

저궤도 위성 엣지 컴퓨팅을 위한 ARM64 플랫폼 분석 연구

신성환, 고용운, 신동엽, 김영필
인천대학교

seonghwan911@inu.ac.kr, asdcv0428@inu.ac.kr, sdyeob1002@inu.ac.kr, ypkim@inu.ac.kr

Exploring ARM64 Platforms for Edge Computing on Low Earth Orbit Satellites

Seonghwan Shin, Yongun Go, Dongyeop Shin, Youngpil Kim
Incheon National University

요약

본 논문은 우주 환경에서 안정적인 컴퓨팅을 제공할 수 있는 ARM64 MPSoC 기반 플랫폼을 제안하여, 저궤도 위성용 엣지 컴퓨팅 시스템 구축의 기반을 마련한다. 제안한 플랫폼은 범용 ARM 기반 보드 및 일반 리눅스 시스템과 비교했을 때 우주 환경에 적합한 기술적 강점을 갖는다. 본 연구의 결과는 향후 차세대 위성 임무를 위한 신뢰성 높은 엣지 컴퓨팅 시스템 설계와 구현에 실질적인 기여를 할 수 있을 것이다.

I. 서론

최근 위성 컴퓨팅의 패러다임은 지상 중심의 중앙 집중형 처리 방식에서 위성 탑재 엣지 컴퓨팅 방식으로 전환되고 있다. 이러한 변화는 심우주 및 저궤도(low earth orbit, LEO) 임무에서 실시간 데이터 처리, 통신 지연 최소화, 운용 자율성 확보에 대한 요구가 증가함으로써 발생하였다. 특히 큐브위성(CubeSat) 및 소형 위성(MicroSat) 분야에서는 이미지 전처리, 고장 탐지 등의 탑재 지능(onboard intelligence) 도입 등 컴퓨팅 활용이 필수적인 요소가 되었다[1].

그러나 기존의 전통적인 컴퓨팅 플랫폼을 우주 환경에 적용하는 데는 여러 가지 제약이 따른다. 지상에서 개발 표준으로 사용되는 리눅스(Linux) 기반 시스템은 유연성과 범용성 면에서 널리 채택되고 있음에도 불구하고, 방사선과 열적으로 불안정한 환경을 고려하지 않고 설계되었다. 우주 공간에서 발생하는 우주선(cosmic rays) 및 대전 입자(charge particles)는 단일 이벤트 업셋(single event upset, SEU)이나 래치업(Latch-up) 현상을 유발하여 시스템 동작의 예측 불가능성, 데이터 손상 및 영구적인 손상을 초래할 수 있다[2]. 또한 대부분의 범용 보드는 상용 기성 부품(Commercial Off-The-Shelf, COTS)을 사용하기 때문에 초저전력 상황, 발사 시의 진동, 궤도 내 극심한 온도 변화 등 극한 환경에서의 신뢰성이 낮다.

본 논문에서는 이러한 우주 환경적 제약을 극복하기 위해, 고성능 처리 시스템과 유연한 프로그래밍 가능 로직 패브릭을 통합한 이종(heterogeneous) 컴퓨팅 플랫폼인 Zynq UltraScale+ MPSoC의 활용을 제안한다. 그 근거로 저궤도 위성 컴퓨팅 플랫폼으로서 제안된 플랫폼의 아키텍처 및 소프트웨어적 강점을 분석하였고,

기존 ARM 기반 대안 및 범용 리눅스와 비교하여 우수성을 평가하였다.

II. 본론

2.1. 제안 ARM 보드의 특성

1) 구조적 강점

제안 보드인 Zynq UltraScale+ MPSoC(AXU4EVB-E)는 ARM 64 비트 기반 시스템 중에서도 이종 구조를 갖춘 고성능 SoC(System-on-Chip)로, 저궤도 위성의 엣지 컴퓨팅 요구사항을 충족할 수 있는 구조적 특성을 보유하고 있다. 본 SoC는 쿼드코어 ARM Cortex-A53 애플리케이션 프로세서, 듀얼코어 Cortex-R5 실시간 프로세서, 그리고 Mali-400 MP2 GPU를 통합하고 있어 일반적인 리눅스 응용 뿐만 아니라 하드 리얼타임 처리가 필요한 항법, 센서 융합 및 오류 감지 알고리즘까지 하나의 칩 내에서 통합 구현이 가능하다[3].

또한, MPSoC에는 FPGA 기반의 프로그램 가능한 논리 (Programmable Logic, PL)가 포함되어 있어 사용자 정의 회로나 데이터 흐름 가속기를 구현함으로써 데이터 병렬처리, 이미지 전처리, 통신 프로토콜 처리 등의 연산을 실시간으로 최적화할 수 있다.

2) 우주 환경 대응 특성

우주 환경에서는 전자 장치가 지속적으로 우주 방사선, 온도 변화, 진공, 그리고 기계적 진동에 노출되므로 하드웨어의 내구성과 회복 능력이 중요하다. 제안 ARM 보드는 데이터 무결성 및 신뢰성을 위한 Error Correction Code (ECC) 지원[4]과 코어 명령 실행의 오류 감지가 가능한 Lock-Step 모드, 적절한 온도

내구성(-40~85°C) 지원으로 우주 환경적 요인에 대응할 수 있다[5].

3) 보안 부팅 과정

인공위성 시스템은 지상과의 통신 지연, 물리적 접근 제한, 복구 불가능성 등으로 인해 높은 수준의 신뢰성과 보안이 요구된다. 제안 ARM 보드는 부팅 시점부터 시스템 무결성을 보장하는 보안 부팅(secure booting) 기능을 제공하며, 부트 이미지 내 각 파티션에 대한 인증 및 암호화를 통해 악성 코드 또는 비인가된 소프트웨어의 실행을 차단함으로써 위성 시스템을 예측 가능하고 안전한 상태로 가동시킬 수 있다.

2.2 기존 ARM64 플랫폼 (Raspberry Pi)의 한계

ARM64 플랫폼으로 널리 알려진 Raspberry Pi 는 지상 애플리케이션에서 광범위하게 사용하지만 우주 환경에서는 방사선 취약성, 신뢰성 부족, 온도 변동 대응 미비, 계산 능력 제한 등의 한계를 보인다. Raspberry Pi 3B+ 및 4 모델은 중성자 빔 테스트에서 단일 이벤트 기능 장애(SEFI) 및 SEU 에 취약하고, 일반 ARM® Cortex®-A53 및 A72 아키텍처는 고에너지 중성자 환경에서 메모리 오류 및 프로세스 중단을 유발하는 것이 확인되었다[6]. 또한 우주 전자 장치에 필수적인 ECC 메모리, 삼중 모듈 중복(TMR), 방사선 강화 설계 등이 부재한다. 또한 -40°C ~ +85°C 의 산업 등급 온도 범위를 초과하는 우주 환경에서 정상 동작하지 못한다는 점도 치명적이다[7].

2.3 기존 Linux의 한계

범용 Linux 배포판(Ubuntu, Debian, Fedora 등)은 데스크탑 또는 서버 중심의 범용 하드웨어를 대상으로 설계되었기 때문에 커널 사이즈, 드라이버 불필요성, 실시간성 부족 등의 문제가 저궤도 위성 환경에서 제약으로 작용한다. 또한, 실시간 처리 능력이 제한적이어서 위성의 실시간 제어, 센서 융합, 이벤트 기반 제어 등에는 적합하지 않다[8].

2.4 PetaLinux의 이점

PetaLinux[9]는 Xilinx 의 FPGA/SoC 보드를 위한 맞춤형 임베디드 리눅스 배포판으로, Yocto Project 기반으로 개발되어 있고, 사용자가 하드웨어 수준에서 최적화된 리눅스 이미지를 직접 구성할 수 있다.

1) 우주 환경 적합성

- 커널 및 루트 파일 시스템의 커스터마이징: 전체 OS(운영체제)를 최소한의 바이너리 집합으로 축소할 수 있어, 저장 공간 및 부팅 시간을 절감할 수 있다.
- 하드웨어 기반의 인터럽트 및 GPIO 제어 용이성: Vivado 하드웨어 플랫폼과 통합되어 있어, FPGA 활용이 용이하다.
- 실시간성과 오류 회복 구조: PREEMPT_RT 커널은 실시간성 요구를 만족시키며, watchdog, soft error handler 등과의 연동도 쉽게 구성할 수 있다.
- 부트로더 수준의 유연성: U-Boot 환경에서 멀티 이미지 부팅(Multi-Image Boot), OTA 업데이트,

이중화(Redundant Boot Partition) 등의 전략을 쉽게 적용할 수 있다.

III. 결론

본 논문은 저궤도 위성 환경의 우주 컴퓨팅 환경에 적합한 하드웨어 플랫폼 및 OS 를 리뷰하고, 기존 ARM 64 시스템과 비교하였다. 우주적 특성을 반영한 새로운 저궤도 위성 엣지 컴퓨팅 플랫폼으로서 활용성을 분석하였으며, 기술적 강점을 보였다. 본 논문의 결과는 ARM 기반 실제 하드웨어로 LEO 위성 기반 컴퓨팅 테스트 베드를 구축하고자 하는 시스템 설계 및 구현 연구자들에게 도움이 될 수 있을 것이다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학 ICT 연구센터사업의 연구결과로 수행되었음 (IITP-2025-RS-2023-00259061).

참고 문헌

- [1] Wu, Y., Gao, L., et al, "Expandable On-Board Real-Time Edge Computing Architecture for Luojia3 Intelligent Remote Sensing Satellite," *Remote Sensing*, 14(15), 3596. (2022).
- [2] G. M. Castillo and B. A. Ratkevich, "Single event upset testing of commercial off-the-shelf electronics for launch vehicle applications," *2011 Aerospace Conference*, Big Sky, MT, USA, 2011, pp. 1–5.
- [3] Xilinx, Zynq UltraScale+ MPSoC Data Sheet: Overview, DS891 v1.13, 2022, <https://docs.amd.com/v/u/en-US/ds891-zynq-ultrascale-plus-overview>, accessed in May 2025.
- [4] Xilinx, Soft Error Mitigation Controller v4.1 Product Guide, PG036, 2020, https://docs.amd.com/r/en-US/pg036_sem, accessed in May 2025.
- [5] NASA, GSFC-STD-7000: General Environmental Verification Standard (GEVS), Rev. B, 2013. <https://standards.nasa.gov/standard/GSFC/GSFC-STD-7000>, accessed in May 2025.
- [6] S. M. Guertin, "ARM & RISC-V Processor Radiation Characterization Update," in *NASA Electronic Parts and Packaging Program*, 2023.
- [7] G. Lentaris et al., "High-Performance Embedded Computing in Space: Evaluation of Platforms for Vision-Based Navigation," *Journal of Aerospace Information Systems*, vol. 15, no. 4, pp. 178–192, 2018.
- [8] Michael M. Madden, "Challenges Using Linux as a Real-Time Operating System," *AIAA Scitech 2019 Forum*, San Diego, California, Jan 2019.
- [9] Xilinx, PetaLinux Tools Documentation Reference Guide, UG1144 v2023.1, 2023, <https://docs.amd.com/r/en-US/ug1144-petalinux-tools-reference-guide>, accessed in May 2025.