

アドホックネットワークにおける 動的クラスタリングに基づく適応型経路制御

Adaptive Routing Based on Dynamic Clustering in Ad-hoc Networks

吉田 紀彦 * 田中 健介 * 澤村 崇博 * 松本 倫子 *

Norihiko Yoshida Kensuke Tanaka Takahiro Sawamura Noriko Matsumoto

Ad-hoc networks do not need particular network equipments such as routers or base stations, and they are autonomously constructed from end-user terminals (nodes). In ad-hoc networks, routing is one of the most important issues so that nodes communicate with target nodes, and various protocols have been proposed. One of the most promising is Clusterbased routing. The Advantages of using cluster are mainly alleviation of flooding and amount of routing information that nodes maintain. However, as situations and topologies of an ad-hoc network are various and dynamic, it is difficult for a single fixed protocol to perform well for all occasions. Therefore, some dynamic and adaptive mechanism in routing protocols is necessary. In this paper, we propose an adaptive routing system for ad-hoc networks. This system begins in the same manner as a reactive protocol, and when the network situation gets unsuitable for the protocol, the system changes its manner of routing with a cluster-head in Cluster-based Routing, which emerges autonomously at the place of “hot spots” in the network. Consequently, this protocol system constructs clusters in a dynamic and adaptive manner.

keywords: Ad-hoc Network, Cluster-based Routing, Adaptive Network, Network Traffic Reduction

1 はじめに

アドホックネットワークとは、ルータや基地局のようなネットワークインフラを必要とせず、端末（ノード）のみによりその場的に構築されるネットワークである。アドホックネットワークは、ノードの移動性やネットワークの「その場的」な発生を想定しているため、目的のノードとの安定した通信を確立す

るには、経路制御は重要な要素である。

端末のみによって自律的に構成されるアドホックネットワークでは、特定のネットワーク設備を必要としないため比較的容易に柔軟性に富んだネットワークが構築可能である。しかし一方で、ルータのようなネットワーク全体の構成を把握して経路制御を行うものが存在しないために、端末自身が経路情報を取得しそれをもとに通信を行わなければならない。したがってどのように経路制御を行うかが重要な問題となってくる。

現在までにアドホックネットワークのために多く

*埼玉大学 工学部 情報システム工学科

Department of Information and Computer Sciences,
Saitama University, Saitama 338-8570, Japan

の経路制御プロトコルが提案されているが、アドホックネットワークはその柔軟性からネットワークの形状が様々であり、それらのどのプロトコルが最適であるかは適用するネットワークによって変わってくる。さらに、そもそもアドホックネットワークとはその場の（アドホック）に構成されるものであって、ネットワークの形状や状況などは事前に把握することが難しく、一度構築された後にも端末の移動や通信頻度などにより常に変化してしまう。

本研究ではこれらの問題に対応する手段として、ネットワークの開始後にネットワークの状況にあわせて動的に手法を変化させ、ネットワークに適した制御を行う適応型の経路制御を提案し、その設計を行った。すなわち、アドホックネットワークヘクラスタを導入することが、フラッディングの抑制やノードが保持すべき経路情報量の抑制といった点で有効である。しかし、アドホックネットワークが、ノードの移動などによりトポロジが常に変化するという特徴を持っているため、クラスタを固定的に形成することは困難である。そこで、本研究ではネットワークの開始後にクラスタを動的に形成させる方式についての提案と設計を行った。

2 経路制御手法

アドホックネットワークの経路制御手法には、大別して Reactive 型と Proactive 型がある。Reactive 型は通信の要求が発生してから経路を作成する方法であり、Proactive 型は定期的にノード同士が経路情報をやり取りすることで、あらかじめネットワーク内の経路情報を保持しておく方法である。

2.1 Reactive 型と Proactive 型

Reactive 型の経路制御方法においては、実際にデータ送信要求が発生した際に経路を構築する。ノードが他のノードへの経路を探索する場合は、ネットワーク中のノードへ経路探索パケットを送信する。これをフラッディング (flooding) という。フラッディングの多発はネットワーク内のトラフィックを増大させてしまう問題がある。代表的な方式には、DSR [1] や AODV [2] などがある。

フラッディングを抑制するという観点から、Proactive 型の経路制御は定期的にネットワーク内のノードと経路情報をやり取りしており、通信要求が発生した際にフラッディングは発生しない。しかし、経路情報を有効に維持するための負荷が大きくなってしまいう問題がある。代表的な方式には、OLSR [3] や TBRPF [4] が挙げられる。

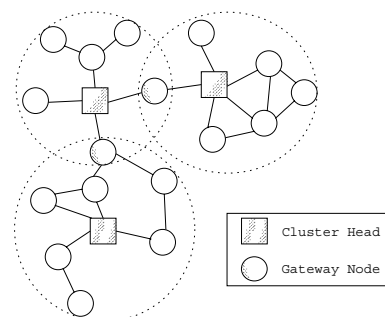


Figure 1: Cluster-based Routing

この他にも、2つの方式を自分からの距離などによって使い分けて併用するハイブリッド型 (例えば Zone Routing) や、ネットワークにクラス階層を持たせることによって制御パケット増大の問題を解消させようとしている階層型、GPS などによる位置情報を利用してネットワークのパフォーマンスを向上させている位置情報型などがある [5]。

2.2 クラスタ

フラッディングを抑制するという点において、クラスタ [6] を用いることは有効である。クラスタは、ネットワークをいくつかの集団に分割したものである。各クラスタでは、代表のノード (クラスタヘッド) がクラスタ内の経路情報を保持している。クラスタ内のノードは、通信要求が発生したときにはクラスタヘッドへ経路を問い合わせる。これにより、フラッディングの発生を抑制できる。Proactive 型とは違い、経路情報を保持するのはクラスタヘッドだけであり、保持すべき経路情報の範囲も制限される、というメリットもある (図 1)。

しかし、アドホックネットワークにおいてクラスタを固定的にしてしまうことは、次の点から困難である。

- アドホックネットワークは任意の空間にその場に形成されるネットワークであるため、事前の取り決めができない。
- ノードの移動などによりトポロジが変化する。

そこで、本研究では動的にクラスタを形成させる方式を提案する。

3 クラスタヘッドの動的選出

まず初期状態ではリアクティブ型で経路制御を行う。リアクティブ型での問題は、探索パケットのフラッディングによりトラフィック量が増え、ネットワークの負荷増大を招くことにある。そこで提案手法では、各端末が自分の周りのトラフィックの状況を観測し、必要に応じて自らをクラスタヘッド（ルータ端末）に格上げし周りの端末を結びつけ、これらの端末がクラスタヘッドを中心とした経路制御に切り替わることでこの問題を防いでいる [7]。つまり、トラフィック量が増大しリアクティブ型では効率が悪い状態になった場所にはクラスタヘッドが動的に生成し、その周囲の端末が直接クラスタヘッドに問い合わせを行うことで、トラフィック量の減少につながりネットワーク負荷を抑えられる仕組みとなっている。

この方式では、分散的に経路情報（完全ではない）を持つクラスタヘッドが配置されることになり、これは全ての端末がネットワーク内の完全な経路情報を持つプロアクティブ型と、基本的に必要となるまで経路情報を持たないリアクティブ型との中間の形をとる。またその間でどの程度の位置をとるかは、クラスタヘッドの存在個数つまりはトラフィック量によるため、ネットワークの状況によって動的に決定されることになる。

3.1 初期状態

提案手法は初期状態ではリアクティブ型の AODV で経路制御を行う。端末は定期的に Hello パケットを送信し近隣端末との接続性を確かめている。経路は RREQ (Route Request) パケットをフラッディングして探索し、宛先または宛先までの経路をキャッシュしている中間の端末が RREP (Route Reply) パケットを返答することで 2 つの端末間に経路が構築される。

3.2 経路情報のキャッシュ

リアクティブ型のプロトコルでは利用した経路情報を一時的にキャッシュする。通信頻度が上がり短時間の間に多数の経路を利用すれば、それにともないキャッシュされる経路情報も増える。そこで、キャッシュによってトラフィック量を判断し、制御手法変更の基準とする。

ここで、AODV では自分の周りのいる近隣端末と接続できなくなった場合、その近隣端末を利用した経路を持つ端末に対して Error パケットを送りそのことを通知する仕組みになっている。したがって

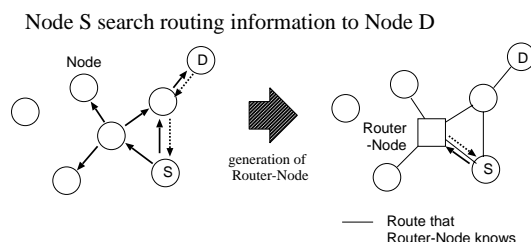


Figure 2: Emergence of Cluster Head

提案手法では経路の有効性は Error パケットの通知によって確認するものとし、キャッシュの有効時間を既定値よりも長く設定する。

3.3 クラスタヘッドへの格上げ

経路情報のキャッシュが一定量以上集まった端末は、ルータ端末へと格上げする。ルータ端末となった端末は周りの端末に対しその事を通知し、それらの端末からさらに経路情報を集める。

この時、集められた経路情報はそれぞれの端末用の経路情報であり他の端末がそのまま利用することはできない。そこでクラスタヘッドでは集めた経路情報からトポロジ表を作成する。そして、経路は問い合わせを受けた時点でトポロジ表からダイクストラ法によって作成する (図 2)。

3.4 経路情報の取得

各端末は以下の順序で経路情報の取得を試みる。

1. 自分の経路キャッシュをみる
2. 知っているクラスタヘッドに対して問い合わせを行う
3. 経路探索パケットをフラッディングする

それぞれの過程で経路情報がみつければそこで終了。みつからなければ次に進む。また、他の端末から経路探索パケットを受け取った時も、すぐにフラッディングをするのではなく上の過程をふむ。

3.5 データ送信・転送

AODV で経路制御を行っている場合、各端末は宛先と次の送信先などからなる経路表を持ち、この情報と送られてきたパケットの宛先から次の送信先を判断してパケットを送信することになる。しかし、

クラスタヘッドから返答された経路情報は送信元から宛先までの全ての経路を示すソースルートであり、この場合各端末はソースルートでデータを送信または転送する必要がある。そのためパケットにはソースルートであるかどうかを知らせるフラグがあり、ソースルートで送信時にはこのフラグを立てる。パケットを受け取った端末はまずこれを見て、転送の方法を決定することになる。これにはアクティブネットワーク技術 [8] を応用している。

4 クラスタの動的形成

クラスタヘッドとなるノードが選出されたならば、クラスタを次のような手順で形成していく。

4.1 クラスタ形成の概要

まずネットワーク内で、あるノードがクラスタヘッドとして選出されると、クラスタヘッドは自分の周囲 1 ホップを自分のクラスタ内に取り込む。クラスタに取り込まれたノードにおいて通信の要求が発生したときは、クラスタヘッドへ目的のノードへの経路を問い合わせる。クラスタヘッドが要求された経路情報を保持していれば、その経路を要求元へ返すが、経路情報を保持していなければ、要求元のノードは Reactive 型のフラッディングによる経路探索を行う。

その後、クラスタは周囲のノードを 1 つずつ取り込んでいき、徐々に拡大していく。クラスタは一定の大きさになるか、クラスタが別のクラスタと接触するまで大きくなっていく。クラスタ同士が接触した場合、クラスタ間の境界にあるノードがそれぞれのクラスタヘッドへ他方のクラスタヘッドの存在を通知する。この境界ノードはゲートウェイノードの役割を果たし、クラスタヘッドは他のクラスタヘッドと通信を行うことができるようになる。クラスタヘッドが他のクラスタヘッドと通信を行うことができれば、一方のクラスタヘッドが保持していない経路情報をもう一方のクラスタヘッドへ問い合わせることができる。これにより、クラスタヘッドに経路を問い合わせたときに経路が見つかる確率が高まり、フラッディングの発生が抑制できる [9]。

4.2 クラスタの発生

クラスタヘッドが選出されると、クラスタヘッドは周囲 1 ホップのノードへ自分の存在 (クラスタヘッドのアドレス) を通知する。この通知を受け取ったノードはクラスタヘッドを登録して、自分の属する

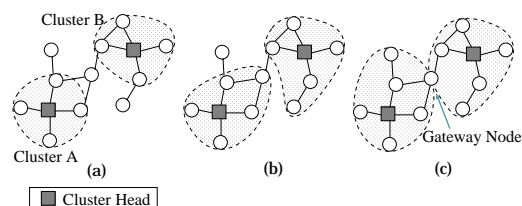


Figure 3: Dynamic Organization of Clusters

クラスタの情報を返答する。どのクラスタにも属していない場合は、何も付加せずに返答する。クラスタヘッドは返答を受け取ると、そのノードの経路情報をトポロジ表として保持する。これにより、クラスタヘッドの周囲に 1 ホップのクラスタが形成される。クラスタ内のノードはクラスタヘッドの存在を知っているため、経路を探索する場合、クラスタヘッドへ経路を問い合わせることができる。

4.3 クラスタの拡大と接触

クラスタの周囲 1 ホップにあるノード X がフラッディングにより経路探索を行ったとき、クラスタの最も外側のノード Y は経路探索パケットを受け取る。このとき、ノード Y はノード X が要求する経路情報をクラスタヘッドへ問い合わせるが、その前にノード X とやり取りを行ってノード X の情報も送信する。このノード X の情報とは、具体的にはノード X が属するクラスタのクラスタヘッドのアドレスである。クラスタヘッドはその情報を元にノード X をクラスタに含めるか否かを判断し、その結果を経路探索の結果を返信するときに付加する。このような操作を経て、クラスタは 1 つずつ周囲のノードを取り込み拡大していく (図 3)。

このようにクラスタは徐々に拡大し、やがてクラスタ同士が隣接しあう状態になる。ノード a が経路探索のためにフラッディングを行ったとすると、前段落のような手順で、ノード a はクラスタ B に取り込まれる。このとき、ノード a は既に属しているクラスタのクラスタヘッド A へクラスタヘッド B のアドレスを通知する。なお、クラスタヘッド B はノード a をクラスタに取り込むときに、ノード a からクラスタヘッド A の存在を知るので、通知をする必要はない。

このように、クラスタ同士が接触することで各クラスタヘッドはもう一方のクラスタヘッドと通信することができるようになる (図 4)。

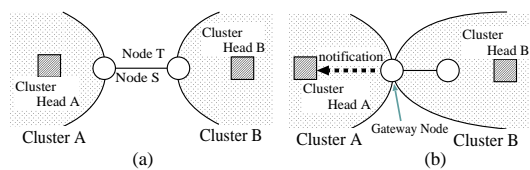


Figure 4: Enlargement of Clusters

4.4 他のクラスタへの問い合わせ

クラスタヘッドは要求されたノードへの経路情報を保持していないとき、他のクラスタのクラスタヘッドへ問い合わせを転送する。例えば、クラスタヘッド A からクラスタヘッド B へ問い合わせが行われたとき、クラスタヘッド B は目的のノードからクラスタ A とのゲートウェイノードまでの経路をクラスタヘッド A へ返信する必要がある。クラスタヘッド A はその経路を受信すると、ゲートウェイノードから経路の要求元ノード間の経路を作成し、受信した経路とつなぎ合わせる。これが要求元-目的ノード間の経路となる。

4.5 クラスタ内のトポロジ変化への対応

クラスタ内のトポロジが変化すると、クラスタヘッドが保持している経路情報では正しい経路制御が行えなくなる。そのため、クラスタ内の各ノードは定期的に Hello パケットを送出し、隣接ノードとの接続性を確認しあう。隣接ノードの変化を確認したノードは、クラスタヘッドへ変化を報告し、クラスタヘッドはそれに基づいて保持している経路情報を修正する。

5 おわりに

本研究ではネットワークの状況にあわせて動的に制御手法を変化させ対応する適応型経路制御の設計を行った。この手法は、リアクティブ型を基礎とするためプロアクティブ型に比べ経路維持のための負担は少なく、リアクティブ型で問題となる経路探索パケットのフラッディングによるトラフィック量増大を軽減することもできる。また、制御手法を決定づける基準が実際のネットワークの挙動に依存することになるこの手法においては、ネットワークが開始される前に少ない情報からプロトコルを選択せざるを得ない従来の手法よりも、よりネットワークに適した経路制御が行えると考えられる。

そして、選出された代表ノードをクラスタヘッドとして、動的にクラスタを形成していく方式の提案と設計を行った。クラスタは、クラスタヘッドが保持する経路情報の範囲を制御できることや、フラッディングの発生を抑制できるといった利点を持っている。提案方式は、選出されたクラスタヘッドを中心に徐々にクラスタが形成されていく設計となっており、固定的なクラスタの構築が困難であるアドホックネットワークでクラスタを形成することに適していると考えられる。一方、提案方式の初期では各クラスタは独立しており、フラッディングが多くなると考えられる。しかし、クラスタが拡大し、接触すると、クラスタ同士が通信を行えるようになり、フラッディングが抑制されていくと考えられる。

謝辞

本研究の一部は、平成 17 年度埼玉大学総合研究機構研究プロジェクト先端的研究 A05-09 の支援を受けている。

References

- [1] <http://www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-manet-dsr-10.txt>
- [2] <http://www.ietf.org/rfc/rfc3561.txt>
- [3] <http://www.ietf.org/rfc/rfc3626.txt>
- [4] <http://www.ietf.org/rfc/rfc3684.txt>
- [5] 小菅 他, “アドホックネットワークが開く新しい世界 (前編)”, 情報処理, Vol.44, No.10 (2003)
- [6] T. Nieberg, et al., “Collaborative Algorithms for Communication in Wireless Sensor Networks”, in T. Basten et al. eds., Ambient Intelligence, Kluwer (2003)
- [7] 田中, 吉田, “アドホックネットワークにおける適応型経路制御”, 情報処理学会/電子情報通信学会 情報科学技術フォーラム 2004 論文集, Vol.4, pp.61-62 (2004)
- [8] 山本, “アクティブネットワーク”, 電子情報通信学会誌, Vol.86, No.7, pp.489-492 (2003)
- [9] 澤村, 吉田, “アドホックネットワークの経路制御における動的クラスタリング”, 情報処理学会/電子情報通信学会 情報科学技術フォーラム 2005 論文集, Vol.4, pp.129-130 (2005)