無線アドホックネットワークにおけるIEEE 802.11 DCFのチャネル利用率の改善

中村 直毅[†]，菅沼 拓夫[†]，岡崎 直宣[††]，白鳥 則郎[†]

[†]東北大学大学院情報科学研究科/電気通信研究所 [††]宮崎大学工学部

あらまし IEEE 802.11では，RTS/CTS交換機能により隠れ端末問題を効果的に解決することができる．しかしながら，IEEE 802.11では，予約されたチャネルを開放することができないことから，チャネルの獲得が頻繁に失敗する無線アドホックネットワークにおいては，大幅なチャネル利用率の低下を招く．これを改善する手法としてCRTS方式が提案されているが，標準規格との互換性の問題がある．そこで本稿では，標準規格に準拠しつつ，かつチャネル利用率の低下を改善するIEEE 802.11 with Channel Releaseを提案する．本方式の特徴は，近隣ノードによる自主的なチャネルの解放である．シミュレーション実験では，IEEE802.11と比べ最大24%程度のスプープットの改善および55%程度の通信遅延時間の改善効果が得られ，本提案方式の有効性が示された．

Improvement Channel Utilization of IEEE 802.11 over MANET

Naoki Nakamura[†], Takuo Suganuma[†], Naonobu Okazaki[††], and Norio Shiratori[†]

[†] Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University

[††] Faculty of Engineering, Miyazaki University

Abstract The MAC protocols of IEEE 802.11 standard solves hidden terminal problem by using RTS/CTS handshaking mechanism. However in this protocol the channel is not released once it is reserved even when it remains unused. In Mobile Ad hoc NETWorks (MANET), this causes inefficient channel utilization. CRTS scheme can improve this channel inefficiency, but sufferes from compatibility problems with standard IEEE 802.11. In this paper, we propose a mechanism, which is compatible with IEEE 802.11 and at the same time can improve the channel inefficiency without incorporating any special frame like CRTS. The basic idea is to release the reserved channel on each neighboring node independently. Results from extensive simulations shows our modification improves the throughput of IEEE 802.11 up to 24% and the delay up to 55% compared to standard IEEE 802.11 and thus verify the effectiveness of our scheme.

1 はじめに

現在最も広く知られた無線LANの標準規格であるIEEE 802.11では，CSMA/CAに基づいた自律分散制御が行われ，隠れ端末問題によるコリジョンを効果的に防ぐためRTS/CTS(Request-to-Send/Clear-to-Send)交換機構と仮想キャリアセンス機構[1]が導入されている．しかしながら，IEEE 802.11を無線アドホックネットワーク(MANET: Mobile Ad Hoc NETwork)で用いた場合，隠れ端末問題やさらし端末問題によりパフォーマンスが低下し，ネットワークの安定性が損われる．また，ネットワークサイズが大きく，ネットワークが混雑している場合，この問題がさらに悪化することが報告されている[2, 3]．従って，MANETにおいてIEEE 802.11を用いる場合，そのパフォーマンスの改善は重要である．

これまで，MANET上におけるIEEE 802.11のパフォーマンス向上を目的として，様々な拡張がなされてきた[4, 5, 6]．それらの中で，文献[6]では，RTS/CTS交換の中断によるチャネル利用率低下を改善するため，RTSフレームを送信した後，CTSフレームの応答が戻って来なかった場合に，送信ノードがCRTS(Cancel RTS)フレームを送信し，CRTSフレームを受信した近隣ノードに設定されているNAVの解除を行うCRTS方式が提案されている．しかしながら，CRTS方式では，新たにCRTSフレームを導入しているため，標準規格IEEE802.11に準拠していないだけでなく，チャネルの獲得を失敗するたびにCRTSフレームを送信するためオーバヘッドが存在するという問題がある．

そこで本研究では，標準規格IEEE 802.11に準拠しつつ，パフォーマンス低下の改善を実現するIEEE 802.11 with Channel Releaseを提案する．本提案方式の特徴は，近隣ノードによるRTS/CTS交換の中断の検出および，その検出に基づく自主的なチャネルの解放である．本提案方式は，特殊な制御フレームを必要としないことから，標準規格に準拠するだけでなく，CRTS方式で必要であった通信オーバヘッドが不要となるため，CRTS方式に比べ，パフォーマンスの改善が期待される．本稿では，計算機シミュレーションを通して，IEEE802.11と比べ最大24%程度のスプープットの改善および55%程度の通信遅延時間の改善効果が得られた．また，ネットワークトラフィックが比較

的多い場合やネットワーク密度が高い場合において、CRTS 方式より改善効果が得られることを確認し，本提案方式の有効性を示した．

2 IEEE 802.11 DCF メディアアクセス機能の概要

2.1 基本アクセス方式

本研究で対象としている IEEE 802.11 Distributed Coordination Function (DCF) は，CSMA/CA に基づいて動作する．すなわち，各ノードは DATA フレームを送信する前に，チャネルの状態を観測し，チャネルがビジーの場合には DATA フレームの送信を延期しチャネルの状態の観測を継続する．その後，チャネルが DCF InterFrame Space(DIFS) 間アイドルであると観測されると，ランダムな Backoff Couter を生成する．また，生成された Backoff Counter は，チャネルがアイドルである場合に限りデクリメントを行い，チャネルがビジーであることを検出するとデクリメントを停止する．その後，DIFS 間チャネルがアイドルになると，Backoff Counter のデクリメントを再開する．Backoff Counter の値が 0 に到達すると DATA フレームを送信する．

Backoff Counter の値は，$(0, \omega - 1)$ の一様分布に従うランダムな値から選択される．ω は Contention Window(CW) と呼ばれる．はじめに各ノードは DATA フレームを送信する前に ω として CW_{min} を設定する．その後，DATA フレームの送信を失敗する毎に，最大 CW_{max} まで ω を倍に増やしながら，再送処理を行う．

また，無線通信におけるコリジョンの検出は困難であるため，ACK フレームによる受信確認を用いる．受信ノードは，DATA フレームを適切に受信すると，SIFS(Short InterFrame Space) 後 ACK フレームを送信する．ACK が届かない場合，送信ノードは DATA フレームが損失したと判断して CW を倍にし，再送スケジュールを組む．

2.2 RTS/CTS 交換・仮想キャリアセンス

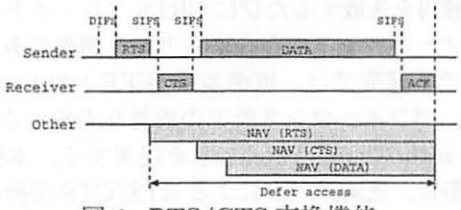


図 1: RTS/CTS 交換機能

RTS/CTS 交換機能は，隠れ端末問題によって引き起こされるコリジョンを効果的に減少させるために IEEE 802.11 のオプションとして定義されている．各ノードは RTS Threshold[1] によって指定された値よりも大きい DATA フレームを送信する場合，まず最初に Backof Counter のデクリメントの処理を行う．その後，即座に DATA フレームの送信を行わずに，図 1 に示すように CTS，DATA，ACK の送信処理を行うために必要とされる source，destination，duration フィールドを含んだ RTS (Request to Send) と呼ばれる小さな制御フレームを送る．受信ノードは，RTS フレームを正常に受信すると，RTS フレームと同様の情報を含んだ CTS(Clear to Send) と呼ばれる小さな制御フレームを送信する．送信ノードは，正常に CTS フレームの応答を受信すると DATA フレームの送信を開始することができる．

また自分宛でない RTS/CTS フレームを受信したノードは，RTS/CTS フレームに記述された duration を用いてチャネルが利用できない期間を表わす NAV (Network Allocation Vector) を設定する．この NAV が設定されている期間は仮想キャリアセンス機能によってチャネルがビジーとして扱われ，物理的にチャネルがビジーである場合と同様にフレームの送信が延期される．

この RTS/CTS 交換機能は，CTS フレームの応答の有無によってコリジョンの早期検出を効果的に行うことができる [7]．しかしながら IEEE 802.11 には予約されたチャネルを解放する機能がないため，送信ノードが RTS フレームを送信したにも関わらず CTS の応答が戻って来ない場合，チャネルは使用されてないにもかかわらず，周辺のノードでは RTS フレームによって NAV が設定されているため，DATA フレームの送信が禁止されている．これにより送信ノード周辺のチャネルの利用率が低下する．

3 仮想キャリアセンスによるチャネル利用率低下

本節では，送信ノードが RTS フレームを送信したにもかかわらず，CTS フレームを受信しない場合の状況について分析し，既存手法およびその問題点について述べる．以下に上記の場合の 3 つの代表的な状況について説明する．

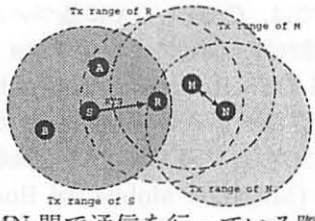


図 2: MN 間で通信を行っている際の状況

状況 1 受信ノードに届いた RTS フレームが他のフレームと衝突することによって，CTS フレームの応答が戻って来ない．このような状況は，トラフィック量が多い場合やネットワーク密度が高い場合に頻繁に発生する．

状況 2 図 2 に示すようにノード M-N 間で既に通信が行われている際に，ノード S がノード R へ RTS フレームを送信すると，ノード R では，M-N 間の通信によって NAV が設定されているため，CTS フレームの応答が戻って来ない．このような状況は，トラフィック量が多い場合やネットワーク密度が高い場合に頻繁に発生する．

状況 3 図2におけるノードRが，ノードSの通信範囲外に移動したため，受信ノードはRTSフレームを受信しないためCTSフレームの応答が戻って来ない．このような状況は，ノードの移動速度が速い場合に発生する．

上記のようなRTS/CTS交換の中断が発生すると，送信ノードの周辺のチャネルは使用されていないにも関わらず，近隣ノードにおいては，RTSフレームによってNAVが設定されているため，Backoff Counterのデクリメントやフレームの送信が抑制される．これにより，チャネル利用率の低下や通信遅延の増加，それに伴うルートの喪失等の問題が生じる．

文献[6]では，RTSフレームによって予約されたチャネルを解放するCRTS(Cancel RTS)方式が提案されている．CRTS方式では，送信ノードがRTSフレームを送信した後，一定期間CTSフレームが来ない場合，RTSによって設定された近隣ノードのNAVを解除するため，CRTSフレームを送信する．その後，CRTSフレームを受信した近隣ノードは，RTSによって設定されたNAVの解除を行い，上記のような状況が発生した際に生じるチャネル利用率の低下を改善することができる．しかしながら，CRTS方式には以下のような問題点がある．

1. 新たにCRTSフレームを導入しているため，標準規格IEEE 802.11に準拠しない．
2. チャネル獲得を失敗するたびにCRTSフレームを送信するためネットワークが混雑するにつれてパフォーマンスが低下する．

CRTS方式では，送信ノードでRTS/CTS交換の中断の検出を行なうため，近隣ノードへRTS/CTS交換の中断を通知する制御フレームCRTSが必要であった．そこで本稿では，制御フレームを用いることなく，近隣ノードによるRTS/CTS交換の中断の検出に基づき，チャネルの解放を自主的に行うIEEE 802.11 with Channel Releaseを提案する．

4 IEEE 802.11 with Channel Releaseの提案

4.1 RTS/CTS交換の中断の検出

近隣ノードによるRTS/CTS交換の中断の検出を行うためには，RTSフレームを受信した後に届くであろうCTSおよびDATAフレームの受信状況を把握することが必要である．そこで図2におけるRの通信可能範囲内にある近隣ノードA，Rの通信可能範囲外にある近隣ノードBのフレームの受信状況からどのように判断すれば良いか分析すると，以下のように考えられる．

受信ノードの通信可能範囲内のノードA

RTSフレームに続くCTSフレームを受信しなかった時にRTS/CTS交換が中断したと判断することができる．

受信ノードの通信可能範囲外のノードB

DATAフレームを受信しなかった時にRTS/CTS交換が中断したと判断することができる．

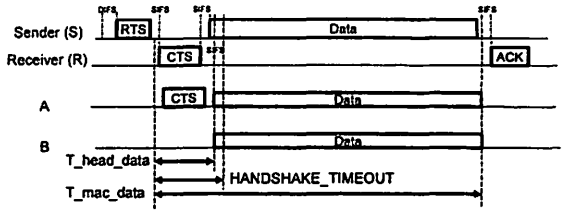


図 3: 各フレームの受信状況

しかしながら，IEEE 802.11では，通信可能範囲内外の把握が困難なため，受信ノードRの通信可能範囲に関係なくRTS/CTS交換の中断を検出する必要がある．従って，RTSフレームを受信してから，CTSフレームおよびDATAフレームを受信しなかった場合にRTS/CTS交換が中断したと判断する．

図3に，各フレームの交換処理を示す．伝播遅延時間を*propagation_delay*，CTS，DATAフレームの送信時間を各々，CTS_Tx_time，$DATA_Tx_time$とすると，RTSフレームを受信してからDATAフレームをMAC層で受信するまでの時間T_mac_dataは，$propagation_de\text{-}lay+SIFS+CTS_Tx_time+propagation_delay+SIFS+DATA_Tx_time+propagation_delay$と与えられるが，検出された時点では，再利用可能な時間はほとんど残されていない．従って，MAC層でフレームを受信した時点で検出するのではなく，リンク層でフレームを受信開始した時点で検出を行うことにする．

RTSフレームを受信してからリンク層においてDATAフレームを受信開始するまでの時間T_head_dataは，$propagation_delay+SIFS+CTS_Tx_time+propagation_delay+SIFS+propagation_delay$で与えられる．これより，受信開始から一定時間経過した$T_head_data+SIFS$の時点までにリンク層のチャネルが常にアイドルであるならば，CTSやDATAフレームを含め一切のフレームを受信しなかったと判断することができる．この期間をHANDSHAKE_TIMEOUTと呼ぶ．

以上の分析をまとめると，他のノード宛てのRTSフレームを受信してから$HANDSHAKE_TIMEOUT$の間リンク層においてチャネルが常にアイドルである場合，RTS/CTS交換が中断したと検出することができる．

4.2 Channel Releaseアルゴリズム

本節では，前節における近隣ノードによるRTS/CTS交換の中断の検出手法を用いて，RTS/CTS交換が中断した際にそれぞれのノードが自主的にチャネルの解放を行うIEEE 802.11 with Channel Releaseを提案する．本提案方式を実現するために，標準規格IEEE 802.11の動作およびリンク層に若干の修正を加える必要がある．提案方式の詳細なアルゴリズムを図4に示す．

各ノードは自分宛てでないRTSフレームを受信すると，リンク層においてチャネルの状態の観測を開始す

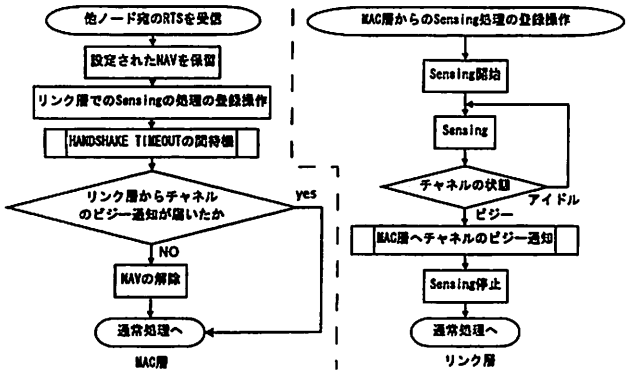


図 4: 提案アルゴリズムの詳細

る．リンク層ではチャネルの状態を観測し，チャネルの状態がアイドルからビジーになった場合，MAC層に対してチャネルビジー通知を送る．MAC層では，RTSフレームを受信してから *HANDSHAKE_TIMEOUT* の間までにリンク層からチャネルビジー通知を受けとらなければ，RTSによって設定されたNAVを解除し，通常の動作フェーズへ戻る．

本提案方式は， RTS/CTS 交換が中断するたびにCRTS フレームを送信するCRTS方式と異なり，各ノードがチャネルの状態に応じて，自主的にチャネルを解放するため，CRTS方式で存在したオーバーヘッドがなく，パフォーマンスの向上が期待できる．

4.3 IEEE 802.11 との互換性に関して

本提案方式 IEEE 802.11 with Channel Release を実現するにあたり，IEEE 802.11 で定義されたフレームの変更や追加を一切行っていない．また，NAV の解除後の動作に関しても IEEE 802.11 DCF の処理に従って動作する．従って，本提案方式は標準規格 IEEE 802.11 に準拠しており，本提案方式をサポートしていないノードが存在する場合においても問題なく動作する．

5 評価

本提案方式の有効性を確認するために，ネットワークシミュレーター *ns-2* を用いて評価を行った．

ネットワークモデルとして，ルーチングプロトコル AODV (Ad hoc Ondemand Distance Vector) を用いた一般的な無線によるマルチホップトポロジーとし，無線リンク帯域 1 Mbps，通信半径=250m，slot time = 20 μs，SIFS = 10 μsec，DIFS = 50 μsec，propagation delay = 2 μsec とした．また omni-directional アンテナを用い，RTS Threshold は，文献 [6] に従い 0 とした．トラフィックモデルとしては，送受信ノードをフィールド上からランダムに選択し，パケットサイズを 512 から 2048byte とするランダムな 30 本の CBR トラフィックを流す．以下トラフィックパラメータとして，全 CBR トラフィックの送信レートの総和を *Offered Load* として与える．また移動モデルとして，Random Waypoint Model を用いた．

シミュレーションは，$1500m \times 500m$ のフィールド上で 700 秒間実行し，100 秒から 700 秒の CBR トラフィックのスループットおよび通信遅延時間を計測した．デフォルトのシミュレーションパラメータとして，ノード数を 50 個，Offered Load を 300*kbps* とし，また，モビリティパラメータは，$max_speed = 10(m/sec)$, $min_speed = 0(m/sec)$, $pause_time = 50(sec)$ として与えた．各シミュレーションは 300 回以上試行し，各測定結果の平均値を評価に用いた．ここでスループットは，パケットが source から destination へ到達した単位時間あたりのデータサイズとし，また通信遅延時間は，パケットが source から destination へ到達するまでに要した単位パケットあたりの通信時間とした．

5.1 ネットワークトラフィック量に対する性能比較

ネットワークトラフィックに対する性能評価を行うため，Offered Load を 200kbps から 600kbps まで変化させた場合のシミュレーションを行った．

スループットに関しては，図 5 に示すように，Offered Load が高くなるとともに，RTS/CTS 交換の中断の発生が増加し，スループットの上昇が抑えられている．この時，本提案方式および CRTS 方式では，チャネルの再利用の効果により，チャネル利用率が向上し，スループットが改善している．Offered Load が高い 600kbps の時には，CRTS 方式では，IEEE 802.11 より 8%程度改善しているのに対して，本提案方式では，12%程度改善している．これは，本提案方式では，CRTS 方式のような制御フレームの送信によるオーバヘッドが無いため，チャネル再利用が効果的に行えているからである．

また，通信遅延時間に関しては，図 6 に示すように，Offered Load の増加とともにコリジョンが増加し，再送回数が増えることから通信遅延が生じている．本提案方式および CRTS 方式では，チャネル再利用の効果により，送信開始までの待ち時間を短縮することができ，通信遅延時間が改善している．Offered Load が高い 450kbps の時には，CRTS 方式では，IEEE 802.11 より 17%程度改善しているのに対し，本提案方式では，30%程度改善している．このように本提案方式が高い改善効果を実現しているのは，スループットの場合と同様，制御フレームによるオーバヘッドが無く，チャネルを効果的に再利用しているからである．

5.2 ネットワーク密度に対する性能評価

次に，ネットワーク密度に対する性能評価を行うため，ネットワークトラフィックの影響が少ない際 (Offered Load が 300kbps) に，密度ノード数を 10 から 100 まで変化させた場合のシミュレーションを行った．

スループットに関しては，図 7 に示すように，ノード数が比較的少ない場合には，ネットワーク内に Partition が存在することからスループットが比較的低いが，ノード数が増えるともに Partition が減少し，スループットが増加している．本提案方式および CRTS 方式は，チャネルの再利用の効果により，スループットが改善している．ネットワーク密度が高いノード数が

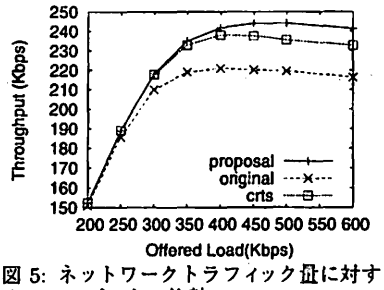


図 5: ネットワークトラフィック量に対するスループットの比較

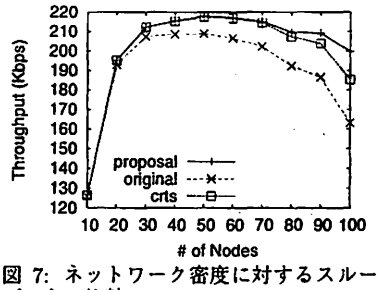


図 7: ネットワーク密度に対するスループットの比較

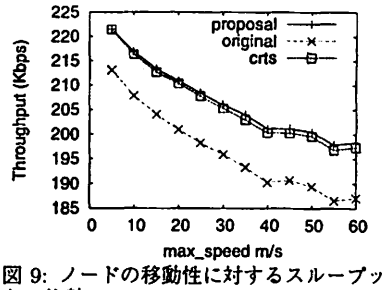


図 9: ノードの移動性に対するスループットの比較

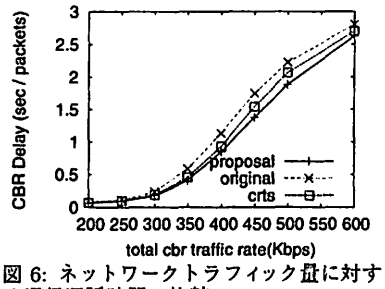


図 6: ネットワークトラフィック量に対する通信遅延時間の比較

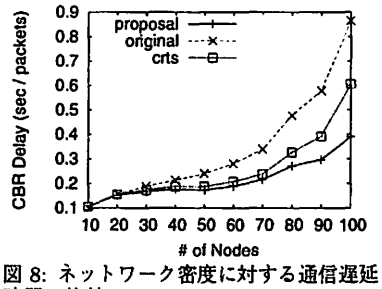


図 8: ネットワーク密度に対する通信遅延時間の比較

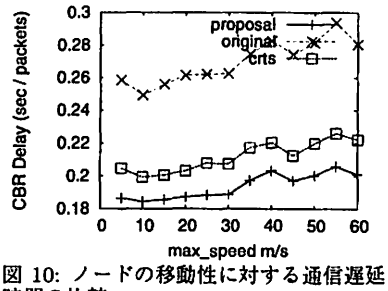


図 10: ノードの移動性に対する通信遅延時間の比較

100 の時には，CRTS 方式は，IEEE 802.11 より 13% 程度スループットが改善しているのに対し，本提案方式では，24%程度改善している．

また通信遅延時間に関しては，図 8 に示すように，ノード数が増加するとともにコリジョンが増加し，フレームの再送回数が増えることから通信遅延時間が増加している．本提案方式および CRTS 方式では，チャネル再利用によって，通信開始までの待ち時間等が短縮されることから，通信遅延時間が改善している．ネットワーク密度が高いノード数が 100 の時には，CRTS 方式では，IEEE 802.11 より 30%程度改善しているのに対し，本提案方式では，55%程度改善している．

以上より，本提案方式は，ネットワーク密度が比較的高い場合において，CRTS 方式に比べ，スループットおよび通信遅延時間の改善を実現している．これは，本提案方式では CRTS 方式のようなオーバヘッドを付加していないことで，チャネルを効果的に再利用できているためである．

5.3 ノードの移動性に対する性能評価

ノードの移動性に対する性能評価を行うため，max_speed を 10 から $60m/sec$ まで変化させた場合のシミュレーションを行った．図 9，10 に示すように，本提案方式は，移動速度が高くなるにつれて，CRTS 方式よりも性能の改善効果が表われている．しかし，移動速度の増加に対する改善率の変化は，それほど大きくない．これは，Offered Load やノード数を変化させた場合と比べて，RTS/CTS 交換の中断がそれほど発生しないためと考えられる．また，Offered Load が高くなるにつれて，改善率が高くなることを追加実験によって確認している．

6 おわりに

本稿では，IEEE 802.11 の RTS/CTS 機能を無線アドホックネットワーク上で用いた際のチャネル利用率の低下を改善する IEEE 802.11 with Channel Release を提案した．本提案方式は，新たに制御フレームを導入することなく，IEEE 802.11 に対して単純な拡張を行うことにより，チャネル利用率の改善を実現することができた．具体的には，シミュレーションにおいて，スループットが最大 24%程度，通信遅延時間が最大 55%程度改善し，ネットワークトラフィックが比較的多い場合やネットワーク密度が高い場合などのチャネル獲得が頻繁に失敗する状況では，CRTS 方式よりも改善効果が高いことを確認した．以上より，本提案方式により，IEEE 802.11 に準拠しつつ，スループットおよび通信遅延時間の改善を実現した．

今後は，他のルーチング方式を採用した場合などさまざまな状況下での性能評価および数学的な解析を通して本提案方式の有効性を確認する予定である．

参考文献

[1] IEEE Standard for Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specication, *IEEE Std. 802.11*, August 1999

[2] Y. Wang and J. J. Garcia-Luna-Aceves, Collision Avoidance in Multihop Ad Hoc Networks, *Proc. of the IEEE/ACM MASCOT'02*, Texas, U.S.A., October 2002.

[3] S. Xu and T. Saadawi, Does the IEEE 802.11 MAC Protocol Work Well in Multihop Wireless Ad Hoc Networks?, *IEEE Commun. Mag.*, 39(6): 130–137, June 2001.

[4] F. Calí, M. Conti, and E. Gregori, Dynamic Tuning of The IEEE 802.11 Protocol to Achieve a Theoretical Throughput Limit, *IEEE/ACM Trans. Networking*, 8(6): 785–799, December 2000.

[5] H. Wu, Y. Peng, K. Long, S. Cheng, and J. Ma, Performance of eliable Transport Protocol Over IEEE 802.11 Wireless LAN: Analysis and enhancement, *Proc. the IEEE INFOCOM'02*, June 2002.

[6] 原田貴弘，太田能，森井唱克，無線マルチホップ網における IEEE 802.11 DCF のスループット特性の改善，電子情報通信学会論文誌 B, Vol.J85-B, No.12, pp 2198-2208, 2002 年 12 月

[7] G. Bianchi, Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function, *IEEE J. Select. Areas Commun.*, 18(3): 535–547, March 2000.