

다중 Level-4 vECU 협동 시뮬레이션 환경을 위한 분산 타이밍 오류 검출 시스템 아키텍처 설계

조수호, 조정훈*

경북대학교, *경북대학교

sooho990911@knu.ac.kr, *jcho@knu.ac.kr

Design of a System Architecture for Distributed Timing Fault Detection in Multi-Level-4 vECU Co-simulation Environments

Suho Jo, Jeonghun Cho*

Kyungpook National Univ., *Kyungpook National Univ.

요약

본 논문은 SDV의 SW 복잡성으로 인한 테스트 병목을 해결하기 위해 Level-4 vECU가 주목받고 있으나, 기존 방식은 단일 제어기 내부의 결함 추적에 국한된다는 한계가 있다. 본 논문은 이를 극복하기 위해 FMI 기반 다중 vECU 협동 시뮬레이션 환경에서의 분산 타이밍 오류 검출 아키텍처를 제안한다. 시뮬레이션, 로컬 검출, 전역 분석의 3계층으로 구성된 이 아키텍처는 비침습적 로그 수집과 시간 동기화를 통해 분산 노드 데이터를 통합하고, 전역적 타이밍 안정성을 조기에 확보할 수 있는 논리적 프레임워크를 제시한다.

I. 서론

자동차 산업이 소프트웨어 중심 자동차(SDV)로 진화함에 따라 차량 내 소프트웨어의 규모와 복잡성이 기하급수적으로 증가하고 있다[1]. 이러한 복잡성은 시스템 통합 및 검증 단계에서 예상치 못한 오류를 야기하며, 전통적인 하드웨어 기반의 V-모델 개발 프로세스에서는 테스트 부하가 후반부에 집중되는 병목 현상이 발생한다. 이를 해결하기 위해 실제 하드웨어 없이 소프트웨어를 조기에 검증할 수 있는 가상 전자제어장치(vECU) 기술이 핵심 대안으로 부상하고 있다[2]. 특히 실제 타겟 바이너리를 하드웨어 에뮬레이터 상에서 구동하는 Level-4 vECU는 실제 제어기 수준의 높은 타이밍 충실도를 제공하여 실질적인 소프트웨어 검증을 가능하게 한다[3].

기존 연구에서는 이러한 Level-4 vECU의 높은 타이밍 충실도를 활용하여, 소스 코드나 OS의 수정 없이 비침습적으로 타이밍 오류를 검출하는 시스템이 제안되었다[4]. 그러나 앞서 언급한 단일 제어기 대상의 오류 검출 시스템은 개별 ECU 내부의 소프트웨어 로직 결함은 효과적으로 찾아낼 수 있지만, 여러 ECU가 네트워크로 연결된 제어 환경에서의 복합적인 결함을 추적하는 데는 한계가 있다. 가상 검증 단계에서 시스템의 신뢰성을 확보하기 위해서는 단일 노드의 오류 검출 정보를 개별적으로 확인하는 수준을 넘어, 전역적인 통신 로그와 각 노드의 실행 로그를 유기적으로 통합하여 분석할 수 있는 환경이 필요하다.

본 연구는 이러한 필요성에 따라, 기존의 정밀한 단일 타겟 오류 검출 알고리즘을 FMI 기반의 동기화된 다중 vECU 시뮬레이션 환경에 접목하여, E-to-E 오류의 원인을 규명하는 시스템 아키텍처를 제안하고자 한다.

II. 시스템 아키텍처

본 장에서는 다중 Level-4 vECU 환경에서 발생하는 분산된 타이밍 데이터를 통합하고, 이를 기반으로 End-to-End(E-to-E) 오류의 인과관계

를 분석하기 위한 시스템 아키텍처를 기술한다. 제안하는 시스템은 독립적으로 실행되는 여러 Level-4 vECU들을 FMI(Functional Mock-up Interface) 표준으로 동기화하고[5], 각 노드에서 발생하는 상세 타이밍 오류와 중앙 버스의 통신 데이터를 수집하는 통합 프레임워크 구조를 가진다. 전체 시스템 아키텍처는 그림 1과 같이 크게 시뮬레이션 계층, 로컬 에러 검출 계층, 그리고 전역 상관분석 계층의 3단계로 구성된다.

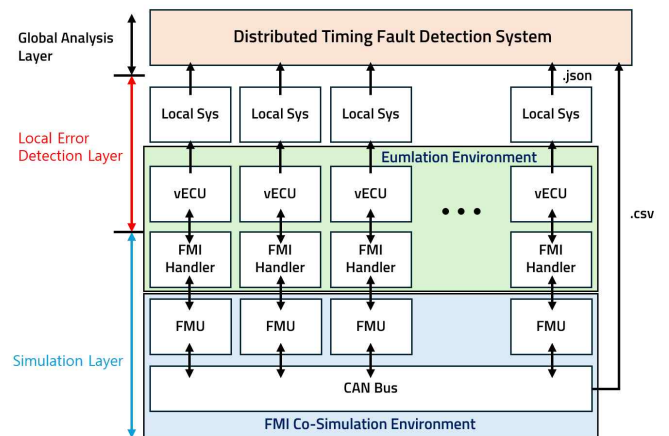


그림 1 : Full System Architecture

먼저, 시뮬레이션 계층에서는 vFCL(vECU-FMI Coordination Layer)을 통해 모든 vECU가 동일한 시뮬레이션 타임라인을 공유하며 실행된다. vFCL은 vECU 컨트롤러 FMU와 FMI 핸들러로 구성되어 FMI CS 환경과 vECU 간의 데이터 교환 및 실행 제어를 담당하며, 각 vECU가 실제 하드웨어와 유사한 시간 베이스로 동작하도록 보장한다. 이때 중앙의 CAN Bus FMU는 시뮬레이션 중 발생하는 모든 메시지의 전송 시점, ID, 중재 결과 등을 타임스탬프와 함께 통합 CSV 파일로 기록한다. 로컬 에러 검출 계층에서는 각 vECU 노드 내부에 배치된 엔진이

ARXML 설정 파일로부터 자동 추출한 태스크 제약 조건을 바탕으로 개별 오류를 실시간 검출한다. 이 엔진은 Renode 에뮬레이터에서 스트리밍 되는 실행 로그를 비침습적으로 분석하여 AUTOSAR Timing Protection Fault에 정의된 Execution Budget, Time Frame, Lock Budget 위반 여부를 판별하고, 그 결과를 상세 JSON 로그 형태로 생성한다.

전역 상관분석 계층은 본 연구의 핵심으로, 분산된 노드들의 로컬 에러 로그와 중앙의 통신 CSV 데이터를 병합하여 전역적인 인과관계를 도출한다. 분산 환경의 특성상 정확한 원인 규명을 위해 서로 다른 소스에서 발생하는 데이터의 시간 축을 일치시키는 과정이 필수적이며, 본 시스템은 vFCL에 의해 보장된 Wall-clock Time을 공통 키로 사용하여 모든 이벤트를 하나의 타임라인 상에 정렬한다. 이 과정에서 본 설계는 통합된 데이터를 정교하게 분석하기 위해, 각 노드의 실제 실행 시점 및 실행 시간, 그리고 네트워크 전송 정보 등을 포함하는 타이밍 파라미터를 새롭게 정의한다. 이렇게 구조화된 파라미터들은 단순한 로그 기록을 넘어, 오류 간의 상관관계를 분석하고 복합적인 결함의 전파 경로를 추적하기 위한 핵심적인 정량적 지표로 활용된다.

이러한 통합 데이터를 기반으로 작동하는 E-to-E 오류 인과관계 규명 알고리즘은 특정 제어기에서 발견된 타이밍 지연의 근본 원인을 역추적한다. 예를 들어, 수신단 vECU에서 데이터 수신 이벤트 지연이 감지되면, 시스템은 통합 CSV 로그를 통해 해당 메시지의 네트워크 전송 지연이나 중재 밀림 현상을 먼저 확인한다. 이후 송신단 vECU의 로컬 로그를 역추적하여, 해당 메시지를 전송한 태스크가 내부적인 Execution Budget이나 Lock Budget으로 인해 지연되었는지를 최종 판별함으로써 오류의 원인을 규명한다.

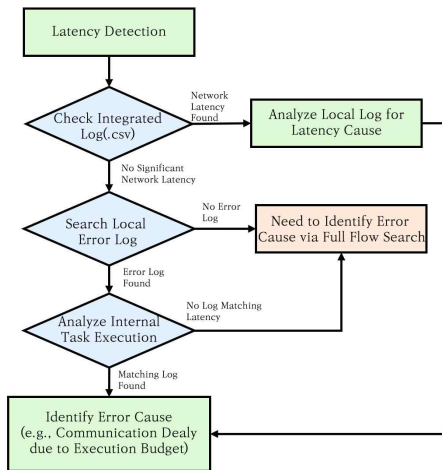


그림 2 : E-to-E Error Propagation Analysis Logic

III. 결론

본 논문에서는 소프트웨어 중심 자동차(SDV)의 실시간 보장성을 조기에 검증하기 위해, FMI 기반 다중 Level-4 vECU 협동 시뮬레이션 환경에서 동작하는 분산 타이밍 오류 검출을 위한 시스템 아키텍처를 설계하고 제안하였다. 제안된 시스템은 개별 제어기 내부의 국소적인 오류 검출에 국한되었던 기존 연구의 범위를 확장하여, 네트워크로 연결된 다중 제어기 환경에서 시스템 전체의 전역적 타이밍 안정성을 평가할 수 있는 통합 프레임워크 아키텍처를 정립하였다는 데 의의가 있다. 특히, 동기화된 시뮬레이션 환경에서 수집된 통신 로그와 각 노드의 정밀한 실행 로그를 유기적으로 결합함으로써, 분산 환경에서 발생하는 연쇄적인 타이밍 결함을 검출할 수 있는 체계를 마련하였다.

향후 연구에서는 본 논문에서 구축한 오류 검출 시스템을 기반으로 다양한 결함 주입 시나리오를 적용하여 시스템의 탐지 정확도를 정량적으로 평가할 계획이다. 또한, 분산 노드 간의 지연 상관관계를 분석하여 오류의 근본 원인을 역추적하는 End-to-End 오류 판별 및 인과관계 추론 알고리즘을 고도화함으로써, 복합적인 타이밍 이슈를 직관적으로 진단할 수 있는 분석 엔진을 개발할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2025년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원(RS-2024-00415938, 2024년 산업혁신인재성장지원사업) 및 2025년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구 결과 임 (No.RS-2025-02216517, 재구성형 인공지능 프로세서 SW 프레임워크 기술개발)

참 고 문 헌

- [1] Safar, M.; El-Moursy, M.A.; Abdelsalam, M.; Bakr, A.; Khalil, K.; Salem, A. "Virtual verification and validation of automotive system." J. Circuits Syst. Comput. 2019, 28, 1950071.
- [2] Jordan, Y.; von Wissel, D.; Dolha, A.; Mauss, J. "Virtual ECUs Used to Develop Renault's Engine Management Software." ATZelektronik Worldw. 2018, 13, 36 - 39.
- [3] Kim, H.; Kwak, J.; Cho, J. "AUTOSAR-Compatible Level-4 Virtual ECU for the Verification of the Target Binary for Cloud-Native Development." Electronics 2024, 13, 3704.
- [4] S.-H. Jo and J.-H. Cho, "Task Execution Visualization Using AUTOSAR-Based Virtual ECU," Annual Conference of KIPS, pp. 41 - 43, May 2025.
- [5] Kim, H.; Lee, H.; Cho, J. A Coordination Layer for Time Synchronization in Level-4 Multi-vECU Simulation. Electronics 2025, 14, 1690.