

信頼性要求に基づいた耐故障性を実現する TDMA スケジューリング手法

岩 永 明 人[†] 杉 原 真^{††,†††}

近年の自動車制御システムは、環境性能、安全性、及び快適性の向上を目的とした電子化が急速に進展している。車載向け通信システムにおいては、外来ノイズに対する信頼性、及び仕様で定められるデッドライン時刻までに通信が完了できる安価な車載ネットワークシステムが求められる。本稿では、TDMA 方式の通信を行う FlexRay において、通信データ毎に信頼性要求として再送を考慮し、通信機構の実現に要する製造コストを削減する車載システム設計手法を提案する。本稿では、通信データの最小単位であるフレームのペイロードセグメントのサイズを最適化し、通信帯域幅を最小化する整数計画問題を与える。計算機実験により、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た。

TDMA scheduling method for fault tolerant communication based on reliability requirements

AKIHITO IWANAGA[†] and MAKOTO SUGIHARA^{††,†††}

Recently, electronic device in an automobile is increasing in order to improve the environment, safety and comfort. In-vehicle network systems are required a cheap communication mechanism to send out transmission data from node to node by their deadline time, and reliability of the electromagnetic noise. This paper presents a design method to reduce manufacturing costs required for the realization of communication mechanism of FlexRay considering retransmission of a data. We formulate an integer linear programming (ILP) problem to optimize a payload size of the frame under hard real-time constraints. In computational experiments, our proposed method shows a design of FlexRay that be able to guarantee retransmissions of each frame.

1. はじめに

近年の自動車の制御システムは、環境性能、安全性、及び快適性の向上を目的としたエレクトロニクス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。次世代の自動車開発においては、x-by-wire システムのようなハードリアルタイム性を要求されるシステムの実現に向けて、信頼性の高い通信機構が求められている。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、低コストな分散組み込みシステムを実現する設計技術が求められている。

現在、FlexRay が次世代の車載ネットワークプロトコルとして規格化されている¹⁾。FlexRay は、通信帯域を使用する上で、通信レイテンシにおける決定性と、通信帯域を有効利用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、TDMA (Time Division Multiple Access)²⁾ 方式で通信レイテンシにおける決定性を提供し、FTDMA (Flexible Time Division Multiple Access)³⁾ 方式で通信帯域を有効利用する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 は通信データの最小単位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、エラーの検出を行うことは可能であるが、通信エラー発生後にフレームを再送する機能は備わっていない。本稿では、TDMA 方式の通信を行う FlexRay にお

[†] 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,
iwanaga@soc.ait.kyushu-u.ac.jp

^{††} 九州大学システム LSI 研究センター
System LSI Research Center, Kyushu University

^{†††} 独立行政法人科学技術振興機構, CREST
Japan Science and Technology Agency, CREST

いて、通信データ毎に信頼性要求を考慮し、通信機構を製造するためのコスト削減を両立する設計方法論を提案する。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を提案したが、通信エラーに対する耐故障性は考慮していない⁴⁾。提案手法では、信頼性要求として FlexRay におけるデータ送信の最小単位である各フレームに対して再送を保証し、通信帯域幅を最小化する整数線形計画モデルを構築する。提案手法は、スケジューリングの段階で各フレームの再送を考慮するため、全てのフレームに対して信頼性を保証することが可能である。さらに、最小の通信帯域幅にすることにより、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。FlexRay ネットワークシステムの設計手法に関しては幾つか提案されているが、信頼性と製造コスト削減の両立に着目した研究は行われていない。

本稿は、次のように構成される。2 節では、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 節では、送信データの再送を保証し、フレームのペイロードサイズを最適に決定することで通信帯域幅を最小化する設計手法を提案する。送信データの再送を考慮し、通信帯域幅を最小化する問題を定義し、非線形計画モデル、及び線形計画モデルを与える。4 節では、通信帯域幅の最小化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 節では、提案手法と関連研究について比較を行う。最後に 6 節では、本稿の結論を述べる。

2. FlexRay プロトコル

本節では、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、仕様書を参照されたい¹⁾。

2.1 時間階層構造

FlexRay は、階層的な時間構造をもった通信方式である。各階層の構成を図 1 に示す。時間階層において最も大きな時間の単位を通信サイクルと呼ぶ。通信サイクルを繰り返すことによって、周期的にデータを転送する。通信サイクルの後は、ネットワークアイドルタイムが付加される。ネットワークアイドルタイムは、ノード間の同期に必要なパラメータの計算を行うための時間であり、データの送信は行わない領域である。

次に、通信サイクルの下位は、アービトレーショングリッドレベルである。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、ダイナミックセグメント、及びシンボルウィンドウから構成される。

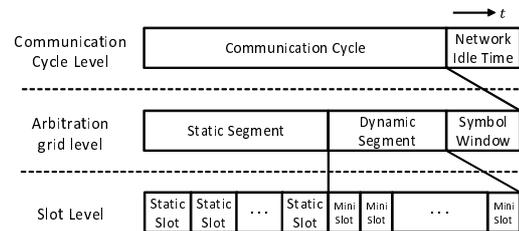


図 1 FlexRay の時間階層構造
Fig.1 FlexRay timing hierarchy.

スタティックセグメントでは、TDMA 方式に基づいたデータの転送を行う。TDMA 方式は、通信媒体を時分割によって共有する通信方式である。ダイナミックセグメントでは、FTDMA 方式に基づいたデータの転送を行う。FTDMA 方式は、通信媒体に接続されたノードの送信要求を用いる方式である。FTDMA 方式は、データの衝突が発生する可能性があるため、優先度による調停を行う。

最後に、アービトレーショングリッドレベルの下位は、スロットレベルである。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が繰り返される。一方、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が繰り返される。

2.2 メディアアクセス制御

FlexRay のメディアアクセス制御は、前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 TDMA 方式に基づいたデータの転送を行う。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の転送を行う。

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。FTDMA は優先度に基づいて、通信媒体を動的な割り当てを行う方法である。優先度に基づいた調停を行うため、優先度の低いフレームは送信を要求した時の通信サイクルでデータを転送することを保証することができない。なお本稿では、自動車制御システムのような安全に対して重大な影響を与える通信データはハードリアルタイム性が要求されることを仮定し、スタティックセグメントのみに着目する。

全てのフレームは各々にフレーム ID が与えられる。フレーム ID はユニークにスタティックセグメントに割り当てられ、フレーム ID によって送信スロットが決定される。フレーム ID をユニークにノードへ割り当てることで調停を実現する。新しいスタティッ

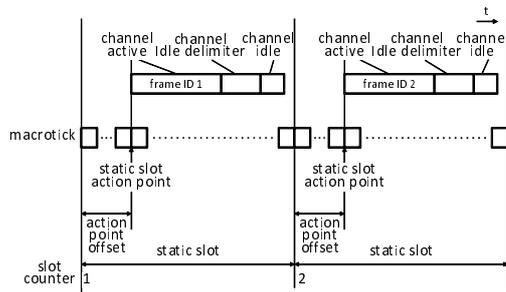


図 2 スタティックセグメント内のタイミング
Fig. 2 Timing within a static segment.

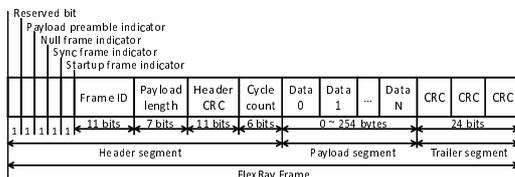


図 3 フレームフォーマット
Fig. 3 Frame format.

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。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2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。

2.3 フレームフォーマット

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、及びトレーラセグメントの3つの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3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チェックの機能をもつ。

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)、及びダイナミックフレーム指示列(DTS:

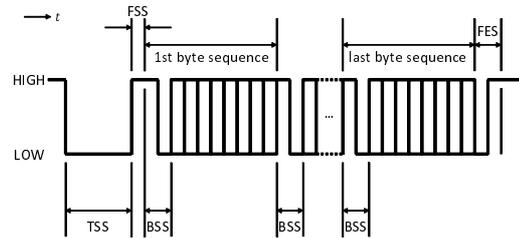


図 4 フレームの符号化
Fig. 4 Frame encoding.

Dynamic Trailing Sequence)である。TSS及びFSSはフレームの開始時に挿入される。フレームの全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

本節では、フレームの再送を考慮し、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の概要を説明する。次に、最適化を行うためにフレームの再送を考慮した通信帯域幅最小化問題を定義、及び整数線形計画モデルを構築する。

3.1 提案手法の概要

提案手法は、車載通信システムにおいて外来ノイズに対する信頼性、及びデッドライン制約を満たす最小限の通信帯域幅を決定する。本手法では、信頼性要求としてフレームの再送回数を保証することで、通信データの信頼性を保証する。

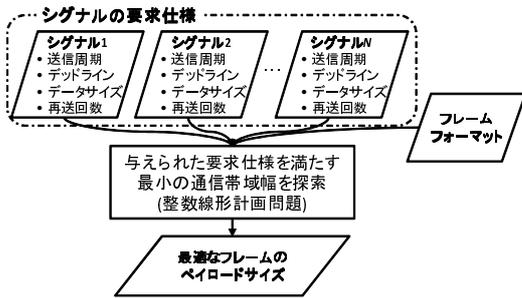


図 5 提案手法の概観
Fig. 5 The overview of our proposal method.

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、及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する。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。

次に、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る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、及び再送回数から構成される。シグナルの要求仕様、及びフレームのフォーマットから要求仕様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、構築した数理解画モデルの解を求めることで、最適なペイロードサイズを決定する。

3.2 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の下で、送信フレームの再送回数の要求を満たし、通信帯域幅を最小化するフレームのペイロードサイズを決定する最適化問題を定義する。シグナルは、ノードが一定のサイズのデータを周期的または非周期的に送信する振る舞いとして定義される。ここで、シグナルの集合を $\mathcal{S} = \{s_1, s_2, \dots, s_{N_{sig}}\}$ として表す。 \mathcal{S} の要素である各シグナル $s_i (1 \leq i \leq N_{sig})$ は、 (T_i, D_i, C_i, K_i) の組から定義される。 T_i, D_i, C_i 及び K_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、及びフレームの再送回数である。シグナル s_i はデータサイズ C_i のデータを T_i 時間毎に送信を要求し、1 つのデータの送信に要する時間が期間 D_i 以内で K_i の再送を保証することが要求される。

シグナル s_i を送信する際にはフレームと呼ばれる単位で転送を行い、フレームサイズは、

$$f = O_h + O_t + p \quad (1)$$

と表される。 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は、

$$f_{enc} = f + \left(TSS + FSS + \frac{f}{8} BSS + FES + DLM + IDL \right) \quad (2)$$

と表される。式 (2) を変形してまとめると、

$$\begin{aligned} f_{enc} &= \left(1 + \frac{BSS}{8} \right) p + O \\ O &= \left(1 + \frac{BSS}{8} \right) (O_h + O_t) \\ &\quad + TSS + FSS + FES + DLM + IDL \end{aligned} \quad (3)$$

と表される。ただし、 TSS, FSS, BSS, FES, DLM 及び、 IDL は、FlexRay のフレーム符号化で付加されるビット数を表す。

通信サイクル時間は式 (3) を用いて、

$$\begin{aligned} t_{cc} &= \sum_{i=1}^{N_{sig}} \frac{f_{enc} + K_i f_{enc}}{w} \\ &= \sum_{i=1}^{N_{sig}} \left\{ \left(1 + \frac{BSS}{8} \right) p + O \right\} (1 + K_i) \frac{1}{w} \end{aligned} \quad (4)$$

と表される。ただし、 w は通信帯域幅を表す。

シグナル s_i は 1 つ以上のフレームで送信される。図 6 はシグナル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。通信媒体とノードは非同期であることを仮定すると、最悪待ち時間は通信サイクル t_{cc} 時間である。次に、待ち時間後はフレームを送信する時間が続く。最初のフレームを送信する時刻から最後に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り、それぞれの最悪送信時間 l_i は、

$$l_i = \begin{cases} \alpha + \frac{f_{enc}}{w} & (K_i = 0) \\ \alpha + t_{cc} & (K_i \geq 1) \end{cases} \quad (5)$$

$$\alpha = t_{cc} + \left(\left\lceil \frac{C_i}{p} \right\rceil - 1 \right) t_{cc} \quad (6)$$

と表される。式 (5) を変形してまとめると、

$$l_i = \begin{cases} \left\lceil \frac{C_i}{p} \right\rceil t_{cc} + \frac{f_{enc}}{w}, & (K_i = 0) \\ \left\lceil \frac{C_i}{p} \right\rceil t_{cc} + t_{cc}, & (K_i \geq 1) \end{cases} \quad (7)$$

シグナル s_i の最悪送信時間より、デッドライン制

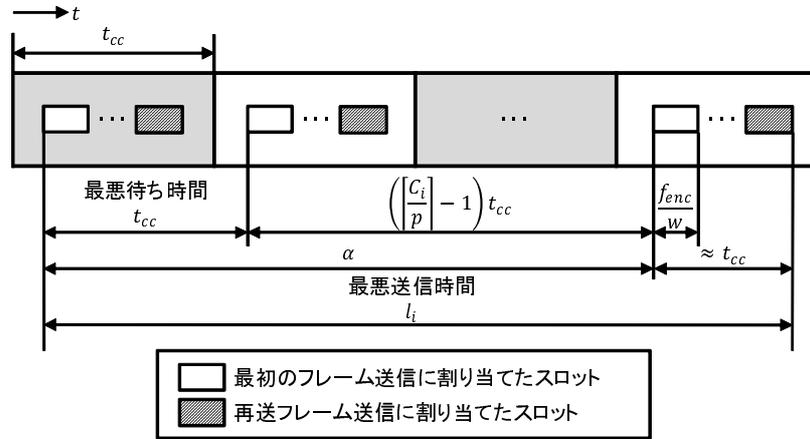


図 6 シグナルの最悪送信時間
Fig. 6 Worst case latency of a signal

約は,

$$l_i \leq D_i, \forall i \quad (8)$$

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,

$$D_i \leq T_i, \forall i \quad (9)$$

を付加する.

以上より, シグナルの信頼性の考慮及び通信帯域幅を最小化するための, ペイロードサイズを最適化する問題の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) $\begin{cases} \lceil \frac{C_i}{p} \rceil t_{cc} + \frac{f_{enc}}{w} \leq D_i & (K_i = 0) \\ \lceil \frac{C_i}{p} \rceil t_{cc} + t_{cc} \leq D_i & (K_i \geq 1) \end{cases}, \forall i.$
(4) $D_i \leq T_i, \forall i.$

Variables

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

Bounds

- $p \in \{x | x = 2y, 0 \leq y \leq 127, y \in \mathbb{Z}\}.$

3.3 非線形計画モデルの線形化

上記で示した問題を整数線形計画として解くためには, 目的関数及び制約式を線形関数の形として表現する必要がある. 本問題の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¹⁵⁾.

本手法では, 幾つかの通信帯域幅を用いることが

できると仮定する. 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.

$$x_j = \begin{cases} 1 & (\text{if } W_j \text{ is the bandwidth of the bus}) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (10)$$

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.

$$\sum_{j=1}^{N_{bw}} x_j = 1 \quad (11)$$

通信帯域幅 w は 0-1 変数 x_j を用いて,

$$w = \sum_{j=1}^{N_{bw}} W_j x_j \quad (12)$$

と表し, 式 (12) の逆数は,

$$\frac{1}{w} = \sum_{j=1}^{N_{bw}} \frac{1}{W_j} x_j \quad (13)$$

と表される.

次に, 制約式の線形化を行う. ペイロードサイズの集合を $\mathbb{P} = \{P_1, P_2, \dots, P_{N_{pl}}\}$ ペイロードサイズの選択を定式化するために 0-1 変数 y_k を導入する.

$$y_k = \begin{cases} 1 & (\text{if the size of a payload is } P_k) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (14)$$

ペイロードサイズの選択は, 1 つのみという制約が必要である. よって, y_k に以下の条件式を与える.

$$\sum_{k=1}^{N_{pl}} y_k = 1 \quad (15)$$

ペイロードサイズ p は 0-1 変数 y_k を用いて,

$$p = \sum_{k=1}^{N_{pl}} P_k y_k \quad (16)$$

と表し, 式 (16) の逆数は,

$$\frac{1}{p} = \sum_{k=1}^{N_{pl}} \frac{1}{P_k} y_k \quad (17)$$

と表される.

式 (15), 式 (17) を用いて, $\left\lceil \frac{C_i}{p} \right\rceil$ を線形化すると,

$$\left\lceil \frac{C_i}{p} \right\rceil = \sum_k \left\lceil \frac{C_i}{P_k} \right\rceil y_k \quad (18)$$

と表される.

式 (13), 式 (18) を用いると l_i は,

$$l_i = \sum_j \frac{O}{W_j} x_j + \sum_{j,k} \frac{A_{j,k} + B_{j,k} + C_{j,k}}{W_j} x_j y_k, (K_i = 0) \quad (19)$$

$$l_i = \sum_{i,j} \frac{O(1+K_i)}{W_j} x_j + \sum_{j,k} \frac{B_{j,k} + C_{j,k} + D_{j,k}}{W_j} x_j y_k, (K_i \geq 1) \quad (20)$$

と表される. ただし, $A_{j,k}$, $B_{j,k}$, $C_{j,k}$, 及び $D_{j,k}$ はそれぞれ,

$$A_{j,k} = P_k \left(1 + \frac{BSS}{8} \right) \quad (21)$$

$$B_{j,k} = \sum_i \left(O \left\lceil \frac{C_i}{P_k} \right\rceil (1 + K_i) \right) \quad (22)$$

$$C_{j,k} = \sum_i \left(A_{j,k} P_k \left\lceil \frac{C_i}{P_k} \right\rceil (1 + K_i) \right) \quad (23)$$

$$D_{j,k} = \sum_i \left(A_{j,k} P_k (1 + K_i) \right) \quad (24)$$

と表される.

式 (19), 式 (20) の $x_j y_k$ は非線形項である. 線形化を施すために, 新たに 0-1 変数 $z_{j,k}$ を導入する.

$$z_{j,k} = x_j y_k \quad (25)$$

$z_{j,k}$ を導入するために, 次の制約式を与える.

$$z_{j,k} - x_j \leq 0 \quad (26)$$

$$z_{j,k} - y_k \leq 0 \quad (27)$$

$$z_{j,k} - x_j - y_k \geq -1 \quad (28)$$

式 (25) を用いると, l_i は以下のように線形化される.

$$l_i = \sum_j \frac{O}{W_j} x_j + \sum_{j,k} \frac{A_{j,k} + B_{j,k} + C_{j,k}}{W_j} z_{j,k}, (K_i = 0) \quad (29)$$

$$l_i = \sum_{i,j} \frac{O(1+K_i)}{W_j} x_j + \sum_{j,k} \frac{B_{j,k} + C_{j,k} + D_{j,k}}{W_j} z_{j,k}, (K_i \geq 1) \quad (30)$$

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) $\sum_k y_k = 1.$
- (3) $\begin{cases} L_1 \leq D_i, & (K_i = 0) \\ L_2 \leq D_i, & (K_i \geq 1) \end{cases}, \forall i.$
- (4) $L_1 = \sum_j \frac{O}{W_j} x_j + \sum_{j,k} \frac{A_{j,k} + B_{j,k} + C_{j,k}}{W_j} z_{j,k}.$
- (5) $L_2 = \sum_{i,j} \frac{O(1+K_i)}{W_j} x_j + \sum_{j,k} \frac{B_{j,k} + C_{j,k} + D_{j,k}}{W_j} z_{j,k}.$
- (6) $A_{j,k} = P_k \left(1 + \frac{BSS}{8} \right).$
- (7) $B_{j,k} = \sum_i \left(O \left\lceil \frac{C_i}{P_k} \right\rceil (1 + K_i) \right).$
- (8) $C_{j,k} = \sum_i \left(A_{j,k} P_k \left\lceil \frac{C_i}{P_k} \right\rceil (1 + K_i) \right).$
- (9) $D_{j,k} = \sum_i \left(A_{j,k} P_k (1 + K_i) \right).$
- (10) $O = \left(1 + \frac{BSS}{8} \right) (O_h + O_t) + TSS + FSS + FES + DLM + IDL.$
- (11) $z_{j,k} - x_j \leq 0, \forall j, \forall k.$
- (12) $z_{j,k} - y_k \leq 0, \forall j, \forall k.$
- (13) $z_{j,k} - x_j - y_k \geq -1, \forall j, \forall k.$
- (14) $D_i \leq T_i, \forall i.$

Variables

- x_j is a binary variable.
- y_k is a binary variable.
- $z_{j,k}$ is a binary variable.

Bounds

- $0 \leq x_j \leq 1.$
- $0 \leq y_k \leq 1.$
- $0 \leq z_{j,k} \leq 1.$

4. 実 験

本節では, 全てのフレームに対して再送を考慮し, ペイロードサイズを最適化することで通信帯域幅を削減する提案手法の有効性を確認するために, 幾つかのシグナルセットに対して通信帯域幅を調査する.

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

4.1 実験環境

前節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、シグナルの仕様を入力として 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。本稿では、ILP ソルバとして GLPK 4.43¹⁶⁾ を用いた。最適化のために用いた計算機の CPU は Intel Core i5-M560 2.67GHz である。フレームの符号化で用いたパラメータは表 1 で示す値を使用した。本実験では、Idle delimiter 後の channel idle 時間は 0 と仮定した。

本実験では、SAE ベンチマーク及びランダムに生成したシグナルを用いて通信帯域幅をそれぞれ調査した。また、0~254[byte] までの偶数をペイロードサイズとして用いると仮定した。まず、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ある。SAE ベンチマークは 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、及びデータサイズの詳細は¹⁷⁾¹⁸⁾ で与えられている。次に、ランダムに生成されるシグナルは、送信周期及びデッドラインを 5~1000[ms]、データサイズを 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ことを条件とした。

4.2 実験結果

4.2.1 SAE ベンチマーク

SAE ベンチマークを基にしたシグナルセットに対して、全てのシグナルの再送回数を 0, 1, 2, 3, 4, 及び 5 回とした場合にそれぞれの通信帯域幅を調査した。各再送回数に対する通信帯域幅の結果を図 7 に示す。SAE ベンチマークにおいては、再送回数を増やす毎に、約 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、再送回数が 3 回以上の場合には実装できないことが確認できた。

4.2.2 ランダムシグナルセット

上記で示した条件を基に、シグナル数が 10~150 個のシグナルセットを各シグナル数で 20 通り作成した。

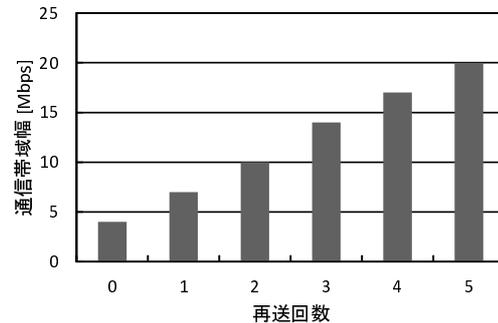


図 7 実験結果 (SAE ベンチマークシグナルセット)
Fig. 7 Experimental results (SAE benchmark signal set).

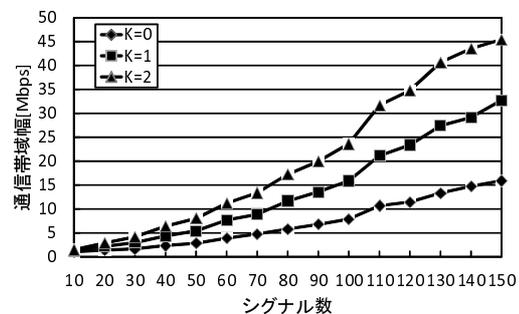


図 8 実験結果 (ランダムシグナルセット)
Fig. 8 Experimental results (Random signal sets).

各シグナルセットに対して、再送回数を 0, 1, 及び 2 回とした場合にそれぞれの通信帯域幅を調査した。各シグナル数、及び各再送回数に対する平均通信帯域幅の結果を図 8 に示す。SAE ベンチマークを用いた実験と同様に、再送回数に比例して必要な通信帯域幅は増加する結果となった。本実験で生成したシグナルの条件において、再送回数が 0, 1, 及び 2 回の場合、実装可能な最大シグナル数はそれぞれ 100, 70, 50 個であるということが確認できた。

5. 関連研究

FlexRay ネットワークシステムの設計手法は、これまでに幾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、通信データ再送の考慮、及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において

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	通信データ再送 の考慮	通信帯域幅 最小化
Sugihara ら ^{7),4)}			x	x	x	
Pop ら ^{6),7)}		x	x	x	x	x
Schmidt ら ⁹⁾			x	x	x	x
Lukasiewicz ら ⁸⁾			x	x	x	x
Park ら ¹⁰⁾				x	x	x
Zeng ら ¹¹⁾			x		x	x
Li ら ¹²⁾		x	x	x		x
Tanasa ら ^{13),14)}			x			x
提案手法			x	x		

フレームのペイロードサイズを最適化し、FlexRay パスの通信帯域幅を最小化する手法を提案した⁴⁾。Sugihara らの手法は、本手法と同様に通信帯域幅を最小化することにより、システムの製造コストを削減することを目的としている。しかしながら、Sugihara らの手法は通信エラーに対する耐故障性の考慮は行われていないため、フレームの再送を保証する本手法とは異なる。

Pop らは、既存の通信プロトコルである TTP の時間解析手法⁵⁾を基にして、FlexRay パ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^{6),7)}。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。

Lukasiewicz ら、及び 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^{8),9)}。しかしながら、^{8),9)}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。

Park ら、及び 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^{10),11)}。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なスロット数の事を指し、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、^{10),11)}ら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。

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¹²⁾。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 らの手法は既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、全て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。

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、及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^{13),14)}。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、及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。

6. おわりに

本稿では、TDMA 方式の通信を行う FlexRay において伝送中の符号誤りに対する通信データの再送を考慮し、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した。構築した数理モデルを用いて SAE ベンチマークセット、及びランダムに生成した複数のシグナルセットに対して、信頼性要求を満たす必要最低限の通信帯域幅を求めた。計算機実験により、通信データの振る舞いを示すシグナルを定義することで、フレームの再送を考慮した 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。提案手法は次世代の自動車

開発に向けて、外来ノイズに対する通信データの信頼性を高め、通信機構に必要な製造コスト削減が可能である。また、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し、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) M. Sugihara and A. Iwanaga: Minimization of FlexRay Bus Bandwidth for Hard Real-Time Applications, accepted for publication in *IPSJ Journal*, vol. 21, no. 1, (2013).
- 5) 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).
- 6) 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).
- 7) 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).
- 8) 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).
- 9) 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).
- 10) 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).
- 11) 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).
- 12) Wenchao Li, Di Natale, M., Wei Zheng, 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).
- 13) Tanasa, B., Bordoloi, U.D., Eles, P., Zebo Peng: Scheduling for Fault-Tolerant Communication on the Static Segment of FlexRay, *Real Time Systems Symposium*, pp. 385-394, (2010).
- 14) Tanasa, B., Bordoloi, U.D., Eles, P., Zebo Peng: Reliability-aware frame packing for the static segment of flexray, *Proc. Conference on Embedded software*, pp. 175-184, (2011).
- 15) H.P. ウィリアムス, 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).
- 16) GNU Linear Programming Kit(online), <http://www.gnu.org/software/glpk/>
- 17) Tindell, K. and Burns, A.: Guaranteeing message latencies on control area network (CAN), *Proc. International CAN Conference*, pp. 1-11, (1994).
- 18) 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).