

무인 ATV의 종 방향 제어를 위한 CAN 기반 분산형 시스템의 고장감지 및 진단

Fault Detection and Diagnosis of CAN-Based Distributed Systems for Longitudinal Control of All-Terrain Vehicle(ATV)

김 순 태, 송 봉 섭*, 홍 석 교
(Soontae Kim, Bongsob Song, and Suk-Kyo Hong)

Abstract : This paper presents the fault detection and diagnosis(FDD) algorithm to enhance reliability of a longitudinal controller for an autonomous All-Terrain Vehicle(ATV). The FDD is designed to monitor and identify faults which may occur in distributed hardware used for longitudinal control, e.g., DSPs, CAN, sensors, and actuators. The proposed FDD is an integrated approach of decentralized and centralized FDD. While the former is processed in a DSP and suitable to detect faults in a single hardware, it is sensitive to noise and disturbance. On the other hand, the latter is performed via communication and it detects and diagnoses faults through analyzing concurrent performances of multiple hardware modules, but it is limited to isolate faults specifically in terms of components in the single hardware. To compensate for disadvantages of each FDD approach, two layered structure including both decentralized and centralized FDD is proposed and it allows us to make more robust fault detection and more specific fault isolation. The effectiveness of the proposed method will be validated experimentally.

Keywords : fault detection, fault diagnosis, All-Terrain Vehicle(ATV), distributed system, CAN(Controller Area Network)

NOMENCLATURE

v	Longitudinal velocity of ATV
v_{des}	Desired longitudinal velocity
v_{GPS}	Longitudinal velocity measured by GPS
J_e	Moment of inertia of engine
J_w	Moment of inertia of axle and wheel
F_r	Rolling resistance force
F_a	Aerodynamic drag force
μ	Rolling resistance coefficient
C_a	Aerodynamic drag coefficient
m	Total weight of ATV
T_b, T_e	Brake and engine torque
ω_w, ω_e	Angular velocity of wheel and engine
R_g	Effective gear ratio
h	Effective wheel radius
α, β	Angle of throttle and brake control motor
$\omega_\alpha, \omega_\beta$	Angular velocity of α and β
V_{tb}, V_{bt}	Input DC voltage to throttle and brake motor
I_{tb}, I_{bt}	Input DC current to throttle and brake motor
K_E	Back-EMF constant of DC motor
R_a	Armature resistance of DC motor
V_{td}, V_{bd}	Input DC voltage to throttle and brake motor driver
D_{ti}	Input PWM duty ratio of throttle motor driver
D_{to}	Output PWM duty ratio of throttle motor driver
D_{bi}	Input PWM duty ratio of brake motor driver
D_{bo}	Output PWM duty ratio of brake motor driver

I. 서론

무인 지능형 시스템을 개발하기 위한 필수 요건인 안전성과 신뢰성 확보를 위하여 시스템에서 발생할 수 있는 고장을 감지하고 진단하는 FDD(Fault Detection and Diagnosis)에 관한 연구는 차량, 산업용 로봇, 항공기에 이르기 까지 다양한 분야에 걸쳐 활발히 연구가 진행되어 왔다[1-4]. 특히 전기/전자, IT기술의 눈부신 발전에 힘입어 시스템 규모가 확장되고 복잡해짐에 따라 발생할 수 있는 고장요소가 늘어나게 되며, 이에 따른 복잡한 분산 시스템에 대한 FDD의 연구가 지속적으로 요구되고 있다.

기존의 FDD에 관한 연구동향을 살펴보면, 하드웨어의 공칭모델에서 추정되는 상태와 실제적으로 측정된 상태를 비교하여 그 차이를 분석하는 방법이 많은 비중을 차지하고 있다[5,6]. 이 연구들은 하드웨어의 내부 변수 혹은 동작 출력 상태를 대상으로 하여 관측기나 필터, 또는 패리티(parity) 함수를 이용하여 추정치를 계산하고, 이에 따른 실측치의 적합성을 판별함으로써 고장을 감지한다[7-9]. 여기서 실측치의 적합성 여부는 추정치와의 차이를 설정된 한계값(threshold)과 비교함으로써 판단되는데, 한계값을 설정하는 방법에 대해서는 활발히 연구되고 있는 분야이다. 예를 들어서, 선형행렬부 등식을 이용한 시스템의 안정성 분석에 근거하여 상태에 따라 유동적으로 계산하거나[10], 실험적 방법으로 1차 한계값을 설정한 후 이를 초과한 경우에 대해 다시 확률적으로 분석하기 위한 2차 한계값을 설정하여 적용하는 방법[11] 등이 있다. 일반적으로 FDD의 성능은 모델추정치와 실제 측정치의 차이를 감지하기 위한 한계값의 적절성에 의존하지만 실제 시스템과 추정모델 사이에는 비선형성과 잡음으로 인한 불확실성이 존재하며, 이를 실제 고장과 구별하여 신뢰성과 강인성(robustness)을 확보하는 동시에 판단의 민감성(sensitivity)을 보장하는 것이 FDD의 주요 연구 내용이 되어왔다[11].

대표적인 분산시스템 중 하나인 차량 시스템의 경우 다양

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2008. 4. 15., 채택확정 : 2008. 7. 8.

김순태, 홍석교 : 아주대학교 전자공학과

(saxomaster@ajou.ac.kr/skhong@ajou.ac.kr)

송봉섭 : 아주대학교 기계공학과(bsong@ajou.ac.kr)

※ 본 연구는 한국과학재단 특정기초연구 R01-2006-000-11373-0 지원으로 수행되었음.

한 하드웨어가 CAN을 통하여 연결되어 있으며 모듈 별로 확장이 가능하도록 설계가 되어 고려해야 할 고장요소가 증가됨에 따라 FDD를 위한 대상 정의와 진단 기준 또한 복잡해진다. 차량을 위한 기존의 FDD를 적용하는 방법을 크게 대상 측면에 따라 두 가지로 구분할 수 있는데, 첫째로 모터 [12,13], 스로틀 및 브레이크 밸브시스템[5,14], 센서[15] 등과 같이 개별 하드웨어에 대하여 독립적으로 고장을 진단하는 경우와, 둘째로는 종 방향 제어 또는 횡 방향 제어와 같이 전체 차량시스템을 대상으로 제어수행 성능을 분석하여 하드웨어에서 출력되는 변수의 적합성을 판단함으로써 진단하는 경우로 나눌 수 있다[1,18]. 각 하드웨어를 독립적으로 진단하는 경우는 후자에 비하여 수학적 모델 추정이 간단하여 즉각적인 고장감지와 세부적인 원인진단이 가능하다. 그러나 단일 모델과 한계값 설정에 의존한 고장감지와 진단은 외부 잡음 및 시스템의 불확실성에도 민감하게 반응하여 오감지(false alarm)를 할 수 있기 때문에 강인성이 고려되어야 할 필요가 있다[11,17]. 전체 차량 모델을 대상으로 한 후자의 방법은 제어 모델을 기반으로 여러 하드웨어의 상태를 동시 분석하고 고장을 진단한다는 점에서 좀 더 강인성이 고려된다[5]. 하지만 세부적인 고장인자를 인식하고 분류하기에는 한계가 있다. 따라서 개별 하드웨어를 대상으로 한 FDD로서 세부적인 고장감지와 진단을 가능하게 하는 동시에 전체 시스템의 성능을 고려한 FDD를 통하여 이를 종합적으로 평가함으로써 강인성을 확보할 수 있을 것으로 기대되지만 이러한 통합적 접근 방법을 이용한 연구를 기존의 문헌에서 거의 찾아볼 수가 없다.

본 논문은 무인 ATV의 종 방향 주행 제어를 위하여 구성된 CAN 기반의 분산형 제어시스템의 특성을 활용하여, 위에서 언급한 개별 하드웨어에 대한 고장진단 기법과 전체 종 방향 제어모델에 근거한 고장진단 기법을 동시에 고려한 통합 FDD 방법을 제안하고자 한다. 다시 말해서 다 개체 DSP(Digital Signal Processor)에 하드웨어를 각각 분배하고 연산을 분산시켜 제어시스템을 구성하였으며 이에 따라 자신에 연결된 개별 하드웨어에 대해 각 DSP에서 직접적으로 FDD를 담당하도록 하였다. 이와 동시에 종 방향 제어가 설계되어 있는 DSP에서는 CAN을 통하여 각 DSP로부터 수신된 정보를 기반으로 종 방향 제어모델에 근거한 FDD를 수행하도록 하였다. 더 나아가 각 FDD를 통하여 감지된 고장요소들을 관련 하드웨어 별로 구분하고 종합한 후 시스템적으로 증상을 재분석하여 최종적으로 고장을 진단하는 통합 FDD 방법을 제시한다. 통합 FDD를 통하여 이중적 고장감시 구조를 마련함으로써 고장진단의 강인성과 안전성을 높였으며 발생한 고장에 대한 더욱 세부적인 분류를 가능하게 하였다.

이 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서 ATV의 종 방향 제어시스템의 하드웨어 구성과 이에 따른 고장의 감지대상 및 진단 방법을 분류하고, III장에서는 분류된 각각의 FDD 방법에 대하여 구체적인 감지 및 진단 방법을 제시한다. IV장에서는 실험을 통하여 제안된 방법의 유용성을 보이고 마지막으로 V장에서 결론과 향후 과제를 제시함으로써 이 논문의 끝을 맺는다.

II. 시스템 구성

1. 분산형 하드웨어 구성

무인 ATV의 효율적인 종 방향 제어를 위하여 상용 ATV에 다양한 센서와 스로틀 및 브레이크 액츄에이터를 장착하여 그림 1과 같이 하드웨어를 구성하였다. 먼저 ATV의 엔진 회전속도와 바퀴 회전속도를 측정하기 위한 엔코더가 장착되었고, ATV 전방의 장애물을 감지하기 위한 레이저 스캐너(laser scanner)가 장착되었다. 또한, 차체의 움직임 측정을 위한 IMU와 ATV의 위치, 속도 및 가속도를 측정하기 위한 GPS가 장착되었다. 스로틀 및 브레이크를 제어하기 위한 DC모터에는 각 모터의 회전각을 측정하기 위한 절대 위치값 출력 방식의 엔코더를 장착하였다.

연결된 각 센서의 정보를 수집하고 융합하여 ATV의 동작을 실제적으로 제어하기 위한 시스템은 그림 2에 나타난 바와 같이 7개의 DSP와 CAN을 통하여 분산화 되었다. 중앙 집중 제어시스템의 경우 프로세서의 부하가 증가하면 계산의 효율성이 저하될 뿐만 아니라 데이터 전송에 있어 데이터가 손실될 가능성이 크다. 분산형 제어시스템을 통하여 이러한 문제들을 줄일 뿐만 아니라 각각의 센서와 연결되어 있는 DSP를 모듈화시킴으로써 디버깅(debugging), 시스템의 교체 및 확장에 용이할 수 있도록 하였다.

각각의 DSP가 CAN을 통하여 송/수신하는 정보를 보면 우

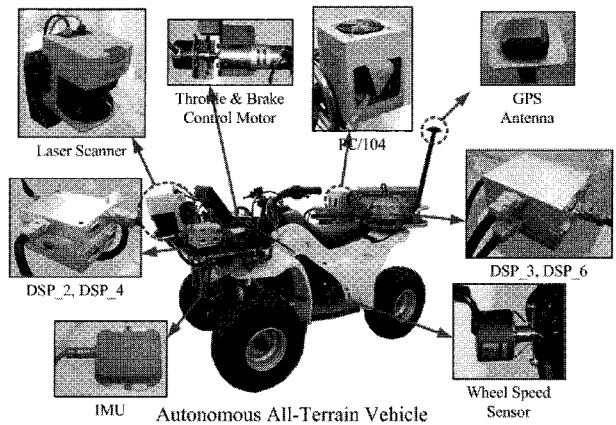


그림 1. 무인 ATV의 하드웨어 구성.

Fig. 1. Hardware layout for autonomous ATV.

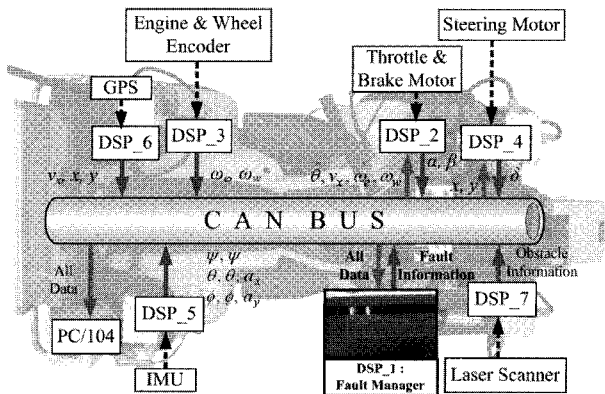


그림 2. CAN을 통한 DSP 간의 데이터 통신구조.

Fig. 2. Schematics of data communication among DSPs via CAN.

선 DSP 3에서는 회전 엔코더를 이용해 측정된 ω_e 와 ω_w 를 DSP 5에서는 IMU(Inertial Measurement Unit)로부터 획득한 3축 자세 정보($a_x, a_y, a_z, \dot{\theta}, \dot{\phi}, \dot{\psi}$), 그리고 DSP 6에서는 GPS에서 수신한 절대위치(x, y)와 v 를 CAN 버스에 송신한다. DSP 7에서는 레이저 스캐너를 이용하여 전방의 장애물을 감지하고 CAN을 통하여 전송하며, 종 방향 제어가 설계되어 있는 DSP 2에서는 CAN 버스를 통해 공유되는 정보를 선택적으로 수신하여, ATV의 속도제어를 위해 필요한 α, β 를 계산한다. 그리고 DSP 1에는 하드웨어에 대한 고장진단을 목적으로 모든 CAN 정보를 종합적으로 수집하고 관리하는 고장관리자(fault manager)가 설계되어 있다. 끝으로, PC/104는 CAN 버스를 통해 공유되는 모든 데이터를 실시간으로 수집하여 저장하고 모니터링 한다.

2. FDD의 대상

고장감지와 진단을 위해서는 먼저 각 하드웨어 및 시스템의 연결 상태에 따라 발생할 수 있는 고장상태를 예측하여 진단대상을 정의하는 일이 선행되어야 한다[5]. 그림 2에 나타난 각 하드웨어와 담당 프로세서 및 CAN의 고장감지와 진단을 위해 필수적으로 고려해야 할 대상을 선정하여 표 1에 나타내었으며, 각 고장감지와 진단 대상들이 포함된 DSP 2, 3, 6과 고장관리자가 설계되어 있는 DSP1에서 FDD 알고리즘을 중점적으로 수행하게 한다. 표 1에 나타난 대상 이외에도 FDD의 안전성 확보를 위해서 가장 기본적으로 전제되어야 할 각 DSP의 전원과 CAN의 활성화 상태를 DSP 1에서 감시하도록 하였고, 각 센서들의 전원공급 상태를 연결된 DSP에서 추가적으로 감시하도록 하였다. 본 논문에서 다루는 알고리즘은 표 1에 나타난 대상을 중심으로 전개되며, 본 논문에서는 종 방향 제어에 개입하지 않는 DSP 4, 5, 7과 이에 관계된 하드웨어를 고장감지와 진단의 대상에서 제외한다.

3. FDD 방법의 분류

본 연구에서는 각 하드웨어의 고장감지 및 진단을 위하여 정의된 표 1의 대상에 있어 각 하드웨어의 개별적인 특성을 이용하여 분석함과 동시에 전체 차량 제어시스템의 성능에 기초하여 분석하는 방법을 이중적으로 사용한다. 이를 위해서는 먼저 시스템의 구조와 특성을 고려하여 각 FDD 방법을 정의함으로써 알고리즘이 효과적으로 수행될 수 있도록 설계해야 한다. 따라서 분산시스템의 특수성을 활용하여 다

표 1. 고장감지 및 진단 대상.

Table 1. Hardware set for fault detection and diagnosis.

Processor	Hardware	Target for FDD	Variables for FDD
DSP 2	Throttle actuator	DC motor	V_{ti}
		encoder	α
		motor driver	D_{to}
	Brake actuator	DC motor	V_{bi}
		encoder	β
		motor driver	D_{bo}
Communication	CAN	$\Delta T_w, \Delta T_{GPS}$	
DSP 3	Speed sensor	wheel speed encoder	ω_w
DSP 6	Speed sensor	GPS	v_{GPS}

음과 같이 세 가지의 형태로 FDD의 방법을 정의하고 구분하였다.

3.1 Decentralized FDD(DFDD)

개별 DSP가 자신에게 연결된 하드웨어에 대하여 직접 고장을 감지하고 진단하는 방법으로서 하드웨어의 독립적인 특성에 근거한 공칭모델에서의 추정치와 실측치의 차이인 레지듀얼 분석을 통하여 이루어진다. 단일 하드웨어에 대한 개별적인 FDD는 유도되는 레지듀얼 수가 적기 때문에 즉각적인 고장감지와 원인진단이 가능하다. 그러나 단일 레지듀얼의 상태와 한계값 설정에 의존해야 하기 때문에 외부 잡음 및 불확실성에 대한 강인성 확보에 한계가 있다[6].

3.2 Centralized FDD(CFDD)

시스템의 내부에서 발생된 고장요소는 제어성능의 이상 현상을 야기하기 때문에 전체 차량 제어모델에 근거한 제어 수행 성능분석을 통하여 단일 하드웨어의 고장을 추측할 수 있다. 종 방향 제어가 설계되어 있는 DSP 2에서 CAN을 통하여 입수된 각 하드웨어의 정보를 이용하여 레지듀얼을 발생시키고, 차량 제어모델에 근거하여 증상을 분석함으로써 고장을 감시하고 진단한다. 이는 각 프로세서의 정보가 CAN을 통하여 공유되고 종합된다는 점에서 가능하다. 복수 레지듀얼의 동시적인 관측을 통하여 시스템적으로 증상을 분석하고 최종적인 고장진단을 함으로써 강인성이 보장되지만 CAN으로 전송되는 정보의 수에 한계가 있기 때문에 세부적으로 고장요소를 분류하기가 어렵다[1,18].

3.3 Integrated FDD(IFDD)

최종적인 고장감지와 진단을 위한 방법으로써 DSP 1에서 CAN을 통하여 전송된 DFDD와 CFDD의 정보를 종합하여, 각 방법으로부터 감지된 고장요소를 동일 하드웨어에 대한 연관성을 기준으로 구분하고 통합하여 수행한다. IFDD 알고리즘으로 시스템에서 발생하는 고장을 세부적으로 감지하는 동시에 시스템 성능 분석을 통하여 고장진단에 있어 강인성을 확보할 수 있다. 고장의 세부적인 원인과 시스템에 미치는 영향의 수준을 파악하는 것은 차후 설계될 고장 감내(fault tolerance)에서 시스템이 대처해야 할 단계를 결정하는 지표로 이용되기 때문에 매우 중요한 일이다[5].

III. 고장감지와 진단 알고리즘

1. Decentralized FDD 알고리즘

본 절에서는 앞 장에서 구분된 DFDD가 ATV 시스템에 어떻게 적용되었는지 자세히 설명한다. DFDD를 통한 고장발생 여부는 각 개체의 고장감지 레지듀얼이 설정된 한계값을 초과하였을 때 판단되며 이를 위해서는 레지듀얼의 정의와 한계값 설정에 대한 타당성이 전제되어야 한다.

1.1 고장감지를 위한 레지듀얼의 정의

DFDD를 위해 각 하드웨어의 독립적인 모델에서 추정된 상태와 실제 상태의 차이인 레지듀얼을 발생시킨다. 추가로 CAN 메시지 수신 상태를 DFDD의 대상에 포함시켜 이를 감시하기 위한 레지듀얼을 정의하였다. 이를 액츄에이터와 CAN으로 나누어 설명한다.

1.1.1 액츄에이터의 고장감지 레지듀얼

스로틀 및 브레이크 조절을 위한 DC모터 제어기는 DSP 2

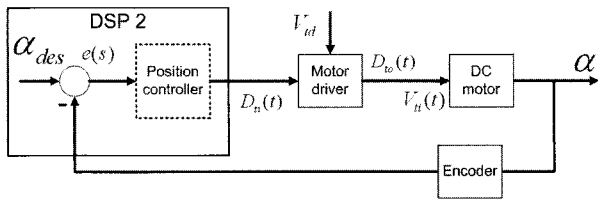


그림 3. 스로틀 액추에이터 제어를 위한 시스템 구성도.
Fig. 3. Block diagram of throttle motor control system.

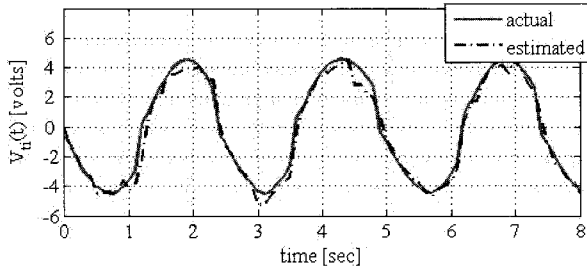


그림 4. 공칭모델에서의 $\hat{V}_{ii}(t)$ 와 $V_{ii}(t)$ 의 비교.
Fig. 4. Comparison between $\hat{V}_{ii}(t)$ and $V_{ii}(t)$ under no fault condition.

에 설계되어 있으며, 그림 3과 같은 구성으로 이루어진다. 각 액추에이터에 지시된 위치각 추종을 위하여 DSP에서 모터드라이버에 PWM(Pulse Width Modulation)을 공급하면, 모터드라이버에서는 PWM에 해당하는 전압을 생성하여 DC모터에 인가하고 이에 대한 위치각이 엔코더를 통하여 출력된다.

먼저 스로틀 DC모터의 고장감지를 위한 레지듀얼을 유도하기 위하여 모터의 전기적 특성에 기초한 파라미터 추정법을 이용하여 모델을 다음과 같이 근사화 시켰다[5,12].

$$\hat{V}_{ii}(t) = R_a I_{ii}(t) + K_E \omega_a(t) \tag{1}$$

DC모터의 공칭모델에서 $V_{ii}(t) = V_{id} \cdot D_{io}(t)$ 라 하면, V_{id} 와 $D_{io}(t)$ 를 측정하여 $V_{ii}(t)$ 를 구할 수 있다. 또한 $I_{ii}(t)$ 및 ω_a 의 값을 측정하고, LSE(Least Squares Estimation)를 이용하여 R_a 과 K_E 를 1.6910, 0.0744로 각각 예측하였다. 공칭모델에서 $\hat{V}_{ii}(t)$ 를 추정하여 $V_{ii}(t)$ 와 비교한 결과는 그림 4와 같다. 그러나 모터에 기계적인 압력이나 전기적 특성 변화가 일어나면 내부 파라미터 R_a 와 K_E 에 변화가 생긴다[6,12]. 이 때 (1)로 추정된 전압과 실제로 측정된 전압 사이의 오차가 커지는 원리를 이용하여 스로틀 및 브레이크 DC모터의 고장감지 레지듀얼을 다음과 같이 정의한다.

$$R_1 = |V_{ii}(t) - \hat{V}_{ii}(t)|, R_2 = |V_{bi}(t) - \hat{V}_{bi}(t)| \tag{2}$$

한편, 스로틀 및 브레이크 모터 드라이버의 동작은 입력 PWM 신호와 출력 PWM 신호 사이의 유사성 분석을 통하여 그 적합성 여부를 판별할 수 있다. 따라서 각 모터 드라이버의 고장감지 레지듀얼은 그림 3에서와 같이 DSP로부터 드라이버로 입력되는 PWM과 드라이버에서 모터로 출력되는 PWM의 폭(duty ratio) 차이로서 다음 (3)과 같이 정의한다.

$$R_3 = |D_{ii}(t) - D_{io}(t)|, R_4 = |D_{bi}(t) - D_{bo}(t)| \tag{3}$$

다음으로 스로틀 및 브레이크 모터의 위치각을 측정하기 위한 엔코더는 ATV의 엔진 구동과 주행환경 특성 상 진동의 영향으로 인한 원점 변화를 방지하기 위하여 절대 위치값 출력 방식을 사용하였다. 이 엔코더의 방식은 위치값 α 와 β 를 10비트의 그레이 2진수 코드(Gray BCD code)로 출력해준다. 이 값은 10개 선으로부터 나오는 디지털 신호의 조합으로 생성되기 때문에 하나 이상의 신호에 문제가 발생하면 위치 값이 불연속적으로 변화하게 된다. 공칭모델에서의 위치 값 변화폭이 제한되어 있으므로 스로틀 및 브레이크 엔코더 출력값의 변화량을 다음과 같이 레지듀얼로 정의하여 관측함으로써 고장여부를 감지할 수 있다.

$$R_5 = |\alpha[k] - \alpha[k-1]|, R_6 = |\beta[k] - \beta[k-1]| \tag{4}$$

1.1.2 CAN 전송에 대한 고장감지 레지듀얼

바퀴의 회전속도는 바퀴 구동축에 증가형(Incremental) 엔코더를 부착하여, 회전 시 출력되는 디지털 신호의 펄스 수를 DSP 3에서 단위시간마다 카운트함으로써 측정된다. 연산된 속도정보는 CAN 버스로 송신되고 DSP 2에서 이를 수신함으로써 중 방향 속도 제어에 이용한다. 속도정보의 연산과정에서 문제가 발생하지 않았더라도 통신 과정에서 정보가 손실되면 센서고장과 동일한 수준의 고장요인이 되기 때문에 CAN의 전송상태 또한 고장감지의 대상이 되어야 한다. 수신측 DSP에서 타이머를 동작시킨 후에 각 센서의 CAN 메시지가 수신될 때마다 초기화 해줌으로써 CAN 메시지의 전송 간격을 실시간으로 측정할 수 있고, CAN 고장감지 레지듀얼은 다음과 같이 정의된다.

$$R_7 = |\Delta T_{ref} - \Delta T_w|, R_8 = |\Delta T_{ref} - \Delta T_{GPS}| \tag{5}$$

여기서 ΔT_{ref} 는 CAN 메시지의 기준 전송시간 간격이고, CAN을 통해 전송 받는 각 메시지의 전송시간 간격은 다음과 같이 정의된다.

$$\Delta T_w \triangleq t[\omega_w(k)] - t[\omega_w(k-1)],$$

$$\Delta T_G \triangleq t[v_{GPS}(k)] - t[v_{GPS}(k-1)].$$

1.2 고장감지를 위한 레지듀얼의 한계값 설정

실제적으로 고장의 발생여부를 판단하기 위한 레지듀얼의 한계값을 설정하는 것은 어려운 일이다. 실제 시스템과 추정 모델 사이에는 비선형성과 불확실성이 존재하며 외부 잡음의 유입 등으로 인하여 예측하지 못한 오차가 발생한다[16]. 따라서 이러한 공칭모델과 추정모델 관계의 불확실성을 고장상태와 구별하기 위한 강인성을 요구하며, 반면에 강인성을 강조한 높은 한계값 설정은 자칫하면 판단의 민감성을 떨어뜨릴 수 있기 때문에 고장감지의 민감성과 강인성을 동시에 확보할 수 있는 한계값 설정이 필요하다[11]. 이를 위한 방법으로 1차 한계값 이상의 레지듀얼이 발생한 경우를 확률적으로 계산하여 2차 한계값 이상의 확률이 발생하였을 때 고장으로 인지하는 이중 한계값 설정법을 이용하였으며 다음과 같이 표현된다[11].

$$\text{if } \Pr(R_i > \epsilon_{i1}) > \epsilon_{i2}, F(R_i) = H \text{ for } i=1, \dots, 8 \tag{6}$$

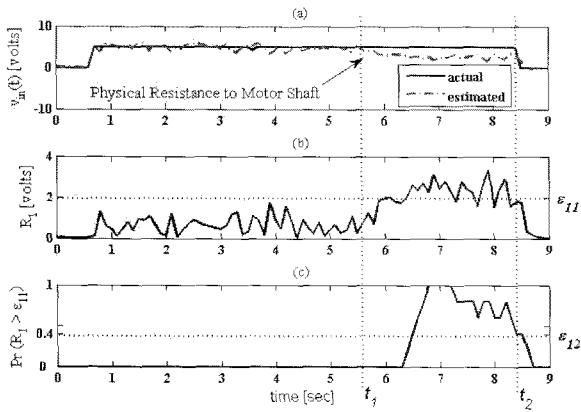


그림 5. 모터 구동축의 물리적 저항에 의한 고장 발생.
Fig. 5. Fault in DC motor by physical resistance to motor shaft.

이 방법은 민감성을 위한 1차 한계값과 강인성을 위한 2차 한계값을 설정함으로써 고장감지의 신뢰도를 높여줄 수 있다. (6)에 기초한 실험적 방법을 통하여 모든 DFDD 대상의 한계값 설정에 적용하였고, 이 방법의 유용성을 확인하기 위한 실험 결과를 그림 5에 나타내었다. 시간 t_1 에서 t_2 까지 스톱 모터의 구동축에 인위적으로 물리적인 저항을 가하여 그림 5(b)와 같은 레지듀얼 상태를 얻었으나 레지듀얼의 변동폭이 불규칙하여 한계값 설정이 모호하다. 먼저 R_f 의 1차 한계값 ϵ_{11} 을 2로 설정하고, 이 값을 초과하는 경우를 50개의 표본에 대하여 매 10msec마다 확률적으로 계산하여 그림 5(c)와 같은 결과를 얻었다. 그림 5(b)에서와 같은 경계값 근처의 불규칙 현상이 그림 5(c)에서는 제거됨으로써 상태의 구분이 명확해지고 한계값 설정이 용이해짐을 알 수 있다.

2. Centralized FDD 알고리즘

다음으로 DSP 2에서 수행되는 Centralized FDD가 ATV 시스템에 어떻게 적용되었는지 살펴본다. CFDD는 차량의 종 방향 제어 관제식에 개입되는 각 변수들에서 레지듀얼을 유도한 후, 센서 및 액츄에이터의 동작에 따라 변화하는 레지듀얼들의 동시적 상태를 나타내는 테이블에 기초하여 고장감지 및 진단을 수행한다.

2.1 종 방향 제어기 설계

ATV의 종 방향 제어기를 설계하기 위해 다음과 같이 실험적으로 검증이 된 동역학적 비선형 모델을 이용하였다[19].

$$J_{eq} \dot{v} = \frac{T_e(\alpha, \omega_e)}{R_g} - T_b(\beta) - h \cdot F_f(v) \quad (7)$$

여기서, $T_e(\alpha, \omega_e)$ 는 실험을 통해 구성된 엔진 맵이고, $T_b(\beta)$ 는 역시 실험을 통해 구성된 브레이크 맵이다. 또한, ATV의 등가 관성 모멘트 J_{eq} 와 구동저항력 $F_f(v)$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$J_{eq} = \frac{J_e + R_g^2(J_w + m \cdot h^2)}{R_g \cdot h}$$

$$F_f(v) = F_a(v) + F_r = \frac{1}{2} C_d v^2 + \mu mg$$

다음으로 ATV 모델의 불확실성을 극복하기 위하여 비선

형 강인 제어 기법인 동적 표면 제어 기법(dynamic surface control)을 이용하여 종 방향 제어기를 설계하였다[20]. 추종하고자 하는 목표 속도를 v_{des} 라 하면, 실제 ATV 속도와와의 차이를 $S_{1e} := v - v_{des}$ 로 정의할 수 있고 이 식을 미분한 후 (7)을 이용하면,

$$\dot{S}_{1e} = \dot{v} - \dot{v}_{des} = \frac{1}{J_{eq}} \left(\frac{T_e}{R_g} - T_b - h \cdot F_f \right) - \dot{v}_{des} \quad (8)$$

가 된다. 여기서 S_{1e} 를 0으로 수렴하도록 하는 $T_{e,des}$ 는 다음과 같다.

$$T_{e,des} = R_g \left\{ J_{eq} (\dot{v}_{des} - \lambda_{1e} S_{1e}) + h \cdot F_f \right\} \quad (9)$$

비슷하게 $S_{1b} = S_{1e}$ 라 하고 감속을 위한 브레이크 토크 $T_{b,des}$ 를 구하면 다음과 같다.

$$T_{b,des} = - \left\{ J_{eq} (\dot{v}_{des} - \lambda_{1b} S_{1b}) + h \cdot F_f \right\} \quad (10)$$

여기서 λ_{1e} 와 λ_{1b} 는 엔진과 브레이크의 제어를 위해 필요한 제어 상수이다. 또한, (7)에서 주어진 $T_e(\alpha, \omega_e)$ 와 $T_b(\beta)$ 의 역함수가 존재한다면, α_{des} 와 β_{des} 는 $T_e(\alpha, \omega_e)$ 와 $T_b(\beta)$ 의 역함수로서

$$\alpha_{des} = p(T_{e,des}, \omega_e), \quad \beta_{des} = q(T_{b,des}) \quad (11)$$

와 같이 계산할 수 있다. 각 액츄에이터의 스위칭 로직과 제어기 및 제어기 상수 설계에 대한 이론적 배경 및 자세한 설계 방법은 참고논문[20]을 참조한다.

2.2 고장감지를 위한 레지듀얼의 정의

ATV의 종 방향 제어 모델에 근거하여 목표 속도와 실제 속도의 오차 S_{1e} 를 이용하고, 속도 추종을 위한 스톱 및 브레이크 액츄에이터의 목표 각도와 실제 각도의 오차를 이용하여 고장감지를 위한 레지듀얼과 각각에 대한 고장감지 플래그(flag)를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} r_1 &= S_{1e} \mid, & \text{if } r_1 > \delta_1, & f(r_1) = H \\ r_2 &= \alpha - \alpha_{des} \mid, & \text{if } r_2 > \delta_2, & f(r_2) = H \\ r_3 &= \beta - \beta_{des} \mid, & \text{if } r_3 > \delta_3, & f(r_3) = H \end{aligned} \quad (12)$$

또한, 지면과 바퀴 사이의 미끄러짐이 없다고 가정하였을 때, GPS를 통하여 측정된 종 방향 속도와 바퀴 회전속도의 관계식에서 레지듀얼을 유도하여 다음과 같이 정의한다.

$$r_4 = v_{GPS} - h\omega_w \mid, & \text{if } r_4 > \delta_4, & f(r_4) = H \quad (13)$$

2.3 고장진단을 위한 레지듀얼 처리기

위에서 정의된 레지듀얼이 차량의 제어모델에 근거하여 하나 이상의 센서와 연관성을 지니고 있고, 또한 각 레지듀얼마다 연관된 센서들의 집합이 모두 다르기 때문에 하나의 하드웨어에서 발생한 고장과 이에 영향 받는 레지듀얼 집합이 구별된다[1,18]. 하나의 하드웨어에서 고장이 발생하였을 경우 예측되는 동시적인 레지듀얼 상태를 표 2에 나타내었다. 각 하드웨어의 고장상황에 해당하는 레지듀얼 상태(signature)가 모두 다름을 알 수 있으며, 이를 이용하여 고장이 발생하였을 때 원인이 되는 개체를 분류할 수 있다.

표 2. Centralized FDD를 위한 레지듀얼 테이블.

Table 2. Truth table of residuals for centralized FDD.

고장개체	$f(r_1)$	$f(r_2)$	$f(r_3)$	$f(r_4)$	Flag
Throttle actuator	H	H	L	L	$f(\alpha)$
Brake actuator	H	L	H	L	$f(\beta)$
Encoder for wheel speed	H	L	L	H	$f(\omega_w)$
GPS	L	L	L	H	$f(v_{GPS})$

3. Integrated FDD 알고리즘

최종적인 고장감지 및 진단을 위한 통합 FDD의 목적은 DFDD와 CFDD의 이중 감시를 통하여 고장요소를 세부적으로 분류하고, 시스템 성능 분석을 통하여 고장을 강인하게 구별하는데 있다. DFDD의 방법은 개별 하드웨어의 고장대상을 직접 정의하고 여기서 단일 레지듀얼을 발생시켜 감시함에 따라 고장발생을 즉각적이고 세부적으로 인지할 수 있지만 외부 잡음 및 시스템의 불확실성에도 민감하게 영향을 받을 가능성이 있기 때문에 오감지(false alarm)가 발생할 우려가 높다. 예를 들어 통신 장애나 잡음 유입으로 인한 일시적인 현상이 DFDD에 따라 고장으로 진단된다면 오히려 시스템에 비효율성을 가져다 줄 수 있기 때문이다. 이러한 오감지를 방지하기 위해 CFDD를 통하여 증상을 제어 성능에 입각하여 재분석함으로써 DFDD가 진단한 고장요소를 시스템적으로 검증하고, 또한 DFDD에서 정의되지 않은 대상에서 이상이 발생하였을 경우 이를 진단함으로써 시스템의 안전성을 더 높일 수 있다.

먼저 동일 하드웨어에 대한 연관성을 기준으로 DFDD와 CFDD의 각 고장감지 플래그를 표 3과 같이 구분하고, 이에 따라 구성된 각 하드웨어의 고장감지 플래그를 통합적으로 감시한다. 하나의 개체 하드웨어의 고장 여부를 판단하기 위하여 DFDD와 CFDD의 고장감지 대상요소를 동시에 측정함으로써 그 감지된 고장을 더욱 세부적으로 파악할 수 있다. 또한 각 하드웨어가 포함하는 CFDD의 고장감지 대상 중 하나 이상에서 고장이 발생되면 해당 하드웨어의 비정상적인 동작이 예측되며, CFDD를 통한 증상 분석을 통하여 고장상

황의 추이와 경과를 분석할 수 있다. 표 3에 나타난 각 DFDD의 고장감지 플래그와 이에 해당하는 CFDD의 고장감지 플래그를 동시에 관측하여 최종적으로 고장을 진단하도록 한다. CFDD의 고장 감지 플래그가 H값을 나타낸 경우 최종적으로 고장이 진단된 상태이며, 이에 해당하는 DFDD의 관련 레지듀얼의 상태를 통하여 세부적인 고장인자를 알 수 있다. 그러나 CFDD의 고장감지 플래그가 H값을 갖게 되더라도 이에 관련된 DFDD의 레지듀얼 상태 중 어느 것도 H값을 나타내지 않은 경우가 발생할 수 있으며, 이는 DFDD에서 정의되지 않은 고장감지대상에서 이상이 발생하였음을 나타낸다. 이러한 경우에도 CFDD의 고장진단에 의하여 위험요소를 인지할 수 있음을 알 수 있다. 이와 같은 통합 FDD를 통하여 DFDD와 CFDD의 이중적 고장감시 구조를 마련함으로써 고장진단의 강인성과 안전성을 높일 수 있으며 발생된 고장에 대한 더욱 세부적인 분류를 가능하게 한다.

IV. 실험 결과

제안된 FDD 알고리즘의 타당성을 검증하기 위하여 실제 고장상황을 가정한 실험을 수행하였다. 먼저 DFDD와 CFDD 알고리즘에 대한 성능을 검토하고 마지막으로 통합 FDD 시스템의 효용성을 확인한다.

1. Decentralized FDD 알고리즘의 검증

모터 내부 고정자의 온도 상승이나 물리적 압력, 회전자의 파손 등은 모터의 내부 저항 파라미터에 변화를 가져올 수 있으며, 모터의 성능을 저하시킨다[12,13]. 내부 저항 상승에 따른 액뮌에이터 모터의 고장을 발생시키고, 이에 대한 감지 성능을 확인한다. 내부 저항 상승을 가상하기 위하여 모터의 입력단에 가변저항을 연결하여 그림 6(a)와 같이 시간 t_f 에서 저항값을 증가시켰다. 내부 저항이 증가함에 따라, 그림 6(a)에서 볼 수 있듯이 DC모터의 회전속도가 감소하면서 모터의 DFDD를 위한 R_f 은 그림 6(c)에서와 같이 증가한다. 그림 6(d)를 보면, 고장 발생 후 1초 이내에 R_f 의 확률 함수가 2차 한계점을 초과함으로써 정상적으로 고장감지가 됨을 알 수 있다.

표 3. Integrated FDD를 위한 고장증상 테이블.

Table 3. Truth table of fault symptom for Integrated FDD.

Hardware	Fault Isolation	DFDD	CFDD
Throttle actuator	DC motor	$F(R_1)=H$	$f(\alpha)=H$
	Motor driver	$F(R_3)=H$	
	Encoder	$F(R_5)=H$	
	Throttle actuator	$F(R_i)=L$	
Brake actuator	DC motor	$F(R_2)=H$	$f(\beta)=H$
	Motor driver	$F(R_4)=H$	
	Encoder	$F(R_6)=H$	
	Brake actuator	$F(R_i)=L$	
Encoder for wheel speed	CAN message	$F(R_7)=H$	$f(\omega_w)=H$
	Rotary encoder	$F(R_i)=L$	
GPS	CAN message	$F(R_8)=H$	$f(v_{GPS})=H$
	GPS	$F(R_i)=L$	

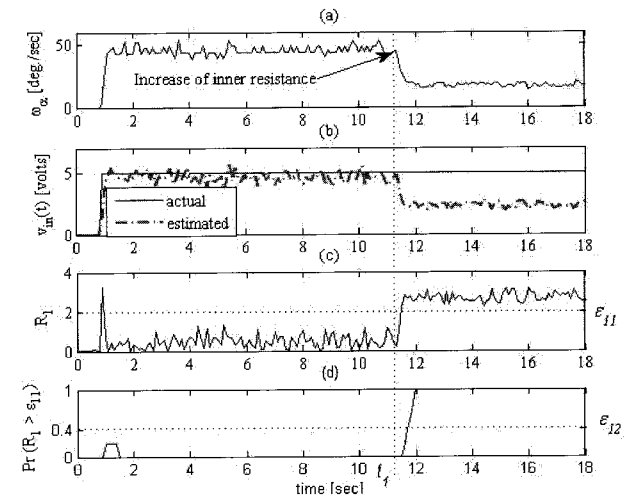


그림 6. DC모터 내부저항 증가에 의한 고장에 대한 DFDD. Fig. 6. DFDD for fault in DC motor by increase of inner resistance.

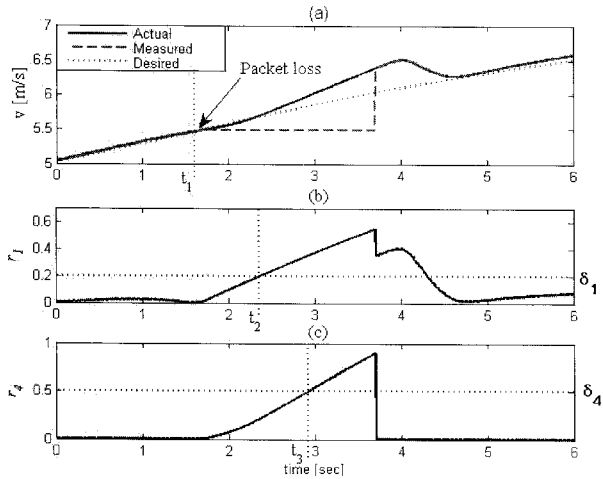


그림 7. CAN 메시지 손실에 대한 CFDD.
Fig. 7. CFDD for consecutive packet loss of CAN.

2. Centralized FDD 알고리즘의 검증

다음으로 CAN에서 연속적인 데이터 손실에 의해서 고장이 발생하는 경우 CFDD의 판단에 미치는 영향을 살펴보기 위해 그림 7과 같이, 일정 시간 동안 ω_w 의 CAN 데이터 수신 이 중단되도록 설정한 후 레지듀얼 상태를 동시적으로 관찰 하였다. 그림 7에 나타난 바와 같이 데이터 지연이 t_1 부터 약 2초간 발생하게 되었을 때에 $t = t_3$ 시점에서 r_1, r_4 의 상태가 동시에 H의 값을 갖게 되면서 표 2에 나타난 바와 같이 바퀴속도 측정 엔코더의 고장을 정상적으로 감지하고 진단하고 있음을 알 수 있다.

3. Integrated FDD 알고리즘의 효용성 검증

본 절에서는 실험을 통하여 DFDD와 CFDD에 대한 통합적인 FDD 알고리즘을 적용하여 얻을 수 있는 장점을 확인 한다.

첫째로, DFDD와 CFDD의 동시적인 감지를 통하여 진단의 강인성 확보와 세부적인 고장분류가 가능함을 확인하기 위한 실험을 구성하였다. 이를 위하여, 종 방향 제어를 담당하는 DSP 2에 바퀴 회전속도의 CAN 메시지 수신 이 중단되는 고장상태를 발생시켰다. 먼저 CAN 메시지 수신 이 중단됨에 따라 그림 8(a)처럼 바퀴속도는 일정한 값으로 정지되며 그림 8(b)는 바퀴속도의 CAN 메시지에 대한 고장감지 레지듀얼 R_7 의 상태를 나타낸 것으로서, 그림 8(c)에서 볼 수 있듯이 시간 t_1 에서 2차 한계값인 ϵ_{72} 를 초과하게 되면서 DFDD에 의하여 고장발생이 먼저 감지된다. 그림 8(d)를 보면 시간 t_2 에서 CFDD의 레지듀얼인 r_4 가 한계값을 초과하면서 $f(r_4)$ 가 H값을 나타내며, 그림 8(a)에서 목표 속도와의 차이를 추정 하면 $f(r_1)$ 역시 H이므로 표 2에 따라 $f(\omega_w)$ 가 H를 나타내면서 표 3에 근거하여 IFDD에 의해 최종적으로 CAN 메시지 손실로 인한 바퀴속도 출력의 이상을 진단하게 된다. 결과적으로 IFDD를 통하여 DFDD의 감지요소를 시스템적으로 분석함과 동시에 고장진단에 있어 CFDD에서 감지된 고장요소에 대하여 더욱 세부적으로 분류할 수 있음을 확인하였다.

둘째로 DFDD의 방법으로 감지하기 어려운 고장상태를 IFDD로써 감지할 수 있음을 확인하기 위한 실험을 구성하였

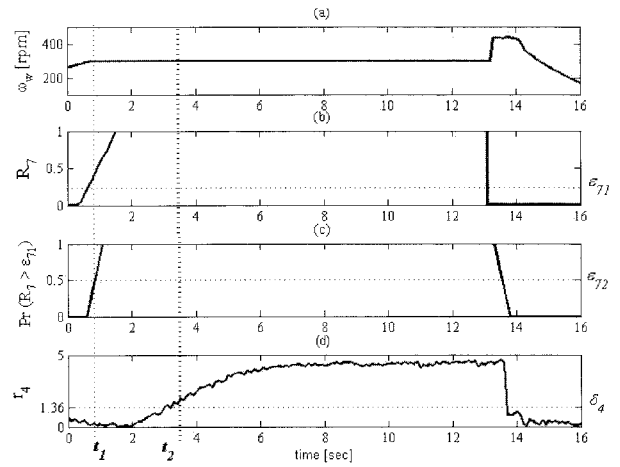


그림 8. ω_w 의 CAN 메시지 수신 중단 시 IFDD.
Fig. 8. IFDD for fault of CAN message (ω_w).

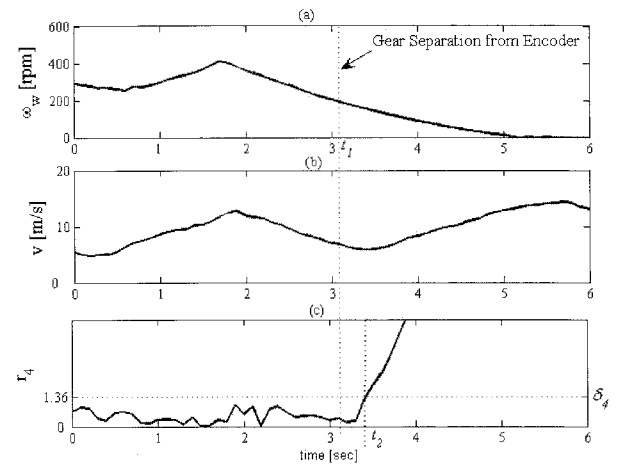


그림 9. 구동체인과 엔코더 기어의 분리 시 IFDD.
Fig. 9. IFDD for the case of separation of encoder gear from driving chain.

다. 우선 바퀴속도는 엔코더에 장착한 기어가 바퀴 구동 체인에 맞물려 회전함으로써 측정이 되는데, 반복적인 바퀴 회전과 차체의 진동 등에 의하여 기어가 엔코더의 회전축에서 이탈하거나 체인과의 접촉에서 분리될 가능성이 있으며 이러한 경우에 엔코더의 회전이 멈추게 되면서 속도 측정값은 0으로 수렴하게 된다. 이러한 고장상태를 임의로 가정하였을 때, 이와 같은 기계적 결함을 감지대상으로 정의하지 않았기 때문에 DFDD로는 진단이 불가능하며, IFDD로써 이상이 검출되는지 확인해보고자 한다. 그림 9(a)와 같이 바퀴가 회전하는 도중에 t_1 에서 엔코더 기어와 체인의 접촉을 분리시켰다. 그림 9(b)는 ATV의 실제 속도를 나타낸 그래프이다. 엔코더의 측정값이 서서히 감소함에 따라 그림 9(c)에서 볼 수 있듯이 종 방향 속도와 바퀴 회전속도에 관련된 레지듀얼 r_4 가 t_2 에서 한계점을 넘게 됨에 따라 $f(r_4)$ 가 H의 값을 갖게 되며, $f(r_1)$ 의 H값과 함께 표 3에 근거하여 정상적으로 바퀴속도 엔코더의 고장을 진단한다. 결과적으로 IFDD를 통하여 DFDD가 간과할 수 있는 위험요소를 감지할 수 있음이 확인되었다.

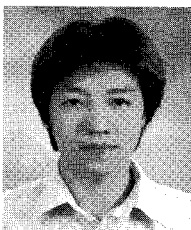
V. 결론

본 논문에서는 무인화 ATV의 종 방향 속도제어 시 발생할 수 있는 고장을 감지하고 진단하기 위한 방법을 적용하는 대상적 측면에서 접근하여 DFDD와 CFDD로 구분하였고, 분산형 제어시스템의 특성과 구조를 활용하여 설계 및 적용하였다. 또한 두 가지 방법을 통합적으로 수행할 수 있는 IFDD 알고리즘을 제시하여 오감지(false alarm)을 방지할 수 있는 강인성을 확보하고, 발생된 고장에 대하여 더욱 세부적으로 분류할 수 있도록 하였다. 또한 실험을 통하여 알고리즘의 유용성을 확인함으로써 제어의 안전성과 신뢰성을 향상시킬 수 있는 기반을 마련하였고 향후 고장감내 시스템(fault tolerant system) 개발로 확대하고자 한다.

참고문헌

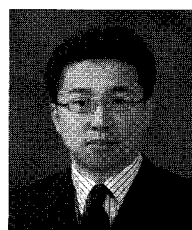
[1] J. Yi, L. Alvarez, A. Howell, R. Horowitz, and J. K. Hedrick, "A fault management system for longitudinal vehicle control in AHS," *Proc. of the ACC*, pp. 1514-1518, 2000.
 [2] C. Fantuzzi, C. Secchi, and A. Visioli, "On the fault detection and isolation of industrial robot manipulators," *In Proc. IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technological Processes*, Washington, 2003.
 [3] V. Hasu and H. Koivo, "Wheather sensor fault detection with time-dependent recursive thresholds," *Proc. of the first ICICIC*, 2006.
 [4] Y. Zhang and X. R. Li, "Detection and diagnosis of aircraft sensor and actuator failure," *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 34, no. 4, pp. 1302-1312, 10, 1998.
 [5] R. Isermann, *Fault-Diagnosis Systems*, Springer, Berlin 2006.
 [6] R. Isermman, "Model-based fault detection and diagnosis methods," *Proc. of the ACC*, pp. 1605-1609, Seattle, Washington, 6, 1995.
 [7] J. J. Gertler, "Survey of model-based failure detection and isolation in complex plants," *IEEE Control Systems Magazine*, pp. 3-11, 11, 1998.
 [8] H. El Brouji, P. Poure, and S. Saadate, "A fast and reliable fault diagnosis method for fault tolerant shunt three phase active filter," *IEEE ISIE*, Montreal, Canada, 7, 2006.
 [9] E. Y. Chow and A. S. Willsky, "Analytical redundancy and the design of robust failure detection systems," *IEEE Trans. on*

Automatic Control, vol. AC-29, no. 7, pp. 603-614, 1984.
 [10] S. X. Ding, P. Zhang, and P. M. Frank, "Threshold calculation using LMI-technique and its integration in the design of fault detection systems," *Proc. of IEEE Conference on Decision and Control*, Maui, Hawaii, USA, 12, 2003.
 [11] X. Fang, J. Gertker, M. Kunwer, J. Heron, and T. Barkana, "A double-threshold-testing robust method for fault detection & isolation in dynamic systems," *Proc. of the ACC*, Baltimore, Maryland, pp. 1979-1983, 1994.
 [12] O. Moseler and R. Isermann, "Application of model-based fault detection to a brushless DC motor," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 47, no. 5, pp. 1015-1020, Dec., 2000.
 [13] N. Kim, "Rotor fault detection system for inverter driven induction motors using current signals and an encoder," *Journal of Power Electronics*, vol. 7, no. 4, pp. 870-881, 10, 2007.
 [14] T. Pfeuer, "Application of model-based fault detection and diagnosis to the quality assurance of an automotive actuator," *Control Engineering Practice-CEP*, vol 5, no. 5, pp. 703-708, 1997.
 [15] E. L. Ding, H. Fennel, and S. X. Ding "Model-based diagnosis of sensor faults for ESP systems," *Control Engineering Practice*, pp. 847-856, 12, 2004.
 [16] 이인수, 전기준, "선형시스템의 모델기반 고장감지와 분류," *전자공학회 논문지*, 제 35 권, S편, 제 1 호, pp. 68-79, 1, 1998.
 [17] B. Song and J. K. Hedrick, "Fault tolerant nonlinear control with applications to an automated transit bus," *Vehicle System Dynamics*, vol. 43, no. 5, pp. 331-350, 2005.
 [18] R. Rajamani, A. S. Howell, C. Chen, J. K. Hedrick, and M. Tomizuka "A complete diagnostic system for automated vehicles operating in a platoon," *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, vol. 9, no. 4, pp. 553-564, 2007.
 [19] H. Song, S. Kim, W. Baek, B. Song, and S.-K. Hong, "Dynamic modeling and longitudinal control for autonomous All-Terrain Vehicle(ATV)," *Control, Automation, and Systems Symposium*, pp. 14-19, 2007.
 [20] B. Song, J. K. Hedrick, and A. Howell, "Robust stabilization and ultimate boundedness of dynamic surface control systems via convex optimization," *Int. J. Control*, vol. 75, no. 12, pp. 870-881, 2002.



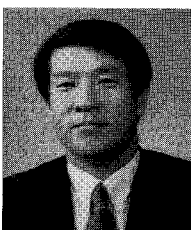
김 순 태

1979년 5월 20일생. 2006년 아주대학교 전자공학과(공학사). 2008년 아주대학교 대학원 전자공학과(공학석사). 현 (주)만도 근무. 관심분야는 차량의 주행제어, 시스템의 고장감지 및 진단.



송 봉 섭

1971년 11월 24일생. 1996년 한양대학교 정밀기계공학과 졸업. 1999년 U. C. Berkeley 기계공학부 석사. 2002년 동 대학원 박사. 2004년~현재 아주대학교 기계공학과 부교수. 관심분야는 차량제어, 센서융합, 고장감지 및 진단.



홍 석 교

1948년 8월 23일생. 1971년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1973년 동 대학원 석사. 1981년 동 대학원 박사. 1976년~현재 아주대학교 전자공학과 교수. 관심분야는 로봇제어, 컴퓨터 응용, 지능제어.