

Self-Validating 지능형 센서를 사용한 디지털 제어기의 설계

나 승 유, 배 회 중
전남대학교, RRC-HECS, 전자공학과
Tel : +82-62-530-1753; Fax : +82-62-530-1759

Design of Digital Controllers with Self-Validating Intelligent Sensors

Seung You Na, Hee Jong Bae
RRC-HECS, Dept. of Electronics Eng., Chonnam National University, Puk-Ku, Kwangju
E-mail: syna@chonnam.ac.kr

Abstract

We are concerned with processing methods of the measurement values of sensors in the control system. When some faults happen to sensor components, the measurement value of sensors cause the malfunction of the plant. So it is necessary to detect and reduce the influence of faults to control with reliability for the overall system. The sensor status must be always good for best demonstration of the controller performance. A self-validating sensor detects the sensor state from the measurement value, reconstruct a soft sensor and can improve reliability of the sensor.

If sensor faults, the sensor is detected and reconstructed with the best estimate from its correlation to other sensors and historical data. It is applied to the control of a flexible link system with the sensor fault problems in the light sensor module for position to show the applicability. In this paper, we propose a digital controller which reduces deflection of the moving set-point by reconstructing output of a sensor when the sensor fault is detected.

I. 서론

폐루프 제어시스템에서 센서는 시스템의 상태를 측정하여 제어대상이 목표치에 도달하는데 꼭 필요한 구성요소이다. 시스템 주변의 환경변화와 내부 센서회로의 오류로 인해 센서값이 영향을 받은 경우 제어시스템의 오동작을 야기시킨다. 그러므로, 센서에 오류가 발생했을 경우 센서를 보정하거나 대체할 SEVA 센서^[1]

라 불리우는 소프트 센서를 사용한다.

본 논문에서는 Flexible Link 시스템에서 센서가 정상일 때 센서값들의 연관정도를 학습시키고, 모터 출력과 Deflection 사이의 관계를 감시하여 센서 오류를 검출하고, 센서를 진단하여 오류 요인에 따른 동작모드를 변경하여 센서의 내부 또는 외부요인에 의해 이상이 발생하였을 경우에 학습한 SEVA 센서로 이를 검출하고 센서를 재구성하여 센서 에러에 대한 영향을 줄일 수 있는 디지털 제어기를 제안한다.

II. System modeling

Flexible Link System^[2]은 DC Servo Motor와 각도 및 Deflection을 측정하는 센서를 사용하여 링크의 각도를 목표치로 이동시키는데 Deflection을 적게 하면서 빠른 시간 내에 수렴하게 하는데 목적이 있다.

1. 수학적 모델

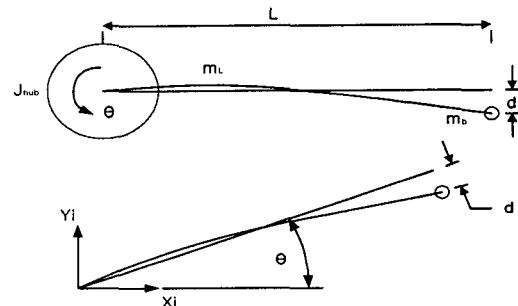


Fig. 1 Simplified model of flexible link experiment

Table 1 Flexible Link 실험장치의 Parameter

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 $K_{gi}=14:1$) (모터외부기어비 $K_{ge}=5:1$)	$K_g=K_{gi}K_{ge}$	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	

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

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

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

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

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

$$Y = [1 \ \frac{1}{L} \ 0 \ 0]$$

이때, 여기에 Parameter들을 대입시키면 아래와 같은 상태 방정식을 얻을 수 있다.

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

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.

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

III. 시스템 구성

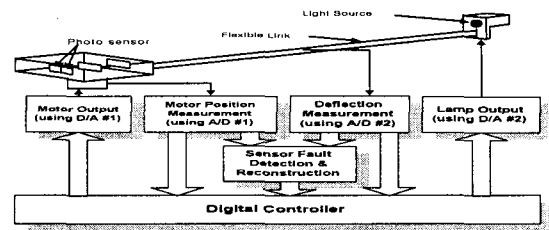


Fig. 2 System Block Diagram

1. Input Part

A/D 12bit, $\pm 5[V]$, 2개 채널을 사용하며, 샘플링 주파수는 100[Hz]이고, 링크의 각도와 Bulb의 Deflection을 측정한다.

2. Output Part

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

3. Control Part

PC에서 볼랜드 C++ 3.1을 사용해 LQR 제어기로 작성된 것에, 센서의 상태를 감시하고 SEVA 센서로 재구성하도록 코드를 추가하였다.

4. Diagnosis Part

제어기 출력을 D/A 12bit, $\pm 5[V]$, 채널2를 전압증폭하고 Lamp를 구동전류를 얻기 위해 전류증폭하여, 센서 오류 진단 시 D/A 채널2로 Lamp를 점멸한다.

IV. Self-Validating Sensor

센서에 오류가 발생하였을 경우에 이 센서를 대신할 SEVA 센서라 부르는 소프트웨어 센서로 시스템을 재구성하여 시스템의 오류를 줄이기 위해 사용한다.

1. 동작 모드

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

2. 센서 오류 검출

Deflection과 D/A 모터 출력의 연속 절대값 평균을 비교하여, Fig. 3과 같이 모터 출력 전압의 평균이 어느 레벨 이상인 경우 Deflection이 크게 발생하므로 이 문턱값을 기준으로 센서오류를 검출하며 목표치가 주어진 경우와 정상시의 모터 출력 전압의 평균에 따라 문턱값을 조정한다.

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

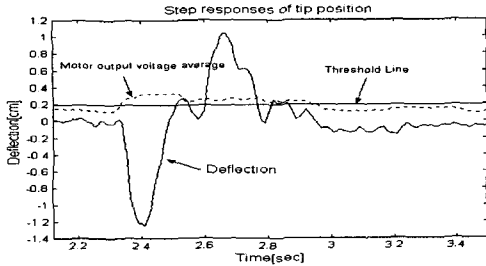


Fig. 3 모터 출력전압과 Deflection과의 관계

3. 센서 오류의 진단

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

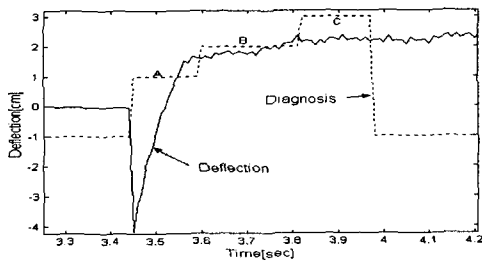


Fig. 4 센서 회로가 개방된 경우의 응답

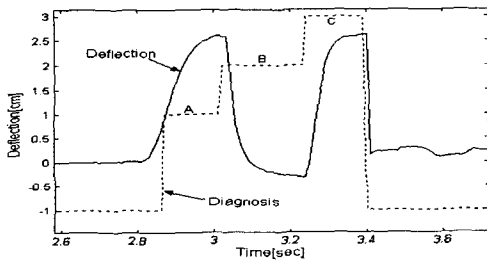


Fig. 5 외부 광원이 있는 경우의 응답

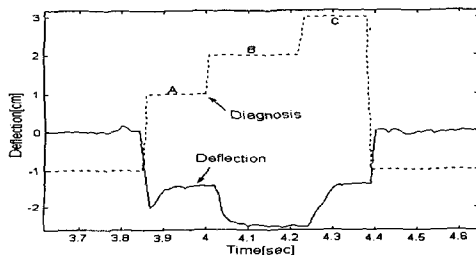


Fig. 6 반투명물체로 카메라입구를 가린 경우의 응답

Table 2와 같이 오류 진단은 0.5초동안 이루어지며, 센서 오류를 진단하는 동안 모터 출력은 0이다.

Table 2와 같이 실험하여 Fig. 5, 6, 7의 실험결과를 얻으며, 이 결과로부터 Table 3을 작성한다. 센서 오류가 검출되면 Table 2와 Table 3을 참고하여 센서 오류를 진단한다. 이 표를 참고하여 오류 요인별 동작모드를 변경한다.

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

Table 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

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

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

위 식과 Table 3을 이용해 오류 요인을 판정하고, 동작모드를 변경한다.

Table 3 Diagnosis of sensor faults

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

3. SEVA 센서의 생성

Fig. 7과 같이 시스템이 정상으로 동작하고 있을 때의 센서값들의 연결강도를 Fig. 8과 같은 구조로 구하고, 다시 Fig. 8과 같은 구조로 SEVA센서를 생성하여 동작모드별로 SEVA센서가 필요할 때 재구성한다.

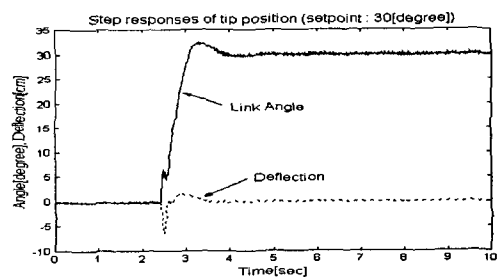


Fig. 7 시스템의 정상 동작

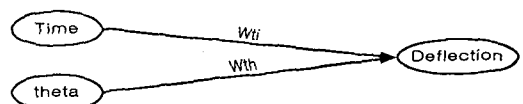


Fig. 8 Weight calculation and deflection prediction

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

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

K_{ti}, K_{th} 는 시간, 각도의 가중치이다.
 (본 실험에서는 임의로 각각 0.5, 0.5를 사용)
 Deflection 예측값 = $\text{time} * W_{ti} + \theta * W_{th}$ (식 3)

센서값이 정상일 때 (식 1, 2)를 이용하여 연결각도를 구하고, (식 3)을 사용하여 센서값을 예측한다.

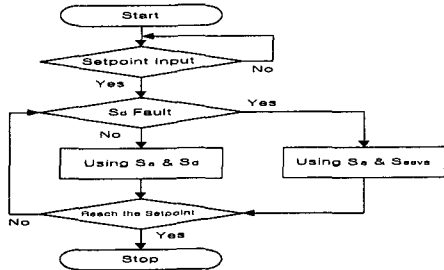


Fig. 9 Real and self-validating sensor values

Sa : 링크의 각도를 측정하는 센서
 Sd : Deflection을 측정하는 센서
 Sseva : Self-validating 센서

V. Results of experiments

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

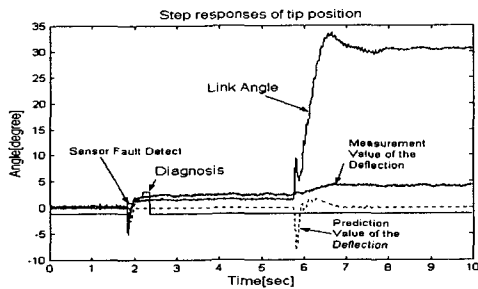


Fig. 10 센서회로 개방시의 오류 검출, 진단, 동작모드의 변경, 목표치 이동

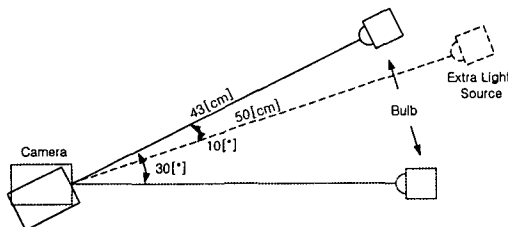


Fig. 11 외부광원이 10[degree]에 존재한 경우

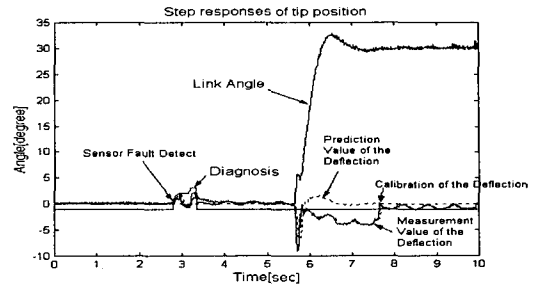


Fig. 12 Fig. 11과 같은 외부광원이 존재하는 경우의 오류 검출, 진단, 동작모드 변경, 목표치 이동

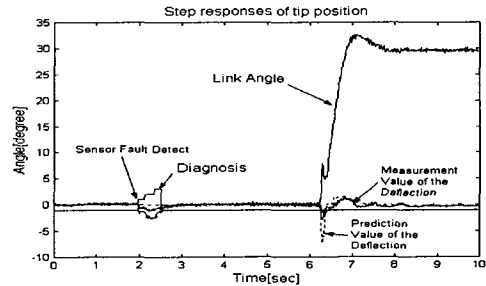


Fig. 13 카메라 렌즈를 반투명 물체로 가린 경우의 오류 검출, 진단, 동작모드 변경, 목표치 이동

VI. Conclusion

본 논문에서는 Flexible Link 시스템에서 센서가 정상일 때 학습한 센서값으로부터 현재의 센서값을 예측하고, 센서값을 감시하여 센서 오류를 검출하고, 진단하여 오류 요인에 따른 보정을 하여 센서 에러에 대한 영향을 줄일 수 있는 디지털 제어기를 제안한다.

제안한 방법은 제어기를 보다 강인하게 하는데 적용할 수 있을 것이다.

References

- [1] Janice C.-Y. Yang and David W. Clarke, "A Self-Validating Thermocouple", IEEE Transactions On Control Systems Technology, vol. 5, no. 2, 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. 1997.