)\mathbf{v}_r + \mathbf{D}(\mathbf{v}_r)\mathbf{v}_r + \mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) - \boldsymbol{\delta} \quad (3)$$

$$\dot{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{J}(\boldsymbol{\eta})\mathbf{v} \quad (4)$$

여기서, \mathbf{M} 은 강체로서의 로봇의 관성(inertia)과 유체의 가속에 의해 더해진 관성의 결합이고, \mathbf{C} 는 구심력에 의한 항과 코리올리스(Coriolis) 항을, \mathbf{D} 는 유체역학적인 감쇠(hydrodynamic damping)에 의한 항을, \mathbf{g} 는 동체 고정 좌표 계에서의 중력과 부력의 결합을 나타낸다. 그리고, $\boldsymbol{\delta}$ 는 테더 케이블의 견인력에 의해 발생하는 외란을 나타내고, $\boldsymbol{\tau} = [F_{x_b} \quad F_{y_b} \quad F_{z_b} \quad T_p \quad T_q \quad T_r]^T$ 는 동체 고정 좌표 계에서 수중로봇에 가해지는 힘과 토크를 나타낸다. 관성 기준 좌표 계에서 수중로봇에 가해지는 힘과 토크를 $\mathbf{F} = [F_x \quad F_y \quad F_z \quad T_\phi \quad T_\theta \quad T_\psi]^T$ 이라고 하면, $\boldsymbol{\tau} = \mathbf{J}^T \mathbf{F}$ 의 관계 식이 성립한다. 그러므로, 식 (3)의 양변에 \mathbf{J}^T 을 곱해줌으로써 동체 고

정 좌표 계에 대한 운동방정식 (3)을 다음과 같이 관성 기준 좌표 계에 대한 운동방정식으로 변환할 수 있다.

$$\mathbf{J}^T \boldsymbol{\tau} = \mathbf{J}^T \mathbf{M} \dot{\mathbf{v}} + \mathbf{J}^T \mathbf{C}(\mathbf{v}_r) \mathbf{v}_r + \mathbf{J}^T \mathbf{D}(\mathbf{v}_r) \mathbf{v}_r + \mathbf{J}^T \mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) - \mathbf{J}^T \boldsymbol{\delta} \quad (5)$$

즉,

$$\mathbf{F} = \mathbf{J}^T \mathbf{M} \dot{\mathbf{v}} + \mathbf{J}^T \mathbf{C}(\mathbf{v}_r) \mathbf{v}_r + \mathbf{J}^T \mathbf{D}(\mathbf{v}_r) \mathbf{v}_r + \mathbf{J}^T \mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) - \mathbf{J}^T \boldsymbol{\delta} \quad (6)$$

이다. 식 (4)로부터

$$\dot{\mathbf{v}} = \mathbf{J}^{-1} \ddot{\boldsymbol{\eta}} - \dot{\mathbf{J}}^{-1} \dot{\mathbf{v}} \quad (7)$$

이므로, 이 식을 식 (6)에 대입하면 최종적으로 관성 기준 좌표 계에 대한 수중로봇의 비선형 모델이 다음과 같이 구해진다.

$$\mathbf{M}_x \ddot{\boldsymbol{\eta}} + \mathbf{H}_x = \mathbf{F} \quad (8)$$

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{J}^T \mathbf{F} \quad (9)$$

여기서, $\mathbf{M}_x = \mathbf{J}^{-T} \mathbf{M} \mathbf{J}^{-1}$, $\mathbf{H}_x = -\mathbf{J}^{-T} \mathbf{M} \dot{\mathbf{J}}^{-1} \dot{\mathbf{v}} + \mathbf{J}^{-T} \mathbf{C}(\mathbf{v}_r) \mathbf{v}_r + \mathbf{J}^{-T} \mathbf{D}(\mathbf{v}_r) \mathbf{v}_r + \mathbf{J}^{-T} \mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) - \mathbf{J}^{-T} \boldsymbol{\delta}$.

지금까지의 모델링 과정은 식 (8)의 비선형 항 \mathbf{M}_x , \mathbf{H}_x 가 굉장히 복잡한 항들로 구성되어 있음을 보여준다. 뿐만 아니라, 실제적으로 이 항들을 이루는 많은 파라미터들의 정확한 값을 모두 알기가 어려운 실정이다. 이러한 점을 고려하였을 때, TDC가 이 비선형 시스템의 제어에 적합한 제어 기법으로 고려된다.

2.2 TDC 설계

본 절에서는 수중로봇에 대하여 TDC를 설계하도록 한다. 2.1 절에서 구한 수중로봇의 모델 식을 다시 기술하여 보면, 다음의 식과 같다.

$$\mathbf{M}_x \ddot{\boldsymbol{\eta}} + \mathbf{H}_x = \mathbf{F} \quad (10)$$

여기서, $\mathbf{M}_x = \mathbf{J}^{-T} \mathbf{M} \mathbf{J}^{-1}$, $\mathbf{H}_x = -\mathbf{J}^{-T} \mathbf{M} \dot{\mathbf{J}}^{-1} \dot{\mathbf{v}} + \mathbf{J}^{-T} \mathbf{C}(\mathbf{v}_r) \mathbf{v}_r + \mathbf{J}^{-T} \mathbf{D}(\mathbf{v}_r) \mathbf{v}_r + \mathbf{J}^{-T} \mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) - \mathbf{J}^{-T} \boldsymbol{\delta}$ 이다. 식 (10)에서 TDC를 설계하기 위해 비선형 항들을 분리하면, 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{\mathbf{M}} \ddot{\boldsymbol{\eta}} + \mathbf{H} = \mathbf{F} \quad (11)$$

여기서 $\bar{\mathbf{M}}$ 는 \mathbf{M}_x 의 알려진 범위를 나타내는 상수 행렬이고, $\mathbf{H} = (\mathbf{M}_x - \bar{\mathbf{M}}) \ddot{\boldsymbol{\eta}} + \mathbf{H}_x$ 이다.

계산토크제어(computed torque control approach)에 의하여 제어 입력을 계산하여 보면, 다음과 같이 구해진다.

$$\mathbf{F} = \bar{\mathbf{M}}(\ddot{\boldsymbol{\eta}}_d + \mathbf{K}_d \dot{\mathbf{e}} + \mathbf{K}_p \mathbf{e}) + \mathbf{H} \quad (12)$$

여기서, $\mathbf{K}_D = \text{diag}(K_{Dx}, K_{Dy}, K_{Dz}, K_{D\phi}, K_{D\theta}, K_{D\psi})$, $\mathbf{K}_P = \text{diag}(K_{Px}, K_{Py}, K_{Pz}, K_{P\phi}, K_{P\theta}, K_{P\psi})$ 이다. 그리고, $\mathbf{e} = \boldsymbol{\eta}_d - \boldsymbol{\eta}$ 이며, \mathbf{K}_D , \mathbf{K}_P 는 각각 비례(proportional), 미분 이득(derivative gain) 행렬이다. 식 (12)을 식 (11)에 대입하면, 페루프 시스템은 다음과 같은 오차 동역학을 가지게 된다.

$$\ddot{\mathbf{e}} + \mathbf{K}_d \dot{\mathbf{e}} + \mathbf{K}_p \mathbf{e} = 0 \quad (13)$$

이와 같은 제어 알고리즘의 적용은 불확실성 \mathbf{H} 의 계산을 필요로 한다. TDC는 이를 위하여 다음과 같은 시간지연 추정방법을 사용하고 있다. 만약 시간 지연 L 이 충분히 작은 값이고 시스템이 불연속적으로 변하지 않는다면, $\mathbf{H}(t)$ 는 $\mathbf{H}(t-L)$ 로 근사화될 수 있다. 따라서, 식 (11)을 이용하여 \mathbf{H} 는 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$\mathbf{H}(t) \cong \mathbf{H}(t-L) = \mathbf{F}(t-L) - \bar{\mathbf{M}} \ddot{\boldsymbol{\eta}}(t-L) \quad (14)$$

TDC는 상기한 추정 방법에 의해 복잡한 비선형 항들을 포함한 불확실성 $\mathbf{H}(t)$ 를 추정하므로 정확한 모델 식이나 파라미터 값들을 필요로 하지 않는다. 식 (14)를 식 (12)에 대입하면, 수중로봇에 대한 TDC의 제어 입력이 최종적으로 다음과 같이 구해진다.

$$\mathbf{F}(t) = \mathbf{F}(t-L) + \bar{\mathbf{M}}(\ddot{\boldsymbol{\eta}}_d - \ddot{\boldsymbol{\eta}}(t-L) + \mathbf{K}_d \dot{\mathbf{e}} + \mathbf{K}_p \mathbf{e}) \quad (15)$$

3. 수중로봇 시스템

3.1 수중로봇 시스템의 구성

본 연구의 실험에는 원자로 압력용기 육안검사용으로 개발된 수중로봇⁽¹⁶⁾의 모형시스템(mockup)이 사용되었다. 이 모형 시스템은 원자력발전소 내에서는 방사능과 같은 환경적 제약과 시간적 제약으로 인해 다양한 실험을 직접 수행하기 어려우므로, 실제로 발전소 내에 수중로봇을 적용하기에 앞서 사전에 제어 시스템을 검증하기 위하여 실물의 크기에 비례 축소시켜 제작한 시스템이다. 본 연구에서 사용된 수중로봇 시스템은 Fig. 2에서 볼 수 있듯이 크게 수중로봇과 제어장치(control station) 및 부속장치로 나뉘어진다. 제어기는 로봇을 직접 제어하는 서보 제어기와 원격작업을 수행하는 마스터 제어기로 구성된다. 부속장치로는 수중로봇의 위치와 방향을 측정하기 위하여 원자로 압력용기 모형의 천정에 설치된 영상카메라(vision camera)가 있다.

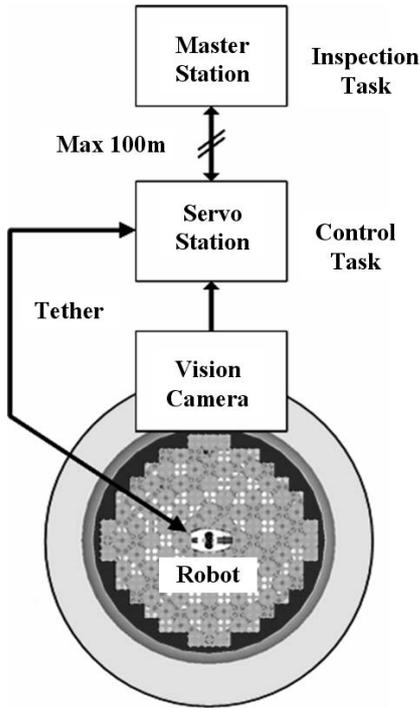


Fig. 2 Overall structure of underwater robot system

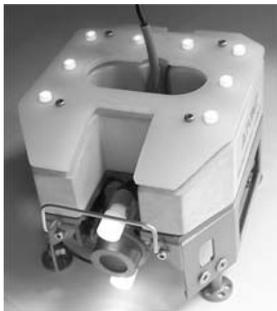


Fig. 3 Underwater robot

3.1.1 수중로봇

수중로봇의 본체는 Deep Ocean Engineering 사에서 제작한 Phantom-150 을 축소시켜 제작한 Fig. 3 과 같은 소형 수중로봇을 사용하였다. 본 수중로봇에는 수중로봇의 위치와 방향을 측정하기 위한 8 개의 LEDs(Light Emitting Diodes), 수중로봇의 깊이를 측정하는 압력 센서와 음향 센서(acoustic sensor)가 장착되어 있다. 이 외에 로봇의 전방에는 육안검사를 위한 카메라(camera for visual inspection)와 2 개의 전조등이 장착되어 있다.

3.1.2 제어장치

제어장치는 마스터 제어기와 서보 제어기로 구성되어 있다. 서보 제어기는 수중로봇의 위치 및 방향 제어를 담당하며, 마스터 제어기는 수중로봇

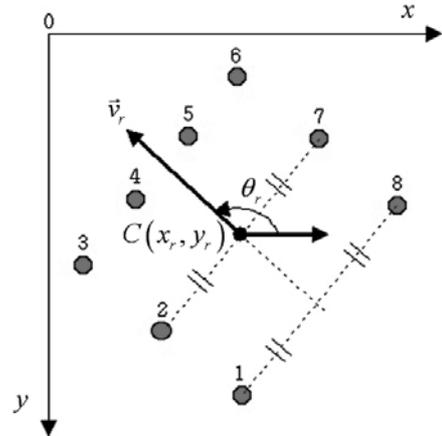


Fig. 4 LED pattern for robot position and orientation estimation

을 이용한 육안검사작업을 원격으로 수행하기 위한 목적으로 사용된다. 그리고, 서보 제어기와 마스터 제어기는 LAN 통신으로 정보를 서로 교환한다. 따라서, 본 수중로봇이 원자력발전소와 같은 극한 작업에 사용될 경우에는 마스터 제어기를 실제 작업장에서 멀리 떨어진 제어실에 설치하여 운전할 수 있다.

A. Master Control Station

마스터 제어기는 산업용 PC, 비디오 스위치, VTR 및 비디오 모니터와 컴퓨터 모니터 및 스피커 등의 주변장치로 구성되어 있다. 육안검사 화면은 PC 에 설치되어 있는 영상획득(frame grabber) 카드로 입력되어 작업 이름, 작업 일시, 검사 위치 및 방향 등의 정보가 함께 겹쳐진 상태로 수중로봇의 센서박스에 설치되어 있는 진동센서에 감지된 음향신호와 함께 비디오 테이프에 녹화된다.

B. Servo Control Station

서보 제어기에는 산업용 PC, 입출력장치, 모터를 구동하기 위한 파워 증폭기(power amplifier), 카메라 조명의 밝기를 조절하는 조광기(dimmer)와 컴퓨터 통신카드 등이 내장되어 있다. 서보 제어기에는 게임패드와 같은 형태의 소형 수동 조종기를 접속할 수 있어서 마스터 제어기가 없는 상태에서도 수동으로 수중로봇의 제어가 가능하다.

3.2 수중로봇의 위치와 방향의 측정

수중로봇의 (x, y) 평면에서의 2 차원 위치와 방향은 수중로봇에 장착된 8 개의 LEDs(Fig. 4 참조)를 원자로 압력용기 모형의 천정에 설치된 카메라에 의해 촬영한 후 이 화면을 영상처리가 처리함으로써 계산된다.

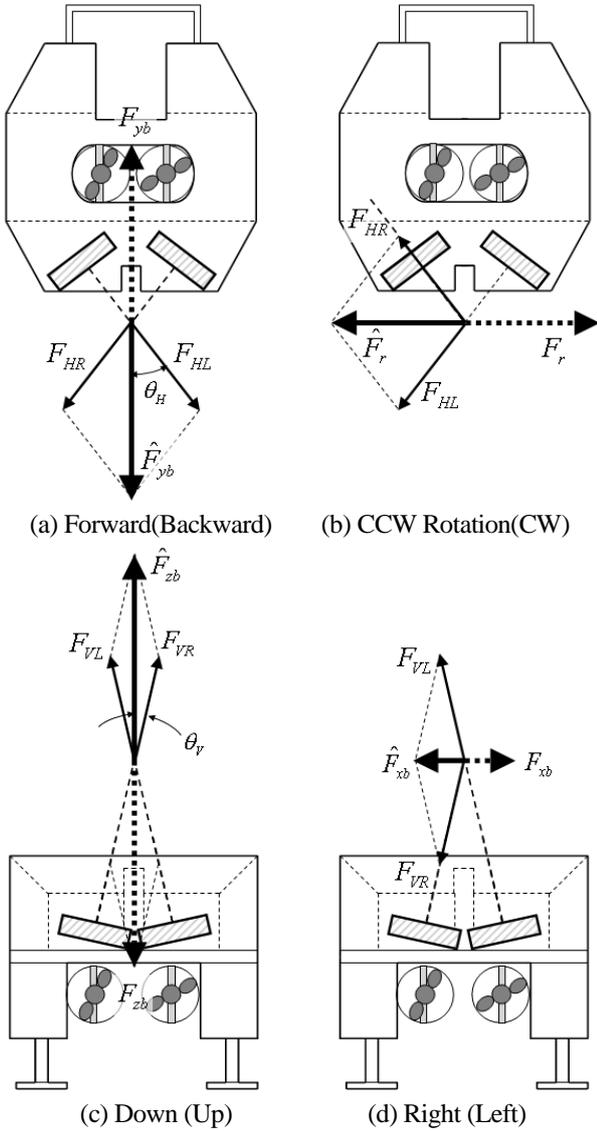


Fig. 5 Relationship between forces of thrusters and those of body-fixed coordinate frames

영상처리기는 화면에서 각 LED의 위치를 찾아 로봇의 방향과 위치를 계산하며, 로봇의 중심위치 $C(x_r, y_r)$ 은 LED2와 LED7의 중간이고 로봇의 방향 θ_r 은 점 C에서 점 D로 향하는 벡터 \vec{v}_r 와 x축이 시계방향으로 이루는 각도이다. 영상처리기에서는 LEDs의 움직임을 선형시스템으로 근사화한 칼만 필터를 채용하여 잡음(noise)의 영향을 최소화하였고, LEDs가 최대 4개까지 테더 케이블에 가려지거나 꺼진 경우에도 추적 창(tracking window)의 설정을 통하여 지속적으로 개별 LED의 움직임을 감시할 수 있도록 개발되어 있다. 그리고, 수중로봇의 깊이 z 는 전술한 바와 같이 압력 센서에 의해 측정된다.

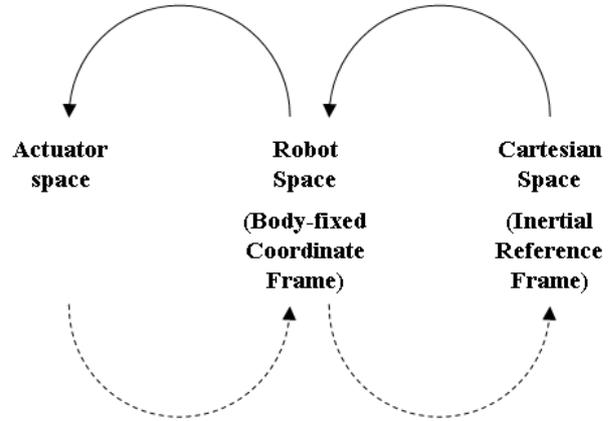


Fig. 6 Mappings between kinematic descriptions

3.3 추진기의 제어입력

2.2 절에서 TDC 설계를 통해 계산된 식 (15)의 제어 입력은 로봇의 동체 고정 좌표계에 대한 것이 아니라 관성 기준 좌표계에 대하여 계산된 값이다. 또한, 실험에 사용된 수중로봇의 추진기는 Fig. 5에서 볼 수 있듯이 수평 추진기와 수직 추진기가 각각 2개씩 일정한 각도로 대칭되게 배치되어 있어서 2개의 수평 추진기가 함께 전후 및 회전운동에 기여하고, 2개의 수직 추진기가 함께 상하 및 좌우 이동에 기여한다. 즉, 수중로봇의 실제 이동방향과 추진기에서 동력을 발생시키는 방향 간의 불일치가 존재한다.

따라서, 수중로봇의 추진기를 통해 수중로봇을 실제로 구동하기 위해서는 Fig. 6에서 볼 수 있듯이 식 (15)의 제어 입력 값을 동체 고정 좌표계에 관한 값으로 환산한 후에 다시 구동기 공간(actuator space)에 관한 값으로 변환해 주어야 한다. 그런데, 본 연구에서 사용된 수중로봇은 항상 동체가 수평을 유지하도록 설계되어 있기 때문에 즉, $\phi = \theta = p = q = 0$ 이므로, 식 (15)의 입력 중에서 이에 해당하는 값들은 실제로는 고려되지 않는다.

먼저 동체 고정 좌표계에 관한 값으로 환산해 보도록 한다. 이는 2.1 절에서 기술한 바와 같이 식 (9)를 통해 구현될 수 있다.

$$\tau = J^T F \tag{16}$$

그런데, 상기한 바와 같이 $\phi = \theta = p = q = 0$ 이기 때문에, 이 식은 다음과 같이 쉽게 구해질 수 있다.

$$\begin{aligned} F_{xb} &= F_x \cos \psi + F_y \sin \psi \\ F_{yb} &= -F_x \sin \psi + F_y \cos \psi \\ F_{zb} &= F_z \\ T_r &= T_\psi \end{aligned} \tag{17}$$

다음으로 구동기 공간에 관한 값으로 환산해보도록 한다. 전술한 바와 같이 Fig. 5 는 각각의 추진기에 의해 발생하는 힘과 동체 고정 좌표 계에 관해 적용되는 힘 사이의 관계를 보여준다. Fig. 5 를 살펴보면, 동체 고정 좌표 계의 힘과 추진기에 의해 발생하는 힘의 합력은 서로 정반대 방향을 가리키는데, 이는 수중로봇을 원하는 방향으로 움직이기 위해서는 작용·반작용의 법칙을 고려하여 원하는 방향과 반대방향으로 힘을 가해야 하기 때문이다. 각 추진기에서의 힘의 방향은 수중로봇으로부터 외부로 물이 분출되는 방향을 (+)으로 설정했다. 이 그림에서 쉽게 알 수 있듯이, 동체 고정 좌표 계에서의 힘과 구동기 공간인 추진기에서의 힘 사이에는 다음과 같은 관계가 존재한다.

$$\begin{aligned} F_{xb} &= -\hat{F}_{xb} = F_{VR} \sin \theta_V - F_{VL} \sin \theta_V \\ F_{yb} &= -\hat{F}_{yb} = -(F_{HR} \cos \theta_H + F_{HL} \cos \theta_H) \\ F_{zb} &= -\hat{F}_{zb} = -(F_{VR} \cos \theta_V + F_{VL} \cos \theta_V) \\ T_r &= l_r F_r = -l_r \hat{F}_r = l_r (F_{HR} \sin \theta_H - F_{HL} \sin \theta_H) \end{aligned} \quad (18)$$

여기서, l_r 는 수중로봇의 무게중심으로부터 F_{yb} 까지의 거리이다. 위 식으로부터 각 추진기가 발생시켜야 할 힘은 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} F_{HR} &= \frac{1}{2} \left(-\frac{F_{yb}}{\cos \theta_H} + \frac{T_r}{l_r \sin \theta_H} \right) \\ F_{HL} &= -\frac{1}{2} \left(\frac{F_{yb}}{\cos \theta_H} + \frac{T_r}{l_r \sin \theta_H} \right) \\ F_{VR} &= \frac{1}{2} \left(-\frac{F_{zb}}{\cos \theta_V} + \frac{F_{xb}}{\sin \theta_V} \right) \\ F_{VL} &= -\frac{1}{2} \left(\frac{F_{zb}}{\cos \theta_V} + \frac{F_{xb}}{\sin \theta_V} \right) \end{aligned} \quad (19)$$

그러므로, 식 (17)와 식 (19)로부터 각 추진기의 힘은 최종적으로 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} F_{HR} &= \frac{1}{2} \left(\frac{F_x \sin \psi - F_y \cos \psi}{\cos \theta_H} + \frac{T_\psi}{l_r \sin \theta_H} \right) \\ F_{HL} &= \frac{1}{2} \left(\frac{F_x \sin \psi - F_y \cos \psi}{\cos \theta_H} - \frac{T_\psi}{l_r \sin \theta_H} \right) \\ F_{VR} &= \frac{1}{2} \left(-\frac{F_z}{\cos \theta_V} + \frac{F_x \cos \psi + F_y \sin \psi}{\sin \theta_V} \right) \\ F_{VL} &= -\frac{1}{2} \left(\frac{F_z}{\cos \theta_V} + \frac{F_x \cos \psi + F_y \sin \psi}{\sin \theta_V} \right) \end{aligned} \quad (20)$$

Table 1 Specification of experimental setup

		Specification
Underwater robot	Dimensions	118×86×84mm(L×W×H)
	Material	anodized aluminum, polyurethane foam
	Weight	280g
	Geared Motor	Maxon RE10 118391(0.75W) & Maxon 110308(ratio 4:1) for 2 vertical & 2 horizontal thrusters
Vision Camera on Ceiling		TMC-7DSP made by PULNiX
Sensors		depth and acoustic sensors

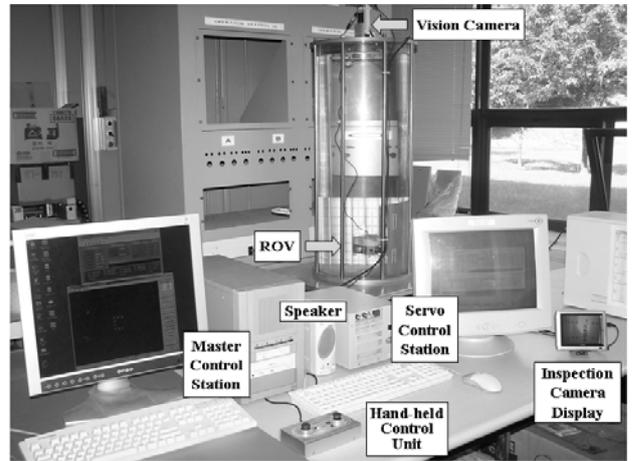


Fig. 7 Mock-up system of underwater robot developed for visual inspection of nuclear reactor internals

4. 실험

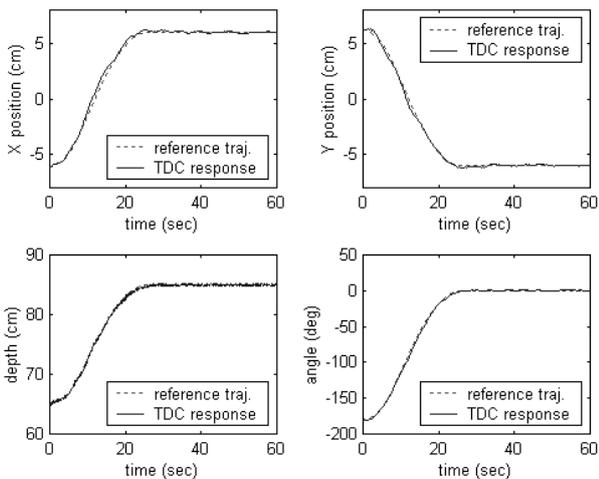
본 실험에는 전술한 바와 같이 원자로 압력용기 육안검사용 수중로봇 모형시스템(Fig. 7)이 사용되었고 그 구성은 Fig. 2 와 같다. 실험장치의 사양은 Table 1 과 같다.

수중로봇이 추종해야 할 기준 궤적(reference trajectory)은 $(x, y, z, \psi) = (-6 \text{ cm}, 6 \text{ cm}, 65 \text{ cm}, -180^\circ)$ 로부터 $(6 \text{ cm}, -6 \text{ cm}, 85 \text{ cm}, 0^\circ)$ 로 이동하는, 사다리꼴 형태의 속도 형상(profile)을 가지는 궤적이다. 제어기의 표본 주파수(sampling frequency)는 20Hz 이고, 센서의 잡음 영향을 줄이기 위하여 제어 입력에 저주파통과 필터(Low-pass filter)를 사용하였다. 실험에 사용된 TDC 의 이득(gain)과 파라미터 값은 Table 2 와 같다.

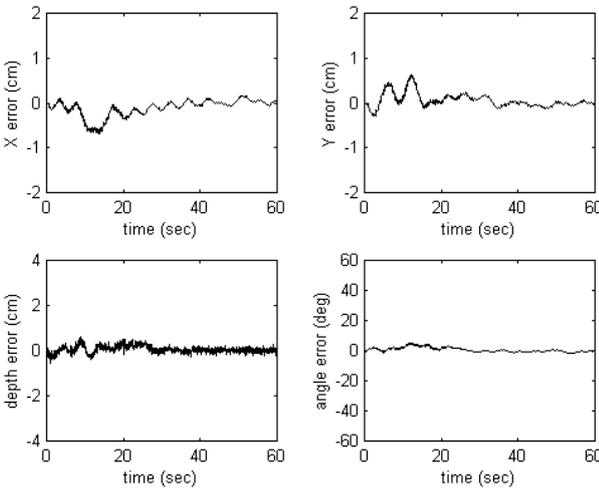
Fig. 8 은 관성 기준 좌표 계에 대한 X 위치, Y 위치, Z 깊이, 회전각에 대한 실험 결과로서, Fig. 8(a)의 점선과 실선은 각각 기준 궤적과 TDC 응답을 나타내고, Fig. 8(b)는 추종 오차를 나타낸다.

Table 2 TDC gains and parameters

Control Object	Gains and Parameters
X Position	$\bar{M}_x = 0.04, K_{Dx} = 4.5, K_{Px} = 0.81$
Y Position	$\bar{M}_y = 0.04, K_{Dy} = 4.5, K_{Py} = 0.81$
Depth	$\bar{M}_z = 0.025, K_{Dz} = 7.2, K_{Pz} = 1.44$
Angle	$\bar{M}_\psi = 0.0007, K_{D\psi} = 1.2, K_{P\psi} = 0.36$



(a) Control responses



(b) Errors

Fig. 8 Experimental results of trajectory control by TDC

실험결과를 살펴보면, X 위치, Y 위치, Z 깊이뿐만 아니라 회전각까지 동시에 제어하고 있지만 주어진 궤적을 잘 추종하고 있음을 확인할 수 있다. 이 실험 결과는 수중로봇의 비선형성, 모델의 불확실성, 추진기 간의 동역학적 간섭, 테더 케이블의 외란 등이 존재함에도 불구하고 강인 비선형 제어기법인 TDC가 기준 궤적을 잘 추종하도록

제어하고 있음을 보여준다.

5. 결론

수중로봇의 궤적 제어는 로봇과 작업 환경이 가지는 비선형성과 불확실성으로 인하여 모델링이 쉽지 않고 모델 식에 들어가는 각종 파라미터 값들을 정확히 알기 어렵기 때문에, 제어공학의 관점에서 상당히 해결하기 어려운 과제이다. 이러한 관점에서 정확한 모델 식이 필요 없고 외란과 파라미터 변화에 강인한 제어기법인 TDC는 상기한 제어상의 문제점에 대한 해결책의 하나로 고려될 수 있다. 수중로봇의 궤적 제어에 대하여 TDC를 설계하고 실제로 수중로봇 시스템에 적용해본 결과 좋은 제어 성능을 얻을 수 있었다. 이상의 결과로부터 TDC를 수중로봇과 함께 적용한다면, 추후 해양 탐사나 수중 구조물의 검사에 수중로봇을 적극적으로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- (1) Bartolini, G. and Punta, E., 2000, "Second Order Sliding Mode Tracking Control of Underwater Vehicles," *Proceedings of the American Control Conference*, pp. 65~69.
- (2) Shi, J., 2006, "Design of Sliding Mode Autopilot with Steady-State Error Elimination for Autonomous Underwater Vehicles," *Proceedings of 2006 IEEE Region 10 Conference*, pp. 1~4.
- (3) Yuh, J., Fox, J. S., and Uchibori, G., 1989, "Application of discrete-time adaptive control to underwater robotic vehicles," *ASME 4th Annual Symposium on Current Practices and New Technology in Ocean Engineering*, ASME paper No. 89-OCN-3.
- (4) Jordan, M. A. and Bustamante, J. L., 2006, "A Speed-Gradient Adaptive Control with State/Disturbance Observer for Autonomous Subaquatic Vehicles," *Proceedings of the 45th IEEE Conference on Decision & Control*, pp. 2008~2013.
- (5) Naik, M. S., Singh, S. N. and Mittal, R., 2007, "Biologically-Inspired Adaptive Pectoral-Like Fin Control System For CFD Parameterized AUV," *Symposium on Underwater Technology and Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies*, pp. 371~377.
- (6) Yuh, J., 1994, "Learning Control for Underwater Robotic Vehicles," *IEEE Control Systems Magazine*, pp. 39-46.
- (7) Carreras, M., Yuh, J., Batlle, J. and Ridao, P., 2005, "A Behavior-Based Scheme using Reinforcement Learning for Autonomous Underwater Vehicles," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 30, No. 2,

- pp. 416~427.
- (8) Santora, M., Alberts, J. and Edwards, D., 2006, "Control of Underwater Autonomous Vehicles using Neural Networks," *OCEANS 2006*, pp.1~5.
- (9) Youcef-Toumi, K., and Ito, O., 1990, "A Time Delay Controller Design for Systems with Unknown Dynamics," *ASME Journal of Dynamic Systems Measurement and Control*, Vol. 112, pp. 133 - 142.
- (10) Chang, P.-H., Park, B.-S. and Park, K.-C., 1996, "An Experimental Study on Improving Hybrid Position/Force Control of a Robot using Time Delay Control," *Mechatronics*, Vol. 6, No. 8, pp. 915~931.
- (11) Chang, P.-H. and Park, S.-H., 2003, "On Improving Time Delay Control under Certain Hard Nonlinearities," *Mechatronics*, Vol. 13, pp. 393~412.
- (12) Lee, S.-U. and Chang, P.-H., 2002, "Control of a Heavy-duty Robotic Excavator using Time Delay Control with Integral Sliding Surface," *Control Engineering Practice*, Vol. 10, Iss. 7, pp. 697~711.
- (13) Park, J.-Y. and Chang, P.-H., 2004, "Vibration Control of a Telescopic Handler using Time Delay Control and Commandless Input Shaping Technique," *Control Engineering Practice*, Vol. 12, Iss. 6, pp. 769~780.
- (14) Yuh, J., 1990, "Modeling and Control of Underwater Robotic Vehicles," *IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics*, Vol. 20, No. 6, pp. 1475~1483.
- (15) Fossen, T. I., 1994, *Guidance and Control of Ocean Vehicles*, Wiley, New York.
- (16) Cho, B.-H., Byun, S.-H., Shin, C.-H., Yang, J.-B., Song, S.-I. and Oh, J. M., 2004, "KeprovT : Underwater Robotic System for Visual Inspection of Nuclear Reactor Internals," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 231, Iss. 3, pp. 327~335.