

2ホップ隣接ノード位置情報によるGEDIRの性能改善

久保 勇暉^{1,a)} 梶垣 博章^{1,b)}

概要：無線マルチホップネットワークにおける無線ノードの移動に対する耐性の高いルーティングプロトコルにGEDIRをはじめとする位置ベースルーティング手法がある。ここでは、隣接移動無線ノードの位置情報に基づいて、送信先移動無線ノードに最も近い隣接移動無線ノードを次ホップとし、データメッセージを転送する。このような局所的な位置情報のみを用いることによって、無線ノード移動への耐性を高めることができるものの、デッドエンドの発生によりデータメッセージ配送に失敗することがある。デッドエンド発生を削減するには、各移動無線ノードの位置情報広告範囲を拡大し、各移動無線ノードがより広域の無線ノード位置情報を取得することが有効であるが、通信オーバーヘッドの拡大と通信遅延による位置情報の不正確さが問題となる。本論文では、 N ホップ隣接移動無線ノードの位置情報により次ホップ隣接移動無線ノードを選択する拡張GEDIRを提案し、その位置情報広告、次ホップノード選択手法を示す。また、シミュレーション実験により N の選択による性能改善を評価し、 $N=2$ とすることが有効であることを示す。

1. はじめに

移動無線ノードから構成される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までの無線マルチホップ配送経路をデータメッセージ配送に先立って検出し、検出した経路を用いてデータメッセージ群を配送する方法では、データメッセージ群の配送終了以前に経路が切断し、経路修復や経路再探索が必要となる。無線ノードの移動に対して耐性のあるルーティング手法として、局所的な位置情報を用いて次ホップ移動無線ノードのみを選択し、保持する配送中データメッセージを転送する位置ベースルーティングプロトコルが提案されている。GEDIR [5]、COMPASS [7]、FACE [1]、GPSR [4]等のプロトコルでは、各移動無線ノードは隣接移動無線ノードの位置情報のみを取得し、送信先移動無線ノードの位置情報から次ホップ移動無線ノードを選択し、データメッセージを転送する。各移動無線ノードがGPSレシーバ等を用いて取得した自身の位置情報を制御メッセージのブロードキャスト送信によって隣接移動無線ノードに通知することで、各移動無線ノードは隣接移動無線ノードの位置情報を取得することができる。ただし、GEDIR、COMPASS等の貪欲プロトコル(Greedy Protocol)では、次ホップ隣接移動無線ノード選択アルゴリズムによる選択が不可能となるデッドエンドが発生する場合がある。このデッドエンド発生を削減は、次ホップ移動無線ノードの選択において、より広域な移動無線ノードの位置情報を取得することによって実現されると考えられるが、各移動無線ノードの位置情報広告を広域化することによって、位置情報の保持と広告に要する通信オーバーヘッドが拡大すること、遠方に位置する移動無線ノードの位置情報は古く、現在位置からの差分が拡大するため、不正確な情報による次ホップ隣接移動無線ノード選択となることが問題である。本論文では、各移動無線ノードの位置情報広告範囲を拡大することが、デッドエン

ド発生を回避に寄与することを確認し、通信オーバーヘッドとのトレードオフをとる方法について考察する。

2. 関連研究

無線マルチホップネットワークにおけるルーティングプロトコルには様々なものが提案されているが、中継移動無線ノード列の選択において、どれだけ広域の位置情報(移動無線ノードの位置情報には座標情報や隣接関係情報があり、それぞれのプロトコルに応じた位置情報が用いられている)を活用するかが異なっている。OLSR [2]等のプロアクティブ型ルーティングプロトコルでは、移動無線ノード間の隣接関係を各移動無線ノードが全域的に取得する。このため、各移動無線ノードの位置情報が正確であるという前提においては、送信元移動無線ノードから送信先移動無線ノードまでの経路の有無は正確であり、データメッセージが配送途中で配送不可となることはない。すなわち、各中継移動無線ノードは、転送先である次ホップ隣接移動無線ノードを選択しデータメッセージを転送することが可能である。ただし、広域に渡る隣接無線ノード間の接続性情報は、時間の経過とともに古いものとなり、現在の接続状況とは異なる情報が各移動無線ノードで保持されることが考えられる。したがって、この情報更新を低通信オーバーヘッドで実現することは重要であり、OLSRでは制御メッセージのフラッディングオーバーヘッドを削減する工夫がなされている。

AODV [6]やDSR [3]等の経路探索要求メッセージ *Rreq* のフラッディングによる経路探索手法は、各移動無線ノードが他の移動無線ノードの位置情報を取得せずに無線マルチホップ配送経路を探索している。しかし、個々の移動無線ノードが広域の位置情報を取得してはいないものの、フラッディングによって間接的に全域的な移動無線ノードの位置情報(隣接関係)を取得しているため、検出した無線マルチホップ配送経路は正確であり、移動無線ノード間の隣接関係が変化しない限りにおいて、データメッセージが配送途中で転送不可となることはない。ただし、検出経路が中継無線ノードの移動によって切断されることが考えら

¹ 東京電機大学未来科学部ロボット・メカトロニクス学科

^{a)} kubo@higlab.net

^{b)} hig@higlab.net

れ、経路の局所的な修復や再経路探索による経路の再構築が必要となり、その通信オーバーヘッドが大きいという問題がある。

移動無線ノードの局所的な位置情報によって各中継移動無線ノードが次ホップ隣接移動無線ノードを選択し、保持する配送途中のデータメッセージを転送する位置ベースルーティングプロトコルは、無線ノードの移動に対してより耐性の高いルーティングを提供する。ここでは、固有の配送経路を事前に確定せず、各中継移動無線ノードが転送時点において取得済みの隣接移動無線ノード位置情報に基づいて転送先隣接移動無線ノードのひとつを次ホップとしてデータメッセージを転送する(図1)。GEDIRにおける次ホップ隣接移動無線ノード選択を実現するためには、各中継移動無線ノードは、隣接移動無線ノードの位置情報と送信先移動無線ノードの位置情報を取得していることが必要である。そこで、各移動無線ノードは、GPS レシーバ等の位置情報取得デバイスにより自身の位置情報(座標)を取得し、これをピギーバックした制御メッセージを定期的に自身の無線信号到達範囲に含まれる隣接移動無線ノードにブロードキャスト送信する。これによって、各移動無線ノードは、隣接移動無線ノードの位置情報が取得できる。制御メッセージのブロードキャスト送信間隔が T であれば、最大 T だけ古い隣接移動無線ノード位置を用いて次ホップ移動無線ノード選択アルゴリズムを適用することが可能である。このようにして取得した隣接移動無線ノード位置情報から、送信先移動無線ノードに最も近い隣接移動無線ノードへとデータメッセージを転送するのが GEDIR における次ホップ隣接移動無線ノード選択手法である。これは、より送信先移動無線ノードに近い隣接移動無線ノードを選択することによって、無線マルチホップ配送経路の短縮を実現できる可能性があり、結果として配送遅延の短縮やデータメッセージ配送成功率の向上が期待される。なお、送信先移動無線ノードの位置情報もより低い通信オーバーヘッドでより正確に取得することが求められ、... といった手法が提案されている。

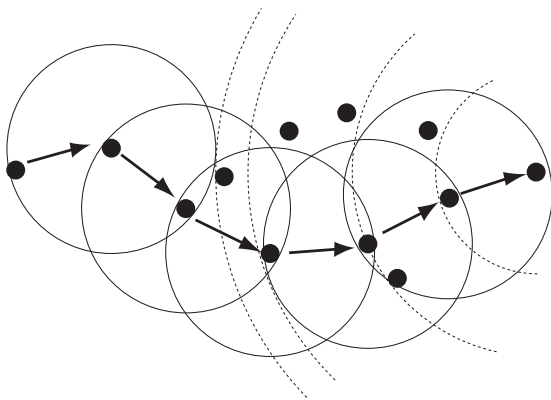


図1 GEDIRによる次ホップ隣接移動無線ノード選択

GEDIRのような局所的な位置情報のみによって次ホップ隣接移動無線ノードを選択する手法では、データメッセージを次ホップ隣接移動無線ノードが選択できない隣接ノードへと転送してしまうことで発生するデッドエンドを回避することは困難である。図2に示すように、移動無線ノード N^c が送信先移動無線ノード N^d に最も近い隣接移動無線ノード N^n へとデータメッセージを転送した結果、 N^n

の隣接移動無線ノードはすべて N^n よりも N^d から離れており、 N^n のデータメッセージ転送先隣接移動無線ノードが選択できない。この状態がデッドエンドと呼ばれるが、デッドエンドの発生は N^c が N^n を次ホップ移動無線ノードとして選択した時点で決定しており、 N^n がこれを回避することはできない。

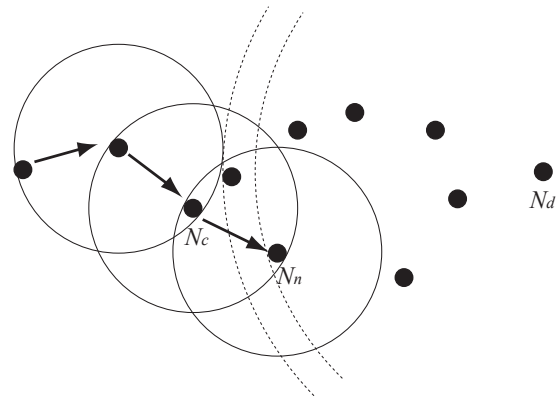


図2 デッドエンド

このように、データメッセージの転送先である次ホップ隣接移動無線ノードの選択においては、より広域の位置情報を取得することによって配送の不具合(デッドエンド)の発生を回避できるものの、位置情報取得や経路修復等にもとむ通信オーバーヘッドが拡大する問題があり、そのトレードオフをとることが必要となる。

3. 提案手法

隣接移動無線ノードの位置情報のみによって次ホップ隣接移動無線ノードを選択する GEDIR においては、デッドエンドの発生を回避することは困難である。ただし、図2において、中継移動無線ノード N^c が1ホップ隣接移動無線ノードの位置情報のみではなく、2ホップ隣接移動無線ノードの位置情報を取得しているならば、転送後にデッドエンドを発生する N^n ではなく、送信先移動無線ノードまでの距離が N^n より長いもののその次ホップ隣接移動無線ノードの選択が可能な $N^{n'}$ を次ホップ隣接移動無線ノードとして選択し、データメッセージを転送することが可能となる(図3)。さらに、図4に示すように、送信先移動無線ノードに最も近づく1ホップ隣接移動無線ノードではなく、送信先移動無線ノードに最も近づく2ホップ隣接移動無線ノードへとデータメッセージが転送可能な1ホップ隣接移動無線ノードをデータメッセージの転送先として選択することが、経路全体としてのホップ数の削減に寄与すると考えられる。これも、2ホップ隣接移動無線ノードの位置情報を取得することによる利点である。

この考え方を進めることで、 N ホップ隣接移動無線ノードの位置情報に基づく GEDIR ルーティング手法へと拡張される。ここでは、 N の増加によるデッドエンドの回避効果と配送ホップ数の削減効果が期待される一方、位置情報広告による通信オーバーヘッドの拡大とより古い位置情報を用いた次ホップ隣接移動無線ノード選択によるルーティングの不具合、すなわち、配送経路長の拡大やデータメッセージ配送成功率の低下(デッドエンド発生率の上昇)が懸念される。そこで、本論文では N ホップ隣接移動無線ノード

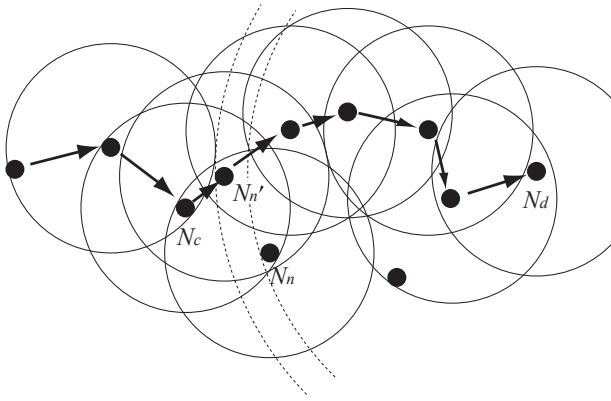


図 3 デッドエンドの回避

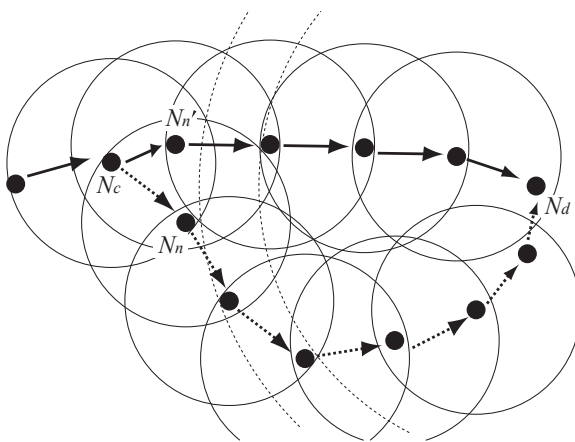


図 4 2 ホップ隣接ノード位置による次ホップノードの選択

の位置情報を用いた拡張 GEDIR ルーティングプロトコルを構成し、 N による性能の違いをシミュレーション実験によって評価することによって適切な N を用いることを提案する。

各移動無線ノードが N ホップ隣接移動無線ノードの位置情報を取得するためには、各移動無線ノードが GPS レシーバ等で取得した位置情報を N ホップ隣接移動無線ノードに対して広告すればよい。これは、従来の移動無線ノード識別子と移動無線ノード位置情報 (座標) の 2 項組を各移動無線ノードが定期的にブロードキャスト送信していたものを拡張し、TTL を含む 3 項組を送信することによって実現できる。TTL の初期値は N であり、位置情報を受信した移動無線ノードは TTL が 0 より大きな位置情報について、その TTL を $N - 1$ に更新してこの位置情報をブロードキャスト送信する。従来の GEDIR では、移動無線ノード N_i の位置情報は N_i のみによってブロードキャスト送信されたが、本論文で提案する拡張 GEDIR では、 N_i 以外の移動無線ノードも N_i の位置情報をブロードキャスト送信する。これによって、移動無線ノード N_j が異なる隣接移動無線ノードから N_i の位置情報を受信することが考えられる。このとき、より新しい位置情報のみが広告されるようにするために、位置情報の取得時刻を加えた 4 項組として各移動無線ノードが位置情報を管理する。各移動無線ノードは、最新の移動無線ノード位置情報を保持し、その通知に用いられた TTL に基づいて位置情報の広告の要否、すなわち、位置情報をブロードキャスト送信するか否かを判断する。拡張 GEDIR における位置情報広告プロトコル

を以下に示す。

[位置情報広告プロトコル]

- 各移動無線ノード N_i は、自身および他の移動無線ノードの位置情報である 5 項組 (移動無線ノード識別子, 移動無線ノード位置, 位置情報取得時刻, TTL) を保持する。
- N_i は、定期的に自身の位置情報を GPS レシーバ等の位置情報取得デバイスにより取得し、移動無線ノード位置, 位置情報取得時刻を更新する。TTL は N で固定である。
- N_i は、定期的に自身の保持する位置情報を隣接移動無線ノードへブロードキャスト送信することにより広告する。広告対処は $TTL > 0$ の 5 項組のみであり TTL を 1 だけ減少させて送信する。
- N_i は隣接移動無線ノードからブロードキャスト送信された位置情報を取得すると、以下の処理を行なう。
 - 位置情報が保持されていない移動無線ノードの位置情報は 5 項組をそのまま保持する。
 - 既に位置除法が保持されている移動無線ノードの位置情報については、位置情報取得時刻を比較し、時刻のより新しい 5 項組を保持する。なお、時刻が同一で TTL が異なる場合には TTL が大きな 5 項組を保持する。
- N_i は、取得時刻からあらかじめ定められた閾値時間以上経過した位置情報を破棄する。これは、この移動無線ノードがネットワークトポロジの変化により N ホップ以上離れたために位置情報が更新されなくなったと考えられるためである。□

また、送信先移動無線ノードへ向けたデータメッセージを隣接移動無線ノードから受信した N_i は、以下の方法で次ホップ隣接移動無線ノードを選択し、このデータメッセージを転送する (図 5)。

[次ホップ移動無線ノード選択手法]

- 自身の保持する位置情報、すなわち、位置情報広告プロトコルによって取得した 5 項組の情報に基づいて、 N_i から N ホップで到達可能なすべての移動無線ノードから送信先移動無線ノードまでの距離が最短であるものを選択する。
- この移動無線ノードへ N ホップで到達可能な無線マルチホップ配送経路を探索し、その経路の次ホップ隣接移動無線ノードに N_i はデータメッセージを転送する。このような無線マルチホップ配送経路が複数存在し、次ホップ隣接移動無線ノードが異なる場合には、ランダムにいずれかの隣接移動無線ノードを選択してデータメッセージを転送する。□

4. 評価

前章で提案した拡張 GEDIR プロトコルによるデータメッセージの配送成功率の改善、すなわち、配送途中のデータメッセージによるデッドエンドの回避が位置情報の広告範囲の設定値によってどのように変化するかをシミュレーション実験により評価する。また、 N ホップ隣接移動無線ノードの位置情報によって次ホップ隣接移動無線ノードを選択する拡張 GEDIR を実現するために各移動無線ノードで保持する位置情報量を測定することで、実現のための通信オーバーヘッドを評価する。

シミュレーション領域を $1,000\text{m} \times 1,000\text{m}$ の正方形領域とし、無線信号到達距離 100m の移動無線ノード $100\sim 500$ 台を一様分布乱数によりランダムに初期配置する。各移動

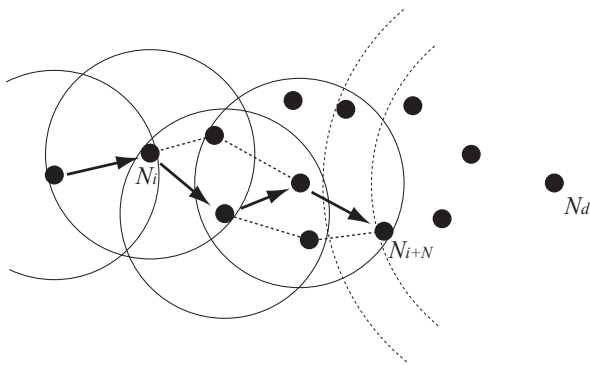


図 5 拡張 GEDIR による次ホップ選択

無線ノードはランダムウェイポイント移動モデルにしたがって 0, 1, 2, 3m/s で移動する。各移動無線ノードは**秒ごとに自身の位置を取得するとともに、更新された位置情報を隣接移動無線ノードにブロードキャスト送信する。また、移動無線ノードの位置情報広告範囲 N を 1-10 ホップとし、ランダムに選択された 1,000 対の送信元移動無線ノードから送信先移動無線ノードへのデータメッセージ配送の成功確率を評価する。実験結果を図 6-9 に示す。

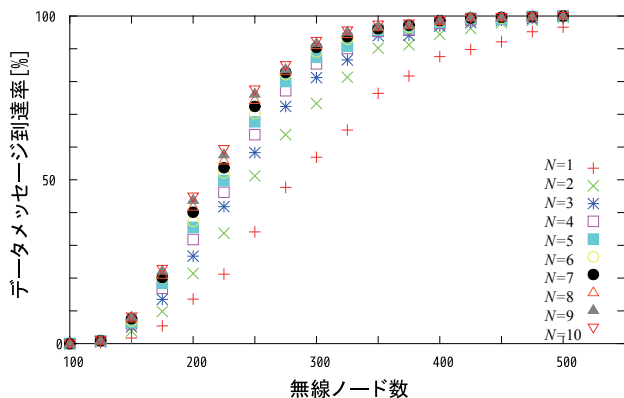


図 6 データメッセージ到達確率 (移動速度 0m/s).

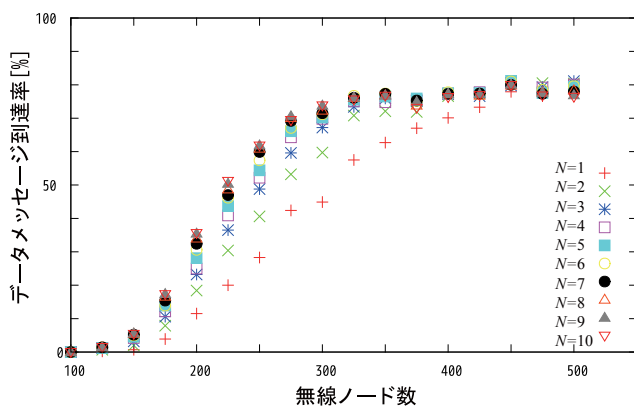


図 7 データメッセージ到達確率 (移動速度 1m/s).

移動速度によらず、移動無線ノード数の増加とともにデータメッセージ配送成功率は上昇する。具体的には、移動無線ノード数 200 台以下では十分な接続性が得られず、400

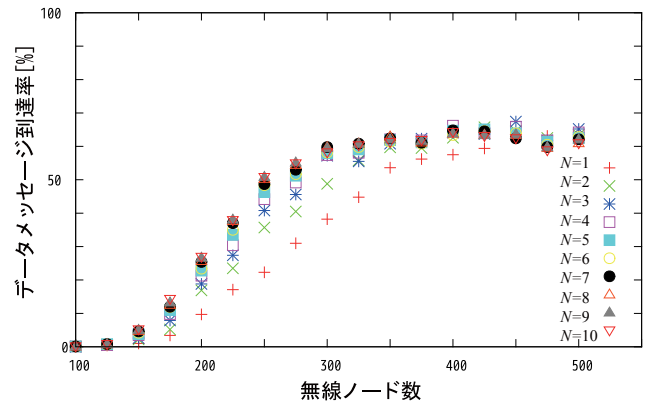


図 8 データメッセージ到達確率 (移動速度 2m/s).

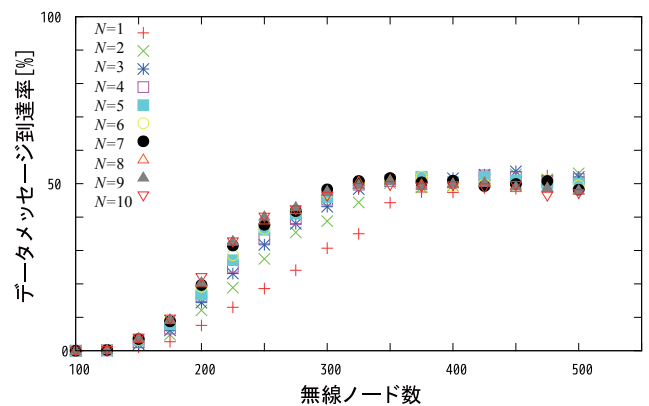


図 9 データメッセージ到達確率 (移動速度 3m/s).

台以上では接続性はほぼ一定値となる。いずれの環境においても N の増加により接続性は改善されるが、その改善は N の増加とともに小さくなる。無線ノードが低速で移動する環境においては、 $N \leq 4$ 程度まで到達率の改善が見られるものの、移動速度の上昇とともに N の増加による到達率の改善は期待できなくなる。本実験の設定範囲では、 $N = 2$ とすることはいずれの条件においても到達の改善が認められるが、 $N \geq 3$ においては必ずしも効果的であるとは言えない。限られた 1 ホップ隣接移動無線ノードから次ホップ隣接移動無線ノードを選択する際には遠方の移動無線ノード位置の寄与が小さいこと、デッドエンド回避に対しても遠方の情報は効果が小さいこと、遠方の移動ノード位置は伝達時間が拡大しており、現在位置を正しく反映していないこと、などが原因として考えられる。

一方、各移動無線ノードが保持する位置情報量について評価した結果を図 10 に示す。各移動無線ノードが保持し、隣接移動無線ノードに広告する位置情報量は、移動無線ノード分布密度に比例して増加する。また、 N の増加とともに概ねその 2 乗に比例して増加している。これは、移動無線ノードが一様分布乱数によって配置されており、位置情報の広告範囲がその方向によらずほぼ N に比例していることによるためである。この N の増加による位置情報量の増加の影響は大きいと考えられることから、 N の増加には十分な考慮が必要である。

以上により、2 ホップ隣接移動無線ノードの位置情報を用いた拡張 GEDIR では、位置情報の保持、交換オーバーヘッドを大きく拡大することなく、デッドエンドの発生率を低減させることでデータメッセージ到達率を向上させることができることが示された。また、無線ノードが低速で移動する場合には、4 ホップ隣接移動無線ノード程度までの位

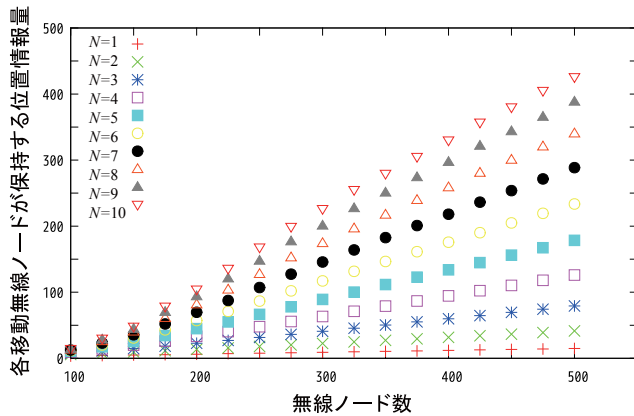


図 10 各移動無線ノードが保持する位置情報量.

置情報を交換することはデータメッセージの到達率向上に有効である.

5. まとめ

本論文では、位置ベースルーティングプロトコルである GEDIR において、デッドエンドによるデータメッセージ不到達の発生率を低減し、データメッセージ配送遅延の短縮を実現するために、 N ホップ隣接移動無線ノードの位置情報を用いて次ホップ隣接移動無線ノードを選択してデータメッセージを転送する拡張 GEDIR を提案した。また、シミュレーション実験によって位置情報広告範囲 N の拡大の効果を評価し、2 ホップ隣接移動無線ノードの位置情報を広告する方法には有効性が十分認められ、低移動速度環境においては 4 ホップ隣接移動無線ノード程度までの位置情報取得は有効であることが確認できた。今回のシミュレーション実験では、データメッセージ配送経路長についての効果が評価されておらず、今後の課題とする。

参考文献

- [1] Bose, P., Morin, P., Stojmenovic, I. and Urrutia, J., "Routing with Guaranteed Delivery in Ad Hoc Wireless Networks," *Wireless Networks*, Vol. 7, pp. 609–616 (2001).
- [2] Jacquet, P., Muhlethaler, P., Clausen, T., Laouiti, A., Qayyum, A., Viennot, L., "Optimized Link State Routing protocol for Mobile ad hoc networks," *Proceedings of IEEE International Publication*, pp. 62–68 (2001).
- [3] Johnson, D. B., "Routing in Ad Hoc Networks of Mobile Hosts," *Mobile Computing Systems and Applications*, 1994. WMCSA 1994. First Workshop on , pp. 158–163 (1994).
- [4] 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).
- [5] Lin, X. and Stojmenovic, I., "Geographic Distance Routing in Ad Hoc Wireless Net," *Technical Report in University Ottawa*, TR-98-10 (1998).
- [6] Perkins, C.E. and Royer, E.M., "Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing," RFC 3561 (2003).
- [7] Kranakis, E., Singh, H. and Urrutia, J., "Compass Routing on Geometric Networks," *Proceedings of the 11th Canadian Conference on Computational Geometry*, pp. 51–54 (1999).