

온라인 식별 및 매개변수 추정을 이용한 실시간 e-Actuator 오류 검출

Realtime e-Actuator Fault Detection using Online Parameter Identification Method

박 준 기* · 김 태 호** · 이 흥 식** · 박 찬 식†
(Jun-gi Park · Tae-ho Kim · Heung-sik Lee · Chansik Park)

Abstract - E-Actuator is an essential part of an eVGT, it receives the command from the main ECU and controls the vane. An e-Actuator failure can cause an abrupt change in engine output and it may induce an accident. Therefore, it is required to detect anomalies in the e-Actuator in real time to prevent accidents. In this paper, an e-Actuator fault detection method using on-line parameter identification is proposed. To implement on-line fault detection algorithm, many constraints are considered. The test input and sampling rate are selected considering the constraints. And new recursive system identification algorithm is proposed which reduces the memory and MCU power dramatically. The relationship between the identified parameters and real elements such as gears, spring and motor are derived. The fault detection method using the relationship is proposed. The experiments with the real broken gears show the effectiveness of the proposed algorithm. It is expected that the real time fault detection is possible and it can improve the safety of eVGT system.

Key Words : e-Actuator, eVGT, Online system identification, Fault detection

1. 서 론

최근 높은 연비와 성능을 제공하는 고효율 디젤엔진에 대한 관심이 증가하고 있다. 고효율 디젤엔진 터보차저는 적은 크기로 같은 출력을 낼 수 있어 터보차저는 다운사이징 엔진에서도 크게 주목받고 있다[1]. 터보차저는 배기가스를 이용하여 압축된 공기를 엔진으로 공급하며 일반적으로 압축공기를 엔진으로 공급하는 압축기 휠, 엔진 배기가스를 이용해 압축기를 구동하는 터빈 휠, 압축공기 통로인 압축기 하우징, 배기가스 통로인 터빈하우징과 하중을 지지하는 베어링으로 구성된다[2]. 터보차저에서 압축기 압력이 너무 높아져 압축공기가 엔진으로 과도 공급되는 현상을 막기 위하여 초기에는 압력이 높아지면 압축공기가 별도의 통로로 빠져나가도록 하는 WGT(Waste Gate Turbo-charger)가 사용되었다[3]. 이후 자동차가 저속일 때는 배기유로를 축소시켜 빨라진 배기가스 속도를 터빈의 구동력을 높여 토크를 향상시키고, 고속주행에서는 배기유로를 확대해 출력을 높이는 가변 터보차저(VGT: Variable Geometry Turbo-charger)가 채용되었다[4]. eVGT(electronic VGT)는 배기유로를 전자식

으로 제어하는 최신 기술이며 마이크로프로세서를 이용한 정밀한 제어가 가능하여 엔진 성능 향상과 연료소비 및 배기가스 감소에 탁월한 성능을 나타낸다[5].

전자식 배기유로 제어기인 e-Actuator(electronic Actuator)는 엔진 ECU(Engine Control Unit)의 명령을 받아 배기유로를 제어하는 eVGT의 핵심부품으로 날개의 위치를 제어하기 위한 디지털 제어기, DC 모터와 스프링 및 여러 개의 기어가 결합된 구조를 가지며, 디지털 제어기는 MCU, CAN(Controller Area Network) 통신, PWM(Pulse Width Modulation) 통신 모듈, DC 모터 제어를 위한 모터 드라이버 및 홀(Hall)센서로 구성된다[5]. e-Actuator는 다수의 기계 부품과 전기 부품으로 이루어져 고장의 발생의 소지가 많으며, 고온의 엔진룸 내의 장착되므로 고장이 발생할 경우 이를 파악하기 힘들다. e-Actuator의 고장은 급격한 출력 변화를 유발하고 이로 인하여 사고의 위험성이 증가할 수 있다. 따라서 e-Actuator의 이상을 감지하여, 사고를 예방할 수 있는 실시간 오류 검출 기법의 연구가 필요하다[6].

실시간 오류 검출 기법은 고장에 의하여 발생하는 사고를 최소화 하는 기법으로써, 안전이 요구되는 많은 분야에 적용되고 있다. 오류 검출 기법으로 신호 모델 기반 방법과 공정 모델 기반 방법 그리고 지식 기반 방법이 많이 사용된다[7]. 신호 모델 기반 방법은 어떤 시스템에서 출력 신호만 측정 할 수 있는 경우에 적용하는 방법으로, 대역 통과 필터, 스펙트럼 분석, 최대 엔트로피 추정 3가지 방법이 있다[7]. 공정 모델 기반 방법은 작동장치와 센서가 포함되어 있는 시스템의 입력과 출력을 측정 할 수 있는 경우에 적용하는 방법으로, 출력 관측 기법, 패리티 방정식, 식별 및 매

* Dept. of Control and Robot Engineering, Chungbuk National University, Korea

** ATT Co. Asan city Chungnam, Korea

† Corresponding Author : Dept. of Control and Robot Engineering, Chungbuk National University, Korea

E-mail : chansp@chungbuk.ac.kr

Received : December 11, 2013; Accepted : February 24, 2014

개 변수 추정 3가지 방법이 있다[7]. 지식 기반 방법은 특성 값 또는 기능으로부터 오류를 검출 하는 방법으로, 오류가 발생에 따라 시스템 출력의 평균값과 분산의 편차를 확인하여 오류를 검출 하는 방법으로, 평균 및 분산 추정, 우도 - 비(likelihood-ratio) 검사, 실행-합(run-sum) 검사의 3가지 방법이 있다[7]. e-Actuator는 작동장치에 인가되는 전압을 내부 MCU 내에서 PWM을 이용하여 전압을 인가하기 때문에, 입력되는 전압을 측정 할 수 있으며, 출력은 홀센서로부터 e-Actuator의 모터각도를 측정 할 수 있는 시스템이다. 따라서 본 논문에서는 동적 시스템의 오류가 시스템의 물리적 매개변수(마찰, 질량, 저항, 관성 모멘트 등)에 투영되어 나타나는 공정 모델 기반 방법 중에서 식별 및 매개변수 추정을 통한 오류 검출 기법을 e-Actuator 이상 검출에 적용하였다.

식별 및 매개변수 추정 기법은 입력과 출력을 측정할 수 있는 시스템에서 시스템의 모델을 추정 할 수 있고, 추정한 시스템 모델은 시스템을 이루고 있는 변수들로 표현된다. 시스템에 오류가 발생 했을 경우, 물리적 변화에 의해 시스템 모델 역시 변화하게 되고, 그로부터 오류가 발생 했는지 여부를 알 수 있다[8]. 그러나 식별 및 매개변수 추정 기법을 이용하여 오류를 검출하기 위해서는, 시스템이 입력과 출력에 대해 관측가능이어야 하며, 정상상태의 시스템 모델을 저장할 수 있는 저장 공간이 필요하며, 정확한 시스템 모델링이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 실시간 동작이 요구되고 메모리 등 자원이 부족한 e-Actuator 환경에서 이 기법을 구현하기 위해 온라인 구조의 모델링 기법과 변수의 관측성을 최대화시키는 입력 선정기법을 제안하고 실제 구현된 시스템을 이용하여 그 타당성을 확인 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 정밀한 모터 제어 알고리즘의 구현을 위하여 DC 모터와 기어, 스프링의 특성을 포함한 전체 시스템 모델링기법을 소개한다. 3장에서 모델링 기법을 e-Actuator에서 구현하기 위하여 시스템 식별 방법을 나타내고, 고려할 5가지 제약조건과 이 제약조건을 고려한 입력신호 선정과 재귀형 시스템 식별 기법을 설계한다. 4장에서는 모델링으로 구한 매개변수 변화와 실제 e-Actuator 부품 고장과의 관계를 분석하고 이로부터 오류검출 방법을 제안한다. 5장에서는 제안한 기법의 구현과 이를 이용한 실험결과를 나타내고, 마지막 6장에 결론을 나타낸다.

2. e-Actuator 모델링 기법

2.1 e-Actuator 시스템의 구조

그림 1에 DC 모터, 4개의 기어 및 비틀림 스프링으로 구성되어 있는 e-Actuator의 구동부를 나타낸다. DC 모터는 존슨 모터사[9]의 최고속도 6,000RPM, 동작전압 14V인 모델을 사용한다. 작은 톱니(pinion) 기어는 DC 모터 축과 연결되어 있으며, 출력(output) 기어는 e-Actuator 벨브 축과 연결되어 있다. 두 개의 평(spur) 기어는 작은 톱니 기어와 출력 기어 사이에 연결되어 있고, 전체 기어 비는 50.91322이다. 비틀림 스프링은 출력 기어에 295도 비틀러서 연결되어 있으며, 스프링 상수는 0.88[Nmm/deg]이다.

그림 2는 ATmega32M1 MCU(Micro Controller Unit), 홀

센서 그리고 모터 드라이버로 구성되어 있는 e-Actuator의 제어부를 나타낸다. e-Actuator의 MCU는 차량의 메인 ECU로부터 기준입력명령을 CAN 통신 혹은 PWM 통신을 이용하여 받고 모터드라이버를 사용하여 DC 모터를 원하는 위치로 제어한다. 홀센서는 출력 기어의 축에 위치하며, e-Actuator 벨브의 각을 직접 측정한다. 사용하는 홀 센서는 SPI(Serial Peripheral Interface)버스를 이용하여 e-Actuator의 MCU와 연결되고 0.022도의 해상도를 가진다[10].

본 논문에서 구현한 e-Actuator는 그림 2의 제어부로 그림 1의 구동부의 DC모터의 입력전압을 제어하고, 구동부의 각도 변화를 홀 센서로 측정하면서 원하는 각도가 되도록 DC모터를 정밀 제어하는 시스템이다.

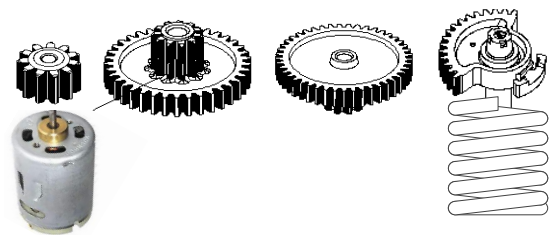


그림 1 e-Actuator 구동부
Fig. 1 e-Actuator driving module

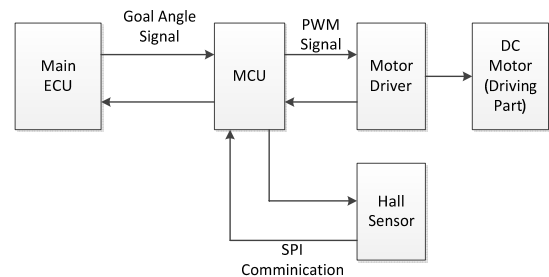


그림 2 e-Actuator 제어부
Fig. 2 e-Actuator control module

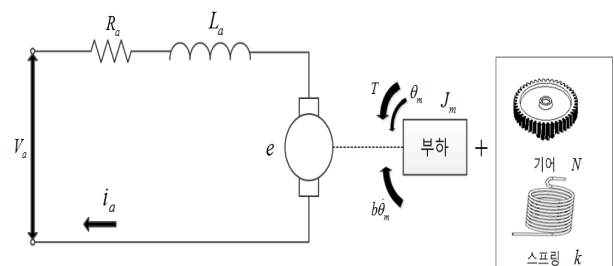


그림 3 e-Actuator 시스템 모델
Fig. 3 e-Actuator system model

2.2 수학적 모델링

e-Actuator는 모터와 부하를 포함한 시스템은 그림 3으로 모델링 되며, 일반적인 DC 모터의 전기자, 회전자 선형 모델에 기어와 스프링에 의한 영향이 포함된 e-Actuator 모델이다. 식(1)에 e-Actuator의 DC 모터 전기자 모델을 식(2)에 e-Actuator의 기어와 스프링이 포함된 회전자 모델을 나

타낸다. 여기서 L_a 는 모터 내부인덕턴스, R_a 는 모터 내부저항, K_e 는 모터 역기전력상수, J_m 은 모터 관성모멘트, b 는 기계적 점성마찰, K_m 는 속도상수, $\ddot{\theta}$ 는 각가속도, $\dot{\theta}$ 는 각속도, θ 는 각도를 나타내며, k 는 스프링상수, θ_s 는 스프링 초기 장착각도, N 는 기어 비, K_t 는 토크상수, v_a 는 전기자에 걸리는 전압, i_a 는 전기자에 흐르는 전류를 의미한다.

$$L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a + NK_e \dot{\theta} = v_a \quad (1)$$

$$NJ_m \ddot{\theta} + N\dot{\theta} + k(\theta + \theta_s) = K_t i_a \quad (2)$$

식(1), (2)에서 모터 내부 인덕턴스(L_a)는 매우 작으므로 무시하고 정리하면 식(3)의 e-Actuator 모델을 얻는다. 여기서

$$\text{매개변수 } \alpha_2, \alpha_1, \alpha_0 \text{는 } \alpha_2 = \frac{NR_a}{K_m K_t K_e} J_m,$$

$$\alpha_1 = \frac{R_a N}{K_m K_e K_t} (b + \frac{K_e K_t}{R_a}), \alpha_0 = \frac{R_a k}{K_m K_t K_e} \text{이다.}$$

$$\alpha_2 \ddot{\theta} + \alpha_1 \dot{\theta} + \alpha_0 (\theta + \theta_s) = v_a \quad (3)$$

e-Actuator 시스템 모델에는 L_a, R_a, K_e, K_m 등의 변수가 사용되지만, 이들 모두를 다루기 힘들므로 본 논문에서는 매개변수인 $\alpha_2, \alpha_1, \alpha_0$ 만을 고려한다[11]. 따라서 오류 판단도 매개변수 식별 기법으로 $\alpha_2, \alpha_1, \alpha_0$ 를 구하고 이들의 변화로부터 실제 시스템의 특성 변화를 유추한다.

3. 시스템 식별을 이용한 모델링

3.1 e-Actuator 식별 및 매개변수 추정 기법

시스템의 식별은 물리적 실제 시스템의 입력과 출력 자료를 사용하여 그 시스템의 수학적 모델을 식별하는 과정으로 과학과 공학 분야에서 시스템의 다양한 물리적 특성을 추정하는데 사용되는 기법이다. 본 논문에서는 알고 있는 입력에 대하여 출력을 측정하고, 이를 이용하여 매개변수를 식별하는 방법을 적용하였다. 즉, 식(3)으로부터 알고 있는 n 개의 입력 $v = (v_1, v_2, \dots, v_n)^T$ 에 대하여 각도 측정치 $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)^T$ 와 이를 샘플링 주기 Δ 로 수치 미분하여 각속도 $\dot{\theta} = (\frac{\theta_3 - \theta_2}{\Delta}, \frac{\theta_4 - \theta_3}{\Delta}, \dots, \frac{\theta_n - \theta_{n-1}}{\Delta})^T$, 각가속도 $\ddot{\theta} = (\frac{\theta_3 - 2\theta_2 + \theta_1}{\Delta^2}, \frac{\theta_4 - 2\theta_3 + \theta_2}{\Delta^2}, \dots, \frac{\theta_n - 2\theta_{n-1} + \theta_{n-2}}{\Delta^2})^T$ 를 구할 수 있으며 이 측정치를 원소로 가지는 $n \times 3$ 행렬을 H 라 정의하고 식(4)를 이용하여 매개변수 $x = (\alpha_2, \alpha_1, \alpha_0)^T$ 를 구할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\theta_3 - 2\theta_2 + \theta_1}{\Delta^2} & \frac{\theta_3 - \theta_2}{\Delta} & \theta_3 + \theta_s \\ \frac{\theta_4 - 2\theta_3 + \theta_2}{\Delta^2} & \frac{\theta_4 - \theta_3}{\Delta} & \theta_4 + \theta_s \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\theta_n - 2\theta_{n-1} + \theta_{n-2}}{\Delta^2} & \frac{\theta_n - \theta_{n-1}}{\Delta} & \theta_n + \theta_s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha_2 \\ \alpha_1 \\ \alpha_0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$v = [\ddot{\theta} \mid \dot{\theta} \mid \theta + \theta_s] x \equiv Hx$$

$n \geq 3$ 의 측정치에 대하여 최소자승법을 적용하면 식(5)와 같이 매개변수의 추정치를 얻을 수 있다.

$$\hat{x} = (H^T H)^{-1} H^T v \quad (5)$$

식(5)를 적용하기 위해서는 입력전압 v , 각도 θ , 각속도 $\dot{\theta}$, 각가속도 $\ddot{\theta}$ 를 측정하여야 하지만, e-Actuator에서는 θ 만 측정 할 수 있으므로 수치미분으로 각속도 $\dot{\theta}$, 각가속도 $\ddot{\theta}$ 를 구하여 식(5)에 적용해야한다[12]. 이에 따라 오차가 증폭되므로 이에 대한 고려가 필요하다.

식(4)에서 만약 샘플링 주기 Δ 가 1보다 매우 작은 값이라면, 그 때 Δ^2 은 0에 가까운 값이 된다. 그럴 경우 H 행렬이 특이행렬에 가까워 저서, 답을 찾기가 어려워진다. 그러나 오히려 샘플링 주기가 너무 작을 경우 각도 측정치의 변화가 거의 없게 되어서 $\theta_n - \theta_{n-1}$ 이 0에 가까운 값이 되어 이 경우 역시 H 행렬이 특이행렬에 가까워지게 된다. 따라서 이 두 가지를 만족하는 샘플링 주기 Δ 를 선정해야 한다. 또 한, 입력전압이 일정하면 e-Actuator는 일정한 각속도를 가지게 되고, 그때 각가속도는 0 이 된다. 즉, 식(4)에서 $\ddot{\theta} = (0, 0, \dots, 0)^T$ 이 되기 때문에 H 행렬은 특이행렬이 되어 해를 구하기 어렵다. 따라서 e-Actuator가 일정한 각속도를 가지지 않도록 입력 전압을 선정해야한다. 이를 포함한 구현의 제약조건과 해결 방법은 다음 절에서 자세히 설명한다.

3.2 e-Actuator 시스템의 제약조건

e-Actuator 시스템에서 식별 및 매개변수 추정 기법을 적용하기 위해서는 다음의 5가지 제약조건을 고려해야 한다.

1) 데드 존(Dead zone)

DC 모터가 일정 크기 이하의 전압에 대해서는 반응하지 않으며, 이를 고려하여 입력신호를 설정하여야 한다. 본 논문에서 사용한 존슨 모터사의 모터의 데드존은 0.6V이므로 0.6V 보다 큰 입력신호를 사용한다.

2) 수치 미분에 의한 각속도 및 각가속도 계산

각속도와 각가속도를 각도 측정치를 수치 미분하여 사용하므로 각도 측정치에 포함된 잡음에 영향을 많이 받는다. 본 논문에서는 잡음의 영향을 줄이기 위해서 10개의 샘플을 평균하는 이동평균(moving average)을 이용했다. 이는 10배의 샘플링 시간을 요구하므로 이를 고려하여 샘플링 주기를 선정해야 한다.

3) 역행렬 계산의 용이함 및 계산오차

식(5)를 이용하여 파라미터를 추정하는 경우 $(H^T H)$ 의 역행렬을 계산해야 한다. 역행렬 계산의 정확도는 행렬 $(H^T H)$ 의 조건계수(condition number)[13]에 영향을 받는다. 예를 들어 입력 전압이 일정하면 e-Actuator는 일정한 각속도를 가지게 되고 각가속도는 0이 된다. 식 (4)에서 각가속도 $\ddot{\theta} = (0, 0, \dots, 0)^T$ 에 의해 H 행렬은 특이행렬(singular matrix)이 되고 그로 인해 $(H^T H)$ 도 역시 특이행렬이 되어 역행렬을 구할 수 없다. 이를 해결하기 위하여 본 논문에서는 입

력의 변화가 크게 나타나는 사인과 입력을 사용한다. 또한 샘플링 주파수와 입력 사인파의 주기에 따라 행렬 ($H^T H$)의 조건계수가 크게 나타나 역행렬 계산에 오차가 증가할 수 있다. 본 논문에서 샘플링 주파수를 10KHz로 사인파는 4Hz의 주기를 갖도록 하여 이를 해결했다.

4) e-Actuator 동작 범위 제약

본 논문에서 고려한 e-Actuator는 기계적인 구조상 10°~90° 사이에서만 동작한다. 따라서 사인파 입력의 크기를 e-Actuator가 15°~85° 사이에서 동작하도록 선정한다.

5) MCU의 한정된 메모리와 처리속도

본 논문에서 고려한 ATmega32M1 MCU는 8비트, 내부 메모리는 2KB로 구성되어 있다[14]. 가격을 고려하면 대부분의 e-Actuator는 이와 비슷한 사양의 MCU로 구성될 것으로 판단된다. 일괄 처리형 매개변수 식별기법의 구현에서 입력 전압 v , 각도 θ , 각속도 $\dot{\theta}$, 각가속도 $\ddot{\theta}$ 은 각각 데이터 하나당 4Byte의 실수형 변수를 할당하며, 이 경우 n 개의 측정치에 대하여 식(5)를 구현하기 위하여 필요한 메모리 용량은 $16n(4 \times 4 \times n)$ Byte 이다.

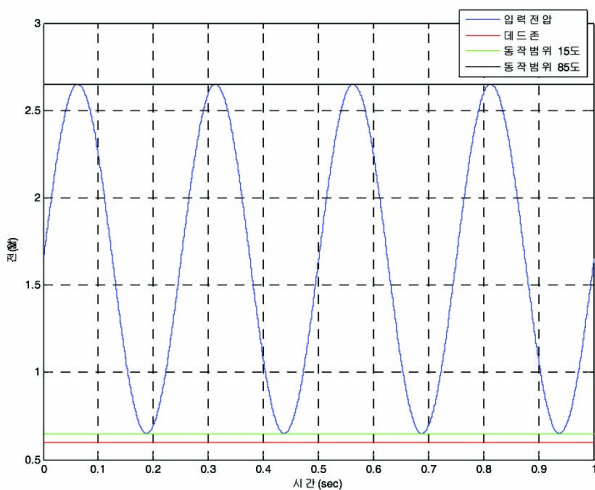


그림 4 제약조건을 고려하여 선정된 입력전압
Fig. 4 Selected input voltage considering the constraint

본 논문에서는 이상의 제약 조건을 모두 고려하여 그림 4와 같이 $1.65 + 1.0\sin(8\pi t)$ 로 입력 전압을 선정했다. 데드존을 회피하기 위하여 입력 전압의 최소 전압이 0.6V 이상 나오도록 바이어스 전압을 1.65V로 설정하였으며, 15°~85° 범위를 동작하는 4Hz의 주파수를 가진 사인파 전압을 설정했다.

3.3 재귀형 식별 및 매개변수 추정 기법

본 논문의 e-Actuator에서는 ATmega32M1을 MCU로 사용하므로, 이 MCU를 이용하여 온라인 식별 및 매개변수 추정 기법을 구현하기 위해서는 연산량과 메모리의 제약을 고려해야 한다. 식(5)를 사용한 일괄 처리 방식의 식별 및 매개변수 추정 기법으로 e-Actuator를 구현하기 위해서 필요한 연산량과 메모리는 다음과 같이 계산된다. n 개의 샘플

에 대하여, 각 샘플을 실수형 4Byte로 저장한다면 총 $4n \times 4$ Byte의 메모리가 필요하고 $H^T H$ 와 $H^T v_a$ 을 이루기 위한 각 성분이 저장될 공간 12×4 Byte와 $H^T H$ 의 역행렬에 행렬식과 각 성분이 저장될 공간 10×4 Byte를 포함하여 총 $(4n+22) \times 4$ Byte의 저장 공간이 필요하다. 연산량은 $H^T H$ 의 역행렬에 $(54n+21)$ 회의 곱셈과 $(60n-36)$ 회의 덧셈이 소요되며, $H^T v_a$ 에 대하여 $3n$ 회의 곱셈과 $(4n-3)$ 회의 덧셈이 소요되며, $(H^T H)^{-1}$ 와 $H^T v_a$ 사이의 행렬 곱에서 9회의 곱셈과 6회의 덧셈이 발생하여 총 $(57n+30)$ 의 곱셈과 $(64n-33)$ 회의 덧셈이 소요된다.

본 논문에서는 메모리와 연산량의 제약을 해결하기 위해서 재귀형 식별 및 매개변수 추정 기법을 제안한다. 제안한 재귀형 식별 및 매개변수 추정 기법은 식(6)과 식(7)을 이용하여 구현할 수 있다. 제안한 방법은 매번 새로운 측정치에 대하여 변화되는 부분만 추가하는 구조이므로 메모리와 연산량을 대폭 감소시킬 수 있다. 만약 $(n-1)$ 번째까지 측정치에 대하여 이미 구해진 $H^T H$ 와 $H^T v_a$ 가 있다면 n 번째 측정치 $v_{an}, \theta_n, \dot{\theta}_n, \ddot{\theta}_n$ 에 대한 변화 값을 더해주면 된다. 예를 들면 $H^T v_a$ 의 첫 번째 성분은 $\sum_{i=1}^n \ddot{\theta}_i v_{ai} = \ddot{\theta}_n v_{an} + \sum_{i=1}^{n-1} \ddot{\theta}_i v_{ai}$ 을 이용하여 계산할 수 있다. 이때 $\sum_{i=1}^{n-1} \ddot{\theta}_i v_{ai}$ 는 $(n-1)$ 번째까지 측정치로 계산되어 있는 값이므로 1개의 곱셈과 1개의 덧셈으로 계산할 수 있다. 이는 n 개의 곱셈과 $n-1$ 개의 덧셈으로 계산하던 이전의 일괄 처리 기법에 비하여 크게 연산량을 줄일 수 있음을 나타낸다. 또한 메모리 사용량도 $n \times 4$ Byte에서 2×4 Byte로 대폭 줄일 수 있음을 알 수 있다.

$$H^T H = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n \ddot{\theta}_i^2 & \sum_{i=1}^n \ddot{\theta}_i \dot{\theta}_i & \sum_{i=1}^n \ddot{\theta}_i (\theta_i + \theta_s) \\ \sum_{i=1}^n \dot{\theta}_i \ddot{\theta}_i & \sum_{i=1}^n \dot{\theta}_i^2 & \sum_{i=1}^n \dot{\theta}_i (\theta_i + \theta_s) \\ \sum_{i=1}^n (\theta_i + \theta_s) \ddot{\theta}_i & \sum_{i=1}^n (\theta_i + \theta_s) \dot{\theta}_i & \sum_{i=1}^n (\theta_i + \theta_s)^2 \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$H^T v_a = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n \ddot{\theta}_i v_{ai} \\ \sum_{i=1}^n \dot{\theta}_i v_{ai} \\ \sum_{i=1}^n (\theta_i + \theta_s) v_{ai} \end{pmatrix} \quad (7)$$

식(6)의 행렬 $H^T H$ 과 식(7)의 벡터 $H^T v_a$ 의 모든 성분에 대하여 필요한 연산량과 메모리 사용량은 다음과 같이 계산할 수 있다. 메모리는 측정치의 개수는 $H^T H$ 의 9개, $H^T v_a$ 의 3개 총 12개의 성분에 대하여 현재 값과 직전 값의 저장과 4개의 현재 측정치 $v_{an}, \theta_n, \dot{\theta}_n, \ddot{\theta}_n$ 의 저장을 위한 28×4 Byte와 역행렬 계산을 위한 저장 공간 10×4 Byte의 합인 38×4 Byte가 사용된다. 이는 시간과 측정치의 개수에 상관없이 항상 일정한 값으로 $(4n+22) \times 4$ Byte인 일괄 처리 방법에 비하여 월등한 차이를 나타내며 표 1에서 확인할 수 있다.

제안한 재귀형 기법의 연산량은 측정치의 개수에 상관없

이 총 66회의 곱셈과 94회의 덧셈이 수행된다. 이는 역행렬 $(H^T H)^{-1}$ 을 구하기 위한 곱셈 54회, 덧셈 84회와 $H^T v_a$ 를 구하기 위하여 곱셈 3회 덧셈 4회, $(H^T H)^{-1}$ 와 $H^T v_a$ 사이의 행렬 곱에 곱셈 9회과 덧셈 6회를 수행하기 때문이다. 이는 일괄 처리 기법에 비하여 월등히 적은 값이며 표 1에서 확인할 수 있다. 특히 사용한 MCU의 내장 SRAM이 2KByte이므로 최대 측정치는 500개 정도이나 실제 구현에서 사용되는 프로그램과 데이터 영역을 제외하면 반 이하로 줄어든다.

표 1에서 제안한 재귀형 식별 및 매개변수 추정 기법이 기존의 일괄 처리형 식별 및 매개변수 추정 기법보다 샘플의 개수가 2개 이상이면 연산량이 유리해지고, 10개 이상이면 메모리 사용면에서도 유리함을 알 수 있다. 특히 측정치의 개수에 무관하게 일정한 연산량과 메모리 사용량을 가지므로 저가의 MCU를 이용하여 효율적인 구현이 가능하다.

표 1 일괄 처리형과 재귀형의 연산량과 메모리 사용량 비교

Table 1 compare Batch form with recursive form about memory usage and computational complexity

	일괄처리	재귀형
덧셈	$64n - 33$	66
곱셈	$57n + 30$	94
메모리(Byte)	$(4n+22) \times 4$	38×4

4. e-Actuator 소자 이상 판단 기법

eVGT는 고온의 차량 엔진 룸에 장착되므로 고장의 확률이 높으며, 고장이 발생하는 경우 이를 쉽게 파악하기 힘들므로 eVGT의 고장을 빠른 시간에 검출하고 보고하는 기법이 필요하다. 본 논문에서는 eVGT의 많은 고장 원인들 중에서 e-Actuator와 직접 연관이 있는 기어, 스프링 및 DC 모터만 고려하여 이상을 검출하는 기법을 제안한다.

앞 절의 식별 및 매개변수 추정 기법에 의하여 구해지는 매개변수 추정치 $\hat{x} = (\alpha_2, \alpha_1, \alpha_0)^T$ 는 e-Actuator 구동부의 DC 모터, 기어 그리고 스프링의 특성이 반영되어 나타난다. 여기서 모터와 관련된 매개변수를 $\beta = \frac{R_a}{K_m K_t K_e}$ 로 두면 $\alpha_2, \alpha_1, \alpha_0$ 는 다음과 같이 간략히 나타낼 수 있다.

$$\alpha_2 = N J_m \beta, \quad \alpha_1 = N(\beta b + \frac{1}{K_m}), \quad \alpha_0 = k \beta \tag{8}$$

식(8)에서 α_2 는 모터와 기어에만 연관 있는 매개변수이고, α_1 은 기어와 모터 그리고 기계적 점성 마찰에 연관 있는 매개변수이며, α_0 는 비틀림 스프링과 모터가 연관되어 있는 매개변수이다. 본 논문에서는 매개변수 추정치의 변화로부터 e-Actuator의 오류를 판별하는 기법을 제시한다.

처음 e-Actuator가 조립될 때 시험을 통하여 매개변수의 기준 값을 결정하고, 이로부터 각 매개변수 추정치가 존재해야 하는 범위인 임계치를 설정할 수 있다. 임계치는 3개의 매개변수에 대하여 최대값($T_{Mi}, i=0,1,2$)과 최소값($T_{mi}, i=0,1,2$)으로

정의하며 이를 EEPROM(Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory)에 저장해 둔다. 따라서, 이후 e-Actuator가 동작 할 때 변수 식별 기법을 이용하여 시스템 매개변수를 결정하고, 구해진 매개변수 추정치가 $T_{mi} < \alpha_i < T_{Mi}, i=0,1,2$ 의 범위 안에 있으면 정상상태라 판단하고, 이 범위를 벗어나면 오류로 판단한다. 예를 들어, 식(8)에서 만약 모터에 문제가 있을 경우, 모든 시스템 매개변수 $\alpha_2, \alpha_1, \alpha_0$ 가 영향을 받는다. 만약 기어에 문제가 있으며 두 개의 매개변수 α_2, α_1 가 영향을 받고, 스프링에 문제가 있으면 오직 α_0 의 매개변수만 영향을 받음을 알 수 있다. 이와 같은 방법으로 추정된 매개변수를 이용하여 오류를 판별할 수 있으며 표 2에 자세히 나타냈다.

표 2 e-Actuator 오류 판별 알고리즘

Table 2 e-Actuator fault detection algorithm

α_2	α_1	α_0	오류 판정
정상	정상	정상	정상 상태
정상	정상	오류	스프링 이상
정상	오류	정상	기계적 점성 마찰 이상
정상	오류	오류	스프링과 기계적 점성 마찰 이상
오류	정상	정상	관성 모멘트 이상
오류	정상	오류	관성 모멘트와 스프링 이상
오류	오류	정상	기어 이상
오류	오류	오류	모터 이상

5. 시험 및 검증

제안된 기법의 성능을 시험하기 위해, 표 2에서 나타난 여러 오류 중에서 재현하기 쉬운 기어 파손에 대한 실험을 진행 하였다. 그림 5과 같이 두 개의 평기어의 톱니를 파손시켜 e-Actuator 내부에 장착하고 재귀형 식별 및 매개변수 추정 기법으로 구해진 추정치를 이용한 오류 판정기법의 타당성을 확인하였다.

그림 6에 파손된 기어를 장착하고 식별 및 매개변수 추정 기법을 통해 구한 매개변수 추정치($\alpha_2, \alpha_1, \alpha_0$)를 나타내었다. 그림 6의 파란색 선은 정상 상태의 e-Actuator에 대한 매개변수 추정치를 나타내고, 붉은색 선은 첫 번째 평기어만 파손된 경우의 매개변수 추정치를, 녹색 선은 두 번째 평기어만 파손된 경우의 매개변수 추정치를 나타낸다. 매개변수는 처음 1,000개의 샘플을 수집한 후 총 7,000개의 샘플까지 10개 단위로 샘플의 수를 증가시키면서 추정하였다.

그림 6(a)에 매개변수 α_2 의 추정치를 나타내었다. 그림에서 기어의 파손에 대하여 α_2 의 추정치가 큰 차이를 나타낼 수 있다. 이는 제시한 기법을 이용하여 충분히 오류를 검출할 수 있음을 나타낸다. 그림에서 기어의 위치에 상관없이 한 개의 기어가 파손된 경우 비슷한 결과를 나타내며 두 개의 기어가 모두 파손된 경우는 큰 차이를 나타내었

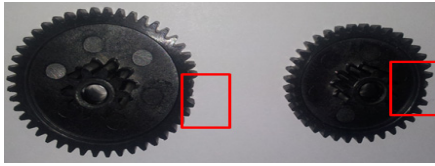


그림 5 파손된 e-Actuator 평 기어
Fig. 5 Broken spur gear of e-Actuator

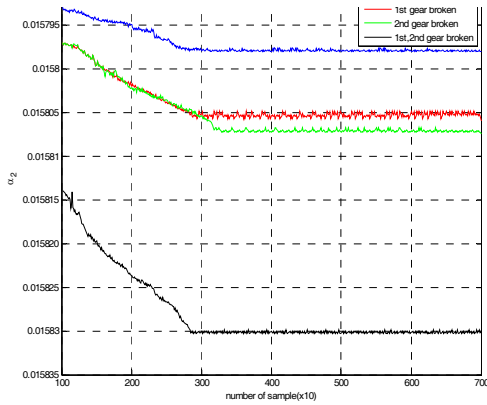


그림 6(a) α_2 추정치
Fig. 6(a) α_2 estimation value

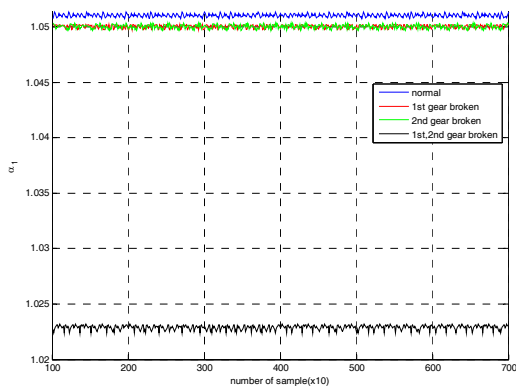


그림 6(b) α_1 추정치
Fig. 6(b) α_1 estimation value

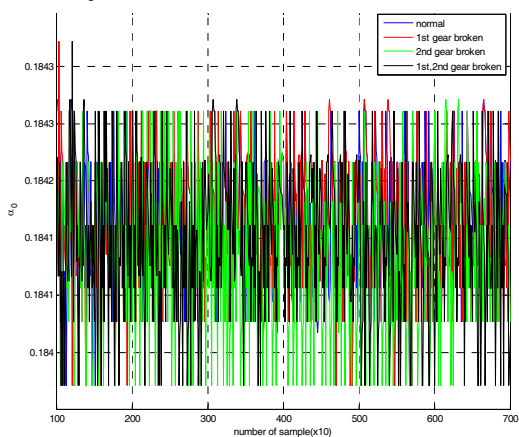


그림 6(c) α_0 추정치
Fig. 6(c) α_0 estimation value

다. 측정치의 개수가 증가함에 따라 일정한 값으로 수렴하며 대략 3,000샘플 이후에 수렴함을 확인할 수 있다. 또한 수렴된 값을 이용하여 임계치를 쉽게 결정할 수 있다. 그림 6(b)의 매개변수 α_1 의 추정치를 이용하여도 충분히 오류를 검출할 수 있음을 알 수 있다. 이 경우는 두 개의 기어가 모두 파손된 경우에 현격한 차이를 나타내며, 한 개의 기어만 파손된 경우에도 충분히 구분할 수 있음을 볼 수 있다. 그러나 그림 6(c)의 α_0 는 표 2에서 나타나듯 기어의 영향을 받지 않으므로 그림에서 정상 상태와 기어가 파손된 경우의 차를 확인할 수 없다.

실험에서 샘플링 주기는 0.1msec로 총 7,000개의 샘플을 처리하였다. 그러나 실제 적용에서는 시간이 짧을수록 유리하다. 그림 6(a)로부터 3,000샘플 정도에 수렴된 추정치를 얻을 수 있으며 이는 0.3초 이내로 기어 파손 오류가 검출이 가능함을 나타낸다. 실제 적용을 위한 임계치와 오류검출에 사용될 샘플의 수는 좀 더 다양한 시험을 통하여 결정되어야 한다.

6. 결 론

본 논문에서는 식별 및 매개변수 추정 기법을 이용한 실시간 e-Actuator 오류 검출 기법을 제안했다. e-Actuator 모델은 DC 모터의 전기자 모델에 기어와 스프링이 포함된 회전자 모델이 결합된 형태로 표현하고 최종적으로는 매개변수를 이용하여 나타냈다. 매개변수를 식별하기 위하여 최소 자승법을 이용한 일괄 처리형 식별 및 매개변수 추정 기법을 소개하고, e-Actuator의 제약조건으로 구현이 어려움을 확인했다. e-Actuator의 모델과 구현에서 발생할 수 있는 데드존, 수치미분, 역행렬 계산오차, 동작범위 및 MCU의 5 가지 제약조건을 고려하여 입력신호의 범위, 주기 및 샘플링 주파수를 결정했다. 또한 MCU의 연산량과 메모리 제약을 고려하여 재귀형 식별 및 매개변수 추정 기법을 제안하여 일괄 처리형 식별 및 매개변수 추정 기법에 비하여 메모리와 연산량을 크게 줄일 수 있다. 추가로 식별 및 매개변수 추정 기법을 이용하여 구해진 매개변수와 실제 e-Actuator 모델을 고려하여 오류를 검출하는 기법을 제안했다. 제안된 기법을 검증하기 위해 실제 e-Actuator 내부의 2개의 평기어를 파손하여 시험을 수행했다. 시험 결과 제안한 방법을 이용하여 0.3초 이내에 충분히 e-Actuator의 오류 발생 여부를 판단 할 수 있었다. 이 결과는 eVGT에 적용되어 안전성과 신뢰도의 향상에 도움을 줄 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 지식 경제부의 첫걸음부품소재기술개발 사업의 지원을 받아 수행 된 연구임

References

[1] Hiroshi Uchida, "Trend of Turbocharging Technologies", Special issue turbocharging technologies R&D review

of Toyota CRDL. Vol 41 No.3.

- [2] Wikipidia, the free encyclopedia, "Turbocharger".
- [3] Klaus Heim, "Existing and future demands on the turbocharging of modern large two-stroke diesel engines", the 8th Supercharging conference, 1-2 October 2002, Dresden.
- [4] Hawley J., Wallace F., Cox A., Horrocks R. and Bird G. "Variable geometry turbocharging for lower emissions and improved torque characteristics." Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers; 1999; 213, 2; ProQuest Science Journals page. 145.
- [5] Inhae Cho, Jaegoo Kim, Kitae Park, Hyungtae Moon, "Study on the position control of e-Actuator for e-VGT", The Korean Society of Automotive Engineers, 2010.11
- [6] Dubravko Miljkovic "Fault Detection Methods: A Literature Survey", IEEE MIPRO, 2011 Proceedings of the 34th International Convention.
- [7] Silvio Simani, Cesare Fantuzzi and Ron J.Patton "Model-based Fault Diagnosis in Dynamic Systems Using Identification Techniques", Springer, 2003.
- [8] Manlan Liu, Xu Yang, Shumei Cui "Online Fault Detection and Diagnosis of Permanent-magnetic DC Motor", IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Harbin, China, 2008.9.
- [9] Johnson electric, <http://www.johnsonelectric.com>
- [10] Melexis, <http://www.melexis.com>
- [11] Jungi Park, Youngcheol Shin, Heungsik Lee, Tea-ho Kim, Chansik Park "e-Actuator Online Modeling using System Identification Method", The Korea Insitute of Military Science and Technology, 2013.7.
- [12] Dongsu Kwon, Jung Kim, Jungmyun Bae, "DC Motor System Identification", KAIST Mechanical Engineering Experiment Part 4.
- [13] Elliott Ward Cheney, David Kincaid. "Numerical Mathematics and Computing 6th edition", ThomsonLearning, 2007.08.
- [14] Atmel.Co.Ltd, <http://www.atmel.com>

저 자 소 개



박준기 (朴俊起)

2013년 2월 충북대학교 전자공학과 졸업. 2013년 3월~현재 충북대학교 제어로봇공학과 석사과정. 관심분야는 정밀제어, 관성항법, 자율주행.

Tel : 043-261-3259

E-mail : adol3212@cbnu.ac.kr



김태호 (金太鎬)

2004년 2월 충주대학교 졸업. 2006년 2월 충북대학교 제어로봇공학과 석사. 현재 (주)ATT 재직중. 관심분야는 정밀제어, 차량용 전장품 설계. eVGT

Tel : 043-261-3259

E-mail : maxkth@cbnu.ac.kr



이흥식 (李興植)

1990년 경기과학기술대 졸업. 현재 (주)ATT 부설연구소 연구소장 재직중. 관심분야는 차량용 전장품 설계, eVGT

Tel : 041-533-4528

E-mail : hslee@attco.kr



박찬식 (朴贊植)

1984년 서울대학교 제어계측공학과 졸업. 1986년 동 대학원 석사. 1997년 동 대학원 박사. 1987년~1997년 삼성전자 연구원. 1997년~현재 충북대학교 교수. 관심분야는 GNSS, PNS, SDR, 미지정수 결정 알고리즘, 오차해석

Tel : 043-261-3259

E-mail : chansp@cbnu.ac.kr