

IEEE 802.11p 規格を用いた Hybrid DTN の実車実証

木全 崇^{1,a)} 寺西 裕一¹ 高木 雅裕¹ 中西 徹洋^{2,1,b)} 河合 栄治¹ 永野 秀尚¹

概要: 車車間通信・路車間通信による Delay Tolerant Network (DTN; 遅延耐性ネットワーク) を用いて車両が持つ車載センサー等のデータを収集・分析するコネクテッドカー応用システムの実車上の実装方法の検討や性能検証は、従来十分になされていなかった。我々の研究グループにおいても、DTN をデータプレーンに、公衆モバイル網をコントロールプレーンに用いることでコネクテッドカーからのデータ収集を効率的に実行可能とする「Hybrid DTN」方式の研究開発を行ってきたが、シミュレーションによる性能評価にとどまり、実車実装による性能は未検証であった。我々は車車間通信・路車間通信の標準規格である IEEE 802.11p を用いて Hybrid DTN に基づくデータ収集プラットフォームを実車実装し、実車両を用いた大容量データ収集アプリケーションの実証を行った。本稿では本実証におけるシステムの実装方法および評価結果について報告する。

1. はじめに

近年、自動車をインターネットに接続し、安全・快適な運転支援サービスや自動運転サービス等を実現するコネクテッドカーが注目されている。本研究では、コネクテッドカーの応用として、車載センサーや車載カメラなどから得られる比較的大容量のデータをクラウド上で収集・分析し、故障診断、ナビゲーション、警報通知などに活用する「大容量データの収集・分析」のユースケースを想定する。こうしたユースケースでは、一定の時間内に、必要なデータを各車両から出来るだけ多くクラウド上に収集できることが重要となる。

5G 等の高速かつ安定的なモバイル網が整備されれば、上記ユースケースに対応することは可能である。しかし、狭帯域のモバイル網しか利用できない、あるいは、モバイル網の通信可能エリアが十分に広くない地域では、データ送信に長時間かかる状況や、通信が不可能となる状況が生じ、上記ユースケースへの対応が困難となる。こうした課題に対応するため、モバイル網に依存しない車車間通信の方式として、DTN (Delay Tolerant Network) または VDTN (Vehicular DTN) と呼ばれる、いわゆる蓄積転送型 (store-carry-and-forward) のデータ転送方式が数多く提

案されてきた。しかし、既存方式は、いずれも大容量のデータ収集を対象とする場合、十分な収集成功率を実現できず、実用的とは言えなかった。

我々は、上記課題に対応し、大容量のデータ収集における収集成功率を向上させるため、モバイル網と車車間通信・路車間通信とを組み合わせ、車車間通信・路車間通信による DTN をデータ送信用に、モバイル網を制御用にそれぞれ活用する新たなデータ収集方式 Hybrid DTN を提案してきた [1]。提案方式は、モバイル網を用いた制御により、DTN における無駄なデータ転送を削減し、通信帯域の利用効率を向上させる。これにより、モバイル網が未発達な地域においても DTN を用いた大容量データ収集を効率的に行うことを可能とする。

従来、DTN の関連研究では、上記 Hybrid DTN を含め既存の多くの方式において、シミュレーションや机上検討によって性能や有効性が示されてきた [2, 3]。DTN の標準化やその実装は、近年も継続的に進められており [4, 5]、WiFi (IEEE 802.11 b/g) 等を用いた基本的な性能の検証も行われているが、データ収集システムへの応用については、従来、検討・検証が十分になされていなかった。また、コネクテッドカーの分野では、車車間通信・路車間通信の国際標準規格である IEEE 802.11p が制定され、開発が進められているが、これまで ITS のプロトコルの実装が主として進められており、車両を用いた DTN やそのアプリケーションの性能を評価した例は見当たらない。

我々は IEEE 802.11p を用いて Hybrid DTN に基づくデータ収集プラットフォームを実装し、実車両を用いた大容量データ収集システムの実証を行った。筆者らが知る限

¹ 情報通信研究機構

4-2-1 Nukui-Kitamachi, Koganei, Tokyo 184-8795, Japan

² スズキ株式会社

300 Takatsuka-cho, Minami-ku, Hamamatsu, Shizuoka 432-8611, Japan

a) kimata@nict.go.jp

b) tnakanisi@hhq.suzuki.co.jp

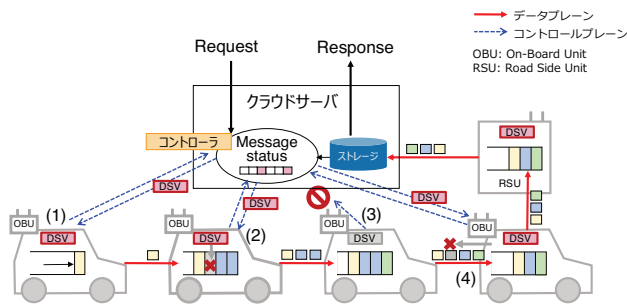


図 1 Hybrid-DTN

り、本実証は実車上で IEEE 802.11p 規格を用いて DTN によるデータ収集システムを評価した最初の事例である。本稿では本実証の結果について報告する。

2. 準備

まず本研究で前提とする Hybrid DTN および IEEE 802.11p 関連技術について述べる。

2.1 Hybrid DTN

まず、本研究で用いる Hybrid DTN 方式について述べる。Hybrid DTN においては、公衆モバイル網が狭帯域・狭エリア、すなわち、データ転送速度が低く、かつ、利用可能エリアが狭い状況を想定する。このような環境においてコネクテッドカーから大容量のデータ収集を行う場合、データ送信が未完了な状態や接続エラーが頻繁に生じてしまう。このため、車両からのデータ収集に DTN を適用する方法がこれまでに数多く研究開発されてきたが、大容量データを扱う場合、バッファ容量や通信帯域が不足し、データに欠落が生じる等の課題があった。

Hybrid DTN は、SDN (Software Defined Network) のコンセプトに基づき、ネットワーク制御のためのコントロールプレーンと、データ送受信のためのデータプレーンを分離し、データプレーンとして DTN を、コントロールプレーンとしてモバイル網を、それぞれ用いる (図 1)。道路側に配備され、有線でインターネット接続された RSU (Road Side Unit) も DTN に参加し、各車両からのデータを受信するとクラウドへ直接有線経由で転送する。

Hybrid DTN では DTN ルーティング方式として、Epidemic [6], Spray & Wait [7] 等の既存のルーティング方式を適用する。クラウド上には、「コントローラ」が置かれ、データ収集を行うリクエストメッセージ・レスポンスメッセージの発信状態、コントローラは、受信状態等を管理する。配信中および配信完了したメッセージの識別子を保持する。コントローラは、すでに配信完了したメッセージの識別子の情報を含む DSV (Delivery Status Vector) と呼ばれるデータを生成する。各車は、コントロールプレーン、すなわち、モバイル網を通じて定期的にコントローラに DSV の問い合わせを行って、最新状態の DSV を取得し、

保持する (図中の (1))。各車では、DTN に用いるバッファ上に、DSV に含まれるメッセージがあるとき、バッファから削除する (同 (2))。モバイル網の状況によっては、コントローラとの間の通信に失敗する場合があるが、その場合は、DSV が最新状態に更新されず、次の定期更新までは古い状態となる。したがって、受信側の DSV にすでに含まれるメッセージが転送されてしまうことがある (同 (3)) が、その場合、受信を拒否する (同 (4))。RSU も DTN として基本的に各車と同様の動作を行う。メッセージが RSU に到着すると、クラウド上のストレージへ転送する。データ収集アルゴリズムの詳細については文献 [1] を参照されたい。Hybrid DTN を用いたデータ収集では、バッファ用のストレージが潤沢でなくともバッファ溢れが生じず、大幅に収集効率が向上することを確認した。また、制御に用いられるモバイル網が利用できない状況が生じてても、DTN による自律的なデータ転送・収集を継続でき、データ収集性能に大きな影響が出ないことを確認した。しかし、上記は想定パラメータのもとシミュレーションにより評価した性能であり、実際の環境でどの程度の性能が実現となるかについては、未検証であった。

2.2 IEEE 802.11p と関連技術

Hybrid DTN は端末同士が直接接続して通信を行うアドホック通信を用いて実装される。我々は、公衆モバイル網が整備途上にある国や地域において Hybrid DTN をコネクテッドカーへ適用することを目指し、車車間・路車間通信の国際標準である IEEE 802.11p を用いた実装を主として検討した。

IEEE 802.11p は 2010 年に制定された車車間・路車間通信の標準規格である。物理層は IEEE 802.11a と同じ OFDM 技術を採用し、5.9GHz 帯で用いられることを想定している。変調方式としては BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM が用いられ、10MHz チャンネルの場合の PHY 層データレートは 3Mbps から 27Mbps となる。MAC 層は CSMA/CA に基づく DCF を基本とする。車両が高速に移動する環境のもとでは通信可能な時間が短いことが想定されるため、通常の IEEE 802.11 で用いられる認証と接続の手順を省いた OCB (outside the context of a BSS) を MAC 層に導入した点が主な特徴である。データ通信がブロードキャストで行われることも想定されている。車車間・路車間通信も可能な次世代公衆モバイル通信技術 LTE-V2X [8] 等の検討も盛んに行われているが、IEEE 802.11p は LTE-V2X と比べるとパケット周期・サイズが一定でない場合の性能に優れていることが知られている [9]。IEEE 802.11p の上位層には ITS 応用のためのプロトコルスタックを積むことが前提となっており、米国においては IEEE 1609 委員会、欧州においては ETSI TC ITS が、日本においては ARIB が、ITS 応用のプロトコルを規定している。また、安全のため

の通信だけではなく、一般的なアプリケーションによる通信を対象とした規格も規定されている。IEEE 1609.3 [10] は、主にレイヤ 3/4 を対象としており、低遅延を特徴とする独自の WSMP (Wave Short Message Protocol) を規定すると共に低遅延化した IPv6/TCP/UDP も採用している。なお、欧米は 5.9GHz 帯を使用するのにに対し、日本の ARIB 規格は 760MHz 帯を使用する。

また、IEEE 802.11p 制定後の IEEE 802.11 技術の進歩を V2X 応用に取り入れるため、IEEE 802.11bd (Enhancements for Next Generation V2X) Task Group が設立され、執筆時点において規格策定作業が進められている。

2.3 実験試験局

本研究では、公衆モバイル網の整備が発展途上にある国や地域への適用を想定し、Hybrid DTN 実装の性能評価を IEEE 802.11p にて想定されている周波数帯である 5GHz 帯を用いて行った。

日本においては、5GHz 帯を用いる IEEE 802.11 は、衛星・レーダーなどとの干渉を避けるため、各端末はアクセスポイントの指示に基づいて通信を行うことが要求される。したがって、車車間通信・路車間通信に必要となるいわゆるアドホックモードによる運用を技術基準適合証明を受けた無線機によって行うことはできない。そこで、IEEE 802.11p が想定する 5.9GHz 帯 (5850MHz から 5925MHz) に近い周波数で IEEE 802.11p の評価用無線機の実験試験局免許を取得し、性能評価に用いた。周波数としては、今回実験コースとして想定する情報通信研究機構小金本部周辺において、他の無線に干渉を与える可能性が少ないと判断された 5780MHz から 5820MHz までの各 10MHz 帯域、5 チャンネルを用いた。

なお、2.4GHz 帯の IEEE 802.11 はアドホックモードによる運用が許可されているが、IEEE 802.11p が想定する周波数帯と大きく異なるため、今回は用いなかった。

3. 関連研究

DTN の主要な実装としては、IBR-DTN [4]、DTN7 [5] が知られている。DTN7 は、RFC 9171 として標準化された Bundle Protocol version 7 に基づく実装*1であり、Epidemic Routing などいくつかのルーティング方式が実装されている。文献 [5] は実装によるオーバーヘッドの評価を示している。

DTN をスマートフォンに実装した例として、文献 [11] [12] 等がある。文献 [12] は、DTN7 をベースとし、LoRa をデータ交換に用いる実装を示している。いずれも主に小さいサイズのメッセージ交換への応用を想定しており、大容量データ収集を扱うものではない。

*1 実装は Internet Draft(draft-ietf-dtn-bpbis-31) の仕様をベースとしている

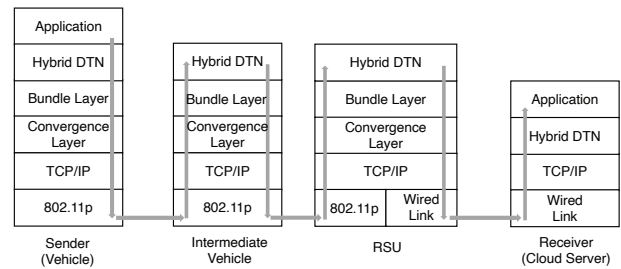


図 2 実装システムの構成

文献 [13] では、WiFi の基地局検索・認証・鍵交換等を高速化する標準である IEEE 802.11ai (FILS) を用いた VDTN の実車実証が行われている。この実証は、主に FILS と EAP-PEAP の性能比較に主眼があり、高速移動時に FILS がより長時間データ転送を行えることを示している。

VDTN のテストベッドの例として、文献 [14], [15] がある。文献 [14] では、IEEE 802.11b/g, Bluetooth のインタフェースを有する VDTN を用いて事故車両のデータを転送する実験を行っている。文献 [15] では、IEEE 802.11b/g を用いて異なる速度・データサイズでのデータ転送性能を評価している。

上記にあげた既存研究は、いずれも通常の WiFi IEEE 802.11 b/g (または 802.11ai) を用いて基本的な性能を検証するものであり、本研究が対象とするデータ収集システムへの応用について、検討・検証している例は見当たらない。

一方、IEEE 802.11p を想定した DTN のアプリケーション動作をシミュレーションにより再現し、性能評価を行った事例は多数ある。IoB-DTN [16] は、自転車に IEEE 802.11p のモジュールを搭載させた場合のデータ収集動作をシミュレーションにより評価している。文献 [1] では、Hybrid DTN の性能を IEEE 802.11p を想定した設定でシミュレーション評価している。IEEE 802.11p の性能を実車を用いて計測した事例としては、文献 [17] などがあるが、いずれも車両安全システム等の ITS アプリケーションの実装・評価が主として行われており、車両を用いた DTN やそのアプリケーションの性能を評価した例は見当たらない。

4. 実装

我々が開発した HybridDTN に基づくデータ収集プラットフォームの実装について述べる。

4.1 設計

図 2 は、実装システムの構成を示している。DTN レイヤに相当する Bundle Layer, Convergence Layer は、RFC 5050 (Bundle Protocol version 6) に基づく独自実装である。これらは DTN の標準に従った実装であり、既存の DTN 実装と互換性を有している。DTN レイヤの上には Hybrid DTN のレイヤがあり、上位アプリケーションによ

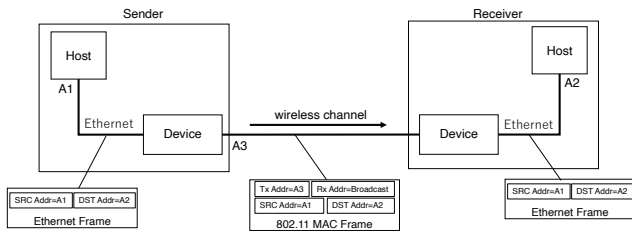


図 3 IEEE 802.11p 通信モジュールの構成

るデータ収集リクエスト，データ収集動作に基づいてデータの送受信を行う。Hybrid DTN レイヤは，コントロールプレーンとして公衆モバイル網のインタフェースを持ち，車両上，および RSU 上ではクラウド上のコントローラの指示に基づいて Bundle Layer の動作を制御する。

Hybrid DTN レイヤは DTN ルーティングの機能も含んでいる。ルーティングアルゴリズムは差し替え可能である。本実装では，Hybrid DTN に要求される Anycast によるデータ送信を Epidemic Routing [6] により転送するモジュールを組み込んだ。

VDTN のトランスポートとしては，WASP を用いることも考えられるが，本研究では，トランスポートとしての汎用性・互換性を考慮し，802.11p をネットワークアクセスレイヤ (L2) とするインターネットプロトコルに基づく実装を行った。パケットの再送制御や輻輳制御は，TCP/IP によって行っている。Convergence Layer においてトランスポートの差異は吸収可能であり，用途等に応じて将来的に WASP による実装へ差し替えることも可能である。

車両上で動作するアプリケーションとしてのデータ送信指示は，クラウド上のコントローラから公衆モバイル網経由で行う。RSU は 802.11p と有線ネットワークのインタフェースを持ち，車両から受信したメッセージを有線ネットワーク経由でクラウド上で動作する Hybrid DTN ノードへ転送する。クラウド上の Hybrid DTN ノードは，受信したデータをメッセージとして受信し，アプリケーションへ引き渡す。

4.2 IEEE 802.11p 通信モジュール

図 3 は，本実装に用いた IEEE 802.11p 通信モジュールの構成を示している。

IEEE 802.11p デバイスとして，アルプスアルパイン社製 UMPZ2-EVK3 を採用した。ホストは，このデバイスがホストに対して提供する物理的な Ethernet インタフェースを経由して，IEEE 802.11p による通信を行う。

本実装は，IEEE 802.11p をホストから L2 透過的に扱えるよう設計した。送信側ホストの Ethernet MAC Address を送信元アドレス (SRC Addr)，受信側ホストの Ethernet MAC Address を宛先アドレス (DST Addr) とし，送信側と受信側の各 Ethernet 上ではこの 2 つの MAC Address を持つ通常の Ethernet フレームとして通信を行う。IEEE

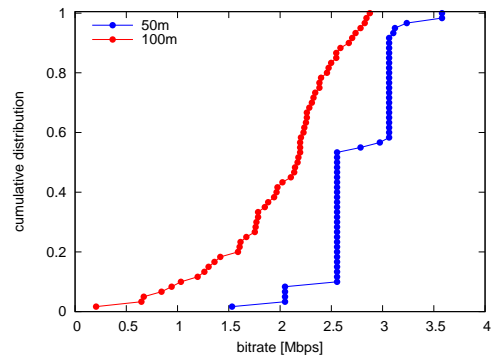


図 4 IEEE 802.11p 通信モジュールの基本性能

802.11p デバイス間の通信を行う際には，上述の SRC/DST Addr に加え，送信側の IEEE 802.11p 無線機の MAC Address を TX Addr，受信側の IEEE 802.11p 無線機の MAC Address を RX Addr とする 4 つの MAC Address を持つ IEEE 802.11 フレームを用いた。上記フレームの RX Addr はブロードキャストアドレスとし，受信したフレームは TX Addr の値に関わらずホストへ転送する動作とした。ブロードキャストには送達確認がなく，IEEE 802.11 実装で一般的な送達確認履歴を用いた適応的なレート制御ができないため，PHY データレートを固定する必要がある。今回は次節に示す実験環境における最大見通し距離 100m 強で概ね通信可能となる 6Mbps を選択した。

実装モジュールによるホスト間の TCP/IP によるデータ通信速度 (ビットレート) の累積分布を図 4 に示す。本データは iperf [18] を用いて次節に示す実験環境にて遮蔽物がない状態の下で測定した結果である。ホスト間の距離が 50m のとき，概ね 2.5Mbps~3Mbps で送信された。距離が 100m のとき，データ通信速度は減少したが 80% のデータが 1.5Mbps 以上，50% が 2Mbps 以上で送信された。

5. 実験

5.1 実験設定

本実証では，DTN を用いたデータ収集システムの動作を再現する実験設定とした。図 5 は，実験環境および実験で用いた移動経路を示している。実験コースは，実験試験局免許のエリアである情報通信研究機構小金井本部内に設けた。図 6 は実験コース内を走行中の様子 (すれ違い走行時) である。実験では，車両 2 台 (Car 1, Car 2)，RSU 2 台 (RSU 1, RSU 2) を Hybrid DTN のノードとして動作させ，RSU を 2 ヶ所に設置した。Car 1 および Car 2 は，RSU 1 付近 (図中の「Start & Turning Point」) から移動を開始し，RSU 2 付近を経由して RSU 1 付近へ戻る経路で移動を行う。Car 1, Car 2 はそれぞれコースを平均速度 15km/h で周回し，各車両は 1 試行あたり 2 周した。2 周したのち，各車両は図中の「Goal」付近へ移動する。Car 2 は Car 1 が 1 周目に RSU 2 付近を通過したのち移動を開始した。Car 1 と Car 2 は 1 試行の間に，3 度すれ違い，

表 1 実験パラメータ

パラメータ	値
データサイズ	500 (KByte)
データ生成間隔	30 (秒)
Bundle 生存期間	360 (秒)
1 回あたり生成データ数	10
車両移動速度 (平均)	15 (km/h)
1 試行あたり移動時間	540(秒)
バッファサイズ (BS)	30(MB), 2(GB)



図 6 実験の様子

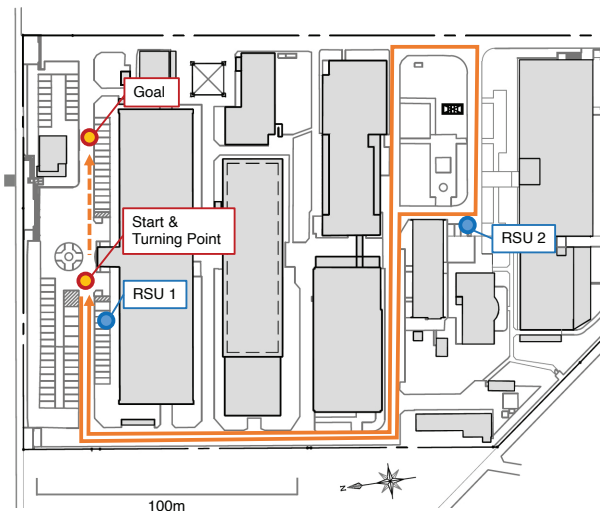


図 5 実験環境と移動経路

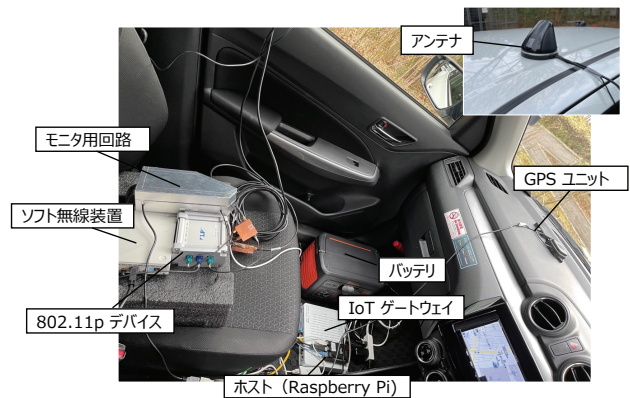


図 7 車載装置

終了時に合流する動作となる。

表 1 は実験で用いたパラメータである。実験では、データは Car 1 および Car 2 が 30 秒おきに 1 回生成する設定とし、生成データサイズを 1 データあたり 500KB とした (画像データを想定)。また、1 回あたり 10 データを連続的に生成した。すなわち、30 秒毎に 5MB、1 分あたり 10MB、1 試行 (540 秒=9 分) あたり約 90 MB のデータを生成した。Bundle の生存期間 (lifetime) は 360 秒とした。クラウドの性能に依存しないよう、実験設定としては、RSU 1, RSU 2 いずれかにデータが到達した時点を配信完了時刻とした。

実験では、通常の DTN (Normal DTN) と Hybrid DTN のデータ収集完了率を比較した。それぞれバッファサイズ (BS) を 30MB, 2GB とする合計 4 試行を実施した。

BS=30MB の場合、移動に伴う通信可能時間が十分に確保できた場合も全受信データをバッファに保持できない状態、すなわち、バッファがボトルネックとなる状態が想定される。BS=2GB の場合、移動に伴う通信可能時間が十分に確保できれば、全受信データをバッファに保持することができる状態となる。この場合、通信時間がボトルネックとなる状態が想定される。

5.2 実験装置

図 7 は実験に用いた車載装置の構成である。4.2 節で示した 802.11p デバイス、ホストが主要構成要素となっている。

ホストは Raspberry Pi4 を用いて実装している。モニタ用回路は、IEEE 802.11p デバイスの送受信信号をソフトウェア無線機に分岐する回路であり、新規に設計・実装した。ソフトウェア無線機 (Ettus 社 B210) は、IEEE 802.11p デバイスの送受信信号を後から解析するため IQ 信号に変換する役割をはたす。IoT ゲートウェイは、NICT 総合テストベッドサービス [19] で提供される装置である。IoT ゲートウェイは LTE の公衆モバイル通信機能を有しており、これを Hybrid DTN のコントロールプレーンに用いた。実験は GPS を用いて位置を記録しながら実施した。

5.3 電波強度と TCP/IP 通信の推移

図 8, 図 9 は、Car 1 および Car 2 において、車車間、および路車間 (RSU 1, RSU 2 との間) の相対電波強度、および、データ通信に用いられた TCP/IP のパケットの SEQ (シーケンス番号) の時間経過にともなう推移を示している*2。これらは、パラメータ BS=2GB, Hybrid DTN の場合であるが、他の条件の場合も同様の推移となった。

実験コース内では建物が電波を遮蔽するため、Car 1, Car 2, RSU 1, RSU 2 全てが同時に接続する状態は生じない。およそ 250 秒経過時点で、一時的に Car 1 が Car 2 と RSU 2 に同時に接続する状態が生じている。Car 2 は、開始時点から約 100 秒間移動せず待機するため、データ生成

*2 モニタ系の性能不足によりデータの一部に欠落が生じている。

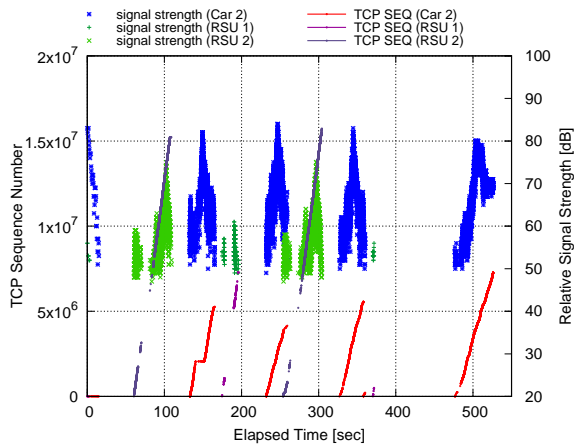


図 8 電波強度と受信 TCP SEQ の推移 (Car 1)

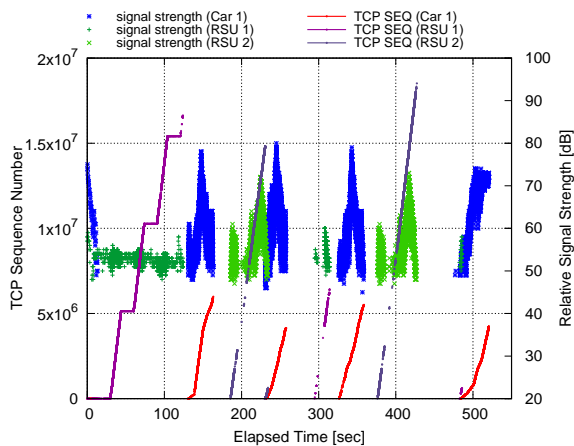


図 9 電波強度と受信 TCP SEQ の推移 (Car 2)

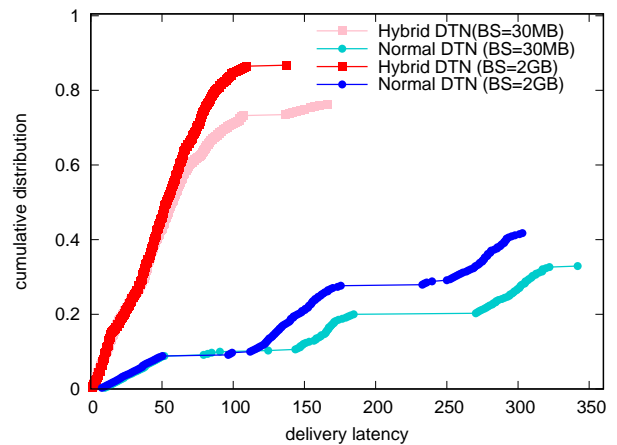


図 10 データ収集完了率 (累積分布)

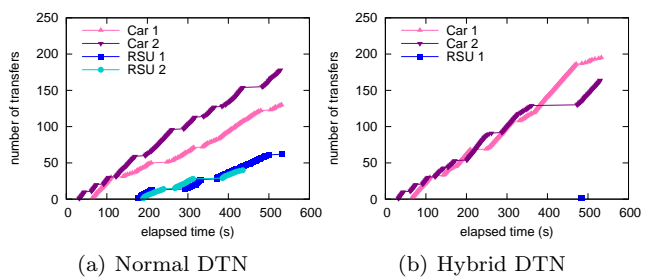


図 11 累積データ送信数の推移 (バッファサイズ=30MB)

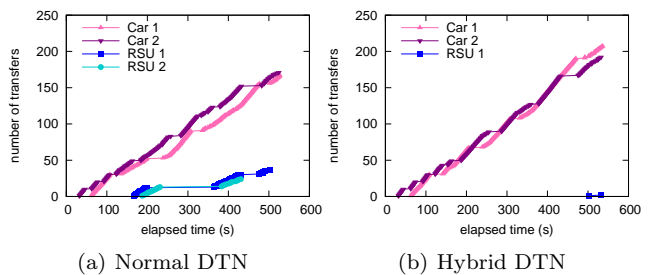


図 12 累積データ送信数の推移 (バッファサイズ=2GB)

後、直接 RSU1 に転送する動作となっており、この間に生成されたデータが収集される動作となっている。その後の動作は Car 1 と同様であり、約 250 秒経過時点で、一時的に Car1 と RSU 2 に同時に接続する状態が生じる。

Car 1 と Car 2 は、500 秒経過時点で合流するまでの間に 3 回すれ違っており、その間にデータ交換を行っている。電波強度が概ね 50dB 以上となっている間、データ交換が実行されている。電波強度が一定以上となるタイミングとデータ交換開始時刻に大きなずれはなく、IEEE 802.11p における OCB の効果が現れているものと考えられる。

1 回目、3 回目のすれ違いは、見通しが良い直線上で行われており、2 回目のすれ違いにおける通信可能時間よりも、若干長くなっている。Car 1 は、RSU 1 付近を約 180 秒経過時点、および、約 380 秒経過時点、RSU2 付近を約 70 秒経過時点、約 250 秒経過時点で、それぞれ通過し、通信可能状態となっている間にデータをアップロードしている。

Car 2 は、RSU 1 付近を開始から約 100 秒経過時点、および、約 390 秒経過時点、RSU2 付近を約 180 秒経過時点、約 380 秒経過時点で、それぞれ通過し、通信可能状態となっている間にデータをアップロードしている。

5.4 データ収集性能

図 10 は、本実験において、データ収集 (配信) 完了までにかかった時間の 1 試行あたりの累積分布を条件が異なる試行毎の結果を示している。

Hybrid DTN は通常の DTN (図中の Normal DTN) と比べ、収集完了率・収集完了時間ともに性能を大きく改善可能であることがわかる。BS=30MB の場合よりも、BS=2MB の場合のほうが、最終的な収集完了率は高く、収集にかかる時間は短くなっている。これは、BS=2GB のときバッファサイズによるボトルネックが生じないためである。また、バッファサイズによるボトルネックが生じない BS=2GB の場合も Hybrid DTN が Normal DTN よりも高い収集完了率、短い収集完了時間となっている。

図 11, 図 12 は、BS=30MB, 2GB の場合のデータ送信数の時間経過に応じた推移を、(a) 通常の DTN, (b) Hybrid DTN の場合についてそれぞれ示している。BS=30MB の場合、データ送信数が増加しない時間帯がいくつか存在し

ているのに対し、BS=2GBの場合、データ送信数が増加しない時間帯は比較的少ない。これは、BS=30MBの場合に通信可能な状態であってもバッファサイズの上限によりデータ送信数が増加しない時間帯が生じているためと考えられる。また、(a)の通常のDTNでは、RSU 1やRSU 2からのデータ送信が多く生じている。すなわち、車両がRSU付近を移動した際、すでに収集が完了したデータを再度車両へ転送する動作が生じており、通信帯域を無駄に消費する状態となっている。これに対し、(b) Hybrid DTNではRSU 1からのデータ転送が少量存在するものの、RSU 2からはデータ転送は全く生じていない。これは、Hybrid DTNではデータ収集が完了した時点でDSVが車両に送信され、車両がRSUへデータを送信する前に当該データが削除されるため、無駄な通信帯域の消費が抑えられることによる。この通信帯域の無駄な消費の有無が、通常のDTNとHybrid DTNにおいてデータ転送完了率の差を生じさせる要因となっていると考えられる。

6. おわりに

本稿では、我々の研究グループにおいて研究開発を進めてきたHybridDTN方式に基づくデータ収集プラットフォームのIEEE 802.11pを用いた実装、および、同実装を用いた大容量データ収集アプリケーションの実車実証の結果を示した。本実証によって、IEEE 802.11pを用いた実車実装においてHybrid DTNが通常のDTNと比べ、高い性能を得られることが確認できた。通常、実証において異なるパラメータによる試行結果を、条件を揃えて比較することは困難であるが、コース上の通過タイミング管理等の工夫により、ほぼ同一の条件を再現できた。

今後の課題としては、異なる実験環境、パラメータでの評価が挙げられる。特に、より現実的なアプリケーションを想定したデータ生成量・タイミングの設定、車両数や通信状況が異なる場合の性能などは今後評価・検討が必要と考えている。また、IEEE 802.11pのみならず、他の車車間・路車間通信方式を用いた実装方法の検討、ならびにその性能評価についても今後逐次進めたい。

参考文献

- [1] Y. Teranishi, T. Kimata, E. Kawai and H. Harai, "Hybrid Cellular-DTN for Vehicle Volume Data Collection in Rural Areas," Proc. of IEEE 43rd Computer Software and Applications Conference (COMPSAC 2019), 2019.
- [2] G. F. João, A. Patel, B. L. A. Batista, J. Celestino Jr., "A systematic technical survey of DTN and VDTN routing protocols," Computer Standards and Interfaces 48, 2016.
- [3] M. T. Sergio, C. T. Calafate, J. Cano, P. Manzoni, "DTN Protocols for Vehicular Networks: An Application Oriented Overview," IEEE Communications Surveys and Tutorials 17, 2014.
- [4] M. Doering, S. Lahde, J. Morgenroth, L. Wolf, "IBR-

DTN: an efficient implementation for embedded systems," Proc. ACM 3rd Workshop on Challenged Networks, 2008.

- [5] A. Penning, L. Baumgärtner, J. Höchst, A. Sterz, M. Mezini, B. Freisleben, "DTN7: An open-source disruption-tolerant networking implementation of bundle protocol 7," Proc. International Conference on Ad-Hoc Networks and Wireless, 2019.
- [6] A. Vahdat, and D. Becker, "Epidemic routing for partially connected ad hoc networks," Technical Report CS-200006, 2000.
- [7] T. Spyropoulos, K. Psounis, C. S. Raghavendra, "Spray and Wait: an efficient routing scheme for intermittently connected mobile networks," Proc. of the 2005 ACM SIGCOMM workshop on Delay-Tolerant Networking (WDTN '05), 2005.
- [8] S. Chen, J. Hu, Y. Shi, Y. Peng, J. Fang, R. Zhao, L. Zhao, "Vehicle-to-everything (V2X) services supported by LTE-based systems and 5G," IEEE Communications Standards Magazine 1, No. 2, 2017.
- [9] R. Molina-Masegosa, J. Gozalvez and M. Sepulcre, "Comparison of IEEE 802.11p and LTE-V2X: An Evaluation With Periodic and Aperiodic Messages of Constant and Variable Size," in IEEE Access, vol. 8, 2020.
- [10] IEEE 1609.3-2016 - IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) – Networking Services.
- [11] Y. Teranishi, S. Shimojo, "MONAC: SNS message dissemination over smartphone-based DTN and cloud," Proc. 2011 IEEE International Conference on Peer-to-Peer Computing, 2011.
- [12] J. Höchst, L. Baumgärtner, F. Kuntke, A. Penning, A. Sterz, B. Freisleben, "Lora-based device-to-device smartphone communication for crisis scenarios," Proc. of 17th International Conference on Information Systems for Crisis Response and Management (ISCRAM 2020), 2020.
- [13] A. Kato, T. Maeno, Y. Owada, G. Sato, K. Temma, T. Kuri, M. Takai, S. Ishihara, "Performance evaluation of FILS in a vehicular delay/disruption tolerant network," Proc. IEEE 92nd Vehicular Technology Conference (VTC2020-Fall), 2020.
- [14] M. C. Paula, J. N. Isento, J. A. Dias, J. J. Rodrigues, "A real-world VDTN testbed for advanced vehicular services and applications," Proc. of IEEE 16th International Workshop on Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD 2011), 2011.
- [15] M.C. Paula, J. J. Rodrigues, J. A. Dias, J. N. Isento, A. Vinel, "Performance evaluation of a real vehicular delay-tolerant network testbed," International Journal of Distributed Sensor Networks 11, No. 3, 2015.
- [16] Y. Zguira, H. Rivano, A. Meddeb, "IoB-DTN: A lightweight DTN protocol for mobile IoT applications to smart bike sharing systems," Proc. of IEEE Wireless Days (WD 2018), 2018.
- [17] T. T. Almeida, L. D. C. Gomes, F. M. Ortiz, J. R. Júnior, L. H. Costa, "IEEE 802.11p performance evaluation: simulations vs. real experiments," Proc. of 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2018), 2018.
- [18] "iPerf - The ultimate speed test tool for TCP, UDP and SCTP," <https://iperf.fr/>.
- [19] NICT ICT Testbed Research and Development Promotion Center, "NICT's Integrated Testbed," <https://testbed.nict.go.jp/english/>