

無線アドホックネットワークにおける ループフリーな動的メトリック変更による 通信の高信頼化

吉廣卓哉

和歌山大学システム工学部

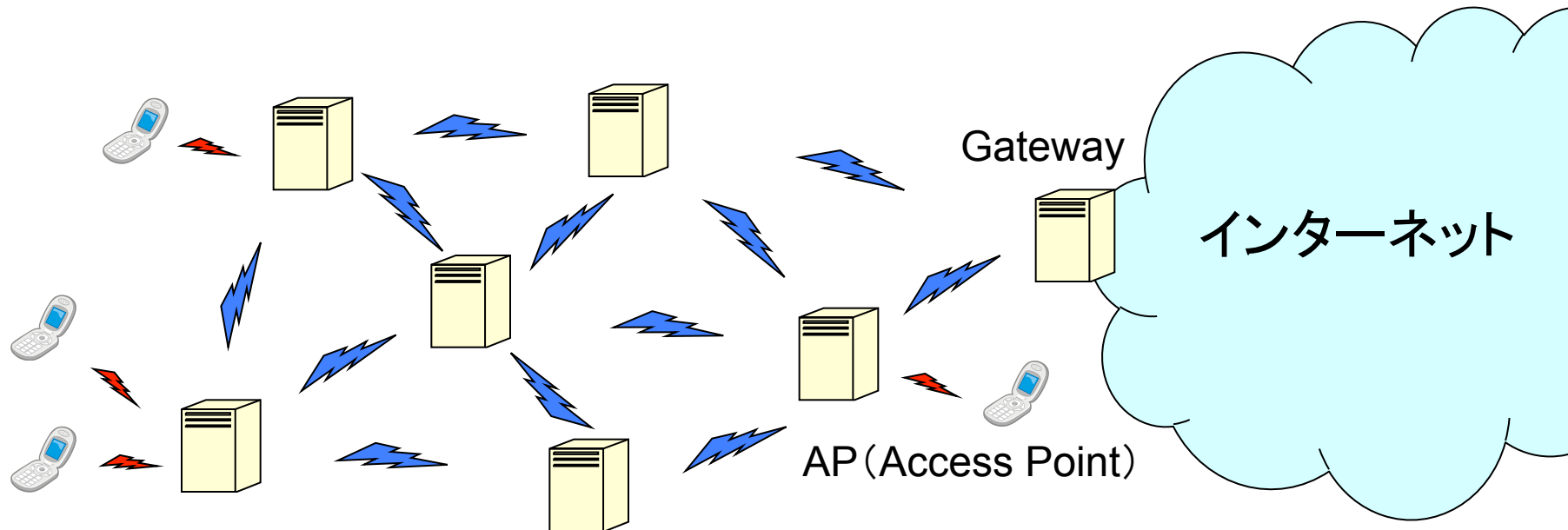
tac@sys.wakayama-u.ac.jp

発表概要

- 無線アドホックネットワークにおける
一時的なループ削減手法の提案と評価
 - 対象: プロアクティブ型経路制御スキーム
 - 2つの提案手法
 - LLD (Loopfree Link Duration)
 - LMR (Loopfree Metric Range)
 - 理論的結果
 - シミュレーション評価
 - 実機評価 (LMRのみ)

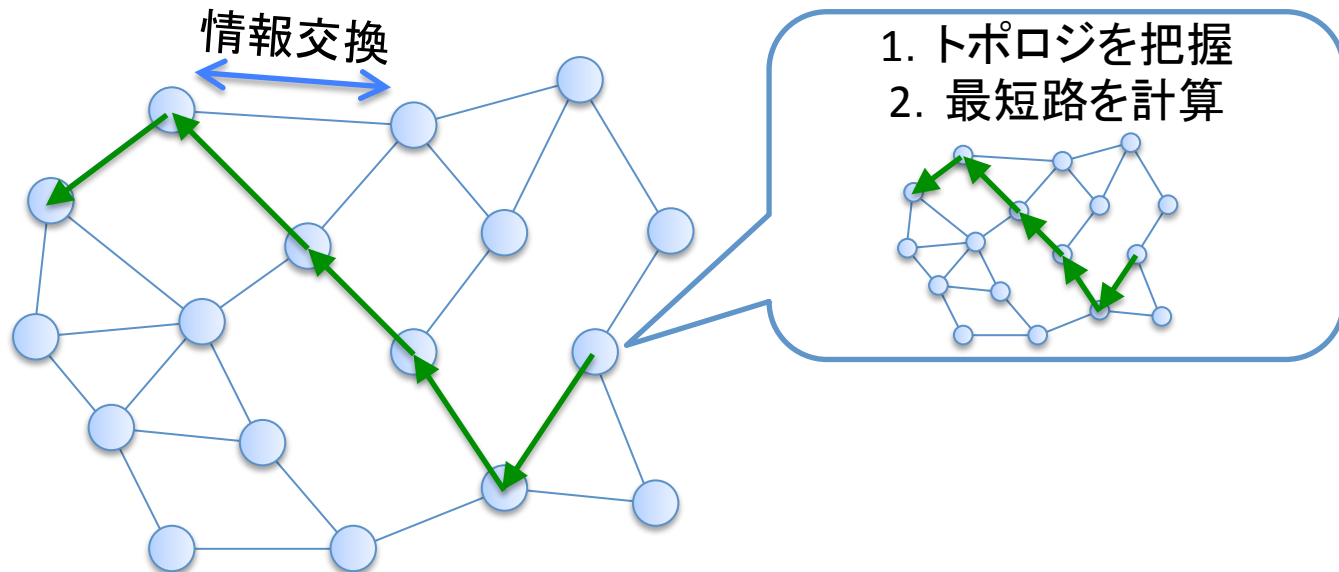
研究の背景

- WMN (Wireless Mesh Network)
 - 固定基地局を無線で網状に接続したネットワーク
 - 次世代の無線インフラ技術として注目されている



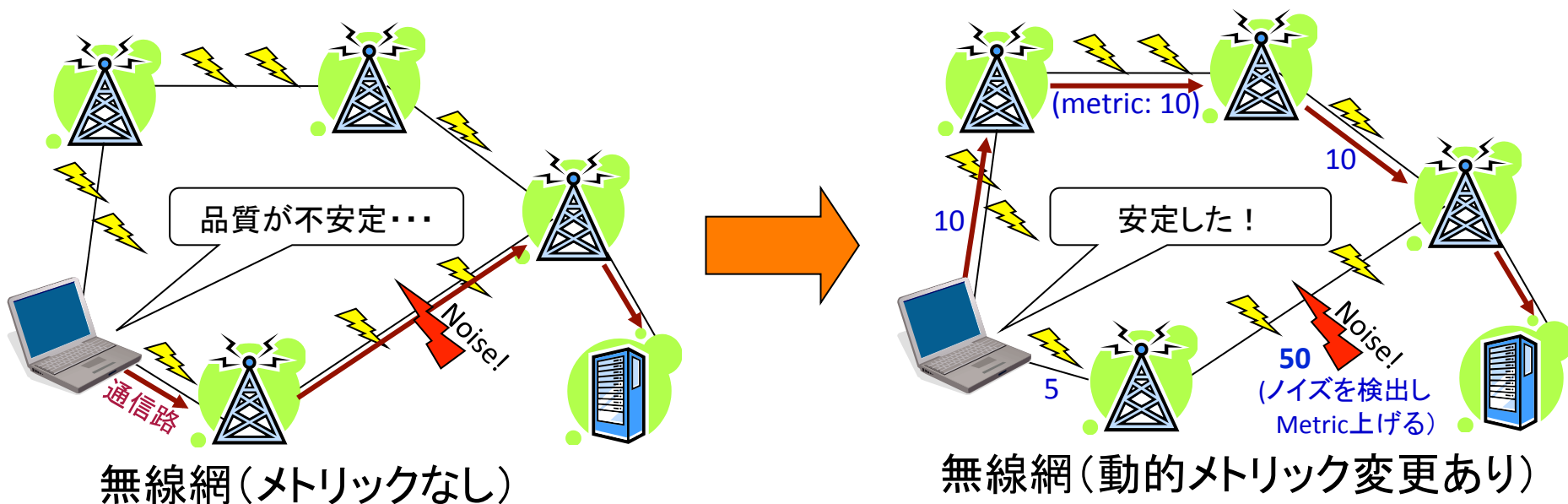
MANETにおけるプロアクティブ型経路制御

- 最短経路に沿ったパケット転送
- プロアクティブ型の経路制御プロトコル
 - 各ノードが隣接ノードを広告し、ネットワークトポロジを把握
 - 各ノードがネットワークトポロジ上で最短経路計算



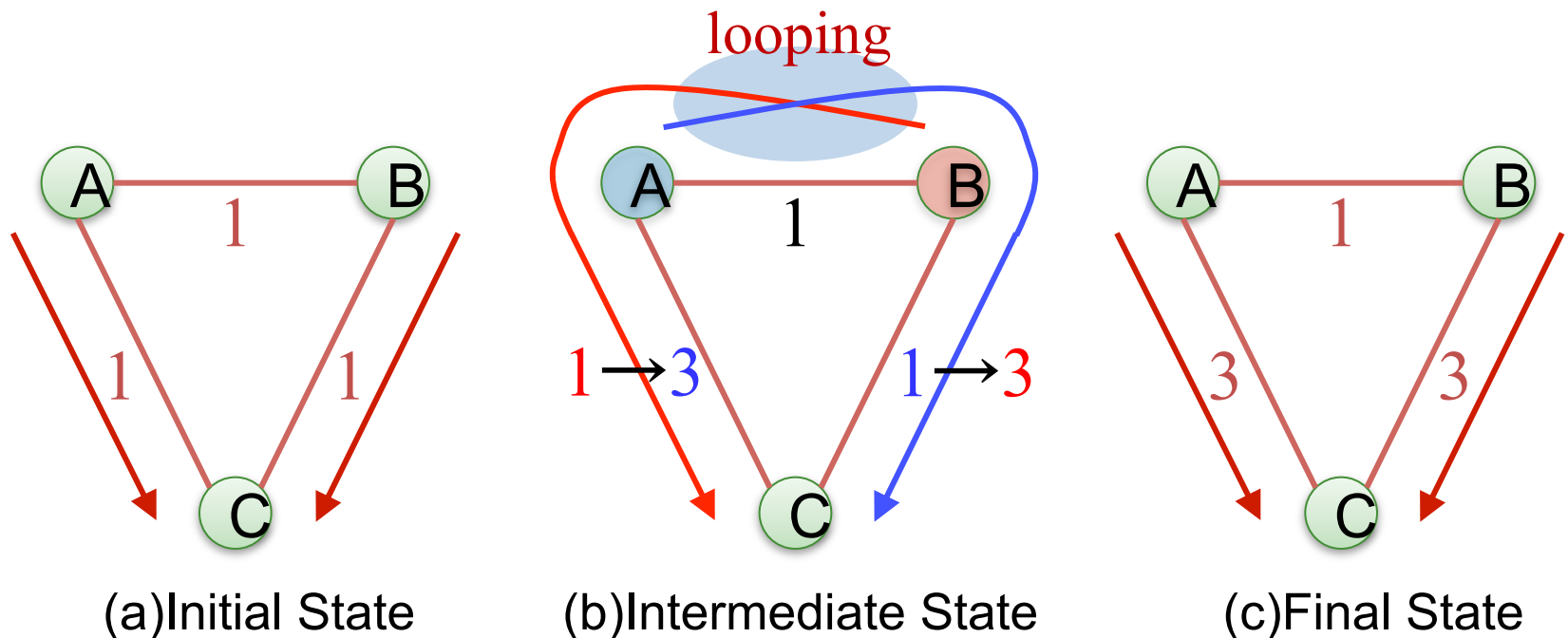
動的なメトリック変更による経路制御

- 動的メトリック (ex. ETX, ETT)
 - 品質の良い経路を選択するために、無線リンクの品質を数値化
 - 通常、最短路計算によりメトリックの和が最小の経路を選択
 - 動的にリンク品質が変わる状況で、常に良い経路を選択できる



経路ループ問題

- メトリックの伝播遅延により、一部ノードで古いメトリック値が使われる
- 各ノードが持つ経路表が一貫性を欠くことで、経路ループが生じる。
- ループは輻輳や通信切断を起こし、通信の信頼性を著しく損なう
- 安定通信を実現するためには、ループを防止することが重要



ループ削減のための既存研究

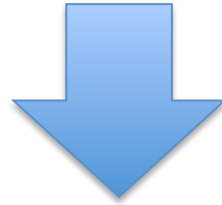
- ループパケットの検出と破棄 [Speakman et al '09]
 - 最大で数十%程度のスループットの向上
(欠点)
 - ループは防げるが、ループパケットは宛先に到達しない
 - 3ホップ以上のループを防ぐためには大きなオーバーヘッド



本質的な解決として、やはりループを防ぎたい

研究課題の目的

低いオーバーヘッドでループを防止／削減したい

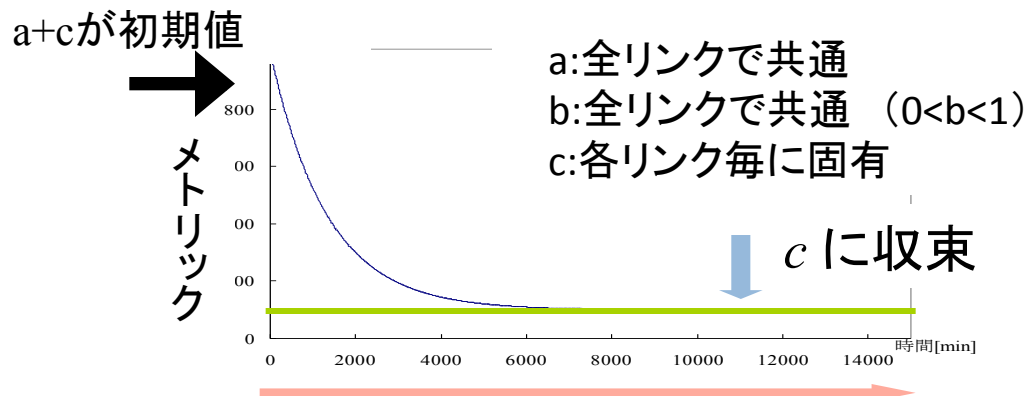


無線メッシュ網において通信の信頼性を確保

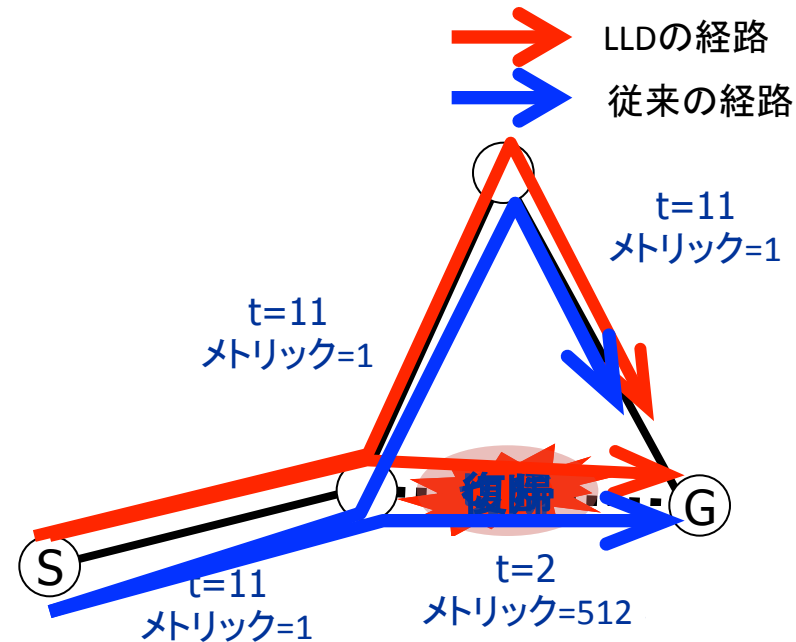
提案手法1: LLD

- メトリック変更手法LLD (Loop-free Link Duration)
 - 安定な接続を続けるほど低くなるメトリックを用いた最短経路を計算
 - 経路ループ問題が起きないことを保証
- リンク l の経過時間 t におけるメトリックの推移式

$$\delta^t(l) = ab^t + c$$

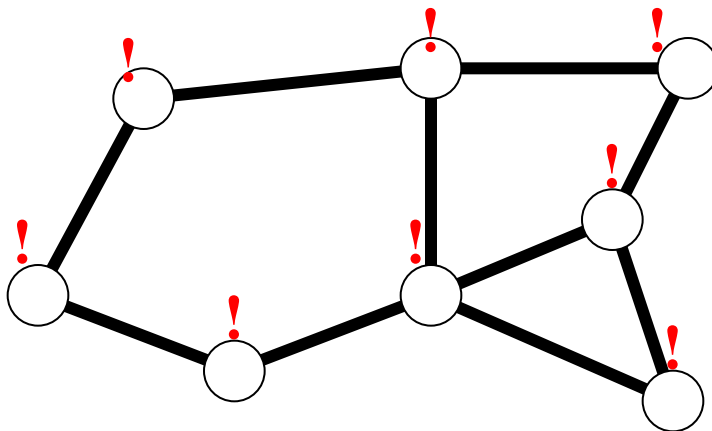


長時間接続するほどリンクは安定



LLDの経路制御プロトコル

- 全リンクの時間に対するメトリックの変化割合を一定にする必要がある
 - リンクの生成時刻を広告
 - 一定時間 t を経過する度にメトリックを更新し、経路表を再計算する
- 同期メッセージ
 - 一定時間ごとに同期メッセージをブロードキャスト
 - 同期メッセージを受け取ったノードはメトリック及び、経路表を再計算する
 - メトリックを定期的に広告する必要がなく、オーバーヘッドが低い



- ①同期時間にノードが気付く
- ②気付いたノードが
同期メッセージをブロードキャスト
- ③時間の同期がなされ、 t が更新され、
メトリックの再計算が行われる

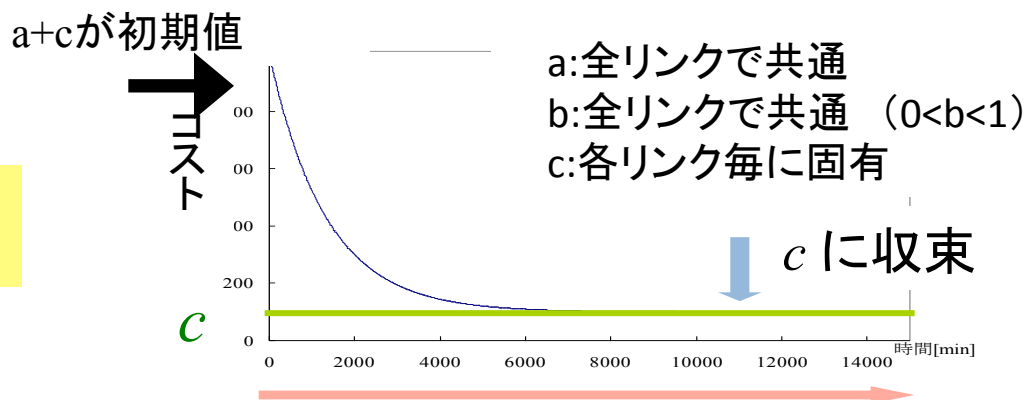
LLD: 理論解析

証明した理論的結果

リンク切断が起こらず、同期が崩れないと仮定する。
このとき、ループが発生しないことを保証できる同期
間隔 t の上限が存在することを示した。また、上限値を
計算するアルゴリズムを示した。

LLDのメトリック推移式

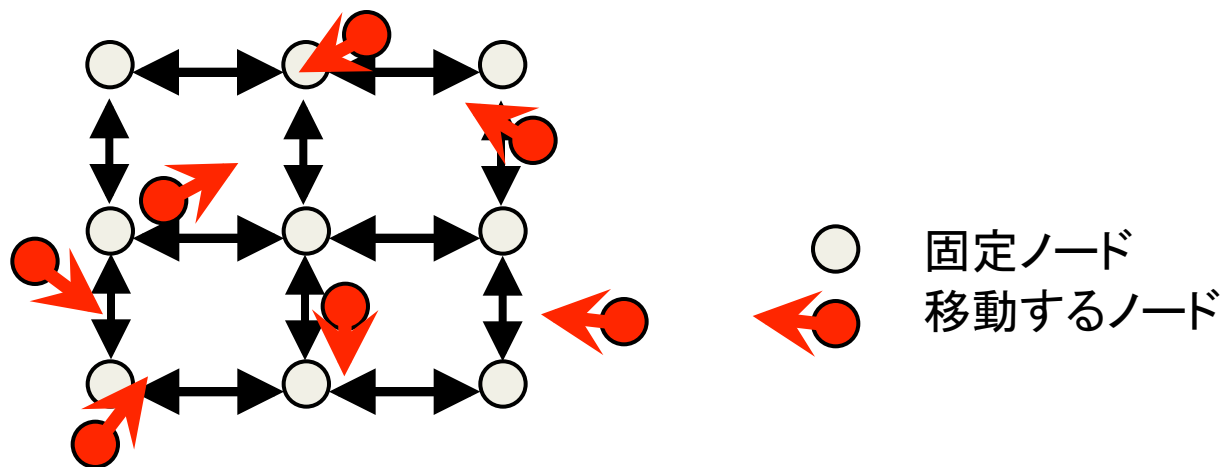
$$\delta^t(l) = ab^t + c$$



長時間接続するほどリンクは安定

シミュレーション実験

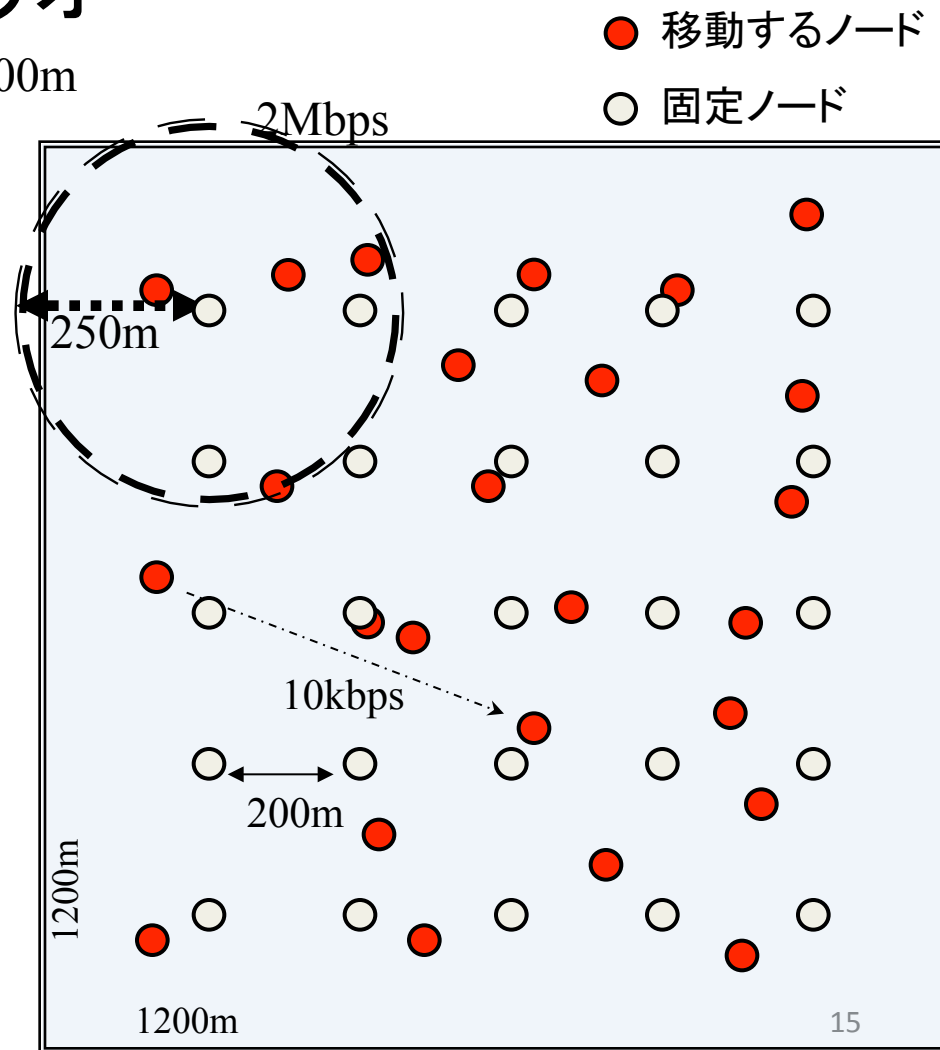
- Qualnet ver 4.5 を用いたシミュレーション評価を実施
- LLDは安定経路を優先利用し品質を向上させる
 - 安定な経路を含むネットワークでの性能を評価する
 - 固定ノードの間の経路は安定に接続する
- 固定ノードと移動ノードが混在するシナリオを作成



シミュレーションシナリオ

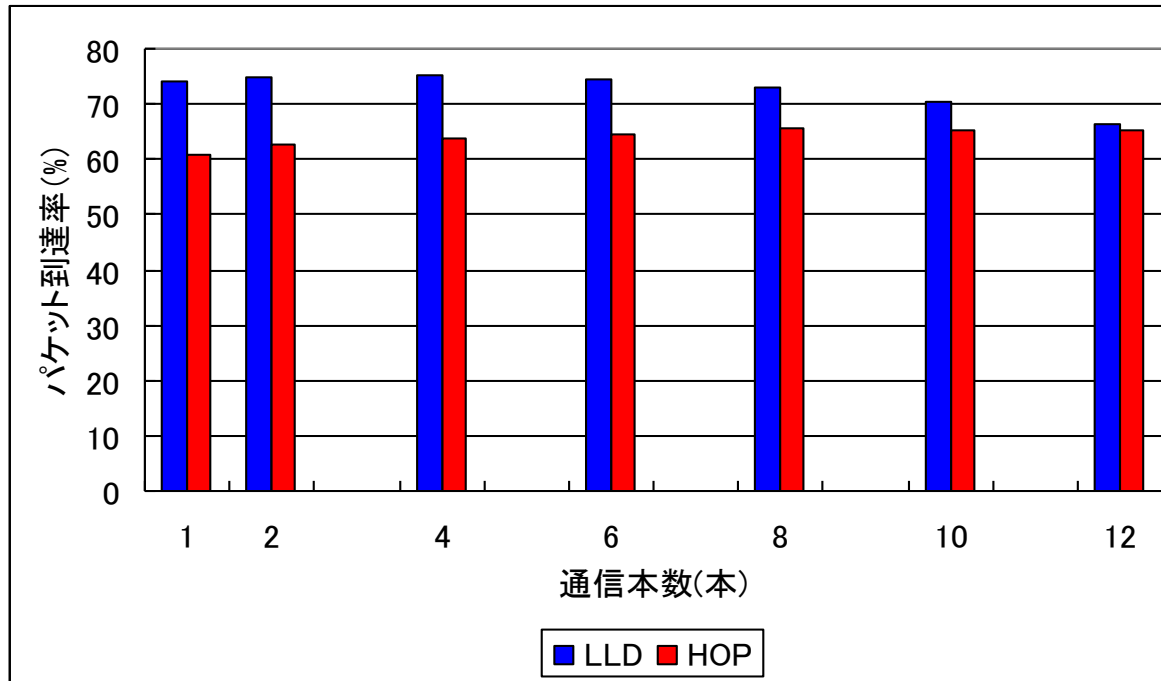
●シミュレーションシナリオ

- シミュレーションフィールド 1200m×1200m
- 固定ノード:25個
- 移動するノード:25個
- 移動モデル: RWPモデル, 5km/h
- 固定ノード間の距離 200m
- リンクの通信帯域 2Mbps
- ノードの通信距離 250m
- 移動ノード間にランダムに通信発生
- UDPによる通信
- パケット送信レート 10kbps
- $a=1000, b=0.9, c=1$
- シミュレーション時間60分
- 時間同期間隔1分
- 試行回数4回の平均で評価



シミュレーション結果: パケット到達率

- 通信本数を変化させてパケット到達率を比較した



※ HOP: メトリック無し

- LLDは既存の方式HOPよりも高い到達率が発揮できた
- 通信本数が増えると電波の干渉が増えるためリンク切れが多発し、LLDとHOPの到達率の差が低くなった

提案手法2: LMR

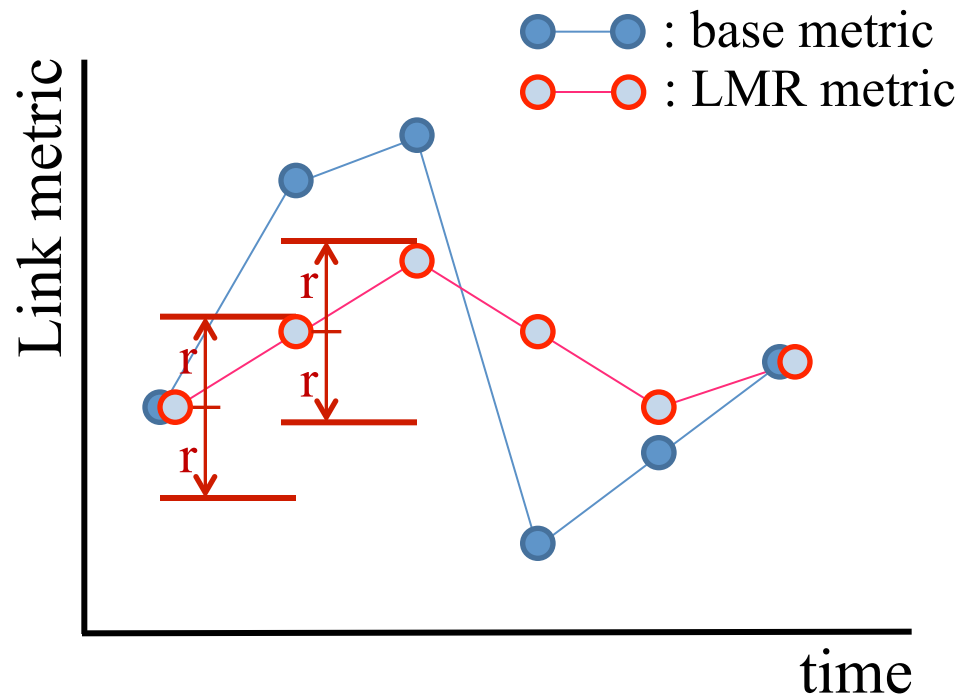
- LMR (Loop-free Metric Range)
 - 一つ前の値に対する最新メトリック値の範囲を伸張係数 $r > 1$ で制限
 - メトリックの変動を緩やかにすることで、ループを防止／削減
 - 既存のメトリック法に適用できるので、応用範囲が広い

単位時間あたりの
メトリックの変動を抑制

$$r^{-t'} m_t \leq m_{t+t'} \leq r^{t'} m_t$$

新しいメトリック

時刻 t の古いメトリック

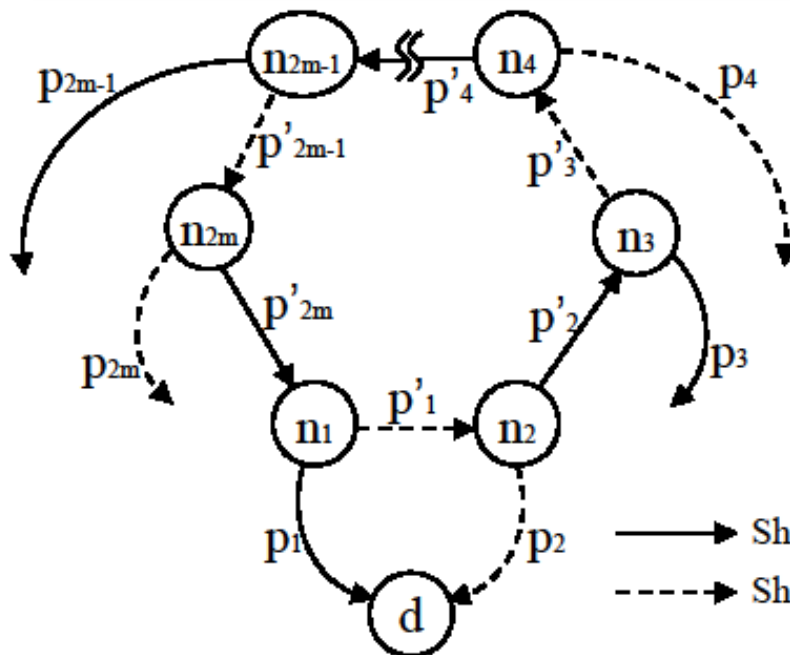


理論的結果 (LMR)

定理: リンク切断と制御メッセージの損失が生じないと仮定する。
あるループを考えたとき、そのループが生じないことを保証できる伸張係数 r の上限は次の式で与えられる

$$r \leq K^{1/w} \quad \text{where } K = \frac{\sum \text{dist}(n_k \rightarrow d)}{\sum \text{metrics in the loop}}$$

w = ホップ数を基にしたネットワークの直径



Kの最小値が、いかなるループも生じない r の値を与える

実用的な r の値

- ネットワークの直径 $w=10$,
メトリックの最小値 $M_{\min}=1$, 最大値 $M_{\max}=5$ とした場合、
ループフリーを保証できる r の値は $r=1.002$
実用するには小さすぎる



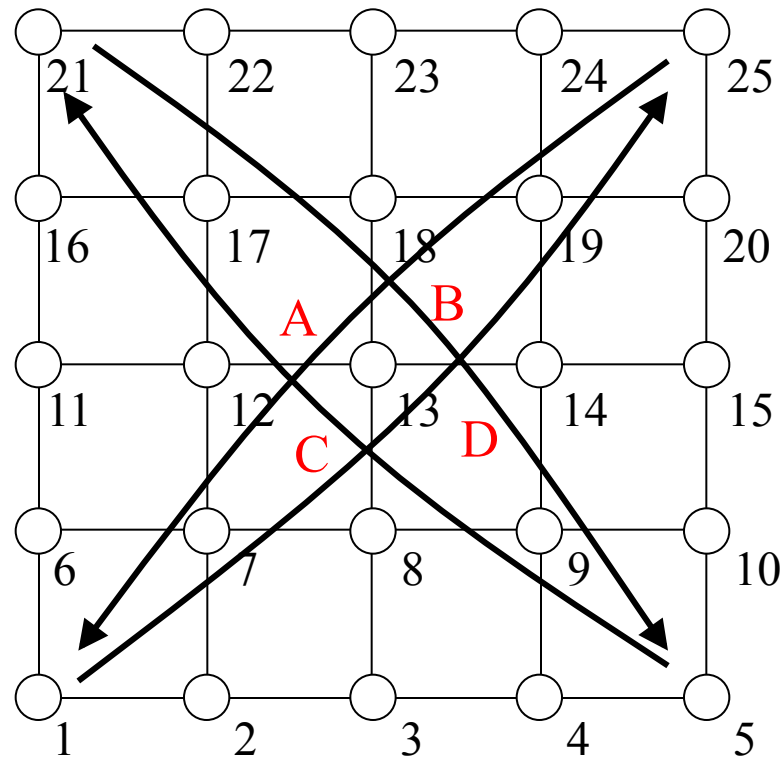
- しかし、理論的結果によると、 r が比較的大きくても、 r が小さい
ほどループが生じる可能性は低減する。



- r の値によるループ削減効果を測るためシミュレーション実験
を実施

シミュレーションシナリオ

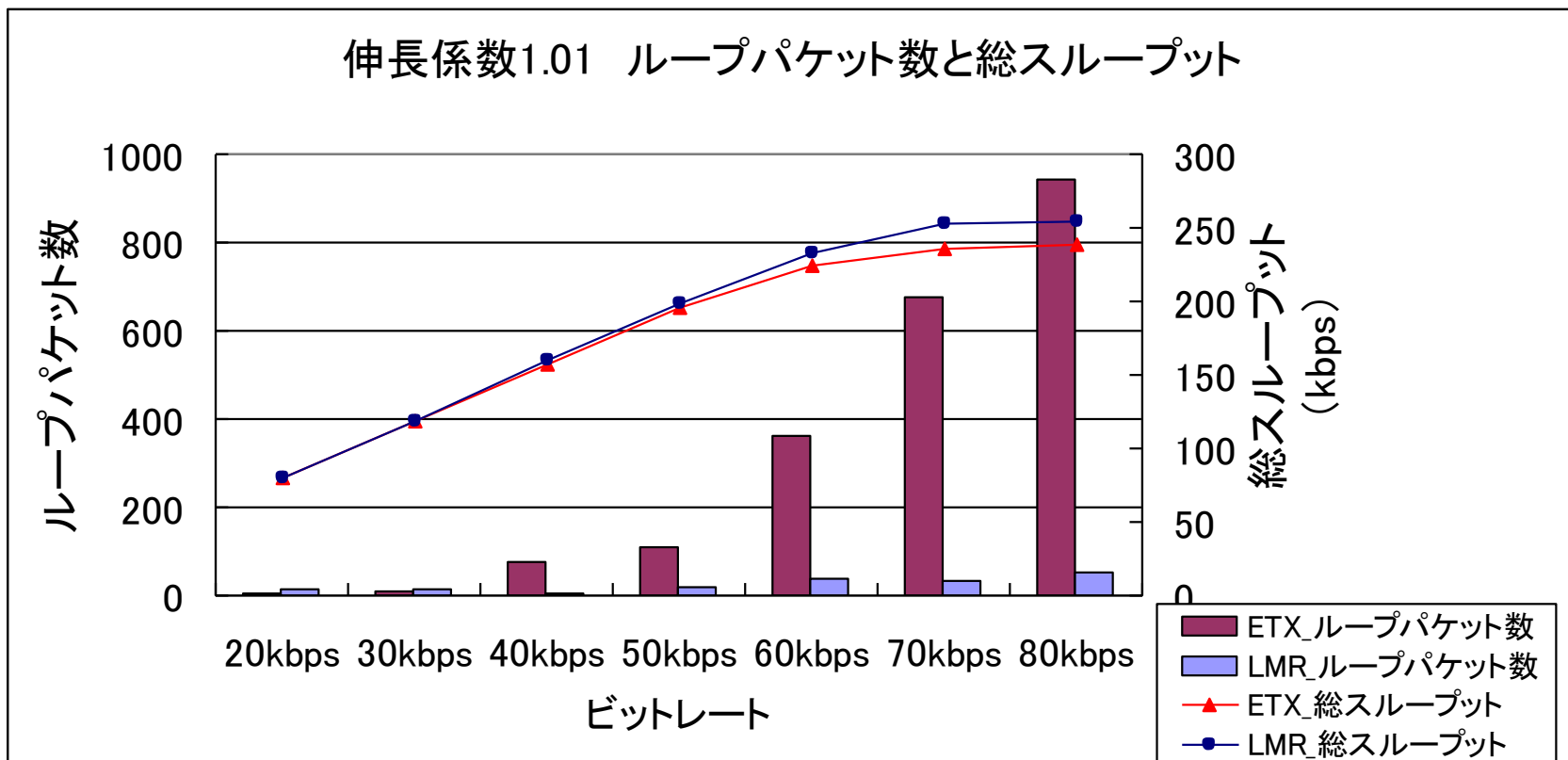
- Qualnet 4.5を用いたシミュレーション
- フィールド 1500×1500
 - 固定ノード25個を格子状に配置
 - 各ノード間300m
- リンク帯域2Mbps
- 各対角線に通信を発生
 - CBR通信:20kbps~80kbps
 - FTP通信
 - 1パケットサイズ512byte
 - 5分間の通信
- 方式
 - ETX、ETX+LMR 1.01~1.50
- 反復回数30回
- 実験結果には平均の値を使用



<u>通信A:25→1</u>	<u>通信B:21→5</u>
<u>通信C:5→21</u>	<u>通信D:1→25</u>

シミュレーション結果1: 通信レート変動

- ループパケット数と総スループットの関係

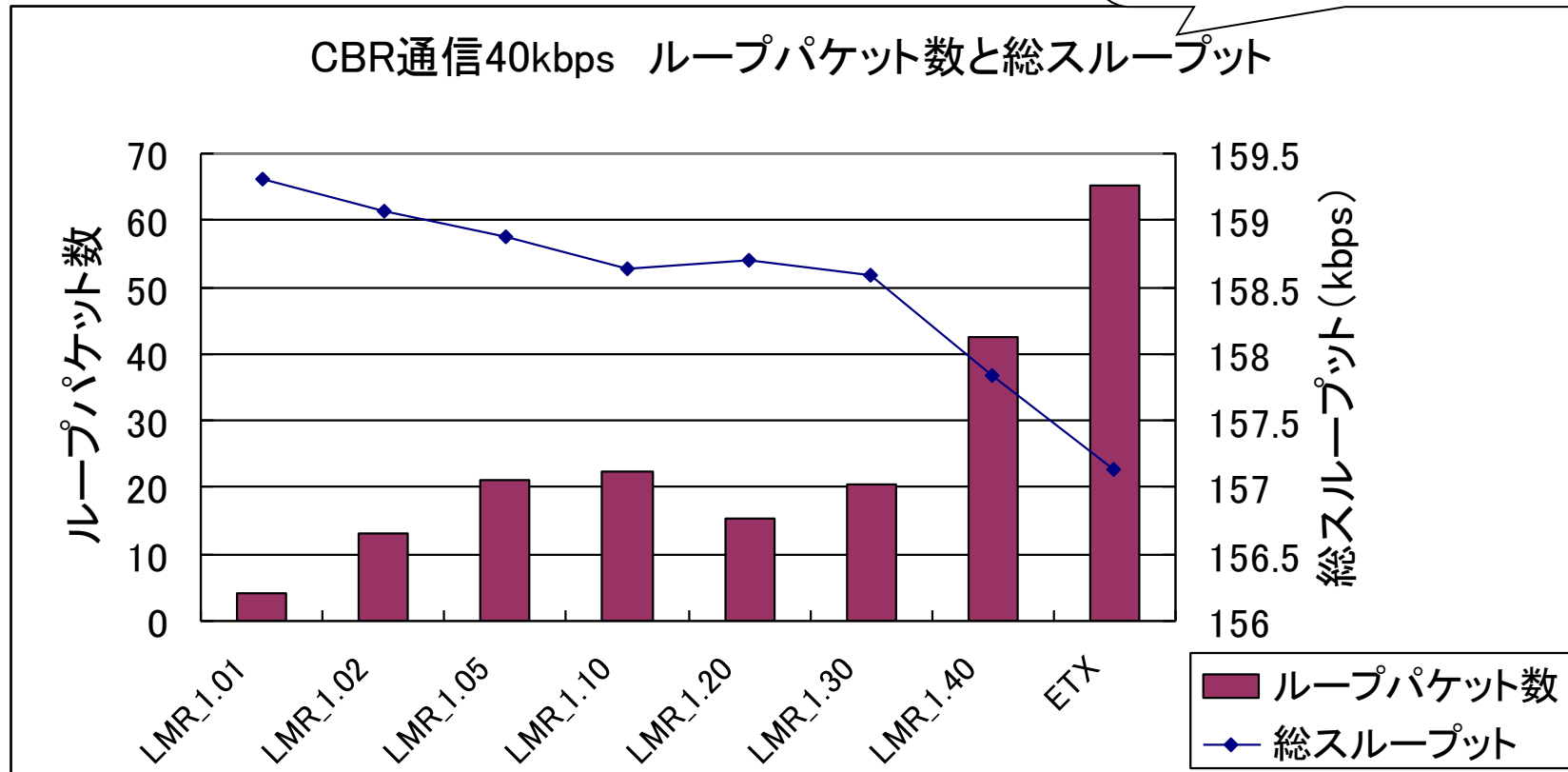


LMRはループ発生を格段に抑制し、
その結果スループットも向上

シミュレーション結果2: 伸長係数変動

- ループパケット数と総スループットの関係

伸長係数 $r=1.01$ の場合
ループパケット数はETXの
約1/15に



伸長係数 r を低くすることにより
ループを抑制し、総スループットを向上

実機端末の実装

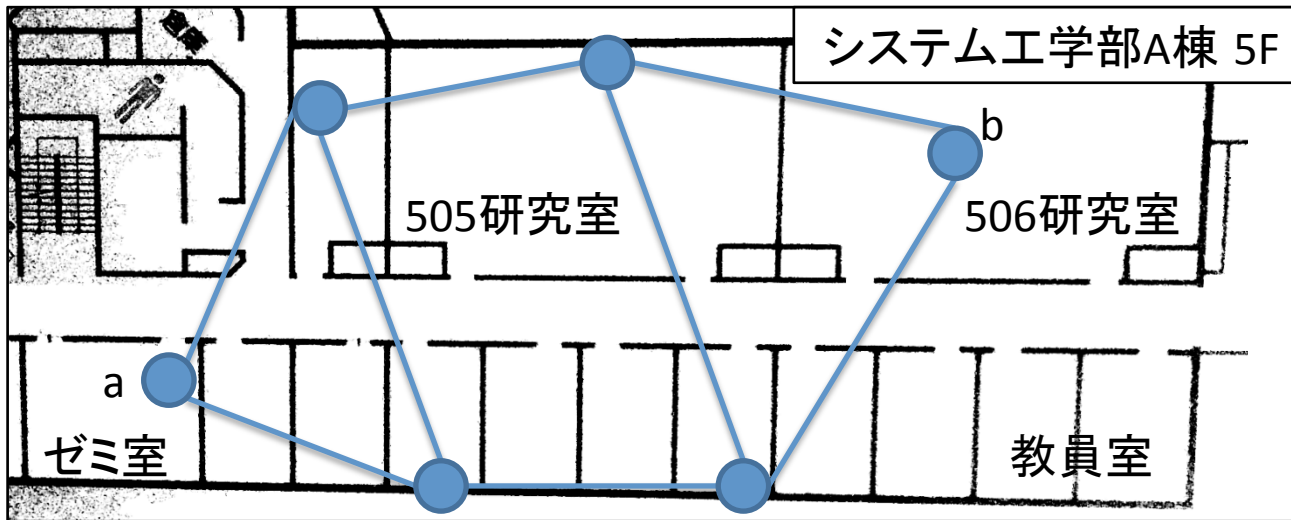
- PC: Dinabook SS RX2 SG120E/2W
- OS: ubuntu 11.04
- NIC: NEC WL300NU-AG
 - インフラストラクチャモードとアドホックモードが使用可能
 - IEEE802.11aの5Ghz帯が使用可能
- ルーティングデーモン: olsrd 0.6.1
 - リンク状態型経路制御OLSRを利用するためのデーモン
 - 0.6.1はubuntu11.04のソフトセンターに登録されているバージョン
 - 改造してLMRを追加実装



olsrdの改造

- olsrdはOLSRに基づいた経路制御デーモン
 - OLSR(Optimized Link State Routing)^[3]はリンク状態型経路制御プロトコルである
 - 動的メトリックとしてETXが実装されている
- ETXによるメトリック変動を抑制するようにLMRを実装した

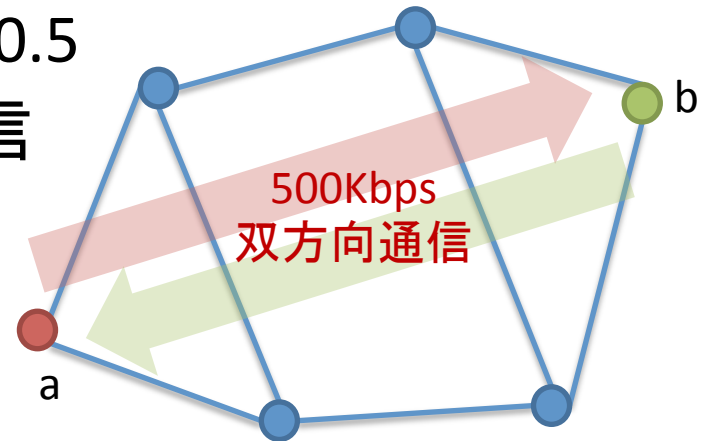
ネットワークの構築



- 和歌山大学システム工学部A棟5階に端末6台を設置
- 使用帯域: IEEE802.11aの48チャンネル(5.2Ghz帯)
 - 2.4Ghz帯は電波干渉に弱く、学内でも広く使われている
- 送信レート: 6Mbps
- 経路制御にはOLSRを使用
 - Helloパケットの連続損失10回を切断とするように設定を変更

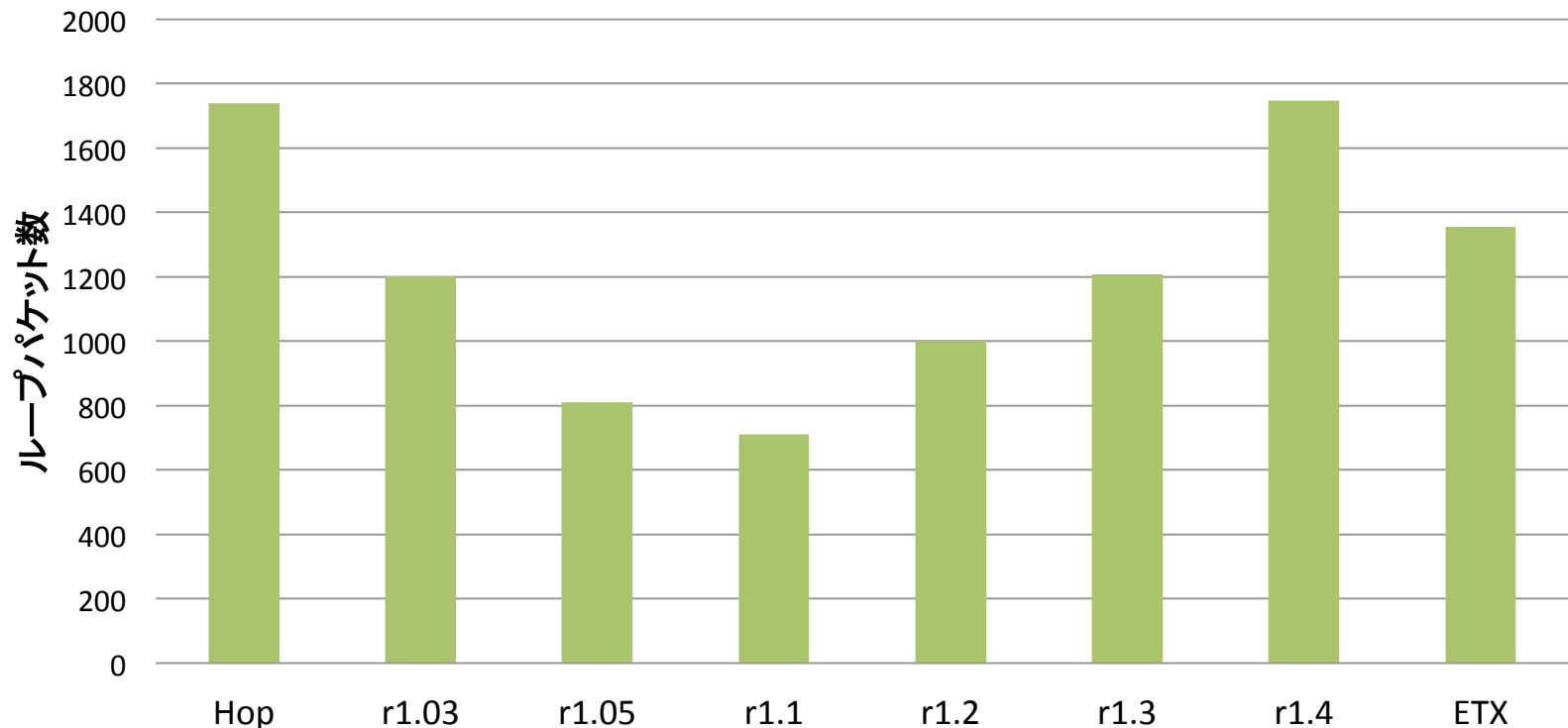
実験シナリオ

- 発生させるトラフィック
 - 送信端末、受信端末: 端末aからb、bからaの双方向
 - パケットジェネレータ: iperf 2.0.5
 - 通信の種類: 500kbps CBR通信
 - プロトコル: UDP
 - パケットサイズ: 78バイト
- 比較手法(21回ずつ実施)
 - hop数による経路制御
 - ETX
 - ETX+LMR($r=1.03, 1.05, 1.10, 1.20$)
- 各通信の間には、5分間の待機時間を設定



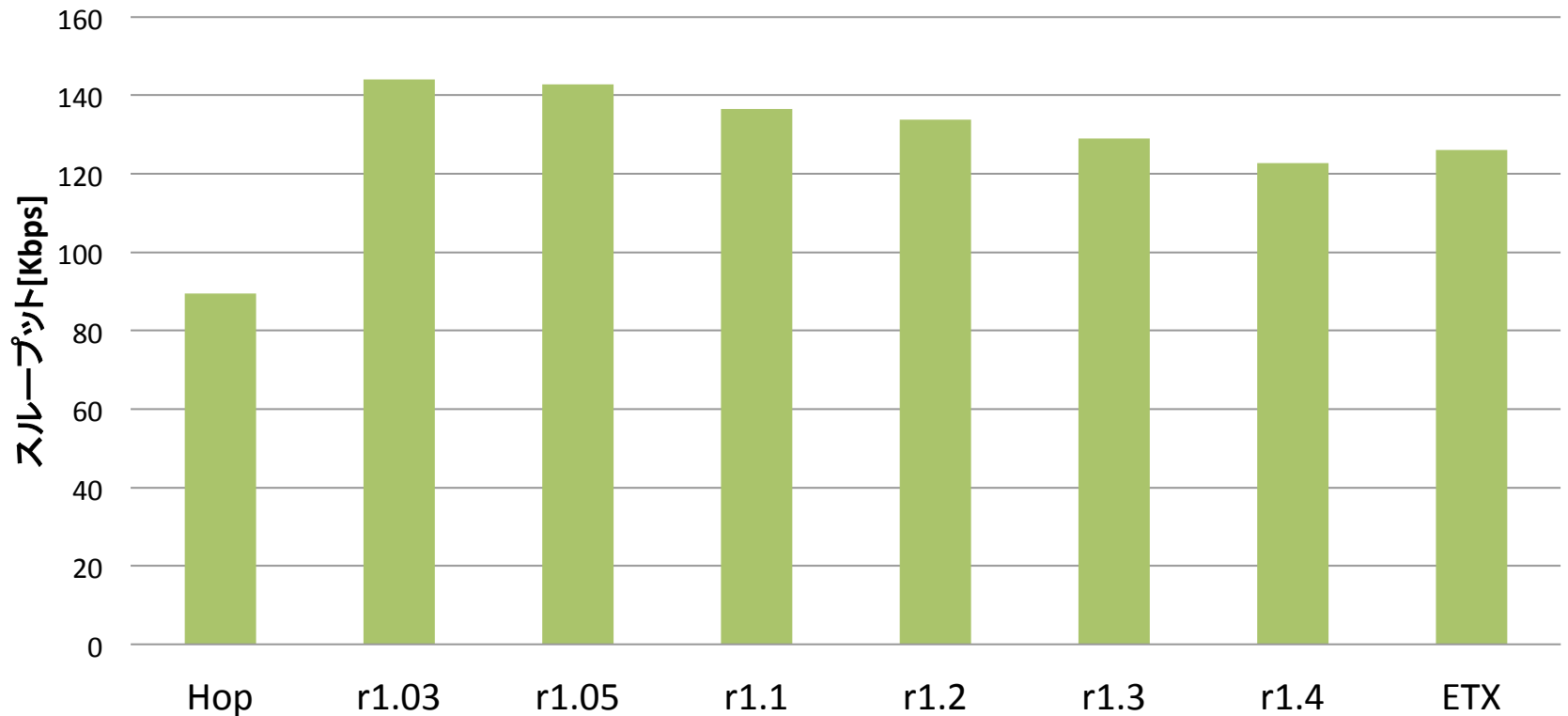
実験結果：ループパケット数

- LMRの伸張係数 r が適度な値のとき、ループパケット数が最も少なくなった



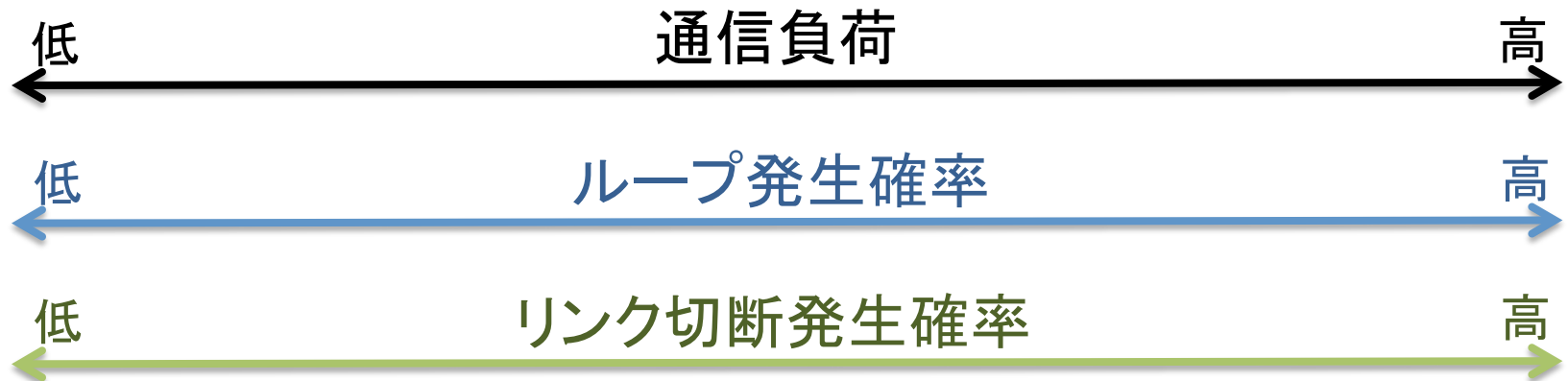
実験結果：スループット

- LMRのスループットが最も良い値を示した



考察と今後の課題

- LLD, LMRともにループ削減効果が認められる。
- しかし、通信負荷が上がると輻輳が発生し、これがリンク切断を引き起こす。
- リンク切断により経路が変更されるときにループが生じる。このループは提案手法では扱えない。
- 高負荷でもリンク切断を防げる輻輳制御手法との併用が必要



まとめ

- 成果
 - 無線メッシュネットワークにおけるループ削減手法LLD及びLMRを提案した
 - ループ防止性能に関する理論的根拠を与えた
 - シミュレーション実験及び実機実験の結果、ループ削減性能を確認した
- 今後の課題
 - 高負荷時にもリンク切断を発生させない輻輳制御手法を開発し、併用すること