

Self-Validating 센서를 사용한 지능형 디지털 제어기의 설계 및 구현

나 승 유[†] · 배 희 종^{††}

요 약

제어 시스템에서 요구되는 특성과 제공되는 하드웨어들의 기능을 유지하는 것은 만족할만한 제어를 설계하는데 있어서 중요하다. 제어시스템의 하드웨어들 중에서 센서는 내·외부 외란에 가장 취약하지만, 정확하고 신뢰성있는 센서값을 유지하는 것은 좋은 제어기 성능을 위해 꼭 필요하다. 센서에 오류가 발생했을 경우, 센서 출력과 제어기 출력 같은 값을 사용하여 이를 검출하고, 오류의 증상을 분석하여 오류 요인을 판단한다. 오류 요인에 따라 원래 센서값 대신 Self-Validating 센서값을 사용한다. 본 논문에서는 유연 링크 시스템에서 광센서 모듈의 오류 문제들에 Self-Validating 센서를 응용하여 이의 유효성을 보이고, 센서 오류가 발생하였을 때 만족할만한 성능을 제공할 수 있는 디지털 제어기를 제안한다.

Design and Implementation of Intelligent Digital Controllers with Self-Validating Sensors

Seung-You Na[†] · Hee-Jong Bae^{††}

ABSTRACT

For the satisfying performance of a control system, design of a controller for the system which meets the required specifications and its supporting hardware that keep their functioning is important. Among the hardware of a control system, sensors are most vulnerable to malfunction. Thus it is necessary to keep track of accurate and reliable sensor readings for good controller performance. In case of sensor faults, they are detected by examining the sensor output values and the major values of the system, and then the types of the faults are recognized by the analysis of symptoms of faults. If necessary self-validating sensor values are synthesized according to the types of faults, and then they are used for the controller instead of the raw data. In this paper, a self-validating sensor is applied to the control of a flexible link system with the sensor fault problems in the light sensor module for exact positioning to show the applicability. It is shown that the digital controller can provide a satisfactory loop performance even when the sensor faults occur.

1. 서 론

일반적인 페루프 디지털 제어시스템의 설계는 시스템 모델링, 제어기 설계, 하드웨어 구현의 과정으로 이루어진다. 시스템 모델링이나 제어기 설계는 하드웨어가 정상이라는 전제하에 시스템을 설계하므로, 회로의 접속 불량이나 주위 환경의 변화와 같은 내·외부 요인이 예기치 못한 오동작을 일으킬 수 있다.

이와 같은 센서의 동작에서 발생하는 오류로 인해 크고 작은 경제적 손실뿐만 아니라 인명 피해도 발생할 수 있다. 그러므로 센서 오류로 인한 피해를 줄이기 위한 노력이 필요하다. 센서가 시스템의 상태를 제대로 측정하지 못할 때 이를 검출하고, 진단 및 소프트웨어적으로 재구성하여 전체시스템에 미치는 영향을 줄이는 지능적인 신호처리방법을 사용한다. 본 논문에서는 이처럼 센서가 시스템의 상태를 제대로 측정하지 못할 때 하드웨어 센서를 대체할 SEVA 센서[1]라 부르는 소프트웨어 센서를 사용한 지능형 디지털 제어기를 제안한다.

† 종신회원 : 전남대학교 RRC-HECS, 전자공학과 교수

†† 준회원 : 전남대학교 대학원 RRC-HECS, 전자공학과
논문접수 : 2000년 8월 16일, 심사완료 : 2000년 12월 22일

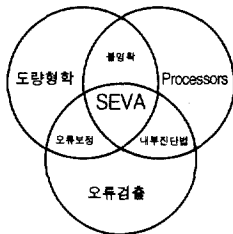
본 논문에서 제안한 지능형 디지털 제어기의 유효성을 보이기 위해 Flexible Link 시스템에 적용하여 성능의 개선을 얻는데 필요한 신호처리 과정을 보인다. 센서가 정상일 때 센서값들의 연관정도를 실시간 학습하고, 모터로 나가는 제어기 출력전압과 deflection사이의 관계를 감시한다. 센서의 내·외부 요인에 의해 이상이 발생하였을 경우에 이를 검출하고 진단한다. 진단결과에 따라 동작모드를 변경하여 오류로 인한 영향을 줄일 수 있다.

2. SEVA 센서

일반적인 아날로그 시스템에서 ADC와 DAC가 있는 디지털 제어기의 제어 알고리즘 설계자는 안정성, disturbance rejection, 응답 속도, robustness, 센서의 성능 등에 관심이 집중되어 있다. 오류 검출과 같은 작업을 수행하기 위해 제어 시스템에 병렬연산을 추가하여 유용성, 안정성과 환경적 영향으로부터 모든 구성요소를 보호하는 것에 대한 산업체의 관심이 증가하고 있다. 이것은 '전문가 시스템' 연구를 보다 발전시키기에 알맞은 응용 분야이다.

2.1 SEVA 센서의 구성

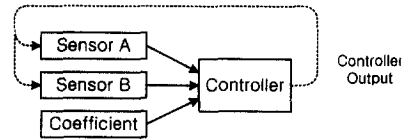
Sensor Validation은 여러 기술들의 연합체로서, (그림 1)과 같이 오류 검출기술, 디지털 응용기술, 도량형학의 방법에 의해 제공된 불명확한 값의 분석으로 SEVA 센서는 구성되어있고, 구성 요소간에 상호 작용한다. SEVA 센서는 간단한 신호처리와 센서 상태를 감시하기 위한 전문가 시스템을 사용하며, 각종 오류들은 연산 과정을 수행하여 환경을 검출할 수 있다.



(그림 1) SEVA 구성요소의 상호작용

2.2 SEVA 센서의 구현

(그림 2)는 센서를 두 개 사용하고 있는 폐루프 제어 시스템에서의 센서값과 제어기 출력사이의 관

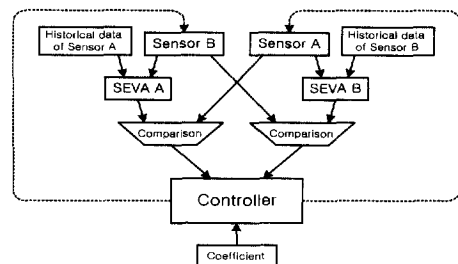


(그림 2) 센서값과 제어기 출력의 관계

계를 간략히 표현한 것이다. 그림에서 실선 화살표는 직접적인 영향이 있는 것을 뜻하고, 점선 화살표는 간접적으로 영향을 미치는 것을 뜻한다. 제어기 출력은 두 개의 센서값과 계수에 의해 결정되고, 제어기 출력은 다시 센서값에 영향을 주지만 여러 변수들과 함께 전달되므로 간접적인 영향을 준다. 여기서 여러 변수들 중에는 내·외부 외란 요인이 포함되므로 외란 요인이 있는지 없는지 구분하기 위해 센서값과 제어기 출력사이의 관계를 이용한다. 센서 오류의 검출, 진단, 보정하는 과정은 소프트웨어적으로 처리한다.

(그림 3)은 센서가 두 개인 폐루프 제어 시스템에서 SEVA 센서의 동작과정을 보여준다. 각 센서의 Historical data는 정상동작시의 센서값을 학습하고, 저장한 값이다. Sensor A, B는 각 센서로 측정된 실제값이고, SEVA A, B는 각 센서값을 예측한 값이다. (그림 3)에서 SEVA A는 센서 A의 과거값과 센서 B의 현재값으로부터 센서 A의 현재값을 예측한다. 그러므로, 센서 A에 오류가 발생하였을 경우에 센서 A의 예측값을 구할 수 있다. SEVA B의 경우도 SEVA A와 마찬가지로 센서 B의 예측값을 구할 수 있다. 센서의 수가 많을 경우에는 서로의 관계는 더욱 복잡해지지만 기본구조는 이와 같다. 비교기는 센서의 실제값과 예측값을 비교하여 차이가 문턱값을 넘으면 동작모드를 변경하고, 제어기에는 센서의 예측값을 보내준다.

SEVA 센서의 주 역할 세가지는 센서오류의 검출,



(그림 3) SEVA 센서의 동작

진단, 보정이다. 센서오류의 검출, 진단, 보정을 위해서는 센서의 오류 요인에 대한 특성을 미리 파악하는 전문가 시스템이 필요하다. 페루프 제어시스템에서는 각각의 센서와 제어기 출력이 직·간접적으로 서로 연관되어 있으므로 이 값들의 연관도를 미리 학습하였다가 센서오류를 검출, 진단, 보정하는데 사용한다.

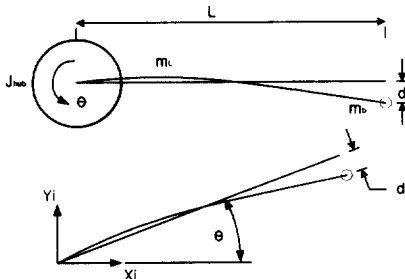
3. 시스템 모델링

실험을 위해 우선 Flexible Link 실험장치[2]의 모델링을 한다. 본 실험장치는 DC Servo Motor와 각도 및 deflection을 측정하는 센서를 사용하여 링크의 각도를 목표치로 이동시키는데 deflection을 적게 하면서 빠른 시간 내에 수렴하게 하는데 목적이 있다.

3.1 수학적 모델

〈표 1〉 Flexible Link 실험장치의 파라미터

Parameter	Symbol	Value	Units
Camera의 관성 (모터 관성 포함)	J_{hub}	0.002	kgm ²
링크의 길이	L	0.43	m
링크의 질량	m_l	0.06	kg
링크의 관성	J_l	0.0042	kgm ²
Bulb 질량	m_b	0.05	kg
(실험에 의한) 링크의 고유주파수	f_c	1.8	Hz
모터 상수	K_m	0.00767	
기어 상수 (모터내부기어비 $K_{gr}=14:1$) (모터외부기어비 $K_{ge}=5:1$)	$K_g=K_{gr}+K_{ge}$	70	
모터 코일 저항	R	2.6	Ω
링크의 관성	J_l	0.003698	kgm ²
Bulb의 관성	J_b	0.009245	kgm ²
부하의 관성	$J_{load}=J_l+J_b$	0.012943	kgm ²
STIFF 상수	K_{STIFF}	1.656	



(그림 4) Flexible Link 실험장치의 간단화 모델

고정된 Camera frame에 대한 Tip의 각 편향은 $\dot{\alpha} = -\omega_c^2 \alpha$ 이다.

여기서, $d = aL \rightarrow \alpha = \frac{d}{L}$ 이며, θ : 링크의 각도[°], d : deflection[cm]일 때,

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{K_{STIFF}}{J_{hub}L} & -\frac{K_m^2 K_g^2}{R J_{hub}} & 0 \\ 0 & \frac{-K_{STIFF}(J_{load} + J_{hub})}{J_{hub}J_{load}} & \frac{L K_m^2 K_g^2}{R J_{hub}} & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{K_m K_g}{R J_{hub}} \\ -\frac{L K_m K_g}{R J_{hub}} \end{bmatrix} \quad \begin{matrix} X = [\theta \ d \ \dot{\theta} \ \dot{d}]^T \\ Y = [1 \ \frac{1}{L} \ 0 \ 0] \end{matrix}$$

이며, 여기에 파라미터들을 대입시키면 아래와 같은 상태 방정식을 얻을 수 있다.

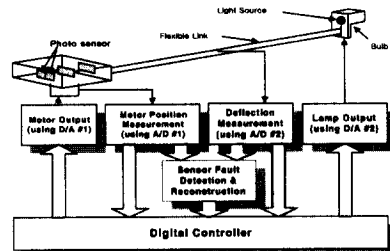
$$\begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{d} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{d} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1925 & -55 & 0 \\ 0 & -956 & 24 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ d \\ \dot{\theta} \\ \dot{d} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 103 \\ -44 \end{bmatrix} V_m$$

3.2 LQG 제어기

위에서 구한 A, B와 시스템의 $Q = \text{diag}([300 \ 30000 \ 1 \ 0])$, $r = 2$ 를 사용하여 Matlab의 LQR 디자인으로 최적의 상수값을 구하면 아래와 같다.

$$K = [0.21 \ -0.89 \ 0.053 \ 0.052] \text{ [V/deg][V/cm]}$$

4. 시스템 구성



(그림 5) 시스템 블록도

4.1 Input Part

A/D 12bit, ±5[V], 2개 채널을 사용하며, 샘플링

주파수는 100[Hz]이고, 링크의 각도와 Bulb의 deflection을 측정한다.

4.2 Output Part

제어기 출력은 D/A 12bit, ±5[V], 채널1을 전류증폭하여 모터를 구동시키며, Camera는 이 모터에 70 : 1의 기어로 연결되어 있어 링크를 목표치로 이동시킨다.

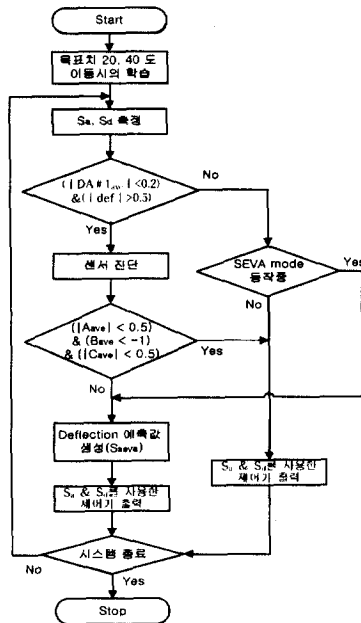
4.3 Control Part

PC상에서 볼랜드 C++ 3.1을 사용해 LQG 제어기로 작성된 것에 센서의 상태를 감시하고 SEVA 센서로 재구성하도록 코드를 추가하였다.

4.4 Diagnosis Part

제어기 출력을 D/A 12bit, ±5[V], 채널2를 전압증폭하고 Lamp를 구동전류를 얻기 위해 전류증폭하여, 센서 오류 진단 시 D/A#2로 Lamp를 점멸한다.

4.5 시스템 동작 순서



- S_a : 링크의 각도를 측정하는 센서(값)
- S_d : deflection을 측정하는 센서(값)
- S_{seva} : Self-validating 센서(값)
- D/A#1ave : 제어기에서 모터로의 출력 전압 평균

(그림 6) 시스템 동작 순서도

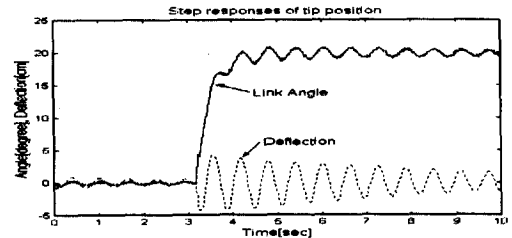
5. SEVA 센서의 동작

Self-Validating 센서는 하드웨어 센서가 시스템의 상태를 제대로 측정하지 못할 때 센서 오류를 검출, 진단, 재구성하여 스스로 센서값을 유효하게 한다.

먼저 시스템의 특성을 파악하고, 이후 SEVA 센서를 구현하는 과정을 설명한다.

5.1 시스템의 특성

deflection 측정센서를 사용하지 않은 경우에는 (그림 7)과 같이 목표치인 20도에서 바로 수렴하지 못하고 진동한다.



(그림 7) 목표치 20도, S_d를 사용하지 않은 경우

5.2 센서값의 학습

(그림 9), (그림 10)과 같이 시스템이 정상일 때 0~90까지 10도 간격으로 학습시킨 실험결과 20도와 40도만을 학습하여 (그림 8)과 같은 보간법으로 아래 수식을 이용하여 목표치에 따른 weight를 재조정한다.

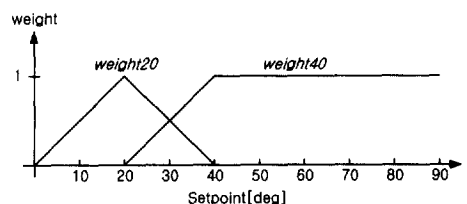
$$0 \sim 20 [^\circ] : \frac{\text{setpoint}}{20} \times \text{weight} 20$$

$$20 \sim 40 [^\circ] : \frac{40 - \text{setpoint}}{20} \times \text{weight} 20 + \frac{\text{setpoint} - 20}{20} \times \text{weight} 40$$

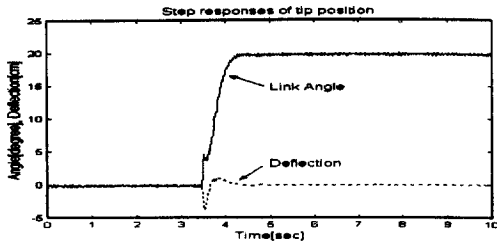
$$40 \sim 90 [^\circ] : \text{weight} 40$$

weight 20 : 목표치 20도일 때의 연결강도

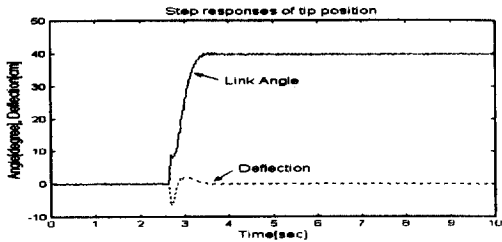
weight 40 : 목표치 40도일 때의 연결강도



(그림 8) 목표치에 따른 연결강도 생성



(그림 9) 목표치 20도, 정상 응답(학습#1)



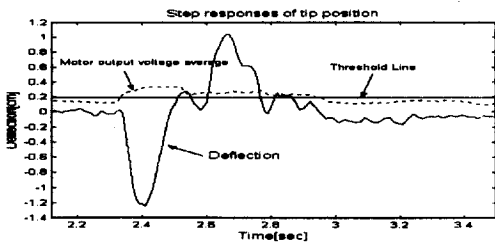
(그림 10) 목표치 40도, 정상 응답(학습#2)

5.3 동작 모드

- 정상모드 : SEVA 센서를 생성, 센서의 오류 감시
- 진단모드 : 센서 오류 검출 시 오류 종류판별
- SEVA모드 : 센서 측정값 대신에 정상 상태에서 생성된 SEVA 센서값을 이용

5.4 센서 오류 검출

(그림 11)과 같이 제어기 출력인 D/A#1의 연속 절대값 평균이 어느 레벨 이상인 경우 deflection이 크게 발생하므로 이 문턱값을 기준으로 센서오류를 검출하며 목표치가 주어진 경우와 정상시의 모터 출력 전압의 평균에 따라 문턱값을 조정한다.



(그림 11) D/A#1 전압평균과 deflection과의 관계

본 논문에서는 실험을 위해 센서의 오류를 다음의 3가지 형태로 가정한다. 즉, 센서회로가 개방, 외부 외란 광원의 존재, 카메라 입구에 반투명 물체의 존재.

5.5 센서 오류의 진단

센서 오류가 검출되면 Bulb에 달려있는 Lamp를 점멸하여 deflection 측정센서의 응답을 이용해 오류 종류를 구분하고, 동작모드를 변경한다.

<표 2>와 같이 광원을 조작하여 오류 진단을 하며, 센서 오류를 진단하는 0.5초 동안 제어기 출력 전압을 0V로 하여 링크를 정지시킨다.

<표 2> Sensor Diagnosis를 위한 광원 조작

	A	B	C
Lamp State	Turn On	Turn Off	Turn On
Time[sec]	0.15	0.2	0.15

<표 2>와 같이 실험하여 (그림 12), (그림 13), (그림 14), (그림 15)의 실험결과를 얻으며, 이 결과로부터 <표 3>을 작성하고, 오류 요인별 동작모드를 변경한다.

- SEVA_EX모드 : 외부 광원이 존재
- SEVA_IN모드 : Lamp와 카메라 입구사이에 반투명 물체가 존재
- 수동모드 : 센서 회로가 개방

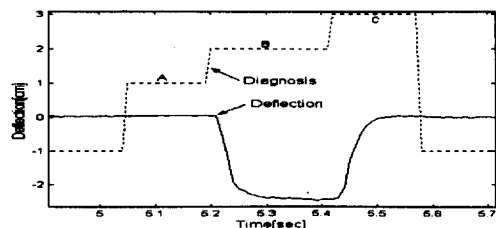
A, B, C 구간마다 마지막 0.1초 동안의 deflection 값의 평균을 각각 A_{ave} , B_{ave} , C_{ave} 라 할 때,

$$K_{mode} = A_{ave} - B_{ave} - C_{ave}$$

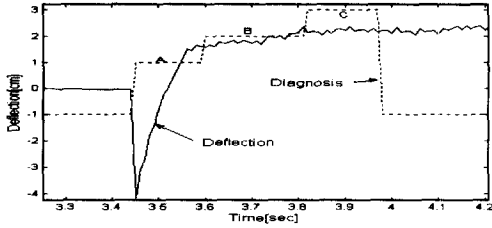
제한된 오류에 대해서는 <표 3>과 같이 오류 요인을 구분할 수 있으나, 시스템마다 오류 검출, 진단, 보정 방법이 다르므로 약간의 수정이 필요하다.

<표 3> 센서 오류의 진단 결과

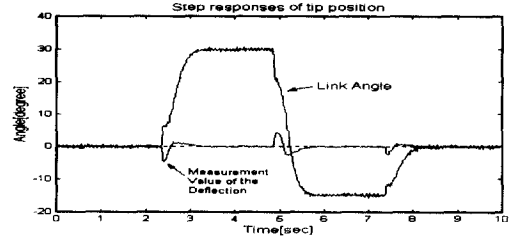
	$K_{mode} < -1$	$-1 \leq K_{mode} < 1$	$1 \leq K_{mode}$
Fault	sensor circuit open	light source to right	screen to the camera
Mode	Manual	SEVA_EX	SEVA_IN



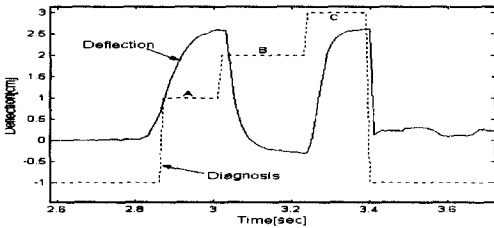
(그림 12) deflection 측정 센서값이 정상인 경우



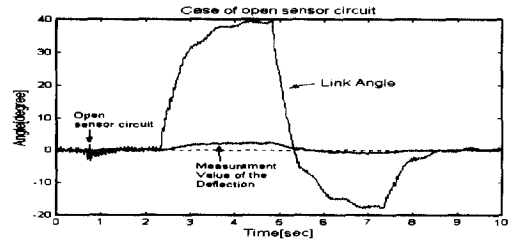
(그림 13) 센서 회로가 개방된 경우



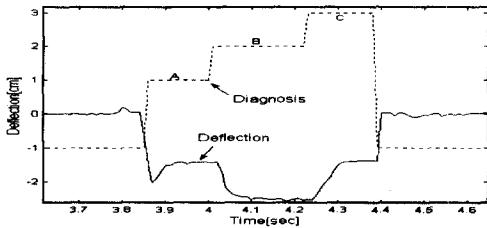
(그림 16) 목표치 30, -15, 0도의 정상 응답



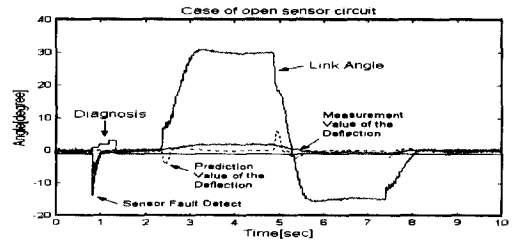
(그림 14) 외부 광원이 있는 경우



(그림 17) 센서 회로가 개방된 경우의 보정 전 응답



(그림 15) 반투명물체로 카메라입구를 가린 경우



(그림 18) 센서 회로가 개방된 경우의 보정 후 응답

5.6 SEVA 센서의 생성

센서값이 정상일 때 식 (1), 식 (2)를 이용하여 연결 강도를 구하고, 식 (3)을 사용하여 deflection 값을 예측한다.

$$W_{ti} = (\text{deflection}/\text{time}) * K_{ti} \quad (1)$$

$$W_{th} = (\text{deflection}/\theta) * K_{th} \quad (2)$$

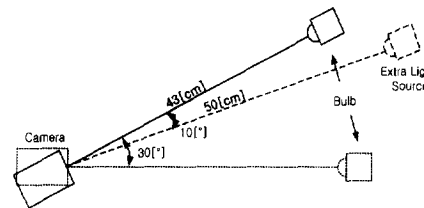
K_{ti} , K_{th} 는 시간, 각도의 가중치이다.

(본 실험에서는 임의로 각각 0.5, 0.5를 사용)

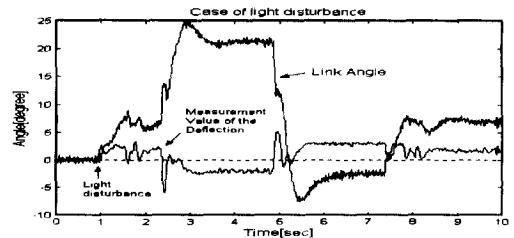
$$\text{deflection 예측값} = \text{time} * W_{ti} + \theta * W_{th} \quad (3)$$

6. 실험결과

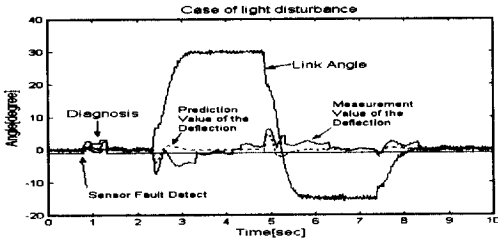
본 실험결과는 실험 전에 미리 deflection 측정센서와 각도 측정 센서의 0점 조정을 마친 상태에서 내·외부 외란 환경을 만들었을 때의 결과들이다.



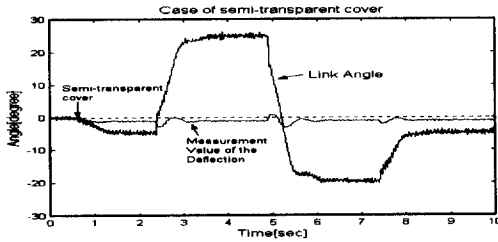
(그림 19) 실험에 사용된 외부광원



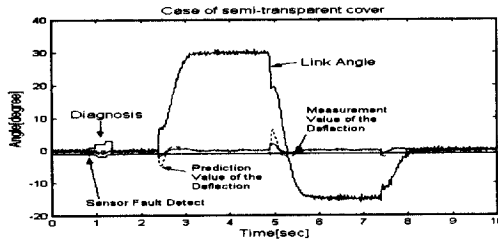
(그림 20) 외부광원이 존재하는 경우의 보정 전 응답



(그림 21) 외부 광원이 존재하는 경우의 보정 후 응답



(그림 22) 반투명 물체로 카메라 입구를 가린 경우의 보정 전



(그림 23) 반투명 물체로 카메라 입구를 가린 경우의 보정 후

7. 결 론

시스템 모델링과 제어기 설계 시 하드웨어는 정상 임을 전제로 한다. 시스템의 상태를 측정하는 센서의 중요성에 비해 지나치게 쉬운 센서의 오류 문제에 대한 대처 방법으로 SEVA 센서를 사용하였다. 하드웨어적인 센서 회로의 접속 불량이나 주위 환경의 변화와 같은 내·외부 요인으로 인한 영향으로 센서가 시스템의 상태를 제대로 측정하지 못할 경우가 있다. 이때 영향을 받은 센서를 소프트웨어적으로 검출, 진단 및 재구성하여 시스템에 미치는 피해를 줄일 수 있다.

본 논문에서는 제안한 지능형 디지털 제어기의 유효성을 보이기 위해 Flexible Link 시스템의 광센서 모듈에 SEVA 센서를 사용하였다. 센서값의 실시간 학습, 감시, 오류 검출, 진단, 재구성할 수 있는 디지털

제어기를 설계하여 실험에 사용한 제한된 3가지 형태의 외란에 대해 양호한 응답을 얻었다.

앞으로의 과제는 외란 요인을 확대하였을 경우에도 양호한 응답을 얻을 수 있도록 일반화하여야 한다.

참 고 문 헌

- [1] Janice C. Y. Yang and David W. Clarke, "A Self-Validating Thermocouple," IEEE Transactions On Control Systems Technology, Vol.5, No.2, pp.239-253, March 1997.
- [2] Jacob Apkarian, "A Comprehensive And Modular Laboratory For Control Systems Design And Implementation," Quanser Consulting, 1995.
- [3] S. Joe Qin, Hongyu Yue, and Ricardo Dunia, "Self-Validating Inferential Sensors with Application to Air Emission Monitoring," Ind. Eng. Chem. Res., Vol.36, No.5, pp.1675-1685, 1997.
- [4] 나승유, 배희종, "Self-Validating 지능형 센서를 사용한 디지털 제어기의 설계", 대한전자공학회 하계 학술대회 논문집 V, Vol.23, No.1, pp.51-54, 2000.



나 승 유

e-mail : syna@chonnam.ac.kr

1977년 서울대 전자공학과 졸업
(공학사)

1986년 미국 Univ. of Iowa 전기
및 전자공학과 졸업
(공학석사, 박사)

1987년~현재 전남대학교 전자공학과 교수

관심분야 : 지능제어, 뉴로·퍼지 시스템, 계측 및 신호
처리



배 희 종

e-mail : hjbae@intcon.chonnam.ac.kr

1999년 조선대학교 전자공학과
졸업(공학사)

1999년~현재 전남대학교 전자공
학과 석사과정

관심분야 : 지능제어, 계측 및 신호
처리