

移動頻度の高いMANETにおける テーブルベースルーティング手法

内田 達哉^{†1} 松垣 博章^{†1}

移動速度、移動頻度の高いアドホックネットワークでは、移動無線ノード ID 列として規定された無線マルチホップ配送経路は頻りに切断される。フラッディングを基礎とした経路探索プロトコルで検出された経路の検出時点における中継移動無線ノード位置を目標中継点とし、データメッセージごとに転送時点で目標中継点に最も近い移動無線ノードを中継移動無線ノードとする手法は、高移動速度、高移動頻度環境においても高い接続性を得ることができる。これまでに、この手法をソースルーティングで実現するプロトコルが提案されているが、データメッセージヘッダに目標中継点位置を格納する必要がある。本論文では、テーブルベースルーティングプロトコルとして実現するプロトコルを提案する。ここでは、ルーティングテーブルエントリを格納した中継移動無線ノード候補から消失することを防ぐために、いくつかのエントリ引継ぎ手法を提案し、その引継ぎ成功率をシミュレーション実験によって比較評価する。

Table-Base Routing Protocol in MANET with High Mobility

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

A wireless multihop transmission route determined by a sequence of IDs of intermediate mobile wireless nodes is disconnected in short time in a MANET with high speed and high frequency mobility. The authors have proposed a routing method in which a wireless multihop transmission route is determined by a sequence of locations of virtual intermediate nodes where the intermediate nodes forwarding a route request control message are located and the nodes nearest to the locations of virtual intermediate nodes serve a role of dynamically selected intermediate nodes for each data message. It achieves higher connectivity even in highly mobile environments. Until now, a source-routing protocol for the method has been designed. However, the locations of virtual intermediate nodes are required to be included in a header of each data message. In order to avoid the communication overhead, this paper proposes a table-based routing protocol. Here, routing table entries are stored in mobile

wireless nodes distributedly. Thus, according to mobility, the routing table entries are forwarded not to lose candidates of intermediate nodes with the entries. This paper also proposes some forwarding methods and the performance is evaluated in simulation experiments.

1. 背景と目的

移動無線ノード群から構成されるモバイルワイヤレスネットワークでは、各移動無線ノードが継続的な電力供給源を備えないこと、無線通信はブロードキャストを基礎としており近隣移動無線ノードと通信メディアを共有するために衝突、競合を回避あるいは削減することが求められることから、各移動無線ノードは限られた電力を用いて無線信号を送信する。このため、無線信号到達範囲に含まれる隣接移動無線ノードとのみ直接通信可能となり、これに含まれない移動無線ノードとの通信は、他の移動無線ノードを中継移動無線ノードとする無線マルチホップ配送を用いて実現される。ここで、DSR¹⁾ や AODV²⁾ といったアドホックルーティングプロトコルでは、無線ノードの移動速度、移動頻度が比較的低い場合を想定して設計されている。このため、ITS 等の応用においては、無線マルチホップ配送経路が頻りに切断され、データメッセージの配送遅延の延長、スループットの低下、経路再探索のための通信オーバーヘッドの拡大といった問題があり、適用が困難である。従来のアドホックルーティングプロトコルが無線マルチホップ配送経路を移動無線ノード ID 列として与えていたのに対して、目標中継点の位置の列として与え、データメッセージごとに中継移動無線ノードを動的に決定する手法が提案されている⁴⁾。しかし、この手法を実現するプロトコルはデータメッセージのヘッダに経路情報を格納するソースルーティングを用いており、各データメッセージヘッダには目標中継点の位置の列を格納することが必要とされる。このため、データメッセージの配送オーバーヘッドが大きい。本論文では、これを解決するために、この手法をテーブルベースルーティングプロトコルとして実現するための問題点を明らかにし、解決手法を示す。

2. 関連研究

DSR¹⁾ や AODV²⁾ といった従来のアドホックルーティングプロトコルでは、経路探索要

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

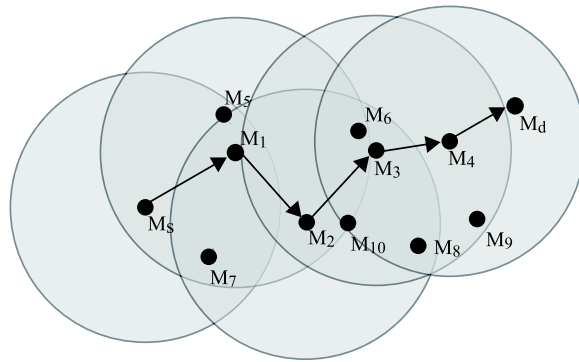


図 1 ノード ID 列によるマルチホップ配送経路

Fig.1 Multihop Transmission Route determined by Sequence Node IDs

求メッセージ $Rreq$ のフラッディングを用いて送信元移動無線ノード $M_s (= M_0)$ から送信先移動無線ノード $M_d (= M_n)$ までの無線マルチホップ配送経路 $R = \{M_0 \dots M_n\}$ を探索、検出、構築する (図 1)。

ここでは、経路を中継移動無線ノードの列として与えているため、いずれかの中継無線ノード M_i の無線信号到達範囲から次ホップ中継移動無線ノード M_{i+1} が逸脱すると R が切断され、データメッセージを配送することができない (図 2)。このとき、経路再探索や局所的な経路修復を行なう拡張プロトコルが提案されているが、データメッセージの配送遅延の拡大、配送スループットの低下、制御メッセージ交換による通信オーバーヘッドの拡大を回避することはできない。特に、無線ノードの移動頻度、移動速度が高い場合には、経路切断が頻繁に発生する。

GVGrid³⁾ では、アドホックネットワークが存在する対象領域 (平面) を正方形セルに分割し、無線マルチホップ配送経路をセル列として与える (図 3)。ただし、セルの大きさは隣接セルに位置する任意の移動無線ノードが互いに無線信号到達範囲に含まれるように定めることとする。このセル列として与えた経路は、無線ノードの経時的な移動とは無関係に固定である。各データメッセージが配送される時にセルに含まれる移動無線ノードのうちの一つが動的に中継移動無線ノードとして選択される手法を導入することで、無線ノードの移動頻度、移動速度が高い場合でも、経路再探索や経路修復の機会を削減している。ただ

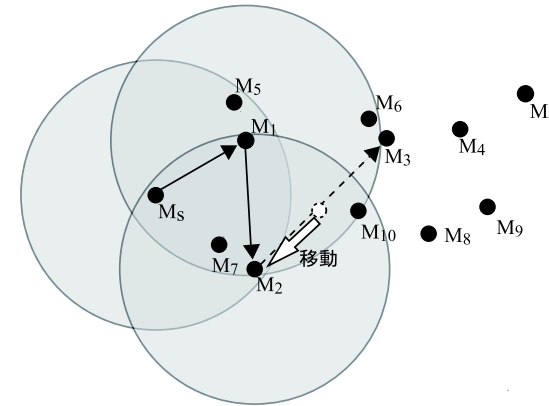


図 2 ノード ID 列によるマルチホップ配送経路の切断

Fig.2 Disconnection of Wireless Multihop Transmission Route determined by Sequence of Node IDs

し、各データメッセージ転送時に次ホップセルに移動無線ノードが含まれない場合には経路切断となり、経路再探索が必要となることから、比較的移動無線ノード密度が高い環境が適用対象となる (図 4)。

セルに含まれる移動無線ノードから動的に中継移動無線ノードを選択することで無線ノードの移動に頑強なデータメッセージ配送を実現する手法を移動無線ノードがより低密度に分布する環境においても適用可能とするためには、セルの面積がより大きな手法が必要となる。論文⁴⁾では、あらかじめ対象領域をセルに分割するのではなく、 $Rreq$ メッセージのフラッディングで検出されたマルチホップ配送経路に含まれる中継移動無線ノード M_i の経路検出時の位置を目標中継点と定め、各データメッセージが配送される時に目標中継点に最も近い移動無線ノードを中継移動無線ノードとして選択する手法が提案されている (図 5)。この手法では、GVGrid に比べて中継移動コンピュータ候補を含む領域が GVGrid のセルよりも大きいので、同じ移動ノード分布密度ではより経路が切断され難く、また同じ程度の接続性を維持する場合にはより低い分布密度の環境に対しても適用することが可能である (図 6)。

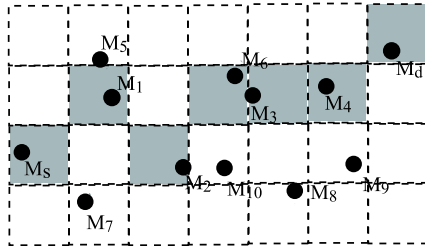


図3 セル列によるマルチホップ配送経路

Fig.3 Wireless Multihop Transmission Route determined by Sequence of Cell IDs

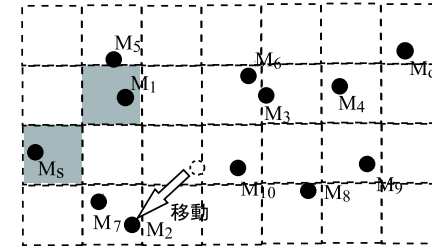


図4 セル列によるマルチホップ配送経路の切断

Fig.4 Disconnection of Wireless Multihop Transmission Route determined by Sequence of Cell IDs

3. 提案手法

3.1 テーブルベース手法

論文⁴⁾の手法では、データメッセージをソースルーティングによって配送する。Mdで検出された無線マルチホップ配送経路R'は目標中継点の列 $\langle M_s, VM_1, \dots, VM_{n-1}, M_d \rangle$ である。そこで、目標中継点の位置の列 $\langle L(VM_1), \dots, L(VM_{n-1}) \rangle$ ^{*1}が経路探索応答メッセージRrepにピギーバックされ、Msへと通知される。各データメッセージにはMsによって $\langle L(VM_1), \dots, L(VM_{n-1}) \rangle$ が格納され、データメッセージを受信した移動無線ノードが $\langle L(VM_1), \dots, L(VM_{n-1}) \rangle$ を参照することによって中継移動無線ノードMiを動的に決定する。しかし、すべてのデータメッセージに $\langle L(VM_1), \dots, L(VM_{n-1}) \rangle$ を格納することによる通信オーバーヘッドの拡大によって配送効率が低下することになる。通信コストの大きな無線通信においては、配送効率の低下は避けなければならない。そこで本論文では、この手法をテーブルベースのルーティングプロトコルとして実現する手法を提案する。ここでは、AODVプロトコルを基礎としてRrep受信時に検出経路に含まれる移動無線ノードMiが3項組(送信先移動無線ノードID, 現ホップ目標中継点位置, 次ホップ目標中継点位置

*1 $L(VM)$ は移動無線ノードMのRrep受信時の位置

$\rangle = \langle M_d, L(VM_i), L(VM_{i+1}) \rangle$ をルーティングテーブルエントリとして生成する。このエントリを持つ移動無線ノードMは、Mdを送信先とするデータメッセージを受信した場合、 $|L^c(M)L(VM_{i+1})|^{*2}$ によって中継移動無線ノードとなり得るかを判定し、 $|L^c(M)L(VM_i)|$ にしたがってタイマを設定することでL(Mi)に最も近い移動無線ノードであるかを判定することができる。

3.2 ルーティングテーブル維持手法

Miは自身と近隣無線ノードの移動によってL(VMi)に最も近い移動無線ノードではなくなる。このとき、前ホップ移動無線ノードの無線信号到達範囲に含まれ次ホップ移動無線ノードとなり得るノードを無線信号到達範囲に含む移動無線ノードがルーティングテーブルエントリ $\langle M_d, L(VM_i), L(VM_{i+1}) \rangle$ を保持していることがデータメッセージ配送を行なうために必要である。このような無線ノードが存在する場合でも、そのすべてがこのルーティングテーブルエントリを保持していないのであれば、データメッセージを転送することができない。そこで、MiはRrep受信時にこのエントリを含むルーティングテーブル広告メッセージTBadvをブロードキャスト送信し、隣接移動無線ノードにこのエントリを通知する。さらに、このエントリを保持する移動無線ノードが何らかの条件を満たす場合に

*2 $L^c(M)$ は移動無線ノードMの現在位置

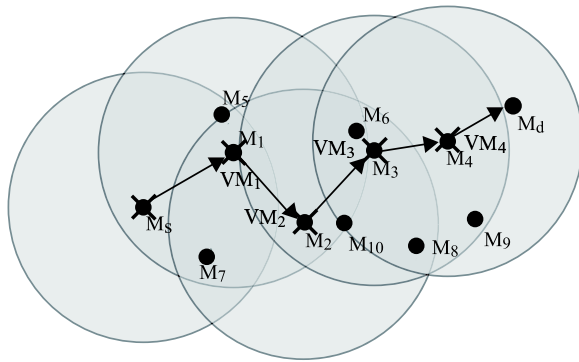


図 5 目標中継点列によるマルチホップ配送経路

Fig. 5 Wireless Multihop Transmission Route determined by Sequence of Locations of Virtual Intermediate Nodes

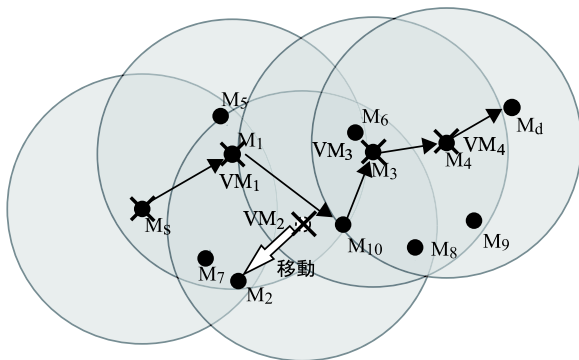


図 6 目標中継点列による動的なマルチホップ配送経路の構築

Fig. 6 Wireless Multihop Transmission Route by Dynamic Selection of Intermediate Nodes

$TBadv$ メッセージをブロードキャスト送信することで、 $L(VM_i)$ 近隣にこのエントリを保持する移動無線ノードが存在しなくなり、データメッセージの転送が不可能となるまでの時間を延長することが必要である。本論文では、エントリを保持する移動無線ノード M が $TBadv$ をブロードキャスト送信する以下の条件を考案した。

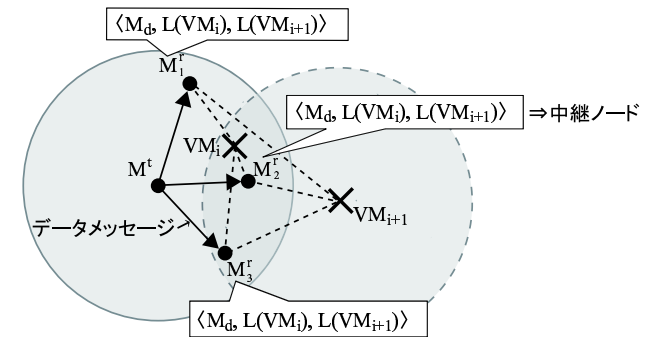


図 7 ルーティングによる中継無線ノードの動的選択

Fig. 7 Dynamic Selection of Intermediate Node based on Routing Table

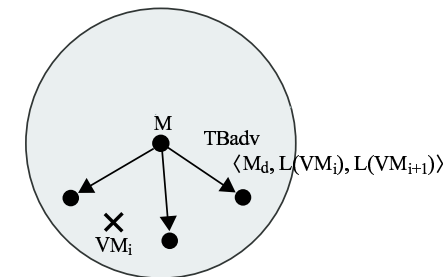


図 8 ルーティングエントリの広告

Fig. 8 Advertisement of Routing Table Entries

- $TBadv$ のブロードキャスト送信から周期 T が経過したとき.
- M が $L(VM_i)$ から遠ざかり、閾値 $l = |ML(VM_i)|$ となったとき.
- データメッセージを送信するとき.

4. 評 価

提案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 平方の正方形領域に無線信号到達距離 100m, 最大速度 10m/s のランダムウェイポイントモデルにより移動する 300 台の移動無線ノードをランダムに配置し、5 ホップの配送経路を用いて、

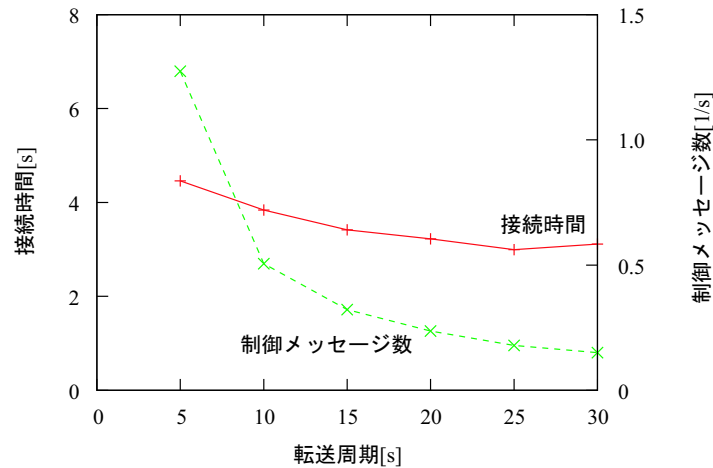


図 9 周期的配送手法の性能

Fig. 9 Connectivity and Communication Overhead in Method with Regular Interval Advertisements

それぞれの手法における経路接続時間，ルーティングテーブルエントリ伝達に要する通信オーバーヘッドとしての1秒あたりの制御メッセージ数を測定した。ただし，目標中継点からの距離が100mに達した時点でエントリを破棄するとした。測定結果を図3-7に示す。

周期的な配送手法を周期1-5sとした場合の経路接続時間と制御メッセージ数を図9に示す。接続時間は周期に対して線形に短縮している。また，制御メッセージ数は指数的に減少しているが，短周期では他の手法と比べて非常に多くのメッセージを要している。これは，エントリを保持する無線ノードがすべてブロードキャスト送信するためであることから，高密度に無線ノードが分布する環境での適用が不向きであるといえる。また，制御メッセージ数が多いため消費電力も多くなり，携帯電話やセンサノードなどの貯蓄できる電力が比較的少ない移動ノードが多い環境では不向きである。しかし，制御メッセージ数が多い一方で通信可能時間は3つの手法の中で最も長い結果となったことから，自動車などの移動速度が速く配送経路が切断しやすい環境では有効であるといえる。

次に，目標中継点からの距離を閾値として配送する手法において，閾値を10-70mとした場合の経路接続時間と制御メッセージ数を図10に示す。接続時間は閾値に対して減少しているものの，その減少の割合は小さい。一方，制御メッセージ数は閾値に対して線形に減少している。したがって，比較的大きな閾値での適用が可能である。また，制御メッセー

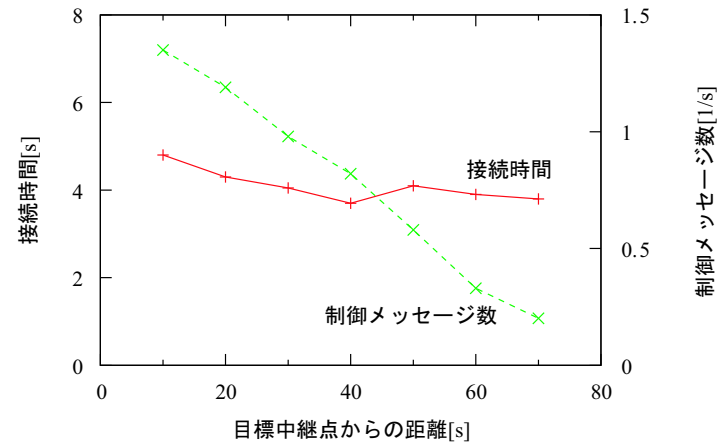


図 10 距離基準配送手法の性能

Fig. 10 Connectivity and Communication Overhead in Method with Distance Threshold

ジ数が3つの手法の中で最も少ない結果となったため，少ない制御メッセージ数で配送経路を構築することが求められる無線ノードが高密度に分布する環境で有効であるといえる。

周期的なルーティングテーブルエントリの配送手法と目標中継点からの距離の閾値を用いた配送手法における通信オーバーヘッドに対する配送経路接続時間の延長効果を評価したものを図11, 12に示す。周期の延長と閾値距離の拡大に対して接続時間の延長効果がいずれも単調に増加することがわかる。たとえば，13.3秒周期で配送する手法と目標中継点から57m離れたときに配送する手法は，接続時間延長の視点からほぼ等価であるといえる。

最後に，データメッセージ転送時に配送する手法において，データメッセージ転送が平均間隔0.1-100sのポアソン過程に従って生起する場合の経路接続時間を図13に示す。転送間隔の延長とともに接続時間が短縮しているが，その変化率は比較的小さい。また，データメッセージにルーティングテーブルエントリをピギーバックすることが可能であるため，追加制御メッセージが不要である。このため，データメッセージの送受信が頻繁に行なわれる環境や，データメッセージの送受信が定期的に行なわれる環境で有効であるといえる。

5. まとめと今後の課題

本論文では，ソースルーティングを用いて目標中継点列で無線マルチホップ配送経路を定

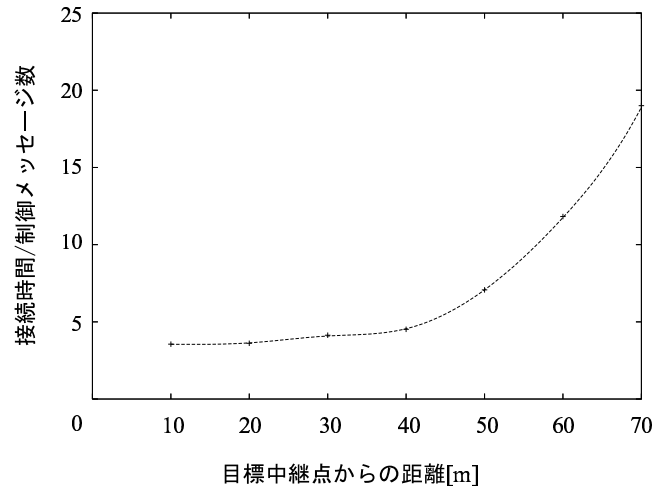


図 11 周期的配送手法における制御メッセージ数に対する接続時間延長効果

Fig. 11 Route Lifetime Extension for Control Message in Regular Interval Advertisement Method

めるアドホックルーティング手法をテーブルベースで実現する手法を提案した。テーブルベースとすることで、データメッセージ配送への通信オーバーヘッドを削減することができるが、無線ノードの移動にともなってルーティングテーブルエントリが消失することでデータメッセージ中継が不可能となるまでの時間を延長するための手法が必要となる。本論文では、エントリのブロードキャスト広告を行なう3種類の条件を提案し、シミュレーション実験評価を行なった。それぞれの手法の性能は、設定環境によって異なることから今後は移動速度、移動頻度、ノード分布密度等の実験パラメータによる性能の違いを分析することで、それぞれの適用領域を明らかにする。

参 考 文 献

- 1) Johnson, D., Hu, Y. and Maltz, D., "The Dynamic Source Routing Protocol (DSR) for Mobile Ad Hoc Networks for IPv4," RFC4728 (2007).
- 2) Perkins, C., Belding-Royer, E. and Das, S., "Ad Hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing," RFC3561 (2003).
- 3) Sun, W., Yamaguchi, H., Yukimasa, K. and Kusumoto, S., "GVGrid: A QoS Routing Protocol for Vehicular Ad Hoc Networks," Proc. of 14th Int. Conf. on Quality

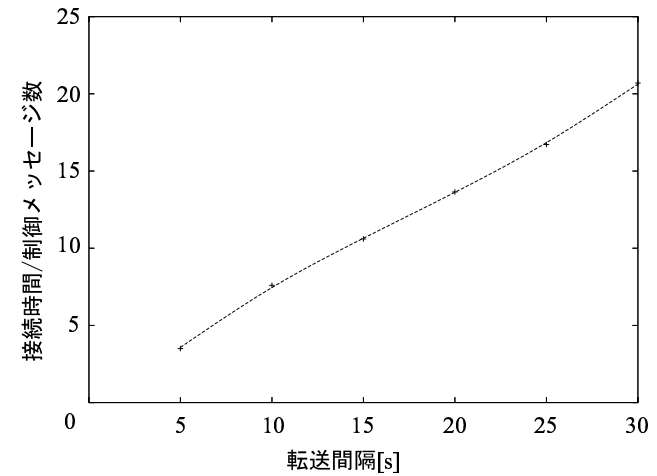


図 12 距離基準手法における制御メッセージ数に対する接続時間延長効果

Fig. 12 Route Lifetime Extension for Control Message in Distance Threshold Method

- of Service, pp.130-139 (2006).
- 4) 島田, 小野, 桧垣, "高移動頻度環境のための位置ベースアドホックルーティングプロトコル," 情報研報, Vol.2007, No.98, pp.113-120 (2007).

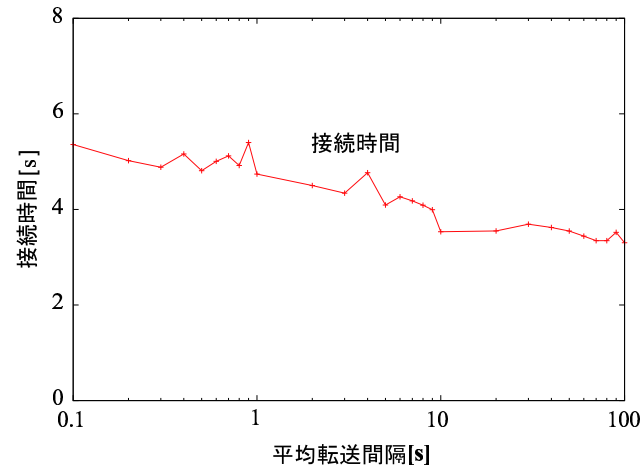


図 13 データ転送時配送における経路接続時間
Fig. 13 Connectivity in Method with Piggyback to Data Messages