

IoT技術に基づいたバスロケーションシステムの提案

西尾 航¹ 鈴木 秀和¹ 松本 幸正¹

概要：バスの利便性を向上させる手段の一つとして、バスの運行情報を提供するバスロケーションシステムがある。これまでに筆者ら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を提案しており、コミュニティバスを対象とした実証実験から、マルチホップ数の増加に伴うパケットロス率の増加や、独自プロトコルの採用に伴う開発生産性や保守性が不十分であることが明らかとなった。一方で、近年はIoTやM2M通信技術を駆使したスマートシティ実現に向けた取り組みが活発に行われており、無線センサネットワークが様々な情報を収集するためのインフラとして街中に構築されることが期待されている。本稿では、IoT技術に基づく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する。Wi-SUN準拠の920MHz帯無線通信を利用し、マルチホップ数を抑制した複数の無線センサネットワークを有線網で接続することでパケットロスの発生を抑制する。また、6LoWPANやMQTTなどのIoT向け通信技術を利用することにより、開発生産性や保守性の改善を図る。提案システムの一部を試作して動作検証した結果、MQTTを利用してバスの位置情報を管理サーバへ収集できることを確認した。

1. はじめに

交通弱者にとって地域公共交通は重要な移動手段である一方、不採算路線の廃止や縮小が相次いでおり、特に地方部におけるバス交通の衰退が著しい。そこで、地域住民の生活交通を確保するためにコミュニティバスを運用する地方自治体が増加している[1]。しかし、バスは天候や渋滞の影響を受けやすく、定時運行が困難である。したがってバスの利用者は、バスがどこを走行しているのか、いつバス停に到着するのかを判断するのが難しい。このような課題を解決する手段として、バスの位置情報収集や運行情報配信をするバスロケーションシステムを導入する地方自治体やバス事業者が増加している。現在多く普及しているバスロケーションシステム[2-5]は、バスの位置情報収集や運行情報配信に携帯電話網を利用しているため、多額な通信コストが発生する。そのため、不採算路線での運用となるコミュニティバスでは通信コストの捻出ができず、バスロケーションシステムの導入は難しい。

一方で、近年では大量のモノをネットワークに接続するIoT(Internet of Things)やM2M(Machine-to-Machine)通信技術の発展に伴い、都市や生活のインフラ状態を細部まで把握できるスマートシティの実現に向けた取り組みが活発になっている。スマートシティでは、街中に無線セン

サネットワークが構築され、モノが環境情報をセンシングしたり、人の位置を検知したりするなど、地域のインフラとして利用されることが期待されている。

そこで、筆者らは一つの広域な無線センサネットワークを利用することで、通信コストが不要なバスロケーションシステム(以後、従来システム)を提案し、実証実験を行ってきた[6]。実証実験により通信コストが不要なバスロケーションシステムとして動作することが確認できたが、マルチホップ数の増加に伴うパケットロス率の増加や、独自プロトコルの使用による開発生産性や保守性が不十分であることが判明した。また、独自プロトコルに対応した無線センサノードを多数配置する必要があるため、導入コストが高いといった課題もある。

従来システムの課題を解決するために、本稿では、スマートシティにおいて構築される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を提案する。提案システムでは、スマートシティを構成する要素として期待されているスマートメーターやHEMS(Home Energy Management System)が利用するWi-SUN(Wireless Smart Utility Network)[7,11]を基盤とし、OASIS標準として策定されたIoT向け通信プロトコルMQTT(MQ Telemetry Transport)を利用する。Wi-SUNはネットワーク層としてIPv6を採用しており、無線センサネットワーク上でIPv6ネットワークを利用するための標準プロトコル6LoWPAN(IPv6 over Low power Wireless Personal Area Networks)[8]を併せ持つ。従来システムを標準プロトコ

¹ 名城大学大学院理工学研究科
Graduate School of Science and Technology, Meijo University

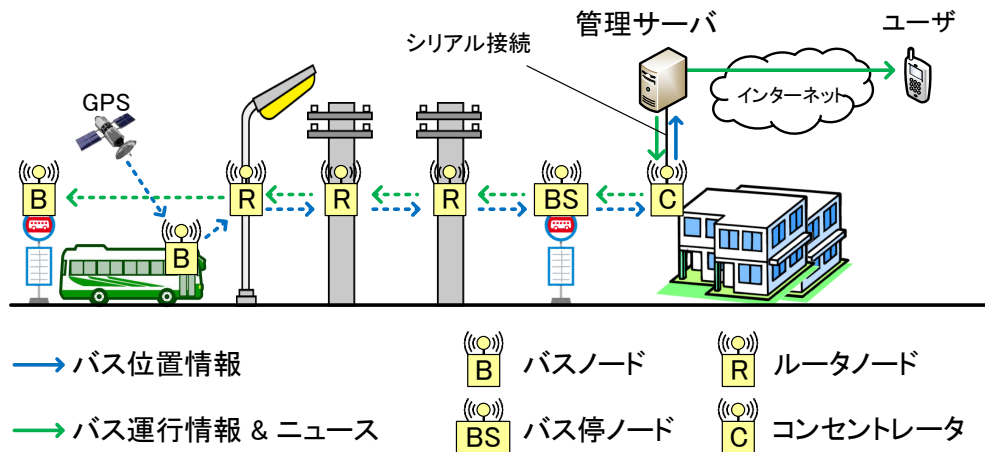


図1 無線センサネットワークを利用したバスロケーションシステムの概要

ル上で再構成することにより、開発生産性や保守性の改善を図る。また、スマートシティで構築される無線センサネットワークの一部をバスロケーションシステムの実現のために利用することが可能になり、ネットワーク構築に関わる導入コストの削減が期待できる。さらに、広域無線センサネットワークを複数の小規模なネットワークに分割し、CATV/FTTHなどの地域固定網に接続させることにより、安定したデータ収集を実現する。

以後、2章で筆者らが提案してきた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示す。3章で提案システムについて述べ、4章で検証内容と評価を示す。最後に5章でまとめる。

2. 従来システム

2.1 システム概要

筆者らがこれまで提案してきた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概要について述べる。図1にシステムの概要を示す。バス、バス停、バス路線沿いの電柱や街路灯、バス運行管理施設に小型無線センサノードを設置し、これらの無線センサノードを用いて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。バス車載器に設置した無線センサノード（バスノード）は、GPSから定期的に位置情報を取得し、バスの位置情報を記載したフレームをバス運行管理施設に設置された無線センサノード（コンセントレータ）宛に送信する。このフレームを受信したバス近隣の街路灯などに設置された無線センサノード（ルータノード）は、ルーティングプロトコルによって生成された経路表に従って他のルータノードへフレームを中継する。位置情報が記載されたフレームを受信したコンセントレータは、シリアル接続された管理サーバへバスの位置情報を蓄積する。

管理サーバは蓄積されたバスの位置情報から運行情報を生成し、無線センサネットワークを経由してバス停に設置された無線センサノード（バス停ノード）に送信したり、Webページで情報を公開する。バス停ノードはルータノードと同様に中継機能を持つほか、コンセントレータから受信したバスの運行情報をディスプレイに表示することにより、バス利用者に対してバスの現在位置や遅延情報などを提供する。また、バスの運行情報だけでなく、地域イベントの情報や行政からの連絡、バス停周辺の案内情報などを合わせて配信することにより、バス利用者の利便性向上や、おでかけを促進する効果を狙っている。

このシステムでは無線センサネットワークを利用して、バスの位置情報の収集および運行情報の配信を行うため、通信コストが一切不要で低コストで運用することができる。また、無線センサノードは小型バッテリーや太陽光発電などで駆動できるため、電源配給工事が不要で柔軟にノードの配置や撤去が可能であり、動的に無線センサネットワークの通信可能エリアを拡張することができる。そのため、災害時にはバス停にて緊急情報の提供も可能で、平時ではバスロケーションシステムだけでなく、電波強度を利用して無線センサノードを持った徘徊高齢者や子供の位置を把握する見守りシステムへの応用も検討している。

2.2 バスノード

バスノードはLinuxマイコンボードを搭載し、GPSモジュール、小型タッチパネルディスプレイ、無線モジュールから構成されている。バスがエンジンをかけたと同時に起動し、タッチパネルに経路選択画面が表示される。バス運転手により経路が選択されると、Linuxマイコンボードが一定時間おきにGPSモジュールから位置情報の取得する。その後、位置情報を記載したフレームを生成し、コン



図 2 ルータノードの構成（左）と防犯灯への設置例（右）

セントレータ宛にフレームを送信する。

2.3 ルータノード

ルータノードは、防水防塵ボックスに格納された無線モジュールと小型バッテリーで構成される。ルータノードの構成と設置例を図 2 に示す。ルータノードは、バスノードなどから受信した位置情報フレームを近隣のルータノードあるいはコンセントレータへ送信する機能を持つ。また、ルータノードは定期的にバッテリーの電源電圧情報をコンセントレータへ送信する。

2.4 コンセントレータ・管理サーバ

コンセントレータと管理サーバは、バス運行管理施設に設置される。コンセントレータは、バスノードから送信された位置情報フレームを管理サーバへ蓄積する。管理サーバでは、蓄積したバスの位置情報と時刻表から運行情報を生成し、この情報を記載したフレームを無線センサネットワーク経由で各バス停ノードへ配信する。

2.5 バス停ノード

バス停ノードは、バス停筐体に組み込まれた組み込み用 PC とタッチパネル、無線モジュールから構成される。ルータノードと同様の中継機能を持つほか、コンセントレータから受信したバスの運行情報を図 3 のように簡易マップでディスプレイに表示する機能を持つ。

2.6 実証実験で明らかとなった課題

筆者らは、愛知県日進市のコミュニティバス「くるりんばす」の一部区間を用いた実証実験を行ってきた。実証実験の結果、管理サーバへのバスの位置情報収集やバス停のディスプレイによる運行情報の提供など、バスロケーションシステムとして十分に稼働していることを確認した一方で、次のような解決すべき課題が明らかとなった。

(1) 独自プロトコル採用に伴う弊害

従来システムではルータノードのスリープ機能をサ



図 3 バス停ノードでの情報提供

ポートし、バッテリー寿命を長期化することができる Skyley Networks 社の DECENTRAII [9] という独自の通信プロトコルを採用していた。ネットワークの加入および離脱処理がないため、バスの移動に伴う無線センサノードの移動が発生してもルーティングテーブルを更新する必要がなく、システムを設計しやすいという利点も採用理由の一つであった。

一方で、システムを広域化する際、無線センサノード同士の通信可能距離は限りがあるため、マルチホップ数の増加に伴うフレームロスが発生し、バスの位置情報を十分に収集できない可能性が明らかとなった。また、DECENTRAII は非 IP のプロトコルであるため、携帯電話網を利用した既存のバスロケーションシステム（ソケット通信を用いたクライアントサーバモデル）とは異なる設計が必要であり、開発効率が高いとは言えない。また、DECENTRAII は詳細な仕様が公開されていないため、ルーティング制御などの設定を柔軟に行えないなどの課題もあった。さらに、DECENTRAII を利用するためには動作確認済の一部の無線センサノードが必要であるため、故障や廃盤になった際、即時に代替品を確保することが難しい。

(2) パケットロスに伴う位置情報の欠落

実証実験では、東京コスモス電機社の 2.4GHz 帯を利用する無線モジュール TWE-001 Strong [10] を利用した。この無線モジュールは IEEE802.15.4 に準拠しており、街中での最長通信距離は 400m 程である。無線モジュールの設置可能箇所は、日進市が管理している構造物に限定されたため、無線センサノードの最適配置が困難であった。そのため、見通しの悪い設置箇所の影響もありフレームロス率が上昇してしまうという課題があった。

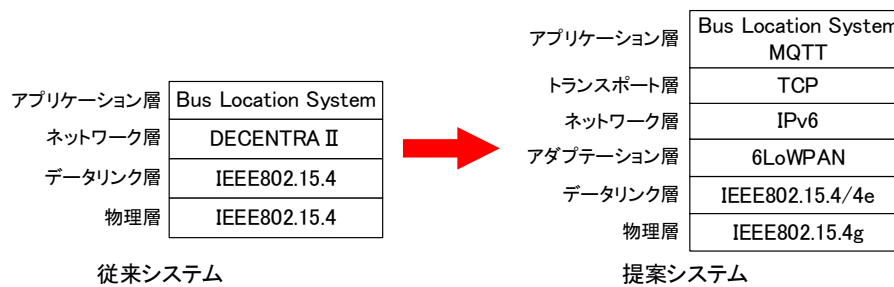


図 4 プロトコルスタックの変更

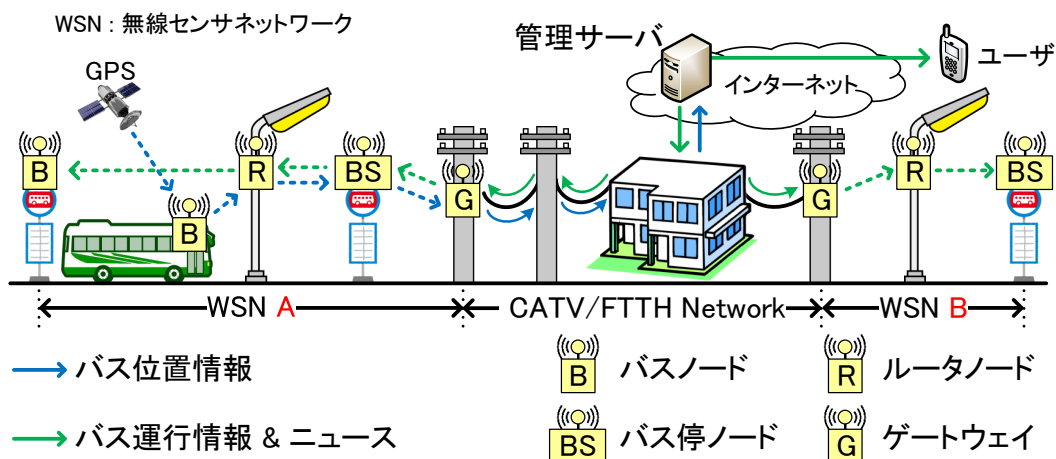


図 5 提案システムの概要

3. 提案システム

従来システムの一つ目の課題である独自プロトコル採用に伴う弊害に対しては、Wi-SUN および MQTT などの標準化技術に変更することにより解決する。2つ目のフレームロスに伴う位置情報の欠落に対しては、広域無線センサネットワークを複数の小規模な単位に分割し、さらに使用する周波数帯域を変更することにより解決する。

3.1 通信プロトコルの変更

従来システムで課題である開発生産性や保守性は、非 IP の独自プロトコルを採用したこと起因するものである。そのため提案システムでは、図 4 のようにスマートシティを構築する要素として期待されているスマートメーター用通信方式 Wi-SUN が利用する 6LoWPAN を基盤とした通信仕様に変更する。

Wi-SUN は、Wi-SUN Alliance が標準化および普及促進活動を行っている無線通信規格であり、物理層からトランスポート層までを定義している。次世代電力量計であるスマートメーターや HEMS への採用が決定しており、スマー

トシティにおける無線センサネットワークを構築する技術の一つとして注目されている。日本では 920MHz 帯の電波が ISM バンドとして割り当てられており、他の ISM バンドである 2.4GHz 帯の電波に比べると回折特性がよく、電波の干渉が少ないという特徴がある。また、通信速度は数百 kbps と低速であるが、通信距離が 500m ほどであり、マルチホップ通信が可能であるため、長距離にわたってデータを伝達することができる。Wi-SUN は、6LoWPAN をネットワーク層に定義している。6LoWPAN は、IPv6 パケットのヘッダ圧縮や分割送信を行うことで、低消費電力 PAN で IPv6 による通信を可能にする技術である。そのため、無線センサネットワークにおいて IPv6 を用いた通信を実現することができる。したがって、既存の携帯電話網を利用したバスロケーションシステムと同様に IP ベースの設計が可能になり、既存システムの設計を提案システムに活かすことが可能である。

提案システムでは、6LoWPAN を導入することにより、IP ベースの通信を行う。そこで、TCP/IP 上で動作する IoT 向け通信プロトコルである MQTT を利用する。MQTT は、OASIS によって標準化された Publish/Subscribe 型の

アプリケーション層通信プロトコルである。固定長ヘッダが2バイトと非常に軽量であり、プロトコルの仕様が単純であるため処理速度が速く、消費電力が少ないという特徴がある。また、コネクション型の通信を行うため、パケットロスが多い無線センサネットワーク向けの仕様となっている。従来システムではDECENTRAIIを用いて送信していたバスの位置情報などを、MQTTを利用してメッセージを構築し、IPv6ネットワーク化された無線センサネットワークを用いて管理サーバへ送信する。

3.2 無線センサネットワークの分割

提案システムの概要を図5に示す。提案システムでは、従来システムと同様にバス、バス停、バス路線沿いの電柱や街路灯に無線センサノードを設置する。コンセントレータはバス運行管理施設ではなく、特定の電柱などに設置することにより、小規模な無線センサネットワークを複数構築する。提案システムにおいて、コンセントレータはCATVやFTTHなどの地域固定網へ接続するゲートウェイとしての役割を新たに定義する。以後、コンセントレータをゲートウェイと呼称する。ゲートウェイは、無線センサネットワークと固定網の両方のインタフェースを持ち、両ネットワークの中継機として動作する。

また、Wi-SUNの利用により2.4GHz帯から920MHz帯へ変更した効果もあり、従来システムに比べマルチホップ数が少なく、かつ安定した無線センサネットワークを構築することが可能になる。バスノードから送信される位置情報フレームは中継機であるゲートウェイまで送信された後、地域固定網を通じて管理サーバまで転送される。従来システムにおける管理サーバはバス運行管理施設内に設置されており、直接無線センサネットワークと接続していたが、提案システムにおいては3.1節で前述した通り、IPプロトコルを採用するため、インターネット上の任意の場所に設置されていればよく、クラウドサービスやVPS (Virtual Private Service) などを利用して構築することが可能になる。管理サーバは収集したバスの位置情報から運行情報を生成し、インターネットを利用して無線センサネットワーク内のバス停へ配信される。

このように無線センサネットワークを複数構築して地域固定網に接続することにより、バスの位置情報の収集率を改善しつつ、システムを広域化することが可能である。なお、ゲートウェイの設置場所によっては地域固定網が敷設されていない可能性も考えられるが、その場合は携帯電話網やWiMAXなどの広域無線通信網に接続することも可能である。

3.3 提案システムの応用

上記のように、提案システムではWi-SUNをベースとしたIPv6による通信を行う。そのため、今後普及が見込ま

れる地域のエネルギー監視システムであるCEMS (Community Energy Management System) など、スマートシティで構築される無線センサネットワークを利用してバスロケーションシステムを展開することができる。したがって、従来システムで課題であった導入コストを抑えることができ、地方自治体が運営するコミュニティバスへの導入の促進が期待できる。

IPv6ネットワークに属する無線センサノードは、一つのIoTデバイスとしてみなすことができる。そのため、子供や高齢者の見守りシステムなど、多種多様なサービスを個々の無線センサノードに対して展開することが可能であり、新たなビジネスモデルの展開が可能である。さらに、携帯電話網に依存しない通信インフラであるため、従来システムと同様に災害時の情報配信手段としても利用可能である。

4. 検証および評価

4.1 MQTTの動作検証

提案システムの一つであるMQTTの通信を確認するため、マイコンとUbuntu PCを用いて簡易的なクライアント/サーバプログラムを実装し、バスロケーションシステムにおけるバスの位置情報を収集するシステムを試作した。なお、今回の動作検証は、無線センサネットワークではなく有線ネットワークにて行った。動作環境とプロトコルスタックを図6に示す。クライアント側はNXP社のLPC1768と呼ぶ低リソースなワンボードマイコンを使用し、ARM社のプロトタイプ用ワンボードマイコン開発環境であるmbedを利用して開発した。サーバ側はオープンソースのMQTTサーバとして実績が多いMosquitto [12]を利用して構築した。なお、MQTTクライアントはバスの位置情報フレームをMQTTサーバに送信するが、GPSから取得した位置情報を記載するメッセージ部は静的に設定した。MQTTサーバにおいてWiresharkによりパケットキャプチャを行った結果、MQTTクライアントからMQTTプロトコルにより送信されるバスの位置情報を受信できたことを確認した。

今回は有線ネットワーク (Ethernet) 上での動作検証で

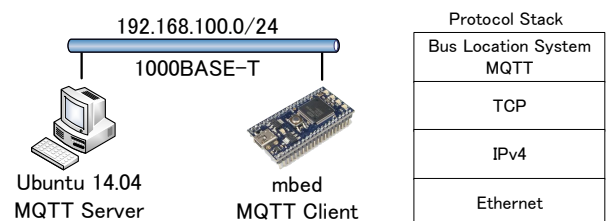


図6 動作検証のネットワーク構成 (左) とプロトコルスタック (右)

表 1 既存技術との比較

	携帯電話網を用いたシステム	従来システム	提案システム
カバーエリア	○	△	○
開発生産性	○	△	○
保守性	○	△	○
導入コスト	○	×	△
運用コスト	×	○	○

あったため、提案システムにおけるゲートウェイと管理サーバ間の通信に該当する。MQTT を利用して構築した位置情報メッセージをソケット API を用いて IPv4 パケットを構築し、有線ネットワークへ送信した。一方、バスノード側では Wi-SUN を利用して無線センサネットワークへ送信する必要があるが、今回生成した MQTT ベースの位置情報メッセージを UART から Wi-SUN モジュールへ書き出すことにより、Wi-SUN、6LoWPAN に基づいて IPv6 パケットが生成されることになる。

4.2 既存技術との比較

表 1 に、提案システムと既存バスロケーションシステムとの比較を示す。

携帯電話網を用いたシステムでは、通信端末が基地局と通信できるエリアであればカバーすることができる。また、一般的なネットワークシステムで構築することができるため、開発生産性および保守性が高い。市販の携帯端末でシステムの実現が可能であるため、他のバスロケーションシステムに比べ導入コストは高くない。しかし、携帯電話網を用いるため通信コストがかかり、携帯端末を設置するバスやバス停の数に応じて通信コストが増加する。運用コストが増大するため、財政の厳しい地方自治体では継続的な運用が困難である。

無線センサネットワークを利用した従来システムでは通信コストが不要であり、無線センサノードは小型バッテリーで動作するほど省電力であるため、運用コストを大幅に削減できる。ただし、単一の広域無線センサネットワークでバス路線全域をカバーすることは、データ収集の観点から困難である。また、使用していた独自プロトコルは機能拡張やルーティング制御などが困難であるほか、既存の多くのバスロケーションシステムが採用している TCP/IP を利用したクライアントサーバモデルのシステム開発のノウハウが活用できないなど、開発生産性が高いとは言えない。独自のプロトコルを搭載した製品が必要であり、製品の廃版や故障時に代替品を用意することが困難であるケースが考えられ、保守性が高いとは言いがたい。また、独自プロトコルをポーティング可能なハードウェアが必要であり、従来システムに特化した無線センサノードであることから別システムで設置されたノードを共有することもできず、導入コストが高くなる可能性がある。

提案システムでは、マルチホップ数に起因したパケットロスを削減することができ、かつシステムの広域化を実現可能にした。また、Wi-SUN/6LoWPAN を採用することで IP ベースのシステム設計が可能になるため、従来システムより開発生産性が向上させることができる。加えて、6LoWPAN 対応の通信ノードであれば提案システムを実現できるため、従来システムより代替品を用意しやすく保守性の向上も期待できる。従来システムで大きな課題であった導入コストは、スマートシティ実現のために構築される無線センサネットワークをバスロケーションシステムにおけるネットワークの一部として利用することにより、削減できると考えられる。そのため、地方自治体が運営するコミュニティバスを中心に、導入の促進が期待できる。また、従来システムと同様に無線センサネットワークを用いるため通信コストが不要であり、運用コストは携帯電話網を用いたシステムに比べ大幅に安価にすることができる。

5. まとめ

本稿では、IoT 技術に基づいたバスロケーションシステムを提案した。提案システムでは、従来システムのように一つの無線センサネットワークを構築するのではなく、マルチホップ数を減らした小規模無線センサネットワークを複数構築し有線網で接続する。また、周波数帯域を 2.4GHz 帯から 920MHz 帯に変更することにより、無線センサノード間の接続性を高める。これらを併用することにより、位置情報を安定的に収集可能にしつつ、サービス提供エリアを広域化することができる。また、スマートメーターや HEMS での使用が期待されている Wi-SUN/6LoWPAN や IoT 向けプロトコル MQTT を基盤とすることにより、従来システムで課題であった開発生産性、保守性および導入コストの課題を解決できることを示した。

今後は、無線センサノードに提案システムを実装し、バスロケーションシステムとしての動作検証を行う。また、バスの移動に伴うバスノードの IP アドレスの変化や、無線センサネットワーク上で伝送される IPv6 パケットを IPv4 で稼働する管理サーバへ伝送する方法など、IP ネットワーク導入に伴って新たに発生する検討事項について取り組む必要がある。

参考文献

- [1] バス路線網改善プログラム策定調査検討会：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 (2010). <http://www.tb.mlit.go.jp/chubu/tsukuro/kassei/traffic%20network/index.html>.
- [2] 仙台市交通局：どこバス仙台. http://www.city.sendai.jp/sumiyoi/kotsu/annai/1194537_1591.html.
- [3] VISH 株式会社：バスキャッチ. <http://www.buscatch.com/>.
- [4] 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, 第 70 回全国大会講演論文集, pp. 3-251-3-252 (2010).
- [5] 伊藤昌毅, 川村尚生, 菅原一孔：スマートフォンを用いたバスロケーションシステムの開発, 電子情報通信学会論文誌, Vol. 196-D, No. 10, pp. 2327-2339 (2013).
- [6] Hata, M., Adachi, H., Suzuki, H., Kitase, K., Matsumoto, Y. and Watanabe, A.: Proposal for Novel Bus Location System Using Wireless Sensor Network, *Proceedings of the 20th ITS World Congress Tokyo 2013*, No. 3209, pp. 1-10 (2013).
- [7] IEEE 802.15 WPAN Task Group 4g (TG4g) Smart Utility Networks. <http://www.ieee802.org/15/pub/TG4g.html>.
- [8] 原田博司, 巖名潤一：スマートワイヤレスユーティリティネットワーク：Wi-SUN, 電子情報通信学会総合大会講演論文集, Vol. 2, pp. SS-78-SS-79 (2013).
- [9] Montenegro, G., Kushalnagar, N., Hui, J. W. and Cullen, D. E.: Transmission of IPv6 Packets over IEEE 802.15.4 Networks, RFC 4944, IETF, <https://tools.ietf.org/html/rfc4944> (2007).
- [10] SKYLEY NETWORKS : DECENTRA II. <http://www.skyley.com/products/decentra2.html>
- [11] TOCOS-WIRELESS.COM.: TWE-Strong. <http://tocos-wireless.com/jp/products/TWE-001STRONG.html>.
- [12] Mosquitto. <http://mosquitto.org/>.