論文 한국정밀공학회지 제6권 제4호 1989. 12
Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 6, No 4 December 1989

아날로그 신호처리에 의한 좌표변환에 관한 연구

제 우성* 박 서욱** 오 준호**

A Study on the Coordinate Transformation by Using the Analog Signal Processing

Woo-Seong Che* Seo-Wook Park** Jun-Ho Oh**

-Abstract-

This paper presents a method of analog signal processing for a coordinate transformation. Through the proposed method, two-dimensional position information obtainded from any type of null-detector can be transformed into the information with repect to world coordinate system. In order to implement the method, a null-detection device which consists of four optical proximity sensor is developed. Through the experiments for performance evaluation, the effectiveness of the proposed method has been demonstrated.

* 한국과학기술원 과학기술대학
** 한국과학기술원 생산공학과

1. 서 론

현재 상용되고 있는 산업용 로보트의 대부분은 단순 재생방식(Playback Type)이므로 그 응용범위가 점용접, 페인팅, 단순반복 조립작업(즉 Pick and Place)등으로 제한되고 있는 실정이다. 이러한 형태의 로보트는 가변적인 주변 상황에 대처하는 적응성(Adaptability)이 없으므로, 최근에는 센서정보를 바탕으로 하여 온라인으로 동작제어를 행하는 지능로보트(Intelligence Robot)에 대한 연구가 활발해지고 있다. 따라서 이를 위한 다양한 센서의 개발이 요구되어지며, 이들로부터의 정보를 처리하는 알고리즘이나 처리속도(Processing Speed)등이 쟁점이 되고 있다.

일반적으로 로보트의 Hand가 움직여야 할 궤적은 공간상에 고정되어 있는 기준좌표계(World Coordinate System)에 대해서 나타내어진다. 그런데 센서를 로보트 Hand 끝에 부착할 경우는 작업물에 대한 정보가 로보트의 Hand에 상대적인 값으로 얻어지므로, 이를 기준좌표계로 좌표변환을 행해 주어야 한다. 이러한 과정은 Sine 또는 Cosine 함수 및 곱셈연산등을 포함하고 있으며, 이를 대개 디지틀 컴퓨터에 의해 수행한다. 본 논문에서는 이러한 연산과정을 아날로그 신호처리로 가능케 하는 새로운 방법을 제시하고자 한다. 제안하고자 하는 방법에 의하면 좌표변환을 위하여 별도의 프로세서가 필요없게 되며, 아날로그 신호처리 회로를 통한 센서정보의 직접적인 궤환에 의하여 로보트의 동작을 자율적(Autonomous)으로 제어할 수 있게 된다.

로보트가 주변정보를 얻기위해 주로 사용하고 있는 센서로는 크게 접촉식과 비접촉식으로 나눌 수가 있다. 접촉식으로는 힘 및 토크 센서, 접촉센서(tactile sensor)등이 있으며, 비접촉식에는 카메라를 이용한 비젼센서(vision sensor) 나 근접센서(proximity sensor)등이 있다[1].

이중에서 비젼센서를 이용하여 움직이고 있는 물체를 실시간으로 추적(real-time tracking) 하거나 정교한 위치잡기 (positioning) 등을 수행하기 위해서는 처리속도가 문제가 되며 가격이 비싼 단점이 있다[2].

반면에 광학 근접센서(optical proximity sensor)는 값이 싸고 크기가 작아서 로보트 Hand끝에 장착하기가 용이하다. 대개 이 근접센서는 물체의 유무를 판별하거나 거리 및 방위각 (orientation) 등을 측정하는데, 이중에서 거리를 측정하고자 할때는 반사광의 세기(intensity)에 의한 방법, 삼각측정방식 (triangulation) 및 위상변조 (phase modulation)에 의한 방식등으로 대별할 수가 있다[3][4][5].

본 논문에서는 발광(emitter) 및 수광소자(receiver)의 쌍으로된 광학 근접센서 네개를 서로 직각이 되게 방사형으로 설치한 다음, 가운데 놓인 목표물의 위치 편차량(deviation)을 검출해 내는 영점감지장치(null-detection device)를 제작하였다. 이러한 감지장치를 로보트 Hand끝에 장착하여 움직이는 물체를 추적하거나 교시작업등을 할 때 필요한 좌표변환은 제안하고자 하는 아날로그 신호처리 방식을 사용한다.

본 논문의 구성은 먼저 2 장에서 좌표변환을 위한 아날로그 신호처리 방법을 서술하고자 한다. 3 장에서는 광학근접센서를 이용한 영점감지장치의 구조를 설명하고, 4 장에서는 만들어진 센서의 성능평가에 관한 내용을 설명한다.

2. 좌표변환을 위한 아날로그 신호처리 방법

센서 좌표계에 대해서 얻어진 목표물의 위치 편차, Ex 및 Ey를 기준좌표계에 대한 값으로 변환하기 위해서는 다음과 같이 회전행렬을 곱해주면 된다. 즉

$$\begin{Bmatrix} Ex \\ Ey \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} Ex \\ Ey \end{Bmatrix} \cdots\cdots\cdots\cdots (1)$$

식(1)을 아날로그 신호처리를 통하여 구현하기 위한 구성도는 그림 1과 같다. 이 그림을 참조하면서 $E_Y = Ex\sin\theta + Ey\cos\theta$를 구하는 과정을 단계별로 설명하면 다음과 같다.

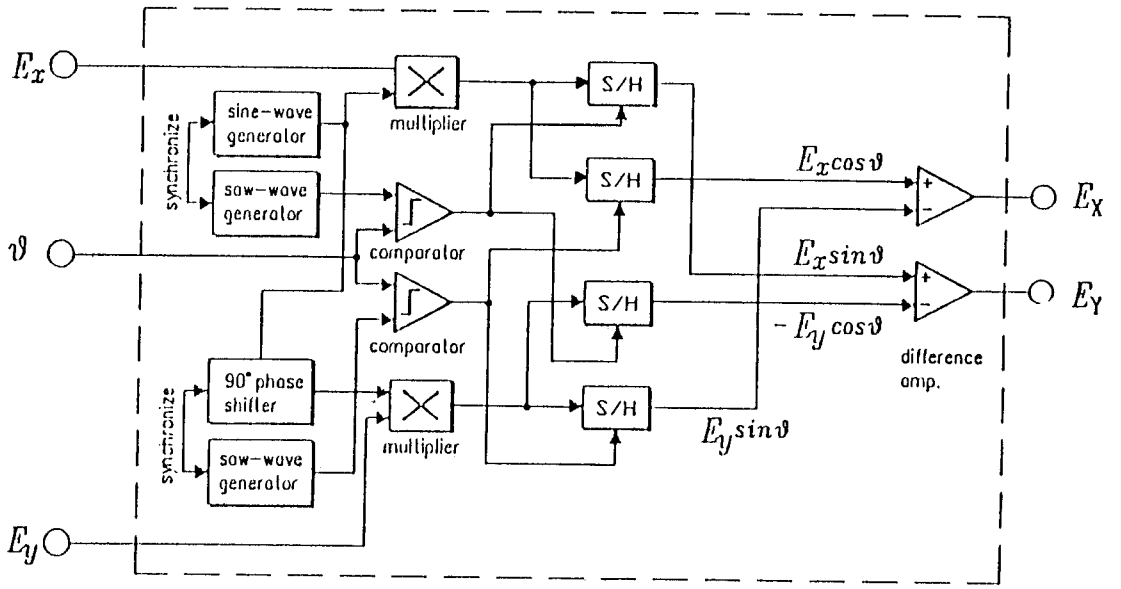

Fig. 1 Structure of the Analog Coordinate Transformer

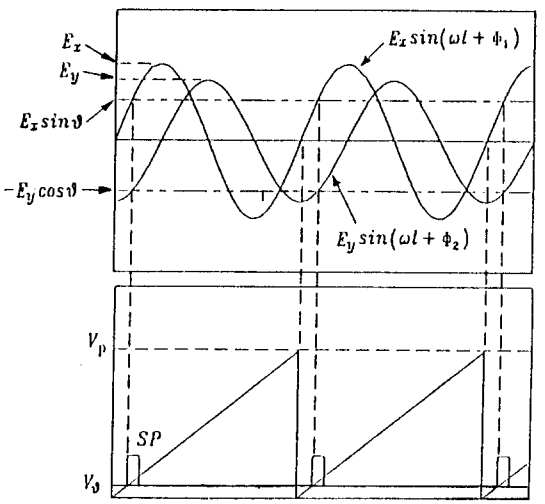

Fig. 2 Concept of the Signal Processing

(a). 영점감지장치에서 얻어지는 x축 편차량, Ex 와 정현파 발생기 (sine-wave generator)로부터 나오는 단위진폭의 정현파를 아날로그 곱셈기 (analog multiplier)에 인가 한다. 이때 곱셈기는 Ex에 의해 진폭변조된 정현파(amplitude modulated sine-wave), $Ex\sin(\omega t+\Phi_1)$를 출력한다. (그림2참조). 여기서 ω는 정현파 발생기의 주파수인데, 이것이 신호처리계의 대역(bandwidth)을 결정하게 된다.

(b). 한편 그림2에서 보는 바와같은, 정현파와 동기된 톱니파(sawtooth wave)를 얻는다.

(c). (b)로 부터 얻어지는 톱니파와 센서좌표계의 회전량, θ에 대응하는 전압, V_θ 를 비교기 (comparator)에 인가하여 샘플링 펄스(sampling pulse), SP를 발생시킨다. 여기서 V_θ는 다음식으로 주어진다.

$$\nabla_\theta = \frac{\theta}{2\pi} V_P \quad \cdots\cdots (2)$$

여기서 V_P는 톱니파의 최대전압(peak voltage)이고, θ는 radian으로 주어진다.

(b), (c)에서 얻어진 펄스, SP로 (a)에서 만들어진 진폭변조된 정현파, $Ex\sin(\omega t+\Phi_1)$를 샘플링하면 $Ex\sin\theta$의 값을 얻게 된다(그림 2 참조).

또한 그림2에서 보는 바와 같이, 정현파 발생기로부터 나오는 파를 90° 위상지연시켜 이것을 E_Y로 진폭변조시킨 다음 펄스, SP로 샘플링하면 $-E_y\cos\theta$를 얻을 수 있다.

마지막으로 $E_x\sin\theta$와 $-E_y\cos\theta$를 뺄셈 연산증

폭기(difference op.amplifier)에 통과시키면 E_Y를 얻을 수 있다.

$E_x = E_x\cos\theta - E_y\sin\theta$의 값도 위와 비슷한 과정을 거치면 얻을 수 있다.

3. 영점 감지장치의 제작

본 논문에서는 전절에서 제안된 아날로그 좌표변환 기법을 구현하기 위하여 광학근접센서를 이용한 간단한 영점감지장치를 제작하였다.

광학 근접센서는 그림 3에서 보는 바와 같이 발광 및 수광소자의 한쌍으로 아루어져 있다.

목표물의 표면이 감지영역(sensitive volume)내로 들어오면 목표물과의 거리에 따라 수광소자에 반사되어져 들어오는 빛의 세기(intensity)가 변하게 된다.

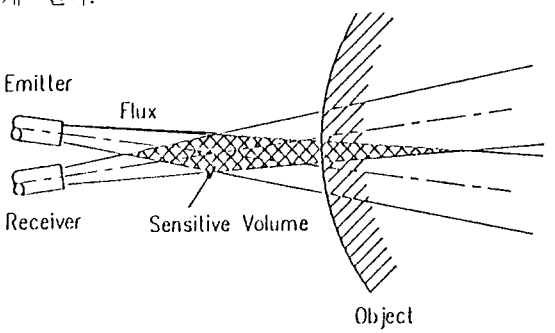

Fig. 3 Concept of the Optical Proximity Sensor

이러한 발광 및 수광소자의 쌍으로 된 광학근접센서 네개를 서로 직각이 되게 방사형으로 배치하여 원형의 목표물이 센서의 중심점에 대해서 벗어난 정도 (즉 위치 편차)를 감지할 수 있도록 하였다(그림4).

각 근접센서의 출력특성이 같다고 가정한다면, 목표물이 센서의 중심점에 놓여 있을때, 일직선상에서 서로 마주보고 있는 근접센서의 출력이 같을 것이다. 그러나 그림 4 에서 보는 바와같이 목표물이 중심점을 약간 벗어나게 되면 x 및 y 축상에 일렬로 놓인 근접센서의 출력이 서로 다르게 되며, 이들간의 차이가 위치편차량에 비례한 값이 된다. 즉 네개의 센서로부터 얻어지는 출력전압을 각각 V_1, V_2, V_3 및 V_4라고 할때, x 및 y축에 대한 목표물의 위치편차는 다음식과 같

$$E_x = V_1 - V_3 \qquad (3)$$
$$E_y = V_2 - V_4$$

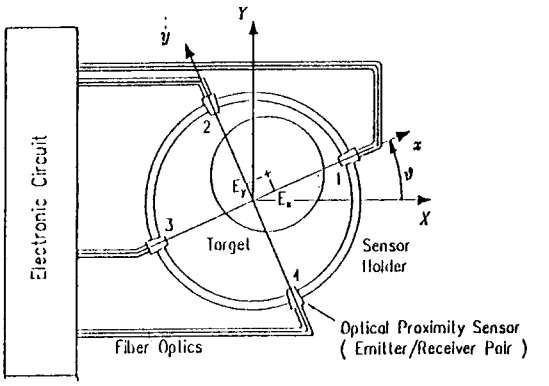

Fig. 4 Configuration of the Null-Detection Device

실제로 제작에 사용된 광학근접센서의 발광소자로는 적외선 발광다이오우드(IR LED; EL-23F)이고 수광소자로는 포토 트랜지스터(photo transistor; ST-23F)를 사용하였다. 또한 이들 소자와 전자회로간은 광섬유(fiber optics)로 연결되어 있다.

실험을 통하여 얻어진 각 근접센서의 거리에 대한 출력전압의 특성곡선은 그림 5와 같다. 각

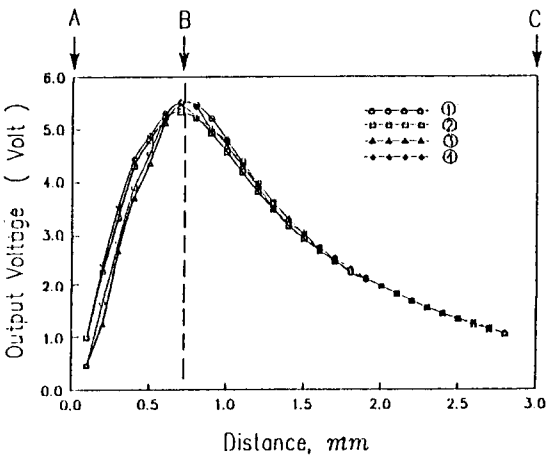

Fig. 5 Characteristic Curves of Proximity Sensors

센서의 매개변수들의 차이로 인하여 특성곡선간에 편차가 다소 존재한다. 이들 특성곡선의 B-C 구간중 다소 선형성(linearity)이 좋은 (0.7㎜-1.5㎜) 구간을 이용하는데, 이를 위하여 근접센서를 지지하는 홀더의 내경은 30㎜로, 목표물의 외경은 27㎜로 결정하였다. 또한 목표물은 거울면을 갖는 알루미늄 봉을 사용하였다.

발광소자는 주변의 잡광등에 의한 외란(disturbance)의 영향을 제거하기 위해서 펄스로 구동된다. 실제로 사용한 펄스의 듀티 사이클(duty cycle)은 10%이고, 주파수는 4kHz 이다.

목표물의 표면에 반사되어진 빛은 광섬유를 통하여 포토 트랜지스터에 인가 된다. 이 트랜지스터의 출력을 4kHz의 중심 주파수 (center frequency)를 갖는 밴드패스 필터(bandpass filter)로 통과시키면 거의 정현파에 가까운 파형을 얻게 된다. 이때 정현파의 진폭은 목표물과 근접센서간의 거리에 비례하여 변하게 된다. 따라서 정현파 발생기 및 아날로그 곱셈기를 합하여 사용한 것과 동일한 상황이 된다.

적분기와 zero-crossing detector를 이용하여 밴드패스 필터를 통과한 정현파와 동기된 톱니파를 얻을 수 있다. 즉 정현파가 영점을 지나는 것을 감지하여 이 순간에 적분기를 reset 시킴으로써 톱니파가 발생된다.

이러한 톱니파와 센서회전각도에 비례하는 전압, V_θ를 비교함으로써 샘플링 펄스를 만들고, 이것이 sample-and-hold의 논리신호 (logic signal)로 사용된다.

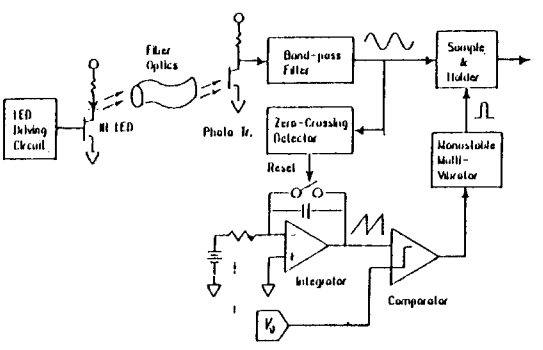

Fig. 6 Structure of the Signal Processing Circuit

실제로 제작된 신호처리 회로의 일부분에 대한 구성도를 간략하게 그린것이 그림 6과 같다.

전절에서 제시한 아날로그 신호처리에 의한 좌표변환 방식은 제작된 간단한 영점감지장치 뿐만 아니라, 4분할 광학센서 (4-quadrant photo-detector)[2], PSD(Position Sensitive Detector)[6] 등을 사용하였을 때에도 그대로 적용될 수 있다. 따라서 이들을 이용하여 아크용접을 위한 seam tracking, 움직이고 있는 컨베어상의 작업물에 대한 실시간 추적등의 여러가지에 응용이 가능하다.

4. 성능 평가

4.1 실험 장치

제작된 영점 감지장치 및 신호처리회로의 성능을 평가 하기위한 실험장치의 개략도는 그림 7과 같다.

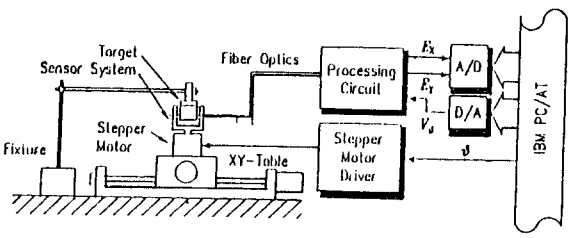

Fig. 7 Schematic diagram of the Experimental Set-Up

감지장치를 회전시켜 주기위해 분해능이 펄스당 1.8°인 스텝 모터를 부착하고, 이를 XY 테이블상에 장착시켰다. 목표물은 지지대를 이용하여 공간상에 고정시켜둔다. 마이크로 컴퓨터 (IBM PC)에서 회전각도, θ 만큼 회전하도록 스텝 모터에 지령을 주고, 이에 대응하는 전압, V_θ를 D/A 컨버트를 통해 신호처리 회로에 인가한다. 또한 XY 테이블을 이동시켜 목표물과 센서간에 위치 편차를 준 뒤, 12 bit 의 분해능을 갖는 A/D 컨버트를 통하여 위치 편차량 E_X 및 E_Y를 읽어 드린다.

4.2 실험 결과

(1). 거리에 따른 센서출력의 선형성 평가

센서의 회전이 없는 상태에서, x 및 y축 상으로 목표물을 움직이면서 센서의 출력 전압을 관찰하였다. 대체적인 거리 대 출력전압 간의 특성 곡선은 그림 8과 같다.

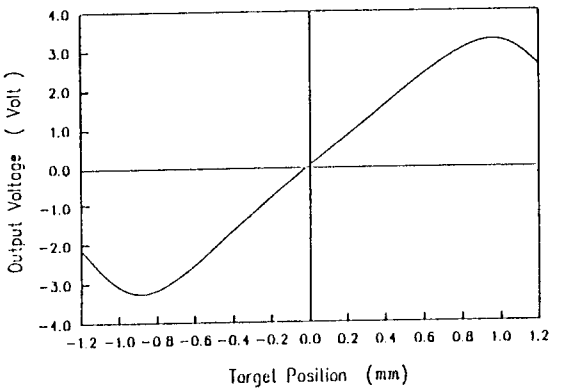

Fig. 8 Output Characteristics for Distance

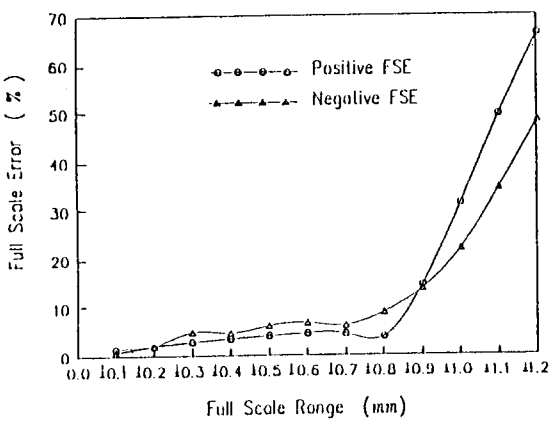

Fig. 9 Linearity of the Sensor output; FSR vs. FSE

선형성을 보다 더 정량적으로 평가하기 위하여, 임의로 정의된 측정범위(Full Scale Range; FSR)에 대해서 FSE(Ful Scale Error)를 다음과 같이 정의하였다.

$$FSE = \frac{\text{최대오차}}{FSR} \times 100\,(\%) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (4)$$

여기서 최대오차는 최소자승법 (least square method)으로 구해진 직선식과 실험데이타간의 최대오차를 말한다.

몇가지 FSR에 대한 FSE의 경향은 그림 9와 같다. 이 그림에서 보는 바와같이 FSR를 ±0.7 ㎜로 했을때 FSE는 7%이하 임을 알 수가 있다.

(2). 회전에 대한 센서 출력특성의 평가

영점감지장치가 회전함에 따라, 좌표변환된 목표물의 위치를 신호처리 회로로부터 얻을 수 있는지를 살펴보았다. 목표물이 (0.0㎜, 0.2㎜) 및 (0.0㎜, 0.4㎜)에 각각 고정되어 있는 두가지의 경우에 대해서, 센서를 30.4° 에서 331.2° 까지 1.8° 간격으로 회전시켜 가면서 센서의 출력 전압을 측정하였다.

이 실험의 결과는 그림 10과 같다. 이 그림에

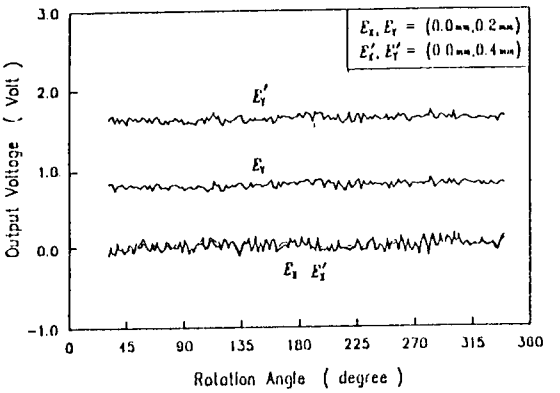

Fig. 10 Observed Outputs for Sensor Rotation

서 보는 바와같이 센서가 회전하더라도 기준좌표계에 대해 고정되어 있는 목표물의 위치에 대한 정보를 얻을 수 있었다. 이때의 FSE는 4.0%-6.0% 정도임을 알 수가 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 센서 좌표계의 회전에 대응하는 좌표변환을 아날로그 신호처리로 구현 할 수 있는 방법을 제시하였다. 또한 제시된 방법을 구현

하기 위해서, 네개의 광학 근접센서를 사용하여 목표물의 위치편차를 감지할 수 있는 영점감지장치를 제작하였다. 이 감지장치부터 얻어지는 신호를 기준 좌표계의 값으로 변환하기 위한 회로를 설계 및 제작하였고, 몇 가지 실험을 통하여 이의 성능을 평가 하였다. 이로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1). 아날로그 신호처리를 통하여 좌표변환을 구현함으로써 빠른 응답성을 얻을 수 있다. 또한 아날로그 신호처리가 불가피한 경우(예로써 속응성이 중요한 경우, 좌표변환을 위한 별도의 (프로세서를 쓰기가 곤란한 경우)에 대해서 좌표변환을 위한 신호처리의 기본 개념을 제공하여 준다.

(2). 제안한 아날로그 신호처리에 의한 좌표변환 방식은 제작된 간단한 영점감지장치 뿐만이라, 2차원의 위치정보를 아날로그 형태로 출력할 수 있는 임의 형태의 영점센서에 대해서도 그 개념을 그대로 적용할 수 있다. 따라서 이를 이용하여 아크용접을 위한 seam추적, 움직이고 있는 컨베어 상의 작업물에 대한 실시간 추적 뿐만아니라, 로보트의 Hand 끝에 부착하여 정교한 위치잡기 (positioning)및 작업교시(teaching)등에 응용가능하다.

(3). 성능평가를 위한 몇가지 실험을 통하여 거리에 대한 센서 출력 전압의 선형성은 ±0.7 ㎜ FSR 에 대하여 7% FSE를 가지고 있음을 알 수 있었고, 센서 회전에 대해서는 4.0%-6.0% FSE를 유지하면서 좌표변환된 목표물의 위치를 얻을 수 있었다.

參 考 文 獻

(1). G. Hirzinger, "Sensory Feedback in Robotics - State-of-Art in Research and Industry," IFAC, Vol. 4, p. 204-217, 1987

(2). Moshe Shoham, Y. Fainman and E. Lenz, "An Optical Sensor for Real-Time Positioning, Tracking, and Teaching of Industrial Robots," IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. IE-31, NO. 2, pp. 159-163, May 1984

(3). Johnston. A. R, "Optical Proximity Sensor for Manipulators," Technical Report JPL TM, Jet Propulsion Laboratory, 1974

(4). Takeo Kanade, Thomas Sommer, "An Optical Proximity Sensor For Measuring Surface Position and Orientation For Robot Manipulator," The International Journal of Robotics Research, 1984

(5). Ryosuke Masuda, "Multi-Functional Optical Proximity Sensor By Using Phase Information," '85 ICAR, Sep. 9-10, 1985

(6). Y. Hamamada, "Position Sensitive Detector and Its Application," Elec. Eng., Vol. 12, NO. 12, p. 43-50, 1970