

# 자동 보정형 디지털 제어기 설계에 관한 연구

나 승 유, \* 박 민 상  
전남대학교 전자공학과  
광주광역시 북구 용봉동 300  
E-mail: syna@orion.chonnam.ac.kr

## A Study on the Design of Digital Controllers with Automatic Calibration

Seung You Na, \* Min Sang Park  
Dept. of Electronics Eng., Chonnam National University, Puk-Ku, Kwangju, 500-757, KOREA  
Tel: +82-62-530-1753; Fax: +82-62-530-1759; E-mail: syna@orion.chonnam.ac.kr

**Abstract** - Sensitivity and calibration considerations are most important in the design and implementation of real control systems. Ideally parameter changes due to various causes should not appreciably affect the system's performances. But all the values of physical components of the plants and controllers as well as the relevant environmental conditions change in time, thus the output performance can be deteriorated during the operating span of the system. Naturally the duty of calibration or the prevention of performance deterioration due to excessive component sensitivity should be provided to the control system.

In this paper, we propose a digital controller which has the capability of calibration and gain adjustment as well as the execution of control law. Specifically the problems of gain adjustment and offset calibration in the light source and CdS sensor module for position measurement in a flexible link system are considerably resolved. The parameters of measurement module are prone to change due to environmental brightness conditions resulting in poor steady state performance of the overall control system. Thus a proper method is necessary to provide correction to the changed values of gain and offset in the position measurement module.

The proposed controller, whenever necessary, measures the open-loop characteristics, and then calculates the offset and sensor gain correction values based on the prepared standard measurements. It is applied to the control of a flexible link system with the gain and offset calibration problems in the light sensor module for position to show the applicability.

## 1. 서 론

제어시스템의 만족스런 성능을 얻기 위해서는 선택된 시스템 모델에 대한 제어기 설계를 통해 주요한 성능지수인 안정성, 강인성, 정상상태 오차, 과도지수 등의 요구 조건을 만족해야 한다. 또한 실제 시스템의 설계 및 구현에서 가장 중요한 사항 중의 하나는 감도 분석 및 파라미터 보정 문제이다. 이상적으로는 주어지는 입출력 관계를 유지 하면서 다양한 파라미터의 변동에도 불구하고 시스템의 출력 형태에 영향이 충분히 작아야 된다. 시스템의 구성 요소와 주변 환경의 변화에 따라 제어시스템의 동작 구간에서도 설계된 출력 정격을 유지하지 못하고 벗어나는 경우가 발생할 수 있다. 따라서 필요시에는 제어시스템에서 보정이나 파라미터 변동에 따른 출력 훼손을 방지하는 방안이 필요하게 된다.

본 논문에서는 제어규칙의 수행 뿐만이 아니라 변동된 파라미터의 보정과 증폭율을 설계값으로 재조정하는 기능을 갖는 이산형 제어기를 제안한다. 유연 링크를 갖는 계통에서 끝단의 위치 측정을 위해 사용되는 광원과 CdS 센서 모듈에서의 증폭율 조절과 오프셋 보정 문제를 고려한다. 이러한 광측정 모듈은 주변의 조도 변화에 민감하여 전체 계통의 정상상태 출력값이 설계치에서 벗어나는 요인으로 작용한다. 제안된 제어기는 필요할 때마다 계통의 개방회로 특성을 측정하고 표준 측정값과 비교하여 오프셋과 센서의 증폭율 교정값을 계산하는 루틴을 통상적인 제어기에 통합하여 구성된다. 끝단의 진동을 억제할 수 있는 유연 링크를 갖는 계통에서 끝단의 위치 측정을 위해 사용되는 센서 모듈에서의 증폭율 조절과 오프셋 보정 문제에 본 제어기를 적용하여 효용성을 보인다.

## 2. 시스템 모델링

본 논문에서는 PD제어를 이용하여 Tip을 요구하는 위치로 옮길 때, Tip의 Oscillation을 제거하기 위한 피드백 시스템을 디자인하고 소프트웨어적인 영점 보정과 이득 조정으로 기존의 번거러움을 줄인다. 먼저 PD 제어를 설계하기 위해서는 시스템에 대한 수학적 모델이 필요하고, 정확한 수학적 모델을 기초로 하여 제어기의 상수 값인  $K_p, K_d$  값을 결정한다.

### 2.1 수학적 모델

시스템을 위한 Parameter는 다음의 절차에 의해서 유도된다. 그리고 그림 1은 본 실험장치의 간략한 모델이다.

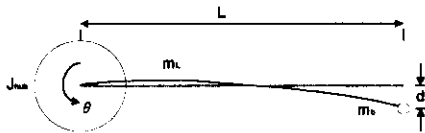


Fig. 1 Simplified model of flexible link

실험을 통해 얻은 Link의 natural frequency( $f_c$ )는 1.8Hz 이고, 고정된 Camera frame에 대한 Tip의 각 변향은 다음과 같이 주어진다.

$$\ddot{\alpha} = -\omega_c^2 \alpha \quad (1)$$

그리고, 고정된 Joint의 Stiffness는 다음과 같이 측정된다.

$$\omega_c = \sqrt{\frac{K_{STIFF}}{J_L + J_b}}$$

$$K_{STIFF} = (2\pi f_c)^2 (J_L + J_b) \quad (2)$$

$$J_L = \frac{1}{3} m_L L^2 \quad (3)$$

$$J_b = m_b L^2$$

$J_L$  : Inertia of the link assuming a rigid body

$J_b$  : Inertia of the bulb at the end of the link

Stiffness가 Joint점에 있다고 가정하고, Rotary Flexible Joint처럼 미분방정식을 진행시키며,

$$d = \alpha L \rightarrow \alpha = \frac{d}{L} \text{ 를 대입시키면,}$$

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

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{K_m K_g}{RJ_{hub}} \\ -\frac{K_m K_g}{RJ_{hub}} \end{bmatrix} \quad \begin{matrix} X = [\theta \ d \ \dot{\theta} \ \dot{d}]^T \quad (4) \\ Y = [1 \ \frac{1}{L} \ 0 \ 0] \end{matrix}$$

여기에, 다음과 같은 Parameter들을 대입시키면 식 (5)와 같은 상태 방정식을 얻을 수 있다.

$$R = 2.6;$$

$$K_m = .00767; \% \text{모터 토크}$$

$$K_g = 14.1*5; \% \text{기어비}$$

$$L = 0.41; \% \text{flexible link의 길이}$$

$$J_{load} = \frac{1}{3} 0.06 \times 0.41^2$$

$$J_{hub} = (0.5) \times (0.41)^2$$

$$K_{STIFF} = \omega_c^2 (J_{load} + J_{hub})$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{d} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{d} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1919 & -57 & 0 \\ 0 & -932 & 24 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ d \\ \dot{\theta} \\ \dot{d} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 106 \\ -44 \end{bmatrix} V_m \quad (5)$$

### 2.2 제어기의 상수값 결정

Matlab의 LQR 디자인을 이용하면,

$$Q = \text{diag}[300 \ 30000 \ 1 \ 0], \quad r = 2$$

최적의 feedback gain은 다음과 같다.

$$k = [0.21 \ -0.95 \ 0.046 \ 0.045] \text{ [V/deg and V/cm]}$$

## 3. 시스템 설계

Flexible Camera를 제어하기 위한 전체적인 시스템 구성은 그림 2와 같다

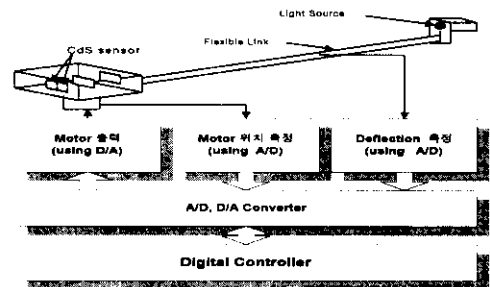


Fig. 2 System configuration

먼저 모터의 현재위치를 측정하기 위해서 그림 3과 같은 포텐서미터(Potentiometer)를 사용한다.



Fig. 3 Diagram of Potentiometer

Camera의 Deflection 측정원리를 보면 그림 4에서와 같이 빛이 중앙에 위치 할 때를 기준으로 하여 오른쪽으로 빛이 이동하면, 오른쪽 끝에서부터 음영이 시작되므로 "Sensor R"의 빛의 양은 줄어들고 "Sensor L"의 빛의 양은 증가한다. 반대로, 빛이 왼쪽으로 이동하면, 왼쪽 끝에서부터 음영이 시작되므로 "Sensor L"의 빛의 양은 줄어들고 "Sensor R"의 빛의 양은 증가한다.



Fig. 4 Principle of deflection measurement

그림 5는 Deflection을 측정하기 위한 실제 회로도이다.



Fig. 5 Circuit of deflection measurement

모터의 출력신호는 D/A Converter를 통해서 출력된다. 이 출력은 모터를 구동 할 정도의 충분한 전력이 아니므로 그림 6과 같은 전력증폭을 통해서 증폭된다.

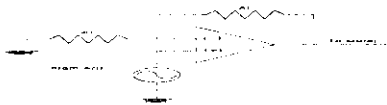


Fig. 6 Power amplifier for DC-Motor

#### 4. Software에 의한 Calibration

본 논문의 실험에서는 빛을 이용하여 Tip의 위치를 측정하므로 주변의 환경에 매우 민감하다. 그러므로 기존에는 실험을 시작할 때마다 전압을 측정할 수 있는 장비를 동원하여 항상 영점보정과 이득 조절을 해야한다. 만약 영점 조절과 이득 조절이 정확히 되지 않으면 아무리 우수한 제어기를 설계하더라도 Set Point에 대한 에러는 항상 존재한다. 그러므로 본 논문에서는 소프트웨어적인 방법에 의해서 영점보정과 이득조절을 하여 Set Point 에러를 최소화 할 수 있는 방법을 제시한다.

#### 4.1 Deflection 측정

Set Point의 에러의 주된 원인은 Tip이 중심에 위치할 때 측정된 Deflection 전압이 "0V"이어야 하나 중심점의 이동으로 인하여 "0V"가 아닐 때 와 좌우 Deflection에 의한 전압값과 중심점과의 전압차가 같아야 하나 주변환경의 변화에 의하여(갑자기 어두워지거나 밝아진 경우) 측정된 전압차가 다른 경우이다.

본 실험에서는 영점보정과 이득 조절을 위하여 실험전 제어기로 하여금 그림 7과 같은 파형을 형성하여 현재 Tip의 Deflection 범위를 측정한다.

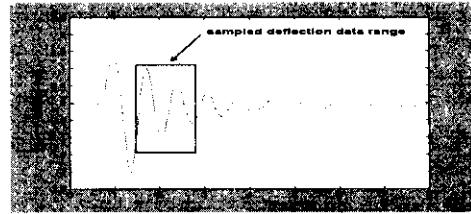


Fig. 7 Measurement of deflection

#### 4.2 Deflection 보정

측정된 Deflection의 영점조절과 이득조절을 하지 않을 경우 Set Point에서 큰 에러가 나오는 것을 막기 위해서 본 논문에서는 그림 8과 같은 Deflection 보정 방법을 제안하다

(1) Deflection 편차계산

(2) Scaling Factor 계산

(3) Deflection 보정

Fig. 8 Calibration of deflection

(1) Deflection 편차 계산

IF 오른쪽으로 Deflection될 때,  
최대 Deflection값 - 초기중심값

IF 왼쪽으로 Deflection될 때,  
최대 Deflection값 + (-초기중심값)

(2) Scaling Factor 계산

$$f_{right} = \frac{1.5V}{Deflection_{right}} \quad (6)$$

$$f_{left} = \frac{-1.5}{Deflection_{left}} \quad (7)$$

(3) Calibration된 편차

$$Deflection_{right}^* = f_{right} \times Deflection_{right} \quad (8)$$

$$Deflection_{left}^* = f_{left} \times Deflection_{left} \quad (9)$$

#### 5. 실험 결과

아래의 실험 결과에서도 알 수 있듯이 본 논문에서 제안한 방법을 이용하여 제어기를 구성할 경우 실험 시작전 계측장비의 도움으로 영점이나 이득을 조정하지 않고도 만족할만한 제어기의 구성이 가능하다. 이러한 결과는 주변 환경에 대한 둔감함을 알 수 있다. 본 논문에서 실험에 사용한 조건은 아래의 3가지 조건이다 첫 번째와 두 번째는 영점의 에러가 있을 때 나타나는 에러와 에러 보정 결과를 고찰하기 위한 것이고, 마지막은 이득의 변화에 따른 결과를 위한 조건이다.

**Case I :** 그림 9와 10은 중심 Deflection이  $-0.3V$ , 좌우가 각각  $-1.4V, 1.24V$  그림 9는 Set Point가 20도 일 때 결과 비교이고 그림 10은 Set Point가 40도 일 때의 결과이다.

**Case II :** 그림 11과 12는 중심 Deflection이  $-0.7V$ , 좌우가 각각  $-1.7V, 0.9V$  그림 11은 Set Point가 20도 일 때 결과 비교이고 그림 12는 Set Point가 40도 일 때의 결과이다.

**Case III :** 그림 13과 14는 중심 Deflection이  $-0.4V$ , 좌우가 각각  $-2.1V, 1.83V$ 로 이득이 Cas I, Case II 보다 클 때이다. 그림 13은 Set Point가 20도 일 때 결과 비교이고 그림 14는 Set Point가 40도 일 때의 결과이다.

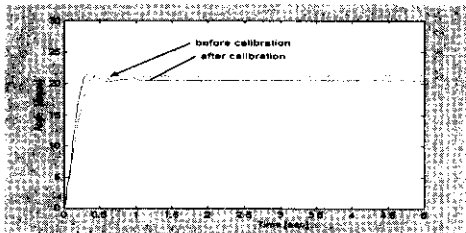


Fig. 9 Result of case I at angle '20°'

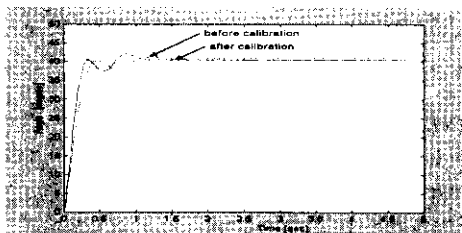


Fig. 10 Result of case I at angle '40°'

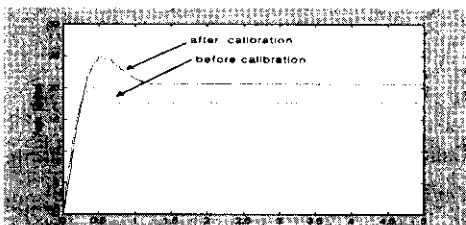


Fig. 11 Result of case II at angle '20°'

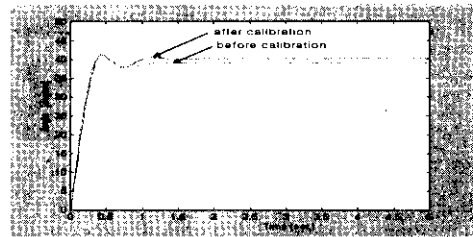


Fig. 12 Result of case II at angle '40°'

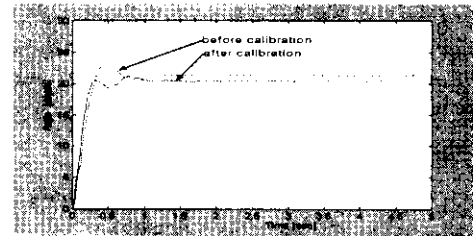


Fig. 13 Result of case III at angle '20°'

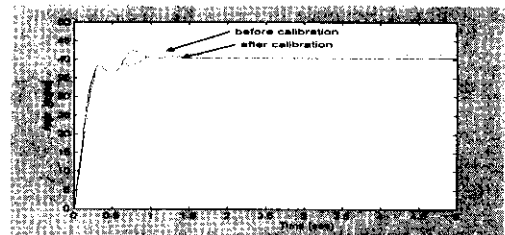


Fig. 14 Result of case at angle '40°'

### 참고문헌

- [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] Chern-Lin Chen and Shun-Chung Wang, "A PC-Based Adaptive Software for Automatic Calibration of Power Transducers," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 46, no. 5, Oct. 1997.
- [4] Hakan Bacakoglu and Mohamed S. Kamel, "A Three-Step Camera Calibration Method," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 46, no. 5, Oct. 1997.