

계단식 관측기에 의한 수중 차의 상태 추정

State Estimation for Underwater Vehicles by Means of Cascade Observers

김동헌

Dong Hun Kim

경남대학교 전기공학과

요 약

본 논문은 수중 차의 차속도와 프로펠러 각속도를 추정하는 문제를 다룬다. 계단식 관측기는 측정된 위치 값으로부터 속도 값 추정을 위해 사용한다. 고이득 관측기(high-gain observer)에 전형적으로 생기는 전형적인 문제를 없애기 위하여 계단식 구조의 관측기가 설계되었다. 고이득 관측기처럼 시스템 다이내믹스와 파라미터로부터 무관하게 설계할 수 있으며, 단순한 구조를 가진다. 관측기의 첫 단계에서 출력 값이 추정되고, 측정된 출력의 1계 미분 값이 관측기의 두 번째 단계를 통해 추정된다. 또한 출력의 n 번째 미분 값은 관측기의 n+1 번째 단계에서 추정된다. 제안된 관측기가 전체 점근적 안정도를 보장함을 보여준다. 시뮬레이션 결과는 기존의 고이득 관측기에 비해 제안된 관측기가 수중 차의 차속도와 프로펠러 각속도를 더 우수하게 추정함을 보여준다.

키워드 : 수중 차, 속도 추정, 관측기 설계, 적응 법칙

Abstract

This paper investigates the estimation problem of vehicle velocity and propeller angular velocity on the underwater vehicle. Inspired by but different from a high-gain observer, the cascade observer features a cascade structure and adaptive observer gains. In doing so the cascade observer attempts to overcome some of the typical problems that may pose to a high-gain observer. As in the case of a high-gain observer, the cascade observer structure is simple and universal in the sense that it is independent of the system dynamics and parameters. A cascade observer is used for the estimation of velocity from measured position. In the 1st step of the observer, the output is estimated, and the 1st order derivative of measured output is estimated via the 2nd step of the observer. Also, nth order derivative of the output is estimated in the (n+1)th step of the observer. It is shown that the proposed observer guarantees globally asymptotical stability. By simulation results, the proposed observer scheme for the estimations of vehicle velocity and propeller angular velocity shows better performance than the scheme based on the existing observer.

Key Words : Underwater vehicle, velocity estimation, observer design, adaptive law

1. 서 론

지난 몇 십년 동안 수중 차의 제어 문제에 대해서는 상당한 연구 노력이 이루어져 왔다[1]-[3]. 수중 차의 관측기 설계 문제는 상태변수에서 측정할 수 있는 값들을 최대한 이용하는 방법으로 상당히 발전되어 왔다. 관측기에서 구해지는 값들은 수중 차의 제어 문제에 있어서 이용됨으로 실질적으로 상당히 중요하다. 사실상, 수중 차에 대한 제어 기술은 수중 차의 위치, 속도에 대한 정보를 필요로 한다. 그런 이유로, 수중 차의 속도 관측기에 대한 이론과 실질적인 구현에 대한 많은 연구들이 이루어지고 있다. 논문 [4]는 이러한 수중 차를 위한 관측기 설계 문제에 대한 흥미 있는 결과들을 보여 준다. 관측기 설계문제는 모델 중심의 관측기

설계와 모델이 필요 없는 관측기 설계로 크게 두 영역으로 분리할 수 있다.

모델 중심의 관측기 설계는 수중 차의 운동 방정식을 완전하게 혹은 부분적으로 이용할 수 있음을 가정으로 하고 있다. 예를 들면 논문 [5], [6]에서 비선형 관측기는 수중 차의 속도를 추정하고 있다. 하지만, 수중 자동차의 상당히 정확한 운동방정식을 사용하고 있음을 가정하고 있다. 논문 [2]에서의 적응 관측기는 운동 방정식의 파라미터는 모르지만 운동 방정식의 구조는 모두 알고 있음을 가정하고 있다.

모델이 필요 없는 관측기 설계는 수중 차에 대한 운동 방정식을 전혀 요구 하지 않는다. 가장 일반적인 모델이 필요 없는 관측기는 고이득 관측기(high-gain observer)이다. 논문 [7]-[13]에서는 고이득 관측기를 사용하여 출력 값의 미분 값을 추정하고 있다. 하지만, 실제 응용에서 어려운 점은 적당한 관측기 이득을 설정하는 것이다. 너무 적은 관측기 이득 값이 사용되면, 요구되는 관측기 오차 보다 더 큰 값을 얻게 된다. 너무 큰 관측기 이득 값이 사용되면, 잡음에 대한 민감도가 커져서 실질적으로 사용하는데 커다란 제

접수일자 : 2008년 9월 8일

완료일자 : 2009년 3월 25일

본 연구는 2008학년도 경남대학교 학술연구 장려금 지원으로 이루어졌음.

한을 받게 된다[12]. 또한 측정된 출력 값이 잡음에 의해 섞이게 되면 더 큰 문제가 될 수 있다. 고이득 관측기의 안정도 문제는 고려되어지고 있는 시스템과 추정 오차 운동방정식에서의 시간 단위 분리에 의해 유도된다. 이러한 이유로, 단수 섭동법(singular perturbation) [14]이 오차 운동방정식[13]의 안정도 분석을 위해 사용된다. 기계 시스템의 속도를 측정하기 위하여 고이득 관측기가 사용된 예는 많은 연구에서도 보여 진다 [15]-[18]. 무엇보다도 고이득 관측기 설계에서는 관측기 이득 설정은 잠재적인 문제를 안고 있다. 왜냐하면 실제 구현에서 관측기 이득은 샘플링 비율, 컴퓨터에서 유한한 워드 길이, 비모델 고주파와 다이내믹스와 같은 다양한 요소들에 의해 제한 받기 때문이다. 이러한 해결 사항들이 이 논문에서 계단식 관측기를 설계하는데 동기가 되었다.

본 논문에서는 고이득 관측기의 단점을 없애기 위해 계단식 구조를 갖는 새로운 형태의 관측기를 제안하며, 수중 차의 차속도와 프로펠러 각속도 추정에 계단식 관측기를 적용한다. 계단식 관측기를 사용함으로써 얻는 또 다른 이점은 제어기 설계에서도 상당히 복잡한 과정들을 없앨 수 있다. 시스템 운동방정식과 파라미터 값을 정확히 구하지 않고도 계단식 구조의 도움으로 관측기 설계 문제를 푼다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 문제 정의와 계단식 관측자를 제시한다. 3장에서는 수중 차의 모델과 이에 대한 계단식 관측자 설계를 보여 준다. 4장에서는 외부 외란이 존재 시와 존재 하지 않을 때에 대하여 시뮬레이션 결과를 보여 준다. 5장은 결론을 다룬다.

2. 제안된 계단식 관측기

고이득 관측기[19]와 마찬가지로 제안된 관측기의 이론은 시스템이 관측가능 정규 형태(observability normal form[20]), 즉 일반화된 제어기 캐노니컬 형태(generalized controller canonical form[21])로 변경 가능한 시스템을 대상으로 삼는다. 입력이 u 이고, 출력이 y 인 모든 균등 관측 가능한(uniformly observable) SISO 시스템은 다음의 정규 형태(normal form)로 변경될 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= x_3 \\ &\vdots \\ \dot{x}_{n-1} &= x_n \\ \dot{x}_n &= \phi(x, u) \\ y &= x_1 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, $x = [x_1, \dots, x_n]^T$ 이고, $u = [u, \dot{u}, \ddot{u}, \dots, u^{(n)}]^T$ 이다.

제안된 관측기의 기본 설계 개념은 관측기 오차의 수렴성을 증명하는 것이다. 즉,

$$\begin{aligned} \hat{x}_1 = x_1 \rightarrow \hat{x}_2 = \dot{\hat{x}}_1 \rightarrow \hat{x}_2 = \dot{\hat{x}}_1 = \dot{x}_1 \rightarrow \hat{x}_2 = \dot{x}_1 = x_2 \\ \rightarrow \hat{x}_3 = \dot{\hat{x}}_2 \rightarrow \hat{x}_3 = \dot{\hat{x}}_2 = \ddot{x}_1 \rightarrow \hat{x}_3 = \dot{\hat{x}}_2 = \ddot{x}_1 = \dot{x}_2 = x_3, \dots, \\ \hat{x}_{p+1} = \hat{x}_p \rightarrow \hat{x}_{p+1} = \dot{\hat{x}}_p = x_1^{(p)} \rightarrow \hat{x}_{p+1} = \dot{\hat{x}}_p = x_1^{(p)} = \dot{x}_p = x_{p+1}. \end{aligned}$$

제안된 관측기의 기본 설계 개념은 3.2절에서 수중차 모델에 적용된 관측기식 식(12)에서 더 자세히 설명한다.

위의 개념을 기본으로 계단식 관측자는 다음과 같이 설계된다.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_i &= \hat{x}_{i+1} + l_i(\hat{x}_{i-1} - \hat{x}_i) + \hat{\rho}_i \text{sgn}(\hat{x}_{i-1} - \hat{x}_i) \quad i = 1, \dots, p \\ \dot{\hat{x}}_{p+1} &= l_{p+1}(\hat{x}_p - \hat{x}_{p+1}) + \hat{\rho}_{p+1} \text{sgn}(\hat{x}_p - \hat{x}_{p+1}) \\ \hat{y} &= \hat{x}_1 \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 $|\hat{x}_{i+1} - \hat{x}_{i-1}| \leq \rho_i$ 이고, $\hat{\rho}_i$ 은 ρ_i 의 관측 값이다. l_i 는 양수이고, p 는 관측을 요구하는 출력의 미분 계수보다 더 큰 값으로 설정된다.

관측기의 차수는 추정하려는 시스템 차수보다 1개 더 많다. 그래서 수식(2)에서 $p=n$ 이면 변수 추정을 위해 $n+1$ 개의 변수를 사용한다.

식(2)에서 $i=1$ 의 경우에는 \hat{x}_{i-1} 는 x_1 으로 대체된다. 식(2)의 관측기가 시스템 식(1)에 적용될 때 p 는 n 이 된다. 식(2)에 있는 $\hat{\rho}_i$ 의 적용법칙은 다음과 같이 설계 된다.

$$\begin{aligned} \hat{\rho}_i &= \gamma_i |\hat{x} - \hat{x}_i| \quad \text{if } \hat{\rho}_i \leq \bar{\rho}_i, \quad i = 1, \dots, p+1 \\ &= \gamma_i \left[1 + \frac{\bar{\rho}_i - \hat{\rho}_i}{\delta_i} \right] |\hat{x}_{i-1} - \hat{x}_i| \quad \text{otherwise} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, δ_i 는 양수이고, $\bar{\rho}_i$ 는 임의의 값으로 설정된다. 식(3)은 $\hat{\rho}_i$ 가 임계값을 보장하는 적용 법칙이다.

그림 1은 계단식 관측기의 구조를 보여주며, 각 단계마다 계단식 구조로 연결되어 있다.

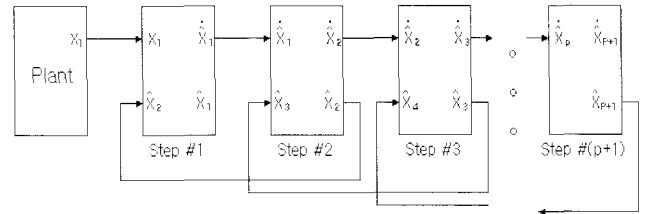


그림 1. 계단식 관측기의 구조
Fig. 1. Structure of cascade observer

$\hat{\rho}_i$ 값은 식(3)에서처럼 적용법칙에 프로젝션 알고리즘[24]을 사용하여 최대 $\bar{\rho}_i$ 값을 갖는다. 이러한 방법은 적용 법칙에서 추정값 수렴을 위해 사용되는 방법이다. \hat{x} 의 추정값은 마치 sliding mode 방법[20]처럼 이득 스위칭에 의해 좌우된다. $|\hat{x}_{i+1} - \hat{x}_{i-1}|$ 의 상한값, 즉 ρ_i 는 응용 예에 따라서 얻을 수 있는 값일 수도 있다. 예를 들어 자동차 운동방정식 경우에, 최대 속도, 가속도 값은 성능제한으로부터 구할 수도 있다. 하지만, 다른 응용 예에서 상한값을 미리 구하는 것은 어려운 문제일 수도 있다. 적용 법칙을 사용하는 경우에 일반적인 경우에서처럼 ρ_i 의 추정값이 실제 값에 수렴해야 한다는 것은 중요한 문제가 아니다. ρ_i 의 추정값은 상태오차 $x - \hat{x} = 0$ 이 되도록 이용되어질 뿐이다. 궁극적인 목적은 상태오차 $x - \hat{x} = 0$ 이 되도록 x 의 추정값 \hat{x} 를 얻는 것이다.

정리 1. 식(2)에서 $\hat{x}_{i-1} \rightarrow \hat{x}_i \rightarrow y^{(i-1)}$ 이면, 관측기 오차는 다음 단계에서 계단식으로 $\hat{x}_i \rightarrow \hat{x}_{i+1} \rightarrow y^{(i)}$ 되므로 수렴성이 보장된다.

정리1의 증명: 제안된 관측기의 안정도 해석을 위하여 다음의 리아프노프(Lyapunov) 함수 후보를 고려한다.

$$V_i = \frac{1}{2}(\dot{\hat{x}}_{i-1} - \dot{\hat{x}}_i)^2 + \frac{1}{2\gamma_i} \tilde{\rho}_i^2 \quad (4)$$

여기서, $\tilde{\rho}_i = \rho_i - \hat{\rho}_i$ 이다.

V_i 를 미분하면 다음과 같다.

$$\dot{V}_i = (\ddot{\hat{x}}_{i-1} - \ddot{\hat{x}}_i)(\dot{\hat{x}}_{i-1} - \dot{\hat{x}}_i) + \frac{1}{\gamma_i} \tilde{\rho}_i \dot{\tilde{\rho}}_i \quad (5)$$

식(5)에 식(2)를 대입하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{V}_i &= -(\dot{\hat{x}}_{i-1} - \dot{\hat{x}}_i) \left[\dot{\hat{x}}_{i+1} + l_i(\dot{\hat{x}}_{i-1} - \dot{\hat{x}}_i) + \hat{\rho}_i \text{sgn}(\dot{\hat{x}}_{i-1} - \dot{\hat{x}}_i) \right] \\ &\quad + \ddot{\hat{x}}_{i-1}(\dot{\hat{x}}_{i-1} - \dot{\hat{x}}_i) + \frac{1}{\gamma_i} \tilde{\rho}_i \dot{\tilde{\rho}}_i \\ &= -l_i(\dot{\hat{x}}_{i-1} - \dot{\hat{x}}_i)^2 - (\dot{\hat{x}}_{i-1} - \dot{\hat{x}}_i) \left[\dot{\hat{x}}_{i+1} - \ddot{\hat{x}}_{i-1} \right. \\ &\quad \left. + \hat{\rho}_i \text{sgn}(\dot{\hat{x}}_{i-1} - \dot{\hat{x}}_i) \right] + \frac{1}{\gamma_i} \tilde{\rho}_i \dot{\tilde{\rho}}_i \\ &\leq -l_i(\dot{\hat{x}}_{i-1} - \dot{\hat{x}}_i)^2 + |\dot{\hat{x}}_{i-1} - \dot{\hat{x}}_i| |\dot{\hat{x}}_{i+1} - \ddot{\hat{x}}_{i-1}| \\ &\quad - \hat{\rho}_i \text{sgn}(\dot{\hat{x}}_{i-1} - \dot{\hat{x}}_i)(\dot{\hat{x}}_{i-1} - \dot{\hat{x}}_i) + \frac{1}{\gamma_i} \tilde{\rho}_i \dot{\tilde{\rho}}_i \\ &\leq -l_i(\dot{\hat{x}}_{i-1} - \dot{\hat{x}}_i)^2 + \rho_i |\dot{\hat{x}}_{i-1} - \dot{\hat{x}}_i| - \hat{\rho}_i |\dot{\hat{x}}_{i-1} - \dot{\hat{x}}_i| \\ &\quad + \frac{1}{\gamma_i} \tilde{\rho}_i \dot{\tilde{\rho}}_i \\ &= -l_i(\dot{\hat{x}}_{i-1} - \dot{\hat{x}}_i)^2 + \tilde{\rho}_i |\dot{\hat{x}}_{i-1} - \dot{\hat{x}}_i| - \frac{1}{\gamma_i} \tilde{\rho}_i \dot{\tilde{\rho}}_i \end{aligned} \quad (6)$$

식(6)에 식(3)을 대입하면 다음과 같다.

$$\dot{V}_i = -l_i(\dot{\hat{x}}_{i-1} - \dot{\hat{x}}_i)^2 \quad (7)$$

식(7)로부터 $(\dot{\hat{x}}_{i-1} - \dot{\hat{x}}_i)$ 와 $\tilde{\rho}_i$ 이 유계하다는 것을 알 수 있다. 또한, $\hat{\rho}_i$ 이 식(3)으로부터 유계하다. 따라서, $|\dot{\hat{x}}_{i+1} - \ddot{\hat{x}}_{i-1}|$ 와 ρ_i 이 유계하다. 식(7)을 적분하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \int_0^t l_i(\dot{\hat{x}}_{i-1}(\tau) - \dot{\hat{x}}_i(\tau))^2 d\tau &\leq -V_i(t) + V_i(0) \leq V_i(0) \\ &= \frac{1}{2}(\dot{\hat{x}}_{i-1}(0) - \dot{\hat{x}}_i(0))^2 + \frac{1}{2\gamma_i} \tilde{\rho}_i^2(0) \end{aligned} \quad (8)$$

따라서, $(\dot{\hat{x}}_{i-1} - \dot{\hat{x}}_i) \in L_2$ 이다. $|\dot{\hat{x}}_{i+1} - \ddot{\hat{x}}_{i-1}| \leq \rho_i$ 이 유계이기 때문에, 식(2)로부터 $\frac{d}{dt}(\dot{\hat{x}}_{i-1} - \dot{\hat{x}}_i) \in L_\infty$ 이다. 바바렛렘마(Barbalat's Lemma)[22]를 사용하여 $\lim_{t \rightarrow \infty} (\dot{\hat{x}}_{i-1}(t) - \dot{\hat{x}}_i(t)) = 0$ 이다. 그러므로, $|\dot{\hat{x}}_{i+1} - \ddot{\hat{x}}_{i-1}|$ 이 미지의 값이더라도 점근 안정도(asymptotical stability)를 보장할 수 있다. \square

3. 수중차 모델에 적용

3.1 수중차 모델

그림 2에 있는 수중 차의 운동방정식을 고려하자 [23]. 에너지 기반의 물리 시스템 접근법을 사용하면 추진력에 대한 운동 방정식이 전개된다. 측정 가능한 프로펠러 각 변위 α 와 프로펠러 각 속도 Ω 를 사용하면 다음과 같은 상태 방정식과 출력 방정식이 얻어진다.

$$\begin{aligned} \dot{\alpha} &= \Omega \\ \dot{\Omega} &= c_1 \tau - c_2 \Omega |\Omega| \\ thrust &= C_f \Omega |\Omega| \end{aligned} \quad (9)$$

여기서, τ 는 입력 토크이고, c_1 과 c_2 는 모델 상수이며 C_f 는 비례 상수 이다.

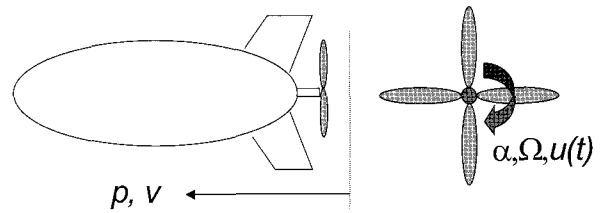


그림 2. 수중차

Fig. 2. Underwater vehicle

측정 가능한 수중 차의 변위 p 와 수중 차의 속도 v 를 사용하면 수중 차에 대한 다음과 같은 운동 방정식이 얻어진다.

$$\begin{aligned} \dot{p} &= v \\ M\dot{v} &= thrust - C_D |v| \end{aligned} \quad (10)$$

여기서, M 은 수중차의 질량이고, C_D 는 드래그(drag) 상수 이다.

다음의 $x^T = (\alpha, \Omega, p, v)$ 벡터를 정의하면, 단순 상태 공간 방정식 모델[22]에 의해 식(9)와 식(10)은 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{x} = \begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_2 \\ u(t) - 3x_2|x_2| \\ x_4 \\ x_2|x_2| - 3x_4|x_4| \end{pmatrix} \quad (11)$$

여기서, $u(t) = c_1 \tau$ 이다. x_1 은 프로펠러 각변위 이고, x_2 는 프로펠러 각속도이다. x_3 는 수중 차의 변위이고, x_4 는 수중 차의 각변위이다. $x_2|x_2|$ 는 프로펠러의 추진력을 표시하고, $u(t)$ 는 프로펠러에 대한 토크 입력이다.

프로펠러 각변위 x_1 과 자동차 변위 x_3 는 측정되어 관측기 설계를 위하여 이용된다.

3.2 수중차를 위한 관측기 설계

수중차의 속도 x_2 와 프로펠러 속도 x_4 가 측정 가능하지 않고, 수중차 모델의 다이내믹스를 알고 있지 않다면 시스템 식(11)의 x_2 와 x_4 값을 추정하기 위하여 다음과 같이 관측기를 설계할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \dot{\hat{x}}_1 &= \hat{x}_2 + l_1(x_1 - \hat{x}_1) + \hat{\rho}_1 \text{sign}(x_1 - \hat{x}_1) \\
 \dot{\hat{x}}_2 &= \hat{x}_3 + l_2(\hat{x}_1 - \hat{x}_2) + \hat{\rho}_2 \text{sign}(\hat{x}_1 - \hat{x}_2) \\
 \dot{\hat{x}}_3 &= l_3(\hat{x}_2 - \hat{x}_3) + \hat{\rho}_3 \text{sign}(\hat{x}_2 - \hat{x}_3) \\
 \dot{\hat{x}}_4 &= \hat{x}_5 + l_4(x_3 - \hat{x}_4) + \hat{\rho}_4 \text{sign}(x_3 - \hat{x}_4) \\
 \dot{\hat{x}}_5 &= \hat{x}_6 + l_5(\hat{x}_4 - \hat{x}_5) + \hat{\rho}_5 \text{sign}(\hat{x}_4 - \hat{x}_5) \\
 \dot{\hat{x}}_6 &= l_6(\hat{x}_5 - \hat{x}_6) + \hat{\rho}_6 \text{sign}(\hat{x}_5 - \hat{x}_6)
 \end{aligned} \tag{12}$$

여기서, \hat{x} 는 x 의 추정값 이다.

식(12)는 식(11)의 2차의 모델식 2개에서 상태변수값을 각각 추정하는 것이므로 (2+1)+ (2+1)= 6차식이 된다. $\hat{x}_1 = x_1$ 이면 식(12) 첫째 줄에 의해 $\dot{\hat{x}}_1 = \hat{x}_2$ 이다. $\hat{x}_1 = x_1$ 에 미분을 하면 $\dot{\hat{x}}_1 = \dot{x}_1$ 이고, $\dot{x}_1 = x_2$ 와 $\dot{\hat{x}}_1 = \hat{x}_2$ 에 의해 $\hat{x}_2 = \dot{\hat{x}}_1 = \dot{x}_1 = x_2$ 가 된다. $\hat{x}_1 = \hat{x}_2$ 에 의해 식(12) 둘째 줄에 의해 $\dot{\hat{x}}_2 = \hat{x}_3$ 가된다. 관측기 설계에서 다음차수로 넘어가도 이와 같은 개념으로 그 다음차수를 추정한다.

식(12)에서 $\hat{\rho}_i$ 는 다음의 적응 법칙에 의해 구해진다.

$$\begin{aligned}
 \dot{\hat{\rho}}_i &= \gamma_i |\dot{\hat{x}}_{i-1} - \hat{x}_i| \quad \text{if } \hat{\rho}_i \leq \bar{\rho}_i, \quad i=1, \dots, 6 \\
 &= \gamma_i \left[1 + \frac{\bar{\rho}_i - \hat{\rho}_i}{\delta_i} \right] |\dot{\hat{x}}_{i-1} - \hat{x}_i| \quad \text{otherwise}
 \end{aligned} \tag{13}$$

여기서, $i=1$ 인 경우 \hat{x}_0 는 x_1 으로 대체되고, $i=4$ 인 경우 \hat{x}_3 는 x_3 로 대체된다.

4. 시뮬레이션

시스템과 관측기에 대한 초기 값은 다음과 같다. $x_1(0)=0, x_2(0)=0, x_3(0)=0, x_4(0)=5, \hat{x}_1(0)=0, \hat{x}_2(0)=4, \hat{x}_3(0)=0, \hat{x}_4(0)=-10$. 관측기 파라미터는 다음과 같다. $l_{1-6} = 1000, 500, 10, 1000, 500, 10, \gamma_{1-6} = 20, 20, 2, 20, 20, 2$. 제어 입력은 다음과 같이 설정한다.

$u = \begin{cases} 5 & \text{for } 0 \leq t < 1 \\ -10 & \text{for } 1 \leq t < 2 \end{cases}$. 그림 3은 제안된 관측기에 대하여 각 상태에 대한 상태 추정 수렴도를 보여준다. 그림 4는 수중 차의 속도, 프로펠러 각 속도에 대한 관측기 오차를 보여준다. 프로펠러 각 변위 x_3 에 측정 잡음

$d = \frac{1}{10}(\sin 30t + \cos 80t)$ 이 존재할 때, 그림 5는 제안된 관측기의 상태 추정 값을 보여준다. 그림 6은 측정 잡음이 존재할 때 수중 차의 속도, 프로펠러 각 속도에 대한 관측기 오차를 보여준다. 그림 4와 6은 지나친 피킹 현상(peaking phenomenon) 없이 만족스러운 추정 성능을 보여주고 있다. 시뮬레이션 결과 $\hat{\rho}_i$ 의 추정값은 1초 안에 모두 $\bar{\rho}_i$ 값으로 수렴하였다.

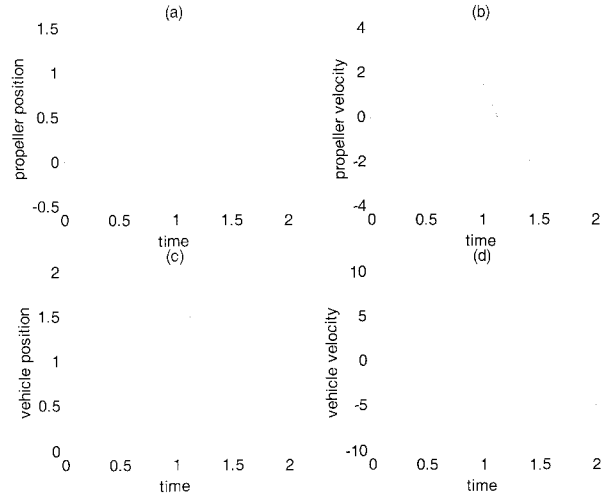


그림 3. 실제 값과 상태 값의 추정궤적
Fig. 3. Convergence of the estimated states

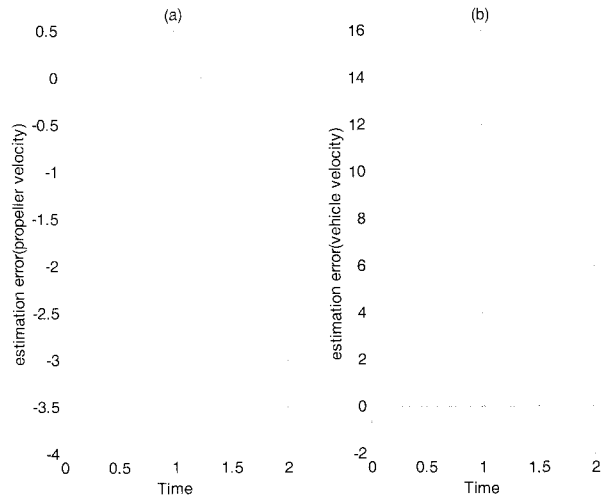


그림 4. 상태 관측 오차
Fig. 4. Observer errors

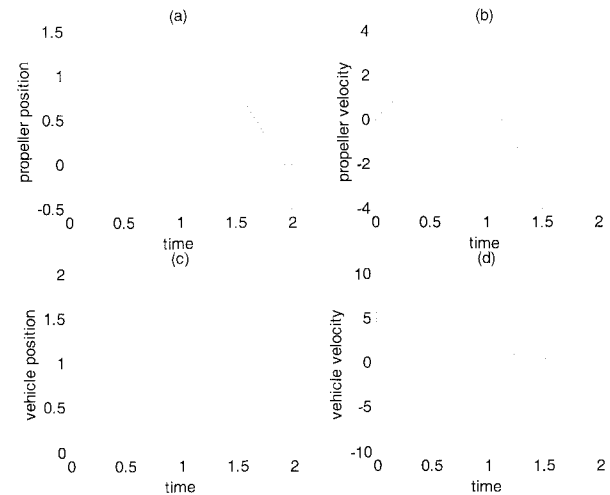


그림 5. 외란 존재시 실제 값과 상태 값의 추정궤적
Fig. 5. Convergence of the estimated states in the presence of disturbance

본 논문에서 사용된 관측기의 성능을 비교하기 위하여 동일한 시스템에 대하여 고이득 관측기를 사용하였다. 하지만 고이득 관측기를 사용하는 경우에는 수중 차의 속도, 프로펠러 각 속도에 대한 관측기 오차도 제안된 방법의 결과보다 클 뿐만 아니라 과도 상태에서 지나치게 관측 오차가 큰 피킹 현상을 일으켜 그림 삽입은 생략한다. 따라서, 좀 더 좋은 성능을 보여주는 비선형 관측기[6]를 적용하였다. 그림 7은 논문 [6]에서 사용한 비선형 관측기 사용시 수중 차의 속도, 프로펠러 각 속도에 대한 관측기 오차를 보여준다. 그림 8은 측정 잡음이 존재할 때 수중 차의 속도, 프로펠러 각 속도에 대한 관측기 오차를 보여준다. 그림 4와 그림 7을 비교하면 제안된 계단식 관측기가 논문 [6]의 비선형 관측기의 경우보다 더 적은 관측 오차를 보여 주었다. 외란이 존재할 때 또한 그림 6과 그림 8을 비교하면 제안된 계단식 관측기가 논문 [6]의 비선형 관측기의 경우보다 더 좋은 성능을 보여 주었다.

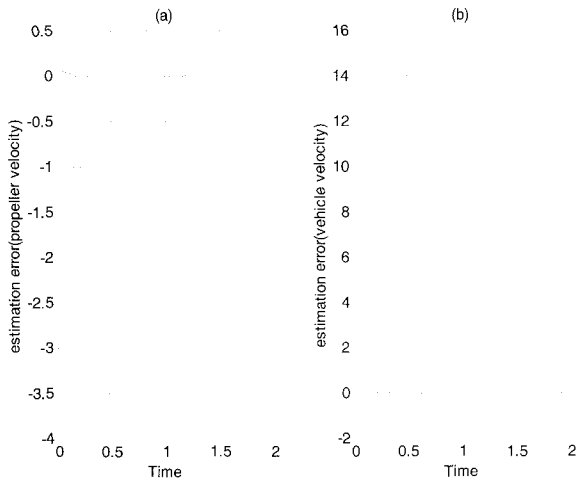


그림 6. 외란 존재시 상태 관측 오차
Fig. 6. Observer errors in the presence of disturbance

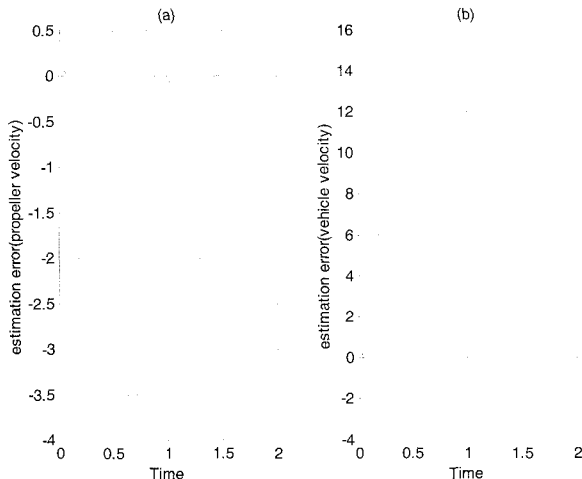


그림 7. 비선형 관측기[6] 사용에서의 상태 관측 오차
Fig. 7. Observer errors using the nonlinear observer[6] in the presence of disturbance

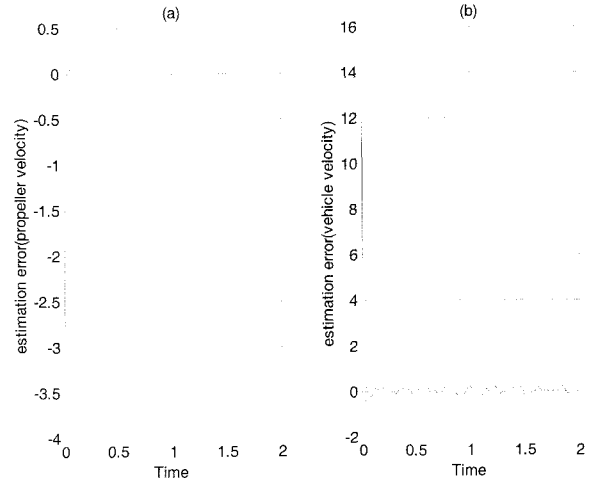


그림 8. 외란 존재시 비선형 관측기[6] 사용에서의 상태 관측 오차
Fig. 8. Observer errors using the nonlinear observer[6] in the presence of disturbance

5. 결 론

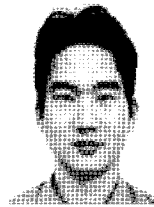
수중 차의 상태 추정을 위하여 계단식 구조를 가진 새로운 형태의 관측기 설계가 제시 되었다. 계단식 관측기의 첫 번째 단계에서 추정 오차가 점근적으로 수렴하기 때문에, 다음 단계의 추정 오차 또한 계단식 연결에 의해 점근적으로 수렴한다. 제안된 계단식 관측기 설계를 위해 수중 차의 모델 다이내믹스 정보를 전혀 요구하지 않는다. 오직 측정되는 출력 값만이 필요하다. 또한, 제안된 관측기는 고이득 관측기와 달리 피킹 현상을 일으키지 않으며, 관측기 이득을 적응 범칙으로 구하기 때문에 관측기 이득을 설정하기 위한 어려움을 피할 수 있다. 따라서, 제안된 계단식 관측기의 사용은 기존의 제어기 설계의 복잡한 문제를 단순하게 만들어 준다. 추정되는 출력값의 미분값을 효과적으로 구할 수 있고, 시스템 다이내믹스와 시스템 파라미터 값과 같은 정보를 요구하지 않는다는 점에서, 수중 차 이외의 다른 많은 기계적 시스템의 효과적인 속도, 가속도 값 추정에도 응용 가능하다. 추가적인 연구는 시스템에 외란 혹은 불확실성이 존재할 때 제안된 관측기가 적용될 때 강건성(robustness)을 해석적으로 증명하는 것이 필요하다.

참 고 문 헌

- [1] F. Alonge, F. D'Ippolito and F. M. Raimondi, "Trajectory tracking of underactuated underwater vehicles," *Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 4421-4426. 2001.
- [2] S. Zhao, J. Yuh and H. T. Choi, "Adaptive DOB control of underwater robotic vehicles," *MTS/IEEE Conference and Exhibition on OCEANS*, vol. 1, pp. 397-402. 2001.
- [3] G. Bartolini, E. Punta and E. Usai, "Tracking control of underwater vehicles including thruster

- dynamics by second order sliding modes," *Proceedings of the IEEE International Conference on Oceans*, vol. 3, pp. 1645-1649, 1998.
- [4] W. Lohmiller and J. E. Slotine, "Control system design for mechanical systems using contraction theory," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 45, no. 5, pp. 984-989, 2000.
- [5] G. Antonelli, F. Caccavale, S. Chiaverini and L. Villani, "Tracking control for underwater vehicle-manipulator systems with velocity estimation," *IEEE Trans. Oceanic Engineering*, vol. 25, no. 3, pp. 399-413, 2000.
- [6] W. Lohmiller and J. E. Slotine, "Applications of metric observers for nonlinear systems," *Proceedings of the IEEE International Conference on Control Applications*, pp. 367-372, 1996.
- [7] G. Besancon, "Further Results on High Gain Observers for Nonlinear Systems," *Proceedings of the 38th IEEE Conference on Decision and Control*, vol. 3, pp. 2904-2909, 1999.
- [8] A. Dabroom, H. K. Khalil, "Discrete-time implementation of high-gain observers for numerical differentiation," *International Journal of Control*, vol. 72, no. 17, pp. 1523-1537, 1999.
- [9] A. Tornambe, "Use of asymptotic observers having high-gains in the state and parameter estimation," *Proceedings of the 28th IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 1791-1794, 1989.
- [10] H. Hammouri and N. Marchand, "High gain observer for a class of implicit systems," *Proceedings of the 39th IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 804-808, 2000.
- [11] G. Besancon, "Further results on high gain observers for nonlinear systems," *Proceedings of the 38th IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 2904-2909, 1999.
- [12] E. Bullinger and F. Allgower, "An adaptive high-gain observer for nonlinear systems," *Proceedings of the 36th IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 4348-4353, 1997.
- [13] A. Isidori, *Nonlinear Control Systems*, Springer-Verlag, 1995.
- [14] A. Tornambe, "Use of asymptotic observer having high-gains in the state and parameter estimation," *Proceedings of the 28th IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 1791-1794, 1989.
- [15] H. K. Khalil, "Adaptive output feedback control of nonlinear systems represented by input-output models," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 41, no. 2, pp. 177-188, 1996.
- [16] E. S. Shin and K. W. Lee, "Robust output feedback control of robot manipulators using high-gain observer," *Proceedings of the IEEE International Conference on Control Applications*, vol. 1, pp. 881-886, 1999.
- [17] J. A. Heredia and W. Yu, "A high-gain observer-based PD control for robot manipulator," *American Control Conference*, pp. 2518-2522, 2000.
- [18] S. Seshagiri and H. K. Khalil, "Longitudinal adaptive control of a platoon of vehicles," *Proceedings of the American Contr. Conf.*, pp. 3681-3685, 1999.
- [19] A. Tornambe, "High-gain observers for nonlinear systems," *Int. J. of Systems Science*, pp. 1475-1489, 1992.
- [20] A. Isidori, *Nonlinear Control Systems*, Springer-Verlag, 1995.
- [21] M. Fliess, "Generalized controller canonical form for linear and nonlinear dynamics," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 35, no. 9, pp. 994-1001, 1990.
- [22] J. E. Slotine and W. Li, *Applied Nonlinear Control*, Prentice Hall, 1991.
- [23] D. Yoerger, J. Cooke and J. J. Slotine, "The influence of thruster dynamics on underwater vehicle behavior and their incorporation into control system design," *IEEE Trans. Oceanic Engineering*, vol. 15, no. 3, pp. 167-178, 1990.
- [24] P. A. Ioannou and J. Sun, *Robust Adaptive Control*, Prentice Hall, 1996.

저 자 소 개



김동헌(Dong Hun KIM)
 2001년 : 한양대학교 전기공학과(공학박사)
 2001년~2003년 : 미국 듀크 대학교 연구원
 2003년~2004년 : 미국 보스턴 대학교 연구원
 2004년~2005년 : 일본 동경대학교 박사후
 과정
 2005년~현재 : 경남대학교 전기공학과
 부교수

관심분야 : 스웬 시스템, 이동로봇 경로계획, 스웬 인텔리전스, 비선형 적응제어, 지능제어&로봇
 Phone : 055-249-2629
 Fax : 055-249-2839
 E-mail : dhkim@kyungnam.ac.kr