

# 時分割多元接続方式における動的スロットマルチプレクシング 及びメッセージスケジューリングの提案

杉原真（九州大学システム LSI 研究センター）

## 概要

実時間性を保証する通信方式として、時分割多元接続 (Time Division Multiple Access: TDMA) 方式が提唱されている。TDMA 方式においては、離散的な時間単位であるタイムスロットに基づき、ネットワークシステムは動作する。タイムスロットの時間粒度で周期的かつ排他的に通信資源をメッセージ送信ノードに割り当てることで、当該送信ノードが所定時間内にメッセージ送信を完了すること、すなわち実時間性を保証する。本稿では、自動車アプリケーションに代表される産業用アプリケーションにおいては、システムの動作状況に依存してシステムが必要とするデータが変わり得る点に着目する。システムの動作状況を表すものとして動作モードを導入する。設計者は、アクティブになる、すなわち、メッセージが送信される通信信号をそれぞれの動作モードにおいて定め、さらに、動作モード毎に規定された通信信号に対してメッセージスケジューリングする。本稿では、システムの動作状況に応じて動作モードを切り替え、メッセージスケジューリングを動的に切り替える動的スロットマルチプレクシングを提案する。動作モード数の一つである手法、すなわち、全ての通信信号を対象として一通りのメッセージスケジューリングを定める既存手法と比べると、複数の動作モードを導入し、それぞれの動作モードにおいてメッセージスケジューリングを定めて用いる提案手法は、貴重な通信資源を浪費することを避けることが期待される。本稿では、ワイヤハーネスの動作周波数を低減すれば、部材コストを削減できるとの考えを採る。動作モード及びそれらの通信信号集合が与えられたとき、それぞれの動作モードでのメッセージスケジューリングを最適にし、ワイヤハーネスの動作周波数を最小化する動的スロットマルチプレクシング最適化問題を提示する。計算機実験により、静的スロットマルチプレクシングと比べ、約 21-37% の動作周波数が削減できる事例を示す。

## 1 はじめに

自動車産業においては、経済性、安全性、及び快適性を絶えず追求し、自動車製品を改良し続けている。昨今の自動車製品における進化は車載システムの進化に負うところが大きい。車載システムは次世代自動車の開発においてより重要な役割を果たすと考えられる。車載システムは高価な電子デバイスとワイヤハーネスから構成される。商業的観点からは、車載システムを安価に組み上げる設計パラダイムが求められる。現状では、ある高級車には 100 個を越すマイコンが搭載され、マイコンは大規模なネットワークを介して通信する。高機能な自動車を実現するためには、高度でかつ大規模な分散システムを低コストに設計する技術が重要である。

CAN (controller area network) は、相互接続された機器間のデータ転送に用いられる通信ネットワークの標準であり、車載ネットワークに用いられている [1]。CAN においては、フレームの優先度に基づいて通信バスの使用順序が定まるために、上位の優先度を持つフレームが非決定的に送信される場合、下位の優先度を持つフレームの通信レイテンシは非決定的に定まる。通信レイテンシが非決定的に定まるのであれば、リアルタイム性を保証することは難しい。x-by-wire システムのようなハードリアルタイム性が要求されるシステムに CAN を適用する事は困難である [2]。FlexRay は TDMA 方式に基づいた新しいネットワーク標準であり、ネットワーク帯域幅を使用する上で、通信レイテンシにおける決定性と柔軟性を兼ね備えている [3]。FlexRay の通信機構は Static TDMA 法で通信レイテンシにおける決定性を提供し、Flexible TDMA 法で通信帯域幅における柔軟性を与える。

FlexRay の通信機構の設計パラダイムについて昨今研究が進んでいる。我々はこれまでに、通信バスの動作周波数を削減すれば、ワイヤハーネスの部材コストを削減できる点に着目し、フレームのペイロードセグメントの

大きさを最適化し、通信バスの動作周波数を最小化する設計手法を提案した [9]。サイクル間でタイムスロットを区別し、サイクルとタイムスロットの組を通信信号と対応づけるスロットマルチプレクシングに基づき、動作周波数を最小化するメッセージスケジューリングを提案した [10]。バスアーキテクチャを対象とし、製造コストを最小化するバスアーキテクチャ合成手法を提案した [11]。また、転送されるデータの誤り率を考慮した TDMA スケジューリングを提案した [4, 5]。

本稿では、産業用アプリケーション、特に自動車アプリケーションでは、システムの動作状況に依存してシステムが必要とするデータが変わり得る点に着目する。システムの動作状況を表すものとして動作モードを導入する。設計者は、アクティブになる、すなわち、メッセージが送信される通信信号をそれぞれの動作モードにおいて定め、さらに、動作モード毎に規定された通信信号に対してメッセージスケジューリングする。本稿では、システムの動作状況に応じて動作モードを切り替え、メッセージスケジューリングを動的に切り替える動的スロットマルチプレクシングを提案する。動作モード数の一つである手法、すなわち、全ての通信信号を対象として一つのメッセージスケジューリングを定める手法 [10] では、メッセージ送信ノードがタイムスロットを必要としない状況においてもタイムスロットがそれぞれの通信信号のメッセージ送信ノードに割り当てられるため、タイムスロットを浪費してしまう。複数の動作モードを導入し、動作モード毎に通信信号を規定し、メッセージスケジューリングを定める手法では、動作モード毎に規定される通信信号のメッセージ送信ノードにタイムスロットが割り当てられるために、タイムスロットの浪費を避けることが期待される。本稿では、ワイヤハーネスの動作周波数を低減すれば、部材コストを削減できるとの考えを採る。動作モード及びそれらの通信信号集合が与えられたとき、それぞれの動作モードでのメッセージスケジューリングを最適にし、ワイヤハーネスの動作周波数を最小化する動的スロットマ

マルチプレクシング最適化問題を提示する。

本稿の残りは次のように構成される。2節では、FlexRay ネットワークプロトコルについて簡単に述べる。3節では、本稿で取り扱う設計問題を定式化し、設計問題の解法として焼きなまし法を適用する。4節では、実験結果により提案手法の有効性について議論する。5節で結論を述べる。

## 2 FlexRay

本節では FlexRay 標準について簡単に調査する。FlexRay に関する詳細は仕様書を参照されたい [3]。

### 2.1 通信サイクル

通信サイクルは、FlexRay システムのメディアアクセス法を構成するために周期的に繰り返される通信の一つのインスタンスである。通信サイクルは時間階層によって定義される。時間階層は四つの時間階層レベルから構成される。すなわち、マイクロティックレベル、マクロティックレベル、アービトレーショングリッドレベル、及び通信サイクルレベルの四つである。一つの通信サイクルに着目した時間階層を図1に示す。

通信サイクルレベルでは、通信サイクルが繰り返し実行される。一つの通信サイクルには、静的セグメント、動的セグメント、シンボルウィンドウ、及びネットワークアイドル時間が含まれる。本稿では特に静的セグメントに注目する。静的セグメント内では、送信を調停するために TDMA(time division multiple access) 法が用いられる。TDMA 法は共有される通信路のための通信路アクセス法である。TDMA 法では、チャンネルを時間的に分割し、タイムスロットが設けられる。各々のタイムスロットは、あらかじめ許可された通信メッセージのみが使用できる。動的セグメント内では、送信を調停するために FTDMA(flexible time division multiple access) 法が用いられる。シンボルウィンドウはネットワークにシンボルを送るために用いられる通信期間である。ネットワークアイドル時間は、通信が行われない期間であり、通信サイクルを完結するものである。

次の下位のレベルであるアービトレーショングリッドレベルはアービトレーショングリッドを含む。静的セグメントでは、アービトレーショングリッドは静的スロットと呼ばれる連続する時間間隔で構成される。動的セグメントでは、アービトレーショングリッドはミニスロットと呼ばれる連続する時間間隔で構成される。

アービトレーショングリッドレベルはマクロティックレベルの上に位置し、マクロティックによって定義される。マクロティックはグローバル時間を表す最小単位で

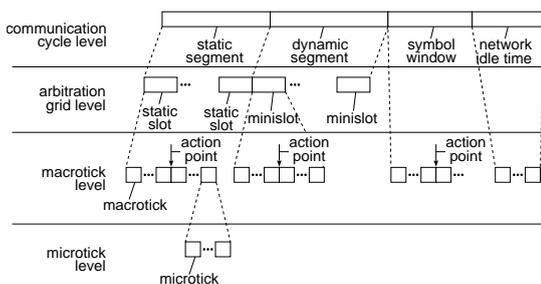


図1 通信サイクル内の時間階層。

ある。図1に示されるマクロティックの境界はアクションポイントと呼ばれる。アクションポイントは送信器が FlexRay フレームの送信を開始する時刻である。

時間階層において最も低いレベルはマイクロティックである。一つのマイクロティックは時間における一間隔を示し、ノードに局所的な概念である。

### 2.2 フレームフォーマット

FlexRay フレームは送信のための入れものであり、三つのセグメントから構成される。すなわち、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である。図2に FlexRay フレームのフォーマットを示す。ノード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順でフレームを送信する。図2において、個々のセグメントにおいて、ノードは左から右の順序でデータを送信する。

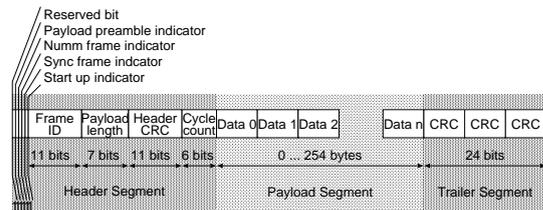


図2 フレームのフォーマット。

### 2.3 フレームの符号化

FlexRay フレームは5つのビット列で符号化される。すなわち、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), 及び動的フレーム指示列 (DTS: 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 は動的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3に、静的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 が TSS の後に続く。FSS は TSS の後の最初の BSS においてあり得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 は受信デバイスにビットストリームの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。フレームデータの各バイトは、一つの BSS と8ビットのデータ列から構成される拡張バイト列として、通信路で送信される。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。

### 2.4 スロットマルチプレクシング

FlexRay の仕様では、ある特定のスロット番号を持つ、全ての通信スロットをノードに割り当てる手法として、

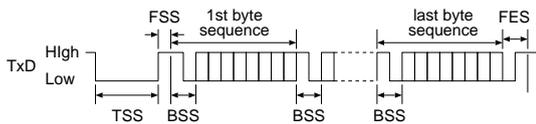


図3 フレームの符号化.

サイクルに独立したスロット割り当て (cycle-independent slot assignment) を規定している。また、サイクル番号とスロット番号の組で指定される個々のスロット、あるいは、スロット集合をノードに割り当てる手法として、サイクルに依存するスロット割り当て (cycle-dependent slot assignment) を規定している。FlexRay の仕様では、異なるサイクルで同一のスロット ID を持つスロットを異なるノードに割り当てる手法、すなわちスロットマルチプレクシング (slot multiplexing) を規定している。図 1 に示すように、1 つのサイクルは 4 つの時間領域、すなわち、1 つの静的セグメント、1 つの動的セグメント、1 つのシンボルウィンドウ、及び 1 つのネットワークアイドルタイムから構成される。1 つの静的セグメントは複数個のスロットから構成される。図 4 はスロットマルチプレクシングにおけるサイクルとスロットの取り扱いを示す。スロットマルチプレクシングによるネットワークシステムにおいては、64 個のサイクルを対象とし、サイクルとスロットの組をノードへ割り当てることができる。サイクルは繰り返し出現する。

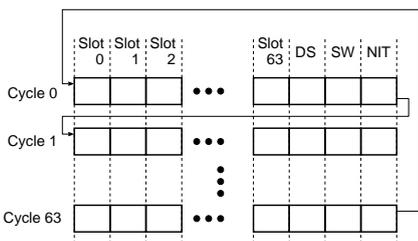


図4 FlexRay におけるサイクル及びスロット.

### 3 動的スロットマルチプレクシング

本稿では、自動車アプリケーションにおいてはシステムの動作状況に依存してシステムが必要とするデータが変わり得る点に着目する。システムの動作状況を表すものとして動作モードを導入する。それぞれの動作モードに対して、メッセージ送信がなされる通信信号を定めることで、設計者が動作モードを規定する。本稿では、システムの動作状況に応じて動作モードを切り替え、メッセージスケジュールを切り替える、すなわち、TDMA 法における通信信号及びサイクルとスロットの組の対応付けを動的に変更する動的スロットマルチプレクシングを提案する。動作モード数が一つである手法、すなわち、全ての通信信号が常時アクティブである前提で通信メッセージのスケジュールを定める手法 [10] では、通信信号の送信ノードがメッセージを送信する必要がない状況においてもタイムスロットが当該ノードに静的に割り当てられるため、タイムスロットを浪費してしまう。複数の動作モードを導入し、動作モード毎にメッセージスケジュールを定める手法では、必要に応じて、タイムスロットが送信ノードに割り当てられるために、タイムスロットの浪費を避けることが期待される。本稿では、ワイヤハーネスの動作周波数を低減すれば、部材コストを削減できる

との考えを採る。動作モード及びそれらの通信信号集合が与えられたとき、それぞれの動作モードでのメッセージスケジューリングを最適にし、ワイヤハーネスの動作周波数を最小化する動的スロットマルチプレクシング最適化問題を提示する。

#### 3.1 動的スロットマルチプレクシング最適化問題

今、ノードの集合  $N$  で与えられるノードからネットワークが構成される。ノードが固定長のデータを締切時刻までに周期的あるいは非周期的に送る振る舞いを通信信号と定義する。通信信号は 4 つ組  $(N, C, D, B)$  で定義される。  $N$  は  $N$  の要素である送信ノード、  $C$  は送信周期 [s]、  $D$  は送信要求時刻を基準とした相対デッドライン時刻 [s]、  $B$  は一つの通信メッセージのデータ量 [ビット] を表す。ノード  $N$  は  $C$  秒毎に通信メッセージを送信することを要求し、要求から  $D$  秒以内に  $B$  ビットのデータを送信し終わるが要求される。また、通信信号で規定される、ノードから送信される一まとまりのデータを通信メッセージと定義する。実装の観点では、一つの通信メッセージは 1 個以上のフレームに分割して送信される。問題の単純化のために、全ての通信メッセージは周期的に送信されると仮定する。

今、TDMA 方式のネットワークを対象として  $N_{sig}$  個の通信信号の集合  $S = \{S_1, S_2, \dots, S_{N_{sig}}\}$  が与えられ、それらの通信メッセージは静的セグメントの時間領域に送信されるとする。静的セグメントは  $q$  ( $q \leq N_{sig}$ ) 個のタイムスロットから構成され、 $q$  を変数として取り扱う。通信信号  $S_i$  は 4 つ組  $(N_i, C_i, D_i, B_i)$  で与えられるとする。通信信号は 1 サイクル内においては高々 1 個までの静的スロットが割り当てられるとする。対象とするネットワークにおける通信バスのボーレートを  $w$  [bps] とする。我々は、必要とされるボーレートを低減することによって、より安価なワイヤハーネスを選択できるであろうとの考えを採り、本稿の最適化問題における目的関数は  $w$  の最小化とする。

本稿では、自動車アプリケーションにおいては、システムの動作状況に依存して、システムが必要とするデータが変わり得る点に着目する。動作モードは、アクティブになる、すなわち、通信メッセージが送信される通信信号の集合によって定められる。今、設計者により  $N_{mode}$  個の動作モードが規定され、動作モードの集合  $M = \{M_1, M_2, \dots, M_{N_{mode}}\}$  が与えられるとする。すなわち、それぞれの動作モードにおいてそれぞれの通信信号がアクティブか否かを示す以下の  $E_{i,j}$  が与えられるとする。

$$E_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{通信モード } M_i \text{ において通信信号 } s_j \\ & \text{はアクティブである。} \\ 0 & \text{それ以外。} \end{cases} \quad (1)$$

一つの通信メッセージは一個以上のフレームの形で送られる。図 2 に示すように、一つ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から構成される。本稿では、ヘッダセグメントの大きさ及びトレーラセグメントのビット量をそれぞれ  $B_{hd}$  及び  $B_{tr}$  とする。ペイロードセグメントの大きさは、設計者が定められるものであるが、任意の静的セグメントにおいて同一である必要がある。一つのペイロードセグメントは  $p$  ( $0 \leq p \leq 127$ ) 個の 16 ビットワードから構成されるとする。なお、FlexRay の標準においては、ペイロードセグメントの大きさは偶数バイトであるとされ、その

範囲は 0 以上 254 以下であることが規定されている。フレームのビット長  $f$  は以下のように示される。

$$f = B_{hd} + B_{tl} + 16p. \quad (2)$$

符号化されたフレームの大きさ  $f_{enc}$  は以下のように表される。

$$\begin{aligned} f_{enc} &= f + \left( B_{TSS} + B_{FSS} + \frac{f}{8} \cdot B_{BSS} + B_{FES} + B_{DLM} + B_{IDL} \right) \\ &= \left( 1 + \frac{B_{BSS}}{8} \right) f + B_{TSS} + B_{FSS} + B_{FES} + B_{DLM} + B_{IDL} \\ &= (16 + 2B_{BSS})p + O, \\ O &= \left( 1 + \frac{B_{BSS}}{8} \right) (B_{hd} + B_{tl}) \\ &\quad + B_{TSS} + B_{FSS} + B_{FES} + B_{DLM} + B_{IDL}. \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 $B_{TSS}$ ,  $B_{FSS}$ ,  $B_{BSS}$ ,  $B_{FES}$ ,  $B_{DLM}$ , and  $B_{IDL}$  はそれぞれ TSS, FSS, BSS, FES, チャネルアイドルデリミタ, 及びチャネルアイドル時間を表す。

1 サイクルの時間  $t_{cc}$  について考えよう。静的セグメントにおいては、1 つのフレームは 1 つの静的スロットを用いて送信される。説明の簡化のために、システムが正常に動作する限りにおいては、与えられたデッドライン制約を必ず守ることを前提とする。換言すれば、ハードデッドライン制約を持つ通信信号だけが与えられるとする。一つの通信サイクルは一つの静的セグメントだけで構成されるとする。本節で定義される問題は、動的セグメント、シンボルウィンドウ、及びネットワークアイドルタイムが固定長である限り、静的セグメント、動的セグメント、シンボルウィンドウ、及びネットワークアイドルタイムを持つシステムに拡張できる。なお、動的セグメントを用いたメッセージスケジューリングについては、本稿の対象外であり、別途議論する必要がある。仮定から、1 つの通信サイクルの時間  $t_{cc}$  は  $q$  個の静的セグメントの時間と等しく、以下の式で表される。

$$t_{cc} = \frac{q \cdot f_{enc}}{w} \quad (5)$$

ここで、 $q$  は一つの静的セグメントを構成する静的スロット数を表す整数変数であり、 $w$  は FlexRay バスのポーレートを表す実数変数である。

FlexRay の標準では、スロットマルチプレクシング、すなわち、複数の通信サイクルに亘り、複数の通信信号を同一の静的スロットに割り当てる技法、を許容している。すなわち、サイクル及びスロットの組に対して、一つの通信信号を割り当てるのが許容されている。具体的には、64 個の通信サイクルに亘り、最大 64 個までの通信信号を同一の静的スロットに割り当てることを許容している。64 個の通信サイクルは繰り返し出現することとなる。スロットマルチプレクシングを用いることで、ポーレートに対する通信帯域幅使用率は向上するが、設計空間が大きくなるために、費やすべき設計エフォートは増加する。問題の簡化のために、通信信号  $S_i$  に対して、以下に示す二値変数  $a_{i,j}$  を導入し、通信信号  $S_i$  は 64 個の通信サイクルで、 $2^j$  個の静的スロットを消費し、 $2^{6-j}$  個の通信

サイクル毎に一つの静的スロットを消費すると仮定する。

$$a_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{通信信号 } S_i \text{ が } 2^{6-j} \text{ サイクル毎に一つのサイクルを使用する場合.} \\ 0 & \text{それ以外.} \end{cases} \quad (6)$$

通信信号  $S_i$  に割り当てられる通信サイクル数は一通りであるために、以下の制約が導入される。

$$\forall i, \sum_{j=0}^6 a_{i,j} = 1. \quad (7)$$

通信信号  $S_i$  が一つの通信メッセージを送るためには  $\lceil \frac{B_i}{16p} \rceil$  の静的スロットが必要である。一つの通信メッセージの伝送時間はその周期を上回ってはならないとし、次の制約を導入する。

$$\forall i, \left\lceil \frac{B_i}{16p} \right\rceil \left( \sum_{j=0}^6 2^{6-j} a_{i,j} \right) t_{cc} \leq C_i. \quad (8)$$

$2^{6-j}$  個の通信サイクル毎に一つの通信サイクルを用い、64 個ある通信サイクルにおいて  $2^j$  個の通信サイクルを用いる場合、 $2^{6-j}$  の位相が存在する。最初に用いられる通信サイクルを示すために、以下の二値変数  $c_{i,l}$  ( $1 \leq l \leq 64$ ) を導入する。

$$c_{i,l} = \begin{cases} 1 & \text{初めのサイクルが } l \text{ 番目の場合} \\ 0 & \text{それ以外} \end{cases} \quad (9)$$

変数  $a_{i,j}$  及び  $c_{i,l}$  の定義より、以下の制約を導入する。

$$\forall i, \forall j, a_{i,j} = 1 \Rightarrow \sum_{l=1}^{2^{6-j}} c_{i,l} = 1 \text{ and } \forall l > 2^{6-j}, c_{i,l} = 0 \quad (10)$$

通信信号  $S_i$  が動作モード  $n$  において通信サイクル  $m$  ( $1 \leq m \leq 64$ ) を使用するか否かを示す二値変数  $d_{i,m,n}$  を以下のように導入する。

$$d_{i,m,n} = \begin{cases} 1 & \text{信号 } S_i \text{ が動作モード } n \text{ で } m \text{ 番目のサイクルを使用する} \\ 0 & \text{それ以外} \end{cases} \quad (11)$$

通信信号は規定される動作モードにおいて  $2^{6-j}$  サイクル毎に 1 サイクルを使用するため、次の制約を導入する。

$$\begin{aligned} \forall i, \forall j, \forall l \leq 2^{6-j}, 0 \leq \forall h \leq 2^j - 1, \\ a_{i,j} = 1 \text{ and } c_{i,l} = 1 \text{ and } E_{n,i} = 1 \\ \Rightarrow d_{i,l+h \cdot 2^{6-j},n} = 1 \end{aligned} \quad (12)$$

一つの通信サイクル当たりの静的スロットの数  $q$  は、以下に示すように、動作モードにおいて 1 つの通信サイクルに割り当てられる通信信号数の最大値によって定まる。

$$q = \max_{n,m} \sum_i d_{i,m,n} \quad (13)$$

通信メッセージの送信過程、及び制約について考えよう。図 5 に通信メッセージを周期的に送信する過程を示す。各メッセージ送信において、最初のフレームを送出

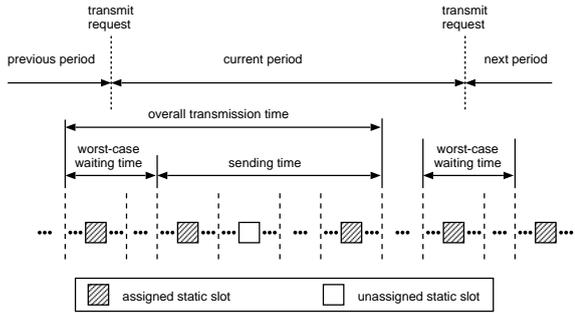


図5 一つのメッセージの送信待ち時間及び伝送時間。

する前に待ち時間を生じる。通信信号は当該通信サイクル中の任意の静的スロットに割り当てられる前提で、最悪待ち時間を以下に示すフレーム送信間隔と等しいとする。

$$\left( \sum_{j=0}^6 2^{6-j} a_{i,j} \right) t_{cc} \quad (14)$$

待ち時間の後にフレームを送るための時間が続く。当該通信信号は1サイクル内の任意の静的スロットに割り当てられるため、保守的立場をとり、1つの通信メッセージのフレームの伝送時間を以下の式で表す。

$$\left\{ \left( \left\lceil \frac{B_i}{16p} \right\rceil - 1 \right) \left( \sum_{j=0}^6 2^{6-j} a_{i,j} \right) + 1 \right\} t_{cc} \quad (15)$$

通信信号  $S_i$  の1通信メッセージを送信するための最悪レイテンシ  $t_i$  は以下に示すように最悪待ち時間(14)と全てのフレームを伝送時間(15)の和で表される。

$$t_i = \left\{ \left\lceil \frac{B_i}{16p} \right\rceil \left( \sum_{j=0}^6 2^{6-j} a_{i,j} \right) + 1 \right\} t_{cc} \quad (16)$$

最悪レイテンシ  $t_i$  が  $D_i$  を上回らないことが要求されるため、以下の制約を導入する。

$$\forall i, \left\{ \left\lceil \frac{B_i}{16p} \right\rceil \left( \sum_{j=0}^6 2^{6-j} a_{i,j} \right) + 1 \right\} t_{cc} \leq D_i \quad (17)$$

数理モデルは以下のように与えられる。

**Minimize** the cost function  $w$

**subject to**

1.  $\forall i, \sum_{j=0}^6 a_{i,j} = 1.$
2.  $\forall i, \left\lceil \frac{B_i}{16p} \right\rceil \left( \sum_{j=0}^6 2^{6-j} a_{i,j} \right) t_{cc} \leq C_i.$
3.  $t_{cc} = \frac{q \cdot f_{enc}}{w}.$
4.  $f_{enc} = (16 + 2B_{BSS})p + O.$
5.  $O = \left( 1 + \frac{B_{BSS}}{8} \right) (B_{hd} + B_{tl}).$
6.  $\forall i, \forall j, a_{i,j} = 1 \Rightarrow \sum_{l=1}^{2^{6-j}} c_{i,l} = 1$  and  $\forall l > 2^{6-j}, c_{i,l} = 0.$
7.  $\forall i, \forall j, \forall l \leq 2^{6-j}, 0 \leq \forall h \leq 2^j - 1, a_{i,j} = 1$  and  $c_{i,l} = 1$  and  $E_{n,i} = 1$   
 $\Rightarrow d_{i,l+h \cdot 2^{6-j},n} = 1.$
8.  $q = \max_{n,m} \sum_i d_{i,m,n}$
9.  $\forall i, \left\{ \left\lceil \frac{B_i}{16p} \right\rceil \left( \sum_{j=0}^6 2^{6-j} a_{i,j} \right) + 1 \right\} t_{cc} \leq D_i.$

**Variables**

- $w$  is a real variable.
- $p$  is an integer variable.

- $q$  is an integer variable.
- $a_{i,j}$  is a binary variable.
- $t_{cc}$  is a real variable.
- $f_{enc}$  is an integer variable.
- $c_{i,l}$  is a binary variable.
- $d_{i,m,n}$  is a binary variable.

### 3.2 SA法による解法

焼きなまし (SA: simulated annealing) 法は非決定性アルゴリズムの一つである [8]。評価値が改善される解を採択することに加えて、ある条件のもとで評価値が悪化する解も採択する点が SA 法の特徴として挙げられる。探索処理の初期段階では、評価値が悪化する解を採択する確率が大きく、探索処理が進むにつれ、評価値が悪化する度合いが小さい解のみが採択されやすくなる。最終的には、評価値を改善する解のみが採択される。

SA法の擬似コード [8] を図6に示す。手続き SA においては、手続き Metropolis の呼び出しが繰り返される。手続き Metropolis が呼び出される度に、温度を表す変数  $T$  に冷却率  $\alpha$  が乗じられ、 $T$  は減少する。一方、手続き Metropolis が呼び出される度に、 $M$  に  $\beta$  が乗じられ、 $M$  は増加する。 $M$  は手続き Metropolis における解の探索回数を決定するものである。手続き Metropolis においては、与えられた解の近傍を戻す手続き Neighbor によって得られた一時解を得る。新たに得られた解と現在解の評価値の差分に基づいて、処理が異なる。評価値が削減された場合、 $NewS$  で  $BestS$  を更新する。さもなければ、確率的に、評価値の増加を許し、 $NewS$  で  $CurS$  を更新する。

本研究においては、SA法を3.1節で示した問題の解法として用いた。解空間は、変数  $a_i, b_i, c_i, w, p$  によって

#### Pseudo-code for Simulated Annealing

```

Procedure SA( $S_0, T_0, \alpha, \beta, M, MaxTime$ )
  //  $S_0$  は初期解
  //  $T_0$  は初期温度
  //  $\alpha$  は冷却率
  //  $\beta$  は定数
  //  $M$  は次のパラメータ更新までの時間
  //  $MaxTime$  は総処理時間
begin
   $T = T_0;$ 
   $CurS = S_0;$ 
   $BestS = CurS;$ 
   $CurCost = Cost(CurS);$ 
   $BestCost = Cost(BestS);$ 
   $Time = 0;$ 
  repeat
    Metropolis( $CurS, CurCost, BestS, BestCost, T, M$ );
     $Time = Time + M;$ 
     $T = \alpha T;$ 
     $M = \beta M;$ 
  until ( $Time \geq MaxTime$ );
end

Procedure Metropolis( $CurS, CurCost, BestS, BestCost, T, M$ )
begin
  repeat
     $NewS = Neighbor(CurS);$ 
     $NewCost = Cost(NewS);$ 
     $\Delta Cost = NewCost - CurCost;$ 
    if ( $\Delta Cost < 0$ ) then
      if  $NewCost < BestCost$  then
         $BestS = NewS;$ 
      endif
    else
      if ( $RANDOM < e^{-\Delta Cost/T}$ ) then
         $CurS = NewS;$ 
      endif
    endif
     $M = M - 1;$ 
  until ( $M = 0$ )
end

```

図6 SA法の擬似コード

構成される。近傍を求める手続き Neighbor においては、一定の確率に基づいて、解を構成する変数の一つを選択し、増減させる。整数変数について、1 だけ増減する。w に関しては、正規分布 ( $\mu = 0, \sigma = 50$ ) に基づいて増減値を決定した。

## 4 実験

### 4.1 準備

本稿で示す計算機実験には、表 1 に示す、Park らによって与えられたネットワークパラメータ集合 [7] を用いた。チャンネルアイドルレミタの直後にはチャンネルアイドルタイムがないと仮定した。

3.1 節に示した問題の解を与える、SA 法に基づいたソルバを C++ 言語で開発した。SA のパラメータとして、表 2 に示すものを用いた。16 通りのパラメータの組合せに対してソルバを実行し、解を求めた。

SAE ベンチマークは自動車向け分散制御システムの通信信号要件の一例である。SAE ベンチマークは 53 種類の通信信号から構成される。SAE ベンチマークの詳細は Kutlu らによって与えられている [6]。1 から 5 の動作モード数に対して動作周波数を調査した。それぞれの通信信号に対して 1 から  $2^{N_{mode}} - 1$  までの整数を一様乱数として生成し、乱数を二進数表現した場合のそれぞれの桁の値によって、当該信号が各動作モードでアクティブか否かを決定した。例えば、ある通信信号に対する乱数が 100 であれば、動作モード 1 ではアクティブ、動作モード 2 及び 3 では非アクティブ、と言った形である。各動作モード数 (1~5) において、通信信号の動作モードが異なる通信信号の集合を 20 通り生成した。

### 4.2 実験結果

図 7 に、それぞれの動作モード数において与えられた 20 通りのベンチマーク通信信号集合に対して通信バスの最小化を行った実験結果を示す。動作モード数が 1 の結果は静的スロットマルチプレクシング [10] に相当する。ベンチマーク通信信号の集合における動作モードの与え方によって動作周波数が異なる。本実験では、それぞれの動作モード数に対して 20 通りのベンチマーク通信信号集合を用いて最適化を行った。それぞれの動作モード数において最も小さかった動作周波数を実線で、最も大きかった動作周波数を破線で示す。例えば、動作モード数が 2 の場合、約 21-37% 程度の動作周波数が削減された。

## 5 おわりに

本稿においては、TDMA 方式における動的マルチプレクシングを提案し、通信バスのポーレートをも最小化する動的マルチプレクシング最適化問題を定式化した。我々の実験においては、全ての通信信号を対象として一通り

表 1 ネットワークパラメータ。

Factor	Length
Header w/o BSS	5 B/frame
Header w BSS	45 bits/frame
Trailer w/o BSS	3 B/frame
Trailer w BSS	27 bits/frame
TSS	9 bits/frame
FSS	1 bit/frame
FES	2 bits/frame
Idle delimiter	11 bits/frame
Action point offset	1 MT/frame, 10 bits/frame
BSS	2 bits/frame byte

表 2 SA のパラメータ。

$S_0$	SM を行わない場合の最適解 [9]
$T_0$	100
$\alpha$	0.9999, 0.99999
$\beta$	1.00001, 1.0001, 1.001, 1.01
$M$ の初期値	100, 200

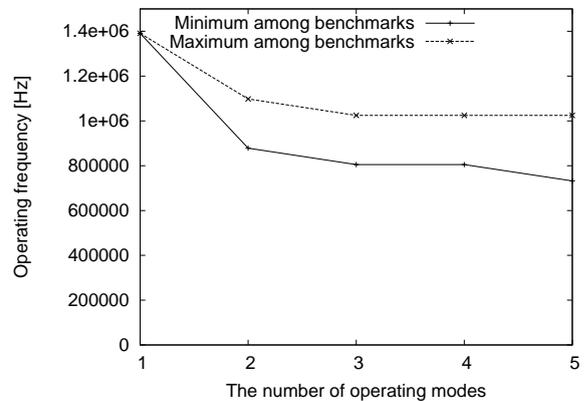


図 7 動作モード数に対する動作周波数。

のメッセージスケジュールを定める静的マルチプレクシングが必要とされる動作周波数に対して、提案する動的マルチプレクシングは、動作モード数が 2 の場合で約 21-37% の動作周波数を削減できることを示した。今後の課題として、実際の自動車アプリケーションにおける動的マルチプレクシングの効果を実験的に調査する点が挙げられる。また、TCP 等において採用されている 3 ウェイ・ハンドシェイクを前提とした場合の動作周波数の実験的調査が挙げられる。

## 参考文献

- [1] Bosch, "Control area network," <http://www.can.bosch.com/>, Jan. 2013.
- [2] G. Cena and A. Valenzano, "Achieving round-robin access in controller area networks," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 49, No. 6, pp.1202-1213, Dec. 2002.
- [3] FlexRay Consortium, FlexRay communications system protocol specification version 3.0.1, Oct. 2010.
- [4] 岩永明人, 杉原真, "信頼性要求に基づいた対故障性を実現する TDMA スケジューリング手法," 情報処理学会組込みシステムシンポジウム, pp.39-47, 2012 年 10 月.
- [5] 岩永明人, 杉原真, "耐故障性の実現と通信帯域幅の最小化を両立する TDMA スケジューリング手法," 情報処理学会論文誌, 第 54 巻, 7 号, pp. 1873-1882, 2013 年 7 月.
- [6] A. Kutlu, H. Ekiz, and E. T. Powner, "Performance analysis of MAC protocols for wireless control area network," *Proc. International Symposium on Parallel Architectures, Algorithms, and Networks*, pp. 494-499, Jun. 1996.
- [7] I. Park and M. Sunwoo, "FlexRay network parameter optimization method for automotive applications," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 58, No. 4, pp. 1449-1459, Apr. 2011.
- [8] 白石洋一, 訳 Sadiq M. Sait 著, 組合せ最適化アルゴリズムの最新手法, 丸善株式会社, 2002 年 3 月.
- [9] M. Sugihara and A. Iwanaga, "Minimization of FlexRay bus bandwidth for hard real-time applications," *Journal of Information Processing*, Vol. 21, No. 1, pp.46-52, Jan. 2013.
- [10] M. Sugihara and A. Iwanaga, "Slot multiplexing optimization for minimizing the operating frequency of a FlexRay bus under hard real-time constraints," *Journal of Information Processing*, Vol. 21, No. 3, pp. 563-571, Jul. 2013.
- [11] M. Sugihara, "Minimization of the fabrication cost for a bridged-bus-based TDMA system under hard real-time constraints," *IEICE Trans. Information and Systems*, Vol. E97-D, No. 12, pp. 3041-3051, Dec. 2014.