

耐故障性の実現と通信帯域幅の最小化を両立させる TDMA スケジューリング手法

岩永 明人^{1,†1,a)} 杉原 真^{2,3,b)}

受付日 2012年11月5日, 採録日 2013年4月5日

概要: 本稿では, TDMA (Time Division Multiple Access) 方式の通信を行う FlexRay において, 通信データの信頼性を満たし, 通信帯域幅を最小化する車載ネットワークシステムの設計手法を提案する. 通信帯域幅を最小化することにより, 一般的なコストモデルの下で安価な配線や電子部品の使用が可能になる. 提案手法は, 通信媒体の故障率と通信データの目標故障率よりフレームの再送回数を決定し, フレームのペイロードセグメントのサイズを最適化することで, 通信帯域幅を最小化する整数線形計画問題を与える. 計算機実験より, 我々の提案手法は各フレームに必要な再送を保証した FlexRay の設計が可能であることを確認し, 信頼性と通信帯域幅の間にトレードオフの関係が存在することを示した.

キーワード: 信頼性, 設計手法, 車載システム, 組込みネットワーク

TDMA Scheduling Method for Fault Tolerant Communication and Minimization of Bus Bandwidth

AKIHITO IWANAGA^{1,†1,a)} MAKOTO SUGIHARA^{2,3,b)}

Received: November 5, 2012, Accepted: April 5, 2013

Abstract: This paper presents a design method to guarantee reliability of each transfer data and minimization of bus bandwidth required for the realization of a communication mechanism of the FlexRay. The reduction of communication bandwidth contributes to cutting down the manufacturing cost for network wires and controllers to build a distributed embedded system. We determine the number of retransmissions of each transfer data and formulate an integer linear programming (ILP) problem to optimize a payload size of a frame under hard real-time and reliability constraints. In experiments, our proposed method showed a design of the FlexRay that be able to guarantee retransmissions of each frame. Furthermore, our experiments showed a trade-off relationship between the communication bandwidth and reliability.

Keywords: dependability, design methodology, automotive system, embedded network

¹ 九州大学大学院統合新領域学府オートモーティブサイエンス専攻
Department of Automotive Science, Graduate School of Integrated Frontier Sciences, Kyushu University, Fukuoka 819-0395, Japan

² 九州大学システム LSI 研究センター
System LSI Research Center, Kyushu University, Fukuoka 819-0395, Japan

³ 独立行政法人科学技術振興機構, CREST
Japan Science and Technology Agency, CREST, Chiyoda, Tokyo 102-0076, Japan

^{†1} 現在, ボッシュ株式会社シャシーコントロール事業部ドライバーアシスタンス部門
Presently with Bosch Corporation Chassis Systems Control Japan Driver Assistance Business Unit, Shibuya, Tokyo 150-8360, Japan

a) iwanaga@soc.ait.kyushu-u.ac.jp

b) sugihara@slrc.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

自動車の制御システムにおいては, 環境特性, 安全性, および快適性の向上を目的に, システムの電子制御化が急速に進展している. 車載電子システムは, 電子制御を行うために複数の ECU (Electronic Control Unit) が搭載されており, ECU は通信ネットワークを介して互いに通信を行っている. x-by-wire をはじめとする高度な車両制御システムを実現するためには, ハードリアルタイム性, およ

本論文の簡約版は, 2012 年 10 月に東京の国立オリンピック記念青少年センターで開催された, 組込みシステムシンポジウムにて発表済みである.

び信頼性の高い通信機構が求められる。同様に、車載電子システムは、高価な電子部品やワイヤハーネスから構成されるため、低コストな分散組込みシステムを実現する設計技術が求められる。

次世代の車載ネットワークプロトコルとして FlexRay が規格化された [1]。現在の FlexRay の仕様においては、2.5, 5, および 10 [Mbps] の 3 種類の通信帯域幅が設定可能である。FlexRay は、通信帯域を使用するにあたり、通信レイテンシにおける決定性と、実効帯域幅を向上するためのメディアアクセス制御を備えたネットワークプロトコルである。FlexRay の通信機構は、2 種類の TDMA (Time Division Multiple Access) [2] 方式によって通信を行う。1 つ目は、STDMA (Static Time Division Multiple Access) 方式で通信レイテンシにおける決定性を提供し、2 つ目は、FTDMA (Flexible Time Division Multiple Access) [3] 方式で実効帯域幅を向上させるための通信方式を提供する。物理層において FlexRay は迅速なエラー検出の機構が提供されている。また、通信の同期の誤差によって生じる障害から通信チャンネルを保護する機構によって、エラーを抑制する機能が提供されている。しかしながら、FlexRay では、通信を行うデータ構造であるフレームの送信において通信エラーが発生した場合、エラーの検出は可能であるが、通信エラー発生後に自動でフレームを再送する機能は備わっていない。

本稿では、TDMA 通信方式の FlexRay において、通信媒体の故障率に基づきノードが送信する各通信データに対する信頼性要求を考慮し、通信帯域幅を最小化する設計方法論を提案する。提案手法では、信頼性要求を満たすフレームの再送回数を決定し、ハードリアルタイム制約の下でフレームのペイロードセグメントのサイズを最適化することで通信帯域幅を最小化する。通信帯域幅を最小化することにより、低速で安価な製造コストで車載ネットワークシステムの実現が可能になる。これまでの研究では、ハードリアルタイム制約の下で FlexRay バスの通信帯域幅を最小化する手法 [4]、および信頼性要求を再送回数として与えたスケジューリング手法を提案した。しかしながら、通信媒体の故障率に基づいたシグナルの信頼性要求を考慮した定量的な評価は行われていない。

本稿は次のように構成される。2 章では、提案手法で対象とする通信プロトコル FlexRay について説明する。3 章では、通信媒体の故障率に基づきシグナルの信頼性要求を考慮したフレームの再送回数を算出し、フレームのペイロードサイズを最適化することで通信帯域幅を最小化する数理計画モデルを構築する。4 章では、信頼性と通信帯域幅に関する計算機実験を行い、提案手法の有効性について議論する。5 章では、提案手法と関連研究について比較を行う。最後に 6 章では、本稿の結論を述べる。

2. FlexRay プロトコル

本章では、提案手法で対象とする FlexRay プロトコルについて簡単に説明する。FlexRay に関する詳細については、仕様書 [1] を参照されたい。

2.1 フレームフォーマット

FlexRay は、フレームと呼ばれるデータ構造を用いて通信を行う。FlexRay のフレームは、ヘッダセグメント、ペイロードセグメント、およびトレーラセグメントの 3 つのデータセグメントから構成される。FlexRay のフレームフォーマットを図 1 に示す。ヘッダセグメントでは、主にフレーム ID とペイロード長が格納されている。ペイロードセグメントは 0 から 254 バイトのサイズを持ち、実際に転送するデータを格納する領域である。トレーラセグメントでは、ヘッダセグメントとペイロードセグメントの CRC が格納され、フレーム全体のエラー検出の機能を持つ。

2.2 時間階層構造

FlexRay は、階層的な時間構造を持った通信方式である。FlexRay の時間階層構造は、通信サイクルレベル、アービトレーショングリッドレベル、マクロティックレベル、およびマイクロティックレベルの 4 つの時間階層レベルから構成される。1 つの通信サイクルに着目した時間階層の構成を図 2 に示す。

通信サイクルレベルでは、通信サイクルを周期的に実行する。1 つの通信サイクルは、スタティックセグメント、ダイナミックセグメント、シンボルウィンドウ、およびネットワークアイドル時間

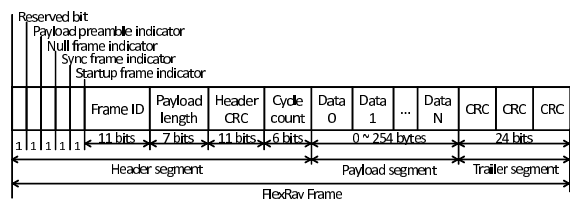


図 1 フレームフォーマット

Fig. 1 Frame format.

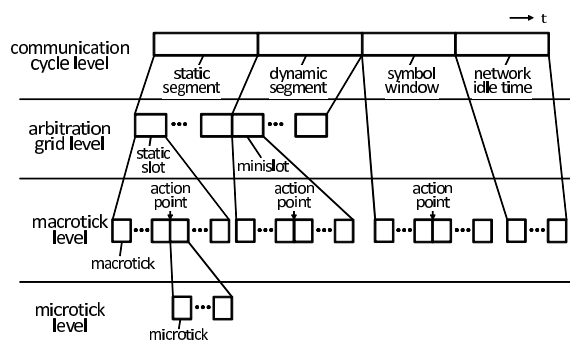


図 2 FlexRay の時間階層構造

Fig. 2 FlexRay timing hierarchy.

トワークアイドルタイムから構成される。スタティックセグメントでは、STDMA 方式に基づいた調停が行われ、ダイナミックセグメントでは、FTDMA 方式に基づいた調停が行われる。シンボルウィンドウは、各ノードの状態を確認するために特定のビットパターンを送信する領域である。ネットワークアイドルタイムは、同期のために補正を行うための時間領域である。

アービトレーショングリッドレベルでは、スタティックセグメント、およびダイナミックセグメントから構成される。スタティックセグメントでは、スタティックスロットと呼ばれる時間間隔で構成し、ダイナミックセグメントでは、ミニスロットと呼ばれる時間間隔で構成する。

マクロティックレベルは、グローバルタイムの最小単位であるマクロティックから構成される。アクションポイントは、ノードがフレームの送信を開始する時刻である。マイクロティックレベルは、ノードのクロックから得られるローカルタイムの最小単位であるマイクロティックから構成される。

2.3 メディアアクセス制御

FlexRay のメディアアクセス制御は、2.2 節の時間階層構造で示したように、2つの方式が存在する。1つ目は、スタティックセグメントにおいて STDMA 方式に基づいたデータの転送を行うものである。スタティックセグメントでは、スタティックスロットと呼ばれる時間の単位に分割され、各スロットには静的にスケジューリングされたフレームが割り当てられる。

2つ目は、ダイナミックセグメントの範囲で FTDMA 方式に基づいたデータの転送を行うものである。FTDMA 方式では、フレームの送信要求に基づいて通信を行う方式である。フレームの送信要求が衝突した場合は、フレームの優先度に基づいて通信媒体を動的に割り当てる。なお本稿では、安全性に対して重大な影響を与えるシグナルは、ハードリアルタイム性が要求されると仮定し、スタティックセグメントのみに着目する。

すべてのフレームには、フレーム ID が与えられる。フレーム ID は、ユニークにスタティックスロットに割り当てられる。次のスタティックスロットの時刻になると、スロットカウンタは現在の値から 1つ増加する。フレームのフレーム ID がスロットカウンタと一致する場合に、当該するフレームが送信される。該当するフレーム送信の後には、チャンネルアイドルデリミタ (DLM: channelidle DeLiMiter)、およびチャンネルアイドル (IDL: channel IDLe) 時間が付加される。スロットカウンタの初期値は 1 であり、スタティックセグメントが終了するとスロットカウンタ値は再初期化される。図 3 にスタティックセグメント内のタイミングの詳細を示す。

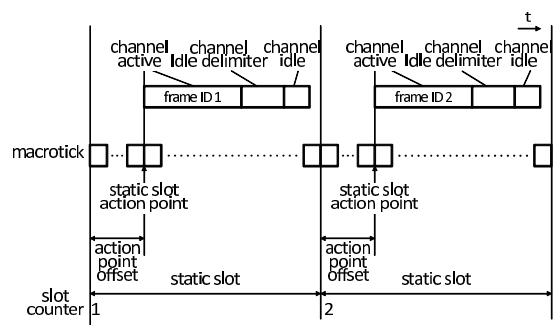


図 3 スタティックセグメント内のタイミング
Fig. 3 Timing within a static segment.

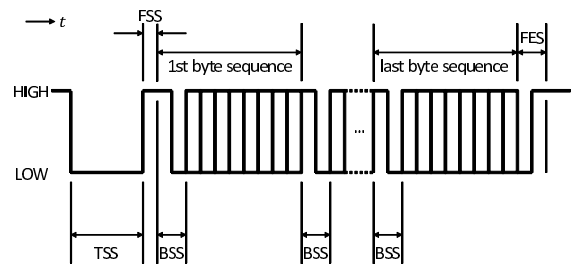


図 4 フレームの符号化
Fig. 4 Frame encoding.

2.4 フレームの符号化

FlexRay のフレームは、5つのビット列で符号化される。5つのビット列は、送信開始列 (TSS: Transmission Start Sequence)、フレーム開始列 (FSS: Frame Start Sequence)、バイト開始列 (BSS: Byte Start Sequence)、フレーム終了列 (FES: Frame End Sequence)、およびダイナミックフレーム指示列 (DTS: Dynamic Trailing Sequence) である。TSS および FSS はフレームの開始時に挿入される。フレームのすべてのバイトにはその先頭に BSS が挿入される。FES はフレームの後に挿入される。DTS はダイナミックセグメントにおいてフレームの FES の直後に挿入される。

図 4 にスタティックセグメントの符号化されたフレームを示す。TSS はネットワークを介して適切な接続準備を開始するために用いられる。送信ノードは、FlexRay のパラメータで規定される一定期間連続する LOW 信号から構成される TSS を生成する。FSS は TSS 後の最初に発生する量子化誤差を補うために用いられる。FSS は 1 ビット時間の HIGH 信号によって構成される。ノードは送信されるフレームの TSS の直後のビットストリームに FSS を追加する。BSS は受信デバイスに対してタイミング情報を与えるために用いられる。BSS は 1 ビット時間の HIGH 信号と 1 ビット時間の LOW 信号から構成される。FES はフレームの最後のバイト列の終了を示すために用いられる。FES は 1 ビット時間の LOW 信号と 1 ビット時間の HIGH 信号で構成される。ノードはフレームの最後の拡張バイト列の直後のビットストリームに FES を付加する。

3. 提案手法

本章では、通信媒体の故障率に基づき、シグナルの信頼性要求を考慮したフレームの再送数決定法、およびハードリアルタイム制約の下でペイロードサイズを最適化することにより、通信帯域幅を最小化する提案手法を説明する。

3.1 提案手法の概要

提案手法では、FlexRay においてシグナルの信頼性制約、およびデッドライン制約を満たす最小な通信帯域幅を決定する。一般的に、ワイヤハーネスを高周波化するためには、遮断シールド、インピーダンス整合、および太径化を施す必要がある。ワイヤハーネスの高周波化は製造コストを増加させる。本稿においては、ワイヤハーネスを含む通信機構の動作周波数を削減すれば、製造コストを削減できると仮定する。

提案手法の概観を図 5 に示す。シグナルは、通信媒体に接続される各ノードが送信する通信データの振舞いとして定義される。各シグナルは、送信要求周期、デッドライン、データサイズ、および目標故障率から構成される。提案手法は、以下で示す 2 つの処理から構成される。まず、シグナルの要求仕様、通信媒体の故障率、およびフレームのフォーマットから信頼性制約を満たすフレームの再送回数を決定する。次に、再送回数とデッドライン制約を満たす最小の通信帯域幅を整数線形計画問題として定式化し、解を求めることで最適なフレームのペイロードサイズを決定する。

3.2 システムモデル

本稿では、ノードが一定のサイズのデータを周期的に送信する振舞いをシグナルと定義する。シグナルの集合を $S = \{s_1, s_2, \dots, s_{N_{sig}}\}$ として表す。S の要素であるシグナル s_i ($1 \leq i \leq N_{sig}$) は、 (T_i, D_i, C_i, ρ_i) の 4 つ組から定

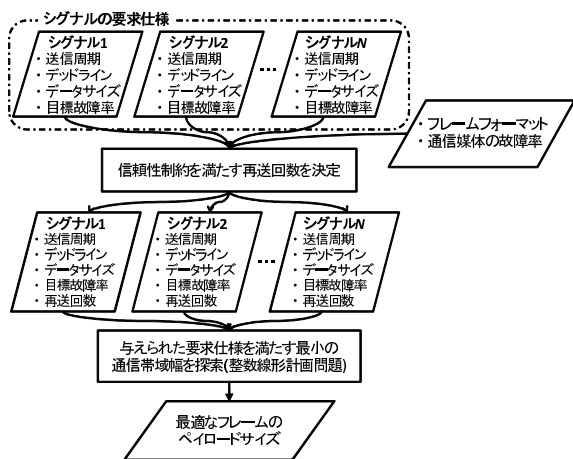


図 5 提案手法の概観

Fig. 5 Overview of our method.

義される。 T_i, D_i, C_i および ρ_i はそれぞれ、送信要求周期、送信要求時刻からの相対デッドライン、データサイズ、および各シグナルの 1 時間あたりの目標故障率である。シグナル s_i はデータサイズ C_i のデータを T_i 時間ごとに送信することを要求し、このとき 1 つのデータの送信に要する時間が期間 D_i 以内で、故障率が ρ_i 以内であることが要求される。本稿では、ノードが通信媒体を介して送ることを要求するシグナルの 1 つのインスタンスをメッセージと定義する。

FlexRay では、シグナル s_i のメッセージを送信する際にはフレームと呼ばれる単位で送信する。フレームサイズ F は、

$$F = O_h + O_t + P \tag{1}$$

と表される。ただし、 P はフレームのペイロードサイズ、 O_h と O_t はヘッダとトレーラのサイズである。

FlexRay は式 (1) で表したフレームを符号化して送信を行う。符号化されたフレーム F_{enc} は、

$$F_{enc} = F + \left(TSS + FSS + \frac{F}{8} BSS + FES + DLM + IDL \right) \tag{2}$$

と表される。式 (2) を変形してまとめると、

$$F_{enc} = \left(1 + \frac{BSS}{8} \right) P + O$$

$$O = \left(1 + \frac{BSS}{8} \right) (O_h + O_t) + TSS + FSS + FES + DLM + IDL \tag{3}$$

と表される。ただし、 TSS, FSS, BSS および FES は FlexRay のフレーム符号化で付加されるビット数で、 DLM および IDL は FES から次のフレーム送信までの時間を表すビット数である。

3.3 信頼性制約

FlexRay におけるフレームの信頼性制約に関しては、Tanasa らが通信路で発生する符号誤りを考慮したフレームの再送回数の決定法を提案している [14], [15]。しかしながら、Tanasa らの手法では故障率をメッセージのデータサイズのみしか考慮していないため、実装の観点から正確でないという問題点がある。実装におけるメッセージの送信は、フレームと呼ばれるデータ構造で送信されるため、ヘッダ、ペイロード、およびトレーラセグメントに加えて、符号化のビット数を考慮する必要がある。本稿では、フレームのデータサイズを考慮した故障率を提案し、さらに 1 つのメッセージを複数のフレームに分割して送信する場合に対しても故障率を算出できる手法を提案する。

各シグナルに対するメッセージの信頼性制約を与えるために、メッセージの故障率を定義する。本稿では、通信媒

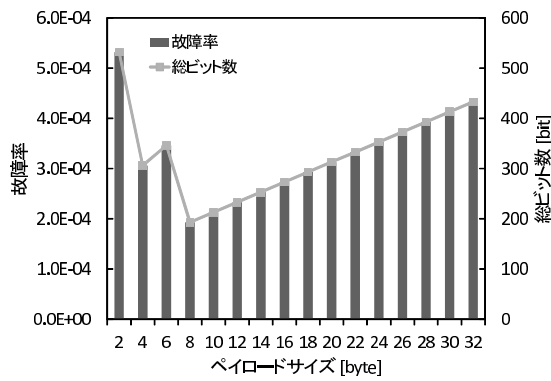


図 6 フレームの故障率

Fig. 6 Failure rate of a frame.

体において、1ビット送信時間あたりの故障率を Q と仮定する。これより、1ビット送信時間あたりの故障率 Q を用いると、1ビット送信時間あたりの信頼度は $1 - Q$ となる。データサイズ C_i のシグナル s_i のメッセージを、ペイロードサイズ p のフレームで送信する場合の故障率 $P_i(p)$ は、

$$P_i(p) = 1 - (1 - Q)^{\lceil \frac{C_i}{p} \rceil} \cdot f_{\text{enc}}(p) \quad (4)$$

と表される。ただし、 $f_{\text{enc}}(p)$ は、ペイロードサイズが p で符号化されたフレームサイズで、

$$f_{\text{enc}}(p) = \left(1 + \frac{BSS}{8}\right)p + O \quad (5)$$

と表される。

フレームの故障率 $P_i(p)$ の例として、1ビット送信時間あたりの故障率 Q を 10^{-7} とし、データサイズ C_i を 64 [bit] とした場合のフレームの故障率と総ビット数を図 6 に示す。フレームの故障率 $P_i(p)$ は、メッセージをフレームで送信する総ビット数に比例して増加する。図 6 の例では、フレームのペイロードサイズが 8 [byte] の時に故障率が最小であることを表している。

フレームの故障率 $P_i(p)$ を用いて、再送回数 k_i を含めてすべてのフレームが連続して送信エラーが発生する故障率 $PF_i(k_i, p)$ は、

$$PF_i(k_i, p) = \{P_i(p)\}^{k_i+1} \quad (6)$$

と表される。フレームの故障率 $P_i(p)$ の例と同様に、1ビット送信時間あたりの故障率 Q を 10^{-7} とし、データサイズ C_i を 64 [bit] とした場合の各再送回数に対する再送を考慮したフレームの故障率を図 7 に示す。図 7 の例では、再送回数 K を増加させるたびに故障率が約 10^3 減少することを示している。

再送を考慮したフレームの故障率 $PF_i(k_i, p)$ より、少なくとも 1 つのフレームが送信できる信頼度を求めることができる。単位時間 τ (1 時間) あたりのメッセージの信頼度 $PS_i(k_i, p)$ は、

$$PS_i(k_i, p) = (1 - PF_i(k_i, p))^{\frac{\tau}{T_i}} \quad (7)$$

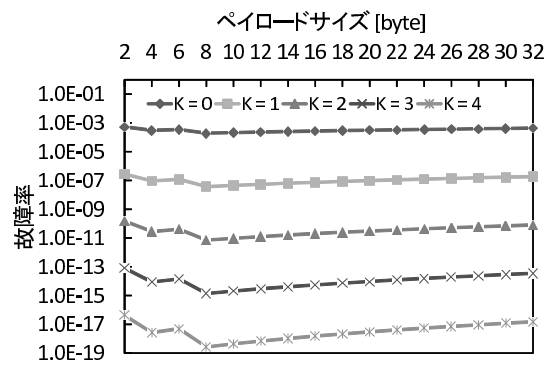


図 7 送信を考慮したフレームの故障率

Fig. 7 Failure rate of frames with retransmission.

と表される。

単位時間 τ あたりのメッセージの信頼度 $PS_i(k_i, p)$ より、各シグナルの目標故障率 ρ_i を用いて、

$$1 - PS_i \leq \rho_i, \forall i \quad (8)$$

をメッセージの信頼性制約と表すことができる。

3.4 フレームの再送を考慮した FlexRay 通信帯域幅最小化問題

ハードリアルタイム制約、および送信フレームの再送回数の制約の下で、ペイロードサイズを最適化することで通信帯域幅を最小化する最適化問題を定義する。

通信サイクル時間は式 (3) を用いて、

$$t_{\text{cc}} = \sum_{i=1}^{N_{\text{sig}}} \frac{F_{\text{enc}} + K_i F_{\text{enc}}}{w} = \sum_{i=1}^{N_{\text{sig}}} \left\{ \left(1 + \frac{BSS}{8}\right) P + O \right\} (1 + K_i) \frac{1}{w} \quad (9)$$

と表される。ただし、 w は通信帯域幅を表す。

シグナル s_i のメッセージは、1 つ以上のフレームで送信される。図 8 はシグナル s_i のメッセージがフレームとして送信するための時間を表している。まず、最初のフレームが対応するスタティックスロットによって送信される前に、待ち時間が発生する。ノードが送信を要求する時刻とスロット間是非同期であると仮定すると、最悪待ち時間は t_{cc} 時間である。次に、待ち時間の後は、フレームの送信時間が続く。最初のフレームを送信する時刻から最後のフレームを送信する時刻までの時間は、再送回数が 0 回 ($K_i = 0$) の場合と、1 回以上 ($K_i \geq 1$) の場合でそれぞれ異なる。再送回数が 1 回以上の場合、最後のフレームと再送フレームを送信する時間を t_{cc} 時間と近似する。それぞれの最悪送信時間 l_i は、

$$l_i = \begin{cases} \alpha + \frac{F_{\text{enc}}}{w} & (K_i = 0) \\ \alpha + t_{\text{cc}} & (K_i \geq 1) \end{cases} \quad (10)$$

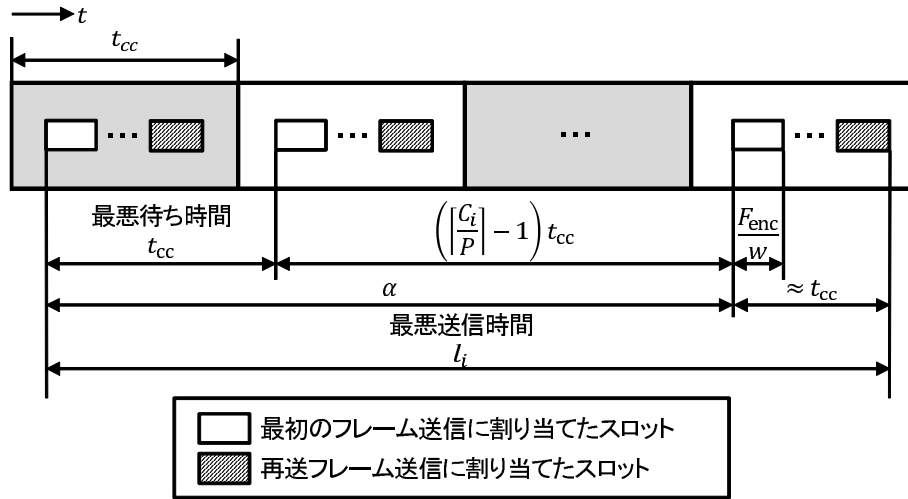


図 8 シグナルの最悪送信時間

Fig. 8 Worst case latency of a signal.

$$\alpha = t_{cc} + \left(\left\lceil \frac{C_i}{P} \right\rceil - 1 \right) t_{cc} \quad (11)$$

と表される. 式 (10) を変形してまとめると,

$$l_i = \begin{cases} \left\lceil \frac{C_i}{P} \right\rceil t_{cc} + \frac{F_{enc}}{w}, & (K_i = 0) \\ \left\lceil \frac{C_i}{P} \right\rceil t_{cc} + t_{cc}, & (K_i \geq 1) \end{cases} \quad (12)$$

最悪送信時間 l_i より, デッドライン制約は,

$$l_i \leq D_i, \forall i \quad (13)$$

と表される. また, 送信ノードにおいてフレームのバッファリングが発生しないための制約として,

$$D_i \leq T_i, \forall i \quad (14)$$

を付加する.

以上より, メッセージの信頼性を考慮し, ペイロードサイズを最適化することで通信帯域幅を最小化する非線形計画モデルは以下のように表される.

Minimize the cost function w
subject to

- (1) $F_{enc} = (1 + \frac{BSS}{8})P + O.$
- (2) $O = (1 + \frac{BSS}{8})(O_h + O_t) + TSS + FSS + FES + DLM + IDL.$
- (3) $\begin{cases} \left\lceil \frac{C_i}{P} \right\rceil t_{cc} + \frac{F_{enc}}{w} \leq D_i & (K_i = 0) \\ \left\lceil \frac{C_i}{P} \right\rceil t_{cc} + t_{cc} \leq D_i & (K_i \geq 1) \end{cases}, \forall i.$
- (4) $D_i \leq T_i, \forall i.$

Variables

- f_{enc} is a integer variable.
- w is a real variable.

3.5 非線形計画モデルの線形化

3.4 節で示した問題を整数線形計画として解くためには,

目的関数および制約式を線形関数の形として表現する必要がある. 3.4 節で示したような非線形計画モデルは, 標準的な線形化手法を用いて線形化することが可能である [16].

本稿では, 有限の通信帯域幅を用いると仮定する. 通信帯域幅の有限集合 $\mathbb{W} = \{W_1, W_2, \dots, W_{N_{bw}}\}$ が与えられる. 通信帯域幅 W_j の選択を示す 0-1 変数 x_j を導入する.

$$x_j = \begin{cases} 1 & (\text{通信帯域幅として } W_j \text{ を選択した場合}) \\ 0 & (\text{そうでない場合}) \end{cases} \quad (15)$$

通信帯域幅の選択は, 1 つのみという制約が必要である. よって, x_j に以下の条件式を与える.

$$\sum_{j=1}^{N_{bw}} x_j = 1 \quad (16)$$

通信帯域幅 w は 0-1 変数 x_j を用いて,

$$w = \sum_{j=1}^{N_{bw}} W_j x_j \quad (17)$$

と表し, 式 (16) および式 (17) より, 式 (17) の逆数は,

$$\frac{1}{w} = \sum_{j=1}^{N_{bw}} \frac{1}{W_j} x_j \quad (18)$$

と表される.

式 (12) および式 (18) より, l_i は,

$$l_i = \begin{cases} \sum_{i,j} \frac{A_{i,j}}{W_j} x_j + \sum_j \frac{F_{enc}}{W_j} x_j, & (K_i = 0) \\ \sum_{i,j} \frac{B_{i,j}}{W_j} x_j, & (K_i \geq 1) \end{cases} \quad (19)$$

と表される. ただし, $A_{i,j}$, および $B_{i,j}$ はそれぞれ,

$$A_{i,j} = \left\lceil \frac{C_i}{P} \right\rceil \cdot F_{enc} (1 + K_i) \quad (20)$$

$$B_{i,j} = \left(\left\lceil \frac{C_i}{P} \right\rceil + 1 \right) \cdot F_{enc} (1 + K_i) \quad (21)$$

と表される。

以上より、整数線形計画問題は次のように表される。

Minimize the cost function $w = \sum_j W_j x_j$
subject to

(1) $\sum_j x_j = 1.$
 (2) $\begin{cases} L_1 \leq D_i, & (K_i = 0) \\ L_2 \leq D_i, & (K_i \geq 1) \end{cases}, \forall i.$
 (3) $L_1 = \sum_{i,j} \frac{A_{i,j}}{W_j} x_j + \sum_j \frac{F_{enc}}{W_j} x_j.$
 (4) $L_2 = \sum_{i,j} \frac{B_{i,j}}{W_j} x_j.$
 (5) $A_{j,k} = \lceil \frac{C_i}{P} \rceil \cdot F_{enc} (1 + K_i).$
 (6) $B_{j,k} = (\lceil \frac{C_i}{P} \rceil + 1) \cdot F_{enc} (1 + K_i).$
 (7) $O = (1 + \frac{BSS}{8}) (O_h + O_t) + TSS + FSS + FES + DLM + IDL.$
 (8) $D_i \leq T_i, \forall i.$

Variables

- x_j is a binary variable.

Bounds

- $0 \leq x_j \leq 1.$

4. 実験

本章では、各シグナルのメッセージに対して信頼性制約を満たす再送回数を決定し、フレームのペイロードサイズを最適化することで通信帯域幅を最小化する計算機実験を行う。いくつかのシグナルセットに対して通信帯域幅を調査し、提案手法の有効性を確認する。

4.1 実験環境

前章で構築した整数線形計画モデルを用いて最適化を行うために、シグナルの要求仕様を入力として、構築したモデルに従ったLPフォーマットファイルを生成するソフトウェアを作成した。整数線形計画問題を解くためのソルバとして、IBM ILOG CPLEX 12.4 [17] を用いた。本実験では、ペイロードサイズごとにLPファイルを列挙して最適化を行い、通信帯域幅が最小であるペイロードサイズを最適値とした。最適化のために用いた計算機のCPUはIntel Core i7-X980 3.33 GHzである。フレームの符号化で用いたパラメータは表 1 で示すとおりであり、Idle delimiterの後のchannel idle時間は0と仮定した。

本実験では、SAEベンチマークシグナルセットおよびランダムに生成したシグナルセットに対して、目標故障率に対する通信帯域幅を調査した。フレームのペイロードサイズは0~254 [byte] までの偶数値を用いると仮定した。SAEベンチマークは、車載向け分散制御システムにおける通信データの要件を与えたもので、53種類のシグナルから構成される。各シグナルの送信周期、デッドライン、およびデータサイズの詳細は文献 [18], [19] で与えられている。ランダムに生成されるシグナルについては、送信周期および

表 1 ネットワークパラメータ

Table 1 Network parameters.

パラメータ名	サイズ
Header and Trailer	80 bits/frame
TSS	9 bits/frame
FSS	1 bits/frame
FES	2 bits/frame
DTS	2 bits/frame
Idle delimiter	11 bits/frame
Action point offset	10 bits/frame
BSS	2 bits/payload byte

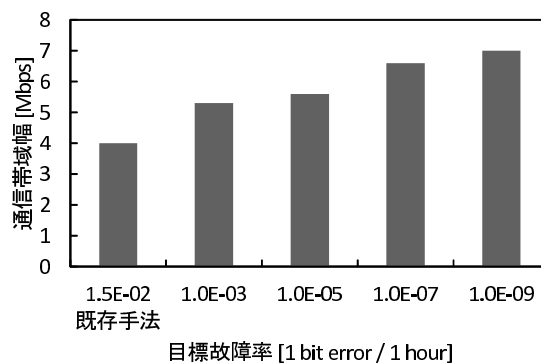


図 9 実験結果 (SAE ベンチマークシグナルセット)

Fig. 9 Experimental results (SAE benchmark signal set).

デッドラインの範囲を5~1,000 [ms], データサイズの範囲を8~64 [bit] とした。ただし、本実験では送信周期とデッドラインは同じ時間であると仮定した。

4.2 実験結果

4.2.1 SAE ベンチマークシグナルセット

SAEベンチマークを基にしたシグナルセットに対して、各シグナルの目標故障率 ρ を 10^{-4} , 10^{-6} , 10^{-8} および 10^{-10} とし、1ビット送信時間あたりの故障率 Q を 10^{-7} とした場合の通信帯域幅を調査した。本実験では、既存手法であるフレームの再送を考慮しない場合 [4] を比較対象として用いた。既存手法の目標故障率は、最も高いシグナルの故障率である0.015を基準とした。目標故障率に対する通信帯域幅を図 9 に示す。SAEベンチマークにおいては、目標故障率 ρ を 10^2 減少させるたびに平均で約0.3 [Mbps] の通信帯域幅が増加する結果となった。また、FlexRayの最大通信帯域幅は10 [Mbps] であるため、本実験のすべての条件は実装可能であることが確認できた。

4.2.2 ランダムシグナルセット

ランダムシグナルセットでは、150個のシグナルセットを基準として生成した。次に、150個のシグナルセットから、10~140個のシグナルセットを作成した。各シグナル数のシグナルセットに対して、目標故障率 ρ を 10^{-4} , 10^{-6} および 10^{-8} とした場合の通信帯域幅を調査した。各シグナル数、および各目標故障率に対する通信帯域幅を図 10

表 2 提案手法と既存手法の比較

Table 2 Comparison between the proposal method and the conventional method.

	ハード RT 時間解析	ST セグメント スケジューリング	ハード RT 性を満たす シグナル数最大化	拡張性 最大化	定量的な 信頼性評価	通信帯域幅 最小化
Sugihara ら [4], [5]	○	○	×	×	×	○
Pop ら [7], [8]	○	×	×	×	×	×
Schmidt ら [10]	○	△	×	○	×	×
Lukasiewicz ら [9]	○	△	×	○	×	×
Park ら [11]	○	○	○	×	×	×
Zeng ら [12]	○	○	×	○	×	×
Li ら [13]	○	×	×	×	△	×
Tanasa ら [14], [15]	○	○	×	○	○	×
提案手法	○	○	×	×	○	○

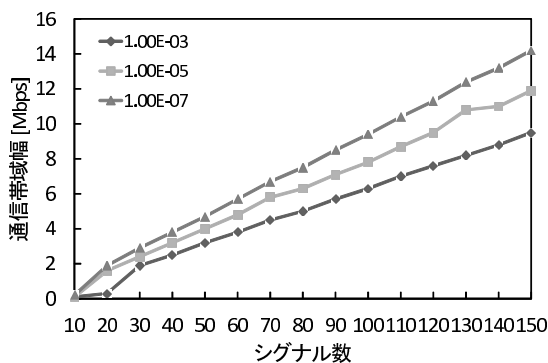


図 10 実験結果 (ランダムシグナルセット)

Fig. 10 Experimental results (Random signal sets).

に示す. SAE ベンチマークと同様に, 目標故障率を減少させるたびに通信帯域幅が増加する結果となった. また, シグナル数が増加するにつれて, 目標故障率が通信帯域幅に与える影響は増加した. 本実験では, シグナル数が 150 個のシグナルセットにおいて, 目標故障率 ρ を 10^2 減少させるたびに約 2 [Mbps] の通信帯域幅が増加することを確認した.

5. 関連研究

FlexRay ネットワークシステムの設計手法は, これまでにいくつかの研究によって提案されている. 本章では, 表 2 にハードリアルタイム (ハード RT) 性の時間解析, スタティックセグメント (ST セグメント) のスケジューリング, ハードリアルタイム性を満たすシグナル数の最大化, 拡張性の最大化, 定量的な信頼性評価, および帯域幅最小化の観点から提案手法と既存手法の比較を示している.

Sugihara らは, ハードリアルタイム制約の下でフレームのペイロードを最適化することで, FlexRay バスの通信帯域幅を最小化する手法を提案した [4], [5]. しかしながら, Sugihara らの手法は, 通信路の故障率に基づいた定量的な信頼性評価は考慮していないため本手法と異なる.

Tanasa らは, 通信路で発生する符号誤り (過渡的故障) を考慮した信頼性要求に基づいたフレームの再送回数の計

算法, およびスタティックセグメントのスケジューリング手法を提案した [14], [15]. Tanasa らの研究は, 信頼性要求に基づき使用するスロット数を最小化するものであり, 本研究と類似したアプローチである. しかしながら, Tanasa らの研究では通信帯域幅を定数として取り扱うため, 通信帯域幅削減を目的とする本研究とは異なる. また, 通信サイクル時間, およびスタティックスロット時間を定数としているため, スケジューリングの探索範囲を限定している.

Li らは, FlexRay システムにおける信頼性を高めることを目的とした手法を提案している [13]. Li らの研究は, フレームの再送を考慮することを目的とするものであり, 本研究と類似した問題設定を行っている. しかしながら, Li らの手法はすでにスケジューリングされた FlexRay の構成に対して再送可能な通信データ数を最大化するため, 一部の通信データの再送が保証されない可能性がある. また, 通信帯域幅を定数としていることから送信データの量が少ない場合, 通信帯域幅を浪費する.

Pop らは, 既存の通信プロトコルである TTP の時間解析手法 [6] を基にして, FlexRay バスのスタティックセグメントにおけるフレームの送信時間解析の手法を提案した [7], [8]. Pop らの研究によって, ハードリアルタイム制約の下における FlexRay の時間解析は可能となったが, 実現可能なスケジューリング手法は提供されていない.

Park ら, および Zeng らは, 提案手法と同様に要求仕様として定義されるシグナルに対して, スタティックセグメントのスケジューリングを行う手法を提案した [11], [12]. Park らの手法は, デッドライン制約を満たすシグナル数を最大化することを目的としてスタティックスロットのサイズを最適化するものである. Zeng らの手法は, タイムトリガ方式のネットワークシステムにおいて拡張性を性能指標として目的を設定し, 拡張性を最大化するスケジューリング手法である. 拡張性とは, 通信サイクルにおける未使用スロット数のことを指し, システム開発における機能拡張の容易さを表している. しかしながら, 文献 [11], [12] の研究も通信帯域幅を定数として取り扱っており, 製造コ

ストに着目する本研究とは明らかに異なる。

Lukasiewicz ら, および Schmidt らは, FlexRay のスタティックセグメントのスケジューリング手法を提案した [9], [10]. Lukasiewicz ら, および Schmidt らの手法は, Zeng らの手法と同様にスタティックスロットへ割り当てる数を指標として用いている. しかしながら, Lukasiewicz ら, および Schmidt らの手法は, 通信サイクルの時間を定数として扱うため, スケジューリングの探索範囲を限定している. また, 通信帯域幅も定数として取り扱っているため, ネットワークシステムのコスト削減は期待できない.

6. おわりに

本稿では, TDMA 方式の通信を行う FlexRay において, 通信媒体の故障率に基づいて各シグナルの信頼性要求を満たす再送回数を決定し, フレームのペイロードサイズを最適化することで通信帯域幅を最小化する設計手法を提案した. 構築した整数線形計画モデルに従い, SAE ベンチマーク, およびランダムに生成したシグナルセットを用いて, 目標故障率に対する通信帯域幅を調査した. 計算機実験では, 各シグナルの信頼性要求を考慮した FlexRay ネットワークシステムの設計が可能であることを確認した. 実験結果より, SAE ベンチマーク, およびランダムに生成したシグナルセットにおいて, 信頼性と通信帯域幅の間にトレードオフ関係が存在することを示した. 提案手法は, 次世代の自動車開発において耐故障性の実現, および製造コストの削減に寄与する. さらに, 本手法は TDMA ネットワークシステムのパラメータの設計を自動化するため, 車載電子システム開発における設計費用の増加の抑制に貢献できると考えられる.

謝辞 本研究は, JST CREST-DVLSI の支援によるものである.

参考文献

[1] FlexRay Consortium: FlexRay communication system - protocol specification version 3.0.1 (2010).
 [2] Sollenberger, N.R., Chuang, J.C.I., Chang, L.F., Ariyavisitakul, S. and Arnold, H.: Architecture and implementation of an efficient and robust TDMA frame structure for digital portable communications, *IEEE Trans. Vehicular Technology*, Vol.40, No.1, pp.250–260 (1991).
 [3] Cena, G. and Valenzano, A.: On the properties of the flexible time division multiple access technique, *IEEE Trans. Industrial Informatics*, Vol.2, No.2, pp.86–94 (2006).
 [4] Sugihara, M. and Iwanaga, A.: Minimization of FlexRay Bus Bandwidth for Hard Real-Time Applications, *Journal of Information Processing*, Vol.21, No.1, pp.46–52 (2013).
 [5] Sugihara, M. and Iwanaga, A.: Slot multiplexing optimization for minimizing the operating frequency of a FlexRay bus under hard real-time constraints, to appear in *Journal of Information Processing*, Vol.21, No.3

(2013).
 [6] Eles, P., Peng, Z., Pop, P. and Doboli, A.: Scheduling with bus access optimization for distributed embedded systems, *IEEE Trans. Very Large Scale Integration Systems*, Vol.8, No.5, pp.472–491 (2000).
 [7] Pop, P., Eles, P. and Peng, Z.: Schedulability-driven communication synthesis for time-triggered embedded systems, *Real-Time Systems*, Vol.26, No.3, pp.297–325 (2004).
 [8] Pop, T., Pop, P., Eles, P., Peng, Z. and Andrei, A.: Timing analysis of the flexray communication protocol, *Proc. Euromicro Conference on Real-Time Systems*, pp.203–216 (2006).
 [9] Lukasiewicz, M., Glas, M., Teich, J. and Milbredt, P.: Flexray schedule optimization of the static segment, *Proc. IEEE/ACM International Conference Hardware/Software Codesign and System Synthesis*, pp.363–372 (2009).
 [10] Schmidt, K. and Schmidt, E.G.: Message scheduling for the FlexRay protocol: The static segment, *IEEE Trans. Vehicular Technology*, Vol.58, No.5, pp.2170–2179 (2009).
 [11] Park, I. and Sunwoo, M.: FlexRay network parameter optimization method for automotive applications, *IEEE Trans. Industrial Electronics*, Vol.58, No.4, pp.1449–1459 (2011).
 [12] Zeng, H., Matala, M.D., Ghosal, A. and Sangiovanni-Vincentelli, A.: Schedule optimization of time-triggered systems communicating over the FlexRay static segment, *IEEE Trans. Industrial Informatics*, Vol.7, No.1, pp.1–17 (2011).
 [13] Li, W., Di Natale, M., Zheng, W., Giusto, P., Sangiovanni-Vincentelli, A. and Seshia, S.A.: Optimizations of an application-level protocol for enhanced dependability in FlexRay, *Proc. Conference on Design, Automation and Test in Europe*, pp.1076–1081 (2009).
 [14] Tanasa, B., Bordoloi, U.D., Eles, P. and Peng, Z.: Scheduling for Fault-Tolerant Communication on the Static Segment of FlexRay, *Real Time Systems Symposium*, pp.385–394 (2010).
 [15] Tanasa, B., Bordoloi, U.D., Eles, P. and Peng, Z.: Reliability-aware frame packing for the static segment of flexray, *Proc. Conference on Embedded Software*, pp.175–184 (2011).
 [16] H.P. ウィリアムス (著), 前田英次郎 (訳): 数理計画モデルの作成法, 産業図書株式会社 (1995).
 [17] The IBM Corp.: The IBM ILOG CPLEX optimization studio V12.4 documentation, available from <http://publib.boulder.ibm.com/infocenter/cosinfoc/v12r4/>.
 [18] Tindell, K. and Burns, A.: Guaranteeing message latencies on control area network (CAN), *Proc. International CAN Conference*, pp.1–11 (1994).
 [19] Tindell, K.W. and Hansson, H.: Analysing real-time communications: Controller area network (CAN), *Proc. Real-Time Systems Symposium REAL94*, No.6, pp.259–263 (1994).



岩永 明人 (学生会員)

昭和 63 年生. 平成 23 年徳山工業高等専門学校専攻科情報電子工学専攻修了. 平成 25 年九州大学大学院統合新領域学府オートモーティブサイエンス専攻博士前期課程修了. 平成 24 年組込みシステムシンポジウム 2012 優秀論文賞受賞. 自動車技術会会員.



杉原 真 (正会員)

昭和 49 年生. 平成 13 年九州大学大学院システム情報科学研究科情報工学専攻博士後期課程修了. 日本学術振興会特別研究員, デューク大学研究員, 九州システム情報技術研究所研究員, 豊橋技術科学大学講師および准教授を経て, 平成 23 年より九州大学システム LSI 研究センター准教授. VLSI 設計技術およびコンピュータシステム設計技術に関する研究に従事. 博士 (工学). 平成 12 年情報処理学会創立 40 周年記念論文賞, 平成 20 年安藤博記念学術奨励賞, および平成 21 年船井情報科学奨励賞をそれぞれ受賞. 電子情報通信学会, IEEE 各会員.