

#### PSD 센서를 이용한 이동물체의 실시간 위치측정

• 노재희, 권석근, 서남일, 노영식  
울산대학교 전기공학과

## Real-time position measurements of mobile object using PSD sensor

Jae-Hee Ro, Young-Shick Ro, Seok-Geon Kweon, Nam-il Seo  
 Dept. of Electrical Engineering, Univ. of Ulsan

**Abstract** - The Position Sensitive Detector(PSD) is an useful device which can be used to measure the position of an incidence light in accuracy and in real-time. In this paper, 2-D PSD sensor is used to measure the 2-D position of moving object with light source. To get the position of light source from PSD sensor exactly, we propose two position computation methods ; the parameter calibration and neural network. Experimental data is presented that offer the comparision between two methods and demonstrates the effectiveness of proposed approach.

1. 서 론

이동하는 물체의 공간상의 위치 정보를 얻기 위한 시각 서보 기술은 산업현장이나 자동화 조립 라인 등 여러 가지 로보트 응용분야에서 중요한 역할을 하며 꾸준히 연구되어 오고 있다[1]. 특히, 이동하는 이동물체에 대한 실시간 시각추적은 대표적인 시각 서보 문제로서 반드시 시각정보 처리과정을 거쳐야만 한다. 시각정보 처리는 일반적인 경우에 비전 카메라를 시각센서로 사용함으로 카메라 교정 및 실시간 영상정보 처리에 관심이 집중되어 있지만 이를 주위 환경에 영향을 많이 받고, 측정 정밀도가 떨어지며, 긴 처리시간으로 인해 실시간 측정이 어렵다[2][3]. 한편 입사 된 광의 위치를 아날로그 방식으로 매우 정밀하게 검출할 수 있는 반도체 소자인 PSD(Position Sensitive Detector)가 개발되었다. PSD를 이동물체의 위치 측정을 위한 센서로 사용하는 경우 물체에 광을 부착해야 하는 번거러움이 있으나 실시간으로 이동물체의 위치 측정이 가능한 장점이 있다.

본 논문의 목적은 수 미터 떨어져 움직이는 2차원 공간상의 이동 물체 위치를 실시간으로 측정할 수 있는 PSD 센서 시스템을 개발하는 것이다. 먼저 이동물체에 적외선 광원을 설치하고 이 광원으로부터 적외선 광이 PSD 센서에 입사 되도록 한다. 센서에 입사된 적외선광은 2차원 PSD에 의하여 2차원 위치 정보를 포함하는 광전류를 발생시키고 이를 신호처리 함으로써 광원의 위치에 대한 정보를 얻는다. 이때 얻어진 위치 정보와 실제 광원의 위치 정보는 약간의 비선형성이 있으므로 실제 광원의 위치를 계산하기 위한 두 가지 방법을 제시한다. 첫 번째 방법은 센서에서 얻어진 정보와 실제 위치가 거의 선형적이라 가정하고 계산식의 파라미터를 정밀 헬리브레이션하는 것이다. 다른 방법은 비선형 관계를 학습 할 수 있는 신경 회로망을 이용하는 것이다. 제안된 각각의 방법으로 PSD 센서를 이용하여 위치 측정을 실시하고 상호 위치 측정 오차를 비교한다. 또한 이동물체를 실시간으로 측정할 수 있음을 보이기 위하여 PSD 센서를 천장에 고정시키고 이동로봇 상에 적외선 광원을 위치시키 후 이동 중에 있는 로봇의 위치를 측정한다.

## 2. PSD 센서를 이용한 위치측정

### 2.1 광원 위치의 기하학적 모델링

PSD 센서에서 얻어진 광원의 위치 정보를 이용하여 공간상의 실

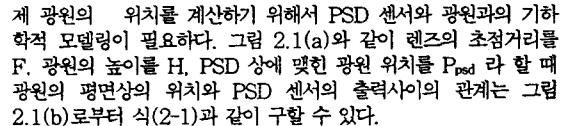


그림 2.1(b)에서 좌표 변환을 이용하여 광원 위치에 대한 작업계 벡터  $P_M$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$${}^wP_M = {}^wP_{SOPG} + {}^wR^s {}^sP_M \quad (2-1)$$

광원의 위치와 센서출력이 선형적이라 가정하면 광원 위치에 대한  
센서계 벡터는 식(2-2)와 같이 놓을 수 있다.

$$^sP_M = -\alpha [x_{ad} \quad y_{ad}]^T \quad (2-2)$$

여기서

$[x_{adc} \ y_{adc}]$  : PSD 센서의 디지털 출력

$\alpha$  : 출력 신호 스케일 계수

11

## 2.2 파라미터 캐리브레이션에 의한 위치측정

PSD 센서와 움직이는 광원과의 위치에 대한 모델의 내부 파라미터(즉, PSD의 위치, 출력 신호의 스케일 계수) 웰리브레이션을 위하여 Least Squared Estimation 방법이 도입되었다. 파라미터 웰리브레이션을 위해 식(2-1)과 식(2-2)를 다음과 같은 형태의 선형 방정식으로 표현한다.

$$C(x_{\alpha k}, y_{\alpha k}) r(x_i, y_i, \theta_i, \alpha) = d(x_m, y_m) \quad (2-3)$$

여기서

$$C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -x_{adc} & y_{adc} \\ 0 & 1 & -y_{adc} & -x_{adc} \end{pmatrix}, \quad r = \begin{pmatrix} x_s \\ y_s \\ \cos\theta \\ \sin\theta \end{pmatrix}, \quad d = \begin{pmatrix} x_m \\ y_m \end{pmatrix}$$

이다

식(2-3)은 4개의 미지수를 갖는 2개의 선형방정식이다.

하나의 알려진 광원의 위치( $x_m, y_m$ )에 대해 PSD 센서에서의 출력치( $x_{\text{out}}, y_{\text{out}}$ )가 주어졌을 때 2개의 선형방정식이 구성되므로 최소한 2개의 측정이 이루어져야 4개의 선형방정식이 구성되어 4개의 미지수를 구할 수 있다. 3개 이상의 측정에 대해서는 Least Squared Estimation을 이용하여 벡터  $r$ 에 대한 최소자승해를 구할 수 있다. 알려진 광원 위치와 이에 대한 PSD 센서의 출력치들에 의하여 벡터  $r$ 에 대한 최소자승해를 구한 후 이를 이용하여 내부 파라미터를 구하는 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x_s &= r_1 \\ y_s &= r_2 \\ \theta_s &= \tan^{-1}(r_4/r_3) \\ \alpha &= \sqrt{r_1^2 + r_2^2} \end{aligned} \quad (2-4)$$

식(2-4)의 케일리브레이션된 파라미터를 이용하여 PSD 센서의 출력치로부터 광원의 위치를 계산하는 식은 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} x_m \\ y_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_s \\ y_s \end{pmatrix} - \alpha \begin{pmatrix} \cos \theta_s & -\sin \theta_s \\ \sin \theta_s & \cos \theta_s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{\text{out}} \\ y_{\text{out}} \end{pmatrix} \quad (2-5)$$

### 2.3 신경 회로망에 의한 위치측정

입사 된 광원의 PSD 상의 위치와 PSD 센서의 출력은 식(2-2)과 같이 정확하게 비례 관계에 있지 않고 약간의 비선형을 갖는다. 따라서 보다 정밀한 위치 측정을 위해서는 비선형 관계식을 알아야 한다. 본 논문에서는 이러한 비선형 관계를 학습할 수 있는 신경 회로망을 이용한 위치 측정 방법을 제시한다.

#### 2.3.1 신경 회로망의 구조

본 연구에서 사용한 신경 회로망은 그림 2.2에 나타난 것과 같은 구조를 가진다. 신경망의 입력을 2개(센서에서 감지된 광원의 2차원 위치), 출력을 2개(광원의 실제 2차원 위치). 은닉층 뉴런은 20개로 구성하였고 이 신경 회로망은 2-20-2의 디중퍼셉트론(Multilayer Perceptron)구조를 가진다. 은닉층의 뉴런의 개수는 입력층과 출력층의 뉴런의 수를 참조하여 경험적으로 구하였다.

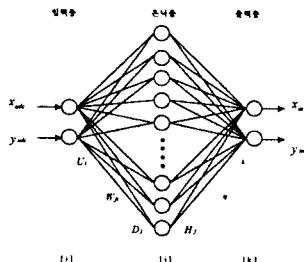


그림 2.2 신경 회로망의 구조

입력층 뉴런들은 전이함수(transfer function)를 사용하지 않으며 은닉층과 출력층에는 탄젠트 시그모이드(tangent sigmoid) 전이함수를 사용한다.

#### 2.3.2 신경 회로망의 학습 알고리즘

신경 회로망은 출력이 목표값과 일치하도록 연결강도를 조정할 필요가 있는데 이를 학습에 의해 변화시킬 수 있다. 신경 회로망의 학습 알고리즘은 back-propagation법을 이용하였다. 그림2.3은 본 논문에서 사용한 신경 회로망의 학습에 대한 블록 다이어그램을 나타낸다.

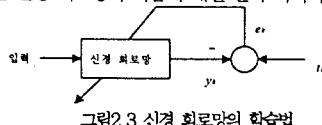


그림2.3 신경 회로망의 학습법

Back-propagation 학습 알고리즘을 통해 신경 회로망의 연결강도의 변화량을 구해보면 오차함수는 식(2-6)과 같다.

$$E = \frac{1}{2} \sum_k e_k^2 = \frac{1}{2} \sum_k (t_k - y_k)^2 \quad (2-6)$$

오차 함수를 접근적으로 최소화시키기 위한 연결강도의 변화량은 식(2-7)과 같다.

$$w(n+1) = -\eta \frac{\partial E}{\partial w} + w(n) \quad (2-7)$$

위 식에 의해서 연결강도의 변화량을 구할 수 있고 이로 인해 학습이 가능하게 된다. 전체적인 신경 회로망의 학습 알고리즘을 나타내면 다음과 같다.

(Step1) 연결강도와 바이어스값을 랜덤하게 초기화 한다.

(Step2) 신경 회로망에 입력을 인가해서 출력을 발생시킨다.

(Step3) 목표값과 실제 출력값 사이의 오차를 얻는다.

(Step4) 오차가 감소하도록 각 층의 연결강도를 조절 한다.

[은닉층과 출력층사이의 연결강도의 변화량 결정]

$$w_{ij}(n+1) = -\eta \frac{\partial E}{\partial w_{ij}} + w_{ij}(n) \quad (2-8)$$

[입력층과 은닉층사이의 연결강도의 변화량 결정]

$$w_{ji}(n+1) = -\eta \frac{\partial E}{\partial w_{ji}} + w_{ji}(n) \quad (2-9)$$

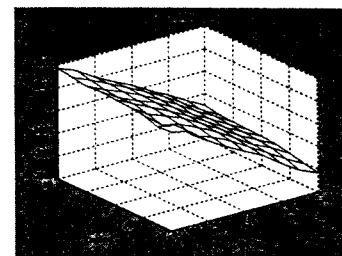
(Step5) 학습된 연결강도를 이용한 출력을 얻는다.

(Step6) Step 2를 반복한다.

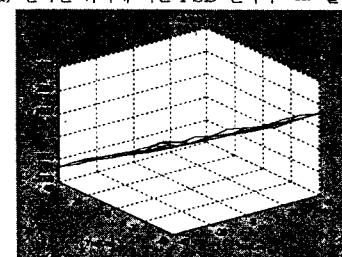
### 3. 실험 및 결과고찰

#### 3.1 광원 위치측정 방법의 비교

PSD 센서의 출력 데이터를 얻기 위해 약 2.4m높이의 연구실 천장에 PSD센서를 고정시키고 연구실 바닥에 80cmX80cm의 정사각형공간에 가로세로 길이 10cm간격으로 격자(grid)를 만들어 그림 3.1과같은 각 지점에서 광원의 위치에 따른 PSD 센서의 출력 데이터를 얻었다.



a) 알려진 위치에 따른 PSD 센서의  $x_{\text{out}}$  출력치



b) 알려진 위치에 따른 PSD 센서의  $y_{\text{out}}$  출력치  
그림 3.1 PSD 센서의 출력치

얻어진 PSD 센서의 출력 데이터를 이용하여 선형식(2-5)의 내부 파라미터를 캘리브레이션한 결과는 다음과 같다.

$$x_s = -0.8583 \text{ cm} \quad y_s = 1.3720 \text{ cm}$$

$$\theta_s = -0.1658^\circ \quad \alpha = 0.0230$$

신경 회로망은 PSD 센서 데이터가 입력될 때 정확한 광원 위치가 출력되도록 학습되었다. 학습율은 0.01로 하였으며 초기 연결강도는  $-1\sim1$ 사이 범위로 램덤하게 하였다. 그리고 종료 임계값은 0.00001로 하였다. 상기 과정 후 파라미터 캘리브레이션에 의한 위치측정과 신경회로망에 의한 위치측정을 각각 수행하였다. 그림 3.2은 파라미터 캘리브레이션과 신경 회로망에 의한 위치측정 오차를 비교한 것이다.

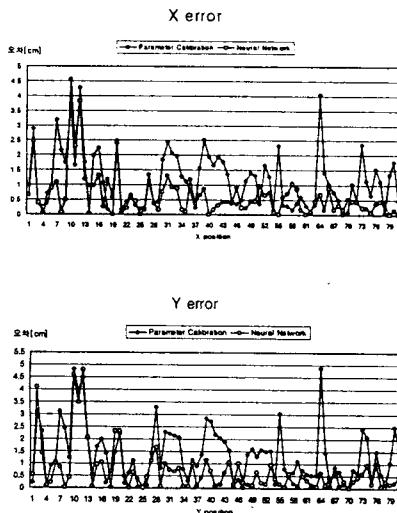


그림 3.2 파라미터 캘리브레이션 vs 신경 회로망에 의한 위치측정 오차 비교

파라미터 캘리브레이션과 신경 회로망의 위치측정 결과와 실제 위치와의 오차를 표준편차로 나타내면 각각  $2.3458\text{cm}$ ,  $1.5688\text{cm}$ 이다. 위 결과에서 보는 바와 같이 PSD센서의 비선형적인 출력 특성을 고려해볼 때 신경 회로망을 이용한 위치측정이 다소 시간이 걸리지만 실제 위치와의 오차를 보다 줄일 수 있다. 따라서 이동물체의 실시간 위치측정은 신경 회로망을 이용하여 실시하였다.

### 3.2 이동물체의 실시간 위치측정

이동물체를 실시간으로 측정할 수 있음을 보이기 위하여 PSD 센서를 천장에 고정시키고 이동로봇 상에 적외선 광원을 위치 시킨 후 2차원 평면상에서 이동로봇이 원궤적을 그리며 이동하는 동안 이동로봇의 위치를 실시간으로 측정하였다. 그림 3.3은 이동로봇의 초기위치는 원점에 가깝고 2차원 평면상에서 약  $250\text{mm/sec}$ 의 속도로 원궤적을 그릴 때 PSD 센서의 출력신호를 나타낸 것이며 그림 3.4는 신경 회로망에 의한 이동로봇의 위치를 보여준다.

그림 3.4에서 보이는 원궤적의 오차는 이동로봇의 이동속도에 기인한다. 이동로봇의 회전속도는 약  $250\text{mm/sec}$ 로 비교적 빠른 편이므로 원의 전체적인 모양에서 벗어나 다소 일그러진 형태를 가지게 된다. 이동로봇의 속도를 더욱 빨리 하면 원은 더욱 일그러진 형태를 가지게 된다.

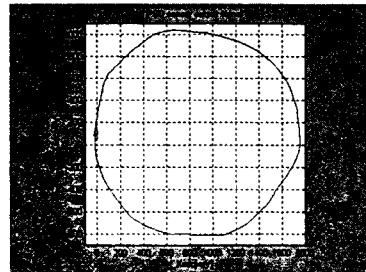


그림 3.3 PSD 센서 출력신호

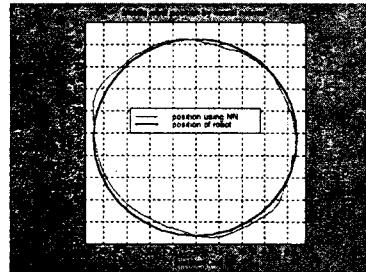


그림 3.4 신경 회로망에 의한 이동로봇의 위치

## 4. 결 론

본 논문에서는 수 미터 떨어져 평면상에 움직이는 물체의 위치를 실시간으로 측정할 수 있는 센서 시스템을 제안하였다. 이동 물체상에 설치된 적외선 광원으로 부터 센서에 입사되는 적외선광은 2차원 PSD(Position Sensitive Detector)에 의하여 2차원 위치정보를 포함하는 광전류를 발생시키고 이를 신호처리 함으로써 광원의 위치에 대한 정보를 얻었다. 이 때 얻어진 위치정보와 실제 광원의 위치 정보와는 약간의 비선형성이 있으므로 실제 광원의 위치를 계산하기 위한 두 가지 방법을 제시하고 실험을 통하여 각각의 방법의 정확성을 비교하였다. 실험결과 비선형 특성을 학습할 수 있는 신경회로망을 이용하는 방법이 파라미터 캘리브레이션을 통한 선형식을 이용하는 것보다 오차를 약간 줄일 수 있었다. 이동물체의 위치측정 실험을 위하여 이동로봇 상에 적외선 광원을 위치 시키고  $250\text{mm/sec}$ 의 속도로 원궤도 주행을 수행하였다. PSD 센서와 신경회로망으로 이동로봇의 평면상의 이동 위치를 실시간으로 측정한 결과 경로 표준 편차가 약  $\text{mm}$ 로 비교적 정확한 측정을 할 수 있었다.

비록 본 연구에서는 평면상의 이동위치를 측정하였으나 향후 두 개의 PSD 센서를 사용하여 3차원 공간상의 이동물체 위치를 측정하는 연구를 계속 진행할 예정이다.

## 참 고 문 헌

- (1) Takashi Oya, Hideki Hashimoto, Fumio Harashima, Predictive Filtering for Visual Tracking, IECON, pp. 1781-1723, 1993
- (2) G. C. Buttazzo, B. Allotta, F. P. Fanizza, Mousebuster : A Robot for Real-Time Catching, IEEE Control Systems, Feb. 1994
- (3) A. J. Koivo, N. Houshangi, Real-Time Vision Feedback for Servoing Robotic Manipulator with Self-Tuning Controller, IEEE Trans. Sys. Man and Cyber. Vol. 21, no. 1, Jan. 1991