社団法人　情報処理学会　研究報告
IPSJ SIG Technical Reports

2007－ＱＡＩ－23（６）
2007／5／30

無線マルチホップネットワークにおけるアプリケーション適応型メトリックを用いたリアクティブ型経路制御方式

柳生　智彦[†,††]　地引　昌弘[†]　吉田　健一[††]

† NECシステムプラットフォーム研究所
†† 筑波大学大学院ビジネス科学研究科

あらまし　無線マルチホップネットワークのリアクティブ経路制御方式において、通信の高信頼化を目的とした様々なメトリックが提案されている．例えば、無線信号強度や推定リンク生存時間などである．こうしたメトリックは主に、経路の接続時間を長く維持することを目的として導入されている．しかし、アプリケーションによってどのような経路が望ましいかは異なるため、単一メトリックでは最適な経路を求めることは難しい．本論文では、複数メトリックの計算重み計数を送信ノードが指定することで、送信者が望む条件で経路を構築できるリアクティブ型経路制御方式を提案する．シミュレーションにより、通信継続時間の異なるトラフィックを用いて、複数メトリックに対する計算重み係数を変化させて通信性能の評価を行った．評価の結果、単独でメトリックを用いる場合に比べ、複数のメトリックを同時に重み付けして用いるほうが良いパケット到達率を実現できることを検証した．
キーワード　無線マルチホップネットワーク,AODV-AAM, アプリケーション適応型メトリック

Reactive routing using application adaptive metrics for wireless multihop networks

Tomohiko YAGYU[†,††], Masahiro JIBIKI[†], and Kenichi YOSHIDA[††]

† Systems Platform Research Laboratories, NEC Corporation
†† Graduate school of business sciences, University of Tsukuba

Abstract　Many metrics to select a better route for reactive routing protocols have been proposed for wireless multihop networks. They use the signal strength, estimated link lifetime and so on. Such metrics are introduced mainly to establish long-lived routes. However, since criteria of better routes will vary according to applications, it is difficult to select desired route with single metric. In this paper, we propose a reactive routing protocol which can handle multiple weighted metrics to select better routes for various applications. We performed simulations to evaluate communication properties by various combinations of weighted metrics with traffics of different duration. The simulation results showed that our proposed method can achieve better packet reachability with multiple weighted metrics than with single metric.
Key words　Wireless multihop network, AODV-AAM, Application adaptive metrics

1. まえがき

無線マルチホップネットワークは、インフラを敷設できない場所において通信接続性を提供するために重要な技術である．災害救助活動やITSなど様々な場面での応用が期待されている．無線マルチホップ通信を実現する経路制御方式として、これまで様々な方式が提案されている[1][2]．代表的なものとして、定期的に経路情報を交換して逐次最適経路を維持するプロアクティブ方式や、経路が必要になった時点で探索を行うリアクティブ方式などがある．リアクティブ方式は定期的な情報交換が不要なため、帯域の狭い通信環境での利用に向いている．代表的なリアクティブ型経路制御プロトコルとして、AODV[3]がある．AODVは、通信開始時に経路要求メッセージ（RREQ）をネットワーク全体にフラッディングすることにより経路探索を行う．RREQを受け取った経路の宛先ノードは、経路応答メッセージ（RREP）をRREQと逆の経路で返すことにより、経路が作成される．ノードの移動などにより経路が切れた場合は、障害端ノードが再度RREQを送信して局所的に経路修復

（ローカルリペア）を行う．基本的に、宛先ノードは最も早く到着したRREQに対して応答を返し、それ以降に重複して受信したRREQは破棄する．中継ノードの状態やノード間の通信品質等を考慮せず経路が構築されるため、設定された経路はノードの移動や障害物などにより切れやすく、頻繁に修復や再設定が必要となる．

リアクティブ型経路制御で良い経路を選択するために、ノードまたはリンクに様々なメトリックを導入する方法が提案されている[4]～[8]．これらのメトリックは、特定のトラフィック特性を持つアプリケーションに関してはうまく動作する．例えば、DNSクエリやSIPシグナリングなどの制御メッセージは、数秒で終わるため長時間の接続は不要であるが、なるべくロスを減らすため混んでいない経路を選択することが望ましい．そのため、ノードの持つ経路数やキュー長、経路のホップ数などを考慮して経路を選択することが望ましい．VoIPなどのストリーム通信では、長時間継続可能で帯域も確保できる経路を探索する必要がある．FTPや重要度の低いファイル交換などのアプリケーションでは、なるべく他のアプリケーションを邪魔しないよう空いている経路を選択することが望ましい．しかし、通常ネットワーク内では様々なトラフィック特性を持つアプリケーションが同時に動作する．単一メトリックでこうした多様な経路選択基準を満たすことは不可能である．アプリケーション特性に合わない冗長または過負荷な経路での通信は、ネットワークリソースの浪費およびユーザが許容できない通信品質劣化を引き起こす．

本論文では、アプリケーションのトラフィック特性に適応した経路選択を可能とするリアクティブ型経路制御プロトコルを提案する．提案方式では、経路要求ノード（送信ノード）が経路選択に利用するメトリックの計算重み係数を経路要求パケットで指定し、中継ノードはその重みに従って各ホップでのメトリックを計算する．計算したメトリック情報を経路要求パケットに入れて伝達することにより、宛先ノードは最適な経路を選択して応答を返すことができる．シミュレーションにより、通信継続時間の異なるトラフィックに対して、様々な複数メトリックの計算重み係数を用いて評価した．

2. 経路選択メトリック

リアクティブ型経路制御において、良い経路を選択するためのメトリックが様々提案されている．主な経路選択基準は、接続可能時間である．長く接続可能な経路を探すメトリックを導入したプロトコルとして、ABR[4], SSR[5], FORP[6]などがある．ABRは隣接ノードから受信したビーコン回数に基づき隣接ノードとの結合度を計算する．経路探索では最も結合度の高い経路を選択する．SSRは隣接ノードからのパケット受信強度を記録しておき、経路探索においては受信強度の良いノードで経路を構成する．FORPは相対速度情報から隣接ノードとの通信可能時間を推定し、End-Endでもっとも通信可能時間の長い経路を選択する．

もうひとつの経路選択基準として輻輳を回避する経路を選択することが考えられる．特に無線マルチホップネットワークにおいては、さらし端末問題や隠れ端末問題などで知られるように干渉が通信品質に大きく影響を及ぼすため、通信品質の向上にはこうしたメトリックが必要となる．輻輳を回避するためのメトリックを導入したプロトコルとして、LBAR[7]やDLAR[8]などがある．LBARは、自ノードおよび隣接ノードが持つ経路数をメトリックとして利用しトラフィックを分散する経路を構築する．DLARは、自ノードのキュー長をメトリックとして利用することにより輻輳を回避する経路を選択する．

さらに、PDAなどの携帯端末を利用する場合はバッテリ残量なども重要なメトリックとなる．こうしたメトリックは確かに通信品質（パケット到達率や遅延、スループット等）を改善できるが、単一メトリックでは、アプリケーションに応じた柔軟な経路選択ができない．アプリケーションにとって適切な経路を選択するには、前述の様々な経路選択メトリックを、アプリケーションの持つトラフィック特性、つまり、通信時間や利用帯域、遅延許容性などに応じて使い分ける必要がある．

3. アプリケーション適応型メトリックによる経路選択方式

本節では、アプリケーションに適した経路を設定するリアクティブ型経路制御プロトコルとしてAODV-AAM(AODV with Application Adaptive Metrics)を提案する．提案方式の特徴は、複数メトリックの計算重み係数を送信ノードが経路要求メッセージによって指定できる点である．これにより、送信ノードはアプリケーションに合わせて適切なメトリックで経路探索を行うことができる．

AODV-AAMは、ノードメトリックとリンクメトリックの2種類のメトリックを持つ．ノードメトリックは、ノード自身のパラメータ（移動速度、保持経路数、バッテリ残量等）から計算される．リンクメトリックは、2ノード間の通信状況（受信強度、推定通信可能時間等）から計算される．ノードメトリックは以下のように計算される．

$$M_{node} = m_{node,base} + \sum_{i=1}^{k}(w_{node,i} \times m_{node,i})$$

M_{node}はトータルのノードメトリック値、$m_{node,base}$は基準ノードメトリック、$w_{node,i}$はi番目のノードメトリックに対する重み係数、$m_{node,i}$はi番目のノードメトリックを最良値0～最悪値100で正規化した値である．基準ノードメトリックは、自ノードのパケット転送能力によって決定される固定値である．例えば、中継車のような通信能力の高いものは小さく設定され、PDAのような非力な端末は比較的大きい値に設定される．後述の評価では、ノードメトリックとしてノード自身の移動速度と保持経路数の2つ($k = 2$)を用いる．

同様にリンクメトリックも以下のように計算される．

$$M_{link} = m_{link,base} + \sum_{i=1}^{l}(w_{link,i} \times m_{link,i})$$

M_{link}はトータルのリンクメトリック値、$m_{link,base}$は基準リンクメトリック、$w_{link,i}$はi番目のリンクメトリックに対する重み係数、$m_{link,i}$はi番目のリンクメトリックを最良値0～最悪値100で正規化した値である．基準リンクメトリックは、基本的に1である．後述の評価では、その他のリンクメトリッ

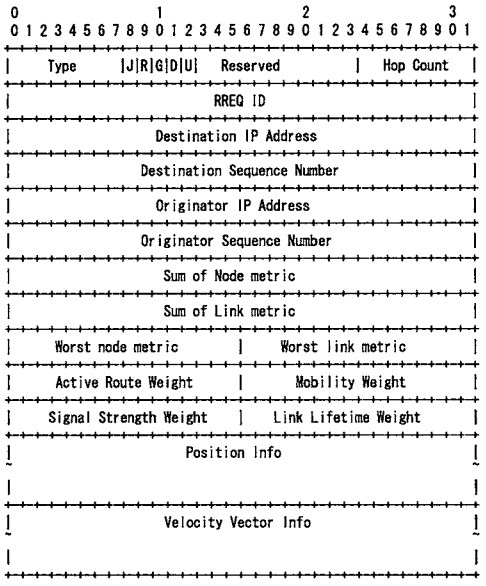

図 1 RREQ メッセージフォーマット
Fig. 1 RREQ message format

クとして受信強度とリンク生存時間の 2 つ ($l = 2$) を用いる. 相手ノードとのリンク生存時間は以下のように計算する.

$$L = \begin{cases} L_{max} & (|v| = 0) \\ min(L_{max}, (d_{max} - d)/|v|) & (|v| \neq 0) \end{cases}$$

L_{max} はリンク生存時間の最大設定値、d_{max} は最大通信可能距離、d は RREQ に入った相手ノードの位置情報と自身の位置情報から計算したノード間距離、v は RREQ に入った相手ノードの速度ベクトル情報と自身の速度ベクトル情報から計算した相対速度ベクトル、$|v|$ はその大きさである.

送信ノードが経路探索を開始する場合、開始する通信に適したメトリック計算重み係数を RREQ メッセージに入れて送信する.RREQ メッセージは、重み係数の他に、ノードメトリック合計値、リンクメトリック合計値、最悪ノードメトリック値、最悪リンクメトリック値、位置情報、速度ベクトル情報を含んでいる. 位置情報および速度ベクトル情報は、GPS やジャイロなどのデバイスから取得できるものを利用する. 図 1 に、RREQ メッセージのフォーマットを示す.

RREQ を受信した中間ノードは、自身の移動速度と経路数を取得し、RREQ に入っている計算重み係数を用いて、自身のノードメトリックを計算する. また、RREQ を送信したノードとのリンクメトリックを、受信強度とリンク生存時間、計算重み係数を用いて計算する.

該当する RREQ を初めて受信した中間ノードは、その RREQ を転送する. 転送に際して RREQ に入っているノードメトリック合計値とリンクメトリック合計値に、それぞれ上記で計算したメトリックを加算する. また、自身が計算したメトリックが RREQ に入っている最悪メトリック値よりも悪い場合、それらを置き換える. 転送した RREQ の情報は一定時間記録しておく. 中間ノードが以前に同じ宛先への RREQ を受信したことがある場合、RREQ の Hop 数が以前受け取った RREQ と同じであるかより小さい場合のみ(注1)、メトリックを比較する. 後に受信した RREQ の方がメトリックが良い場合は、その RREQ を転送する.

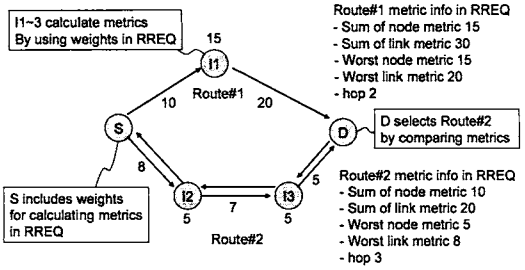

図 2 提案方式の動作例
Fig. 2 Example of the proposed method's action

宛先ノードが RREQ を受信すると、そこから一定時間他の RREQ 受信を待つ. その間に複数の RREQ を受信した場合、最良の RREQ を選択し RREP を応答する. RREP を受信した中間ノードは、自身が記録する最良の RREQ に沿って RREP を転送する. 中間ノード及び宛先ノードでは、以下の値の小さい順で RREQ の良否を判定する.

- ノードメトリック合計値+リンクメトリック合計値
- リンクメトリック合計値
- ノードメトリック合計値
- 最悪リンクメトリック
- 最悪ノードメトリック
- Hop 数
- 隣接ノードとのリンクメトリック

図 2 に、AODV-AAM の動作例を示す.

4. 性能評価

シミュレーションにより、通信継続時間の異なるトラフィックに対して、メトリック計算重み係数を変えてパケット到達率等を評価した. トラフィックは、16Kbps の双方向固定ビットレートとした. トラフィック発生間隔と通信継続時間の平均は同じとし、平均 10 秒、60 秒、180 秒の指数分布に従ってトラフィックの発生間隔、継続時間を決定した. $1000m \times 1000m$ の範囲に 100 台のノードをランダムに配置し、ランダムウェイポイントモデルに従って移動させる. ノードの移動速度は 5〜20m/秒、移動間隔は 30〜120 秒で変化させた. MAC は IEEE802.11 を用い、無線帯域は 11Mbps、通信可能範囲は 200m とした. 1000 秒間のシミュレーションを異なるノード移動パターンとトラフィックパターンで 10 回行い平均値を取った.

評価したメトリック計算重み係数の組み合わせは、表 1 に示す 22 パターンである. A は経路数に対する重み、M は移動速

(注1): RREQ のループを防ぐため

	A	M	S	L
Original AODV	0	0	0	0
Use only Link lifetime metric	0	0	0	1
Use only Mobility metric	0	1	0	0
	0	1	0	1
Use only Active route metric	1	0	0	0
	1	0	0	1
	1	1	0	0
Use only Signal strength metric	0	0	1	0
	0	0	1	1
	0	1	1	0
	1	0	1	0
	1	1	1	1
	1	1	1	2
	1	2	1	1
	1	2	1	2
	2	1	1	1
	2	1	1	2
	2	2	1	1
	1	1	2	1
	1	1	2	2
	1	2	2	1
	2	1	2	1

表 1　評価した重みの組み合わせ
Table 1　Evaluated combinations of weight

度に対する重み、S は受信強度に対する重み、L はリンク生存時間に対する重みである．すべて 0 であるものはオリジナルの AODV であり、宛先ノードは最初に受信した RREQ に対し即座に RREP を応答する．それ以外は、提案方式 (AODV-AAM) であり、宛先ノードは RREQ を受信すると 0.3 秒待ってから最良の RREQ に対して RREP を応答する．

4.1　実験結果

通信継続時間とパケット到達率の関係を図 3 に示す．なお、図 3〜8 ではオリジナルの AODV と単一メトリックを用いた場合及び各継続時間で最もパケット到達率の良かったものだけをプロットしている．最もパケット到達率が良かった重み係数の組み合わせは、通信継続時間が 10 秒の場合 (A=1,M=2,S=2,L=1)、60 秒の場合 (A=1,M=2,S=1,L=1)、120 秒の場合 (A=1,M=1,S=1,L=2) であった．つまり、通信時間が 10 秒と短い場合は、移動速度メトリックと受信強度メトリックが良い経路、つまりなるべく移動せず近くにいるノードを中継ノードとして経路を構築するのが最も良い結果となる．通信時間が 120 秒と長い場合、リンクの生存時間を強く考慮して経路を構築することでパケット到達率が最良となる．いずれの場合でも単独でメトリックを使うよりも、すべてのメトリックを考慮した上で、より強く考慮するメトリックの重みを大きくするほうが良い到達率を得ることができる．

図 4 に、平均パケット遅延を示す．パケット遅延も、ほとんどの場合重みを組み合わせて経路を選択するほうが良い結果となっている．

オリジナルの AODV では、中間ノードは 2 度目以降に受信した RREQ はそのまま破棄するが、提案方式ではメトリックの良い RREQ を後から受信した場合は再度転送する．そのため、提案方式では RREQ の増加が懸念される．しかし、図 6 に示すように、特に通信継続時間が短い場合は良い経路を選択することで経路障害が少なくなり通信中の経路再構築 (ローカルリペア) 回数が減少する．それにより、オリジナルの AODV よりも RREQ メッセージ負荷は減少している (図 5)．ローカルリペアの回数は、オリジナルの AODV に比べ最も良い重み組み合わせの場合 2〜8 回程度少なくなっている．

図 7 に、平均経路ホップ数を示す．平均経路ホップ数は、単一メトリックを用いた場合が最も小さくなる．複数のメトリックを考慮する場合、より長い経路を選択する傾向が強くなり

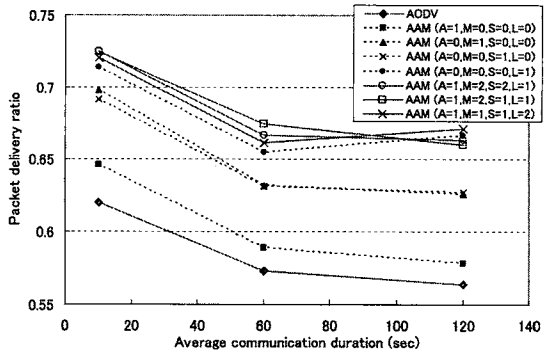

図 3　通信継続時間とパケット到達率
Fig. 3　Packet delivery ratio vs. communication duration

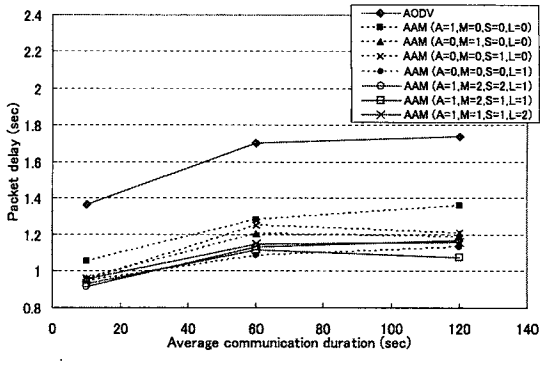

図 4　通信継続時間とパケット遅延
Fig. 4　Packet delay vs. communication duration

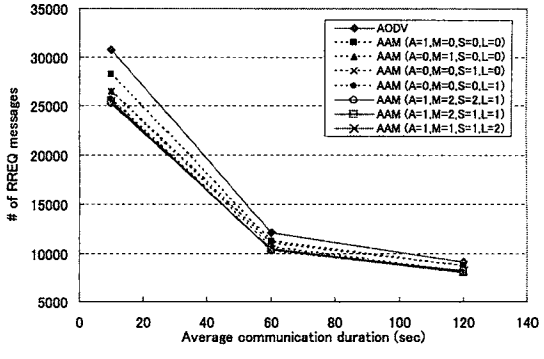

図 5　通信継続時間と発生 RREQ 数
Fig. 5　RREQ messages load vs. communication duration

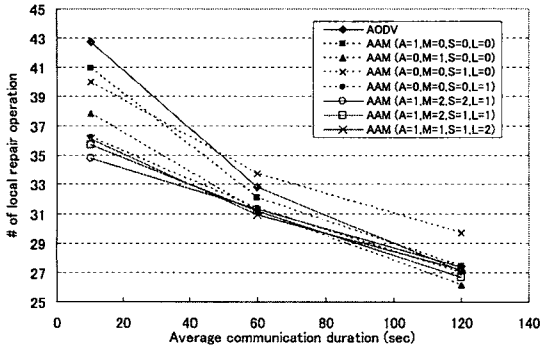

図 6 通信継続時間とローカルリペア回数

Fig. 6 Number of local repair vs. communication duration

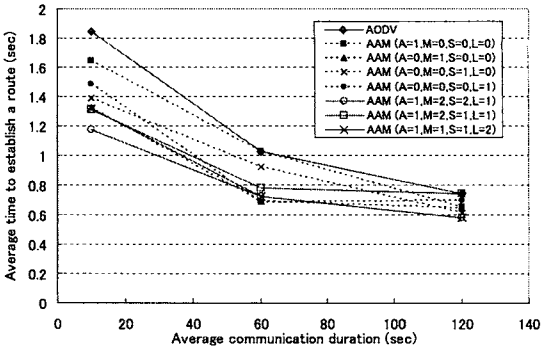

図 8 経路構築時間

Fig. 8 Time to establish a route

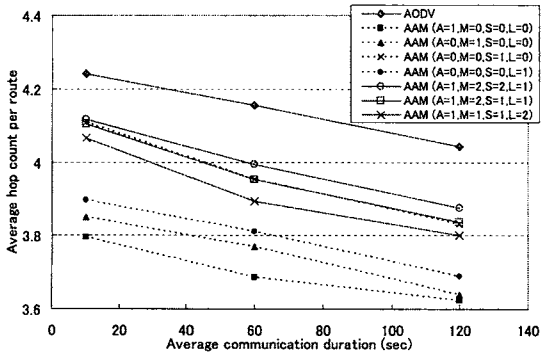

図 7 平均経路ホップ数

Fig. 7 Average hop count

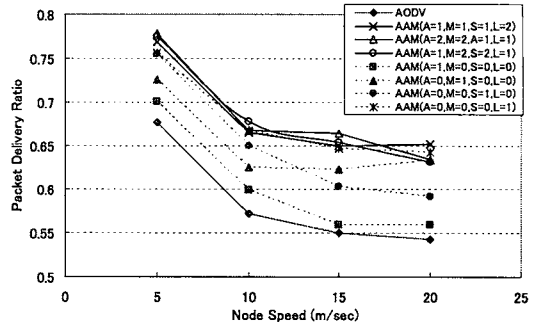

図 9 ノード移動速度とパケット到達率

Fig. 9 Packet delivery ratio vs. nodes' speed

ホップ数が増加する．オリジナルの AODV の平均経路長が最も長くなっている．AODV では、パケット衝突によっていくつかのノードが RREQ を受信できないことがある．そのためオリジナルの AODV では、しばしば最短でない経路を構築する．AODV-AAM においても RREQ の衝突は発生するが、メトリックの良い RREQ は再転送されるため RREQ の取りこぼしによる影響が緩和される．また、後から受信した RREQ のほうが良ければそちらを選択するため、良い経路を選択しやすくなる．このような要因から、AODV-AAM の経路長はオリジナルよりも短くなっていると考えられる．

最後に、図 8 に経路構築にかかった平均時間を示す．AODV-AAM では、最初に RREQ を受信してから RREP を返すまでに 0.3 秒待つため、オリジナルの AODV よりも経路構築時間が長くなるように思われる．しかし、実験結果では逆にオリジナルの AODV のほうが経路構築時間が長くなっている．これはローカルリペアが原因であると考えられる．パケット到達率を維持するため、AODV-AAM もオリジナルの AODV と同様にローカルリペア時は最初に受信した RREQ に応答する．ローカルリペアの経路修復時間は、障害端ノードと宛先ノードがどのくらい離れているかによって決まる．リンク生存時間やノード移動速度をメトリックとして考慮しない場合、経路を構築するノードは時間とともに離れやすくなる．経路障害が発生した時点で、障害端ノードと宛先ノードの距離はオリジナルの AODV が最も大きくなり、経路修復にも時間を要する．Hop 数の増加についても同じことが言える．

4.2 ノード移動特性に対する効果

本節では、ノードの移動特性に対するパケット到達率への影響について考察する．

図 9 に、ノードの移動速度とパケット到達率の関係を示す．パケット到達率が最も良かった重みの組み合わせは、移動速度が 5m/sec の場合 (A=2,M=2,S=1,L=1)、10m/sec の場合 (A=1,M=2,S=2,L=1)、15m/sec の場合 (A=2,M=2,S=1,L=1)、20m/sec の場合 (A=1,M=1,S=1,L=2) であった．移動速度が 5〜10m/sec と遅い場合は、各組み合わせで到達率にほとんど変化は無い．15m/sec ではノードの移動メトリックの重みを高くし、20m/sec ではリンク生存時間メトリックの重みを高くすることでパケット到達率を改善することができる．

図 10 に、ノードの移動間隔とパケット到達率の関係を示す．パケット到達率が最も良かった重みの組み合わせは、移動間隔が 30 秒の場合 (A=2,M=1,S=1,L=1)、60 秒の場合 (A=1,M=1,S=1,L=2)、120 秒の場合 (A=1,M=0,S=0,L=1) であった．移動間隔が長い場合、つまりノードがそれほど頻繁

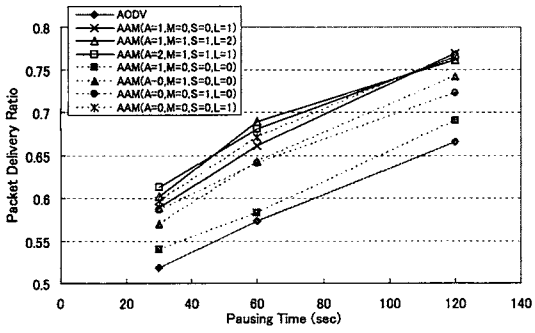

図 10 移動間隔とパケット到達率

Fig. 10 Packet delivery ratio vs. pausing time

に移動しない場合、移動速度メトリックや受信強度メトリックを考慮せず、経路数などを考慮するほうが良い到達率を得られることがわかる.

5. むすび

本論文では、アプリケーションの通信特性に応じて最適な経路を選択する無線マルチホップネットワークのリアクティブ経路制御方式を提案した. 提案方式では、送信ノードが経路要求メッセージの中で複数メトリックに対する計算重み係数を指定することで、中間ノードおよび宛先ノードは送信ノードが望む経路を選択できる. 通信継続時間を変化させたシミュレーションにより、オリジナルの AODV 及び単独でメトリックを使う場合に比べ、複数のメトリックを重み付けして同時に利用するほうが良いパケット到達率が得られることがわかった. また、通信継続時間の長短により、最良のパケット到達率を実現するメトリック重み係数の組み合わせが異なることを検証した.

今後、さらに異なる通信特性（パケットサイズ、バーストトラフィック、通信レート等）においてもメトリック計算重み係数の最適値を検証してゆく予定である.

文 献

[1] M.Abolhassan, T.Wysocki and E.A.Dutkiewicz, "A review of routing protocols for mobile ad hoc networks", Ad Hoc Networks, vol.2, no.1, pp.1-22, Jan. 2004

[2] E.M.Royer and C.-K. Toh, "A Review of Current Routing Protocols for Ad-Hoc Mobile Wireless Networks", IEEE Pers. COmmum., Apr. 1999

[3] C.Perkins, E.Belding-Royer and S.Das,"Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing", IETF RFC3561, July 2003

[4] C.-K. Toh, " Associativity-Based Routing For Ad-Hoc Mobile Networks ", Journal on Wireless Personal Communications vol.4, No.2, pp.103-139, March 1997

[5] R.Dube, C.D.Rais, K.-Y.Wang, and S.K.Tripathi, " Signal Stability based Adaptive Routing (SSA) for Ad Hoc Mobile Networks ", IEEE Personal Communication Magagine, pp.36-45, Feb 1997

[6] W.Su and Mario Gerla, " IPv6 flow handoff in ad-hoc wireless networks using mobility prediction ", Proc. IEEE GLOBECOM, pp.271-275, Dec. 1999

[7] H.Hassanein and A.Zhou, " Routing with load balancing in wireless ad hoc networks ", Proc. MSWiM 2001, pp89-96, 2001

[8] S.Lee and M.Gerla, " Dynamic load-aware routing in ad hoc networks ", Proc. ICC 2001, June 2001