論文 한국공작기계학회지 제9권 제3호 2000. 6.
Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers

본 연구는 1997년도 교육부 학술연구조성비(기계공학:ME97-E-35)에 의하여 연구되었음.

초정밀 엔코더를 위한 신호처리기법개발

정 규 원*

Signal Processing Algorithm for High Precision Encoder

Kyuwon Jeong*

Abstract

Shaft encoder which encodes the rotational angle of a shaft becomes more important recently due to factory automation and office automation. Although an absolute type encoder is more desirable due to its convenience, an incremental encoder is commonly used because of its cost and technical difficulties. Fabricating a high resolution absolute encoder is very difficult because the physical size is limited by currently available technology. In order to overcome this difficulty, Moire fringe can be used incorporated with gray code.

In order to measure the position of fringes which move as the code disk rotates, a neural network was developed in this paper. Formerly fringe position is usually measured by a sophisticated software, which needs a little long calculation time. However, using neural network method can eliminate such calculation time, even though it needs learning job. The proposed method is verified through several experiments.

Key Words : Absolute Encoder(절대위치 엔코더), Radial Grating(반경방향 격자), Moire Fringe(모아레 프린지), Neural Network(신경회로망)

1. 서 론

서보 모타, 로봇, 공작기계 등의 핵심적인 자동화 기계에는 구동부분의 위치를 측정하기 위한 센서로서 가변저항기, 레졸버 (resolver), 엔코더 (encoder)등을 사용하고 있으나, 최근에는 엔코더의 사용이 일반화되고 있으며, 정밀도를 높이기 위하여 고분해능을 갖는 것이 요구된다.

전형적인 광학식 엔코더의 구성은 Fig. 1과 같다. 그림에서와 같이 엔코더는 크게 코드디스크 부분, 감지 부분, 신호처리 부분으로 나눌 수 있다. 코드디스크 부분에는 회전각도를 측정할 수 있는 코드가 그려져 있는데, 절대위치 방식에는 그레이 코드, 또는 이진코드등을 사용하고, 증분식 엔코더에는 일정한 간격으로 투명, 반투명 슬롯이 교대로 만들어져 있다. 이런 형태의 디스크 전후면에 적외선

* 충북대학교 기계공학부

다이오우드등의 발광 소자와 포토트랜지스터 또는 CCD 소자등의 수광소자를 설치한다. 이와 같은 구조에서 코드 디스크가 회전하면 수광소자에 인가되는 신호를 검출하여 그 회전 각도를 산출한다. 따라서 코드디스크에 그려진 코드의 정밀도가 엔코더의 분해능을 결정한다. 한편 증분식 엔코더는 기계를 가동할 때 초기위치를 검출하는 장치가 반드시 필요하나, 절대위치 방식 엔코더는 그러한 과정이 필요 없기 때문에 로봇등에 많이 사용되나, 고분해능의 것을 제작하기 어렵기 때문에 고정밀도의 제품에는 사용이 어렵다. 본 논문에서는 신호처리기법과 모아레(Moire) 간섭현상을 이용한 코드디스크를 이용하여 정밀도를 향상시키는 방법을 연구하고자 한다.

초정밀 엔코더에 대한 기존의 연구는 다음과 같은 것이 있다.[1-17] Itek회사[13]의 방법은 전자적으로 고분해능 부분을 생성하기 때문에 기계적인 회전과는 무관하게 전자회로의 정밀도가 전체 엔코더의 정밀도를 결정하며, 광섬유를 이용한 방법들에서는 실용화 하기 위해서는 광섬유 및 감지 소자의 크기가 미크론이하로 소형화 되어야 하나, 기술적으로 매우 실현하기 어렵다. 선형 엔코더에 대하여는 참고문헌 [17]에서는 4점 모아레법(FPMM)을 제안하였다. 여기에서는 리니어 스케일로 사용한 두 격자를 서로 중첩시키고 여기에 투과시킨 He-Ne레이저의 0차 회절광으로 부터 얻어진 정현적인 모아레 무늬를 4개의 광 센서로 검출하여 변위에 따른 위상 변화량을 계산함으로써 비교적 간단하면서도 매우 정확하게 변위를 측정할 수 있는 변위 측정법을 개발하였다. 그러나 이 방법에서는 간섭무늬가 정현적이라고 가정하고, 수식적인 계산을 통하여 간섭무늬의 위치를 파악하고 있다.

본 논문에서 제안하는 엔코더의 핵심적인 코드디스크(code disk)에는 Fig. 2와 같이 일반적인 그레이 (gray) 코드가 그려진 저분해능 부분과 반경방향 격자 (grating)가 그려진 부분으로 되어 있다. 그림에서는 3bit의 그레이 코드와 100개의 격자가 그려진 것을 볼 수 있으나, 실용적으로 제작할 때는 저분해능 부분에는 10bit 정도의 그레이코드를 사용하고, 고분해능 부분 즉 11 ~ 16bit 부분의 데이터는 반경방향 격자가 일으키는 간섭무늬로부터 구한다. 증분식 엔코더가 2000ppr 이상의 것이 실용화 되어 있으므로, 2000라인 이상의 격자는 용이하게 제작이 가능할 것이다. 이와 같은 반경방향 격자와 인덱스 격자가 발생시키는 모아레 간섭무늬는 원형으로 생성된다.

일반적인 선형의 격자 (Ronchi grating)에 대해서는 간섭무늬의 위치가 인덱스 격자의 이동에 따라 선형적으로 이동하나 본 논문에서 사용하는 간섭무늬는 그렇지 않기 때문에 적절한 신호처리 기법을 개발하고, 이로부터 고분해능에 해당되는 회전각도를 구하고자 한다.

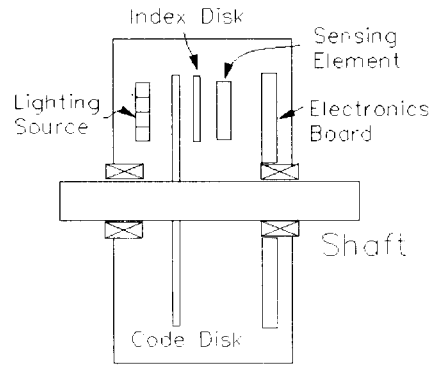

Fig.1 Basic structure of optical encoder

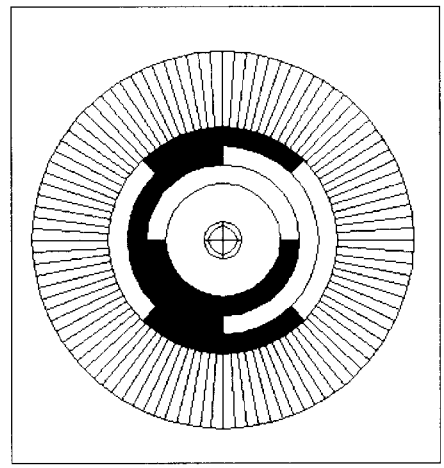

Fig. 2 Code disk with gray code and radial grating

2. 간섭무늬 해석

본 논문에서는 원형의 회전하는 디스크 (주격자판)에 반경방향으로 일정한 각도의 간격을 갖는 격자를 만들고, 정지하여 있는 인덱스 디스크에도 역시 주격자판과 같은 제원의 격자를 만든다. 간섭무늬를 발생시키기 위하여 인덱스 디스크는 주격자판에 대하여 일정한 편심을 갖도록 설치한다. Fig.3은 전체 원에 n=100개의 선을 그은 것이

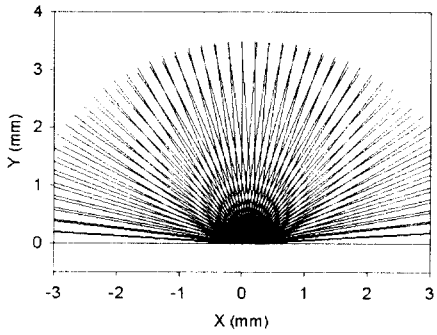

Fig. 3 Moire fringe from two radial gratings

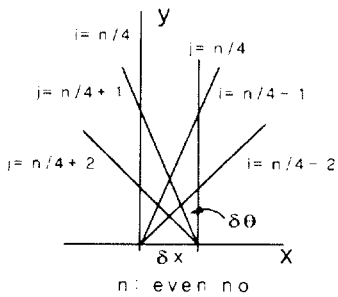

Fig. 4 Moire fringe formation with two radial gratings

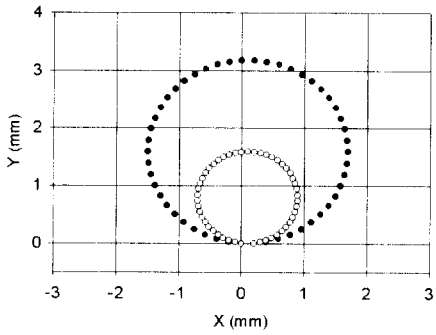

Fig. 5 Moire fringe position

며, 인덱스 디스크를 주격자로부터 $\delta x = 0.2$mm편심 시킨 것이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 간섭무늬는 원형이 된다. 또한 간섭무늬의 어두운 부분은 상당히 넓은 부분에 걸쳐서 형성되어 있으며, 어두운 부분의 폭이 원주를 따라서 변화하고 있다. 이것은 선형 격자의 경우와 매우 다름을 알 수 있다. 여기에서 보이는 간섭무늬의 위치는 Fig. 4를 참고하여 계산하면 다음과 같다. 이 그림에서 격자의 간격 (각도)은 $\delta\theta = 2 * \pi / n$(rad) 이다. 위의 그림에서 원점을 중심으로 설치되어 있는 디스크가 주격자 디스크이며, 이의 중심에서 δx만큼 이동된 디스크가 인덱스 디스크이다. 각각의 격자가 기준선과 이루는 각도를 θ_i 와 θ_j 라 하자.

$$\theta_i = \delta\theta \cdot i,\ i = 0,1,2,\mathrm{L}\ \frac{2\pi}{\delta\theta} \tag{1}$$

$$\theta_j = \delta\theta \cdot j,\ j = 0,1,2,\mathrm{L}\ \frac{2\pi}{\delta\theta}$$

먼저 두 선이 겹쳐지는 부분이 가장 밝은 구역이 된다. 이들의 위치를 계산하기 위하여 각각 디스크의 격자를 식으로 나타내면, 주격자는 다음 식 (2)와 같으며,

$$\frac{y}{x} = \tan\theta_i \tag{2}$$

인덱스 격자는 다음과 같다.

$$\frac{y}{x-\delta x} = \tan\theta_j \tag{3}$$

위의 식으로부터 두개의 격자가 겹치는 부분의 좌표를 구하면 다음과 같다.

$$x = -\frac{\tan\theta_j}{\tan\theta_i - \tan\theta_j}\delta x \tag{4}$$

$$y = -\frac{\tan\theta_i \tan\theta_j}{\tan\theta_i - \tan\theta_j}\delta x$$

주어진 δx에 대하여, 각각의 격자가 교차하는 좌표를 구해보면, Fig. 4에서 보는 바와 같이 (0, 0) 과 (δx , 0)를 지나며, $x = \delta x/2$인 수직선을 기준으로 좌우대칭이다. n이 짝수일 경우, 주격자의 수직선과 인덱스 격자중 $j = n/4+1$, 즉 x축과 이루는 각도가 $\pi/2+(2\pi/n)$ 인 선이 만나는 점과, 주격자중 $i = n/4-1$, 즉 x축과 이루는 각도가 $\pi/2-(2\pi/n)$인 선과 인덱스 격자의 수직선이 만나는 점을 이용하여, 이들 점들을 원주상에 갖는 원의 지름과 중심의 좌표를 구할 수 있다.

제 1 프린지 (fringe)원 (지름이 가장 큰 프린지원) 의 지름:

$$D_1 = \frac{\delta x}{\cos(\pi/2 - \frac{2\pi}{n})} \tag{5}$$

제 2 프린지원 (지름이 두 번째로 큰 프린지원) 의 지름:

$$D_2 = \frac{\delta x}{\cos(\pi/2 - \frac{2\pi}{n}\cdot 2)} \tag{6}$$

제 1 프린지원의 중심좌표:

$$C_1 = (\frac{\delta x}{2},\ \frac{\delta x}{2}\tan(\frac{\pi}{2} - \frac{2\pi}{n})) \tag{7}$$

제 2 프린지원의 중심좌표:

$$C_2 = (\frac{\delta x}{2},\ \frac{\delta x}{2}\tan(\frac{\pi}{2} - \frac{2\pi}{n}\cdot 2)) \tag{8}$$

중심의 좌표와 위의 직경을 이용하여 x 축으로부터 가장 멀리 있는 원주상의 점의 좌표를 계산하면 위의 2개의 프린지원에 대하여 각각 다음과 같다.

$$A_1 = (\frac{\delta x}{2},\ \frac{\delta x}{2}\{\frac{\sin(\frac{\pi}{2} - \frac{2\pi}{n}) + 1}{\cos(\frac{\pi}{2} - \frac{2\pi}{n})}\}) \tag{9}$$

$$A_2 = (\frac{\delta x}{2},\ \frac{\delta x}{2}\{\frac{\sin(\frac{\pi}{2} - \frac{2\pi}{n}\cdot 2) + 1}{\cos(\frac{\pi}{2} - \frac{2\pi}{n}\cdot 2)}\}) \tag{10}$$

이들로부터 프린지의 최대 이동거리를 계산할 수 있다.

$$d_{A_1A_2} = A_{1,\,y} - A_{2,\,y} = \frac{\delta x}{2}\frac{1}{\sin\frac{2\pi}{n}} \tag{11}$$

이와 같은 계산으로 간섭무늬의 위치와 이동거리를 계산할 수 있으며, 코드디스크의 제작시에 설계기준이 된다. 위의 계산은 격자를 선폭이 없는 이상적인 경우로 가정한 것인데, 실제의 격자는 일정한 선폭을 갖게 되므로, 선폭과 간격폭에 따라서 간섭무늬의 밝기가 변화한다.

3. 신호처리기법

선형격자가 일으키는 간섭무늬는 격자판의 이동에 따라 선형적으로 이동하는데 반해, 반경방향의 격자가 일으키는 간섭무늬는 주격자판의 회전에 따라서 원형으로 퍼져나간다. 따라서 이와 같이 비선형적으로 이동하는 간섭무늬의 위치를 감지하기 위하여 비선형적인 신호처리기법이 필요하다. 여러 가지 방법이 있으나 본 논문에서는 최근에 많이 이용되는 신경회로망 기법을 이용하고자 한다. 신경회로망은 일반적으로 비선형 시스템을 학습시킬 수 있는 것으로 알려져 있다.[19]

본 연구에서 사용하게 될 인공신경망은 다층 퍼셉트론으로 Fig. 6과 같다. 이 그림은 1개의 입력층, 1개의 은닉층, 1개의 출력층을 갖는 인공신경망이다. 입력층과 은닉층 사이에는 연결강도를 표시하는 가중치가 있으며, 입력층과 은닉층 사이, 은닉층과 출력층 사이에 가중치 벡터가 있다. 이들의 값은 학습과정을 거쳐서 가장 최적의 값을 갖도록 결정된다. 또한 각각의 활성함수에는 바이어스가 있다. 사용한 활성함수는 은닉층에는 로그시그모이드 (logsigmoid) 함수를 사용하며, 출력층에는 탄시그모이드 (tansigmoid) 함수를 사용한다. 로그시그모이드 함수는

$$f(\cdot) = \frac{1}{1 + e^{-(\cdot)}} \tag{12}$$

으로 표시되며, 탄시그모이드 함수는

$$f(\cdot) = \tanh(\cdot) = \frac{e^{(\cdot)} - e^{(\cdot)}}{e^{(\cdot)} + e^{-(\cdot)}} \tag{13}$$

으로 표시된다. 로그시그모이드 함수는 신경세포에 주어지는 입력이 $-\infty$에서 $+\infty$로 주어질 때 0 과 1 사이의 값이 주어진다. 반면에 탄시그모이드 함수는 -1에서 +1 사이의 값이 주어진다. 이들 함수에 주어지는 바이어스는 학습시에 더욱 많은 자유도를 준다. 즉 바이어스를 줌으로써 역전파 학습방법이 더욱 좋은 결과를 주거나 필요한 학습 횟수를 감소시켜 줄 수 있다. 여기에 사용되는 함수는 모두 단조 증가 함수들이며 또한 미분 가능한 함수들이다. 따라서 이들 함수를 사용한 인공신경망은 학습시에 교착상태에 빠지게 하는 오차 최소값들 (error minima)을 발생시키지 않는다. 은닉층의 개수와 각 층의 노드의 개수가 많으면 더욱 복잡한 형태의 함수를 학습시킬 수 있으나, 반드시 더욱 좋은 결과를 얻을 수 있는 것은 아니며, 계산시간이 많이 걸리는 문제가 있다. 따라서 본 연구에서는 실험적으로 이들을 결정하였다.

본 신경망의 학습 방법은 오차 역 전파 방법(Error Back Propagation)을 사용한다. 이 방법은 스티피스트 디센트 (Steepest descent) 방법으로서, 출력의 자승 오차 합을 최

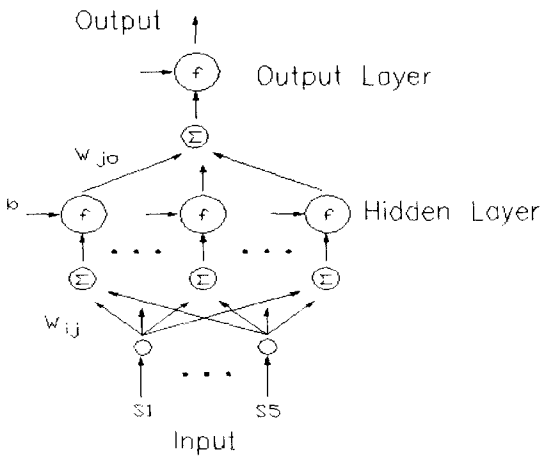

Fig. 6 Neural network for fringe processing

소화 하도록 가중치와 바이어스를 조정한다. 학습 중에 가중치와 바이어스의 변화량은 각 값들이 망의 자승오차합에 미치는 효과에 비례한다. 학습된 역전파 인공신경망은 학습 당시에 주어지지 않았던 입력에 대해서도 합리적인 답을 준다. 즉 새로운 입력에 대한 답은 이와 비슷한 학습 당시에 주어졌던 입력에 대한 정확한 값에 근사한 답을 준다. 이런 일반화 성질이 입력/출력의 대표적인 값에 대하여 학습시킨 후, 학습당시에 주어지지 않았던 새로운 입력에 대한 값을 얻는 것이 가능하도록 한다. 인공신경망을 역전파 방법으로 학습시키면 가중치와 바이어스 값들이 전역 최소값 (global minimum) 또는 국부 최소값 (local minimum)을 갖도록 한다.

앞에서 언급한 신경회로망을 이용하여 간섭무늬의 위치를 결정하기 위하여 간섭무늬로부터 입력 데이타를 얻도록 한다. 일반적인 증분식 또는 기존의 절대식 엔코더에서는 Fig. 1에서처럼 발광소자와 수광소자를 코드디스크 앞뒤로 배치하고 광량을 감지하도록 하고 있다. 본 논문에서도 가장 외곽의 간섭무늬가 이동하는 구간에 발광소자와 수광소자가 일정한 간격으로 배치되어 있는 것으로 가정하고, 수광소자로부터 얻은 광량을 신경회로망의 입력 데이타로 사용한다.

4. 실 험

4.1 실험장치

본 논문에서 제안된 방법의 타당성을 검증하기 위하여

Fig. 7 Experimental setup

실험장치를 Fig. 7과 같이 구성하였다. 실험장치는 코드디스크, 인덱스 디스크, 회전 스테이지, CCD 카메라로 구성되었다. 정밀한 반경방향의 격자는 광학적인 기술을 이용하여 전문적으로 제작하여야 하므로 비용이 많이 든다. 따라서 본 연구에서는 일반적인 반도체 소자 제작에 사용되는 스크린 인쇄방식을 사용하여 유리판에 제작하였다. 실험에 사용된 격자와 센서의 사양은 Table 1과 같다. 데이터 획득은 자연광 상태에서 CCD 카메라를 이용하여 Fig. 9와 같은 간섭무늬의 영상을 얻도록 하였으며, 이 영상으로부터 원형으로 표시된 부분의 평균밝기를 수광소자가 받은 광량으로 간주하였다.

실험에 사용될 디스크를 제작하기 위하여 먼저 반경방향의 격자를 CAD 프로그램을 이용하여 정밀하게 그렸다. 디스크의 격자부분의 크기는 내경 40mm, 외경 80mm인 원, 격자의 개수는 1회전당 360개로 하였다. 즉 격자선의 간격이 0.5도이며, 격자 간의 간격이 0.5도로 하였다. 이 도면을 이용하여 필름을 제작하고, 필름을 스크린에 놓고 감광시켜서 스크린에 패턴을 만든다. 스크린은 메쉬가 ST325이며 크기는 320x320mm^2 이다. 제작된 스크린을 유리판 위에 놓고 흑색 페이스트 (paste)를 스크린 위에 묻혀서 인쇄를 한다. 유리판과 스크린 사이에 약 1mm 정도의 적당한 간격을 유지하고, 페이스트의

Table 1 Radial disk specifications for the experiment

Grating pitch	$2\pi/360$ (rad)
Grating thickness	$2\pi/720$ (rad)
Sensor size	ϕ 20 pixel
Sensor location	Vertical to offset direction
Disk offset	1.0mm

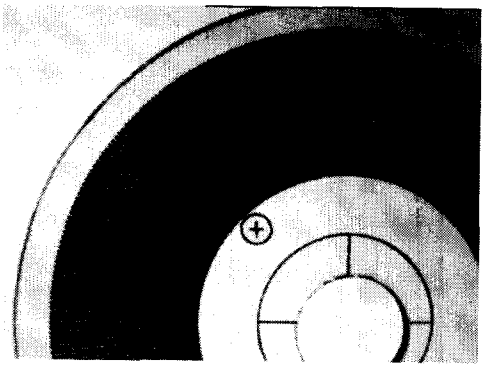

Fig. 8 Fabricated grating (partial view)

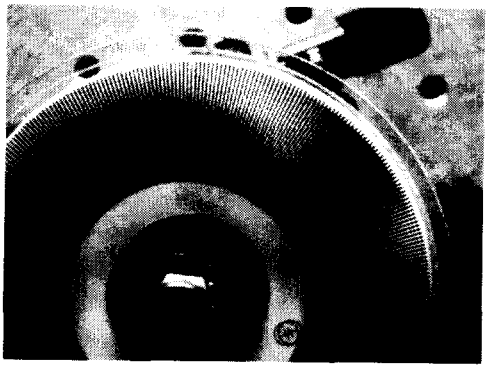

Fig. 9 Fringe from radial grating and pick-up sensors (Radial angle)

점도를 적절히 조정하여야 한다. 인쇄가 끝난 유리판을 페이스트가 건조되고 밀착되도록 건조로내에서 건조시킨다. 건조시간은 약 10분 정도이며, 온도는 600도로 한다. 온도를 급격히 가열시키면 유리가 파손되므로 10분정도에 걸쳐서 서서히 가열시킨 후 서서히 냉각시킨다. 이와 같이 하여 Fig. 8에서 보는 바와 같이 반경방향 격자가 제작되었다.

격자가 그려진 디스크를 광학실험에 사용되는 회전 스테이지 (Newport 481-A)에 장착하고, 마이크로미터를 이용하여 정밀하게 회전시킨다. 인덱스 디스크도 앞에서 언급한 것과 동일하게 제작하여 회전하는 디스크위에 설치고 움직이지 않도록 고정한다. 이들이 만들어 내는 간섭무늬를 CCD 카메라를 이용하여 획득한다. CCD 카메라에 간섭무늬를 확대하여 획득할 수 있도록 접사링을 끼웠다. 격자간의 회전각도가 0도일 때 획득한 간섭무늬가 Fig. 9와 같다. 이 그림에는 간섭무늬의 밝기를 픽업할 가상의 센서들의 위치를 같이 보였다.

4.2 회전각도 측정 실험

격자의 간격이 1도이므로 회전스테이지에 있는 마이크로 미터를 1/10도 간격으로 회전시키면서 CCD 카메라를 통하여 간섭무늬를 저장한다. 저장된 영상으로부터 앞의 Fig. 9에 보인 5개의 수광소자 위치에서 간섭무늬의 평균 밝기를 계산하여 신경회로망의 입력으로 사용하고, 이에 해당하는 회전각도를 목표값으로 하여 신경회로망을 학습시킨다. Fig. 9의 수광소자 위치에서 얻은 데이터를 Fig. 10에 보였다.

Fig. 11에는 회전각도 0.02도 간격으로 0.1도까지 회전시켰을 때 얻은 픽업 데이터이다. 이 그림을 보면 모든 수광소자에서 얻은 데이타가 일관성 있게 변화되는 것을 볼 수 있다. 이로부터 세밀한 회전을 측정할 수 있음을 알 수 있다.

4.3 실험결과 및 토의

앞에서 얻은 센서 출력에 따른 회전각도를 구하기 위하여 앞에서 언급한 신경회로망을 이용하였다. 여기에서 은닉층에는 로그시그모이드 함수를 활성함수로 사용한 7개의

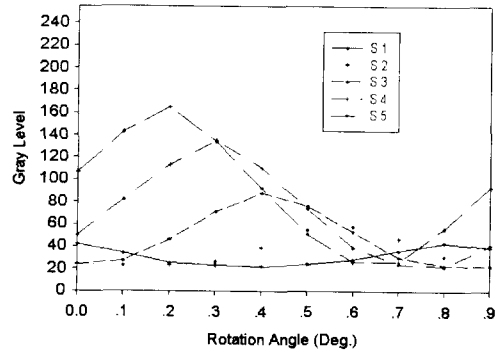

Fig. 10 Pick-up sensor data

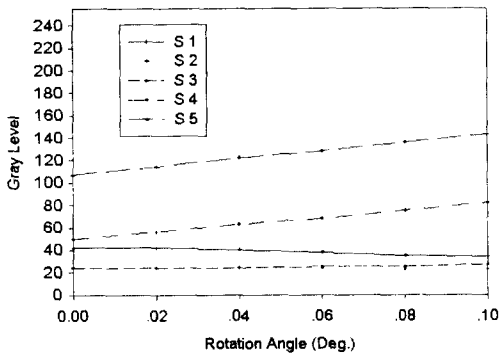

Fig. 11 Pick-up sensor data for precise rotation

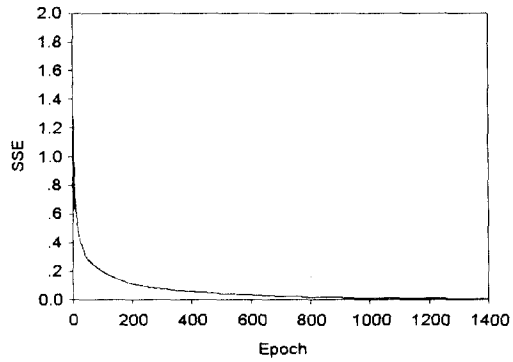

Fig. 14 Error trends with learning (S3-S5)

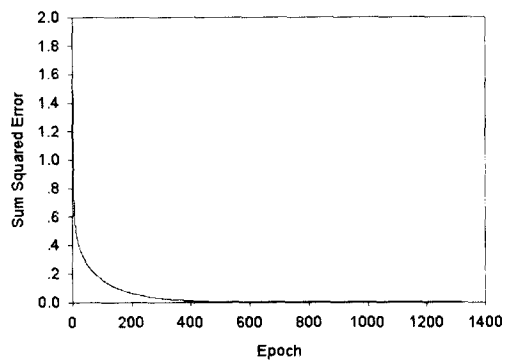

Fig. 12 Error trends with learning (S1-S5)

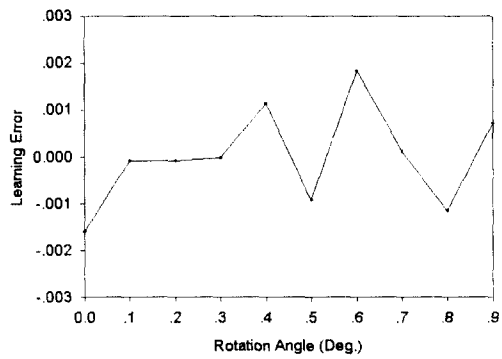

Fig. 15 Error between Target and Output data (S3-S5)

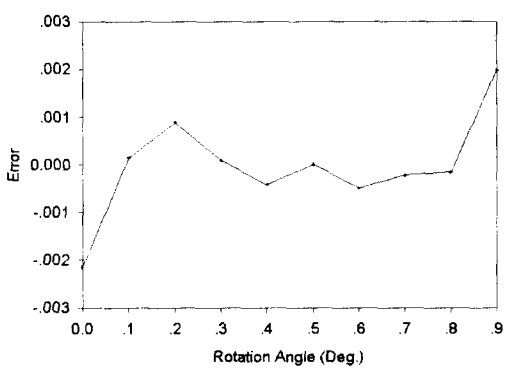

Fig. 13 Error between Target and Output data (S1-S5)

노드를 사용하고, 출력층에는 탄시그모이드 함수를 활성함수로 사용한 1개의 노드를 갖도록 하였다. Fig. 12는 이런 신경회로망이 앞의 5개의 센서에서 얻은 픽업값을 이용하여 학습하는 과정에서 보인 학습오차의 경향이다. 데이터의 수가 10세트이므로 매우 빨리 수렴하였다. 최종오차가 Fig. 13에서 볼 수 있는 것처럼 0.002도 이내의 오차로 학습이 되었다. 또한 Fig. 14, 15에서는 5개의 센서중에서 민감도가 높은 S3, S4, S5 등 3개의 센서에서 얻은 값을 이용하여 학습한 결과를 보여주고 있다. 이 경우에도 역시 학습오차가 5개의 센서를 사용한 경우와 같은 결과를 주고 있다. 이와 같이 코드디스크의 외곽부분에 있는 간섭무늬를 사용함으로써 격자부분을 작게 할 수 있으며, 또한 이와 같은 신경회로망이 간섭무늬의 위치에 따른 회전각도를 2% 이내의 정확성을 갖고 계산할 수 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

절대위치 방식 엔코더의 분해능을 향상시키기 위하여, 반경방향 격자를 사용하여 간섭무늬를 발생시키고, 이를

신경회로망을 이용하여 처리함으로써 제안된 방법의 적용 가능성을 확인하였다. 제안된 신경회로망은 격자 간격의 1/10의 각도를 실용적인 오차범위 이내로 계산했으며, 학습속도도 실용적인 반복회수 이내이다.

향후에 광학계통을 실용적인 소자를 사용하고, 신경회로망을 상용화 할 수 있는 기술을 개발하면 분해능이 높으며, 소형인 센서가 제작될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

(1) G. Avolio, "Selecting encoders for industrial environments", Powerconversion and Intelligent motion, Vol.12, No.9, pp. 42~44, Sept. 1986.

(2) J. T. M. Stevenson and J. R. Jordan, "Absolute position measurement using optical detection of coded patterns", J. of Phys. E:Scie. Instrum. 21, 1988, 1140~1145.

(3) J. S. Johnston, M. S. Beales and, K. M. Wells, "Light-in light-out fiber optic digital position encoder based on scales with pseudo-random codes", Optical Engineering, Aug. 1992, Vol.31, No.8, 1643~1645.

(4) Patent, US 713718, "Absolute optical position encoder-uses data track with multiplicity of windows through which light is detected by data photodetector to provide absolute position of shaft".

(5) Patent, DE 401396, "Optical absolute encoder for measuring angular increments -use image information mask cooperating with CCD sensor or LED array".

(6) K. Kimura and M. Minami, "Single track absolute encoder using charge coupled image sensor", 13th Congress of the Int. Commision for Optics, Optics in Modern Science and Technology, Sapporo, Japan, Aug. 20~24, 1984.

(7) Patent, US 165714, "Encoding system for determining absolute and incremental position - has narrow light beams from stationary member received at timing and encoding band on movable member".

(8) Patent, US 849574, "Absolute encoder for linear or angular position measurements - has grid patterns with optical patterns forming repeated areas of transparent and non-transparent portions".

(9) E. D. Park and E. Gat, "Wavelength division multiplexed fiber optic absolute position encoder", Proce. of the SPIE, Fiber optic and Laser sensor VI, Vol.985, pp. 130~135, Sept. 6~7, 1988.

(10) M. C. Hutley, R. F. Stevens and D. E. Putland, "Wavelength encoded optical fiber sensors", Sensor review, Vol.5, no.2, Apr. 1985, pp. 64~68.

(11) T. Ueda, F. Kohsaka and T. Iino, "Optical absolute encoder using spatial filter", Proce. of the SPIE, Vol.814, Pt.1, Int. Conf. on Photomechanics and Speckle Metrology, Aug. 17-20, 1987, pp. 217~221.

(12) F. Kohsaka, T. Iino, K. Kazami, H. Nakayama and T. Ueda, "Multi-turn absolute encoder using spatial filter", JSME Int. Journal, Series 3, No.1, Mar. 1990, pp. 94~99.

(13) K. Takasu, "Laser rotary encoders offer small size and improved shaft loading", Powerconversion and Intelligent Motion, Vol.14, No.11, Nov., 1988, pp. 60~62.

(14) D. H. Breslow, "Smart absolute shaft encoders", Sensors, Vol.6, No.4, Apr. 1989, pp. 42~52, ITEK.

(15) A. L. Whitwell, "Moire techniques ensure unerring positional control", Design Engneering, Nov., 45~48, 1973.

(16) A. T. Ahepherd, "25 years of moire fringe measurement", *Precision Engineering* 1, pp. 61~69, 1979.

(17) 전병욱, 4점 모아레법을 이용한 레이저 엔코더의 개발에 관한 연구, 석사학위논문, 한양대학교 정밀기계공학과, 1992. 6.

(18) O. Kafri and I. Glatt, The Physics of Moire Metrology, Wiley, NewYork, 1990.

(19) J. A. Freeman and D. M. Skapura, Neural Networks Algorithms, Applications, and Programming Techniques, Addison-Wesley Publ. Co., 1992.