

## 特別研究報告

### 題目

アドホック無線ネットワークにおける  
経路情報を利用した TCP 性能向上手法の提案

### 指導教官

宮原 秀夫 教授

### 報告者

幸 太一

平成 14 年 2 月 19 日

大阪大学 基礎工学部 情報科学科

## アドホック無線ネットワークにおける経路情報を利用した TCP 性能向上手法の提案

幸 太一

### 内容梗概

アドホック無線ネットワークシステムを利用した製品のひとつであるフレキシブル無線ネットワークは、障害物や雑音によって無線回線の品質が劣化した場合でも、通信の信頼性を確保するための独自のプロトコルを実装している。アドホック無線ネットワークと有線ネットワークとの融合を考えた場合、トランスポート層プロトコルには TCP (Transmission Control Protocol) を用いるのが自然である。しかしこれまでは、フレキシブル無線ネットワークシステム上のトランスポート層に TCP を使った性能評価は行われていなかったため、その特性は明らかでなく、性能改善の余地があると考えられる。一般的なアドホック無線ネットワークにおける TCP の性能向上手法として ELFN (Explicit Link Failure Notification) 手法が提案されているが、ELFN をそのままフレキシブル無線ネットワークに適用するにはいくつかの問題点が挙げられる。しかし ELFN のように、短い期間のリンク切断に対応し、適切な処理を行うことは、フレキシブル無線ネットワークにおける TCP 性能向上に有用であると考えられる。そこで本報告では、まず、一般的な ELFN 手法について説明し、それをフレキシブル無線ネットワークに適用する際の問題点を述べる。また、フレキシブル無線ネットワークシステムに適するように ELFN を改良した手法を提案する。さらにシミュレーションによる性能評価を行い、提案手法によって TCP スループットを向上できることを示す。

### 主な用語

アドホック無線ネットワーク、TCP (Transmission Control Protocol)、ELFN (Explicit Link Failure Notification)、スループット

## 目次

<b>1</b>	<b>はじめに</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>FRN の概略</b>	<b>8</b>
2.1	ネットワークの構成要素とネットワーク構築手法	8
2.2	データリンクプロトコル	10
2.3	ルーティングプロトコル	14
<b>3</b>	<b>ELFN による TCP 性能向上と FRN における問題点</b>	<b>16</b>
3.1	ELFN による性能向上手法	16
3.2	ELFN 手法の FRN への適用に関する考察	18
<b>4</b>	<b>FRN の TCP 性能改善手法の提案</b>	<b>20</b>
4.1	リンク切断の検出方法	20
4.2	リンク切断を検出した場合の動作	21
4.2.1	他に利用可能な経路がある場合	21
4.2.2	他に利用可能な経路がない場合	21
4.3	利用停止状態からの復帰	23
<b>5</b>	<b>シミュレーションによる提案手法の評価</b>	<b>25</b>
5.1	シミュレーションモデル	25
5.2	提案手法における TCP スループットの評価	25
5.3	Delayed ACK オプションの適用	27
5.4	リンク切断発生率の影響	33
<b>6</b>	<b>おわりに</b>	<b>35</b>
	謝辞	36

## 図目次

1	FRN の構成	8
2	エコーと ACK による受領確認方式	11
3	中継送信と ACK 送信のタイミング	12
4	再送間隔が 3 スロット固定の場合	13
5	再送間隔が 3~5 スロットでランダムに決定される場合	13
6	目的ノードに至る隣接ノードの分類	14
7	ノードの移動に伴う経路変更の TCP への影響	18
8	ERDN と ERSN による送信ノードの制御	18
9	別経路を試す場合の例	22
10	別経路を試す場合のパケットの流れの例	22
11	ERDN を使って前のノードから経路を選び直す例	23
12	ERDN を送信する場合のパケットの流れの例	23
13	シミュレーションモデル	26
14	リンク切断の閾値によるスループットの変化 (ノード停止の発生率 0.01、平均継続時間 10.0 秒)	27
15	平均継続時間 2.5 秒の場合	28
16	平均継続時間 5.0 秒の場合	28
17	平均継続時間 20.0 秒の場合	29
18	ノード停止の平均継続時間によるスループットの変化	29
19	TCP の Delayed ACK オプション	30
20	Delayed ACK を適用したときのスループット	31
21	ノード停止の平均継続時間によるスループットの変化 (Delayed ACK を適用した場合)	32
22	平均継続時間 2.5 秒の場合	33
23	平均継続時間 5.0 秒の場合	34
24	平均継続時間 10.0 秒の場合	34

## 表 目 次

1	構成情報管理テーブル . . . . .	8
2	隣接ノード情報 . . . . .	9
3	構成制御パケットの例 . . . . .	9
4	信頼性値管理テーブルの例 . . . . .	10
5	リンク切断を検出するためのテーブル . . . . .	21
6	ノード停止の平均継続時間によるスループット向上率の変化 . . . . .	30
7	ノード停止の平均継続時間によるスループット向上率の変化 (Delayed ACK を適用した場合) . . . . .	32

## 1 はじめに

無線通信技術の進歩により、電波を介して通信を行う無線通信ネットワークが実用化され、さまざまな分野への応用が広がっている。無線ネットワークを構築する方式としては、携帯電話や無線 LAN のように、有線ネットワークに接続された基地局を介して端末を接続するセルラー方式がある。この方式では、無線回線は端末と基地局の間の通信で使用され、端末同士が直接通信しあうことはない。一方、アドホック無線ネットワークは、端末同士が無線回線によって直接通信を行ない、他の端末へのパケットの中継機能を有することで、自律分散的にネットワークを構築することができるシステムである。アドホック無線ネットワークは、基地局や有線回線を必要としないため、端末の配置やネットワーク拡張時に配線を行う必要がなく、端末の故障や移動などによるネットワーク形態の動的な変化にも各端末の自律的動作によって対応できるという特徴がある。そのため、アドホック無線ネットワークの特性の解析や、ルーティング等に関する研究が現在さかんに行われている [1, 2, 3]。

フレキシブル無線ネットワーク (FRN: Flexible Radio Network) は、アドホック無線ネットワークを構築するための製品であり、固定端末を配置することによって、容易に大規模なネットワークを構築できるシステムである [4, 5]。ネットワークを構成する各端末の通信範囲は約 500 m で、1 つのネットワークにつき最大 200 台まで設置することができる。変調方式には直接スペクトラム拡散方式を用い、周波数帯域は 2.4 GHz ISM バンド (Industrial, Scientific and Medical Band) を使用している。現在、FRN は、自動販売機の売上・故障情報や、工場内の消費電力情報などの収集などに用いられている。

近年、アドホック無線ネットワークの適用範囲が拡大するに伴って、有線ネットワークとの相互接続や、有線ネットワークと同様のサービス提供についての要求が高まっている。有線ネットワークでは、トランスポート層プロトコルとして TCP (Transmission Control Protocol) [6] が一般的に用いられているため、アドホック無線ネットワークでも TCP を用いた通信が行われることが求められている。一般に、無線回線は有線回線よりも伝送品質が不安定で、パケット損失が頻繁に発生するため、セルラー方式による無線ネットワークにおいても、TCP を効率よく伝送するための手法が課題となっている。そのため、アドホック無線ネットワークは無線回線の多段構成になり、端末の移動なども発生するため、コネクショ

ンの切断や経路の変更が起こりやすく、TCP の性能が著しく劣化してしまう。したがって、アドホック無線ネットワークにおいても、TCP を効率良く伝送するための手法を確立することが重要である。

アドホック無線ネットワークにおける TCP の性能向上手法に関する研究のひとつとして、ELFN (Explicit Link Failure Notification) が提案されている [7, 8]。ELFN は、端末の移動によって TCP コネクションの切断が発生した場合に、切断中のパケット損失やタイムアウトを最小限に防ぐため、TCP 送信端末に対して経路の切断を通知し、また新たな経路が設定された場合には再接続を通知して送信を制御することで、TCP の性能向上を目指した方式である。ELFN の対象となっているアドホック無線ネットワークでは、端末が頻繁に移動することが前提となっており、それによる経路の変更に焦点を当てていた。しかしながら、本報告で対象とする FRN では、基本的に端末は固定されており頻繁に移動することはない。そのため、ELFN が対象としているシステムとは経路変更の頻度や時間が異なり、そのまま FRN に適用しても効果が期待できない。また、FRN では、各端末はネットワークの構成を把握しており、経路変更が発生した場合でも、ただちに別の経路を確保することが可能である。すなわち、単に ELFN による送信端末の制御を行なうだけではなく、FRN が持っている経路情報を利用することで、より適した手法で TCP の性能を向上させることが期待できる。

そこで本報告では、端末の移動ではなく、雑音や障害物による短い期間のリンクの切断に着目し、FRN が持っている経路情報を利用した TCP の性能向上手法を提案し、その性能評価を行なう。本システムのように、各端末が自律分散的に動作するシステムの振る舞いを解析的に捉えることは困難である。そこで本報告では、提案方式を ns-2 [9] によるシミュレータ上に実装し、評価の対象となる性能指標を導出し、提案方式の効果を明らかにする。また、リンク切断の発生頻度や切断時間などに対して、提案方式が有効となるような制御パラメータの評価を併せて行なう。

以下、まず 2 章で FRN のシステムの概要について述べる。また 3 章では ELFN 手法の説明を行ない、この手法をそのまま FRN に適用することの問題点を述べる。4 章では、FRN の特性を考慮に入れて ELFN 手法を改良した TCP 性能向上手法の提案を行い、5 章でその

性能評価を行なう。最後に、6章で本報告のまとめと今後の課題について述べる。



## 2 FRNの概略

### 2.1 ネットワークの構成要素とネットワーク構築手法

図1に、本報告で対象とするFRNの構成要素を示す。本システムでは、パケットの送受信及び中継機能を持つ各無線機をノードと呼ぶ。また、あるノードから直接通信可能なノードを隣接ノードと呼び、ノードが互いに通信できる無線通信路をリンクと呼ぶ。また、データの発信・受信を行うデータ端末装置 (DTE: Data Terminal Equipment) に接続しているノードをホストノード、それ以外のノードを中継ノードと呼ぶ。各ノードは固有のIDを持っており、それによって識別される。

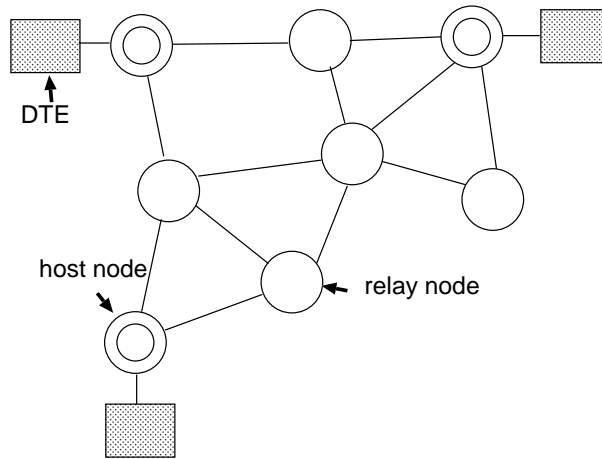


図 1: FRN の構成

表 1: 構成情報管理テーブル

ID:0	ID:1	ID:2	.....
隣接ノード情報	隣接ノード情報	隣接ノード情報	.....
隣接ノード情報	隣接ノード情報	隣接ノード情報	.....
:	:	:	.....

表 2: 隣接ノード情報

目的ノードに到達するために送出手の隣接ノードの ID
その隣接ノードから目的先ノードまでの中継回数
隣接ノードと自ノードとの通信路の信頼性値

表 3: 構成制御パケットの例

ID:0	ID:1	ID:2	ID:3	.....
0*	2	1	3	.....

\* 自分自身への中継回数は 0 とする

各ノードは、表 1 に示すような、構成情報管理テーブルと呼ばれるネットワーク情報を管理する。構成情報管理テーブルは、ネットワーク内の全ノードに対する自身からの相対的な位置情報を示すものであり、全ノードまでの中継回数とそのノードへのパケットを送出手のための隣接ノード情報を管理している。構成情報管理テーブルは、目的先ノード ID ごとに表 2 に示す隣接ノード情報を有する。

各ノードは、構成情報管理テーブルから全ノードへの最短中継回数を求めて表 3 のような構成制御パケットを生成し、構成制御周期と呼ばれる一定の周期ごとに送信先を指定せずに周囲のノードに送信している。構成制御パケットを受信したノードは、その情報を元に自身の構成情報管理テーブルを再構成する。構成制御周期については、その周期を短くすればネットワーク構成の変化に素早く対応できるが、構成制御パケットの負荷も大きくなるため、あまり短くすることはできない。

表 2 に示す隣接ノード情報における信頼性値とは、ノード間の通信の成功確率を表す値であり、表 4 に示すような信頼性値管理テーブルとして管理されている。各ノードは、自身以外の全ての無線機に対して、例えば過去  $X$  回の構成制御パケットの受信状況を  $Y/X$  のような信頼性値として保持しており、表中の  $\frac{Y}{X}$  と  $\times$  が他ノードからの構成制御パケットの受信・未受信を表している。また、ノード同士が直接通信可能であると認識するかどうかは、信頼性値に閾値を設定して行う。あるノードから対象とするノードへの信頼性値がその閾値より

表 4: 信頼性値管理テーブルの例

ID:0	×      ……      ×
ID:1	× ×      ……      × ×
:	:
:	:

大きければ、対象ノードを隣接ノードと認識し、構成情報管理テーブルに登録するが、信頼性値が閾値以下の場合、隣接ノードと認識せず、構成情報管理テーブルにも登録しない。

## 2.2 データリンクプロトコル

無線回線は固定時間のスロットで分割されており、パケット送信要求が生じた場合は、スロットの初めにキャリアセンスを行うことによってパケットの衝突を回避している。キャリアセンスとは、パケットを送信する際にあらかじめ通信路上の搬送波を調べることで、通信路が空いていればパケットを送信するが、他パケットの搬送波を検知した場合は、時間間隔を置いてから再送を行う。

また、無線通信の特性として、電波の到達する範囲内のすべてのノードは、パケットの送信先に関わらず、その送信を知ることができるということが挙げられる。フレキシブル無線ネットワークではこの特性を用いて、次のノードに中継送信したパケットを前ノードへのACKの代わりとして用いている。これを特に中継エコー（もしくは単にエコー）と呼ぶ。なお、ここでのACKとはTCPのものとは異なり、隣接ノード間の通信の成功を確認するものである。パケットの最終到着先であるホストノードだけは中継送信を行わないため、エコーを返さない。その代わりとして、パケットを受信したことを知らせるために前中継ノードにACKを返す処理を行う必要がある。パケット送信後、エコーもしくはACKというレスポンスを一定時間内に受信できなかったノードは、パケットの再送を行う。

図2に、中継回数2回のパケット送信の例を示す。この例では、ホストノードがノード1とノード3で、ノード1からノード3にノード2を経由してパケットaが送信される。この

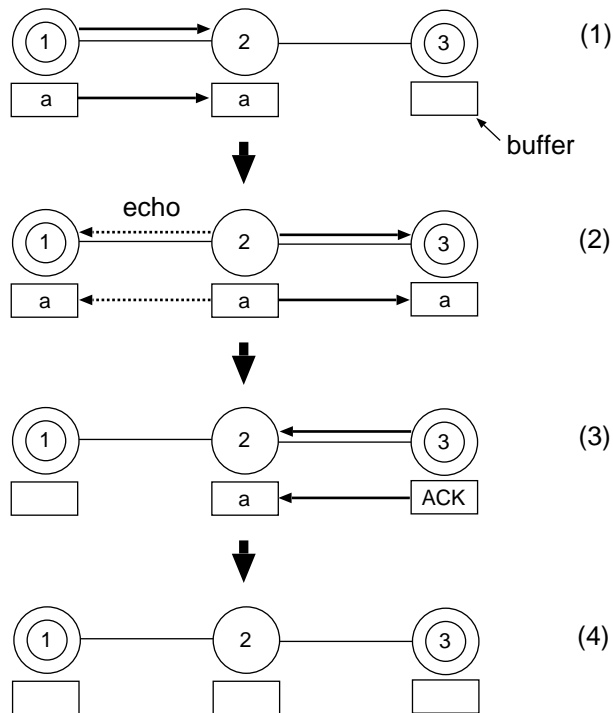


図 2: エコーと ACK による受領確認方式

図を用いて、パケット送信の流れとそのときのバッファの様子を説明する。

- (1) まずノード 1 で、ノード 3 への経路としてノード 2 を利用することを決定し、パケット a のヘッダに送信先としてノード 2 を指定したのち、パケット a を送信する。
- (2) パケット a を受け取ったノード 2 は、パケット a のヘッダから送信先が自分であることを確認し、今度は送信先をノード 3 としてノード 3 へ中継送信を行う。このとき、点線の矢印で表されるように、ノード 1 でもこのパケットを受信することになる。これが中継エコーである。
- (3) 中継エコーを受信したノード 1 は、ステップ (1) での送信成功を確認し、バッファ内のパケット a を消去する。また、パケット a を受信したノード 3 は、パケット a のヘッダから送信目的先ノードが自分自身であることを確認し、ノード 2 への ACK を送信する。

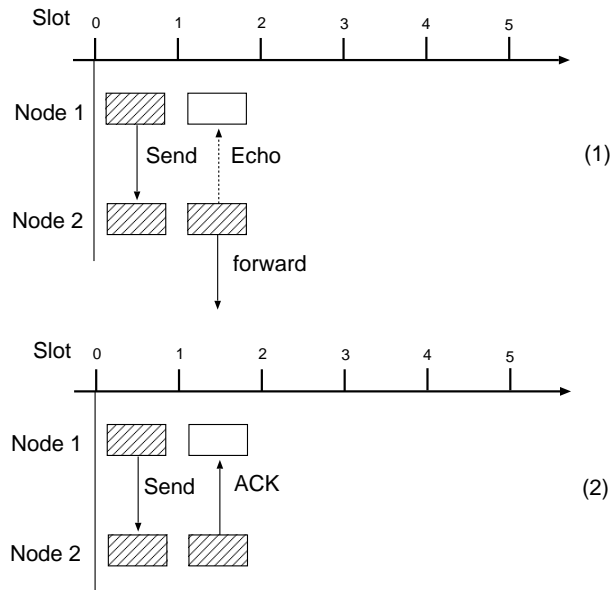


図 3: 中継送信と ACK 送信のタイミング

(4) ACK を受け取ったノード 2 は、ステップ (2) での送信成功を確認し、バッファ内のパケット a を消去する。

図 3 はパケットの送信のタイミングについて示している。パケットの中継や ACK の送信は、ともにパケットを受信した次のスロットで行なわれる。このとき中継エコー、もしくは ACK が返ってこなかった場合には、送信が失敗したと判断し再送となる。本来の FRN においては、再送は 3 スロット後に行われるように固定されている。しかしながら、図 4 に示すように、パケットの衝突によって送信が失敗し、再送が行なわれる場合、再送間隔がすべてのノードで一定であれば、同じタイミングで再送が行なわれるため、再びパケットの衝突が発生してしまう。このような FRN の問題点は [10] で指摘されており、図 5 に示すように、再送間隔を 3~5 スロットでランダムにすることで性能が向上することが明らかとなっている。したがって、本報告で評価の対象とするシステムにおいても、再送間隔を 3~5 スロットでランダムにすることとした。

また、再送を繰り返し、ネットワーク中にいつまでも存在し続けるパケットがあると、ノードにおけるバッファ容量を圧迫し、負荷の増大にもつながるため、すべてのパケットにはス

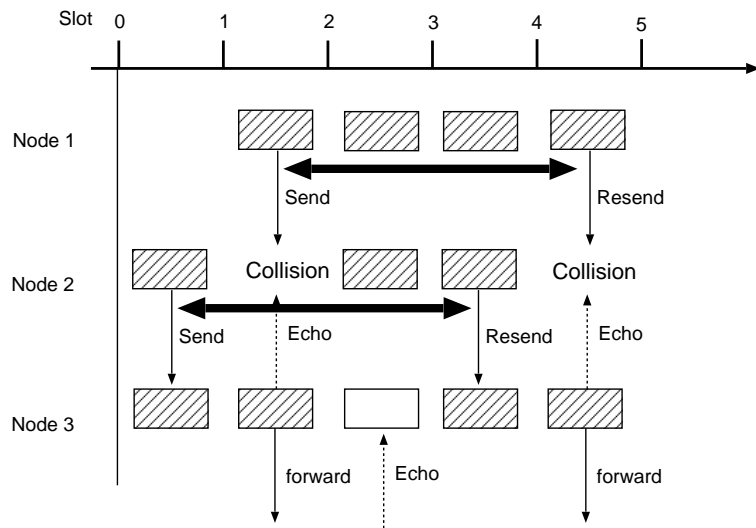


図 4: 再送間隔が 3 スロット固定の場合

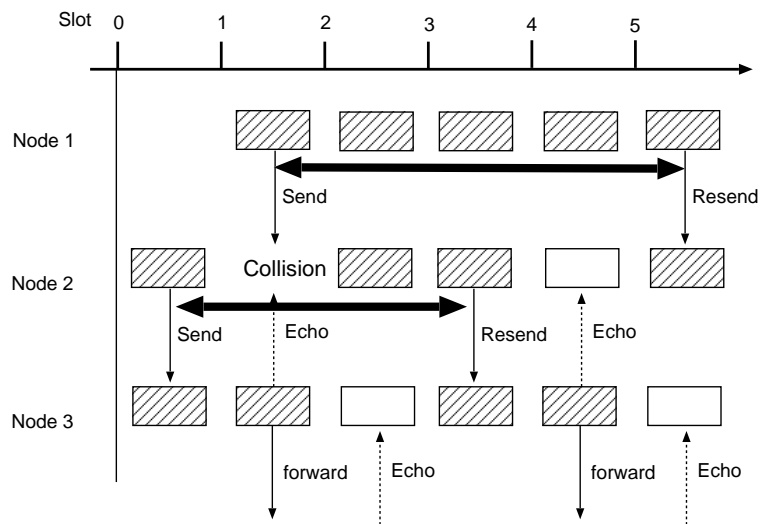


図 5: 再送間隔が 3~5 スロットでランダムに決定される場合

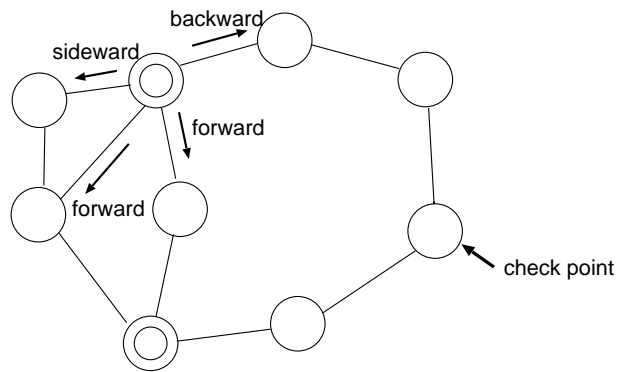


図 6: 目的ノードに至る隣接ノードの分類

ロット単位の最大生存時間が設定されている。最大生存時間はパケット発生時に初期値が設定され、パケットがネットワーク内に存在する間は、1 スロット経過するごとに減少されていく。そして、その値が0 になった時点で、そのパケットは最大生存時間オーバーとしてシステムから除去される。最大生存時間は、ホストノード間の距離等を十分に考慮した上で、全発生パケットに対して一定の値が設定されている。

### 2.3 ルーティングプロトコル

本システムのルーティングプロトコルは、絶えず変化し続ける無線通信路の環境下においても、通信の信頼性を確保することを目的として設計されている。例え最短中継回数を与える経路であっても、何らかの要因で経路が遮断されたり、停電や故障などの障害が生じることが考えられる。そのような場合に、即座に別経路を選択し、場合によっては迂回経路を経由してパケットを送信するという方法で通信信頼性を高めている。各ノードは、第 2.1 節で述べたように構成情報管理テーブルによって、自分自身から各隣接ノードを利用したときのそれぞれの場合について、他のノードへの中継回数を把握している。ある目的ノードに対して管理されている複数の経路上の隣接ノードは、各々の経路の中継回数によって 3 種類に分類されている (図 6)。

- (1) 前向き隣接ノード: 目的ノードへの中継回数が最短となる隣接ノード

(2) 横向き隣接ノード: 目的ノードへの中継回数が最短中継回数+1 となるノード

(3) 後向き隣接ノード: 目的ノードへの中継回数が最短中継回数+2 以上となるノード

パケット送信先ノードとしての送信優先度は、前向き隣接ノード、横向き隣接ノード、後向き隣接ノードの順になっており、同じ分類に属する隣接ノードは、信頼性値の高い経路ほど高い優先度を持つようになっている。目的ノードまでの中継回数のみから考えると前向き隣接ノードへの送信が最も効率が良いが、隣接ノード自体の障害や遮蔽物の存在といった通信路の障害が発生している可能性が考えられ、送信先隣接ノードを一意に決めてしまわず、前向き隣接ノードへの送信がすべて失敗した場合には、横向き隣接ノードへ送信し、それも失敗した場合は後向きノードへ送信するという、柔軟なルーティングプロトコルが実現できる。また、このルーティングプロトコルを用いると、複数ノードからの送信パケットがあるノード周辺で衝突している場合にも、送信先を変更することによって衝突を回避することが可能となる。

迂回ルートを通しての後向き送信は、通信路やノードの障害物などにより前向き・横向きの送信が一時的に不可能になった場合などでも、確実に送信を行うために考えられているものである。また、パケットが迷走することなく迂回ルートを通っていくための経由地点として、ネットワーク上のそれぞれのノードに関してチェックポイントと呼ばれるノードが設定される。各ノードは、構成情報管理テーブルに基づき、全ノードに対する迂回ルートの探索と、チェックポイントの検出を定期的に行っているが、具体的アルゴリズムについてはここでは割愛する [4, 5]。



### 3 ELFN による TCP 性能向上と FRN における問題点

#### 3.1 ELFN による性能向上手法

TCP は、インターネットにおいて信頼性の高い通信を実現するために開発されてきたエンドホスト間のプロトコルであり、TCP エンドホストは、損失したパケットの再送やデータ送出量の制御などを行なう。インターネットはこれまで主に有線回線によって構成されてきたが、有線回線は通信品質が高く安定しており、伝送誤りに起因するパケットの損失はほとんど発生しない。つまりパケットの損失が発生するのは、ネットワークに対する負荷が過剰になっており、途中のルータのバッファがあふれている状態、すなわち輻輳状態に陥ってしまったことに起因するものがほとんどである。そのため TCP は、パケットの損失を検知すると、ネットワークに対する送出量を抑制することで輻輳を回避するという制御を備えている。

一方、無線回線は雑音や障害物などの影響を受けやすく、伝送誤りによるパケットの損失が頻繁に発生する。特にアドホック無線ネットワークは、無線回線が多段構成されており、基地局方式のネットワークよりも無線回線の品質の影響が大きいと考えられる。また、端末の移動による経路変更に起因するパケット損失の影響も考慮する必要がある。このようなパケット損失は、ネットワークの輻輳状態とは無関係に発生するため、輻輳制御によってパケット送出量を抑える必要はない。しかしながら、TCP 送信端末はパケット損失の原因を特定する機構を備えないために、すべてのパケット損失をネットワークの損失と考え、一律にパケットの送出量を抑えてしまい、スループットが極端に低下してしまうという問題がある。

アドホック無線ネットワークの適用範囲が広がるにつれて、TCP を用いたデータ転送への要求が生じており、アドホック無線ネットワーク上での TCP の性能評価や性能劣化を抑える方式に関する研究が行なわれつつある。ELFN (Explicit Link Failure Notification) 手法 [7, 8] はノードの移動による経路変更のために、上述のような TCP の性能が劣化することに着目した方式である。すなわち、ノードの移動によってリンク切断が発生した際に、送信パケットの流れを制御することによって、ネットワークのスループットを向上させること

を目的としている。

まず、図7に、ノードの移動がTCP送信へ及ぼす影響を示す。図7(a)はノード0から送信されたパケットが、ノード1、2、3を経由してノード4まで中継されている状態を示している。ここでノード2が移動することでノード3とのリンクが切断されるとする。その場合でもノード0においてパケットは発生するので、図7(b)に示すように、ノード2のバッファにはパケットが蓄積されることになる。もしバッファサイズを超えるパケットが到着すれば、パケット損失が発生することになる。もちろん、ノード2がノード5、6を経由する新たな経路を発見したとすると、図7(c)に示すように、滞留していたパケットはノード5へと送られることになる。しかしながら、リンク切断中に中間ノードで滞留していたパケットは、第2.2節において説明したパケット生存時間が減少しており途中のノードでタイムアウトになってしまう可能性が高くなる。このように、輻輳に起因しないパケット損失や、パケット生存時間切れによるタイムアウトの発生により、TCPのスループットが低下してしまうことになる。

そこでELFNでは、TCPパケットが流れている経路上において、あるノードがリンクの切断を検出した場合、そのノードはERDN (Explicit Route Disconnection Notification) というメッセージをTCPの送信元に送り、ERDNを受け取った送信元はパケットの送信を一時停止するという処理を行う。また、リンク切断を検出したノードが、TCPパケットの目標ノードへの新しい経路を発見した場合には、ERSN (Explicit Route Successful Notification) を再びTCPの送信元に送り、ERSNを受け取った送信元は送信を再開する。これにより、中間ノードのバッファにパケットが滞留することを防ぎ、リンクの切断中のパケット損失やタイムアウトの発生を最小限に抑えることができる。

図8は図7のノード2が、ELFNによって送信ノード0を制御する場合の例である。図7(a)の状態から(b)のようにノード2が移動することにより、ノード2とノード3の間の通信が不可能になった場合を考える。ノード2はリンク切断を検知すると、TCP送信元であるノード0にERDNを送信する。ERDNを受け取ったノード0はTCPパケットの送信を停止する。同時に、ノード2は送信先であるノード4への新しい経路を探索し、図7(c)のようにノード5を経由する新たな経路を見つけるとする。そのときノード2は、ERSNをノー

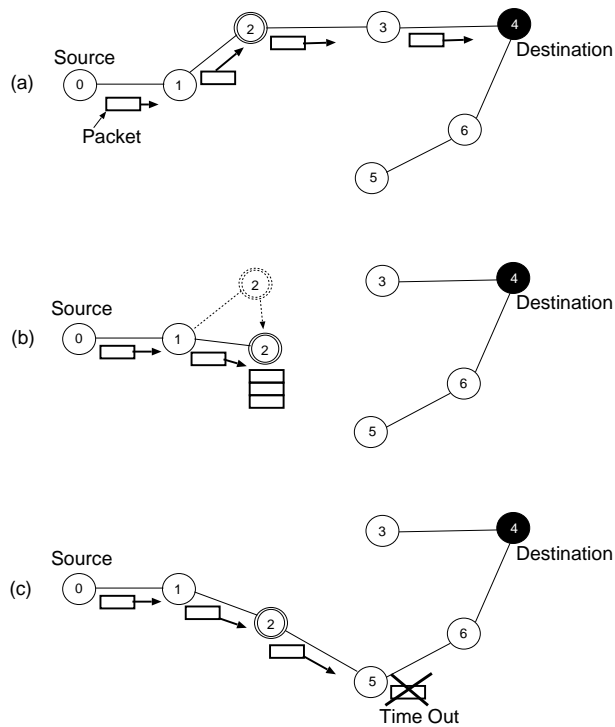


図 7: ノードの移動に伴う経路変更の TCP への影響

ド 0 に送信し目標ノードまでのリンクの再接続を通知する。ERSN を受けとったノード 0 は TCP パケットの送信を再開する。

### 3.2 ELFN 手法の FRN への適用に関する考察

ELFN は、ノードの移動によるリンク切断や経路変更に着目した性能改善手法である。一方、本報告で対象としている FRN では基本的にノードは固定されており、頻繁に移動する

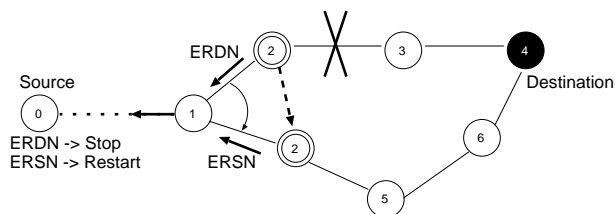


図 8: ERDN と ERSN による送信ノードの制御

ことはない。しかしながら、FRN でも障害物などによる無線回線の遮断に伴うリンク切断は発生する。そのため、ELFN が対象とするような、ある程度短い期間のリンク切断に対して適切な制御を行うことで、FRN における TCP 通信の性能を高めることが可能であると考えられる。

また、本報告ではネットワーク層に TCP パケットを流すことを前提としている。FRN 自体はネットワーク層の下位層であるデータリンク層プロトコルとして動作するため、ELFN のように TCP の送信端末を操作することは、FRN のシステムに対してだけではなく、上位層の TCP に対しても ELFN の手法に合わせた変更が必要となる。これは本報告の前提と異なっており、ELFN をそのまま適用することは難しい。

その一方で、第 2 章で述べたように、FRN では構成制御情報を周期的に交換することにより、目的先ノードに到達するために送信すべき隣接ノードの情報を、優先順位とともに管理している。そこでリンク切断が発生した場合でも、目的ノードへの経路として他の有用な隣接ノードが存在する場合には、ELFN のように送信ノードがパケットの送信を止める必要はなく、その経路情報を利用して有用な隣接ノードを選択することで、リンク切断による性能劣化を抑えることができるであろう。そこで、本報告では、FRN が保持している経路情報を活用することで、リンク切断が発生した場合でも TCP の性能劣化を抑えるための手法を提案する。次章において、提案方式について説明する。

## 4 FRN の TCP 性能改善手法の提案

FRN では、ノードは基本的に固定されており、移動によるリンク切断は発生しない。また FRN は、構成制御周期で構成制御パケットを交換することで経路変更を行なう機能を有しており、長時間にわたるリンク切断やネットワーク構成の変更に対応している。しかしながら、第 2 章で述べたように、構成制御周期を短くしすぎると、構成制御パケットの負荷が大きくなり性能劣化を引き起こすおそれがある。そのため、構成制御周期はあまり短くすることができず、実際には 60 秒程度に設定されている。つまり、雑音や障害物による数秒から数十秒程度のリンク切断は、FRN の構成情報には反映されず、TCP の性能劣化の原因になると考えられる。そこで、提案手法を設計する際に対象とするリンク切断は、構成制御周期より短かく、TCP の性能を劣化させるような期間のものとする。

提案手法では、リンクの切断を検出した場合、対応するノードを利用停止状態として登録し、そのノードに対するパケットの送信を停止する。また、FRN の各ノードが保持している構成情報管理テーブルに基づいて、利用可能な別の経路があればそれを選択する。そのような経路がない場合には、ERDN を使って前のノードに戻りながら別の経路を探索していく。利用停止状態になっているノードに対しては、ある程度の頻度にパケットを送信し、リンクの状態を確認する。このプローブ機能によって、リンクの復活を検出した場合には、利用停止状態から復帰し、利用可能なノードとする。以下に、提案手法の詳細を述べる。

### 4.1 リンク切断の検出方法

あるノードに対してパケット送信が失敗した場合には、リンク切断だけではなく、パケットの衝突による場合も考えられる。そこで、送信に失敗したら直ちにリンク切断と判断するのではなく、何回か連続して送信に失敗した場合にリンク切断とする。そのため提案手法では、各ノードにおいて、パケットを送信した隣接ノードごとに送信失敗回数をカウンタに記憶しておく。ある隣接ノードにパケットを送信し、ACK もしくは中継エコーが返ってこなければ、そのノードのカウンタの値を 1 増やす。そのカウンタが閾値を越えた段階でリンク切断と見なすものとし、対応するノードを利用停止状態とする。また、あるノードから何ら

かのパケットを受け取った場合には、そのノードとのリンクは接続されていると判断できるので、その時点でカウンタを0に戻すものとする。

## 4.2 リンク切断を検出した場合の動作

### 4.2.1 他に利用可能な経路がある場合

図9のようなネットワーク構成を考える。この場合、ノード2の構成情報管理テーブルには、ノード8への隣接ノードとしてノード3、4、5が登録されている。いまノード3の優先順位が高くなっているために、ノード1からノード8への経路として、1 2 3 8の順に伝送されているものとする。このときに、ノード2においてノード3のカウンタが閾値を超え、リンクの切断を検出したものとする。ノード2の構成情報管理テーブルには、隣接ノードとしてノード4やノード5が登録されているので、ノード3が利用停止となった場合には、ノード4またはノード5を経由した経路で伝送が行なわれる。

図10に、リンク切断の閾値を2とした場合の packets 送信手順を示す。隣接ノードの優先順位はノード3、4、5の順であるとする。図ではノード3に対して、パケットa、bという2回の失敗でリンク切断を検出し、ノード3を一時利用停止としている。そのため、それ以降のパケットc、dは、ノード4に対して送信されている。

### 4.2.2 他に利用可能な経路がない場合

次に、図11のようなネットワーク構成において、ノード1からノード6への経路が、1 2 3 6であり、ノード2とノード3の間でリンク切断を検出したとする。この場合、ノード2の構成情報管理テーブルには、前向き・横向き隣接ノードとしてノード3だけが登

表 5: リンク切断を検出するためのテーブル

隣接ノード	3	4	5	...
カウンタ	2	0	1	...

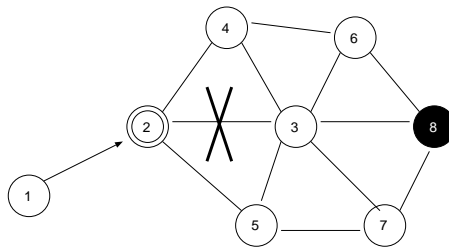


図 9: 別経路を試す場合の例

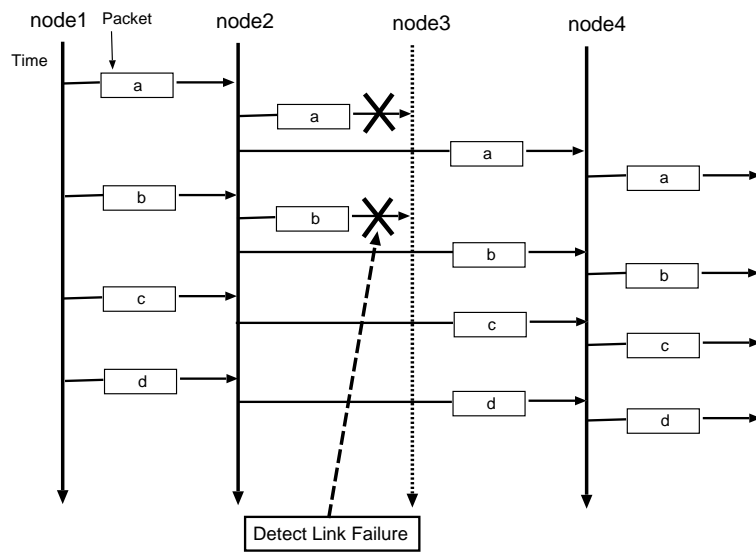


図 10: 別経路を試す場合のパケットの流れの例

録されており、他に利用可能な経路はない。このような場合には、ノード 2 は、ERDN を一つ前のノードであるノード 1 に送信して、リンク切断を通知する。ERDN を受け取ったノード 1 は別の経路を探し、見つかった場合は新たなノードに向けてパケットを送信する。見つからなかった場合は、さらにひとつ後ろ向きノードに対して ERDN を送信する。このような動作を、前向きや横向きノードが見つかるまで、ノードをさかのぼって繰り返す。このときのノード 1、ノード 2 におけるパケットの流れを図 12 に示す。

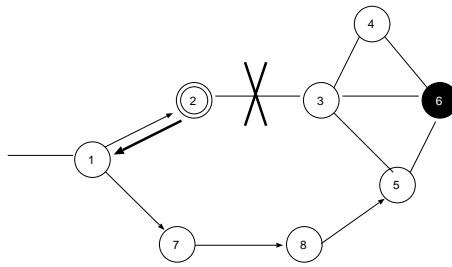


図 11: ERDN を使って前のノードから経路を選び直す例

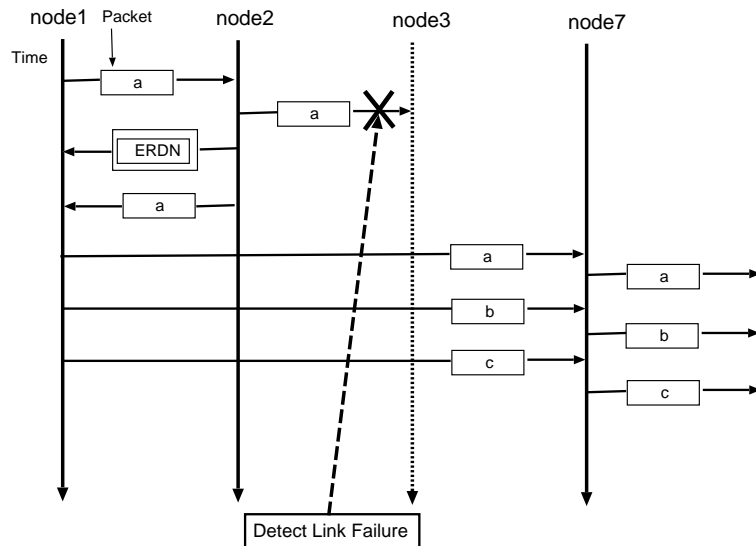


図 12: ERDN を送信する場合のパケットの流れの例

#### 4.3 利用停止状態からの復帰

リンク切断を検出した後、利用停止しているノードを避けてパケットを送信しているノードは、利用停止しているノードに対してプローブパケットとしてデータパケットを、数パケットに1つ送る。これはリンク切断からの復帰を素早く検出し、そのノードを再び利用することによって、有効な経路を選択できるようにするために行う。図9では、ノード2がノード3に対してプローブパケットを送信し、図11では、ノード1がノード2に対して送信し、ノード2はさらにノード3に送信する。リンク切断を検出したノード(図9、図11と



もにノード 2) で、リンク切断のノードに対して送信が成功した場合、リンク切断から回復する。4.2.2 節のように ERDN を送信していた場合は、別経路を選択しているノードまで ERSN を送る。ERSN を受け取ったノードは、利用停止を解除する。また、リンク切断のノードから何らかのパケットを受け取った場合、4.1 節でカウンタをクリアしたときの考え方と同様に、そのノードはエラー状態にないと判断し、パケットを受け取ったノードではリンク切断のノードに対して一時利用停止から復活する。

プローブパケットの機能を使うことによって、リンク切断を検出したノードは一時利用停止しているノードがリンク切断から復帰したことを能動的に知ることができ、プローブパケットを使わず受動的になんらかのパケットの到着を待つよりも、素早く利用可能な経路を活用することが可能となる。このことは、ネットワークのスループット向上に影響する。

## 5 シミュレーションによる提案手法の評価

### 5.1 シミュレーションモデル

提案手法の効果や適用範囲を明らかにするため、性能評価を行なう。本報告で対象としているシステムのように、複数のノードが自律的に動作している場合には、解析的な手法による評価が困難なため、シミュレーションによって性能指標を求める。

まず、シミュレーションのためのモデル化を行うにあたって、以下の仮定を導入する。

1. ネットワークを構成するノードは移動しないものとする。
2. シミュレーションの簡単化のために、ノードそのものを停止させることでリンク切断をモデル化する。すなわち、停止状態にあるノードは、パケットの送受信ができないものとする。各ノードにおいて、ノード停止の発生頻度はポアソン分布に従い、停止状態の続く時間は指数分布に従うものとする。
3. 第 2.2 節で述べたように、パケットの再送を行う際の時間間隔は 3 スロットから 5 スロットの間のランダムな値とする。

FRN のプロトコルおよび提案手法を、ネットワークシミュレータである ns-2 [9] に提供されているアドホック環境上を実装し、シミュレーションにより性能評価を行なった。シミュレーションの対象とするネットワークの構成を図 13 に示す。本ネットワークにおいて、ノード 0 を送信ノード、ノード 9 を受信ノードとして、ftp コネクションを入力トラヒックとして与えた。コネクションの発生は、構成制御によってネットワークの構成情報管理テーブルが十分安定した後に行った。また、ネットワークの規模より、FRN のデータリンクプロトコルにおけるパケットの最大生存時間は 32 スロットに設定した。

### 5.2 提案手法における TCP スループットの評価

提案手法の効果を評価する際の性能指標として TCP スループットを考える。ここで TCP スループットとは、送受信ノード間の送信成功パケット数をシミュレーション時間で割った値で、1 スロットあたりの送信成功パケット数を表している。

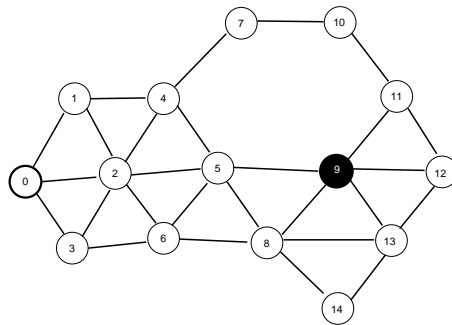


図 13: シミュレーションモデル

まず、ノード停止の平均発生率を 1 秒あたり 0.01、ノード停止の平均継続時間を 10.0 秒として、リンク切断判定のための閾値を変化させた場合の、TCP スループットの変化を図 14 に示す。この図において、提案手法を組み込む前のスループットは閾値とは無関係に一定であるため、“original” で示される直線で表されている。提案手法によるスループットは“modified” で示されている。図 14 より、リンク切断判定の閾値を 1 に設定すると、本来のスループットよりも悪化していることがわかる。これは、衝突などのために一回だけパケット損失が発生した場合でも、リンク切断と判断してしまうためと考えられる。すなわち、実際には停止状態ではないノードをリンク切断と判断することによって有効な経路を利用できなくなり、スループットが低下している。また、閾値が 2 の場合に最もスループットが向上しており、閾値が高くなるにつれて低下している。これは、閾値を大きくしていくにつれ、リンク切断を検出するのが遅れ、短時間のリンク切断を検出できないために提案手法の効果が小さくなり、元のスループットの値に近づくものと考えられる。

実際の利用環境においては、リンクが切断される時間は、その原因によって大きく変化すると考えられる。そのため、提案方式がリンク切断時間に関してどのような範囲で有効なのかを明らかにすることが必要である。そこで次に、リンク切断の平均継続時間を変化させた場合の影響を評価した。ここでは、ノード停止の発生率を 0.01 に固定し、平均継続時間を変化させた結果を図 15 から図 nodelay0.01-20 に示す。これらの図より、平均継続時間が異なっても、共通していることは、リンク切断判定のための閾値が 2 または 3 のときに最もスループットが向上していることがわかる。すなわち、本シミュレーションにおいては、

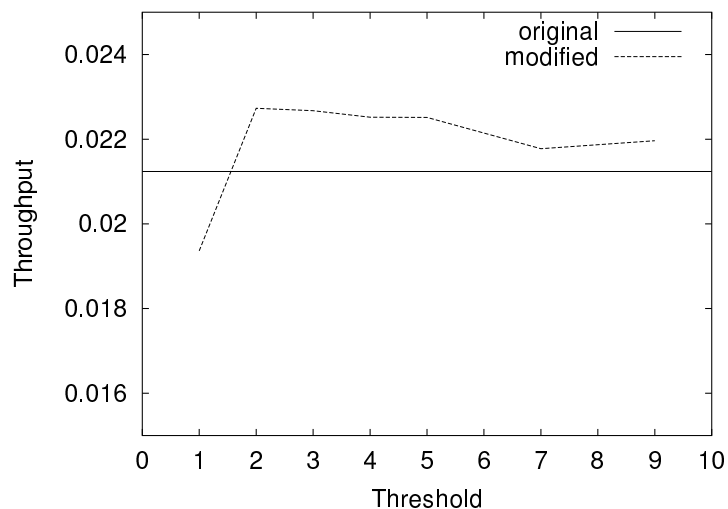


図 14: リンク切断の閾値によるスループットの変化 (ノード停止の発生率 0.01、平均継続時間 10.0 秒)

送信失敗回数が 2 回、3 回と起こったときは、リンク切断と判断して経路制御を行なうことで、スループットを向上できることが明らかとなった。

そこで、閾値が 2 または 3 のときに、平均継続時間を変化させた場合のスループットを図 18 に示し、提案手法を組み込む前のシステムと比較したスループット最大向上率を表 6 に示す。図 18 より、リンク切断の平均継続時間が長くなるにつれて、スループットが急速に低下していることが示されている。表 6 からは、リンク切断の平均継続時間が長いほど向上率が大きくなっており、提案手法の効果は大きいといえるが、スループット自体は劣化していることが示されている。

### 5.3 Delayed ACK オプションの適用

FRN で TCP を送信した場合に、スループットが抑えられているのは、データパケットと TCP の ACK パケットの干渉によるものが大きいと考えられる。つまり、FRN のようなアドホック無線ネットワークでは、同一の無線回線を双方向を含めた複数のリンクが共有するため、干渉が避けられない。TCP には Delayed ACK オプション [6] があり、ACK セグメ

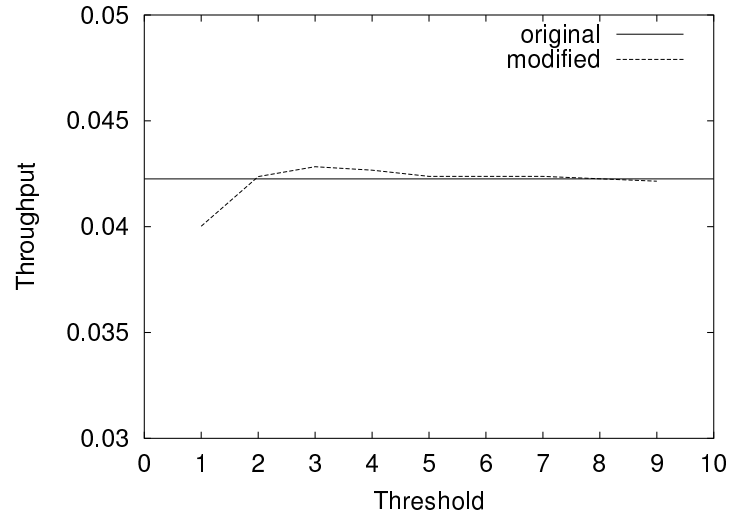


図 15: 平均継続時間 2.5 秒の場合

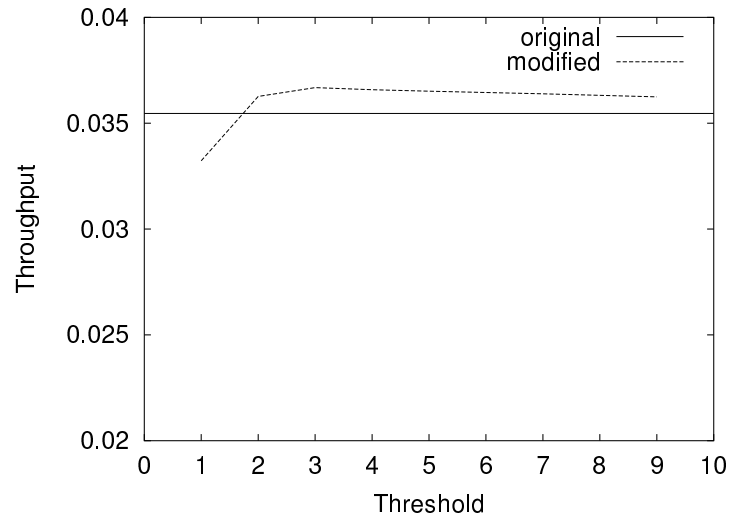


図 16: 平均継続時間 5.0 秒の場合

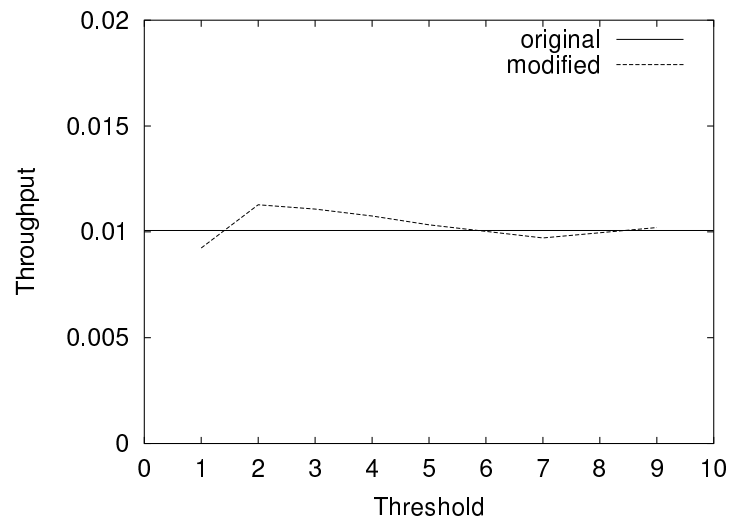


図 17: 平均継続時間 20.0 秒の場合

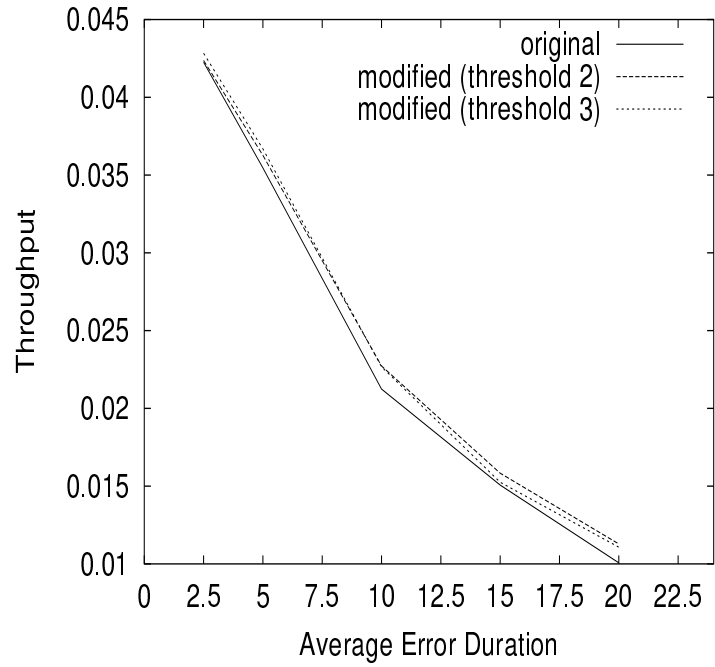


図 18: ノード停止の平均継続時間によるスループットの変化

表 6: ノード停止の平均継続時間によるスループット向上率の変化

平均継続時間 (s)	向上率 (%)
2.5	1.35
5.0	3.44
10.0	7.02
20.0	12.05

ントをまとめて送信することによって、ネットワーク資源の浪費を抑えることを目的としている。これによって ACK のトラフィック量を減らすことができれば、FRN における TCP スループットの向上が期待できる。そこで次に、Delayed ACK オプションを利用した場合の TCP スループットの評価を行なう。

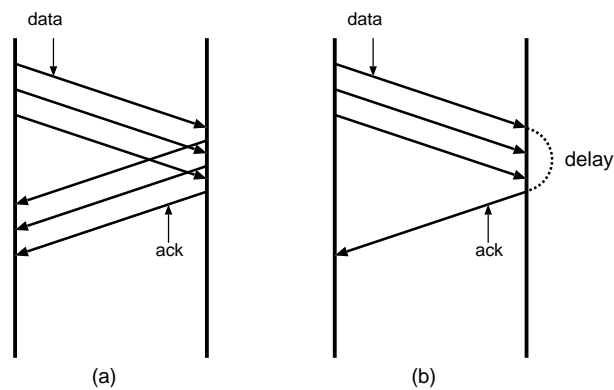


図 19: TCP の Delayed ACK オプション

まず、図 19 を用いて、Delayed ACK についての説明をする。図 19(a) は Delayed ACK が使われていないときの図であり、受信したデータパケットすべてに対して ACK を返送する。一方、図 19(b) は Delayed ACK オプションを適用したときの図であり、データパケットを受信した時点ですぐに ACK を返送せず、一定時間返送を遅らせる。その間にいくつかのデータパケットの受信に成功していた場合には、それらの分もまとめてひとつの ACK として返送する。この動作により、ACK パケット数を抑えることができる。

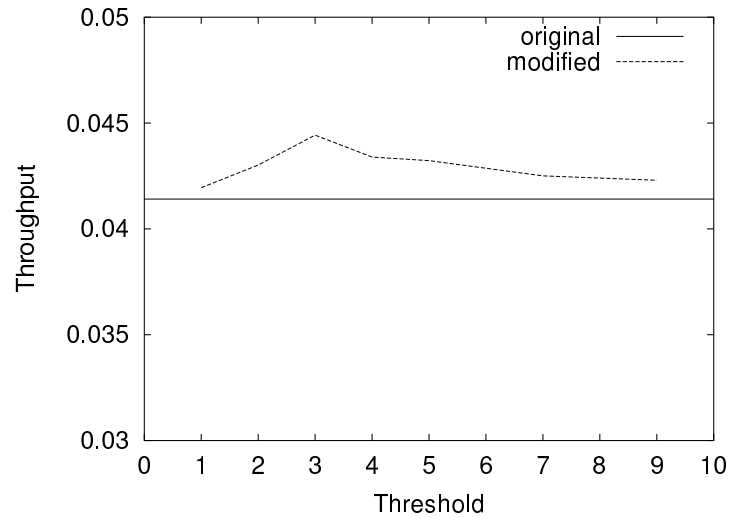


図 20: Delayed ACK を適用したときのスループット

ここでは第 5.2 節と同様、ノード停止の発生率を 0.01、平均継続時間を 10.0 秒とした。また、Delayed ACK の遅延時間は 100ms とした。その結果を図 20 に示す。Delayed ACK を使わなかった場合の図 14 に比べ、スループットが 2 倍近い値になっている。これは双方向で通信した場合、干渉の影響が非常に大きいことを示しており、Delayed ACK は無線回線で TCP を用いる際に有効であることを示している。

また提案手法の結果については、全体的にスループット自体は 2 倍近くの値になり、閾値による変化は Delayed ACK を適用する前の場合と同様の傾向となった。閾値 3 のときスループットは最も向上し、7.30% の向上となった。これは、Delayed ACK を用いることで干渉による送信失敗が減っているときに、送信失敗回数が 2、3 回でリンク切断と判断することは、実際にそのノードでリンク切断が発生している可能性が高く、経路選択の正確さが向上しているためであると思われる。図 21 に平均継続時間を変化させた場合のスループットの変化、表 7 にスループットの向上率を示す。



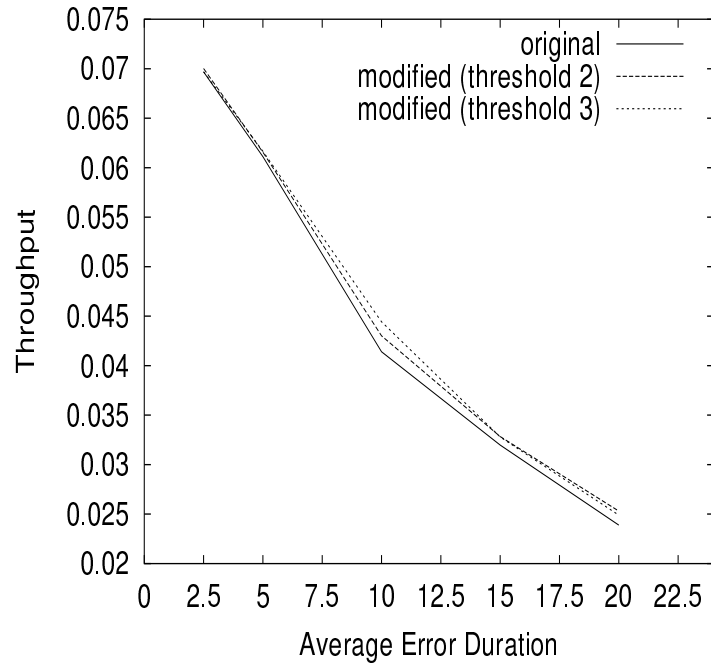


図 21: ノード停止の平均継続時間によるスループットの变化 (Delayed ACK を適用した場合)

表 7: ノード停止の平均継続時間によるスループット向上率の変化 (Delayed ACK を適用した場合)

平均継続時間 (s)	向上率 (%)
2.5	0.52
5.0	1.43
10.0	7.30
20.0	5.94

#### 5.4 リンク切断発生率の影響

ここからリンク切断判定の閾値を2と3に固定し、リンク切断の発生率に関して、平均継続時間ごとに、Delayed ACK オプションの有無それぞれの場合についてスループットの評価を行った。その結果を図 22、図 23、図 24 に示す。

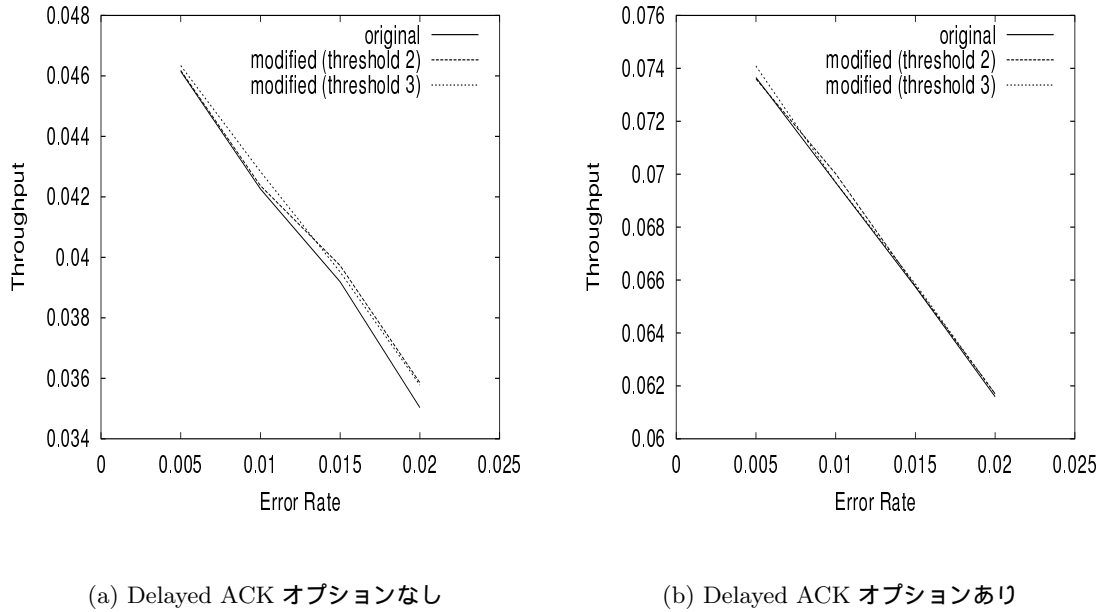
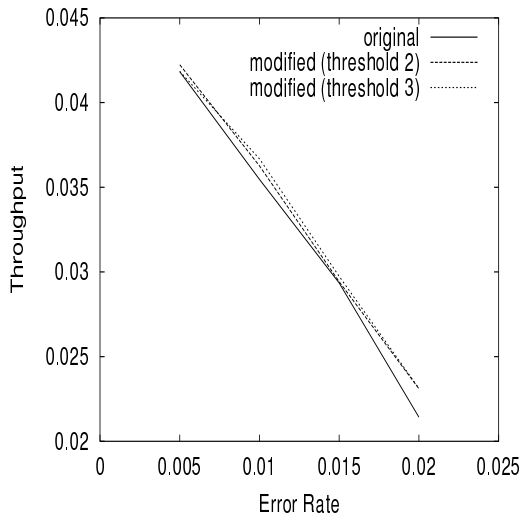
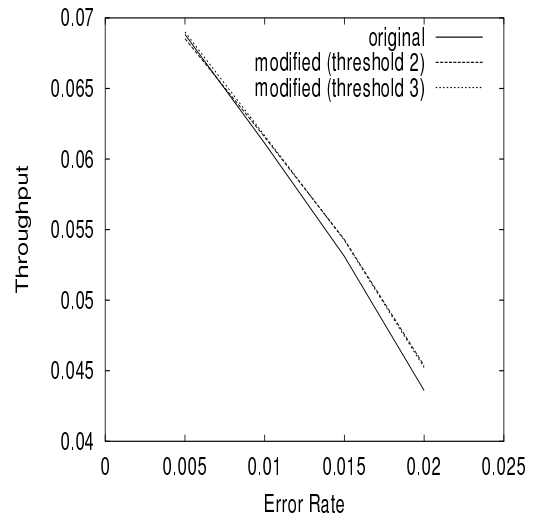


図 22: 平均継続時間 2.5 秒の場合

それぞれの場合において、提案手法はスループットを向上させることが確認できた。また Delayed ACK オプションを利用しているときは、リンク切断の発生率が高く、平均継続時間が長いほど、その効果が大きいことがわかった。これに対して Delayed ACK オプションを利用しないときは、平均継続時間 10.0 秒、発生率 0.02 のようなリンク切断が非常に多い状態になると、効果が薄れてしまっている。この場合は、スループット自体が非常に悪い状態になっておりパケットの数も少なくなっている。そのため提案手法でパケットの流れを制御しても、その効果が現れないと考えられる。

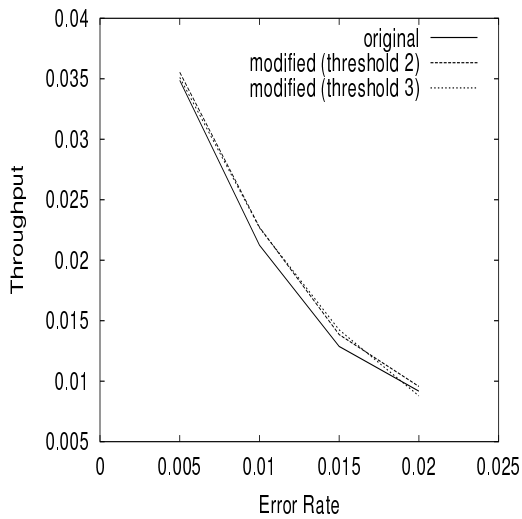


(a) Delayed ACK オプションなし

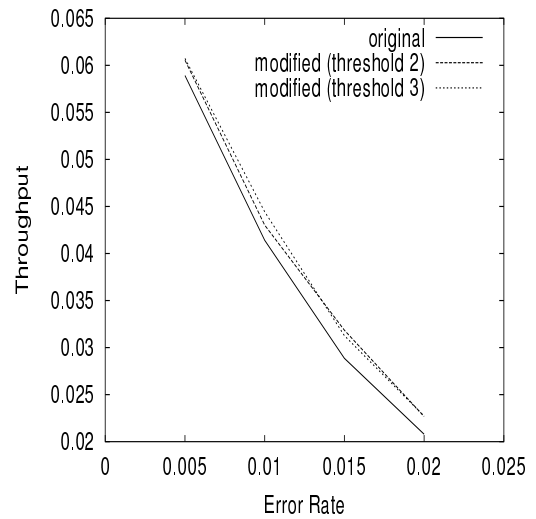


(b) Delayed ACK オプションあり

図 23: 平均継続時間 5.0 秒の場合



(a) Delayed ACK オプションなし



(b) Delayed ACK オプションあり

図 24: 平均継続時間 10.0 秒の場合

## 6 おわりに

本報告では、アドホック無線ネットワークを構成するフレキシブル無線ネットワークに対して、騒音や障害物の通過といった短い時間のリンク切断に着目し、シミュレーションによる性能評価を行った。その結果、システムの動作を定めるパラメータ値が、スループットに与える影響が明らかになった。また、TCP の Delayed ACK オプションを無線回線に用いることは非常に有効であることを示した。さらに、さまざまなエラーモデルでシミュレーションを行うことにより、エラーがどのように性能に影響を与えるかを調べ、提案手法が TCP のスループットを向上させることを示した。

今後の課題としては、リンク切断の判定をより正確なものにするために、送信失敗の回数だけでなく、送信失敗した時間などを考慮することが挙げられる。また、本報告で TCP の Delayed ACK オプションを用いた場合の結果から、アドホック無線ネットワークにおいては、双方向の通信は非常に干渉が多いことがわかった。この干渉を減らすことを考慮に入れたルーティング手法の考察も、今後の課題として挙げられる。

## 謝辞

本報告を終えるにあたり、宮原秀夫教授より御指導、御教授頂いたことに心から感謝致します。また、本報告において直接御指導頂いた村田正幸教授、大阪府立看護大学医療技術短期大学の菅野正嗣助教授に深く感謝いたします。本報告において多大な御協力を頂いた富士電機株式会社の畠内孝明氏、稲山朋宏氏に心からお礼を申し上げます。本報告を行うにあたって、大阪大学サイバーメディアセンターの下條真司教授、大阪大学大学院基礎工学研究科の若宮直紀講師、大阪大学サイバーメディアセンターの大崎博之助手、長谷川剛助手、経済学部の荒川伸一助手、国際公共政策研究科の植田和憲助手からも御指導及び御助言を頂き深く感謝の意を申し上げます。また、日頃から多くの御指導を頂いた、村田研究室の山本貴之氏に心から感謝いたします。

最後に、御協力頂いた宮原研究室及び村田研究室の皆様にご心からお礼申し上げます。

## 参考文献

- [1] C. E. Perkins, *Ad Hoc Networking*. Addison-Wesley, 2001.
- [2] K. Nakano, M. Sengoku, and S. Shinoda, “Fundamental Characteristics of Multi-hop Wireless Communication Networks,” in *Proceedings of 11th ITC Specialist Seminar*, pp. 293–301, Oct. 1998.
- [3] C. R. Lin and M. Gerla, “Asynchronous Multimedia Multihop Wireless Networks,” in *Proceedings of IEEE INFOCOM '97*, pp. 118–125, Apr. 1997.
- [4] “Flexible Radio Network, Fuji Electric Co. Ltd.” available at [http://www.fujielectric.co.jp/denki/p26/ecop\\_contents2.html](http://www.fujielectric.co.jp/denki/p26/ecop_contents2.html).
- [5] M. Sugano, T. Araki, M. Murata, T. Hatauchi, and Y. Hosooka, “Performance Evaluation of a Wireless Ad Hoc Network: Flexible Radio Network (FRN),” in *Proceedings of the IEEE ICPWC 2000*, pp. 350–354, Dec. 2000.
- [6] W. R. Stevens, *TCP/IP Illustrated, Volume 1: The Protocols*. Addison-Wesley, 1994.
- [7] D. Kim, C. K. Toh, and Y. Choi, “TCP-BuS: Improving TCP Performance in Wireless Ad Hoc Networks,” in *Proceedings of the ICC 2000*, June 2000.
- [8] T. Goff, J. Moronski, and D. S. Phatak, “Freeze-TCP – A True End-to-End TCP Enhancement Mechanism for Mobile Environments,” in *Proceedings of INFOCOM 2000*, Mar. 2000.
- [9] “The Network Simulator - ns-2.” available at <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.
- [10] T. Yamamoto, M. Sugano, M. Murata, T. Hatauchi, and Y. Hosooka, “Performance Evaluation and Improvement of an Ad Hoc Wireless Network,” in *Proceedings of ICOIN-16*, Jan.–Feb. 2002.