

隣接送受信無線ノードに通信機会を平等に与えるための 受信ノード主導型 RTS/CTS 制御手法

原 桃香^{1,a)} 梶垣 博章^{1,b)}

概要: 固定基地局を介することなく隣接する無線ノードが直接データメッセージを送受信する無線アドホックネットワークでは、無線 LAN プロトコルの備える CSMA/CA と RTS/CTS 制御によって制御メッセージおよびデータメッセージの衝突を回避している。RTS 制御メッセージの衝突を回避するために各無線ノードの待機時間をランダムに決定するバックオフタイマ機能は、その値を単調減少させることにより隣接無線ノードに RTS 制御メッセージの送信機会を平等に与えることを実現している。ところが、受信無線ノードによる CTS 制御メッセージの送信タイミングは RTS 制御メッセージの受信タイミングによって決まることから、CTS 制御メッセージを受信無線ノードが送信できるとは限らない。データメッセージ送受信に至る確率は、受信無線ノードとその隣接無線ノードにおける通信要求頻度に依存する。このため、無線 LAN プロトコルのバックオフタイマ機能のみでは、RTS 制御メッセージの送信機会の平等性は実現されているものの、データメッセージ送受信機会の平等性が実現されていないという問題がある。本論文では、周辺の通信要求頻度が高い受信無線ノードが主導して RTS/CTS 制御手順を開始する受信無線ノード主導型 RTS/CTS 制御を提案する。また、シミュレーション実験により、提案手法がデータメッセージ送信機会の平等性を改善することを示す。実施することで隣接する送受信無線ノードに通信機会を平等に与える手法を提案する。

キーワード: 無線アドホックネットワーク, 無線 LAN プロトコル, RTS/CTS 制御, 平等性。

Receiver-Initiated RTS/CTS Control for Even Transmission Opportunities of Data Messages among Neighbor Wireless Nodes

Abstract: In a wireless ad-hoc network, collisions of control and data messages are avoided by CSMA/CA and RTS/CTS control of wireless LAN protocols. Random backoff timers for avoidance of collisions among RTS control messages provide equal opportunities to transmit data messages to neighbor wireless nodes since the value of the backoff timer monotonically decreases. In wireless ad-hoc networks, wireless nodes are not equally distributed and frequency of transmission requests in wireless nodes is also not the same. Thus, especially in a region with high density of transmission and receipt requests for data messages, it is not always possible for a wireless node with a transmission request to receive a response CTS control message even though it has an opportunity to transmit an RTS control message. Hence, the equal opportunities to transmit an RTS control message is not enough to realize the equal opportunities to transmit a data message. In order to solve this problem, this paper proposes an extended receiver-initiated RTS/CTS control to equally provide opportunities to transmit data messages whose receiver node is hard to send back a CTS control message in response to an RTS control message. Here, a transmission of a CTS control message precedes a transmission of an RTS control message after failed transmissions of a CTS control message.

Keywords: Wireless Ad-Hoc Networks, Wireless LAN Protocol, RTS/CTS Control, Feasibility.

¹ 東京電機大学 ロボット・メカトロニクス学科
Department of Robotics and Mechatronics, Tokyo Denki University

a) hara@higlab.net

b) hig@higlab.net

1. はじめに

無線アドホックネットワークでは、互いに無線信号到達範囲に含む隣接無線ノード間で固定基地局を介することな

くデータメッセージを送受信する。無線ノードによって送信された無線信号は、送信無線ノードの無線信号到達範囲に含まれるすべての無線ノードに到達する。このことから、送信無線ノード N_s から受信無線ノード N_r に送信されたすべての制御メッセージとデータメッセージは、 N_r に受信されるばかりでなく、 N_s のすべての隣接無線ノードによって傍受される。複数の隣接無線ノードから同時並行にメッセージが送信される時、これらの無線信号到達範囲に共通に含まれる無線ノードでは無線信号の衝突が発生し、メッセージを正しく受信することができない。

この衝突の発生を回避するために、IEEE802.11等の無線LANプロトコルでは、CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) 機構が導入されている。これによって、互いに晒し端末の位置にある無線ノードが同時並行に無線信号を送信することによるメッセージの衝突を回避している。また、互いに隠れ端末の位置にある複数の無線ノードが同時並行に無線信号を送信することによるメッセージの衝突を回避するために、RTS/CTS制御が導入されている。これによって、 N_s から N_r へのデータメッセージ配送と N_r から N_s へのACK (受信確認) 制御メッセージの配送とが行なわれる時間、これらの隣接無線ノードによる制御メッセージとデータメッセージの送信を待機させ、メッセージの衝突を回避することが可能となる。

ここで、互いに隣接する複数の送信無線ノードにおいては、RTS制御メッセージを衝突回避のために排他的に送信するために、タイムアウト時間がランダムに定められるバックオフタイマによって待機時間を各送信無線ノードに与える。待機時間をランダムに定めることから、複数の送信無線ノードが同時並行にRTS制御メッセージを送信して衝突を発生させる機会が削減される。また、タイムアウトしなかった送信無線ノードのバックオフタイマが持ち越されることにより、いずれの送信無線ノードにもRTS制御メッセージの送信機会が平等に与えられるとしている。この送信機会の付与をより平等に実現する多数の手法が提案されている。

一方、 N_s から N_r へのデータメッセージ配送は、 N_s によるRTS制御メッセージ送信と N_r によるCTS制御メッセージの送信がなされて初めて可能となる。ここで、RTS制御メッセージおよびCTS制御メッセージのいずれについても、 N_s および N_r がそれらの隣接無線ノードからRTS制御メッセージおよびCTS制御メッセージのいずれかを受信することによるNAV (Network Allocation Vector) を設定していないことが送信するための条件となる。すなわち、互いに隣接する複数の送信無線ノードと受信無線ノードの間でデータメッセージ配送をめぐって競合することとなるが、これらの中で通信機会を平等に配分することは現在の無線LANプロトコルでは考慮されていない。このため、 N_r の周辺におけるデータメッセージ送受信要求の発

生頻度が高い場合には、 N_s からのRTS制御メッセージの受信に呼応して受動的にCTS制御メッセージを送信する N_r は、隣接する送受信無線ノードに対して平等にCTS制御メッセージを送信する機会すなわちデータメッセージを受信する機会を得ることができない問題がある。

本論文では、自身がNAVを設定しているために、 N_s から受信したRTS制御メッセージに対するCTS制御メッセージの送信を一定回数以上連続して失敗した N_r が N_s からのRTS制御メッセージ受信に先行してCTS制御メッセージを能動的に送信する受信ノード主導型RTS/CTS制御手法を提案し、その実現プロトコルを設計し、シミュレーション実験によりその性能を評価する。

2. 関連研究

IEEE802.11等の無線LANプロトコルでは、隣接無線ノード対間でデータメッセージとACK (受信確認) 制御メッセージが他の無線ノードが送受信するメッセージと衝突することなく送受信されるために、これらのメッセージに先立ってRTS制御メッセージおよびCTS制御メッセージを送信無線ノードおよび受信無線ノードが隣接無線ノードへとブロードキャスト送信する。これらの制御メッセージを送信することができるのは、隣接無線ノードからブロードキャスト送信されたRTS制御メッセージおよびCTS制御メッセージの受信によってメッセージの送信を待機していない場合のみである。互いに隣接する複数の無線ノードがデータメッセージの送信に先立ってRTS制御メッセージを送信するとき、その送信をランダムに定められるバックオフタイマのタイムアウトまで遅延させることによって、RTS制御メッセージ同士の衝突を削減する。また、隣接無線ノードのいずれかが先行してタイムアウトすることでRTS制御メッセージを送信した場合、この隣接無線ノードによるデータメッセージ送信に対応するACK制御メッセージの受信を終えた後にバックオフタイマの値をリセットせずに持ち越す。これによって、バックオフタイマの値は時間経過に対して単調減少することが保証され、いずれの無線ノードも平等にRTS制御メッセージの送信機会を得ることができる。

無線ノードの分布が均一でなく地理的に偏在している場合、さらに、近接する無線ノードのデータメッセージ送信要求発生頻度が高い場合、多数の隣接無線ノードが同時並行にデータメッセージ送信を要求することとなる。このとき、複数の隣接無線ノードが同一のバックオフタイマ値を持ち、送信したRTS制御メッセージが衝突することがある。そこで、バックオフタイマの値の範囲を拡大することによって、複数の隣接無線ノードでランダムに定められるバックオフタイマが同一の値を持つ確率を低減する手法が導入されている。具体的には、RTS制御メッセージの衝突を検出した無線ノード、すなわち、データメッセージの送受信に

失敗した無線ノードがバックオフタイマの値の範囲を拡大し、自身が *RTS* 制御メッセージを送信する機会を減らすことによって衝突の可能性を低減している。このように、このバックオフタイマの値の範囲を無線ノードごとに自律的に調整していることから、*RTS* 制御メッセージの送信機会が隣接無線ノード間で不平等に配分される結果となる問題が指摘されている。そこで、論文 [1, 2, 4, 5] では、隣接無線ノード間でデータメッセージ送信の実績情報を相互に交換することによってバックオフタイマの値の範囲を適切に拡大、縮小する方法が提案されている。WLPB [7] では、隣接無線ノードに対してデータメッセージの送信機会を十分に得られていない無線ノードが、送信したデータメッセージに対応する *ACK* 制御メッセージを受信した後、*SIFS* インターバル時間経過後に *RTS* 制御メッセージを送信することによってデータメッセージを連続で送信するフレームバースティングによって送信機会を補償する手法が提案されている。

送信無線ノード N_s がバックオフタイマのタイムアウトによって *RTS* 制御メッセージの送信機会を得た場合でも、これを受信した受信無線ノード N_r が *CTS* 制御メッセージを送信することができるとは限らない。このとき、*RTS* 制御メッセージを受信した N_s の隣接無線ノードは、このメッセージに含まれる *NAV* によってメッセージ送信待機期間を設定している。 N_s が N_r からの *CTS* 制御メッセージを受信することができない場合には、 N_s が N_r にデータメッセージを送信できないことから、 N_s の隣接無線ノードによるメッセージ送信待機は衝突回避に貢献することなく、これらの無線ノードがメッセージ送受信の機会を失うのみである。*RTS* validation [6], *NAV* 短縮方式 [6], *Cancel RTS (CRTS)* [8] は、いずれも N_s が N_r からの *CTS* 制御メッセージを受信できない場合に N_s の隣接無線ノードに無駄なメッセージ送信待機を継続させない手法である。

3. 提案手法

3.1 問題点

無線アドホックネットワークでは、任意の隣接する無線ノード間で固定基地局を介することなくデータメッセージを送受信する。ここで、無線ノード位置は、図 1(a) のように均等に分布することは稀であり、地形や道路位置、建物位置などの環境要件や無線ノード設置位置分布などのアプリケーションの要求によって図 1(b) のように偏った分布となることが一般的である。特に、移動無線ノードから構成される無線アドホックネットワークでは、移動無線ノードの分布密度は経時的にも変化する。また、各隣接無線ノード対における通信要求の発生頻度も無線ノードの位置分布と同様に均等ではなく、各隣接無線ノード対ごとに異なる。例えば、無線センサネットワークでは、センサが観測する事象 (イベント) の発生頻度に応じて通信要求発生頻度が偏在

する。また、データメッセージを無線ノードの中継によって配送する無線マルチホップネットワークでは、無線マルチホップ配送経路の中継無線ノードとして選択される頻度の高い位置に存在する無線ノードの通信要求頻度が結果的に高くなる。

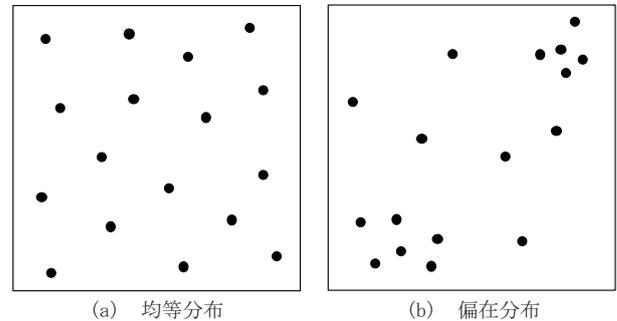


図 1 無線ノードの均等分布と偏在分布。

RTS/CTS 制御は、送信無線ノード N_s から受信無線ノード N_r へのデータメッセージ配送において、 N_s と N_r のすべての隣接無線ノードの制御メッセージおよびデータメッセージの送信を待機させることによって、 N_s が送信するデータメッセージを N_r が他のメッセージと衝突することなく受信し、 N_r が送信する受信確認 (*ACK*) 制御メッセージを N_s が他のメッセージと衝突することなく受信することを実現する。同時に、 N_s が送信するデータメッセージと他のデータメッセージもしくは *ACK* 制御メッセージが N_s の隣接無線ノードで衝突すること、 N_r が送信する *ACK* 制御メッセージと他のデータメッセージもしくは *ACK* 制御メッセージが N_r の隣接無線ノードで衝突することによって、これらのメッセージが受信できなくなることを回避する。

N_s とその隣接無線ノードにおける衝突を回避するために N_r を含む N_s の隣接無線ノードに対する N_s の排他的な *ACK* 制御メッセージ受信を実現するのが *RTS* 制御メッセージである。この *RTS* 制御メッセージの送信機会の平等性は、バックオフタイマの単調減少性によって実現されている。すなわち、ランダムに決定されたバックオフタイマの値は送信要求を持つ隣接無線ノード間で等しく減少し、*RTS* 制御メッセージの送信機会を得ることができなかった無線ノードではバックオフタイマの値を持ち越すことによって、いずれの無線ノードにおいてもバックオフタイマがタイムアウトし、*RTS* 制御メッセージを送信する機会を得ることができる。

一方、 N_r における衝突を回避するために N_s を含む N_r の隣接無線ノードに対する N_r の排他的なデータメッセージ受信を実現するのが *CTS* 制御メッセージである。しかし、その送信機会の平等性を実現することは考慮されていない。 N_r が N_s へ *CTS* 制御メッセージを送信することができるのは、 N_r が N_s からの *RTS* 制御メッセージを受信

した時点で N_r が NAV を設定していない場合、すなわち、 N_r がその隣接無線ノードから先行して受信した RTS 制御メッセージあるいは CTS 制御メッセージによってメッセージの送信を待機していない場合に限られる (図 2)。このため、 N_r 周辺における送受信要求発生頻度が高い場合には、 N_r は隣接無線ノードから多数の RTS 制御メッセージや CTS 制御メッセージを受信し、頻りに NAV が設定されることとなる。その結果、図 3 に示すように、 N_r に NAV が設定されている時間が延長し、 N_s から受信した RTS 制御メッセージに対応して CTS 制御メッセージを送信する機会が減少する。 N_s が RTS 制御メッセージを送信するタイミングは N_r に設定される NAV とは独立であることから、 N_r が CTS 制御メッセージを送信する機会と N_r の隣接無線ノードが RTS 制御メッセージや CTS 制御メッセージを送信する機会との間の平等性が実現されているとは言えない。その結果、 N_s から N_r へのデータメッセージ配送の機会が平等に与えられておらず、データメッセージ配送遅延が延長する問題がある。

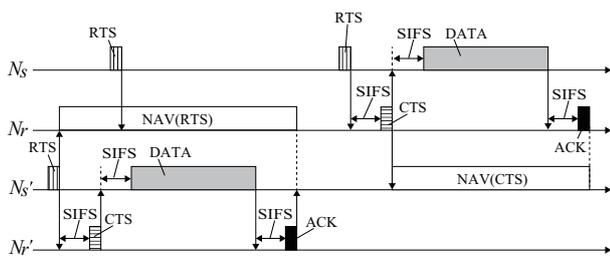


図 2 RTS/CTS 制御。

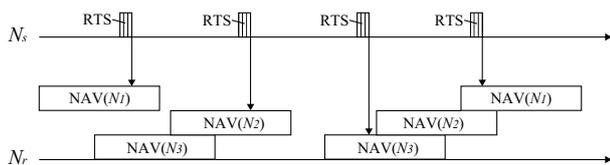


図 3 高通信要求密度による不平等な CTS 制御メッセージ送信機会。

ここで、 N_r が受信することが可能なタイミングで N_s が RTS 制御メッセージを送信することが可能となるように、 N_r の NAV を N_s に (すなわち N_r のすべての隣接無線ノードに) あらかじめ通知する方法が考えられる。しかし、 N_r の NAV はその隣接無線ノードから RTS 制御メッセージ、あるいは、CTS 制御メッセージを受信した直後から設定されるため N_r は制御メッセージの送信を待機しなければならない。この通知のための制御メッセージを送信することができない。この通知のための制御メッセージの送信を可能とするためには NAV 設定によるメッセージ送信待機時間の開始を遅延させる必要があり、RTS/CTS 制御によるデータメッセージ配送性能の低下を招くこととなる。

一方、 N_r が現在設定されている NAV によるメッセー

ジ送信待機時間が終了した時点でただちに CTS 制御メッセージを N_s に送信する方法が考えられる。しかし、 N_r からの CTS 制御メッセージを N_s が受信するまでに N_s がその隣接無線ノードに設定した NAV によるメッセージ送信待機時間が経過してしまうことが考えられる。メッセージ送信待機時間の経過とともに N_s が RTS 制御メッセージを再送信することで NAV を再設定して待機時間を延長することも考えられるが、 N_s の隣接無線ノードによるメッセージ送信待機時間を無用に延長することは、データメッセージ送受信機会の新たな不平等性を生み出すとともに、無線アドホックネットワーク全体の通信性能を低下させることとなる。

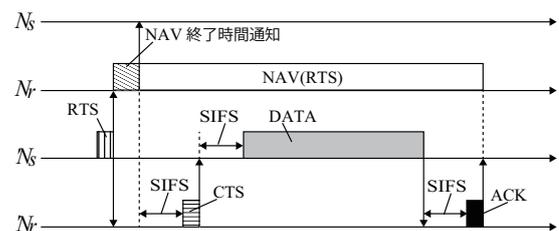


図 4 NAV 通知と NAV 延長。

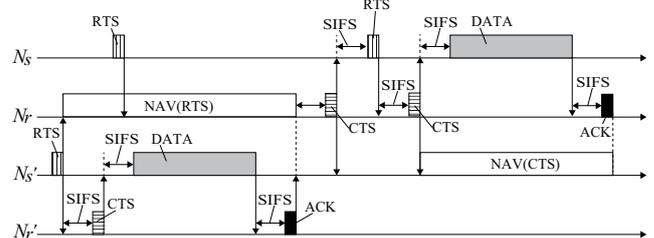


図 5 CTS 制御メッセージの遅延送信。

3.2 受信無線ノード主導型 RTS/CTS 制御

前節で述べた受信無線ノード N_r が CTS 制御メッセージを送信無線ノード N_s に送信する機会を得ることが困難となる問題を解決する手法として、本論文では、受信無線ノード主導型 RTS/CTS 制御手法を提案する。

N_s から RTS 制御メッセージを受信したにも関わらず、先行して隣接無線ノードから受信した RTS 制御メッセージや CTS 制御メッセージによって NAV が設定されているために、 N_r が制御メッセージの送信を待機しなければならない場合、CTS 制御メッセージを N_s に送信することができない。この場合、 N_s では N_r からの CTS 制御メッセージの受信待ちがタイムアウトし、データメッセージを送信することはできない。本論文で提案する受信無線ノード主導型 RTS/CTS 制御では、 N_r が NAV 設定によるメッセージ送信待機によって同一の N_s から送信された RTS 制御メッセージに対して一定回数以上繰返して CTS 制御

メッセージを送信することができない場合には、 CTS 制御メッセージを RTS 制御メッセージに先行して送信することとする。これは、 N_s の周辺におけるデータメッセージ送受信要求発生頻度よりも N_r の周辺におけるデータメッセージ送受信要求発生頻度が高い場合には、 N_r が CTS 制御メッセージを送信する機会が N_s が RTS 制御メッセージを送信する機会よりも少ないにも関わらず、 CTS 制御メッセージの送信タイミングが N_r の隣接無線ノードの状態とは無関係に RTS 制御メッセージの受信タイミングのみによって定められている従来の RTS/CTS 制御手法の問題点を解決するものである。図 6 に示すように、 N_r は、隣接無線ノードから受信した RTS 制御メッセージおよび CTS 制御メッセージによって設定されたすべての NAV によるメッセージ送信待機時間を経過したならば、ただちに CTS 制御メッセージを N_s に送信する。この CTS 制御メッセージを受信した N_s は、隣接無線ノードから先行して受信した RTS 制御メッセージあるいは CTS 制御メッセージによって NAV が設定されておらず、メッセージ送信を待機する必要がない場合には、 $SIFS$ インターバル経過後に RTS 制御メッセージを N_r へ送信する。この RTS 制御メッセージを N_r が受信することによって N_s と N_r が互いにデータメッセージ送受信が可能であることが認識されるとともに、 N_s と N_r のすべての隣接無線ノードに NAV を設定し、制御メッセージとデータメッセージの送信を待機させることで、データメッセージと ACK 制御メッセージを衝突なく N_s と N_r の間で送受信することが可能となる。

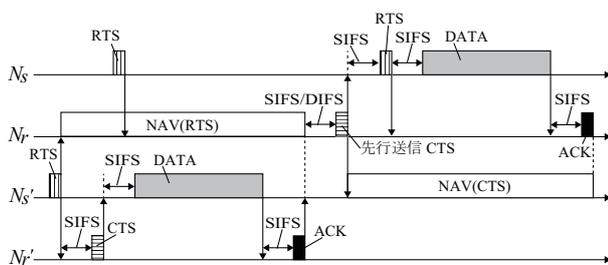


図 6 受信無線ノード主導型 RTS/CTS 制御.

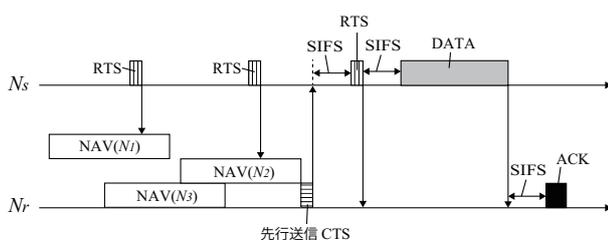


図 7 提案手法による送信機会の早期獲得.

本提案手法を実現するためには、 N_r がその隣接無線ノードから受信した RTS 制御メッセージおよび CTS 制御メッ

セージによって設定されたすべての NAV によるメッセージ送信待機時間を経過した後、「ただちに」 CTS 制御メッセージを N_s に送信することが必要である。すなわち、隣接無線ノードのいずれかから RTS 制御メッセージあるいは CTS 制御メッセージを受信する以前に N_r が CTS 制御メッセージを N_s に送信することが求められる。そこで、本来は $DIFS$ インターバル経過後にバックオフタイムがタイムアウトすることを待って送信するべきである CTS 制御メッセージを $SIFS$ インターバル経過後に送信する [7]、あるいは、バックオフタイムの値を 0 として $DIFS$ インターバル経過後直後に送信する [3] ことで、隣接無線ノードによる RTS 制御メッセージや CTS 制御メッセージの送信に先行することができる。

本提案手法では、 CTS 制御メッセージが RTS 制御メッセージに先行して送信されるため、それぞれに設定される NAV の値が従来の RTS/CTS 制御とは異なる。従来の RTS/CTS 制御では、図 8 に示すように、 RTS 制御メッセージに設定される NAV の値は、 CTS 制御メッセージの配送時間、データメッセージの配送時間、 ACK 制御メッセージの配送時間の和に $SIFS$ インターバル時間の 3 倍を加えたものであり、 CTS 制御メッセージに設定される NAV の値は、データメッセージの配送時間と ACK 制御メッセージの配送時間の和に $SIFS$ インターバル時間の 2 倍を加えたものである。ここで、各制御メッセージ配送時間とインターバル時間は定数であるが、データメッセージの配送時間はデータメッセージサイズによって決まるものであり N_s のみが取得可能である。そこで、 N_r は N_s から受信した RTS 制御メッセージに設定されている NAV の値から CTS 制御メッセージに設定する NAV を算出する。すなわち、 CTS 制御メッセージに設定される NAV の値は、受信した RTS 制御メッセージに設定されている NAV の値から CTS 制御メッセージの配送時間と $SIFS$ インターバル時間を引いたものとする。

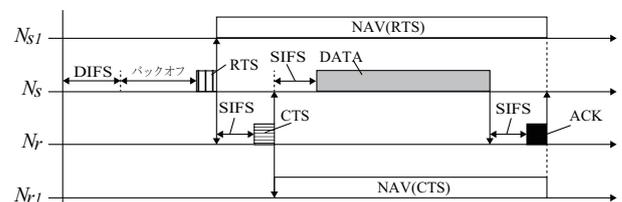


図 8 従来の RTS/CTS 制御における NAV の設定値.

これに対して、本論文で提案する受信無線ノード主導型 RTS/CTS 制御では、 N_r によって先行送信される CTS 制御メッセージに設定される NAV の値は、 RTS 制御メッセージの配送時間、データメッセージの配送時間、 ACK 制御メッセージの配送時間に $SIFS$ インターバル時間の 3 倍を加えたものであり、この CTS 制御メッセージの受信に応じて N_s が送信する RTS 制御メッセージに設定される

NAV の値は、データメッセージの配送時間と ACK 制御メッセージの配送時間の和に SIFS インターバル時間の 2 倍を加えたものである (図 9)。ここで、 N_r は CTS 制御メッセージの先行送信に先立って N_s が送信した RTS 制御メッセージを受信していることから、データメッセージサイズが未知であっても CTS 制御メッセージに設定する NAV の値を定めることが可能である。すなわち、 N_r によって先行送信される CTS 制御メッセージに設定される NAV の値は、 N_s から受信済みの RTS 制御メッセージに設定されている NAV の値に RTS 制御メッセージの配送時間を加えて CTS 制御メッセージの配送時間を引いたものとする。この CTS 制御メッセージの受信に応じて N_s が送信する RTS 制御メッセージに設定される NAV の値は、受信した CTS 制御メッセージに設定されている NAV の値から RTS 制御メッセージの配送時間と SIFS インターバル時間を引いたものとする。

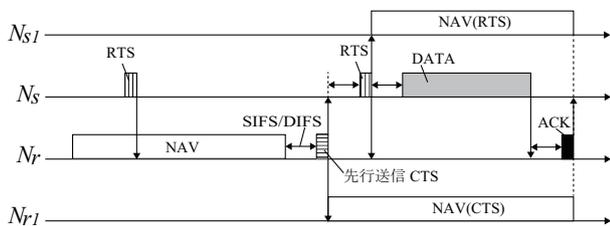


図 9 提案手法の RTS/CTS 制御における NAV の設定値。

この CTS 制御メッセージに設定される NAV の値は、 N_s が N_r から受信した CTS 制御メッセージが RTS 制御メッセージの受信に応じて送信されたものであるか、 N_r に設定されたすべての NAV によるメッセージ送信待機時間が経過して N_r が先行送信したものであるかを区別するために用いることができる。 N_s は、前者の場合には SIFS インターバル経過後にデータメッセージを送信し、後者の場合には SIFS インターバル経過後に RTS 制御メッセージを送信する。RTS 制御メッセージ送信後、 N_s が N_r からの CTS 制御メッセージを受信するまでの時間は SIFS インターバル時間で固定であるが、 N_r から先行送信される CTS 制御メッセージを N_s が受信するタイミングは任意である。このため、 N_s が RTS 制御メッセージを送信後に十分に長い時間経過の後に N_r から受信した CTS 制御メッセージは N_r によって先行送信されたものであると判別することが可能であるが、短い時間経過後に CTS 制御メッセージを受信した場合は判別が困難である。ここで、本節で述べたように、CTS 制御メッセージに設定される NAV の値は、 N_r が受信した RTS 制御メッセージに設定された NAV の値によって決定され、それぞれの CTS 制御メッセージによって異なる。すなわち、RTS 制御メッセージの受信に応じてただちに送信される CTS 制御メッセージに設定される NAV の値は、RTS 制御メッセージに設定

された NAV の値から CTS 制御メッセージの配送時間と SIFS インターバル時間を引いたものであり、 N_r が先行送信する CTS 制御メッセージに設定される NAV の値は、RTS 制御メッセージに設定された NAV の値から CTS 制御メッセージの配送時間を引き、RTS 制御メッセージの配送時間を加えたものである。RTS 制御メッセージに設定された NAV の値は N_s が算出したものであり、加減算する制御メッセージ配送時間はすべて定数であることから、 N_s は N_r から受信した CTS 制御メッセージがいずれのものであるかを判別することができる。

さらに、 N_r の複数の隣接無線ノード N_{s1} と N_{s2} が送信した RTS 制御メッセージに対する CTS 制御メッセージの受信に連続して失敗した場合、 N_r が先行送信した CTS 制御メッセージが N_{s1} と N_{s2} のいずれに対して送信されたものであるかを判別するためにも NAV の値を用いることができる。CTS 制御メッセージには、送信元無線ノード N_r のアドレスが含まれるものの、送信先無線ノード N_{s1} あるいは N_{s2} のアドレスは含まれない (図 10)。従来の RTS/CTS 制御においては、CTS 制御メッセージは RTS 制御メッセージの受信に呼応して SIFS インターバル経過後に他の制御メッセージに先行して N_r が送信するため、 N_s が自身を宛先とする CTS 制御メッセージであると判別することができる。しかし、提案手法における N_r によって先行送信される CTS 制御メッセージの送信タイミングは、 N_s とは無関係に N_r が自身に設定されていた NAV がすべて解除されたタイミングで決定されるため、 N_{s1} と N_{s2} のように送信要求を持つ複数の隣接無線ノードが CTS 制御メッセージの受信に連続して失敗している場合、提案手法の先行送信 CTS 制御メッセージの受信タイミングでは、それが自身を宛先とするものであるかが判別することができない。もし、 N_{s1} と N_{s2} が送信するデータメッセージのサイズが異なるのであれば、 N_{s1} あるいは N_{s2} に先行送信される CTS 制御メッセージが自身を宛先とするものであるかは、これに設定される NAV の値によって判別することが可能である。ただし、 N_{s1} と N_{s2} が送信するデータメッセージのサイズが同じである場合には、 N_{s1} あるいは N_{s2} に先行送信される CTS 制御メッセージが自身を宛先とするものであるかは、これに設定される NAV の値では判別することができず、 N_{s1} と N_{s2} は同時並行に RTS 制御メッセージを送信し、さらに、同時並行にデータメッセージを送信するため、いずれも N_r で衝突する。このとき、 N_r は N_{s1} と N_{s2} のいずれに対しても ACK 制御メッセージを送信しないため、通常の衝突と同様の処理が N_{s1} と N_{s2} において行なわれるのみである。

本提案方式では、隣接無線ノード対である N_s と N_r の間のデータメッセージ配送のための RTS/CTS 制御を周辺の送受信要求発生頻度が高い N_r から再開することで、常に N_s のみから再開する従来手法よりも隣接無線ノード間

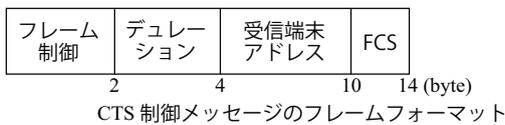


図 10 RTS/CTS 制御メッセージフォーマット。

のデータメッセージ配送機会の平等性を高めている。ここで、 N_r から先行送信される CTS 制御メッセージは、すべての NAV によって定められたメッセージ送信待機時間経過後にただちに送信することができるものの、これを受信した N_s が必ずしも RTS 制御メッセージを送信することができるとは限らない。CTS 制御メッセージ受信時点で、先行してその隣接無線ノードから受信した RTS 制御メッセージ、あるいは、CTS 制御メッセージによって N_s に NAV が設定され、メッセージ送信を待機しなければならない、RTS 制御メッセージを N_r に送信できないことが考えられる。このとき、 N_r の隣接無線ノードは、 N_r から先行送信された CTS 制御メッセージに設定された NAV によってメッセージ送信を待機しているが、 N_r の周辺におけるデータメッセージ送受信要求発生頻度が高いことから、 N_s からの RTS 制御メッセージが受信できない場合には、この NAV をキャンセルし、メッセージ送信待機を解除することが求められる。そこで、 N_r において CTS 制御メッセージ送信後、一定時間待機しても N_s からの RTS 制御メッセージを受信できない場合には、CCTS (Cancel CTS) 制御メッセージを隣接無線ノードにブロードキャスト送信することによって、隣接無線ノードの NAV をキャンセルすることとする (図 11)。

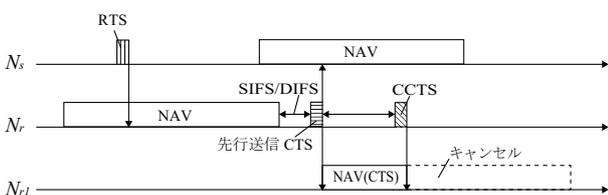


図 11 先行送信 CTS 制御メッセージによる NAV のキャンセル。

なお、RTS 制御メッセージおよび CTS 制御メッセージを受信する N_s および N_r の隣接無線ノードは、制御メッセージの種類に依存せずに受信した制御メッセージに設定された NAV を設定するため、従来の RTS/CTS 制御と同様にメッセージ送信を待機すればよい。これは、RTS 制御メッセージと CTS 制御メッセージの両方を受信する N_s と N_r に共通の隣接無線ノードにおいても同様である。これらの無線ノードでは、 N_s から N_r へのデータメッセージ

配送のための RTS 制御メッセージと CTS 制御メッセージの受信順序が従来の RTS/CTS 制御とは逆順になるものの、それぞれに設定された NAV によりメッセージ送信待機時間を定めることから、データメッセージおよび ACK 制御メッセージとの衝突回避に必要な十分な送信待機を実現することが可能である。

4. 性能評価

本論文で提案する受信ノード主導型 RTC/CTS 制御手法の有効性をシミュレーション実験により示す。図 12 に示すように、送信無線ノード N_s から受信無線ノード N_r へのデータメッセージ配送に対して、 N_s には隣接しない N_r の隣接無線ノード $N_s^1 \dots N_s^n$ がそれぞれ $N_r^1 \dots N_r^n$ へとデータメッセージを配送するものとする。このとき、 N_s から N_r へのデータメッセージ配送機会を提案手法と従来手法とで比較し、提案手法がより多くの配送機会を与えていることを確認する。NS3 シミュレータにより、すべての無線ノードは IEEE802.11b によって伝送レート 1Mbps で通信しているものとする。通信可能な無線ノード間距離 110m に対して、送受信無線ノード対 (N_s-N_r および $N_s^i-N_r^i$) 間の距離をすべて 100m とする。各送信無線ノード (N_s および N_s^i) におけるデータメッセージ送信要求の発生は平均発生間隔 60ms のポアソン過程とし、データサイズを 2,268 バイト (データメッセージサイズ 2,332 バイト) とする。

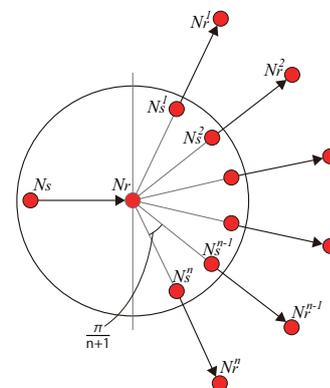


図 12 シミュレーション実験環境。

図 13 は実験結果の例である。時間経過 (水平軸) に対して、緑色が送信無線ノードから受信無線ノードへのデータメッセージ配送時間を示している。また、 N_s における赤色の鉛直線分は RTS 制御メッセージの送信時刻を示している。従来手法では、 N_s からの RTS 制御メッセージの受信に対して、 N_r が隣接する送信無線ノード N_s^i からの RTS 制御メッセージの受信によって設定された NAV のために CTS 制御メッセージの送信機会を得ることができていないことがわかる。これに対して、提案手法では、 N_r がいずれの N_s^i からも RTS 制御メッセージの受信による NAV の設定が要求されていない青色の鉛直線分で示す時刻に

CTS 制御メッセージを先行送信する機会を得ることが可能となる。この CTS 制御メッセージの受信によってすべての N_s^i は NAV を設定して制御メッセージの送信を待機する。すなわち、提案したプロトコルの適用によって N_s から N_r へデータメッセージが配送される。このデータメッセージ配送後、すなわち N_r が N_s へ ACK 制御メッセージが配送されると N_s^i の NAV 設定は解除される。この間、各 N_s^i ではバックオフタイムの値が保持されることから、以降、提案手法の場合と同一の振舞いとなる。実験結果が示すように、青色の鉛直線分の間隔と N_s-N_r の緑色領域の間隔では前者の方が短縮されていることから、提案手法は N_s から N_r へのデータメッセージ配送機会を増加させていることがわかる。

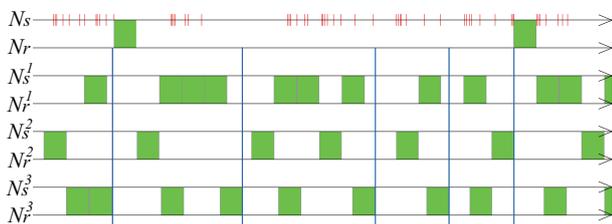


図 13 シミュレーション実験結果例。

これを隣接無線ノード対数 n を 1 から 4 まで変化させて比較したものが図 14 である。図から分かるように、 N_s-N_r 間のデータメッセージ配送機会の間隔の平均は、 n の増加とともに単調に増加しているが、その増加の割合は提案手法が従来手法よりも小さなものとなっており、提案手法の方が従来手法よりも短くなっている。 N_r に隣接する送信無線ノード数 n が 4 であるとき、提案手法のデータメッセージ配送間隔は従来手法の 0.47 倍となっており、提案手法が配送機会の均等性を改善していることが分かる。

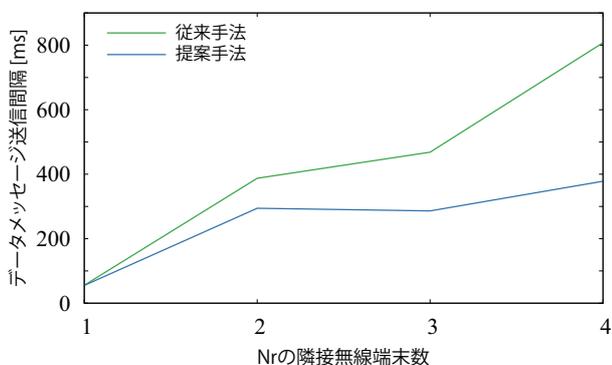


図 14 データメッセージ送信間隔。

5. まとめ

本論文では、無線アドホックネットワークのデータメッセージ送受信要求密度が局所的に高い領域において、隣接無線ノード間で RTS 制御メッセージの送信要求と CTS 制御メッセージの送信要求が競合する場合に、CTS 制御メッセージの送信要求が受け入れられにくいという無線 LAN プロトコルの問題点を示し、その解決策として、受信無線ノードが送信無線ノードの RTS 制御メッセージ送信に先行して CTS 制御メッセージを送信する受信ノード主導型 RTS/CTS 制御手法を提案した。また、シミュレーション実験により、提案手法が隣接ノード間の RTS 制御メッセージ送信と CTS 制御メッセージ送信との競合をより平等に解消し、データメッセージ配送機会の不均等な提供を改善することを示した。

参考文献

- [1] Cali, F., Conti, M. and Gregori, E., “Dynamic Turning of the IEEE 802.11 Protocol to Achieve a Theoretical Throughput Limit,” IEEE/ACM Trans. on Networking, vol. 8, pp. 785–799 (2000).
- [2] Crow, B., Widjaja, I., Kim, J. and Sakai, P., “IEEE 802.11 Wireless Local Area Network,” IEEE Communication Magazine, vol. 35, no. 9, pp. 116–126 (1997).
- [3] Ikuma, S., Li, Z., Pei, T., Choi, Y. and Sekiya, H., “Rigorous Analytical Model of Saturated Throughput for the IEEE802.11p EDCA,” IEICE Trans. on Communications, vol. E102-B, no. 4, pp. 669–707 (2019).
- [4] Kwon, Y., Fang, Y. and Latchman, H., “A Novel MAC Protocol with Fast Collision Resolution for Wireless LANs,” Proceedings of IEEE INFOCOM, vol. 2, pp. 853–862 (2003).
- [5] Tian, X., Chen, X., Ideguchi, T. and Fang, Y., “Improving Throughput and Fairness in WLANs through Dynamically Optimizing Backoff,” IEICE Trans. on Communication, vol. E88-B, no. 11, pp. 4328–4338 (2005).
- [6] 井上, 重安, 松野, 森永, “不必要な送信延期を防ぐ IEEE802.11DCF with Cancel CTS の提案,” 情報処理学会マルチメディア通信と分散処理ワークショップ論文集, pp. 129–134 (2007).
- [7] 重安, 松野, 森永, “IEEE802.11DCF 端末との混在環境下における MAC Level Fairness 向上方式の提案,” 情報処理学会論文誌, vol. 50, no. 3, pp. 1156–1169 (2009).
- [8] 原田, 太田, 森井, “無線マルチホップ網における IEEE802.11DCF の TCP スループット特性の改善,” 電子情報通信学会論文誌, vol. 85-B, no. 12, pp. 2198–2208 (2002).