

신경회로망의 광학적 구현

Optical Implementation of Neural Networks

김홍만, 정재우

한국전자통신연구소

신경회로망은 두뇌의 신경조직이 갖는 병렬적이며 분산적인 정보처리 능력을 흉내낸 인공적인 회로망이다. 이러한 신경회로망을 영상인식, 음성인식, 적응제어 및 최적화등에 응용할 경우 지금까지 얻지 못하였던 우수한 여러가지 특성을 얻을 수 있음이 알려짐에 따라 신경회로망을 구체적으로 구현하고자 하는 연구가 활발히 이루어지고 있다. 본 고에서는 신경소자간의 연결세기의 변조에 의한 학습 원리를 설명하고 광전기적인 구현방법에 대해서 몇 개의 예를 들어 설명하고 그 발전 가능성에 대하여 기술하였다.

1. 서론

사람의 뇌는 대략 $10^{10} - 10^{11}$ 개의 신경세포로 구성되어 있으며 각각은 $10^3 - 10^4$ 개의 다른 신경세포와 연결되어 있어 $10^{13} - 10^{14}$ 개의 연결갯수를 가진 것으로 알려져 있다. 이러한 수많은 신경세포간 연결부위에 정보가 분산 저장(distributed memory)되어 있으며 또한 병렬적으로 정보처리가 이루어져서 현재의 컴퓨터로는 수행할 수 없는 여러가지 분야, 특히 인식분야, 종합적이고 실시간적인 판단이 요구되는 분야 등에서 탁월한 정보처리능력을 가지게 된 것으로 믿어지고 있다.

이러한 사람 두뇌의 신경망 구조와 기능을 모방한 인공적인 신경회로망을 구현하고자하는 시도가 활발히 진행되고 있다. 1982년 Caltech의 Hopfield는 인간 두뇌의 연상기억처리 방식을 본따서 신경회로 모델(neural network model)을 제안하고 신경회로망을 애널로그 전자회로로 대체하고 하드웨어화 하는 가능성을 보였다.⁽¹⁾ Hopfield의 제안 이후

많은 연구자들에 의한 신경회로망의 하드웨어적인 구현 노력이 구체적으로 제시되고 있다. 이미 상당한 수준에 이른 반도체 기술에 힘입어 VLSI 칩에 수 백개의 신경들을 상호 연결하여 신경회로망을 실현하려는 연구가 AT&T Bell Lab.,⁽²⁾ Hitachi 연구소,⁽³⁾ 등의 많은 연구소에서 진행되고 있다. 최근까지의 연구 현황으로 볼 때 약 10^3 개 정도의 신경소자를 갖는 신경회로망 구성이 1 개의 VLSI 칩내에 가능할 것으로 보이나 인간의 뇌가 갖고 있는 neuron의 갯수인 10^{11} 개에 비하면 아직은 신경회로망의 인공적인 구현에 대한 그 가능성만을 제시하고 있는 셈이다.

한편 VLSI에 의한 신경소자간 연결이 2차원적인 구조를 갖는 반면 3차원적인 연결이 가능한 광학기술을 이용하면 그 잠재성은 매우 클 뿐만 아니라 광학이 가지는 massive interconnectivity, parallelism, analog nature는 신경회로망의 하드웨어화에 필요한 요구와 잘 부합할 뿐 아니라 광파(optical wave)는 매질안을 제외하고는 서로 상호 작용을 하지 않으므로 이러한 특성들을 살려 신경회로 모델을 광학적으로 구현하고자 하는 연구가 각광을 받고 있다.

본 고에서는 이러한 광의 특성을 살리면서 기존의 전자 기술과 상호 보완적으로 사용이 가능한 광전기적인 방법의 신경회로망 구현 방법에 대해서 설명하고 앞으로의 연구방향에 대해서 토의하였다.

2. Neuron의 공학적 모델 및 학습원리

그림 1(a)는 신경세포 한개의 구조를 나타낸 것이다. 신경세포는 다른 신경세포로부터 시냅스(synapse) 연결을 통하여 정보를 받아들이는 여러개로 분기된 수상돌기(dendrites)와 다른 신경세포에 정보를 전달하는 통로인 축색돌기(axon) 및 세포체로 구성되어 있다. 다른 신경세포들로부터 자극이 주어지면 수상돌기의 시냅스 결합강도에 따라 각각 다른 가중치를 갖고 세포체로 전달 되며 전달되는 자극의 크기가 일정한 값(문턱치)을 넘어서면 이 신경세포는 다시 다른 세포들에 축색돌기를 통하여 자극을 전달한다.

그림 1(b)는 이러한 신경세포의 정보전달 체계에 관한 McCulloch-Pitts의 개념을 도식적으로 보여주고 있으며 그림 1(c)는 이러한 개념을 보다 공학적으로 표현한 것이다. 입력신호를 U_i , 시냅스 결합강도를 W_{ij} 라 할 때 neuron으로부터 출력되는 값 V_j 는 $\sum U_i W_{ij}$ 의 함수로 나타내어진다.

$$V_j = S(\sum U_i W_{ij} - \theta_j), \quad (1)$$

여기서 θ_j 는 j 번째 neuron 의 문턱치(threshold value)를 나타내며 $S()$ 는 j 번째 neuron의 입출력 관계를 나타내는 함수이다.

신경회로망에서의 학습은 크게 자율학습과 지도학습으로 구분되며 주로 신경소자간 연결세기 W_{ij} 를 조정하므로써 이루어진다. 여기서는 지도학습 방법 중 이미 잘알려져 있는 델타룰(delta rule)에 대해서 살펴 보기로 한다. 임의의 W_{ij}

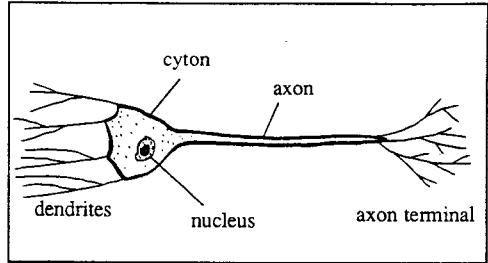


그림 1(a) Neuron 의 구조

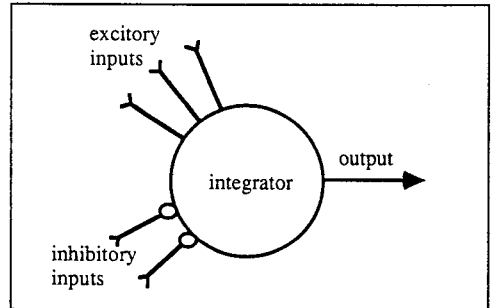


그림 1(b) McCulloch-Pitts의 neuron 모형

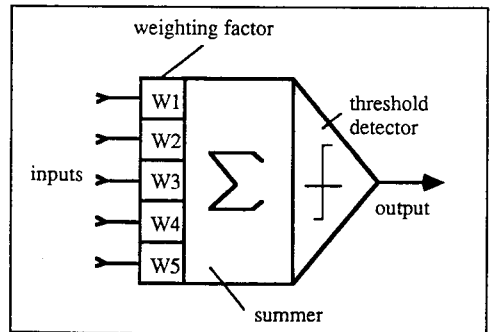


그림 1(c) Neuron의 공학적 모델

에 대한 출력값 V_j 와 원하는 출력값 V_j' 가 서로 같지 않을 때 연결세기 W_{ij} 는 다음의 규칙에 따라서 조정된다.(4)

$$\Delta W_{ij} = \eta(V_j' - V_j)U_i, \quad (2)$$

여기서 η 는 학습속도를 나타내는 비례상수이다. 이러한 델타 룰은 여러가지 변형된 형태로 사용되어지기도 한다. 다층신

경회로망에 대한 학습에서는 이러한 델타를 보다 일반화한 오류역전파 학습방법(4) (error back propagation learning method)이 대표적으로 알려져 있다.

지금까지 살펴본 신경회로망의 원리를 실제의 광학 부품을 사용하여 구현하기 위해서는 입력력 U_i 및 V_j 를 나타내기 위한 광원 및 광검출기가 필요하며 시냅스 연결세기 W_{ij} 정보를 저장하고 표시하기 위한 광기억소자 및 신경소자의 입출력 관계를 나타내는 함수 $S(\cdot)$ 의 표현을 위한 광논리소자 혹은 비선형 광소자가 필요하다. 한편 광학적 학습을 구현하기 위해서는 출력신호의 궤환이 이루어져야하며 시냅스 연결세기 W_{ij} 의 조정이 가능하여야 한다. 또한 광학적인 신호 궤환시 일어나는 광손실을 보상하기 위한 광증폭이 함께 이루어져야 한다. 이러한 신경회로망의 광학적 구현시 필요한 요구 조건들이 실제로 어떻게 이루어지는지를 다음 절에서 몇 개의 예를 들어 설명하고자 한다.

3. 신경회로망의 광학적 구현에

1985년 Psaltis등은 Hopfield 모델에 근거한 연상기억 시스템을 최초로 광전기적인 방법으로 실현하였다.(5) 그림 2는 Psaltis등이 구현한 시스템 구성을 나타내고 있다. 각 neuron의 흥분 상태는 일렬로 나열한 LED의 점멸 상태에 대응한다. 시냅스 결합세기 W_{ij} 는 광의 투과도가 1 혹은 0인 마스크에 기록되어 있다. LED에서 나온 빛은 마스크를 통과하여 수광소자 어레이에 도달하는 동안 행렬-벡터 곱셈이 이루어지도록 되어 있다. 수광소자 어레이에 검출된 출력 벡터 값은 전기적으로 문턱치화되어 1 혹은 0의 값으로 다시 LED 점멸을 위하여 궤환된다. 이러한 행렬-벡터 곱셈방식에 의한 광신경회로망은 초기에는 원통형 렌즈 등의 bulk optics를 사용하여 광학테이블 상에서 구현되었으나 1989년 Mitsubishi 연구소의 Ohta 등은 GaAs 기판을 사용하여 광전기적으로 LED 어레이, PD 어레이 및 시냅스 결합세기 마스크

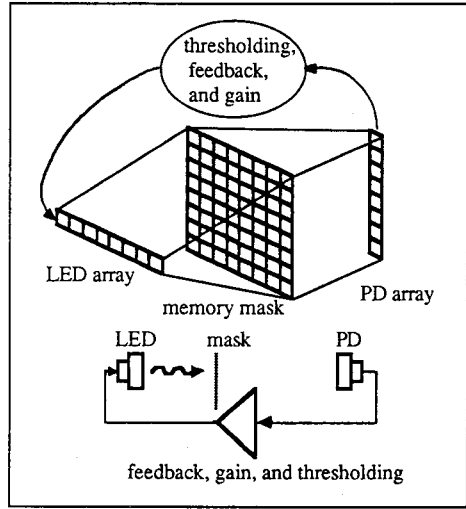


그림 2. Hopfield 모델의 광학적 구현예

W_{ij} 를 표현하기 위한 Cr/Au 마스크를 사용하여 32×32 개의 고정된 값의 시냅스 연결이 가능한 $7.6 \text{ mm} \times 7.6 \text{ mm}$ 크기의 광신경회로 칩을 개발하였다(6)(그림 3). 그러나 이러한 광신경회로 칩은 고정된 시냅스 연결세기만을 나타낼 수 있었으므로 학습이 불가능하며, 띠 모양의 넓은 면적의 LED 및 PD 구조를 가지므로 반응속도도 비교적 느려 약 1 usec의 처리속도를 지니고 있었다. Ohta 등은 초기의 이러한 광신경회로 칩이 갖는 단점을 보완하여 학습이 가능한 광신경회로 칩을 1991년 발표하였다.(7) 이들은 그림 4에서 보인 MSM (metal-semiconductor-metal) 구조를 갖는 2차원적인 PD

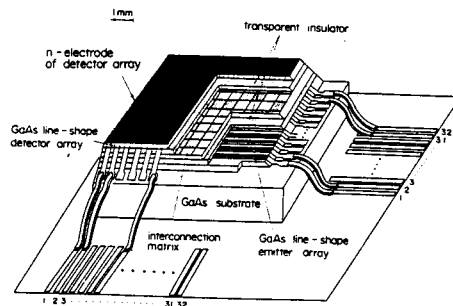


그림 3. 고정된 시냅스 연결세기를 갖는 32×32 광신경회로칩

어레이의 각각에 가해지는 bias 전압을 조정함으로써 수광각도의 차이를 유도하고 이를 이용하여 시냅스 연결세기를 나타내고 조정할 수 있도록 하였다. 제작된 8 x 8 시냅스 연결갯수를 갖는 광신경회로칩은 반응속도의 개선도 함께 이루어져 초당 640만개의 광연결이 가능한 것으로 보고되고 있다. 그러나 이러한 구조의 광전기적 집적회로에 의한 신경회로칩은 각각의 시냅스 연결세기에 해당하는 값을 전기적으로 각각의 MSM-PD에 bias 전압으로 가해줘야 하므로 어레이 크기가 증가될 경우 전기적인 배선에 의한 한계에 부딪칠 것이 예상되어지므로 근본적으로 VLSI 기술을 이용한 신경회로칩의 수준을 크게 벗어나지 못할 것으로 예측된다.

한편 광기록 특성을 가진 매질을 이용하여 시냅스 연결세기 매트릭스를 광학적으로 기록하고 그내용을 변조함으로써 신경회로망의 광학적 학습에 이용하는 연구가 시도되었다. (8) 그림 5는 비정질 As_2S_3 박막이 갖는 가역적인 광유도 비등방성을 이용하여 시냅스 연결세기 매트릭스를 Ar-ion 레이저로 기록하고, He-Ne 레이저 광원을 이용하여 매트릭스

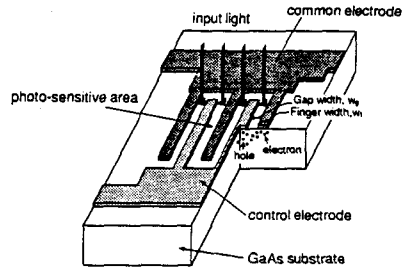


그림 4. 시냅스 연결세기의 조정을 위한 MPM (metal-semiconductor-metal) PD 구조

-벡터 곱셈이 이루어 지도록 한 장치 구성도이다. 광검출기 어레이로 검출된 출력 벡터의 값으로 부터 식(2)의 학습 규칙에 따라 시냅스 매트릭스 값의 수정이 이루어지도록 되어 있다. 이러한 평면형 광기록 매질을 이용하는 다른 예로써 Psaltis 등은 이미 상품화 되어 있는 광자기 디스크를 이용하는 방법을 제시하고 병렬적으로 기록된 정보를 읽는 것이 가능함을 보였다. (9) 그러나 이러한 평면적인 광기록 매질을 이용하는 경우 연결세기 매트릭스를 나타내기 위한 전기

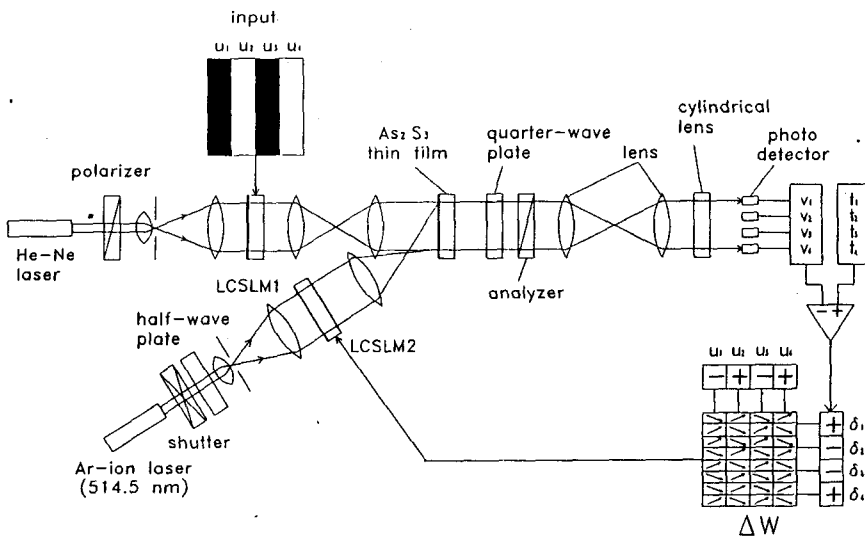


그림 5. 비정질 As_2S_3 박막을 시냅스 연결세기 매트릭스 기록 매질로 이용한 신경회로망의 광학적 학습 장치 구성.

적인 배선의 필요성이 없으므로 매우 유리하지만 평면적인 광기록 밀도에 의한 매트릭스 용량의 제한을 받는 단점이 있으며 기존의 개별 광소자에 의한 순차적인 입출력을 탈피하여 고속 병렬 신호 입출력이 가능한 어레이 광원 및 병렬적인 편광특성 변조 기술이 현실적으로 요구되고 있다. 이러한 광전기적인 신경회로망 구현 방법은 주로 신경 소자간 다중 연결을 광이 담당하고 비선형 논리처리 등의 기능을 전자가 담당하는 형태를 취하고 있다. 그러나 최근에는 광학적으로 병렬 논리처리가 가능한 광소자 기술도 발전하고 있어 (10), (11) 광기술의 적용 범위가 점차 확대 되어갈 것으로 기대 되어진다. 한편 이러한 광전기적인 방법의 신경회로망의 구현 외에도 체적홀로그래프를 고밀도 광기록 매질, 위상 공액거울 혹은 광중폭 소자로 사용한 all optical implementation을 지향하는 많은 연구가 활발히 발표되고 있다. (12)-(14) 이러한 all optical 구현 방법은 아직은 집적화 측면에서 불리하며 시스템의 안정성등 여러가지 측면에서 개선이 요구되고 있지만 광의 장점을 최대한 이용하여 전자 기술이 쉽게 가질 수 없는 여러가지 장점을 내포하므로 앞으로의 지속적인 발전이 기대된다.

4. 결론

인간의 두뇌가 갖는 우수한 정보처리 기능을 모방하여 이를 구현하려는 시도는 현재 비록 그 규모면이나 기능적인 면으로 볼때 매우 초보적인 단계에 있지만 기술 발전 가능성이 매우 크며, 광범위한 응용 분야에 급속히 적용될 수 있을 것으로 기대된다. 특히 광학 기술이 고유하게 지니는 병렬처리 특성과 신경소자간의 대규모 병렬 광연결의 가능성은 신경회로망의 구현에 요구되는 여러가지 성질과 잘 부합하므로 앞으로 신경회로망 구현에 광기술의 보다 많은 적용이 예상되어지고 있다. 단기적으로는 현재의 발달된 전자기술과 상

호 보완적으로 사용이 가능한 광전집적 기술에 의한 실현이 보다 유리할 것으로 보이며 장기적으로는 광학 고유의 가능성을 최대한 발휘할 수 있는 all optical implementation 방향으로 나아갈 것으로 생각되어 진다. 그러나 지금부터 해결해야 할 연구과제도 매우 많이 남아 있다. 특히 병렬광변조 및 논리처리용 광소자의 개발이 절실히 요구되고 있으며 여러가지 광학기술에 적합한 학습방식 및 응용 기술의 개발이 아울러 필요한 것으로 생각된다.

<참고문헌>

- (1) J.J.Hopfield, Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 79, 2554 (1982).
- (2) H.P.Graf & D.Henderson, Proc. IEEE Int. Sol. Sta. Cir. Conf. 144 (1990).
- (3) M.Yasunaga et al, Proc. Int. Conf. Neural Networks, 527 (1990).
- (4) D.Rumelhart Ed., Parallel Distributed Processing, MIT Press, 322 (1987).
- (5) N.H.Farhat et al, Appl. Opt. 24, 1469 (1985).
- (6) J.Ohta et al, Opt. Lett. 14, 844 (1989).
- (7) K.Kyuma et al, Proc. Opt. Comp. 291 (1991).
- (8) 김홍만의, 제5회 파동 및 레이저 학술발표회, 215(1990).
- (9) A.Yamamura et al, Proc. Opt. Comp. 152, (1992).
- (10) K.Matsuda et al, Proc. Phot. Swt. (1990).
- (11) G.R.Olbright et al, Proc. Phot. Swt. (1990).
- (12) E.G.Paek et al, Opt. Comp. 237 (1990).
- (13) J.S.Jang et al, Proc. Opt. Comp. 325 (1990).
- (14) B.H.Soffer et al, Opt. Lett. 11, 118 (1986).