

〔招待論文〕

無線 Ad-Hoc ネットワーク技術

太田 能[†]

† 徳島大学工学部
〒 770-8506 南常三島町 2-1

E-mail: †ohta@is.tokushima-u.ac.jp

あらまし 現在、IETF MANET WG においてモバイルアドホックネットワーク (MANET: Mobile Ad-hoc NETworks) に関する議論がなされている。MANET は、災害などでネットワークインフラストラクチャが利用できない状況、あるいは会議時に手軽にネットワークを構築して携帯端末を結びたい場合などのさまざまな利用形態が想定されている。近年の携帯端末の普及ならびに無線技術の進展により、MANET を実現する技術的条件は整いつつある。しかし、MANET では端末が移動するという特徴から、従来、IP ネットワークで用いられてきたようなルーティング方式をそのまま適用できない。本講演では、MANET の特徴とこれにより必要とされる機能、MANET の評価の際に考慮すべき事項と考えられる性能評価尺度、代表的なルーティングプロトコル (DSDV, CGSR, AODV, DSR, TORA, ABR, ZRP) および MANET における課題について解説する。

キーワード アドホックネットワーク、MANET、ルーティング

Wireless Ad-Hoc Network Technologies

Chikara OHTA[†]

† Faculty of Engineering, University fo Tokushima
Minamijosanjima-cho 2-1, Tokushima, Tokushima, 770-8506 Japan

E-mail: †ohta@is.tokushima-u.ac.jp

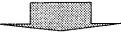
Abstract MANET (Mobile Ad-hoc NETworks) has been discussed in IETF MANET WG. MANET is assumed to be used in various situations, say a case where rescue networks are needed in disaster or a case when mobile terminals should be connected each other with ease in a conference. Recently, MANET is being realized as mobile terminals become into wide use and wireless technologies have been developed. Existing routing methods for IP networks, however, is not applicable to MANET straightforward due to mobility of terminals. In this presentation, I will explain the characteristics and its requirements of MANET, performance issues, typical routing protocols (DSDV, CGSR, AODV, DSR, TORA, ABR, ZRP), and problems.

Key words Ad-hoc network, MANET, routing

THE UNIVERSITY OF TOKUSHIMA

背景

- 軍事利用としての検討
- 小型化技術による携帯端末出現
- 無線技術の進展



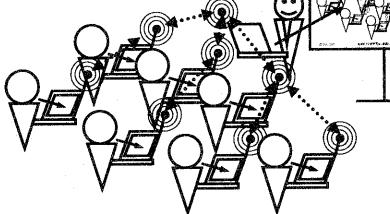
- Mobile Ad-hoc NETworks (MANET)
 - 手軽につないで情報共有したい
 - インフラのないところでもネットワークを構築したい

IEICE CS/IE研究会: 無線Ad-Hoc ネットワーク技術

THE UNIVERSITY OF TOKUSHIMA

MANET利用イメージ

- 会議におけるスライド共有



MANET利用イメージ
会議におけるスライド共有

IEICE CS/IE研究会: 無線Ad-Hoc ネットワーク技術

THE UNIVERSITY OF TOKUSHIMA

MANETのアプリケーション

- 会議、ミーティング
- 災害時ネットワーク
- パーソナルアリアネットワーク(PAN)
- ユビキタスネットワーク
- センサー ネットワーク
- 車々間通信
- 軍事ネットワーク
- 警察ネットワーク、など

IEICE CS/IE研究会: 無線Ad-Hoc ネットワーク技術

THE UNIVERSITY OF TOKUSHIMA

IETF MANET WG

- MANETに関する検討
 - mobile wireless ドメインを想定
 - peer-to-peer mobile routing の開発
 - RFC2501 (Jan. 1999)
 - MANETの目的、性能評価項目など
 - Internet-drafts
 - 現時点で12方式(AODV, TORA, ZRP, etc.)を検討

IEICE CS/IE研究会: 無線Ad-Hoc ネットワーク技術

THE UNIVERSITY OF TOKUSHIMA

MANETの特徴(1/3)

- ノードは無線インターフェースとルータ機能を有する
 - パケットフォワーディング機能
 - 固定網へのゲートウェイ機能
- トポロジが動的に変化する
 - ノードの移動、電波伝搬状況の変化
 - リンクは双方向あるいは単方向



ノイズ源
非対称リンク

IEICE CS/IE研究会: 無線Ad-Hoc ネットワーク技術

THE UNIVERSITY OF TOKUSHIMA

MANETの特徴(2/3)

- 無線リンク速度が小さく、容量が変化する
 - 有線網に比べて小
 - フェージング、ノイズ、干渉の影響
- バッテリ容量による制約がある
 - 多くの携帯端末はバッテリで動作
 - システム設計の指標のひとつ
- 物理的セキュリティが脆弱
 - 盗聴、なりすまし、DoS攻撃にさらされやすい
- スケーラビリティが要求される
 - 戰軍利用では数十から数百のノードを想定

IEICE CS/IE研究会: 無線Ad-Hoc ネットワーク技術

MANETの特徴(3/3)

- ノードの移動によるトポロジ変化の様子

IEICE CS/IE研究会: 無線Ad-Hoc ネットワーク技術

MANET WG の目標(1/2)

- 短期目標
 - 1つ(以上)のユニキャストルーティングの標準化
 - ネットワーク層サポート技術
 - 幅広いネットワーク環境のもとでの効率よく動作
 - IPサービスのサポート
 - トポロジ変化やトラヒック変化に対して効率よく対応
 - セキュリティ

IEICE CS/IE研究会: 無線Ad-Hoc ネットワーク技術

MANET WG の目標(2/2)

- 長期目標
 - 短期目標で定めたルーティング上に機能追加
 - マルチキャスト対応
 - QoS サポート

IEICE CS/IE研究会: 無線Ad-Hoc ネットワーク技術

L3ルーティング vs. L2ルーティング

- IP層(L3)ルーティング
 - IPアドレスベースで経路探索
 - 異なるリンク層をもつアドホック網を実現
 - 隣接ノードのIP/物理アドレスペアがわかれればよい
- リンク層ルーティング
 - 物理アドレスベースで経路探索
 - ARPのための網全体にブロードキャストが必要
- IETF MANET WG ではL3ルーティングを想定

IEICE CS/IE研究会: 無線Ad-Hoc ネットワーク技術

既存IP網との相互接続

- MANETはスタブ(stub)ネットワークとして機能
 - トランジットネットワークとしての機能は未想定
 - manet-based anycast + mobile IPによる解

IEICE CS/IE研究会: 無線Ad-Hoc ネットワーク技術

ルーティングへの要求機能(1/2)

- 分散オペレーション
- ループフリーダム
 - TTLの設定以外のアプローチも必要
- デマンド型オペレーション
 - トラヒックパターンに応じた対応
 - バッテリや帯域の有効利用
- プロアクティブ型オペレーション
 - (問題となる場合に)パス発見遅延を最小化
 - オンデマンド型と逆の要求条件

IEICE CS/IE研究会: 無線Ad-Hoc ネットワーク技術

ルーティングへの要求機能(2/2)

- セキュリティ機能
 - 盗聴, パケット改ざん, 複製, リダイレクト容易
 - ネットワーク層・リンク層レベルで対策必要
- スリープ期間オペレーション
 - 可能な場合, 送受信を止め, バッテリ消費を削減
 - リンク層との協調必要
- 単方向リンクサポート
 - ノイズ源の位置により単方向リンクが発生しうる
 - 単方向リンク対応が望ましい

IEICE CS/IE研究会: 無線Ad-Hoc ネットワーク技術

評価環境

- ネットワークサイズ(ノード数)
- ネットワーク接続度(隣接ノード数)
- トポロジ変化速度
- リンク容量(実効リンク速度)
- 単方向リンクの割合
- 移動性(時間的, 空間的トポロジ関相)
- ノード特性(トラヒックモデル, バッテリ容量など)

IEICE CS/IE研究会: 無線Ad-Hoc ネットワーク技術

性能評価尺度(1/3)

- エンド・ツー・エンド スループット／遅延
 - 平均, 分散, 分布などの統計量
- ルート獲得遅延
 - オンデマンド型はプロアクティブ型に比べ大
- パケット到着順序入替率
 - TCPパフォーマンスに影響

IEICE CS/IE研究会: 無線Ad-Hoc ネットワーク技術

性能評価尺度(2/3)

- 効率
 - 制御トラヒックのオーバヘッドの大小
 - 送信データビット量／配信データビット量
 - 平均ホップ数
 - 送信制御データビット量／配信データビット量
 - プロトコル効率
 - 送信(制御+データ)パケット数／データパケット数
 - チャネルアクセス効率

IEICE CS/IE研究会: 無線Ad-Hoc ネットワーク技術

性能評価尺度(3/3)

- サバイバビリティ
 - ノード生存時間
 - ノード生存率
 - ネットワーク完全連結時間
- プロトコル収束速度
 - リンク切断時の復旧時間(TCPパフォーマンスに影響)

IEICE CS/IE研究会: 無線Ad-Hoc ネットワーク技術

ルーティングプロトコルの種類

- Proactive 型(テーブル駆動型)
 - 分散 Bellman-Ford アルゴリズム
 - ex. DSDV, CGSR, WRPなど
- Reactive 型(オンデマンド型)
 - Request/Reply 型/パス探索
 - ex. AODV, DSR, TORA, ABR, SSRなど
- コンビネーション型
 - テーブル駆動型+オンデマンド型
 - ex. ZRP

IEICE CS/IE研究会: 無線Ad-Hoc ネットワーク技術

DSDV(1/2)

- Destination Sequence Distance Vector
- 特徴
 - 分散 Bellman-Ford ベース
 - ホップカウント以外のメトリックにも適用可能
 - 目的局シーケンス番号によるループ除去
 - 情報の新しさを経路情報に埋め込む
 - Incremental update により制御トラフィック削減
 - full dump により全経路情報を通知
 - full dump 以降の変更情報のみを incremental update
 - スケーラビリティが低い
 - Fisheye方式による制御情報削減のアプローチあり

IEICE CS/IE研究会: 無線Ad-Hoc ネットワーク技術

DSDV(2/2)

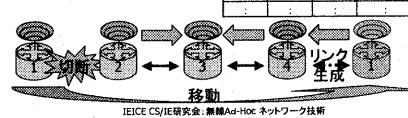
■ 受信局シーケンス番号付経路情報

- 自ノードはシーケンス番号を2インクリメント
- リンク切断を認識すると隣接ノードのシーケンス番号を1インクリメント

ノード3のフォワーディングテーブル

目的局	次ホップ	メトリック	シーケンス番号
1	2	2	2
2	1	1	4
3	-	0	6
4	1	1	4

他に Install time, Stable エイリあり

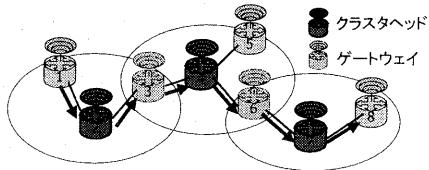


IEICE CS/IE研究会: 無線Ad-Hoc ネットワーク技術

Cluster Based Networks(1/3)

■ CGSR(Cluster Gateway Switch Routing)

- DSDVベース
 - クラスタメンバーテーブル: 目的クラスタヘッドの決定に利用
 - ルーティングテーブル: 次ホップの決定に利用



IEICE CS/IE研究会: 無線Ad-Hoc ネットワーク技術

Cluster Based Networks(2/3)

■ CGSR(続き)

- Least Cluster Change (LLC)
 - クラスタリングアルゴリズム
 - 2つのクラスタヘッド接近時
 - ノードが全クラスタヘッドの通信範囲外に出たとき
 - クラスタヘッドの変更頻度を低減

IEICE CS/IE研究会: 無線Ad-Hoc ネットワーク技術

Cluster Based Networks(3/3)

- 特徴
 - クラスタ構造、構成方法は使用目的に依存
 - クラスタ化による経路制御情報を削減
 - クラスタ構成、クラスタヘッド変更のオーバヘッド大
 - MAC層におけるクラスタ化の利点
 - クラスタ間での拡散符号分割
 - ポーリングによる帯域割当制御など

IEICE CS/IE研究会: 無線Ad-Hoc ネットワーク技術

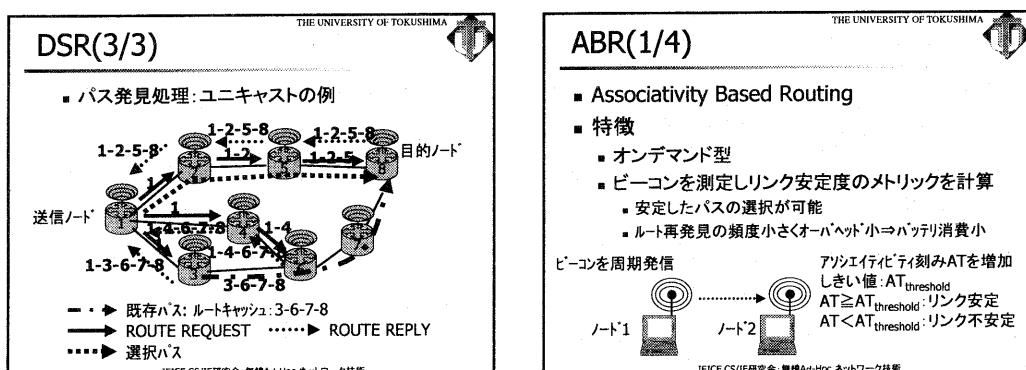
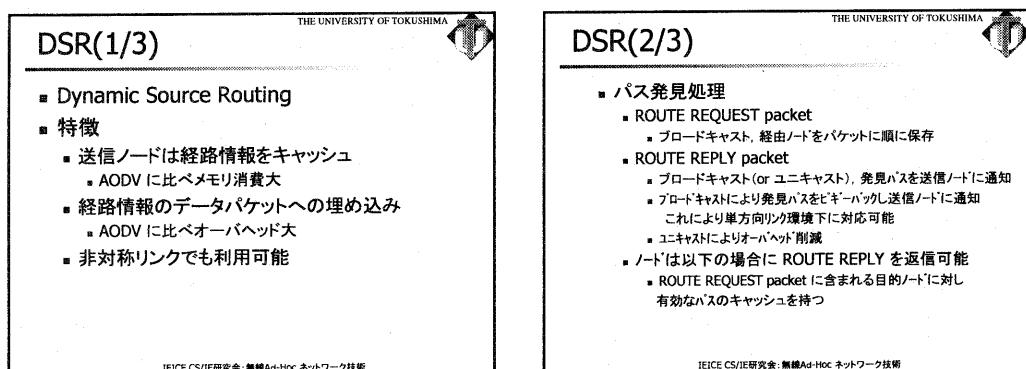
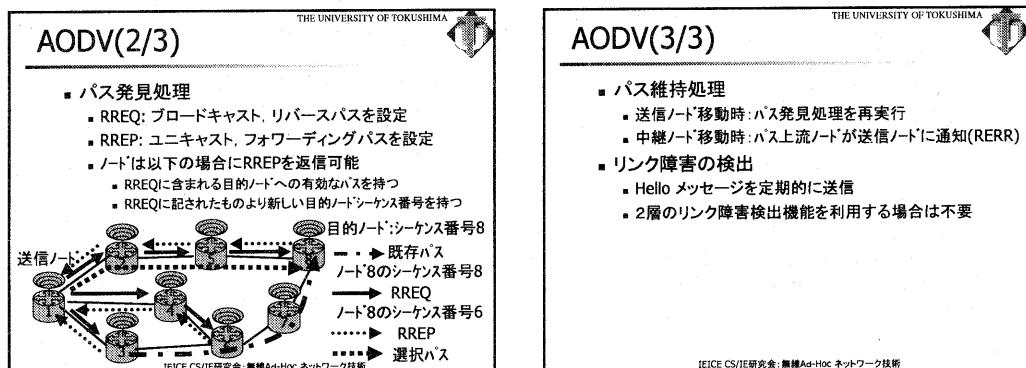
AODV(1/3)

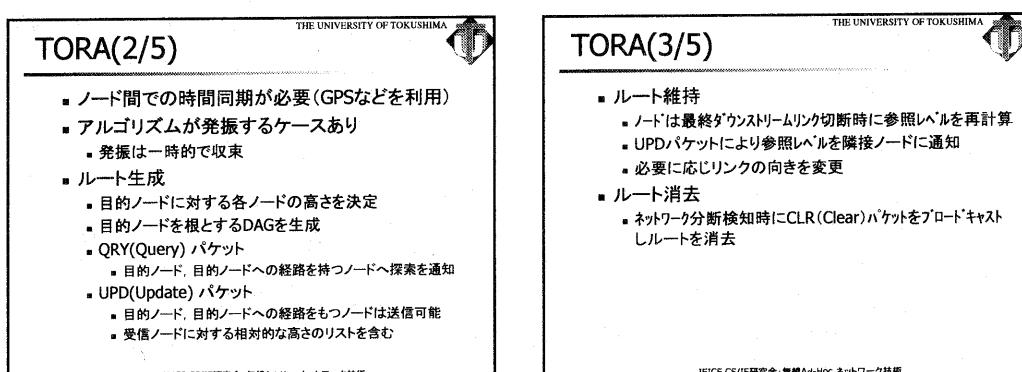
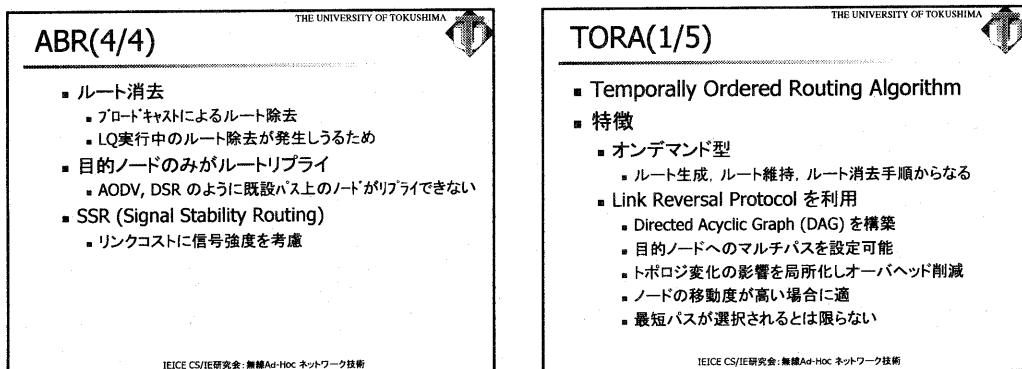
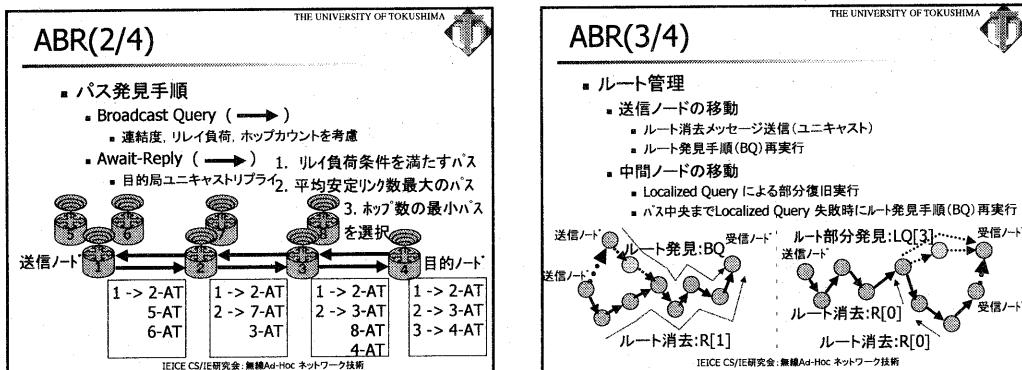
■ Ad-hoc On-demand Distance Vector

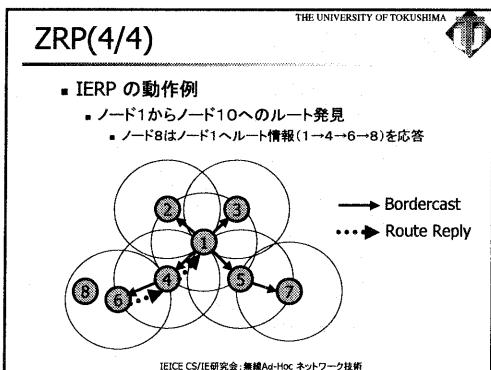
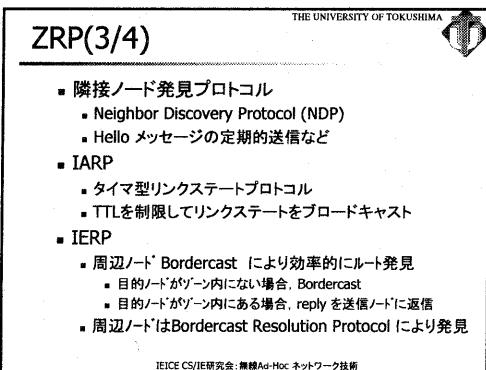
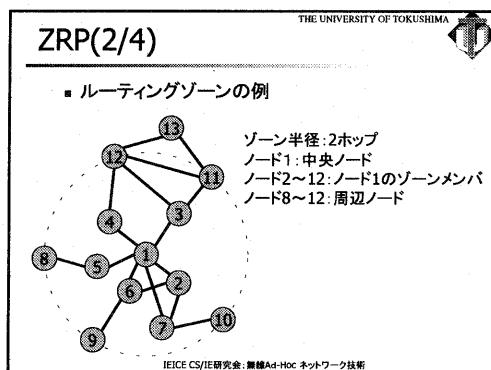
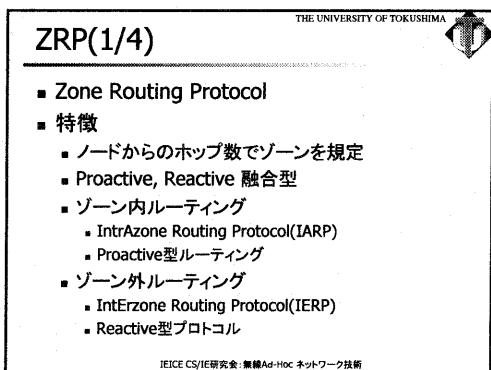
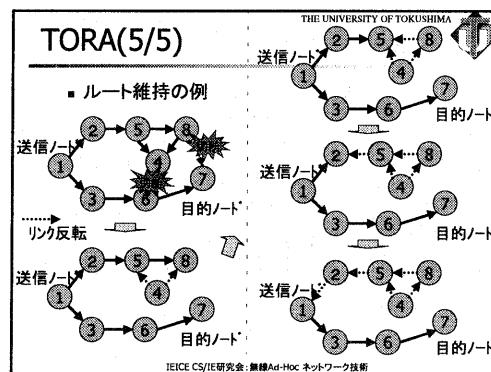
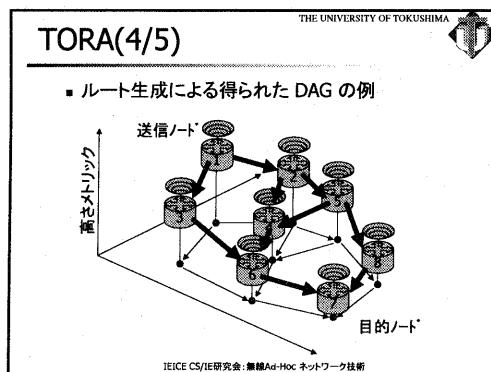
■ 特徴

- オンデマンド型
 - Route Request / Route Reply
- パス上のノードのみがルーティング情報を管理
 - メモリ消費削減
- パスの新旧を目的局シーケンス番号により識別
 - ループ除去
- 双向リンクを仮定
- マルチキャストサポート

IEICE CS/IE研究会: 無線Ad-Hoc ネットワーク技術







<h2>課題</h2> <ul style="list-style-type: none"> ■ スケーラビリティ ■ QoS保証 ■ サービス発見 ■ セキュリティ ■ インターネットとの接続性 ■ パワー制御 ■ MAC層 	<h2>スケーラビリティ</h2> <ul style="list-style-type: none"> ■ ノード移動により <ul style="list-style-type: none"> ■ アドレスアグリゲーション困難⇒クラスタ, ゾーン ■ 制御メッセージのオーバヘッド大 ■ 制御メッセージ量の比較には移動度, 規模を考慮
--	--

THE UNIVERSITY OF TOKUSHIMA

THE UNIVERSITY OF TOKUSHIMA

IEICE CS/IE研究会: 無線Ad-Hoc ネットワーク技術

IEICE CS/IE研究会: 無線Ad-Hoc ネットワーク技術

<h2>QoS保証</h2> <ul style="list-style-type: none"> ■ テーブル駆動型 <ul style="list-style-type: none"> ■ リンクステート型 ■ FallbackなどのQoSルーティングを適用可能 ■ オンデマンド型 <ul style="list-style-type: none"> ■ パス発見時にQoS要求条件を付加 ■ パスの維持にはICMPを利用 <ul style="list-style-type: none"> ■ ICMP QOS_LOSTメッセージにより送/受信端末に通知 	<h2>サービス発見</h2> <ul style="list-style-type: none"> ■ Client/Serverパラダイム(⇒P2Pパラダイム?) ■ ルート発見とサービス発見を統合 <ul style="list-style-type: none"> ■ サーバのanycastによるアドレスシング ■ 4層以上の機能が3層に混入 ■ セキュリティ <ul style="list-style-type: none"> ■ 鍵配信サーバ, 認証サーバ(Client/Serverパラダイム)
--	--

THE UNIVERSITY OF TOKUSHIMA

THE UNIVERSITY OF TOKUSHIMA

IEICE CS/IE研究会: 無線Ad-Hoc ネットワーク技術

IEICE CS/IE研究会: 無線Ad-Hoc ネットワーク技術

<h2>パワーコントロール</h2> <ul style="list-style-type: none"> ■ バッテリ消費の削減 <ul style="list-style-type: none"> ■ サバイバビリティの向上 ■ 送信電力コントロール <ul style="list-style-type: none"> ■ RFパワーとパケット再送のトレードオフ ■ 経路制御(3層)への影響 ■ MAC層におけるスリープモードの導入 <ul style="list-style-type: none"> ■ MACAベース:PAMAS ■ TDMAベース:IEEE802.11(シングルホップ) ■ 消費電力に関する実験的調査 <ul style="list-style-type: none"> ■ 対象: WaveLAN 	<h2>MAC層(1/2)</h2> <ul style="list-style-type: none"> ■ 低リンク品質 <ul style="list-style-type: none"> ■ TCPパフォーマンスへの影響 ■ 隠れ端末・さらし端末問題 <ul style="list-style-type: none"> ■ IEEE802.11 <ul style="list-style-type: none"> ■ RTS/CTS/DATA/ACK ■ 隠れ端末問題解決, さらし端末未解決 ■ DBTMA <ul style="list-style-type: none"> ■ ビジートーンによる隣接ノード送信抑制 ■ 隠れ端末問題, さらし端末問題解決 ■ リンクレベルでのACKはなし
--	---

THE UNIVERSITY OF TOKUSHIMA

THE UNIVERSITY OF TOKUSHIMA

IEICE CS/IE研究会: 無線Ad-Hoc ネットワーク技術

IEICE CS/IE研究会: 無線Ad-Hoc ネットワーク技術

MAC層(2/2)

- MAC with ACK or without ACK
 - リンク層レベルのACKの有効性
 - TCPパフォーマンスとの関係
- TCP Performance
 - 低リンク品質
 - リンク層レベルのACKの有無
 - 移動度とリンク復旧との関係
 - IEEE802.11 Ad-Hoc モードにおける性能評価
 - RTSの連続失敗によるリンク切断

IEICE CS/IE研究会:無線Ad-Hoc ネットワーク技術

References(1/4)

1. J. Broch, et al., "A Performance Comparison of Multi-Hop Wireless Ad Hoc Network Routing Protocols," ACM/IEEE Mobicom'98, pp.85-97, 1998. (DSDV, TORA, DSR, AODV の定量的比較:ノード数小(30)でDSR有利)
2. S. Chen, et al., "Distributed Quality-of-Service Routing in Ad Hoc Networks," IEEE JSAC, vol.17, no.8, pp.1488-1505, Aug. 1999. (QoS ルーティング)
3. C. -C. Chang, et al., "Routing in Clustered Multipath, Mobile Wireless Networks with Fading Channel," Proc. of IEEE Singapore International Conference on Networks, pp.197-211, 1997. (CSRの文献)
4. S. Corson, et al., "Mobile Ad hoc Networking (MANET): Routing Protocol Performance Issues and Evaluation Considerations," IETF RFC2501 1999. (現時点でのMANET唯一のRFC)
5. J. Deng, et al., "Dual Busy Tone Multiple Access (DBTMA): A New Medium Access Control for Packet Radio Networks," IEEE ICUPC'98, pp.973-977, 1998. (DBTMAの文献)

IEICE CS/IE研究会:無線Ad-Hoc ネットワーク技術

References(2/4)

6. R. Dube, et al., "Signal Stability based Adaptive Routing (SSA) for Ad-Hoc Mobile Networks," IEEE Personal Communications, pp.36-45, Feb. 1997. (SSRの文献)
7. J. -P. Ebert, et al., "Power Saving in Wireless LANs: Analyzing the RF Transmission Power and MAC Retransmission Trade-Off," Proc. of European Wireless'99, 1999. (再送とRFパワーのトレードオフ評価)
8. Z. J. Haas, et al., "The Performance of Query Control Schemes for the Zone Routing Protocol," IEEE/ACM Trans. on Networking, vol.9, no.4, pp.427-438, Aug. 2001. (ZRP のパラメータ性能評価)
9. IETF Mobile Ad-hoc Networks WG,
<http://www.ietf.org/html.charters/manet-charter.html>
10. A. Iwata, et al., "Scalable Routing Strategies for Ad Hoc Wireless Networks," IEEE JSAC, vol.17, no.18, pp.1369-1379, Aug. 1999. (クラスター型ルーティングとFisheyeルーティング)
11. Y. Ko et al., "Location-Aided Routing in Mobile Ad Hoc Networks," Proc. of MOBICOM'98, pp.66-75, 1998. (ロケーションエイド)

IEICE CS/IE研究会:無線Ad-Hoc ネットワーク技術

References(3/4)

12. S.-J. Lee, et al., "A Simulation Study of Table-Driven and On-Demand Routing Protocols for Mobile Ad Hoc Networks," IEEE Network, pp.48-54, Jul./Aug. 1999. (テーブル駆動型(DBF)とオンデマンド型(DSR, ABR)の比較:ノード数小(30))
13. D. A. Maltz, et al., "The Effect of On-Demand Behavior in Routing Protocol for Multihop Wireless Ad Hoc Networks," IEEE JSAC, vol.17, no.8, Aug. 1999. (DSRのシミュレーション評価)
14. V. D. Park, et al., "A Highly Adaptive Distributed Routing Algorithm for Mobile Wireless Networks," IEEE INFOCOM'97, pp.1405-1413, 1997. (TORAの文献)
15. C. E. Perkins, et al., "Highly Dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector Routing (DSDV) for Mobile Computers," ACM SIGCOMM'94, Computer Communication Review, vol.24, no.4, pp.234-244, Oct. 1994. (DSDVの文献)
16. C. Roehl, et al., "A Short Look on Power Saving Mechanisms in the Wireless LAN Standard IEEE 802.11," Adv. in Wireless Commun., pp.219-226, Kluwer Academic Publishers, 1998. (802.11の文献)

IEICE CS/IE研究会:無線Ad-Hoc ネットワーク技術

References(4/4)

17. E. M. Royer et al., "A Review of Current Routing Protocols for Ad Hoc Mobile Wireless Networks," IEEE Personal Communications, vol.6, no.2, pp.46-55, April 1999. (DSDV, CGSR, WRP, AODV, DSR, TORA, ABR, SSR の定性的な比較)
18. S. Singh, et al., "PAMAS - Power Aware Multi-Access Protocol with Signalling for Ad Hoc Networks," ACM Computer Communication Review, vol.28, no.3, pp.5-26, July 1998. (MACAベースのパワーセーブ可能なMAC)
19. S. Singh, et al., "Power-Aware Routing in Mobile Ad Hoc Networks," Proc. in MOBICOM'98, pp.181-190, 1998. (パワーセーブのためのメトリックの提案)
20. R. Sivakumar, et al., "CEDAR: a Cost Extraction Distributed Ad Hoc Routing Algorithm," IEEE JSAC, vol.17, no.8, pp.1454-1465, 1999. (バックボーン型ルーティング)
21. C. -K. Toh, "Maximum Battery Life Routing to Support Ubiquitous Mobile Computing in Wireless Ad Hoc Networks," IEEE Commun. Mag., pp.138-147, June 2001. (バッテリーメトリックを考慮したルーティングの比較)

IEICE CS/IE研究会:無線Ad-Hoc ネットワーク技術