

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 11 日現在

機関番号：33919

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760422

研究課題名(和文) 広域無線センサネットワークを利用したバスロケーションシステムの開発と実証実験

研究課題名(英文) Development of a novel bus location system using wide-area wireless sensor networks and its demonstration experiments

研究代表者

鈴木 秀和 (Suzuki, Hidekazu)

名城大学・理工学部・助教

研究者番号：50583803

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円、(間接経費) 990,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、広域無線センサネットワークを活用することにより、低コストで継続運用が可能な新しいバスロケーションシステムを開発した。このシステムは、無線センサネットワークにおけるマルチホップ通信により、通信費をかけることなくバス位置情報の収集および運行情報を配信する。愛知県日進市が運用する「くるりんバス」の運行エリアにおいて、試作システムの実証実験を行った。その結果、走行車両や木々などの影響によりデータ欠損が生じるものの、バスが走行している各区間をほぼ正確にバス停のディスプレイに表示することが可能であることを確認した。

研究成果の概要(英文)：This research developed a novel bus location system capable of continuously achieving operation at low running costs by using wide-area wireless sensor networks. The system can collect bus location information and deliver bus operation information without communication costs by multi-hop communication in wireless sensor networks. Demonstration experiments were held in an operation area of "Kururin Bus" that is operated by Nisshin City, Aichi Prefecture. As a result, the system was confirmed that respective sections on which a bus was traveling were almost accurately indicated on the display panel of bus stop even when data occurred from influences of traveling vehicles and trees.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木計画学・交通工学

キーワード：バスロケーションシステム センサネットワーク 位置情報 公共交通

1・研究開始当初の背景

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。従来のバスロケーションシステムの構成は、GPSでバスの位置情報を取得し、セルラー網を利用してロケーションサーバに登録する。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セルラー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。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。

2. 研究の目的

本研究の目的は、バス路線沿線に低消費電力な無線センサデバイスを配置して広域無線センサネットワークを構築することにより、管理・運用コストを抑制し、継続運用が可能なバスロケーションシステムを実現することである。具体的な研究項目は次のものである。

- (1) 無線センサネットワークによるバス位置情報収集システムの開発
- (2) 広域無線センサネットワークの構築とバスロケーションシステムの実証実験

地方自治体や中小バス事業者が運営するバス路線で実証実験を行い、システムの有効性を確認する。

3. 研究の方法

(1) バスロケーションシステムの開発

図1に示すように、バス、バス停、バス路線沿線などに無線センサデバイスを配置し、広域の無線センサネットワークを構築する。バスはGPSで取得した位置情報を近隣の無線センサデバイスへ送信し、マルチホップ通信によりバスセンターへ配送する。バスの位置

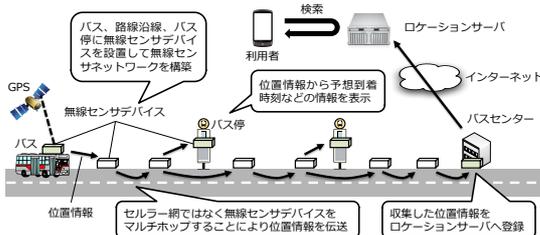


図1 無線センサネットワークを活用したバスロケーションシステム

情報を中継するための通信プロトコルの仕様を策定し、これに基づいてバスロケーションシステムを開発する。

(2) 実地調査および実証実験計画の立案

コミュニティバスを運営するバス事業者や地方自治体の担当者と事前打合せを実施する。実証実験の実施場所を決定した後、事前に無線センサデバイスの設置場所や電波状況、通信距離などを把握するための実地調査を行う。実地調査の結果に基づき、センサデバイスの設置場所や実証実験の計画立案を行う。

(3) 実証実験環境の整備

実証実験計画に基づいて関係機関との打合せを行い、センサデバイスおよびバスセンター内にPCを設置して収集した位置情報をロケーションサーバへ転送できる環境を整備する。なお、沿線に設置するルータ型無線センサデバイスは1台が故障などにより稼働しなくても、別のルータを経由して通信を中継できるように冗長性を持たせたメッシュ型トポロジとなるように配置する(図2)。

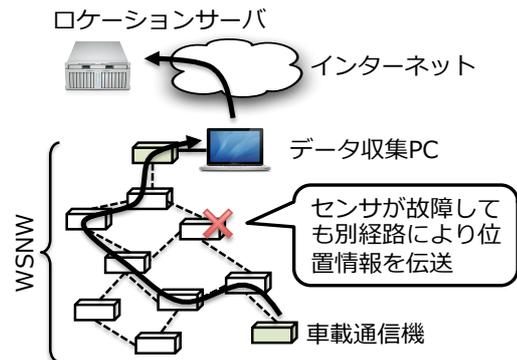


図2 ネットワーク冗長性の検証

(4) 実証実験および評価

試験動作による確認を行った後、車載通信機をバスに設置して半年から1年の期間に渡って実証実験を実施する。安定運用が確認できた後、ホームページや行政・マスメディアを通じて、バス利用者へシステム公開を告知する。最後にシステムの評価を行い、研究成果を学会や学術論文などへ発表する。

(5) 開発システムの改良

関係機関および連携研究者との議論および実証実験を通じて得られた知見や明らかとなった課題から、実環境でバスロケーションシステムを運用させるために必要な機能の検討および実装を行う。

4. 研究成果

(1) 通信プロトコルの仕様策定

無線センサネットワークを構築するために、省電力で動作可能なIEEE802.15.4をMAC層プロトコルとして採用し、ネットワーク層にはSkyley Networks社のDECENTRA IIを実装した。ZigBeeなどの他のプロトコルに対して、コ

ードサイズが約半分の 50KB 程度で、必要な RAM 容量が最小 4KB と、極めて少ないリソースでセンサネットワークを構築できる。これは、性能が高くない安価なデバイスでも動作させることができ、センサノードの低コストに貢献する。

図 3 に示すように、DECENTRA II の上位層にバスロケーションシステムで送受信するデータのフレームフォーマットを定義した。Information Type と Content Type の先頭 2byte でデータの種別を判別し、バス位置情報の他、バス停における情報提供に関わるデータ配信、運行情報の配信、電源電圧情報の収集やスリープ命令などを定義した。これにより、今後のシステム拡張やバスロケーションシステム以外のメッセージ交換にも対応することができる。

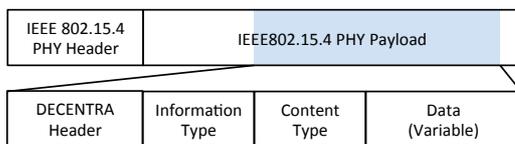


図 3 フレームフォーマット

### (2) ルータノードの省電力化

ZigBee など一般的な無線センサネットワークではルータノードは常に稼働している。そこでルータノードを一切スリープせず、5 秒間隔でバス位置情報を送信する場合、単一乾電池 2 本で計算上 80 日程度しか連続稼働しない結果となった。そこで、DECENTRA II の時刻同期処理を実装し、全ノードが 5 秒間のうち 150 ミリ秒だけ全ノードが起床して通信を行い、残りの期間はスリープする間欠通信の実装を行った。また、バスが運行していない夜間は常時スリープすることにより、理論上 310 日程度は稼働するよう設計した。これにより、バッテリー交換頻度を削減でき、運用コストの低下にも寄与する。

### (3) 各種センサノードの試作

無線センサデバイスには東京コスモス電機社の TWE-001 STRONG の無線モジュールを採用した。以下に試作した各ノードを示す。

#### ① コンセントレータ（管理端末）

バスの位置情報や運行情報を管理するセンターに設置する端末は、PC に無線モジュールを接続し、無線センサネットワークから受信したデータをデータベースに保存する。また、各ノードの強制スリープ/タイマー復帰処理やバス停への情報配信などを行う。

#### ② ルータノード（図 4）

防水・防塵ボックスに無線モジュールと乾電池を格納し、バス路線沿線にある防犯灯や電柱などに設置する。なお、実証実験の際には無線モジュール部とバッテリー部を分割し、無線モジュール部は電波到達性を高めるために高所に設置した。バッテリー部はメンテナンスの効率を高めるため、低所に設置した。

#### ③ バスノード（図 5）

バスノード（車載器）は、Linux マイコンボ



図 4 ルータノードの試作と設置例



図 5 バスノードの試作

ード BeagleBoard-xM に GPS モジュール、無線モジュールおよびタッチパネルを接続する構成とした。タッチパネルではバスの運行コースなどを選択し、バス情報と GPS で取得した位置情報を無線モジュールによりコンセントレータへ送信する。

#### ④ バス停ノード（図 6）

バス停には組込用 PC と無線モジュールおよびタッチパネルを実装した。管理端末から受信した運行情報から、バスの走行区間がわかるように表示し、また接近した場合に音声により案内を行う設計とした。また、バスの情報だけでなく、行政からの案内などを表示するエリアも設けることにより、キオスク端末として活用することを狙ったためである。なお、バス停の開発は研究協力者である株式会社メイエレクトックが担当した。



図 6 バス停ノードの試作

#### (4) 実証実験

愛知県日進市の協力の下、同行政が運行しているコミュニティバス「くるりんばす」の中コースを対象に、開発システムの動作検証及び実証実験を行った。図7に示す日進市役所周辺の約800m四方のエリア（バス運行距離は約2km）にルータノードを設置し、市役所内にコンセントレータ（管理端末）、市役所前に試作したバス停を配置した。各ノードの設置箇所は、日進市が管理している構造物の中から、事前に通信品質測定実験を行い、2点間のフレーム到達率が90%以上となる箇所とした。また、車載器は運転手の上部スペースに固定して設置した。これは関係機関と協議した結果、バス運転手に通常業務とは異なる操作をさせないことを条件としたためである。

2013年2月より実環境における動作検証およびプロトコルやシステムの改修を経て、2013年7月から2014年2月の期間、実証実験を行った。



図7 センサノードの設置箇所（愛知県日進市）

#### ① バス位置情報の収集結果とバス停における走行区間の表示精度

図8にある1便が無線センサネットワークを構築したエリアを走行した際のバス位置情報フレームを受信した結果を示す。バスの運行経路に沿ってバスの位置情報を収集してプロットできていることが確認できる。さらに詳細に分析するために、位置情報フレームの到達率を調査した。表1にフレーム到達率を示す。ルータノードを設置する際に行った事前の通信品質測定実験ではノード間の到達率は90%以上であったものの、走行中のバスが送信するフレーム到達率は、平均で37.7%とかなり低い値となった。この原因として、今回採用した無線モジュールは2.4GHz帯を利用しているため、走行中の他車両が電波を反射させている可能性が考えられる。また、通信品質測定実験は冬期に実施しており、夏期になって設置したセンサノード周辺の木々が茂ってしまい、電波が遮られてしまった可能性も考えられる。



図8 バス位置情報収集結果

表1 バス位置情報フレームの到達率

平均到達率 [%]	最大到達率 [%]	最低到達率 [%]
37.7	54.0	25.3

表2 バス走行区間の認識率

バス停区間	存在確認成功率 [%]
笠寺山ー市民会館	93.3
市民会館ー図書館	100
図書館ー中央福祉センター	76.7
中央福祉センターー市役所	96.7

ただし、バス停区間において1つでも位置情報フレームがコンセントレータに到達すれば、バスの走行位置をバス停で表示することは可能である。表2にバス走行区間の認識率を示す。フレームロスが多いものの、多くの区間ではほぼ確実に走行区間を認識できていることが確認できた。

#### ② ルータ故障による経路迂回の検証

ルータノードが故障した際に、ネットワークを動的に再構築して通信を行うことができるか検証した。図9にバスが笠寺山(A付近)を走行中に送信した位置情報フレームがどのルータノードを経由してコンセントレータまで到達したかを示す。図9左側はA→B→C→D→E→コンセントレータの経路で送信されている例である。ここで、図9右のようにルータノードCの電源をOFFにして故障した場合を再現すると、B→Cの経路が切断されることになる。この状態で笠寺山付近から位置情報フレームを送信した場合、A→B→F→G→H→I→コンセントレータのように、冗長は位置したルータノードを経由して送信されていた。DECENTRA IIにより経路表が更新され、経路が切り替わったことが確認できた。

#### ③ ルータノードのバッテリー電圧推移

図10に実証実験中(2013年10月7日～2014年1月10日)のあるルータノードのバッテリー電圧の推移を示す。なお、このルータノードは10月初旬に通信プログラムを改修して

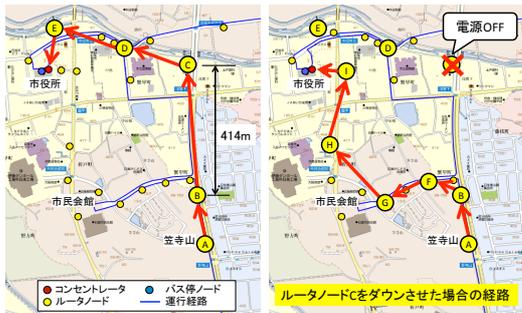


図9 迂回経路による冗長性の確認

いるが、搭載された乾電池はそのまま利用している状態である（およそ3ヶ月）。今回の試作で使用した無線モジュールは2.3V以上であれば稼働するため、この結果から6ヶ月以上動作していることが確認できた。なお、グラフが途中で途切れている部分は、停電の影響により管理端末で停止していたためである。

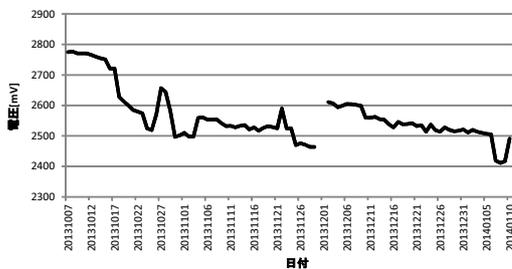


図10 ルータノードのバッテリー電圧推移

### (5) システム改良の検討

① GPS を利用しないバス走行位置推定手法  
試作した車載器ではGPSモジュールを実装して、バスの位置情報を取得している。一方、バスロケーションシステムにおいて、バスの位置を地図上にピンポイントで表示する表示方法は利用者からあまり必要とされず、バスがどの区間を走行しているかを確認できればよいということが別研究により明らかとなった。  
そこで、車載器のコストをさらに低価格化させるために、GPSモジュールを利用せずにバスの走行位置を推定する手法を検討した。図11のようにルータノードがビーコンを発するように改良し、車載器側で電波強度を測定することにより、最寄りのルータを検知する。ルータノードは固定設置され、どの区間に存在するかは既知である。そこで、ルータノードのIDと走行区間の対応関係を定義することにより、GPSを利用することなくバスの走行区間を推定することができる。

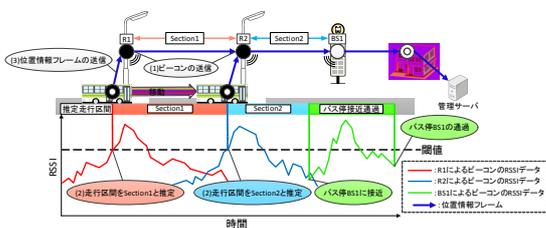


図11 電波強度に基づくバス走行区間推定手法

### ② 太陽光発電による無線センサネットワークの長期安定稼働の基礎的検証

ルータノードのスリープ処理により、長期間連続稼働できることを確認したが、それでもバッテリー交換に伴う運用コストは発生する。そこで、ルータノードの電源供給を乾電池から太陽光発電に切り替えることにより、永続的に稼働させることが可能か、発電システムを試作した。非日照補償を3日間として設計を行い、バッテリーには6,000mAhのリチウムバッテリーを使用した。大学敷地内にて試作システムの動作検証を76日間行い、電圧の推移を調査した。図12の結果より、天候の影響は全く見られず、安定して3V以上を保持していることが確認できた。

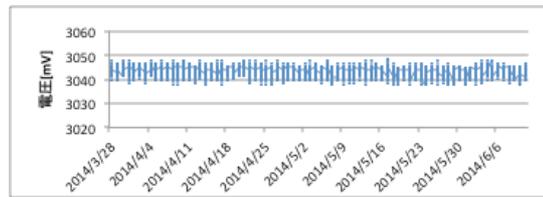


図12 ルータノードのバッテリー電圧推移

### (6) 総括

#### ① 研究目的の達成

以上の研究成果より、当初の研究目的である「無線センサネットワークによるバス位置情報収集システムの開発」および「広域無線センサネットワークの構築とバスロケーションシステムの実証実験」を達成することができた。また、開発及び検証を進めるにあたって新たに見つかったセンサノードの省電力化の課題に対して、ルータのスリープ処理および太陽光発電駆動型の検証を行い、長期間安定してシステムを稼働させる見通しを得ることができた。

#### ② 研究成果の国内外における位置づけとインパクト

無線センサネットワークでバスの位置情報を収集し、バスの運行情報を配信するバスロケーションシステムの構築及び実証実験は、研究代表者らが調査した限り世界初の成果である。従来システムが広く普及しない原因の一つである運用コストの課題を解決したものであり、地方自治体が運用するコミュニティバスへの導入が期待させる。

#### ③ 今後の展望

無線モジュールを回折性の高い920MHz帯のものに変更することにより、ルータノードの設置台数を減らすことを検討する。また、あらゆるモノが通信システムに繋がり、エネルギーを効率よく使う都市環境として、スマートシティが注目されている。スマートシティを構築するために、街の中に無線センサネットワークを構築することが想定されており、本研究との親和性が極めて高い。今後はバスロケーションシステムを一つのアプリケーションとして捉え、スマートシティ環境下での実現を目指す。

## 5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計10件)

- ① 加藤謙作、畠基成、足達元、鈴木秀和、松本幸正、無線センサネットワークを用いたバス位置推定手法の提案、情報処理学会第76回全国大会、2014年3月13日、東京
- ② 東風平勝太、林口正樹、北瀬和之、瀬野尾徹、松本幸正、鈴木秀和、通信コスト不要なバスロケーションシステム、第58回名鉄技術研究発表会、2013年11月20日、愛知
- ③ 足達元、畠基成、鈴木秀和、旭健作、松本幸正、渡邊晃、距離減衰モデルを用いたバス接近通過表示システムにおける判定精度向上に関する検討、情報処理学会第68回MBL研究発表会、2013年11月14日、広島
- ④ Motonari Hata, Hajime Adachi, Hidekazu Suzuki, Kazuyuki Kitase, Yukimasa Matsumoto and Akira Watanabe, Proposal for Novel Bus Location System Using Wireless Sensor Network, 20th ITS World Congress Tokyo 2013, 2013年10月15日、東京
- ⑤ 畠基成、鈴木秀和、足達元、北瀬和之、大森昭嗣、松本幸正、渡邊晃、無線センサ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、マルチメディア、分散、協調とモバイル (DICOMO2013) シンポジウム、2013年7月11日、北海道
- ⑥ 鈴木秀和、畠基成、松本幸正、大森昭嗣、澤田基弘、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、第47回土木計画学研究発表会(春大会)、2013年6月1日、広島
- ⑦ 足達元、畠基成、鈴木秀和、松本幸正、距離減衰モデルを用いたバス通過判定手法の検証、情報処理学会第75回全国大会、2013年3月7日、宮城
- ⑧ 畠基成、鈴木秀和、旭健作、松本幸正、渡邊晃、バスロケーションシステムにおけるセンサネットワーク管理手法の検討、情報処理学会第63回MBL研究発表会、2012年8月31日、東京

〔産業財産権〕

○出願状況(計2件)

名称：まちづくりセンサネットワークシステム

発明者：松本 幸正、鈴木 秀和、澤田 基弘、北瀬 和之

権利者：株式会社メイエレクト、学校法人名城大学、株式会社日建設計シビル

種類：特許

番号：特許出願 2012-256018 号

出願年月日：24年11月22日

国内外の別：国内

名称：バスロケーションシステム

発明者：北瀬 和之、松本 幸正、鈴木 秀和  
権利者：株式会社メイエレクト、学校法人名城大学

種類：特許

番号：特許出願 2012-140402 号

出願年月日：24年6月22日

国内外の別：国内

〔その他〕

報道関連情報

- ① バスロケーションシステムの紹介、地域ジャーナル、ひまわりネットワーク株式会社、2014年1月24日放送
- ② 夕刊ゴジラじ、NHK名古屋放送局、NHKラジオ第一、2014年12月13日放送
- ③ 次世代バスロケーション、あいち ITS ワールド 2013 出展企業紹介、中部経済新聞、2013年11月29日発刊
- ④ バス情報案内システム「簡易無線で費用抑制」、中部経済新聞、2013年7月31日発刊
- ⑤ バスの位置をリアルタイムで把握、クルマ未来博 2012 出展企業紹介、中部経済新聞、2012年11月10日発刊

アウトリーチ活動情報

- ① あいち ITS ワールド 2013 展示会出展、2013年12月12日～15日、愛知
- ② 名城大学オープンキャンパス 2013 デモ展示、2013年8月3日～4日、愛知
- ③ クルマ未来博 2012 展示会出展、2012年11月16日～18日、愛知
- ④ 名城大学オープンキャンパス 2012 デモ展示、2012年8月4日～5日、愛知

ホームページ情報

[http://www.ucl.meijo-u.ac.jp/project/bus\\_location/](http://www.ucl.meijo-u.ac.jp/project/bus_location/)

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

鈴木 秀和 (SUZUKI, Hidekazu)

名城大学・理工学部・助教

研究者番号：50583803

(2)連携研究者

松本 幸正 (MATSUMOTO, Yukimasa)

名城大学・理工学部・教授

研究者番号：30239123

(3)研究協力者

北瀬 和之 (KITASE, Kazuyuki)

株式会社メイエレクト・技術開発部

大森 昭嗣 (OMORI, Shoji)

株式会社メイエレクト・技術開発部

畠 基成 (HATA Motonari)

名城大学・大学院理工学研究科・大学院生