

슬라이딩 모드 제어를 이용한 수중운동체 액추에이터 고장진단 및 대처

Actuator Failure Diagnosis and Accommodation Using Sliding Mode Control for Submersible Vehicle

양 인 석*, 김 영 진, 이 동 익
(Inseok Yang, Young-Jin Kim, and Dongik Lee)

Abstract: This paper presents a failure diagnosis and accommodation strategy which is capable of tolerating faulty actuators of a submersible vehicle. The proposed method is mainly based on a sliding mode control technique. The primary ideas include a performance index to describe the effectiveness of actuators, and a controller reconfiguration strategy using the actuator effectiveness index. The actuator effectiveness proposed in this work is defined as the relationship between the sliding surface and the controlled system behavior. The resulting actuator effectiveness is then used in reconfiguring the controller in order to counteract for the deteriorated control performance in the presence of a faulty actuator. The effectiveness of the proposed method is demonstrated by means of numerical simulations with a submersible vehicle.

Keywords: actuator, failure diagnosis, fault-tolerant control, reconfigurable control, submersible vehicle

I. 서론

잠수정, 항공기, 자동차 등과 같이 시스템의 갑작스런 고장으로 인하여 인적 또는 경제적으로 큰 손실을 일으킬 수 있는 시스템을 안전중요시스템(safety-critical systems)이라 부른다. 이러한 안전중요시스템은 높은 수준의 신뢰성(dependability)을 요구하며, 고장으로 인한 위험을 줄이기 위하여 다양한 연구가 진행되고 있다. 특히 제어공학 분야에서는 시스템에서 발생하는 고장을 실시간으로 진단하고 대처할 수 있는 제어시스템 설계에 많은 관심이 있었다[1]. 고장대처 능력을 확보하기 위하여, 전통적으로 다중의 센서 및 액추에이터를 적용하는 이른바 하드웨어 여유도(hardware redundancy) 기반의 기법들이 주로 이용되었다[2]. 그러나 하드웨어 여유도는 시스템의 비용과 복잡성 증가, 공간적 제약 등의 문제점으로 인해 많은 제약이 따른다. 이러한 문제점을 극복하기 위한 대안으로써 시스템의 수학적 모델을 기반으로 한 해석적 여유도(analytic redundancy)를 이용한 신뢰성 확보 방안이 제시되고 있다[3-5]. 해석적 여유도를 이용한 방법은 제한된 수의 센서와 액추에이터를 기반으로 시스템의 안정성을 확보하기 위한 기법으로써, 크게 수동적 고장대처기법과 능동적 고장대처기법으로 나눌 수 있다[3]. 수동적 기법에서는 주로 강인 제어를 통해서 제한된 크기의 고장을 외란과 같은 요소로 간주하여 대처하게 된다[4]. 반면에 능동적 기법의 경우, 고장에 대한 정확한 검출 및 진단(failure detection and isolation, FDI)을 통하여 고장의 유형을 파악한 후, 이 정보를 이용하여 고장으로 인해 변경된 시스템의 특성에 적합한 제어를 실시간으로 재구성(reconfiguration)한다[5-7]. 능동적 방법이 효

과적으로 동작하기 위해서는 고장 검출 및 진단 과정과 제어기 재구성 과정이 매우 유기적으로 연결되어야 한다. 그러나 현재까지 진행된 연구들은 주로 두 과정이 독립적으로 진행되어 왔으며[8,9], 최근 일부 연구에서 통합적 방법 제시를 시도하고 있는 추세이다[10,11].

본 논문에서는 슬라이딩 모드 제어를 기반으로 고장 진단 및 대처를 통합적으로 수행할 수 있는 알고리즘을 제시하고자 한다. 슬라이딩 모드 제어기는 강인 제어기법의 한 종류이며, 슬라이딩 평면의 설계에 따라 동적 특성이 결정된다[12]. 따라서 슬라이딩 모드 제어를 이용한 고장 대처의 경우, 강인함을 기반으로 한 수동적 대처[4]뿐 아니라 슬라이딩 평면을 재설정하여 제어를 재구성하는 능동적 대처[5,13]도 가능하다. 본 논문에서는 슬라이딩 평면과 시스템 상태변수들과의 관계를 이용한 액추에이터 고장 진단 알고리즘을 제안한다. 이어서 고장 진단 결과로부터 액추에이터의 성능을 정량적으로 표현하는 액추에이터 성능지표(actuator effectiveness index)를 정의한다. 마지막으로 액추에이터 성능지표를 이용하여 제어입력을 재구성함으로써 고장으로 인한 시스템 변화에 능동적으로 대처하는 방법을 제시한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. I 장의 서론에 이어서, II 장에서는 시스템이 정상적으로 동작하고 있는 상태의 슬라이딩 모드 제어를 설계한다. 이 제어기는 기저 제어기(baseline controller) 역할을 수행하게 된다. III 장에서는 액추에이터의 성능 저하가 발생하는 경우, 고장을 진단하고 대처하는 알고리즘을 제시하며, IV 장에서는 제시된 알고리즘을 수중운동체에 적용하여 성능을 분석한다.

II. 슬라이딩 모드 제어기 설계

슬라이딩 모드 제어 기법은 강인 제어 기법 중 하나이다. 슬라이딩 모드 제어를 설계하기 위하여 식 (1)과 같이 상태공간 방정식으로 표현 가능한 시스템을 고려하자.

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (1)$$

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2009. 12. 21., 수정: 2010. 3. 11., 채택확정: 2010. 5. 11.

양인석: 경북대학교 산업융합수학과(jewill@hanmail.net)

김영진: LG전자(yjkim84@ee.knu.ac.kr)

이동익: 경북대학교 전자공학부(dilee@ee.knu.ac.kr)

* 이 논문은 2008년도 경북대학교 학술연구비에 의하여 연구되었음.

여기서 $x \in R^n$ 은 상태변수, $u \in R^m$ 는 제어입력이다.

슬라이딩 모드 제어는 도달 단계(reaching phase)와 슬라이딩 단계(sliding phase)의 2단계로 이루어져있다. 먼저 슬라이딩 평면(sliding surface, sliding manifold)이 설계되면, 상태변수를 슬라이딩 평면 위로 이끌게 되는데 이 과정을 도달 단계로 정의한다. 여기서 슬라이딩 평면은 설계자의 의사에 따라 선형 또는 비선형으로 설계될 수 있으나, 본 논문에서는 다음의 조건을 만족하는 선형 평면을 고려한다.

$$s(x) = G(x - x_d) = 0 \in R^m \tag{2}$$

여기서 G 는 $m \times n$ 행렬이며, x_d 는 기준상태(desired states)를 가리킨다. 실제로 슬라이딩 모드 제어에서 시스템 동특성은 평면의 설계에 의존함은 잘 알려져 있는 사실이다.

만약 상태변수가 슬라이딩 평면 위에 도달하게 되면, 상태변수는 식 (2)를 만족하며, 평형점(equilibrium point)으로 이동하게 된다. 이 과정을 슬라이딩 단계로 정의한다. 식 (2)로부터 슬라이딩 단계에서는 시스템의 차수가 낮아짐을 알 수 있다.

본 논문에서는 등가 입력(equilibrium input) 방법을 사용한 슬라이딩 모드 제어를 설계한다. 식 (2)로부터, 다음의 조건을 만족한다.

$$\begin{aligned} \dot{s}(x) &= 0 \\ \Rightarrow \dot{s} &= G(\dot{x} - \dot{x}_d) = G(Ax + Bu_{eq} - \dot{x}_d) = 0 \end{aligned} \tag{3}$$

여기서 u_{eq} 는 시스템이 슬라이딩 모드를 유지할 수 있도록 만들어주는 입력이며, 등가 입력으로 정의한다. 식 (3)에서 행렬 GB 가 nonsingular라면, u_{eq} 는 다음의 조건을 만족하게 된다.

$$u_{eq} = -(GB)^{-1} G(Ax - \dot{x}_d). \tag{4}$$

또한 시스템의 강인성을 확보하기 위하여 다음과 같은 스위칭 입력을 추가하게 된다.

$$u_N = -(GB)^{-1} K \operatorname{sgn}(s) \tag{5}$$

여기서 K 는 임의의 양정치행렬(positive definite matrix)이다.

위 식 (4)와 (5)로부터 슬라이딩 모드 제어기는 다음과 같이 설계된다.

$$\begin{aligned} u &= u_{eq} + u_N \\ &= -(GB)^{-1} G(Ax - \dot{x}_d) - (GB)^{-1} K \operatorname{sgn}(s). \end{aligned} \tag{6}$$

III. 제안된 고장 진단 및 대처 기법

1. 알고리즘의 구조

지금까지 제어기 재구성을 통한 고장 대처 기법에 대해서 많은 연구가 진행되어 왔다[5-7,10,11]. 제어기 재구성 기법은 크게 고장검출 및 진단(FDI) 모듈과 재구성 모듈로 구성되어 있다. FDI 모듈은 고장 발생 유무 판별 및 발생한 고장에 대한 진단을 실시하여 고장 대처에 필요한 정보를 제공한다. 즉 FDI 모듈로부터 고장에 대한 정보가 주어지면, 이를 기반으로 제어기 재구성 또는 재설계 과정을 통해 고장으로 인한 성능 또는 안정성 저하를 보상하게 된다.

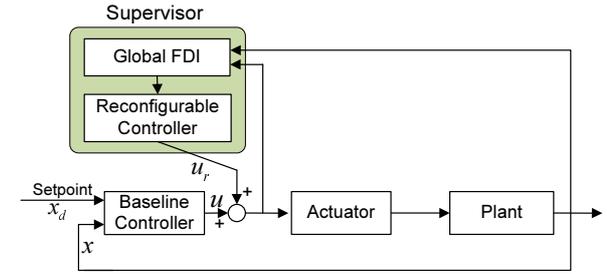


그림 1. 재구성 제어기 구조.
Fig. 1. The proposed structure of reconfigurable controller.

본 논문에서는 그림 1과 같은 계층 구조 형태의 고장 대처 알고리즘을 제안한다. 먼저 상위 계층은 전역 FDI (global FDI) 모듈과 재구성이 가능한 제어기로 구성되어 있다. 여기서 전역 FDI와 재구성 제어기는 supervisor 내에 위치하고 있으며, 시스템 성능 평가 및 성능 저하에 대한 대처를 수행하게 된다. 반면 하위 계층은 피드백 제어를 기반으로 한 기저 제어기(baseline controller)를 포함하도록 설계되어 있다. 일반적으로 고장 대처를 위하여 기저 제어기를 직접 재구성하게 되지만, 본 논문에서는 기저 제어기의 재구성을 대신하여 고장으로 인한 효과를 보상할 수 있도록 추가적인 입력항(u_r)을 도입하였다. 추가 입력은 고장이 시스템에 미치는 영향을 최소화함으로써 전체 시스템의 안정성을 유지한다. 계층구조를 구현하기 위한 구체적인 알고리즘 설계방법은 4절에서 제시한다.

2. 액추에이터 고장 모델링

그림 2에 나타낸 것처럼, 액추에이터에서 발생 가능한 고장은 크게 Lock in Place(LiP), Float, Hard-over 및 Loss of Effectiveness(LoE) 등 4가지로 분류할 수 있다.

시스템의 액추에이터에서 LiP, Float, Hard-over와 같은 고장이 발생할 경우, 액추에이터 출력은 입력과 독립적으로 나타나게 된다. 이러한 고장을 ‘Total Failure’로 정의한다. 반면 LoE 고장은 액추에이터의 성능이 저하된 경우로써, 입력과

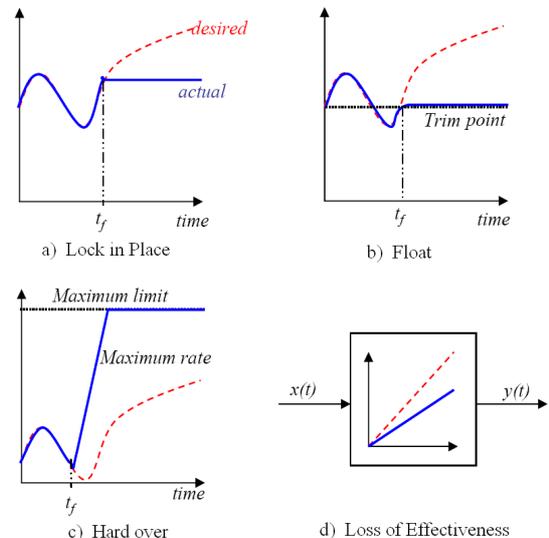


그림 2. 액추에이터 고장 종류[14].
Fig. 2. Typical failures on an actuator[14].

출력은 종속적인 관계를 유지한다. Total failure의 결과로 발생한 액추에이터의 출력을 \bar{v}_i 로 가정하면, 고장의 종류에 따른 액추에이터의 출력은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$u_i = (1 - \alpha_i)\gamma_i v_i + \alpha_i \bar{v}_i \quad (7)$$

여기서 v_i 와 u_i 는 각각 i 번째 액추에이터의 정상적인 출력과 실제 출력을 의미한다. 또한 α_i 는 액추에이터의 고장 종류에 따라 결정되는 변수이며 다음과 같이 정의된다.

$$\alpha_i = \begin{cases} 0, & \text{if actuator is normal or LoE failure occurs} \\ 1, & \text{if total failure occurs} \end{cases} \quad (8)$$

그리고 γ_i 는 i 번째 액추에이터의 성능을 나타내는 지표 (actuator effectiveness)로 액추에이터의 상태를 0~1사이의 값으로 정량화 한 값이다. 여기서 γ_i 는 정량화 된 상태에 따라 다음과 같은 결과를 얻게 된다.

$$\gamma_i = \begin{cases} 0, & \text{total failure} \\ \varepsilon (0 < \varepsilon < 1), & \text{LoE failure} \\ 1, & \text{healthy} \end{cases} \quad (9)$$

위 결과를 이용하여, i 번째 액추에이터에서 고장이 발생된 시스템을 모델링하면 다음의 결과를 얻게 된다.

$$\dot{x} = Ax + B\Gamma(I - \Omega)u + B\Omega\bar{u} \quad (10)$$

여기서 $x \in R^n$ 은 상태변수, $u \in R^m$ 은 제어입력, $\bar{u} = [u_1, \dots, \bar{u}_i, \dots, u_m]^T = [u_1, \dots, 0, \dots, u_m]^T + [0, \dots, \bar{u}_i, \dots, 0]^T \in R^m$ 은 i 번째 액추에이터에 total failure가 발생한 경우에 나타나게 되는 입력이다. 또한 $\Gamma = \text{diag}(\gamma_i) \in R^{m \times m}$ 은 성능지표로 구성된 함수이며, $\Omega = \text{diag}(\alpha_i) \in R^{m \times m}$ 은 total failure를 판별하는 값으로 구성된 함수이다. 위 식으로부터, 고장이 발생하지 않은 시스템은 $\Gamma = I_m$, $\Omega = 0_m$ 이 됨을 알 수 있다. 반면에 임의의 액추에이터에서 total failure가 발생하게 되면, 해당 액추에이터의 출력은 0으로 상환되며 더 이상 시스템 제어를 위한 기능을 수행하지 못하게 된다. 이 경우 고장이 발생한 액추에이터는 시스템 측면에서 볼 때 외란요인으로 작용한다고 볼 수 있다. 즉 재구성 제어를 설계하기 위해서, 식 (10)에서 $B\Omega[0, \dots, \bar{u}_i, \dots, 0]^T$ 항을 외란으로 간주하고, 외란 특성을 고려한 제어기로 재구성할 수 있음을 알 수 있다. 그러나 실제로 total failure가 발생하는 경우 재구성 제어를 통한 대처에는 한계가 있다. 발생 가능한 모든 total failure를 대처하기 위해서는 제어기에 충분한 견실성이 확보되거나 여분의 액추에이터가 충분히 확보되어야 한다. 하지만 이러한 요건을 만족하는 제어시스템 설계는 현실적으로 어려움이 따른다. 또한 여분의 액추에이터를 이용한 고장대처 기법은 액추에이터 여유도가 없는 대부분의 시스템에서는 적용할 수 없다. 본 논문에서 다루는 수중운동체의 경우, 수중운동체의 구조적 특성으로 인해서 액추에이터 여유도가 충분하지 않은 시스템이다. 따라서 본 논문에서는 액추에이터에서 발생하는 고장의 종류를 성능저하(LoE) 경우로 한정하여 제어알고리즘을 설계 및 분석한다. 액추에이터의 성능저하가 발생하면, 식

(10)로부터 $\Gamma \neq I_m$, $\Omega = 0_m$ 이 된다. 여기서 Γ 는 액추에이터의 성능 지표(γ_i)의 함수로 표현되며 제어기를 재구성하는데 사용된다.

3. 슬라이딩 평면을 이용한 고장 진단

본 논문에서 고장진단은 상위 계층인 supervisor의 global FDI 모듈에서 수행된다(그림 1). 식 (10)으로부터, 성능저하가 발생한 시스템의 상태방정식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{x} = Ax + B\Gamma u. \quad (11)$$

식 (3)에서 알 수 있듯이, 등가제어 방법을 사용한 슬라이딩 모드 제어기의 경우, 정상적인 시스템의 상태변수는 슬라이딩 평면 부근에 위치하게 된다. 그러나 고장이 발생하면 상태변수는 슬라이딩 평면 위를 유지할 수 없게 된다. 이 경우 슬라이딩 평면과 상태변수는 성능지표를 나타내는 함수(Γ)에 따라 다음과 같은 관계가 성립하게 된다.

$$\beta(x) = \dot{s}(x) = G(Ax + B\Gamma u_{eq} - \dot{x}_d). \quad (12)$$

위 식 (12)는 식 (3)로부터 다음을 만족하게 된다.

$$GB(\Gamma - I)u_{eq} = \beta \quad (13)$$

여기서 Γ 는 u_{eq} 와 β 값의 관계로부터, recursive least square (RLS) 등의 추정 기법을 이용하여 추정($\hat{\Gamma}$) 가능하며, 추정 결과로부터 액추에이터의 성능을 진단할 수 있다.

4. 제안된 고장 대처 알고리즘

4.1 재구성 알고리즘 설계

고장이 발생하고 액추에이터 성능지표가 추정되면 추정된 정보를 바탕으로 제어기를 재구성하게 된다. 제어기 재구성은 상위 계층에 있는 재구성 제어기에서 수행 하게 된다. 재구성 입력(u_f)은 다음과 같이 구함으로써 고장으로 인한 효과를 보상하게 된다.

$$u_f = u + u_r \quad (14)$$

여기서 u 는 슬라이딩 모드 제어기로 설계된 제어입력이며, u_r 은 고장 대처를 위한 추가 제어입력으로 다변수 입력 시스템에서 정상적으로 작동하는 액추에이터의 입력들로 구성 되어 있으며, 식 (15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$u_r = u_{reconf} + u_{IN} \quad (15)$$

여기서 u_{reconf} 는 추정된 액추에이터 성능지표에 따라 다음의 최적화 문제의 해를 구함으로 얻을 수 있다.

$$\min_{u_{reconf}} \|GB(I - \hat{\Gamma})u - GBu_{reconf}\|_2. \quad (16)$$

여기서 $d = GB(I - \hat{\Gamma})u - GBu_{reconf}$ 라고 가정한다. 또한 u_{IN} 는 스위칭 입력 형태의 항으로 식 (17)과 같다.

$$u_{IN} = -(GB)^{-1} \sigma \text{sgn}(s) \quad (17)$$

여기서 σ 는 $\|d\|_2 < \lambda_{\min}(K + \sigma)$ 을 만족하는 양정치행렬이며,

슬라이딩 모드 제어기의 스위칭 입력과 같이 시스템의 강인성을 확보하기 위하여 추가되는 항이다. 또한 여기서 $\lambda_{\min}(K + \sigma)$ 는 $K + \sigma$ 의 고유치의 최솟값을 의미한다.

4.2 안정성 분석

제안된 기법에 대한 안정성을 증명하기 위하여, 본 논문에서는 Lyapunov 안정성 판별 방법을 이용한다. Lyapunov 후보 함수를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$V(s(x)) = \frac{1}{2} s^T(x) s(x) \geq 0 \quad (18)$$

여기서 $s(x) = G(x - x_d) \in R^m$ 는 식 (2)에서 정의된 슬라이딩 평면이다. 만약 $\dot{V}(s)$ 이 음의 한정 함수가 되면 시스템은 점근적인 안정성이 보장된다.

식 (18)로부터, 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\begin{aligned} \dot{V}(s) &= s^T \dot{s} = s^T G(\dot{x} - \dot{x}_d) \\ &= s^T G(Ax + B\hat{\Gamma}u_f - \dot{x}_d) \\ &= s^T G(Ax + B(I - \hat{\Delta})u_f - \dot{x}_d) \\ &= s^T (-K \operatorname{sgn}(s) - GB\hat{\Delta}u_f + GBu_r) \\ &= s^T [-K \operatorname{sgn}(s) - GB\hat{\Delta}u_f + GB(u_{reconf} + u_{iv})] \quad (19) \\ &= s^T [-K \operatorname{sgn}(s) + d + GBu_{iv}] \\ &= s^T [-K \operatorname{sgn}(s) + d - \sigma \operatorname{sgn}(s)] \\ &\leq -\lambda_{\min}(K + \sigma)|s| + d^T s \\ &\leq -\lambda_{\min}(K + \sigma)|s| + |d||s| \\ &\leq -\lambda_{\min}(K + \sigma)|s| + \|d\|_2 |s| < 0 \end{aligned}$$

여기서 $\hat{\Delta}(= I - \hat{\Gamma})$ 는 액추에이터의 성능저하를 나타내는 함수이다. 식 (19)로부터, 항상 $\dot{V}(s) < 0$ 이 성립하게 된다. 따라서 도달조건을 만족하게 되며 시스템의 안정성이 확보되게 된다.

IV. 시뮬레이션 결과 및 고찰

1. 수중운동체 모델링

본 논문에서는 다음과 같은 중운동 상대방정식을 갖는 수중운동체에 대해서 제안한 알고리즘의 제어 및 고장대처 성능을 분석한다[15].

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{w} \\ \dot{q} \\ \dot{\theta} \\ \dot{z} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -0.0354 & 1.1461 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0022 & -0.1132 & -0.0063 & 0.0000 \\ 0.0000 & 1.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 1.0000 & 0.0000 & -4.1120 & 0.0000 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ q \\ \theta \\ z \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} -0.0080 & -0.0797 \\ 0.0018 & -0.0089 \\ 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta b \\ \delta s \end{bmatrix} \quad (20) \end{aligned}$$

여기서 w 는 히브 속도(heave velocity), q 는 피치 각속도, θ 는 피치각, 그리고 z 는 심도를 나타낸다. 또한 δb 와 δs 는 시스템 입력으로 각각 선수타(bow plane)와 선미타(stern plane)

의 변형각을 가리킨다.

고장은 선수타의 성능저하(LoE)를 가정하며, 각각 50%(시나리오 1)와 90%(시나리오 2)의 성능저하가 발생하도록 설정하였다. 또한 제안된 대처 기법의 성능을 분석하기 위하여, 시나리오 3에서는 고장 대처 기법으로 잘 알려진 PI (Pseudo Inverse) 기법[16]과 본 논문에서 제시한 대처 기법을 비교하여 평가하였다. 여기서 고장은 선수타의 성능저하(LoE)를 고려하였으며, 시나리오 2와 같이 90%의 성능저하가 발생하는 것을 가정하였다. 시나리오 3을 제외한 모든 고장은 제어시스템이 동작하고 10초 이후에 발생하도록 하였다. 또한 슬라이딩 모드 제어기는 II 장에서 설명한 등가입력 기법으로 설계되었으며, 슬라이딩 평면은 다음과 같이 주어진다.

$$s(x) = G(x - x_d) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0.264 & -0.008 \\ 0 & 1 & 0.528 & -0.016 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w - w_d \\ q - q_d \\ \theta - \theta_d \\ z - z_d \end{bmatrix} \quad (21)$$

2. 시뮬레이션 결과

식 (21)과 같이 설계된 슬라이딩 모드 제어기를 이용한 수중운동체의 중운동 결과는 그림 3과 같다. 그림 3에서 고장이 인가되지 않은 수중운동체는 150초 후에 정상상태에 도달함을 볼 수 있다. 그림 4는 정상적으로 동작하고 있는 수중운동체의 선수타 및 선미타의 움직임 보여주고 있다.

시나리오 1: 선수타의 성능이 50% 저하된 LoE 고장에 대한 진단 및 대처 결과를 제시한다.

그림 5와 같이 고장이 발생하면, 제안된 고장진단 알고리즘에 의해서 액추에이터 성능지표를 추정하게 된다. 그림 5에서 볼 수 있는 것처럼, 고장이 인가되지 않은 선미타의 성능지표는 1로 나타나며, 고장이 인가되기 이전의 선수타 성능지표 역시 1이 됨을 알 수 있다. 반면 10초 이후 선수타에 50%의 성능저하가 발생함에 따라 선수타의 성능지표가 0.5

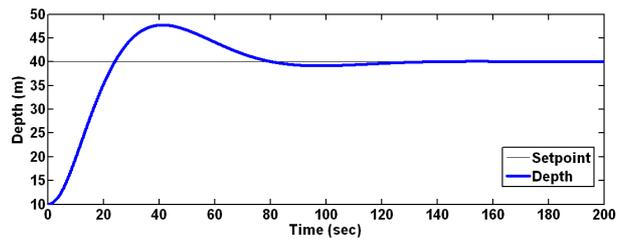


그림 3. 수중운동체의 심도 제어. Fig. 3. Depth control of submersible vehicle.

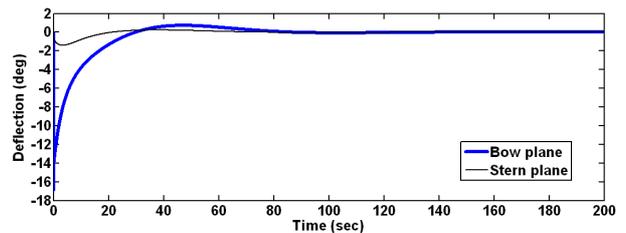


그림 4. 액추에이터 출력. Fig. 4. Deflection of actuators.

로 변경됨으로써, 제안된 진단 알고리즘이 고장으로 인한 액추에이터의 성능저하를 적절히 추정함을 확인할 수 있다.

그림 6은 성능이 저하된 수중운동체의 중운동 결과를 보여주고 있다. 실제로 슬라이딩 모드 제어기는 강인 제어기로서 제한된 범위 내의 고장에 대하여 외란으로 간주하여 수동적 고장 대처 성능을 갖게 된다. 따라서 그림 6에서 고장대처 알고리즘의 적용 여부와 무관하게 정상상태 추종특성에 차이가 없음을 볼 수 있다. 반면에, 제안된 고장대처 알고리즘이 적용된 경우 과도상태 특성이 개선됨을 확인할 수 있다.

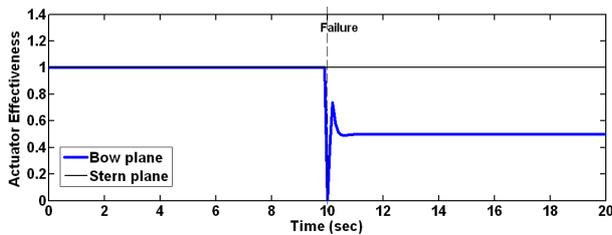


그림 5. 고장 이후 10초 동안 선미타와 선수타의 성능지표 추정(선수타 50% 성능저하).

Fig. 5. Estimation of actuator effectiveness for both planes (50% of LoE with bow plane at $t=10$ sec).

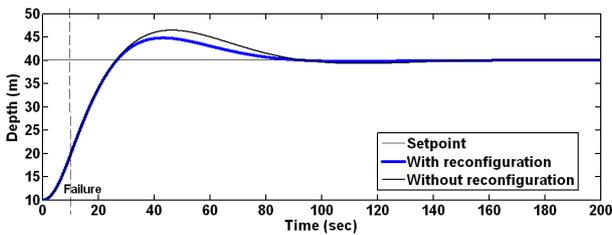
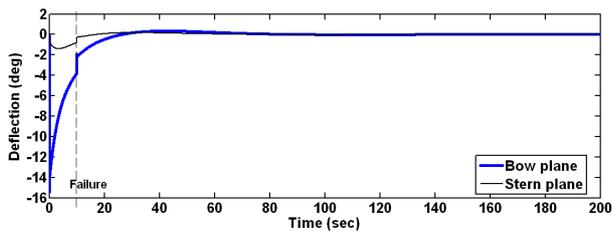
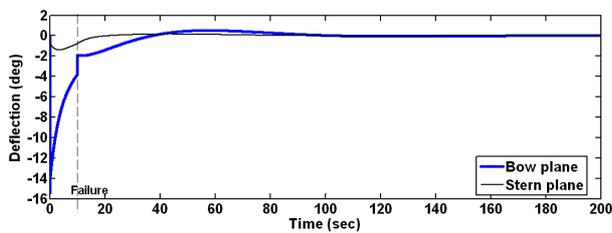


그림 6. 선수타 고장($t=10$ 초에서 50% 성능저하) 발생시 심도 제어 성능.

Fig. 6. Depth control with faulty bow plane (50% of LoE at $t=10$ sec).



(a) With reconfiguration



(b) Without reconfiguration

그림 7. 선수타 고장($t=10$ 초에서 50% 성능저하) 발생시 액추에이터 출력.

Fig. 7. Deflection of actuators with faulty bow plane (50% of LoE at $t=10$ sec).

그림 7은 선수타의 50% 고장이 발생한 수중운동체의 고장대처 알고리즘을 사용하지 않은 경우와 사용한 경우의 선수타 및 선미타의 움직임을 보여주고 있다. 그림 7에서 선수타에 고장이 발생하면, 고장으로 인하여 선수타의 움직임이 비선형적으로 나타남을 볼 수 있다. 그 결과, 고장이 발생한 선수타의 저하된 성능을 보상하기 위해서 선미타의 출력도 비선형적으로 동작하게 됨을 확인할 수 있다.

시나리오 2: 선수타의 성능이 90% 저하된 LoE 고장발생시 제안된 알고리즘의 진단 및 대처 성능을 시뮬레이션한다.

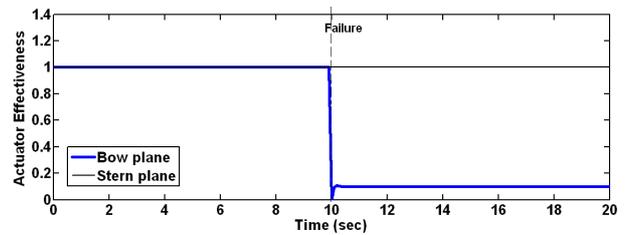


그림 8. 고장 이후 10초 동안 선미타와 선수타의 성능지표 추정(선수타 50% 성능저하).

Fig. 8. Estimation of actuator effectiveness for both planes (90% of LoE with bow plane at $t=10$ sec).

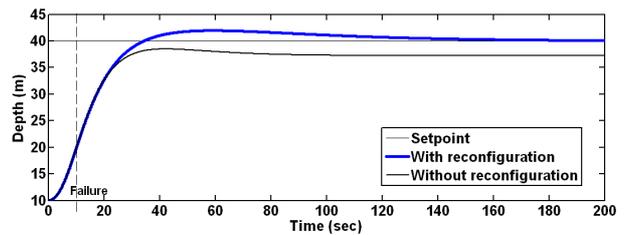
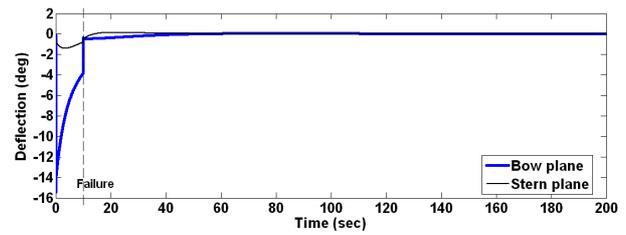
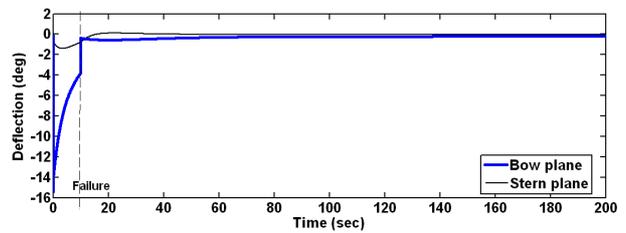


그림 9. 선수타 고장($t=10$ 초에서 90% 성능저하) 발생시 심도 제어 성능.

Fig. 9. Depth control with faulty bow plane (90% of LoE at $t=10$ sec).



(a) With reconfiguration



(b) Without reconfiguration

그림 10. 선수타 고장($t=10$ 초에서 90% 성능저하) 발생시 액추에이터 출력.

Fig. 10. Deflection of actuators with faulty bow plane (90% of LoE at $t=10$ sec).

그림 8은 선수타에서 발생한 고장에 대한 진단결과를 보여주며, 10초 이후에 고장이 발생한 선수타의 성능지표를 잘 추종하고 있음을 알 수 있다. 또한 그림 9는 성능이 저하된 수중운동체의 종운동 결과를 보여준다. 제안한 고장대처 알고리즘을 사용하여 제어기를 재구성한 경우, 수중운동체가 정상상태를 추종하고 있음을 볼 수 있다. 그러나 재구성을 하지 않은 경우, 수중운동체는 원하는 성능을 추종하지 못함을 볼 수 있다. 즉 선수타의 과도한 고장으로 인해서 슬라이딩 모드 제어기의 강인성에만 의존하는 수동적 고장대처로는 적절한 제어능력이 유지될 수 없음을 알 수 있다.

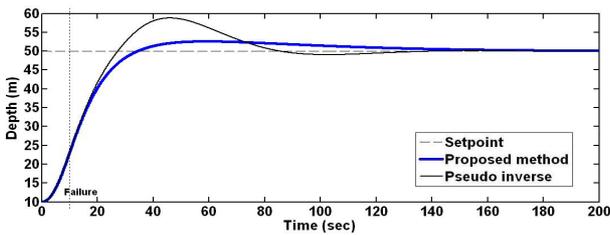
그림 10은 선수타 성능의 90%가 저하된 LoE 고장 발생시, 제안된 알고리즘을 사용한 경우와 그렇지 않은 경우의 선수타 및 선미타의 움직임을 보여주고 있다. 시나리오 1과 동일하게 선수타의 성능저하를 보상하기 위해서 선미타에서도 비선형적 출력을 보임을 알 수 있다.

시나리오 3: 선수타의 성능이 90% 저하된 것을 가정하여, 제안된 고장 대처 알고리즘을 재구성 기법으로 잘 알려진 PI 방법[16]과 비교하여 성능을 평가한 결과를 제시한다. 그림 11의 고장 발생 시간은 제어시스템 동작 후 10초로 가정하였고, 그림 12에서의 고장 발생 시간은 1초로 가정하였다.

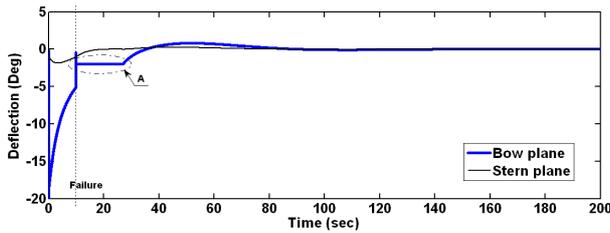
그림 11(a)에서 선수타에 90%의 성능이 저하되는 고장이 발생하여도 제안된 고장 대처 기법과 PI 고장 대처 기법의 성능이 비슷하게 나타나고 있음을 볼 수 있다. 그러나 액추

에이터 출력 결과(그림 11(b))로부터, PI를 이용하여 고장을 대처하는 과정에 입력의 크기가 한계(saturation)에 도달하고 있음을 볼 수 있다(A 영역). 여기서 saturation이 발생하는 A 영역의 영향은 제어기의 강인성으로 보상이 가능한 정도로 나타나며, 결과적으로 수중운동체는 정상상태를 추종하게 된다. 그러나 이와 같은 경우, saturation의 영향은 고장이 발생하는 환경(고장 발생시 동작 상태, 고장 시간 등)에 종속적인 경향이 나타나며, 안정성을 보장할 수 없는 잠재적인 위험을 가지고 있는 상태가 된다. 반면에 본 논문에서 제시한 고장 대처 기법은 입력 saturation 내에서 액추에이터가 동작하게 되며(그림 11(c)), 결과적으로 안정성을 확보하게 된다.

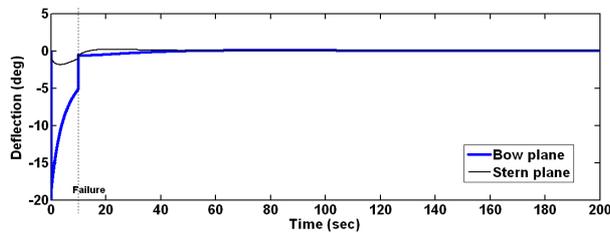
그림 12는 고장 시간에 종속적으로 나타나는 액추에이터 saturation이 수중운동체의 안정성에 미치는 영향을 보여준다. 그림 12(a)에서 수중운동체 동작 후 1초에 발생하는 선수타 90% 성능저하 고장에 대하여, PI를 이용한 기법은 고장을 대처하지 못하고 있음을 보여준다. PI를 이용하여 고장을 대처하는 과정에서 선수타의 입력은 saturation의 영향으로 수중운동체에 필요한 충분한 입력을 제공하지 못하였고(그림 12(b)), 결과적으로 수중운동체의 안정성은 확보되지 못하게 된다. 반면에 제시한 알고리즘을 이용하여 고장을 대처하는 경우, 모든 액추에이터들은 입력 saturation내에서 안정적으로 동작하고 있음을 볼 수 있다(그림 12(c)). 따라서 안정적인 심도 제어가 이루어지고 있다.



(a) Depth control using pseudo inverse and the proposed method with faulty bow plane (90% of LoE at $t=10$ sec).



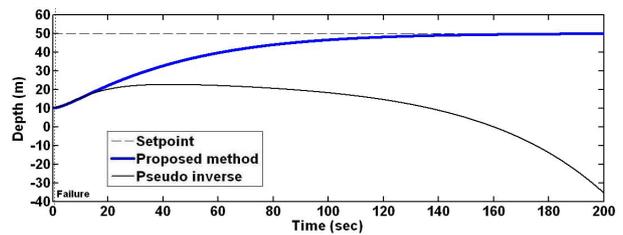
(b) Deflection of actuators controlled by pseudo inverse method



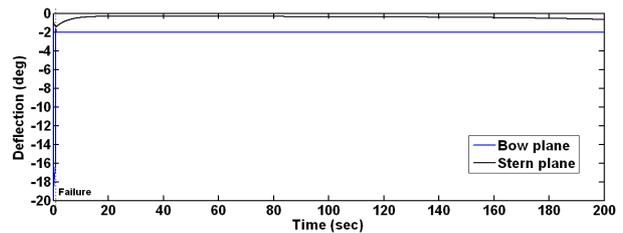
(c) Deflection of actuators controlled by proposed method

그림 11. 선수타 고장($t=10$ 초에서 90% 성능저하) 발생시 pseudo inverse 방법과 제안된 알고리즘의 성능.

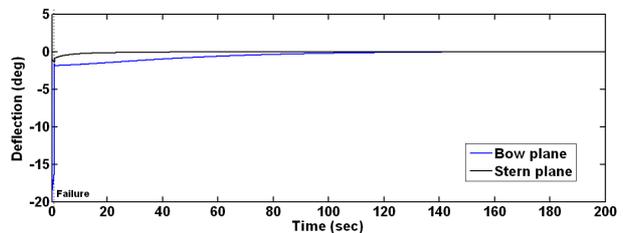
Fig. 11. The results of pseudo inverse and the proposed method with faulty bow plane (90% of LoE at $t=10$ sec).



(a) Depth control using pseudo inverse and the proposed method with faulty bow plane (90% of LoE at $t=1$ sec).



(b) Deflection of actuators controlled by pseudo inverse method



(c) Deflection of actuators controlled by proposed method

그림 12. 선수타 고장($t=1$ 초에서 90% 성능저하) 발생시 pseudo inverse 방법과 제안된 알고리즘의 성능.

Fig. 12. The results of pseudo inverse and the proposed method with faulty bow plane (90% of LoE at $t=1$ sec).

V. 결론

본 논문에서는 슬라이딩 모드 제어를 기반으로 한 수중 운동체의 액추에이터 고장진단 및 대처 알고리즘을 제시하였다. 슬라이딩 평면의 특성을 이용하여 고장진단 알고리즘을 설계하였으며, 슬라이딩 평면과 고장이 발생한 시스템의 상태변수의 관계로부터 액추에이터 성능지표를 정의하였다. 이 성능지표는 액추에이터의 현재 성능을 0~1사이의 정량적 값으로 나타내며 고장대처를 위한 제어기 재구성에 사용된다. 그리고 제안된 성능지표를 이용하여 고장이 발생한 액추에이터의 성능저하를 보상할 수 있는 재구성 제어기 설계기법을 제시하였다. 시뮬레이션 결과로부터 제안한 방법들이 수중운동체의 액추에이터 고장진단 및 대처에 효과적으로 적용될 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

- [1] J. Chen and R. J. Patton, *Robust Model-Based Fault Diagnosis for Dynamic Systems*, Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [2] D. Brière, C. Favre, and P. Traverse, "A family of fault-tolerant systems: electrical flight controls, from Airbus A320/330/340 to future military transport aircraft," *Microprocessors and Microsystems*, vol. 19, no. 2, pp. 75-82, 1995.
- [3] Y. Zhang and J. Jiang, "Bibliographical review on reconfigurable fault tolerant control systems," *Proc. of the IFAC Symposium SAFEPROCESS '03, Washington*, pp. 265-276, 2003.
- [4] B. Song, J. K. Hedrick, and A. Howell, "Fault tolerant control and classification for longitudinal vehicle control," *Journal of dynamic systems, measurement, and control*, vol. 125, no. 3, pp. 320-329, 2003.
- [5] I. A. Shkolnikov and Y. B. Shtessel, "Aircraft nonminimum phase control in dynamic sliding manifolds," *Journal of guidance, control and dynamics*, vol. 24, no. 3, pp. 566-572, 2001.
- [6] M. Bodson and J. E. Groszkiewicz, "Multivariable adaptive algorithms for reconfigurable flight control," *IEEE transaction on control systems technology*, vol. 5, no. 2, pp. 217-229, 1997.
- [7] Y. Zhang and J. Jiang, "Integrated active fault-tolerant control using IMM approach," *IEEE transaction on aerospace and electronic systems*, vol. 37, no. 4, pp. 1221-1235, 2001.
- [8] J. J. Gertler, "Survey of model-based failure detection and isolation in complex plants," *IEEE control systems magazine*, vol. 8, no. 6, pp. 3-11, 1998.
- [9] R. J. Patton, "Fault detection and diagnosis in aerospace systems using analytical redundancy," *Computing and control engineering journal*, vol. 2, no. 3, pp. 127-136, 1991.
- [10] S. Klinkhiew, R. J. Patton, and C. Kambhampati, "Robust FDI and FTC coordination in a distributed network system," *Proc. of 17th IFAC world congress, Seoul, Korea*, July 2008.

- [11] J. D. Bošković, S. E. Bergstrom, and R. K. Mehra, "Robust integrated flight control design under failures, damage, and state-dependent disturbances," *Journal of guidance, control, and dynamics*, vol. 28, no. 5, pp. 902-917, 2005.
- [12] V. I. Utkin, "Variable structure systems with sliding modes," *IEEE transaction on automatic control*, vol. 22, no. 2, pp. 212-222, 1977.
- [13] 김영진, "슬라이딩 모드 제어 기법을 이용한 차량용 Throttle 밸브 고장대처," 경북대학교 석사학위논문, 2009.
- [14] H. Alwi, "Fault Tolerant Sliding Mode Control Schemes with Aerospace Applications," Ph.D. Thesis, University of Leicester, 2008.
- [15] 양승윤, 이만형, "수중운동체의 조종제어기 설계 연구," *대한기계학회논문집(A)*, 제20권 제3호, pp. 850-860, 1996.
- [16] M. Staroswiecki, "Fault tolerant control: the pseudo-inverse method revisited," *Proc. of the 16th IFAC World Congress, 2005, Czech Republic*, 2005.



양 인 석

2001년 2월 경북대학교 수학과(이학사). 2005년 2월 경북대학교 대학원 산업응용수학과(이학석사). 2006년 3월~현재 경북대학교 대학원 산업응용수학과 박사과정 재학중. 관심분야는 고장진단, 고장대처제어.



김 영 진

2007년 8월 경북대학교 전자전기컴퓨터학부(공학사). 2009년 8월 경북대학교 대학원 전자전기컴퓨터학부(공학석사). 2009년 9월~2010년 1월 경북대학교 센서기술연구소 연구원. 2010년 1월~현재 LG전자(주) 연구원.



이 동 익

1987년 8월 경북대학교 전자공학과(이학사). 1990년 2월 경북대학교 대학원 전자공학과(공학석사). 1990년 3월~1997년 8월 국방과학연구소 연구원. 1997년 9월~2002년 4월 영국 셰필드대학교 자동제어시스템공학과(공학박사). 2002년 1월~2005년 3월 영국 DRTS Ltd 공동설립 및 CTO. 2005년~현재 경북대학교 전자공학부 조교수.