

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

畠 基成¹ 鈴木 秀和¹ 足達 元¹ 北瀬 和之² 大森 昭嗣² 松本 幸正¹ 渡邊 晃¹

概要：近年、バスの利便性向上のためのバスロケーションシステムに注目が集まっている。多くの既存システムではバス位置情報や運行情報の送信に携帯電話網を利用しているため、多くの通信コストがかかる。そのため、コミュニティバスにおいてはシステムの継続運用が困難である。そこで筆者らは、通信コストが不要な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を提案している。提案システムでは、バス、バス停、バス路線の道沿いに IEEE802.15.4 準拠のセンサノードを設置し、無線センサネットワークを構築する。本稿では、提案システムの試作開発の内容と、実際のバス路線を用いた検証実験の結果について報告する。検証実験の結果、実環境に広域無線センサネットワークを構築することにより、携帯電話網を使用せずにバス位置情報の収集、およびバス停への接近情報の配信が可能であることを実証した。

A Development of Bus Location System Using Wireless Sensor Network

MOTONARI HATA¹ HIDEKAZU SUZUKI¹ HAJIME ADACHI¹ KAZUYUKI KITASE² SHOJI OMORI²
YUKIMASA MATSUMOTO¹ AKIRA WATANABE¹

1. はじめに

近年、バス利用者数が減少傾向にあり、路線バスが次々と廃止されてきた。そのため、鉄道などを含む公共交通の空白地域が拡大してきた。一方、バスは子どもや高齢者など、車が運転できない人々の重要な移動手段である。これらを背景に、コミュニティバスを運営する地方自治体が増加している [1]。しかし、バスは天候や道路状況により定時運行が困難であり、利用者減少の理由の 1 つとなっている。そのため、バス利用者の利便性向上のために、バスロケーションシステムを導入する民間バス事業者や地方自治体が増えている。現在のバスロケーションシステムではバスの位置情報の収集や運行情報の配信に携帯電話網を使用している。そのため、通信コストが発生し、財政が厳しい地方自治体では継続運用ができない事例が発生してい

る [2]。従って、低運用コストで継続運用可能なバスロケーションシステムが必要となる。携帯電話網を使用しないバスロケーションシステムの 1 つに、あしあとランプがある [3]。あしあとランプでは、バスに車載器、バス停に表示器を設置する。バスが通過する際に車載器から表示器に向け信号を発信し、信号を受信した表示器は一定時間、バスの通過を表示する。このシステムでは低運用コストでバス通過の判断ができる一方で、バスの現在位置を収集しないため、遠方のバス停やインターネットを通じたバスの運行情報の配信ができない。

そこで筆者らは、通信コストが不要、かつ双方向通信が可能な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を提案している [4]。バス運行エリアおよびバスに小型の無線センサノードを設置し、メッシュ型の無線センサネットワークを構築することにより、携帯電話網を利用せずにバス位置情報の収集が可能となる。収集した位置情報を用いて、遠方のバス停やインターネットを通じて、バス運行情報の提供が可能である。

本稿では、提案システムの概要と試作開発したシステム

¹ 名城大学大学院理工学研究科
Graduate School of Science and Technology, Meijo University, Nagoya, Aichi 468-8502, Japan

² 株式会社メイエレクトロニクス
MeiElec Co.,Ltd. Nagoya, Aichi 456-0031, Japan

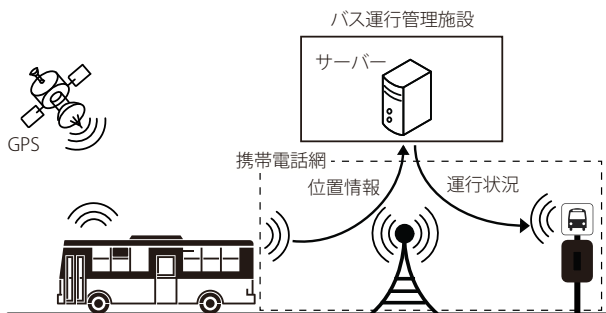


図 1 既存のバスロケーションシステムの概要
Fig. 1 Overview of existing bus location system.

の内容について紹介し、実際のコミュニティバス路線の一部で実施した検証実験の結果について報告する。以後、2章で既存システムとその課題について示す。3章で提案システムの概要、および4章で試作システムの内容について示す。5章で検証実験における動作検証について示し、6章でまとめる。

2. 既存システム

2.1 GPSと携帯電話網を利用したバスロケーションシステム

図 1 に、GPS と携帯電話網を利用したバスロケーションシステムの概要図を示す [5], [6]。このシステムは、GPS を利用してバスの現在位置を取得し、携帯電話網や MCA 無線を用いてバス運行管理施設へ送信する。バス運行管理施設にはバスロケーションサーバが設置してあり、受信したバス位置情報から、バス停やインターネットを通じてバス利用者に対しバス運行情報を配信する。このようなシステムは東京都交通局 [7]、伊予鉄道株式会社 [8]、三重交通株式会社 [9] などで導入されている。

このシステムでは、バス運行管理施設からバス停へ情報を配信する際にも携帯電話網を利用するため、バス停にも通信機器を設置する必要がある。全てのバス停に通信機器を設置した場合、通信コストは膨大となる。そのため、経営状況が厳しい民間バス事業者やコミュニティバスを運営する地方自治体では、公的補助金等を利用してシステムの導入は可能であったとしても、継続的な運用は財政的に厳しくなる。

2.2 あしあとランプ

図 2 に、あしあとランプの概要を示す [3]。あしあとランプは、バスに車載器、バス停に表示器を設置する。車載器は常に電波を送出しており、その電波を受信した表示器は 10 分間、バスの通過を表示する。あしあとランプでは携帯電話網等の通信網は使用しておらず、315MHz 帯の特定小電力無線を利用してバスの通過を検出しているため、通信コストは発生しない。また、表示器は単 1 乾電池 2 本で約 1 年間動作することから、非常に低運用コストである。

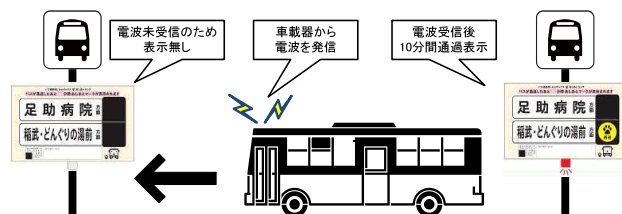


図 2 あしあとランプの概要
Fig. 2 Overview of Ashiato-lamp.

あしあとランプは、愛知県東海市「らんらんバス」[10]、青森県三沢市「みーばす」[11]、岐阜県美濃加茂市「あい愛バス」[12] など、地方自治体が運営するコミュニティバスを中心に導入されている。

あしあとランプでは、バスの位置情報を収集しないため、バス利用者がバスの通過、遅延を知りたい場合には直接バス停を見に行く必要がある。また、遠方のバス停で待つ利用者は、バスが遅延しているかどうか判断できない。さらに、渋滞などによりバスが 10 分以上遅延した場合、本当にバスが通過したかどうかを利用者が判断するのは困難である。

3. 提案システム

3.1 システム概要

通信コストをかけずに、バスの位置情報を収集するシステムを提案する。図 3 に、提案システムの概要を示す。提案システムでは無線センサノードを利用し、マルチホップ通信可能な無線センサネットワークを構築する。バス運行管理施設に設置するセンサノード（コンセントレータ）は、無線センサネットワークにおいて情報を収集する役割を持つ。コンセントレータとサーバは接続しており、バスの位置情報を蓄積する。蓄積した情報から運行情報を生成し、コンセントレータからバス停へ送信する。バスに設置するセンサノード（バスノード）は、GPS で取得した位置情報をコンセントレータへ送信する。電柱や街路灯などに設置するセンサノード（ルータノード）は、通信の中継を行う。バス停に設置するセンサノード（バス停ノード）は、コンセントレータから配信された情報を受信し、バス停のディスプレイに表示する。コンセントレータから配信される情報には、バスの運行情報や地域の行事案内、行政からのお知らせなどが含まれている。無線センサネットワークは通信キャリアに頼らない通信網であるため、通信コストは発生しない。また、無線センサネットワークはコンセントレータと各ノード間で双方向で通信が可能であるため、バス停への情報配信、ルータノードの制御が可能である。

3.2 通信モジュール

今回、筆者らが採用したセンサノードは、東京コスモス

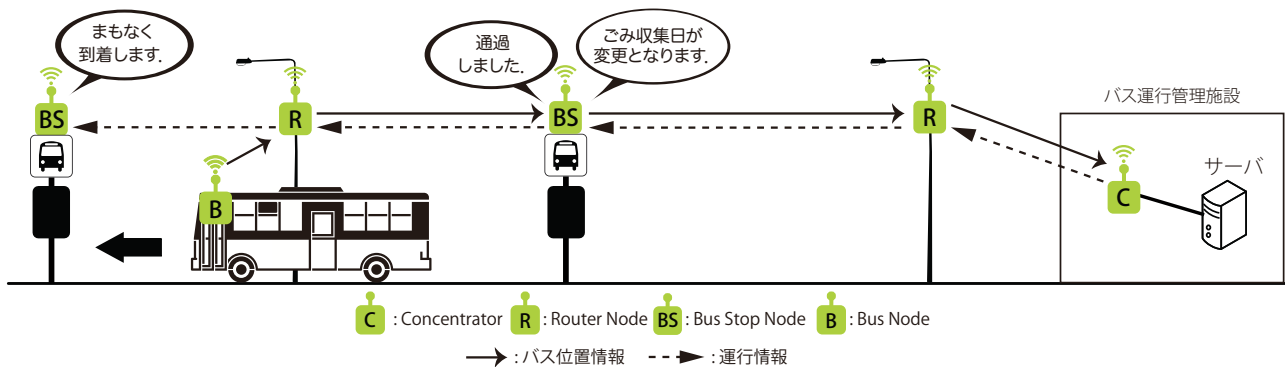


図 3 提案システム概要

Fig. 3 Overview of proposed system.

電機株式会社の TWE-001 STRONG^{*1}である。この通信モジュールは 2.4GHz 帯を利用する無線モジュールである。本提案システムにて伝送するデータは、位置情報や運行情報などといったテキストデータであるため、通信速度が 250kbps であっても実用上問題無い。

3.3 無線通信規格と通信プロトコル

今回、筆者らが採用した無線通信規格は、IEEE802.15.4[13]である。この規格は、ZigBee[14]などの通信プロトコルにおいて利用されており、通信速度が低速である反面、低コスト、低消費電力という特徴がある。そのため、センサノードは商用電源を必要とせず、乾電池やバッテリー、太陽光発電などで稼働させることが可能である。そのため、容易に設置、撤去ができ、新規、廃止路線の発生などに応じて、ネットワークの規模を変更することができる。

無線センサネットワークを構築する通信プロトコルとして、ZigBee, JenNet[15], 6LoWPAN[16]などがある。今回、筆者らは Skyley Networks 社が開発した DECENTRA II[17]を採用した。DECENTRA IIでは、ネットワークへの接続、離脱に関する処理過程が存在しない。そのため、バス走行中に接続するルータノードを瞬時に切り替えることが可能である。

3.4 メッセージのフレームフォーマット

本システムにおいて交換するメッセージを DECENTRA II 上で定義した。図 4 に定義したフレームフォーマットを示す。バス位置情報、運行情報の他にルータノードを管理、制御するためのメッセージを定義した。それぞれのメッセージを識別するために、データの種類や内容を識別するフィールド (Information Type, Content Type) を定義し、メッセージの種類を拡張できるようにした。表 1 に示したメッセージ一覧のうち、本稿に関係の深い 3 つのフレームについて説明する。

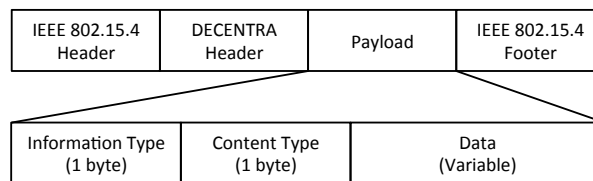


図 4 フレームフォーマット

Fig. 4 Frame format.

3.4.1 バス位置情報フレーム

バス位置情報フレームは、バスノードからコンセントレータに送信するメッセージである。系統番号は路線を識別する番号、便番号は運行便数を識別する番号である。系統番号と便番号は、バス運転手が車載器を操作して決定した値を格納する。位置情報は、GPS で取得したデータのうち、位置情報に関するデータの中から時刻、緯度、経度、測位状態、捕捉衛星数を格納する。

バス位置情報フレームの送信方法として、DECENTRA II で定義されている委譲送信を利用する。委譲送信とは、ユニキャスト送信に必要な経路探索といった処理を、隣接端末に委譲する方式である。そのため、バスが移動し、接続するルータノードが変化しても、バスノードはルーティングテーブルを更新すること無く、コンセントレータにバス位置情報フレームを送信することが可能である。

3.4.2 電源電圧要求/応答フレーム

電源電圧要求フレームは、コンセントレータから各ノードに対して送信するメッセージである。要求時刻は、コンセントレータが各ノードに電源電圧を要求した時刻である。要求時刻は、各ノードからの返信に相当時分の遅延が発生した場合に、いつ要求したものかを識別するために使用する。

電源電圧要求フレームは、ノードへの到達性を向上させるため、ブロードキャストで送信することで、ネットワーク全体にフラディングしている。そのため、ある特定のノードに対して要求を行うことができるよう、宛先アドレスをメッセージ内に格納している。

*1 <http://tocos-wireless.com/jp/>

表 1 メッセージ一覧
Table 1 Message list.

Information Type	Content Type	データ内容	送信方法
1: バス位置情報	1: バス位置情報	系統番号, 便番号, 位置情報	D
2: 情報配信	1: テロップ送信データ	テロップのテキストデータ	SA
	2: ニュース送信データ	ニュースのテキストデータ	SA
	3: 案内停止送信データ	案内停止コマンド	SA
	4: バス運行情報データ	運行情報データ	SA
3: 機器管理情報	1: 隣接テーブル要求	要求時刻	SA
	2: 隣接テーブル応答	要求時刻, 隣接ノードの台数, 隣接ノードアドレス	SA
	3: 電源電圧要求	要求時刻, 宛先ノードアドレス	B
	4: 電源電圧応答	要求時刻, 電源電圧	SB
4: 機器制御	1: スリープ指示	スリープ待機時間, スリープ時間	SA
	2: スリープ復帰	電源電圧	SA

送信方法 B: ブロードキャスト D: 委譲送信 SA: データ送信 (Ack 利用) SB: センドバック

電源電圧要求フレームを受信したノードは、宛先アドレスを参照し、自ノード宛であった場合には、コンセントレータに対して自身の電源電圧を格納した電源電圧応答フレームを送信する。

電源電圧応答フレームの送信方法として、DECENTRA II で定義されている SEND BACK を利用する。SEND BACK とは、フレームヘッダに記載された経路履歴を利用して、フレームが通過したルートを通り逆順にたどって、送信元まで送り返す方法である。この方法は、フレームが送られてきた経路が、最も信用できる経路であると仮定し、意図的に通信経路を指定するものである。

3.4.3 スリープ指示/復帰フレーム

スリープ指示フレームは、コンセントレータからルータノードに対して、スリープを指示するメッセージである。スリープ待機時間は、スリープ指示フレームを受信してからスリープを開始するまでに待機する時間である。スリープ時間は、スリープを開始してから起床するまでの時間である。起床したルータノードは、コンセントレータに対してスリープ復帰フレームを送信する。スリープ復帰フレームには電源電圧の情報が含まれているため、ルータノードが起床した時点でのバッテリー状態を把握することが可能である。

スリープ指示フレーム、およびスリープ復帰フレームは、DECENTRA II 上で再送制御を有効にして送信する。

4. 試作開発

4.1 コンセントレータ/管理端末

バス運行管理施設に設置する管理端末は、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バス位置情報や電源電圧などのメッセージを読み込み、ログとして保存する。また、バスの現在位置を用いて、バス停に配信する接近、遅延情報の生成、バス停のディスプレイ上に表示するテロップの生成、ルータノードへの制

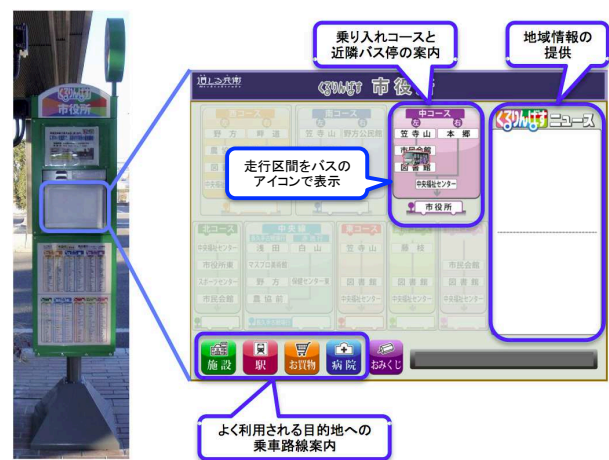


図 5 タッチパネル搭載バス停における情報提供

Fig. 5 Providing information at bus stop with touch panel.

御メッセージの送信を行う。

4.2 バス停ノード/バス停

図 5 にディスプレイによる情報提供が可能なバス停を示す。バス停筐体内には、組込用 PC と無線モジュールが格納されており、バス停正面にタッチパネルを搭載している。ディスプレイには、管理端末から送信された運行情報などを表示する。バスがどのバス停間を走行しているか確認でき、1つ前のバス停を出発すると音楽と音声により、バスの接近を案内する。

4.3 ルータノード

図 6 にルータノードを示す。ルータノードは防水・防塵ボックスに、無線モジュールと乾電池を納めたコンパクトな作りである。無線モジュールは低消費電力であるため、単一形アルカリ電池 2 本で駆動するように設計した。バス車載器から送信されたバス位置情報フレームを受信すると、コンセントレータまでの経路を探索して、コンセントレー

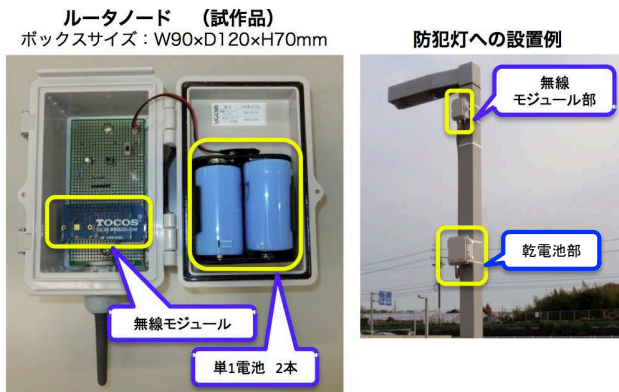


図 6 Router node and its installation example.



図 7 Bus-mounted device.

タまたは近隣のルータノードへ送信する。また、定期的に乾電池の電源電圧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際には、周囲の樹木や走行車両の影響があるため、電波到達性を高めるには高所に取り付けを行う必要がある。ただし、電池交換やルータノードプログラムの修正など、メンテナンスを容易に行うことができるよう、無線モジュール部分と乾電池部分を分離して設置した。

4.4 バスノード/車載器

図 7 に車載器を示す。車載器には Linux マイコンボード BeagleBoard-xM^{*2} を搭載し、GPS モジュール^{*3}、小型タッチパネルディスプレイ^{*4}、無線モジュールで構成されており、それぞれシリアル通信を用いてデータの入出力を行う。

車載器はバスから電力供給を受けると起動し、タッチパネル上に系統の選択画面が表示される。バスの運転手が系統を選択すると、系統番号をマイコンボードに対して通知する。系統番号を受けたマイコンボードは GPS による位置測位を開始し、位置情報メッセージを生成する。位置情報メッセージは無線モジュールを通じて定期的にコンセントレータへ送信する。

5. 検証実験と結果

試作開発した各機器と通信プロトコルの動作確認を行うために、愛知県日進市のコミュニティバス「くるりんばす [18]」の中コースの一部区間に広域無線センサネットワークを構築し、バスロケーションシステムの検証実験を行った。図 8 に各ノードの設置場所を示す。今回の検証実験では、ルータノードを日進市が管理する防犯灯や道路案内標識柱に設置した。設置位置は、事前に通信品質測定

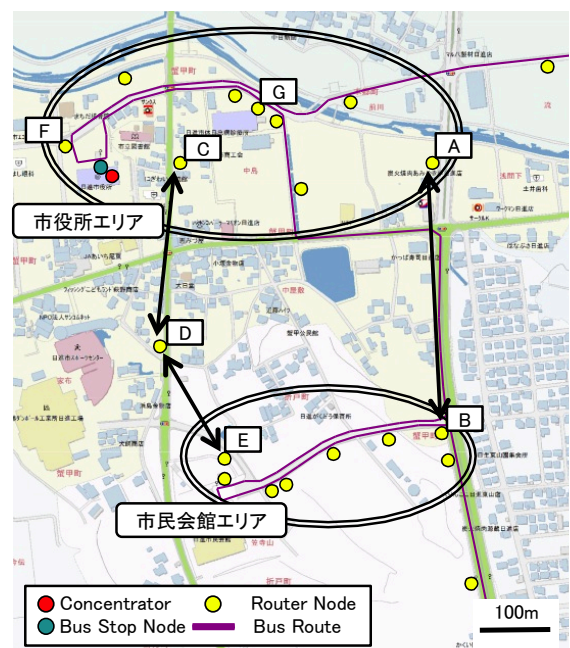


図 8 センサノードの設置箇所
Fig. 8 Installation location of sensor nodes.

試験を行い、設置候補となる 2 点間のフレーム到達率が 90% 以上となる箇所とした。市役所エリアと市民会館エリアを 2 つの経路で接続できるようにノードを設置し、冗長性を持たせた。また、管理端末を日進市役所の庁舎内に、バス停ノードを市役所バス停に、車載器を実際に運行しているバス車内に設置した。

5.1 バス位置情報の収集

バス車載器がコンセントレータに対して、5 秒間隔でバス位置情報を送信し、管理端末で受信ログを保存した。保存した受信ログを用いてバスの位置を地図上にプロットした。図 9 に、管理端末が収集したバス位置情報の結果を示す。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は、フレームロスはあるものの、位置情報を概ね

^{*2} <http://beagleboard.org/Products/BeagleBoard-xM>
^{*3} Can More Electronics 社製 GT-730FL-S : <http://www.canmore.com.tw/>
^{*4} Seedware 社製 IS701-3-001 : <http://infososa.jp/>

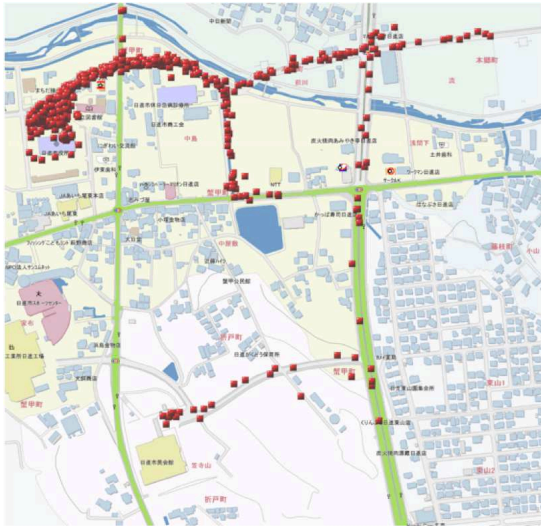


図 9 バス位置情報の収集結果

Fig. 9 Result of bus location information collected.

収集できており、バスの位置を正しく捉えていた。一方、市民会館エリアおよび南部の運行コースを走行している際は、フレームロスが多く、あまり位置情報が収集できていないことがわかる。市民会館エリアと市役所エリアをつなぐ経路として、図 8 に示す地図中のルータ A, B の 1 ホップで接続する東側のルートと、ルータ C, D, E の 2 ホップで接続する西側のルートがある。ルータ B のルーティングテーブルを確認したところ、AB 間で通信していることがわかった。AB 間は距離が離れているため、フレーム到達率が低下したことが原因と考えられる。

この課題を解決するには、AB 間に新たなルータノードを増設すればよいが、今回の検証実験は日進市が管理する防犯灯などの構造物に限定してルータノードを設置してよいという条件下で行っており、AB 間にはそのような構造物がなかったため、ルータノードを設置することができなかった。ただし、管理端末が位置情報のメッセージを 1 つでも収集できれば、バスの位置を把握することができるため、バス停に対して運行情報を送信することができる。実際に、バスが市民会館エリアを走行した際には、バス停のディスプレイに走行区間が正しく表示されることを確認した。

5.2 ルータノードの電池消費

ルータノードがコンセントレータに対して、1 時間おきに電源電圧を送信し、管理端末で受信ログを保存した。保存した受信ログのうち、図 8 に示す地図中のルータ F, ルータ G の電源電圧について調査した。調査した時間は 190 時間で、そのうちルータ F は 46 時間、ルータ G は 7 時間 40 分スリープをしている。スリープ時間が異なる原因は、スリープ指示メッセージの不到達と考えられる。図 10 に電圧の推移のグラフを示す。初期電圧は、ルータ F が

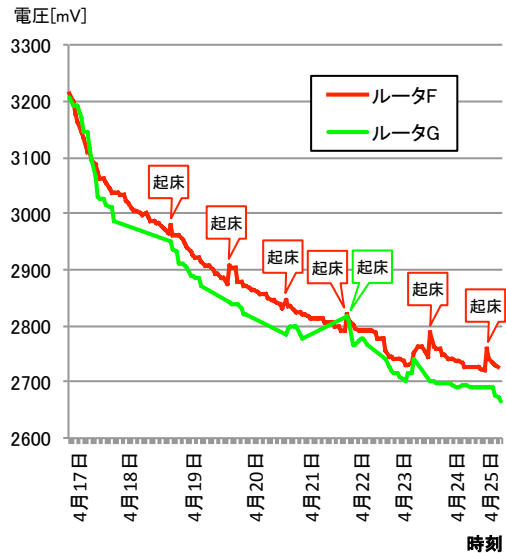


図 10 電池電圧の推移

Fig. 10 Transition of battery voltage.

3.201V, ルータ G が 3.206V であり、測定終了時の電圧は、ルータ F が 2.748V, ルータ G が 2.652V であった。グラフを見ると、ルータ F, G 共にアルカリ電池の放電特性に従って電圧が低下しているが、ルータ F はルータ G に比べ、電圧が高く推移していることがわかる。アルカリ電池を含む一次電池には、電流が発生しない時に電圧が復元する特性がある。この特性により、ルータノードがスリープより起床した際に、電圧が復元していることがわかる。起床時以外にも電圧が復元する箇所が存在するが、気温の変化による影響であると考えられる。ルータ F は全体時間の 25%, ルータ G は 4% スリープしていることから、スリープによる省電力効果があると考えられる。しかし、電池消費割合で見ると、ルータ F は初期電圧の 14%, ルータ G は 17% であることから、省電力効果を高めるには、バス運行時間中にもスリープさせるなど、より長時間スリープさせる必要がある。

6. まとめ

本稿では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を行った。実際のバス路線を用いて検証実験を行った結果、フレームロスは発生するものの、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。今後は無線センサネットワークの広域化、および長期安定運用を目標に仕様の改良や太陽光発電による電源供給を行い、フィールド検証を継続していく。

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。検証実験を行うに当たり、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 の梅田英和氏に感謝する。

参考文献

- [1] よりよい地域公共交通ネットワークを形成するための提言書, 国土交通省中部運輸局, 入手先 <https://www.tb.mlit.go.jp/chubu/tsukuro/kassei/traffic%20network/index.html> (2013.04.12).
- [2] 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.
- [3] あしあとランプ, ITS アライアンス株式会社, 入手先 <http://www.its-alliance.jp/ashiato.lamp/> (2013.05.03).
- [4] 横山和希, 鈴木秀和, 松本幸正: ZigBee センサネットワークにおけるバス位置情報配送手法の検討, 情報処理学会全国大会講演論文集, Vol.74, No.3, 3X-8, pp.311-312, 2009.
- [5] 交通・バス業向けシステム 伊予鉄道株式会社 様, NEC ネットソリューションズ株式会社, 入手先 <http://www.nec-nexs.com/solution/case/iyobus.html> (2013.05.13).
- [6] 交通・バス業向けシステム 東京都交通局自動車部 (都営バス) 様, NEC ネットソリューションズ株式会社, 入手先 <http://www.nec-nexs.com/solution/case/tobus.html> (2013.05.13).
- [7] 都バス運行情報サービス, 東京都交通局, 入手先 <http://navi.tobus.jp/blsys/navi> (2013.05.13).
- [8] 伊予鉄道株式会社, 入手先 <http://www.iyotetsu.co.jp/> (2013.05.13).
- [9] 三重交通株式会社, 入手先 <http://www.sanco.co.jp/> (2013.05.13).
- [10] 愛知県東海市, 入手先 <http://www.city.tokai.aichi.jp/> (2013.05.14).
- [11] 青森県三沢市, 入手先 <http://www.city.misawa.lg.jp/> (2013.05.14).
- [12] あい愛バス, 入手先 <http://www.city.minokamo.gifu.jp/bus/> (2013.05.14).
- [13] IEEE 802.15 WPAN Task Group 4 (TG4), 入手先 <http://www.ieee802.org/15/pub/TG4.html> (2013.05.16).
- [14] ZigBee Alliance, 入手先 <http://www.zigbee.org/> (2013.05.16).
- [15] JenNet Protocol Stack, 入手先 http://www.jennic.com/products/protocol_stacks/jennet (2013.05.16).
- [16] Montenegro, G., Kushalnagar, N., Hui, J. and Culler, D.: Transmission of IPv6 Packets over IEEE 802.15.4 Networks, RFC 4944, IETF, 2007.
- [17] DECENTRA II, 株式会社スカイリーネットワークス, 入手先 <http://www.skyley.com/products/decentra2.html> (2013.05.03).
- [18] ぐるりんばす, 愛知県日進市, 入手先 <http://www.city.nisshin.lg.jp/shisetsu/bus/> (2013.05.16).