

センサネットワークを用いた 新たなバスロケーションシステムの開発と 災害時への適用に関する研究

鈴木 秀和¹・畠 基成²・松本 幸正³・大森 昭嗣⁴・澤田 基弘⁵

¹非会員 名城大学助教 理工学部情報工学科 (〒 468-8502 愛知県名古屋市天白区塩釜口 1-501)
E-mail: hsuzuki@meijo-u.ac.jp

²非会員 名城大学学生 大学院理工学研究科情報工学専攻
E-mail: 123430033@ccalumni.meijo-u.ac.jp

³正会員 名城大学教授 理工学部社会基盤デザイン工学科 (〒 468-8502 愛知県名古屋市天白区塩釜口 1-501)
E-mail: matumoto@meijo-u.ac.jp

⁴非会員 株式会社メイエレクト 技術開発部 (〒 456-0031 愛知県名古屋市熱田区神宮 4-3-36)
E-mail: s-oomori@meielec.co.jp

⁵正会員 株式会社日建設シビル 都市施設設計部門 (〒 460-0008 名古屋市中区栄 4-15-32)
E-mail: sawada@nikken.jp

地方自治体におけるコミュニティバスの利便性向上と、災害時における情報提供システムとしての活用が可能なセンサネットワーク技術を用いた新たなバスロケーションシステムを開発した。本システムは、平常時には通常のバスロケーションシステムとして利用可能なだけでなく、センサが町中に張り巡らされていることから、地域情報の提供システムや防犯システムとしても活用できる。また、災害発生時などには災害情報の提供システムとして稼働する。このセンサネットワークは電池で動作することから、電力供給が絶たれるような災害時の情報システムに適している。通信料は無料で運用コストが安価で、財政状況の厳しい地方自治体においても運用が容易となる。本研究では、この新たに開発したバスロケーションシステムを用いたフィールド検証で得られたデータの分析結果について報告するとともに、災害時の稼働可能性と課題について考察する。

Key Words : Wireless Sensor Network, Bus Location System, Emergency Communication

1. はじめに

交通弱者の移動手段を確保する上で、地域公共交通の重要性は高い一方、不採算路線の廃止や縮小が続いており、特にバス交通の衰退が深刻化している。バスの利用率向上には利便性の向上が重要であり、その方策の一つとしてバスロケーションシステムがある。バスロケーションシステムとは、バスの位置情報を情報通信技術を活用して収集管理することにより、バス利用者に対してバスの接近や到着予想時刻情報をバス停、携帯電話やパソコンなどに情報提供するシステムである。

従来のバスロケーションシステムの構成は、各バスがGPSで取得した位置情報を携帯電話通信網を利用してロケーションサーバに登録する^{1),2),3)}。さらに、バス停に次発バスの位置情報や、到着予想時刻などの情報を表示する場合は、全バス停にも通信装置を設置して携帯電話通信網を利用して情報配信している。このようなシステムは初期導入コストだけでなく、通信事業者に支払うデータ通信料などの運用コストが非常に高いことが課題となっている。そのため、中小バス事業

者や自治体などが運営する地方都市では、システムを導入しても継続的な運用費を捻出できず、サービスを終了してしまうケースが発生している⁴⁾。従って、地域公共交通にバスロケーションシステムを展開するためには、低コストで継続運用可能な新たなシステムを実現する必要がある。

そこで本研究では、通信コストが発生せず、かつ耐障害性のある無線センサネットワークを用いた、新しいバスロケーションシステムを提案する。バス運行エリアおよびバスに小型の無線センサデバイスを設置し、これらのデバイスがメッシュ状の無線ネットワークを構築することにより、携帯電話通信網を利用することなくバスの位置情報をセンターへ収集することができる。また、無線センサネットワークでは双方向通信が可能なため、センターからバスやバス停に運行情報や地域情報などを配信することができる。

本稿では、筆者らが開発した新しいバスロケーションシステムの概要と、フィールド実験から得られた結果について報告する。また、災害時における無線センサネットワークの可能性と課題について述べる。

2. 携帯電話通信網を利用しない既存のバスロケーションシステム

本研究と同様に、携帯電話通信網を利用せず、安価に従来のバスロケーションシステムと同等の機能を運用することを目的としたシステムとして、“chi-bus”が提案されている^{5),6)}。chi-busは、バスとバス停間で特定省電力無線を用いて、バスの接近通過を検出し、その情報をバス停の表示器で提供する。特定省電力無線は伝送速度が4.8kbps以下であるため、バスからバス停へ送信できる情報は制御情報程度である。また、バスの利用しか想定されていないため、バス停もバス到着予測時刻や通過時間など、きわめて限定的な情報しか表示することができない。また、バス運行履歴はバス車載器に蓄積されるため、バスが車両基地に帰還しなければ運行情報を収集することができない。

Zhianらは、ワイヤレスセンサネットワークを構築するプロトコル ZigBee⁷⁾を用いて、バスの到着予測時刻と出発時刻をバスからバス停に報告するシステムを提案している⁸⁾。このシステムでは、各バス停が独立した ZigBee ネットワークを構成しており、バスに搭載された ZigBee デバイスはそのネットワークに接続することにより、バスとバス停間で情報交換を行っている。バス路線全体でセンサネットワークを構築しておらず、本来のネットワークとしての役割を果たしていない。そのため、運行情報を管理するセンターに情報を送る場合は、携帯電話通信網(GSM/GPRS)を用いており、運用コストの削減にはつながらない。

Iqbalらは、乗客のデマンドに応じてバスを効率よく運行するフレキシブル・バスシステムを提案している⁹⁾。従来はセンターとバスおよびバス停の間で通信する際に携帯電話通信網などを利用してしたが、このシステムではセンターとバスの間で直接通信を行わず、バスとバス停の間に ZigBee 通信を導入する。これにより、バスはバス停を中継することによりセンターと通信できるため、システム全体の通信コストを抑制することを考えている。しかし、センターとバス停間は従来通り携帯電話通信網を利用しており、センサネットワークの利点を活用しきれていない。

山本らは、無線 Ad-hoc ネットワークを用いたバスロケーションシステムを提案している¹⁰⁾。塩尻市街地に子供の見守りシステム用に構築されているアドホックネットワークを活用することにより、安価にバスロケーションシステムを構築するアプローチとなっている。バスの位置情報を中継器を経由することにより、サーバへ蓄積して運行状況を把握する。このシステムでは利用者に運行状況を提供する方法として、Web ページのみを提供している。そのため、外出先でバスの現在地

を確認する際は、スマートフォンや携帯電話が必要となるが、高齢者にとっては利用できなかったり、小さい画面で確認することは困難である。また、提供する情報はバスの現在地、およびバスの走行方向しかないため、利用者にとって到着予想時刻を瞬時に確認することができない。

3. 提案システム

(1) 設計方針

従来のバスロケーションシステムは、バスの位置情報を収集し、運行情報を提供するための専用システムとして設計開発されてきた。これに対して、筆者らが提案するバスロケーションシステムは、図-1に示すネットワーク層とアプリケーション層から構成されるシステムアーキテクチャに基づいて設計されている。ネットワーク層は、アプリケーション層から渡されたデータを伝送する役割を担い、本研究では町中に構築する無線センサネットワークにて実現する。アプリケーション層は、アプリケーションが扱うデータフォーマットを定義し、それに基づいて各種装置で動作するプログラムが情報を処理してユーザに提供する役割を担う。2つの層は互いに独立しており、これらが通信プロトコルを利用して連携することにより、1つのシステムとして動作する。

(2) センサネットワーク

センサネットワークとは、空間に多数配置された無線通信機能を持つ小型のセンサデバイスが、相互に存在を認識して動的に無線接続されたネットワークである。個々のセンサデバイスは、温度、湿度、照度などのセンサを搭載しており、センサネットワークが構築された地域の環境データの収集などを行うことができる。これらの情報は、マルチホップ(バケツリレー方式)通信により、情報収集端末まで伝送される。

今回、筆者らが採用した無線ネットワーク規格は、IEEE802.15.4¹¹⁾である。この規格は、ZigBeeなどの無線通信規格において利用されており、通信速度は低速である反面、低コスト、低消費電力、高セキュリティ

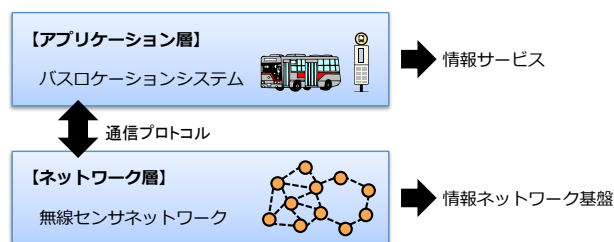


図-1 システムアーキテクチャ

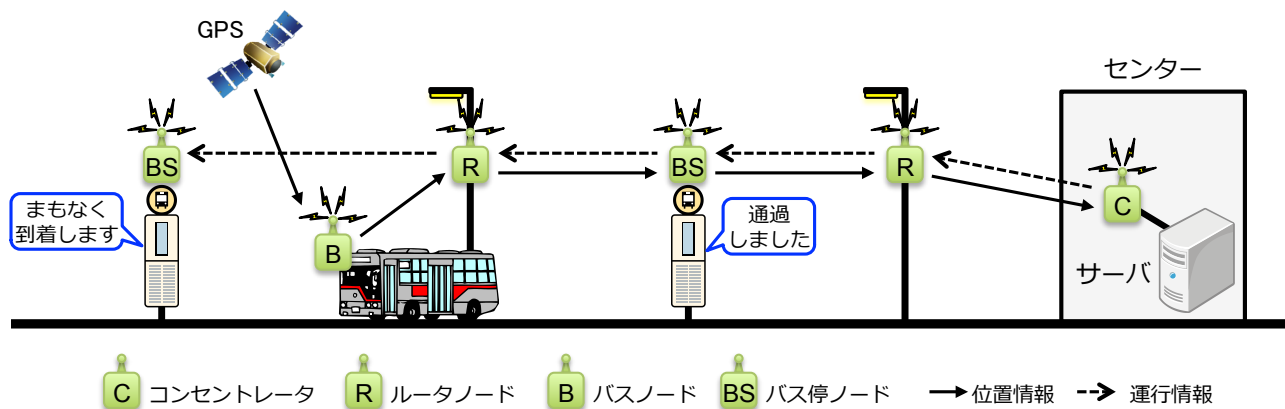


図-2 提案システムの概要

という特徴を有している。そのため、センサデバイスは商用電源を必要とせず、乾電池やバッテリー、太陽光などのエネルギー・ハーベスティング技術により稼働できることから、簡単に設置・撤去が可能で、需要に応じてネットワークの規模を変更することができる。

(3) システム構成

図-2 に提案システムの概要を示す。IEEE802.15.4 準拠のセンサデバイスを利用し、マルチホップ通信が可能な無線センサネットワークを構築する。センターに設置されたセンサデバイス(コンセントレータ)は、無線センサネットワークで伝送される情報を収集する。バスに設置されるセンサデバイス(バスノード)は、GPS から取得した位置情報をコンセントレータへ送信する。バス路線沿いの電柱や街路灯などに設置したセンサデバイス(ルータノード)は、バスから送信された位置情報などを中継する。コンセントレータはサーバと接続しており、収集したバスの位置情報をデータベースに蓄積する。これらの情報から、バスの遅延などの運行情報を生成し、バス停に向けて送信する。バス停に設置されたセンサデバイス(バス停ノード)は、受信したバスの遅延情報や到着予想時間などをディスプレイに表示する。

無線センサネットワークを構成するセンサデバイスには、東京コスモス電機株式会社の TWE-001 STRONG¹を採用した。表-1 に TWE-001 STRONG の仕様を示す。このデバイスは、2.4GHz 帯を使用する無線通信モジュールであり、外径が 20×45.5×3.5mm と非常に小さい。送受信時に 28mA、ディープスリープ時は 1.3μA と非常に低消費電力で稼働するため、10 秒の間欠動作時には、計算上、ボタン電池で 2 年以上稼働し続ける。また、採用した無指向性アンテナは利得 2dBi の場合、見通し 3km という長い通信距離を実現で

表-1 無線通信モジュール TWE-001 STRONG の仕様

無線仕様	
無線規格	IEEE802.15.4 準拠
周波数帯	2.4GHz
通信速度	250kbps
送信出力	+9.08dBm
受信感度	-100dBm
暗号化	AES-128 ビット
マイコン仕様	
CPU	32 ビット 最大 32MHz
RAM/ROM	128kB/128kB
フラッシュROM	512kB

きる性能を有する。なお、市街地で無線 LAN 等のノイズが多い条件下では、200m 程度の通信が可能である。

通信速度は 250kbps と低速だが、chi-bus など多くのバスロケーションシステムで利用されている特定省電力無線と比較して、1 秒あたりのデータ転送量は特定省電力無線の約 52 倍である。無線センサネットワークで送受信するデータは、位置情報や運行情報など主にテキストデータであるため、データサイズが小さく、実用上問題ない。また、地域にネットワークとして構築されるため、バス、バス停、市役所などが双方向に情報交換することができる。従って、バスの位置情報や運行情報をリアルタイムに車両基地やセンターで収集・蓄積することができる。

このように、広域にわたって構築されるセンサネットワークのことを、広域センサネットワーク (WASN: Wide-Area Sensor and/or actuator Network) と呼ぶ¹²⁾。その特徴として、山間部のような端末密度が低い環境から、都市部のような端末密度が高い環境まで、様々な場面に適用することができる。

¹ <http://tocos-wireless.com/jp/>

表-2 バスロケーションシステムのメッセージ一覧

種別	メッセージ
位置情報	バス位置情報
情報配信	運行情報
	テロップ情報
	ニュース情報
機器管理	電源電圧要求
	電源電圧応答
機器制御	スリープ指示
	スリープ復帰



図-3 バス車載器

a) 通信プロトコル

無線センサネットワークを構築する通信プロトコルには、ZigBee や JenNet, 6LoWPAN (IPv6 over Low power Wireless Personal Area Networks)^{13),14)}, WirelessHART¹⁵⁾ など、用途に応じて様々存在する。今回、筆者らは、Skyley Networks 社が開発した DECENTRA II¹⁶⁾を採用した。DECENTRA II は、ZigBee と比較してコードサイズがおよそ半分の 50KB 程度で、必要な RAM サイズが最小 4KB と、きわめて少ないリソースで高度なセンサネットワークを構築できる特徴がある。また、パケットを中継する際に必要な経路表のサイズが、通信端末数によらず一定となるため、ネットワークの規模を容易に拡大することが可能である。

バスロケーションシステムで交換される情報は、DECENTRA II の上で定義したメッセージフォーマットに基づいて交換される。表-2 に定義したメッセージの一覧を示す。なお、これらのメッセージはバスロケーションシステムだけではなく、あらかじめ他の用途にも応用できる拡張性を持たせており、汎用的なパケットフォーマットとした。そのため、無線センサネットワーク上で別の情報サービスを提供する場合は、メッセージの種類を表すコードと、その内容を新たに定義するだけでよい。

b) バス車載器

図-3 に開発したバス車載器を示す。車載器は Linux マイコンボード BeagleBoard-xM²⁾ を搭載しており、GPS モジュール³⁾、タッチパネルディスプレイ⁴⁾、および無線通信モジュールから構成されており、それぞれシリアル接続によりデータを入出力する。

車載器の起動時に、バスの運転手にタッチパネルからバス系統番号を選択してもらい、その情報をマイコンボードへ通知する。マイコンボードは GPS モジュー

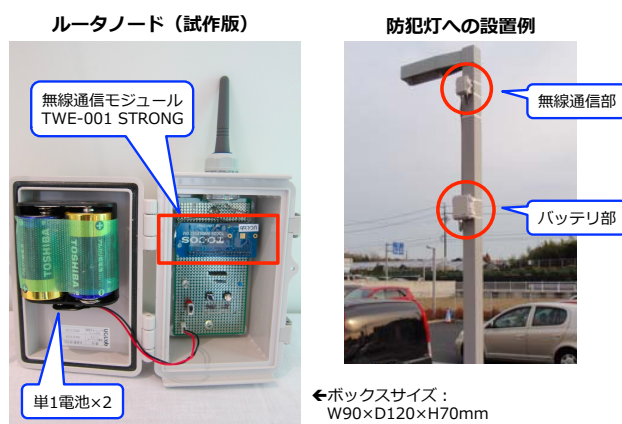


図-4 ルータノード

ルから位置情報を取得し、GPS の時刻、位置情報、測位状態、捕捉衛星数と、選択された系統番号を記載した位置情報パケットを生成する。位置情報パケットは、無線通信モジュールを通じてコンセントレータへ定期的に送信される。

c) ルータノード

図-4 にルータノードを示す。ルータノードは無線通信モジュールと乾電池からなる簡素な構成となっており、防水・防塵ボックス内に納められる。バス車載器から送信された位置情報パケットを受信すると、ルータノードは経路表を検索して、コンセントレータまたは近隣ルータノードへ中継転送する。また、定期的に乾電池の電源電圧情報をコンセントレータへ送信する。

実際のフィールドに設置する場合、アンテナを高い位置に設置することにより、周辺の樹木や走行車両などの影響を受けにくくなり、電波到達性が高まる。ただし、バッテリー交換やルータノードのプログラム修正などのメンテナンス性を確保するため、バッテリー部分を分離して低めに設置した。

²⁾ <http://beagleboard.org/Products/BeagleBoard-xM>

³⁾ CanMore Electronics 社製の GT-730FL-S を使用。
<http://www.canmore.com.tw/>

⁴⁾ Seedsware 社製の IS701-3-001 を使用。<http://infososa.jp/>

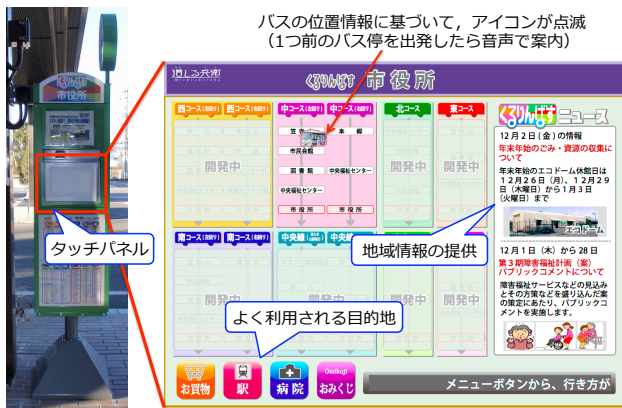


図-5 バス停でのバス位置情報の表示

d) バス停

図-5 に情報提供が可能なバス停を示す．このバス停は、タッチパネルディスプレイと無線通信モジュールを搭載しており、センターから通知された運行情報を表示する．バスがどのバス停間を走行しているかを確認でき、1つ前のバス停を出発すると、音声によりまもなく到着することを案内する．バス利用者がよく訪れる場所・目的地のアイコンをタッチすると、その場所に向かうために乗車するバスと、到着・出発時間を確認することができる．また、バスの運行情報だけでなく、行政から配信された地域情報などを表示することも可能であり、情報発信ポイントとして活用できる．

e) 管理端末（サーバ）

センターに設置される管理端末はコンセントレータとシリアル接続しており、コンセントレータが受信した位置情報パケットや電源電圧パケットなどを読み込み、ログとして保存して運行情報を生成するために蓄積する．また、管理ソフトから各バス停へ各種情報を配信したり、ルータノードを設定するためのパラメータを送信したりすることができる．

4. フィールド検証

提案システムの動作検証を行うために、愛知県日進市のコミュニティバス「くるりんバス」⁵の1路線（中コース）の一部エリアで実証実験を行った．

(1) 無線センサネットワークの構築

無線センサネットワークでは、複数のルータノードを中継して情報が伝送される．ここで、バス車載器とコンセントレータ間のパケット到達率 P は、ホップ数を n 、 i ホップ目のリンクにおけるパケット到達率を P_i



図-6 センサボックスの設置位置とネットワークポロジ

すると、式 (1) で表される．

$$P = \prod_{i=1}^n P_i \quad (1)$$

すなわち、ホップ数が増加したり、あるリンクにおけるパケット到達率が低いと、パケットロス率が高くなり、コンセントレータに情報が到達しない可能性がある．

そこで、フィールドに無線センサネットワークを構築するために、まず、日進市が管理する防犯灯や道路案内柱など、ルータノードを設置可能な地点を調査し、その地点間のパケット到達率を計測した．図-6 にセンサボックスの設置位置と、無線センサネットワークのトポロジを示す．地点 A の市役所に管理端末とコンセントレータ、バス停を設置し、周辺 800 m 四方のエリアにルータノードを 11 台設置した．各地点間で 1 分間に 19,800 個のパケットを送信し、その応答パケット数から各無線リンクにおけるパケット到達率を算出した．

表-3 に算出結果を示す．まず、パケットの応答がない場合にリトライをしない場合で測定した結果、見通が悪い区間 (AB, HI) や距離が離れている区間 (DG, GH)⁶ はパケット到達率が低く、例えば、バスが笠寺山 (地点 L) を走行しており、このときに位置情報パケットをコンセントレータへ送信した場合⁷、パケット到達率は 10% 程度とほとんど情報を伝送できないことがわ

⁶ 地点 G は交差点付近のバス停であり、ルータノードの設置高が低く、また GH 間は上り坂となっているため、通過する車両の影響を強く受けていると考えられる．

⁷ パケット転送経路が L→K→H→G→D→C→B→A の場合．

⁵ <http://www.city.nisshin.lg.jp/shisetsu/bus/>

表-3 各無線リンクの packets 到達率

無線リンク	パケット到達率 (%)	
	リトライなし	リトライあり
AB	59.0	93.3
BC	80.4	98.5
CD	94.3	99.9
CF	97.3	100.0
DE	80.8	99.4
DG	63.9	93.6
GH	48.0	84.3
HI	55.4	94.5
HK	81.6	99.8
IJ	92.8	99.2
KL	74.0	91.4

かった．そこで，応答パケットが無い場合にパケットを再度送信するリトライ処理を行った場合，各リンクのパケット到達率は安定して動作する 90%以上を実現できた．しかし，地点 L のバスから位置情報パケットを送信した場合，コンセントレータが受信する確率はそれでも 66%であり，改善が必要である．

そこで，コンセントレータを設置している市役所周辺のパケットロスを防ぐために，図-7のようにルータデバイスを増設した．その結果，図-7の市役所エリアにおける各無線リンクのパケット到達率を 99.9%にまで改善できた．また，市民会館エリアについても，各無線リンクのパケット到達率を 99.9~100%に改善できた．図-6の DG 区間を改善するために，地点 G の設置場所を道路案内標識柱の高い位置へ移設した．これにより，DG 間のパケット到達率を改善し，かつ GH 間の接続性も維持した．なお，GH 間にはルータノードが設置可能な既設の街路灯などが存在しないため，今回の検証実験では，別途，地点 N と地点 Q を追加して，市役所エリアと市民会館エリアを 2 つの経路で接続するよう，ネットワークの冗長性を持たせた．

(2) バスロケーションシステムの動作検証

図-7に示した無線センサネットワークを利用して，バスの位置情報を収集する検証実験を行った．中コースを走行するコミュニティバスにバス車載器を取り付け，位置情報パケットを 5 秒間隔でコンセントレータへ送信した．図-8に管理端末が収集したバスの位置情報を地図上にプロットした結果を示す．コミュニティバスが市役所エリアおよび北部の運行コースを走行している際のデータはよく収集できており，パケットロスはあるものの，バスの位置を正しく捉えていた．一方，



図-7 ルータノード追加後のセンサネットワークポロジ

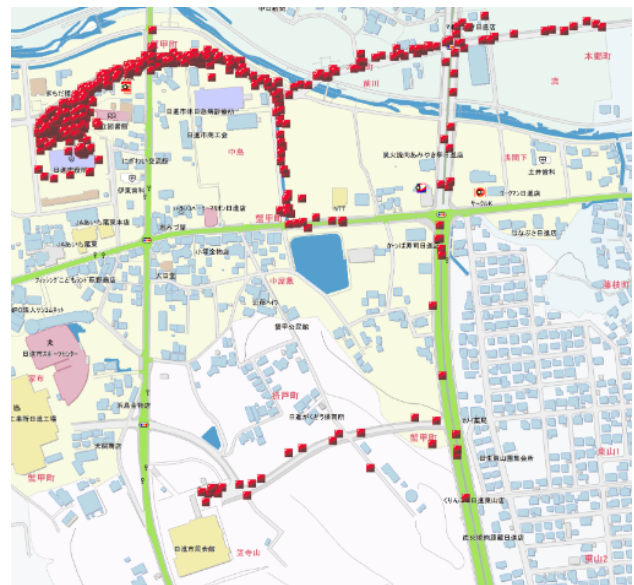


図-8 バスの位置情報収集結果

市民会館エリアの位置情報はパケットロスが非常に多いことが確認できる．ただし，管理端末が位置情報パケットを 1 つでも収集できれば，バス停に対して運行位置を送信できる．実際に，バスが市民会館エリアを走行すると，市役所前に設置したバス停のディスプレイにバスの現在地が表示されることを確認した．

(3) データ分析結果

動作検証の初期段階では、位置情報パケットが意図したとおり収集することができなかった。原因を究明するために、動作検証時に収集した位置情報パケットや、無線パケットをキャプチャしたデータなどログを解析したところ、ネットワーク特有の機能によりパケットが効率よくマルチホップ通信できていなかったことがわかった。

バス車載器は、通常、ユニキャストにより位置情報パケットをコンセントレータへ送信する。このとき、バス車載器の無線通信モジュールは自身の経路表を検索し、コンセントレータまでの経路を選択する。ただし、バス車載器が初めてパケットを送信する場合は経路表を生成する必要があり、その間は位置情報パケットは送信できない。さらに、バスは移動するため、最寄りのルータノードが時間に応じて変化するが、その度に経路表を再生成する必要がある。

また、バス車載器に複数のルータノードが存在する場合、既に確立した無線リンクを維持し続けていることを確認した。例えば、バスが時刻 t のとき地点 H を走行しており、このときバス車載器はルータノード H と接続して、コンセントレータ宛のパケットをルータノード G へ送信している。時刻 $t + \alpha$ のとき、バスは G と H との距離が $d_{G-BUS} < d_{BUS-H}$ となる地点を走行しているとすると、理論的に RSSI は離反距離の 2 乗に反比例して減衰するため、 $RSSI_{G-BUS} > RSSI_{BUS-H}$ となる。そのため、バス車載器は H に送信するより、 G へ送信する方が最適であることは明らかである。しかし、バス車載器は H とのリンクを維持し続けるため、コンセントレータ宛のパケットは $H \rightarrow G$ のように冗長な経路で転送されてしまう。すなわち、バスとルータノード R 間のパケット転送率を P_{BUS-R} とすると、 $P_{G-BUS} > P_{BUS-H} > P_{G-H}$ であるにも関わらず、バスが送信した位置情報パケットが G に到達する確率は、 $P_{BUS-H} \times P_{G-H}$ となり、大幅に低下してしまう。

そこで、バス車載器の通信モジュールはユニキャストではなく、ブロードキャストにより位置情報パケットを送信するよう改良した。これにより、経路表を生成する処理を省略して、即座に位置情報パケットを近隣のルータノードに届けることができる。また、経路表を生成する制御パケットの交換と、それに要する時間も削減できる。ルータノードは固定設置されているため、一度、経路表が生成されると、それを使い続ける。ルータノードは位置情報パケットを受信すると、自身の経路表に基づいてコンセントレータへユニキャストで転送する。なお、位置情報パケットはブロードキャストで送信されるため、複数のルータノードがユニキャストにより転送することになるが、既に転送済みのルー

タノードに同一の位置情報パケットが転送されてきた場合は破棄するようになっている。図-8 はこれらの改良を行った後の結果である。

5. 災害時への適用

提案しているバスロケーションシステムを地域に構築することにより、町中に無線センサネットワーク環境が整備される。3.(1) で示したシステムアーキテクチャに基づいているため、センサネットワークはバスの位置情報以外の情報を伝達する「地域情報ネットワーク基盤」として位置づけられる。本章では、この情報ネットワーク基盤を災害時で活用する際に考え得る利点と課題について考察する。

(1) 拡張性・耐障害性

センサネットワークを構築する際、電源や通信ケーブルが不要で、ルータノードを設置するだけでオンデマンドにネットワークを構築できる。ルータノード自体が安価であるため、容易にネットワークを拡張することができる。また、省電力でバッテリー駆動が可能のため、停電などの電源遮断時にも稼働することができる。

東日本大震災では、携帯電話通信網に接続するための基地局のうち、約 29,000 局が停止し、パケット通信も 30% の規制が実施された¹⁷⁾。無線センサネットワークであれば、ルータノードが故障して停止しても、すぐに設置してネットワークを維持・回復することができる。さらに、ネットワークトポロジをメッシュ状に形成することができるため、一部のリンクが切断されても、別の迂回経路を通じて伝送することができる。そのため、耐障害性に優れ、拡張性にも富んでいることから、災害時におけるインフラとして十分に活用することができる。

(2) 汎用性・操作性

従来のバスロケーションシステムは、バスの利用に限定した設計となっているため、災害時情報システムとして活用することができない。それに対し、提案システムではネットワークとサービスが分離独立して定義されているため、災害時に提供したい情報、あるいは収集したい情報をサービスとして開発すれば、町中に張り巡らせたセンサネットワークにより、瞬時に展開することが可能である。

このような汎用性を持たせたことにより、平時と災害時に同じネットワークで運用できるため、いざという時に普段と同じ操作でシステムを利用することができる。バス停においては、平時はバスの運行情報や地域情報を表示しているが、災害時は情報スタンドとして

活用できる。例えば避難所に避難している住民や、救援物資情報などを表示したり、住民が身につけているセンサデバイスあるいはセンサタグの情報をバス停が取得し、それを市役所へ蓄積するなどの利用方法も考えられる。

また、バス停はタッチパネル式のディスプレイを搭載していることから、昨今のスマートフォンやタブレットでよく利用される拡大・縮小やスライド・スクロール機能を持たせれば、より多くの情報を提供できたり、情報を拡大して確認したりすることができる。これらの機能は、小さい字が見にくい高齢者に対して有効である。

(3) 解決すべき課題

災害時における情報配信、特に安否に関わる情報の収集を行う場合には、パケット欠損の有無が信頼性を示す重要な要因となる。そこで、センサネットワークを広域かつ長期間安定して稼働させる必要がある。これまでのフィールド検証では、800 m四方の限られたエリアでしか確認が取れていない。今回のフィールド検証では、市が管理する防犯灯や道路案内標識柱などにしか設置できないという前提があるため、ネットワークを構築するための最適な配置になっていないことが一因でもあるが、この狭いエリア内に 20 台程度のセンサデバイスを設置する必要がある。

これを解決するためには、920MHz 帯を使用する機器に変更することが考えられる。一般的に、周波数が低くなると長距離を伝搬し、回折性が向上する。近年、HEMS (Home Energy Management System) などのエネルギー管理システムが注目されているが、920MHz 帯はスマートメータ等のセンサネットワークでの利用が想定されている。920MHz 帯の方が 2.4GHz 帯と比較して、見通し環境で約 3 倍の通信距離が得られること、また建物で遮蔽された見通し外環境で優れた回折特性を有することが報告されている¹⁸⁾。920MHz 帯の無線通信モジュールを採用することにより、ルータノードの設置台数を削減できると考えられる。

今回のバスロケーションシステムの開発では、ルータノードの電源として乾電池を利用した。しかし、災害時に停電しても長期間安定してネットワークを稼働し続けるためには、二次電池 (バッテリー) と太陽光などのエネルギー・ハーベスティング技術の導入が必須である。これは平時においてもバッテリー交換に関わる維持管理コストを抑えることに繋がるため、現在、小型の太陽光発電モジュールを試作中である。

6. まとめ

本稿では、無線センサネットワークを用いて動作する新しいバスロケーションシステムを開発した。フィールド検証を行った結果、パケット損失が発生するものの、バスロケーションシステムとして動作することを確認した。また、構築した無線センサネットワークの活用方法として、災害時通信システムへの適用と課題について考察した。

今後は無線センサネットワークの広域化、および太陽光発電による連続稼働期間の長期化を目標に、仕様を改良しつつ、フィールド検証を進める。また、本稿のセンサーネットワークが、市民に新たな外出・交流機会を提供し地域の活性化に資する「まちづくりの情報インフラ」へと発展させることを視野に入れた研究を筆者らは目指している。

謝辞：本研究は、JSPS 学術研究助成基金助成金 (若手研究 (B) 24760422) の助成を受けたものである。動作検証実験を実施するに当たり、フィールドをご提供頂きました日進市役所生活安全課の関係者、並びに通信プロトコルに関わる助言を頂きました Skyley Networks の梅田氏に感謝する。

参考文献

- 1) 牧野浩志, 小川文章, 高木繁, 新枝秀樹: インテリジェントバスロケーションシステムの開発地方都市におけるバスの復権に向けて, 交通工学研究発表会論文報告集, Vol. 20, pp. 69-72, 2000.
- 2) 淵一馬, 池田勝洋, 石田梢, 菊池純男, 駒谷昇一, 北川博之, 田中二郎: 幼稚園向けバスロケーションシステムの開発, 情報処理学会全国大会講演論文集, pp. 3-251-3-252, 2010.
- 3) Farooq, U., Haq, T., Amar, M., Asad, M. and Iqbal, A.: GPS-GSM Integration for Enhancing Public Transportation Management Services, *Proc. IEEE ICCEA 2010*, Vol. 2, pp. 142-147, 2010.
- 4) 大谷達彦: バスロケーションシステムの運用に関する検討, JICE レポート, Vol. 9, pp. 33-38, 2009.
- 5) 岡村健志, 永原三博, 谷口綾子, 岩佐隆, 松本修一, 熊谷靖彦: 地方型バス案内システム「chi-bus」の提案と検証, 土木計画学研究・講演集, Vol. 39, 2009.
- 6) 岡村健志, 永原三博, 菊池豊, 熊谷靖彦, 中川敏正: 地方部でのバス案内システム「chi-bus」の適用, 土木計画学研究・講演集, Vol. 41, 2010.
- 7) ZigBee Alliance. <http://www.zigbee.org/>.
- 8) Zhian, L. and Han, H.: A Bus Management System Based on ZigBee and GSM/GPRS, *Proc. IEEE IC-CASM 2010*, pp. V7-210-V7-213, 2010.
- 9) R, I., Yukimatsu, K. and Ichikawa, T.: The Flexible Bus Systems Using Zigbee as a Communication Medium, *Proc. IFIP International Conference on NTMS 2011*, pp. 1-5, 2011.
- 10) 山本紘資, 新村正明, 國宗永佳, 鈴木彦文, 不破泰: 無線 Ad-Hoc ネットワークを用いたバスロケーションシステムの開発, 電子情報通信学会総合大会講演論文集, pp. 71-72, 2011.

- 11) IEEE 802.15 WPAN Task Group 4 (TG4).
<http://www.ieee802.org/15/pub/TG4.html>.
- 12) 清水芳孝, 藤田隆史: 広域センサーネットワーク(WASN)システムに関するITU-Rでの標準化活動, 電子情報通信学会技術報告, SR2011-128, Vol. 111, No. 452, pp. 169-173, 2012.
- 13) Mulligan, G.: The 6LoWPAN Architecture, *Proc. 4th Workshop on Wmbedded Networked Sensors (EmNets '07)*, pp. 78-82, 2007.
- 14) Montenegro, G., Kushalnagar, N., Hui, J. and Culler, D.: Transmission of IPv6 Packets over IEEE 802.15.4 Networks, RFC 4944, IETF, 2007.
- 15) HART Communication Protocol and Foundation.
<http://www.hartcomm.org/>.
- 16) Skyley Networks / DECENTRA II.
<http://www.skyley.com/products/decentra2.html>.
- 17) 総務省東海総合通信局: 災害時の通信確保に向けた最近の取り組み, 2011.
- 18) 福井潔, 福永茂: センサネットワーク向け900MHz帯の標準化動向, OKIテクニカルレビュー, 第218号, Vol. 78, No. 1, pp. 104-107, 2011.

(平成 25 年 5 月 7 日 受付)

Development of Novel Bus Location System Using Sensor Network and its Applicability to Information System under Disaster Situation

Hidekazu SUZUKI, Motonari HATA, Yukimasa MATSUMOTO, Shoji OMORI and Motohiro SAWADA