

キャプチャエフェクトの考慮による 無線アドホック通信の並行性向上手法

山崎 雄大^{1,a)} 梶垣 博章^{1,b)}

概要: 無線アドホックネットワークでは、互いに隠れ端末となる無線ノードが並行に送信するメッセージがこれら双方に隣接する無線ノードにおいて衝突することでメッセージの受信に失敗することを回避するために、RTS/CTS 制御が導入されている。RTS/CTS 制御では、データメッセージの送受信ノードのいずれかに隣接する無線ノードのメッセージ送信を一時停止する。これによって、メッセージの衝突が回避できるものの、データメッセージ配送の並行性を低下させるため、無線アドホックネットワーク全体のデータメッセージ配送スループットを低下させる問題がある。本論文では、2つの無線ノードに共通の隣接無線ノードが、これらによって並行に送信されるメッセージのうちの受信電力が閾値以上に高い一方を受信することが可能であるキャプチャエフェクトを考慮することで、データメッセージ配送の並行性を高める手法を提案する。すなわち、キャプチャエフェクトによって同時並行に送信されたメッセージであっても受信が可能である特性を考慮して、衝突回避のためのメッセージ送信を一時停止させる条件を緩和する。また、この手法に基づいて拡張された RTS/CTS 制御プロトコルを設計する。ここでは、隣接無線ノード間の距離情報に基づいて2種類の NAV を使い分けることにより、メッセージ送信の一時停止の必要性を各無線ノードが判断することを可能としている。

キーワード: 無線アドホックネットワーク, RTS/CTS 制御, キャプチャエフェクト, データメッセージ並行配送。

Highly Concurrent Wireless Ad-Hoc Transmissions of Data Messages in Consideration of Capture Effects

Abstract: In wireless adhoc networks, RTS/CTS control is introduced in order to avoid collisions of messages concurrently transmitted by wireless nodes that are hidden-terminals each other. In conventional RTS/CTS control, all the neighbor wireless nodes of a sender and a receiver wireless nodes are required to suspend their transmissions of both control and data messages. Though collisions of messages are avoided due to the temporary suspension, fewer data messages are transmitted concurrently and the throughput of data messages in the wireless adhoc network is decreased. This paper proposes a novel method to realize higher concurrent data message transmissions based on the capture effects where one of the messages with higher receipt power with the predetermined margin is received among concurrently transmitted messages. That is, weaker restrictions for concurrent message transmissions based on the capture effects are induced and an extended RTS/CTS control protocol for the higher concurrent data message transmissions is designed. Here, based on the distance between neighbor wireless nodes, each wireless node determines settings of its own NAV by using two different kinds of NAVs.

Keywords: Wireless Adhoc Networks, RTS/CTS Control, Capture Effects, Concurrent Data Message Transmissions.

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) yudai@higlab.net

b) hig@higlab.net

1. はじめに

無線アドホック通信では、互いに無線信号到達範囲に含まれている隣接無線ノード間で無線基地局による中継を行わずに直接データメッセージを配送する。このとき、ひとつの無線ノードに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と、これらが衝突して受信に失敗する。これを回避する機構として CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) と RTS/CTS 制御 (Request to Send/Clear to Send) が導入されている。これらはいずれも隣接無線ノードが送信する無線信号の傍受とそれに基づいて判断したメッセージ送信の一時停止によるものである。無線ノードの自律的なメッセージ送信の一時停止はメッセージの衝突回避に有効であるものの、メッセージ送信の一時停止による無線アドホックネットワーク全体のデータメッセージ配送スループットの低下とのトレードオフとなる。そのため、データメッセージ配送の並行性を改善する、すなわち、衝突回避のために各無線ノードが自律的に行なう送信待機の制約を緩和することが求められる。

2. 従来手法

無線アドホック通信では、互いに隠れ端末となる無線ノードが制御メッセージあるいはデータメッセージを並行に送信することによる衝突の発生を回避するために RTS/CTS 制御 [4] を導入している。図 1 に示すように、隣接無線ノード N_s から N_r へのデータメッセージ配送の開始前に、 N_s は、 N_r へ RTS (Request to Send) 制御メッセージ送信する。また、この RTS 制御メッセージを受信した N_r は、 N_s へ CTS (Clear to Send) 制御メッセージを送信する。 N_s は、この CTS 制御メッセージの受信を待って、データメッセージを N_r へ送信する。もし、 N_s が CTS 制御メッセージを受信しないままタイムアウトしたならば、データメッセージを送信しない。この RTS 制御メッセージと CTS 制御メッセージには、データメッセージ配送が終了するまでの所要時間が含まれている。RTS 制御メッセージを受信した N_r 以外の N_s の隣接無線ノード N_s^n と CTS 制御メッセージを受信した N_r 以外の N_r の隣接無線ノード N_r^n は、これらの制御メッセージを受信したならば NAV (Network Allocation Vector) を設定して、制御メッセージに含まれるデータメッセージ配送終了までの時間にはメッセージ送信を一時停止する。これによって、 N_s と N_r のすべての隣接無線ノードがメッセージ送信を一時停止するため、 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 ACK (Acknowledgement) 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。NAV を設定している無

線ノードは、制御メッセージ、データメッセージともに送信を一時停止していることから、 N_s が NAV を設定している場合には、通信要求の発生に対して RTS 制御メッセージの送信を直ちに行なうことができず、 N_r が NAV を設定している場合には、 N_s から送信された RTS 制御メッセージの受信に対して CTS 制御メッセージの送信を行なうことができない。

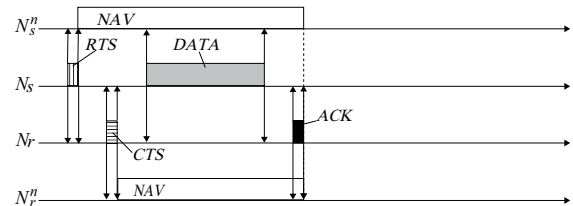


図 1 RTS/CTS 制御.

このため、 N_s から N_r へのデータメッセージ配送のための RTS/CTS 制御が先行して開始している状況で、隣接無線ノード $N_{s'}$ から $N_{r'}$ へのデータメッセージ配送を並行に行なうためには、 $N_{s'}$ と $N_{r'}$ がともに N_s , N_r の隣接無線ノードでないことが条件となる。

[並行配送可能条件]

無線ノード N_s から N_r へのデータメッセージ配送と並行して、無線ノード $N_{s'}$ から $N_{r'}$ へのデータメッセージ配送を衝突なく行なうための条件は、以下のすべてを満足することである。ただし、 R を無線ノードの無線信号到達距離とする。

- $\min\{|N_s N_{s'}|, |N_s N_{r'}|, |N_r N_{s'}|, |N_r N_{r'}|\} > R$ □

このように、従来の RTS/CTS 制御では、メッセージの衝突を回避したデータメッセージ配送の並行性が低く、無線アドホックネットワーク全体のデータメッセージ配送スループットが低い問題がある。

論文 [2][3][6] で述べられているように、無線ノード N_r が隣接無線ノード N_s , $N_{s'}$ が並行に送信するメッセージを受信する場合、ディスクモデル [5] では、 N_s と $N_{s'}$ が送信する無線信号が N_r で衝突するために N_r はいずれのメッセージも受信することができないとしているが、無線ノード間距離 $|N_s N_r|$ と $|N_{s'} N_r|$ の差が閾値 Δ 以上に大きい場合には、キャプチャエフェクトによってノード間距離の短い無線ノードによって送信されたメッセージを N_r は受信することが可能である。すなわち、 $|N_s N_r| + \Delta < |N_{s'} N_r|$ であるならば N_s が送信するメッセージを、 $|N_{s'} N_r| + \Delta < |N_s N_r|$ であるならば $N_{s'}$ が送信するメッセージを N_r は受信することができる。本論文では、この性質を活用して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一時停止の条件を緩和し、より並行性の高いデータメッセージ配送を実現するために拡張された RTS/CTS 制御を考案し、そのプロトコルを設計する。

3. 提案手法

3.1 並行配送可能性検証

隣接無線ノード N_s から N_r へのデータメッセージ配送のための RTS/CTS 制御が先行して開始している状況において、隣接無線ノード $N_{s'}$ から $N_{r'}$ へのデータメッセージ配送のための RTS/CTS 制御を開始した場合に、キャプチャエフェクトが発生することを前提として、制御メッセージおよびデータメッセージの受信無線ノードにおける衝突を回避して、これらのデータメッセージの並行配送を実現する可能性について検証する。ここでは、 N_s 、 N_r のいずれかと $N_{s'}$ 、 $N_{r'}$ のいずれかとの一対が互いに隣接する、すなわち、無線信号到達範囲に含まれる以下の4つの場合について考える (R は無線ノードの無線信号到達距離とする)。

- N_r と $N_{s'}$ が隣接する ($|N_r N_{s'}| \leq R$) 場合
- N_r と $N_{r'}$ が隣接する ($|N_r N_{r'}| \leq R$) 場合
- N_s と $N_{s'}$ が隣接する ($|N_s N_{s'}| \leq R$) 場合
- N_s と $N_{r'}$ が隣接する ($|N_s N_{r'}| \leq R$) 場合

[$|N_r N_{s'}| \leq R$ の場合]

図 2-5 に示すように、隣接無線ノード N_s から N_r へのデータメッセージ配送のための RTS/CTS 制御が先行して開始している状況において、 N_r に隣接する無線ノード $N_{s'}$ から $N_{r'}$ へのデータメッセージ配送のための RTS/CTS 制御を開始した場合について考える。従来手法では、 N_r がブロードキャスト送信した CTS 制御メッセージを受信した $N_{s'}$ は N_s から N_r へのデータメッセージ配送が終了する時刻までの 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一時停止する。これは、 N_s が N_r に送信するデータメッセージと $N_{s'}$ が送信する RTS 制御メッセージおよびデータメッセージとが N_r で衝突することを防止するためである。このため、これらのデータメッセージ配送が並行に行なわれることはない。

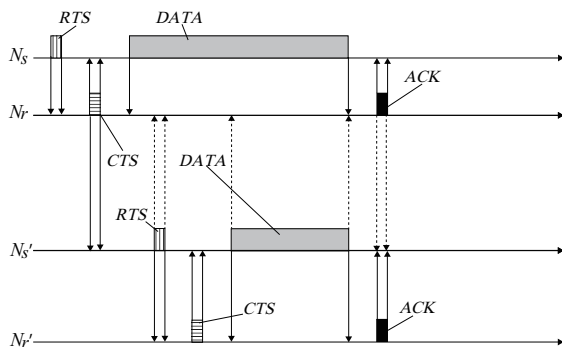


図 2 並行配送可否の検証 ($|N_r N_{s'}| \leq R$, $|N_s N_r| + \Delta < |N_r N_{s'}|$, $|N_{s'} N_{r'}| + \Delta < |N_r N_{s'}|$).

ところが、図 2 および図 3 のように $|N_s N_r| + \Delta < |N_r N_{s'}|$ である場合には、たとえ N_s がデータメッセージを送信し

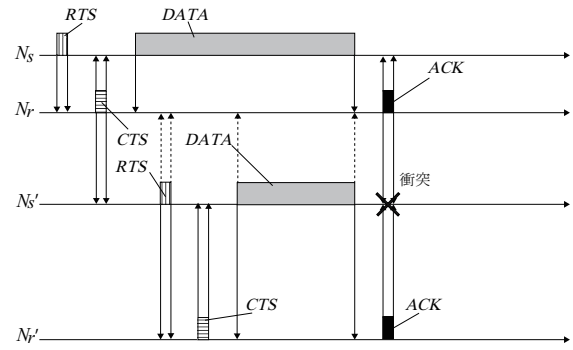


図 3 並行配送可否の検証 ($|N_r N_{s'}| \leq R$, $|N_s N_r| + \Delta < |N_r N_{s'}|$, $|N_{s'} N_{r'}| + \Delta \geq |N_r N_{s'}|$).

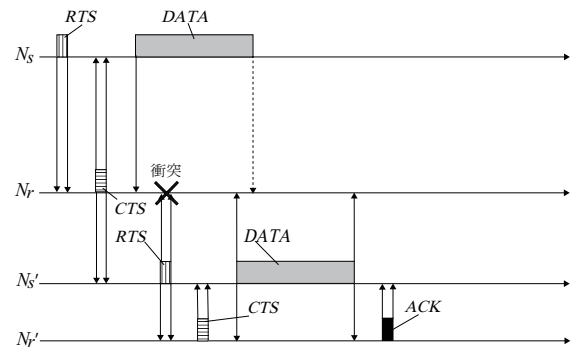


図 4 並行配送可否の検証 ($|N_r N_{s'}| \leq R$, $|N_s N_r| + \Delta \geq |N_r N_{s'}|$, $|N_{s'} N_{r'}| + \Delta < |N_r N_{s'}|$).

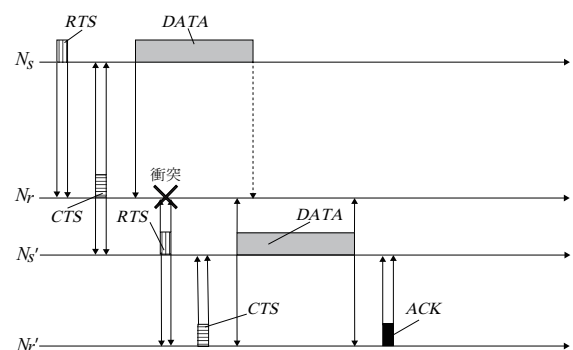


図 5 並行配送可否の検証 ($|N_r N_{s'}| \leq R$, $|N_s N_r| + \Delta \geq |N_r N_{s'}|$, $|N_{s'} N_{r'}| + \Delta \geq |N_r N_{s'}|$).

ている最中に $N_{s'}$ が RTS 制御メッセージあるいはデータメッセージを送信しても、キャプチャエフェクトによって N_r は N_s からのデータメッセージを受信することができる。逆に、図 4 および図 5 のように $|N_s N_r| + \Delta \geq |N_r N_{s'}|$ である場合には、 N_s がデータメッセージを送信している最中に $N_{s'}$ が RTS 制御メッセージあるいはデータメッセージを送信すると、これらが N_r で衝突して N_r は N_s からのデータメッセージを受信することができない。

一方、図 2 のように $|N_{s'} N_{r'}| + \Delta < |N_r N_{s'}|$ である場合には、 $N_{r'}$ が CTS 制御メッセージあるいは ACK 制御メッセージを送信すると並行して N_r が ACK 制御メッ

セージを送信しても、キャプチャエフェクトによって $N_{s'}$ は $N_{r'}$ からの制御メッセージを受信することができる。逆に、図3のように $|N_{s'}N_{r'}| + \Delta \geq |N_rN_{s'}|$ である場合には、 $N_{r'}$ が CTS 制御メッセージあるいは ACK 制御メッセージを送信すると、これらが $N_{s'}$ で衝突して $N_{s'}$ は $N_{r'}$ からの制御メッセージを受信することができない。ただし、この $N_{s'}$ における ACK 制御メッセージ同士の衝突が回避できるのであれば、2つのデータメッセージを並行に配送することが可能となる。

[$|N_rN_{r'}| \leq R$ の場合]

図6-10に示すように、隣接無線ノード N_s から N_r へのデータメッセージ配送のための RTC/CTS 制御が先行して開始している状況において、無線ノード $N_{s'}$ から N_r に隣接する $N_{r'}$ へのデータメッセージ配送のための RTS/CTS 制御を開始した場合について考える。従来手法では、 N_r がブロードキャスト送信した CTS 制御メッセージを受信した $N_{r'}$ は N_s から N_r へのデータメッセージ配送が終了する時刻までの NAV を設定し、制御メッセージの送信を一時停止する。これは、 N_s が N_r に送信するデータメッセージと $N_{r'}$ が送信する CTS 制御メッセージおよび ACK 制御メッセージとが N_r で衝突することを防止するためである。このため、これらのデータメッセージ配送が並行に行なわれることはない。

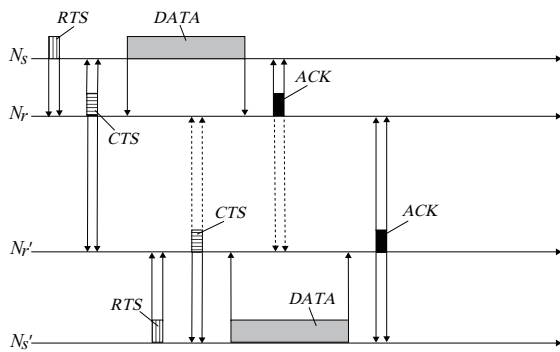


図6 並行配送可否の検証 ($|N_rN_{r'}| \leq R$, $|N_sN_r| + \Delta < |N_rN_{r'}|$, $|N_{s'}N_{r'}| + \Delta < |N_rN_{r'}|$).

ところが、図6、図7および図8のように $|N_sN_r| + \Delta < |N_rN_{r'}|$ である場合には、たとえ N_s がデータメッセージを送信している最中に $N_{r'}$ が CTS 制御メッセージあるいは ACK 制御メッセージを送信しても、キャプチャエフェクトによって N_r は N_s からのデータメッセージを受信することができる。逆に、図9および図10のように $|N_sN_r| + \Delta \geq |N_rN_{r'}|$ である場合には、 N_s がデータメッセージを送信している最中に $N_{r'}$ が CTS 制御メッセージあるいは ACK 制御メッセージを送信すると、これらが N_r で衝突して N_r は N_s からのデータメッセージを受信する

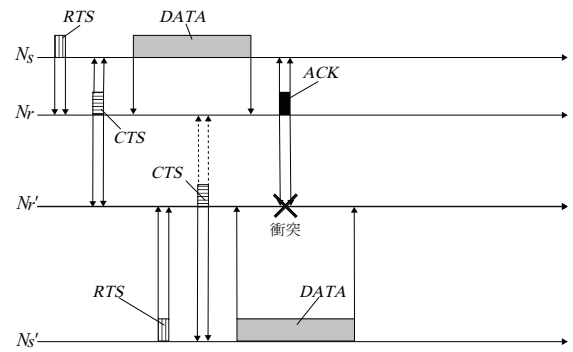


図7 並行配送可否の検証 ($|N_rN_{r'}| \leq R$, $|N_sN_r| + \Delta < |N_rN_{r'}|$, $|N_{s'}N_{r'}| + \Delta \geq |N_rN_{r'}|$).

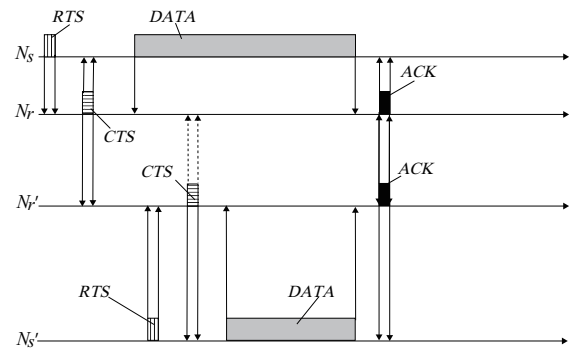


図8 並行配送可否の検証 ($|N_rN_{r'}| \leq R$, $|N_sN_r| + \Delta < |N_rN_{r'}|$, $|N_{s'}N_{r'}| + \Delta \geq |N_rN_{r'}|$).

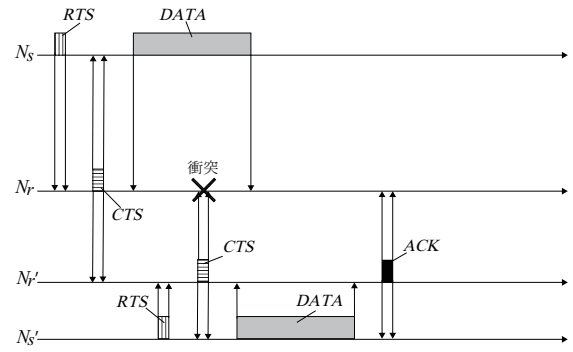


図9 並行配送可否の検証 ($|N_rN_{r'}| \leq R$, $|N_sN_r| + \Delta \geq |N_rN_{r'}|$, $|N_{s'}N_{r'}| + \Delta < |N_rN_{r'}|$).

ことができない。

一方、図6のように $|N_{s'}N_{r'}| + \Delta < |N_rN_{r'}|$ である場合には、 $N_{s'}$ が RTS 制御メッセージあるいはデータメッセージを送信すると、これらが N_r で衝突して N_r は N_s からのデータメッセージを受信することができる。逆に、図7のように $|N_{s'}N_{r'}| + \Delta \geq |N_rN_{r'}|$ である場合には、 $N_{s'}$ が RTS 制御メッセージあるいはデータメッセージを送信すると、これらが $N_{r'}$ で衝突して $N_{r'}$ は $N_{s'}$ からの RTS 制御メッセージおよびデータメッセージを受信する

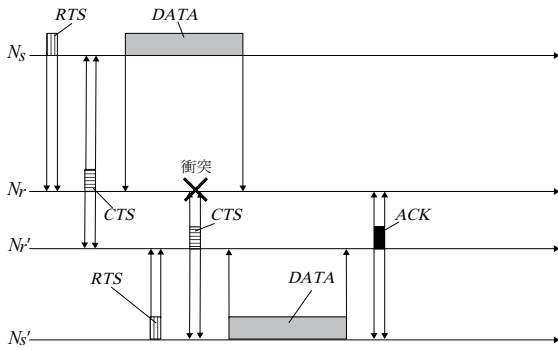


図 10 並行配送可否の検証 ($|N_r N_{r'}| \leq R$, $|N_s N_r| + \Delta \geq |N_r N_{r'}|$, $|N_{s'} N_{r'}| + \Delta \geq |N_r N_{r'}|$).

を受信することができない。ただし、図 8 のように N_r が ACK 制御メッセージを送信する以前に $N_{s'}$ によるデータメッセージ送信が終了しているのであれば、2つのデータメッセージを並行に配送することができる。

$|N_s N_{s'}| \leq R$ の場合および $|N_s N_{r'}| \leq R$ の場合についても同様に検証すると、キャプチャエフェクトが発生する場合に二対の隣接無線ノード間でデータメッセージの並行配送を行なうための条件は表 1 に示す通りとなる。

[キャプチャエフェクト発生時の並行配送可能条件]

無線ノード N_s から N_r へのデータメッセージ配送と並行して、無線ノード $N_{s'}$ から $N_{r'}$ へのデータメッセージ配送を衝突なく行なうための十分条件は以下の通りである (表 1o)。ただし、 R を無線ノードの無線信号到達距離とする。

- $\max\{|N_s N_r|, |N_{s'} N_{r'}|\} + \Delta < \min\{|N_s N_{s'}|, |N_s N_{r'}|, |N_r N_{s'}|, |N_r N_{r'}|\}$

なお、以下のいずれかの条件を満たす場合には、 N_r および $N_{r'}$ が送信する ACK 制御メッセージ同士が N_s あるいは $N_{s'}$ において衝突しないならば、データメッセージの並行配送が可能である (表 1Δ)。

- $|N_r N_{s'}| < R$, $|N_s N_r| + \Delta < |N_r N_{s'}| \leq |N_{s'} N_{r'}| + \Delta$
- $|N_s N_{r'}| < R$, $|N_{s'} N_{r'}| + \Delta < |N_s N_{r'}| \leq |N_{s'} N_{r'}| + \Delta$

さらに、以下のいずれかの条件を満たす場合には、 N_r が ACK 制御メッセージを送信する以前に $N_{s'}$ がデータメッセージの送信を終えるならば、データメッセージの並行配送が可能となる (表 1▲)。

- $|N_r N_{r'}| < R$, $|N_s N_r| + \Delta < |N_r N_{r'}| \leq |N_{s'} N_{r'}| + \Delta$
- $|N_s N_{s'}| < R$, $|N_{s'} N_{r'}| + \Delta < |N_s N_{s'}| \leq |N_s N_r| + \Delta$

□

3.2 並行配送実現プロトコル

前節で導出した並行配送可能となる十分条件を満足する場合に二対の隣接無線ノード間でデータメッセージの並行配送を可能とするように拡張した RTS/CTS 制御プロトコルを設計する。ここで、条件 $|N_s N_r| +$

$\Delta < \min\{|N_s N_{s'}|, |N_s N_{r'}|, |N_r N_{s'}|, |N_r N_{r'}|\}$ は、 $N_{s'}$ から $N_{r'}$ へのデータメッセージ配送のための RTS/CTS 制御を開始しても、制御メッセージやデータメッセージの衝突によって N_s から N_r へのデータメッセージ配送が失敗しないための条件である。このため、逆にこの条件を満足しない場合には、 N_s あるいは N_r に隣接する $N_{s'}$ あるいは $N_{r'}$ は、 $N_{s'}$ から $N_{r'}$ へのデータメッセージ配送のための RTS/CTS 制御を行なってはならない。すなわち、従来手法の RTS/CTS 制御と同様、NAV を設定して $N_{s'}$ であれば RTS 制御メッセージを送信せず、 $N_{r'}$ であれば $N_{s'}$ からの RTS 制御メッセージの受信に対して CTS 制御メッセージを送信しない。

一方、 $|N_{s'} N_{r'}| + \Delta < \min\{|N_{s'} N_s|, |N_{s'} N_r|, |N_{r'} N_s|, |N_{r'} N_r|\}$ という条件は、 $N_{s'}$ から $N_{r'}$ へのデータメッセージ配送のための RTS/CTS 制御を開始しても、制御メッセージやデータメッセージの衝突によって $N_{s'}$ から $N_{r'}$ へのデータメッセージ配送が失敗しないための条件である。このため、この条件を満足しない場合には、 N_s あるいは N_r に隣接する $N_{s'}$ あるいは $N_{r'}$ は、 $N_{s'}$ から $N_{r'}$ へのデータメッセージ配送のための RTS/CTS 制御を行なってはならない。逆に、この条件を満足するのであれば、従来手法では NAV が設定されていることによって並行配送による衝突を回避する場合であっても $N_{s'}$ であれば RTS 制御メッセージを送信し、 $N_{r'}$ であれば $N_{s'}$ からの RTS 制御メッセージの受信に対して CTS 制御メッセージを送信する。

これらの条件を満足するかの判断は、 N_s および N_r が送信した RTS 制御メッセージ および CTS 制御メッセージを受信した $N_{s'}$ および $N_{r'}$ の隣接無線ノードが個別に無線ノード間距離を比較することによって行なう。このため、本節では以下の前提条件が満足されていることとしてプロトコルを設計する。

[拡張 RTS/CTS 制御プロトコル設計条件]

- 各無線ノードは、自身のすべての隣接無線ノードとの間の距離を取得している。これは、各無線ノードが送信した制御メッセージおよびデータメッセージの受信電力から推定することに加えて、各無線ノードが定期的に距離推定のための制御メッセージを送信することによって実現できる。
- N_s および $N_{s'}$ が送信する RTS 制御メッセージと N_r および $N_{r'}$ が送信する CTS 制御メッセージに受信無線ノード間距離をピギーバックすることが可能である。□

表 1 キャプチャエフェクト発生時の並行配送可能条件

	$ N_s N_r + \Delta < X$ $ N_{s'} N_{r'} + \Delta < X$	$ N_s N_r + \Delta < X$ $ N_{s'} N_{r'} + \Delta \geq X$	$ N_s N_r + \Delta \geq X$ $ N_{s'} N_{r'} + \Delta < X$	$ N_s N_r + \Delta \geq X$ $ N_{s'} N_{r'} + \Delta \geq X$
$X = N_r N_{s'} < R$	○	△	×	×
$X = N_r N_{r'} < R$	○	▲	×	×
$X = N_s N_{s'} < R$	○	×	▲	×
$X = N_s N_{r'} < R$	○	×	△	×

まず、いずれも NAV を設定していない隣接無線ノード N_s から N_r へのデータメッセージ配送のための RTS/CTS 制御では、 N_s と N_r がそれぞれ送信する RTS 制御メッセージ、CTS 制御メッセージに $|N_s N_r|$ をピギーバックする。これを受信した N_s あるいは N_r の隣接無線ノード $N_{s'}$ は、自身を送受信無線ノードとするデータメッセージの並行配送が可能であるか否かをメッセージにピギーバックされた $|N_s N_r|$ と $|N_s N_{s'}|$ あるいは $|N_r N_{s'}|$ と比較することによって判断する。ここで、 $|N_s N_r| + \Delta \geq |N_s N_{s'}|$ あるいは $|N_s N_r| + \Delta \geq |N_r N_{s'}|$ を満足する場合には、キャプチャエフェクトを考慮しても衝突のないデータメッセージの並行配送を行なうことはできないため、従来手法と同様に N_s から N_r へのデータメッセージ配送が終了するまでメッセージの送信を一時停止する NAV を設定する。これを本論文では「ハード NAV」と呼ぶ。一方、 $|N_s N_r| + \Delta < |N_s N_{s'}|$ あるいは $|N_s N_r| + \Delta < |N_r N_{s'}|$ を満足する場合には、キャプチャエフェクトによって衝突のないデータメッセージの並行配送を行なうことが可能であるため、従来手法とは異なり N_s から N_r へのデータメッセージ配送のための RTS/CTS 制御が継続している時間においても条件付きでメッセージ送信を行なうことができる NAV を設定する。これを本論文では「ソフト NAV」と呼ぶ。

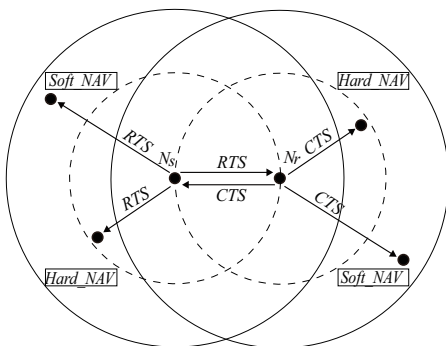


図 11 ハード NAV とソフト NAV.

ハード NAV を設定している $N_{s'}$ は RTS 制御メッセージの送信を NAV が解除されるまで延期する。また、ハード NAV を設定している $N_{r'}$ は $N_{s'}$ から送信された RTS

制御メッセージを受信しても CTS 制御メッセージを送信しない。 $N_{s'}$ は CTS 制御メッセージを受信せずにタイムアウトするため、データメッセージを送信しない。

一方、ソフト NAV を設定している $N_{s'}$ は、 N_s あるいは N_r による制御メッセージおよびデータメッセージの送信と $N_{r'}$ による CTS 制御メッセージあるいは ACK 制御メッセージの送信とが並行に行なわれても、キャプチャエフェクトにより $N_{r'}$ からの制御メッセージを受信することができる場合にのみ RTS 制御メッセージを $N_{r'}$ へ送信する。すなわち、RTS 制御メッセージあるいは CTS 制御メッセージの受信によってソフト NAV を設定した $N_{s'}$ は、 $|N_{s'} N_{r'}|$ と $|N_s N_{s'}|$ あるいは $|N_r N_{s'}|$ とを比較し、 $|N_{s'} N_{r'}| + \Delta < |N_s N_{s'}|$ あるいは $|N_{s'} N_{r'}| + \Delta < |N_r N_{s'}|$ を満足する場合にのみ RTS 制御メッセージを $N_{r'}$ へ送信する。条件を満足しない場合には、このソフト NAV が解除されるまで RTS 制御メッセージの送信を延期する。

また、ソフト NAV を設定している $N_{r'}$ が $N_{s'}$ が送信する RTS 制御メッセージを受信したならば、 N_s あるいは N_r による制御メッセージおよびデータメッセージの送信と $N_{s'}$ によるデータメッセージの送信とが並行に行なわれても、キャプチャエフェクトにより $N_{r'}$ からのデータメッセージを受信することができる場合にのみ CTS 制御メッセージを $N_{s'}$ へ送信する。すなわち、RTS 制御メッセージあるいは CTS 制御メッセージの受信によってソフト NAV を設定した $N_{r'}$ は、 $N_{s'}$ が送信する RTS 制御メッセージの受信に対して、 $|N_{s'} N_{r'}|$ と $|N_s N_{r'}|$ あるいは $|N_r N_{r'}|$ とを比較し、 $|N_{s'} N_{r'}| + \Delta < |N_s N_{r'}|$ あるいは $|N_{s'} N_{r'}| + \Delta < |N_r N_{r'}|$ を満足する場合にのみ CTS 制御メッセージを $N_{s'}$ へ送信する。条件を満足しない場合には、CTS 制御メッセージを送信しない。 $N_{s'}$ は CTS 制御メッセージを受信せずにタイムアウトするため、データメッセージを送信しない。

この提案プロトコルを前節で検証したそれぞれの場合に適用する。

[$|N_r N_{s'}| \leq R$ の場合]

図 12 および図 13 のように $|N_s N_r| + \Delta < |N_r N_{s'}|$ である

場合には、 N_r が送信した CTS 制御メッセージの受信に対して $N_{s'}$ はソフト NAV を設定する。データメッセージの送信要求に対して、図 12 のように $|N_{s'}N_{r'}| + \Delta < |N_rN_{s'}|$ である場合には、 $N_{s'}$ は $|N_{s'}N_{r'}|$ をピギーバックした RTS 制御メッセージを $N_{r'}$ へ送信し、これを受信した $N_{r'}$ は $|N_{s'}N_{r'}|$ をピギーバックした CTS 制御メッセージを $N_{s'}$ へ送信する。このとき、これらの RTS 制御メッセージ、 CTS 制御メッセージを受信した $N_{s'}$ 、 $N_{r'}$ の隣接無線ノード $N_{r''}$ は、ピギーバックされた $|N_{s'}N_{r'}|$ と $|N_{s'}N_{r''}|$ あるいは $|N_{r'}N_{r''}|$ とを比較し、ハード NAV もしくはソフト NAV を設定する。 $N_{r'}$ が CTS 制御メッセージあるいは ACK 制御メッセージを送信すると並行して N_r が ACK 制御メッセージを送信しても、キャプチャエフェクトによって $N_{s'}$ は $N_{r'}$ からの制御メッセージを受信することができる。逆に、図 13 のように $|N_{s'}N_{r'}| + \Delta \geq |N_rN_{s'}|$ である場合には、 $N_{s'}$ は RTS 制御メッセージの送信をこのソフト NAV の解除まで延期する。

一方、図 14 のように $|N_sN_r| + \Delta \geq |N_rN_{s'}|$ である場合には、 N_r が送信した CTS 制御メッセージの受信に対して $N_{s'}$ はハード NAV を設定する。データメッセージの送信要求に対して、 $N_{s'}$ は RTS 制御メッセージの送信をこのハード NAV の解除まで延期する。

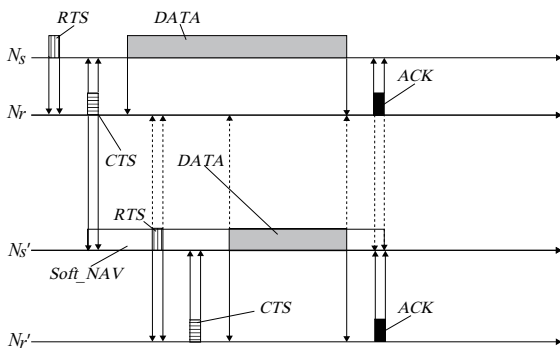


図 12 提案プロトコル ($|N_rN_{s'}| \leq R$, $|N_sN_r| + \Delta < |N_rN_{s'}|$, $|N_{s'}N_{r'}| + \Delta < |N_rN_{s'}|$).

[[$|N_rN_{r'}| \leq R$ の場合]

図 15 および図 16 のように $|N_sN_r| + \Delta < |N_rN_{r'}|$ である場合には、 N_r が送信した CTS 制御メッセージの受信に対して $N_{r'}$ はソフト NAV を設定する。 $N_{s'}$ から送信された RTS 制御メッセージの受信に対して、図 15 のように $|N_{s'}N_{r'}| + \Delta < |N_rN_{r'}|$ である場合には、 $N_{r'}$ は $|N_{s'}N_{r'}|$ をピギーバックした CTS 制御メッセージを $N_{s'}$ へ送信する。このとき、これらの RTS 制御メッセージ、 CTS 制御メッセージを受信した $N_{s'}$ 、 $N_{r'}$ の隣接無線ノード

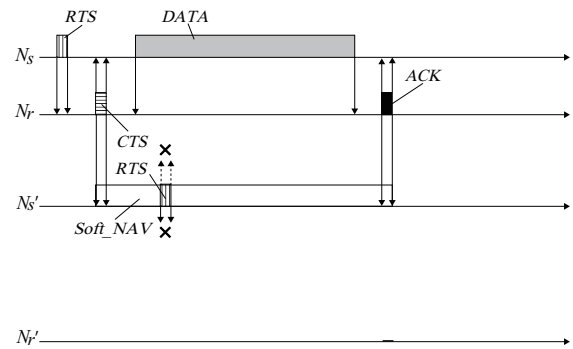


図 13 提案プロトコル ($|N_rN_{s'}| \leq R$, $|N_sN_r| + \Delta < |N_rN_{s'}|$, $|N_{s'}N_{r'}| + \Delta \geq |N_rN_{s'}|$).

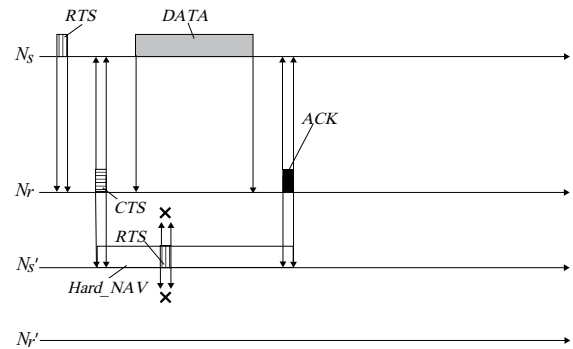


図 14 提案プロトコル ($|N_rN_{s'}| \leq R$, $|N_sN_r| + \Delta \geq |N_rN_{s'}|$).

ド $N_{r''}$ は、ピギーバックされた $|N_{s'}N_{r'}|$ と $|N_{s'}N_{r''}|$ あるいは $|N_{r'}N_{r''}|$ とを比較し、ハード NAV もしくはソフト NAV を設定する。 $N_{s'}$ がデータメッセージを送信すると並行して N_r が ACK 制御メッセージを送信しても、キャプチャエフェクトによって $N_{r'}$ は $N_{s'}$ からのデータメッセージを受信することができる。逆に、図 16 のように $|N_{s'}N_{r'}| + \Delta \geq |N_rN_{r'}|$ である場合には、 $N_{r'}$ は CTS 制御メッセージを送信しない。 $N_{s'}$ は CTS 制御メッセージを受信せずにタイムアウトするため、データメッセージを送信しない。

一方、図 17 のように $|N_sN_r| + \Delta \geq |N_rN_{r'}|$ である場合には、 N_r が送信した CTS 制御メッセージの受信に対して $N_{r'}$ はハード NAV を設定する。 $N_{s'}$ から送信された RTS 制御メッセージの受信に対して、 $N_{r'}$ は CTS 制御メッセージを送信しない。 $N_{s'}$ は CTS 制御メッセージを受信せずにタイムアウトするため、データメッセージを送信しない。

$|N_sN_{s'}| \leq R$ の場合および $|N_sN_{r'}| \leq R$ の場合についても、それぞれ $N_{s'}$ 、 $N_{r'}$ が RTS 制御メッセージの送信の可否および CTS 制御メッセージの送信の可否を設定している NAV の種類と $|N_{s'}N_{r'}|$ に基づいて判断することができる。

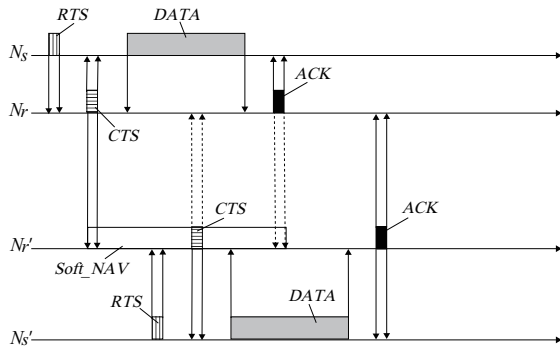


図 15 提案プロトコル ($|N_r N_{r'}| \leq R$, $|N_s N_r| + \Delta < |N_r N_{r'}|$, $|N_{s'} N_{r'}| + \Delta < |N_r N_{r'}|$).

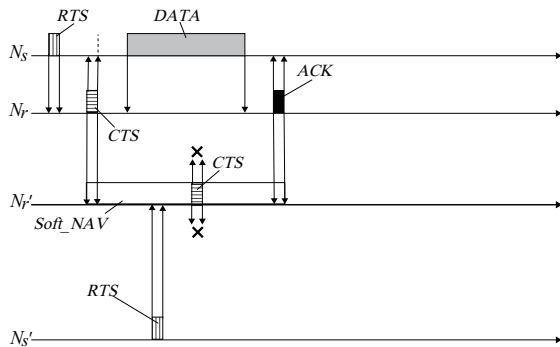


図 16 提案プロトコル ($|N_r N_{r'}| \leq R$, $|N_s N_r| + \Delta < |N_r N_{r'}|$, $|N_{s'} N_{r'}| + \Delta \geq |N_r N_{r'}|$).

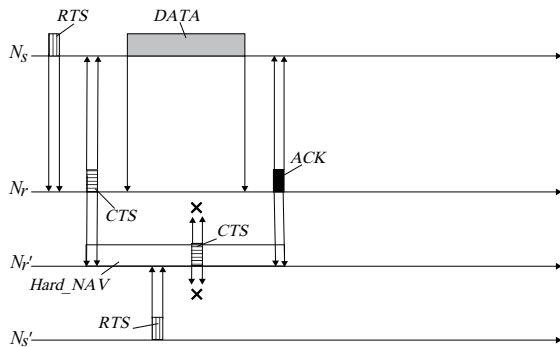


図 17 提案プロトコル ($|N_r N_{r'}| \leq R$, $|N_s N_r| + \Delta \geq |N_r N_{r'}|$).

4. まとめ

本論文では、キャプチャエフェクトにより、互いに隠れ端末である隣接無線ノードが並行に送信するメッセージの一方を受信することが可能であることを考慮して、メッセージ送信の一時停止条件を緩和することでデータメッセージ配送の並行性を向上する手法を考案した。また、これを實現するために拡張された RTS/CTS 制御プロトコルを設計した。

今後は、並行性の向上によるデータメッセージ配送スループットの向上効果をシミュレーション実験によって検証す

るとともに、ACK 制御メッセージ同士の衝突回避あるいはデータメッセージと ACK 制御メッセージとの衝突回避によってデータメッセージの並行配送に対する制約を緩和することを検討する。また、無線ノードの移動への適応性を高めるために、事前に隣接無線ノード間距離を制御メッセージの受信電力から取得しておくのではなく、RTS/CTS 制御で送受信される制御メッセージ、データメッセージの受信電力からノード間距離を取得して、同等のデータメッセージ並行配送を実現するためのプロトコルを構成する。

参考文献

- [1] Bahillo, A., Blas, J., Fernández, P., Lorenzo, M. R., Mazuelas, S. and Prieto, J., “IEEE 802.11 Distance Estimation Based on RTS/CTS Two-Frame Exchange Mechanism,” Proceedings of IEEE 69th Vehicular Technology Conference (2009).
- [2] Boer, J. and et al., “Wireless LAN with enhanced capture provision,” US Patent 5987033 (1999).
- [3] Choi, Y., Jo, D., Kim, W., Kwon, T., Lee, J., Lee, S. and Ryu, J., “An Experimental Study on the Capture Effect in 802.11 a Networks,” Proceedings of ACM Workshop on Wireless Network Testbeds, Experimental Evaluation & Characterization (2007).
- [4] IEEE 802.11, “Wireless LAN Medium Access Control (MAC) And Physical Layer (PHY) Specifications,” IEEE 802.11 (2016).
- [5] Kranakis, E., Singh, H. and Urrutia, J., “Compass Routing on Geometric Networks,” Proceedings of the 11th Canadian Conference on Computational Geometry, pp. 51–54 (1999).
- [6] 磯村, 三好, 山口, “多数の無線 LAN における干渉とキャプチャエフェクト解析,” 情報処理学会シンポジウムシリーズ, vol. 2013, no. 2 (2013).