

## 自律分散型 TDMA 車車間通信システムの開発

原田 知育<sup>†</sup> 鈴木 徳祥<sup>†</sup> 牧戸 知史<sup>†</sup> 伊藤 修朗<sup>†</sup> 林 宏明<sup>†</sup> 寺田 重雄<sup>†</sup>

<sup>†</sup>株式会社 豊田中央研究所

〒480-1192 愛知県愛知郡長久手町大字長湫字横道 41-1

E-mail: [†tharada@mosk.tytlabs.co.jp](mailto:†tharada@mosk.tytlabs.co.jp)

**あらまし** 無線通信技術を用いた安全運転支援システムのための、低遅延で高信頼な車車間通信システムを開発した。開発したシステムは、周辺端末が送信したパケットの受信タイミングの分布をもとに自律的に TDMA スロット同期を確立し、観測されたスロット使用状況(フレーム情報)をもとに自律的に TDMA スロットの獲得/移動を行う。さらに、端末間でフレーム情報を通知し合うことで隠れ端末によるパケット衝突を回避している。

本報告では、開発した自律分散型 TDMA 車車間通信システムの構成および動作検証結果について述べる。

**キーワード** ITS, 車車間通信, 安全運転支援システム, 自律分散型 TDMA プロトコル, 隠れ端末

## Inter-Vehicle Communication System with Decentralized TDMA Protocol for Safety Driving

Tomohisa HARADA<sup>†</sup>, Noriyoshi SUZUKI<sup>†</sup>, Satoshi MAKIDO<sup>†</sup>, Nobuo ITOH<sup>†</sup>,  
Hiroaki HAYASHI<sup>†</sup>, and Shigeo TERADA<sup>†</sup>

<sup>†</sup> TOYOTA Central R&D Labs., Inc.,

41-1 Yokomichi, Nagakute-Cho, Aichi, 480-1192 Japan

E-mail: [†tharada@mosk.tytlabs.co.jp](mailto:†tharada@mosk.tytlabs.co.jp)

**Abstract** We have developed the real-time and reliable inter-vehicle communication system for safety driving using wireless communication. The system establishes the TDMA slot-timing synchronization using the distribution of the receiving timing of the packets sent from the surrounding terminals, and also set / change the TDMA slot automatically based on the condition of the packet reception (frame information). Moreover the system solves the hidden terminal problem by informing the surrounding terminals of their frame information. This paper shows the outline of our developed system and the experimental results.

**Key words** ITS, Inter-vehicle communications (IVC), Driving support system for safety, Decentralized TDMA protocol, Hidden terminal problem

### 1. まえがき

近年、見通しの悪い交差点での出会い頭事故や右折直進事故など、自律系システムでは、低減困難な交通事故に対し、無線通信により

車両の位置や速度などの情報を交換し、必要に応じてドライバに情報提供、注意喚起、警報などを行うことで交通事故の低減をはかる、インフラ協調型安全運転支援システムの検討が進

められている[1]~[3].

このような予防安全アプリケーションでは、多数の周辺車両の挙動の変化を常時把握する必要があるため、通信のリアルタイム性が要求される。また、車両間の通信においては、車両ごとに通信可能エリアが異なるため、隠れ端末の問題による深刻な特性劣化が懸念され[4]、隠れ端末対策が必要になると考えられる。さらに、その対策も、車両位置が時々刻々と変化することから、自律的に動作するものが望ましいと考えられる。

これに対し、各車両が周辺車両の通信状態を示す情報(FI:Frame Information)を交換することにより隠れ端末問題を回避し、低遅延で高信頼な無線アクセスを実現する自律分散型TDMA(以下、D-TDMA:Decentralized TDMAと呼ぶ)プロトコルが提案されている[5].

今回、このD-TDMAプロトコルの有効性および実現性を明らかにするために、車車間通信システムを開発した。開発したシステムは、周辺端末が送信したパケットの受信タイミングの分布をもとに自律的にTDMAスロット同期を確立し、フレーム情報をもとに自律的にTDMAスロットの獲得/移動を行う。さらに、端末間でフレーム情報を通知し合うことで隠れ端末によるパケット衝突を回避している。

本報告では、開発した自律分散型TDMA車車間通信システムの構成および動作検証結果について述べる。

## 2. 車車間通信システム

### 2.1 仕様

#### 2.1.1 主な仕様・性能

安全運転支援システムへの適用の観点から、送信情報は、車両の位置、速度、進行方向、車両IDなどで、情報量は100バイト程度と想定される。また、車両が数m程度移動する間に1回は位置情報が更新される必要があるため、送信周期は100ms程度である必要がある。

また、車載機の普及過程の観点から、車載

機は、路車間/車車間通信共用であることが望ましい。そこで、路側機を「静止している、スロットを優先的に使用する車載機」とみなし、パケットフォーマットも共通化するなど、車車間通信を基本とするシステムとしている。

各端末間のTDMAスロット同期確立は、各車両が周辺端末の送信パケットの受信タイミングに基づいて自律的に行う。但し、路側機との通信が可能なエリアでは、各車載機は、路側機のタイミングに自身のタイミングを合わせることで、タイミングの高精度化をはかる。ここで、路側機間のタイミング同期は、別の手法を用いて確立されているものとする。

同時接続可能台数(最大スロット数)については、実際の交通状況に合わせて決定する必要があるが、ここでは、128スロットとした。

D-TDMA方式の動作検証においては、物理層は特に限定されないため、無線LANや米国のDSRCなどで実績のある802.11系の物理層を適用した。

本システムの主な仕様を表1に示す。

表1 車車間通信システムの主な仕様

	項目	内容
通信制御部	アクセス方式	自律分散型TDMA、ブロードキャスト伝送
	スロット長	200μs~2ms(100μs step)
	フレーム周期	16slot~128slot(2 <sup>m</sup> )
	パケット長	255バイト
	入出力I/F	RS-232c, Ethernet
ベースバンド部	変調方式	OFDM(-BPSK/-QPSK/-16QAM)
	占有帯域幅	8.3MHz
	OFDMシンボル長	8.0μs
	GI長	1.6μs
	サブキャリア数	52(4パイロット信号含む)
	誤り制御	畳込み符号(K=7, R=1/2)
無線部	送受信周波数	5110MHz
	最大送信出力	100mW
	送信・受信構成	送信1系統、受信2系統
アンテナ	偏波/指向性等	垂直偏波、水平面内無指向性
電源部	装置供給電源	DC12V

#### 2.1.2 データフォーマット

MAC層データフォーマットを図1に示す。データは、フレーム情報、制御情報、送信情報お

よびFCS(Frame Check Sequence)により構成される。

フレーム情報は、送信端末が自身の送信タイミングから遡って1フレーム時間観測したスロットの使用状況(スロット情報)を示すもので、各スロットに対し3bitを割り当てる。そして、最大128スロットまで使用することを考慮し、合計384bit(=3bit×128スロット)確保している。フレーム情報は、送信スロットからのオフセット(単位はスロット)と表2に示すビットパターンをテーブル化したものである。

制御情報は、パケットの種別や同期確立の方法を示すもので、24bit割当てる(表3)。パケット受信側では、パケット種別ビットにより、スロット同期の確立方法を、適宜、制御する。

送信情報は、自車の位置や速度、進行方向等の情報で、1608bit割当てる(表4)。

PHY層データフォーマットを図2に示す。MAC層データのうち、フレーム情報部分については、システムの信頼性への影響が大きいと考えられることから、フェージングによるレベル低下に対する耐性を確保するため、RateおよびLengthと併せて、サブキャリア変調方式(伝送速度)をBPSK(3Mbps)としている。また、制御情報、送信情報およびFCSの部分については、スロット使用状況や通信品質に応じ、サブキャリア変調方式(伝送速度)として、BPSK(3Mbps)、QPSK(6Mbps)、16QAM(12Mbps)のいずれかを選択し適用する。

フレーム情報をはじめとするMAC層データ部分は、OFDM変調が施された後、同期検出、周波数オフセット補償およびチャネル推定のためのプリアンブルが付加される。

フレーム情報 384bit	制御情報 24bit	送信情報 1608bit	FCS 32bit
------------------	---------------	-----------------	--------------

図1 MAC層データフォーマット

表2 スロット情報

ビット	記号	意味
000	FREE	パケット未検出
001	ACK	パケット正常受信
010	NACK	パケット受信失敗(受信レベル小)
011	RTC	スロット変更要求(パケット衝突検出)
100~111	—	未使用(予備)

表3 制御情報

項目	ビット数	内容
パケット種別	1	0:車載機パケット 1:路側機パケット
スロット同期	1	0:自律分散同期 1:路側機従属同期
ID	20	車両ID/路側機ID
予約	2	未使用
合計	24	

表4 送信情報

項目	ビット数	内容
自車位置	32	緯度: +90.000000 ~ -90.000000 deg
	32	経度: +180.000000 ~ -180.000000 deg
自車速度	9	0 ~ 51.1 m/sec
方位角	12	0 ~ 359.9 deg
方位角速度	12	+100.0 ~ -100.0 deg/sec
UTC時刻	24	時 分 秒
予約	1487	未使用
合計	1608	



図2 PHY層データフォーマット

## 2.2 構成

車車間通信システムの全体構成および外観を図3および図4に示す。本システムは、無線部、ベースバンド部、通信制御部および表示部により構成される。

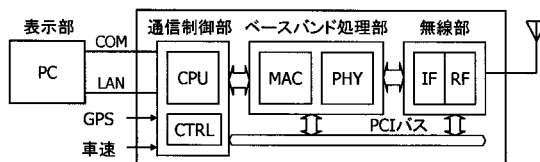


図3 車車間通信システムの全体構成

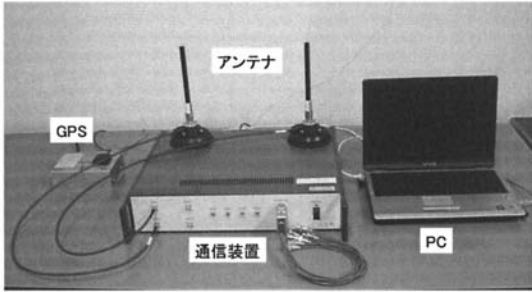


図4 車車間通信システムの外観

通信制御部の構成を図5に示す。

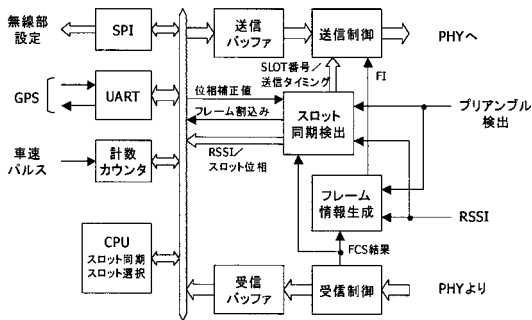


図5 通信制御部の構成

## 2.3 動作概要

### 2.3.1 システム基本動作

本システムは、周辺端末(あるいは路側機)から送信されたパケットの受信タイミングをもとに通信スロットタイミングを検出し、周辺端末の通信状況をもとに通信スロットを決定し、当該スロットで通信を行う。

ここで、所定のスロット数  $N$  を単位としてフレームを構成し、各端末はフレーム毎に同じスロットを使用して通信を行うことを基本とする。但し、周辺端末のスロット使用状況や通信品質に応じて、適宜、使用スロットを変更する。

図6に、本システムの基本動作の一例を示す。現フレームの送信スロットでパケット送信後、次フレームの送信スロットで送信するまでの間に周辺端末から受信したパケットに含まれるフレーム情報(前項参照)を調べ、スロットの使用状況を判断し、次フレームにおける送信スロットを決定する。送信スロットまで所定のスロット数以内になった時点で、位置と車速等を取込み、送信パケットを生成する。送信パケットには、送信スロット直前の1フレーム分のパケットの受信状況を送信フレーム情報として付加する。パケット

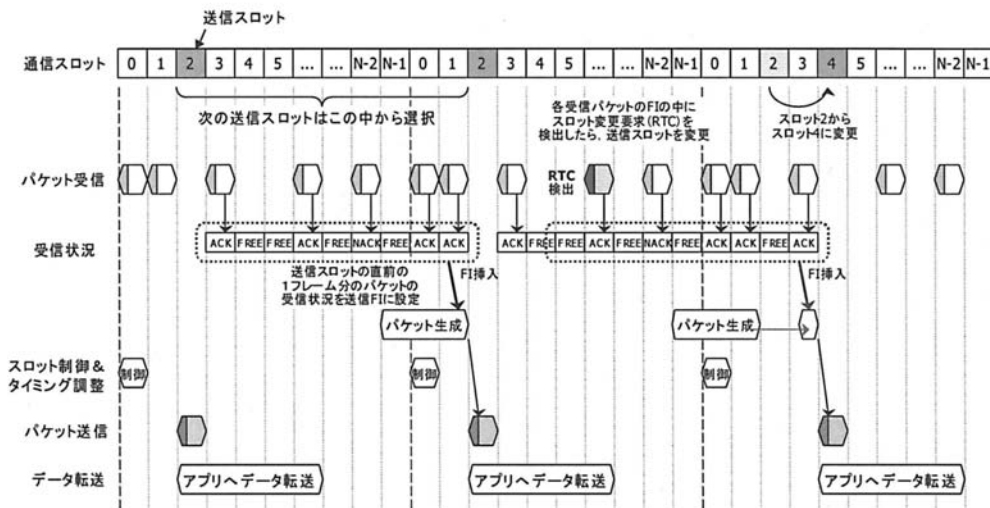


図6 システム基本動作

衝突の通知(RTC)を受けてスロット変更を行った場合は、変更後の送信タイミングの直前でフレーム情報を付加する。

送信スロットにおいてパケットの送信が開始されたら、送信したデータを含め1フレーム分の受信データ(位置、車速等)をアプリケーション部(PC)に転送し、表示を行う。

### 2.3.2 スロット同期検出

PHY から出力されるプリアンブル検出パルスをもとに、周辺端末のスロットタイミングの検出および周辺端末とのスロット同期の確立を行う。

プリアンブル検出パルスのタイミングでスロットタイミング生成カウンタの値を保持することにより、周辺端末とのスロットタイミングの進み/遅れの量を検出し、1フレーム分の位相差分布を生成する。分布が最大となる位相差を検出し、カウンタ値を補正することにより自端末のスロットタイミングを周辺端末のスロットタイミングに近づけ、スロット同期を確立する(図7)。

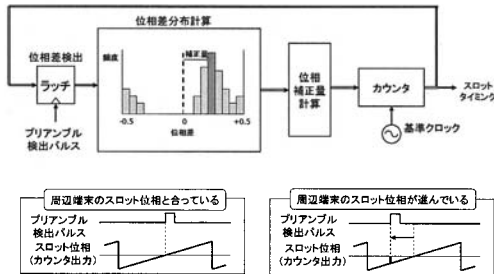


図7 スロット同期検出動作

### 2.3.3 フレーム情報生成

フレーム情報は、図8に示すフローに従い、プリアンブル検出タイミングにおける受信信号強度(RSSI)、パケット受信結果(FCS結果)に基づいて生成する。スロット変更に対して柔軟に対応できるよう、生成したフレーム情報は、1フレーム分のシフトレジスタで保持している。シフトレジスタに保持されたフレーム情報は、パケッ

ト送信時に H/W 挿入される。

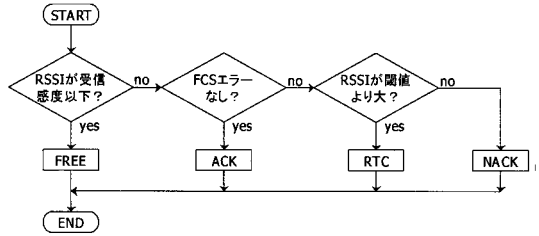


図8 フレーム情報生成フロー

### 2.3.4 スロット制御

各端末で生成されたフレーム情報は、送信スロットを基準として、1フレーム期間遡ったスロット使用状況のデータとして送られてくる。そこで、受信端末では、受信したスロットを基準に受信データを並べ替え、各端末のスロットをそろえてフレーム情報管理テーブルを生成する。具体的には、スロット番号  $i$  で受信したパケットに含まれる  $j$  番目の受信状況  $H(j)$ は、フレーム情報管理テーブル  $(FI[N,N])$ に、

$$FI[i, (i + j) \bmod N] = H(j) \quad (1)$$

のように並べ替えて保存する。このようにして作成したフレーム情報管理テーブルの自分の送信スロット番号の位置を縦に見ることで、自分が送信したパケットの周辺端末における受信状況を把握することができる(図9)。

フレーム情報をもとに図10に示すフローにしたがって送信スロットを決定する。

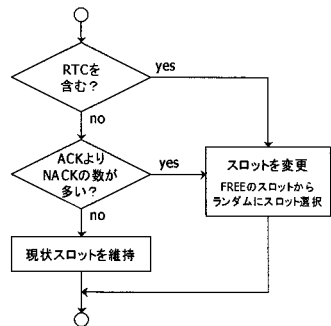


図10 送信スロット決定フロー

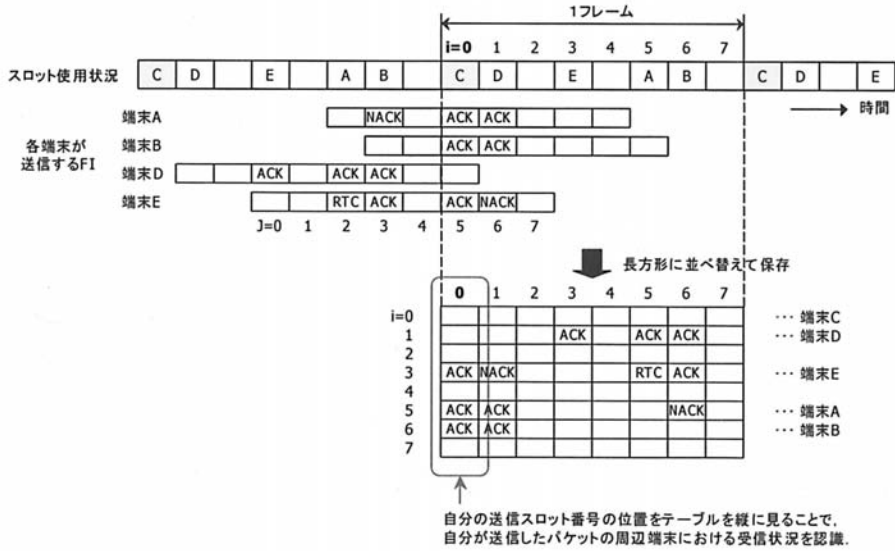


図9 フレーム情報管理テーブル

### 3. 動作検証実験

D-TDMA プロトコルの動作を実現する上で重要となるスロット同期およびスロット制御の機能について、テスト信号を用いて動作検証実験を行った。

#### 3.1 スロット同期実験

既にタイミング同期を確立して相互に通信を行っている端末群に新たに端末が加わる状況を想定し、図11に示すように、端末群を模擬するテスト送信側の信号送信タイミングを $\pm 1/4$ の範囲でランダムに変化させた時の受信側(自端末)のスロット同期タイミングを観測した。図12は、受信側で観測された、プリアンプル検出パルス、スロットタイミング、およびパケット送信タイミングの波形を示す。ランダムに変化するタイミングの平均的なタイミングに受信側のスロット同期タイミングが制御され、スロット同期部分が正しく動作していることが確認された。

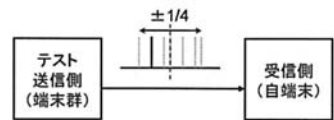
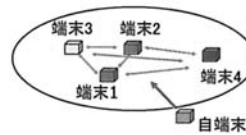


図11 模擬する状況とテスト方法

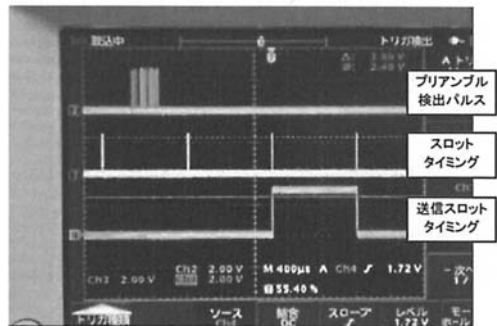


図12 自端末スロットタイミング波形

### 3.2 スロット制御実験

交通量の多い交差点で右折待ちをする状況において、直進車両と右折先で渋滞している車両が直接通信できない状況(隠れ端末の状況)を想定し(図 13), 3 台の端末を用いて電波暗室内において実験を行った。

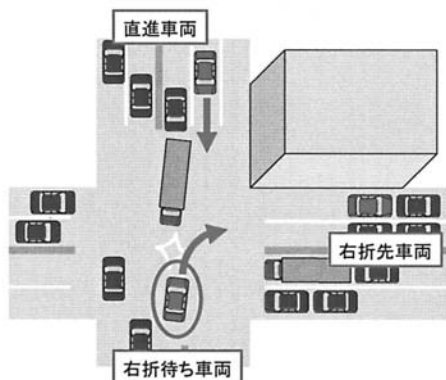
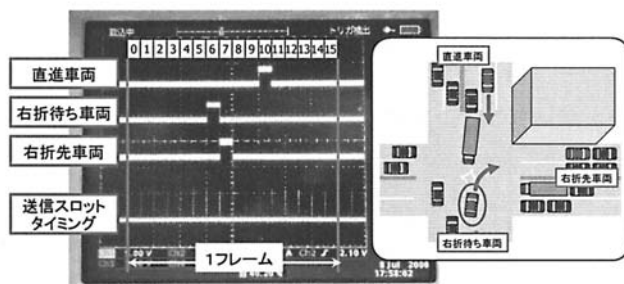


図 13 交差点での右折待ちの状況

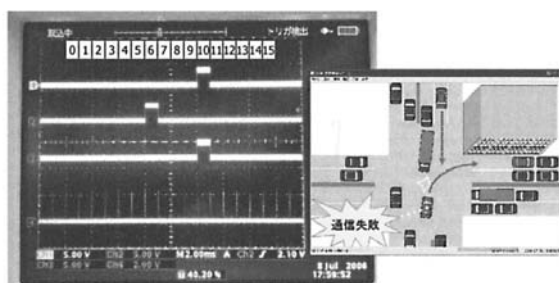
図 14 は、右折待ち車両の送信スロットタイミングと各車両の送信タイミングの一例を示したものである。同図では、1 フレームあたりのスロット数を 16 スロットとして動作を示している。

最初、3 台の車両は異なるスロットで送信をしている(図 14(a))。この状態では、各車両のデータは衝突しないため、データは正しく伝送される。ここで、右折先車両の送信タイミングを強制的に直進車両に一致させる(図 14(b))。隠れ端末対策が施されていないプロトコルでは、直進車両と右折先車両は隠れ端末によるパケット衝突が発生していることが分からないため、同じタイミングで送信を続けてしまい、通信エラーが継続する。その結果、右折待ち車両側で直進車両の接近の把握が遅れて事故につながる恐れがある。一方、D-TDMA プロトコルでは隠れ端末対策が施されたプロトコルでは、1回は衝突が発生するが、右折待ち車両が送信するパケットのフレーム情報によりパケット衝突が検出され、この例では、右折先車両が送信パケットを変更

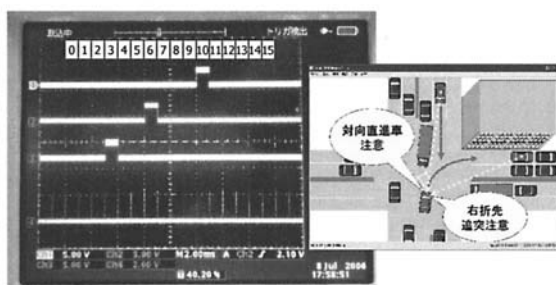
することで、2 目以降のパケット衝突が回避されることを確認した(図 14(c))。



(a)異なるタイミングで送信



(b)隠れ端末対策なし



(c)隠れ端末対策あり

図 14 右折待ちシーンを想定したスロット制御実験

### 4. まとめ

D-TDMA プロトコルの有効性および実現性を明らかにするために、車車間通信システムを開発した。D-TDMA プロトコルの動作を実現する上で重要となるスロット同期およびスロット制御の機能について、テスト信号を用いて動作検

証実験を行い、スロット同期およびフレーム情報に基づく隠れ端末対策機能が正しく動作することを確認した。

今後は、さまざまな条件でのプロトコルの動作検証を行う予定である。

## 文 献

- [1] 国土交通省, 情報交換型運転支援システムシンポジウム, Oct. 2005.
- [2] ASV (Advanced Safety Vehicle),  
<http://www.mlit.go.jp/jidosha/anzen/01asv/>
- [3] 金光寛幸, “ASV 情報交換型運転支援システムシステムコンセプトと技術的検討”, 信学技報, ITS2005-44, pp.29-34, Dec. 2005.
- [4] K. Seki, “Data relay performance of 5.8 GHz inter vehicle communications (The Second Report)”, ITS World Congress, 2006.
- [5] 牧戸知史, 鈴木徳祥, 原田知育, 村松潤哉, “リアルタイム車車間通信のための自律分散型TDMA プロトコル”, 情処論, vol.48, no.7, pp.2257-2266, July 2007.