

平成 30 年 6 月 21 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06073

研究課題名(和文)高電磁ノイズに対する CAN プロトコルの高信頼化手法

研究課題名(英文) Highly Reliable Techniques for CAN Protocol under Highly Electromagnetic Environment

研究代表者

福本 聡 (Fukumoto, Satoshi)

首都大学東京・システムデザイン研究科・教授

研究者番号：50247590

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、高電磁環境下において、車載ネットワークCAN プロトコルを高信頼化する手法について検討した。電力変換回路のスイッチングノイズの周期性などを故障モデルとして踏まえ、プロトコルの互換性を保ちながら耐故障性を強化するアプローチを研究した。おもな成果は以下の三つである。(1) ハイブリッドARQ方式のプロトコルを提案し、あらたに設計・実装したビットレベルのノイズ挿入器を用いた実測でその有効性を示した。(2) バス・ガーディアンにおける高調波ノイズの検出手法を提案した。(3) イベントトリガ型通信と呼ばれるランダムな通信の応答時間を評価するための新しい確率モデルを構築した。

研究成果の概要(英文)：In this project, we have studied on highly reliable techniques for the protocol of vehicle network CANs under the highly electro-magnetic environment. Considering the periodicity of the switching noise on power converter circuit as a new fault model, approaches to enforce the fault tolerance with the compatibility of the protocol have been studied. The major results are as follows.

(1) We have proposed a Hybrid ARQ protocol and empirically shown its effectiveness by using a bit level noise insertion device designed newly. (2) We have proposed a harmonic noise detection method for bus-guardians. (3) A new stochastic model has been constructed for evaluating the response time of random communications called 'event triggered communications'.

研究分野：ディペンダブルコンピューティング

キーワード：CAN 高電磁環境 フレーム破損 ハイブリッドARQ 故障挿入器 バス・ガーディアン 故障検出 評価モデル

### 1. 研究開始当初の背景

スマートグリッド、ソーラーパネル、電気自動車などの急激な普及拡大に伴って、電力変換回路のパルス大電流部分が引き起こす近傍電磁界ノイズ(near-field noise)が問題となっている。このノイズは、変換回路自身の制御回路や周辺装置、ネットワークに大規模な過渡故障を発生させる可能性があり、その対策が必須である。現在、具体的な対策としては EMC(electro-magnetic compatibility, 電磁的両立性)技術が主流であるが、投入できるコストや物量の制限、半導体製造プロセスの微細化による特性のバラつきなどが、しだいにその実現を困難にしているという指摘がある。申請者らは、高電磁環境における情報通信システムにディペンダブルコンピューティングの手法を導入し、EMC 技術と併用して耐故障性を強化するための高信頼化技術を検討してきた。すでに、高電磁ノイズ下の半導体についての故障モデルを定義し、順序回路の耐故障性を向上させるための手法などを提案した。本研究では、半導体と並ぶ情報通信システムの二大基幹要素のひとつであるネットワークに視点を移し、その高電磁ノイズ耐性について検討する。特に、車載ネットワークに用いられる CAN(controller area network) プロトコルについての高信頼化を試みる。

CAN は、現在の車載ネットワークプロトコルのデファクトスタンダードである。耐故障機能としては、メッセージ送信を停止するバスオフモードを伴った自動再送要求(ARQ)を採用しており、比較的小規模なノイズによるフレーム・ビットエラーなどに対処している。しかし、1980 年代に開発されたこのプロトコルは、近年の電気自動車やハイブリッド自動車に搭載される DC-DC コンバータの大規模なスイッチングノイズをまったく想定していない。スイッチングノイズの特徴のひとつは、スイッチング周波数の 2 倍の頻度でそれが発生することである。多くの場合、CAN プロトコルのデータフレームひとつの送信時間は、コンバータのスイッチング周期よりも長い場合、すべてのフレームは複数回のスイッチングノイズに晒されることになり、ネットワークがまったく機能しない可能性もあると思われる。

ところが、申請者らが行った CAN への高電磁ノイズ印加実験によれば、ひとつのデータフレームの転送時間 864 $\mu$ sec のあいだに 17 回ものスイッチングノイズが印加されているにも関わらず、最終的にアプリケーション層で無事に受信されているものがあることが判った。このことは、スイッチングノイズ毎の CAN への影響には大きなバラつきがあり、時間冗長や情報冗長といったディペンダブルコンピューティングの手法を追加的に施すことによって耐故障性を改善し得ることを示唆している。

### 2. 研究の目的

本研究の開始当初の目的は以下の通りである。

本研究では、互換性の観点から基本的なプロトコルを変更することなく、CAN における高電磁ノイズ耐性を向上させる高信頼化手法を検討する。具体的には、(1) 高電磁ノイズに対する故障モデルを決定し、(2) 環境適応型ハイブリッド ARQ および (3) 高電磁環境向けバス・ガーディアンを考察する。

故障モデルについては、上記の予備実験を進展させて、データフレーム内のビット誤りの発生率とバースト性、およびデータフレーム列の誤り発生率とバースト性について定量的に評価する。

環境適応型ハイブリッド ARQ では、通常の CAN の ARQ モードに加え、あらかじめ冗長なフレームを送信する FEC(forward error correction)モードを設定する。ネットワークが置かれた環境毎のフレーム誤り発生率とバースト性に対応して FEC モードに推移することで、再送要求の爆発的な増加によるデータ転送機能の停止を回避する。FEC での冗長フレームの生成と復号化はアプリケーション層でおこなうため、CAN プロトコルに変更はない。

つぎに、高電磁環境向けバス・ガーディアンでは、電力変換回路の制御部からのスイッチング情報などをもとに、高電磁ノイズが影響するタイミングでのデータ送信を抑制する特別な ECU (電子制御ユニット) ノードを導入する。これは、別の車載ネットワークプロトコルである FlexRay で既に提案されているバス・ガーディアンの考え方を CAN の高電磁ノイズ対策に応用するものである。特別なガーディアンノードを追加するだけであり、ネットワーク内の他の ECU やプロトコルに変更を加える必要はない。

本研究で提案する手法は、電力変換回路に近接する CAN に対する十分な EMC 技術の適用が困難なとき、それを補強する有望な技術になることが期待される。検討を予定している高信頼化手法は何れも特許として権利化できる可能性がある。

### 3. 研究の方法

本研究の開始当初の方法は以下の通りである。

#### (1) 高電磁ノイズに対する故障モデルの検討

はじめに現在の予備実験用システムを本格化して、複数の環境について実験できるような CAN の評価用モデルネットワークを構築する。このモデルネットワークを用いて高電磁ノイズに対するビット誤り発生率とバースト性、およびフレームの誤り発生率とバースト性について検討する。さらに、ハイブリッド ARQ の適応性やバス・ガーディアンの設計・試作などのフィードバック情報から故障

モデルの妥当性について再検討する。また、最終的な故障モデルが適用可能な対象・範囲について評価・検討する。

#### (2) 環境適応型ハイブリッド ARQ

CAN プロトコルに対するハイブリッド ARQ では故障モデルとしてバースト的な誤りの発生が想定されるため、インターリーピングを併用することが望ましい。冗長なフレームを生成する度合いやインターリーピングの度合いは、情報の回復や通信路容量に大きく影響するため、スイッチングノイズの影響を測定して、要求されるリアルタイム性を考慮しながら適応的に決定する手法を検討する必要がある。検討された故障モデルや適応性に基づいて、故障率やバースト性に対応したハイブリッド ARQ を設計する。FEC モードに移行するときは、自動再送要求を無効化する必要があり、その方法も最終決定する。また、ソフトウェアとしてのテストとモデルネットワークでの実験・評価を行う。特に、誤りのバースト性に対する FEC モードの適応性について検証する。

#### (3) 高電磁環境向けバス・ガーディアン

ガーディアンの機能としては、従来の CAN と同様のバス監視のほか、電力変換回路の制御部との通信によるノイズ発生時期の事前検出がある。また、過去のノイズの発生状況による未来のノイズ発生時期や持続時間の予測なども考えられる。故障モデルから想定される誤りのレベルを考慮して、誤り検出・予測の方法を検討する。その故障モデルやガーディアンの仕様の検討を基に、高電磁環境向けバス・ガーディアンの設計と試作を行う。また、ガーディアンを FPGA 実装して、モデルネットワークでの動作を実験・評価する。特に、ガーディアンによる予防保全的な信頼性とネットワークのスループットとのトレードオフについて定量的に観測する。

#### 4. 研究成果

初年度(27年度)には、予備実験用モデルネットワークを用いて高電磁ノイズに対するビット誤り発生率とバースト性、およびフレームの誤り発生率とバースト性について検討した。しかしながら、このモデルネットワークに、複数の ECU 相当のノードとパソコン、CAN バス・アナライザなどを設置して拡張するまでには至らなかった。また、環境適応型ハイブリッド ARQ と高電磁環境向けバス・ガーディアンの基礎的検討については、大きな前進はなかった。理由としては、インバータから発生したノイズを CAN バスに印加する実験について、予定を大幅に上回る時間を要したことがあげられる。

28年度には、DC-DC コンバータから発生したノイズを CAN バスに印加する実験に基づき、故障発生率とバースト性に関する検討をおこなった。また、環境適応型ハイブリッド

ARQ の検討を始めた。CAN プロトコルに対するハイブリッド ARQ では故障モデルとしてバースト的な誤りの発生が想定されるため、インターリーピングを併用することを想定した。さらに、高電磁環境向けバス・ガーディアンの構成についても検討を進めた。具体的には、次の成果を得た。

DC-DC コンバータから発生したノイズを CAN バスに印加する実験では、特定の電源電圧でデータフレームの損失率がバースト的に増加して、それを超える電圧では逆に損失率が減少することが明らかになった。ただし、そのメカニズムは解明できていない。また、ハイブリッド ARQ へのインターリーピングの適用では、シミュレーションベースでその有効性を確かめた。バス・ガーディアンの構成の検討では、実装のための各種の資料や、類似したプロトコルであるフレックス・レイの耐障害性などの調査をおこなった。さらに、CAN の信頼性評価を数学モデルベースで実行するための離散時間マルコフモデルを構築し、数値計算およびモンテカルロシミュレーションによる数値評価を可能とした。

29年度には、モデルネットワークの再検討・調整をおこない、安定した測定環境を整えた。その後、ノイズによるフレームの損失を再現するためのノイズ挿入器を設計・製作し、環境適応型ハイブリッド ARQ のための基礎実験をおこなった。また、結果的に設計と実装までは実現できなかったものの、高電磁環境向けバス・ガーディアンの構成についての検討も進めた。さらに、CAN の特性を理論的に評価するための数学モデルを構築した。最終的に、以下の成果を得た。

(1) CAN ノードがサンプリングする直前に、バスの信号値を反転させるノイズ挿入器の試作に成功した。ハイブリッド ARQ にインターリーピングを併用する場合、冗長なフレームやインターリーピングの割合は、情報の回復や通信量に大きく影響するため、スイッチングノイズの影響を測定して、要求されるリアルタイム性を考慮しながら適応的に決定する手法を検討する必要がある。ノイズ挿入器の開発によって、1 ビットレベルでエラー挿入が可能となり、実際のスイッチングノイズを模擬しながらフレーム損失を観測した。

(2) バス・ガーディアンの最も重要な機能のひとつである、高調波ノイズの検出についての実現方法を提案した。CAN ノードにおける誤りの取り込みは、スイッチングノイズによる過渡的な信号値反転によって発生する。そのため、サンプリングのタイミングまでにノイズを検出することが重要である。本手法では、高次のハイパスフィルタで CAN バス信号に重畳したノイズを抽出し、整流回路と積分回路による平滑化で検出する。

(3) CAN のデータ通信における応答時間を評価するための新しい評価モデルを構築した。これは、従来のタイムトリガ型通信と呼ばれる定期的な通信だけでなく、イベントトリガ型通信と呼ばれるランダムな通信を取り扱うことができる確率モデルであり、より現実に近い CAN バス通信を数理的に評価することができる。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 4 件)

[1] Yudai Komori, Kazuya Sakai, and Satoshi Fukumoto, "A Fast and Secure Tag Authentication in Large-Scale RFID Systems Using Skip Graphs," *Computer Communications (COMCOM) - Elsevier*, vol. 116, pp. 77-89, Jan., 2018, DOI: 10.1016/j.comcom.2017.11.008

[2] Aromhack Saysanasongkham, Satoshi Fukumoto, and Masayuki Arai, "Fault masking issue on a dependable processor using BIST under highly electromagnetic environment," *Int. J. Computational Science and Engineering*, Vol. 14, No. 4, pp.309-320, 2017, DOI: 10.1504/IJCSE.2017.10005743

[3] Aromhack Saysanasongkham, and Satoshi Fukumoto, "The Reliability Analysis of the 1-out-of-2 System in Which Two Modules Do Mutual Cooperation in Recovery Mode," *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, Vol.E99-A, No.09, pp.1730-1734, Sep. 2016, DOI: 10.14923/transinfj.2014JDP7061

[4] 池田貴彦, 大原衛, 福本聡, 新井雅之, 岩崎一彦, 木村光宏, "ファイルバージョンニング機能を備えた分散データレプリケーションプロトコルの提案," *電子情報通信学会和文論文誌 D*, Vol. J98-D, No. 4, pp. 684-699, DOI: 10.14923/transinfj.2014JDP7061

〔学会発表〕(計 44 件)

[1] Yusuke Sugiura, Kazuya Sakai, Satoshi Fukumoto, "On Implementation of the Light-Weight MPAR protocol in NS2," *信学技報*, vol. 117, no. 45, DC2017-13, pp. 75-77, 2017 年 5 月.

[2] Shohei Karaguchi, Kazuya Sakai, and Satoshi Fukumoto, "A Top-k Recommendation Algorithm for Socia Networks," 第 77 回 FTC 研究会, 2017 年 7 月.

[3] 佐藤諒平, 福本聡, 大原衛, "離散時間マルコフ連鎖による車載ネットワーク CAN の信頼性解析," *信学技報*, vol. 117, no. 161, R2017-15, pp. 7-12, 2017 年 7 月.

[4] 唐口翔平, 酒井和哉, 福本聡, "遅延耐性ネットワークとクラウドソーシングを用いたトップ-k リストの作成," *信学技報*, vol. 117, no. 249, DC2017-32, pp. 73-76, 2017 年 10 月.

[5] 水原涼太, 酒井和哉, 福本聡, "災害復旧における協調タスク割当アルゴリズム," *信学技報*, vol. 117, no. 359, DC2017-72, pp. 19-24, 2017 年 12 月.

[6] 前田智徳, 酒井和哉, 福本聡, "アドホックネットワークにおけるステートレスな回避ルーティングに関する一考察," *信学技報*, vol. 117, no. 444, DC2017-83, pp. 37-42, 2018 年 2 月.

[7] 佐藤諒平, 酒井和哉, 福本聡, 大原衛, 新井雅之, "CAN の応答時間解析に関する一考察," *信学技報*, vol. 117, no. 480, CPSY2017-148, DC2017-104, pp. 269-274, 2018 年 3 月.

[8] 福地祐哉, 酒井和哉, 福本聡, "プライバシー保全型 k 近傍アルゴリズムに関する一考察," *信学技報*, vol. 117, no. 480, DC2017-103, pp. 263-268, 2018 年 3 月.

[9] Mamoru Ohara and Satoshi Fukumoto, "Off-path Caching for File Versioning in Named Data Networking," In Proceedings of the IEEE/IFIP International Conference on Dependable Systems and Networks (DSN) - Fast Abstract, pp. 107-108, Jun., 2017.

[10] Yudai Komori, Kazuya Sakai, and Satoshi Fukumoto, "RFID Grouping Protocol Made Private," In Proceedings of the IEEE/IFIP International Conference on Dependable Systems and Networks (DSN) - Fast Abstract, pp. 105-106, Jun., 2017.

[11] Tomoya Osuki, Kazuya Sakai, and Satoshi Fukumoto, "Contact Avoidance Routing in Delay Tolerant Networks," In Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM), pp 1-9, May, 2017.

[12] R. Sato, S. Fukumoto, and M. Ohara, "Reliability Evaluation of CANs in High Electromagnetic Environment," Proceedings of Joint Workshop on National Taiwan University of Science and Technology and Tokyo Metropolitan University, Taipei, Oct. 2017.

[13] 小薄誠也, 酒井和哉, 福本聡, "遅延耐性ネットワークにおける接触回避ルーティングの検討," *信学技報*, DC2016-3, pp. 11-14, 2016 年 5 月.

[14] 許斐康司, 中村宗幸, 酒井和哉, 福本聡, "車載ネットワーク CAN の高電磁環境向けハイブリッド通信プロトコル," *信学技報*, DC2016-2, pp. 7-10, 2016 年 5 月.

[15] 小森雄大, 酒井和哉, 福本聡, "大規模な RFID システムのためのランダムスキップグラフ認証," *信学技報*, DC2016-1, pp. 1-6, 2016 年 5 月.

[16] 福本聡, ``高電磁環境下における高信頼順序回路の検討," 日本 OR 学会信頼性研究会, 2016 年 6 月.

[17] 小薄誠也, 酒井和哉, 福本聡, "遅延耐性ネットワークにおける接触回避ルーティングの評価," 第 75 回 FTC 研究会, 2016 年 7 月.

[18] 小森雄大, 酒井和哉, 福本聡, "大規模な RFID システムにおけるスキップグラフを用いた認証," 第 15 回情報科学技術フォーラム, C-28, 2016 年 9 月.

[19] 小薄誠也, 酒井和哉, 福本聡, "遅延耐性ネットワークにおける接触回避の評価尺度," 信学技報, DC2016-69, pp. 27-30, 2016 年 12 月.

[20] 小森雄大, 酒井和哉, 福本聡, "RFID システムにおけるセキュアなグルーピングプロトコル," 第 76 回 FTC 研究会, 2017 年 1 月.

[21] 杉浦佑介, 酒井和哉, 福本聡, "マルチパス・アボイダンス・ルーティング(MPAR)についての一考察," 信学技報 DC2016-81, pp. 41-44, 2017 年 2 月.

[22] 佐藤諒平, 酒井和哉, 福本聡, 新井雅之, 大原衛, "車載ネットワーク CAN の解析モデルに関する一考察," 信学技報 DC2016-91, pp. 2917-301, 2017 年 3 月.

[23] Mamoru Ohara, and Satoshi Fukumoto, "A Fundamental Study on Software Rejuvenation in Time Warp Simulation," Fast Abstracts of the 46th the Annual IEEE/IFIP International Conference on Dependable Systems and Networks, (DSN), Jun., 2016.

[24] Yudai Komori, Kazuya Sakai, and Satoshi Fukumoto, "Randomized Skip Graph-Based Authentication for Large-Scale RFID Systems," Lecture Notes in Computer Science - Wireless Algorithm, Systems, and Applications (WASA), vol. 9798, pp. 1-12, Aug., 2016.

[25] M. Ohara, S. Fukumoto, ``An Experimental Implementation of Software Rejuvenation in Time Warp Simulation," In Proceeding of the 8th International Workshop on Software Aging and Rejuvenation, Session 3, Oct., 2016.

[26] Muneyuki Nakamura, Koji Konomi, Mamoru Ohara, Kazuya Sakai, and Satoshi Fukumoto, "Electromagnetic Noise Tolerant Hybrid Communication Protocol for CANs," , In Proceeding of Pacific Rim International Symposium on Dependable Computing (PRDC), pp. 285-291, Jan, 2017.

[27] Aromhack Saysanasongkham, Satoshi Fukumoto, ``Redundant Configuration on FPGA with Rejuvenation for Real Time Applications,' 電子情報通信学会技術研究報告, DC2015-1, pp.1-6, 2015 年 4 月.

[28] Satoshi Fukumoto, Mamoru Ohara,

``Rejuvenation Strategies in Time Warp-Based Distributed Systems,' 電子情報通信学会技術報告, R2015-9, pp.45-48, 2015 年 5 月.

[29] 小薄誠也, 酒井和哉, 福本聡, 新井雅之, ``遅延耐性ネットワークにおける接触回避ルーティングのモデル化,' 第 73 回 FTC 研究会, セッション 4.

[30] 大原衛, 福本聡, ``タイムワープシミュレーションにおけるソフトウェア若化法に関する一考察,' 第 73 回 FTC 研究会, セッション 3.

[31] 中村宗幸, 大原衛, サイサナソンカムアロムハック, 新井雅之, 酒井和哉, 福本聡, 和田圭二 ``高電磁環境下における CAN 高信頼化手法の実験的評価,' 電子情報通信学会技術研究報告, DC2015-22 pp.1-8, 2015 年 8 月.

[32] 小薄誠也, 酒井和哉, 福本聡, 新井雅之, ``遅延耐性ネットワークにおける接触回避ルーティング,' 電子情報通信学会技術研究報告, IN2015-57, pp.25-28, 2015 年 10 月.

[33] Aromhack Saysanasongkham and Satoshi Fukumoto, ``The Dual System Consisting of Two Modules Which Depend on Each Other in State Recovery Phase,' 電子情報通信学会技術研究報告, DC2015-28, pp.17-21, 2015 年 10 月.

[34] 許斐康司・中村宗幸・酒井和哉・福本聡, ``高電磁ノイズ下における CAN の一高信頼化手法,' 電子情報通信学会技術研究報告, DC2015-79, pp.35-40, 2015 年 12 月.

[35] 小薄誠也, 酒井和哉, 福本聡, ``遅延耐性ネットワークへの接触回避ルーティングの導入,' 第 2 回アシュアランスシステム研究会資料, pp.21-24, 2015 年 12 月.

[36] 小森雄大, 酒井和哉, 福本聡, ``RFID 通信に関する研究,' 第 74 回 FTC 研究会, セッション 2, 2016 年 1 月.

[37] 左藤樹洋, 酒井和哉, 福本聡, 新井雅之, ``クラウドコンピューティングにおける確率的オーバブッキングアルゴリズム,' 第 74 回 FTC 研究会, セッション 8, 2016 年 1 月.

[38] 許斐康司・中村宗幸・酒井和哉・福本聡, ``車載ネットワーク CAN におけるハイブリッド通信プロトコル,' 電子情報通信学会技術研究報告, DC2015-95, 2016 年 2 月.

[39] Kazuya Sakai, Min-Te Sun, and Satoshi Fukumoto, "Energy-Aware Priority for Tree-Based CDS Protocols," In Proceedings of the ICPP Workshop, Sep., 2015.

[40] Satoshi Fukumoto, Masayuki Arai, and Kazuya Sakai, "Side Effect Mitigation Algorithm for Cache Maintenance in Opportunistic Networks," In Proceedings of the ICPP Workshop, Sep., 2015.

[41] Muneyuki Nakamura, Mamoru Ohara, Aromhack Saysanasongkham, Masayuki

Arai, Kazuya Sakai, Satoshi Fukumoto, Keiji Wada, "Testbeds of a Hybrid-ARQ-Based Reliable Communication for CANs in Highly Electromagnetic Environments," In Proceedngs of the International Future Energy Electronics Conference (IFEEC), Nov., 2015.

[42] Satoshi Fukumoto and Mamoru Ohara, "Software Rejuvenation Schemes for Time Warp-based PDES," Fast Abstract of Proceedings of PRDC2015, Nov. 2015.

[43] Aromhack Saysanasongkham and Satoshi Fukumoto, "A Dual-FPGA Architecture with Rejuvenation for Realtime Applications," Fast Abstract of Proceedings of PRDC2015, Nov. 2015.

[44] Mamoru Ohara and Satoshi Fukumoto, "A Client-based Replication Protocol for Multiversion Cloud File Storage," Proceedings of The Second International Workshop on Dependability and Security of System Operation (DSSO 2015).

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

福本 聡 (FUKUMOTO, Satoshi)  
首都大学東京・システムデザイン学部・教授  
研究者番号：50247590

### (2) 研究分担者

酒井 和哉 (SAKAI, Kazuya)  
首都大学東京・システムデザイン学部・助教  
研究者番号：80730746