

## アドホックネットワークにおけるリンク状態適応型ルーティング手法

中川 智 尋† 森川 博 之† 青山 友 紀†

アドホックネットワークを構成するノードはルータとしての機能を持ち、基地局を介さずに自律分散的に無線ネットワークを構築する。アドホックルーティング技術によれば、無線通信機能を備えた省電力ノードが多数存在する高密度なネットワークにおいて、機器の遠隔制御およびインターネットワーキング、センサを利用した情報収集など様々なアプリケーションの展開が期待される。筆者らはこのようなネットワークを高密度ネットワークと呼んでいる。高密度ネットワークにおけるノードは通信半径や移動頻度、電力供給の形態において多様性を持つため、ルーティングプロトコルには様々な要求条件が課される。本稿では、高密度ネットワークにおけるノードの多様性に適応する経路制御手法 SARAH を示す。

### Stability Adaptive Routing in Ad-hoc Networks of Heterogeneous Nodes (SARAH)

TOMOHIRO NAKAGAWA,† HIROYUKI MORIKAWA†  
and TOMONORI AOYAMA†

Nodes in ad hoc networks have function as routers, which makes it possible that they construct wireless networks without the aid of base stations. Ad hoc routing technology will give us diverse application such as remote control and internetworking of appliances or gathering information using wireless sensors. We call this kind of networks as High-density Networks. A routing protocol for High-density Networks must meet diverse requirements derived from diversity of nodes in High-density Networks such as communication radius, node mobility, and power supply. In this paper we propose an ad hoc routing protocol SARAH which cope with diversity of nodes in High-density Networks.

#### 1. ま え が き

アドホックネットワーク技術<sup>1)</sup>は無線ノード同士が基地局を介さずに通信するための技術であり、通信ノード対の距離がお互いの通信半径を越える場合には、ネットワークに参加している他のノードがルータの役割を果たしてパケットを中継することにより通信する。携帯機器や家電製品等のノードに情報通信機能が備わることにより、場所や時間を問わずに遠隔操作や情報通信が可能となり、従来の枠組みを越えて機器の特性を生かした柔軟なサービスが実現する<sup>2)</sup>。筆者らはこのようなネットワークを高密度ネットワークと呼んでいる。多数の機器が情報通信機能を備え、無線によりIP接続されるためにはアドホックネットワーク技術が必須の要素技術となる。従来のアドホックルーティング手法は構成ノードが一樣であることを前提とした研究が主であった<sup>3)4)5)6)</sup>。しかし、高密度ネットワークを構成するノードは多様な特性を持つため、ルーティングプロトコルにはノードの多様性に由来した従来と

異なる要求条件が課される。

本稿では、通信半径、移動頻度、電力供給の観点から多様性を持つノードによって構成されるアドホックネットワークにおいて、ノードの多様性に由来するルーティングプロトコルへの要求条件を明らかにするとともに、これらを満たす経路制御手法 SARAH (Stability Adaptive Routing in Adhoc Networks of Heterogeneous Nodes) を示す。

2節では、高密度ネットワークにおけるノードの多様性について述べ、ノードの多様性に由来して生じるルーティングプロトコルへの要求条件を明らかにする。3節では、これらの要求条件を満たす手法 SARAH について述べる。4節では、関連研究における安定ルート構築手法について述べる。5節では、コンピュータシミュレーションによりアルゴリズムを評価する。

#### 2. ノードの多様性

図1に高密度ネットワークの特徴と、それに由来して生じるルーティングプロトコルへの要求条件を示す。ネットワークを構成するノードが多様性を持つ場合、すなわち通信半径や移動頻度、電力供給形態がノード

† 東京大学工学系研究科  
School of Engineering, University of Tokyo

によって異なるならば、ルーティングプロトコルはその最大の目的である頻繁なトポロジー変化への追従やリンクフリーの保証に加えて、電池駆動ノードの保護および片方向リンクへの対応等が問題となる<sup>7)</sup>。

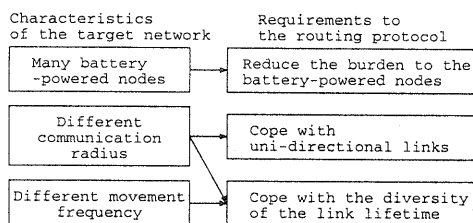


図1 ルーティングプロトコルへの要求条件  
Fig. 1 Requirements to the routing protocol

定常的な電力供給のあるノードと電力供給の乏しい電池駆動ノードが混在するネットワークにおいて電池駆動ノードの電力消費を抑えるためには、制御パケット量の少ないルーティング手法が必要となる。経路制御情報を定期的に広告する手法は避けるべきであり、必要に応じて残余電力の乏しいノードを迂回してルートを構築できることが望ましい。

また、通信半径がノードにより異なる場合、ノード間のリンクには双方向リンクと片方向リンクが生じる。双方向リンクと共に片方向リンクも利用してルートを構築することにより、ルートのホップ数を減少させ、ネットワークの接続性を向上させられるという利点がある<sup>8)</sup>。しかし、片方向リンクに対応するためには送信元ノードと宛先ノードの間に非対称な往路と復路を構築することが必要であり、ルートの新規構築やルート切断時の再構築の際にリンクの双方向性を前提としたアルゴリズムを利用するプロトコルは無効である。

さらに、通信半径と移動頻度の多様性に由来して、ネットワーク内には様々な長さの寿命を持つリンクが混在する。移動頻度の小さいノード対が保持するリンクの寿命は、そのリンクの上流ノードの通信半径によらず長い寿命を持つ。また、通信ノード対のうち一方のノードの移動頻度が大きい場合でも、リンクの上流ノードの通信半径がノード間に生じる距離よりも十分に大きければ、リンクは長い寿命を持つ。これに対し、通信半径の小さいノードが移動頻度の大きいノードとの間に生成するリンクの寿命は短く、移動中のノードとの間に生成するリンクの寿命はさらに短い。ルートの切断とはルート上の任意のリンクの切断を意味するため、ルートの寿命はルートに含まれるリンクの寿命のうち最短のリンク寿命に一致する。リンク寿命が多様であるネットワークにおいてルート構築時に寿命の

短いリンクを回避して安定なルートを構築しなければ、より寿命の長いルートを構築可能であるにも関わらず、繰り返し寿命の短いルートを構築することにより頻繁にルートの切断を起こす可能性がある。

特に片方向リンクをサポートする場合、往路と復路の異なる非対称なルートを構築するため、ルート上のリンク数は対称ルートの2倍となる。したがって、ルート上に寿命の短いリンクを含む可能性は対称ルートを構築する場合に比べて格段に大きくなる。ルートの切断時にはルート再構築が必要となるため、スループット低下、通信時間増大が問題となる。さらに、ルート再構築に要する制御パケットがネットワーク帯域資源およびノードの電力の浪費につながる。

以上のように、多様なノードにより構成される高密度ネットワークのためのルーティングプロトコルは、電池駆動ノードの保護、片方向リンクへの対応、安定ルートの構築という要求条件を満たすことが必要である。

### 3. SARAH

SARAHでは送信元発信オンデマンド型経路制御手法によりルートを構築することにより、ノードの多様性に由来する要求条件を満たすことができる。SARAHプロトコルの要素を以下に示す。

- 送信元発信オンデマンド型ルート構築機構
- 安定ルート構築機構
- 構築ルート切換え機構

本節では、これらの機構について順に述べる。

#### 3.1 送信元発信オンデマンド型ルート構築機構

ノード間の経路を決定するためには、宛先ノードまでのホップ数、あるいはルート上の中継ノードのアドレス等の経路情報を、送信元ノードあるいは中継ノードが保持することが必要である。

##### 3.1.1 SARAHの設計指針

表1に示すように、経路制御手法は定期的に各ノードが自分の保持する経路情報を制御パケットに記録してブロードキャストすることにより全ての目的地への経路情報を常に保持する手法(テーブル駆動型)と、データの送信要求が生じた際に制御パケットをフラグディングして宛先までの経路情報をオンデマンドに獲得する手法(オンデマンド型)に大別される。また、オンデマンド型手法は、送信元ノードから宛先ノードに向けて制御パケットを発信し経路情報を制御パケットに記録する手法<sup>4)5)9)10)</sup>(送信元発信型)と、宛先ノードより発信したパケットを利用して経路情報をノードに記録する手法<sup>6)</sup>(宛先発信型)とに分けら

	table driven	on demand	
		source →target	target →source
power consumption	unsuitable	suitable	suitable
uni-directional links	possible, but unsuitable	suitable	unsuitable
avoid short-lifetime links	possible, but unsuitable	suitable	unsuitable

表1 ルーティングプロトコルの設計指針  
Table.1 Design choice of routing protocols

れる。

なお、ここでブロードキャストとは送信元ノードがパケットを TTL=1 で発信し、パケットを受信した隣接ノードがパケットをそれ以上中継しない動作と定義する。フラディングとは送信元ノードがパケットをブロードキャストし、パケットを受信したノードが再びこのパケットをブロードキャストすることにより、送信元ノードから到達可能な全ノードが一回ずつブロードキャストを行う動作と定義する。このとき、既にブロードキャストを行ったパケットを受信した場合には、ノードは当該パケットのブロードキャストを行わない。

SARAH では、オンデマンド型の手法をベースとして経路制御プロトコルを設計する。テーブル駆動型の手法は消費電力面でのノードへの負担が存在し、特に片方向リンクをサポートする場合にこの負担が大きくなるためである。

具体的には、双方向リンクを前提としたテーブル駆動型手法<sup>3)</sup>では、宛先ノードまでのホップ数を制御パケットに記して広告するため、ネットワークを構成するノード数を  $n$  としたとき隣接ノード間で交換する経路情報は  $O(n)$  のオーダーとなる。この経路情報を片方向リンクに対応するように拡張したテーブル駆動型手法<sup>11)</sup>では、送信元ノードと宛先ノードの組合わせ毎に往路と復路のホップ数情報が必要である。従って、制御パケットに記録されるホップ数情報は  $O(n^2)$  となる。また、安定ルートの構築をテーブル駆動型手法で実現するためには、経路情報以外にリンク安定度の情報を付与することになるため、制御情報はさらに拡大される。テーブル駆動型の手法では、この制御情報を定期的に広告するため、情報のサイズが大きくなるほどノードの電力消費の負担が大きくなる。

一方、オンデマンド型の手法では、新しいノード間でのデータ送信要求がなく、構築済みルートに関する部分のトポロジーに変化がなければ、ルートの新規構築、再構築の必要がない。したがって、消費電力の観点から、SARAH ではオンデマンド型のルート構築を行う。なお、テーブル駆動型手法では各ノードが任意

の目的地へのルートを常に保持するのに対して、オンデマンド型の手法ではデータ送信要求が生じた際にルートを構築する。このため、データ送信要求が生じてからデータを送信するまでの遅延が生じる点ではオンデマンド型手法が劣る。

オンデマンド型手法は、表1のように送信元発信型と宛先発信型に分類できる。SARAH では送信元発信型手法によりルートを構築する。

宛先発信型手法は、ルート構築の制御パケットの流れる方向が構築すべきルートの方向と逆であるため、片方向リンクに対応したルートを構築するには本質的に不適當である。

これに対して、送信元発信型手法は片方向リンクをサポートする場合に、制御パケットが流れる方向と構築すべきルート上の片方向リンクの方向が一致するため、非対称なルート構築との親和性がよい。つまり、送信元からフラディングされた制御パケットは、中継ノードの ID をヘッダ上に記録することにより宛先発信型と比較して容易に経路を決定することができる。

さらに、送信元発信型手法では、電池駆動ノードの残余電力の問題や寿命の短いリンクを回避する問題に関しても対処が可能である。例えば、残余電力の乏しいノードが制御パケットを受信した場合にはこの制御パケットを破棄し、あるいは寿命の短いリンクを経由したパケットをそのリンクの直下の中継ノードが破棄することにより、これらの問題のあるノードやリンクを回避したルーティングを行うことができる。以上の理由から、SARAH では送信元発信オンデマンド型の指針により経路制御を行う。

### 3.1.2 送信元ノードの処理

図2に送信元ノードのアルゴリズムを示す。以下では、図2に従ってルート構築の流れを述べる。データ送信要求が生じると、送信元ノードはルートキャッシュ (Route Cache:RC) とルート要求テーブル (Route Request Table:RRT) を確認し、ルート (Source Route:SR) が RC に存在せず、かつルートを構築中でない場合に限りルート要求パケット (Route Request Packet:RREQ) をフラディングする。データパケット (Data Packet:DATA) はルート構築中は送信バッファ (Send Buffer:SB) に格納される。

送信元ノードがフラディングにより送信した RREQ を受信した中継ノードは、そのノード自身の ID をヘッダに加えて再ブロードキャストを行う。これを繰り返すことによりヘッダには送信元ノードから宛先ノードへのルートが記録される。宛先ノードは RREQ を受信すると、ヘッダに記録されたルートをルート応



パケットを中継する（図3右）. このようにして、不

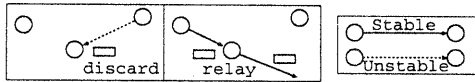


図3 制御パケットの中継判断  
Fig. 3 Judgement of relaying control packets

安定と判断されたリンクを迂回してルートを構築することができる。

図4に中継ノードの処理を示す。RREQ, RREPを受信したノードはそのパケットを中継した一つ前のノードをパケットヘッダ上のSRにより確認し、リンク安定度記録(Link Stability Record:LSR)に記録する。中継ノードはLSRに基づいて上流ノードからのリンクの安定度を判断する。リンク安定度の判断の具体的な手法に関しては3.2.2で述べる。

受信ノードは更新されたLSRに基づいてリンクの安定度を再計算し、パケット中継記録(Relayed Packet Record:RPR)を確認する。受信パケットをまだ中継していなければヘッダ上のSRに受信ノードのIDを付与する。次に、受信ノードが目的地ノードでなければ受信パケットのヘッダ上に記録された構築するルートの種類を確認する。安定ルートを構築する場合は、制御パケットが通過した、ノードの直上リンクの安定度を判断して制御パケットを中継すべきか否かを決定する。単純なフラッディングによるルートを構築する場合は、リンクの安定度の判断をせずにパケットを中継する。中継したパケットはRPRに記録し、同一パケットを再度中継することを防止する。

### 3.2.2 リンクの安定度

リンクの安定度の判断には、当該リンクを経由して受信した制御パケットの数が多ほど安定と判断する。ノードの電力消費をなるべく抑制し、ネットワーク帯域を有効利用するには、制御パケットの定期的広告を利用せずにリンク寿命を判断する手法が適している。この場合、ノードが記録しうるパケットとしては、DATA,ACK およびルート要求パケット(RREQ)、ルート応答パケット(RREP)がある。リンクの記録回数を安定度の判断に利用するためには、異なるリンク間での記録回数が公平である必要がある。このため、一様にブロードキャストされる、つまりフラッディングされるパケットを利用する。このような観点から、ルート構築の際に全ノードがブロードキャストする制御パケット(RREQ, RREP)を各ノードがリンク毎に記録し、そのノードへのリンクの安定度を判断するために利用する。

SARAHではリンクの安定度の判定に利用するパ

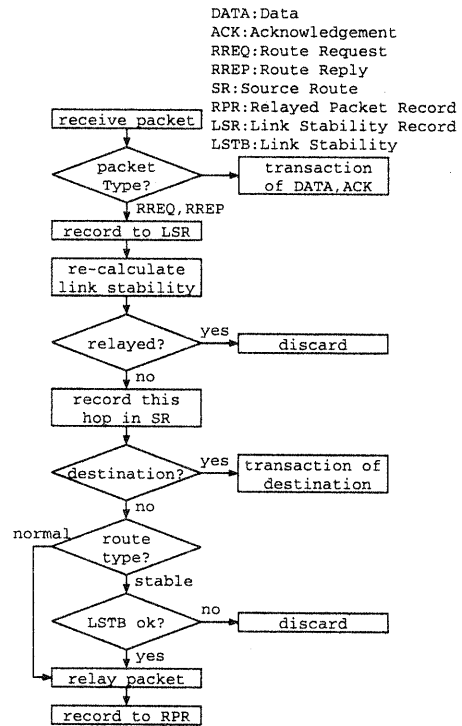


図4 中継ノードのアルゴリズム  
Fig. 4 Algorithm in intermediate node

ケットはルート構築のための制御パケットであり、ルートの新規構築時および再構築時のみにパケット受信回数を記録され、安定度情報が更新される。つまり、ルートの構築要求が頻繁に生じた場合には制御パケットの受信回数が大きく増加し、ルートの構築要求が生じない場合には制御パケットの受信回数は増加しない。したがって、閾値を制御パケットの一定の受信回数に設定する手法<sup>9)10)</sup>では、各リンクに対して異なる時刻において公平に安定度の判断を行うことができない。閾値として設定する値には、異なる時刻での判断を公平に行うことが要求される。

なお、ルートの新規構築要求や再構築要求が生じない期間は、リンクの安定度情報を得ることはできないが、このような期間には特に安定度情報が必要ないため大きな問題とはならない。ルート構築要求が密に生じてリンクの安定度が必要とされる場合には、リンクの記録回数が増し、詳細な安定度情報を利用することができる。ノードは制御パケットを受信した際、このパケットを中継する前に閾値を再計算し、つねに最新の安定度情報を保持する。

ここで、ノードが直上リンク毎に記録した制御パケット受信回数に基づいてリンク安定度の概念を導入

する。SARAHでは、ノードの保持するリンクが制御パケットを受信した回数を、各リンクの受信回数のうち最大値を用いて正規化した値を安定度と定義する。図5左は各リンクを経由して受信した制御パケットの受信回数を示している。4つのリンクの中で受信回数が最大のリンクdの受信回数が50であるため、この値で各リンクの受信回数を正規化すると図5右のようになる。この定義によれば、最大の受信回数を持つリ

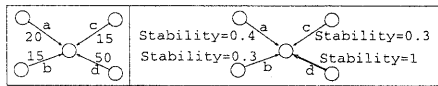


図5 安定度の定義  
Fig. 5 Definition of stability

ンクの安定度は1、制御パケットを全く受信していないリンクの安定度は0であり、各リンクは0以上1以下の安定度を保持する。

### 3.2.3 中継判断の閾値

上記の方法で定義したリンクの安定度に従って、各リンクを安定リンクと不安定リンクに分類し、不安定リンクを排除してルート構築を行う。この際、リンクが安定であるか否かを判定するための閾値  $S_{th}$  は、各リンクの安定度  $S_0, S_1, \dots, S_k$  の関数として、

$$S_{th} = f(S_0, S_1, \dots, S_k)$$

と表される。閾値  $S_{th}$  は、リンクを安定リンク群と不安定リンク群に分類する機能に加えて、以下の要求を満たすように設定する。

- 不安定リンクの安定リンクへの移行
- 制御パケット受信記録時刻の差
- 失われたリンクの安定度情報の破棄

以下では、閾値  $S_{th}$  を決定する関数として、各リンクの安定度の平均値を求める関数を採用した場合について検討する。

まず、不安定リンクが安定リンクに移行するための機構について述べる。SARAHでは、各リンクを経て制御パケットを受信した回数にばらつきがある場合に問題が生じる。制御パケットの受信回数が増加しても、閾値として各リンクの平均値を使用している場合、安定度の判断結果に変化は現れない。つまり、不安定と判断されているリンクは、制御パケットの受信回数が増加しても常に不安定と判断される。

不安定リンクが制御パケットを受信し続けることにより安定リンクへと移行するために、各リンク毎の制御パケットの受信回数に上限値を設ける。受信回数の記録にタイムスタンプを付与し、古い記録を破棄する方法でも同様の効果を得られるが、この方法では長時間にわたってルート構築要求が生じない場合に安定度

情報が失われてしまうため、上記の方法を採用する。

次に、制御パケットのノードへの到着時刻の差を解消する機構について述べる。同一のルート構築要求に対してフラッディングされた制御パケットを受信する時刻は各リンクによって異なる。この時間差は、最大で制御パケットが発信されてから、ネットワーク内の全てのノードが受信するまでの時間となる。したがって、ルート構築中に制御パケットを受信したノードがリンクの安定性を判断する際に、リンク毎の制御パケット記録回数が公平ではない。ある時刻に  $n$  本のルートを構築中であれば、リンク毎の制御パケット記録回数の差は最大で  $n$  となり、安定度判断を誤る原因となる。そこで、同一のルート構築要求に対して、最初に制御パケットを受信した時刻から時間  $t$  が経過した後に、各リンクの受信回数を一斉に更新することにより、各リンクの制御パケット受信時刻の差を解消することができる。猶予時間  $t$  としては、制御パケットがネットワーク内の全てのノードによって受信されるまでの時間が必要である。そこで、ルート構築要求が生じた際に RREP の受信を待機する時間であるルート構築タイムアウト時間を用いる。

最後に、切断したリンクの安定度情報を破棄する機構について述べる。ノードの移動により安定リンクが切断した時、このリンクに関する制御パケットの記録はリンク切断後もリンクの下流のノードに残る。この記録をノードがそのまま保持していると、もはや存在しないリンクの記録が原因となって閾値が意図した値よりも大きくなり、他のリンクが不安定リンクから安定リンクに移行することができない。

そこで、前回まで安定と判断されていたリンクから一定回数  $N_{no\_reception}$  にわたり制御パケットを受信しなくなった場合には、このリンクからの制御パケット受信記録回数を0に戻す。なお、 $N_{no\_reception}$  を小さな値に設定すると、電波状態の一時的悪化に伴って安定リンクを不安定と判断する。また、大きな値に設定すると、失われた安定リンクを消去するまでの遅延が増大する。

### 3.3 構築ルートの切換

図6左に示すような、通信半径が小さく頻繁に移動するノードは、周囲のノードに対して常に寿命の短い不安定なリンクを提供する(図6真中)。このようなノードが安定ルートの構築を試みると、最初の1ホップ目で隣接ノードがルート構築の制御パケットを破棄するため、ルートを構築することはできない(図6右)。送信元ノードは RREP 待機中にタイムアウトを起こし、DATA のルート構築寿命がまだ残っていれば再度

安定ルートの構築を試みるが、安定ルートの構築を試みる限り、このような送信元ノードはルートを構築できない。そこで、リンクの安定度を考慮せずに単純なフラディングによりルートを構築することが必要になる。

ノードはルート構築の度に安定ルートか単純なフラディングによるルートかを問わずルートの総構築回数  $N_{all}$  をカウントする。さらに安定ルートの構築時にタイムアウトが起って安定ルート構築に失敗した回数  $N_{stable}$  をカウントする。このとき、安定ルートの構築失敗率  $P_{stable\_fail}$  は、

$$P_{stable\_fail} = N_{stable\_fail} / N_{all}$$

となる。この  $P_{stable\_fail}$  があらかじめ定められた閾値  $T_{stable}$  を下回っていれば、送信元ノードは RREQ のヘッダ上の 1 ビットを利用して安定ルートを構築することを記録する。閾値を上回っていれば、RREQ に単純なフラディングによるルートを構築することを記録する。

中継ノードは RREQ を受信した際に構築するルートの種類を指示するビットを確認する。安定ルートを構築する場合には、RREQ が経由した直上リンクの安定度を確認してルートを構築する。単純なフラディングによりルートを構築する場合には、中継ノードはリンクの安定度に関係なく RREQ を中継する。このように安定ルートの構築失敗率にもとづいて送信元ノードが構築するルートの種類を選択することにより、通信半径が小さく頻りに移動するノードのように安定なルートを構築できないノードがルートを構築できずにタイムアウトを繰り返すことを防止する。

閾値  $T_{stable}$  の値が大きいと安定ルートを構築できないノードが安定ルート構築を試みる回数が増えるため、制御パケット量が多くなり、ルート構築遅延も増す。逆に、閾値  $T_{stable}$  の設定が小さすぎると、安定ルートの構築に失敗したノードは、安定ルートを構築できる状況でも、単純なフラディングによりルートを構築するためルートの切断回数が大きくなる。

#### 4. 評価

本手法の有効性を検証するために、単純なフラディングによりルートを構築する手法、および定期的にリンク状態を確認する制御情報を利用して安定なルートを構築する手法<sup>10)</sup>とのコンピュータシミュレーション

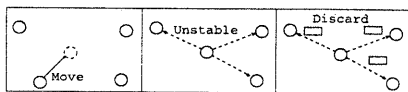


図 6 安定ルートを構築できないノード

Fig. 6 Nodes which can not construct stable routes

シミュレーション領域	7x7	m <sup>2</sup>
ノード数	100	nodes
通信半径 (大)	10	m
通信半径 (小)	1	m
移動ノードの速度	1	m
ルート構築回数の寿命 (RREQLT)	1	
データ送信回数の寿命 (DATALT)	2	
リンク情報破棄の閾値 (Nno_reception)	1	
構築ルート切替え閾値 (Tstable)	0.2	
データ送信時間間隔	0.2	s
データ送信回数	100	times
定期的広告の送信時間間隔 (SSA)	10	s
安定判断の閾値 (SSA)	3	times

表 2 シミュレーション条件  
Table.2 Simulation parameters

による比較を行った。

使用した各種定数を表 2 に示す。

シミュレーションにおいて、7m 四方の平面領域に 100 のノードが存在する。このうち 10% のノードは 10m、残りのノードは 1m の通信半径を持つ。移動ノード数の割合をパラメータとして、0% から 100% まで 10% ずつ変化させる。静止ノードは静止しつづける。移動ノードは 10[s] の静止の後ランダムな目的地を決定し、この目的地に向けて一定速度 1[m/s] で移動する。目的地に到着した移動ノードは、再び 10[s] 静止した後、同様の動作を繰り返す。通信モデルとしては、シミュレーション開始から 180[s] 以内でランダムに 10 対のノードを選択し、一方のノードが他方のノードに対して 0.2[s] 毎に 100 回ずつデータを送信する。SSA のリンク安定度判断のための定期的広告は 10[s] 間隔とし、安定と判断する閾値を 3 回とした。

図 7、図 8 はそれぞれルート切断回数、制御パケット数のグラフである。ルート切断は構築されたルートを利用して DATA を送信した際に、送信元ノードが ACK を受信せずにタイムアウトを起こした回数である。制御パケット数は、ルート構築に要する制御パケット数であり、SSA ではリンク状態を確認するための制御パケット数を加えて算出する。横軸はともに移動ノードの割合を示す。

図 2 によると、Flooding では寿命の短いリンクを含むルートが頻りに切断するのに対し、SSA および SARAH ではこのようなリンクを回避して安定なルートを構築するためルート切断回数が抑制される。図 3 によると、Flooding および SSA は SARAH よりも多くの制御パケットを必要とすることがわかる。Flooding では頻りにルートの切断に伴って再構築のための制御パケットが発信されるため、SSA では安定ルートを構築するために制御情報を定期的に発信するためである。以上の結果から、SARAH では SSA や Flooding

と比較して少ない制御パケットを利用して、SSA と同様の安定なルートを構築できることがわかる。

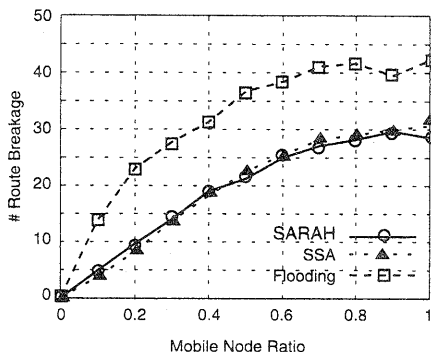


図7 ルート切断回数の減少  
Fig. 7 Reduction of route breakage

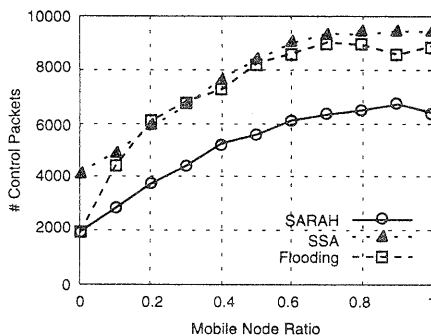


図8 制御パケットの減少  
Fig. 8 Reduction of control packets

## 5. 関連研究

従来の安定ルート構築手法は、定期的に関数状態を確認する制御パケットを広告し、隣接ノードからの制御情報の記録が一定回数に達した時点で、リンクを安定とみなす<sup>9)10)</sup>。

安定ルート構築の観点からこれらの手法を検討すると、トポロジー変化の激しさはネットワークによって様々であり、1つのネットワーク内でも時間の経過とともに変化する。閾値を制御パケット受信回数の一定値に固定すると、このようなトポロジー変化の激しさの多様性に適応してリンクの安定度を判断することができない。また、電力消費の観点からは、リンク状態を確認する制御パケットを定期的に広告する手法では、電力消費を抑えるという要求条件を満たすことはできない。

## 6. むすび

本稿では多様なノードにより構成される高密度ネッ

トワークにおいて、ノードの多様性に適応しうる送信元発信オンデマンド型手法 SARAH を示した。SARAH は、リンクの多様性に由来する不安定ルート構築の問題に対処するためにルート構築のための制御パケットの記録に基づいて安定なルートを構築する機能を持つ。この機能の効果をシミュレーションにより検証し、制御パケット量を抑制すると同時にルートの切断率を改善できることを示した。

## 参考文献

- 1) Elizabeth M. Royer and Chai-Keong Toh. A Review of Current Routing Protocols for Ad Hoc Mobile Wireless Networks. In *Proc. of IEEE Personal Communications*, 1999.
- 2) Mark Weiser. Ubiquitous computing. <http://www.ubiq.com/hypertext/weiser/UbiHome.html>.
- 3) Charles E. Perkins and Pravin Bhagwat. Highly dynamic destination-sequenced distance-vector routing (DSDV) for mobile computers. In *Proc. SIGCOMM'94*, 1994.
- 4) David B. Johnson and David A. Maltz. *Dynamic Source Routing in Ad Hoc Wireless Networks*. Kluwer Academic Publishers, 1996.
- 5) Charles E. Perkins and Elizabeth M. Royer. Ad-hoc On-Demand Distance Vector Routing. In *Proc. 2nd IEEE Wksp. Mobile Comp. Sys. and Apps.*, 1999.
- 6) Vincent D. Park and M. Scott Corson. A highly adaptive distributed routing algorithm for mobile wireless networks. In *Proc. INFOCOM'97*, 1997.
- 7) David B. Johnson. Routing in ad hoc networks of mobile hosts. In *Proc. of IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications*, 1994.
- 8) 西澤 正稔 萩野 浩明 原 隆浩 塚本 昌彦 西尾 章 治郎. アドホックネットワークにおけるリンク状態を考慮した片方向リンク対応ルーティング方式. In *DICOMO'99*, 1999.
- 9) Chai-Keong Toh. A novel distributed routing protocol to support ad-hoc mobile computing (ABR). In *Proc. of 15th IEEE Annual International Phoenix Conference on Computers and Communications*, 1996.
- 10) Kuang-Yeh Wang Rohit Dube, Cynthia D. Rais and Satish K. Tripathi. Signal stability based adaptive routing (SSA) for ad-hoc mobile networks. In *IEEE Personal Communications*, 1997.
- 11) Ravi Prakash. Unidirectional links prove costly in wireless ad-hoc networks. [http://www.utdallas.edu/~ravip/papers/adhoc\\_unidir.ps](http://www.utdallas.edu/~ravip/papers/adhoc_unidir.ps), 1999.