

# CAN プロトコルにおけるビットフリッピングルールの解析

## An Analysis of the Bit-Stuffing-Rule in CANs Protocol

北林友樹<sup>†</sup>

Tomoki KITABAYASHI

福本聡<sup>‡</sup>

Satoshi FUKUMOTO

### 1. まえがき

CAN(Control Area Network) は事実上の業界標準車載ネットワークである。そのプロトコルは他の LAN とは異なる独自のルールを備えている。例えば、送信フレームには、確実にノード間の同期を取るために、転送データとは別にスタッフビットと呼ばれる冗長なビットが挿入されることがある。このスタッフビットの有無は転送データに依存するため、応答時間解析において不確実性をもたらす要因のひとつになっている。

CAN の応答時間解析についての先行研究ではスタッフビットとそのエラーについて詳細に考慮されたものは見受けられない。そこで、本研究はスタッフビットを厳密に考慮したモデル構築のため、各論理値の出現確率を任意に設定した場合のスタッフビット数分布を求める解析的手法について議論する。転送データの論理値の履歴およびその値の出現確率を、離散時間マルコフ連鎖の状態および遷移確率として表し、従来の手法 [1], [2] よりも一般的な確率モデルを記述する。このモデルに基づいた解析によって、データフィールド長がスタッフビットの分布におよぼす影響などを考察する。

### 2. ビットスタッフィングルール

本節では、CAN プロトコルにおけるビットスタッフィングルールについて概説する。図 1 に CAN の送信ユニットから受信ユニットへ送るデータフレームの構成を示す。スタッフビットはノード間の同期を確実にするために、フレームに挿入される冗長なビットであり、同一レベルの論理値が 5 ビット連続した場合に付加される 1 ビットの反転データである。例えば、転送データが "000001111000010" の場合にはスタッフビットが合計 3 ビット付加され、"000001111100000110" というデータが送信される。なおビットスタッフィングルールは図 1 で示したデータフレームの SOF から CRC シーケンスまでの領域において適用される。

SOF		RTR, IDE, r0			DLC	Data	CRC Sequence	CRC ACK, ACK, delimites start delimites			EOF
Length (bit)	1	11			4	0 ~ 64	15	1	1	1	7
Field	SOF	Arbitration			Control	Data	CRC	ACK	1	EOF	

図 1: CAN データフレーム

### 3. 解析モデル

本節では、各論理値の出現確率を任意に設定してスタッフビット数の確率分布を得るための数理モデルを記述する。

#### 3.1. フレームヘッダのスタッフビット

図 1 に示した通り、フレームのヘッダ、すなわち SOF(Start Of Frame) からデータフィールド長を表す DLC (Data Length Code) までの間に挿入されるスタッフビットの数は、フレーム ID および DLC のビットパターンなどに依存する。標準フォーマットの場合、SOF, PTR, IDE, r0 はいずれもドミナント (CAN では論理値 '0' をドミナント、論理値 '1' をレセシブと呼ぶ) であり、RTR (Remote Transmission Request) はデータフレームとリクエストフレームをドミナントとレセシブで表す。ID (Identifier) は 11 ビットで構成される識別コードである。上位 7 ビット連続でのレセシブの送信は禁止されているので、ID の決め方は標準フォーマットの場合  $2^{11}-2^4 = 2048$  通りである。DLC の 4 ビットは 0 から 8 バイトのデータフィールド長によって決まる。よって、フレームとデータフィールド長などの制御ビット列が既知ならば、フレームヘッダのスタッフビットの数が確定する。

#### 3.2. データ領域および CRC 領域のスタッフビット

データ領域および CRC 領域に挿入されるスタッフビットの数は各論理値の出現確率に依存する。その確率を考慮して解析をおこなうため、本稿では、2. で述べたビットスタッフィングルールを離散時間マルコフ連鎖 (Discrete Time Markov Chain) によってモデル化する。1 ビットのデータ転送を 1 ステップとし、ドミナント (論理値 '0') およびレセシブ (論理値 '1') が出現する確率をそれぞれ  $p, q(p+q=1)$  とする。また、データフィールド長は  $d (= 0, 1, \dots, 8[\text{byte}])$ 、CRC 領域は 15 [bit] であるのでステップ回数を  $t$  とすると、

$$t = 8 * d + 15 \quad (1)$$

となる。ドミナントのスタッフビットとレセシブのスタッフビットを別々に考慮し、スタッフビットの挿入を再生点と考えれば、解析モデルは再生過程 (Renewal Process) に帰着される。その再生時間間隔 (Inter-Arrival Time) がしたがう分布を離散時間マルコフ連鎖によって求める。概念図を図 2 に示す。ここで 1 回目のドミナントのスタッフビットが挿入されるまでの再生時間間隔を確率変数  $X_1$ 、以降の再生時間を  $X_2, X_3, \dots$  で表す、レセシブのスタッフビットについても同様に、確率変数  $Y_1, Y_2, Y_3, \dots$  と定める。また、 $X_1$  がしたがう分布を  $F_1$  とし、 $X_2, X_3, \dots$  がしたがう分布を  $F_2$  とする。同様に  $Y_1$  がしたがう分布を  $G_1, Y_2, Y_3, \dots$  がしたがう分布を  $G_2$  とする。

ドミナントのスタッフビットが発生するまでの状態遷移図を図 3 に、またレセシブのスタッフビットが発生するまでの状態遷移図を図 4 に示す。分布  $F_1$  と  $F_2$  の違いおよび分布  $G_1$  と  $G_2$  の違いはその初期状態確率ベクトルである。これは分布  $F_1, G_1$  の初期分布がヘッダに依存し、状態  $D_1$  か  $D_4$  の何れか、また状態  $R_1$  か

<sup>†</sup> 首都大学東京, システムデザイン研究科

<sup>‡</sup> 首都大学東京, システムデザイン学部

$R_4$  の何れかの初期状態確率が 1.0 となり、それに対して、分布  $F_2, G_2$  はそれぞれ状態  $D_1, R_1$  の初期状態確率が 1.0 となるからである。ステップ時間  $t$  の間に発生する事象 (再生) の数を  $N(t)$  とすると、 $n$  回目の事象 (再生) が発生する時刻

$$S_n = X_1 + X_2 + \dots + X_n \quad (2)$$

を用いて

$$N(t) \geq n \iff S_n \leq t \quad (3)$$

の同値関係がある。したがって事象発生回数の分布は以下で得られる。

$$P\{N(t) \geq n\} - P\{N(t) \geq n+1\} = P\{S_n \leq t\} - P\{S_{n+1} \leq t\}. \quad (4)$$

これにより、ドミナントおよびレセプシブのスタッフビット数の分布に関するそれぞれの確率質量関数 (p.m.f) が以下の式によって求められる。

$$f(t, n) = (F_1 * F_2^{(n-1)})(t) - (F_1 * F_2^{(n)})(t), \quad (5)$$

$$g(t, n) = (G_1 * G_2^{(n-1)})(t) - (G_1 * G_2^{(n)})(t). \quad (6)$$

このとき、ステップ時間  $t$  の間に挿入されるスタッフビット数  $N(t)$  の分布は以下のようにあらわされる。ただし、 $F_x * F_y$  は  $F_x$  と  $F_y$  の離散型畳み込みを表し、 $F_x^n$  は  $F_x$  の  $n$  重離散型畳み込みを表している。

$$P\{N_t\} = \sum_{k=0}^N f(t, k) \cdot g(t, N - k) \quad (7)$$

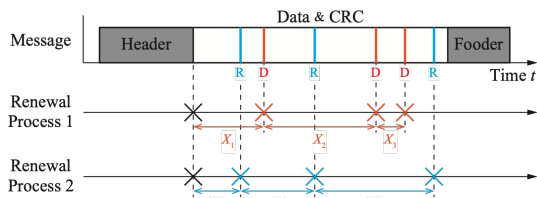


図 2: 概念図

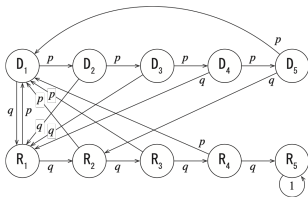


図 3: ドミナントスタッフビットの状態遷移図

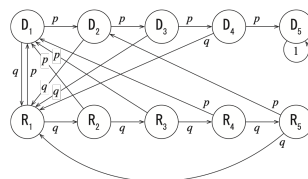


図 4: レセプシブスタッフビットの状態遷移図

## 4. 数値例

前節 2, 3 で論じたスタッフビット数の分布の数値例を示す。例として、今回は 247, 41, 260, 2046 の四つのフレーム ID を用いる。各種パラメータ、すなわちフレーム ID, データフィールド長をそれぞれ変化させ、スタッフビットの分布にどのような影響をおよぼすかを考察する。

### 4.1. ID の違いによる評価

ID だけを変化させた場合、前節 2 より、挿入されるスタッフビット数も変わり得る。例えば、ID 247, 41, 260, 2046 のフレームヘッダに挿入されるスタッフビット数  $h$  はそれぞれ 0, 1, 2, 3 となる。

### 4.2. データフィールド長の違いによる評価

図 5 はデータフィールド長だけを変化させた場合におけるスタッフビット数の分布の差異を示している。ここでは  $h = 3$ , データフィールド長  $d = 0, 2, 4, 6, 8$ ,  $p = q = 0.5$  とした。図 5 より、データフィールド長が大きくなるにつれて、より多くのスタッフビットが挿入される可能性が大きくなることが解る。

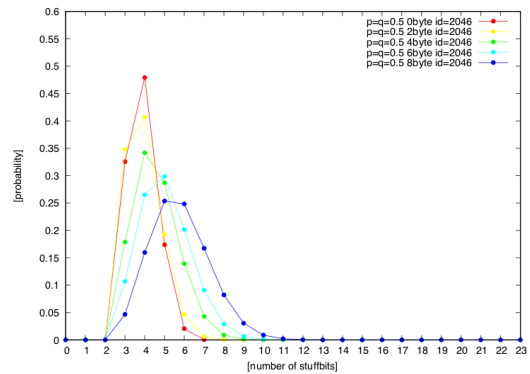


図 5: データフィールド長の違いによる評価

## 5. おわりに

本研究では CAN のデータフレームに挿入されるスタッフビット数の厳密な分布を評価するために、ビットスタッフィングルールを離散時間マルコフ連鎖によって数理モデル化した。今後の課題としては、ビット誤りやエラーを考慮した評価モデルの構築などが挙げられる。

### 謝辞

本研究の着想のヒントと有益なアイデアを与えてくださった首都大学東京大学院の佐藤諒平氏に心より感謝申し上げます。

### 参考文献

- [1] T. Nolte, H. Hansson and C. Norstrom: "Minimizing can response-time jitter by message manipulation", *Proceedings. Eighth IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium*, pp. 197-206 (2002).
- [2] T. Nolte, H. Hansson and C. Norstrom: "Using bit-stuffing distributions in can analysis", *IEEE Real-Time Embedded Systems Workshop at the Real-Time Systems Symposium* (2001).