

QoS 制御を考慮した DSR プロトコル拡張の一考察

A Study on Extensions of DSR Protocol Considering QoS Controls

伊藤 雅[†]
Masaru ITOH

Abstract: This paper discusses some extensions of DSR (Dynamic Source Routing) protocol to consider QoS (Quality of Service) controls. IEEE 802.11e is wireless LAN standards for QoS. It specifies two functions, that is, EDCA (Enhanced Distributed Channel Access) and HCCA (Hybrid coordination function Controlled Channel Access). EDCA has two modes; one is an ad hoc mode and the other is an infrastructure mode. The proposed method focuses on the ad hoc mode in EDCA that classifies all data-frames into four access categories such as voice, video, text, or background. These access categories are indicated by AC_VO, AC_VI, AC_BE, and AC_BK, respectively. They are associated with contention windows that have an effect on setting a back-off time. So firstly, I propose a method for dynamically changing a range of contention windows after getting the number of neighbors of the node. Secondly, I propose three features adding to the original DSR protocol so as to consider QoS in the followings: 1) the first feature is to put an access category into an option field of control packets for DSR, 2) the second is to manage route-caches using only RREP packets, and 3) the last is to limit the hop-count metric.

1. はじめに

IEEE 802.11 無線 LAN^{1, 2)} のアクセス制御には自律分散制御と集中制御の2つがある。前者を DCF (Distributed Coordination Function)、後者を PCF (Point Coordination Function) という。DCF はアクセスポイントをもたず、PCF はアクセスポイント (親機) が順に子機に問い合わせ (これをポーリングという)、応答のあった子機に送信権を与える。本稿では自律分散制御を研究対象とする。

通信エリア内で実際に送受信できるのは1対のノードだけである。他のノードはその間、チャネルが使用中 (Busy: ビジー) であるので、アイドル状態 (Idle: 未使用状態) になるまで次の送信を延期することになる。これが CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) 方式²⁾ の自律分散制御である。

近年、無線 LAN でマルチメディアやリアルタイムのデータを送受信する仕組みが要求されるようになった。このような QoS (Quality of Service) を実現する規格として IEEE 802.11e³⁾ がある。標準化作業は 2005 年 9 月に完了している。これには EDCA (Enhanced Distributed Channel Access) と HCCA (Hybrid Coordination Function Controlled Channel Access) が規定されている。EDCA は従来の DCF の拡張であり、HCCA は従来の PCF の拡張と捉えることができる。ここではスループットの向上を目指し、EDCA をさらにきめ細かく制御する方法を提案する。

IEEE 802.11e はノード間同士で直接通信し合う、直接リンクプロトコル (Direct Link Protocol)⁴⁾ を規定している

に過ぎない。一方、各ノードが自律分散的に通信し合うアドホックネットワークでは、中継ノードを介して通信するマルチホップ機能を備えているのが一般的である。送信元ノードからの通信要求後に中継ノードを介し、宛先ノードまでの経路を探索するリアクティブ型ルーティングプロトコルのひとつに DSR (Dynamic Source Routing) プロトコル⁵⁾ がある。しかし、DSR プロトコルは IEEE 802.11e 対応ノードの利用を想定していない。そこで、IEEE 802.11e 対応ノードで利用できるように DSR プロトコルを拡張する。これが2つ目の提案である。

DCF ではコンテンションウィンドウ (CW: Contention Window) と呼ばれる正区間 $[CW_{min}, CW_{max}]$ に属する乱数を発生させ、バックオフ時間と呼ばれる送信間隔時間を決定して、ノード間のアクセス制御を行っている。詳細については後述する。IEEE 802.11e では、データ種別ごとの優先送信を可能にするために EDCA を設けている。EDCA ではデータ種別を優先度順に音声 (AC_VO)、ビデオ (AC_VI)、ベストエフォート (AC_BE) およびバックグラウンド (AC_BK) の4つのアクセスカテゴリ (AC: Access Category) に分類する。通常、表1のような EDCA パラメータ⁶⁾ でコンテンションウィンドウを規定することが多い。数字はスロットタイム数である。EDCA のパフォーマンスに関しては、Yi ら⁷⁾ の論文が詳しい。

Luca ら⁸⁾ は EDCA 無線 LAN エリアに IEEE 802.11e 非対応ノードが存在する場合でも、アクセスポイントが ACK を無視すればその影響を和らげることができることを提案している。優先度の高い音声やビデオデータの送信時には、コンテンションウィンドウの幅が狭いため、送信ノードが増えるとフレーム衝突率が高くなる。IEEE 802.11e のインフラ

[†] 愛知工業大学 経営情報科学部 情報科学科 (豊田市)

ストラクチャモードでのフレーム衝突を改善する河村ら⁹⁾の研究もある。どちらも IEEE 802.11e のアドホックモードでの利用は考慮していない。提案法ではアクセスポイントを介さないアドホックモードでのフレーム衝突を減らすという視点で問題を捉えている。この点で先行研究の Luca ら⁸⁾や河村ら⁹⁾の方策とは異なる。

アドホックネットワークで IEEE 802.11e 対応ノードを利用することにより、送信ノードはデータ種別ごとに優先的にデータを送信できる。しかし中継ノードが IEEE 802.11e 非対応ノードの場合、次ホップの通信は従来の DCF となり、優先的にデータを送信できない。だから DCF 用に設計された DSR プロトコルの拡張が必要となるのである。

以降では、2 章で DSR プロトコルの拡張、3 章で IEEE 802.11e アドホックモードの拡張についてそれぞれ提案する。4 章では性能評価が必要となるフレーム衝突率とスループットの算定法について述べる。5 章では提案法の性能評価をシミュレーションで行い、その結果について考察する。最後に 6 章でまとめと今後の課題について述べる。

尚、本稿は第 5 回情報科学技術フォーラムで発表した内容¹⁰⁾に大幅な加筆修正を与え、シミュレーション結果に関してより詳細な考察を与えたものである。

2. DSR プロトコルの拡張

DSR プロトコルを IEEE 802.11e 対応ノードに適用し、リアルタイムデータやマルチメディアデータなどの伝送にはオリジナルの DSR プロトコルを拡張する必要がある。

2.1 DSR ヘッダのオプション領域の利用

送信元ノードがビデオなどのマルチメディアデータを送る通信要求であれば、IEEE 802.11e の EDCA チャネルアクセスの AC_VI アクセスカテゴリで RREQ (Route Request) パケットを送信する。メールなどの非リアルタイムデータであれば、従来の DCF チャネルアクセスに相当する AC_BE アクセスカテゴリで RREQ パケットを送信する。RREQ パケットを受信したノードは、次ホップへ RREQ パケットを送信する時も、そのアクセスカテゴリで送信する。それには図 1 のように DSR ヘッダのオプション領域にアクセスカテゴリを格納して、RREQ パケットを送信すればよい。

RREQ パケットを受信した中継ノードが次ホップに RREQ パケットを送信する際には、図 2 のように RREQ パケットの DSR ヘッダのオプション領域からアクセスカテゴリを得て、そのデータ種別に従って RREQ パケット

を送信することになる。RREQ パケットを受信したノードが IEEE 802.11e 非対応でかつ受信したアクセスカテゴリが AC_VI または AC_VO であった場合には、次ホップへの RREQ パケットの送信は行わない。

2.2 IEEE 802.11e 対応ルートキャッシュ

DSR プロトコルでは、送信元ノードが RREQ パケットを受信すると、RREP (Route Reply) パケットを返信するが、送信元ノードに返信される RREP パケットは 1 つだけとは限らない。複数のノードから RREP パケットが返信されてくこともあり得る。DSR プロトコルでは最初に受信した RREP パケットに付加されている経路、または最短ホップの経路でパケット送信を試みることになっている。

経路が決まってからの RREP パケットの役割は、送信元ノード、宛先ノードおよび中継ノードが持つルートキャッシュの経路情報を追加・更新することである。ノードが持つルートキャッシュは、RREP パケット以外に、RREQ パケットに付加されている経路もルートキャッシュに追加されるため、ルートキャッシュは頻繁に更新される。

しかし、ルートキャッシュの記憶域は限られている。リンク切れした際の代替経路情報が正しい保証もない。リンク切れ時点で中継ノードが消滅している可能性があるからである。その場合は再度、経路探索を行わなくてはならない。

そこで、まず、RREP パケットを受取ったノードは、そのパケットに付加されている経路のみをルートキャッシュすることを提案する。さらに、その経路上にある中継ノードがすべて IEEE 802.11e 対応ノードである経路のみをルートキャッシュの対象とすることも併せて提案する。理由はノード消滅時に他の経路での送信を再開したいときに、その経路でデータ種別による優先送信が可能であるか否かを把握できるようにするためである。これら 2 点を満足するルートキャッシュをここでは特に、IEEE 802.11e 対応ルートキャッシュと呼ぶことにする。

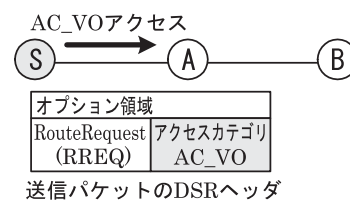


図 1 RREQ パケットの送信

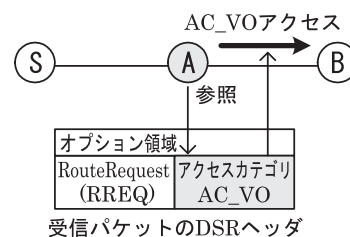


図 2 RREQ パケットの中継

表 1 コンテンションウィンドウのデフォルト値

チャネルアクセス種別	CWmin	CWmax	AIFS
EDCA (AC_VO)	7	15	2
EDCA (AC_VI)	15	31	2
EDCA (AC_BE)	31	1023	3
EDCA (AC_BK)	31	1023	7

AIFS: Arbitration Inter-Frame Space

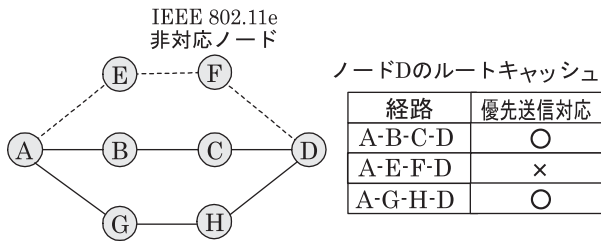


図3 IEEE 802.11e 対応ルートキャッシュ

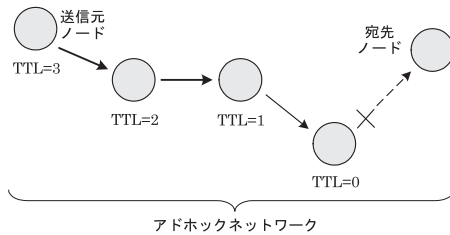


図4 ホップ数を3に制限した例

従来のルートキャッシュとの違いを図3で説明する。経路上のすべてが IEEE 802.11e 対応ノードである経路だけをキャッシュしているのが特徴である。途中で IEEE 802.11e 非対応ノードがある場合、その経路はキャッシュの対象から除外する。DSR プロトコルの従来のルートキャッシュの概念では、この経路も記憶されてしまう。これによって、リンク切断時でも効率よく再経路探索ができ、しかも IEEE 802.11e に対応した優先送信での通信が再開可能となる。

提案する IEEE 802.11e 対応ルートキャッシュでは RREP パケットに含まれている経路のみを記憶するので、記憶域の無駄も少なく、ある程度時間が経過しても有効な経路情報が残っている可能性が高い。

2・3 ホップ数の制限

DSR プロトコルでは、ホップ数の制限は特に規定されていない。ホップ数の大きい経路は、通信が不安定になりがちである。しかも RREQ パケットを広い範囲で拡散させてしまうため、ホップ数の増大とともにエンドツーエンドのパケット送信時間は伸びる傾向にある。

そこで、図4のように IP ヘッダフィールドの TTL (Time To Live) に RREQ パケットの転送回数を記録し、RREQ パケットを受け取ったノードがそれを順に減算していき、零になった時点で、RREQ パケットのブロードキャストを停止することにする。これでホップ数を制限できる。

3. IEEE 802.11e アドホックモードの拡張

送信ノードが増加すると、EDCA を利用して音声またはビデオカテゴリのデータを送信するとフレーム衝突が起き易くなる。そこで各ノードが隣接ノードの台数を把握し、EDCA パラメータを動的に変更できるよう IEEE 802.11e アドホックモードを拡張することを提案する。

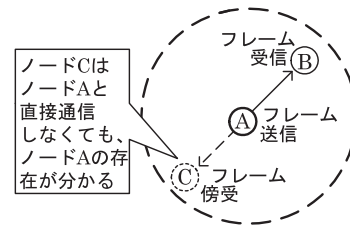


図5 フレームの受信と傍受の例

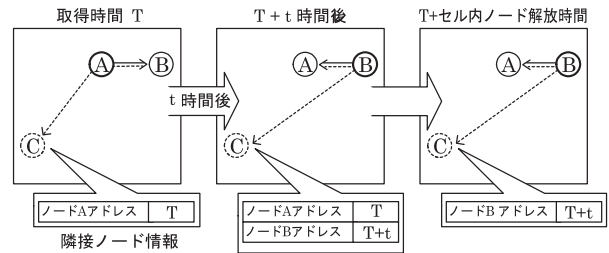
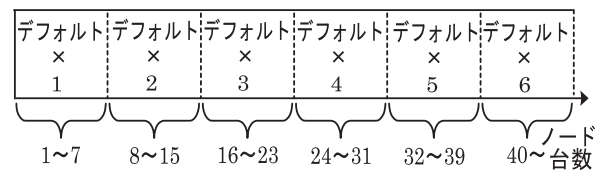


図6 ノードCの隣接ノード情報の更新状況



e.g.) $m = 4$ if $c_n = 24$ for node-n

図7 コンテンションウィンドウのバイアス値 m

3・1 ノード台数の把握

アクセスカテゴリごとの contention window の上下限値 $CW_{max}^*[AC]$ と $CW_{min}^*[AC]$ をノード数によって変更するには、各ノードが隣接するノードの台数を知る必要がある。無線 LAN では、送信ノードが受信ノードにフレームを送信する際、自分の MAC アドレスと、相手の MAC アドレスをフレームに付加して送信を行っている。図5に示すように、送信ノードが送信したフレームは隣接するすべてのノードが傍受している。そして自分の MAC アドレスが傍受したフレームに含まれている場合にだけ、そのフレームを取り込むようになっている。

各ノードは送信ノードの送信フレームを受信または傍受することで送信ノードの MAC アドレスを識別できる。

3・2 EDCA パラメータの動的変更

図6左のように、ノードCが送信元AのMACアドレスを傍受した際、ノードCの隣接ノード一覧にはノードAのMACアドレスとその取得時間Tが記録される。各ノードには固有のセル内ノード解放時間 (cell node release time) が設定されており、図6右のように、この時間を経過した隣接ノード情報は自動的に破棄されることになる。

このように隣接ノード情報が逐次更新できれば、ある時

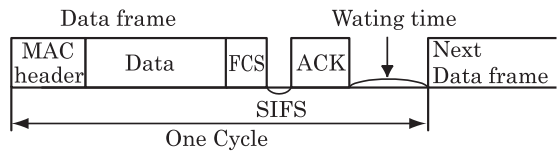


図 8 スループットの計算モデル

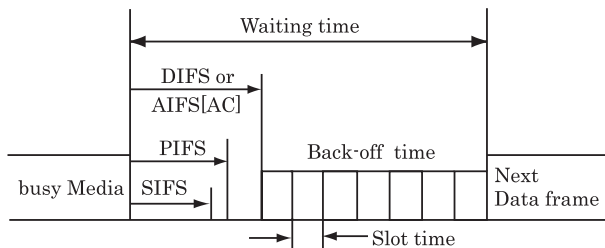


図 9 待機時間の詳細モデル

刻での隣接ノード台数 (c_n) が把握できる。この係数 c_n を使ってコンテンションウィンドウのバイアス値 m を求める (図 7 参照)。最後に式 (1)~(2) によってアクセスカテゴリごとにコンテンションウィンドウの上下限值 $CW_{min}^*[AC]$ と $CW_{max}^*[AC]$ を動的に変更する。

$$CW_{min}^*[AC] = m \cdot CW_{min}[AC] \quad (1)$$

$$CW_{max}^*[AC] = m \cdot CW_{max}[AC] \quad (2)$$

ここで、 $CW_{min}[AC]$ と $CW_{max}[AC]$ は表 1 にあるコンテンションウィンドウのデフォルト値である。コンテンションウィンドウの上下限値は次章のバックオフ時間の計算で必要となる。このようにコンテンションウィンドウの上下限を動的に変更するように拡張したプロトコルをここでは拡張 802.11e (Extended 802.11e) と呼ぶことにする。

4. スループットとフレーム衝突率

シミュレーションで取り扱う評価指標について説明する。

4.1 スループット

スループット (throughput) とは、単位時間当たりのデータの転送速度のことである。図 8 に DCF チャンネルアクセスと EDCA チャンネルアクセスのスループットの計算モデル²⁾を示す。IEEE 802.11 のデータフレームは、MAC ヘッダ、データ部および FCS (Frame Check Sequence) が含まれる。各フレームのデータサイズを表 2 上部に示す。パラメータ値は文献¹¹⁾に基づいて設定している。図 8 の中にある待機時間 (waiting time) の詳細モデルが図 9 である。

IEEE 802.11e の各 EDCA チャンネルアクセスのバックオフ時間は次のようにして計算される。順を追って説明する。まず、図 9 にある短フレーム間隔 SIFS (Short Inter-Frame Space) とは、ACK (Acknowledgement) フレーム伝送に用いられる最小単位のフレーム間隔 IFS (Inter-Frame Space) のことである。スロットタイム (Slot Time) とは通信で使う一定時間のことである。ポーリング用フレーム間隔 PIFS (Point Coordination Function Inter-Frame Space) と DCF

表 2 スループット計算モデルのパラメータ値

MAC header	24 octet
Data size	1500 octet
FCS size	4 octet
ACK size	14 octet
DIFS	50 μ s
AIFS[AC.BK]	140 μ s
AIFS[AC.BE]	60 μ s
AIFS[AC.VI]	40 μ s
AIFS[AC.VO]	40 μ s
PIFS	30 μ s
Slot time	20 μ s
SIFS	10 μ s

チャンネルアクセス用フレーム間隔 DIFS (DCF Inter-Frame Space) は次式のように計算される。

$$PIFS = SIFS + SlotTime \quad (3)$$

$$DIFS = SIFS + SlotTime \times 2 \quad (4)$$

DIFS を EDCA チャンネルアクセス用に拡張した概念が AIFS[AC] である。AC はアクセスカテゴリを示す。AIFS とは Arbitration Inter-Frame Space の略である。フレーム送信までの強制待機時間が AIFS[AC] であると捉えてよい。表 2 下部に示すように音声 (AC.VO) とビデオ (AC.VI) のフレーム送信間隔は 2 スロットタイムと比較的短く設定してある。それでもフレーム衝突は起こる。衝突が起こったときにバックオフ制御を行うが、そこで必要となるのが式 (5) で定義されるバックオフ時間 (back-off time) である。衝突発生後、このスロットタイム分だけ待機時間を延長するのである。これによってフレームの再衝突を低減できる。

$$\text{バックオフ時間} = r \times SlotTime \quad (5)$$

ここで、乱数 r は $r \in [0, CW]$ の整数であり、コンテンションウィンドウ CW は $CW_{min}^*[AC] \leq CW \leq CW_{max}^*[AC]$ の範囲の値である。フレーム衝突や伝送エラーが引き続き発生した場合には、式 (6) で CW を更新する。

$$CW = (CW_{min}^*[AC] + 1) \times 2^n - 1, \quad n: \text{再送回数} \quad (6)$$

通信時間は式 (7) のようにフレーム送信時間と待機時間の合計で評価する。ここでフレーム送信時間は式 (8) で一意に評価できる。しかし待機時間については、DCF チャンネルアクセスの場合は式 (9) で、EDCA チャンネルアクセスの場合は式 (10) で評価することになる。

$$\text{通信時間} = \text{フレーム送信時間} + \text{待機時間} \quad (7)$$

フレーム送信時間

$$= \frac{\text{データフレームサイズ} + \text{ACK フレームサイズ}}{\text{伝送レート}} \quad (8)$$

$$\text{待機時間} = DIFS + \text{バックオフ時間 (for DCF)} \quad (9)$$

$$\text{待機時間} = AIFS[AC] + \text{バックオフ時間 (for EDCA)} \quad (10)$$

スループットは単位時間当たりの送信データ量であるから、結局、次式のようにして算出できる。

$$\text{スループット} = \frac{\text{データサイズ}}{\text{通信時間}} \quad (11)$$

4・2 フレーム衝突率

DCF チャンネルアクセスや EDCA チャンネルアクセスの際に、複数の送信ノードが同時にフレームを送信すると正しく受信ノードへデータフレームが届かない。これをフレーム衝突と呼ぶ。フレーム送信数に対するフレーム衝突数の割合をフレーム衝突率 (frame collision rate) として定義する。

4・3 再経路探索時間と通信再開遅延時間

再経路探索時間は、リンク切れ後の経路探索時間と経路応答時間の和で算出する。経路探索時間とは、送信元ノードが RREQ パケットをブロードキャストし、中継ノードを経て、RREQ パケットが宛先ノードに到着するまでの時間をいう。経路応答時間とは、宛先ノードが RREP パケットを送信して、送信元ノードがそれを受け取るまでの時間である。

通信再開遅延時間は、経路途中でノード消滅によって次ホップへ送信できなくなったとき、IEEE 802.11e 対応ルートキャッシュを使って通信が再開するまでの時間と定義する。

5. シミュレーション結果および考察

提案法の性能評価を行うため、Java 2 Standard Edition 1.4.2 でシミュレータを開発し、Pentium4 2.8GHz, 1GB RAM で検証を行った。

5・1 シミュレーションの前提条件と想定環境

ノードはすべて IEEE 802.11e 対応ノードとし、伝送レートは 54Mbps とする。IEEE 802.11e 対応ルートキャッシュに保持できる経路数は 64 とした。

送信元ノードは 1528 オクテットのデータフレームをバースト的に送信し、ノード間のスループットの計算には式 (11) を基に平均スループットで評価した。単位は Kbps である。スロットタイムなどのパラメータ値は表 2 を使用した。

ノードを図 10 のように 150m×150m のオープンエリアにランダムに配置し、台数を 6 台、14 台、22 台、30 台、38 台にして検証を行った。ノード間は双方向通信を仮定した。

5・2 全ノード同一チャンネルアクセス時の性能評価

エリア内のノードが表 3 のような通信要求で発信したとする。つまり、奇数ノードが 1000 ミリ秒毎に順に送信元となり、偶数ノードを宛先として送信を行う。双方向通信を仮定しているので、今度は宛先ノードが送信元ノードへその 100 ミリ後に通信要求を発する。これでエンドツーエンドの上りと下り合わせて 2 本の通信が発生することになる。表 3 のアクセスカテゴリは AC_BE (DCF 相当) であるが、AC_VO および AC_VI についても同様の実験を試みた。

ノード 1~ノード 6 までのネットワークとノード 1~ノード 14 までのネットワークを対象に、これら 2 つのネット

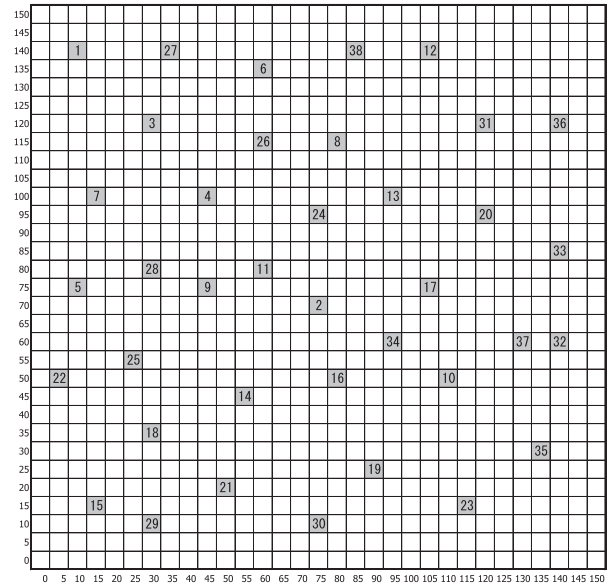


図 10 ノード配置図

表 3 通信要求一覧

No.	送信元	宛先	経過時間 (ms)	AC
1	1	2	1000	AC_BE
2	2	1	1100	AC_BE
3	3	4	2000	AC_BE
4	4	3	2100	AC_BE
5	5	6	3000	AC_BE
6	6	5	3100	AC_BE
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
37	37	38	19000	AC_BE
38	38	37	19100	AC_BE

表 4 平均経路探索時間

プロトコル	アクセスカテゴリ	平均経路探索時間
標準 DSR	DCF	2530.0ms
拡張 DSR	EDCA (AC_VO)	1167.1ms

ワークで出来上がったリンク図を図 11 と図 12 に示す。これらのネットワークを構築するまでの 1 経路当たりの平均経路探索時間を従来の DSR プロトコルと提案した拡張 DSR プロトコルで比較してみた。結果を表 4 に示す。DSR プロトコルの拡張においてホップ数を最大 3 に限定している関係上、標準の DCF チャンネルアクセスを使った DSR プロトコルよりも提案法では約半分の時間で経路探索が終了している。2 つのリンク図で確認すると、確かにホップ数は最大 3 までに収まっていることが確認できる。

提案法の拡張 802.11e (Extended 802.11e) のチャンネルアクセス別の平均スループットは、38×2 本の全リンクがすべて同一アクセスカテゴリに属するので、一概には言えないが、AC_VO < AC_BE < AC_VI の傾向が見られた。ビデオ (AC_VI) と音声 (AC_VO) のアクセスカテゴリについて、従来の IEEE 802.11e (これを Normal802.11e と書くことにする) と提案法の Extended802.11e を平均スループットで

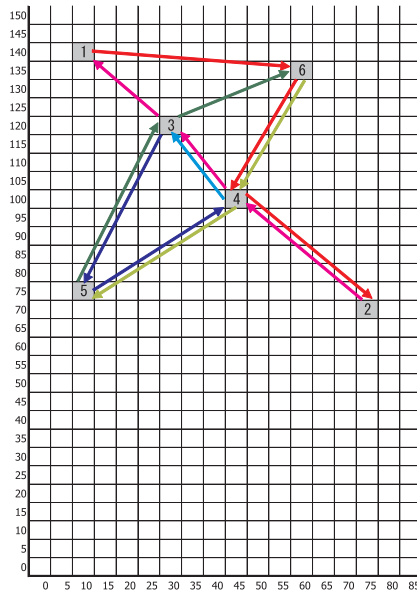


図 11 ノード数 6 で構築されたネットワークのリンク図

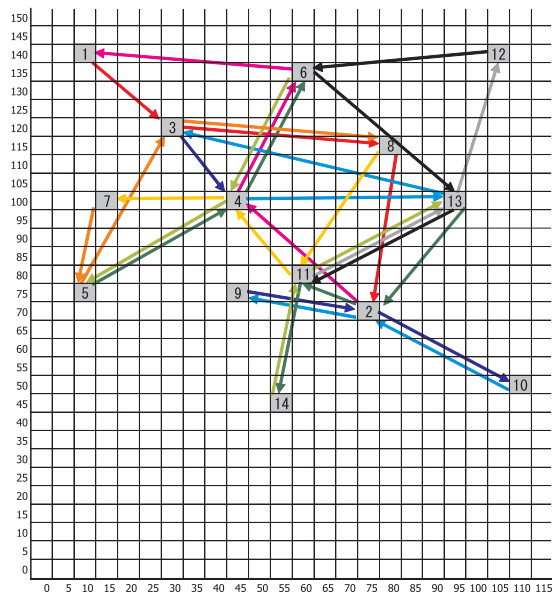


図 12 ノード数 14 で構築されたネットワークのリンク図

比較したのが図 13 と図 14 である。

ビデオについては僅かではあるが提案法の優位性を確認できる。しかし音声についての優位性はほとんど確認できない。これをフレーム衝突率の観点から考察してみる。AC.VI チャンネルアクセスのフレーム衝突率を図 15 に示し、AC.VO チャンネルアクセスのそれを図 16 にまとめてみた。横軸はスループットのときと同様、ノード台数である。縦軸は今度はフレーム衝突率の平均となっている。ビデオ (AC.VI) カテゴリの衝突率が提案法では約 10%程度改善されていることが分かる。一方、音声 (AC.VO) カテゴリの衝突率の改善幅はかなり小さい。結局、この差がスループットに多少なりとも影響を与えていると解釈できる。

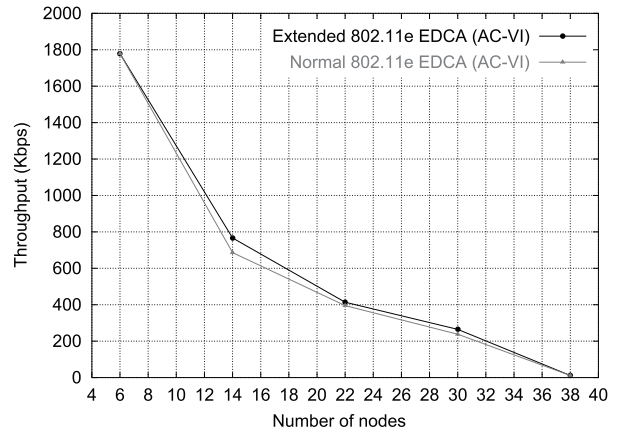


図 13 AC.VI チャンネルアクセスの平均スループット

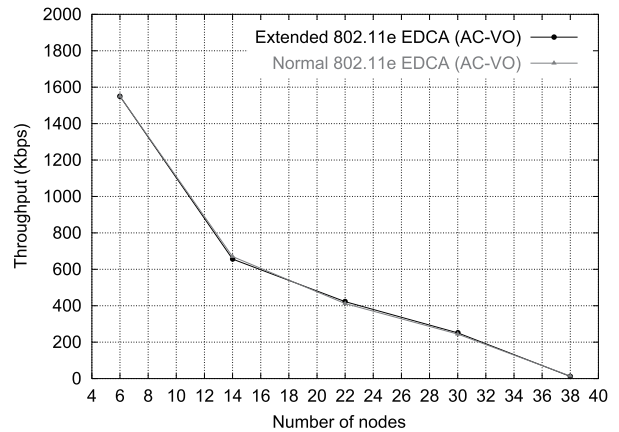


図 14 AC.VO チャンネルアクセスの平均スループット

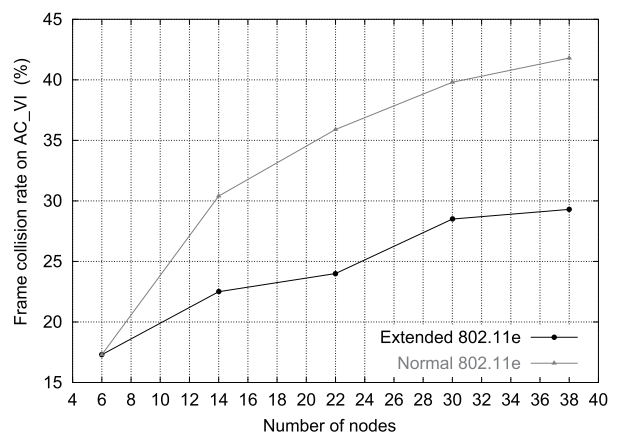


図 15 AC.VI チャンネルアクセスのフレーム衝突率

5・3 チャンネルアクセス混在時の性能評価

ここまではアクセスカテゴリがすべて同一の通信要求である場合の検証結果であった。ここからはアクセスカテゴリが混在する場合について検証してみる。図 13 と図 14 の結果を参考に最大 24 台までのノード台数で検証した。ノード配置は図 10 のままで、ノード 25 以降を無視することになる。

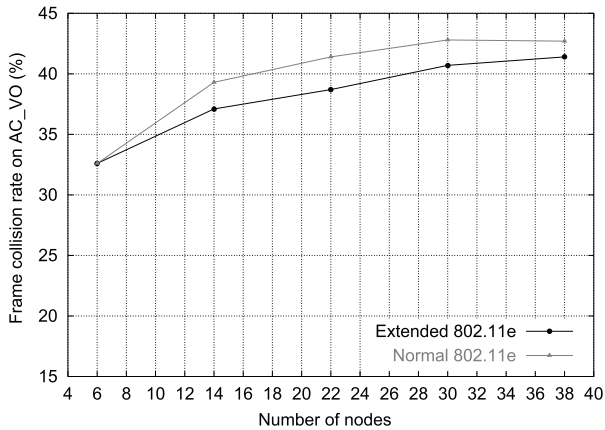


図 16 AC_VO チャンネルアクセスのフレーム衝突率

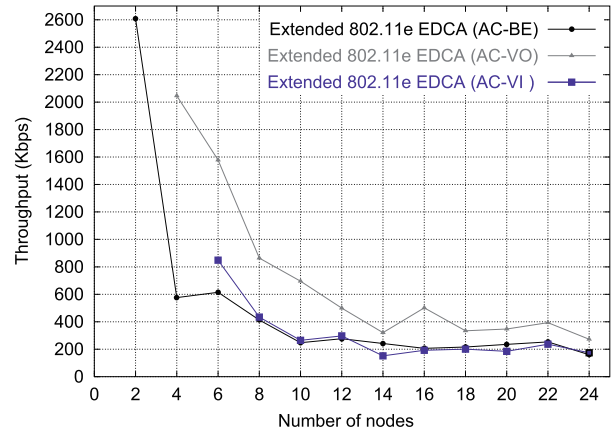


図 17 チャンネルアクセス混在時の平均スループット

表 5 アクセスカテゴリ混在時の通信要求一覧

No.	送信元	宛先	経過時間 (ms)	AC
1	1	2	1000	AC_BE
2	2	1	1100	AC_BE
3	3	4	2000	AC_VO
4	4	3	2100	AC_VO
5	5	6	3000	AC_VI
6	6	5	3100	AC_VI
7	7	8	4000	AC_BE
8	8	7	4100	AC_BE
9	9	10	5000	AC_VO
10	10	9	5100	AC_VO
11	11	12	6000	AC_VI
12	12	11	6100	AC_VI
13	13	14	7000	AC_BE
14	14	13	7100	AC_BE
15	15	16	8000	AC_VO
16	16	15	8100	AC_VO
17	17	18	9000	AC_VI
18	18	17	9100	AC_VI
19	19	20	10000	AC_BE
20	20	19	10100	AC_BE
21	21	22	11000	AC_VO
22	22	21	11100	AC_VO
23	23	24	12000	AC_VI
24	24	23	12100	AC_VI

アクセスカテゴリ (AC) がベストエフォート (AC_BE)、音声 (AC_VO)、ビデオ (AC_VI) など、これらの通信要求が同一エリアに混在する場合を想定する。通信要求一覧は表 5 の通りである。奇数ノードと偶数ノードはペアになっており双方向で通信すると仮定している。送信元、宛先、経過時間の意味は表 3 と同じである。

ノード 1 からノード 24 までは順次、通信を開始する。順次投入されたときの平均スループットは図 17 のようになった。この図は提案法である拡張 802.11e の EDCA チャンネルアクセスの結果である。スループットに着目すれば、概ね $AC_BE < AC_VI < AC_VO$ の結果になっている。ノード 13 とノード 14 が通信を始めたところで、平均スループットが $AC_BE > AC_VI$ と逆転している。つまりアクセスカテゴリ混在時にも拘らず、音声で帯域確保できていないことに

なる。これは以下のような理由であろうと推察される。

No.12 までの通信経路が確保された時点で AC_BE の通信経路は 4 つ、AC_VO の経路も 4 つ、AC_VI の経路も 4 つ存在する。この段階でスループットはかなり落ちている。ここに AC_BE アクセスカテゴリの通信 No.13 と No.14 が新たに 2 つ割り込んでくる。結果、AC_VO と AC_VI のスループットがさらに落ち込む。落ち込んだ時点で $AC_BE > AC_VI$ の逆転現象が起こった。その後、No.15 と No.16 の AC_VO アクセスカテゴリの通信が始まるが、拡張 802.11e の EDCA チャンネルアクセスでは音声 (AC_VO) とビデオ (AC_VI) が優先されるので、ノード 15 とノード 16 が通信を開始した時点でそれらのスループットは少し上がることになる。以上の繰り返しと考えれば、図 17 の傾向線は概ね正しいと理解できる。

5・4 IEEE 802.11e 対応ルートキャッシュの有効性

提案した IEEE 802.11e 対応ルートキャッシュの検証も行った。表 5 の通信要求があったとして、シミュレーション開始から 12 秒後にノード 4 またはノード 8 を強制的に消滅させる実験をした。2 つを同時に消滅させたわけではない。ノード消滅の時点から IEEE 802.11e 対応ルートキャッシュ情報を用いて通信再開までの所要時間を計測した。

まず最初の実験では、24 台 (ノード 1~ノード 24) のうち、ノード 4 が消滅した時点でノード 3 との通信が途絶えるのは当然である。これ以外に、ノード 1 → ノード 3 → ノード 4 → ノード 2 という経路でデータが送信されていた。ノード 4 の消滅により、ノード 3 がノード 4 へフレームを送信できない状況が発生した。そこでノード 3 が保持するルートキャッシュ情報を使って、ノード 11 を介しノード 2 へフレームを送信する経路を確立して、通信を再開していた。この状況を示すのが図 18 である。結果、再経路探索を行わず、380.4ms の通信再開遅延時間のみで通信を再開できていた。

次の実験では、ノード 4 ではなくノード 8 を強制的に消滅させた。今度は図 19 のように経路を変更していた。やはり再経路探索を行わず、57.1ms の通信再開遅延時間のみで通信を再開していたことを確認した。表 4 に示した平均経路探

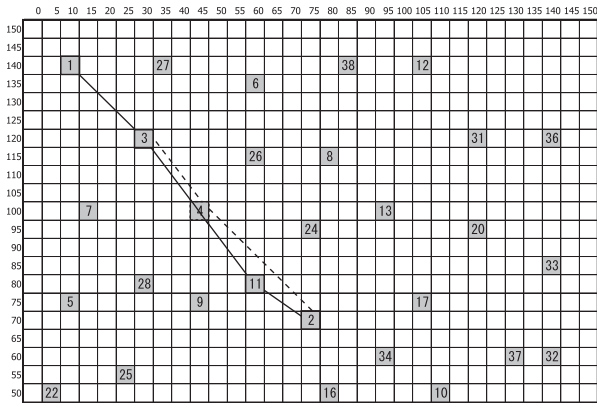


図 18 ノード 4 消滅による経路変更

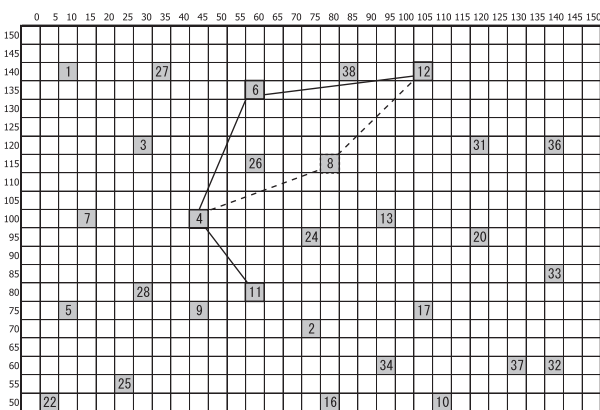


図 19 ノード 8 消滅による経路変更

索時間に比べれば、非常に短い時間で通信の再開に成功しているといえる。

6. おわりに

まず、DSR プロトコルに関する 3 つの拡張を提案した。第 1 に、オプション領域を利用した IEEE 802.11e アクセスカテゴリへの対応。第 2 に、RREP パケットによる IEEE 802.11 対応ルートキャッシュの方法、第 3 にホップ数制限によるネットワークの安定化である。さらに、IEEE 802.11e アドホックモードの拡張として EDCA パラメータの動的変更方法について提案した。

Java2 SE 1.4.2 でシミュレータを開発し、スループット、フレーム衝突率、そして経路探索時間といった定量的評価指標を用いて提案法の有効性を検証した。フレーム衝突率については提案法で数%から 10%程度を減少させることに成功した。スループットについては顕著な改善には至らなかった。この結果より、現行の IEEE 802.11e のコンテンションウィンドウで十分機能しており、隣接するノード台数を考慮してその上下限値を動的に変更したとしても、スループット向上への直接的寄与は少ないと推測される。

同一エリアに 20 台以上のノードが存在すると、どのアクセスカテゴリでも一定帯域の通信確保が困難であることが実験からも確認できた。この解決には制御パケットやデータパケットを抑制する新たな仕組みが必要であろう。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、平成 18 年本学大学院生産システム工学専攻修了の朝居宏明氏（現在 日本インシュレーション株式会社 勤務）には多大な協力を得た。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) Mihaela Cardei, Ionut Cardei, and Ding-Zhu Du: Resource Management in Wireless Networking, Springer, 2005.
- 2) 守倉正博, 久保田周治: 改訂版 802.11 高速無線 LAN 教科書, インプレス, 2005.
- 3) IEEE Std. 802.11e-2005, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specification, Amendment 8: Medium Access Control (MAC) Quality of Service Enhancements, November 2005.
- 4) Yang Xiao: “IEEE 802.11e: QoS Provisioning at the MAC Layer”, IEEE Wireless Communications, Vol. 11, No. 3, pp. 72–79, June 2004.
- 5) David B. Johnson, David A. Maltz, and Yih-Chun Hu: The Dynamic Source Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks (DSR), IETF MANET Working Group Internet-Draft, July 2004.
- 6) Ali Hamidian and Ulf Körner: “An enhancement to the IEEE 802.11e EDCA providing QoS guarantees”, Telecommunication Systems - Modeling, Analysis, Design and Management, Vol. 31, No. 2-3, pp. 195–212, 2006.
- 7) Yi-Wen Lan, Jui-Hung Yeh, Jyh-Cheng Chen, and Zi-Tsan Chou: “Performance Enhancement of IEEE 802.11e EDCA by Contention Adaption”, 2005 IEEE 61st Vehicular Technology Conference, VTC2005-Spring, Vol. 3, pp. 2096–2100, 2005.
- 8) Luca Vollero, Albert Banchs, and Giulio Iannello: “ACKS: A Technique to Reduce the Impact of Legacy Stations in 802.11e EDCA WLANs”, IEEE Communications Letters, Vol. 9, No. 4, pp. 346–348, April 2005.
- 9) 河村憲一, 井上保彦, 小笠原守, 飯塚正孝: “公衆無線 LAN 用 IEEE 802.11e 対応基地局における EDCA パラメータ動的更新機能の開発”, 電子情報通信学会 2005 ソサイエティ大会講演論文集, B-5-183, p. 583, 2005.
- 10) 伊藤雅, 朝居宏明: “QoS 制御を考慮した DSR プロトコルの拡張”, FIT2006 第 5 回情報科学技術フォーラム 一般講演論文集 第 4 分冊, No. L-074, pp. 179–180, 2006.
- 11) 松江英明, 守倉正博, 佐藤明雄, 渡辺和二: 高速ワイヤレスアクセス技術, 電子情報通信学会, 2004.

(受理 平成 21 年 3 月 19 日)