

A-SSCC 2024 Review

고려대학교 전기및전자공학부 박사과정 안재웅

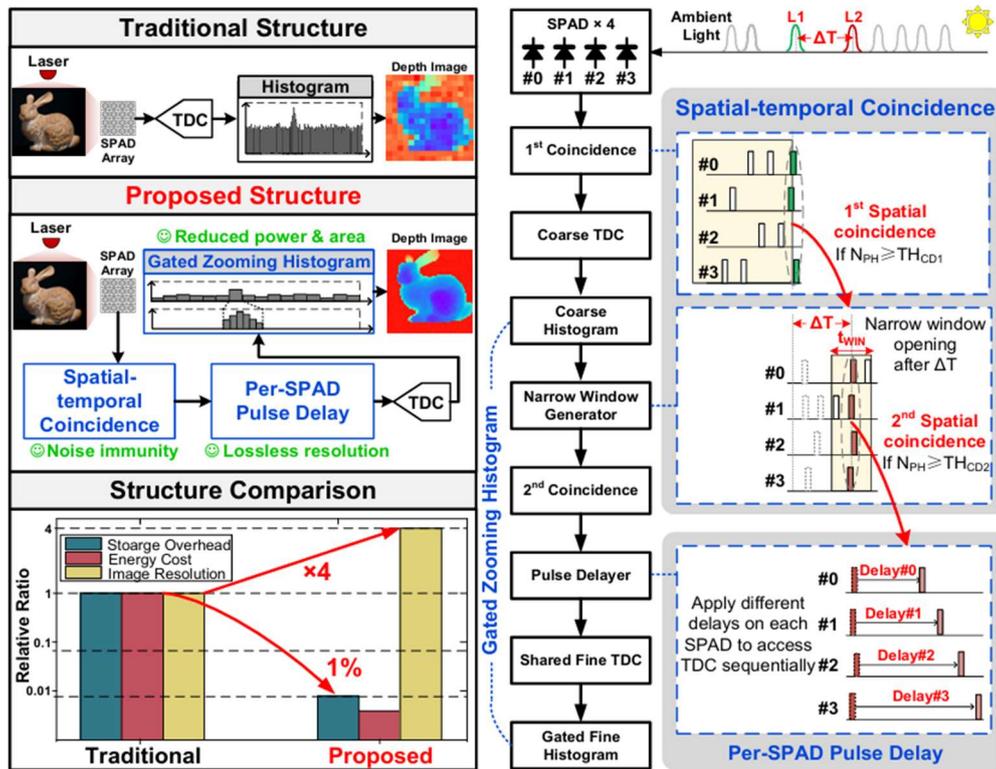
Session 24 Advanced Sensor and Imaging Technologies

이번 2024 IEEE ASSCC의 Session 24는 Advanced Sensor and Imaging Technologies 라는 주제로 총 4편의 논문이 발표되었다. SPAD LiDAR Sensor, Smart Ring에 적용되는 PPG Acquisition Circuit, CMOS Imager의 주제로 발표가 되었으며, 이번 리뷰에서는 그 중 두 가지 주제를 다룰 예정이다.

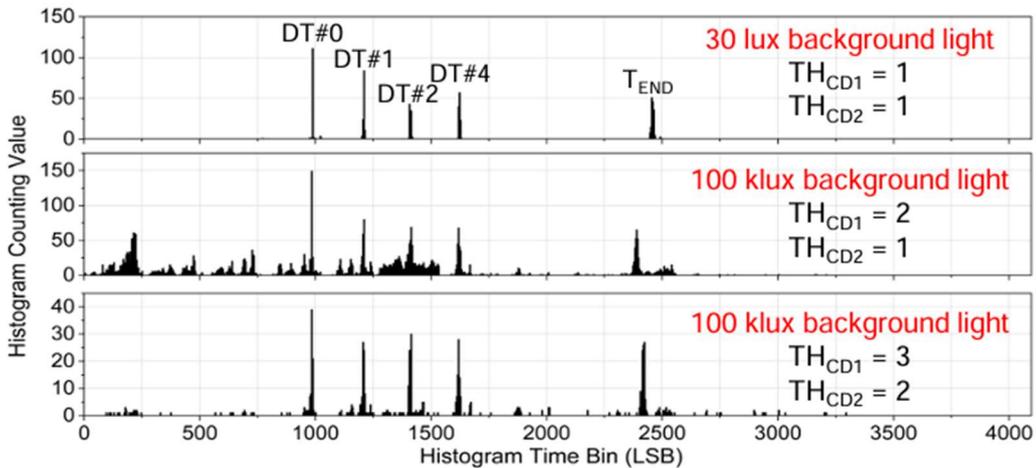
#24-1 Single-photon Avalanche Diode (SPAD)-based LiDAR 기술은 고급 운전자 보조 시스템(ADAS)에서 주로 활용되며, 레이저로부터 얻은 거리 정보를 추출하기 위해 background light (BGL) 데이터를 효과적으로 필터링해야 한다. 그러나 SPAD 픽셀 배열의 증가로 인해 대량의 데이터 처리, 저장 및 전송 과정에서 전력 소모와 레이아웃 크기 증가 문제가 발생한다. 본 논문에서는 이를 해결하기 위해 [그림 1]과 같이 새로운 detection scheme을 제안하였다.

제안된 방식은 ΔT 간격으로 두 번의 레이저 펄스를 방출하고, 각각 coarse TDC와 fine TDC를 활용해 데이터를 처리한다. 마이크로 픽셀은 4개의 SPAD로 구성되며, 첫 번째 레이저 펄스를 통해 coarse time 데이터를 추출하고, 이를 저장 및 peak value와 비교한다. Peak value를 초과한다면, 두 번째 레이저 펄스는 좁은 time window (t_{win})을 통해 수신된다. 이 과정에서 각 SPAD의 데이터는 다양한 delay를 적용받아 단일 fine TDC에 순차적으로 입력된다. 이를 통해 BGL을 효과적으로 제거하면서 storage와 cost를 줄일 수 있고 또한 기존의 coincidence 기법의 해상도 문제를 극복할 수 있었다.

실험 결과, 본 논문은 100 klux 환경에서 98.3%의 BGL 데이터 압축률을 달성하고, 픽셀 당 14.6 μW 의 저전력 소모를 확인하였다. 또한, [그림 2]와 같이 pixel histogram을 통해 100klux의 상황에서도 효과적으로 background light가 제거됨을 증명하였다.



[그림 1] 제안하는 detection scheme



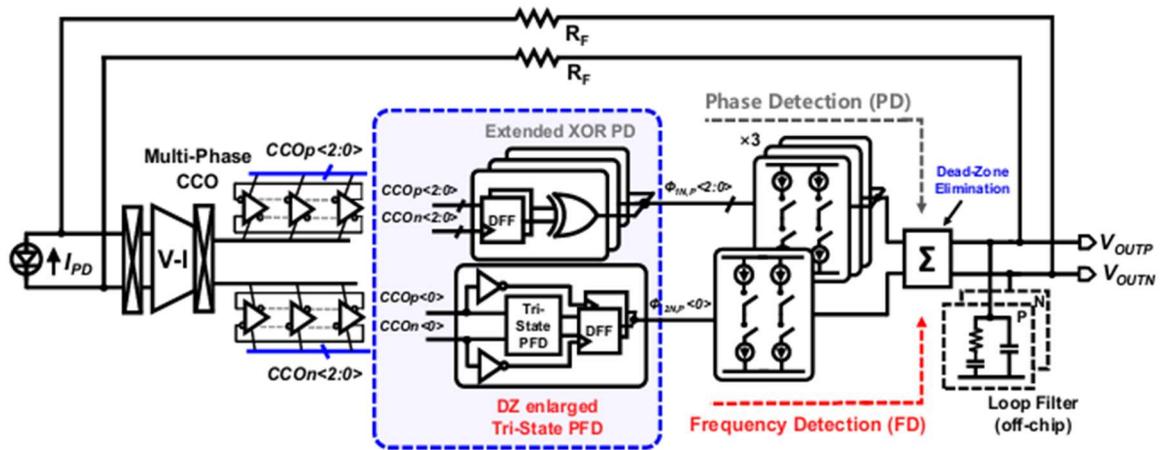
[그림 2] 4개의 SPAD를 이용하여 측정된 pixel histogram

#24-3 Photoplethysmography (PPG)는 심박수와 혈중 산소 포화도를 판단하기 위하여 사용되는 non-invasive biological signal detection 기술이다. 그러나 기존의 기술들은 사용자의 불편함, 비용, 유연하지 않은 구조 등으로 인해 한계가 있었다. 이에 본 논문에서는 TFT 회로를 이용하여 패키징 문제와 유연성 문제를 해결한 fully flexible ring을 제안하였다. 또한 TFT의 성능 저하 문제점을 해결하기 위하여 fully VCO 기반 구조와 dead-zone free TIA 구조를 사용하였다.

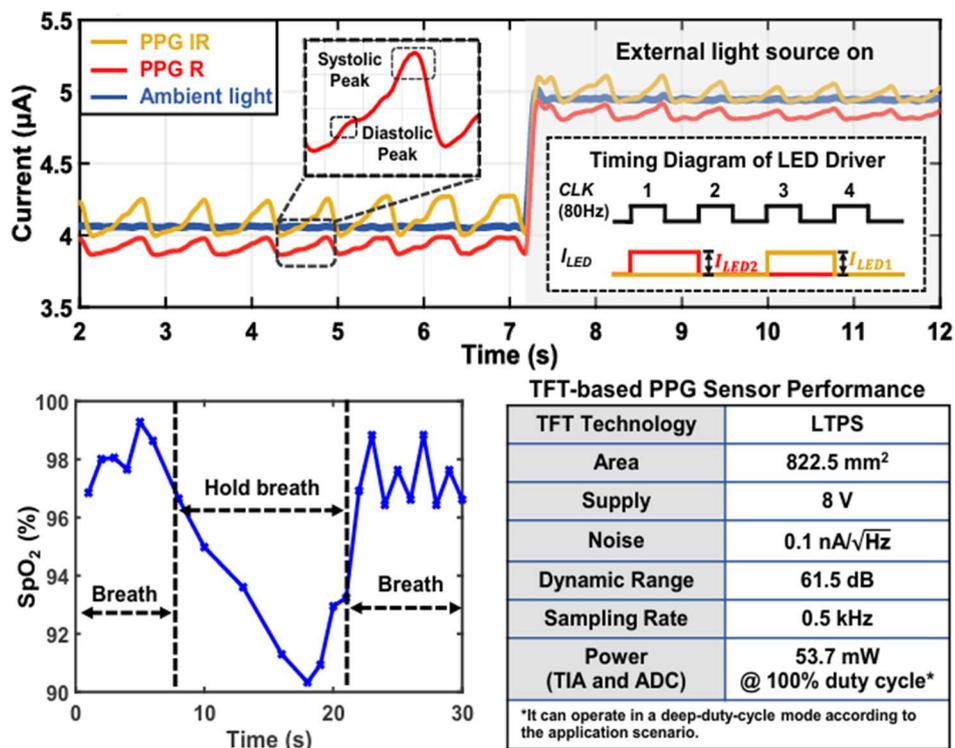
제안된 VCO-TIA는 [그림 3]과 같이 VCO, PFD, charge pump (CP), 그리고 loop filter (LP)로

구성되어 있다. VCO를 time-domain integrator로 사용하여 Infinite DC gain을 얻을 수 있으며, PFD에서는 제안된 기술을 통해 dead zone을 제거하여 nonlinearity와 noise를 제거할 수 있었다. 또한 제안한 0-1 MASH ADC를 통해 input nonlinear error를 제거하고 noise level을 줄일 수 있었다.

실험 결과, PPG 신호는 주변 광 조건에 따라 차이를 보였으며, SpO₂ 값이 호흡에 따라 변화하는 것이 [그림 4]를 통해 확인되었다.



[그림 3] 제안된 VCO-TIA 회로 다이어그램



[그림 4] PPG, SpO₂ 그리고 TFT-based PPG sensor 성능 측정 결과

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>

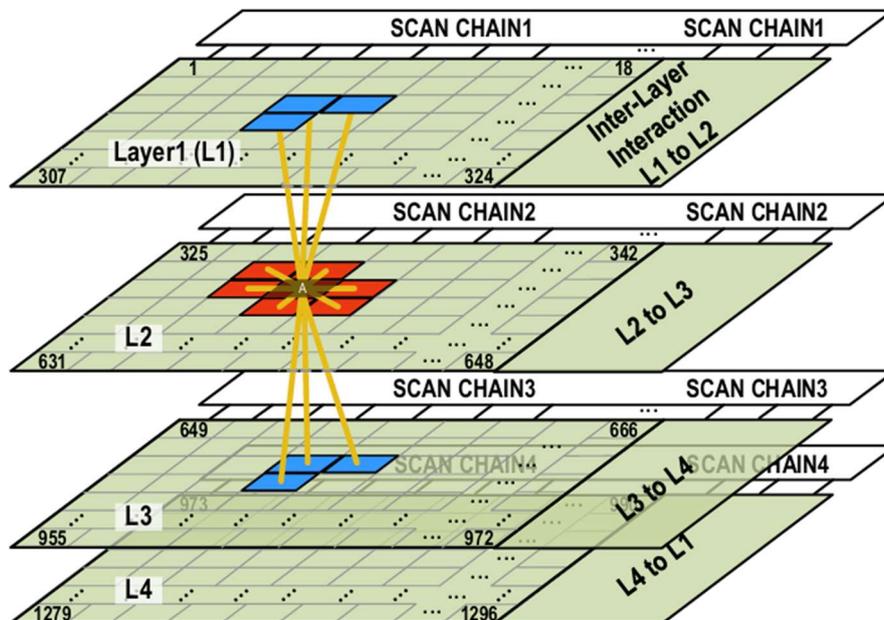
A-SSCC 2024 Review

포항공과대학교 반도체대학원 박사과정 박은빈

Session 20 Innovative Computing and Circuit Design

이번 2024 IEEE A-SSCC 학회의 Session 20은 Innovative Computing and Circuit Design라는 주제로 총 5편의 논문이 발표되었다. 이 세션에서는 고성능 컴퓨팅 및 회로 설계에서 혁신적인 접근법을 통해 다양한 응용 시나리오에서의 효율성과 정확도를 향상시키는 데 초점을 맞추었다.

#20-2 논문에서는 3D 아날로그 Ising 머신(CAIM)을 설계하여 조합 최적화 문제를 해결하기 위한 새로운 접근 방식을 제안하였다. 기존 2D 또는 2.5D Ising 머신이 제한된 상호작용 자유도와 크기 확장성 문제를 가지고 있었던 반면, 본 논문은 Hexagonal Close-Packed(HCP) 구조를 채택하여 스핀 당 12개의 상호작용 자유도를 제공하며, 기존 구조 대비 두 배 이상의 연결성을 확보하였다. 또한, HCP 구조는 상호작용 간 배선을 최적화하여 층 간 복잡성을 크게 줄였으며, 4층 HCP 구조의 1296 스핀 레이아웃을 구현함으로써 확장 가능성과 설계 효율성을 입증하였다.



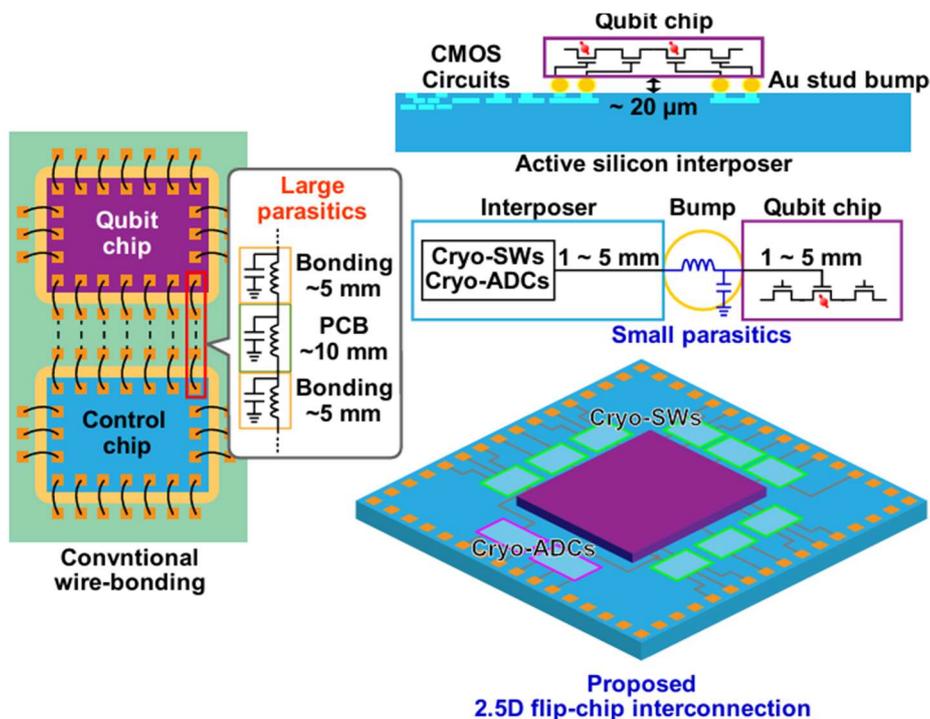
[그림 3] 4층 구성의 3차원 HCP 구조로 구성된 제안된 CAIM

본 논문은 아날로그 스핀 코어의 안정성을 확보하기 위해 Supply-And-Bulk Injection Locking(SABIL) 기술을 도입하였다. 기존 주입 잠금 방식(TIL)이 상호작용에 따른 삼중 안

정성 문제를 유발하여 수렴 속도가 느려지는 반면, SABIL은 공급 전압 및 벌크 주입을 활용하여 스핀 코어가 빠르고 안정적으로 수렴할 수 있도록 지원한다. 이를 통해 수렴 주기를 5 사이클로 단축하였으며, 기존 TIL 대비 58.3%의 개선된 수렴 속도를 달성하였다. 또한, SABIL은 기존 아날로그 Ising 머신 대비 8.5배 넓은 풀인 범위를 제공하여 주파수 변동에 강건한 특성을 나타낸다.

측정 결과, 본 3D Ising 머신은 최대 $18 \times 18 \times 4$ 스핀 문제를 효과적으로 해결하며, 조합 최적화 문제인 max-cut 문제에서 높은 정확도와 에너지 효율을 입증하였다. 특히, SABIL을 활용한 경우 3D 문제를 빠르고 정확하게 해결할 수 있었으며, 실험적으로 평균 에너지 최소화 정확도가 98%에 도달함을 확인하였다. 본 논문은 3D 구조와 안정적인 아날로그 스핀 설계를 결합하여 기존 Ising 머신의 한계를 극복하였으며, 조합 최적화 및 기타 NP-난해 문제 해결을 위한 하드웨어 설계에서 중요한 진전을 보여준다.

#20-3 논문에서는 극저온 환경에서 스핀 큐비트 제어를 위한 초고속 펄스 셰이퍼를 제안하였다. 본 연구는 스핀 큐비트 제어를 위한 1ns 시간 해상도의 Cryo-ADC와 Cryo-SW를 포함하는 2.5D 실리콘 인터포저 구조를 설계하였다. 기존의 외부 제어 시스템이 긴 배선으로 인해 신호 무결성과 열 유입 문제를 겪었던 것과 달리, 본 논문의 설계는 큐비트와의 거리를 1mm 이내로 줄여 신호 정확도와 열 관리 성능을 크게 향상시켰다. 이를 통해 고속 게이트 펄스 제어가 가능해졌으며, 양자 컴퓨팅의 확장성 문제를 해결하는 데 기여하였다.



[그림 4] 제안된 cryogenic 펄스 셰이퍼를 포함한 2.5D 실리콘 인터포저 구조

Cryo-ADC는 극저온 환경에서 낮은 전력 소비와 고해상도를 동시에 달성하도록 설계되었다. 3.3V 전압에서 동작하는 완전 동적 SAR 구조를 채택하여 평균 35 μ W의 전력으로 11비트 해상도를 제공하며, 50MHz의 유효 대역폭을 지원한다. 또한, 동적 샘플링 및 부트스트랩 스위치를 활용한 설계를 통해 기존 구조 대비 입력 정밀도를 83% 개선하였다. Cryo-SW는 큐비트와의 신호 전송 거리를 최소화하여 신호 감쇠를 줄였으며, 이를 통해 2-큐비트 연산에서 요구되는 10mV 이하의 제어 정확도를 만족시켰다.

측정 결과, 본 펄스 셰이퍼는 100mK 이하의 온도에서 안정적으로 작동하며, 외부 펄스 제너레이터 대비 신호 감쇠를 0.3dB로 줄이고, 전압 변동성을 6.5mVpp(1.8mVrms)로 최소화하였다. 이를 통해 2-큐비트 연산에서 필요한 광대역 신호와 높은 정확도를 구현하였으며, 양자 컴퓨팅 환경에서 큐비트 제어의 효율성과 신뢰성을 높였다. 본 논문은 극저온 회로 설계와 양자 컴퓨팅의 융합을 통해 스핀 큐비트 제어 기술의 새로운 기준을 제시하며, 향후 양자 프로세서의 대규모 스케일링 가능성을 확대하는 데 기여할 것으로 기대된다.

저자정보



박은빈 박사과정 대학원생

- 소속 : 포항공과대학교
- 연구분야 : HW설계 및 디버깅 최적화
- 이메일 : eunbin@postech.ac.kr
- 홈페이지 : <https://sites.google.com/view/epiclab/member/ebpark>

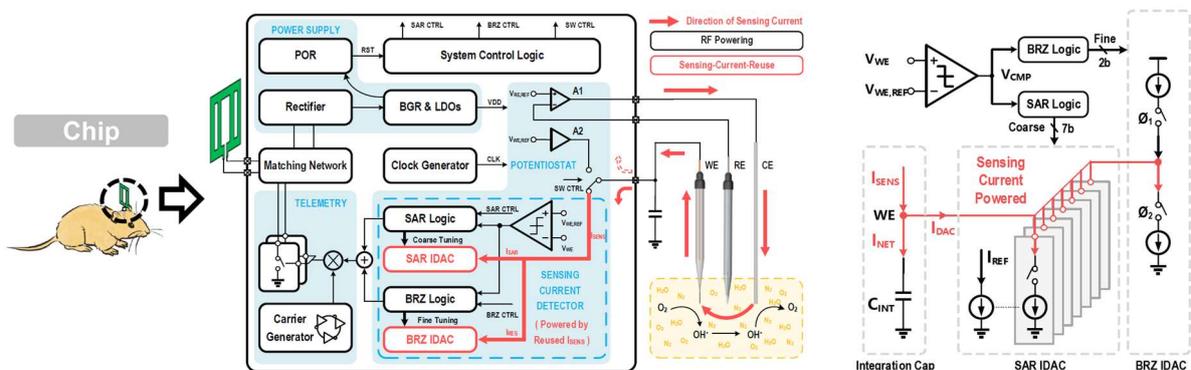
A-SSCC 2024 Review

KAIST 전기및전자공학부 박사과정 윤기찬

Session 4 Emerging Wireless and Battery-Free Systems

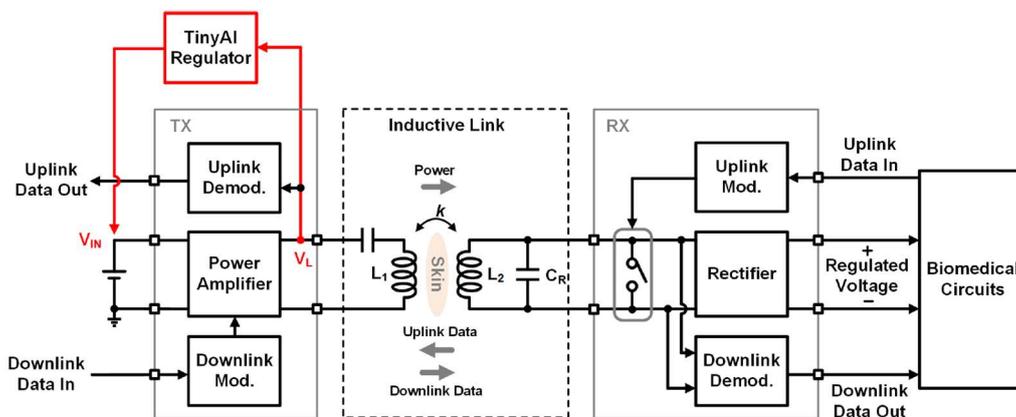
이번 2024 IEEE A-SSCC의 Session 4는 Emerging Wireless and Battery-Free Systems이라는 주제로 총 4편의 논문이 발표되었다. 이 세션에서는 무선 전력 전송 및 데이터 전송 회로가 포함된 센서 인터페이스 시스템에 관련된 논문이 2편, 새로운 통신 방식 제안을 주제로 2편의 논문이 연구 결과를 제시하였다. 본 review에서는 그 중 4-1, 4-2, 4-3을 리뷰하고자 한다.

#4-1 본 논문은 Zhejiang University에서 발표한 연구로, 외상성 뇌손상 등과 같은 뇌 질환 치료에 도움을 주는 뇌 산소 모니터링 (Cerebral oxygen monitoring)인 PO₂ 센싱 시스템을 소개한다. 무선동작 및 장기간 동안 안정적인 사용을 위해, 전력 소모를 크게 줄여야 하고, 이를 위한 저전력 센싱 시스템 및 무선 전력 전송 및 데이터 전송 시스템을 제안한다. 기존의 potentiostat을 활용한 센싱 시스템은 TIA나 전류 미러, ADC 등 추가적인 전력 소모가 필요한 회로를 필요로 한다. 본 논문에서는 센싱 전류를 추가적인 전력 소모 없이, sinking 전류원을 사용하는 IDAC으로 디지털화 하는 기술을 제안하였다. 증폭단이 없어짐으로써 발생하는 해상도 문제는 bipolar residue zoom-in IDAC을 통해 해결하였다. 결과적으로 PO₂ 센싱 회로가 포함된 시스템 중 가장 낮은 전력 소모인 25 μ W를 달성하였으며, 해상도도 0.028%로 2배 이상 좋아졌다. 또한, backscattering 방식을 활용한 434MHz의 주파수를 가지는 passive TX를 통해 무선 전력 전송 및 데이터 전송 회로를 구현하여, 저전력으로 2m 거리에서 통신이 가능한 시스템을 구성하였다.



[그림 1] 무선 뇌 산소 모니터링 시스템 및 제안된 potentiostat

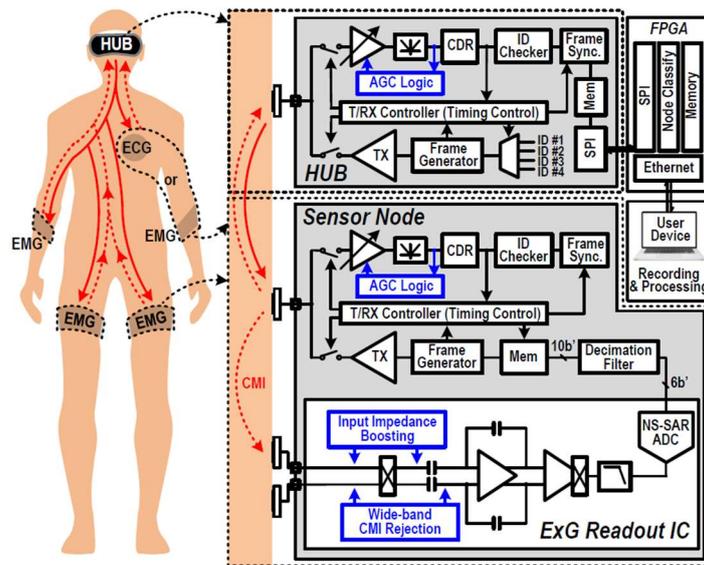
#4-2 본 논문은 Shanghai Jiao Tong University에서 발표한 연구로, WPDT 시스템에서 RX regulation을 위한 새로운 기술 및 개선된 데이터 전송 방식을 제안하였다. 기존에는 RX에 local loop를 구성하거나, TX로 uplink를 통해 regulation을 진행하였다. 하지만, 전력 효율을 감소시키거나, regulation 속도가 제한된다는 단점을 각각 가지고 있었다. 이를 해결하기 위해, 본 논문에서는 TX에 local loop를 구성하였다. TX의 coil에 걸리는 전압을 센싱 및 neural network를 training하여, RX의 load 상태를 예측하고 TX의 V_{IN} 을 조절하여 전력 효율을 개선하였다. 또한, 데이터 전송을 개선하기 위하여 Adaptive-BPSK (A-BPSK)와 Auto Time Tracking Cyclic OOK (ATT-COOK)를 각각 uplink와 downlink에 적용 및 제안하였다. 기존 BPSK는 각 bitstream을 전송하기 위해 6.5T의 PLL locking 시간이 필요한 반면, A-BPSK는 변화하지 않는 bitstream (11 혹은 00)을 전송할 때에는 1T의 시간으로도 인코딩 할 수 있도록 하여, 평균적으로 1.73배 빠른 데이터 전송 속도를 확보할 수 있었다. COOK은 한 carrier cycle에서 스위치를 1번 닫는 위치를 통해 데이터를 전송하기 위해 에너지 손실을 최소화할 수 있다. 하지만, 스위치를 닫는 타이밍에 따라 전력 손실이 커질 수 있고, RX 코일에 걸리는 전압이 최소가 되었을 때를 변조 타이밍으로 선택하여 전력 손실을 최소화하고, 변조 depth를 13.5% 향상시켰다. 결과적으로, 기존 대비 3.7배 높은 전력 전송, 1.4배 빠른 downlink 및 가장 빠른 uplink 속도를 보여주었다.



[그림 2] 제안하는 WPDT 시스템

#4-3 본 논문은 KAIST에서 발표한 연구로, 생체신호 (ECG, EMG)를 4채널의 센서 노드로부터 측정하고, 그 데이터를 body channel communication (BCC)를 통해 무선으로 허브로 전달하는 시스템을 구현하였다. BCC는 몸을 매개체로 저전력 무선 통신을 가능하게 한다. 하지만, 사람의 움직임에 따라 body channel 특성이 달라지게 되고, 그에 따라 신호의 크기가 time-varying하게 달라지고, real-time communication을 어렵게 한다. 본 논문에서는 automatic gain control (AGC) 기술을 활용하여 채널 특성 변화를 극복하고, OOK 변조를 통해 데이터 전송 효율을 높이려고 하였다. 기존 AGC 기술이 포함된 demodulator 같은

경우에는 일반적으로 여러 stage의 증폭기와 정류기를 필요로 하여, 높은 전력 소모가 요구된다. 제안하는 AGC 기술은 각 증폭기의 전압이득을 feedback factor 조절을 통해 programmable하게 만들어, 필요로 하는 증폭기와 rectifier의 수를 줄임으로써 전력소모를 크게 줄일 수 있었다. 또한, BCC 동작은 body channel을 통해 데이터를 전달하기 때문에, ExG recording 회로에게 큰 common-mode interference (CMI)를 인가하게 된다. 본 논문에서는 CMI 제거 회로 및 입력 임피던스 향상 회로를 통해 BCC와 ExG 신호 간의 간섭을 해결하여 concurrent한 동작이 가능하도록 하였다.



[그림 3] 생체신호 측정 인터페이스 및 BCC 통신 시스템

저자정보



윤기찬 박사과정 대학원생

- 소속 : KAIST
- 연구분야 : Mixed-signal IC & Sensor interface IC
- 이메일 : ygc980215@kaist.ac.kr
- 홈페이지 : <https://impact.kaist.ac.kr>

A-SSCC 2024 Review

한국과학기술원 바이오및뇌공학과 박사과정 석동열

Session 17 Biosignal and Biomedical Applications

올해 2024 아시아고체회로학회(ASCC)의 바이오-신호 및 바이오-의료분야 응용회로 부문(Session 17)에 선정된 논문은 5개로 주로 바이오-의료목적에 특화된 센서 및 계측 (instrumentation) 회로 연구를 다루고 있다. 본 부문에 게재된 논문의 제목과 연구 목적과 방법론을 요약해보면(표1), 웨어러블(wearable)이라는 키워드가 주요하게 다가온다. 보다 세부적으로 보면, 1) 웨어러블 바이오 센서 소형화 및 저전력화, 2) 웨어러블 환경의 한계를 극복을 위한 인터페이스 회로의 성능 개선, 3) 웨어러블 바이오 회로의 응용분야 멀티모드 센서 및 인터페이스 회로 개발로 정리해 볼 수 있다. 이 리뷰에서는 게재된 다섯 건의 연구 중 #17-1, #17-4 두 건을 살펴보고자 한다.

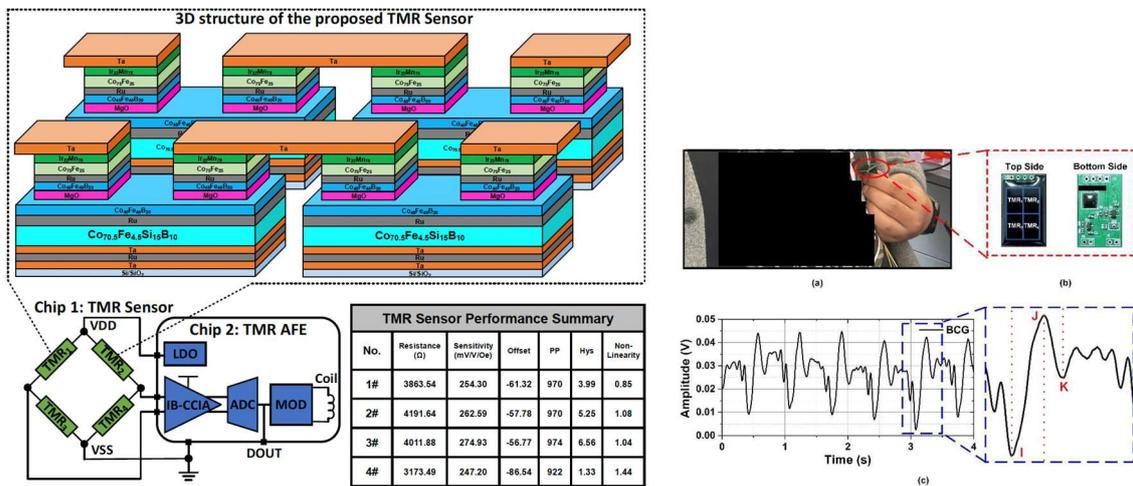
[표 1] 바이오-신호 및 바이오-의료분야 응용 부문 (Session 17) 선정 논문 5개

번호	제목	요약
#17-1	A Non-contact TMR-Based Active Electrode for BCG Recording	MEMS 기술 기반으로 소형화 된 TMR(Tunneling Magnetoresistance) 심탄도(BCG, Ballistocardiogram) 센서 및 인터페이스 회로 개발
#17-2	A 1.96Vpp Input-Range 3rd-order Noise-Shaping Pipelined-SAR ADC with Self-Boosted Impedance and Active Charge Sharing for Biosignal Acquisition	웨어러블 환경(큰 입력 범위, 높은 입력임피던스 요구, 저전력 소모, 저잡음 등) 극복을 위한 고성능 ADC 개발(방법은 논문 제목 참조)
#17-3	RMMIC: A 40 μ W Reconfigurable Multimodal Multi-channel Interface Circuit System for Bio-signals Monitoring	다양한 생체신호(ECG, EOG, PPG, EIT) 수집을 위한 인터페이스 회로 소형화 및 저전력화, 단일 증폭기 및 디지털 컨버터 활용을 위한 컨트롤러 활용
#17-4	A 1.27-mW Battery-Powered Multimodal Biosensor Interface IC for Wireless Motion Intention Recognition in Wearable Robots	웨어러블 로봇 내 움직임을 예측 및 감지하기 위한 무선 저전력 생체신호 및 압력센서(ExG, CDC, pMMG, EIT 등) 인터페이스 회로 소형화 개발
#17-5	A 1.92nJ/Conv Pulse-Width Locked-Loop Time Domain Readout IC with VCO-Integrator and Pipeline TDC for Wheatstone Bridge Wearable Strain Sensing System	저항변화를 이용한 변형(strain) 센서를 PWLL(Pulse-width Locked Loop)을 이용하여 구현, 센서 소형화 및 저전력화 달성

#17-1 심탄도(BCG, Ballistocardiography)는 심장박동에서 발생하는 물리적 진동을 전기신호화 한 것으로 심전도(ECG)와 함께 활용하여 혈류 속도, 혈압 등의 모니터링에 활용되는 기술이다. 본 연구는 항저우의 저장연구실, 베이징 중국과학원의 공동 연구로써 MEMS 기술을 활용하여 고감도의 소형화 TMR(Tunneling Magnetoresistance) 센서를 구현하여 이를 실시간 심탄도 측정에 활용할 수 있음을 실험을 통해 보여주고 있다. 또한, 최종으로 구현된 실험장치는 그 크기로 볼 때 웨어러블 등 소형화 장비에서의 활용 가능

성을 보여주고 있다.

논문은 기존 NiFe 또는 CoFe 층을 대체하여 비정형 결정구조를 가지며 높은 자성저항 (magnetoresistance) 값을 갖는 연자성체 CoFeSiB 층을 도입한 것이 TMR 센서 성능 향상에 기여하는 주요한 요소로 언급하고 있다. 0.18 μm 1P6M CMOS 공정을 활용하여 TMR Sensor에 해당하는 3.08 cm^2 크기의 Chip 하나와 계측회로에 해당하는 1.98 mm^2 크기의 별 개의 Chip을 하나를 제작했으며, 각 Chip을 인쇄회로기판의 앞 뒤에 배치하여 2.8cm x 1.7cm 크기의 능동전극(active electrode)을 제작하여 실험했다. TMR센서는 $\pm 100\mu\text{T}$ 수준의 입력범위, 10pT 수준의 민감도(sensitivity)를 주요 성능 지표로 보여주고 있으며, 계측 회로를 IC기반으로 소형화 제작하여 결합함으로써 제안된 센서의 활용성을 높여 보여주고 있다.

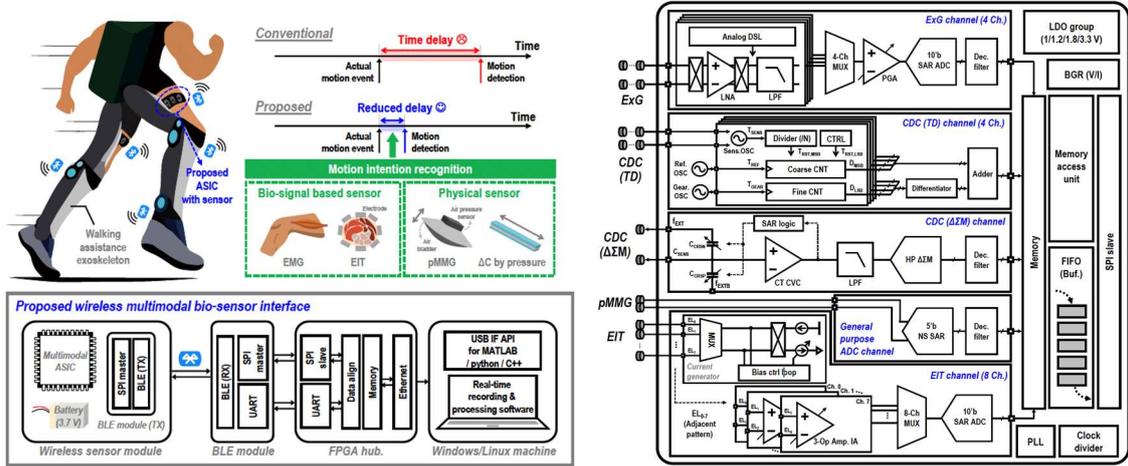


[그림 1] 연구 #17-1이 제시하고 있는 TMR Sensor와 계측회로의 개요도와 In-vivo BCG 측정결과

#17-4 본 논문은 KAIST, 삼성전자, SK Hynix, NYU Abu Dhabi의 공동연구로 사람의 동작에 관한 다양한 정보를 동시에 수집하여 웨어러블 로봇과의 상호작용에 활용하기 위한 기반연구이다. 연구에서 수집하고자 목적하는 신호로는 ExG(EEG, ECG, EMG 등), CDC(capacitance-to-digital converter), pMMG(pressure mechanomyography), EIT(electrical impedance tomography)가 있으며, 각각의 신호를 수집하기 위한 인터페이스 회로를 하나의 칩 안에 모두 구현하였다. 제작된 칩에는 1) ExG 수집을 위한 CCIA(chopper-stabilized capacitive instrumentation amplifier)를 비롯하여 2) 시간-도메인 4채널 CDC, 3) DSM 기반의 CDC, 4) pMMG 센서 정보를 읽어 내기 위한 5bit의 NS SAR, 5) EIT 수집 목적의 전류생성기 및 프론트엔드를 포함한 임피던스 측정기가 포함되어 있다.

180nm CMOS 공정을 활용하여 14 mm^2 크기의 칩을 제작하였으며, 각 인터페이스 모듈에서 주어진 입력에 대해 예상되는 출력신호를 얻을 수 있음을 실험적으로 보여주고 있다. 각 모듈의 성능지표로는 1) 4채널 ExG 센서에서 최대 60dB 이득, $0.8\mu\text{V}_{\text{rms}}$ (0.5 ~

500Hz) 수준의 입력 변환 노이즈, 2) 시간-도메인 CDC에서 0~300pF의 입력 범위(해상도 최대 1.8fF_{rms}), 3) EIT 센서에서 최대 0.33Ω_{rms} 수준의 해상도를 보여주고 있으며, 전체 회로의 전력소모는 1.27mW 수준이다.



[그림 2] #17-4 웨어러블 로봇 사용자 동작 감지를 위한 인터페이스 회로 연구개요 및 구조도

저자정보



석동열 박사과정 대학원생

- 소속 : 한국과학기술원
- 연구분야 : 바이오메디컬 응용회로 설계(센서 및 신호처리)
- 이메일 : sukd10@kaist.ac.kr