

アドホックネットワークにおける TCP 性能向上手法に関する一考察

幸 太一[†] 山本 貴之[†] 菅野 正嗣^{††} 村田 正幸[†]
宮原 秀夫[†] 畠内 孝明^{†††}

A Study on Performance Improvement of TCP over an Ad Hoc Network

Taichi YUKI[†], Takayuki YAMAMOTO[†], Masashi SUGANO^{††}, Masayuki MURATA[†],
Hideo MIYAHARA[†], and Takaaki HATAUCHI^{†††}

あらまし フレキシブル無線ネットワーク (Flexible Radio Network: FRN) は、広範囲なデータ収集ネットワークを構築できるアドホックネットワークである。本論文では、FRN においてトランスポート層に TCP を適用した場合の性能向上手法を検討する。FRN のように端末が移動しない場合でも、雑音や障害物による無線リンクの切断に対して、アドホックネットワークにおける TCP 性能向上手法として提案されている ELFN (Explicit Link Failure Notification) と、経路情報を組み合わせた方式によってスループットが向上することを示す。本論文では、シミュレーションによる提案方式の評価に加え、パケットの衝突による性能劣化を抑えるために、delayed ACK やパケット衝突時に ACK を優先的に再送した場合の影響を明らかにする。

キーワード アドホックネットワーク, TCP, ELFN (Explicit Link Failure Notification), ルーティング, スループット

1. はじめに

フレキシブル無線ネットワーク (FRN: Flexible Radio Network) は、広範囲なアドホック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 [1, 2]。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。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、アドホックネットワークの利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) [3] が用いられているため、アドホックネットワークにおいても TCP による通信が求められている [4, 5]。しかしながら、無線回線は有線回線よりも伝送品質が不安定で、雑音などによるパケット損失が頻繁に発生する。特に、アドホックネットワークは無線回線の多段構成であり、端末の移動も発生するため、コネクションの切断や経路の変更によって TCP の性能が著しく劣化するという問題がある。このような問題を解決するための手法として、ELFN (Explicit Link Failure Notification) が提案されている [6, 7]。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、TCP 送信端末に対して経路の切断や再接続を通知することで、切断中のパケット損失やタイムアウトを抑制する方式である。

本論文で対象とする FRN は、各端末がルーティングテーブルによってネットワークの構成を把握しているテーブル駆動型のルーティングプロトコルによるアドホックネットワークであり、経路の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

[†] 大阪大学大学院 情報科学研究科, 豊中市待兼山町 1-3
Department of Informatics and Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University, 1-3 Machikaneyama, Toyonaka, Osaka 560-8531, Japan

^{††} 大阪府立看護大学 医療技術短期大学部, 羽曳野市はびきの 3-7-30
Osaka Prefecture College of Health Sciences, 3-7-30 Habikino, Habikino, Osaka 583-8555, Japan

^{†††} 富士電機 (株) 電機システムカンパニー 技術開発室 通信応用技術開発部, 日野市富士町 1
Multimedia and Wireless Dept., Technology Development Office, Energy and Electrical Systems Company, Fuji Electric Co., 1 Fuji, Hino, Tokyo 191-8502, Japan

ある．そのルーティングテーブルは一定周期の制御情報によって更新されている．しかしながら，更新の周期よりも短い時間のリンク切断によって性能が劣化するという問題が発生する．このようなリンク切断をテーブルの更新だけで対応することは制御パケットの負荷の増大を招き効率が悪い．また，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．

そこで本論文では，端末の移動ではなく，雑音や障害物など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ため，本論文では提案方式を ns-2 [8] によるシミュレータ上に実装し，TCP スループットを調べることで提案方式の評価を行なう．また，さらに性能を向上させるための工夫として，delayed ACK を適用した場合や，パケット衝突時に ACK を優先的に再送する場合の影響についても明らかにする．

以下，まず 2 章で FRN のシステムの概要について述べる．3 章では，FRN の特性を考慮に入れた TCP 性能向上手法の提案を行い，4 章でその性能評価を行なう．最後に，5 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 データリンクプロトコル

まず，FRN が実装しているデータリンクプロトコルとルーティングプロトコルの概略を述べる．詳細については，文献 [2] を参照されたい．

FRN では，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．また，ノード間の受領確認を行なうために，あるノードが次のノードに中継送信したパケットを用いている．FRN ではこれをエコーと呼ぶ．パケットの最終到着先であるホストノードは中継を行わずエコーを返さないため，前ノードに対して ACK パケットを返す．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．伝送誤りや衝突により送信を失敗した場合は再送を行なうが，パケットの衝突を避けるため

に，再送は 3~5 スロットの間でランダムに選ぶものとする．

また，すべてのパケットにはス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．

2.2 ルーティングプロトコル

FRN では，各ノードは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している．構成情報管理テーブルは，他の全てのノードに対する複数の経路について，中継回数とその経路へパケットを送出するための隣接ノード ID を保持している．また各ノードは，構成情報管理テーブルに基づいて構成制御パケットを生成し，これを一定の周期ごとに全ての隣接ノードに向けて同報送信をする．構成制御パケットを受信したノードは，その情報をもとに自身の構成情報管理テーブルを再構成する．

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，各々の経路の目的ノードへの中継回数によって 3 種類に分類されている．(図 1)

前向き 中継回数が最短となる隣接ノード

横向き 中継回数が最短中継回数+1 となるノード

後向き 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いる．すなわち，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を行なう．また，このルーティングプロトコルにより，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．

3. 経路情報を利用した TCP 性能向上手法

3.1 ELFN による TCP の性能向上

ELFN は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，TCP のスループットを向上させることを目的としている．図 2 に，ノードの移動が TCP 送信へ及ぼす影

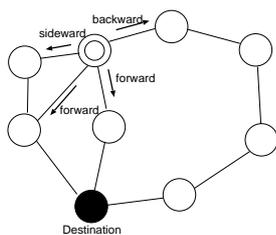


図 1 目的ノードに至る隣接ノードの分類
Fig.1 The classification of adjacent nodes

響を示す．図 2(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 2(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．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場合には，図 2(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，途中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 コネクション上において，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，それを受け取った送信元はパケットの送信を一時停止する．また，リンク切断を検出したノードが，TCP パケットの宛先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，それ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 3 は図 2 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 3(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

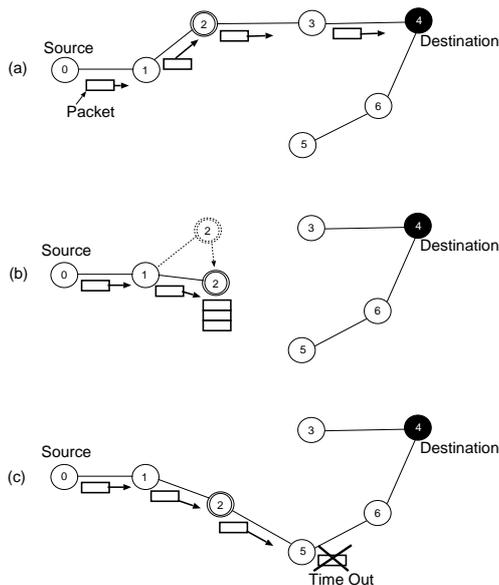


図 2 ノードの移動に伴う経路変更の TCP への影響
Fig.2 Influence of TCP on the route change accompanied by movement of a node

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．図 3(c) のように，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 3(d) 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 を受け取ったノード 0 は TCP パケットの送信を再開する．

このように，ELFN はノードの移動によるリンク切断に着目した性能改善手法である．一方，本論文で対象としている FRN では基本的にノードは固定されており，頻繁に移動することはない．そのため，一定の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ことで，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，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．したがって，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．そこで，ELFN が対象とするような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

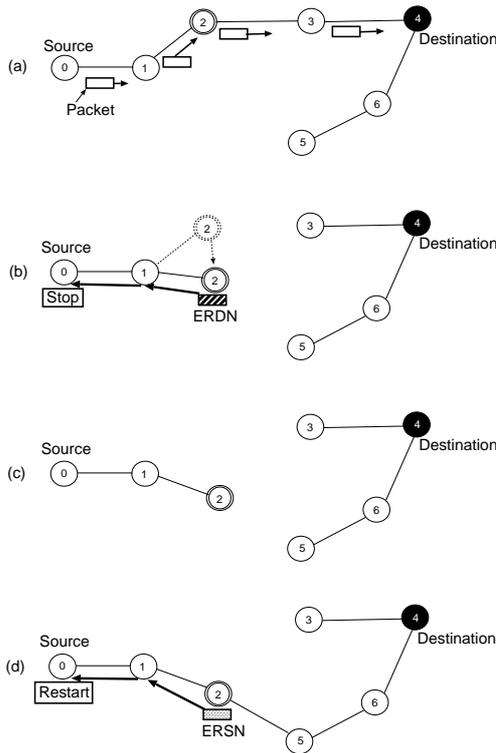


図3 ERDNとERSNによるTCP送信元ノードの制御
Fig.3 The control of TCP sender by ERDN and ERSN

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FRNでは、全てのノードが構成制御情報を周期的に交換することにより、宛先ノードまでの複数の経路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。そこで本論文では、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。

3.2 経路情報を利用したTCP性能向上手法

3.2.1 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

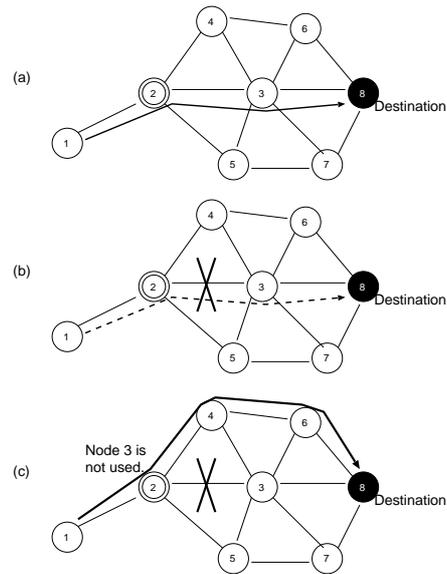


図4 別の経路に迂回する場合
Fig.4 A example in the case of bypassing for alternate route

信に失敗した場合にリンク切断とする。そのため本提案手法では、各ノードにおいて、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。

3.2.2 リンク切断を検出した場合の動作

(1) 他に利用可能な経路がある場合

図4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への送信失敗数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。この場合には、ノード3を利用停止とし、他に構成情報管理テーブルに登録されているノード4またはノード5を経由した経路で伝送が行なわれる。

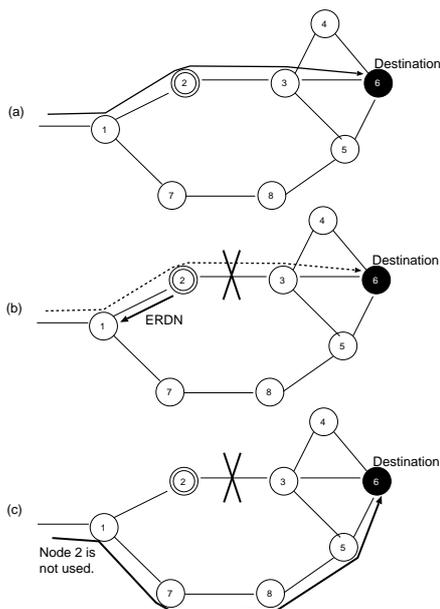


図 5 ERDN を使って前のノードから経路を選び直す例
 Fig. 5 A example which rechooses an alternate route from the previous node by using ERDN

(2) 他に利用可能な経路がない場合

次に、図 5 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のノードに対して ERDN を送信する。このような動作を、前向きや横向きのノードが見つかるまで、ノードをさかのぼって繰り返す。

3.2.3 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するためである。図 4 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 5 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 4, 図 5 とともにノード 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。3.2.2 節 (2) 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、3.2.1 節でカウンタをクリアしたときの考え方と同様に、そのノードは通信可能と判断し、一時利用停止を解除する。このように、プローブパケットの機能を使うことによって、リンク切断から復帰したことを能動的に知ることができ、なんらかのパケットの到着を待つ受動的な場合よりも、素早く利用可能な経路を活用することが可能となる。

4. シミュレーションによる提案手法の評価

4.1 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、シミュレーションによる性能評価を行なう。ここではシミュレーションの都合上、ノードそのものの動作を停止させることでリンクの切断を表現するものとする。また、リンク切断の発生頻度はポアソン分布に従い、その継続時間は指数分布に従うものとする。シミュレーション環境として、ネットワークシミュレータ ns-2 [8] 上に提供されているアドホックネットワーク環境を用い、FRN のプロトコルおよび提案手法を実装した。シミュレーションを行なった 20 ノードからなるネットワークの構成を図 6 に示す。本ネットワークにおいて、できるだけ一般性を高めるために、ホップ数や伝送方向の異なる 4 本の ftp コネクションを同時に入力トラヒックとして与えた。このシミュレーションモデルは、ns-2 における計算機のメモリやシミュレーション時間の制限などのために、シミュレーション実験を行なえる最大のモデルとなっている。また、ここでの TCP のバージョンは Tahoe を用いた。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なった。さらに、ネットワークの規模より、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。

4.2 提案手法における TCP スループットの評価

提案手法の効果の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

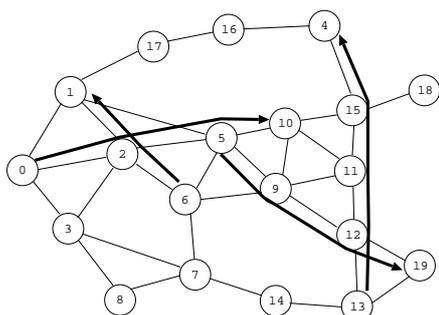


図 6 シミュレーションモデル
Fig. 6 Simulation model

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として正規化した表現を用いる。スループットを、通常の表現である単位時間あたりの情報量に換算するためには、1 スロットで伝送するパケット長が必要である。しかしながら、スロット長によってスループットは影響を受けると考えられ、本論文ではその影響を評価の対象としていないため、正規化した表現を採用した。

まず、リンク切断の平均発生率を 1 秒あたり 0.01、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 7 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、提案手法によるスループットは“modified” で示されている。図 7 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 1 回だけパケット損失が発生した場合に、直ちにリンク切断と判断することで経路を変更してしまうため、スループットが低下していると考えられる。また、閾値が 3 の場合に最もスループットが大きくなり、さらに閾値を高くしていくとスループットは低下していく。これは、閾値を大きくしていくに従って、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るためと考えられる。

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調べた。リンク切断の発生率を 0.01

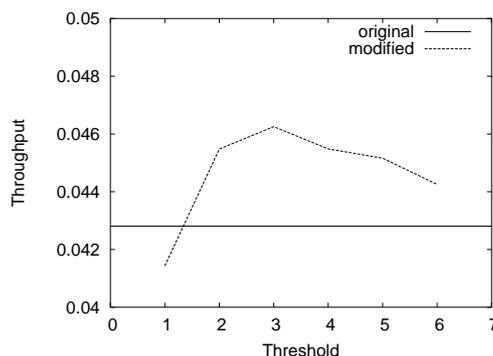


図 7 リンク切断の閾値によるスループットの変化 (リンク切断の発生率 0.01, 平均継続時間 10.0 秒)

Fig. 7 The change of the throughput by the threshold of link failure decision (The rate of link failure is 0.01, and the average duration is 10 seconds.)

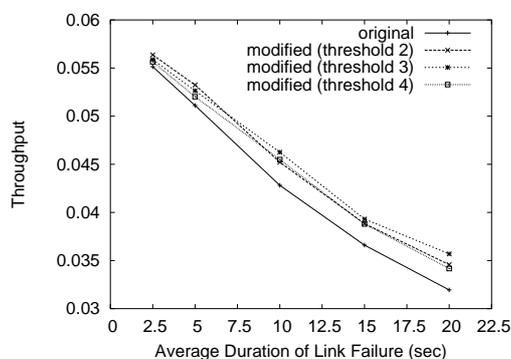


図 8 リンク切断の平均継続時間によるスループットの変化

Fig. 8 The change of the TCP throughput by the duration of link failure

に固定し、その平均継続時間を 2.5 sec から 20 sec までの範囲で、提案手法の閾値を 2 から 4 に設定した場合のスループットの変化を図 8 に示す。この結果より、リンク切断の期間が短い範囲では閾値を 2 に設定してすばやく経路変更を行なう方がスループットが大きく、リンク切断の期間が長い場合には閾値を 3 にする方がスループットが大きいことが示されている。

無線回線においては、ビット誤りに起因するランダムなパケット損失が発生する。そこで、そのような環境における本提案方式の効果を調べた。シミュレーションでは、無線リンク上でパケットが伝送される際に、与えられた一定の確率でランダムにパケットが失われるものとした。リンク切断の発生確率を 0.01、平均継続時間を 10 秒とし、パケット損失の発生率を 0%から

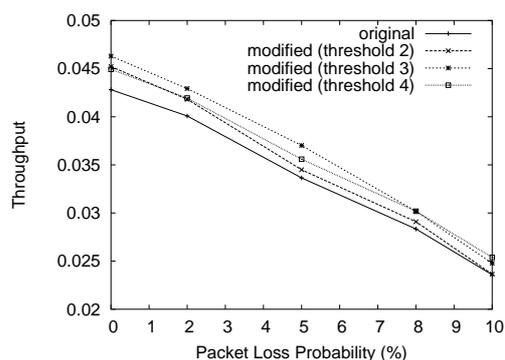


図 9 パケット損失の発生率によるスループットの変化
Fig.9 The change of the throughput by the packet loss probability of radio link

10%へ変化させたときの、スループットを図 9 に示す。この結果より、ランダムなパケット損失が発生する環境下でも、提案手法によるスループットの向上が可能なが示された。与えられたパラメータの下では、閾値を 3 に設定することで最も大きなスループットが得られていることがわかる。

4.3 Delayed ACK オプションの適用

FRN のようなアドホックネットワークでは、同一の無線回線を双方向のパケットが共有するためにデータパケットと ACK の衝突が避けられず、そのために TCP のスループットが低くなることがわかった。TCP には、ACK セグメ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た Delayed ACK オプション [3] があり、データパケットを受信してから一定時間返送を遅らせることで、その間に他のデータパケットの受信に成功した場合には、まとめてひとつの ACK として返送することができる。この動作により、ACK パケットの数を抑えることができれば、FRN における TCP スループットの向上が期待できる。

図 10 に、図 9 と同じパラメータの下で Delayed ACK を適用した結果を示す。まず、Delayed ACK を適用することで、全体的にスループットが 2 倍近くに向上していることがわかる。さらに提案方式を適用することにより、スループットが 7%~11%向上することが明らかとなった。

4.4 ACK を優先的に再送した場合

前節より、データパケットと ACK パケットの衝突を抑えることは、TCP スループット向上に非常に有効であることが明らかとなった。そこで、衝突をさら

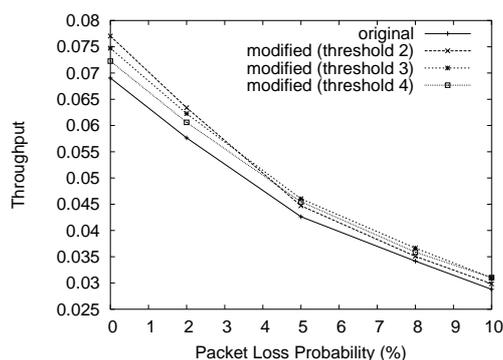


図 10 Delayed ACK を適用した場合のスループットの変化

Fig.10 The change of the throughput at the time of applying delayed ACK option.

に抑えるために、パケット再送時に、ACK に対してデータパケットよりも短い再送間隔を割り当てることで優先的に再送を行なうことを試みた。ここでは、一律 3~5 スロットであった再送間隔を、データパケットで 5 または 6 スロット、ACK パケットで 3 または 4 スロットとした。また、リンク切断判定の閾値を 3 にし、リンク切断の発生率を 0.01、平均継続時間を 10 秒とした場合に、パケット損失率によるスループットの変化を図 11 に示す。ここでは前述の Delayed ACK も適用している。この結果より、ACK を優先的に再送することでさらにスループットは約 20%向上し、その上に提案手法を適用することで 7%あまりの性能向上が見られる。ただし、パケット損失率が大きくなるにつれ提案手法および ACK を優先的に再送する効果が低下していることがわかる。また、図 12 に、リンク切断発生率を変化させた場合のスループットの変化を示す。リンク切断率が異なる場合でも、これらの方式によってスループットが向上できることがわかる。

5. まとめと今後の課題

本論文では、テーブル駆動型のアドホックネットワークを構成する FRN に対して、雑音や障害物に起因する短い時間のリンク切断に着目し、TCP の性能劣化を抑えるための手法を提案した。シミュレーションによる性能評価を行った結果、リンク切断を判定する閾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 オプションの適用や、ACK を優先的に再送することで、データパケットと ACK パケットの衝突を避けることにより、さらにスループット

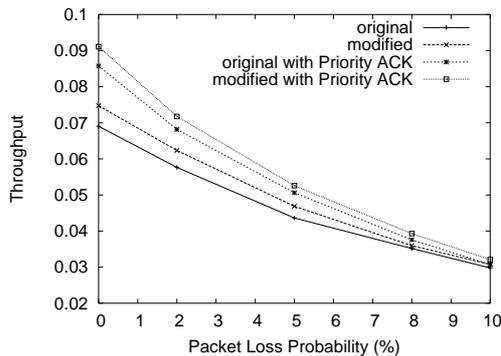


図 11 ACK を優先的に再送することによるスループットへの影響

Fig. 11 The influence on the throughput by transmitting ACK preferentially at the time of re-sending

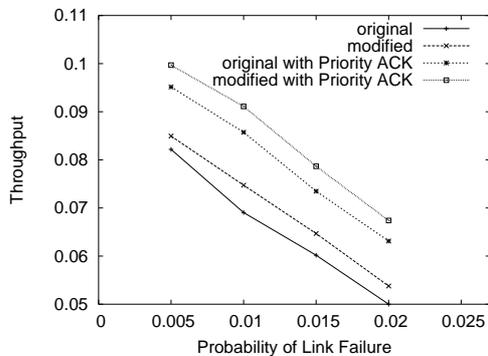


図 12 リンク切断の発生率が異なる場合

Fig. 12 The influence of the probability of link failure

トを向上できることが明らかとなった。

FRN は、ノードの移動を伴わないアドホックネットワークであるが、ルーティングプロトコルは DistanceVector に基づいたテーブル駆動型の一般的なものである。本論文で提案している方式は、テーブル駆動型ルーティング方式を採用しているアドホックネットワークにおいて、テーブルの更新周期よりも短い期間の経路変更の影響を抑えることが可能な方式と考えることができ、FRN 以外のテーブル駆動型アドホックネットワークにおいても、大幅な変更を必要とせずとも同様の効果が期待できると考えられる。また、アドホックネットワークの適用範囲や利用範囲が広がるにつれ、様々な環境、時間スケールで利用することが増えてくると思われるが、いずれの場合に対しても有効に働くことが期待できる。本提案方式の他のアドホック

ネットワークへの適用可能性を明らかにすることは、今後の課題である。

また、今回用いた ns-2 によるシミュレーション実験では、計算機のメモリの制限によって 20 ノードが限界で、それ以上のノード数によるシミュレーション評価が不可能であった。しかしながら、大規模なシステムにおける評価は大変重要であると考えており、よりノード数の多い大規模なシステムにおける有効な性能評価方法の開発も今後の課題と考えている。

謝辞 本研究の一部は、文部科学省平成 13 年度科学技術振興調整費による「モバイル環境向 P2P 型情報共有基盤の確立」によっている。ここに記して謝意を表す。

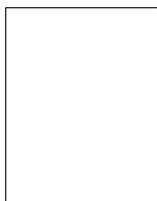
文 献

- [1] "Flexible Radio Network, Fuji Electric Co. Ltd." available at http://www.fujielectric.co.jp/denki/p26/ecop_contents2.html.
- [2] M. Sugano, T. Araki, M. Murata, T. Hatauchi, and Y. Hosooka, "Performance evaluation of a wireless ad hoc network: Flexible Radio Network (FRN)," Proc. IEEE ICPWC 2000, pp. 350-354, Dec. 2000.
- [3] W. R. Stevens, TCP/IP Illustrated, Volume 1: The Protocols. Addison-Wesley, 1994.
- [4] A. Ahuja, S. Agarwal, J. P. Singh, and R. Shorey, "Performance of TCP over different routing protocols in mobile ad-hoc networks," Proc. IEEE VTC 2000 Spring, May 2000.
- [5] G. Holland and N. H. Vaidya, "Analysis of TCP performance over mobile ad hoc networks," Proc. ACM/IEEE MOBICOM'99, pp. 219-230, Aug. 1999.
- [6] D. Kim, C. K. Toh, and Y. Choi, "TCP-BuS: Improving TCP performance in wireless ad hoc networks," Proc. ICC 2000, June 2000.
- [7] T. Goff, J. Moronski, and D. S. Phatak, "Freeze-TCP - A True End-to-End TCP Enhancement Mechanism for Mobile Environments," Proc. INFOCOM 2000, Mar. 2000.
- [8] "The Network Simulator - ns-2." available at <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.

(平成 x 年 xx 月 xx 日受付)

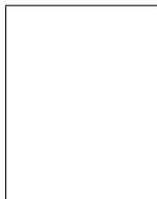
幸 太一

平 14 阪大・基礎工・情報卒。現在、同大大学院修士課程に在籍。アドホックネットワークと有線ネットワークの融合に関する研究を行っている。



山本 貴之 (学生員)

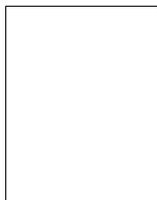
平 14 阪大大学院修士課程了。現在，同大博士課程に在籍。無線アドホックネットワークの性能向上に関する研究を行っている。



菅野 正嗣 (正員)

昭 61 阪大・基礎工・情報卒。昭 63 同大大学院博士前期課程了。同年，三田工業(株)(現，京セラミタ(株))入社。平 8 より大阪府立看護大・医療技術短期大学部・助教授。通信ネットワークの設計・性能評価，無線通信システムに関する研究に従事。

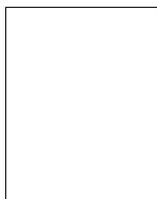
平 3 本会論文賞。工博。IEEE，ACM，情報処理学会各会員。



村田 正幸 (正員)

昭 57 阪大・基礎工・情報卒。昭 59 同大大学院博士前期課程了。同年日本アイ・ビー・エム(株)入社。同社東京基礎研究所を経て，昭 62 阪大大型計算機センター・助手，平 1 同大・基礎工・助手，平 3 同講師，平 4 同助教授，平 11 同教授，平 12

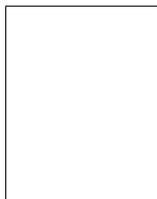
阪大サイバーメディアセンター教授。この間，待ち行列理論，システム性能評価，高速ネットワークなどの研究に従事。工博。IEEE，ACM，The Internet Society，情報処理学会各会員。



宮原 秀夫 (正員)

昭 42 阪大・工・通信卒。昭 47 同大大学院博士課程了。昭 48 京大・工・助手。昭 55 阪大・基礎工・助教授，昭 62 同大・大型計算機センター教授，平 1 同大・基礎工・情報・教授，平 7 より同大・大型計算機センター長併任。平 10 同大・基礎工学部長，

基礎工学研究科長。平 14 同大・情報科学研究科長。昭 58～59 米国 IBM トーマスワトソン研究所客員研究員。システム性能評価，マルチメディアシステム，広帯域通信網，ネットワーク管理に関する研究に従事。平 2 本会論文賞受賞。IEEE，情報処理学会各会員。



畠内 孝明 (正員)

昭 57 近大・理工・電子工学課卒。同年，富士電機(株)入社。主に小電力無線機，無線ネットワークの研究・開発に従事。電子情報通信学会，電気学会各会員。