

MANET における位置依存情報保持手法の提案

内 田 達 哉^{†1} 桧 垣 博 章^{†1}

無線マルチホップネットワークにおいて位置依存情報をその位置の近傍に保持することと送信先を位置で指定することが可能なアドホックルーティングプロトコルとを組合せることによって、位置依存情報分散保持手法が実現できる。ここで、情報を依存位置の近傍に維持するために固定無線ノードを用いない手法として、移動無線ノード間で情報を転送することで、位置依存情報を維持したい領域に含まれるいずれかの移動無線ノードにこの情報を保持させる手法を提案する。提案手法では、位置依存情報を維持したい領域、位置依存情報を保持する移動無線ノードが隣接移動無線ノードへ情報を転送することが可能な領域、位置依存情報を移動無線ノードが保持することが可能な領域を定め、3つの異なる転送条件のいずれかと組み合わせることによって、通信オーバーヘッドと情報を保持する移動無線ノード数、情報保持率との適切なトレードオフを実現することが可能となる。

Storing Method of Location-Dependent Information in MANET

TATSUYA UCHIDA^{†1} and HIROAKI HIGAKI^{†1}

For wireless multihop networks, various location-dependent routing protocols in which a destination of a message is specified by its location have been proposed. By combination of these routing protocols and a method which keeps location-dependent information in its specified area, a low overhead method for storing and retrieving location-dependent information is realized. In our proposed method, the following three areas are determined for each location-dependent information; information maintaining area in which the location-dependent information is required to be kept, information forwarding area in which mobile wireless nodes forward the location-dependent information to its neighbor mobile wireless nodes and information holding area only in which mobile wireless nodes hold the location-dependent information. In addition to the above three areas, we also propose three different conditions for each mobile wireless node to forward location-dependent information to its neighbors. By various combination of the determination of these areas and the forwarding conditions, it is possible for wireless multihop networks to achieve tradeoff among communication overhead for transmission of location-dependent information, storage overhead in mobile wireless nodes and availability of the location-dependent information.

1. 背景と目的

近年、GPS等の位置取得デバイスの普及により、位置を属性とする情報の取得、保持、検索、処理への要求が高まっている。実世界コンピューティング¹⁵⁾やセンサネットワーク³⁾では、センサノードが取得した情報をセンサ位置とともに保持し、これを検索、処理の対象としている。また、ユーザの現在位置や移動履歴等に基づいた将来の移動予測位置に基づいて、ユーザが要求する情報を位置属性に基づいて検索、提供するネットワークサービスが多数考案され、その実現技術が検討されている。

一方、無線通信デバイスを搭載した移動コンピュータは既に広く普及している。そこで、移動無線ノードのみで構成され、基地局や有線ネットワークなどのインフラを必要としない無線モバイルアドホックネットワークの研究開発が進められている¹⁴⁾¹²⁾。ここでは、メッセージは無線マルチホップ通信によって送信元無線ノードから送信先無線ノードへと配送される。これまでに、メッセージのルーティングプロトコルが多数提案されている。移動無線ノードへ位置取得デバイスが搭載されていることを前提としたプロトコルとしてLAR⁷⁾、ZRP⁴⁾、GPSR⁶⁾、GEDIR⁸⁾、FACE²⁾等が提案されており、フラッディングを基礎としたAODV¹³⁾、DSR⁵⁾等のプロトコルに比べて無線通信オーバーヘッド削減の利点を有している。

このように、情報が位置属性を備えていることと位置に基づいてメッセージを配送する手法が確立しつつあることから、情報をその属性として持つ位置に保持し、その情報の取得要求メッセージをその情報の位置に向けてルーティングする手法が考えられる。この手法は、すべての情報を特定サーバに保持する方法に比べ、その配送オーバーヘッドの削減と取得要求の分散を実現できる点で優れている。ただし、一般に情報が属性として持つ可能性があるすべての位置に固定無線ノードを設置することは困難である。時々刻々と位置を変化させる移動無線ノードで構成される無線アドホックネットワークにおいて、情報をそれが属性として持つ位置の近傍に存在し続けさせることによって、情報の取得要求を情報を保持する移動無線ノードへと配送し、取得要求した移動無線ノードに情報を提供することが可能となる。そこで、本論文では、無線マルチホップネットワークによって、位置を属性として持つ情報をその位置近辺に存在する移動無線ノードが保持する手法を提案する。

2. 関連研究

情報 I には位置属性 $L(I)$ が付随することが考えられる。このような情報は位置依存情報とよばれる。 I の発生位置は $L(I)$ のひとつの典型である。たとえば、センサノードが取得したセンシングデータ I は位置依存情報であり、その取得位置 $L(I)$ は I の重要な属性で

^{†1} 東京電機大学大学院未来科学研究科ロボット・メカトロニクス学専攻
Department of Robotics and Mechatronics, Tokyo Denki University

ある．情報の位置属性は，しばしば情報検索のキーとして用いられる^{*1}．すなわち，位置 L を属性として持つ情報の取得がユーザによって要求される．ネットワーク環境においては，位置 L を属性として持つ情報を保持するノードにこの取得要求をルーティングすることが必要である．複数の移動無線ノードで構成され，メッセージを無線マルチホップ通信によって配送するアドホックネットワーク，センサネットワーク，メッシュネットワークなどの無線マルチホップネットワークでは，送信元無線ノードから送信先無線ノードへのメッセージ配送を実現するためのルーティングプロトコルが重要であり，これまでに多数のプロトコルが提案されている．AODV¹³⁾ や DSR⁵⁾ 等のフラッドングを基礎としたアドホックルーティングプロトコルは，各移動無線ノードの位置情報を用いずにメッセージを配送するルーティングプロトコルである．これに対して，LAR⁷⁾，ZRP⁴⁾，GPSR⁶⁾，GEDIR⁸⁾，FACE²⁾ 等は，各無線ノードが自身の位置を自身に搭載された GPS 等の位置情報取得デバイスによって取得可能であることを前提としたプロトコルであり，通信オーバーヘッドの削減が期待できる．これらのプロトコルでは，送信先無線ノードの特定を IP アドレス等の識別子によって行なうことが前提とされている．そのため，送信先無線ノードの識別子と位置情報との対応手法が別途必要となり，DREAM¹⁾，Octopus⁹⁾，HRLI¹⁰⁾，ABLA¹¹⁾ 等の手法が提案されている．ただし，位置情報を用いたルーティングプロトコルでは，送信元移動無線ノードが指定した位置（範囲）にメッセージ到達時に存在する無線ノードを動的に送信先無線ノードと定めることによって，送信先無線ノードを位置（範囲）で指定することも原理的に可能である．そこで，無線マルチホップネットワークにおいて，情報をその属性が示す位置に保持し，送信先を位置で指定した情報取得要求メッセージを無線マルチホップ配送する分散保持手法が考えられる．この手法は，取得要求された情報のみを配送する点，情報取得要求が分散する点において，単一固定無線ノードに情報を保持する集中保持手法よりも優れている（図 1，2）．

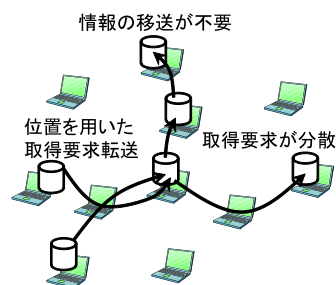


図 1 分散保持手法

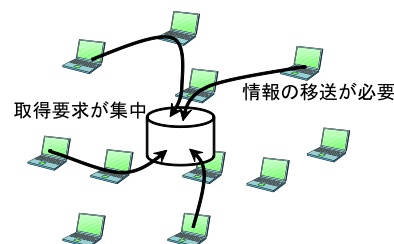


図 2 集中保持手法

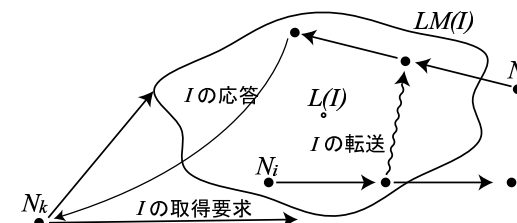


図 3 無線ノード群による位置依存情報保持手法

この分散保持手法においては，情報 I の取得要求をその位置属性 $L(I)$ に基づいて配送する．このため位置 $L(I)$ に情報 I を保持する無線ノードが存在することが必要である．論文¹⁶⁾ では，対象領域を格子状に分割し，各領域に情報管理ノードを設置し，領域の隣接性を考慮することによって探索時間を短縮する P2P ルーティングを提案している．しかし，一般にオンデマンドに生成される情報 I に対して，各 $L(I)$ に I を保持するための固定無線ノードを設置することは困難あるいは不可能である．そこで， $L(I)$ の近傍 $LM(I)$ で定められる位置依存情報維持範囲に存在する移動無線ノードに I を保持し，情報 I の取得要求は $LM(I)$ に含まれる移動無線ノードへ無線マルチホップ配送することが考えられる．このとき，無線ノードの位置は経時的に変化することから，情報 I を保持する無線ノードが $LM(I)$ の内部から外部へと移動することがある．その一方で，情報 I を保持しない無線ノードが $LM(I)$ の外部から内部へと移動することもあることから，移動無線ノード間で情報 I を転送することによって，情報 I を保持する無線ノードを $LM(I)$ 内部に存在させ続け，情報 I の取得要求に応答することが考えられる．

論文¹⁸⁾ では，情報維持範囲内に存在する位置依存情報を保持する移動無線ノードが情報維持範囲外へ移動する際に隣接無線ノードのひとつに保持する位置依存情報を転送することで，位置依存情報を情報維持範囲内の移動無線ノードに保持させ続ける Nomadic Agent System を提案している．ここでは，情報を保持する無線ノードと情報取得を要求する無線ノードとがいずれも情報維持範囲に含まれている比較的狭域分布する無線ノード群からなるネットワークを想定している．また，移動無線ノードに搭載された記憶領域が限られていることを考慮して，位置依存情報を保持する無線ノード数を制限し，情報の転送先となる隣接無線ノードの選択手法による情報維持時間（位置依存情報を情報維持範囲内のいずれかの無線ノードが保持している時間）の違いを評価している．本論文では，情報取得を要求する移動無線ノード位置は，情報維持範囲とは無関係である場合を想定する．

一方，論文¹⁷⁾ では，取得要求メッセージが位置で指定された送信先へ配送される無線マルチホップルーティングを適用することを前提とし，情報取得率の向上と情報取得のための通信オーバーヘッドを削減するための複製情報配置手法および再配置手法を提案している．ここでは，移動無線ノードに搭載された記憶領域が限られていることを考慮して，隣接無線

*1 情報の時間属性も同様に検索のキーとして用いられる．

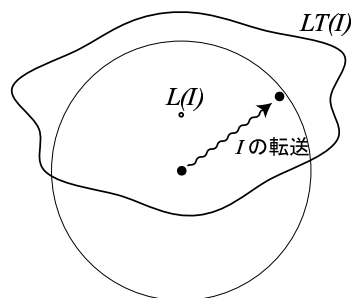


図 4 位置依存情報転送領域 $LT(I)$

ノードには複製情報を配置しない SC (Skip Copy) 手法を提案している。また、各無線ノードが保持する位置依存複製情報は、無線ノードの現在位置と情報が属性として持つ位置との距離によって優先度付けられ、破棄される。このため、複製情報は情報が属性として持つ位置に比較的近くに分布する傾向となる。本手法では、複製情報を保持する移動無線ノードは、情報が属性として持つ位置から複数ホップに広がる比較的広い領域を想定しており、より少ない複製数で高い情報取得率を実現することを目的としている。このため、本論文で提案する位置依存情報を定められた範囲に維持する手法とは異なるアプローチによるものであるといえる。

3. 提案手法

位置依存情報 I をその位置属性 $L(I)$ に基づいて定められる情報維持範囲 $LM(I)$ 内に保持する手法を提案する。ここでは、情報維持範囲 $LM(I)$ が論文¹⁷⁾の複製情報が分布する範囲に比べて狭い領域を想定することから、位置依存情報 I を保持する移動無線ノード数は領域の広さで制約されると考えられる。すなわち、論文¹⁸⁾のように I を保持する移動無線ノード数の上限を明確に規定しない。ただし、論文¹⁷⁾で主張されているように、移動無線ノードが位置依存情報を保持するための記憶領域は限られていること、位置依存情報の取得要求はその情報が属性として持つ位置を送信先として無線マルチホップ配送されることから、以下のことが言える。

- 各移動無線ノードが保持する位置依存情報を隣接移動無線ノードに転送する領域 $LT(I)$ が規定されるべきである。この領域外部に存在する移動無線ノードは、保持する位置依存情報 I を隣接移動無線ノードへ転送しない (図 4)。
- 各移動無線ノードが位置依存情報を保持し続ける領域 $LH(I)$ が規定されるべきである。この領域外部へ移動した移動無線ノードは、保持する位置依存情報 I を破棄する (図 5)。このとき、 $L(I) \in L'(I)$ であり、 $L'(I) \subset LH(I)$ かつ $LT(I) \subset LH(I)$ であるが、 $L'(I)$ と

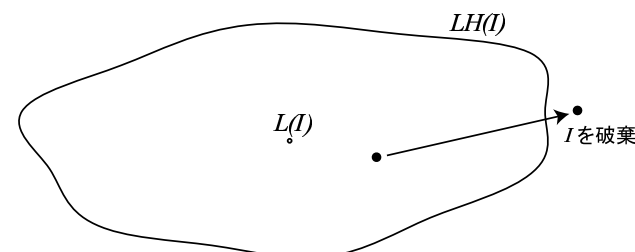


図 5 位置依存情報保持領域 $LH(I)$

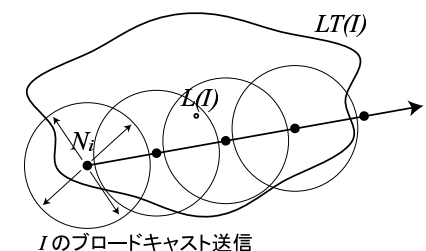


図 6 周期的送信手法

$LT(I)$ との間では包含関係を規定することはできない。

位置依存情報 I を保持する移動無線ノードは、位置依存情報転送領域 $LT(I)$ に含まれている場合に隣接移動無線ノードに対して I をブロードキャスト送信する。この送信タイミングの決定手法として、本論文では以下の 3 つを提案する。

[周期的送信手法] 位置依存情報 I の取得時刻から周期 T で I のブロードキャスト送信を繰り返す手法である。 I を保持する移動無線ノードは、自身が $LT(I)$ に含まれる間、隣接移動無線ノードが存在するか否か、変化するか否かに関わらず周期的にブロードキャスト送信するため通信オーバーヘッドは比較的大きくなることが考えられる一方、移動無線ノードの移動速度に対して送信周期 T が大きすぎなければ、 I が $LM(I)$ に長時間維持されることが期待される。(図 6)

[退出時送信手法] 位置依存情報 I を保持した移動無線ノードが $LT(I)$ の内部から外部へと移動する直前に I をブロードキャスト送信する。 I を保持した移動無線ノードが $LT(I)$ に留まる間はブロードキャスト送信しないことから、通信オーバーヘッドの削減が期待される。ただし、ブロードキャスト送信時に隣接移動無線ノードが存在するとは限らないことから、移動無線ノード分布密度が低い場合には I を $LM(I)$ に長時間維持することが困難となるこ

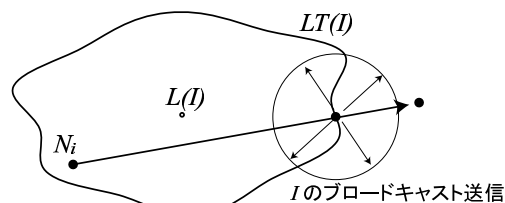


図7 退出時送信手法

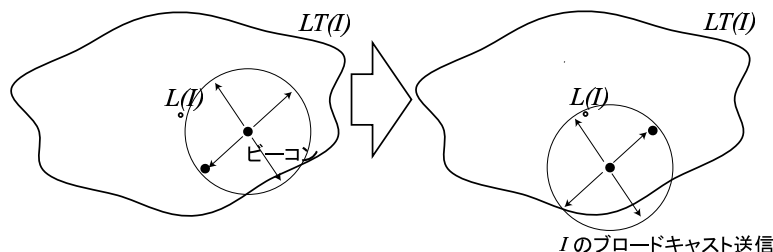


図8 要求応答送信手法

とが考えられる。(図7)

[要求応答送信手法] 各移動無線ノードが自身が保持する位置依存情報 I の識別子を含むビーコンメッセージを周期的にブロードキャスト送信し、これを受信した隣接移動無線ノードがビーコンメッセージに識別子が含まれない位置依存情報を保持している場合には、これをブロードキャスト送信する手法である。 I の転送に要する通信オーバーヘッドが大きい場合には、周期的送信手法の欠点を補う手法となる。(図8)

これらの手法のいずれがより有効に機能するかは、移動無線ノードの分布密度と移動速度、移動頻度といった無線マルチホップネットワークの環境要因と、位置依存情報の維持領域、転送領域、保持領域の大きさと移動無線ノードの無線信号到達範囲との関係というプロトコルのパラメータ要因に依存すると考えられる。

4. 評価

前章で述べたように、位置依存情報を情報維持範囲にあるいずれかの移動無線ノードが保持し続ける位置依存情報維持時間と位置依存情報転送に要する通信オーバーヘッドとは、移動無線ノードの分布密度と移動速度、移動頻度といったネットワーク環境要因と、位置依存情報の維持領域、転送領域、保持領域の大きさと移動無線ノードの無線信号到達範囲の

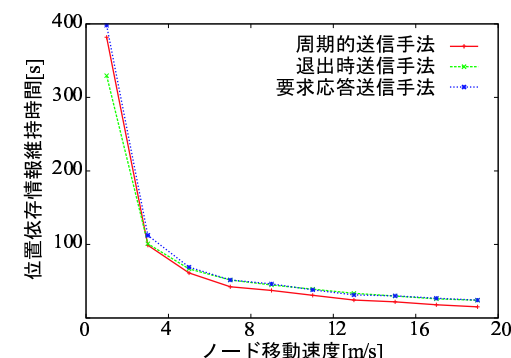


図9 ノード移動速度を変化させた環境における位置依存情報維持時間

大きさとの関係を表すプロトコルパラメータ要因に依存する。そこで、これらの要因を変化させた場合の3つの転送手法の性能をシミュレーション実験によって評価する。ここでは、1,000m 四方の正方形領域に無線信号到達距離 100m、最大移動速度を 2m/s から 20m/s、最低移動速度を 0m/s から 18m/s までそれぞれ 2m/s 刻みで変化させ、ランダムウェイポイントモデルにより移動する 100 台の無線ノードをランダムに配置し、それぞれの手法について位置依存情報を保持した移動無線ノードが位置依存情報維持範囲に含まなくなるまでの時間である位置依存情報維持時間と平均位置依存情報保持ノード数、位置依存情報転送回数を測定した。また、位置依存情報転送範囲を正方形領域の中心点を中心とし、半径 50m の円領域とした。また、位置依存情報保持範囲と位置依存情報維持範囲は正方形領域の中心点を中心とした半径 100m の円領域とした。移動無線ノードは位置依存情報保持範囲の外側に移動したとき、自身の保持する位置依存情報を破棄する。本シミュレーション実験では周期的送信手法の位置依存情報のブロードキャストする周期を 1s、退出時送信手法について位置依存情報のブロードキャストする範囲の境界線を位置依存情報転送範囲の円周上とした。結果を図9、図10、図11に示す。

位置依存情報維持時間はどの転送手法においてもノードの移動速度が速いほど減少しており、位置依存情報送信手法によらず、ほぼ同等の維持時間となっている。この条件のもとで、平均位置依存情報保持ノード数をみると、退出時送信手法と要求応答送信手法では、移動速度に対して増加する結果を示した。しかし、周期的送信手法では移動速度が速くなるにつれて、平均位置依存情報保持ノード数が減少していく結果となった。また、位置依存情報転送回数については、退出時送信手法と要求応答送信手法は移動速度による値の変化は少ない結果となったが、周期的送信手法は移動速度が速くなるにつれて転送回数が急激に減少していることが分かる。これは、周期的送信手法ではあらかじめ設定した周期ごとに位置依存情報の転送を行なうため、移動速度が速くなるにつれて各移動無線ノードが位置依存情報転

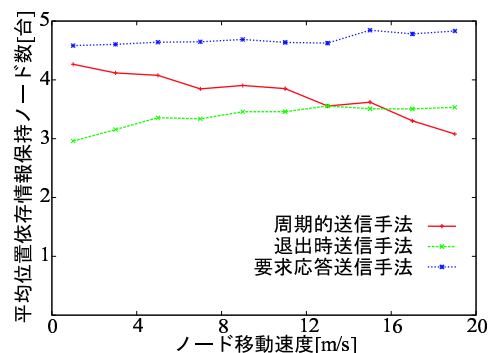


図 10 ノード移動速度を変化させた環境における平均位置依存情報保持ノード数

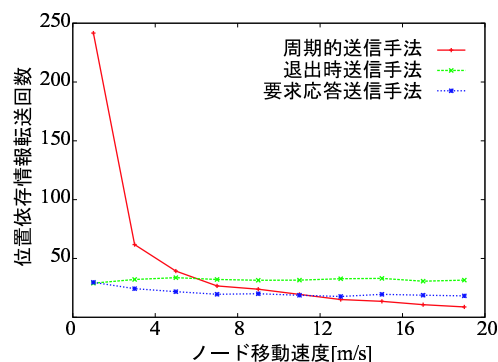


図 11 ノード移動速度を変化させた環境における位置依存情報転送回数

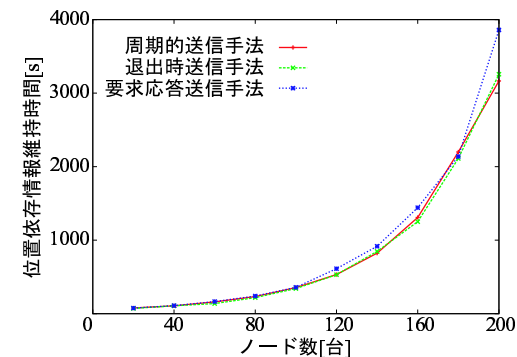


図 12 ノード台数を変化させた環境における位置依存情報維持時間

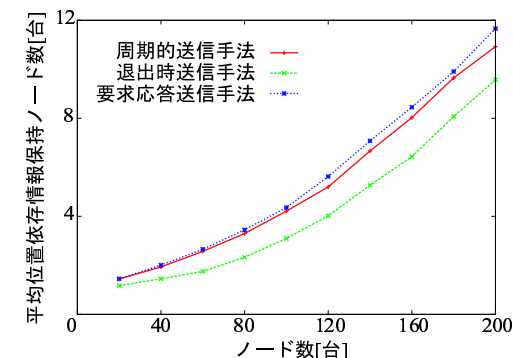


図 13 ノード台数を変化させた環境における平均位置依存情報保持ノード数

送範囲に含まれる時間が短くなり、位置依存情報を転送する機会が減少する。これにより、周期的送信手法は移動無線ノードの移動速度が速い環境において移動無線ノードの記憶容量の圧迫を抑制し、位置依存情報転送のための通信オーバーヘッドが低減される手法であると

いえる。

次に、無線ノードの最大移動速度を 2m/s で固定とし、ノード数を 20 台から 200 台まで 20 台刻みで変化させた環境において測定を行なった。結果を図 12, 図 13, 図 14 に示す。

位置依存情報維持時間はどの転送手法においてもノード数が多いほど増加しており、位置依存情報送信手法によらず、ほぼ同等の維持時間となっている。この条件のもとで、平均位置依存情報保持ノード数をみると、退出時送信手法、周期的送信手法、要求応答送信手法の順に低い値を示した。位置依存情報転送回数については、周期的送信手法、退出時送信手法、要求応答送信手法の順に多い結果となった。周期的送信手法は他の手法と比較してノード数の増加により、位置依存情報転送回数が大幅に増加する結果となった。このため、ノー

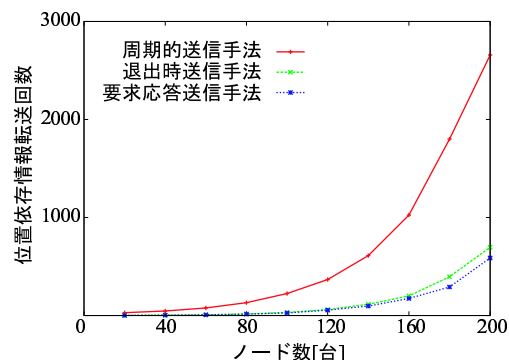


図 14 ノード台数を变化させた環境における位置依存情報転送回数

ド数が多い環境においては位置依存情報転送のための通信オーバーヘッドが大きくなるため、比較的ノード数の低い環境において有効であるといえる。退出時送信手法は平均位置依存情報保持ノード数および位置依存情報転送回数が比較的低い結果となったため、ノード数による影響を受けずに効果的に作用するといえる。要求応答送信手法は2つのシミュレーション環境において、他の2手法と比較し、効果的に作用しなかったといえる。しかし、要求応答送信手法はビーコンメッセージを利用する手法であるため、ビーコンメッセージを受信することにより、確実に位置依存情報の転送を行なうことが可能であるため、適用先環境が不透明である場合に効果的に作用すると考えられる。

5. まとめと今後の課題

本論文では、位置依存情報を定められた範囲に含まれる移動無線ノードに保持させることで、位置依存情報の取得をその位置を送信先とする無線マルチホップ配送によって取得要求メッセージを配送することができる分散型情報保持手法の実現手法を提案した。移動無線ノードの限られた記憶領域に位置依存情報を保持するために、情報維持領域、情報転送領域、情報保持領域の3つを定め、位置依存情報を保持する移動無線ノードが隣接移動無線ノードへブロードキャスト送信する条件を3例示した。シミュレーション実験により、同等の位置依存情報維持時間の実現に要する記憶オーバーヘッドと通信オーバーヘッドを評価し、各手法の特性を明らかにした。今後は適用対象ネットワークの環境パラメータに応じて各手法を動的に選択する基準を明らかにする。

参考文献

- 1) Basagni, S., Chlamtac, I. and Syrotiuk, V.R., "A Distance Routing Effect Algorithm for Mobility (DREAM)," Proceedings of the 4th ACM International Conference on Mobile Computing and Networking, pp.76-84 (1998).
- 2) Bose, P., Morin, P., Stojmenovic, I. and Urrutia, J., "Routing with Guaranteed Delivery in Ad Hoc Wireless Networks," Proceedings of the 3rd ACM International Conference on Discrete Algorithms and Methods for Mobile Computing and Communications, pp.48-55 (1999).
- 3) Culler, D.E. and Hong W., "Wireless Sensor Networks," Communications of the ACM, Vol.47, No.6, pp.30-33 (2004).
- 4) Haas, Z.J., "A New Routing Protocol for the Reconfigurable Wireless Networks," Proceedings of the 6th IEEE International Conference on Universal Personal Communications, pp.562-566 (1997).
- 5) Johnson, D., Hu, Y. and Maltz, D., "The Dynamic Source Routing Protocol (DSR) for Mobile Ad Hoc Networks for IPv4," RFC4728 (2007).
- 6) Karp, B. and Kung, H.T., "GPSR: Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Networks," Proceedings of the 6th ACM International Conference on Mobile Computing and Networking, pp.243-254 (2000).
- 7) Ko, Y.B. and Vaidya, N.H., "Location-Aided Routing (LAR) in Mobile Ad Hoc Networks," ACM Wireless Networks, Vol.6, No.4, pp.307-321 (2000).
- 8) Lin, X. and Stojmenovic, I., "Geographic Distance Routing in Ad Hoc Wireless Networks," Technical Report in University Ottawa, TR-98-10 (1998).
- 9) Melamed, R., Keidar, I. and Barel, Y., "Octopus: A Fault-Tolerant and Efficient Ad-Hoc Routing Protocol," Proceedings of the 24th IEEE International Conference on Reliable Distributed Systems, pp.39-49 (2005).
- 10) Nakagawa, H., Ohta, T., Ishida, K. and Kakuda, Y., "A Hybrid Routing with Location Information for Mobile Ad Hoc Networks," Proceedings of the 8th IEEE International Symposium on Autonomous Decentralized Systems, pp.129-136 (2007).
- 11) Oneda, R. and Higaki, H., "Lower Overhead Location Advertisement in Mobile Wireless Multihop Networks," Proceedings of the 22nd International Conference on Parallel and Distributed Computing Systems (2010).
- 12) Perkins, C.E., "Ad Hoc Networking," Addison Wesley (2001).
- 13) Perkins, C.E. and Royer, E.M., "Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing," RFC3561 (2003).
- 14) Toh, C.K., "Ad Hoc Mobile Wireless Networks," Prentice Hall (2002).
- 15) 大津, "情報処理の新たなパラダイムを目指して," 情報処理, Vol.34, No.12, pp.1423-1428 (1993).

- 16) 小林, バスカラ, 森田, “エリア隣接性を考慮した P2P ルーティング手法の提案,” 信学技報, Vol.110, No.224, pp.39–44 (2010).
- 17) 田森, 石原, 水野, “アドホックネットワークにおける端末の位置を考慮した複製配布方式の評価,” 情処研報, Vol.2001, No.83, pp.135–142 (2001).
- 18) 屋代, La Porta, T.F., “Nomadic Agent System: インフラに依存しない位置情報サービス提供システム,” 情報処理学会論文誌, Vol.46, No.12, pp.2952–2962 (2005).