



# TCAM 아키텍처 기반 SFNN 알고리즘을 이용한 실시간 졸음 운전 감지 시스템의 MPW(Multi-Project Wafer) 구현

임현기, 김수민, 김동휘, 서영석, 최연우, 서지원, 강덕현, \*박성배, \*홍충선, 홍상훈  
 경희대학교 전자공학과  
 \*경희대학교 컴퓨터공학과  
 e-mail : hkrhim@khu.ac.kr

## Abstracts

We show a ternary content addressable memory (TCAM) based digital processing in memory architecture (DPIM). It is a feedforward learning/inference structure with two layers of learnable TCAM structures. To demonstrate the efficacy of this architecture, we have applied it to determine driver drowsiness through external and internal camera views. Training of internal view's driver specific hypnagogic (state between wakefulness and sleep) condition by training on buffered video just before the onset of abnormal driving detection. This is performed in real-time to learn the driver's specific behavior. An accuracy of 99.7% was achieved on inner-view video training (driver state), and 98.2% on external video(driving condition). Real-time training on DPIM takes approximately 6.23 ms per frame, while inference takes 0.33 ms per frame at a 100 MHz clock rate. We implemented the TCAM as MRAM using the MPW (Multi-Project Wafer) process and constructed a structure capable of handling edge filtering and max pooling by parallelly connecting RISC-V modules. Through this approach, we maximized real-time learning and inference performance, achieving both fast learning and accurate driver state detection.

## Algorithm

SNN 모델의 STDP 학습 기법을 착안한 Spike Location Dependant Plasticity(SLDP) 기법을 활용. 비트맵의 위치 기반의 정보를 학습하여 스파이크 데이터를 처리하는 시스템으로 CTCAM(Counting Ternary Content Addressable Memory) 기반의 병렬구조를 도입하여 실시간의 유사한 인공지능 시스템을 구현

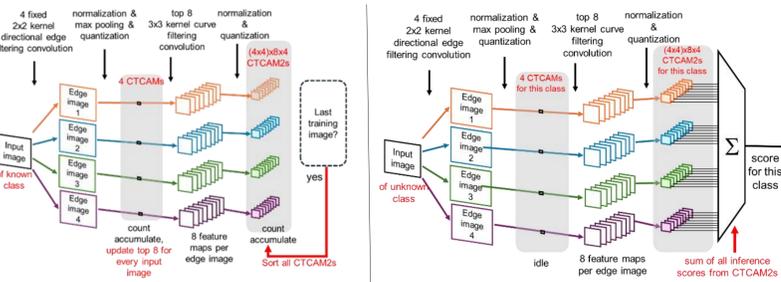


Fig. 1 CTCAM 기반 학습 과정 흐름도

Fig. 2 CTCAM 기반 추론 과정 흐름도

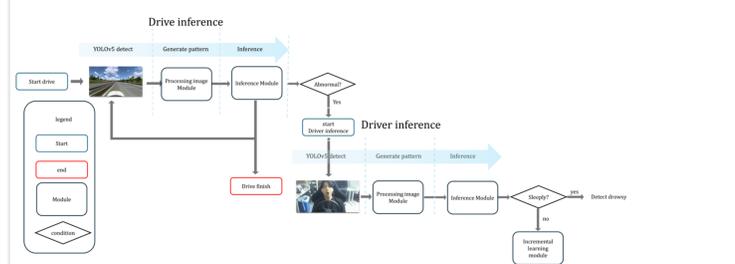


Fig. 3 CTCAM 기반 전체 블록

## MRAM

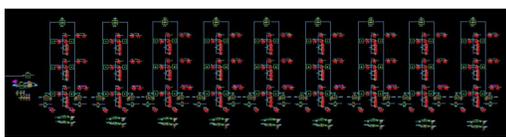


Fig. 9 MRAM 구조도

BL(Bit Line)과 BLB(Bit Line Bar)을 활용하여 두 비트 구현  
 TCAM에서 3진수 (0, 1, X) 표현이 가능

## Result

Table 1. 운전자 상태 정확도

LG Test	Sleepy	Normal	Object search
Sleepy	98 %	0 %	0 %
Normal	0 %	100 %	0 %
Object search	2 %	0 %	100 %

Accuracy: 99.3%

Table 2. 주행 상태 정확도

LG Test	Abnormal	Normal	Lane change to left	Lane change to right
Abnormal	96 %	0 %	0.7 %	0 %
Normal	0 %	97.3%	0 %	0 %
Lane change to left	4 %	0 %	99.3 %	0 %
Lane change to right	0 %	2.7 %	0 %	100 %

Accuracy: 98.2%

Table 3. 기존 연구 성능 및 정확도 비교

Algorithm	[1]	[2]	[3]	This research
Accuracy	81.07%	97.1%	95.4%	<b>99.7 % (driver)</b> <b>98.2 (drive)</b>
Hardware	450MHz CPU	2.5GHz CPU	N/A	100 MHz DPIM
Processing period per frame	4.33ms infer	2.11s train	10s infer	<b>6.23ms train</b>
Detection Targets	Driver camera	Driver camera	Driver camera, BEG, BCG, Telemetry	Driver, Road camera
Dataset Size	14,143 images	98,800 frames	~5,000 samples	611,800 frames
Image Size	100x100	150x150	N/A	28x28

[1] S. K. Moosavi-Dezai, F. Ghahramani, M. Moosavi-Dezai, and S. B. O. Yalcin, "Instruction Set Extension of a Risc-V Based SoC for Driver Drowsiness Detection," IEEE Access, vol. 10, pp. 58151-58162, May 2022, DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3177743  
 [2] M. Ahmed, S. Mousk, M. Noman and A. A. Abd El-Latif, "Intelligent Driver Drowsiness Detection for Traffic Safety Based on Multi-CNN Deep Model and Facial Subsampling," IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems, vol. 23, no. 10, pp. 19743-19752, Oct. 2022, DOI: 10.1109/ITITS.2021.3134222.  
 [3] J. Owa, A. Hira, and M. Shin, "An Investigation of Early Detection of Driver Drowsiness Using Ensemble Machine Learning Based on Hybrid Sensing," Applied Sciences, vol. 10, no. 8, Apr. 2020, DOI: 10.3390/app10082890.

## CTCAM

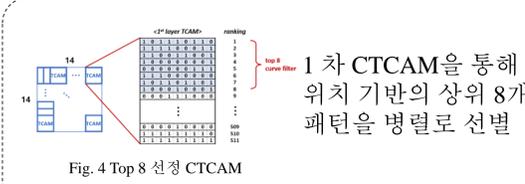


Fig. 4 Top 8 선정 CTCAM

1 차 CTCAM을 통해 위치 기반의 상위 8개 패턴을 병렬로 선별

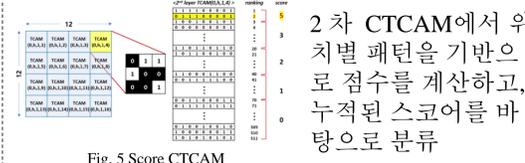


Fig. 5 Score CTCAM

2 차 CTCAM에서 위치별 패턴을 기반으로 점수를 계산하고, 누적된 스코어를 바탕으로 분류

## Image processing



Fig. 6 운전자 상태 감지 및 데이터화

운전자의 영상을 YOLOv5를 이용해 운전 상태 데이터를 추출하여 CLASS (Sleepy, Normal, Object search) 분류

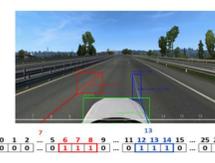


Fig. 7 주행 상태 감지 및 데이터화

EuroTruckSimulator2를 활용하여 주행 상태에 CLASS (normal, abnormal, lane change) 분류

## Hardware

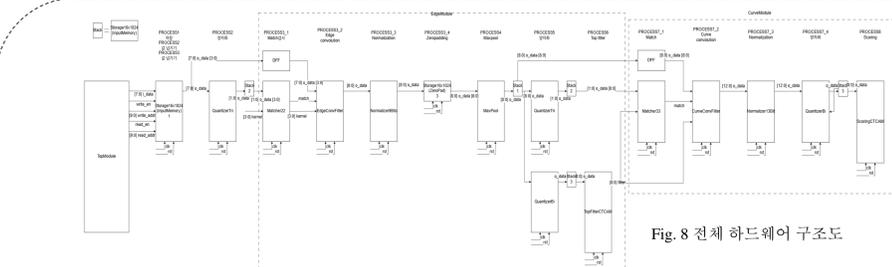


Fig. 8 전체 하드웨어 구조도

전체 하드웨어 구조는 이미지 전처리부터 최종 분류까지의 전 과정을 처리할 수 있도록 Top Module을 중심으로 구성되어 있다. [그림 8] 과 같이 입력 이미지가 순차적으로 엣지 필터링, 양자화, 맥스 풀링, 커브 필터링을 거쳐 CTCAM 기반의 스코어링으로 연결되는 파이프라인 구조를 갖추고 있으며, 각 단계는 독립적인 서브모듈로 설계되어 병렬 처리를 지원한다. 모든 데이터 처리는 동기식 클럭에 기반하며, 실시간 학습과 추론이 가능하도록 구성되어 있다.

## Chip

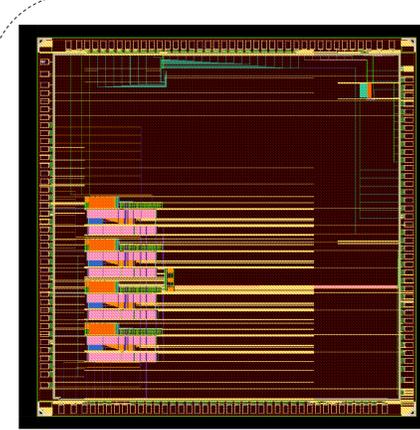


Fig. 10 전체 칩 구성

본 칩은 [그림 11]과 같이 엣지 Edge Filter마다 RISC-V 코어 4개와 Register, Multiplier, Divider를 병렬로 4개씩 구현하여 높은 연산 성능을 확보. 또한, MRAM을 통해 TCAM을 구현하여 [그림 12]와 같이 데이터 보존과 빠른 패턴 매칭이 가능하도록 설계.

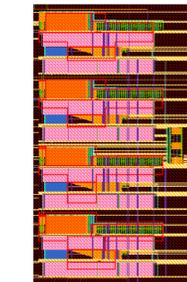


Fig. 11 전체 모듈

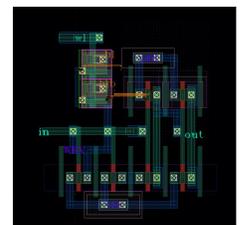


Fig. 12 MRAM

## Conclusion

TCAM 기반의 DPIM 아키텍처와 YOLO 기반 객체 인식을 통해 시공간 비트맵 패턴을 생성하여, 저해상도 이미지 환경에서도 고속·고정밀 졸음운전 감지 시스템을 구현하였다. 실험 결과, 제안된 시스템은 운전자 상태에 대해 **99.7%**, 주행 상태에 대해 **98.2%**의 정확도와 프레임당 학습 **6.23ms**, 추론 **4.33ms**의 실시간 성능을 달성하였다. 현재 제안된 결과는 시뮬레이션을 기반으로 한 성능 평가이며, 칩 구현 단계에서는 Curve Filtering과 2차 CTCAM이 아직 완성되지 않았다. 향후 연구에서는 이러한 부분을 추가 구현하여 실제 칩 환경에서의 성능 검증에 진행할 예정이다.