

X-By-Wire 시스템의 센서 결함 허용을 위한 Fuzzy Hybrid Redundancy 개발

Development of Fuzzy Hybrid Redundancy for Sensor Fault-Tolerant of X-By-Wire System

김 만 호, 손 병 점, 이 경 창, 이 석*

(Man Ho Kim, Byeong Jeom Son, Kyung Chang Lee, and Suk Lee)

Abstract : The dependence of numerous systems on electronic devices is causing rapidly increasing concern over fault tolerance because of safety issues of safety critical system. As an example, a vehicle with electronics-controlled system such as x-by-wire systems, which are replacing rigid mechanical components with dynamically configurable electronic elements, should be fault-tolerant because a devastating failure could arise without warning. Fault-tolerant systems have been studied in detail, mainly in the field of aeronautics. As an alternative to solve these problems, this paper presents the fuzzy hybrid redundancy system that can remove most erroneous faults with fuzzy fault detection algorithm. In addition, several numerical simulation results are given where the fuzzy hybrid redundancy outperforms with general voting method.

Keywords : x-by-wire system, intelligent vehicle, safety critical system, fault-tolerant, fuzzy hybrid redundancy, fuzzy fault detector, double exponential smoothing method, IAE (Integral of the Absolute magnitude of Error) performance index

I. 서론

최근 들어, 자동차는 기계, 전자, 통신과 제어공학의 발전으로 인하여 안전성과 편의성이 획기적으로 향상되고, 안전하고 쾌적한 주행 환경은 교통사고로 인한 사회적인 손실을 최소화시키고 있다. 특히, 자동차 산업은 단순한 운송 수단에서 운송, 정보, 업무 및 휴식 공간으로 발전할 수 있는 지능형 자동차(intelligent vehicle) 기술 개발에 대한 관심을 가지고 있다[1-3]. 여기서, 기구학적 구조의 자동차 부품을 기계, 전자 및 통신 기술로 대체한 x-by-wire 시스템과 같은 지능형 자동차는 높은 수준의 결함 허용(fault tolerant) 기술의 적용이 요구된다. 왜냐하면, 기구적인 구조의 자동차 부품은 주어진 기능의 저하와 같은 현상을 통하여 고장(failure)을 운전자에게 사전에 경고하지만, 전자 시스템에 기반을 둔 x-by-wire 시스템과 같은 지능형 자동차 기술은 특별한 현상 없이 불시에 고장이 발생하는 경우가 많기 때문이다[4-6].

결함 허용을 위한 대표적인 방법인 중복 구조(redundancy)는 기존의 시스템과 비교하여 높은 신뢰성(reliability)을 갖지만, 비용 문제와 구현의 복잡성 때문에 우주 항공 산업과 방위 산업과 같은 safety-critical 시스템에 한정되어 적용되었다. 최근에, 컴퓨터 산업의 발전과 함께 컴퓨터 공학(computer science and engineering) 분야에서 결함 허용에 관련된 연구가 많이 수행되고 있다[6,7]. 특히, Lapresta와 Goeva가 TMR

(Triple Modular Redundancy) 구조에서 다수결(majority)을 이용하여 결함을 검출하는 방법을 제안하고 시뮬레이션 기법을 통하여 그 성능을 검증하였다[8,9]. 또한, Shabgahi가 다수결을 이용한 방법과 중간값(median)을 이용한 방법의 성능을 비교하였으며 Krstic가 중간값(mid-value)을 이용하여 결함을 검출하는 방법을 제안하고 시뮬레이션과 하드웨어 구현을 통하여 성능을 평가하였다[10,11]. 그리고, Levitin, Shabgahi와 Long과 같은 다수의 연구자가 TMR 구조에서 가중치(weight)를 이용하여 결함을 검출하여 제거하는 방법을 제안하고 시뮬레이션을 통하여 성능을 검증하였다[12-14]. 최근에, 임계값(threshold)을 이용하여 결함을 판단하는 smoothing voter와 fuzzy voting과 같은 구조의 하이브리드(hybrid) 중복 구조가 제안되고 시뮬레이션을 통하여 성능을 검증하였다[15,16].

지능형 자동차에서 x-by-wire 시스템의 결함 허용을 위한 연구는 기존의 컴퓨터 공학에서 연구된 하드웨어 중복 구조를 개념적으로 도입하는 단계에 있다. 하지만, 기존의 연구는 시뮬레이션 기법과 디지털 값의 결함과 같은 한정된 범위에서 검증되었기 때문에 x-by-wire 시스템과 같은 높은 신뢰성을 요구하는 시스템에 직접적으로 적용할 수 없다. 또한, x-by-wire 시스템의 구현에 관련된 연구가 진행되는 단계에 있기 때문에 x-by-wire 시스템의 결함 허용에 대한 연구는 아직 시작 단계에서 제한적으로 수행되고 있다[4]. 최근에, 결함을 주입하는 결함 주입기 설계와 예측기 설계를 통한 결함을 검출하여 제거하는 하이브리드 중복 구조 타입의 predictive hybrid redundancy가 제안되었다[2]. 또한, 마이크로 컨트롤러의 가격이 하락하고 연산 기능이 향상됨에 따라 중복 구조와 결함을 검출하여 제거하는 다양한 알고리즘에 대한 연구가 진행되고 있다[17,18].

따라서, 본 논문에서는 하이브리드 타입의 하드웨어 중복 구조(hardware redundancy)를 적용한 fuzzy hybrid redundancy를 제안한다. 특히, 본 논문에서는 제안하는 fuzzy hybrid redundancy는

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2008. 8. 8., 채택확정 : 2009. 1. 9.

김만호 : 대구경북과학기술연구원 미래산업융합기술연구부
(mhkim@dgist.ac.kr)

손병점, 이석 : 부산대학교 기계공학부

(maligy@pnu.edu/slee@pnu.edu)

이경창 : 부경대학교 제어자동화공학과(gclee@pknu.ac.kr)

※ 본 연구는 2008년 정부(교육과학기술부)로부터 지원받아 수행된 연구임(지역거점연구단육성사업/차세대물류IT기술연구사업단, 대구경북과학기술원/기관교유연구사업비).

앞서 제안된 예측기 구조의 하이브리드 중복 구조의 결함 검출 알고리즘에서 입력되는 센서 값의 특성에 따라 임계값을 설정하는 문제를 해결하기 위하여 동적 임계값을 설정하는 방법을 제안한다[5]. 또한, 예측기의 추정값을 이용하여 결함을 검출하는 퍼지 결함 검출 알고리즘을 제안하여 fuzzy hybrid redundancy의 결함 허용 성능을 평가한다. 여기서, 결함의 특성에 따른 가상의 브레이크 입력 신호와 결함 신호를 생성하여 제안된 fuzzy hybrid redundancy와 일반적인 중복구조를 비교하여 결함 검출 및 제거 성능을 평가한다.

본 논문은 서론을 포함하여 V 장으로 구성되어 있다. II 장에서는 결함 및 결함 허용 시스템에 대하여 설명하고, III 장에서는 본 논문에서 제안한 fuzzy hybrid redundancy의 구조와 기능을 소개한다. IV 장에서는 fuzzy hybrid redundancy의 성능을 평가하고 마지막 V 장에서 결론 및 향후 연구 방향을 제시한다.

II. 결함 허용 시스템

1. 결함의 특성 및 결함 허용 시스템

일반적으로, 결함 허용 시스템은 결함(fault), 오류(error)와 고장(failure)을 중심으로 구성되며 각각은 인과관계에 따라 발생된다. 결함은 오류의 원인이 되며 오류로 인하여 시스템은 고장으로 발전하게 된다. 우선, 결함은 하드웨어 또는 소프트웨어 요소의 물리적인 파괴나 불완전한 상태가 발생하는 것으로 정의된다. 즉, 시스템의 하드웨어나 소프트웨어 요소의 blemish, weakness 또는 shortcoming이 결함의 한 예가 될 수 있다. 다음으로, 오류는 결함으로 인한 비정상적인 상태를 의미한다. 즉, 결함으로 인하여 발생하는 상태의 변화를 오류라고 정의할 수 있다. 마지막으로, 고장은 결함으로 인하여 발생한 오류가 원인이 되어 주어진 시스템의 기능을 정상적으로 수행하지 못하는 상태로 정의된다[6,19].

결함 허용 시스템(fault tolerant system)은 하드웨어 및 소프트웨어의 결함이 발생하여도 주어진 기능을 정확하게 수행하는 시스템을 의미한다. 즉, 결함 허용은 결함을 허용할 수 있는 능력을 의미하고, 결함 허용 시스템은 결함이 발생하더라도 정상적으로 기능을 수행하여 주어진 순서에 따라 동작할 수 있는 시스템을 의미한다[23]. 또한, Laprie는 결함이 발생하여도 정상적인 서비스를 제공할 수 있는 시스템을 결함 허용 시스템이라고 정의하였고, 오류 검출과 오류 회복(recovery)을 통하여 결함 허용 시스템이 구현될 수 있다고 하였다[19].

2. 결함 허용을 위한 중복 구조

일반적으로, 중복 구조는 동일한 기능을 수행하는 모듈을 중복으로 설계하는 하드웨어 중복 구조(hardware redundancy), 시스템 모델에 근거하여 소프트웨어로 가상의 중복 구조를 설계하는 소프트웨어 중복 구조(software redundancy), 패리티 코드(parity code)와 같이 추가적인 정보를 바탕으로 고장을 검출하는 정보 중복 구조(information redundancy)와 시간 구간에서 반복 연산을 바탕으로 고장을 검출하는 시간 중복 구조(time redundancy)가 있다. 여기에서, 가장 대표적인 중복 구조인 하드웨어 중복 구조는 디지털 제어 시스템에서 센서, 모듈 및 액츄에이터의 중복 구조 설계에 많이 사용되고 있다.

특히, 마이크로 컨트롤러의 가격이 하락함에 따라 사용 빈도가 급속히 증가하고 있으며 가장 확실한 결함 허용 방법으로 인식되고 있다[5,6].

하드웨어 중복 구조는 기능과 구조에 따라 정적 중복 구조(static redundancy), 동적 중복 구조(dynamic redundancy)와 하이브리드 중복 구조(hybrid redundancy)로 구분된다[17]. 먼저, 정적 중복 구조는 결함이 발생하면 결함을 차단(fault masking)하여 억제(fault containment)하는 기능을 가진다. 하지만, 정적 중복 구조는 3개 이상의 모듈을 사용하기 때문에 상대적으로 비용이 높을 뿐만 아니라, 두 개 이상의 모듈에서 동시에 결함이 발생할 경우 고장을 판단하기 어렵다는 단점을 가지고 있다. 반면에, 동적 중복 구조는 결함 검출(fault detection)을 통해 결함 위치를 찾아서(fault location) 결함을 회복(fault recovery)시키는 기능을 가진다. 즉, 동적 중복 구조는 결함이 발생하면 결함이 발생된 모듈을 교체(reconfiguration)할 수 있는 기능을 가지고 있다. 왜냐하면, 결함은 불규칙하게 순간적으로 발생하는 경향을 가지고 있기 때문에, 결함이 발생된 부분만을 잠시 격리하는 것이 결함을 완벽하게 차단하는 방법보다 더 효율적이기 때문이다. 주 모듈과 대기 모듈의 동작 상태에 따라 hot standby 중복 구조와 cold standby 중복 구조로 구분된다.

마지막으로, 하이브리드 중복 구조로 정적 중복 구조와 동적 중복 구조를 혼합한 구조를 가진다. 그러나 하이브리드 중복 구조는 정적 중복 구조와 동적 중복 구조의 장점을 동시에 가지고 있지만, 복잡한 연산 기능을 수행하는 고가의 마이크로 컨트롤러가 필요하기 때문에 우주선과 같은 높은 안전성을 필요로 하는 시스템에만 제한적으로 사용되었다. 그러나, 마이크로 컨트롤러의 가격이 낮아지고 기능이 향상됨에 따라, 자동차를 비롯한 디지털 제어 시스템에서 하이브리드 타입의 중복 구조를 적용하는 경우가 증가되고 있다.

III. Fuzzy hybrid redundancy 구조

예측기 구조의 하이브리드 중복 구조는 지능형 자동차의 x-by-wire 시스템과 같은 safety critical 시스템의 센서 결함 허용을 위한 하이브리드 중복 구조로 제안되었다[5]. 하지만, 결함 검출 알고리즘은 센서 입력값의 특성에 따라 결함을 검출하는 임계값을 설정해야 한다는 단점을 가지고 있다. 즉, 결함 검출 알고리즘에서 임계값 상수(β)를 선정하는 방법에 따라 일정한 결함 검출 성능을 보장할 수 없다. 따라서, 본 논문은 앞서 제안된 중복 구조의 임계값을 동적으로 설정할 수 있는 fuzzy hybrid redundancy를 제안한다.

그림 1은 임계값 설정에 따라 결함 제거 성능을 향상시키기 위한 방법으로 fuzzy 이론을 적용하여 동적으로 임계값을 생성하는 fuzzy hybrid redundancy를 나타내고 있다. 그림에서, fuzzy hybrid redundancy는 결함 검출을 위하여 임계값을 추정하는 예측기(predictor), 예측기의 추정값($FT(k)$)과 퍼지 규칙에 따라 결정된 임계값 상수(β)를 이용하여 결함을 검출하는 퍼지 결함 검출기(fuzzy fault detector), 두 센서 입력이 모두 결함으로 판단되는 예외 상황을 대처하는 예외 처리기(exception handler)와 최종 출력값을 결정하는 보터(voter)로 구성된다. 여기서, fuzzy hybrid redundancy는 전 사이클의 최종 출력값인

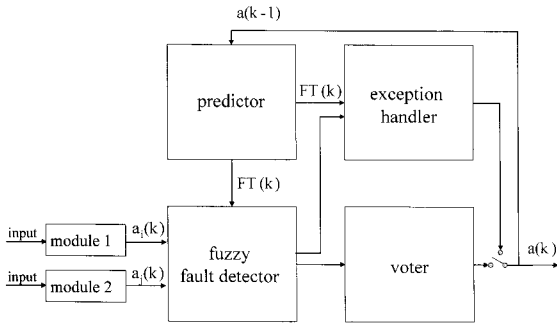


그림 1. Fuzzy hybrid redundancy 구조.
Fig. 1. Structure of fuzzy hybrid redundancy.

$a(k-1)$ 을 이용하여 예측기에서 추정값을 추정한 후 센서 입력값의 특성에 따라 퍼지 규칙에서 결정된 임계값 상수를 이용하여 결함 여부를 판단하여 최종 출력값을 보터가 결정하는 메커니즘을 가진다.

우선, 예측기는 센서 입력값의 변화에 대하여 임계값을 추정하는 기능을 담당한다. 본 논문에서는 임계값을 추정하기 위하여 대표적인 시계열 예측기법인 지수평활법을 사용한다 [20]. 일반적으로, 지수평활법은 입력값의 상관관계가 과거에서 현재로 감에 따라 최근의 값에 높은 비중을 주는 예측방법이다. 또한, 지수평활법은 직관적으로 이해하기 쉽고 사용이 편리하다는 측면에서 자료 예측에 많이 사용되고 있다. 여기서, 이중지수평활법은 제어 입력 신호와 같이 값이 경향을 가지는 경우에 뛰어난 예측 특성을 가진다고 알려져 있다 [21,22].

본 논문에서 사용된 임계값은 식 (1)과 같은 이중지수평활법을 이용하여 추정한다.

$$\begin{aligned}
 FT^{[1]}(k) &= \alpha RT(k) + (1 - \alpha)FT^{[1]}(k - 1) \\
 FT^{[2]}(k) &= \alpha FT^{[1]}(k) + (1 - \alpha)FT^{[2]}(k - 1) \\
 FT(k) &= (2 + \frac{\alpha}{1 - \alpha})FT^{[1]}(k) - (1 + \frac{\alpha}{1 - \alpha})FT^{[2]}(k) \\
 \text{where } RT(k) &= a(k - 1) - a(k - 2)
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

여기서, $FT^{[1]}(k)$ 는 $k-1$ 사이클의 $FT^{[1]}(k-1)$ 추정값과 k 사이클의 실제 임계값(real threshold) $RT(k)$ 에 지수평활법을 적용하여 추정한 값을 의미한다. $FT^{[2]}(k)$ 는 $FT^{[1]}(k)$ 추정값을 다시 지수평활법을 적용하여 추정한 값을 의미한다. $FT(k)$ 는 k 사이클에서 추정한 $FT^{[1]}(k)$ 와 $FT^{[2]}(k)$ 를 이용하여 추정한 k 사이클의 추정값을 의미한다. 또한, α 는 지수평활화 상수로서, 현재에 가까운 값에 높은 가중치를 주기 위하여 0.05에서 0.3의 값을 가진다[21,22]. 실제 임계값 $RT(k)$ 는 $k-1$ 사이클의 최종 출력값 $a(k-1)$ 과 $k-2$ 사이클의 최종 출력값 $a(k-2)$ 의 편차로 정의한다. 단, 이중지수평활법에서 $FT(1)$, $FT^{[1]}(1)$, $FT^{[2]}(1)$ 은 처음 입력값의 평균으로 정의하고, 입력값의 결함은 없다고 가정한다.

퍼지 결함 검출기는 예측기의 추정값 $FT(k)$ 과 퍼지 규칙에 따라 결정된 임계값 상수(β)를 이용하여 입력값의 결함을 검출하는 기능을 담당한다. 즉, 퍼지 결함 검출기는 입력되는 센서 값에 따라 동적으로 임계값 상수를 결정하는 부분과 예측기의 추정값과 임계값 상수를 이용하여 입력된 센서의 결함 유무를 판단하는 결함 검출 알고리즘으로 구성된다. 여기서, 결함 검출기의 결함 검출 알고리즘은 입력 신호가 급격한 변화를 보이는 경우를 포함하여 센서 입력값의 결함을 검출할 수 있도록 개발한다. 왜냐하면, 디지털 제어 시스템에서 일정 속도로 동작하는 플랜트의 출력인 센서 값이나 플랜트의 입력인 구동기 제어 값은 스텝 응답 신호와 같이 초기에 상대적으로 급격한 변화를 보이는 경우도 발생할 수 있기 때문이다.

그림 2는 예측기에서 추정된 $FT(k)$ 를 이용하여 결함 유무를 판단하는 결함 검출 알고리즘을 나타내고 있다. 그림에서, 예측기는 입력값이 들어오면 $FT(k)$ 를 계산한다. 여기서, 결함 검출기는 입력되는 값의 변화가 크면 결함 유무를 정상적으로 판단하기 어렵기 때문에 변화의 폭이 가장 작은 입력값의 편차 $FT(k)$ 를 예측기에서 추정한다. 다음으로, 결함 검출기는 $(1+\beta)FT(k)$ 를 이용하여 입력값의 결함 여부를 판단한다. 여기서, 임계값 상수(β)는 퍼지 규칙에 의해서 동적으로 결정된다.

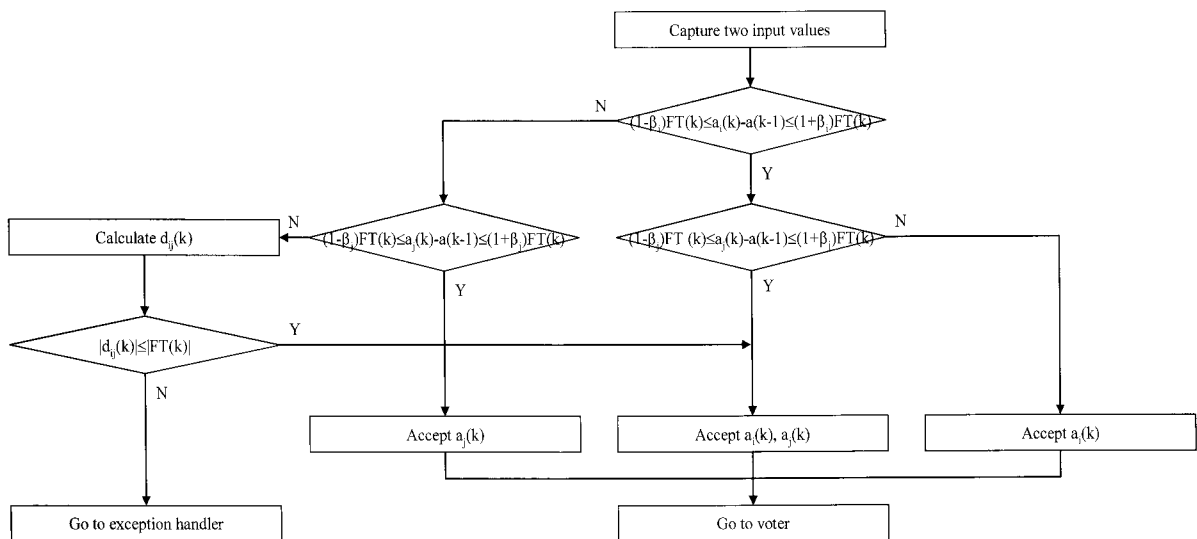


그림 2. Fuzzy hybrid redundancy의 결함 검출 알고리즘.
Fig. 2. Fault detection algorithm of the fuzzy hybrid redundancy.

우선, 결합 검출 알고리즘은 입력값 $a_i(k)$ 와 $k-1$ 사이클의 출력값 $r(k-1)$ 의 차이가 $(1\pm\beta_j)FT(k)$ 범위에 있으면 정상적인 값으로 판단한다. 하지만, $a_i(k)-r(k-1)$ 이 $(1\pm\beta_j)FT(k)$ 범위를 벗어나면 입력값에 문제가 있다고 판단한다. 다음으로, 입력값 $a_j(k)$ 와 $k-1$ 사이클의 출력값 $a(k-1)$ 의 차이가 $(1\pm\beta_j)FT(k)$ 범위에 있으면 역시 정상적인 값으로 판단한다. 하지만, $a_j(k)-a(k-1)$ 이 $(1\pm\beta_j)FT(k)$ 범위를 벗어나면 입력값에 문제가 있다고 판단한다. 결론적으로, 최소한 하나의 입력값이 정상으로 판단되면 결합 검출기는 정상으로 판단된 입력값을 보터로 보낸다.

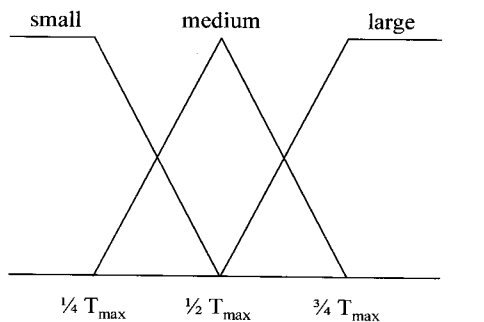
하지만, 결합 검출기가 두 개의 입력값이 모두 문제가 있다고 판단하면, k -th 사이클에 입력된 $a_i(k)$ 와 $a_j(k)$ 의 편차 $d_{ij}(k)$ 를 이용하여 다시 결합 유무를 판단한다. 왜냐하면, 제어 시스템의 특성에 따라 센서 입력값은 상대적으로 급격한 변화를 보이는 경우가 발생하는데 예측기의 추정된 값은 이와 같은 순간적인 변화에 민감하게 반응하지 못하는 경우가 발생할 수 있기 때문이다. 만일, 두 입력값의 편차 $d_{ij}(k)$ 가 $FT(k)$ 범위에 있다면 두 입력값이 비슷하게 움직인 것이기 때문에 결합이 아니라 급격한 신호의 변화라고 판단하고, 두 입력값을 정상으로 판단한다. 하지만, $d_{ij}(k)$ 가 $FT(k)$ 범위를 벗어나면 두 입력 모두 신뢰할 수 없다고 판단하고 예외 처리를 작동시킨다.

결합 검출기에서 임계값 상수(β)를 결정하기 위한 퍼지 규칙은 퍼지 언어 변수(linguistic variable)와 언어값(linguistic value)으로 변환하는 퍼지화부(fuzzifier), 전문가의 경험을 바탕으로 생성한 퍼지 규칙(fuzzy rule)을 이용하여 퍼지 출력을 추론하는 추론 엔진(inference engine)과 추론 결과를 동적 임

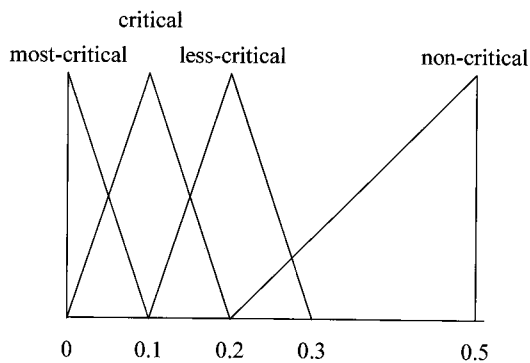
계값으로 변환하는 비 퍼지화부(defuzzifier)로 구성된다[23]. 그림 3은 fuzzy hybrid redundancy의 퍼지 입력력 변수에 대한 소속 함수(membership function)와 언어값을 나타내고 있다. 그림에서, 입력된 값의 동적 임계값을 도출하기 위해 소속함수로 센서 및 액추에이터 출력 값의 오차 범위(tolerance) T_{max} 를 기준으로 대칭인 삼각 퍼지 수(triangular fuzzy number)를 사용하고 결합 허용 설계 경험을 바탕으로 퍼지 언어 변수를 선정한다. 여기서, 추정값 $FT(k)$ 와 실제로 입력된 값의 편차(d_i, d_j)와 실제로 입력된 값의 편차(d_{ij})에 대한 언어 변수는 small, medium, large로 선정한다. 마지막으로, 동적 임계값에 대한 퍼지 언어 변수는 Most-Critical(M-C), Critical, Less-Critical(L-C)과 Non-Critical(N-C)로 선정하고, 임계값의 범위는 최대 1에서 최소 0.5로 정의한다.

결합 검출 알고리즘의 임계값 상수를 결정하기 위한 퍼지 규칙은 입력되는 값에 따라 판단되는 입력값의 결합 여부에 대한 경험을 이용하여 표 1과 같이 17개의 퍼지 규칙을 선정한다[24,25]. 즉, 추정된 값과 실제로 입력된 값의 편차가 큰 경우에는 낮은 임계값 상수를 부여하고 편차가 작은 경우에는 높은 임계값 상수를 부여하는 전문가적 경험을 이용하여 임계값을 부여하는 퍼지 규칙을 결정한다. 여기서, 추정값과 실제로 입력된 값의 편차가 신뢰할 수 있는 언어 변수 범위에 있을 때는 실제로 입력된 값의 편차를 고려하여 보다 신뢰성 있는 임계값 부여 규칙을 결정한다. 또한, 추정값과 실제로 입력된 값의 편차가 신뢰할 수 없는 언어 변수인 large인 경우에는 실제로 입력된 값의 편차와 상관없이 낮은 임계값을 부여할 수 있도록 가중 규칙을 결정한다.

퍼지 추론법과 비퍼지화 과정에서 퍼지 가중 알고리즘의 계산 부담을 줄이기 위하여, 그림 4와 같이 계산 과정이 비교적 단순한 Mamdani의 Minimum operation rule과 SCG



(a) fuzzy input membership function



(b) fuzzy output membership function

그림 3. Fuzzy hybrid redundancy의 소속 함수.

Fig. 3. Fuzzy membership function of fuzzy hybrid redundancy.

표 1. Fuzzy hybrid redundancy의 퍼지 규칙.

Table 1. Fuzzy rules of fuzzy hybrid redundancy.

	$d_i(k)$	$d_j(k)$	$d_{ij}(k)$	$\beta_i(k)$	$\beta_j(k)$
1	small	small	small	N-C	N-C
2	small	small	medium	L-C	L-C
3	small	small	large	critical	critical
4	small	medium	small	N-C	L-C
5	small	medium	medium	N-C	critical
6	small	medium	large	L-C	M-C
7	medium	small	small	L-C	N-C
8	medium	small	medium	critical	N-C
9	medium	small	large	M-C	L-C
10	medium	medium	small	L-C	L-C
11	medium	medium	medium	critical	critical
12	medium	medium	large	M-C	M-C
13	small	large	×	N-C	M-C
14	large	small	×	M-C	N-C
15	medium	large	×	critical	M-C
16	large	medium	×	M-C	critical
17	large	large	×	M-C	M-C

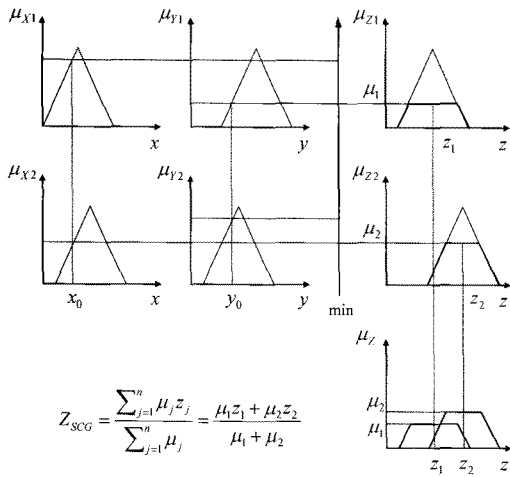


그림 4. Fuzzy hybrid redundancy의 추론 과정.
Fig. 4. Inference procedure of fuzzy hybrid redundancy.

(Simplified Center of Gravity)[26,27]를 사용한다. 특히, SCG는 COG (Center Of Gravity)와는 달리, 추론 결과로 얻어진 각 퍼지 출력의 소속 함수의 꼭지점을 이용하여 퍼지 출력을 계산하는 특징을 가지고 있다[25].

예외 처리기는 퍼지 결합 검출기에서 두 개의 입력값이 모두 결합으로 판단되는 예외 상황에서 결과값을 출력하는 역할을 담당한다. 예외 처리기는 피드백 된 이전 사이클에서 결정된 출력값들을 이용하여 입력값의 증감을 판단한다. 이전 두 사이클의 입력값이 증가하는 추세라면 예외 처리기는 직전 사이클에서 피드백 된 출력값(a(k-1))에 추정값 FT(k)를 더한 값(a(k-1)+FT(k))을 출력한다. 반대로, 이전 두 사이클의 입력값이 감소하는 추세라면 예외 처리기는 직전 사이클에서 피드백 된 출력값에 추정값 FT(k)를 뺀 값(a(k-1)-FT(k))을 출력한다. 이러한 방법으로 예외 처리기는 신뢰할 수 있는 입력값이 없을 때 임시적으로 출력을 생성하여 시스템이 작동하도록 하며, 입력값의 결합이 순간 결합이나 간헐 결합일 경우 다음 사이클의 입력을 받아 정상적으로 작동을 수행할 수 있게 한다.

보터는 퍼지 결합 검출기에서 출력되는 결과값이나 예외 처리기에서 출력되는 결과값을 이용하여 최종 출력값을 연산하는 역할을 담당한다. 여기서, 퍼지 결합 검출기에서 하나의 결과값을 보터로 보내거나 예외 처리기에서 추정된 값을 보내는 경우에 보터는 그 값을 그대로 최종 출력값으로 결정한다. 하지만, 퍼지 결합 검출기에서 두 개의 결과값을 보터로 보내는 경우에는 두 값 중 어느 값이 더 정상적인 값인지 판단할 수 없기 때문에 두 개의 결과값을 평균 연산하여 최종 출력값을 결정한다.

IV. Fuzzy hybrid redundancy 성능 평가

우선, 제한한 fuzzy hybrid redundancy의 성능을 평가하기 위하여 본 연구는 MATLAB Simulink의 함수를 이용하여 fuzzy hybrid redundancy의 시뮬레이션 모델을 구현하였다. 그림 5는 MATLAB Simulink를 이용하여 구현한 fuzzy hybrid redundancy를 나타내고 있다. 그림에서, 입력값의 변화를 추정하는 예측기는 Simulink의 일반 함수를 이용하여 구현하고 입력값의

결합 여부를 판단하는 결합 검출기와 예외 처리기는 MATLAB Stateflow를 이용하여 구현하였다. 특히, 임계값 상수를 결정하는 퍼지 규칙은 그림 6과 같이 Simulink의 퍼지 추론 시스템(fuzzy inference system: FIS)을 이용하여 구현하였다. 또한, 성능 평가를 비교하기 위하여 일반적으로 사용되는 보터 기반인 중간값(median) 보터와 평균값(average) 보터를 Simulink 함수로 구현하였다.

PC 환경의 MATLAB 시뮬레이션을 위한 가상의 입력 신호는 그림 7과 같은 브레이크 페달 신호를 사용하였다. 그림에서, 가상의 입력 신호는 운전자가 위험을 인지하고 급격하게 브레이크를 밟아서 약 400ms에서 약 4.5V(페달 센서 출력은 0에서 5V 기준)까지 상승시켜 일정한 기간 동안 그 상태를 유지한 후 약 600ms부터 천천히 브레이크 페달에서 발을 떼서 약 1,000ms에서 0.5V까지 감소시키는 상황을 모사하였다.

본 연구는 그림 7과 같이 생성한 가상의 브레이크 페달 신호에 결합을 주입하기 위해서 결합 신호를 생성하였다. 결합은 순간 결합(transient)과 간헐 결합(intermittent)의 특성을 가지는 그림 8과 같은 impulse 형태의 결합 신호와 영구 결합(permanent)의 특성을 가지는 그림 9과 같은 영구 결합으로 구분하여 정상적인 브레이크 페달 신호에 주입하였다[6,18]. 여기서, 결합은 결합률과 결합값에 따라 주입되며 결합률은 샘플 된 신호의 총수에 대한 확률적으로 주입된 결합을 포함하는 샘플 수의 비로 정의한다. 또한, 결합값은 결합을 포함한 신호 값과 원래 신호의 최대 차이를 센서 최대 출력값으로 나눈 것이다. 예로, 그림 7에서 브레이크 페달 신호의 42 번째 입력 신호는 1.796V지만, 결합이 주입된 그림 8에서 브

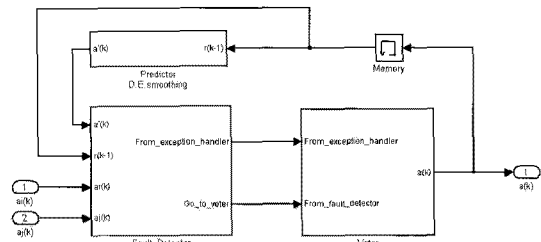


그림 5. Fuzzy hybrid redundancy 시뮬레이션 모델.
Fig. 5. MATLAB simulation model of fuzzy hybrid redundancy.

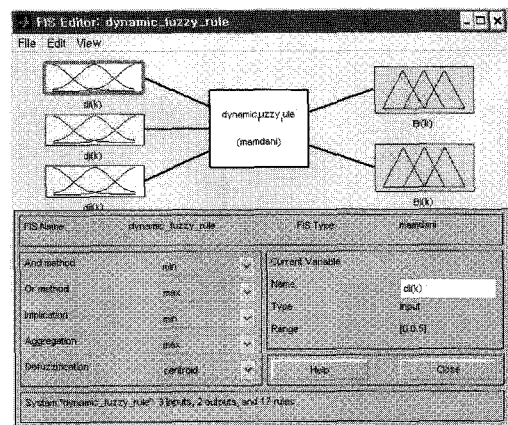


그림 6. Fuzzy hybrid redundancy의 FIS 함수.
Fig. 6. MATLAB FIS function block of fuzzy hybrid redundancy.

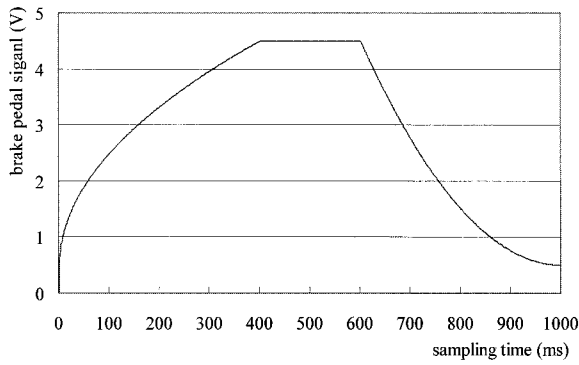


그림 7. 결함이 포함되지 않은 브레이크 신호.
Fig. 7. Example of simulated signal of a brake pedal without a fault.

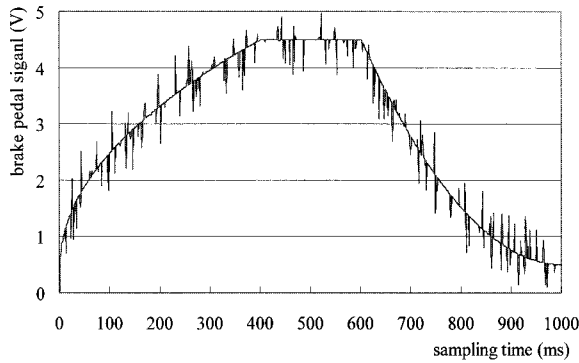


그림 8. 순간 및 간헐 결함이 포함된 브레이크 신호.
Fig. 8. Example of simulated original of brake pedal signals with transient and intermittent fault.

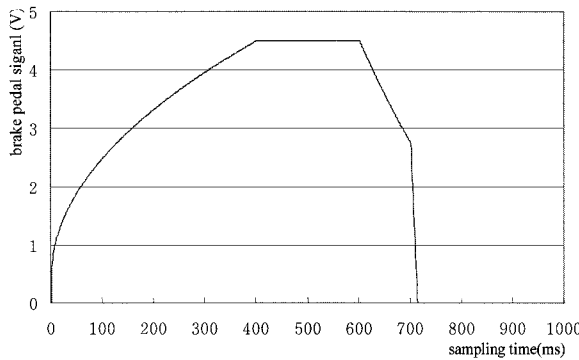


그림 9. 영구 결함이 포함된 브레이크 신호.
Fig. 9. Example of simulated original of brake pedal signals with permanent fault.

레이크 페달 신호는 15% 결함값(브레이크 페달 신호의 최대 출력 5V의 15%인 0.75에서 - 0.75V 사이의 임의의 결함값)에 따라 0.721V 값이 주입된 2.517V가 되었다.

마지막으로, 보터의 성능을 비교하기 위한 성능 지표로서 IAE(Integral of the Absolute magnitude of Error)를 사용하였다[28]. 일반적으로, IAE는 식 (2)와 같이 시간 영역 ΔT 를 기준으로 발생한 오차의 적분 값으로 정의하고 IAE가 작을수록 결함을 제거하는 능력이 우수함을 의미한다. 여기서, $e(k)$ 는 실제 정상적인 브레이크 페달 신호와 결함을 제거한 신호의 차이를 의미한다.

$$IAE = \sum_{k=1}^n \Delta T \cdot |e(k)| \quad (2)$$

그림 10은 정상적인 그림 7과 같은 신호에 순간 결함과 간헐 결함의 특성이 포함된 그림 8과 같은 신호를 두 입력 신호로 하여 fuzzy hybrid redundancy의 결함 제거 성능을 나타내고 있다. 그림에서, fuzzy hybrid redundancy는 결함이 발생된 신호를 결함 검출 알고리즘을 통하여 적절히 제거하는 우수한 결함 허용 성능을 가짐을 확인하였다. 또한, 그림 11은 순간 결함과 간헐 결함의 특성이 포함된 그림 8과 같은 신호와 영구 결함 특성이 포함된 그림 9와 같은 신호를 두 입력 신호로 하여 fuzzy hybrid redundancy의 결함 제거 성능을 나타내고 있다. 그림에서, fuzzy hybrid redundancy는 예측기에서 추정된 $FT(k)$ 와 결함 검출 알고리즘을 통하여 순간 및 간헐 결함과 영구 결함이 포함된 신호를 격리하고, 두 입력에 동시에 결함이 발생하는 경우에는 예외 처리기를 통하여 예외 상황에 대처할 수 있는 출력값을 생성하여 우수한 결함 제거 성능을 가짐을 확인하였다. 또한, fuzzy hybrid redundancy의 IAE 성능 지수가 1.748임을 확인하였다. 하지만, 약 950ms 전후에는 정상적인 결과값을 출력하지 못하고 예외 처리기의 값으로 대체하여 정확한 값을 출력하지 못하는 것을 확인하였다.

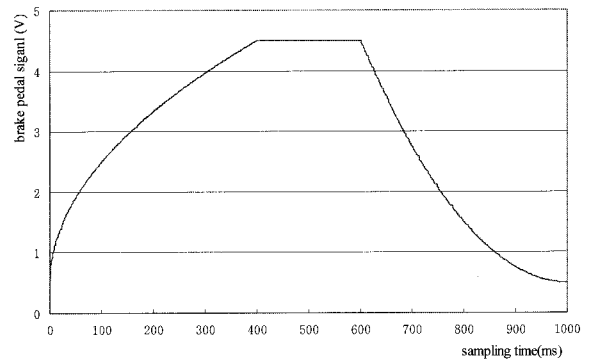


그림 10. 순간 및 간헐 결함이 포함된 신호의 fuzzy hybrid redundancy 결과.
Fig. 10. Brake pedal signal output of fuzzy hybrid redundancy with permanent fault.

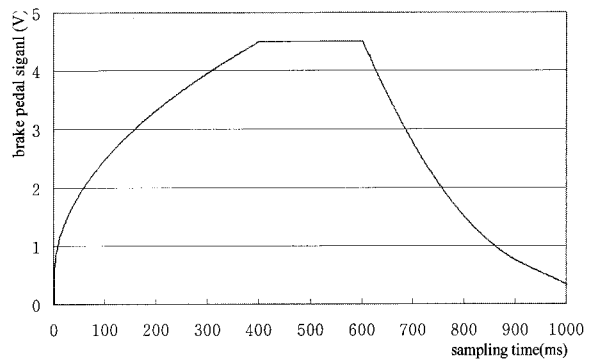


그림 11. 순간 및 간헐 결함과 영구 결함이 포함된 신호의 fuzzy hybrid redundancy 결과.
Fig. 11. Brake pedal signal output of fuzzy hybrid redundancy with permanent fault and transient fault.

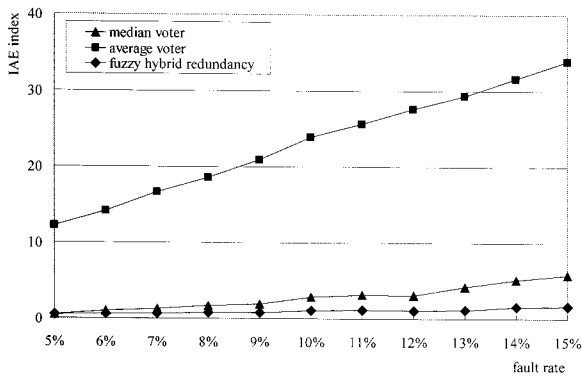


그림 12. 결함률을 변화시킨 경우 fuzzy hybrid redundancy의 IAE 성능지수 결과.

Fig. 12. IAE performance index of brake pedal signal of fuzzy hybrid redundancy for varying fault rate with a fault value of 10%.

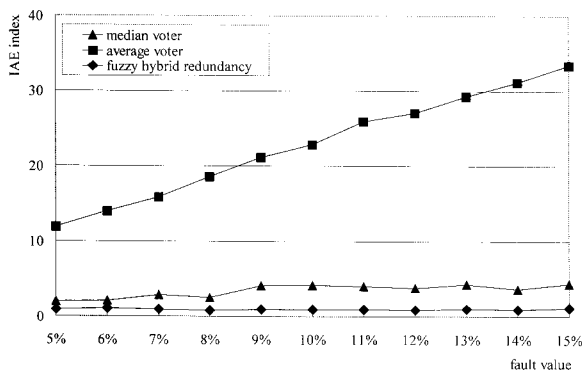


그림 13. 결함값을 변화시킨 경우 fuzzy hybrid redundancy의 IAE 성능지수 결과.

Fig. 13. IAE performance index of brake pedal signal of fuzzy hybrid redundancy for varying fault value with a fault rate of 10%.

그림 12는 그림 8과 같은 순간 및 간헐 결함 특성을 가지는 신호에서 결함값을 10%로 고정된 상태에서 결함률을 5%에서 15%까지 증가시켜 가면서 획득한 브레이크 페달 출력 신호로부터 계산된 평균값 보터, 중간값 보터와 fuzzy hybrid redundancy의 IAE 성능 지수를 나타내고 있다. 그림에서, 평균값 보터의 경우 결함률이 증가함에 따라 IAE 성능 지수가 급격하게 증가하며, 결함률이 15%일 때 IAE 성능 지수가 33.897임을 확인하였다. 또한, 중간값 보터의 경우에도 결함률이 증가함에 따라 IAE 값이 증가하며, 결함률이 15%일 때 IAE 성능 지수가 5.785임을 확인하였다. 하지만, 제안된 fuzzy hybrid redundancy는 결함률의 변화에 영향 없이 일정한 IAE 값을 가지며, 결함률이 15%일 때 IAE 성능 지수가 1.656로 평균값 보터나 중간값 보터에 비하여 상대적으로 낮음을 확인하였다. 즉, 평균값 보터나 중간값 보터의 경우, 결함률의 변화에 상당히 민감하게 반응하는 데 반하여 fuzzy hybrid redundancy는 결함률이 변화하더라도 크게 영향을 받지 않고 일정한 성능을 가짐을 확인하였다.

그림 13은 결함률을 10%로 고정된 상태에서 결함값을 5%에서 15%까지 증가시켜 가면서 획득한 브레이크 페달 출력

신호로부터 계산된 평균값 보터, 중간값 보터와 fuzzy hybrid redundancy의 IAE 성능 지수를 나타내고 있다. 그림에서, 평균값 보터와 중간값 보터는 결함값이 15%일 때 IAE 값이 각각 33.402와 4.338임을 확인하였다. 하지만, 제안된 fuzzy hybrid redundancy는 결함값의 변화에 영향 없이 일정한 IAE 값을 가지며, 결함값이 15%일 때 IAE 성능 지수가 1.137로 평균값 보터나 중간값 보터에 비하여 상대적으로 낮음을 확인하였다.

이상의 결과로부터 제안한 fuzzy hybrid redundancy는 일반적인 보팅 기법인 평균값 보터와 중간값 보터와 비교하여 상대적으로 우수함을 확인하였다. 또한, 앞서 제안된 예측기 구조의 하이브리드 중복 구조와 비교하여 fuzzy hybrid redundancy는 임계값 및 임계값 계수를 판단하는 퍼지 규칙을 가지고 있어 입력값의 특성에 영향을 받지 않는 우수한 결함 검출 성능을 가짐을 확인하였다. 따라서, 요구되는 시스템의 결함 허용 성능이 높은 safety critical 시스템에는 fuzzy hybrid redundancy를 적용하는 것이 적절함을 확인하였다.

V. 결론

본 논문은 높은 신뢰성과 결함 허용 성능을 요구하는 지능형 자동차의 x-by-wire 시스템의 결함 허용을 위하여 하이브리드 중복 구조의 fuzzy hybrid redundancy를 제안하였다. 또한, fuzzy hybrid redundancy를 구현하기 위하여 센서 입력값의 변화에 따라 임계값 및 임계값 상수를 결정하는 퍼지 규칙을 적용한 결함 검출 알고리즘을 제안하였다. 마지막으로, 일반적인 보팅 기법인 중간값 보터와 평균값 보터와 본 논문에서 제안한 fuzzy hybrid redundancy에 서로 상반되는 결함 특성을 가지는 결함 신호를 주입하여 결함 제거 성능을 평가하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 본 논문에서 제안한 fuzzy hybrid redundancy는 일반적인 보팅 기법인 중간값 보터와 평균값 보터와 비교하여 상대적으로 우수한 결함 허용 성능을 가짐을 확인하였다. 특히, 순간 및 간헐 결함 특성을 가지는 결함 신호와 영구 결함 특성을 가지는 결함 신호를 함께 평가하여 서로 상반되는 결함 신호 특성에도 제안된 fuzzy hybrid redundancy가 우수한 성능을 가짐을 확인하였다. 따라서, 제안된 fuzzy hybrid redundancy는 기존의 방법에 비하여 높은 신뢰성을 가지는 중복 구조임을 확인하였다.

둘째, 본 논문에서 결함 검출 알고리즘은 센서 입력값의 특성에 따라 임계값을 설정하지 않고 실시간으로 입력값의 특성에 따라 적절한 임계값 상수를 결정하여 우수한 결함 제거 성능을 가짐을 확인하였다. 특히, 퍼지 규칙을 이용하여 입력값의 특성에 따라 적절한 임계값 상수를 결정하는 방법을 제안하여 입력의 특성에 상관없이 일정한 결함 제거 성능을 가짐을 확인하였다. 따라서, 요구되는 결함 허용 성능이 높은 시스템의 경우에는 fuzzy hybrid redundancy가 적절함을 확인하였다.

그러나, 본 논문에서는 시뮬레이션을 이용하여 fuzzy hybrid redundancy의 성능을 검증하였기 때문에 실제 차량으로 구현하였을 경우에 발생할 수 있는 잡음(noise) 문제에 대한 고려를 하지 못하였다. 또한, 본 논문에서 사용된 결함 신호를 제

위한 구현하지 못하는 다양한 형태의 결함 신호에 대한 충분한 검토와 함께 성능을 검증하는 연구가 필요하다. 마지막으로, 성능에 가장 큰 영향을 미치는 퍼지 규칙을 결정하는 방법에 대한 다양한 연구도 필요하다.

참고문헌

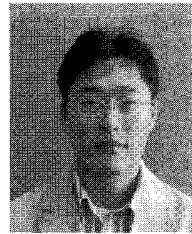
- [1] 이경창, 김만호, 이석, “비전 기반 스마트 와이퍼 시스템을 위한 지능형 레인 센싱 알고리즘 개발,” 제어 · 자동화 · 시스템공학 논문지, 제10권 제7호, pp. 649-657, 2004.
- [2] 김만호, 임창휘, 이석, 이경창, “지수 평활법을 이용한 predictive smoothing voter 개발,” 한국자동차공학회논문집, 제14권 제6호, pp. 34-42, 2006.
- [3] 김만호, 손병집, 이석, 이경창, “분산형 실시간 제어 시스템을 위한 TTP 네트워크 시스템의 구현,” 제어 · 자동화 · 시스템공학 논문지, 제13권 제6호, pp. 596-602, 2007.
- [4] R. Isermann, R. Schwarz, and S. Stolz, “Fault-tolerant drive-by-wire systems,” *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 22, no. 5, pp. 64-81, 2002.
- [5] M. H. Kim, S. Lee, and K. C. Lee, “Predictive hybrid redundancy using exponential smoothing method for safety critical systems,” *International Journal of Control, Automation and Systems*, vol.6, no.1, pp.126-134, Jan. 2008.
- [6] B. W. Johnson, *Design and Analysis of Fault-tolerant Digital Systems*, Addison-Wesley Publishing Company, 1989.
- [7] L. Shabgahi, J. M. Bass, and S. Bennett, “A taxonomy for software voting algorithm used in safety-critical systems,” *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 53, no. 3, pp. 319-328, 2004.
- [8] J. L. Garcia-Lapresta, “A general class of simple majority decision rules based on linguistic opinions,” *Information sciences*, vol. 176, no. 4, pp. 352-365, 2006.
- [9] K. Goeva-Popstojanova and A. Gmarov, “N version programming with majority voting decision: Dependability modeling and evaluation,” *Microprocessing and Microprogramming*, vol. 38, no. 1, pp. 811-818, 1993.
- [10] L. Shabgahi, G. Bass, and J. M. Bennett, “Efficient implementation of inexact majority and median voters,” *Electronics Letters*, vol. 36, no. 15, pp. 1326-1328, 2000.
- [11] M. D. Krstic, M. K. Stojcev, G. Lj. Djordjevic, and I. D. Andrejic, “A mid-value select voter,” *Microelectronics and Reliability*, vol. 45, no. 3, pp. 733-738, 2005.
- [12] G. Levitin, “Weighted voting systems: reliability versus rapidity,” *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 89, no. 2, pp. 177-184, 2005.
- [13] G. R. Latif-Shabgahi, “A novel algorithm for weighted average voting used in fault tolerant computing systems,” *Microprocessors and Microsystems*, vol. 28, no. 7, pp. 357-361, 2004.
- [14] Q. Long, M. Xie, S. H. Ng, and Gregory Levitin, “Reliability analysis and optimization of weighted voting systems with continuous states input,” *European Journal of Operational Research*, In Press, Corrected Proof, Available online 23, 2007.
- [15] G. L. Shabgahi, S. Bennett, and J. M. Bass, “Smoothing voter: a novel algorithm for handling multiple errors in fault-tolerant control systems,” *Microprocessors and Microsystems*, vol. 27, no. 7, pp. 303-313, 2003.
- [16] G. L. Shabgahi and A. J. Hirst, “A fuzzy voting scheme for hardware and software fault tolerant systems,” *Fuzzy Set and Systems*, vol. 150, no. 3, pp. 579-598, 2005.
- [17] Shengwei Wang and Jingtian Cui Sung, “Sensor-Fault Detection, Diagnosis and Estimation for Centrifugal Chiller Systems Using Principal-Component Analysis Method,” *Applied Energy*, vol. 82, no. 3, pp. 197-213, 2005.
- [18] S. Anwar and L. Chen, “An Analytical Redundancy-Based Fault Detection and Isolation Algorithm for a Road-Wheel Control Subsystem in a Steer-By-Wire System,” *IEEE Transactions on vehicular technology*, vol. 56, no. 5, pp. 2859-2869, 2007.
- [19] J. C. Laprie (ED), *Dependability: Basic Concepts and Terminology*, Springer, 1991.
- [20] NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods, <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/>, 2006.
- [21] E. S. and Gardner Jr., “Exponential smoothing: The state of the art-Part II,” *International Journal of Forecasting*, vol. 22, no. 4, pp. 637-666, Dec. 2006.
- [22] R. D. Snyder, A. B. Koehler, R. J. Hyndman, and J. K. Ord, “Exponential smoothing models: Means and variances for lead-time demand,” *European Journal of Operational Research*, vol. 158, no. 2, pp. 444-455, Oct. 2004.
- [23] K. C. Lee, S. Lee, and M. H. Lee, “Remote Fuzzy Logic Control of Networked Control System via Profibus-DP,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 50, no. 4, pp. 784-792, 2003.
- [24] C. C. Lee, “Fuzzy logic in control systems: Fuzzy logic controller—Part I,” *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern.*, vol. 20, no. 2, pp. 404-418, 1990.
- [25] C. C. Lee, “Fuzzy logic in control systems: Fuzzy logic controller—Part II,” *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern.*, vol. 20, no. 2, pp. 419-435, 1990.
- [26] L. X. Wang, *A Course in Fuzzy Systems and Control*. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 1997.
- [27] X. J. Zeng and M. G. Singh, “Approximation accuracy analysis of fuzzy systems as function approximators,” *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, vol. 4, no. 1, pp. 44-63, 1996.
- [28] K. Astrom and T. Haqqlund, *PID Controller: Theory, design and tuning*, International Society for Measurement and Control, 1995.



김만호

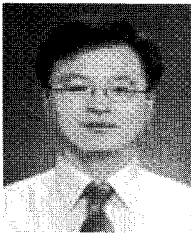
1977년 4월 16일생. 2001년 동아대학교 기계공학부 졸업. 2002년 부산대학교 지능기계공학과 석사. 2008년 동 대학원 박사. 2006년 기계공학연구정보센터 전임 연구원. 2006년~현재 대구경북과학기술원 미래산업융합기술연구부 연구원.

관심 분야는 차량용 네트워크 시스템, 임베디드 시스템, 결합 허용을 위한 중복 시스템, 운전자 행동 분석 및 운전 부하 분석.



손병집

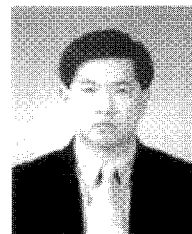
1979년 6월 20일생. 2006년 부산대학교 기계공학부 졸업. 2006년~현재 부산대학교 지능기계공학과 석박사통합과정 재학 중. 관심분야는 차량용 네트워크 및 임베디드 시스템.



이경창

1971년 5월 1일생. 1996년 부산대학교 생산기계공학과 졸업. 1998년 동 대학원 석사. 2003년 동 대학원 박사. 1998년~2003년 기계공학연구정보센터 전임 연구원. 2003년~2005년 울산대학교 네트워크기반 자동화 연구센터 전임연구원.

2005년~현재 부경대학교 제어자동화공학과 조교수. 관심분야는 필드버스, 산업용 이더넷, 차량용 네트워크, 홈 네트워크.



이석

1961년 12월 11일생. 1984년 서울대학교 기계공학과 졸업. 1985년 펜 실바니아 주립대학교 석사. 1990년 동 대학원 박사. 1990년~1993년 신시내티 대학교 기계공학과 조교수. 1993년~현재 부산대학교 기계공학부 교수. 관심분야는 필드

버스, 차량용 네트워크, 홈 네트워크.