상호연관 신경망에 기반을 둔 이동 검출을 위한 아날로그 집적회로

심 선 일 (沈 善 一), *김 용 태 (金 龍 泰), 박 정 호 (朴 廷 浩)
**Masahiro Ohtani, **Hiroo Yonezu,
고려대학교 전자공학과, *한국과학기술연구원(KIST),
**Toyohashi University of Tehcnology, Toyohashi
전화 : 02-958-5733 / 핸드폰 : 011-294-1589

Analog MOS circuits for motion detection based on correlation neural networks

Sun Il Shim, *Yong Tae Kim, Jung Ho Park
**Masahiro Ohtani, , and **Hiroo Yonezy
Department of Electornics Engineering, Korea University
E-mail : ytkim@kist.re.kr

Abstract

We propose simple analog MOS circuits producing the one-dimensional compact motion-sensing circuits. In the proposed circuit, the optical flow is computed by a number of local motion sensors which are based on biological motion detectors. Mimicking the structure of biological motion detectors made the circuit structure quite simple, compared with conventional velocity sensing circuits. Extensive simulation results by a simulation program of integrated circuit emphasis (SPICE) indicated that the proposed circuits could compute local velocities of a moving light spot and showed direction selectivity for the moving spot

Ⅰ. 서론

생물학적 신경 시스템은 시각이나 청력 같은 인지 시스템에서 컴퓨터에 비해 매우 우수한 장점들을 가지고 있다. 생물학적 신경시스템은 상호 연결된 뉴런으로 구성되어 있는데 이 구조는 디지털 컴퓨터의 신호처리 구조와 완전히 다르기 때문에 생물학적 모델을 디지털 컴퓨터로 실시간으로 동작시키는 것은 매우 어렵다. 그러므로 생물학적 모델의 기능을 실시간으로 처리하기 위해서는 이 모델을 표현하는 기본적인 회로의 설계와 네트워크를 LSI화하여 구성하는 것이 매우 중요하다.

여러 생물학적 신경 시스템의 모델 중에서 최근에 시각칩이 제안되고 제작되어왔다.[1-4] 신호 처리는 대부분 MOS 트랜지스터로 이루어진 아날로그 전자회로에 의해 수행되고 회로 구조는 보편적인 디지털 회로들과 비교해서 상당히 간단하다. 일반적으로 아날로그 회로는 정확도와 신뢰도가 소자의 불일치 때문에 떨어진다. 하지만 신경 시스템은 생물학적 뉴런의 정확도와 신뢰도가 떨어지더라도 많은 수의 상호 연결에 의해 확고하고 높은 결정력을 가지는 것을 가능하게 하므로 아날로그 회로의 불일치에 의한 단점을 보완할 수 있다.

이 논문에서는 생물학적 신경시스템의 모델링에 위한 접근에 기반을 두고 높은 공간적 해상도와 큰 fill factor를 가진 영리한 단위 셀의

실현을 목표로 지역적 움직임 검출을 위한 아날로그 MOS 회로를 제안한다. 이 제안된 단위 회로는 적은 수의 트랜지스터로 구성되어 있지만 넓은 속도 영역에 걸쳐 양방향의 움직임을 검출 할 수 있다.

II. 움직임 검출을 위한 상호 연관 신경망

그림 1(a)는 움직이는 물체에 대한 뉴런(neuron)의 속도 반응을 설명하기 위한 지역적 상호연관 방법을 보여준다. [5] 기본적인 상호연관 신경망은 두 개의 포토리셉터 (P_1, P_2)와 지연 뉴런 (D), 그리고 상관기 (C)로 구성되었고 그 응답은 그림 1의 (b), (c), (d)와 같다. 그림 1(c)와 같이 상관기는 지연 뉴런에서의 지연 시간(v_0)과 물체의 이동 시간이 일치할 때 최대의 출력을 얻게 되고 물체의 이동 시간이 늦을 때는 $v \rightarrow v_0$ 로 가까워짐에 따라 일정하게 크기가 증가하는 신호를 얻을 수 있다.

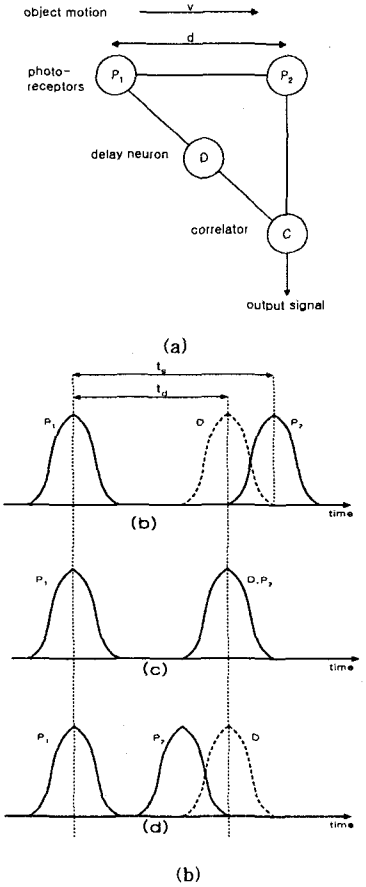


그림 1. (a) 기본적인 상관 신경망. 물체가 v의 속도로 P_1에서 P_2로 움직일 때의 뉴런의 응답 (b) $v < v_0$ (c) $v = v_0$ (d) $v > v_0$

물체가 반대 방향으로 움직일 때($P_2 \rightarrow P_1$), 이 기본 상호연관 네트워크로는 출력 신호를 얻을 수가 없다. 양방향의 움직임을 검출하기 위해 우리는 그림 2(a)와 같은 양방향 상호연관 네크워크를 제안한다. 그림 2(a)의 점선 안의 부분을 셀이라 부르자. 각각의 셀에서 포토리셉터는 세 개의 신호를 만들어 낸다. 이것들 중 하나는 같은 셀의 상관기로 들어가고 나머지 두 개는 각각 양쪽 두 개의 지연 뉴런으로 들어간다. 이 두 개의 지연 신호는 주위의 상관기로 플러스(positive) 연결과 마이너스(negative) 연결로 주어진다. 따라서 i번째 상관기의 출력은 지연신호 D_{i-1}과 D_{i+1}의 차이와 P_i의 결과물로 나타난다. 어느 방향으로 움직이느냐에 따라 i번째 셀의 상관기에 들어오는 D_{i-1}과 D_{i+1}의 신호가 서로 상관되어 다른 부호의 출력을 만들어 낼 수 있게 되는 것이다.

양방향 상호연관 네크워크에서 출력 신호의 부호는 그림 2(b)와 같이 움직이는 물체의 방향에 의존한다. 물체가 P_1에서 P_3로 움직일 때, C_2의 출력은 양이되고 P_3에서 P_1으로 움직일 때 C_2의 출력은 음이 되는 출력을 얻어낼 수 있다. 양방향 네트워크에서 상관기는 $v \leq |v_0|$ 일 때 $v \rightarrow v_0$ 로 갈수록 일정하게 출력 전류의 값이 증가하므로 그 값으로 속도를 알 수 있게 된다.

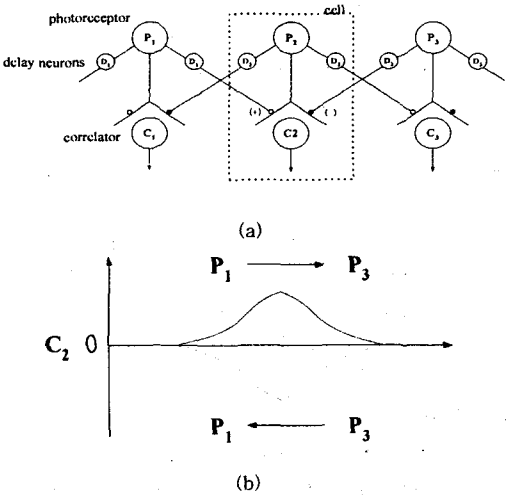


그림 2. (a) 양방향 상관 네트워크 (b) 움직이는 방향에 따른 출력

Ⅲ. 양방향 상호연관 네크워크의 속도 감지 회로

이 장에서 우리는 앞장에서 논의한 셀과 양방향 상호연관 네트워크에 대응하는 속도감지 회로와 (VSC) 속도감지 네트워크를 제안한다. 그림 3은 속도감지 네크워크의 제작을 위해 제안된 단위 셀의 아날로그 전자 회로이다. 이 회로는 그림 2.(a)에서 제안된 셀의 동작에 대응하는 동작을 하도록 설계된 MOS 트랜지스터와 커패시터로 이루어진 VSC이다. 이 VSC는 지연회로와 연산 트랜스컨덕턴스 증폭기(OTA) 두 블록으로 구성되어 있다.

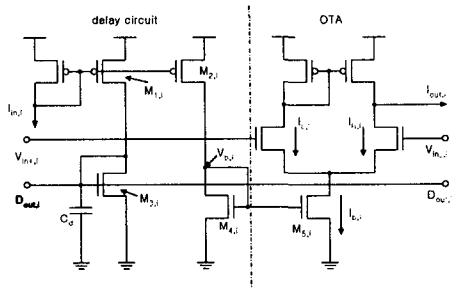


그림 3. 속도 감지 회로

입력 신호 $I_{in,i}$는 전류 거울에 의해 각각의 두 블록으로 복사된다. 지연 회로는 저대역 통과 필터 신호 $D_{out,i}$를 커패시터(C_d)를 통해 생성한다. OTA는 상관기로서 동작한다. 입력 포토전류 $I_{in,i}$가 i번째 VSC에 가해지면 $I_{in,i}$는 트랜지스터 $M_{1,i}$와 $M_{2,i}$로 복사되고 지연된 전압 $D_{out,i}$와 지연되지 않은 전압 $V_{b,i}$를 생성한다. OTA의 소스전류 $I_{b,i}$는 $M_{4,i}$와 $M_{5,i}$를 통해 지연되지 않은 전압에 의해 생성된다. i번째 단위셀의 OTA는 $D_{out,i-1}$과 $D_{out,i+1}$ 두 개의 신호를 인접한 단위셀의 지연회로로부터 터미널 $V_{in+,i}$와 $V_{in-,i}$를 통해 받고, 이 지연된 각각의 전압은 소스전류 $I_{b,i}$를 $I_{L,i}$와 $I_{R,i}$로 나눈다. 따라서 출력전류 $I_{out,i}$는 $I_{L,i} - I_{R,i}$로서 얻어지게 된다. 이상과 같은 OTA의 동작에서 알 수 있듯이 물체가 오른쪽으로 움직이면 $D_{out,i-1}$이 공급되어 $I_{out,i}$는 양수가 되고 왼쪽으로 움직이면 $D_{out,i+1}$이 공급되어 음의 값을 가지는 출력 전류 $I_{out,i}$를 얻을 수 있다.

그림 2와 같이 그림 3의 단위 셀들을 연결하면 움직임 검출을 위한 네크워크가 구성된다. 이 네크워크를 VSC 네트워크라 부르자. 그림 4는 일차원의 VSC 네트워크를 보여준다. 주변의 VSC들의 거리와 깊이를 각각 L_d와 L_v로 정의하였다. 각각의 출력 노드는 패스 트랜지스터로 구성하였다. 이 네크워크에서 물체가 오른쪽으로 움직이면 양의 값의 출력이 나오고 왼쪽으로 움직이면 음의 값의 출력이 나오므로 출력 $I_{out,i}$의 부호로써 방향을 알 수 있고 $|v| < v_0$ 일 때와 크기로써 움직이는 물체의 방향과 속도를 알 수 있다. 검출 가능한 최대 속도 v_0는 커패시터의 시상수가 커패시터 값이 감소할수록 증가하므로 커패시터 값을 줄임에 의해 증가한다.

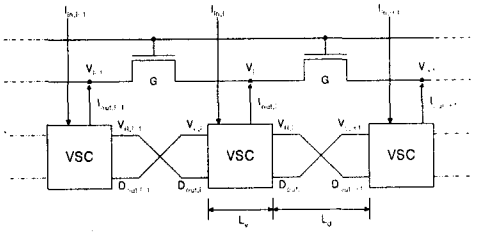


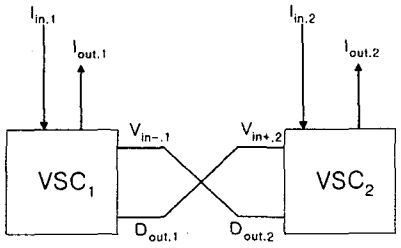
그림 4. 일차원 VSC 네트워크

Ⅳ. 상호 연관 신경망 검증

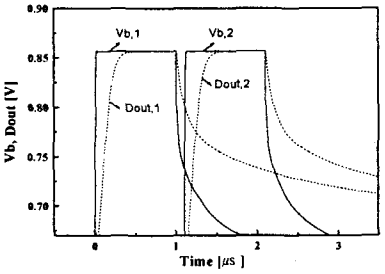
이 장에서 우리는 그림 3과 그림4에서 보인 VSC와 VSC 네트워크를 위한 SPICE 시뮬레이션을 수행하였다. 이 시뮬레이션에서 우리는 트랜지스터를 위해 ISRC(반도체 공동 연구소)의 1.5㎛ 파라미터를 사용하였다.

그림 5(a)와 같이 두 개의 VSC를 연결하여 VSC 네트워크의 과도 응답을 알아보았다. 입력으로는 $I_{in,1}$과 $I_{in,2}$에 폭이 1㎲인 펄스를 가해주었고 그 때 C_d의 값은 1pF이었다. $I_{in,1}$이 VSC_1에 가해졌을 때, 지연된 전압 $D_{out,1}$과 지연되지 않은 전압 $V_{b,1}$이 증가하기 시작한다. 그리고 나서 $I_{in,1}$이 t = 1㎲에서 멈추면 $D_{out,1}$이 감소하기 시작한다. 이 상태에서는 VSC_1은 VSC_2로부터 지연된 전압 $D_{out,2}$를 받지 못했기 때문에 VSC_1의 $I_{out,1}$은 생성되지 않는다. $I_{in,2}$가 VSC_2에 가해지면 VSC_1에서 오는 지연된 전압 $D_{out,1}$ 과 $I_{in,2}$가 예상했던 바와 같이 출력전류 $I_{out,2}$를 생성한다. 이 결과가 그림 5(b), (c)에 나타나 있다.

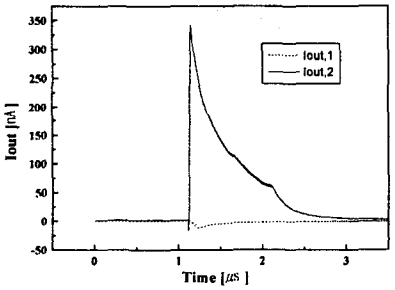
그림 6은 VSC 네트워크의 속도 민감도를 보여준다. 포토다이오드의 깊이 L_v, 인접한 두 셀 사이의 간격 L_d, 그리고 커패시턴스가 C_d는 각각 100㎛, 9㎛, 1pF이다. VSC의 출력 전류가 고정된 값이 아니므로 우리는 i번째 VSC의 최대 출력 전류를 그렸다. $I_{out,i}$의 부호는 움직이는 방향에 따라 바뀌었고 전류의 크기는 대략적으로



(a)



(b)



(c)

그림 5. 두 개의 VSC를 가진 기본 VSC 네트워크. (a) VSC들 사이의 연결 (b) $D_{out,1}$, $D_{out,2}$, $V_{b,1}$, $V_{b,2}$의 시간 응답. (c) VSC의 출력 응답

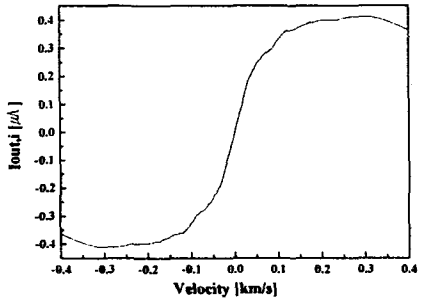


그림 6. VSC의 속도 민감도

$|v| < v_0$ 인 영역에서 움직이는 빛의 속도에 비례하였다. C_d의 값이 1pF이었을 때 v_0는 약 300m/s를 얻을 수 있었다.

V. 결론

우리는 이 논문에서 생물학적 시각 모델에 기반을 둔 아날로그 신경 네트워크를 구성하여 양방향 움직임과 속도를 검출할 수 있는 회로를 설계하였고 SPICE 시뮬레이션을 통하여 제안된 네크워크가 지역적 속도와 움직이는 물체의 방향을 상관 모델에서 예측하였던 것처럼 성공적으로 넓은 영역에서 동작함을 보았다. 제안한 VSC 회로는 10개의 트랜지스터와 1개의 커패시턴스로 간단히 구성되어 기존의 속도 감지 회로와 비교하여 매우 간단하다.

이번 시뮬레이션에서 움직이는 물체는 델타 함수로 주어지는 이미지를 가정하여 사용하였으나 실제의 자연환경에서 이미지는 델타 함수로 주어지지 않는다. 이는 가장자리를 검출해 내는 망막칩을 사용하여 델타 함수를 얻어낼 수 있다. 망막칩에서 자연 이미지의 가장자리를 먼저 추출해내면 이 시각 이미지는 델타 함수로 나타내어지고 이 시각 정보로부터 물체의 움직임과 속도를 검출해 낼 수 있게 되는 것이다.

참고문헌

[1] C. Mead, *Analog VLSI and Neural Systems*, Addison Wesley, 1989

[2] H.Ikeda, K. Tsuji, T. Asai, H. Yonezu and J.-K. Shin. "A Novel Retina Chip with Simple Wiring for Edge Extraction," IEEE Photon.Technol. Lett., vol. 10, no. 2, pp. 261-263, Feb. 1998

[3] T. Delbrück, "Silicon Retina with Correlation-Based, Velocity-Tuned Pixels," IEEE Trans. Neural Networks, vol. 4, no. 3, May 1993

[4] J. Kramer, R. Sarpeshkar, and C. Koch, "Pulse-based Analog VLSI Velocity Sensors," IEEE Trans. Circuits & Syst. II, vol. 44, no. 2, pp. 86-101, Feb. 1997

[5] D. C. Carroll, N. J. Bidwell, S. B. Laughlin and E. J. Warrant, "Insect motion detectors matched to visual ecology," Nature, vol. 382, July. 1996.