

2-7 地域情報共有のための端末間通信ネットワークの開発と実証

李 還幫 単 麟 三浦 龍 松田隆志 児島史秀 大和田泰伯 井上真杉

NICT は地域情報共有のための端末間通信ネットワーク・テストベッドを開発し、東京都港区と京都府精華町のご協力の下、2014年に港区が運行するコミュニティバス「お台場レインボーバス」とその沿線を市街地型環境、精華町が運行するコミュニティバス「精華くるりんバス」とその沿線を郊外地型環境として、それぞれテストベッドを展開し、実証評価実験を行ってきた。テストベッドで用いた端末間通信は中央制御を行わず、920 MHz を使用した通信端末同士が通信範囲に入れば、自律的に通信を行ってネットワークを形成するため基地局などの通信設備は不要で、通信ネットワークの一部の設備が故障や停止してもネットワーク全体への影響が少なく、災害に強いという特徴を持っている。コミュニティバスに搭載した通信端末は、バスの移動に伴ってバス路線沿線に展開している他の通信端末との間で情報の集配信が行われ、様々な地域情報共有が実現される。また、走行中の「精華くるりんバス」搭載の通信端末から送信されるバス位置情報を収集し、バスロケーション案内を実現した。端末間通信ネットワークは携帯電話などの既存の通信ネットワークから独立した地域内通信ネットワークとして、様々な利活用が期待される。

1 まえがき

通信端末同士が直接通信する端末間通信に対して、3 GPP [1] や IEEE802 [2] などにおいて標準規格の策定が進められる一方、ヘテロロジニアス・ネットワークのコンポーネントの1つとして様々な研究開発が行われている [3]-[6]。セルラーネットワークなどを一部利用した Device-to-Device (D2D) のようなインフラ利用型端末間通信 [4][5] と、Peer-Aware-Communication (PAC) のような自律型端末間通信 [6] がそれぞれ検討されている。通信端末同士が直接通信するため、セルラー等の既存ワイヤレスネットワークの負荷を低減し、送信端末のアンテナが送信してから、受信端末のアンテナが受信するまでの通信遅延を減らすなどの可能性を生み出す一方、ホット・スポットに対するスループットの改善にも役立つ。さらに、端末間通信の IoT やモバイル・ソーシャル・ネットワークにおける役割などの研究も行われている [7][8]。

筆者らは地域内を移動するコミュニティバスに着目し、端末間通信の基本方式であるブロードキャストを用いて、地域情報を共有するための端末間通信ネットワーク・テストベッドを開発した [9][10]。東京都港区と京都府精華町のご協力の下、2014年に港区が運行するコミュニティバス「お台場レインボーバス」と、精華町が運行するコミュニティバス「精華くるりんバス」及びそれぞれのバス沿線にテストベッドを展開し、実証実験を行ってきた。コミュニティバスに搭載した通信端末は、バスの移動に伴ってバス路線沿線に展開

している他の通信端末との間で情報の集配信が行われ、地域行政情報やイベント広告など、地域コミュニティが必要とする様々な情報の共有に活用している。その後、テストベッドに冗長性を持たせ、バス搭載の通信端末から送信されるバス位置情報を精華くるりんバス全路線で受信し、バスロケーション案内を実現した。

以下では、2017年7月現在の端末間通信テストベッドを基準に、開発した端末間通信の特徴、テストベッドの試験端末構成及びテストベッドの展開と実証実験の順で記述する。

2 端末間通信のコンセプトと特徴

今回開発した端末間通信のコンセプトを図1で説明する。サイネージ端末をはじめ、屋上端末やセンサ端末などの形態の異なる試験端末を開発しているが、各試験端末には送受信を行う通信端末と試験端末の用途に応じたディスプレイ等の周辺装置及びインタフェースが含まれている。ネットワーク形成の観点からは、ネットワークの中で中央制御する通信端末が存在せず、全ての通信端末が同じ働きをする。送信する通信端末間は後述の通信プロトコルに従って、定められたタイムスロットでブロードキャストにて情報を送信し、通信範囲にある他の通信端末はブロードキャストされた情報を受信する。

コミュニティバス搭載のサイネージ端末の中の通信端末は、地域内を走行しながらバス路線沿線に展開している他の試験端末に含まれる通信端末と繰り返し送

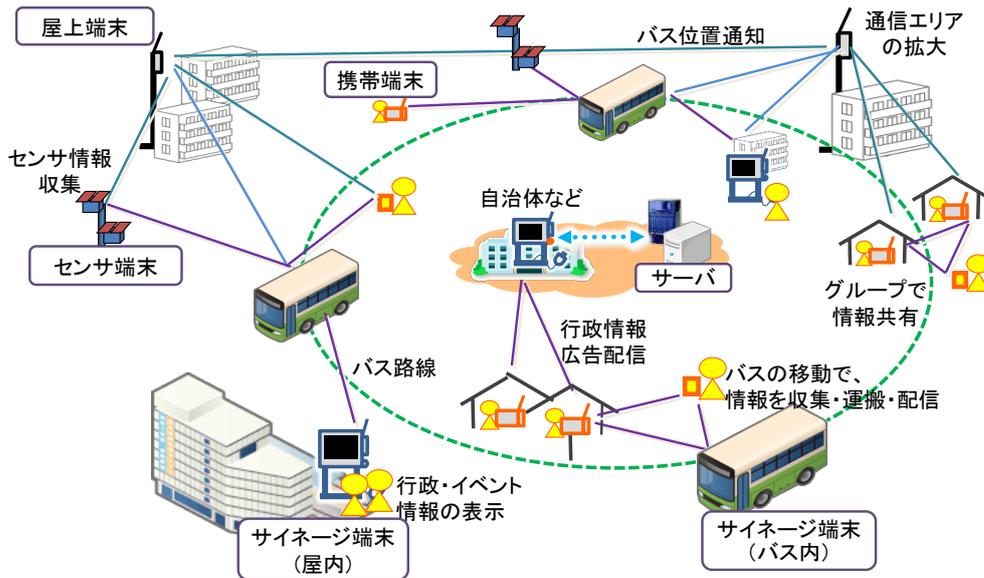


図1 開発した端末間通信のコンセプト図

受信を行う。バスが走行するエリアの広さとバスの走行頻度によるが、バスの移動とともに地域内に同じ行政情報、イベント情報、広告など、地域コミュニティが必要とする様々な情報を共有することができる。

今回開発した端末間通信は、中央制御を行わず、通信端末同士が通信範囲に入れば自律的に通信を行ってネットワークを形成するため、基地局などの通信設備は不要で、通信ネットワークの一部の通信端末が故障や停止しても、ネットワーク全体への影響が少なく、災害に強いといえる。さらに、開発した端末間通信は以下の特徴を有している。

(1) 自律通信プロトコルと GPS に基づく同期

通信範囲にある通信端末が自律通信を行うために、あらかじめ通信プロトコルを定めなければならない。まず、他の通信端末からの送信を素早く検知するよう、全ての通信端末が同じ周波数チャンネルを用いることとした。なお、通信端末の数がチャンネルの容量を超える場合は、筆者らが提案する方式 [11] を用いて複数周波数チャンネルを使いながら、他の通信端末を早く検出することが可能である。次に、通信端末からの送信を分散させるために、各試験端末の働きに応じて、その中に含まれる通信端末の送信タイムスロットを規定する送信フレームを用いた。送信フレームにおいて、各々の試験端末の働きを考慮し、それぞれに含まれる通信端末の送信タイムスロット長と送信頻度を割り当てる。各通信端末は割り当てられたタイムスロット以外では送信しない(具体的なフレーム構成例を 4 で述べる)。

送信フレーム長を 60 秒とし、60 秒を周期に同じフ

レームが繰り返される。地域に分散している通信端末がもっている送信フレームを同期させるために、全ての試験端末には GPS 受信機を取り付け、GPS 衛星からのタイムパルスを用いてフレーム同期を行っている。一方、建物の中の設置等で GPS 受信困難な試験端末に対して、GPS のタイムパルスに同期した試験端末の通信端末から同期信号を送信して、フレーム同期を実現させた。

(2) TDMA と CSMA/CA に基づくチャンネルアクセス

全ての通信端末は同じ周波数チャンネルを用いたとし、前項より通信端末からのチャンネルアクセスは試験端末の類に基づく時分割多重アクセス (TDMA: Time Division Multiple Access) を基本とする。しかし、通信範囲に同じ種類の試験端末が複数存在する場合は、お互いの通信端末からの送信パケットが衝突する恐れがある。パケット衝突を回避するために、上記 TDMA に加えて搬送波検知多重アクセス/衝突回避 (CSMA/CA: Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) を用いた。他の送信する通信端末がないことを確認してから、自分から送信する仕組みである。TDMA と CSMA/CA を組み合わせて用いることによって、異なる種類の試験端末と同じ種類の試験端末の両方の通信端末が自律的に通信してネットワークを形成する。

(3) 情報バッファ機能

通信端末同士が通信範囲内に入っているときのみ通信が可能となるため、より多くの通信端末の間で情報

共有ができるよう情報バッファ機能を設けた。バッファに入れた情報パケットを一定時間内に保持し、この時間内に通信範囲に入ってくる通信端末に対して情報パケットの配信を行う。今回のような移動する通信端末が存在する場合、情報伝播経路が常に変化し、1台の通信端末は同じ情報パケットを重複して受け取る可能性があるため、情報パケットにIDを付けて識別できるようにした。また、情報パケットがネットワークでたどった経路によって、古い情報パケットを後から受信することがあり得るため、情報パケットの送信時刻をもって最新のものにアップデートされるようにしている。

3 テストベッドの試験端末構成

テストベッドには様々な試験端末が含まれているが、用いられる通信端末は全て標準規格 ARIB STD-T108 [12] で定められている 920 MHz 帯周波数を使用している。用途に応じて、送信電力が 20 mW (無免許で使用可能な通信端末) と、送信電力が 250 mW (登録するだけで使用可能な通信端末) の、いずれかを用いている。いずれも通信料金がかからない特徴を有している。250 mW 通信端末と 20 mW 通信端末の電力デシベル差は

$$10\log(250) - 10\log(20) \approx 10.97\text{dB} \quad (1)$$

で与えられ、この差は次式の自由空間の伝搬損失



(a) サイネージの表示画面例



(b) 公共施設での設置例



(c) バス運転席後ろでの設置例

図 2 サイネージ端末の例

$$L(\text{dB}) = 20\log\left(\frac{4\pi}{\lambda}\right) + 20\log(D) \quad (2)$$

より、伝搬距離の差に換算することができる。

$$L_2(\text{dB}) - L_1(\text{dB}) = 20\log(D_2) - 20\log(D_1) \quad (3)$$

すなわち、同じアンテナを用いた場合、250 mW 通信端末と 20 mW 通信端末の伝搬距離の差は $D_2 \approx 3.5 \times D_1$ である。

いずれの通信端末も信号帯域幅が 400 kHz で、GFSK 変調と誤り検出符号 CRC-16 を用いた。伝送レートは 115,200 bps である。以下では開発した試験端末のそれぞれの働きについて説明する。

3.1 サイネージ端末

サイネージ端末の画面表示例を図 2(a) に示す。表示画面は、(1) 日付・時間、(2) 天気情報、(3) 交通情報・緊急情報、(4) コンテンツ、の 4 つのエリアから構成される。コンテンツ・エリアは地域行政関連の情報や、ニュース、イベント広告などを表示する。コンテンツは通常区役所や役場等の WEB から取得するが、手入力することも可能である。サイネージ端末は図 2(b) に示す役場などの公共施設に置くもの (S-F) と図 2(c) に示すバス内に取り付けるもの (S-B) がある。バスの移動に伴って、S-B に内蔵される通信端末は通信範囲に入ってくる他の通信端末と情報交換することによって、表示画面の内容を更新していく。一方、S-F は S-B から受け取った情報をもって表示画面の内容を更新する。S-F と S-B は基本的に 20 mW 通信端末を用いる。ただし、後述するバスロケーション案内を実現するために、精華くるりんバスの中に取り付けたサイネージ端末は 250 mW 通信端末を用いた。また、サ

イネージ端末には GPS 受信機を内蔵している。

3.2 屋上端末

屋上端末は建物の屋上などの高い位置に設置する試験端末で、通信エリアを拡大し、ネットワークの接続性をよくする役割を果たす。そのために、すべての屋上端末は 250 mW 通信端末を用いる。商用電源を備えない屋上環境や災害時などを想定した太陽電池を用いた自立型屋上端末と商用電源を利用できる環境で、簡単に設置できる簡易型屋上端末を開発した。図 3(a)、(b) にそれぞれ設置後の自立型屋上端末と簡易型屋上端末を示す。

自立型屋上端末が用いた太陽電池の最大蓄電容量は 640 Wh に対して、通信端末の消費電力が約 2 W である。80% 蓄電によって通信端末の連続稼働時間が次式によって計算できる。

$$640 \text{ Wh} \times 80 \% / 2 \text{ W} = 256 \text{ h} \quad (4)$$

すなわち 10 日間以上の連続稼働でき、天候が良くない梅雨等においても安定した運用が可能である。なお、自立型屋上端末は独立した送信アンテナと受信用アンテナを用いているが、簡易型屋上端末は設置を更に簡便にするため、送受信共用アンテナを用いた。屋上端末同士間で送受信を行うほか、バスの GPS より得られたバス位置情報や次項で述べるセンサ端末からのセンサデータなどを受け取る役割を果たす。なお、屋上端末にも GPS 受信機が内蔵されている。

3.3 センサ端末

センサ端末 (Sen) には温度、湿度、照度、モーションなどのセンサ及び GPS 受信機が含まれている。どんな場所でも設置可能とするため、自立型屋上端末と

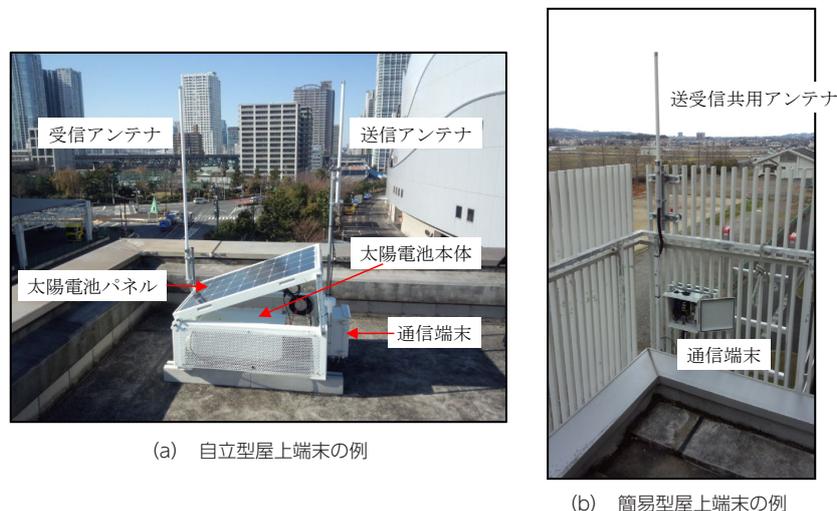


図 3 設置した屋上端末の例

同じ太陽電池システムを用いた。図4に自販機の上に設置したセンサ端末の例である。センサ端末は20 mW 通信端末を使用し、各センサで取得したセンサデータを通信範囲にある屋上端末または通信範囲に入ってくるバス搭載の通信端末に渡していく。なお、省電力のためセンサ端末は他の試験端末からの情報を受け取らない。

なお、様々な実証実験を可能とするために携帯型端末も開発したが、テストベッドに常設しないので、本稿では関連記述を割愛する。



図4 自販機上設置のセンサ端末の例

4 テストベッドの展開と実証実験

4.1 市街地型環境での展開と実証実験：お台場レインボーバス（東京都港区）

お台場レインボーバスが走行する港区お台場地域を市街地型環境として、テストベッドを展開した。お台場レインボーバスを中心としたテストベッドのイメージ図を図5に示す。7台で運行されているお台場レインボーバスは品川駅または田町駅から出発、レインボー・ブリッジを通過して、お台場エリアを走行するルートとなっている。バス7台と港区役所及びお台場エリア内のフジテレビ等の施設に計11台のサイネージ端末を設置し、これらのサイネージ端末は全て20 mW 通信端末を用いた。市街地型環境では高層ビルが多数あり、電波の遮蔽やマルチパス伝搬の影響がある一方、コミュニティバスが頻繁に往来する特徴がある。お台場レインボーバスとお台場周辺施設の間で情報を集配信することによって、市街地型環境のエリア内の情報共有の実証を行った。実証実験では、港区からの行政情報、フジテレビからのニュース、ホテルグランドニッコー東京 台場からのイベント情報、KM観光バス[13]からの交通情報などをコンテンツとして用いた。また、お台場レインボーバスは港区役所近辺を走行しないため、港区からの情報をインターネットを通して、フジテレビのサイネージ端末から配信した。上記コンテンツはお台場レインボーバスの往来に応じて頻繁にアップデートされていることを確認した。

一方、図5に示すように5台の屋上端末を用いて海を隔ててお台場エリアへの通信リンクを実現している。

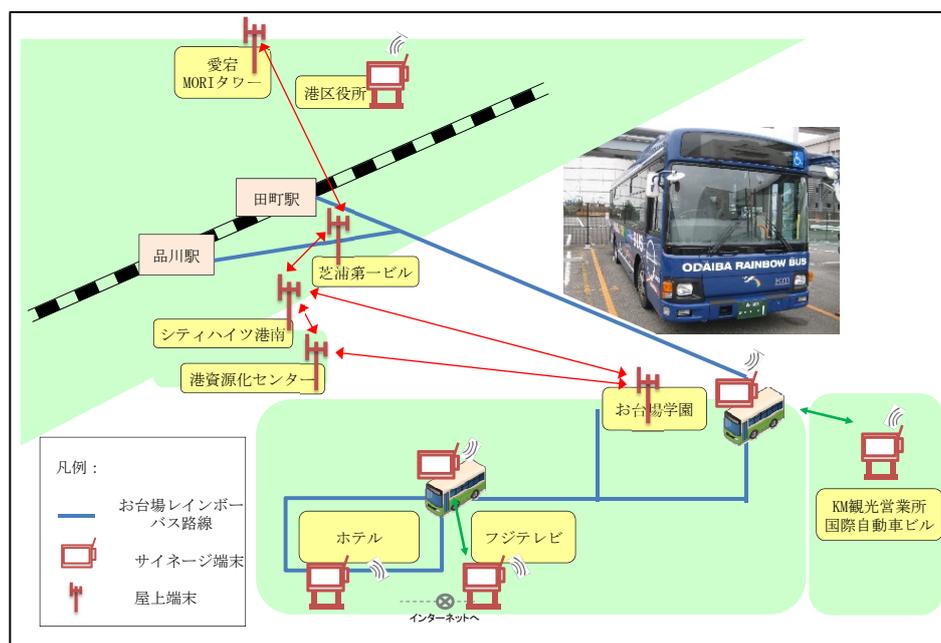


図5 お台場レインボーバスを中心としたテストベッド

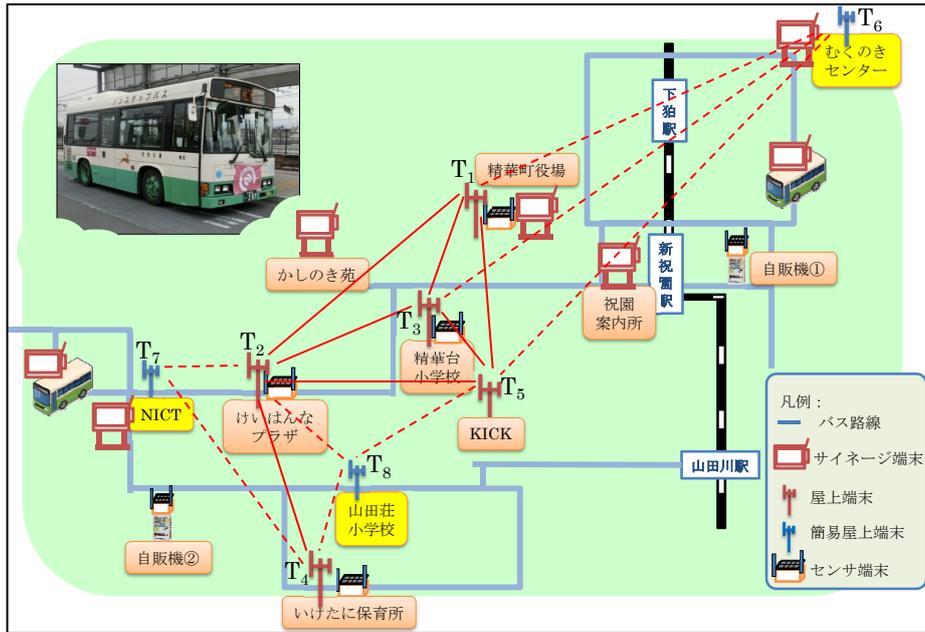


図6 精華くるりんバスを中心としたテストベッド

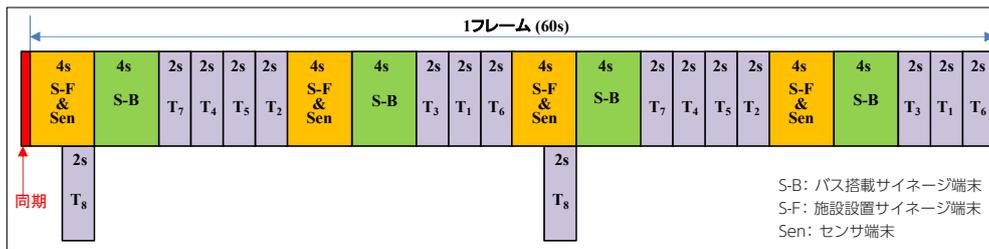


図7 送信フレームの例

5 台の屋上端末は全て太陽電池システムを用い、250 mW 通信端末を用いた。屋上端末間のリンクは緊急情報用として設けられ、バスの走行による集配信に比べて集配信できる情報量が少ない送信フレームを設計しているが、情報が早く届けられる特徴がある。送信フレームの具体例を次項に示す。また、屋上端末を用いて、港区役所から緊急配信ができるように通信リンクを確立した。

4.2 郊外地型環境での展開と実証実験： 精華くるりんバス（京都府精華町）

精華くるりんバスが走行する精華町を郊外地型環境として、テストベッドを展開した。精華くるりんバスを中心としたテストベッドのイメージ図を図6に示す。サイネージ端末8台と屋上端末8台及びセンサ端末6台をエリア内に展開した。3.3で述べたように、センサ端末は取得した情報の配信のみを行う。8台のサイネージ端末は精華くるりんバス内3台(1台は予備車)と精華町役場をはじめとするエリア内の施設に5台を設置した。精華くるりんバスで集配信を行うコ

ンテンツとして、精華町役場からの行政関連情報、国会図書館関西館からのイベント情報及び奈良交通[14]からの交通情報などが含まれている。一方、郊外地型環境ではコミュニティバスの走行頻度が低く、精華くるりんバスについても、バスロケーション案内を実現したいという要望が強かった。バスロケーション案内を行うために、精華くるりんバス路線全線において、バスが走行している位置のバス位置情報を準リアルタイムで把握する必要がある。そのために、精華くるりんバスからの送信信号がより遠くまで届くことが望ましく、3台の精華くるりんバスは250 mW 通信端末を用いた。

また、精華くるりんバス路線全線の任意位置から送信されるバスの位置情報を受信できるように、図6に示すように精華町役場の屋上などに設置の5台の自立型屋上端末に加えて、3台の簡易型屋上端末を設置した。記述の便宜のため、図6に8台の屋上端末をT₁～T₈で標記した。3台の簡易型屋上端末(T₆, T₇, T₈)は図6の破線のリンクで示すように、精華くるりんバス全路線のカバレッジを強化するとともに、屋上端末による

ネットワークの冗長度を増やした。図6からわかるように、1台の屋上端末は2～6台の他の屋上端末と通信リンクをもち、受信したバス位置等の情報の共有をより確実にした。また、何らかの理由で商用電源を使えなくなった場合はカバレッジが縮小するが、図6の実線のリンクで示すように5台の自立型屋上端末で形成されるネットワークの稼働が可能である。

精華くるりんバスを中心としたテストベッドで用いられる送信フレームの構成例を図7に示す。1つの送信フレーム長は60秒であり、GPS衛星からのタイムパルスに同期している。送信フレームは複数のタイムスロットに分けられ、各試験端末に割り当てられている。

まず、バス搭載のサイネージ端末(S-B)に4秒長のタイムスロットをほぼ均等に4回割り当て、より多くの送信チャンスを与えている。通信範囲内に2台以上のバスが存在する場合は、CSMA/CAを用いて自律的に衝突回避を行う。次に、施設設置のサイネージ端末(S-F)は、バス搭載のサイネージ端末と同等のタイムスロット割当てを受けているが、Senと同じタイムスロットを共有している。両者が固定設置であることとお互いに通信範囲にない設置が可能のためである。万が一、S-FとSenは通信範囲に現れる場合は上記と同じくCSMA/CAを用いて自律通信を行う。上記と異なって、屋上端末はカバレッジが広く、隣接する屋上端末同士がお互いに通信してデータを中継する必要があるため、屋上端末に対して1台ずつ1個のタイムスロットを割り当てた。ただし、タイムスロットの長さを2秒に制限している。したがって、屋上端末はバス位置情報やセンサデータ及び緊急情報などの送受信に制限し、コンテンツの送受信を行わない。

精華くるりんバスから送信したバス位置情報等は、そのバスの通信範囲にある屋上端末に受信され、そして屋上端末ネットワークを通して屋上端末同士で共有される。図8にバス位置情報の伝送遅延を測定した例を示す。一般性を失うことなく、バス位置情報が走行中の精華くるりんバスから任意の位置から送信され、図6のむくのきセンター設置の屋上端末T₆にて収集されるとし、伝送遅延時間はバス位置情報を送信した時刻と屋上端末T₆に到達した時刻との差である。大部分のバス位置情報の伝送遅延時間が60秒以内で、120秒を超える伝送遅延時間がわずかである。

表1に伝送遅延時間データを解析した結果を示す。82.8%のデータが60秒以内であり、99.7%のデータは120秒であることを確認した。すなわち、精華くるりんバスの現在位置をほぼ2分以内で把握でき、また、82.8%が1分以内で把握することが可能である。

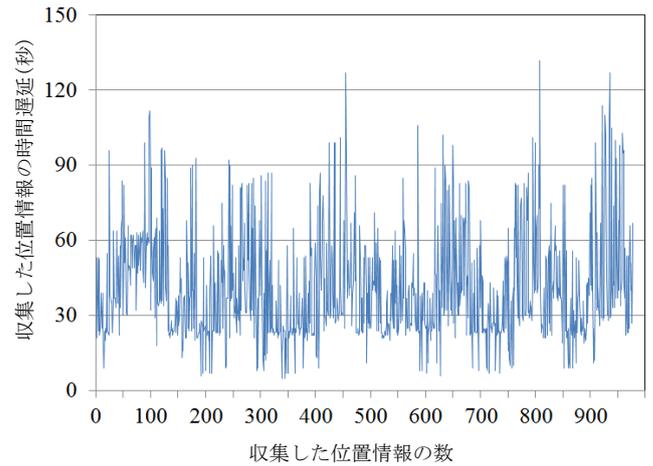


図8 バス位置情報の伝搬遅延測定例

表1 伝搬遅延時間の解析結果

遅延時間	5～30秒	31～60秒	61～120秒	120～132秒
データ数	412	398	165	3
比率	42.1%	40.7%	16.9%	0.3%
累積比率	42.1%	82.8%	99.7%	100%

5 むすび

本稿では、中央制御を行わない端末間通信テストベッドの開発、展開及び実証実験について記述した。東京都港区及び京都府精華町に展開しているテストベッドが順調に稼働していて、それぞれの地域における情報集配信と共有に役立っている。また、精華町のような郊外型環境では、本テストベッドで用いたシンプルな端末間通信システムでもバスロケ案内を実現し、しかも通信料金がかからないため導入しやすい。

本稿では割愛したが、港区での実証実験では、港区の外部連携サーバとの連携を実現し、港区発の緊急情報の配信もテストベッド上で行っている。また、精華町の実証実験では、バスロケーション案内の有用性が確認され、バスロケーション案内の試験公開を開始する予定である。

免許不要で利用可能かつ通信料金がかからない特徴と、故障や災害に強い特徴を發揮し、また、遅延があるもののバスの移動に伴って容易に情報の集配信を行う端末間通信の利活用を今後更に開拓したい。

謝辞

テストベッドの展開及び実証実験に対して、ご協力を頂いている東京都港区、京都府精華町をはじめ、各関係機関に深く感謝を申し上げます。

【参考文献】

- 1 <http://www.3gpp.org/about-3gpp>
- 2 <http://www.ieee802.org/15/pub/TG8.html>
- 3 A. Ghosh, et al., "Heterogeneous cellular networks: From theory to practice," IEEE Comm. Mag., vol.50, no.6, pp.54-64, June 2012.
- 4 K. Doppler, M. Rinne, C. Wijting, C. Ribeiro, and K. Hugl, "Device-to-device communication as an underlay to LTE-advanced networks," IEEE Comm. Mag., vol.47, no.12, pp.42-49, 2009.
- 5 K. J. Zou, M. Wang, K. W. Yang, J. Zhang, W. Sheng, Q. Chen, and X. You, "Proximity discovery for device-to-device communications over a cellular network," IEEE Comm. Mag., vol.52, no.6, pp.98-107, June 2014.
- 6 M. Lee, H.-B. Li, and S.-H. Park, "Introduction to Peer Aware Communications (PAC)," https://mentor.ieee.org/802.15/documents?is_dcn=pac&is_group=wng0&is_year=2012.
- 7 O. Bello and S. Zeadally, "Intelligent Device-to-Device Communication in the Internet of Things," IEEE Systems Journal, vol.10, no.3, pp.1172-1182, 2016.
- 8 J. Lee, T.Q.S. Quek, "Device-to-Device Communication in Wireless Mobile Social Networks," 2014 IEEE 79th Vehicular Technology Conference (VTC Spring), May 2014.
- 9 H.-B. Li, L. Shan, T. Matsuda, and R. Miura, "Design and deployment of infrastructure-independent D2D networks without centralized coordination," International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS2015), Brussels, Belgium, Aug. 2015.
- 10 H.-B. Li, L. Shan, R. Miura, and F. Kojima, "D2D Networks for information diffusion and bus location gaining with local community buses," (Invited Paper) IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC-spring 2017), Sydney, Australia, June 2017.
- 11 H.-B. Li, R. Miura, and F. Kojima, "Channel access proposal for enabling quick discovery for D2D wireless networks," International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC 2017), Santa Clara, CA, USA, Jan. 2017.
- 12 ARIB STD-T108 1.0 版, "920 MHz 帯テレメータ用、テレコントロール用及びデータ伝送用無線設備 標準規格," 電波産業会, Feb. 2012.
- 13 <https://www.km-bus.tokyo/route/odaiba/>
- 14 <http://www.narakotsu.co.jp/rosen/index.html>



松田隆志 (まつだ たかし)

ワイヤレスネットワーク総合研究センター
ワイヤレスシステム研究室
研究員
博士(工学)
センサネットワーク、無線給電、生体通信



児島史秀 (こじま ふみひで)

ワイヤレスネットワーク総合研究センター
ワイヤレスシステム研究室
室長
博士(工学)
無線通信、無線アクセス制御



大和田泰伯 (おおわだ やすのり)

耐災害 ICT 研究センター
応用領域研究室
主任研究員
博士(工学)
分散システム、無線アクセスネットワーク



井上真杉 (いのうえ ますぎ)

グローバル推進部門
国際研究連携展開室
室長
博士(工学)
無線ネットワーク



李 還帮 (り かんほう)

ワイヤレスネットワーク総合研究センター
ワイヤレスシステム研究室
総括研究員
博士(工学)
無線通信、移動通信、端末間通信、ウルトラ
ワイドバンド



単 麟 (たん りん)

ワイヤレスネットワーク総合研究センター
ワイヤレスシステム研究室
研究員
博士(情報学)
無線通信、移動通信、端末間通信、無人機通
信システム



三浦 龍 (みうら りゅう)

ワイヤレスネットワーク総合研究センター
上席研究員
博士(工学)
移動通信、無線制御通信、無人機通信システ
ム