

令和 6 年 5 月 28 日現在

機関番号：22604
研究種目：基盤研究(C)（一般）
研究期間：2021～2023
課題番号：21K04551
研究課題名（和文）高調波ノイズを考慮して CAN の性能・信頼性を評価する新しい確率モデルの検討

研究課題名（英文）Studies on New Stochastic Models for Evaluating the Performance and Reliability of CAN Considering Harmonic Noise

研究代表者
福本 聡（Fukumoto, Satoshi）

東京都立大学・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） 2,100,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究では、標準車載ネットワーク CAN(controller area network) を想定した、高調波ノイズに対する高信頼化技術「ハイブリッド通信プロトコル」および「バスエンフォーサ」の有効性を評価するためのモデルを構築した。実験とシミュレーションモデルおよび数理モデルを併用して評価手法を検討した。その結果、ハイブリッド通信プロトコルでは、ネットワークがバスオフに至るまでの時間と可用性を対象とする信頼性評価モデルによってその有効性を示した。またバスエンフォーサでは、想定する誤りに対して、100台程度の複数ノードまでエンフォーサによるバス制御が可能であることなどを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で検討した、(a) の高調波ノイズによるビット誤りを記述する基礎的確率モデル、(b) CANハイブリッド通信プロトコルの評価モデル、(c) CANバスエンフォーサの評価モデルは、車載ネットワークとしての CAN および、高調波ノイズ環境での動作が想定されるロボットや産業機械などにおけるネットワーク設計にも応用可能である。また、高調波ノイズを考慮した新しいシミュレータの開発のための要素技術としても貢献できる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we developed a model to evaluate the effectiveness of high-reliability technologies, "Hybrid Communication Protocol" and "Bus Enforcer," against harmonic noise in the standard vehicular network CAN (Controller Area Network). We employed a combination of experimental, simulation, and mathematical models to examine the evaluation methods. The results demonstrated the effectiveness of the Hybrid Communication Protocol through a reliability evaluation model that focuses on the time until the network reaches bus off and its availability. Furthermore, the Bus Enforcer showed that bus control by the Enforcer is feasible for up to approximately 100 nodes in the assumed error scenarios.

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 高調波ノイズ 評価モデル ハイブリッド通信プロトコル バス・エンフォーサ

1. 研究開始当初の背景

EV(電気自動車)や HEV(ハイブリッドカー)、太陽光発電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が引き起こす高調波ノイズが問題となっている。このノイズは、変換回路自身が持つ制御回路や周辺装置、車載ネットワークなどに大規模な過渡故障(一時的な故障)を発生させる可能性があり、EMC(electro-magnetic compatibility, 電磁的両立性)技術による対策が必須である。しかし、電力変換機器のエミッション(ノイズレベル)の増加と情報通信機器のイミュニティ(ノイズ耐性)の低下によって、その充足が困難となりつつあることが、IEC(国際電気標準会議)などの国際委員会でも喫緊の課題として認識されている。

高機能化する EV, HEV のさらなる普及のためには、エミッションの効果的抑制とイミュニティの強化によって EMC の新たなバランスを模索しながら、従来のコスト当たりの性能指標に加えて、コスト当たりの信頼性指標を確実に向上させる必要がある。実際に、申請者らも、標準車載ネットワーク CAN(controller area network) を想定して、高調波ノイズに起因する過渡故障に対処した、「ハイブリッド通信プロトコル」および「バスエンフォーサ」などの新しい能動的な高信頼化技術を検討してきた。

しかしながら、それらの新たな技術の有効性を評価するための手法は必ずしも十分に整っているとは言えない。ネットワークシステムの設計では、最終的な実装による確認を除けばシミュレーションによる特性評価が一般的であるが、高調波ノイズに起因する過渡故障を扱える高効率なシミュレータの開発には大きなコストがかかる。特に、ネットワーク物理層における高調波ノイズの影響を精密に反映するのは簡単ではない。

一方、シミュレーションや実機による検証機能を代替・補完するものとして、数理的評価モデルがある。適切なモデル設定によって、短時間で高精度な評価ができる可能性があることが知られている。信頼性理論に基づき、高調波ノイズによる過渡故障を考慮した CAN の数理的評価モデルを検討し、その有効性と限界を明らかにすることは極めて有意義な課題である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、高調波ノイズによる誤りを考慮した CAN の性能・信頼性に関する数理的評価モデルを構築することである。具体的には、三つの研究項目、

- (a) 高調波ノイズによるビット誤りを記述する基礎的確率モデル
- (b) CAN ハイブリッド通信プロトコルの評価モデル
- (c) CAN バスエンフォーサの評価モデル

について取り組む。研究項目(a)は、同(b), (c)の過渡故障を回避する能動的な高信頼化手法の評価モデルを記述するための基礎となる。これらの研究項目に関する成果は、車載ネットワークとしての CAN に留まらず、高調波ノイズ環境での動作が想定されるロボットや産業機械などにおけるネットワーク設計にも資することが期待される。また、高調波ノイズを考慮した新しいシミュレータの開発のための要素技術としても貢献できる可能性がある。

3. 研究の方法

(a) 高調波ノイズによるビット誤りを記述する基礎的確率モデル

従来の CAN の数理的解析では、おもにメッセージ応答時間(メッセージの発生から受信までの時間)の最悪値の評価モデルが扱われてきた。これは、基本的に CAN がエンジンなどの制御系の周期的なメッセージの通信に使用されてきた経緯による。その多くは、簡単な組合せモデルや決定論的なモデルによって記述可能である。しかし、近年では、アプリケーション動作に依存してランダムに発生するメッセージの応答時間解析も必要となってきた。例えば、V2V(車車間通信)、ドアミラーやワイパーなどのユーザ操作に起因するメッセージや、カーナビや AV 機器に由来するメッセージなどの増加がその背景にある。申請者らは、HPQ(High Priority Queue)モデルと隠れマルコフ解析によって、ランダム発生メッセージの応答時間解析手法を提案した。

本研究項目では、高調波ノイズによるビット誤りを考慮した確率モデルを構築する。これは、上記の周期的メッセージとランダム発生メッセージおよび高調波ノイズによるビット誤りの影響の三つの要素を同時に取り扱う。故障モデル(誤り現象の抽象化)としては、ネットワークのデータリンク層に現れる情報ビット誤りを前提とする。すなわち、高調波ノイズが引き起こす物理層の信号値の歪みが論理値の誤りと認識されたものを確率モデルで考察する。単一ビット誤りと連続的なビット誤りの影響をそれぞれに順次記述する。解析で扱う評価尺度としては、エラー処理オーバーヘッド(メッセージ再送などの誤りに対処するための時間)、バス占有率、メッセージ応答時間などが想定される。

(b) CAN ハイブリッド通信プロトコルの評価モデル

ハイブリッド通信プロトコルは、CAN の基本的なプロトコルに変更を加えることなく、能動的に高調波ノイズによる誤りの影響を緩和する手法である。通常の ARQ(Automatic Repeat reQuest)モード(データ再送モード)と、バスオフモード(ネットワークの停止モード)のあいだに FEC(Forward Error Correction)モード(予めデータを冗長に送信するモード)を追加する

ことで、ノイズによる誤りの蓄積によってバスオフに至るまでの時間を拡大する効果などがある。これまでに、一対一の送受信ノード対および疑似ノイズ挿入器による実機計測によって、バスオフまでの平均稼働時間 MTTH(Mean Time To Halt)、総期待オーバーヘッドフレーム数、非稼働率の向上が示されている。

本研究項目では、上記の研究項目(a)の評価モデルをベースに、多対多のノード間通信におけるメッセージ応答時間を数理的に解析するモデルを検討する。これによって、FEC モードがもたらす実質的な通信速度向上の数理的な評価が可能になる。また、実装による検証が難しい、FEC モードによる信頼性向上とアプリケーション層のオーバーヘッドとのトレードオフの定量的評価も可能になる。それらの評価は、ハイブリッド通信プロトコルに対応したネットワークとそれを構成する EUC(電子制御ユニット) の設計支援などに資するものと期待される。

(c) CAN バスエンフォースの評価モデル

バスエンフォースは、バスの CAN-High および CAN-Low と呼ばれる 2 線間の電位差によって論理値が判定されることに着目した新しい耐ノイズ手法である。基本的なアイデアは、バスの値をサンプリングする瞬間だけ、特設した ECU からバスへ電圧を印加し、ノイズによって歪められた信号線電位であっても受信側で正しい論理値が検出されるように 2 線間の電位差を矯正するというものである。従来の CAN プロトコルに対して何の変更ももたらず、完全な互換性が保たれるという重要な利点がある。ただし、ノイズの検出から電圧の印加までには遅れ時間が存在するため、100% の確率で誤りを回避することは原理的に不可能である。これまでに、一対一の送受信ノード対および疑似ノイズ挿入機と試作エンフォースによって、一定の条件下では高い確率で機能することが確認されている。

ここでも、上記の研究項目 (a) の評価モデルをベースに、多対多のノード間通信における性能・信頼性を解析するモデルを検討する。モデルのねらいは、バス電位矯正による誤り回避の成否を考慮したメッセージ応答時間を明らかにすることである。また、多対多のノード間通信においてエンフォースに要求される遅れ時間の限界を定量的に評価することも期待できる。それらの評価モデルは、実ネットワークへのエンフォース適用に向けた指針を与えるものと思われる。

4. 研究成果

2021 年度には、まず研究項目(a)のモデル記述と評価尺度導出をおこない、つぎに、研究項目(b)と(c)のモデル記述を検討した。具体的には、高調波ノイズによるビット誤りを考慮した確率モデルを構築した。故障モデル(誤り現象の抽象化)としては、ネットワークのデータリンク層に現れる情報ビット誤りを前提とした。すなわち、高調波ノイズが引き起こす物理層の信号値の歪みが論理値の誤りと認識されたものを確率モデルで考察した。解析で扱った評価尺度としては、エラー処理オーバーヘッド(メッセージ再送などの誤りに対処するための時間)、バス占有率、メッセージ応答時間などである。研究項目(b)では、FEC モードがもたらす実質的な通信速度向上の数理的な評価を可能にすべくシミュレーションと実測による準備をおこなった。研究項目(c)においても、多対多のノード間通信における性能・信頼性を解析するモデルの検討をおこなった。モデルのねらいは、バス電位矯正による誤り回避の成否を考慮したメッセージ応答時間を明らかにすることであり、その準備としての実測評価をおこなった。

2022 年度には、2021 年度に引き続き、研究項目(a)のモデル記述と評価尺度導出をおこない、つぎに、研究項目(b)と(c)のモデル記述を検討した。具体的には、高調波ノイズによるビット誤りを考慮した確率モデルを再構築するための検討をおこなった。故障モデルとして、前年度と同様にネットワークのデータリンク層に現れる情報ビット誤りを前提とした。すなわち、高調波ノイズが引き起こす物理層の信号値の歪みが論理値の誤りと認識されたものを確率モデルで考察した。解析で扱った評価尺度としては、エラー処理オーバーヘッド、メッセージ応答時間などであるが、CAN バスへの高調波ノイズによるビット反転メカニズムの非対称性を新たに考慮した。研究項目(b)では、FEC モードがもたらす実質的な通信速度向上の数理的な評価に先がけて、シミュレーションと実測による準備をおこない、そこまでの成果を発表するようにまとめた。研究項目(c)においても、多対多のノード間通信における性能・信頼性を解析するモデルのための基礎的な検討をおこなった。前年度に引き続き準備としての実測評価をおこなった。

最終年度である 2023 年度には、研究項目(a)において、単一ビット誤りに加えて連続的なビット誤りの影響を誤りの非対称性を考慮しながら検討した。続いて、研究項目(b)、(c) の前年度までの実験とシミュレーション結果を反映した数理モデルの記述を試みた。研究項目(b)では、研究項目(a)のモデルをベースに、多対多のノード間通信におけるメッセージ応答時間を数理的に解析するモデルを検討した。しかしながら、想定する誤りモードにおいては、FEC モードがもたらす実質的な通信速度向上は期待できないことが明らかとなった。そこで項目(b)では、最終的にネットワークがバスオフに至るまでの時間と可用性を対象とする信頼性評価モデルの構築を行いプロトコルの有効性を示した。研究項目(c)においても、研究項目(a)のモデルをベースに、多対多のノード間通信における性能・信頼性などを解析するモデルを検討した。しかし、想定する誤りモードでは、複数のノードをバスに接続したときのバスインピーダンスとエンフォースのバス制御能力の関係がまず問題となることが明らかとなった。そこで、シミュレーションと実測および数理的な解析によって、想定する誤りに対して、100 台程度の複数ノードまでエンフォースによるバス制御が可能であることなどを明らかにした。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 後藤 亘, 横山 慎悟, 大原 衛, 福本 聡
2. 発表標題 CANのバス電圧補正によるバスオフ攻撃への対抗手法
3. 学会等名 信学技報, R2022-11, pp.13-17
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 R. Sato, T. Kitabayashi, S. Fukumoto
2. 発表標題 Stochastic Evaluation Model Focusing on Single Bit Errors on the CAN Bus
3. 学会等名 Asia Pacific International Symposium on Advanced Reliability and Maintenance Modeling (APARM 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 後藤 亘, 横山 慎悟, 大原 衛, 福本 聡
2. 発表標題 高電磁ノイズに対するCANビット誤り補正手法の再検討
3. 学会等名 信学技報, DC2022-76, pp.21-25
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 横山 慎悟, 後藤 亘, 大原 衛, 福本 聡
2. 発表標題 CANにおけるARQおよびFECの性能と可用性に関する考察
3. 学会等名 FIT2021, C-019, 第1分冊, pp. 213-214, 2021.
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 後藤亘, 横山慎悟, 大原衛, 福本聡
2. 発表標題 誤り処理機構を悪用したバスオフ攻撃への回避手法
3. 学会等名 信学技報, vol. 121, no. 426, DC2021-88, pp. 56-60, 2022年3月.
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤諒平, 福本聡
2. 発表標題 コントローラエリアネットワークのデータフレームとエラーフレームの確率的伝送時間解析
3. 学会等名 第88回FTC研究会, 2024年1月25日.
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 佐藤諒平, 福本聡
2. 発表標題 コントローラエリアネットワークにおけるデータフレームの確率的送信時間解析
3. 学会等名 信学技報, vol. 123, no. 451, DC2023-111, pp. 41-46, 2024年3月.
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 横山慎悟, 田辺翔大, 後藤亘, 大原衛, 福本聡
2. 発表標題 CANにおける対バスオフ攻撃システムの適用可能性の検討
3. 学会等名 信学技報, DC2024, 2024年8月
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------