The Journal of the Convergence on Culture Technology (JCCT)
Vol. 6, No. 3, pp.361-367 August 31, 2020. pISSN 2384-0358, eISSN 2384-0366

http://dx.doi.org/10.17703/JCCT.2020.6.3.361
JCCT 2020-8-44

커패시터 기반 자가발전 인공 신경망 디바이스 설계

The design of capacitor-based self-powered artificial neural networks devices

김용주*, 김태호**

Yongjoo Kim*, Taeho Kim**

요 약 본 논문은 초소형 디바이스 분야에서 사용될 수 있는 배터리가 없는 초저전력 자가발전 협업 신경망 시스템을 제공하는 디바이스에 대하여 설명한다. 본 디바이스는 외부에서 전력을 공급하지 않더라도 동작하며, 다른 신경망과 협업하여 대규모의 신경망 구축이 가능하다. 해당 디바이스는 에너지 하베스팅 모듈을 탑재하고 있어 공간적 제약 없이 어느 곳에서나 자가발전을 이용하여 사용이 가능하며, 디바이스 내부의 신경만을 가지고도 동작할 수 있지만 상황에 따라 네트워크를 통해 대규모의 신경망의 일부로 사용하는 것도 가능하다.

주요어 : 인공신경망, IoT, 자가발전, 에너지하베스팅, 두뇌모사

Abstract This paper proposes the battery-less ultra-low-power self-powered cooperating artificial neural networks device for embedded and IoT systems. This device can work without extraneous power supplying and can cooperate with other neuromorphic devices to build large-scale neural networks. This device has energy harvesting modules, so that can build a self-powered system and be used everywhere without space constraints for power supplying.

Key words : Artificial neural networks, IoT, Self-powered, Energy harvesting, Neuromorphic

Ⅰ. 서 론

현재 많이 연구되고 있는 인공지능 분야는 약인공지능과 강인공지능으로 세분화 할 수 있다. 약인공지능은 어떤 특정한 한가지 분야의 주어진 일을 인간의 지시에 따라 수행하는 인공지능을 말하는데 요즘 많이 연구되고 있는 DNN는 약인공지능의 한 방식이다. 강인공지능의 대표적인 연구분야로 뉴로모픽 컴퓨팅이 있다. 뉴로모픽 컴퓨팅은 뇌의 동작 방식(뉴런과 시냅스의 상관관계)을 하드웨어 형태로 모방하여 회로를 만들어 인간의 뇌 기능을 모사하려는 공학 분야이다. 이렇게 만들어진 회로를 뉴로모픽 회로라고 하며 이 뉴로모픽 회로를 사용하여 인공지능을 만드는 것을 뉴로모픽 컴퓨팅이라고 부른다. 이 방식은 에너지 효율적인 두뇌의 동작원리를 모사하여 회로 자체가 뉴런과 시냅스 만으로 구성하므로, 기존의 머신러닝 방법보다 적은 면적에서 저전력으로 높은 인공지능 시스템을 구성할 수 있다. 머신러닝은 뇌의 동작을 추상화시켜 CPU나 GPU에서 전체

*정회원, 한국전자통신연구원 인공지능연구소 선임연구원 (교신저자)
**정회원, 한국전자통신연구원 인공지능연구소 책임연구원
접수일: 2020년 05월 13일, 수정완료일: 2020년 06월 08일
게재확정일: 2020년 06월 29일
Received: May 13, 2020/ Revised: June 08, 2020
Accepted: June 29, 2020
*Corresponding Author: y.kim@etri.re.kr
Artificial Intelligence Research Laboratory, Electronics and Telecommunications Research Institute (ETRI)

를 동작시키는 것에 반해, 뉴로모픽 컴퓨팅은 뇌의 뉴런 세포 각각을 흉내내어 입력 신호에 반응하는 뉴런 부분만 동작시키면 되기 때문에 머신러닝 방식에 비해 전력소모가 훨씬 적을 것으로 예상한다.

뉴로모픽 컴퓨팅 시스템은 다양한 연구팀에서 하드웨어적으로 다양한 형태로 만들어지고 있다.[1-5] 이 하드웨어들은 두뇌를 최대한 비슷하게 모사하면서도 전력 소모와 성능 관점에서 효율적으로 동작하도록 구현된다. 하지만 이런 결과물들은 단순히 뉴런과 시냅스를 하드웨어적으로 잘 구현하는 것에만 집중하고 있다.

본 기술은 외부에서 전력을 공급하지 않더라도 동작하며 다른 신경망과 협업하여 대규모 신경망 구축이 가능한 자가 발전하는 초저전력의 협업 인공 신경망 디바이스 구조를 설명한다. 기존의 뉴로모픽 컴퓨팅 시스템은 안정적으로 전력이 공급되는 시스템 상에서 전체 컴퓨팅 시스템의 일부로만 존재 하였는데, 해당 디바이스는 이와는 다르게 공간적 제약 없이 자가발전을 이용하여 임베디드 분야 적재적소에 쉽게 적용할 수 있고, 또한 자체적인 신경망을 가지고 다른 디바이스와 협업을 통해 작은 디바이스가 특징인 임베디드, IoT 분야에서 큰 신경망을 구성할 수도 있어 이용에 자유도가 높다.

본 논문의 2장에서는 뉴로모픽 컴퓨팅 분야 관련 연구 및 용어에 대하여 설명한다. 3장에서는 본 논문에서 소개하는 자가발전 협업 인공신경망 디바이스의 구조에 대하여 설명한다. 먼저 디바이스의 전체 구조에 대하여 설명하고, 각 모듈의 세부 구조와 동작 알고리즘에 대하여 설명한다.

II. 관련연구

1. 뉴로모픽 컴퓨팅 개요

뉴로모픽 컴퓨팅은 인간의 뇌를 구성하는 형태를 모방하여 컴퓨팅 회로 또는 칩을 만드는 기술이다. 뇌는 뉴런과 시냅스의 연결구조로 되어 있는데 이를 모사하여 컴퓨팅 시스템도 뉴런과 같이 0과 1의 단순한 신호를 처리하는 뉴런과, 뉴런과 뉴런사이를 연결하는 시냅스의 구조로 시스템을 구성한다. CPU나 GPU를 사용하여 구현하는 기존의 인공지능(DNN등의 인공지능)과는 달리 뉴런과 시냅스 그 자체만을 구현하면 되므로 전력소모, 면적 측면에서 큰 발전이 있을 것으로 예측하는 분야이다.

2. 용어정의

1) 에너지 하베스팅 (Energy Harvesting)

주변에 존재하는 여러가지 환경에서 에너지를 추출하여 전력을 생산하는 기술으로 온도, 진동, 압력, 태양광, 라디오 주파수 등의 주변환경에서 에너지를 생산한다.[6] 환경에 따라 사용될 수 있는 에너지 하베스팅 기술이 다른데, 태양광 모듈을 이용한 에너지 하베스팅은 지상에 열린 공간에서는 효율이 좋으나 지하나 건물안 등에서는 효율이 좋지 않다. 컴퓨팅 환경의 상황에 적합한 에너지 하베스팅 모듈의 선택이 필요하며, 상황에 따라 이종으로 하베스팅 모듈을 구성하여 사용할 수 있다.

2) 차세대 비휘발성 메모리 (Next-Generation Non-Volatile Memory)

소자, 공정기술이 발달함에 따라 새롭게 개발된 메모리로, 이 메모리들은 기존의 SRAM, DRAM, Flash 메모리에 비해서 데이터 비휘발성, 무작위 접근, 전력소비량, 마모저항, 처리속도, 가격 등의 측면에서 기존의 메모리보다 우월함을 보이는 메모리 들이다. 공통적으로 데이터 비휘발성의 특징을 가진다. 차세대 비휘발성 메모리는 사용한 재료 및 소자 기술에 따라 다양하게 나눌 수 있는데, 대표적인 메모리는 ReRAM(Resistance RAM)[7], PCRAM(Phase Change RAM)[8], MRAM(Magnetic RAM)[9], FeRAM(Ferroelectric RAM)[10] 등이 있다.

3) 비휘발성 컴퓨팅 시스템 (Non-Volatile Computing System)

에너지 하베스팅을 에너지원으로 사용할 경우 전력 생산의 불안정성으로 인하여 전력 공급이 간헐적으로 일어나게 되는데, 이런 전원이 켜졌다 꺼졌다 하는 상황에서도 데이터가 없어지지 않고 그대로 유지되는 컴퓨팅 시스템을 말한다. 간헐적 컴퓨팅(Intermittent computing)[11] 이라고도 부른다.

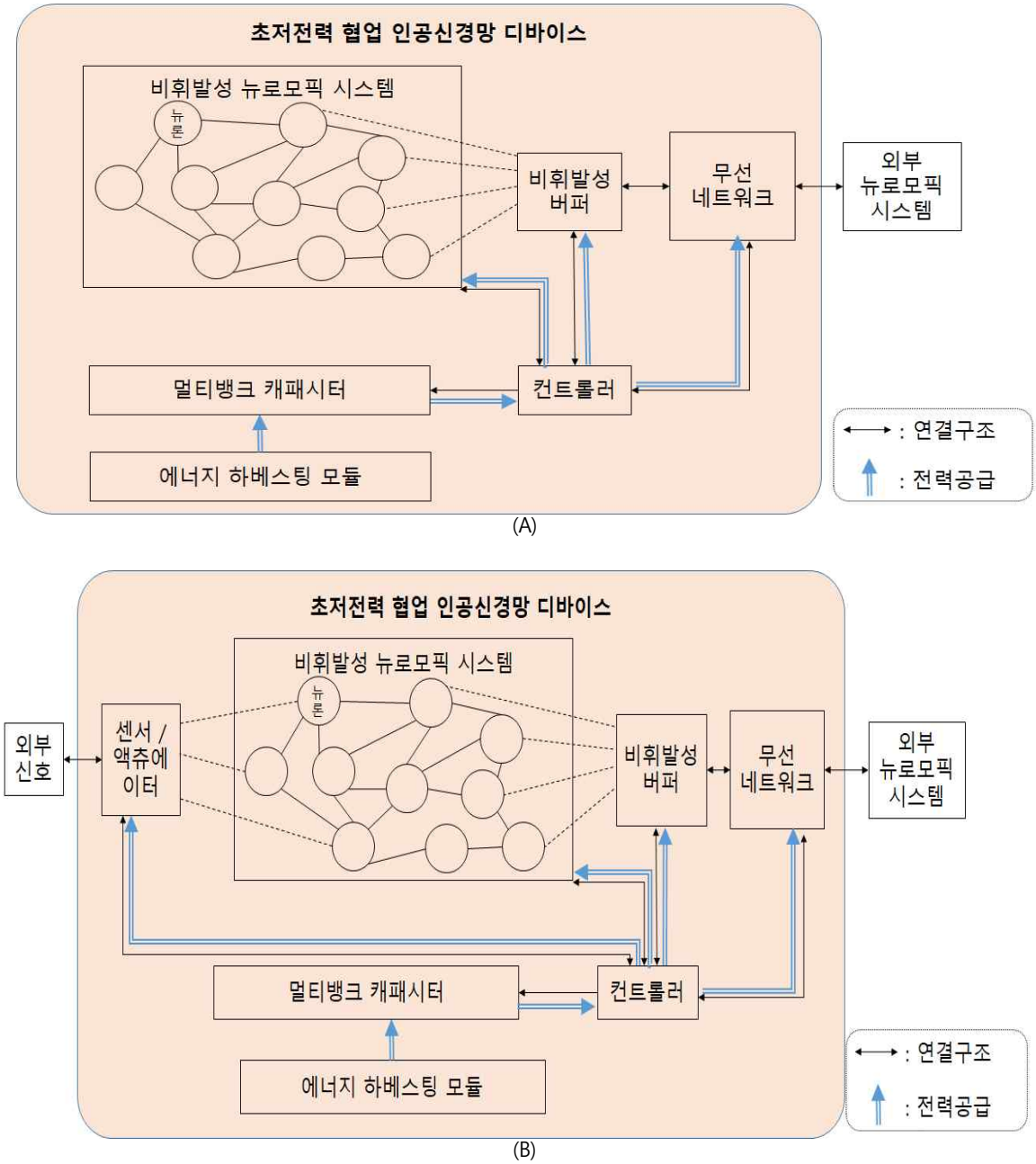

그림 1. (a) 초저전력 협업 인공신경망 디바이스 구조, (b) 센서/액츄에이터가 추가된 협업 인공신경망 디바이스 구조
Figure 1. (a) The structure of the ultra-low-power cooperating artificial neural networks device, (b) The structure of the device having sensors / actuators

III. 자가발전 협업 인공 신경망 디바이스 구조

1. 자가발전 협업 인공 신경망 디바이스 개관

본 디바이스는 세부적으로 비휘발성 뉴로모픽 시스템(뉴로모픽 하드웨어), 컨트롤러, 비휘발성 버퍼, 무선 네트워크, 멀티뱅크 커패시터, 에너지 하베스팅 모듈로 구성된다. 상황에 따라 센서나 액츄에이터가 추가 될 수 있다. 그림1은 본 디바이스의 전체적인 연결구조를 보여준다. 그림1의 (A)는 센서나 액츄에이터가 없이 외부와 연결되어 신경망의 일부가 되는 역할을 하는 디바이스이며 그림1의 (B)는 신경망을 가지고 있으면서도 자체적으로 입출력을 처리할 수 있는 디바이스 구

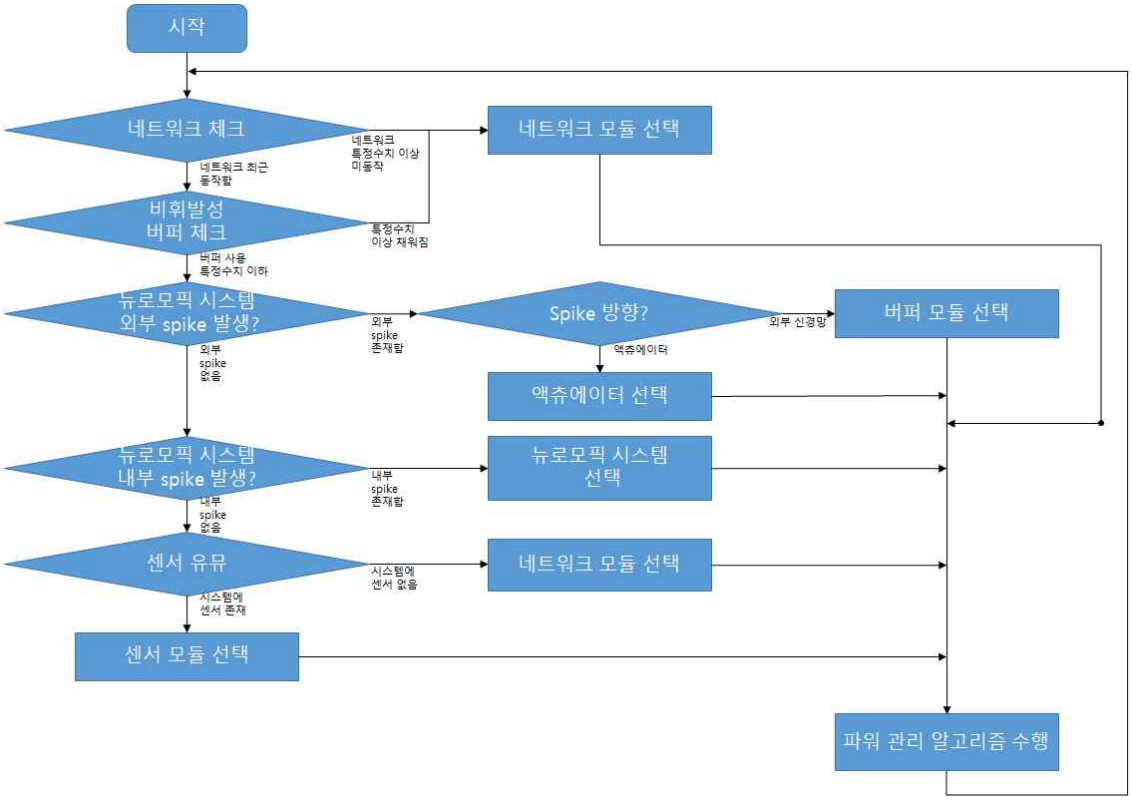

그림 2. 컨트롤러 순서도
Figure 2. The flow chart of a controller

조를 보여준다.

본 디바이스에서 사용되는 비휘발성 뉴로모픽 시스템은 여러 뉴로모픽 시스템 중 멤리스터(Memrister) 와 같은 비휘발성 메모리를 적용하여 구현한 비휘발성 뉴로모픽 시스템을 사용한다. 대부분의 뉴로모픽 시스템이 그렇듯이 전체 뉴런에 동시에 전력을 공급하지 않고 작동을 원하는 일부 뉴런에만 전력을 공급하여 동작시키는 선택적 실행이 가능한 구조이다. 해당 뉴로모픽 시스템에서는 뉴런과 시냅스를 원하는 형태로 구성하여 동작시킬 수 있다.

데이터의 입출력은 무선 네트워크를 통하여 외부의 뉴로모픽 시스템과 스파이크를 주고 받으면서 이루어진다. 디바이스에 센서나 액츄에이터가 있는 경우, 해당 모듈을 사용하여 입출력을 수행할 수도 있다. 뉴로모픽 시스템에서 외부의 뉴로모픽 시스템으로 스파이크를 생성하는 경우에는 비휘발성 버퍼에 우선 저장을 하여 추후 무선 네트워크가 가능해질 때 데이터(스파이크)를 전송한다.

컨트롤러는 디바이스 내부의 모듈을 선택적으로 동작 시키며, 그를 위하여 멀티뱅크 커패시터 사이즈를 조절하여 해당 디바이스에 적합하도록 커패시터 사이즈를 조절한다. 예를 들어 뉴로모픽 시스템을 동작시킬 경우에는 멀티 커패시터의 일부만 사용하도록 조절하여 커패시터 용량을 낮춘다. 비휘발성 뉴로모픽 시스템에서는 스파이크가 입력으로 들어온 뉴런만 활성화되고 나머지 뉴런은 비활성화 상태이기 때문에, 활성화되는 일부 뉴런에만 전력을 공급하여 적은 양의 전력으로도 동작이 가능하다. 멀티 커패시터를 조절하여 저장용량을 줄임으로써, 커패시터에서 파워 소모의 주요 원인이 되는 누수 전력을 줄일 수 있다. 반대로 무선네트워크를 사용할 때에는 한번에 많은 양의 전력이 필요한데, 이 경우 멀티 캐피시터를 조절하여 커패시터 용량을 늘려서 무선 네트워크 모듈이 충분히 동작할 수 있는 전력을 저장할 수 있도록 조절한다.

해당 디바이스에 전력을 공급해 주는 에너지 하베스팅 모듈은 다양한 종류가 존재한다. (태양광, 압전, RF 등등) 이중에 해당 디바이스를 사용하는 환경에 적합한 어떤 것이든 사용해도 무관하다.

해당 디바이스의 신경망은 일부는 센서/액츄에이터 쪽과 연결되어 입출력단에 연결이 되고, 일부는 네트워크를 통해 다른 외부 디바이스의 신경망과 연결이 된다. 이를 통해 대/소규모의 신경망을 자유롭게 구성할 수 있다. 상황에 따라 신경망을 재구성 할 수도 있다.

2. 컨트롤러의 모듈 선택 알고리즘

컨트롤러는 전체 디바이스에서 어떤 모듈을 선택적으로 동작시킬 지를 결정하는 역할을 한다. 그림2는 컨트롤러의 모듈 선택 알고리즘을 순서도로 표현하였다. 해당 모듈은 하드웨어 형태로 구현되어 있고 구조가 간단하여 전체 시스템에서 전력을 거의 소모하지 않는다. 컨트롤러에서는 전체 동작 중 주기적으로 네트워크를 체크하여 외부로 나가는 스파이크가 있는지, 아니면 외부에서 들어오는 스파이크가 있는지를 확인한다. 컨트롤러 내부에 네트워크 미수행 카운터 레지스터를 둬서 네트워크가 아닌 다른 모듈을 사용할 때마다 그 값을 하나씩 증가시킨다. 특정 정해진 수치가 되면 네트워크를 선택해서 주기적으로 외부와 통신을 한다. 카운터 레지스터가 수치 이하이더라도 외부로 전달될 스파이크가 저장되는 버퍼에 스파이크가 일정 수치 이상 쌓이면 네트워크를 선택하여 외부로 스파이크를 보낸다. 네트워크가 동작한 이후에는 카운터 레지스터를 초기화한다. 네트워크를 선택하지 않았을 때에는 뉴로모픽 시스템의 스파이크 발생 상황을 체크하여 다음 수행 모듈을 선택한다. 뉴로모픽 시스템에서 스파이크가 발생 하였는데 그 스파이크가 뉴로모픽 시스템 외부(디바이스 내부의 다른 모듈이나 네트웍을 통한 디바이스 외부의 모듈)로 나가는 상황에는, 해당 타겟 모듈을 선택하여 해당 작업을 처리한다. 뉴로모픽 시스템의 뉴런에서 발생한 스파이크가 내부의 다른 뉴런에게 전달되는 상황에는 뉴로모픽 시스템을 선택하고 스파이크를 받는 해당 뉴런만 선택 동작 시켜 계산이 진행되도록 한다. 마지막으로 위의 상황에 다 적용되지 않는 경우, 그리고 센서가 따로 존재하는 경우에는 센서 모듈을 선택하여 외부에서 데이터를 받아들인다. 센서가 없는 경우에는 네트워크를 선택하여 외부와 스파이크를 주고 받는다. 모듈을 선택하면 해당 모듈에 대한 파워관리 알고리즘을 수행하여 해당 모듈 수행을 위한 커패시터 세팅을 한다.

3. 파워 관리 알고리즘

컨트롤러에서 동작시킬 모듈을 선택하고 나면 컨트롤러에서는 해당 모듈에 적절한 전력을 공급할 수 있도록 멀티커패시터를 세팅한다. 각각의 모듈은 한번의 작업을 수행하기 위해 필요한 전력량이 다르다. 뉴로모픽 시스템 모듈의 경우 내부의 뉴런 각각을 따로 동작시킬 수 있어 적은량의 전력만 공급해도 뉴런 하나의 동작을 수행할 수 있다. 반면에 네트워크의 경우 상대적으로 많은 전력을 요구한다. 컨트롤러에서는 선택된 모듈이 필요로 하는 용량으로 멀티커패시터를 세팅한다. 그리고 에너지 하베스팅 모듈을 통해 커패시터에 전력이 완충이 되는 것을 기다린 후 전력이 준비되면 미리 선택한 모듈에 전력을 공급하여 해당 모듈을 동작시킨다. 그림3은 멀티커패시터를 세팅하기 위한 파워 관리 알고리즘의 순서도를 보인다.

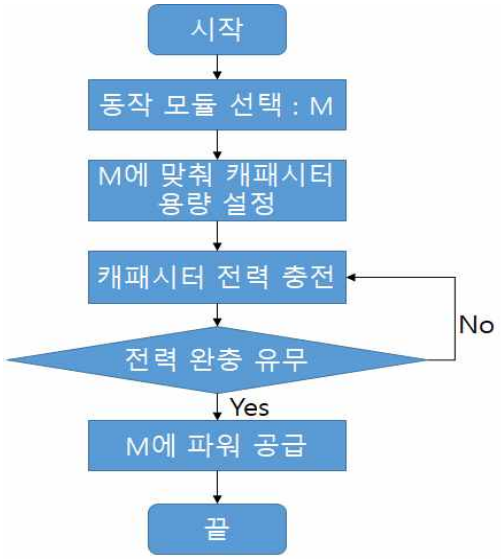

그림 3. 파워관리 알고리즘 순서도
Figure 3. The flow chart of a power management algorithm

4. 멀티커패시터 구조

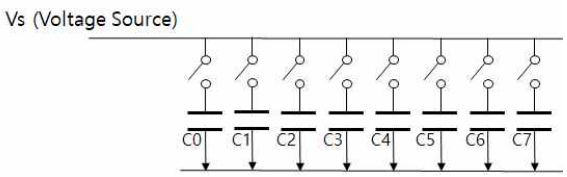

그림 4. 멀티커패시터 구성도
Figure 4. A conceptual diagram of multi-capacitors

그림4는 멀티커패시터의 구조를 보여준다. 멀티커패시터는 여러 개의 서로 다른 크기의 커패시터로 구성되어 있다. 커패시터를 구성하는 방법은 자유롭다. 각 모듈에 필요한 전력량에 맞는 커패시터를 각각을 사용할 수도 있고(ex. C0는 뉴로모픽 하드웨어의 뉴런 하나를 수행할 용량, C1은 네트워크 통신 한번을 수행할 용량 등), 커패시터 간의 용량차를 비율적으로 증가시켜 다양한 조합을 임의로 만들 수도 있다. 아래는 다양하게 조합을 하여 용량을 자유자제로 조절할 수 있도록 설계한 커패시터 세팅이다.

C0=1μF,	C1=2μF,
C2=4μF,	C3=8μF,
C4=16μF,	C5=32μF,
C6=64μF,	C7=128μF

위와 같은 조합을 사용하는 경우의 예시로 19 μF의 커패시터를 구성하고 싶을 때에는 C0(1μF), C1(2μF), C4(16μF) 의 3개의 스위치를 닫고 나머지는 스위치를 열어 조합하여 사용할 수 있다.

IV. 결 론

본 논문은 외부에서 전원을 전혀 공급해주지 않더라도 자가발전하면서 신경망 계산을 진행할 수 있는 자가발전 협업 인공 신경망 디바이스를 제안하였다. 배터리도 없이 자가 발전한 전력을 그때그때 바로 작동에 사용하기 때문에 전력공급을 위한 관리 오버헤드(ex. 전력 공급을 위한 전선망 구축 or 배터리의 주기적 교체)가 발생하지 않는다. 관리 오버헤드 없이 동작하는 디바이스에서 자체적으로 측정한 가공되지 않은 데이터를 내부 신경망에서 일차적으로 처리를 하여 네트워크를 통해 2차 신경망에 전달 할 수 있기 때문에 전체 시스템의 오버헤드를 줄이는데 사용할 수 있다. 또한 해당 디바이스는 외부의 다른 신경망과 연동되어 동작할 수 있어 네트워크를 통한 대규모 신경망을 구성하는데 도움을 주는 형태로 사용할 수 있다.

References

[1] M. Davies et al., "Loihi: A Neuromorphic Manycore Processor with On-chip Learning", IEEE Micro, Jan 2018. DOI: 10.1109/MM.2018.112130359

[2] P.A. Merolla et al., A million spiking-neuron integrated circuit with a scalable communication network and interface, Science, vol. 6197, Aug 2014. DOI: 10.1126/science.1254642

[3] Furber, SB, Galluppi, F, Temple, S & Plana, LA 2014, 'The SpiNNaker project', Institute of Electrical and Electronics Engineers. Proceedings , vol. 102, no. 5, 6750072, pp. 652-665. https://doi.org/10.1109/JPROC.2014.2304638

[4] Johannes Schemmel, Daniel Brüderle, Andreas Grübl, et al. "A Wafer-Scale Neuromorphic Hardware System for Large-Scale Neural Modeling". In: Proceedings of the 2010 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS). 2010, pp. 1947 - 1950 DOI: 10.1109/ISCAS.2010.5536970

[5] Akopyan F, Sawada J, Cassidy A, Alvarez-Icaza R, Arthur J, Merolla P, Imam N, Nakamura Y, Datta P, Nam G, Taba B, Beakes M, Brezzo B, Kuang JB, Manohar R, Risk W, Jackson B, and Modha D. "TrueNorth: Design and Tool Flow of a 65mW 1 Million Neuron Programmable Neurosynaptic Chip". Transactions on Computer Aided Design (TCAD), Volume: 34 Issue: 10, 2015 DOI: 10.1109/TCAD.2015.2474396

[6] Selahattin Kosunalp, "MAC Protocols for Energy Harvesting Wireless Sensor Networks: Survey", ETRI Journal Volume 37, Issue 4 DOI: https://doi.org/10.4218/etrij.15.0115.0017

[7] "MN101L ReRAM Embedded MCUs - Panasonic | Mouser". www.mouser.com. Retrieved 2016-06-08.

[8] Simpson, R.E.; P. Fons; A. V. Kolobov; T. Fukaya; et al. (July 2011). "Interfacial phase-change memory". Nature Nanotechnology. 6 (8): 501 - 505. https://doi.org/10.1038/nnano.2011.96.

[9] Akerman, J. (2005). "APPLIED PHYSICS: Toward a Universal Memory". Science. 308 (5721): 508 - 510.

[10] Dudley A. Buck, "Ferroelectrics for Digital Information Storage and Switching." Report R-212, MIT, June 1952.

[11] Kiwan Maeng, Brandon Lucia, "Adaptive dynamic checkpointing for safe efficient intermittent computing", OSDI'18: Proceedings of

the 12th USENIX conference on Operating Systems Design and ImplementationOctober 2018 Pages 129 - 144
[12] Jee-Young Lee, "Deep Learning Research Trend Analysis using Text Mining" IJACT Vol.7 No.4 doi:http://doi.org/10.1016/j.iedeen.2017.06.002
[13] Ju-eun Kim., "An Analysis of the effect of Artificial Intelligence on Human Society" JCCT Vol.5 No.2

※ 이 논문은 2020년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.2018-0-00769,인공지능 시스템을 위한 뉴로모픽 컴퓨팅 SW 플랫폼 기술 개발)