

オンデマンド型アドホックルーティングにおける 経路確立の効率化手法に関する検討

今川 裕人[†] 横田 英俊[†] 井戸上 彰[†]

無線技術の発達やモバイル端末の高性能化により、端末のみでネットワークを構成するアドホックネットワークへの注目が集まっている。アドホックネットワークに多数のノードが存在する状況では、オンデマンド型のアドホックルーティングプロトコルは経路確立のためにブロードキャストする制御パケットの数が多くなってしまい、中継ノードでのユーザデータの輻輳や消費電力の増加が問題となる。本稿では隣接ノードが発信する制御パケットの数および各ノードが収容している経路の数をもとに、制御パケットのブロードキャストによる伝搬を確率的に抑制し、かつ経路を分散させるための手法を提案し、シミュレーションによる評価を行う。

A Study on Efficient Route Establishment Method in On-demand Ad-hoc Routing

Yujin IMAGAWA[†] Hidetoshi YOKOTA[†] Akira IDOUE[†]

On-demand ad-hoc routing protocol broadcasts control packets to establish routes to the destination nodes. In ad-hoc network that many mobile nodes join, such on-demand ad-hoc routing protocol generates a high number of broadcast packets, causing contention, packet collisions and waste of battery power in the mobile nodes. We propose an efficient route establishment method to decrease transmission of control packets according to the number of control packets broadcast by adjacent nodes and the number of routes that the node accommodates. We report performance evaluation of the proposed method in simulation experiments.

1 はじめに

近年の無線通信技術の性能向上やモバイル端末の高機能化・軽量化に伴い、モバイル通信はより身近な技術として期待が集まっている。従来の無線ネットワークでは各モバイル端末は基地局や中継器を介して通信を行うため、基地局のない場所では通信ができないなどの制約を受けることが多かった。これに対し、モバイル端末のみでネットワークを構成するアドホックネットワーク[1]に対する注目が集まっている。アドホックネットワークでは端末同士が直接通信を行うため、特別なインフラストラクチャを必要とせずにネットワークを構築することが可能である。無線の伝搬可能範囲にいない端末に関しては、複数の伝搬境界内に属するモバイル端末が中継端末として機能する(マルチホップ通信)ことにより、ネットワーク全体での通信を行う。しかし、各端末における自律分散的なルーティング方法や端末の移動によるトポロジ変化への対応、ならびに限られた端末電力での通信確立な

ど解決すべき課題が多数存在する。IETF(Internet Engineering Task Force)の MANET(Mobile Ad-hoc Networks)ワーキンググループ[2]ではアドホックネットワークにおけるさまざまな課題について議論がなされている。

これまで提案されているアドホックネットワークのルーティング手法は、プロアクティブ型、オンデマンド型のそれぞれに大別することができる。プロアクティブ型のルーティングプロトコルとしては DSDV[3]などが提案されており、各ノードは定期的に隣接ノード間で網状態やトポロジに関する制御情報を交換することで、ネットワーク上にある全てのノードに対してのルーティング情報を管理する。端末の移動などによりトポロジが変化したときには再度制御情報を他ノードと交換することでルーティング情報を更新する。一方、オンデマンド型のルーティングプロトコルでは、ルーティング情報は実際に通信を行うノードのみで保持されている。各ノードは通信を開始するときに宛先ノードへのルーティング情報の探索を開始する。探索時には制御パケットをネットワーク全体にフラッディングすることで宛先ノードへの経路を確立する。探

[†] 株式会社 KDDI 研究所
KDDI R&D Laboratories, Inc.

索により確立したルーティング情報は一定期間保持され再度通信を行うときに用いられる。提案されているプロトコルとしては AODV[4]や DSR[5]などが挙げられる。さらに、これらのプロアクティブ型およびオンデマンド型を組み合わせたルーティング手法や位置情報を利用して経路確立を行う手法なども提案されている。

アドホックネットワーク技術が普及し日常的に用いられると、多数のノードがネットワークに参加して通信をするような形態が予想される。このような状況下では、多数存在するノードに対するルーティング情報を管理するのは困難であるため、プロアクティブ型ルーティングプロトコルは適さないと考えられる。一方、オンデマンド型のルーティングプロトコルでは通信が必要なノードのみがルーティング情報を探索・管理するため、隣接ノードが多数存在する状況でもプロアクティブ型と比較して安定した動作が期待できる。ただし、各ノードが宛先ノードへのルーティング情報を探索する際、制御パケットをネットワーク全体にフラッディングさせるため、隣接ノード数が多い状況ではフラッディングされる制御パケットの量が必要以上に増加してしまい、中継ノードではパケットの衝突やユーザデータの輻輳が発生し、また、パケット転送の際のシグナリングによる消費電力の増加が問題となる。

本稿では隣接ノードが多数存在するアドホックネットワークにおいて、隣接ノードが発信する制御パケットの数および各ノードが収容している経路の数をもとに、中継ノードにおける制御パケットのフラッディングによる伝搬を確率的に抑制し、かつ経路を分散させるためのルーティング手法の提案を行い、さらに、計算機シミュレーションによる評価を行った。

以下では、2節において関連する研究を示し、3節においてオンデマンド型アドホックルーティングプロトコルの代表的な一つである AODV の動作の仕組みと問題点を記述し、4節において提案する手法の概要について述べる。5節において提案手法の計算機シミュレーションによる性能評価と考察を行う。最後にまとめと今後の課題を述べる。

2 関連する研究

隣接ノード数と通信性能の関係については、[6]において、ノードの電波伝搬半径から求められるノード密度に注目してアドホックネットワークにおける最適な隣接ノード数について議論が行われている。ここでは、通信半径を大きくすると 1 ホップで到達可能な距離が広がるが、ノード密度が大きくなってしまい、ネットワークの輻輳を引き起こしてしまうトレードオフが存在することが報告されており、また、オンデマンド型の AODV を用いたシミュレーションについて考察を行っている。

制御パケットのフラッディングを確率的に行う手法については、[7][8]などで提案が行われている。[7]では性能指標としてネットワーク全体でのノードの接続性に注目し、制御パケットを確率的に破棄したときの性能を評価している。ただし、論じているネットワークはノードの位置などに制約を設けており、具体的なルーティングプロトコルについては述べられていない。[8]においては、制御パケットを確率的にフラッディングを行うように AODV に変更を加え、その性能を評価している。しかし、評価の基準としてはパケットのネットワーク全体への伝搬に主眼をおいている。そのため、ルーティングの確立手法についてはあまり触れられていない。

高密度、高負荷な状況を想定したルーティングプロトコルとしては、[9]においてノードの負荷に応じてパスを確立する手法が提案されている。この手法では、オンデマンド型のルーティングプロトコルである DSR をベースとして利用し、単位時間当たりの送信データパケット数をノードの負荷の基準とし、制御パケットの破棄を行う拡張を加えて負荷分散を実現している。

3 AODV の概要

3.1 AODV でのルート確立方法

本稿では、オンデマンド型のルーティングプロトコルとして AODV(Ad hoc On Demand Distance Vector)を利用する。AODV では通信を開始するノード(送信元ノード)は宛先ノードへのパス(経路)情報を自ノードで保持しているかを調べ、宛先ノードへのパスを保持していない場合、パスの探索動作を開始する。以下では AODV でのパス探索動作による経路確立方法について概要を示す。

送信元ノードは宛先ノードへのパスを発見するために経路要求メッセージ(RREQ: Route Request)をブロードキャストする。RREQ を受け取ったノードは自分が宛先ノードかもしくは宛先ノードへの有効なパスを持っているかを調べ、そうでなければ RREQ をブロードキャストする。その際、送信元ノードへのパス(逆方向パス)情報エントリに RREQ を受け取ったノードを次ホップとして登録する。なお、一度受け取った RREQ については再送を行わず、受け取った RREQ は無視される。

宛先ノード、もしくは有効なパスを持ったノードが RREQ を受け取った場合、経路応答メッセージ(RREP: Route Reply)を送信元ノードに対してユニキャストで送信する。この際、RREQ を転送する際に作成した送信元ノードへの逆方向パスに沿って RREP はユニキャスト転送される。RREP を転送する各ノードでは、RREP を受け取ったノードを次ホップとする宛先ノードへのパス(順方向パス)情報を登録する。RREP が送信元ノードに到達す

ると構築された宛先ノードへの順方向パスを用いて宛先ノードと通信を開始することができる。各ノードに登録されたパス情報は再度通信を行うときに用いられ、また、一定期間使用されなかった場合にはルーティング情報エントリから消去される。

3.2 AODV での問題点

AODV では宛先ノードへのパスを発見するために RREQ がブロードキャストされるため、アドホックネットワークに参加するノードの数が増えた場合、多数のノードがパス生成に関与し、図 1 のように転送される制御パケットの数も増大してしまう。その結果、制御パケットの多発によるオーバーヘッドが発生し、ユーザデータの送信が阻害され輻輳が発生する問題が生じる。また、中継ノードにおいては制御パケットを多数転送してしまうため、シグナリングによる消費電力の増加などの問題も発生するおそれがある。

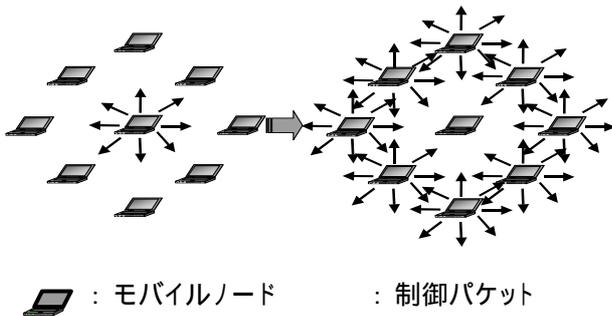


図 1 ノード数の増大に伴う制御パケットの増加

文献[6]において Royer らは各ノードの送信半径からわかる隣接ノード数に対し、最適なノード密度に関する評価を行っている。本稿ではこの点に着目し、各ノードが隣接ノードより受信する RREQ の個数から隣接ノード数を見積もり、また、そのノードにおける既確立のパス数を考慮して RREQ の中継を時間確率的に提供する方法の提案を行う。

4 提案方式の概要

4.1 機能要件

本方式ではアドホックネットワークに参加するノードが増加し、フラッディングによる制御パケットが増大した状況において、制御パケットの中継を確率的に抑制することで性能を向上させることを目指す。制御パケットの確率的な転送の際には隣接ノード数の推定だけでなく、ノードが収容しているパスの数も考慮することで特定のノードにパスが集中するのを防ぎ、負荷を分散させる。この手

法では多数のノードが参加するネットワークだけでなく、各ノードの通信する頻度が高い高負荷なネットワークにおいてもその効果が期待される。ただし、パラメータ情報の収集のために定期的な制御情報の送信などを行った場合、ネットワークへの負荷が増加してしまうため、そのような制御パケットを用いずに情報を収集する必要がある。本方式では次節に挙げる隣接ノードから受け取る RREQ の数および各ノードが収容しているパスの数に注目する。

4.2 制御パケットの抑制のために注目するパラメータ

本提案手法では、隣接ノードから受信する制御パケットの数および既確立のパス数という二つのパラメータを制御パケットの抑制のために注目する。これらは測定のために特別な制御パケットなどを必要とせず、従来の AODV においても取得可能なパラメータである。それぞれの計算方法を以下に述べる。

(1) 隣接ノードから受信する制御パケット数

AODV ではパス確立のために各ノードは自分宛でない RREQ を受け取ると隣接ノードに対してフラッディングを行う。このとき、隣接ノードからの RREQ の数をカウントすることにより隣接ノードの数を推測することができる。時間を時刻 $t=0$ から時間間隔 T ごとに分割し、それぞれの区間を T_j ($j=1,2,\dots$) と呼ぶ。ただし、 T_j は時刻 $t=jT$ から $t=(j+1)T$ の区間を表すものとする。各区間 T_j において隣接ノードから受信した RREQ の合計を N_j とする。この時、 N_j の指数重みつき移動平均を

$$\bar{N}_j = (1 - \alpha) \bar{N}_{j-1} + \alpha N_j$$

と定める。ここで、 α は (0,1) の値を取る指数重みつき平均の定数である。この値を RREQ の確率的な抑制のための指標として用いる。

(2) 既確立のパス数

あるノード i が現在収容しているパスの本数を r_i とし、ノードが収容可能なパスの本数を R_i としたとき、ノード i における収容率を次のように定義する。

$$L_i = \frac{r_i}{R_i}$$

この値を用いて、ノード i にどの程度パスが集中しているかの判断を行う。パスが集中しているノードを避けることにより負荷の分散が期待される。

4.3 提案手法によるパス確立方法

提案方式において各ノードは、隣接ノードから受け取る RREQ の数および自ノードが収容しているパスの数をカウントし、上記に述べた RREQ の指数重みつき平均

ならびにパス収容率を計算し保持するものとする。提案方式の動作イメージを図 2 に示す。

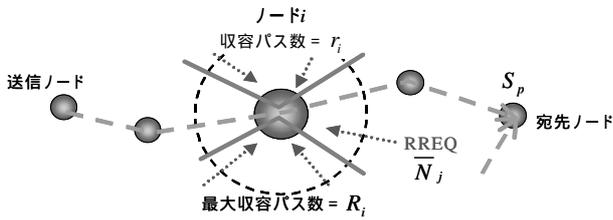


図 2 提案するルーティング方式

パスの確立の際には AODV と同様に、通信を開始する送信元ノードは宛先ノードへのパス情報を保持しているかを判断し、保持していない場合、パス探索動作を開始する。パス探索動作では送信元ノードは RREQ をブロードキャストする。RREQ を受け取ったノードは宛先が自ノードか、もしくは宛先への有効なパス情報を持っているかを調べる。条件に該当しない場合で、まだ一度もその RREQ を再送したことがなければ、次に示す確率に従って RREQ を再ブロードキャストする。ここで、ブロードキャストする確率の計算方法を示す。

ある時間区間 T_j において、閾値 h 、 l 、 $h > l$ に対して、 A_j を

$$A_j = \begin{cases} - & \text{if } \bar{N}_j > h, \\ + & \text{if } \bar{N}_j \leq l, \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases}$$

と定める。このとき、ノード i で時間区間 $T_{j=k}$ において RREQ を再ブロードキャストする確率(以下、転送確率とする)を

$$p_i(k) = \min[\max(0, 1 - f(L_i) + A_k), 1]$$

と定義する。ここで $f(L_i)$ は非負の値、 $f(L_i)$ は $[0, 1]$ の値を取る単調増加関数とする。本稿では、 $f(L_i) = \min(L_i, 1)$ を用いた。ただし、 $f(L_i)$ は $[0, 1]$ の値を取る定数とする。

RREQ をブロードキャストする際には送信元ノードへのパス(逆方向パス)を確立する。また、そのときノードに収容しているパスの数を 1 増加させる。RREQ が宛先、もしくは宛先への有効なパス情報を持つノードに達したときには送信元ノードへの逆方向パスに沿って RREP がユニキャストされる。RREP をユニキャストする際には宛先ノードへのパス(順方向パス)情報を登録し、さらに収容しているパスの数を 1 増加させる。RREP が送信元ノードに到達すると通信が開始される。確立したパスは

一定期間使用されない場合登録から消去され、同時に収容しているパスの数は 1 減算される。

5 性能評価と考察

提案方式の有効性を計算機シミュレーション[10]による実験で確認する。比較のため、AODV と提案方式について評価を行う。

5.1 評価環境

評価環境として各ノードは IEEE802.11 無線 LAN モデルを利用するものとし、一辺 1km の矩形領域にノードをランダムに固定配置した。図 3 にノードの配置およびシミュレーションのイメージを示す。ランダムに選択された 2 ノード間における 1 つの通信セッション時間を 1 秒とし、パケットサイズ 512 バイト、転送速度 64Kbps の固定レートとした。両方式において、RREQ の最大中継ホップ数(TTL)を 7 とし、エラー時の再パス確立、データ転送は行わないものとする。単位時間において通信しているノードの割合を通信頻度 F と定義した。ただし、提案方式について、 $\alpha = 0.0625$ 、 $T = 0.1$ 秒、 $R_i = 150$ 、 $r_i = 0.9$ 、 $f = 0.1$ とした。

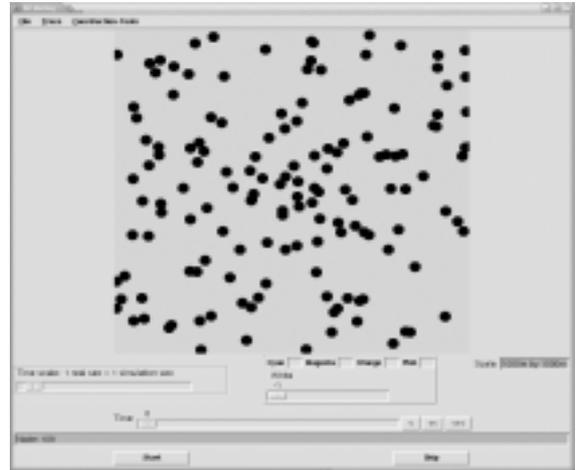


図 3 ノードの配置およびシミュレーションのイメージ

5.2 性能評価と考察

性能指標としてパス確立の成功率、1 回のパス探索動作における RREQ の数およびスループットに注目して評価を行った。

図 4 はネットワーク中のノード数および通信頻度 F に対するパス確立の成功率を表し、図 5 では 1 経路の確立に必要な RREQ の数を表している。転送確率を決定するパラメータは $(\alpha, T) = (0.1, 0.1)$ とした。ノード数が少な

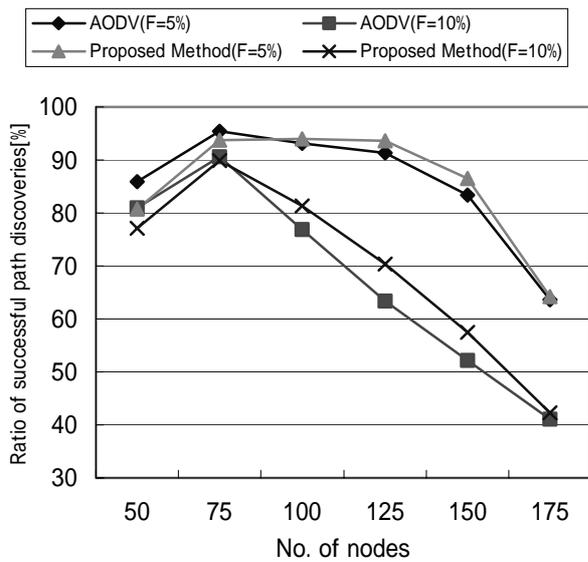


図 4 ノード数、通信頻度とパス確立成功率の関係

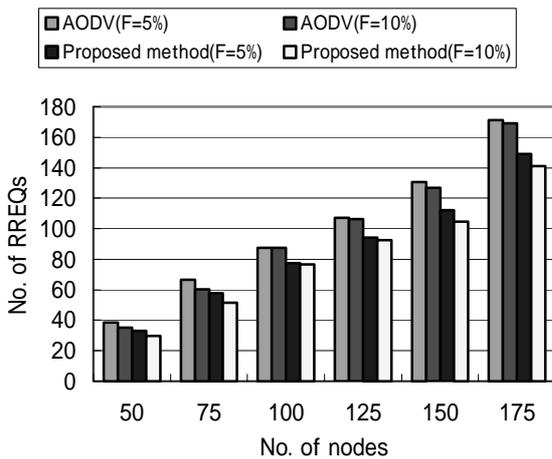


図 5 ノード数、通信頻度と RREQ 数の関係

い場合には、AODV の方が提案方式と比べ、パス確立成功率が高いが、ノード数が増えるにつれて提案方式の成功率が高くなることから分かる。ノード数が多い場合には提案方式によって不必要な RREQ の再送を抑えることができ、その結果パス確立の成功数が増加していると考えられる。一方、ノード数が少ない場合に、提案方式のパス確立成功率が低下している原因としては、RREQ の再送を確率的に抑制するため、ノード確立に必要なパケットを破棄している可能性が考えられる。このため、ノード数の少ない場合にはパラメータ(,)をより小さい値に設定する必要が生じる。また、通信頻度が増加した場合、AODV、提案方式のいずれもがパス確立成功率が減少するが、提案方式の方が減少する幅は小

さい。これらのことから、提案方式についてノード数が多く、通信頻度が高い状況においてその効果が現れることが確認できる。なお、ノード数が 50 ノードの際のパス確立成功率がノード数 75 のものよりも低いのは、ノード数が少ないためにノード間の接続性が低くなり、孤立するノードが存在するケースや、到達しにくいノード配置となるケースがあったためである。以下の評価においてはノード数を 150、通信頻度を 5% に固定して比較試験を行うものとする。

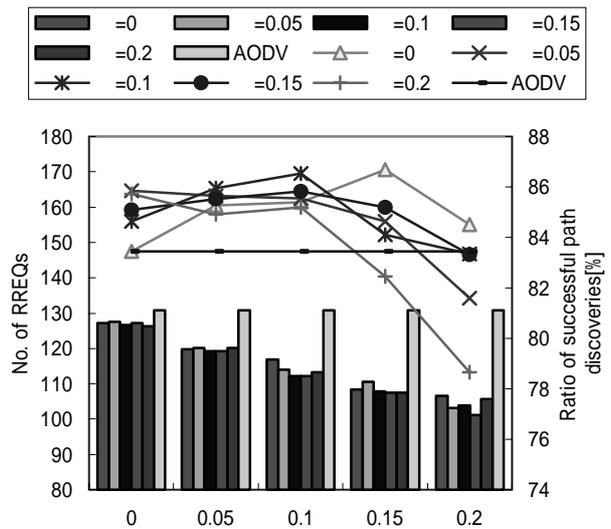


図 6 (,)と RREQ 数、パス確立成功率の関係

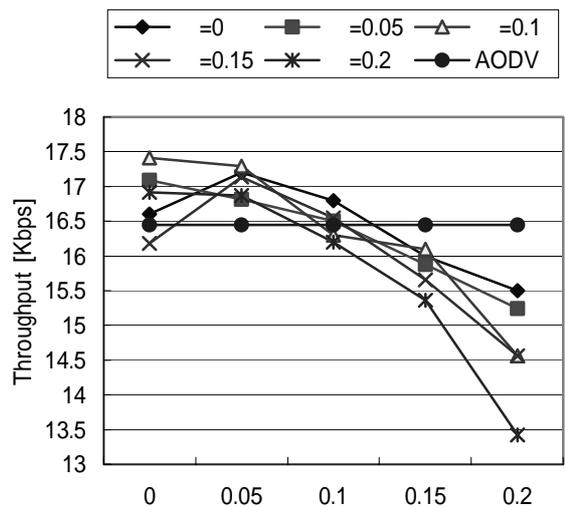


図 7 (,)とスループットの関係

図 6においてパラメータ(α , β)に対する1経路の確立に必要な RREQ 数ならびにパス確立の成功率、図 7においてパラメータ(α , β)に対するスループットについて示す。図 6の結果より、AODV と比較してパス確立の成功率を変えずに、RREQ の数を低減させる(α , β)が存在することが示されている。特に、1 経路の確立に必要な RREQ の数は AODV と比較して $\alpha=0.1$ のときには約 10%程度、 $\alpha=0.2$ のときには約 20%減少していることが分かる。ただし、RREQ の数を過度に低減した場合、パス確立の成功率が AODV よりも悪化しているケースも見受けられる。この原因としては RREQ を減少させすぎた場合、パス確立に最低限必要な RREQ が再送されない事象が発生してしまい、パス確立の成功率の低下につながると思われる。このことはネットワークのノード数が少ない場合に成功率が低下してしまう現象における考察とも一致する。また、図 7 の結果より、上記に述べたようなパス確立成功率を悪化させずに RREQ の数を減少させる(α , β)を用いてパス発見を行うことにより、高負荷時におけるデータ転送のスループットの向上が図られることが示された。

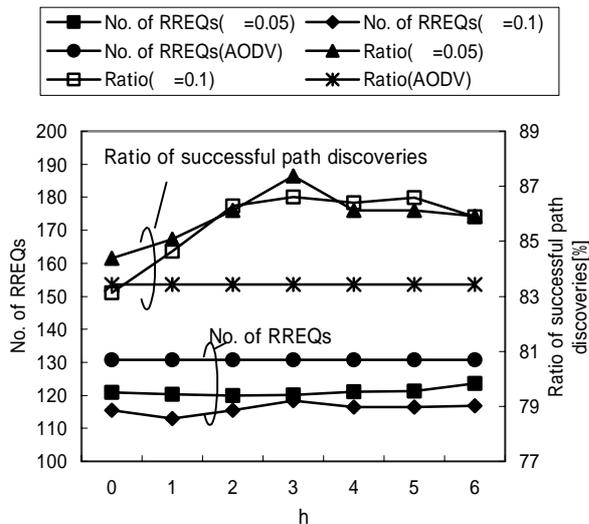


図 8 h とパス確立成功率との関係

本方式では隣接ノードより受け取る RREQ の数から隣接ノード数を推定して、RREQ の転送確率を決定している。これまでの考察により RREQ を過度に低減させた場合に性能が劣化する傾向が確認されている。これは、転送確率が高い場合、パス確立に必要な制御パケットを破棄することが原因として考えられる。そこで、 h を大きくすると、隣接ノード数が低いことが推定される場合に

パス確立に必要な RREQ の転送確率を増加させることが見込まれる。図 8 において h に対する 1 経路の確立に必要な RREQ の数およびパス確立成功率の関係を示す。ここでは $\alpha=0$ として $\alpha=0.05$, $\alpha=0.1$ の結果を示した。ある h に注目すると、 h を適切な値に設定することで RREQ の数はほぼ等しいがパス確立成功率が高くなる傾向が確認できる。これは、隣接ノードから受け取る RREQ の数に応じて効率的に RREQ の再送確率を減少させることで性能が高まることを示している。

6 まとめと今後の課題

本稿では、隣接ノードが送出する経路要求メッセージの数および送信データの中継するノードに収容されているパスの数から中継ノードでの RREQ の再ブロードキャストを確率的に抑制する手法を提案し、その有効性を計算機シミュレーションにより確認した。今後の課題としては、提案手法の実機への実装による評価や制御パケット再送確率の決定アルゴリズムの改良などが挙げられる。最後に、日頃御指導頂く KDDI 研究所浅見所長、松島副所長ならびに篠永執行役員に感謝致します。

参考文献

- [1] S. Corson and J. Macker, "Mobile ad hoc networking (MANET): Routing protocol performance issues and evaluation considerations," IETF RFC2501, 1999.
- [2] Mobile Ad-hoc Networks (manet) Charter, <http://www.ietf.org/html.charters/manet-charter.html>
- [3] C. Perkins and P. Bhagwat, "Destination-Sequenced Distance Vector routing (DSDV) for mobile computers," in Proc. SIGCOMM94, 1994.
- [4] C. Perkins and E. Royer, "Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing," in Proc. MILCOM97, 1997.
- [5] D. Johnson and D. Maltz, "Dynamic Source Routing in Ad hoc Wireless Networks," Mobile Computing, edited by T. Imielinski and H. Korth, Kluwer Publishing Company, 1996.
- [6] E. Royer, P. Melliar-Smith and L. Moser, "An Analysis of the Optimum Node Density for Ad hoc Mobile Networks," in Proc. IEEE ICC2001, 2001.
- [7] Y. Sasson, D. Cavin and A. Schiper, "Probabilistic Broadcast for Flooding in Wireless Mobile Ad hoc Networks," Technical Report IC/2002/54, 2002.
- [8] Z. Haas, J. Halpern and L. Li, "Gossip-Based Ad Hoc Routing," In IEEE INFOCOM, 2002.
- [9] 撫中, 大庭, 奥田, 渡辺, "高負荷アドホックネットワークにおけるノードの負荷を考慮したルート確立プロトコルの提案とその評価," 信学誌, vol.J86-B, No.3, 2002.
- [10] Network Simulator 2, <http://www.isi.edu.nsnam/ns/>