Vol.2013-MBL-68 No.11
Vol.2013-ITS-55 No.11
Vol.2013-DCC-5 No.11
2013/11/14

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

足達 元[1]　畠 基成[1]　鈴木 秀和[1]　旭 健作[1]　松本 幸正[1]　渡邊 晃[1]

概要：近年，バスの運行状況を把握するためのバスロケーションシステムが注目されている．そこで筆者らは，低コスト・低消費電力が特徴である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を提案している．提案システムでは，バス停周辺におけるバスからの電波の受信信号強度（RSSI）と，それに基づいて生成された距離減衰モデルを用いることにより，バス停が自立的にバスの接近通過を判断し，その結果を表示する．本稿では，変動の大きい RSSI をフィルタリングにより平滑化することで，バス接近通過判定の精度を向上させる手法の基礎的な検証実験の結果を報告する．検証実験の結果，RSSI をフィルタリングすることにより，バス・バス停間の推定距離の時間的な変動を平滑化することができ，バス接近通過判定精度が向上することを確認した．

1. はじめに

近年，地方都市における自家用車の保有台数が増加し，路線バスといった地方公共交通の衰退が深刻な問題となっている．路線バスは高齢者や学生といった運転免許を持たない人々の重要な移動手段であるが，利用者の減少は著しい．理由の 1 つとして，路線バスは道路状況や天候などの影響により定時運行が難しい．このことから，バスは利便性が高いとは言えない．そこでバスの利便性を向上させるために，バスロケーションシステムを導入するバス事業者が増加している [1]．

一般的なバスロケーションシステムは，サーバへのバスの現在位置の送信や，バス停への運行情報の配信にセルラー網を利用している [2]．そのため，通信コストが発生し，財政状況が厳しい地方自治体では，バスロケーションシステムを継続運用することが困難である [3]．したがって，通信コストが発生せず，継続運用が可能なバスロケーションシステムが必要となる．セルラー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 [4]．あしあとランプは，バスに搭載した車載機が定期的に電波を発信し，電波を受信したバス停表示機は 10 分間，通過マークとランプを点灯させる．このシステムは，低運用コストでバスの通過情報を提供できる一方で，バスの現在位置をサーバで収集しないため，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，通信コストが不要で，バスの運行状況をリアルタイムで把握することを可能にする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を提案している [5] [6]．このシステムでは，バス運行管理施設，バス，バス停，バス路線沿いの電柱や街路灯に小型の無線センサノードを設置し，広域の無線センサネットワークを構築する．構築した無線センサネットワークを利用して，サーバへのバスの現在位置の送信や，バス停への運行情報の配信を行う．しかし，無線センサネットワークにより運行情報などを配信しているため，無線通信区間でフレーム欠損が生じ，リアルタイムに情報提供することが難しいという課題があった．そこで，バスが送信したフレームをバス停が受信した時の信号強度（RSSI : Received Signal Strength Indicator）と，それに基づいて生成された距離減衰モデルを用いることにより，バス停がバスまでの距離を推定し，バス停が自立的にバスの接近，通過を判断する手法を提案している [12]．この手法を用いることで，バス停においてリアルタイムに情報提供できるようになった．しかし，RSSI は人や自動車などの存在により大きく変動することが分かっている．このような環境においても精度よくバスの接近，通過を判定する必要がある．

本稿では，環境による変動の大きい RSSI をフィルタリングして平滑化することにより，バスの接近，通過の判定精度を向上させる手法を検討し，検討した手法を用いた基礎的な通過判定実験を行った結果を報告する．以降，2 章で既存のバスロケーションシステムにおけるバスの接近情

[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.

© 2013 Information Processing Society of Japan

Vol.2013-MBL-68 No.11
Vol.2013-ITS-55 No.11
Vol.2013-DCC-5 No.11
2013/11/14

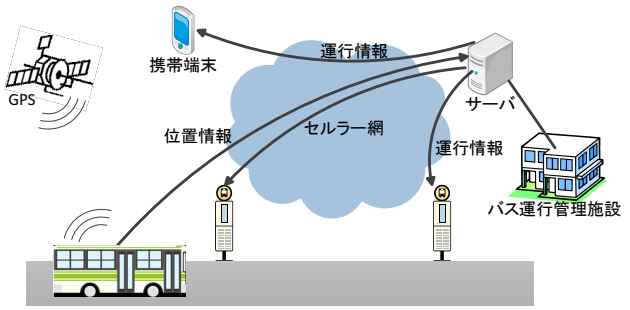


図 1 GPS とセルラー網を用いたバスロケーションシステムの概要
Fig. 1 Overview of bus location system using GPS and cellular network.

報や通過情報の提供方法とその課題について示す．3 章で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とバス停における自立的バス接近，通過判定手法について示す．4 章で今回適用する RSSI フィルタリング方式の概要と，RSSI フィルタリングを適用した基礎的な通過判定実験の結果を示し，5 章でまとめる．

2. 既存システムのバス接近通過情報提供方法

2.1 セルラー網を用いたバスロケーションシステム

現在最も普及しているバスロケーションシステムはセルラー網を利用して，情報の収集および配信を行っている [2]．**図 1** に GPS とセルラー網を用いたバスロケーションシステムの概要を示す．バス，バス停に通信機器を設置し，GPS によりバスの位置情報を取得する．取得した位置情報をセルラー網を用いてバス運行管理施設に設置したサーバに収集し，収集したバスの位置情報からバス停や携帯端末に運行情報を配信する．バスの接近通過情報も同様に，バス付近のバス停にセルラー網を用いて情報提供する．このバスロケーションシステムは京都市営バス [7]，秋田市交通局 [8] など，多くのバス事業者によりサービスが展開されている．

しかしこのシステムでは，すべてのバス停に通信機器を設置した場合，通信コストが膨大となり，コミュニティバスを運営する地方自治体では継続運用が困難である．

2.2 あしあとランプ

あしあとランプは ITS アライアンス株式会社が提供しているバスロケーションシステムである [4]．**図 2** にあしあとランプの概要を示す．あしあとランプはバスに車載機，バス停に表示機を設置する．バス車載機から定期的に送信される電波を受信した表示機は，通過マークとランプを 10 分間点灯させることでバスが通過したことを表示する．あしあとランプは 315MHz 帯の特定小電力無線を使用しており，通信コストは発生しない．また，表示機は単 1 乾電池 2 本で約 1 年間動作することから，手軽に導入でき，かつ運用コストを安く抑えることができる．あしあとランプは

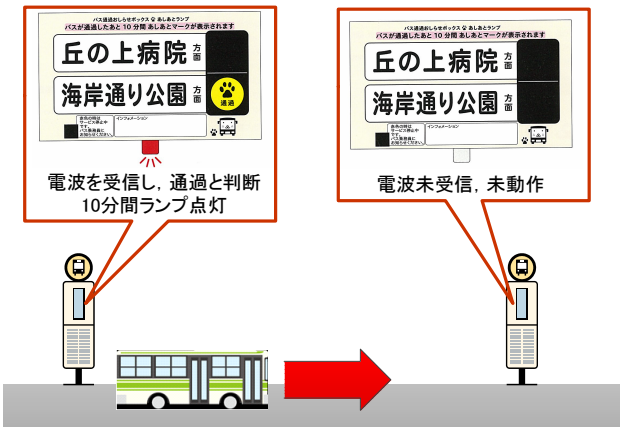


図 2 あしあとランプの基本動作
Fig. 2 Basic operation of Ashiato-lamp.

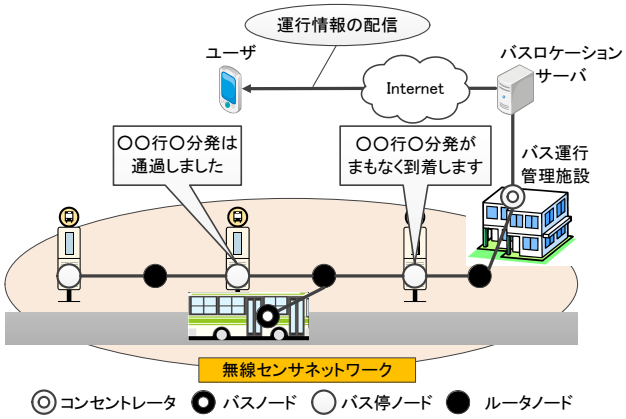


図 3 無線センサネットワークを用いたバスロケーションシステムの概要
Fig. 3 Overview of bus location system using wireless sensor network.

青森県三沢市コミュニティバス「みーばす」[9] や，岐阜県関市「関シティバス」[10] などのコミュニティバスで導入されている．

あしあとランプでは接近通過情報をバス停や待合室に設置した表示機でのみ提供している．そのため，バス利用者はバス停まで行かなければバスの接近や通過情報を確認することができない．また，バスの位置情報を収集しないため，遠方のバス停では運行状況を確認することができない．

3. 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

3.1 システム概要

既存のバスロケーションシステムにおける課題を解決するため，筆者らは低コスト・低消費電力が特徴である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を提案している [5] [6]．**図 3** に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概要を示す．このシステムでは，バス運行管理施設，バス，バス停，バス路線沿い

© 2013 Information Processing Society of Japan

Vol.2013-MBL-68 No.11
Vol.2013-ITS-55 No.11
Vol.2013-DCC-5 No.11
2013/11/14

の電柱や街路灯に IEEE802.15.4 [11] 準拠の小型無線センサノードを設置し，広域無線センサネットワークを構築する．これらのセンサノードをそれぞれコンセントレータ，バスノード，バス停ノード，ルータノードと呼称する．バスノードは現在位置を記載した位置情報フレームをコンセントレータへ送信する．無線センサネットワークは省電力を実現するため，通信距離が短い．そのため近隣のルータノードはバスノードが送信したフレームを受信し，マルチホップ通信によりコンセントレータまで中継する．コンセントレータは受信した位置情報を接続しているバスロケーションサーバに蓄積する．バスロケーションサーバは蓄積した位置情報と時刻表などからバスの遅延状況などを含んだ運行情報を生成する．この運行情報をコンセントレータから無線センサネットワークを経て各バス停ノードに配信したり，インターネットを通じて利用者の携帯端末などに提供する．バス停ノードはコンセントレータから配信された運行情報などを受信して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する情報は運行情報だけでなく，地域のイベント情報やバス停周辺の案内情報などの配信も行う．

バスの位置情報の収集，運行情報の配信に無線センサネットワークを用いることから，GPS とセルラー網を用いたバスロケーションシステムで発生していた通信コストが発生せず，低運用コストでシステムを運用することが可能である．また，すべてのバスの位置情報をバスロケーションサーバに収集し，インターネットを通じた情報発信が可能であるため，バス利用者はいつでもどこからでもバスの運行状況を確認することができる．

3.2 接近通過判定方法

バス停はバスロケーションサーバから送信された運行情報を受信することにより情報提供することが可能である．しかし，無線通信区間におけるフレーム欠損やセンサノードの故障などにより，情報提供の失敗やタイミングにずれが生じることが考えられる．そこで，バス停でリアルタイムに情報提供が必要なバスの接近通過情報については，バスから発せられる電波の RSSI からバス停が自立的に判断して情報提供することを想定している [12]．

3.2.1 距離減衰モデルの作成

バスの接近通過判定を行うための事前準備として，各バス停における距離減衰モデルを作成する．まず，バス停ノードから一定間隔にセンサノードを配置し，センサノードから発せられる電波の RSSI を多数測定する．バス停から距離 d[m] 離れた地点における RSSI を P_d[dBm] とすると，**図 4** のように一般的に RSSI と距離は反比例の関係にある．その関係式は式 (1) で表すことができる [13]．

$$P_d = \alpha d^{-\beta} \tag{1}$$

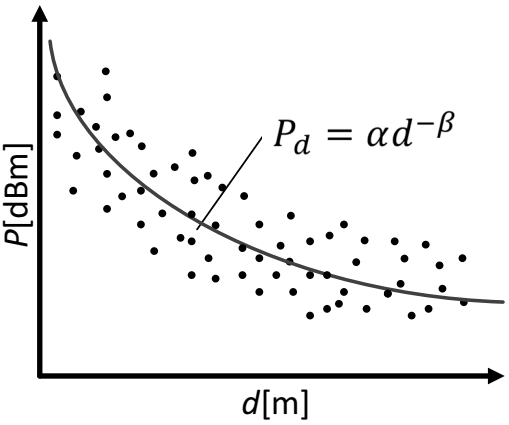


図 4 距離減衰モデル
Fig. 4 Distance attenuation model.

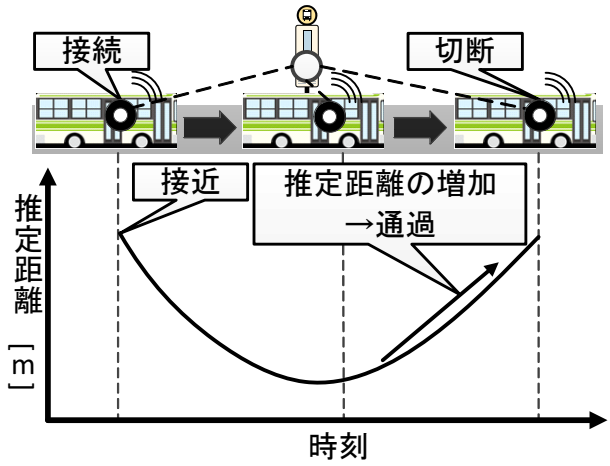


図 5 バスの接近通過判定の原理
Fig. 5 A principle of the judgment in the approaching and passing bus.

式 (1) の係数 α および減衰係数 β は，事前測定した RSSI より，最小二乗法を用いて決定し，個々のバス停の距離減衰モデルを作成する．生成した距離減衰モデルを用いることにより，バス停ノードはバスノードが定期的に送信する位置情報フレームを受信した際の RSSI からバスとの距離を推定する．距離減衰モデルは同じ距離の RSSI を多数測定することにより，精度よく距離を推定することが可能となる．しかし，バス停周辺の電波環境は交通量の影響によって大きく変化する．その結果，バス停が位置情報フレームを受信した際の RSSI が大きく変動し，距離推定の精度が低下することが考えられる．

3.2.2 バスの接近通過の判断

図 5 にバスの接近通過時の時間推移のイメージ図を示す．バスがバス停に接近し，バス停ノードが位置情報フレームを受信すると，バスの接近と判断する．接近判定後，事前に作成したバス停ノード周辺の距離減衰モデルを使用して，バス，バス停間の距離を推定する．バスがバス停に徐々に接近すると RSSI が増加し，推定距離が減少する．

© 2013 Information Processing Society of Japan

Vol.2013-MBL-68 No.11
Vol.2013-ITS-55 No.11
Vol.2013-DCC-5 No.11
2013/11/14

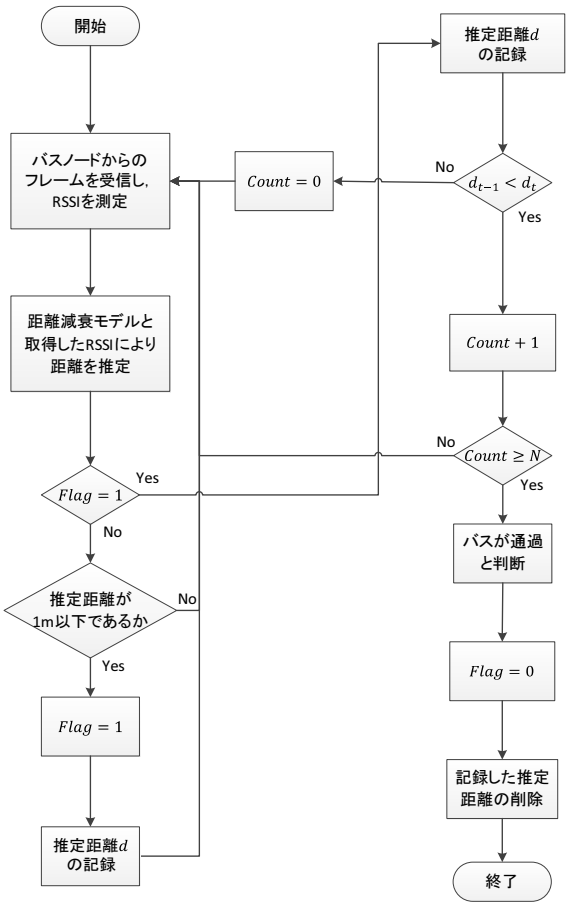


図 6 通過判定フローチャート
Fig. 6 Passing judgment flowchart.

一方，バスがバス停を通過すると RSSI が減少し，推定距離は増加する．したがって，バス・バス停間の推定距離が 0m の付近から徐々に増加する場合を通過と判断する．判定のためのフローチャートを**図 6** に示す．この通過判定方法では，推定距離 1m 以下になった場合，通過判定処理を開始し（$Flag = 1$），時刻 t における推定距離 d_t と時刻 $t-1$ における推定距離 d_{t-1} を比較する．この比較を繰り返し，d_t が d_{t-1} より大きい場合を N 回連続で繰り返した場合に，バスが通過したと判断する．この手法により，各バス停が自立的に接近通過をリアルタイムに判断し，接近通過情報の提供が可能となる．

4. 基礎的な通過判定実験

本方式では RSSI を用いてバスノード・バス停ノード間の距離を推定している．しかし，RSSI は人が多く存在する環境や交通渋滞が発生する環境では同じ距離でも大きく変動し，同時に推定距離も変動する．そのため，推定距離の増加を検出できず，正しく通過判定を行うことができない可能性がある．したがって，RSSI をフィルタリングして平滑化することにより，推定距離の変動を抑制する必要がある．

文献 [14] では，歩行者と自転車の衝突事故を防止するために，無線タグの RSSI を用いて近接検出を行うシステムが提案されており，RSSI をフィルタリングすることにより近接精度を向上できるとしている．例えば，障害物がない理想的な環境や交通量が多い場所では，指数加重移動平均で重み付けした n 個の観測 RSSI データの平均（式 (2)，式 (3)）が有効であることを示している．以降，このフィルタリング方式を RSSI フィルタリングと呼称する．

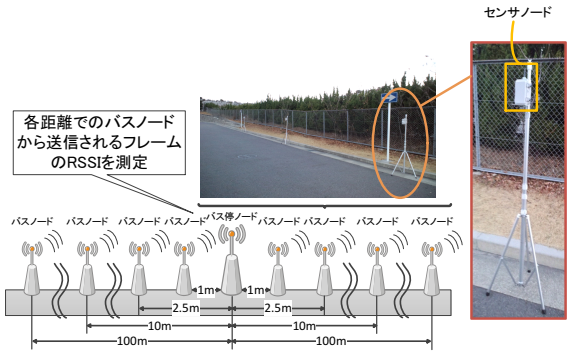


図 7 センサノードの設置構成
Fig. 7 Installation configuration of sensor nodes.

$$EM_t = (1-c)EM_{t-1} + cRSSI_t \quad (2)$$

$$WE_t = (EM_{t-(n-1)} + \cdots + EM_t)/n \quad (3)$$

筆者らが提案しているバスロケーションシステムはコミュニティバスへの導入を考えており，バスは田畑のみで障害物の存在しない場所や，市街地などの交通量が多い場所を走行することが想定される．そこで，この RSSI フィルタリングを適用することにより，バスの通過判定精度がどの程度向上するかを基礎的な通過判定実験により検証する．

4.1 実験方法

図 7 に実験構成を示す．今回，名城大学天白キャンパス内において実験を行った．センサノードには東京コスモス電機株式会社の TWE-001 STRONG[*1] を採用し，これを格納した防塵防止ボックスを三脚に取り付けた．これらをバス停ノードおよびバスノードとする．バスノードはバス停ノードから 10m 以内のエリアにおいて，バス停ノードから 1m，2.5m，5m，7.5m，10m の位置に設置し，バス停ノードから 10m 以上離れたエリアには 10m 間隔で配置した．バス停ノードは各電波送信用センサノードから 1 秒毎に送信されるフレームを受信し，その時の RSSI を 30 分間測定し，距離減衰モデルを作成する．

次に，筆者がバスノードを持ち，徒歩でバス停ノードに接近し，バス停ノード通過後に離反するという実験を 5 回行った．このときバス停ノードで観測した RSSI と，生成

[*1] http://tocos-wireless.com/jp/

© 2013 Information Processing Society of Japan

Vol.2013-MBL-68 No.11
Vol.2013-ITS-55 No.11
Vol.2013-DCC-5 No.11
2013/11/14

表 1 RSSI フィルタリング適用時における推定距離の平均誤差と最大誤差（$c = 0.3$）
Table 1 Average and maximum estimated distance errors in the case of applying the RSSI filtering ($c = 0.3$).

n	実測データ	2	3	4	5	6	7	8	9
平均誤差 [m]	18.8	15.0	14.9	14.9	14.8	14.8	14.7	14.8	14.9
最大誤差 [m]	203	58.8	58.2	58.1	58.1	57.7	56.9	56.2	56.1

表 2 RSSI フィルタリング適用時における推定距離の平均誤差と最大誤差（$n = 2$）
Table 2 Average and maximum estimated distance errors in the case of applying the RSSI filtering ($n = 2$).

c	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
平均誤差 [m]	15.7	15.0	15.0	15.2	15.6	16.1	16.3	16.8	16.9
最大誤差 [m]	60.1	59.3	58.8	59.1	61.9	63.5	65.6	70.5	74.4

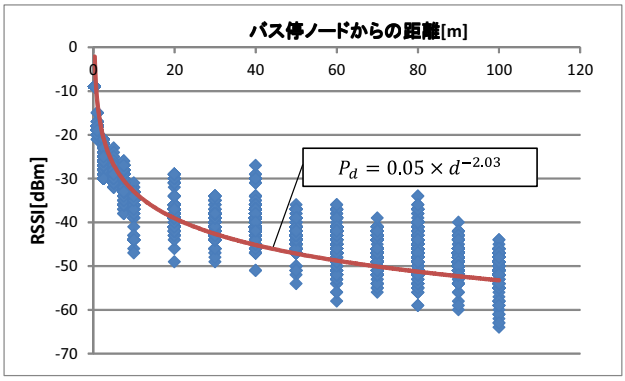


図 8 学内における距離減衰モデル
Fig. 8 The distance attenuation model in the campus.

した距離減衰モデルを用いてバスとバス停間の距離を推定する．ここで，測定した RSSI は RSSI フィルタリング未適用の実測データと RSSI フィルタリングの適用により平滑化したデータの 2 パターンで検証する．また，式 (2)，(3) の c を 0.1〜0.9，n を 2〜9 まで変化させ，c，n の最適値を検証する．その後，前述の通過判定方法を適用し，実測データと RSSI フィルタリングの適用により平滑化したデータの 2 種類とし，それぞれのデータから算出した推定距離を通過判定の検証を行う．

4.2 バス停ノード付近のモデル生成

図 8 にバス停ノードから 100m 以内のエリアにおける RSSI と距離の関係を示す．距離減衰モデルを式 (4) に示す．図 8 を見ると，バス停ノードから 10m 以上離れた距離からの RSSI は同じ距離でも大きく増減している．これは実験場所の道路を通過した自動車や，建物による送信フレームの反射の影響であると考えられる．

$$P_d = 0.05 d^{-2.03} \tag{4}$$

4.3 フィルタリングの最適パラメータ

文献 [14] 内では，障害物がない理想的な環境や交通量が多い場所等では $c = 0.3$ とした場合に近接検知精度が良いと述べている．よって，$c = 0.3$ に固定し，n を 2〜9 まで変化させ，距離の推定を行った．バスノード移動時の推定距離と実距離との差の絶対値の平均（平均誤差）と推定距離と実距離との差の絶対値の最大（最大誤差）を**表 1** に示す．表 1 より，平均誤差は $n = 7$ の時に，最大誤差は $n = 9$ の時にそれぞれ最小となっていた．これは c の値を変化させた場合も同様であった．この結果から，n の値が大きい場合に推定精度が良いことが分かる．しかし，n の値を大きくすると，推定距離の算出に要する時間が長くなり，通過判定情報を表示するタイミングが遅れてしまう．一方，バスの通過判定という目的を鑑みると，表 1 より $n = 2$ から $n = 9$ の範囲の誤差の違いはほとんど影響がないと考えられる．そのため，通過判定のリアルタイム性を重視して，$n = 2$ を採用する．次に，$n = 2$ のとき，c を 0.1〜0.9 まで変化させた時のセンサノード移動時の推定距離の平均誤差と最大誤差を**表 2** に示す．表 2 より，$c = 0.3$ のときに平均誤差と最大誤差がいずれも最小となっていることが分かる．以上の結果より，$n = 2$，$c = 0.3$ を最適なパラメータとして設定する．

4.4 フィルタリングの適用効果と考察

図 9 にバスノードの移動に伴う推定距離の時間推移を示す．図 9 より，RSSI フィルタリング適用時は実測データ利用時に比べ，推定距離と実距離の誤差が減少していることが分かる．**表 3** に N の回数別の通過と判定した時のバスノード・バス停ノード間の実距離を示す．実測データにおいて N の値が小さい場合，バスに見立てた歩行者が接近しているにもかかわらず，通過を判定してしまうケースが見られた．これは**図 10** のようにバスノードとバス停ノード間の実距離は減少していても，推定距離が増加している

© 2013 Information Processing Society of Japan

Vol.2013-MBL-68 No.11
Vol.2013-ITS-55 No.11
Vol.2013-DCC-5 No.11
2013/11/14

表 3　通過判定時のバスノード・バス停ノード間の実距離の比較
Table 3　Comparison with the real distance between the bus node and the bus stop node at the time of the bus passing determination.

N	2	3	4	5	6	7	8	9
実測データ [m]	0（接近中）	4.5	6	29	30.5	32	判定不可	判定不可
RSSI フィルタリング適用時 [m]	1.5	3	4.5	6	7	8.5	10	11

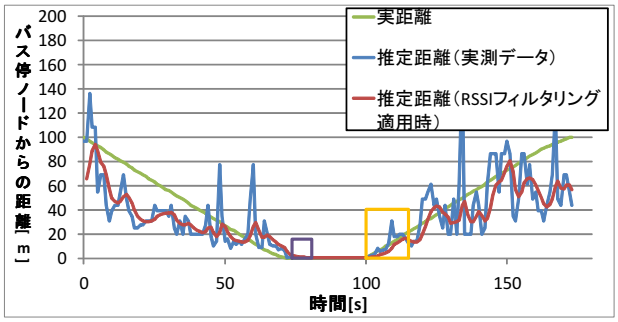


図 9　バスノードの移動に伴う推定距離の時間推移
Fig. 9　Time transition of estimated distance associated with movement of the bus node.

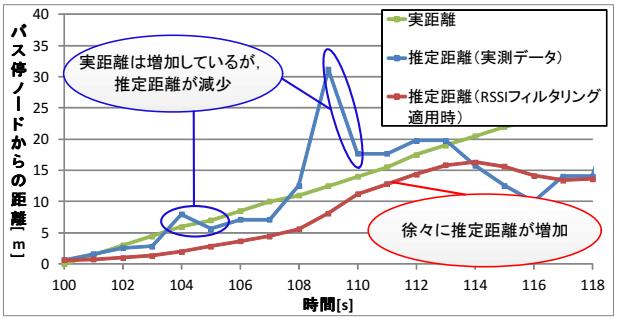


図 11　図 9 のバスノード離反時の拡大図
Fig. 11　Enlarged view of when the bus node is leaving in Figure 9.

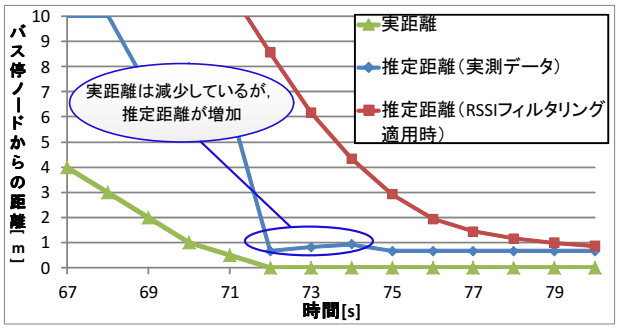


図 10　図 9 のバスノード接近時の拡大図
Fig. 10　Enlarged view of when the bus node is approaching in Figure 9.

場合に発生する．N の値が大きい場合，**図 11** のように，推定距離 0m 付近から連続して増加を検出できず，判定が遅れる，または判定できない場合が存在する．一方，RSSI フィルタリングを適用した場合，推定距離 0m から徐々に推定距離の増加を繰り返し，通過を判定することが可能である．以上のことから，RSSI フィルタリングにより，通過判定精度が向上したと言える．

実際のバス路線において，バス停における通過情報はバスが次に停車するバス停へ送信することを想定しているため，バス停はできる限りリアルタイムにバスの通過を判断する必要がある．少なくとも，バス・バス停間の距離 50m 以内にバスの通過を判断できることが望ましい．バスは約 30〜40km/h で走行している場合，1 秒間に約 10m 前進する．したがって，実環境において通過判定閾値 $N = 4$ が適切な閾値のパラメータであると考えられる．

5. まとめ

本稿では，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のために，RSSI をフィルタリングにより平滑化することを検討し，名城大学キャンパス内で徒歩による基礎的な通過判定実験を行った．実験の結果より，RSSI をフィルタリングした場合，通過判定の精度が向上することを確認した．今後は実際のバス路線において距離減衰モデルを作成し，バス停周辺が田畑のみの環境や市街地等の様々な環境でバスの通過判定の検証を行う．

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．

参考文献

[1] 高度道路交通システム ITS-国土交通省道路局：http://www.mlit.go.jp/road/ITS/j-html/now/sisaku/koukyou/busLocation-system.html.
[2] バスロケーションシステム:導入事例 —NEC ネクサソリューションズ：http://www.nec-nexs.com/solution/case/iyobus.html.
[3] 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 REPORT*, Vol. 9, pp. 33–38 (2009).
[4] あしあとランプ-ITS アライアンス株式会社：http://www.its-alliance.jp/ashiato_lamp/.
[5] 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，土木計画学研究発表会・講演集，Vol. 47, No. 143, pp. 1–8 (2013).
[6] 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），Vol. 2013, pp. 904–910 (2013).

© 2013 Information Processing Society of Japan

[7] 京都市交通局： http://www.city.kyoto.lg.jp/kotsu/.
[8] 秋田中央交通： http://www.akita-chuoukotsu.co.jp/.
[9] 青森県三沢市： http://www.city.misawa.lg.jp/.
[10] 岐阜県関市： http://www.city.seki.lg.jp/.
[11] IEEE802.15.4:http://www.ieee802.org/15/pub/TG4.html.
[12] 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の通過判定手法の検証，情報処理学会全国大会講演論文集，3V-6, Vol. 75, No. 3, pp. 137–138 (2013).
[13] 原 晋介：位置推定における統計的推定理論，*IEICE Fundamentals Review*, Vol. 4, No. 1, pp. 32–37 (2010).
[14] Keiichi Nakamura, Masato Kamio, Tetsushi Watanabe, Shinsuke Kobayashi, Noboru Koshizuka, Ken Sakamura: Reliable Ranging Technique based on Statistical RSSI Analyses for an Ad-hoc Proximity Detection System, *The 5th IEEE Workshop on Pervasive Wireless Networking (PWN09)*, pp. 1–6 (2009).

© 2013 Information Processing Society of Japan