

View-Selector 기반 Dual-View FMCW RD 드론 탐지용 고효율 FPGA 가속기 설계

유주하, 이성주*

세종대학교 반도체시스템공학과 및 지능형드론융합전공 *세종대학교 AI융합전자공학과 및 지능형드론융합전공

juha@itsoc.sejong.ac.kr, *seongjoo@sejong.ac.kr

Design of High-Efficiency FPGA Accelerator for View-Selector-Based Dual-View FMCW Range-Doppler Drone Detection

Juha Yoo, Seongjoo Lee*

Dept. of Semiconductor Systems Engineering and Convergence Engineering for Intelligent Drone, Sejong Univ., *Dept. of AI Convergence Electronic Engineering and Convergence Engineering for Intelligent Drone, Sejong Univ.

요약

본 논문에서는 FMCW 레이더 RD 영상을 입력으로 하는 드론/비드론 이진 분류 문제에서, Normal/Overlay 두 뷰를 활용하여 확실 구간은 Normal-only로 판정하고 불확실 구간에서만 로지스틱 결합을 적용하는 View-Selector 기반 Dual-View 판정 구조를 제안한다. 제안 구조는 Normal 뷰의 예측 확률 p_N 을 기준으로 확실/불확실 구간을 구분한 뒤, 불확실 구간에서만 $a_0 + a_1p_N + a_2p_O$ 형태의 로지스틱 결합으로 최종 출력을 산출한다. 제안 구조의 하드웨어 타당성을 검증하기 위해 Zynq UltraScale+ (ZCU104) 기반 FPGA에서 고정소수점(Q4.12) 추론 가속기를 구현하고, 동일한 CNN 백본을 사용하는 Full-View(always fusion) 및 Dual-View(conditional overlay) 구성과 비교 실험을 수행하였다. 보드 실험 결과, 제안한 Dual-View는 확실 구간에서 Overlay 경로를 생략함으로써 평균 처리 시간이 12.63 ms/sample(\approx 79.16 FPS)로 측정되었으며, Full-View 대비 지연 시간이 약 43% 개선되었다. 최소/최대 지연 시간은 각각 약 11.11ms 및 22.24ms로 확실/불확실 구간에 따른 실행 경로 분리가 확인되었다. 분류 성능 측면에서 Dual-View는 Accuracy 92.68% 및 F1-score 86.69%를 기록하여 Full-View 대비 소폭 향상된 성능을 보였다. 또한 Vivado routed utilization 분석 결과, LUT 약 27k, FF 약 11k, BRAM 75.5, DSP 370 수준으로 두 구조 간 차이는 미미하였다.

따라서 제안 구조는 정적 자원 증가 없이 평균 처리 지연을 유의미하게 감소시키는 동시에 분류 성능을 유지·개선할 수 있음을 확인하였다.

키워드: FMCW 레이더, Range-Doppler, Drone detection, Dual-View, View Selector, Logistic Fusion, Conditional Execution, FPGA Accelerator

I. 서론

FMCW 레이더는 조도·기상 변화에 강인하며 장거리에서 표적을 안정적으로 관측할 수 있어, 드론 감시·경계 및 무인 시스템에서 핵심 센서로 활용된다. 특히 Range-Doppler(RD) 영상은 거리 및 속도 성분을 동시에 포함하므로 드론/비드론 이진 분류의 인지 문제에 효과적인 특징 표현을 제공한다. 그러나 RD 기반 분류를 고정된 단일 관측(view)만으로 수행할 경우 잡음·클러터 및 표적 자세 변화로 인해 예측이 불확실해지는 구간이 발생하며, 오탐/미탐 성능이 저하될 수 있다. 이를 해결하기 위해 본 논문은 Normal 뷰의 예측 확률을 기준으로 확실/불확실 구간을 구분하여 확실 구간은 Normal-only로 판정, 불확실 구간에서만 로지스틱 결합을 적용하는 View-Selector 기반 Dual-View 판정 구조를 제안한다.

II. 본론

본 연구에서는 FMCW 레이더 Range-Doppler 영상을 입력으로 한 드론/비드론 분류를 위해 View-Selector 기반 Dual-View CNN을 제안하고 이를 Zynq UltraScale+ FPGA에 구현하였다.

A. 데이터 구성 및 RD 전처리

본 연구는 FMCW 레이더 신호에서 생성한 RD(Range-Doppler) 영상을 입력으로 사용하며, 동일 샘플에 대해 Normal/Overlay 두 뷰(32x64)를 구성한다. Normal view는 RD의 기본 표현이고, Overlay view는 표적 성분을 강조한 마스크를 결합한 표현이다.

$$I_N = \text{Norm}(I), \quad I_O = \lambda I_N + (1 - \lambda)M \quad (1)$$

전처리된 데이터는 (normalImgs, overlayImg, labels)로 저장하고, FPGA 추론을 위해 입력을 Q4.12로 양자화하여 헤더로 내보낸다.

$$q = \lfloor x \cdot 2^{12} \rfloor, \quad x \approx q \cdot 2^{-12} \quad (2)$$

B. Dual-View CNN 추론 모델 설계

Normal/Overlay RD(32x64)를 각각 입력으로 받는 2개 CNN(동일 구조)을 구성하고, 각 CNN은 드론(class-1) 확률 p_N, p_O 를 출력한다.

$$p_N = f_{CNN}(I_N), \quad p_O = f_{CNN}(I_O), \quad p_N, p_O \in [0, 1] \quad (3)$$

CNN 구조는 경량화를 위해 그림 1의 구조로 구성하였다. 또한, FPGA 구현 시 입력 및 가중치는 Q4.12로 양자화해 사용하며, 누산 폭 확장 및 포화 연산을 적용해 수치 안정성을 확보하였다.

* 교신저자 : 이성주

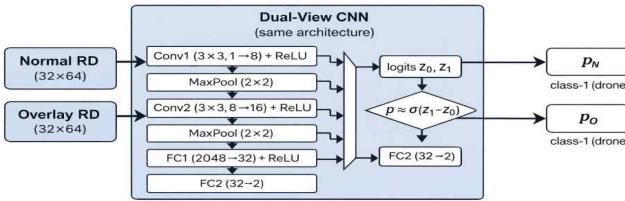


그림 1. Dual-View CNN 추론 구조

(Full-View와 레이어 구성과 차원이 동일한 아키텍처, 가중치는 별도)

C. View-Selector 기반 Dual-View 판정 방식

Normal/Overlay 두 CNN의 출력 확률 p_N, p_O 를 이용하여 최종 드론/비드론 클래스를 결정한다. 먼저 p_N 이 확실 구간에 위치하는 경우 Normal-only로 판정한다.

$$(p_N \leq TH_{Low} \text{ or } p_N \geq TH_{High}) \Rightarrow \hat{y} = 1(p_N \geq 0.5) \quad (4)$$

반대로 p_N 이 불확실 구간에 위치하는 경우 두 뷰의 확률을 로지스틱 결합하여 최종 점수 s 를 계산하고, 시그모이드 출력을 기준으로 판정한다.

$$s = a_0 + a_1 p_N + a_2 p_O, \quad \hat{y} = 1(\sigma(s) \geq 0.5) \quad (5)$$

평균 지연 시간 감소를 위해 불확실 구간에서만 Overlay CNN을 실행하는 조건부 실행(conditional overlay)을 적용하였으며, 비교 기준인 Full-View(always fusion)는 모든 샘플에 대해 로지스틱 결합을 항상 수행한다.

D. FPGA 구현 및 conditional overlay 최적화

제안 구조는 Zynq UltraScale+ (ZCU104) 기반 PS-PL 구조로 구현하였다. PS는 DDR에 RD 입력을 적재하고 AXI-Lite로 주소 모드를 설정한 뒤 IP를 구동하며, PL(HLS IP)은 AXI4-Master로 입력을 읽어 추론 후 $\hat{y} \in \{0, 1\}$ 를 반환한다. 입력/가중치는 Q4.12 고정소수점으로 양자화하여 사용하였다.

$$T_{avg} \approx T_N + p T_O \quad (6)$$

여기서 T_N 은 Normal-only 경로, T_O 는 Overlay 추가 실행에 따른 증가분, p 는 불확실 구간 비율이다. Full-View(always fusion)는 모든 샘플에서 Overlay를 실행하므로 식 (6)에서 $p = 1$ 인 경우에 해당한다.

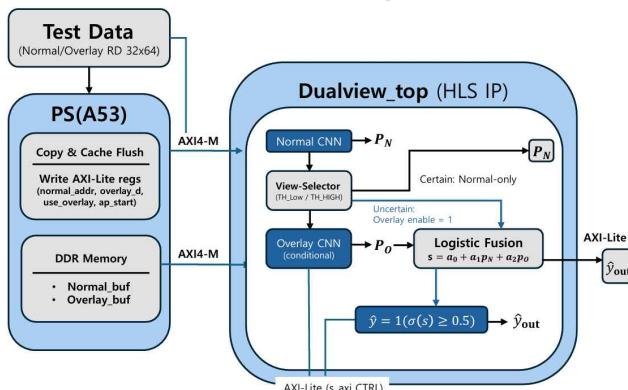


그림 2. PS-PL 기반 Dual-View 추론 흐름도(conditional overlay 포함)

III. 실험 및 결과

본 연구는 Zynq UltraScale+ (ZCU104) 보드에서 Dual-View(conditional overlay)와 Full-View(always fusion)을 2,622개 RD 샘플로 비교하였다. Q4.12 고정소수점 기반으로 Vitis HLS에서 HLS IP를 생성하고, Vivado 및 Vitis IDE를 통해 PS-PL 시스템을 구성하여 IP 평균 실행시간과 처리율(FPS)을 측정하였다. 표 1과 같이

Dual-View는 Accuracy 92.68%, F1-score 86.69%로 Full-View(92.03%, 85.23%)보다 개선된 성능을 유지하면서, 평균 IP 실행시간을 22.237 ms에서 12.632 ms로 감소(약 43.2%)시켜 79.16 FPS를 달성하였다. 또한 표 2에서 두 방식의 LUT/FF/BRAM/DSP 사용량이 거의 동일하여, 조건부 overlay 실행이 정적 자원 증가 없이 평균 지연을 절감함을 확인하였다.

표 1. Dual-View/Full-View 성능-지연 비교

Mode	ACC(%)	F1(%)	IP avg (ms)	FPS
Full-View (always fusion)	92.03%	85.23%	22.237ms	44.97
Dual-View (conditional overlay)	92.68%	86.69%	12.632ms	79.16

표 2. Dual-View/Full-View 자원 비교

Mode	LUT	FF	BRAM	DSP
Full-View (always fusion)	27152	10940	75.5	370
Dual-View (conditional overlay)	27268	10956	75.5	370

IV. 결론

본 논문은 FMCW 레이더 RD 영상을 입력으로 View-Selector 기반 Dual-View CNN 추론 구조를 제안하고, 이를 Zynq UltraScale+ (ZCU104)에서 고정소수점 추론 가속기로 구현하였다. 보드 실험 결과, 제안한 conditional overlay 방식은 always fusion 대비 평균 지연을 약 43% 단축(12.63 ms/sample, 79 FPS) 하면서도 분류 성능 (Accuracy 92.68%, F1-score 86.69%)을 유지하거나 소폭 향상시켰다. 또한 Vivado routed 기준 LUT/FF/BRAM/DSP 자원 사용량은 거의 동일하여, 제안 기법이 정적 자원 증가 없이 실시간 추론 효율을 개선함을 입증하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 지원으로 한국연구재단의 지원 (No. 2023R1A2C1006340)과 정부(교육부)의 지원으로 한국연구재단의 이공분야 대학중점연구소지원사업의 지원 (No. 2020R1A6A1A03038540)을 받아 수행된 연구이며, 검증을 위한 EDA 관련 툴은 IDEC의 지원을 받았음.

참 고 문 헌

- [1] S.-K. Han, J.-H. Lee, and Y.-H. Jung, "Convolutional Neural Network-Based Drone Detection and Classification Using Overlaid Frequency-Modulated Continuous-Wave (FMCW) Range-Doppler Images," Sensors, vol. 24, no. 17, Art. 5805, 2024.
- [2] H. Lee, S. Han, J.-I. Byeon, and J. Choi, "CNN-Based UAV Detection and Classification Using Sensor Fusion," IEEE Access, vol. 11, pp. 68791-68808, Dec. 2023.