

位置情報に基づきマルチパスフェージングを考慮した 移動体向けアドホックルーティングプロトコルの特性評価

渡辺 正浩[†] 湯 素華[†] 小花 貞夫[†]

移動端末を有する環境では、電波伝搬状況やトポロジの変化によりマルチホップ通信のルートが不安定となり、パケット到達率等の通信性能が低下してしまう。また、ITS 車車間通信では、路面反射によるマルチパスの影響により受信信号強度がパースト的に低下する。そこで、GPS からの位置情報を利用して、端末間距離に応じたメトリックをトポロジに反映するルーティングプロトコルをベースに、電波伝搬状況を監視してマルチパスの発生する距離範囲ではイベント的にメトリック値を変化させてルートを変更させる方法により、ルートを不安定や急変させることなく安定に切り替えながらパケット到達率を向上させる方法を提案する。本論文では、計算機シミュレーションにより、1 台の移動端末が 10 台の静止端末を通過していく場合に、End to End のマルチホップ通信特性で、従来方式と比較してパケット到達率を平均で 64% から 75% 以上に向上させることができることを示す。

Investigation of Mobile Ad Hoc Routing with Its Topology Due to GPS Information under Multipath Fading

MASAHIRO WATANABE,[†] SUHUA TANG[†] and SADA O OBANA[†]

Mobility makes route time-variant and multipath fading makes RSSI (Received Signal Strength Indicator) burst degradation in such as ITS inter-vehicle communication. We propose ad hoc routing protocol with its topology reflected upon metric via node's distance due to GPS (Global Positioning System) information to make route more stable and to avoid the relay node under multipath fading at the distance. In this paper, we compare the techniques to associate the information between position and multipath fading distance with conventional routing protocol, and show simulation results improve the average end to end packets delivery ratio about 64% to 75% ahead with one mobile node passed away besides 10-node's situated stationary on the line.

1. はじめに

近年、携帯電話や無線 LAN カードおよび PC (ノート型コンピュータ) は低価格化が進み、一般家庭の多くの人たちが所有するようになった。また、ホットスポットから WiMAX のような比較的広いエリアまでをカバーするサービスが提供され始めたことにより、無線 LAN の AP (アクセスポイント) カバーエリアが拡大している。元々、伝送速度では無線 LAN が圧倒的に携帯電話よりも優れているので、大規模なメディアのダウンロードを短時間で行うことが可能である等、無線ネットワークの利用が急速に進んでいる。また、IEEE802.11 が規定する無線 LAN の機能のうち、インフラに依存しないアドホックネットワークについて

は、災害発生時の被災地との通信に並んで、ITS (高度道路交通システム) の車車間通信への応用¹⁾ が期待されている。ここでの通信サービスでは、通信したい相手まで中継端末を介して接続するマルチホップ通信が必要不可欠となる。マルチホップ通信では、最適な中継端末を選択するルーティングの機能が重要である。IETF (Internet Engineering Task Force) の標準化組織では、MANET (Mobile Ad-Hoc Network) ワーキンググループにおいて、移動端末で自律的に構成されるネットワークを実現するルーティングプロトコルについて議論がなされている。ここでのネットワークでは、端末が頻繁に移動することにより、端末間のリンクが繋がったり切れたりを繰り返すことを想定している。このように、ノードの移動特性、ノードの数や密集の度合い等、環境の違いについても検討されている^{2)~4)}。そして、実際の移動体におけるルーティングを用いたマルチホップ通信においては、端末の移動

[†] 株式会社国際電気通信基礎技術研究所 (ATR) 適応コミュニケーション研究所

ATR Adaptive Communication Research Laboratories

だけでなく、フェージングやマルチパスによる電波伝搬の変動によりルートの切替わりが頻繁に起きる。また、MANET によるルーティングでは最短経路（最小ホップ数）が選択されるために、受信信号強度が低くてリンクの弱い電波伝搬経路が選ばれるとリンクが切断されやすくなる。したがって、移動中において、中継端末を適切なタイミングや安定に切り替えることが難しく、通信性能としてパケット到達率が低下してしまう。

本論文では、このような移動体におけるルーティングの問題を改善するために、受信信号強度を考慮した方式と、GPS (Global Positioning System) からの位置情報を用いた方式について、屋外での基礎実験を行った結果から、両者を組み合わせた方式を提案し、シミュレーションの結果、提案方式によってルートを安定に切り替えることにより通信特性を向上させることができることを示す。

2. 関連研究との関係

位置情報がアドホックネットワークに利用されることにより、従来の MANET による方式よりも効率的に情報の配信や共有の可能性が考えられる。文献 5) の LAR では、送信元端末が送信先端末へのルートを築けていない場合、送信先端末の今までの位置と速度に基づいて現在の位置を予測し、RREQ 信号のフラッディングゾーンを算出し、このゾーン内でのみ RREQ 信号をフラッディングしてネットワーク全体へのフラッディングを避けるようにしている。位置情報を利用することにより、オンデマンドプロトコルのルート探索時における RREQ 信号の効率的な配信を図っている。

このように GPS から得られた各端末の位置情報を管理する場合、文献 6) の DREAM では、定期的に自らの位置情報をネットワーク全体に配信している。このとき、最大転送距離に制限を加えて、近くの端末や速度の速い端末とは更新の頻度を多くし、遠くの端末や速度の遅い端末とは更新の頻度を少なくするようにしている。また、文献 7) の GLS では、自端末を中心に領域 (geographical hierarchical level) を設け、この領域が含む周辺端末の数に応じて複数の領域を定義し、その領域ごとに分散的に自分の位置サーバを設定して、定期的にそれらの位置サーバへ自らの位置を更新している。ある端末が送信先端末と通信する場合、同じ方法で送信先端末が分散的に設定した位置サーバに対して、送信元端末は送信先端末の位置情報の検索を行って通信を開始するようにしている。どちらも、位置情報を共有する際におけるネットワーク全体への

フラッディングを避けてオーバーヘッドの低減を図っている。

これらの文献⁵⁾⁻⁷⁾では、位置情報を利用することによる効率的な情報配信や位置情報の効率的な共有方法について提案されたものである。

次に、位置情報を利用したルーティングプロトコルにおけるルート決定方法として、文献 8) の GPSR では、送信元端末は送信先端末の位置情報を検索してから、パケットのヘッダに送信先端末の位置情報を入れておき、中継端末がそのパケットを受信すると、送信先端末との距離が最も小さい中継端末を選択して転送 (Greedy Forwarding) するようにしている。したがって、送信元端末と送信先端末との距離が最も小さいルートが選択されることになる。また、送信元端末と送信先端末の距離が一番小さく送信先側に適当な中継候補となる端末がないときには、周辺端末の位置関係を平面的に展開して、右手規則 (回り) に中継端末を選択しながら転送 (Perimeter Forwarding) する方法をとっている。また、文献 9) の TRR/TLR では、送信元端末と送信先端末との間に、通過地点としてアンカ (anchor) となる端末を見つけ、これらのアンカに沿ってパケットを転送するようにしている。さらに、このコンセプトの進化した文献 10) の TRP では、送信元端末と送信先端末との間に経路曲線 (Trajectory) を設定して、この経路に沿った一番近い端末を中継端末として選択している。

これらの文献⁸⁾⁻¹⁰⁾では、各端末の位置情報がネットワーク全体で共有されていることを前提として、いわゆる、平面的に展開されたすべての端末の位置関係からルートを策定するために、最終的にリンクが確立できず、送信先端末へパケットが配送できない場合がある。また、通過地点や経路曲線の適切な設定の仕方にも課題がある。したがって、位置情報をトポロジに反映したルーティングプロトコルの必要性が考えられる。

そこで、提案する方式は、まず、定期的にハローパケットのような制御パケットを利用して隣り合う端末と位置情報を局所的に交換し合い、自端末と隣り合う端末との距離を算出し、あらかじめ設定した距離とメトリックの対応に従ってトポロジに端末間の距離に基づくメトリックの情報を反映し、総合的なメトリックによりルートを策定するものである。さらに、メトリックにはリンクの品質について考慮する必要があり、電波伝搬状況を反映する必要がある。ここでは、文献 11) により、MANET によるルーティング方式では、最小ホップ数のルートを選択するので、電波伝搬状況の良

くない弱いリンクが選択されるとマルチホップ通信の総合スループットが低下するという指摘がなされている．そこで，文献 12) では，パケットごとに双方向期待送信数 (ETX) をメトリック値に反映する手法が提案されたが，文献 13) により ETX は統計情報でありデータ収束までに長い時間が必要となるので，端末が静止した環境では効果があるが移動体の中では性能が低下するという指摘がなされている．そこで，提案する方式は，電波伝搬状況を反映するために，瞬時の受信信号強度の値を取得してメトリックに反映するものとする．特に ITS の車車間通信で特有の路面反射によるマルチパスには再現性があり，ある距離範囲でバースト的に受信信号強度が低下するので，あらかじめその距離範囲ではメトリックの変換モデルを別に設定して，イベント的に対応することにより，すばやく異なるルートを選択するものとしている．

このように，GPS からの位置情報を利用して端末間距離に応じたメトリックを求めてトポロジに反映するルーティングプロトコルをベースとする．さらに，電波伝搬状況を反映するために受信信号強度を監視し，特にマルチパスのように受信信号強度がバースト的に低下するような場合にはイベント的にメトリックを変更してトポロジに反映し，総合的なメトリックによりルートを策定する方法を提案する．

次章より，基礎実験として移動体における，MANET によるルーティング方式の場合や，受信信号強度や位置情報からの端末間距離に応じたメトリックをトポロジに反映してルートを策定した場合の，それぞれのパケット到達率の様子を比較する．そして，両者を組み合わせ合わせた提案方式とシミュレーションの結果を示す．

3. 基礎実験

3.1 アドホックネットワーク無線装置

実験のための無線装置としては，アンテナとして DC 電圧制御によりセクタまたはオムニのビームに切り替えることのできる ESPAR アンテナ¹⁴⁾ を使用し，無線モジュールとして IEEE802.11g 無線 LAN カードをベースに，ブロードキャスト時にはオムニビームで送信し，データ通信のようにユニキャスト時にはセクタビームで送信するように改造したものである¹⁵⁾．PC は OS として Linux Red Hat9，カーネル 2.4.20 を使用し，ルーティングプロトコルとしてテーブル駆動型の FSR¹⁶⁾ やオンデマンド型の AODV¹⁷⁾ を実装した．本研究では，無線モジュールに GPS を接続し，位置情報を取得するようにした．図 1 に無線装置の外観図を示す．

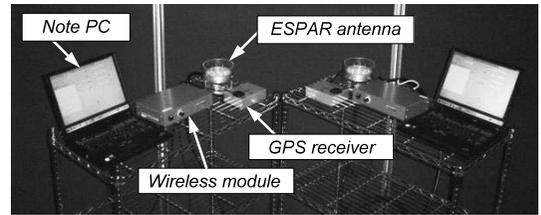


図 1 アドホックネットワーク無線装置

Fig. 1 Overview of wireless ad hoc network test bed.

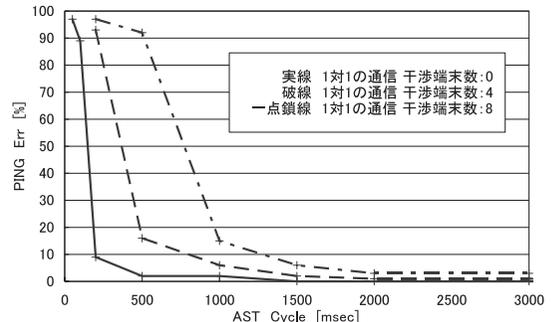


図 2 AST 更新周期と干渉端末数が与える ping エラーの関係
Fig. 2 Ping err rate vs AST cycle related to interference node's.

この無線装置では，セクタビームを通信したい相手方向にセットするために，以下の手順を行っている．各端末は，定期的にセクタビームで全方位 (最大 12 方位) を走査しながら送信し，周辺端末はオムニビームで受信して受信信号強度 (RSSI) の測定を行って結果を返送する．その結果，各端末には周辺端末ごとに 12 方位の RSSI 情報を収納した AST (Angle-SINR Table) を形成し，最も強い RSSI の方向へセクタビームをセットして送信するようにしている．AST のプロトコルは端末のモビリティ等によって更新周期を選択する必要があるが，実際の無線装置においては，装置に固有の性能面からの制約により，パケットの衝突が与える影響についても検討が必要である．図 2 に，AST プロトコルの更新周期や周辺端末の数と ping コマンドによるエラーとの関係を計測した結果を示す．図中より 1 対 1 の通信で干渉端末台数が 8 台の場合，AST 更新周期を 1 秒よりも短くすると大幅にエラーが増えることが分かる．したがって，この無線装置を全 10 台程度で行う基礎実験では AST プロトコルの更新周期を 1 秒以上で使用して基礎特性を評価することが望ましい．

3.2 移動実験

図 3，図 4 に示すように，移動実験の設定としては，前述の無線装置を 4 台用意して車両に搭載し，会社

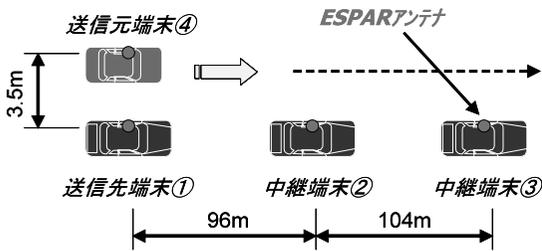


図3 移動実験レイアウト
Fig.3 Formation of mobile experiment.



図4 実験車両
Fig.4 Overview of experimental car.

構内の単純な直線道路の部分にて、送信先端末①を静止させて固定し、送信元端末④が移動して遠ざかり、途中経路に中継候補となる2台の静止させた固定端末②および固定端末③を設置した。前述したとおり各端末が行っているASTプロトコルは1秒周期としており、セクタビームの方向は1秒ごとに計測される受信信号強度の値から設定される。したがって、相対的な移動速度を1m/sec (≈ 3.6 km/h)として実験を行うと、距離方向で1mごとにセクタビームが所定の手順で方向設定されることになる。送信元端末④が1秒間で移動するときに送信先端末①との角度は $16^\circ \{ \approx \tan^{-1}(1\text{m}/3.5\text{m}) \}$ ずれることになるが、ESPARアンテナのセクタビーム幅(3dB低下点)は約 $\pm 45^\circ$ であるので、送信先端末①は十分セクタビーム幅内にあると考えられる。また、移動速度を速くして、たとえば5m/sec (≈ 18 km/h)程度とした場合、送信元端末④が1秒間で移動するときに送信先端末①との角度は $55^\circ \{ \approx \tan^{-1}(5\text{m}/3.5\text{m}) \}$ ずれることになり、送信先端末①はセクタビーム幅の外側に位置してしまう可能性があるため、パケット到達率への評価が難しくなる。この実験の目的としては、送信先端末と送信元端末との相対距離を変化させて、

この場合は離れていくときにおける、各端末間の受信信号強度(RSSI)をモニタし、マルチホップ通信により次々と中継端末を採用しながらパケット転送を行うときのルートの切替の様子とそのときのパケット到達率を評価するものである。実際の道路における運用状況としては、相対距離が長くなっていく場合の例として、高速道路を走行する車両群を隣車線で追い越していく特定車両から、情報としてたとえば緊急情報や交通状況を通過後も安定に受信し続ける場合が想定される。また、相対距離が短くなっていく場合の例として、交差点での見通し外等の道路情報を交差点に進入しようとする車両が早い段階から安定に受信し続ける場合が想定される。

実験の結果、図5に示すように移動する送信元端末④と静止した送信先端末①および2台の中継端末②と③との間の受信信号強度は、端末間距離に応じて変動しながらも増加または減少している。ただし、単調に増加や減少せずに、局部的に受信信号強度は急激に低下している。これは路面からの反射波によるマルチパスの影響である。ESPARアンテナの地上からの高さは1.8mであり、図6に示すように端末間距離が28mと56mの付近に、受信信号強度が急激に低下する現象が再現されている^{18),19)}。なお、実験車両の走行にあたっては、毎回同じような状況とはいえず、また、必ずしも等速度とはいえないので、時間と距離の値とは若干の相違が生じる場合もある。

3.3 MANETによる方式

図7にはMANETによるAODVを用いた移動時のパケット到達率とホップ数を示す。パケットは1,500byteのデータを10msec間隔でUDP送信し、1秒(100パケット)ごとの到達率(%)を算出した。ASTプロトコルの更新周期は1秒で、ハローパケットの周期も1秒に合わせており、ビーム方向の設定周期と通信したい相手端末の選定周期を同じとした。伝送速度は適応変調を用いており、最小伝送速度は1Mbpsで、このときの最小受信感度は -90 dBmである。送信元端末④は送信先端末①と最小ホップ数で接続しようとするために、180秒付近の最小受信感度まで直接通信が続き、切断してから新たな中継ルートを選択している。その後も送信先端末①との受信信号強度は最小受信感度付近にあるので直接通信やマルチホップ通信となりルートが安定せずにパケット到達率が良くない。また、60秒付近では路面からの反射波によるマルチパスの影響により、受信信号強度がバースト的に最小受信感度を下回るためパケット到達率も一時的に大きく低下している。

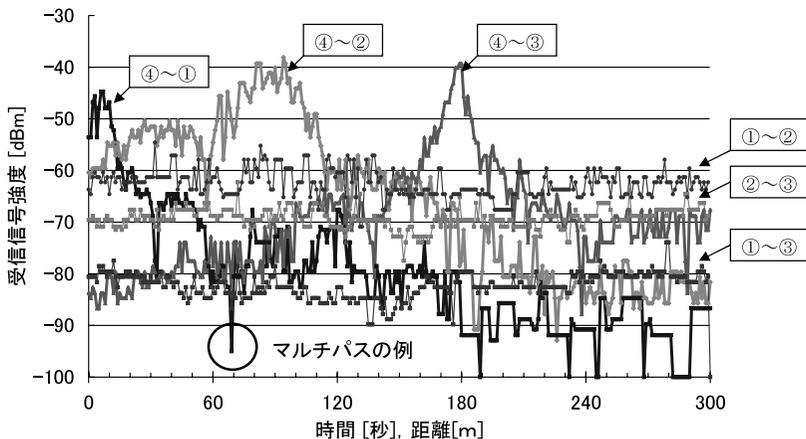


図 5 RSSI の変化 (MANET AODV)

Fig. 5 RSSI in mobile experiment (MANET AODV).

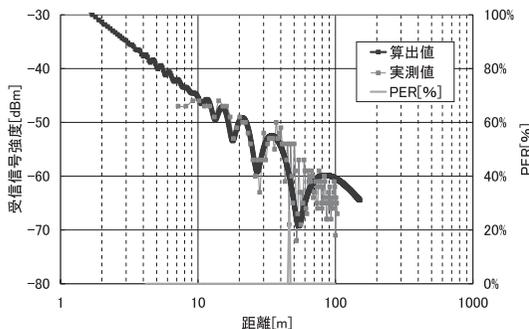


図 6 マルチパス下での RSSI

Fig. 6 RSSI under multipath fading.

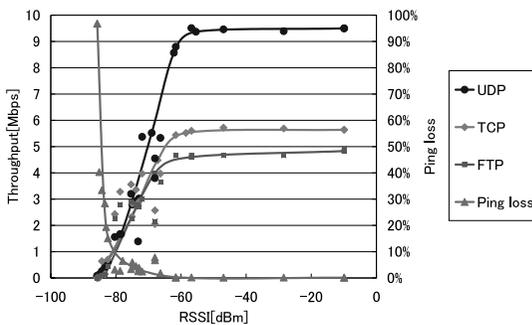


図 8 スループット特性 (適応変調)

Fig. 8 Characteristics of throughput (Adaptive modulation).

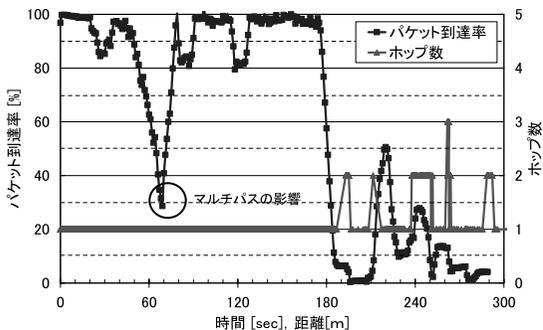


図 7 パケット到達率とホップ数 (MANET による AODV)

Fig. 7 Packet delivery ratio and hop count (MANET AODV).

3.4 受信信号強度を考慮した方式

MANET による FSR, AODV に対して, 筆者は文献 20)~23) にて, 伝搬状況の良い中継端末を選択することにより, マルチホップ通信の総合スループットを向上させる方式を提案し, 静止端末の中での実験において, 伝搬状況の良い方のホップ数が多いルー

表 1 メトリックの設定

Table 1 Metric due to RSSI.

信号強度 (dBm)	-55	-65	-75	-85
メトリック値	1	2	4	8
				16

トを選択しても総合性能が優れることを示した. 具体的には, 図 8 に無線モジュールの受信信号強度に応じたスループットの特性に示すように, 受信信号強度が -50 dBm ~ -90 dBm に応じて, 伝送速度が 54 Mbps ~ 1 Mbps まで変化し, この区間に対してメトリックの値に重み付けを行って対応させ, 総合メトリックの小さい方のルートを選択する手法である.

適応変調におけるスループット特性により, ルーティングにおけるメトリック値は通信特性が劣化し始める -55 dBm 以下で表 1 に示す重み付けを施すこととした.

今回の移動実験においても同様の方式を用いて, 移動時のパケット到達率とホップ数を測定した結果を図 9 に示す. MANET による AODV を用いた実験と同様

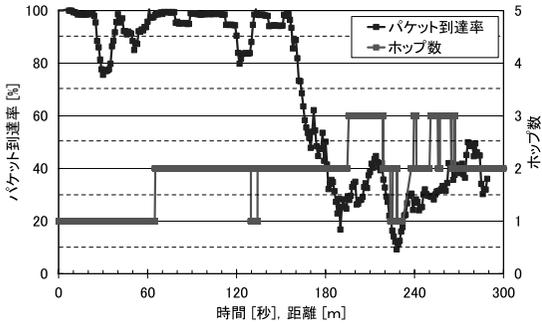


図 9 パケット到達率とホップ数 (RSSI AODV)

Fig. 9 Packet delivery ratio and hop count (RSSI AODV).

に、AST の更新およびハローパケットは 1 秒周期とし、RSSI の値からメトリックへの変換にあたっては、AST プロトコルにより 1 秒周期で取得した値を 5 回分オーバーラップさせながら平均した値を用い、さらに、異なるメトリック値への移行の際には ± 2 dB のヒステリシスを設定した。ルーティングテーブルにおける life time は Hello パケット連続 3 回不達の 3 秒としている。図中より 60 秒付近の送信元端末 ④ と送信先端末 ① との路面からの反射波によるマルチパスの影響により受信信号強度がバースト的に低下する時、中継端末 ② を経由した 2 ホップのマルチホップ通信となることにより、この付近のバースト的なパケット到達率の低下が起きていないことが分かる。また 160 秒付近より送信元端末 ④ と中継端末 ② の受信信号強度の低下にともないパケット到達率も低下していく。200 秒付近では送信元端末 ④ と中継端末 ② との路面からの反射波によるマルチパスの影響による受信信号強度のバースト的な低下により、中継端末 ② および中継端末 ③ をも経由した 3 ホップのマルチホップ通信となることにより、パケット到達率が若干回復している。しかし、200 sec 付近以降では、RSSI の 10 dB ほどの閾値に応じた可変メトリック値に対して、送信元端末 ④ との間で送信先端末 ① や中継端末 ② および ③ との受信信号強度に大きな差がないために、ルートを決定付けるための総合メトリックに差が生じず、ルートが頻繁に変更されて、パケット到達率が低下している。MANET による AODV を用いた場合 (図 7) に比べて、一般的にホップ数が多く、マルチホップ通信における各区間の受信信号強度の値が高いので伝送速度も高く、パケット到達率は比較的良くなっている。

3.5 位置情報を用いた方式

ルートの頻繁な変動に対して、GPS からの位置情報を基に、端末間距離を算出し、距離に応じたメトリックの値をトポロジに反映し、ルートを安定に切り替え

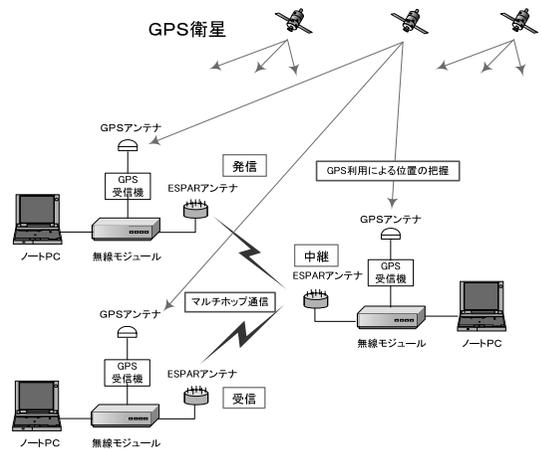


図 10 GPS を用いた実験の構成

Fig. 10 Structure of test bed with GPS.

ることを目的としている。図 10 に実験の構成を示す。

移動実験の関係により、はじめは送信元端末 ④ と送信先端末 ① が直接通信となっているが、直接通信となる一定距離の中継端末を追い越した時点で、その中継端末を経由するマルチホップ通信に切り替えるものとする。したがって、各端末間距離のメトリックを 1 とし、この距離を越えた時点でメトリックの値を大きな値として、たとえば 16 と設定する。選定したいルートのホップ数が総合メトリックの値であり、選定したくないルートのメトリックの値は想定されるホップ数の最大値以上とすればよい。また、AST 生成における返信 (Reply) パケットやルーティングのハローパケット等に GPS から得た位置情報をもちこんでおけば、受信側では自分の位置情報と比較して相手までの距離を算出して、距離に基づくメトリックの値を求めることが可能となる。ただし、AST プロトコルへの位置情報の追加は、オーバーヘッドが大きくなるので望ましくなく、比較的軽いハローパケットへの自端末の位置情報の追加であれば今までとほとんど影響はない。

AODV のルーティングにおいては、ハローや RREQ/REPLY のパケットに、自分の位置情報とアクティブルートについては、隣接端末のアドレスとメトリックの値をもちこむ改造を行い、ルートの制御を行い、移動時のパケット到達率とホップ数の測定を行った。この結果、図 11 に示すように、ルートは安定に切り替えられたが、MANET による AODV を用いたときと同様に、60 秒付近の送信元端末 ④ と送信先端末 ① との路面からの反射波によるマルチパスの影響により受信信号強度がバースト的に低下する時、中継端末を利用せず直接通信が続くので、パケット到達率が良くないことが分かる。また 160 秒付近より送信

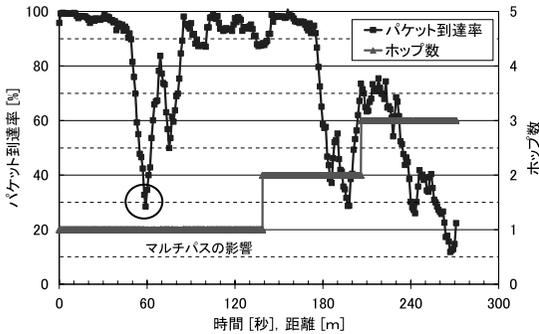


図 11 パケット到達率とホップ数 (GPS 対応 AODV)

Fig. 11 Packet delivery ratio and hop count (GPS AODV).

表 2 基礎実験のまとめ

Table 2 Result of mobile experiment.

		MANET AODV	RSSI AODV	GPS AODV
前半	平均値 (ave)	89.8	94.5	88.4
	標準偏差 (σ)	14.7	6.1	15.4
後半	平均値 (ave)	14.4	35.6	47.1
	標準偏差 (σ)	51.3	12.1	40.5
総合	平均値 (ave)	60.1	68.6	75.3
	標準偏差 (σ)	44.0	36.8	33.3

元端末 ④ と中継端末 ② の受信信号強度の低下にともないパケット到達率も低下していく。200 秒付近では送信元端末 ④ と中継端末 ② との路面からの反射波によるマルチパスの影響により受信信号強度がパースト的に低下する時、中継端末 ③ を追い越した時点で、中継端末 ② および中継端末 ③ も含めた安定な 3 ホップとなり、再び、パケット到達率が回復する。これ以降は、送信元端末 ④ が遠ざかり、受信信号強度の低下にともない、パケット到達率も低下していく。

3.6 基礎実験のまとめ

MANET による AODV, RSSI AODV, GPS AODV の 3 つのプロトコルに対して、移動実験におけるパケット到達率の結果を表 2 に示す。表中、実験開始から 180 秒を境に前半と後半に設定した。

MANET による AODV を用いた場合、最小ホップ数のルートが優先され、受信信号強度の変化を受けやすく、総合的にもパケット到達率が 60.1%であった。受信信号強度を考慮した RSSI AODV 方式では、前半のマルチパスによる受信信号強度の低下に対して、中継端末を用いたマルチホップにより影響を低減させているが、後半では MANET による AODV の場合と同様に、送信元端末と各端末との受信信号強度の差が小さいために、ルートを決定できずに頻繁にルートが変更されて、パケット到達率が低下している。総合的にもパケット到達率が 68.6%であった。位置情報を用いた GPS AODV 方式では、移動中にルートを安定

して切り替えることができたが、マルチパスによる影響を受けやすく、このときのパケット到達率が急激に低下している。また、180 sec 付近より後半では、送信元端末と各端末との間で受信信号強度の差が小さいが、ルートを安定に切り替えて 3 ホップとなり、総合的にはパケット到達率が 75.3%であった。したがって、受信信号強度を考慮した方式で、特に、路面からの反射波によるマルチパスへの対応と、位置情報を用いた方式を、状況に応じて使い分けることが望ましい。

4. 提案方式と計算機シミュレーション

4.1 提案方式

GPS からの位置情報を利用して、端末間距離に応じたメトリックをトポロジに反映するルーティングプロトコルをベースに、電波伝搬状況を監視してマルチパスの発生する距離範囲ではイベント的にメトリック値を変化させてルートを変更させる方法により、ルートを不安定や急変させることなく安定に切り替えながらパケット到達率を向上させるマルチパス対応位置方式 RecMP AODV (Recover MultiPath AODV) を提案する。本方式では、定期的にハローパケットを利用して隣り合う端末と GPS からの位置情報を局所的に交換し合い、自端末と隣り合う端末との距離を算出し、あらかじめ設定した距離とメトリックの対応に従ってトポロジに端末間の距離に基づくメトリックの情報を反映し、一定距離以内の端末を追い越してこの距離を越えると、たとえばメトリックの値を 1 から 16 へと大きく設定し、ルートを切り替えていくものとする。また、路面からの反射波によるマルチパスの影響により受信信号強度がパースト的に低下する距離地点 (50 ~ 60 m) に対しては、優先的にメトリックの値を、同じく 1 から 16 へと大きく設定し、異なる経路を選択するものである。

4.2 実環境を考慮した計算機シミュレーション

計算機シミュレーションにおいては、実際の環境で得られた路面反射によるマルチパスの影響を受けた受信信号強度の値を実装した。シミュレーションソフトウェアとしては Qualnet3.8 版を使用し、無線 LAN は IEEE802.11b, 1 Mbps 固定レート、パケット発生は CBR=1,400 バイト/パケット, 20 パケット/sec とした。ESPAR アンテナのオムニおよびセクタのビームパターンを実装した。また、実装した AST プロトコルの更新周期および AODV のハローパケットの周期は 1 秒とした。実際の基礎実験の時よりも静止した中継端末の台数を 2 台から最大で 9 台まで増やして各端末間距離はマルチホップ通信で直接通信可能な 100 m

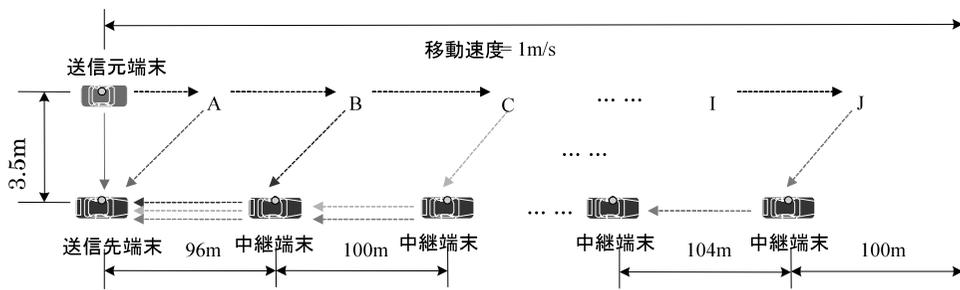


図 12 シミュレーション・トポロジ
Fig. 12 Topology for simulation.

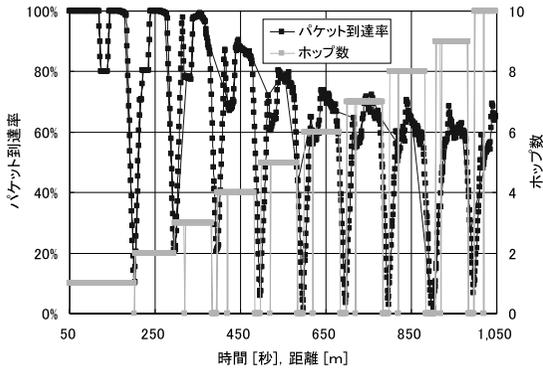


図 13 MANET AODV のパケット到達率とホップ数 (平均パケット到達率は 64.31%)

Fig. 13 Packet delivery ratio and hop count (MANET AODV) (Average delivery ratio = 64.31%).

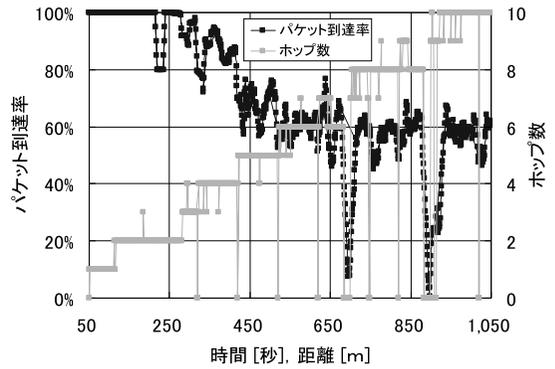


図 14 RSSI AODV のパケット到達率とホップ数 (平均のパケット到達率は 70.17%)

Fig. 14 Packet delivery ratio and hop count (RSSI AODV) (Average delivery ratio = 70.17%).

と設定した。シミュレーションのトポロジを図 12 に示す。

MANET による AODV, 受信信号強度を考慮した RSSI AODV, 位置情報を用いた GPS AODV, マルチパス対応位置方式である RecMP AODV について, シミュレーション結果を図 13, 図 14, 図 15, 図 16 に示し, これらを総括した結果を図 17 に示す。

この結果, MANET による AODV, 受信信号強度を考慮した RSSI AODV, 位置情報を用いた GPS AODV については, 基礎実験とほぼ同様の結果となった。MANET による AODV では, 送信端末と受信端末が最小ホップ数で接続しようとするために, 電波伝搬の限界まで直接通信が続き, 切断してから新たな中継ルートを選択している。また, 受信信号強度の変動にともないルートが頻繁に変更され, マルチパスの発生する距離地点ではバースト的にパケット到達率が低下している。受信信号強度を考慮した RSSI AODV では, 最初のマルチパスによる受信信号強度の低下に対して, 中継端末を用いたマルチホップにより影響を低減しているが, 後半では受信端末と各端末との受信

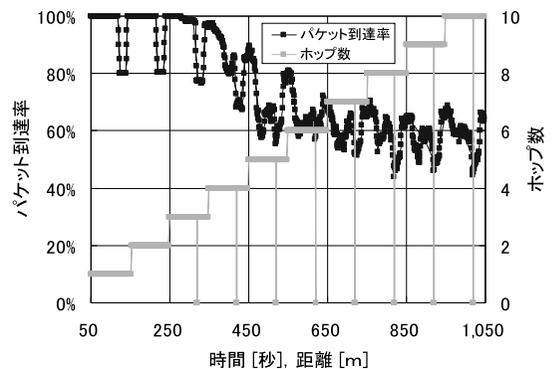


図 15 GPS AODV のパケット到達率とホップ数 (平均パケット到達率は 74.14%)

Fig. 15 Packet delivery ratio and hop count (GPS AODV) (Average delivery ratio = 74.14%)

信号強度の差が小さいために, ルートを決定できずに頻繁にルートが変更されて, パケット到達率が低下している。位置情報を用いた GPS AODV では, 送信元端末との間で送信先端末や中継端末との受信信号強度の差が小さくても, ルートを安定して切り替えるこ

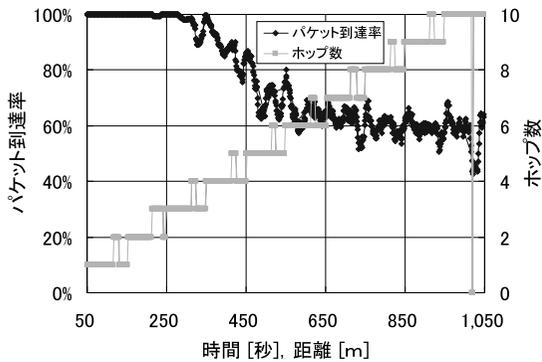


図 16 RecMP AODV のパケット到達率とホップ数 (平均パケット到達率は 75.39%)

Fig. 16 Packet delivery ratio and hop count (RecMP AODV) (Average delivery ratio = 75.39%).

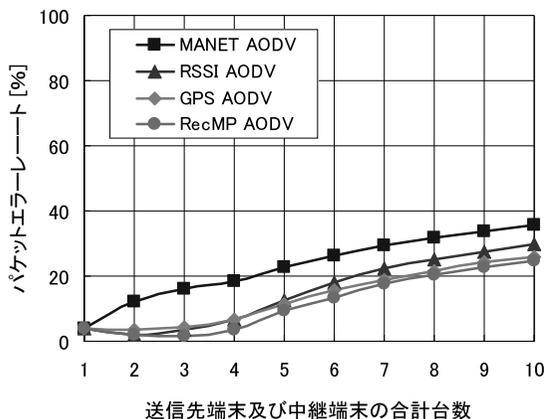


図 17 送信先端末および中継端末の合計台数と PER

Fig. 17 PER vs node numbers related to several AODV's.

とができたが、マルチパスによる影響を受けやすく、このときのパケット到達率が急激に低下している。提案するマルチパス対応位置方式の RecMP AODV では、ルートを安定して切り替えながら、中継端末とマルチパス発生距離地点ではイベント的にルートを変更することにより、マルチパスによる影響を回避しており、パケット到達率にはバースト的な低下がほとんどなく、平均的にも最も良い値となった。

4.3 移動速度について

基礎実験および計算機シミュレーションについて、送信元端末の他端末に対する相対的な移動速度は 1m/sec としている。これは、3.1 節で説明したように、使用する無線装置に固有の性能面からの制約の中で、スループットを確保するために、AST プロトコルは更新周期を 1 秒に選定したものである。また、3.2 節で説明したように、セクタビームを通信したい相手端末の方向に設定されていることを前提に、移動体における

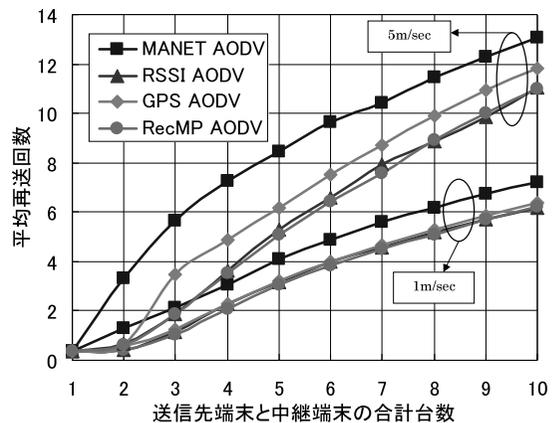


図 18 移動速度とパケットの再送回数

Fig. 18 Average number of retransmission related to mobility.

各種ルーティングプロトコルのパケット到達率の評価を行うためである。所定以上の移動速度となると、セクタビームの方向設定精度の問題だけでなく、ハローパケットによる他の端末の位置情報取得が遅れるのでルート制御のタイミングが問題となる。さらに、ルートが更新されるまでの間に環境が変化してしまい、パケットの不達が増えることが考えられる。今後、無線装置の性能が向上しても制約は生まれると考えられるので、補間のために予測的な手法が必要となってくる。現行の条件のままで、相対的な移動速度が 1m/s ($\approx 3.6\text{Km/h}$) および 5m/s ($\approx 18\text{Km/h}$) におけるパケットの再送回数を図 18 に示す。移動速度が速くなることによりすべてのプロトコルの再送回数が増えている。MANET による AODV は、品質の弱いリンクを使う可能性があり、移動速度が速くなるとリンクの品質の信頼性がさらに低下するので、最も再送回数が多くなる。受信信号強度の情報をを用いる RSSI AODV や RecMP AODV は、受信信号強度の情報を取得する AST プロトコルの更新周期が同じままで、移動速度だけが速くなると、見かけ上フェージングの影響が低下する可能性がある。しかし、位置情報のみを用いた GPS AODV は移動速度が速くなると、送信元端末から通信したい相手に対するセクタビームの設定精度が低下するので、受信信号強度の情報をを用いる RSSI AODV や RecMP AODV よりも再送回数が増えることになる。

5. おわりに

移動体における無線アドホックネットワークでは端末の参入や離散によるトポロジの変化だけでなく、電波伝搬状況の変化によりルートが不安定となって、通

信性能が劣化することから、実用化への課題となっている。本論文では、ITSの車車間通信への応用を想定して、GPSからの位置情報を利用し、端末間距離に応じたメトリックをトポロジに反映するルーティングプロトコルをベースとしている。さらに、電波伝搬状況を監視してマルチパスの発生する距離範囲ではイベント的にメトリック値を変化させてルートを変更させる方法により、ルートを不安定や急変させることなく安定に切り替えながらパケット到達率を向上させるマルチパス対応位置方式を提案した。また、実際の環境で得られた受信信号強度の値を実装した計算機シミュレーションの結果により、パケット到達率にはパースト的な低下がほとんどなく、他の個別のプロトコルと比べて平均的に最も良い結果を示した。本論文での提案方式は、オンデマンド型のプロトコルであるAODVのHelloパケット等の代わりに、テーブル駆動型のプロトコルにおける定期的なLink stateパケットに対しても改造し、導入していくことが可能である。

謝辞 本研究は、情報通信研究機構(NICT: National Institute of information and Communications Technology)の研究委託「ユビキタスITSの研究開発」により実施した。

参 考 文 献

- 1) 渡辺正浩：無線アドホックネットワーク，自動車技術会春季大会ヒューマトロニクスフォーラム，横浜，pp.18–23 (May 2003).
- 2) Perkins, C.E.: *AD HOC NETWORKING*, Addition-Wesley Pub. (2000).
- 3) Toh, C.K.: *Ad Hoc Mobile Wireless Networks Protocols and System*, Prentice Hall PTR (2001).
- 4) Hong, X., Xu, K. and Gerla, M.: Scalable Routing Protocols for Mobile Ad Hoc Networks, *IEEE Network*, pp.11–21 (2002).
- 5) Ko, Y.B. and Vaidya, N.H.: Location-Aided Routing (LAR) in Mobile Ad hoc Networks, *Wireless Networks*, Vol.6, No.4, pp.307–321 (2000).
- 6) Basagni, S., Chlamatac, I. and Syrotiuk, V.R.: A distance routing effect algorithm for mobility (DREAM), *MobiCom '98*, pp.76–84 (1998).
- 7) Morris, R.: A Scalable Location Service for Geographic Ad Hoc Routing, *MobiCom 2000*, pp.120–130 (2000).
- 8) Karp, B. and Kung, H.T.: GPSR: Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Networks, *MobiCom 2000*, pp.243–254 (2000).
- 9) Blazevic, L., Butyyan, L., Capkun, S., Giordano, S., Hubaux, J.P. and Boudec, J.Y.L.: Self-organization in mobile ad hoc networks: The approach of Terminodes, *IEEE Commun. Mag.*, Vol.39, No.6, pp.166–173 (2001).
- 10) Niculescu, D. and Nath, B.: Trajectory Based Forwarding and Its Applications, *MobiCom 2003*, pp.260–272 (2003).
- 11) De Couto, D.S.J., Aguayo, D., Chambers, B.A. and Morris, R.: Performance of multihop wireless networks: shortest path is not enough, *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, Vol.33, No.1, pp.83–88 (2003).
- 12) De Couto, D.S.J., Aguayo, D., Bicket, J. and Morris, R.: A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing, *MobiCom 2003*, pp.134–146 (2003).
- 13) Draves, R., Padhye, J. and Zill, B.: Comparison of routing metrics for static multi-hop wireless networks, *ACM SIGCOMM '04*, pp.133–144 (2004).
- 14) 大平 孝：エスパアンテナの動作原理とシステム応用，信学誌，Vol.87, No.12, pp.1061–1064 (2004).
- 15) 渡辺正浩，田中信介，小宮山牧兒，小花貞夫，藤瀬雅行：マルチホップ通信による動画ストリーミングの実験評価，信学技報，IN2005-56 (2005).
- 16) Pei, G., et al.: Fisheye state routing: a routing scheme for ad hoc wireless networks, *ICC2000. Commun.*, L.A., Vol.1, pp.70–74 (June 2000).
- 17) Perkins, C.E., Belding-Royer, E. and Das, S.: Ad hoc on-demand distance vector (AODV) routing, RFC3561 (July 2003).
- 18) 渡辺正浩，鈴木洋介：WACNet (IEEE802.11b) 無線通信におけるアスファルト路面反射の特性，信学ソ大会，A-17-17 (Sep. 2003).
- 19) 渡辺正浩，田中信介：WACNet (11b アドホック) におけるルートダイバーシティの実験，信学技報，MoMuC2004-16 (May 2004).
- 20) 渡辺正浩，湯 素華，田中信介：受信信号強度を考慮したルーティングプロトコルの提案，信学技報，RCS2004-130 (Aug. 2004).
- 21) 渡辺正浩，湯 素華，田中信介：受信信号強度を考慮したルーティングプロトコルの屋内実験評価，信学ソ大会，B-5-125 (Sep. 2004).
- 22) Tang, S., Zhang, B., Watanabe, M. and Tanaka, S.: A Robust AODV using RSSI with local update, 信学ソ大会，B-5-124 (Sep. 2004).
- 23) 湯 素華，張 兵，渡辺正浩，田中信介：Link Heterogeniety を考慮したオンデマンド・ルーティング方式とその屋内実験評価，信学技報，MoMuC2004-85 (Nov. 2004).

(平成 18 年 3 月 31 日受付)

(平成 18 年 10 月 3 日採録)



渡辺 正浩

昭和 57 年京都工芸繊維大学工学部電子工学科卒業。同年三菱電機(株)入社。レーダ装置および車車間通信装置の研究・開発に従事。平成 14 年(株)国際電気通信基礎技術研究所(ATR)適応コミュニケーション研究所出向。平成 18 年三菱電機(株)復職。現在、同社先端技術総合研究所主席研究員。平成 18 年より ATR 客員研究員。アドホックネットワークおよびセンサ情報処理システムに関する研究に従事。電子情報通信学会会員。



湯 素華

平成 10 年中国科学技術大学電子情報工学科卒業。平成 15 年同大学院博士課程終了(Ph.D.)。同年(株)国際電気通信基礎技術研究所(ATR)適応コミュニケーション研究所研究員。現在、メディアアクセス制御、アドホックネットワークおよび ITS の研究に従事。電子情報通信学会会員。IEEE 会員。



小花 貞夫(フェロー)

昭和 51 年慶應義塾大学工学部電気工学科卒業。昭和 53 年同大学院修士課程修了。同年国際電信電話(株)(現 KDDI(株))入社。パケット交換方式、ネットワークアーキテクチャ、OSI プロトコル実装、データベース、ビデオテクニクス、分散処理、ネットワーク管理、ITS の研究・開発に従事。平成 16 年(株)国際電気通信基礎技術研究所(ATR)執行役員適応コミュニケーション研究所所長、アドホックネットワーク、ITS、センサネットワークの研究・開発に従事。工学博士。平成 13 年文部科学大臣賞(研究功績者)、本会フェロー、電子情報通信学会会員。