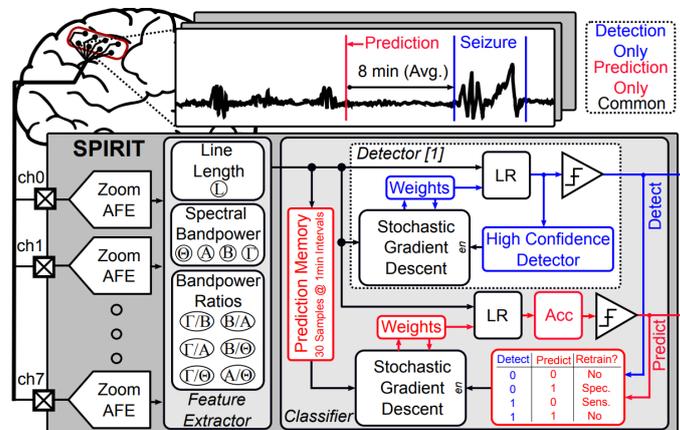


2024 IEEE VLSI Review

DGIST 전기전자컴퓨터공학과 박사과정 위정윤

Session 23 Neural Recording Interfaces

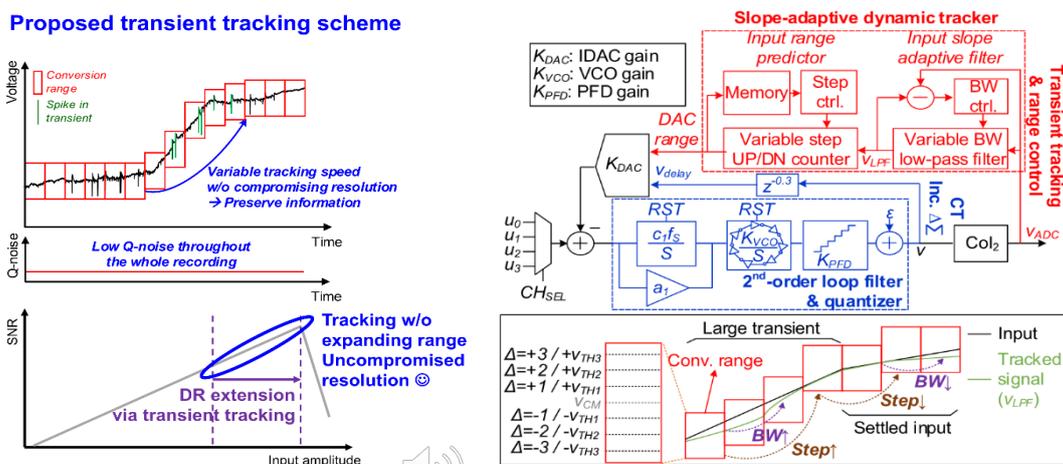
#23-1 본 논문은 칩 내부에서 retraining 및 정확도 조정이 가능한 Stochastic-gradient-descent-based Predictor with Integrated Retraining and In situ accuracy Tuning (SPIRIT) 시스템을 제안했다. (그림 4) 기존 제안된 시스템들은 칩 외부에서 데이터별 training 및 정확도 조정을 수행한 반면, 본 논문은 해당 기술들을 모두 on-chip화 했다는 점에서 높은 완성도를 지닌다. 본 시스템은 크게 analog front-end와 classifier로 나눌 수 있다. 뇌신호 측정을 위한 analog frontend는 coarse conversion을 위한 SAR ADC와 fine conversion을 위한 incremental ADC로 구성되어 있다. Classifier는 일반적인 logistic regression (LR) classifier이 사용되었으며, future weight 조정을 위해 stochastic gradient descent (SGD) 기술이 사용되었다. SPIRIT 시스템은 저전력 incremental ADC를 활용하여 효율적으로 생체 신호를 수집하고, 온라인 학습 알고리즘을 통해 지속적으로 예측 모델을 개선함으로써 실시간 간질 발작 예측이 가능하다는 점에서 기존 기술과 차별성을 갖는다.



[그림 4] 제안된 SPIRIT system level diagram

#23-3 본 논문은 dynamic zoom-and-track 기술을 사용하여 stimulation/motion artifact와 electrode DC offset이 발생한 상황에서도 sub- μ V, 10kHz 대역폭의 신경신호를 안정적으로 기록할 수 있는 Incremental $\Delta\Sigma$ Neural Recording Frontend를 제안했다. (그림 5) 신경신호는 recording front-end의 입력단에 직렬로 연결된 100kohm 상당의 neural 전극을 통해 측정된다. 이때 사용되는 전극은 frontend 입력단에 DC offset를 발생시킨다. 또한 전극과 조직 사이에서 발생하는 electrode-electrolyte impedance (ETI)로 인해 발생하는 motion artifact와 신경 자극으로 인해 발생하는 stimulation artifact는 sub- μ V크기의 신경

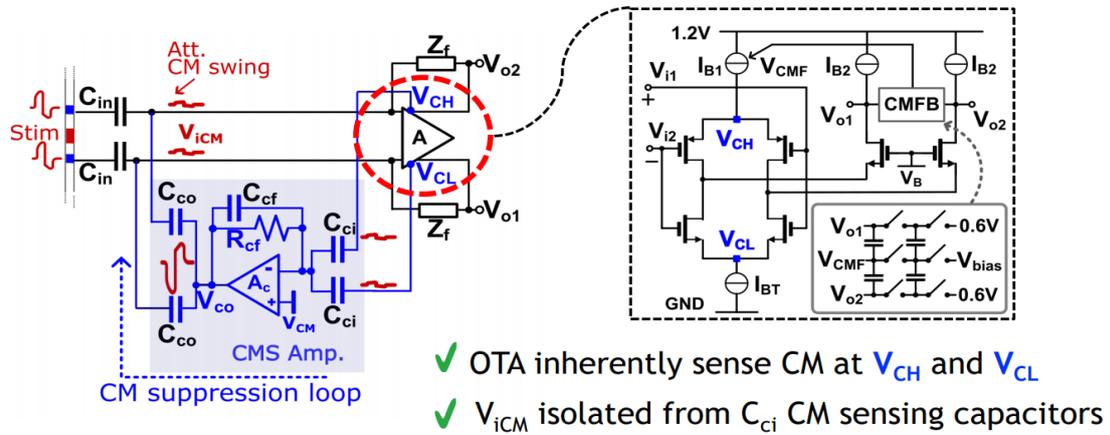
신호에 $<100\text{mV}_{pp}$ 크기의 fast transient 특징을 갖는 DC성분이 함께 기록된다. 이런 상황에서 $\text{sub-}\mu\text{V}$ 의 신경신호를 안정적으로 측정하기 위해서 recording frontend는 최소 100mV_{pp} 의 dynamic range (DR)를 가져야 한다. Interference 제거를 위해 넓은 DR를 구현한 기존 구조들은 quantization noise 레벨을 높이는 단점을 가지고 있다. 예를 들어, pre-amplifier의 gain을 낮춰 신호의 saturation을 방지함으로써 conversion range를 넓히는 구조는 quantizer의 LSB는 고정인 상황에서 amplifier의 gain을 낮춰 frontend의 입력범위를 넓혔기 때문에, input-referred quantization noise는 gain에 반비례하여 증가한다. Coarse ADC로 큰 크기 신호의 transient를 추적한 뒤에, fine ADC로 quantization하는 방법의 경우는 추적하는 순간의 quantization noise는 coarse ADC에 의해 결정되어 큰 크기의 quantization noise를 갖는다. 이러한 기존 기술들의 한계를 극복하기 위해서는 크고 빠른 간섭 신호의 영향을 제거하고 양자화 잡음을 최소화하기 위해서는 넓은 대역폭의 DC servo-loop를 구현하여 DC 신호를 빠르게 추적하고 제거하는 것이 필수적임을 알 수 있다. 본 논문에서는 입력 신호의 slope에 따라 DC servo-loop의 대역폭과 입력범위를 dynamic하게 변경할 수 있는 slope-adaptive dynamic tracker 기술을 제안했다. 본 기술의 내부회로는 그림xx와 같이 대역폭 가변이 가능한 input slope adaptive filter와 입력범위 조절이 가능한 input range predictor로 나누어 확인할 수 있다.



[그림 5] 제안된 Zoom-and-track Incremental $\Delta\Sigma$ Neural Recording Front-end

#23-5 본 논문은 closed-loop neuromodulation 수행 시 발생하는 common-mode interference (CMI)를 제거하기 위한 analog frontend를 제안했다. (그림 6) CMI 발생 시에도 신경신호를 왜곡없이 측정하기 위해서는 보통 넓은 입력범위를 갖는 신경신호 기록 ADC가 필요하다. 하지만 본 논문의 기술은 CMI를 suppression하기 때문에 신경신호 기록 ADC의 설계를 간소화할 수 있다는 장점이 있다. 본 논문은 CMI-tolerant neural AFE를 16채널로 구현하였으며, common-mode suppression에 필요한 amplifier를 8개 채널이 공유함으로써 채널 당 전력소모를 줄였다. 구현된 시스템은 34G의 높은 입력 임피던스를

달성했으며, $3.125\mu\text{W}/\text{Ch}$ 전력소모와 0.006mm^2 의 매우 작은 면적을 달성했다.



[그림 6] 제안된 CMI-tolerant neural AFE

저자정보



위정윤 박사과정 대학원생

- 소속 : DGIST EECS
- 연구분야 : Analog ICs for biomedical application
- 이메일 : wiejung@dgist.ac.kr
- 홈페이지 : <http://ins.dgist.ac.kr>