

本資料について

- 本資料は下記論文を基にして作成されたものです。
文書の内容の正確さは保障できないため、
正確な知識を求める方は原文を参照してください。
 - 著者：高橋ひとみ，斎藤匡人，間博人，戸辺義人，徳田英幸
 - 所属：慶応義塾大学
 - 論文名：MANETにおけるTCPスループット推定による経路選択機構の実環境評価
 - 出展：情報処理学会論文誌 Vol.46 No.12
 - 発表日：2005年 12月

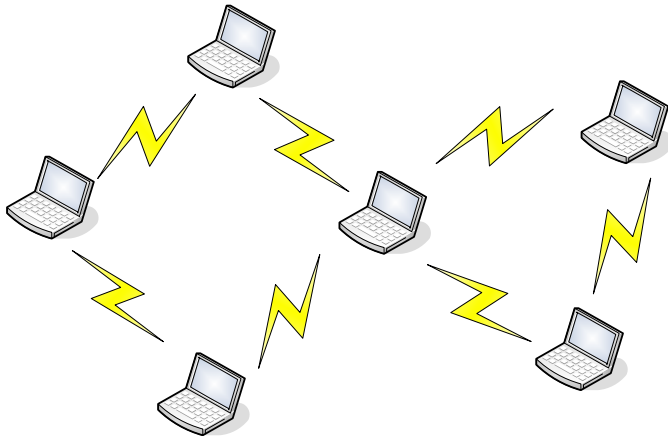


MANETにおけるTCPスループット推定 による経路選択機構の実環境評価

名城大学理工学部
森崎 明

背景①

- 無線通信技術の発達や無線端末の急速な普及にともない、無線端末どうしが瞬時に動的なネットワークを構築するMANETに注目が集まっている
- **MANET** (Mobile Ad-hoc Network)
 - 無線端末どうしが瞬時に動的なネットワークを構築
 - 無線基地局を介した従来の無線ネットワークとは異なり、既存の施設や設備を必要しないネットワークの構築が可能



- **Mobile**: 動的なトポロジー変化
 - ノードは移動可能
- **Ad-hoc**: 自立的トポロジー生成
 - インフラ設備に依存せず
 - No server, No Access Point, etc
- **NETwork**: 全てのノードはルータ機能をもつ
 - 中間ノードはルータとして動作する、マルチホップ通信

背景②

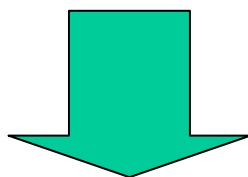
- MANETを構築するほとんどの経路制御プロトコル
 - ホップ数に基づいて経路制御が行われ、複数経路が存在した場合は最短経路を選択
 - 経路状態が調べられるのは経路探索時のみ
- しかし、このような単純な経路制御では、MANET環境において最適なネットワーク運用がなされるとは限らない

MANETにおける経路制御の問題点

- 無線環境の特徴

- 使用する経路の電波品質により通信性能が大幅に変動し、電波品質が悪ければTCPスループットは低下
- 使用中の経路における電波品質の状態は端末の移動により大きく変動

- 最短経路であっても電波品質が悪いと、必ずしも最短経路が最善な経路とは限らない
- 経路探索時に最善であった経路の電波品質が劣化し、他に良好な経路が現れたとしても、劣化した最短経路が使われ続ける

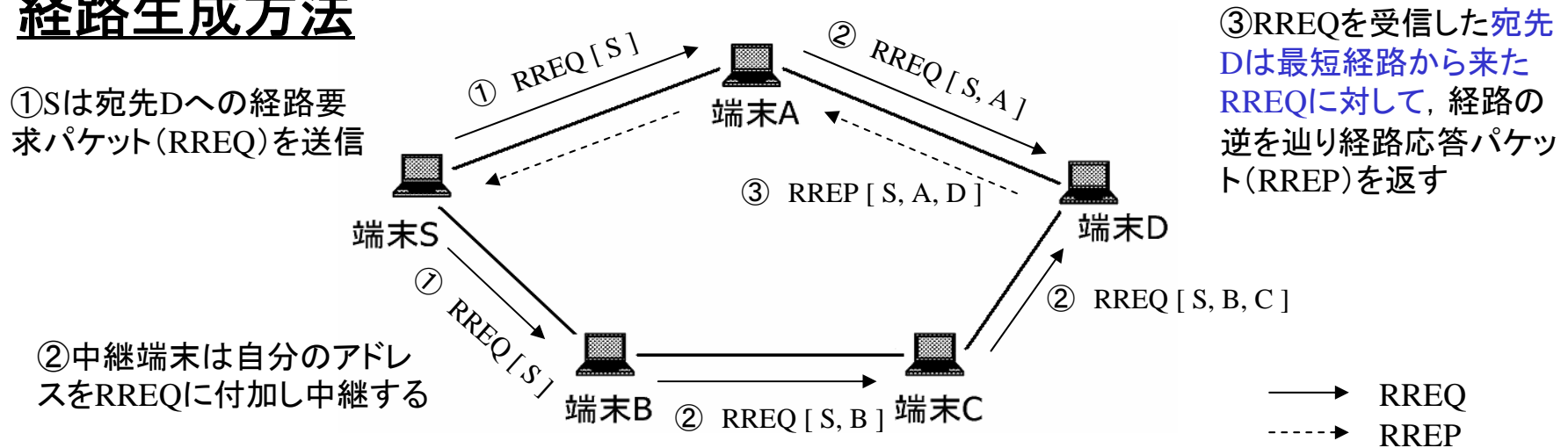


- MANETを構築する経路制御プロトコルの1つであるDSRを用いた実環境の実験(予備実験1, 予備実験2)により、最短経路がTCPスループットにおいて必ずしも最善な経路ではないことを示す

DSR (Dynamic Source Routing) の概要

- 送信パケットのヘッダに送信元から宛先までの経路が含まれ、ソースルーティングによりデータ配送が行われる

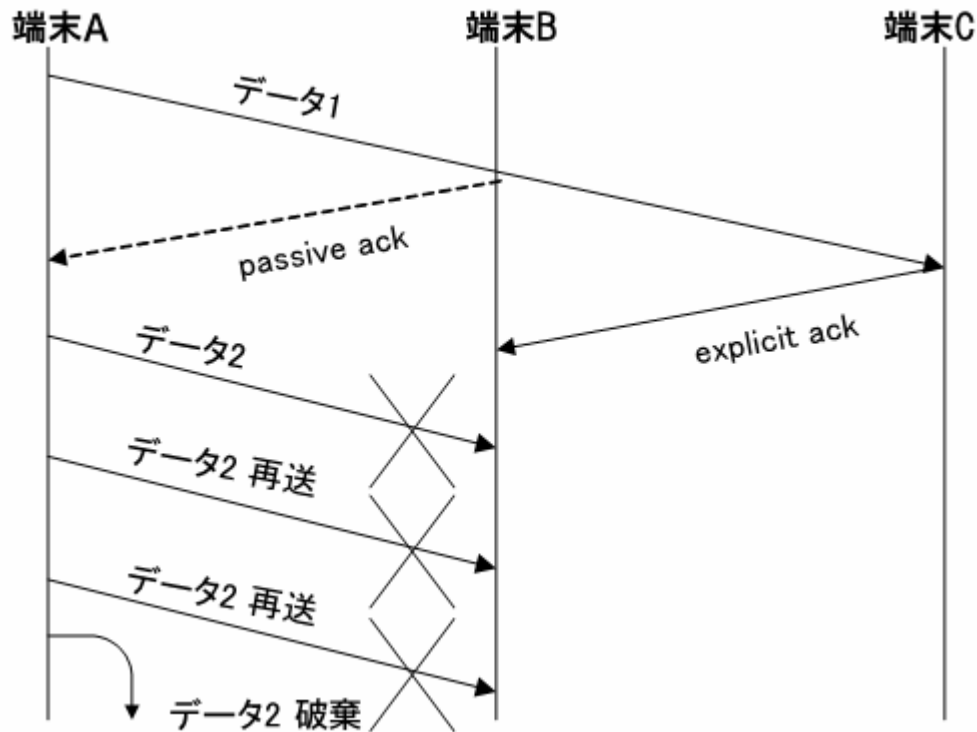
経路生成方法



- 各端末は各宛先への経路を保持する経路キャッシュをもつ
 - 送信元端末の経路キャッシュに宛先への経路が存在する場合は、経路要求なしでデータを送信可能
 - 中間端末の経路キャッシュに宛先への経路が存在する場合は、その端末が経路を付加してRREPを返す

DSRのデータ送信手順

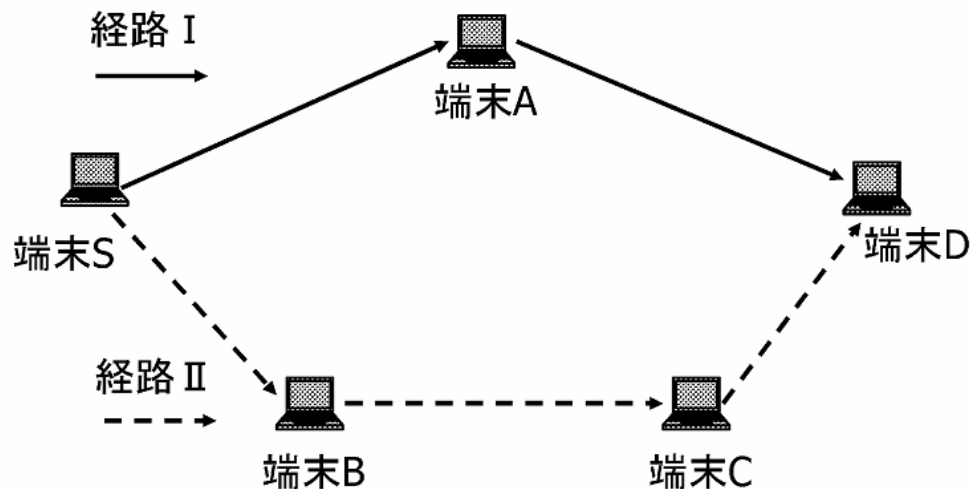
- 宛先までの通信経路が決定した後のデータ送信手順



データ2が端末Bで受信できなかったとき—端末Aは端末Bからのpassive ackが受信できないため、再送を2回行った後データ2を破棄する

予備実験1, 予備実験2の環境

- MANET環境: FreeBSD3.3 Release+PAOおよび 経路制御プロトコルとしてDSRを用いて構築
- 下図のトポロジ上で, 端末 S, A, D で構成される 2 ホップの経路 I, 端末 S, B, C, D で構成される 3 ホップの経路 II を構築

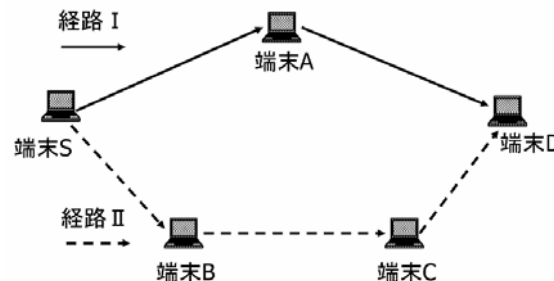


予備実験1: パケット喪失率とTCPスループットの関係①

予備実験1の内容

- TCPスループットの測定は 10秒間の TCPデータの送受信を10回行い, TCP スループットの平均値を求める
- 中間端末においてパケットをランダムに廃棄させるコードを加え, DSR層 (IP層) でパケット喪失を発生
- 以下の3通りの条件でTCPスループットを測定
各中間端末の DSR層におけるパケット喪失率を ρ とする

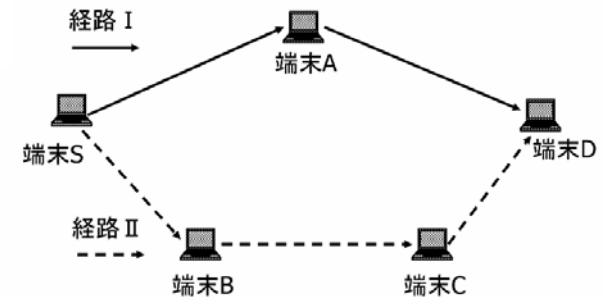
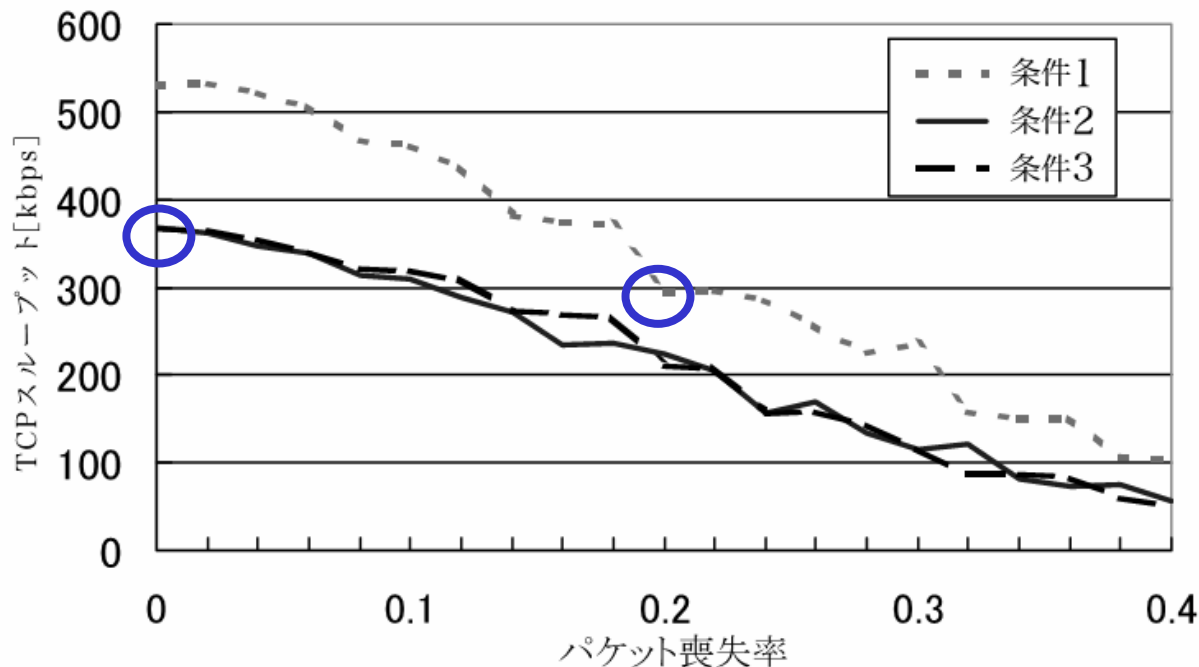
条件1: 経路 I を用い, 端末 A でパケットを廃棄する. ただし, $0 \leq \rho \leq 0.4$ で変化させる
条件2: 経路 II を用い, 端末 B でパケットを廃棄する. ただし, $0 \leq \rho \leq 0.4$ で変化させる
条件3: 経路 II を用い, 端末 C でパケットを廃棄する. ただし, $0 \leq \rho \leq 0.4$ で変化させる



予備実験1: パケット喪失率とTCPスループットの関係②

予備実験1の結果

条件1: 経路 I を用い, 端末 A でパケットを廃棄する. ただし, $0 \leq \rho \leq 0.4$ で変化させる
条件2: 経路 II を用い, 端末 B でパケットを廃棄する. ただし, $0 \leq \rho \leq 0.4$ で変化させる
条件3: 経路 II を用い, 端末 C でパケットを廃棄する. ただし, $0 \leq \rho \leq 0.4$ で変化させる



ρ の値によっては, 経路 I の TCPスループットよりも経路 II の TCPスループットの方が良い状況が発生

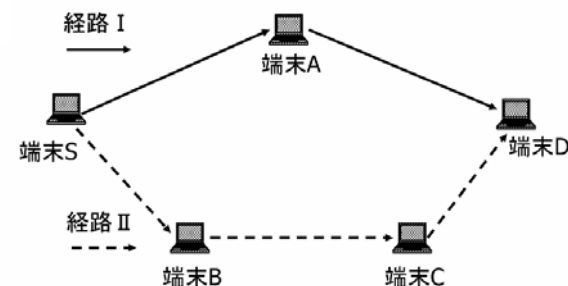
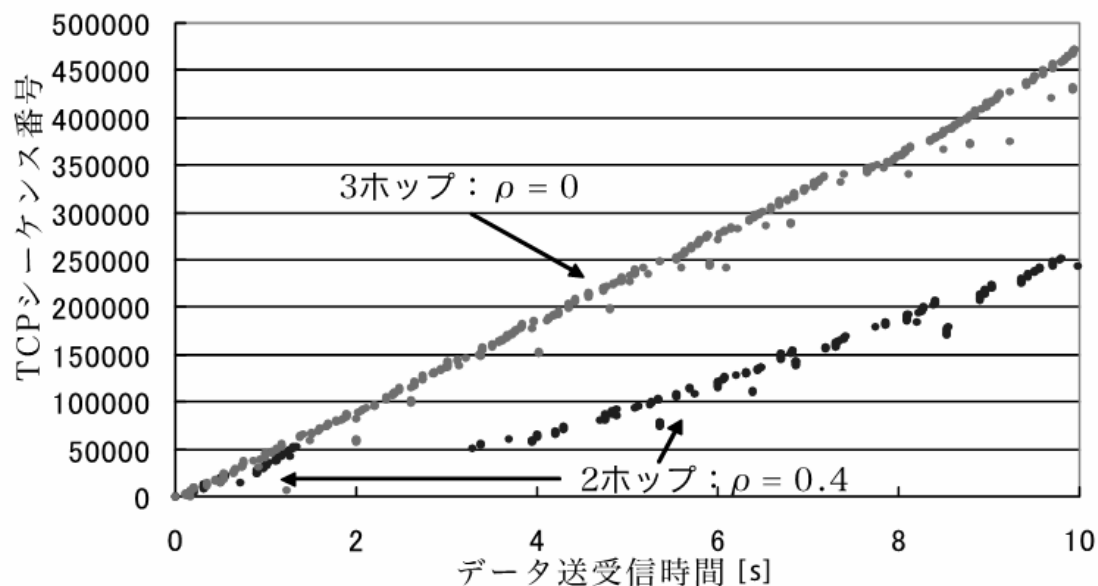
例) 端末 B, 端末 C において $\rho = 0$, 端末 A において $\rho \geq 0.2$ のとき, 経路 I よりも経路 II を使用した方が TCP スループットは向上

予備実験2: TCPシーケンス番号の推移

予備実験2の内容

- TCPデータの送受信を10秒間行う
- 経路 I の端末Aに $\rho = 0.4$ の, 経路 II の端末 B において $\rho = 0$ のパケット喪失を発生させる

結果



これらの実験により、必ずしも最短経路が最善な経路ではないことが示された

提案方式 ETR

- ETR (Estimated-TCP-Throughput Maximization based Routing)
 - 経路選択指標をTCPスループットの推定値とする経路制御機構
 - TCPスループットの推定値がわからない場合は、経路制御プロトコルに従い経路(最短経路)決定しデータを送信
 - データ送信と同時に各端末は遅延とパケット喪失率を測定, そしてTCPスループットの推定値を算出
 - 最善なTCPスループットの推定値を持つ経路へ動的に切替える
 - 経路のTCPスループットの推定値がわかる場合はTCPスループットが最善な経路でデータを送信
- ETRは機構上ソースルーティングが前提となる
 - 既存のMANETの経路制御プロトコルの一つであるDSRを拡張する形で実装
- ETRの想定環境
 - ノードの移動が少ない環境, かつ屋内での小規模なネットワーク

ETRの設計 –TCPスループットの指標–

- ETRはTCPスループットの指標としてTCPスループットのモデル式を用いて、最大スループットの推定値を計算する

TCPスループットのモデル式

$$T \leq \frac{1.5\sqrt{2/3} * B}{RTT * \sqrt{P}}$$

B: 最大セグメントサイズ

RTT: 経路における最小遅延

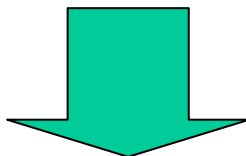
P: 終端端末間のパケット損失率

T: TCPスループットの近似値

- 本機構にTCPスループットのモデル式を適用できる理由
 - TCPスループットのモデル式はパケット損失率*P*が0.05以下の環境以下で有効とされている
 - 予備実験におけるパケット喪失率の*ρ*はDSR層、つまり第3層(IP層)で人工的に発生させているパケット喪失率
 - DSRはパケット喪失が発生した場合、ホップごとに再送を行う機能を有しているため、TCPの第4層におけるパケット喪失率は非常に低くなる

TCPスルーポイントモデル式に必要なパラメータ

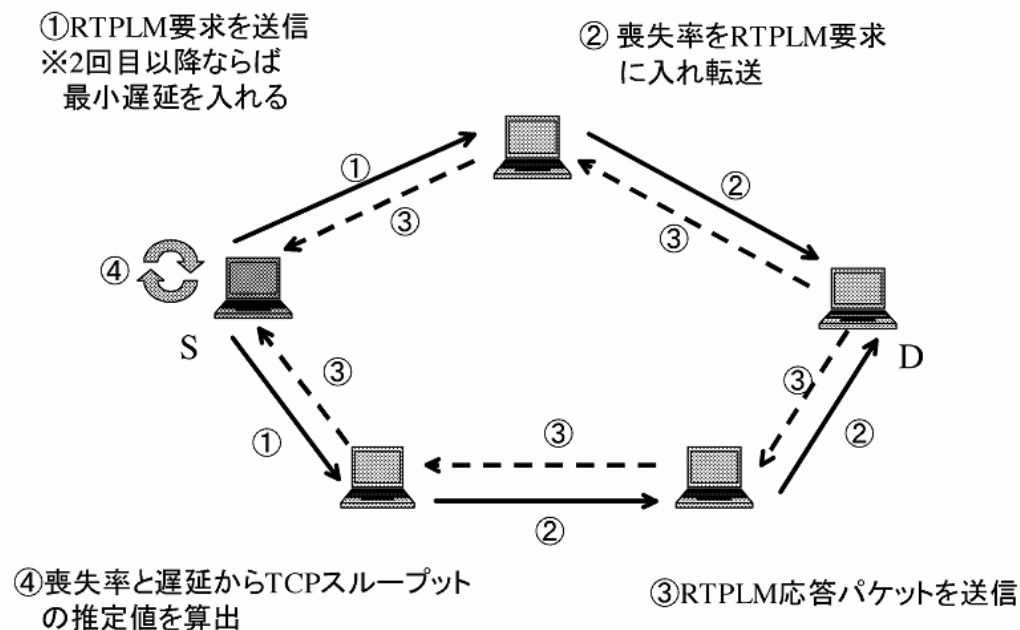
- 経路選択の指標となるモデル式に必要なパラメータ
 - 終端端末間の往復パケット喪失率 (RTPL: Round-Trip Packet Loss ratio)
 - 終端端末間の遅延 (RTT: Round-Trip Time)
- パラメータの取得に用いる経路は行き・帰り同一の経路である必要がある
- そのため, ETRでは送信元は宛先までの全経路を把握している必要がある



ETRは前提として送信元が宛先までソースルーティングを行う

パラメータの算出方法

- 各端末は起動時から現在までに転送したパケット数からリンクごとのパケット喪失率を計算



RTPLM: RTTとRTPLの測定 (RTPLM: RTPL Measurement)を要求・応答するパケット

- 図のように取得された経路のRTTとRTPLからモデル式を用い、SからDへのTCPスループットの推定値が算出される

経路の切替え方法

- MANETでは端末の移動により、TCPスループットの推定値が激しく変動する状況が発生すると考えられる
- そのような状況では、送信元において経路の切替えが頻繁に発生し、TCPスループットが低下してしまう
- そこで切替えの閾値 h を設け、以下のアルゴリズムにより経路切替えを行う
- 閾値 h は経路の状態によって最適となるように動的に変更する

経路切替えアルゴリズム:

送信元がRTPLM応答受信後、現在使用中の経路におけるTCPスループットの推定値に比べ、他の経路におけるTCPスループットの推定値が h 以上の差があった場合、経路が切り替えられる

閾値 h の変更方法:

初期状態:

$$h \leftarrow \gamma \quad \gamma: \text{初期値}$$

経路切替えが発生した場合:

$$h \leftarrow h + \delta \quad \delta: \text{定数}$$

経路切替えが発生しない場合:

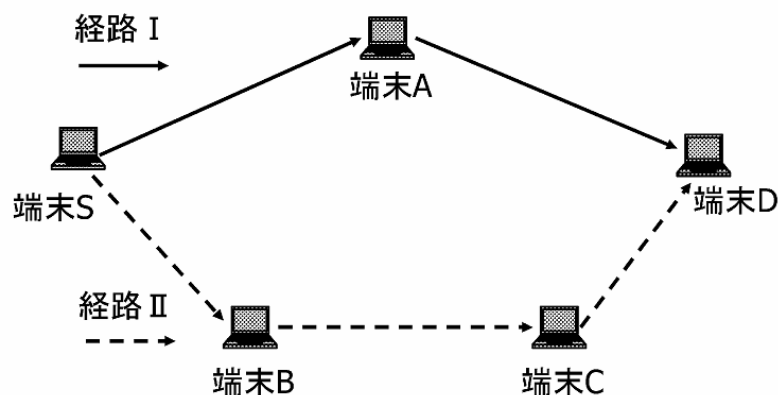
$$h \leftarrow h - \delta$$

$$\text{if } h < \gamma$$

$$h \leftarrow \gamma$$

ETRの評価

- FreeBSD 4.2 Release 上で動作するDSRにETRを実装したシステムと既存のDSRを使用して評価を行う
- 評価環境としてシミュレータではなく、実環境のMANETをテストベッドとする
- 実験環境は小規模でかつノードの移動が少ない下図のMANET



ハードウェア仕様と使用無線デバイス

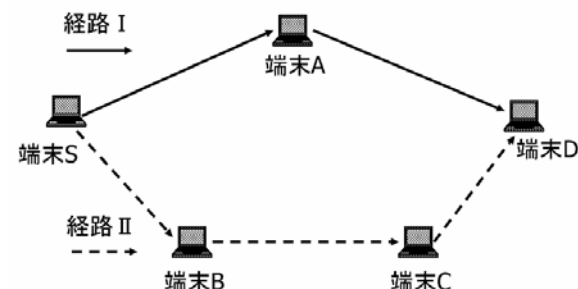
- ・ 端末S, D: Let's Note CF-B5R, CPU: Pentium III 600MHz, メモリ: 64MB
- ・ 端末A, B, C: Vaio PCG-505V, CPU: Petium 300MHz, メモリ: 64MB
- ・ 無線デバイス: Melco WLI-PCM-L11 (802.11b)

オーバヘッドの評価①

- RTPLM要求の送信間隔を変化させ、RTPLM要求・応答によるオーバヘッドの評価を行う

実験内容

- 経路 I, II を用いてTCPデータを送信し、送信を始めてから10秒後に端末 A の DSR 層において意図的に喪失率 $\rho=0.4$ でパケット喪失を発生
- RTPLM要求を送信する端末は S とし、RPTLM要求の送信間隔を1, 2, 3, 4, 5秒と変化させる
- RTPLM要求・応答によるオーバヘッド(η)を下式により算出



$$\eta = \frac{N_{RTPLM} + N_{Ack}}{N_{all}}$$

N_{RTPLM} : RTPLM要求・応答のパケット数

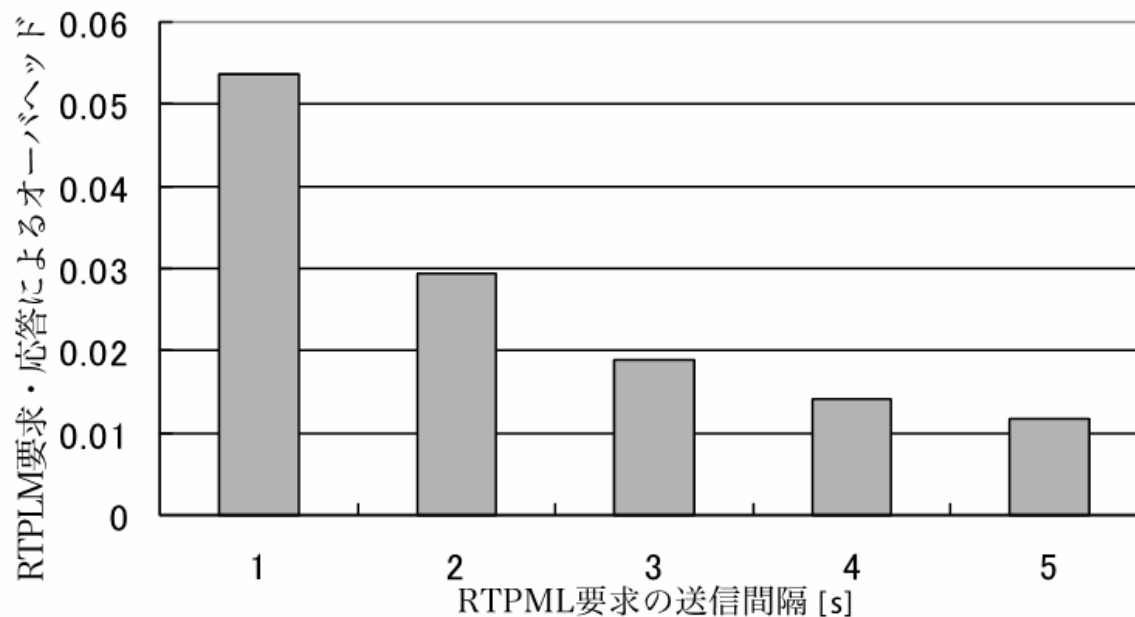
N_{Ack} : RTPLM 要求・応答に対する DSR 層での ACK パケット数

N_{all} : DSR 層で送受信した全パケット数

η : オーバヘッド

オーバヘッドの評価②

オーバヘッドの評価実験の結果



- RTPLM要求の送信間隔が長くなるにつれ、RTPLM要求によるオーバヘッドが少なくなる
- RTPLM要求の送信間隔が短ければ、経路状態の変化に対して送信元の感知が早くなるが、ネットワークへのオーバヘッドが高くなるというトレードオフが存在する

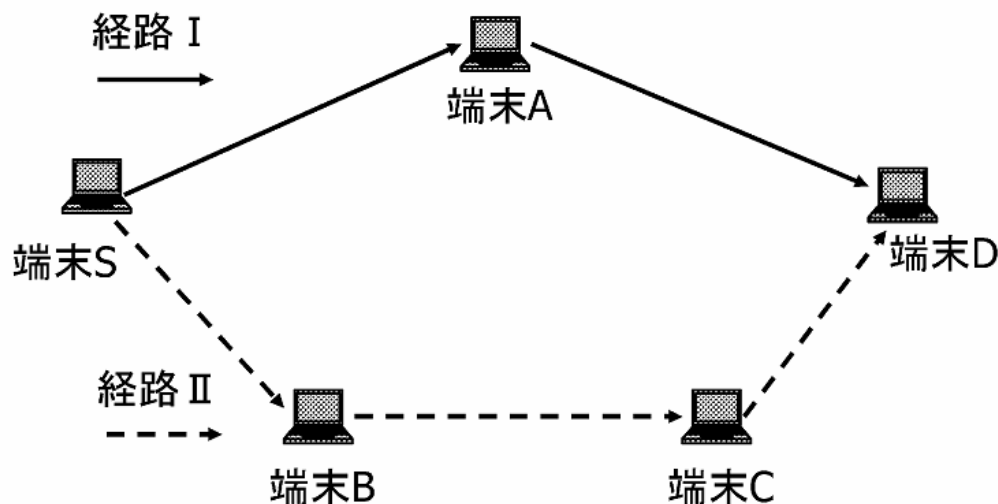
TCPスループットの評価①

- 以下の2条件でTCPデータを送信し, TCPスループットの評価を行う

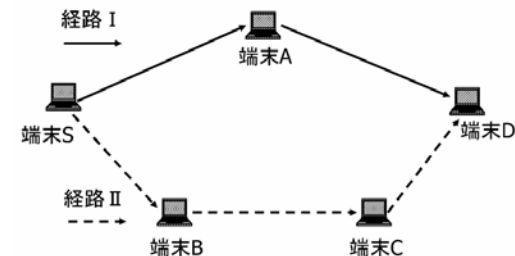
条件 A 経路I, IIを用い, TCP送信を開始し20秒後に端末 A において $\rho=0.4$ のパケット喪失を発生させ続ける

条件 B 経路I, IIを用い, TCP送信を開始し 10秒後に端末Aにおいて $\rho=0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ のパケット喪失を発生させ続ける

ただし, 条件A, BともにRPTLM要求の送信間隔は3秒



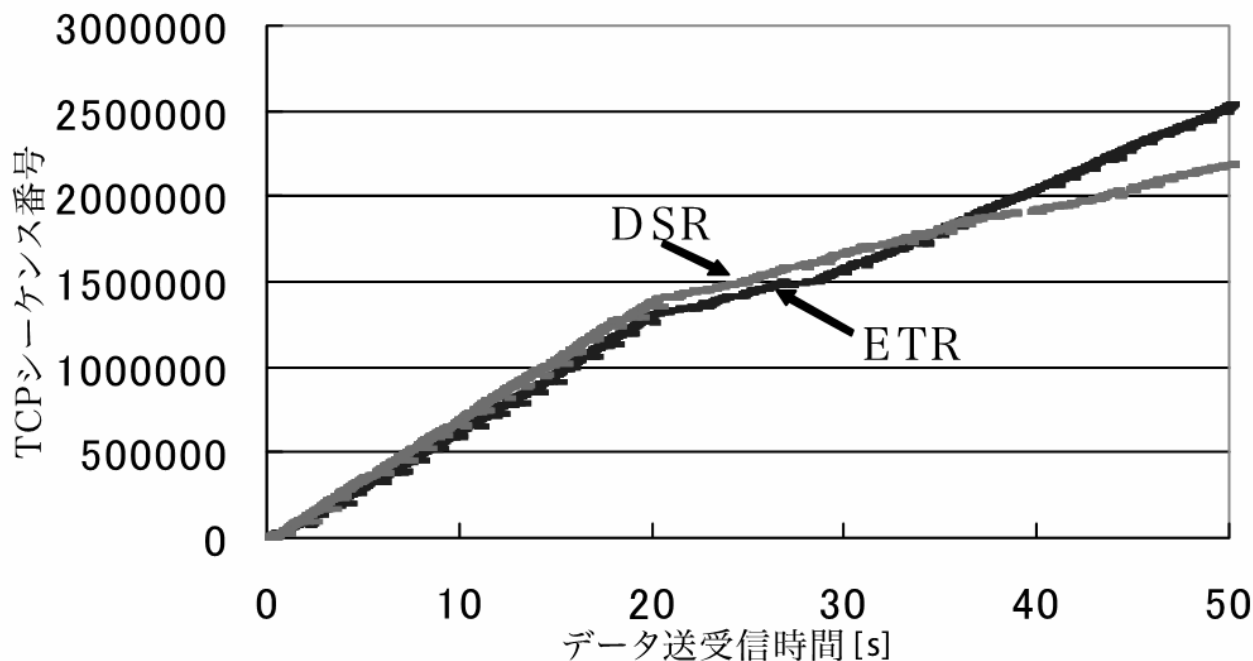
TCPスループットの評価②



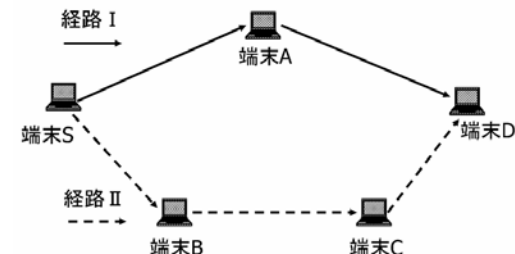
条件Aの結果

条件 A 経路I, IIを用い, TCP送信を開始し20秒後に端末 A において $\rho=0.4$ のパケット喪失を発生させ続ける
ただし, RPTLM要求の送信間隔は3秒

ETRとDSRの端末SにおけるTCPシーケンス番号の推移の比較



TCPスループットの評価③

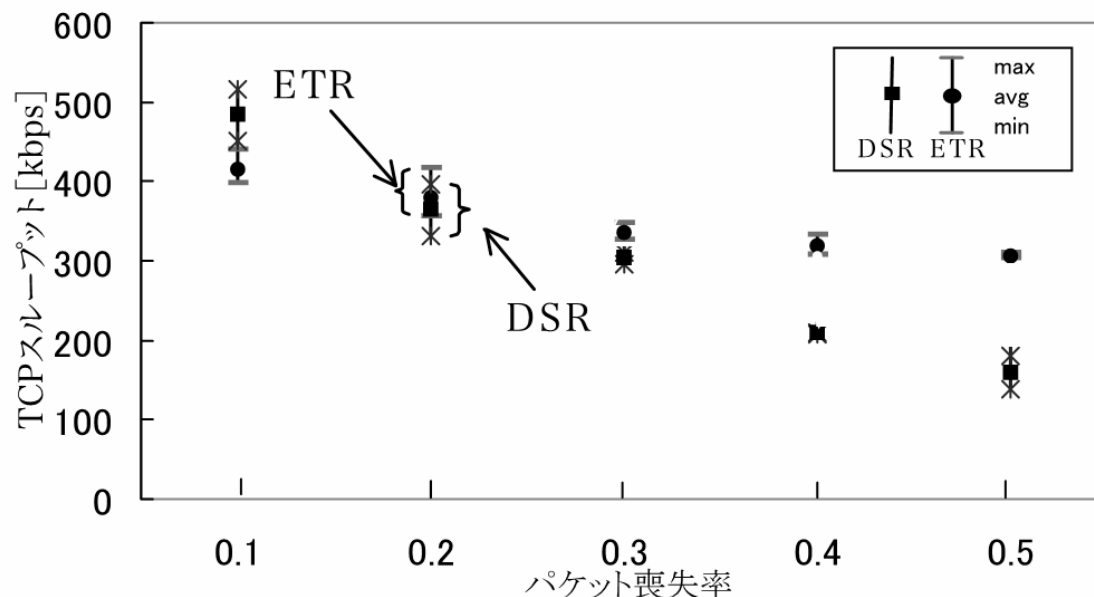


条件Bの結果

条件 B 経路I, IIを用い, TCP送信を開始し 10秒後に端末Aにおいて $\rho = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ のパケット喪失を発生させ続ける
ただし, RPTLM要求の送信間隔 は3秒

ETR とDSRのTCPスループットの比較

- ・30秒間のデータ送受信を行い, TCPスループットの最大値, 平均値, 最小値を示す
- ・DSRではパケット喪失が発生した後のTCPスループットを示し, ETRではパケット喪失が発生し, 経路が経路 Iから経路 IIへ切り替わった後のTCPスループットを示す



- ・ $\rho = 0.1$ のとき, ETR は RTPLM 要求の送信や処理のオーバーヘッドのため DSR に比べ 0.8 倍 TCP スループットが下る
- ・ $\rho \geq 0.2$ になると, ETRは DSR に比べてTCPスループットが向上
- ・ ρ が高くなるにつれDSRとETRのTCPスループットの差は大きくなり, $\rho = 0.5$ のときには, TCPスループットが

1.9倍に向上

考察

- 実験では $\rho = 0.5$ のときには、ETRはDSRよりTCPスループットが1.9倍に向上
- 実環境のMANETにおいてパケット損失率が 0.4~0.5 となる場合が多く発生している(*Coutoらの論文より)
- このことから、ETRはDSRより優れた転送性能が実際のMANETにおいて期待できる

- 実験の結果からETRは以下のような条件下で効率良く動作し、TCPスループットを向上させることができる
 - 端末の移動が少なくトポロジの変化が少ない
 - ノード台数が少なくネットワークの規模が小さい
 - リンク間の電波品質の差が大きくパケット喪失率が高い

*De Couto, D.S.J., Aguayo, D., Chambers, B.A. and Morris, R.: Performance of Multihop Wireless Networks: Shortest Path is Not Enough, Proc. 1st Workshop on Hot Topics in Networks (HotNets-I), pp.83-88 (2002)

まとめ

● 本発表

- MANET上でソースルーティングを行うプロトコルにおける, RTPL と RTT を指標とした経路制御機構である ETR を提案
- ETRは電波品質による影響を大きく受けるためシミュレータ上ではなく, 実機を用いて実際に MANETを構築し評価を行った
- ETRを用いることでDSR層におけるパケット喪失率が0.5の場合, 通常のDSRに比べ TCP スループットが 1.9 倍向上することが判明

● 今後の課題

- より効率良く経路の RTPL と RTTを取得する方法を提案し, RTPLM 要求・応答によるネットワークへのオーバヘッドを軽減
- ETR を DSR に拡張する形で実装を行ったが, 他の経路制御プロトコルに ETRを適用