

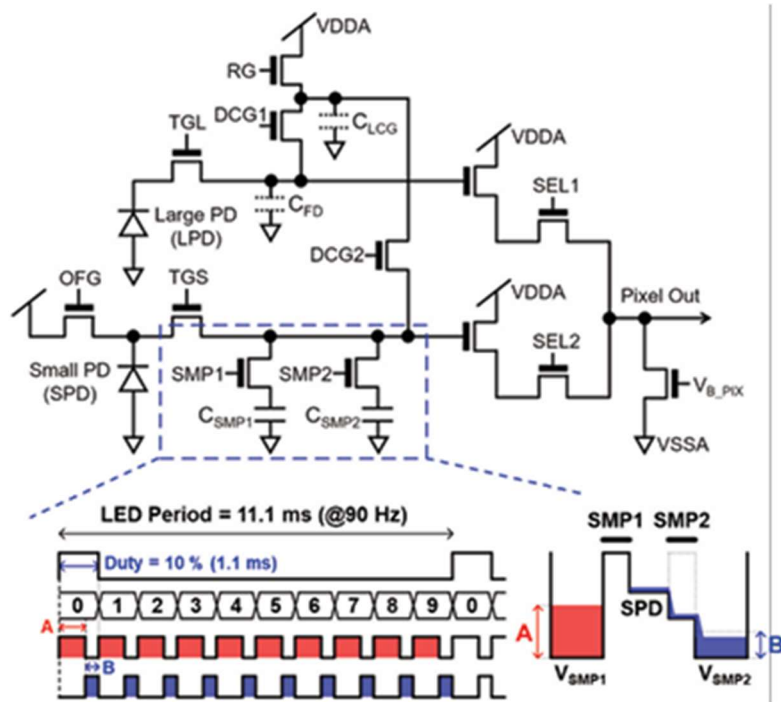
2025 IEEE VLSI Review

고려대학교 전기및전자공학부 박사과정 안재웅

Session 6 Imagers

이번 2025 VLSI의 Session 6에서는 Imagers라는 주제로 총 4편의 논문이 발표되었다. 이중 #6-1은 global shutter CIS에 관련된 내용을 제안하였으며, #6-3은 센서 내부에 CNN을 넣은 이미지 센서에 관련된 내용이다. 또한 #6-4는 ADAS에 사용되는 이미지 센서에 관련된 내용이다.

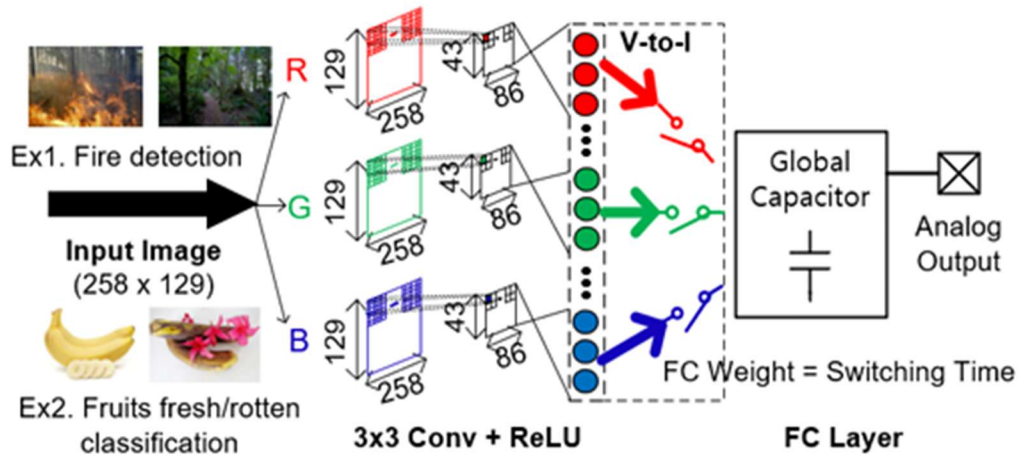
#6-1 논문은 CMOS image sensor (CIS) 기존의 rolling shutter CIS가 빠르게 움직이는 물체 포착에 어려움이 생겨 이를 해결하기 위해 나온 global shutter CIS에 관한 내용이다. 제안된 digital pixel sensor (DPS)는 포토다이오드를 두 개로 나눈 구조로, large photodiode (LPD)는 저조도 환경에서 SNR을 확보하는 데 쓰이고, small PD (SPD)는 high dynamic range (HDR) 구간에서 포화 없이 계조를 유지하는 데 쓰인다. 이때 SPD에는 chopping operation을 추가해 LED flicker 및 저주파 성분을 줄여 주며, 결과적으로 HDR에서도 유효 동작 범위를 넓힌다. 또한 single-slope ADC에 두 개의 DC coupling capacitor를 더해 auto-zero operation이 가능하도록 구성하여 random noise와 fixed pattern noise (FPN) 문제를 동시에 낮췄다. 픽셀/컬럼 경로에서 생기는 오프셋과 저주파 잡음을 한 번 더 상쇄해 주는 셈이라, global shutter 동작 시 프레임 전역의 균일도에도 도움이 된다. 이러한 기법들을 통해 analog gain 16에서 1.22 e-rms의 낮은 노이즈를 달성했고, 3 MP GS 모드 60 fps에서 전력 소모는 270 mW 수준이다. 또한 기존 논문들과 비교했을 때 픽셀 크기, random noise, HDR, 전력 소모 측면에서 경쟁력 있는 수치를 보였고, 빠른 피사체에서도 왜곡을 줄이면서 저조도·고조도 환경 모두에서 신호 품질을 유지했다.



[그림 2] #6-1에서 제시한 split PD를 사용하고, chopping operation을 사용한 pixel structure

#6-3 논문은 edge device에서 늘어나는 vision task에 대응하기 위해, AI processor가 센서 밖에 따로 있는 구조 대신 센서 내부에 CNN을 넣은 이미지 센서에 관한 내용이다. 기존 연구들은 전력 소모가 크거나, 복잡한 작업에서 정확도가 떨어지거나, weight 정밀도가 낮아서 한계가 있었다. 이 논문은 258×129 pixel array를 3×3 sub-pixel array (SPA) 단위로 묶고, exposure time을 weight로 programmable하게 조절한다. Conv layer의 fractional weight는 $-8 \sim +8$ 범위를 0.1 step으로 구현하는데, SPA 내부 픽셀들의 exposure 시작 시점과 up/down 카운트 반복 횟수를 조합하는 two-step Conv로 실현한다. 이렇게 얻은 feature map (FM)은 ReLU를 거친 뒤 analog MAC에서 전류로 변환되고, 5-bit fully-connected (FC) weights가 스위치 on 시간을 정해 global capacitor에 전하를 누적한다. 픽셀은 nMOS-only PWM pixel 구조를 써서 fill factor를 30.6% 향상시켰고, 컬럼 공유 pMOS로 면적/배선도 줄였다. RGB 채널은 독립적으로 처리해서 색 채널 감도의 차이를 high-resolution fractional weights로 학습 단계에서 보정한다. 본 논문은 채널당 20 fps에서 $137.5 \mu\text{W}$ 를 소모했고, iFoM $206.6 \text{ pJ/pixel-frame}$ 을 달성했다. digital MAC 대비 analog MAC은 면적 83%, 에너지 68.8% 절감이 보고된다. 벤치 테스트에서는 fire detection 89.6%, fruits freshness 90.9%의 정확도를 보였고, 동일한 FM 수에서 gray scale 대비 RGB 사용 시 성능이 17.5% / 31.9% 개선되었다.

Multispectral Sensor with Embedded 2-Layer CNN Model

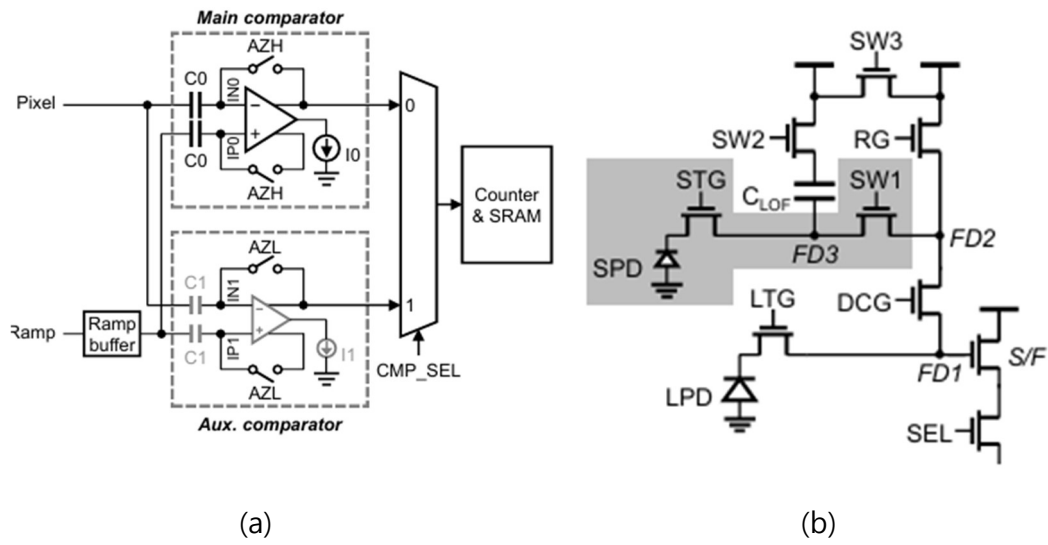


4 Key Features of Proposed Vision Sensor

- | | | |
|---|--|---|
| ① Multispectral Sensor
(R,G,B) | ③ High-resolution Weights | ④ Analog FC Layer |
| <ul style="list-style-type: none"> • Enabling color based classification tasks | <ul style="list-style-type: none"> • Programmable • Fractional Conv weights (-8 to 8, 0.1 resolution) | <ul style="list-style-type: none"> • Area-/Energy-Efficient • Reducing the computational burden |
| ② nMOS-only PWM Pixel | <ul style="list-style-type: none"> • 5b FC weights • Enabling RGB compensation | |
| <ul style="list-style-type: none"> • Improved fill factor | | |

[그림 3] 제안한 multispectral vision sensor의 구조와 중요 내용

#6-4 논문은 advanced driver assistance system (ADAS)에 많이 사용되는 이미지 센서와 관련된 논문이다. High dynamic range (HDR)와 light-emitting diode flicker mitigation (LFM)은 자동차 센서에서 가장 중요한 요소다. 본 논문의 픽셀은 large photodiode (LPD)와 small photodiode (SPD)로 구성되어 있고, 단일 노출(single exposure)에서 포토다이오드 조합에 따라 총 네 번의 센싱을 수행한다. 이미지 센서는 12-bit single-slope ADC를 사용하며, 네 번에 걸쳐 얻은 결과는 28-bit HDR merger에서 결합되어 최대 144 dB 수준의 HDR을 표현하고 최대 16× analog gain을 지원한다. 일반적으로 면적을 줄이기 위해 두 개의 comparator가 하나의 load를 공유하기도 하지만, 이 경우 noise coupling 문제가 생길 수 있어 본 논문은 auxiliary comparator를 도입했다. 또한 ADC ramp slope와 잡음은 oversampling으로 평균화되며, readout 시간 제약을 고려해 모드별로 ADC 분해능과 oversampling 비를 재구성한다(예: LPD-H 10-bit OS4 등). 이러한 기법들을 통해 analog gain 16×, OS4에서, OS가 없을 때 대비 SNR1을 39% 낮출 수 있었다. read noise는 room temperature에서 0.5 e⁻, T_j 85°C에서 0.55 e⁻를 달성했다. 다른 논문들과 비교했을 때도 제안 기법은 우수한 FoM과 경쟁력 있는 HDR 및 SNR을 보였다.



[그림 3] (a) 제안하는 comparator 구조와 (b) 제안하는 sub-pixel 구조

저자정보



안재웅 박사과정 대학원생

- 소속 : 고려대학교
- 연구분야 : 디스플레이 드라이버 / 픽셀 보상 / 터치 센서
- 이메일 : ajw1104@korea.ac.kr
- 홈페이지 : <https://sites.google.com/site/kubasiclab/home>

2025 IEEE VLSI Review

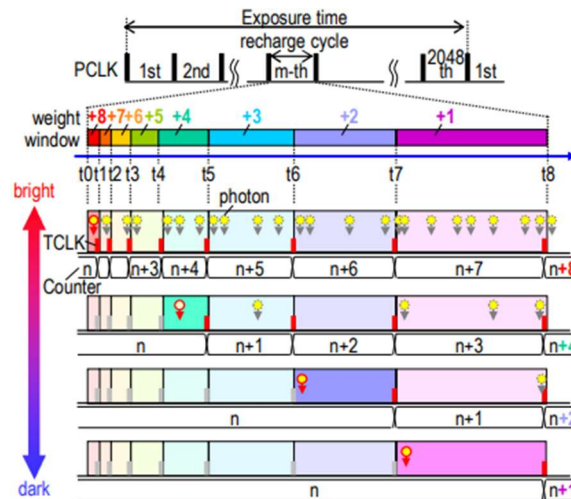
고려대학교 전기전자공학과 박사과정 이윤호

Session 27 Sensing and Ranging Technologies

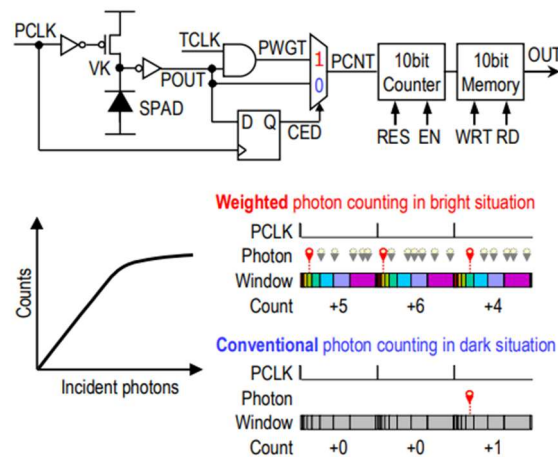
이번 2025 VLSI의 Session 27은 sensing and ranging technologies와 관련된 총 4편의 논문이 발표되었으며, 이들 논문에서는 SPAD 기반 이미지 센서, LiDAR를 위한 SPAD direct ToF 센서, 그리고 초소형 금속저항 기반 온도 센서 등 다양한 센싱 기술이 소개되었다. 그 중에서도 가중치 기반 포톤 계수와 연속 이벤트 검출기를 결합해 단일 촬영으로 156 dB 초고역 동작범위와 LED 플리커 억제를 구현한 2.1Mpixel SPAD 이미지 센서, 그리고 등가 시간 샘플링과 온 칩 에코 추출로 데이터를 대폭 축소하면서 25M points/s를 달성한 SPAD Direct ToF LiDAR 센서에 초점을 맞추어 살펴보고자 한다.

#27-1 본 논문은 자동차 환경에서 요구되는 차세대 이미지 센서의 한계를 극복하고자, 2/3-inch 2.1Mpixel 해상도의 3D 적층 SPAD 이미지 센서를 제안하였다. 자율주행 및 운전자 보조 시스템 (ADAS) 환경에서는 초저조도와 고휘도의 상황이 동시에 존재할 수 있으며, 이때 기존 CMOS 이미지 센서 (CIS)는 LED 플리커에 취약하고 넓은 동작범위 (HDR)를 위해 다중 노출 방식을 사용하므로 SNR 불균형과 색 재현 문제가 발생하는 한계가 있었다. 이러한 문제를 해결하기 위해, 본 연구에서는 weighted photon counting (WPC) 기법을 도입하여 단일 촬영(single-shot)으로 156dB의 초고역 동작범위를 확보하고, 동시에 LED 플리커 억제 기능을 구현하였다.

아래 그림 9는 WPC 동작 원리를 설명하는 그림이다. 한 프레임을 다수의 충전 주기로 나눈 뒤, 첫 번째 광자가 도착하는 시간에 따라 가중치(1~8)를 부여하여 누적 계수하는 방식이다. 이로써 밝은 장면에서는 포화되지 않고, 어두운 장면에서도 충분한 신호를 확보해 단일 촬영에서 156dB HDR을 구현한다. 그러나 저조도 환경에서는 포톤이 드물게 도착한다. 이때는 아래 그림 10과 같이 consecutive event detector (CED)가 WPC를 자동으로 비활성화하여 일반 포톤 카운팅으로 전환, 저조도에서의 SNR 저하를 방지한다.



[그림 9] Weighted photon counting (WPC) operation principle

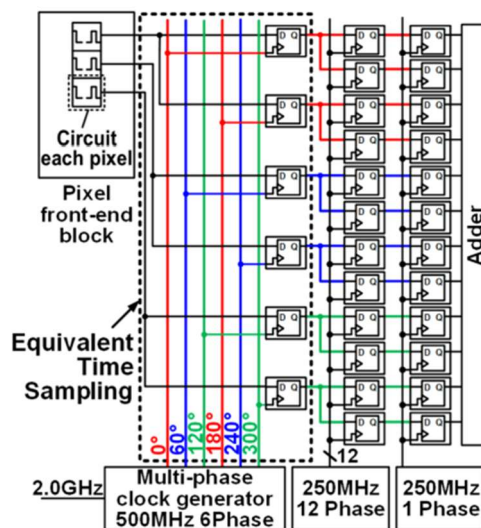


[그림 10] Pixel circuit diagram and conceptual view of consecutive event detector

제안된 센서는 픽셀 단위 글로벌 셔터와 intra-frame nondestructive 판독을 지원해, 짧은 노출 (1ms)과 긴 노출 (25ms)을 동시에 획득함으로써 모션 블러 최소화와 저조도 성능 확보를 동시에 달성한다. 실험 결과, 0.1 lux 환경에서 최대 120m 거리 보행자 인식이 가능했고, 130Hz LED 점멸 환경에서도 플리커 억제가 검증되었다. 따라서 본 연구는 WPC+CDE 기반 단일 촬영 HDR과 플리커 억제라는 새로운 접근을 제시하여, 자율주행 및 ADAS 환경에서 기존 CIS 기반 센서를 대체할 수 있는 가능성을 보여준다.

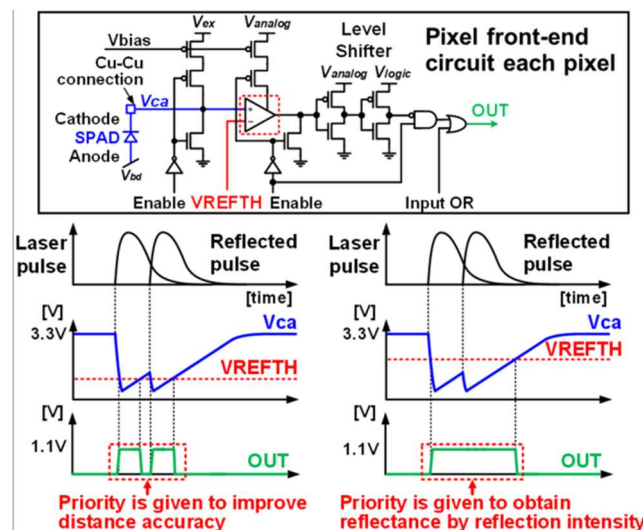
#27-2 본 논문은 장거리이면서 시야가 넓은 자동차용 light detection and ranging (LiDAR) 요구를 만족시키기 위해, 후면 조사 (BSI) 방식의 SPAD 픽셀을 사용한 Direct Time-of-Flight (Direct ToF) 심도 센서를 제안한다. 기존 LiDAR는 낮은 포인트 레이트와 샘플링

속도를 높이면 데이터가 과도하게 늘어나는 문제가 있었는데, 본 연구는 센서 내부에 등가 3 GHz 수준의 시간 해상도를 제공하는 equivalent time sampling (ETS)와, 센서 안에서 즉시 데이터를 줄여 주는 파이프라인을 결합해 이 문제를 해결했다. 아래 그림 11은 multi-phase 사용시 ETS의 다이어그램을 보여주고 있다. 500 MHz에서 여섯 개의 위상을 사용해 같은 신호를 서로 다른 순간에 샘플링하고, 이렇게 얻은 결과를 조합하여 3 GHz에 해당하는 세밀한 시간 분해능을 만든다. 이후 내부 동작 부담을 낮추기 위해 250 MHz에서 열두개의 위상을 거쳐 하나의 위상으로 재정렬한다.



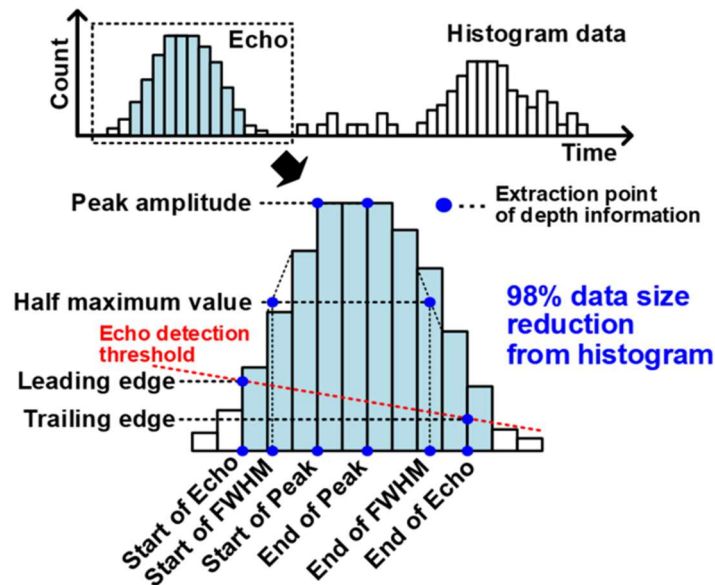
[그림 11] Equivalent time sampling circuit diagram using multi-phase clocks

아래 그림 12는 픽셀 아래에 배치된 차동 비교기와 임계값 조절 기능을 보여 준다. SPAD의 cathode를 비교기에 직접 연결해 신호를 뽑아 내고, 임계값을 조절하여 상황에 따라 거리 정확도를 우선할지, 아니면 반사 강도 정보를 우선할지 선택할 수 있도록 했다.



[그림 12] Operation waveform during photon detection in two different usages

또한 1×3 수직 SPAD를 매크로 픽셀로 묶어(위상 샘플 합산) SRAM 히스토그램에 누적한다. 아래 그림 13은 전용 에코 처리 회로가 히스토그램에서 반사파의 피크와 시간 정보를 골라 내어 깊이만 출력하기 때문에, 원래의 히스토그램과 비교하면 약 98 퍼센트까지 데이터가 줄어드는 것을 보여준다. 파이프라인 제어는 약 19.6 μs 간격의 슬롯으로 동작하여, 샘플링·저장·추출·출력이 동시에 진행되며, 그 결과 초당 20프레임에서 초당 2천5백만 포인트의 출력을 구현했다.



[그림 13] Depth extraction from echo histograms and timestamps

칩은 2-Die Stacked 구조(상단 BSI SPAD 어레이, 하단 신호처리 IC)로 제작되었고, SPAD 픽셀은 10 μm 피치 105×1572 배열로 구성된다. 유효 매크로픽셀 520개를 통해 수평 120°·수직 0.05°의 분해능을 지원하며, 20 fps에서 초당 25 M pts/s의 3D 포인트 클라우드를 생성한다. 실험 결과, 반사율 10%와 일조 120 klux 조건에서 300 m까지 탐지 가능하고, 250 m 거리의 높이 25 cm 물체도 분해해 냈다. 따라서 본 센서는 자율주행 차량의 안정적 원거리 감지에 최적화된 차세대 LiDAR 솔루션으로 평가된다.

저자정보



이윤호 박사과정 대학원생

- 소속 : 고려대학교
- 연구분야 : Power management ICs
- 이메일 : uknow@korea.ac.kr
- 홈페이지 : <https://sites.google.com/site/kubasiclab/home>

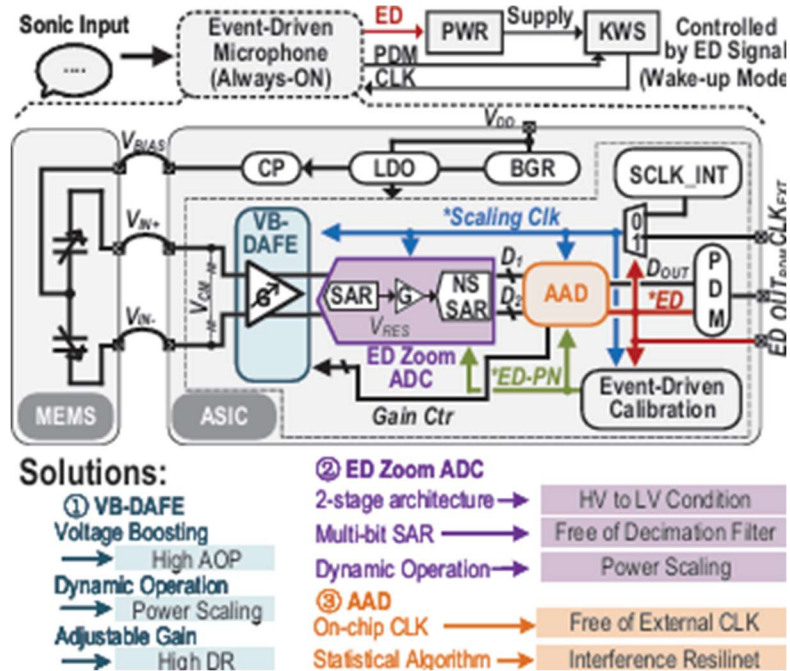
2025 IEEE VLSI Review

고려대학교 전기및전자공학부 박사과정 안재웅

Session 20 Acoustic Sensors

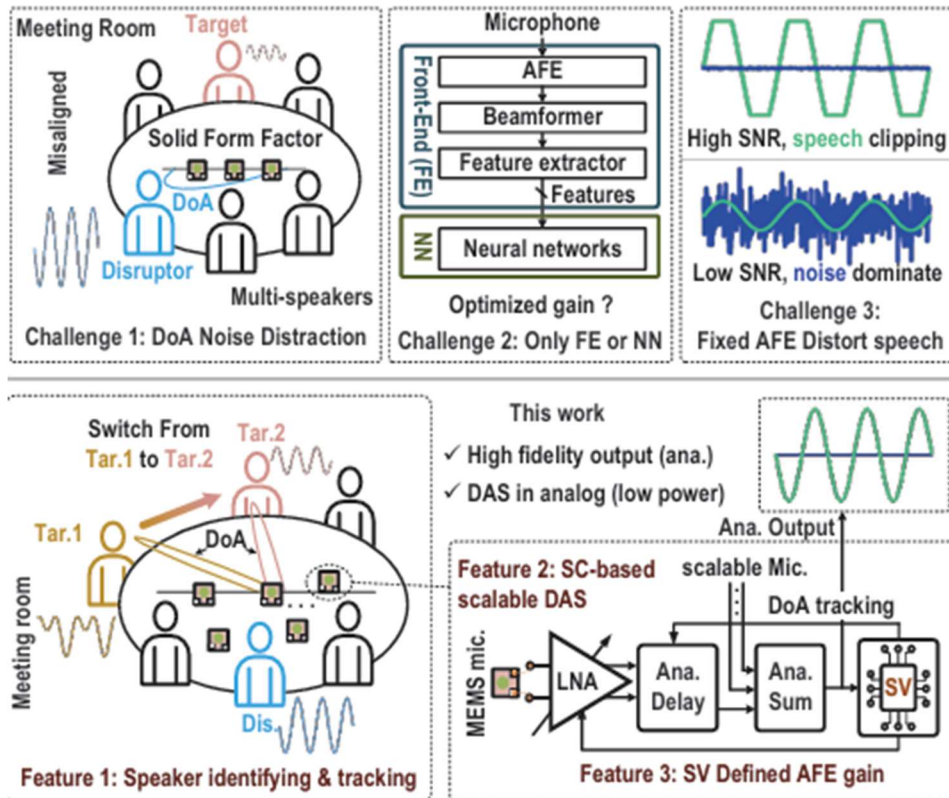
이번 2025 VLSI의 Session 20에서는 acoustic sensors라는 주제로 총 5편의 논문이 발표되었다. 이 중 #20-1은 shunt-resistor-based current sensing에 관한 내용이며, #20-2은 internal acoustic activity detection에 관한 내용이다. 마지막으로 #20-3은 스마트 회의실 환경에서의 automatic speaker tracking을 다룬다.

#20-1 High-linearity shunt-resistor-based current sensing은 스피커의 비이상성을 보정하기 위해 사용된다. 다만 shunt resistor의 발열 때문에 on-chip만으로는 선형도가 깨지기 쉽고, 그래서 off-chip 저항이나 특수 공정 저항을 쓰면 비용·부피가 커진다. 또 Class-D의 PWM 스위칭이 전압 글리치와 왜곡을 유발하므로 이 역시 해결해야 한다. 본 논문은 shunt resistor가 부하 전류를 전압으로 변환하고, 이를 Floating Gm (FGm)으로 다시 전류로 바꾼 뒤, current buffer를 거쳐 TIA로 보내 최종 출력 전압을 만드는 구조를 제안한다. Shunt resistor는 diffusion 저항으로 구현하고, depletion 효과를 줄이기 위해 complementary body connection을 썼다. 또한 shunt의 self-heating으로 FGm 내부 저항과의 온도·선형 매칭이 틀어지는 문제에 대해, FGm 저항을 여러 sub-unit으로 분산 배치해 열 매칭을 잡았다. 측정 결과, HD3는 2 A@1 kHz에서 20 dB 감소했고, DR은 89.1 dB(A-weighted)를 달성했다. THD+N은 최고 -87.2 dB까지 개선되었으며, 기존 대비 1 kHz와 6 kHz에서 각각 17.1 dB/28.2 dB 더 낮았다. PWM 공통모드 억제 14.4 V 스윙에서 최대 2 MHz까지 가능해 기존 125 kHz 대비 16배 확장되었고, 전류 범위는 ± 6 A를 지원한다.



[그림 2] #20-2에서 제시한 전체 시스템

#20-3 논문은 smart meeting room에서 말하는 사람의 목소리를 추적하고 interferences를 제거하는 automatic speaker tracking에 관한 것이다. 기존의 power detector (PD)-based direction of arrival (DoA)나 AFE gain control은 노이즈와 disruptor voice에 취약하다. 본 논문은 speaker verification (SV)와 CNN을 결합하여 disruptor-voice noise 환경에서도 동작 가능하도록 했다. 이때 delay-and-sum (DAS) 빔포머가 채널들의 delay를 정렬·합산해 isolated voice를 생성하는데, high-bit-width DFF 대신 capacitors를 사용하여 power와 area를 크게 줄였다. 또한 SV 모듈은 4-layer CNN으로 time domain에서 52-dimensional embedded speech feature를 추출하며, 첫 번째 layer는 analog-based로 구성해 feature-extraction power를 1.48× 줄였다. 아울러 SV-score-based optimization 알고리즘이 AFE gain을 조절해 SNR을 높여, input SNR이 낮아도 output SNR을 +1.4 dB 개선했다. 측정 결과 SNR은 2.7 dB에서 9.1 dB로 향상되었고, system-level power는 5.2 μW로 낮았다. 또한 기존 논문들과 비교했을 때 약 500× 낮은 power로 동급 성능을 보였다.



[그림 3] 기존의 tracking system의 문제점과 제안하는 기술들.

저자정보



안재웅 박사과정 대학원생

- 소속 : 고려대학교
- 연구분야 : 디스플레이 드라이버 / 픽셀 보상 / 터치 센서
- 이메일 : ajw1104@korea.ac.kr
- 홈페이지 : <https://sites.google.com/site/kubasiclab/home>

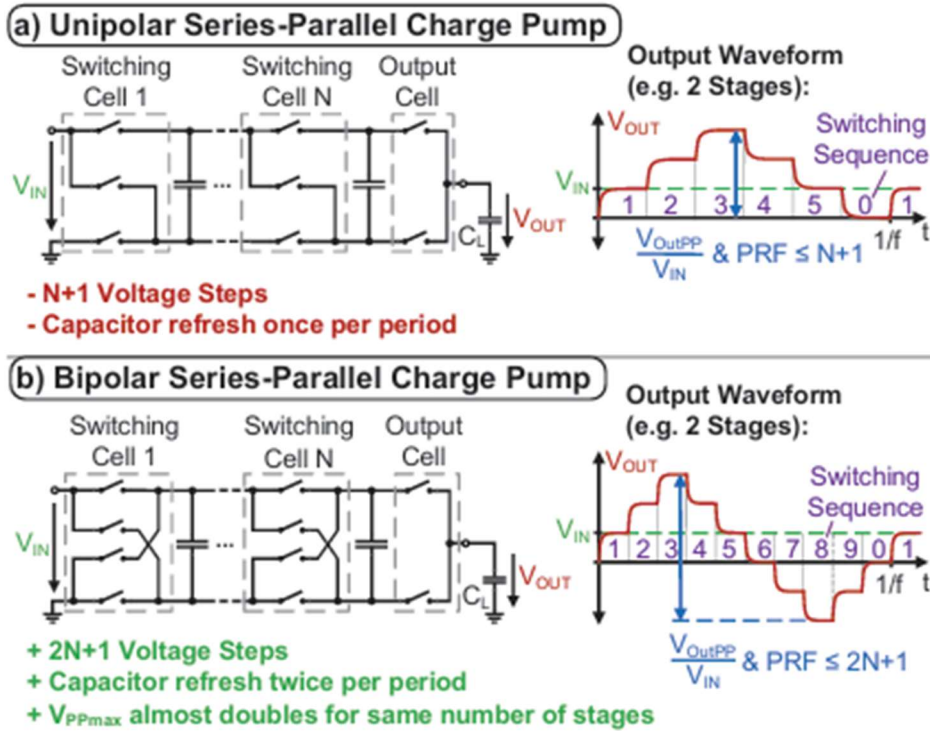
2025 IEEE VLSI Review

고려대학교 전기및전자공학부 박사과정 안재웅

Session 31 MEMS and Display

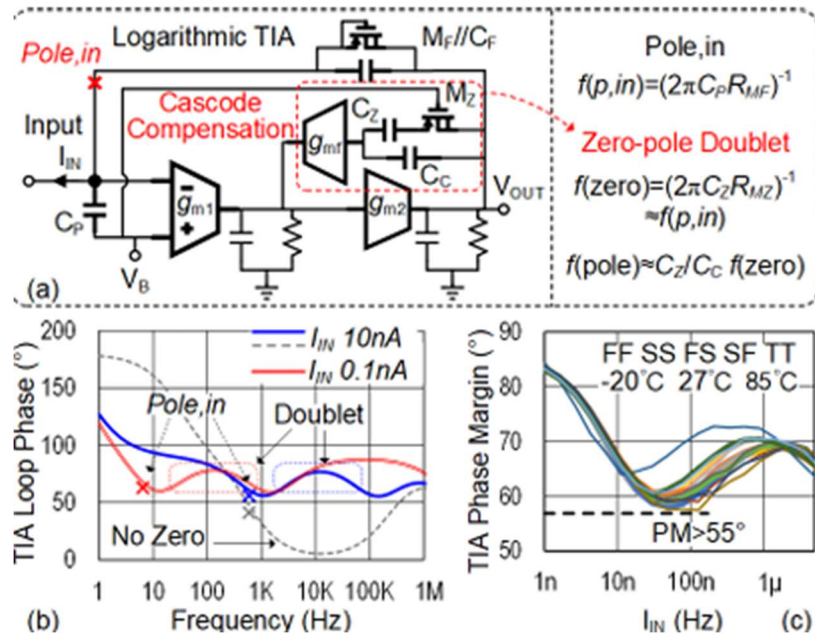
이번 2025 VLSI의 Session 31에서는 MEMS and Display 라는 주제로 총 5편의 논문이 발표되었다. 이 중 #31-1은 switched-capacitor MEMS driver를 제안하였고, #31-3는 디스플레이 아래에서 빛을 센싱하는 회로이며 마지막으로 #31-4는 디스플레이 노이즈 저감을 위한 터치 센서를 발표 하였다.

#31-1 논문은 Piezoelectric Micromachined Ultrasonic Transducer(PMUT)와 같은 초음파 MEMS의 용량성 부하를 효율적으로 구동하기 위한 드라이버를 제안한다. PMUT는 본질적으로 커패시터성(load capacitance)이라 충·방전 과정에서 손실이 발생하기 쉽다. 이를 줄이기 위해 저자는 기존 단극성(unipolar) series-parallel charge pump(SP-CP)의 한계를 보완한 양극성(bipolar) SP-CP를 도입한다. 핵심 아이디어는 각 스테이지의 flying capacitor를 한 주기 내에서 병렬→직렬→병렬→반대 극성 직렬로 재구성하여, 동일 스테이지 수에서 양·음 단일단($\pm$) 출력을 모두 생성하고 전하를 회수(recycling)한다. 그 결과 한 주기 내 전압 스텝 수가 $N+1$ (단극성)에서 $2N+1$ (양극성)로 늘어나고, 이에 따라 power reduction factor(PRF)의 상한이 사실상 두 배로 확장된다. 실험 결과에서는 동일한 active stage 수로 비교하면, 제안한 양극성 구조는 VCR이 약 84%, PRF가 약 93% 증가했다. 또한 같은 개수의 전압 스텝을 기준으로 보면 VCR은 약 6%, PRF는 약 12% 향상되었다. 구조적 측면에서도 이점이 있다. 같은 스텝 수를 만들 때 단극성 대비 절반의 스테이지만으로 목표 V_{PP} 에 도달할 수 있어, 필요한 flying capacitor 수가 줄고 면적·손실을 함께 낮출 수 있다.



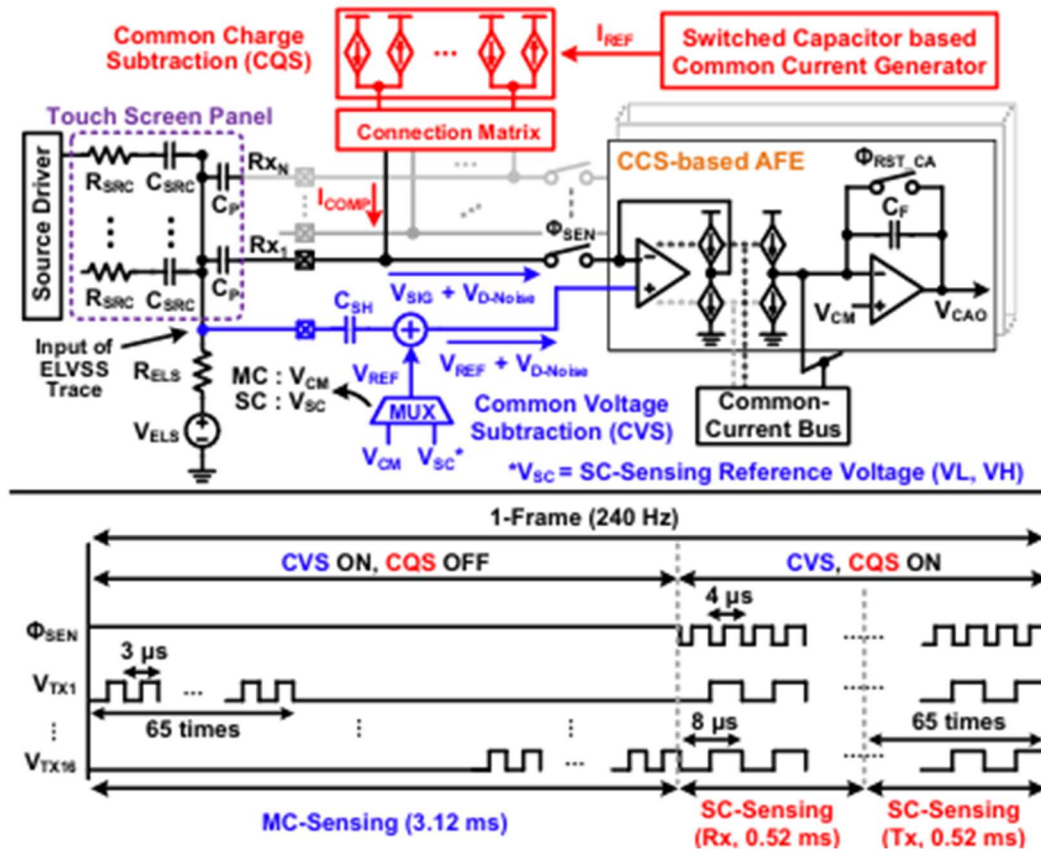
[그림 1] #31-1에서 제시한 Bipolar SP-CP와 기존의 Unipolar SP-CP

#31-3 논문은 디스플레이 아래에 두는 ambient light sensor(ALS)에 관한 내용이다. 최신 스마트폰은 자동 밝기 조절을 위해 ALS를 화면 아래에 배치한다. 하지만 sub-pA까지 측정해야 하고, 짧은 시간 안에 센싱이 돼야 한다. sub-pA 측정을 위해서는 in-band 노이즈 뿐 아니라 고주파 대역 노이즈도 처리해야 한다. 보통은 이를 위해 charge amp의 전력을 높이지만, 이 논문은 대신 LPF를 배치해 작은 전력으로도 노이즈를 효과적으로 처리했다. 또한 피드백 다이오드에는 큰 기생 커패시터가 존재해 안정도가 떨어지고 센싱 시간이 느려질 수 있다. 이를 해결하기 위해 2-stage 앰프에 auto-tracking zero 보상기를 적용해, 온도나 공정 코너와 무관하게 위상여유 55도 이상을 유지했다. 이러한 기술을 통해 FoM-DR 206.3 dB, DR 146 dB, 0.36 pAPP의 분해능을 달성했다. 기존 논문과 비교해 pA-레벨의 전류 센싱 민감도가 높고, 노이즈·read-out 시간·전력 효율에서도 큰 기생 커패시터 환경에서 가장 좋은 결과를 보였다.



[그림 2] (a) 제안하는 auto-tracking zero frequency compensation (b) loop phase response (c) input amplitude, process, corner에 따른 phase margin.

#31-4 논문은 flexible on-cell touch OLED 디스플레이에 쓰이는 터치 센서 IC를 다룬다. 디스플레이의 발달로 기생 커패시턴스가 커지면서, 구동 시 발생하는 디스플레이 노이즈가 터치 센싱에 더 크게 영향을 준다. 이를 해결하기 위해 ELVSS 흔들림을 AC 커플링 기반의 differential sensing으로 제거하는 기법을 제안한다. 이 방식은 기존 RGN과 달리 고주파 노이즈까지 억제할 수 있다. 또한 self-capacitance sensing에서 기존 BCC와 달리 pre-charging을 이용해 여러 단계로 기생 커패시턴스를 순차 충전·보상하여 동적 범위 (dynamic range)를 확장했다. 그 결과, dynamic range를 500 mV에서 1 V로 확대하고 SNR을 6 dB 개선했다. 더불어 AC 커플링 방식 적용으로 mutual-capacitance와 self-capacitance 모드에서 SNR이 각각 6.33 dB, 6.72 dB 개선되었다. 이러한 기법을 통해 기존 연구 대비 더 큰 기생 커패시턴스를 구동할 수 있으며, 디스플레이 노이즈에 견고한 터치 센서 IC를 구현했다.



[그림 3] #31-4 논문에서 제안한 터치 센서 IC 구조

저자정보



안재웅 박사과정 대학원생

- 소속 : 고려대학교
- 연구분야 : 디스플레이 드라이버 / 픽셀 보상 / 터치 센서
- 이메일 : ajw1104@korea.ac.kr
- 홈페이지 : <https://sites.google.com/site/kubasiclab/home>