

仮想環境を用いた SRAM 型 FPGA におけるソフトエラー評価手法 Evaluation Method of System-level Soft Error on SRAM-based FPGA using Virtual Environment

1245058 田中 知成 (集積システム研究室)
(指導教員 密山 幸男 教授)

1. はじめに

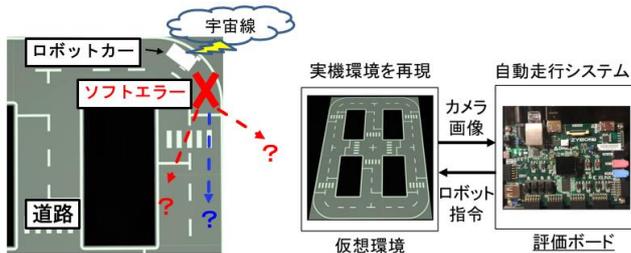
プロセスの微細化に伴い半導体集積回路(LSI : Large Scale Integrated circuit)では、ソフトエラーの懸念が高まっている。ソフトエラーは放射線が原因で生じる半導体素子内の一過性のエラーであり、SRAM (Static Random Access Memory)やフリップフロップのデータの反転を引き起こす。

人命保護の役割も担う高レベルの自動運転システムには高い信頼性が求められるため、ソフトエラーは大きな脅威となる。自動運転システムには高い計算性能が求められるため、Feild Programmable Gate Array (FPGA)を用いた高効率な実装が期待されているが、コンフィギュレーションメモリ (CRAM : Configuration RAM)の放射線に対する脆弱性が大きな課題となっている。

本研究では SRAM 型 FPGA に実装した自動走行システムを対象として、ソフトエラーの評価を行うことを目的とする。仮想環境上で自動走行を実施することで、ソフトエラーが発生した際の自動走行システムの誤動作を観測し、そのメカニズムの解明を目指す[1]。

2. 仮想環境を用いたソフトエラー評価環境

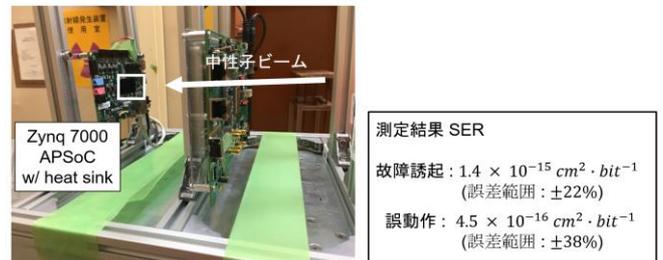
提案する評価環境は、1台のPCと、プログラマブル SoC を搭載する1台の評価ボードで構成される。PC上では3Dシミュレータ Gazebo[2]を用いて、自動走行を実施するための仮想環境を構築する。仮想環境では、車体にカメラを取り付けたロボットカーと道路環境を構築した。また、プログラマブル SoC として Xilinx 社 Zynq-7000 APSoC(XC7Z020)を採用し、カメラ画像に基づいてレーンキープを行う自動走行システムを実装した[3]。自動走行システムにおける画像処理は全て Zynq のプログラマブルロジック (FPGA)上に実装しており、Canny 法によるエッジ検出画像を使用して車道外側線の検出を行う。仮想環境上で生成したカメラ画像を Transmission Control Protocol (TCP/IP)通信によって Zynq に転送し、Zynq で処理を行った後、その結果を PC に転送することで仮想環境上での自動走行を実現する。



(a)仮想環境上での自動走行 (b)提案ソフトエラー評価環境
図1 仮想環境でのソフトエラー評価

3. 照射実験による評価

照射実験では、地上で最も影響が大きいと言われている中性子起因のソフトエラーによる影響を評価する。自動走行システムを実装した DUT (Design Under Test)の CRAM をソフトエラー評価の対象とする。DUT の状態監視と仮想環境でのロボットカーの動作監視によって、CRAM にソフトエラーが発生した際の自動走行システムへの影響を評価する。観測結果は、DUT の論理機能の故障である Single Event Functional Interrupt (SEFI)と、SEFI のうちロボットカーの決められた道路範囲からの脱線を引き起こす深刻な誤動作に分類できる。照射実験の様子と照射実験の結果得られた発生確率を示す SER (Soft Error Rate)を図2に示す。



(a)照射実験の様子 (b)測定結果(SER)
図2 照射実験

4. エラー挿入実験による評価

エラー挿入実験では、DUT の任意のコンフィギュレーションビットを意図的に反転させることでソフトエラーの発生を再現する。照射実験よりも短い時間で多くのビット反転の影響を観測することが可能である。

エラー挿入実験の結果、DUT のコンフィギュレーションビットのうち、30.6%がビット反転によって SEFI を引き起こすことがわかった。また、SEFI のうち 33.0%が最終的に深刻な誤動作を引き起こした。SEFI と深刻な誤動作の SER を推定し、照射実験での測定値と比較した結果を図3に示す。

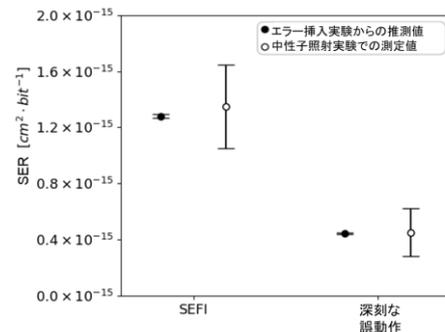


図3 照射実験とエラー挿入実験の結果の比較

エラー挿入実験から推定した SEFI と深刻な誤動作の SER は、照射実験で測定した SER の誤差範囲内であった。これにより、提案評価手法の有用性を実証した。

5. まとめ

3D シミュレータの仮想環境と FPGA に実装した自動走行システムの連携によるソフトエラー評価環境を提案した。照射実験とエラー挿入実験の結果の一致によって、提案する評価環境を用いて自動走行システムにおけるソフトエラーの影響を正確に評価できることを示し、提案評価手法の有用性を実証した。

参考文献

[1] T. Tanaka, et al., "Impact of Neutron-Induced SEU in FPGA CRAM on Image-Based Lane Tracking for Autonomous Driving: From Bit Upset to SEFI and Erroneous Behavior," in *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 69, no. 1, pp. 35-42, Jan. 2022
 [2] C. E. Agüero, et al., "Inside the Virtual Robotics Challenge: Simulating Real-Time Robotic Disaster Response," in *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 12, no. 2, pp. 494-506, Apr. 2015
 [3] T. Tanaka, et al., "Development of Autonomous Driving System Using Programmable SoCs," in *Proc. 2019 ICFPT*, pp.453-456, Dec. 2019.