

지수 평활법을 이용한 Predictive Smoothing Voter 개발

김 만 호¹⁾ · 임 창 휘¹⁾ · 이 석^{*1)} · 이 경 창²⁾

부산대학교 기계공학부¹⁾ · 부경대학교 제어계측공학과²⁾

Development of Predictive Smoothing Voter using Exponential Smoothing Method

Man Ho Kim¹⁾ · Chang Hwye Lim¹⁾ · Suk Lee^{*1)} · Kyung Chang Lee²⁾

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

²⁾Department of Control and Automation Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

(Received 12 January 2006 / Accepted 12 May 2006)

Abstract : As many systems depend on electronics, concern for fault tolerance is growing rapidly. For example, a car with its steering controlled by electronics and no mechanical linkage from steering wheel to front tires (steer-by-wire) should be fault tolerant because a failure can come without any warning and its effect is devastating. In order to make system fault tolerant, there has been a body of research mainly from aerospace field. This paper presents the structure of predictive smoothing voter that can filter out most erroneous values and noise. In addition, several numerical simulation results are given where the predictive smoothing voter outperforms well-known average and median voters.

Key words : Predictive smoothing voter, Exponential smoothing method(지수 평활법), Hybrid redundancy system(하이브리드 중복 구조), Fault-tolerant(고장 허용), Redundancy system(중복 구조)

1. 서론

최근 들어, 자동차나 선박과 같은 제어 시스템에서 신뢰성, 가용성 및 안전성에 대한 관심이 증대되어 가고 있다. 예로, 지능형 차량에 적용되는 x-by-wire 시스템에서는 차량의 성능 향상을 위하여 기구적 연결이 전자식 연결로 대체되고 있으며, 운전자의 안전을 보장하기 위하여 고장에 능동적으로 대처할 수 있는 기능이 요구되고 있다. 이와 같이, 시스템의 신뢰성을 보장하기 위해서는 고장이 발생하더라도 일정 기간 이상 정상 상태를 유지할 수 있어야 할 뿐만 아니라, 고장의 원인을 진단하여 제거할 수 있어야 한다. 따라서 시스템의 고장에 능동적

으로 대처할 수 있는 고장 허용 기법과 같은 적극적인 대응 기법이 요구되고 있다.^{1,4)}

시스템의 고장 허용을 위한 대표적인 방법으로는, 동일한 기능을 수행하는 모듈을 다수 설치하여 일부 모듈에서 고장이 발생하면 정상적인 모듈로 대체할 수 있는 중복 구조를 이용하는 것이다. 예로, Fig. 1은 중복 구조로 설계된 x-by-wire 시스템의 페달 모듈의 구조를 나타내고 있다. 그림에서, duplex 중복 구조로 설계된 페달 모듈에는 페달의 정보를 측정하는 센서, 센서의 신호 처리와 연산을 수행하는 연산 모듈과 연산 결과를 바탕으로 출력값을 결정하는 보터(voter)가 중복으로 설치되어 있다. 여기에서, 보터는 입력 받은 두 개의 센서 값을 평균하여 하나의 결과값을 출력하는 기능을 담당한다.^{5,6)}

*Corresponding author, E-mail: slee@pnu.edu

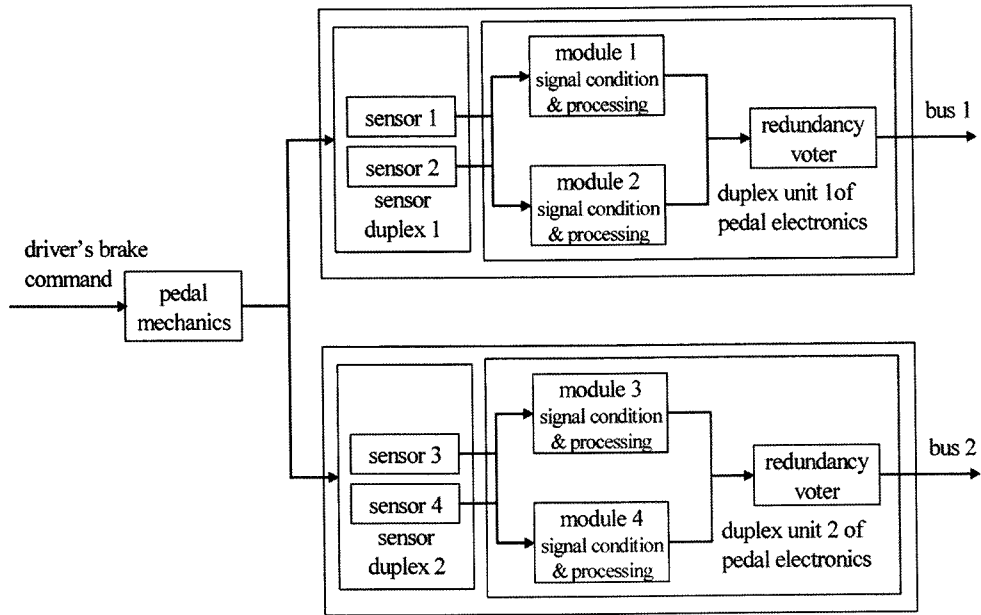


Fig. 1 Duo-duplex architecture for the pedal module in drive-by-wire system

그림과 같이 페달 모듈의 정보를 측정하는 센서나, 센서의 신호 처리 및 연산을 수행하는 모듈에 고장이 발생하면 중복 구조를 적용하지 않은 차량은 사고를 일으키게 된다. 특히, x-by-wire 시스템과 같은 첨단 전자 시스템에서 고장이 발생하면, 기계적인 백업이 없기 때문에 중복 구조를 적용하지 않은 차량은 승객의 안전에 치명적인 문제점을 가지게 된다. 이와 같이, x-by-wire 시스템과 같은 첨단 전자 시스템이 차량에 적용됨에 따라, 필연적으로 고장에 대한 신뢰성을 확보하기 위한 중복 구조의 적용이 요구된다.

특히, 최근 들어, 마이크로 컨트롤러의 가격이 하락하고 연산 기능이 향상됨에 따라 하드웨어 중복 구조에 관한 연구가 진행되고 있다. 뿐만 아니라, 중복 구조를 적용하기 위하여 고장 검출 알고리즘과 같은 다양한 방법들이 제안되고 있다.⁸⁻¹⁰⁾

이에 따라, 본 논문에서는 하드웨어 중복 구조의 한 종류인 하이브리드 중복 구조를 위한 predictive smoothing voter를 제안한다. 본 논문에서는 고장을 검출하기 위한 방법으로서 지수 평활법을 이용한 임계값 예측 방법(threshold prediction method)과 고장 검출 알고리즘을 제안한다. 또한, 본 논문에서는 가상의 제어 신호를 이용하여 제안된 하이브리드

중복 구조의 성능을 평가한다.

2. 중복 구조 시스템의 개요

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 고장 허용 방법으로 인식되고 있다.⁷⁾

하드웨어 중복 구조는 기능과 구조에 따라 정적 중복 구조(static redundancy), 동적 중복 구조(dynamic redundancy)와 하이브리드 중복 구조(hybrid redundancy)로 나눌 수 있다.⁷⁾ 먼저, Fig. 2(a)와 같은

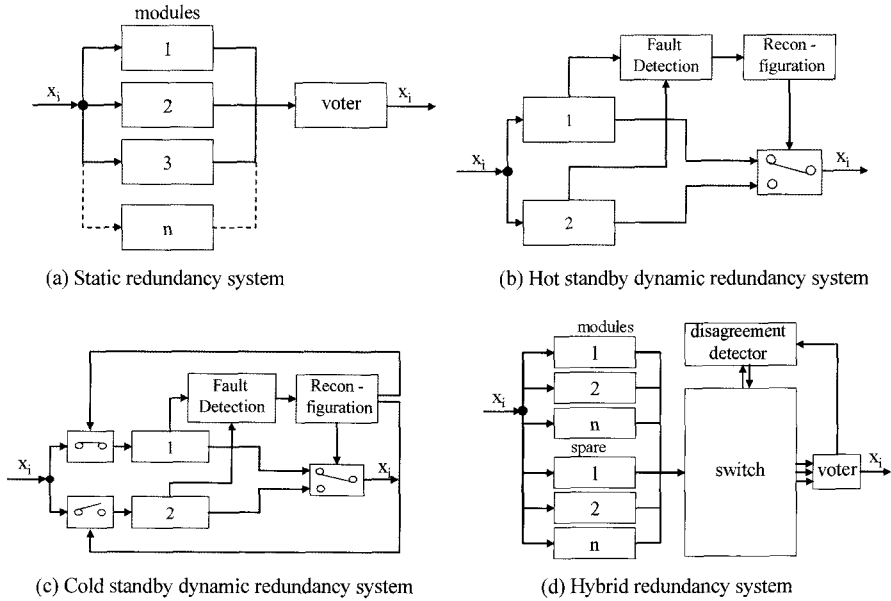


Fig. 2 Structure of hardware redundancy system

정적 중복 구조는 고장이 발생하면 고장을 차단 (fault masking)하여 억제(fault containment)하는 기능을 가진다. 3개 이상의 모듈을 사용하기 때문에 상대적으로 비용이 높을 뿐만 아니라, 두 개 이상의 모듈에서 동시에 고장이 발생할 경우 고장을 판단하기 어렵다는 단점을 가지고 있다.¹¹⁾

반면, Fig. 2(b)와 2(c)와 같은 동적 중복 구조는 고장 검출(fault detection)을 통해 고장 위치를 찾아서 (fault location) 고장 회복(fault recovery)하는 기능을 가진다. 즉, 동적 중복 구조는 고장이 발생하면 고장이 발생된 모듈을 교체(reconfiguration)할 수 있는 기능을 가지고 있다. 왜냐하면, 고장은 불규칙하게 순간적으로 발생하는 경향을 가지고 있기 때문에, 고장이 발생된 부분만을 잠시 격리하는 것이 고장을 완벽하게 차단하는 방법보다 더 효율적이기 때문이다. 주 모듈과 대기 모듈의 동작 상태에 따라 Fig. 2(b)를 hot standby 중복 구조, Fig. 2(c)를 cold standby 중복 구조라고 한다.

마지막으로, Fig. 2(d)는 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 마이크

로 컨트롤러가 필요하기 때문에 우주선과 같은 높은 안전성을 필요로 하는 시스템에만 제한적으로 사용되어왔다. 그러나 최근에는 마이크로 컨트롤러의 가격이 낮아지고 기능이 향상됨에 따라 자동차를 비롯한 디지털 제어 시스템에서의 사용이 증대되고 있다.

하이브리드 형태의 중복 구조로는 Shabgahi가 제안한 smoothing voter¹²⁾가 있다. Smoothing voter는 보터 임계값(voter threshold)을 이용하여 Triple Module Redundancy(TMR) 구조에서 입력받은 3개의 입력값 사이의 차이를 비교하여 일정한 임계값 내에 포함될 경우 정상 신호로 판단하여 통과시킨다. 만약, 일정한 임계값을 벗어나면 입력받은 값을 피드백된 전 단계의 값과 비교하여 smoothing 임계값(smoothing threshold) 내에 포함될 경우 통과시킨다. 마지막으로, 통과된 값을 보터가 다수결 방법에 따라 하나의 출력값을 결정한다.

3. Predictive Smoothing Voter의 구조

Fig. 3은 본 논문에서 제안된 하이브리드 중복 구조인 predictive smoothing voter의 구조를 나타내고 있다. 그림에서, predictive smoothing voter는 고장 검출을 위하여 사용되는 임계값을 예측하는 임계값

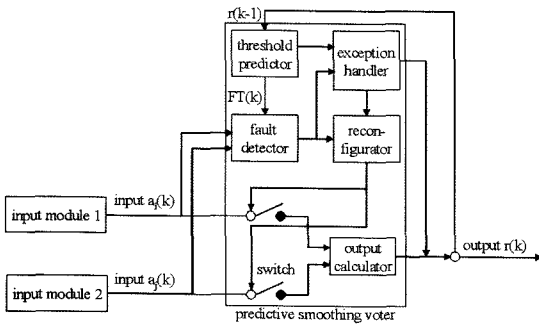


Fig. 3 Structure of predictive smoothing voter

예측부(threshold predictor), 입력 신호의 신뢰 여부를 판단하는 고장 검출부(fault detector), 고장 검출부가 두 입력 모두 신뢰할 수 없는 경우를 처리하는 예외 처리부(exception handler), 고장 검출 결과에 따라 입력값의 통과 여부를 결정하는 스위치를 제어하는 재구성부(reconfigurator)와 통과된 값을 이용하여 출력값을 연산하는 출력 연산부(output calculator)로 구성되어 있다.

먼저, 임계값 예측부는 고장을 검출하기 위하여 사용되는 임계값을 예측하는 기능을 담당한다. 본 논문에서는 임계값을 예측하기 위하여 시계열 예측 기법인 지수 평활법을 사용한다. 일반적으로, 지수 평활법은 입력값의 상관관계가 과거에서 현재로 감에 따라 최근의 값에 높은 비중을 주는 예측 방법이다. 또한, 지수 평활법은 직관적으로 이해하기 쉽고 사용이 편리하다는 측면에서 자료 예측에 사용되고 있다. 특히, 이 중 지수 평활법은 제어 신호와 같이 값이 경향을 가지는 경우에 뛰어난 예측 특성을 가진다고 알려져 있다.¹³⁾

본 논문에서 사용된 임계값은 식 (1)과 같은 이중 지수 평활법을 이용하여 예측된다.

$$\begin{aligned} FT^{[1]}(k) &= \alpha RT(k) + (1-\alpha)FT^{[1]}(k-1) \\ FT^{[2]}(k) &= \alpha FT^{[1]}(k) + (1-\alpha)FT^{[2]}(k-1) \end{aligned} \quad (1)$$

where : $RT(k) = r(k-1) - r(k-2)$

여기서, $FT^{[1]}(k)$ 는 k-1 사이클에서 계산된 $FT^{[1]}(k-1)$ 값과 k 사이클의 실제 임계값(real threshold) $RT(k)$ 에 지수 평활법을 적용하여 예측된 임계값을 의미한다. $FT^{[2]}(k)$ 는 $FT^{[1]}(k)$ 값에 다시 지수 평활법을 적용하여 예측된 임계값을 의미한다. α 는 지수 평활화 상수로서, 현재에 가까운 값에 높은 가

중치를 주기 위하여 0.05에서 0.3의 값을 가진다. 실제 임계값 $RT(k)$ 는 k-1 사이클 출력값 $r(k-1)$ 과 k-2 사이클의 $r(k-2)$ 의 편차로 정의한다. 단, $RT(1)$ 은 $FT(1)$ 과 같은 값을 가지는 것으로 정의한다. 마지막으로, 이중 지수 평활법을 이용한 예측 임계값 (forecast threshold) $FT(k)$ 는 식 (2)를 이용하여 계산된다.

$$FT(k) = (2 + \frac{\alpha}{1-\alpha})FT^{[1]}(k) - (1 + \frac{\alpha}{1-\alpha})FT^{[2]}(k) \quad (2)$$

여기서, $FT(k)$ 는 k 사이클에서 예측된 $FT^{[1]}(k)$ 와 $FT^{[2]}(k)$ 를 이용하여 예측된 k 사이클에서의 임계값을 의미한다. 단, 이중 지수 평활법에서 $FT(1)$, $FT^{[1]}(1)$, $FT^{[2]}(1)$ 은 처음 입력값의 평균으로 정의하고, 입력값의 고장은 없다고 가정한다.^{13,14)}

고장 검출부는 임계값 예측부에서 예측된 임계값 $FT(k)$ 를 이용하여 입력값의 고장을 검출하는 기능을 담당한다. 본 논문에서는 입력 신호가 급격한 변화를 보이는 경우를 포함하여 입력값의 고장을 검출할 수 있는 알고리즘을 개발한다. 왜냐하면, 디지털 제어 시스템에서 일정 속도로 동작하는 플랜트의 출력인 센서 값이나 플랜트의 입력인 액츄에이터 제어 값은 스텝 응답 신호와 같이 초기에 상대적으로 급격한 변화를 보이는 경우가 있기 때문이다. Fig. 4는 임계값 예측부에서 예측된 $FT(k)$ 를 이용한 고장 검출 알고리즘을 나타내고 있다. 그림에서, 고장 검출기는 입력값이 들어오면 $FT(k)$ 와 임계값 범위(threshold range, TR)를 계산한다. 여기서, TR은 잡음이나 외란에 의한 센서 및 액츄에이터 값의 오차 범위(tolerance)로서, 일반적으로 센서나 액츄에이터 정격 출력의 5%로 정의하였다.

다음으로, 고장 검출부는 $FT(k)$ 와 TR을 이용하여 입력값의 고장을 검출하게 된다. 본 논문에서는 입력값과 직전 사이클의 출력값의 차이가 $FT(k) \pm TR$ 범위를 벗어나게 되면 입력값에 문제가 있다고 판단한다. 여기서, 두 개의 입력값이 모두 문제가 있다고 판단되면, k 사이클에 입력된 $a_i(k)$ 와 $a_j(k)$ 의 거리 차이 $d_{ij}(k) = a_i(k) - a_j(k)$ 를 이용하여 정말로 고장인지를 판단한다.

만일, $d_{ij}(k)$ 가 $\pm TR$ 이내에 있다면 두 입력이 비슷하게 움직인 것이기 때문에 고장이 아니라 급격한

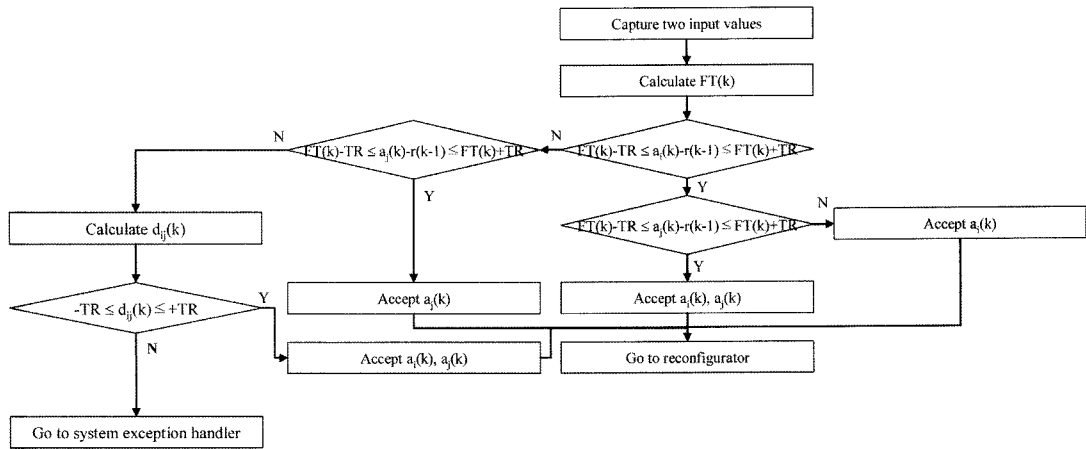


Fig. 4 Flowchart of fault detector in predictive smoothing voter

신호의 변화라고 판단하고, 두 입력을 모두 받아들인다. 하지만, $d_{ij}(k)$ 가 $\pm TR$ 범위 밖이라면 두 입력이 서로 다르고, 두 입력 모두 신뢰할 수 없다고 판단하여 예외 처리부를 작동하게 한다. 마지막으로, 고장 검출부의 판단에 따라 어느 입력값을 출력 연산부에 연결할 것인가를 재구성부에 전달한다.

예외 처리부는 고장 검출부에서 두 개의 입력값이 모두 고장으로 판단된 경우에, 출력해야 할 값 $r(k)$ 를 계산하는 역할을 담당한다. Fig. 5는 두 개의 입력값이 모두 고장으로 판단되는 경우, 출력값을 결정하기 위한 알고리즘을 나타내고 있다. 그림에서, 고장 검출부로부터 호출되면 피드백 된 이전 사이클에서 결정된 출력값들을 이용하여 입력값의 증감을 판단한다. 만약, 입력값이 증가하는 추세라면 직전 사이클에서 피드백 된 출력값에 TR 을 더한 값을 출력한다. 반대로, 입력값이 감소하는 추세라면 직전 사이클에서 피드백 된 출력값에 TR 을 뺀 값을 출력한다. 이러한 방법에 의하여, 신뢰할 수 없는 입력값이 없을 때 임시적으로 출력을 생성하여 시스템이 작동하도록 하며, 입력값의 오류가 일시적이라면 다음 사이클의 입력을 받아 정상적으로 작동을 수행할 수 있게 한다.

재구성부는 입력 모듈과 연결되어 있는 스위치를 조작하는 기능을 담당한다. 즉, 고장 검출부에서 입력값의 고장을 검출하면 재구성부는 고장이 발생된 모듈의 스위치를 조작하여 신뢰할 수 없는 입력값이 출력 연산부에 전달되지 않도록 하는 기능을 담

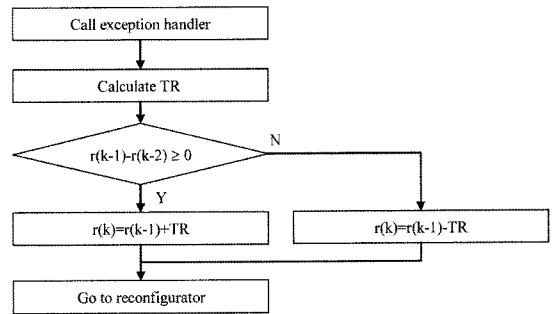


Fig. 5 Flowchart of exception handler in predictive smoothing voter

당한다. 마지막으로, 출력 연산부는 재구성부의 스위치 조작의 결과로 전달받은 정상적인 입력값들의 보정 기능을 담당한다. 일반적으로, 센서는 일정한 값을 출력하고자 할 때에도 잡음이나 외란, 하드웨어적 특성 때문에 일정한 값이 출력되지 않는다. 따라서 이를 보정하기 위하여 보터는 정상값으로 판단된 값들에 대하여 평균 연산을 수행하여 최종 출력값을 결정한다.

4. Predictive Smoothing Voter 성능 평가

본 논문에서는 제안된 predictive smoothing voter의 성능을 평가하기 위하여, PC 환경에서 시뮬레이션을 수행하였다. 특히, 본 논문에서는 제어 시스템에서 시간 영역 성능을 평가하는데 가장 많이 사용되는 스텝 응답 신호에 제어 입력 변수를 교란시키

는 외란(disturbance)이나 센서 잡음이 포함된 것으로 가정하고 고장 검출이 정상적으로 이루어지는가를 평가하였다.

Fig. 6은 센서부의 센서 잡음이 포함된 스텝 응답을 획득하기 위한 시뮬레이션 모델을 나타내고 있다. 그림에서, 스텝 응답을 획득하기 위하여, MATLAB 7.1을 이용하여 식 (3)과 같은 전달함수를 가지는 시스템을 고려하였다.

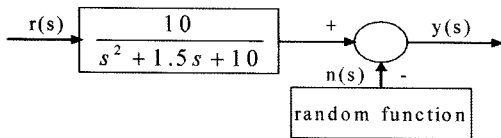


Fig. 6 Simulation model for input signal with disturbance

$$G(s) = \frac{10}{s^2 + 1.5s + 10} \quad (3)$$

이 시스템에 스텝 입력이 주어졌을 때의 응답을 MATLAB에서 계산하고 그 결과를 10ms 마다 파일에 저장하였다. 이 데이터를 C로 작성된 잡음 추가 프로그램이 읽어 들인 후 고장율(fault rate)과 고장값(fault value)에 따라 잡음이 포함된 데이터를 생성하였다. 잡음을 추가하는 과정을 한 번 더 수행하여 잡음이 포함된 두 세트의 데이터를 생성하였다. 마지막으로, C로 작성한 predictive smoothing voter 프로그램이 잡음을 포함한 데이터를 읽어 들여서 최종 출력을 생성하였다. 여기에서, 고장율은 전체 입력된 데이터의 수에서 고장값을 포함한 데이터의 수의 비율로 정의하고, 고장값은 참값과 고장값의 비율로 정의하였다. 또한, 본 논문에서는 고장율과 고장값에 따른 성능을 평가하기 위하여, 고장율과 고장값을 각각 5%에서 15%까지 조절하여 스텝 응답을 생성시켰다.

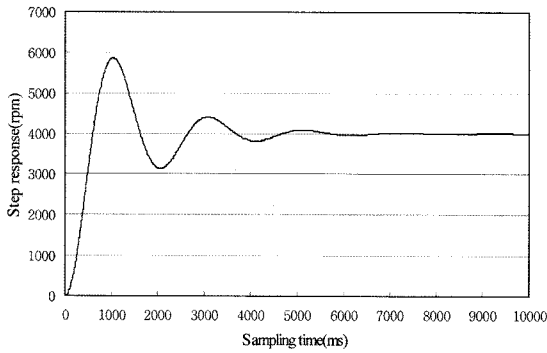
또한, 본 논문에서는 predictive smoothing voter의 성능을 평가하기 위하여, 입력값의 평균을 출력하는 평균값 보터와 입력값의 중간값을 출력하는 중간값 보터의 성능과 비교하였다. 그러나 평균값 보터와 중간값 보터는 세 개 이상의 입력 신호가 존재할 때 효과적으로 동작하기 때문에 시뮬레이션 모델에서 3개의 입력 신호를 생성시켰다. 마지막으로, 보터의 성능을 비교하기 위한 성능 지표로서 IAE

(Integral of the Absolute magnitude of the Error)를 사용하였다. 일반적으로, IAE는 식 (4)와 같이 시간 영역 T를 기준으로 발생한 오차의 적분 값으로 정의되며, 여기서 e(k)는 보터의 출력값과 잡음이 없는 데이터의 차이이고, IAE가 작을수록 잡음을 제거하는 능력이 우수함을 의미한다.

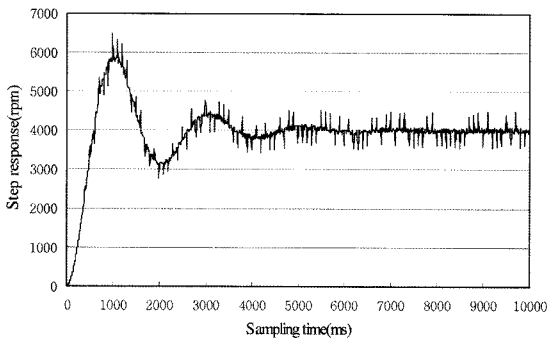
$$IAE = \sum_{k=1}^n \Delta T \cdot |e(k)| \quad (4)$$

Fig. 7(a)는 식 (3)의 전달함수를 이용하여 10ms 주기로 10,000ms 동안 4,000rpm을 추종하는 스텝 응답 데이터를 나타내고 있다. 여기에서, 본 논문에서는 제안된 predictive smoothing voter의 성능을 평가하기 위하여, Fig. 7(a)의 스텝 응답에 고장값과 고장율을 변화시켜 가면서 Fig. 7(b)와 같은 고장 신호를 얻었다. 특히, 본 논문에서는 센서가 잘못된 값을 읽은 경우를 모사하기 위하여, 잡음이 전혀 없는 스텝 응답에 잡음을 추가하여 고장 신호를 생성시켰다. 예로, Fig. 7(b)에서 1190ms에서 임펄스 형태의 잡음이 추가되었는데, 이는 센서 잡음에 의해 5,649rpm을 6,217rpm으로 잘못 읽어 고장이 발생한 경우를 의미한다. Fig. 8은 고장이 첨가된 Fig. 7(b)와 같은 두 개 또는 세 개의 스텝 응답을 이용하여 평균값 보터, 중간값 보터와 predictive smoothing voter를 적용시킨 후의 결과를 나타내고 있다. Fig. 8(a)와 8(b)에서, 평균값 보터와 중간값 보터는 고장을 제거하지 못한 경우가 많이 발생함을 확인할 수 있다. 그러나 Fig. 8(c)에서, predictive smoothing voter는 고장이 고장 검출 알고리즘에 의해 제거되었음을 확인할 수 있다.

Fig. 9(a)는 고장값을 10%로 고정된 상태에서 고장율을 5%에서 15%까지 증가시켜 가면서 획득한 고장 신호로부터 계산된 평균값 보터, 중간값 보터와 predictive smoothing voter의 IAE 값을 나타내고 있다. 그림에서, 평균값 보터의 경우 고장율이 증가함에 따라 IAE 값이 일정하게 증가하며, 고장율이 15%일 때 IAE 값이 57,557임을 알 수 있었다. 또한, 중간값 보터의 경우에도 고장율이 증가함에 따라 IAE 값이 증가하며, 고장율이 15%일 때 IAE 값이 48,802임을 알 수 있었다. 반면에, 제안된 predictive smoothing voter는 고장율의 변화에 영향 없이 일정한 IAE 값을 가지며, 고장율이 15%일 때 IAE 값이



(a) Step response of simulation model without noise signal

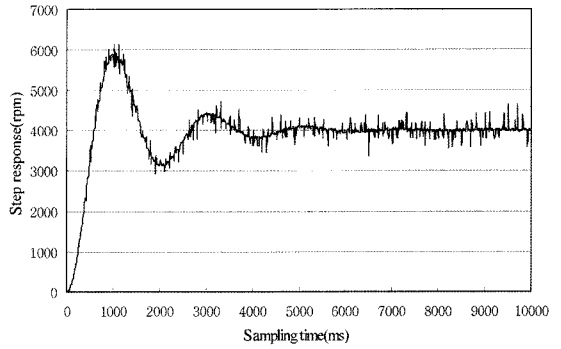


(b) Step response with noise signal in case of 15% fault value and 10% fault rate

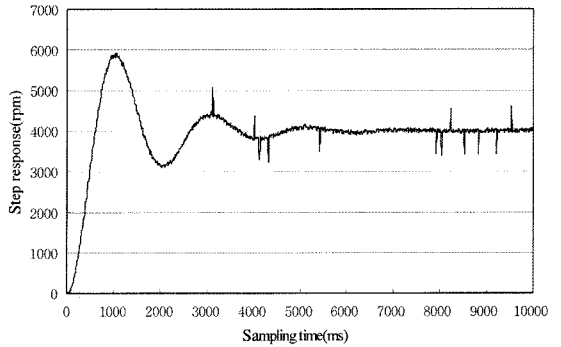
Fig. 7 Step response of simulation model

22,962로 평균값 보거나 중간값 보거나 비하여 상대적으로 낮음을 알 수 있었다. 즉, 평균값 보거나 중간값 보거나의 경우, 고장율의 변화에 상당히 민감하게 반응하는 데 반하여, predictive smoothing voter는 고장율이 변화하더라도 크게 영향을 받지 않음을 알 수 있었다.

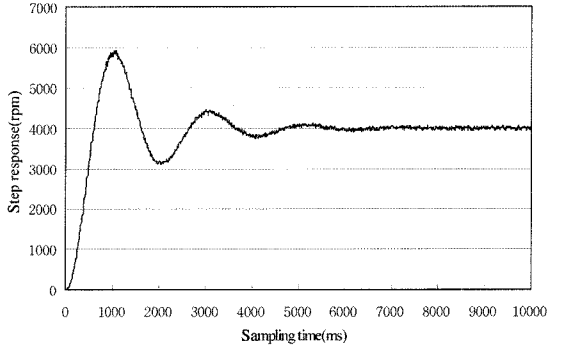
Fig. 9(b)는 고장율을 10%로 고정한 상태에서 고장값을 5%에서 15%까지 증가시켜 가면서 획득한 고장 신호로부터 계산된 평균값 보터, 중간값 보터와 predictive smoothing voter의 IAE 값을 나타내고 있다. 그림에서, 평균값 보터의 경우 고장율이 증가함에 따라 IAE 값이 일정하게 증가하며, 고장값이 15%일 때 IAE 값이 60,679임을 알 수 있었다. 반면, 중간값 보터의 경우 고장율이 증가함에 따라 IAE 값이 서서히 증가하며, 고장값이 15%일 때 IAE 값이 32,116임을 알 수 있다. 마지막으로, predictive smoothing voter의 경우 고장율의 변화에 거의 영향을 받지 않으며, 고장값이 15%일 때 IAE 값이



(a) Step response with average voters in case of 15% fault value and 10% fault rate



(b) Step response with median voters in case of 15% fault value and 10% fault rate

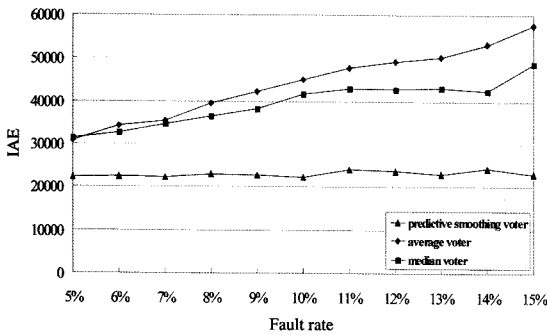


(c) Step response with predictive smoothing voter in case of 15% fault value and 10% fault rate

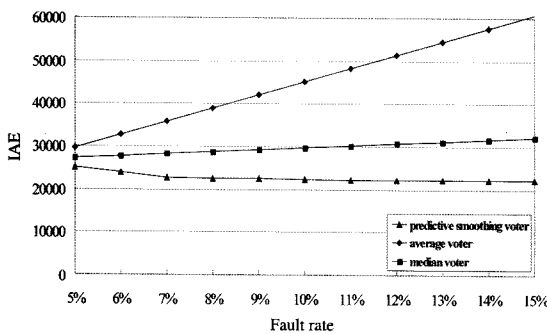
Fig. 8 Step response resulted in case of 15% fault value and 10% fault rate

22,237의 값을 가짐을 알 수 있었다.

이상의 결과로부터, 중간값 보터는 평균값 보터에 비하여, 상대적으로 우수함을 알 수 있다. 즉, 중간값 보터는 3개의 입력값 중에서 중간에 위치한 값을 선택하기 때문에, 신뢰할 수 없는 값을 포함하여



(a) IAE performance index with varying fault rate (fault value fixed at 10%)



(b) IAE performance index with varying fault value (fault rate fixed at 10%)

Fig. 9 Comparison on simulation result for step response

평균을 계산하는 평균값 보터보다는 신뢰할 수 없는 값을 선택하지 않을 확률이 높다. 반면, Fig. 9(a)에서 보는 바와 같이 고장율이 높아지는 경우 중간값도 고장이 날 확률이 높아지기 때문에 IAE가 증가하게 된다. 그러나 predictive smoothing voter는 고장값이나 고장율이 변화하더라도 크게 영향을 받지 않으며, 평균값 보터나 중간값 보터에 비하여 상대적으로 낮은 IAE 값을 보임을 알 수 있다. 즉, predictive smoothing voter에서는 고장 난 값을 검출하여 제거하는 기능을 가지고 있기 때문에, 고장값이 출력값에 영향을 주는 경우가 거의 없기 때문이다.

5. 결론

시스템의 신뢰성을 보장하기 위한 고장 허용 방법으로써 하이브리드 중복 구조의 하나인 predictive smoothing voter를 제안하였다. 또한, 본 논문에서는 predictive smoothing voter를 구현하기 위하여 임계

값을 예측하기 위한 임계값 예측기의 예측 방법과 예측된 임계값을 이용하여 고장을 검출하는 고장 검출 알고리즘을 제안하였다. 마지막으로, 본 논문에서는 제안한 predictive smoothing voter에 고장 신호를 포함하는 스텝 응답을 생성하여 성능을 평가하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 본 논문에서 제안된 predictive smoothing voter는 TMR 중복 구조에서 자주 사용되는 평균값 보터나 중간값 보터에 비하여 상대적으로 우수함을 확인하였다. 특히, 평균값 보터나 중간값 보터는 TMR 구조로서 3개의 입력 모듈을 필요로 하는 반면에, predictive smoothing voter는 하이브리드 중복 구조로서 2개의 입력 모듈만을 필요로 한다. 따라서 predictive smoothing voter를 이용한 하이브리드 중복 구조는 상대적으로 낮은 비용으로도 TMR 구조보다 더 신뢰성 있는 중복 구조 시스템을 만들 수 있다.
- 2) 최근 들어, 마이크로컨트롤러의 성능 향상과 가격 하락에 따라 predictive smoothing voter는 충분한 가격 경쟁력을 가지며 다양한 산업 시스템에 적용이 가능하다고 생각된다. 특히, predictive smoothing voter는 정적 중복 구조와 동적 중복 구조의 장점을 합친 형태로서 높은 신뢰성을 요구하는 다양한 분야에서 적용이 가능하다.

그러나 본 논문에서는 시뮬레이션을 이용하여 predictive smoothing voter의 성능을 검증하였기 때문에 실제 차량으로 구현하였을 경우에 발생할 수 있는 문제점에 대해서는 고려하지 못하였다. 따라서 차량으로 구현된 실험 모델에서 실제 차량의 고장 특성과 유사한 고장을 발생시켰을 경우의 predictive smoothing voter의 성능에 대한 검증이 필요하다. 또한, 시뮬레이션 과정에서의 파라미터 선정 방법에 대한 연구도 추가적으로 필요하다.

후 기

본 연구는 산업자원부에서 시행하는 자동차부품 기반기술개발사업(사업명: 네트워크 기반 분산형 실시간 제어 시스템 설계 기반 기술 개발)으로 지원 받아 수행한 연구결과이며, 연구비를 지원해주신 관계자 여러분께 감사드립니다.

References

- 1) J. H. Lee, K. H. Park and S. J. Heo, "A Study on Modeling and Fault Diagnosis of Suspension Systems Using Neural Network," Transactions of KSAE, Vol.11, No.1, pp.95-103, 2003.
- 2) I. K. Moon, J. M. Ahn and K. S. Lee, "A Fault Diagnosis and Fault Handling Algorithm for a Vehicle Cruise Control System," Transactions of KSAE, Vol.12, No.1, pp.216-221, 2004.
- 3) J. H. Lee and J. Lyou, "Fault Tolerant Controller Design for Linear Stochastic Systems with Uncertainties," Journal of Control, Automation, and Systems Engineering, Vol.9, No.2, pp.107-116, 2003.
- 4) S. M. Yoon, D. W. Kim, M. E. Lee and O. K. Kwon, "Fault Tolerant Control for Nonlinear Boiler System," Journal of Control, Automation, and Systems Engineering, Vol.6, No.4, pp.254-260, 2000.
- 5) O. F. Bay and R. Bayir, "Kohonen Network Based Fault Diagnosis and Condition Monitoring of Pre-Engaged Starter Motor," Int. J. Automotive Technology, Vol.6, No.4, pp.341-350, 2005.
- 6) R. Isermann, R. Schwarz and S. Stolzl, "Fault-Tolerant Drive-By-Wire Systems," IEEE Control Systems Magazine, Vol.22, No.5, pp. 64-81, 2002.
- 7) B. W. Johnson, Design and Analysis of Fault-Tolerant Digital Systems, Addison-Wesley Publishing Company, 1989.
- 8) O. Moseler and R. Isermann, "Application of Model-Based Fault Detection to a Brushless DC Motor," IEEE Transaction of Industrial Electronics, Vol.47, No.5, pp.1015-1020, 2000.
- 9) H. K. Sung, S. H. Lee and Z. Bien, "Design and Implementation of a Fault Tolerant Controller for EMS Systems," Mechatronics, Vol.15, No.10, pp.1253-1272, 2005.
- 10) S. Wang and J. C. 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.
- 11) Latif-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.
- 12) 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.
- 13) S. S. Cho and Y. S. Son, Time Series Analysis, Yulgok Publishing Company, 2002.
- 14) J. W. Taylor, "Exponential Smoothing with a Damped Multiplicative Trend," International Journal of Forecasting, Vol.19, No.4, pp.715-725, 2003.