Vol.2019-MBL-93 No.26
Vol.2019-ITS-79 No.26
2019/11/22

双方向無線マルチホップ配送のための ネットワークコーディング通信手法

青井 雄亮[1,a)]　桧垣 博章[1,b)]

概要：無線マルチホップ配送経路を双方向にデータメッセージ群が配送される場合, それぞれの方向に配送されるデータメッセージが中継無線ノードに保持される頻度が高くなる. そこで, 中継無線ノードのデータメッセージ転送にネットワークコーディングを導入することによって各データメッセージの配送遅延の短縮, エンドエンドのデータメッセージ配送スループットの向上が期待される. しかし, 無線マルチホップ配送経路に沿ってデータメッセージ群を配送する場合, 各中継無線ノードはその前後 2 ホップの中継無線ノードのメッセージ送信を抑制することでデータメッセージと他のメッセージとの衝突 (経路内衝突) を回避することが必要である. そのために RTS/CTS 制御の導入が求められるが, 従来手法では制御メッセージの配送手順が延長しており, データメッセージの配送性能の低下が避けられない. 本論文では, 制御メッセージの配送手順の延長を回避するために, *CTS* 制御メッセージと *ACK* 制御メッセージの衝突の検知をもってこれらの正しい配送を判断する手法を提案する. また, ネットワークコーディングされたデータメッセージを受信した隣接中継無線ノードのいずれかが排他的にデータメッセージの連続転送を行うことで, 制御メッセージの重畳による削減とデータメッセージ配送遅延の短縮を実現する手法を提案する. 提案手法による無線マルチホップ配送性能の改善をシミュレーション実験評価し, 従来手法と比較してエンドエンドのデータメッセージスループットが 40.3%拡大されることを示す.

キーワード：無線マルチホップ配送, 双方向通信, RTS/CTS 制御, 衝突.

Network Coding Communication for Bi-Directional Wireless Multihop Communications

Yusuke AOI[1,a)]　Hiroaki HIGAKI[1,b)]

Abstract: In some wireless network applications using bidirectional wireless multihop transmissions of sequences of data messages, intermediate wireless nodes hold temporarily data messages in both directions with high probability. Network coding methods have been proposed for reduction of forwarding and end-to-end transmission delays and for increase of end-to-end data message throughput. However, for collision-free wireless multihop transmissions, 2-hop neighbor intermediate wireless nodes are required to be suspended during a data message transmission. Some extended RTS/CTS control have been proposed for network coding support; however, for avoidance of collisions between control messages transmitted for the control, longer transmission delay is inevitable. This paper proposes a novel RTS/CTS control method for supporting network coding in bidirectional data message transmission. Here, the *CTS* and *ACK* control messages are transmitted with the usual *SIFS* interval and their correct simultaneous transmissions are detected by their collisions. In addition, one of the neighbor intermediate wireless nodes receiving a network coded data message successively forwards the data message exclusively. This results in reduction of numbers of control messages by introduction of possible piggybacking and shorter end-to-end transmission delay of data messages. In simulation experiments, 40.3% higher end-to-end throughput of data messages is achieved by the proposed RTS/CTS control in comparison with conventional methods.

Keywords: Wireless Multihop Transmissions, Bidirectional Communications, Collision Avoidance, RTS/CTS Control.

© 2019 Information Processing Society of Japan

Vol.2019-MBL-93 No.26
Vol.2019-ITS-79 No.26
2019/11/22

1. はじめに

無線通信デバイスを備えた多数の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, 無線メッシュネットワーク, 無線センサネットワークなどの無線マルチホップネットワークでは, 複数の無線ノードが同時に送信する無線信号の衝突による配送遅延延長の回避, 各無線ノードにおける無線信号の送受信に要する電力消費の削減, 広域に分布する多数の無線ノードから構成されるネットワークにおけるデータメッセージ配送到達性の向上を目的として, データメッセージの無線マルチホップ配送が用いられる. 無線マルチホップ配送では, 中継無線ノードの列からなる無線マルチホップ配送経路に沿って, 中継無線ノードが順次データメッセージを転送し, 送信元無線ノードから送信先無線ノードへのデータメッセージ配送を実現する. すなわち, 送信元無線ノード $N^s = N_0$ から送信先無線ノード $N^d = N_n$ までの無線マルチホップ配送経路 $||N_0 \dots N_n\rangle\rangle$ に沿ったデータメッセージ配送では, 各中継無線ノード N_i $(1 \leq i \leq n-1)$ がその前ホップ無線ノード N_{i-1} から受信したデータメッセージをその次ホップ無線ノード N_{i+1} へと転送する.

音声, 静止画像, 動画像等のマルチメディアデータを無線ノード間で双方向に交換する P2P 型アプリケーションにおいては, エンドエンドの無線ノード間で双方向にデータメッセージ群を交換することとなる. すなわち, 無線マルチホップ配送経路 $||N_0 \dots N_n\rangle\rangle$ に沿ったデータメッセージ群の配送と無線マルチホップ配送経路 $||N_n \dots N_0\rangle\rangle$ に沿ったデータメッセージ群の配送とが並行に行われる. データメッセージ群の無線マルチホップ配送では, 連続して配送されるデータメッセージの衝突による配送遅延の延長が問題となる. 図 1 に示すように, N_{i+1} が N_{i+2} へと転送するデータメッセージを含む無線信号は N_i にも到達することから, N_{i-1} が N_i へと転送するデータメッセージを含む無線信号と N_{i+1} が N_{i+2} へと転送するデータメッセージを含む無線信号が N_i において衝突し, そのデータメッセージの受信に失敗する. このような隠れ端末問題によって発生する無線信号の衝突による再送信や競合するいずれかの無線ノードによる衝突回避のための送信の待機によって, データメッセージ転送に要する時間が延長し, 送信元無線ノードから送信先無線ノードへの無線マルチホップ配送の遅延が延長する. さらに, 双方向に同時並行にデータメッセージを配送する場合には, 無線信号の衝突発生頻度はより高いものとなる.

データメッセージ群の双方向の無線マルチホップ配送性能を改善する手法としてネットワークコーディングが提案されている [3]. 図 2 に示すように, N_i が N_{i-1} から受信したデータメッセージ m_f と N_{i+1} から受信したデータメッセージ m_b から導出したデータメッセージ m_e を N_i がブロードキャスト送信により N_{i-1} と N_{i+1} へと転送する. m_e を受信した N_{i-1} は, 受信した m_e と自身が転送した m_f から m_b を導出する. また, m_e を受信した N_{i+1} は, 受信した m_e と自身が転送した m_b から m_f を導出する. これによって, m_f と m_b を N_i がそれぞれ独立に N_{i+1} と N_{i-1} へ転送する場合に比べ, 転送されるメッセージ数が削減されることで競合する機会が減少し, データメッセージ転送に要する時間が短縮される. ただし, 前述したような無線マルチホップ配送における隠れ端末問題によって発生する無線信号の衝突を回避するためには, RTS/CTS 制御に要する制御メッセージの交換, 受信確認メッセージの交換を行なうことが必要であるが, ネットワークコーディングをともなうデータメッセージ転送においてもこれらがより小さな追加オーバヘッドで実現されることが求められる.

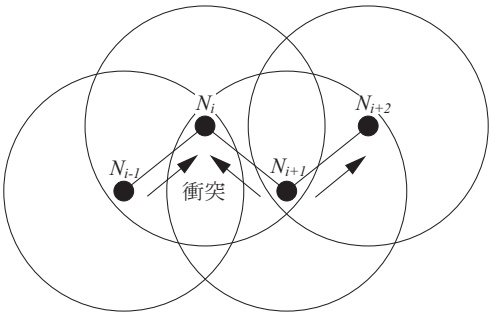


図 1 中継無線ノードにおける隠れ端末問題による無線信号の衝突.

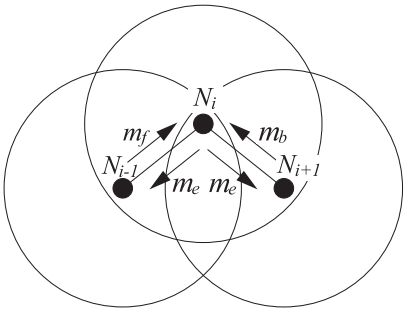


図 2 無線マルチホップ配送におけるネットワークコーディング.

さらに, m_f を受信した N_{i+1} は $N_{i+1} \neq N_n$ であるならば m_f を隣接中継無線ノード N_{i+2} へと転送し, m_b を受信した N_{i-1} は $N_{i-1} \neq N_0$ であるならば m_b を隣接中継無線ノード N_{i-2} へと転送するが, このとき, N_{i+1} と N_{i-1} が N_i へと転送するべきデータメッセージ m'_b と m'_f をバッファに保持しているのであれば, 再度ネットワークコーディングを適用することができる. このように, m_f あるいは m_b を連続して転送する場合には, MARCH [1] で行

[1] 東京電機大学大学院 ロボット・メカトロニクス学専攻
Department of Robotics and Mechatronics, Tokyo Denki University, Adachi, Tokyo 120–8551, Japan
[a)] aoi@higlab.net
[b)] hig@higlab.net

© 2019 Information Processing Society of Japan

Vol.2019-MBL-93 No.26
Vol.2019-ITS-79 No.26
2019/11/22

なわれているように RTS/CTS 制御に用いられる制御メッセージの一部を重畳することによって, 制御メッセージ数を削減し, データメッセージの配送遅延を短縮することが考えられる. しかし, m_f と m'_b とをネットワークコーディングしたデータメッセージの N_{i+1} による転送と, m_b と m'_f とをネットワークコーディングしたデータメッセージの N_{i-1} による転送とは排他的に行なわれなければ, N_i においてこれらのデータメッセージの衝突が発生し, N_i による m'_b と m'_f の受信がともに失敗するという問題がある.

本論文では, 双方向にデータメッセージ群を並行に無線マルチホップ配送する場合を対象として, 中継無線ノードにおいてデータメッセージのネットワークコーディングを行なう場合に, データメッセージの配送遅延の延長を抑制することができる RTS/CTS 制御メッセージの交換手法を提案する.

2. 関連研究

無線アドホック通信および無線マルチホップ通信においてネットワークコーディングを適用したデータメッセージ配送を行なう場合における, *RTS* 制御メッセージ, *CTS* 制御メッセージ, *ACK* 制御メッセージの交換手法を提案している関連研究について述べる. ただし, ここでは無線マルチホップ配送に適用することを考慮して, 無線マルチホップ配送経路を構成する隣接無線ノード列 N_{i-1}, N_i, N_{i+1} を対象として説明する. すなわち, N_i は N_{i-1} から転送され N_{i+1} へと転送するデータメッセージと N_{i+1} から転送され N_{i-1} へと転送するデータメッセージとを自身のバッファに保持しており, これらのデータメッセージをネットワークコーディングすることで得られたデータメッセージを N_{i-1} と N_{i+1} を転送先として自身の無線信号到達範囲へブロードキャスト送信する.

COPE [3] と IFNCPA (Inter-flow Network Coding with Passive ACK) [5] では, *ACK* 制御メッセージの交換手法を提案している. N_i から転送されたデータメッセージを受信した N_{i-1} と N_{i+1} が *SIFS* インターバルを置いて直ちに *ACK* 制御メッセージを N_i へ返送すると, これらの *ACK* 制御メッセージは N_i で衝突し, N_i はこれを正しく受信することができない. この *ACK* 制御メッセージの N_i における衝突を回避するために, COPE では, N_{i-1} と N_{i+1} が次に N_i に転送するデータメッセージに *ACK* 制御メッセージをピギーバックする手法を提案している (図 3). ただし, *ACK* 制御メッセージの返送タイミングがデータメッセージの転送要求発生タイミングに依存しているため, このような転送要求の発生間隔が長い場合には無用にデータメッセージが再送信されるという問題がある.

データメッセージが無線マルチホップ配送経路に沿って配送されることから, N_{i-1} と N_{i+1} は受信したデータメッセージ (受信したネットワークコーディングされた データメッセージからデコードして得られた N_i から転送されたデータメッセージ) をそれぞれの次ホップ中継無線ノード N_{i-2} と N_{i+2} へと転送する. この転送されるデータメッセージを含む無線信号は N_i へも到達することから N_i はこのデータメッセージを傍受することが可能である. そこで, IFNCPA では, N_i がこれを傍受することによって, 自身が転送したネットワークコーディングされたデータメッセージが N_{i-1} と N_{i+1} によって正しく受信されたと判断する (図 4). 本手法は, COPE におけるピギーバックされた *ACK* 制御メッセージとは異なり, N_{i-1} と N_{i+1} によるデータメッセージの受信を一定時間以内に検知することが可能であり, 無用なデータメッセージの再送信を避けることができる. ただし, N_{i-1} と N_{i+1} による次ホップ中継無線ノードへのデータメッセージ転送はほぼ同じタイミングで要求されることが考えられ, その結果, N_{i-1} と N_{i+1} が転送したデータメッセージが N_i で衝突し, N_i が転送データメッセージの傍受に失敗する場合が考えられる.

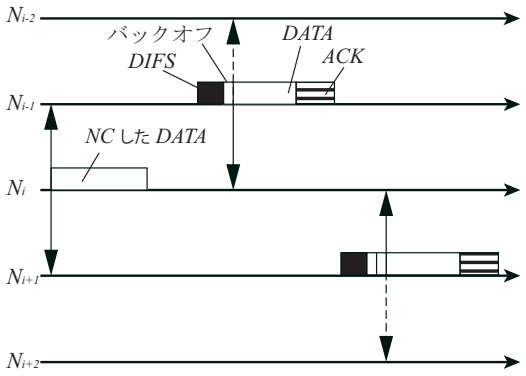


図 3 データメッセージへの *ACK* のピギーバック (COPE).

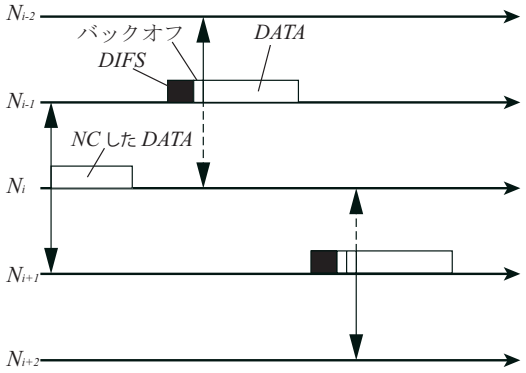


図 4 転送データメッセージ傍受による受信確認 (IFNCPA).

無線マルチホップ配送でデータメッセージ群を配送する場合, 各中継無線ノードは前後 2 ホップ隣接中継無線ノードと互いに隠れ端末の関係になる. そのため, 無線マルチホップ配送経路に沿ってデータメッセージ群を配送する場合, 隠れ端末問題によるデータメッセージの中継無線ノードにおける衝突を回避, 削減することが求められ, RTS/CTS 制御の導入が必要とされる. このとき, N_i から N_{i-1} と

© 2019 Information Processing Society of Japan

N_{i+1} への *RTS* 制御メッセージ送信はこれらを送信先とした *RTS* 制御メッセージを N_i がその無線信号到達範囲にブロードキャスト送信することによって実現され, N_{i-1} と N_{i+1} がともにこれを受信する. しかし, N_{i-1} と N_{i+1} がともに *RTS* 制御メッセージ受信後に *SIFS* インターバルを置いて直ちに *CTS* 制御メッセージを送信すると, これらの *CTS* 制御メッセージは N_i で衝突し, N_i はこれを正しく受信することができない. そこで, CSMA with RTS/CTS [6] および NC-MAC [2] では, *RTS* 制御メッセージに *CTS* 制御メッセージの送信順序に関わる情報を付与することによって, N_{i-1} と N_{i+1} とが送信する *CTS* 制御メッセージの N_i における衝突を回避している (図 5). すなわち, *CTS* 制御メッセージを先行して送信することを指定された N_i の隣接中継無線ノード (図 5 では N_{i-1}) は, N_i からの *RTS* 制御メッセージを受信した後 *SIFS* インターバル後に *CTS* 制御メッセージを N_i へユニキャスト送信する. 他方の N_i の隣接中継無線ノード (図 5 では N_{i+1}) は, N_i からの *RTS* 制御メッセージを受信した後, 先行する *CTS* 制御メッセージの送信に要する時間と *SIFS* インターバルが経過した後に *CTS* 制御メッセージを N_i へユニキャスト送信する. *ACK* 制御メッセージについても同様にして N_i における衝突を回避することができるが, 制御メッセージの交換に要する時間が延長することによってエンドエンドのデータメッセージ配送スループットが低下する問題がある.

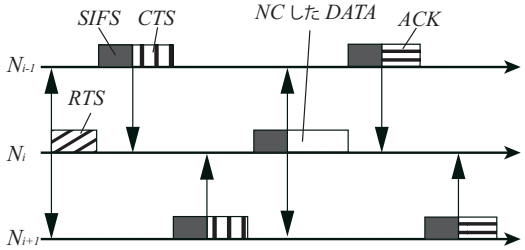


図 5 NC-MAC における *CTS* および *ACK* の衝突回避.

ARAR (Adaptive Round-robin Acknowledge and Retransmit) [4] は無線アドホック通信における隣接無線ノードへのデータメッセージのマルチキャスト通信手法である. ここでは, 図 6 に示すように, 送信無線ノード N_0 がマルチキャスト送信する *RTS* 制御メッセージに対して, 受信無線ノード N_i が *SIFS* インターバルを置いて直ちに *CTS* 制御メッセージを送信する. 複数の受信無線ノードが *CTS* 制御メッセージを送信するならば, これらは N_0 において衝突を発生するが, 逆に N_0 は複数の受信ノードから *CTS* 制御メッセージが送信されたことを検知することができる. すなわち, *CTS* 制御メッセージを送信した N_i が存在しないのか, 単独で存在するのか, 複数存在するのかを N_0 が区別することが可能である. ただし, 複数存在する場合には, いずれの受信無線ノードからの *CTS* 制御メッセージを受信し, いずれの受信無線ノードからの *CTS* 制御メッセージを受信していないかを N_0 が特定することはできない.

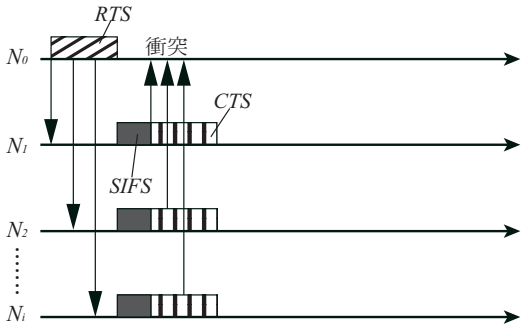


図 6 ARAR における *CTS* の衝突.

3. 提案手法

3.1 制御メッセージ衝突検出による受信確認手法

2 つの無線ノード間の無線マルチホップ配送経路に沿って双方向かつ並行にデータメッセージ群が配送される場合, IEEE802.11 などの無線 LAN プロトコルによる各隣接中継無線ノード間のデータメッセージ転送は半二重通信を基礎として行なわれる. このため, 無線マルチホップ配送経路を構成する多数の中継無線ノードにおいて, 双方向に転送するべきデータメッセージを一時的に保持することとなる. そこで, このような中継無線ノードが双方向に転送されるデータメッセージをネットワークコーディングして転送することによって, 各データメッセージのエンドエンドの配送遅延を短縮することやデータメッセージ群の配送スループットを改善することが期待される. ただし, 配送中のデータメッセージ群が多数存在する場合には, データメッセージを含む無線信号の衝突が発生する機会が増加することから, RTS/CTS 制御を用いて衝突を回避することが求められる. 一方で, ネットワークコーディングされたデータメッセージを転送する中継無線ノードは双方向の次ホップ中継無線ノードへとデータメッセージをブロードキャスト転送することから, これに適合する RTS/CTS 制御を行なわなければ制御メッセージ交換のオーバヘッドが拡大し, ネットワークコーディングを導入した効果が十分に得られないことが懸念される.

そこで, 本論文では, 無線アドホック通信におけるデータメッセージのブロードキャスト配送のために考案された ARAR [4] で用いられている *CTS* 制御メッセージの衝突を活用する手法を *CTS* 制御メッセージと *ACK* 制御メッセージの送受信に応用する手法を提案する. 図 7 に示すように, ネットワークコーディングされたデータメッセージを送信する中継無線ノード N_i は, データメッセージの転送先を双方向の次ホップ中継無線ノード N_{i-1} と N_{i+1} と

© 2019 Information Processing Society of Japan

Vol.2019-MBL-93 No.26
Vol.2019-ITS-79 No.26
2019/11/22

した *RTS* 制御メッセージを自身の無線信号到達範囲にブロードキャスト送信する．この *RTS* 制御メッセージを受信した N_{i-1} と N_{i+1} は, N_i からのデータメッセージを受信することが可能な状態であるならば, すなわち, 他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て待機状態となっていることがないのであるならば[*1], *SIFS* インターバルの後に *CTS* 制御メッセージを N_i へユニキャスト送信する．*RTS* 制御メッセージを受信した N_i の隣接無線ノードのうち *CTS* 制御メッセージを送信するのは N_{i-1} と N_{i+1} のみであることから, N_i が *RTS* 制御メッセージを送信した後に起こる現象は次の 4 つのいずれかである．

- N_{i-1} と N_{i+1} がともに *CTS* 制御メッセージを送信する (図 7(a))．
- N_{i-1} と N_{i+1} のいずれかのみが *CTS* 制御メッセージを送信する (図 7(b)(c))．
- N_{i-1} と N_{i+1} のいずれも *CTS* 制御メッセージを送信しない (図 7(d))．

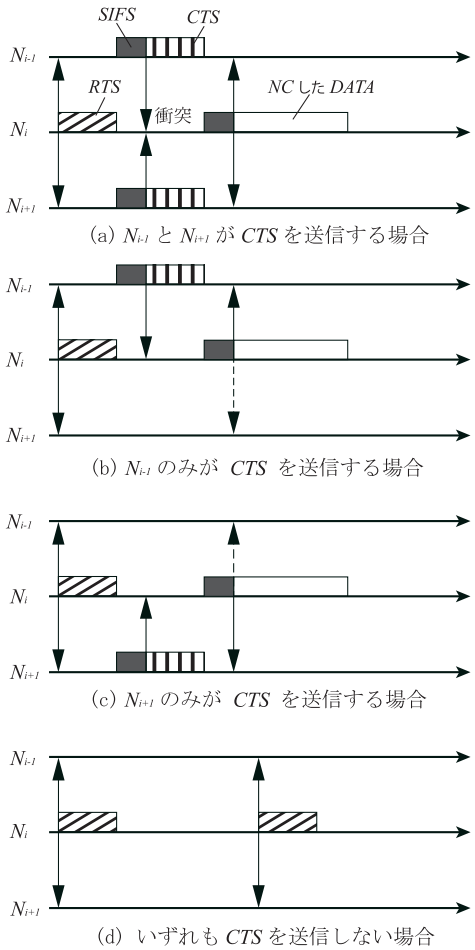


図 7 *CTS* の衝突による受理．

[*1] N_i が *RTS* 制御メッセージを送信していることから N_{i-1} , N_{i+1} 自身がデータメッセージの送受信を行っていることはない．

N_{i-1} と N_{i+1} がともに *CTS* 制御メッセージを送信する場合, これらの制御メッセージは N_i において衝突する．ただし, 残りの 3 つのいずれの場合でも N_i において *CTS* 制御メッセージが衝突することはないことから, この衝突を検出することによって N_i は N_{i-1} と N_{i+1} がともに *CTS* 制御メッセージを送信したものと判断することができる．そこで, N_i は *CTS* 制御メッセージ同士の衝突を検出した場合, ネットワークコーディングされたデータメッセージを N_{i-1} と N_{i+1} を送信先として自身の無線信号到達範囲にブロードキャスト送信する．

一方, N_{i-1} と N_{i+1} のいずれかのみが *CTS* 制御メッセージを送信する場合, N_i はこの *CTS* 制御メッセージを他の *CTS* 制御メッセージと衝突することなく受信する．衝突が発生しなかったことから, 受信した *CTS* 制御メッセージのみが送信されたと判断できるため, *CTS* 制御メッセージを送信した次ホップ中継無線ノードにのみデータメッセージを送信する．このデータメッセージは, ネットワークコーディングされたデータメッセージであってもこの *CTS* 制御メッセージを送信した中継無線ノードを次ホップ中継無線ノードとするデータメッセージであっても受理される．なお, N_{i-1} と N_{i+1} のいずれも *CTS* 制御メッセージを送信しない場合には, N_i が *DIFS* インターバルの後に *RTS* 制御メッセージを再送信する．

CTS 制御メッセージの場合と同様に *ACK* 制御メッセージについても衝突を検知することによって受理することができる．図 8 に示すように, ネットワークコーディングされたデータメッセージを中継無線ノード N_i が双方向の次ホップ中継無線ノードである N_{i-1} と N_{i+1} へ送信する場合, N_{i-1} と N_{i+1} はデータメッセージ受信に成功したならば *SIFS* インタバルの後に *ACK* 制御メッセージを N_i へ返送する．ここで, N_{i-1} と N_{i+1} がともに *ACK* 制御メッセージを送信する場合, これらの制御メッセージは N_i において衝突する．*CTS* 制御メッセージの場合と同様, N_i において *ACK* 制御メッセージ同士が衝突するのは N_{i-1} と N_{i+1} がともに *ACK* 制御メッセージを送信する場合のみであることから, この衝突を検出することによって N_i は N_{i-1} と N_{i+1} がともに *ACK* 制御メッセージを送信したものと判断することができる．

一方, N_{i-1} と N_{i+1} のいずれかのみが *ACK* 制御メッセージを送信する場合, N_i はこの *ACK* 制御メッセージを他の *ACK* 制御メッセージと衝突することなく受信する．衝突が発生しなかったことから, N_i は受信した *ACK* 制御メッセージのみが送信されたと判断できる．そこで, N_i は *ACK* 制御メッセージを送信した次ホップ中継無線ノードにのみデータメッセージが正しく転送されたと判断する．なお, N_{i-1} と N_{i+1} のいずれも *ACK* 制御メッセージを送信しない場合には, N_i が *DIFS* インターバルの後に *RTS* 制御メッセージを再送信する．

© 2019 Information Processing Society of Japan

Vol.2019-MBL-93 No.26
Vol.2019-ITS-79 No.26
2019/11/22

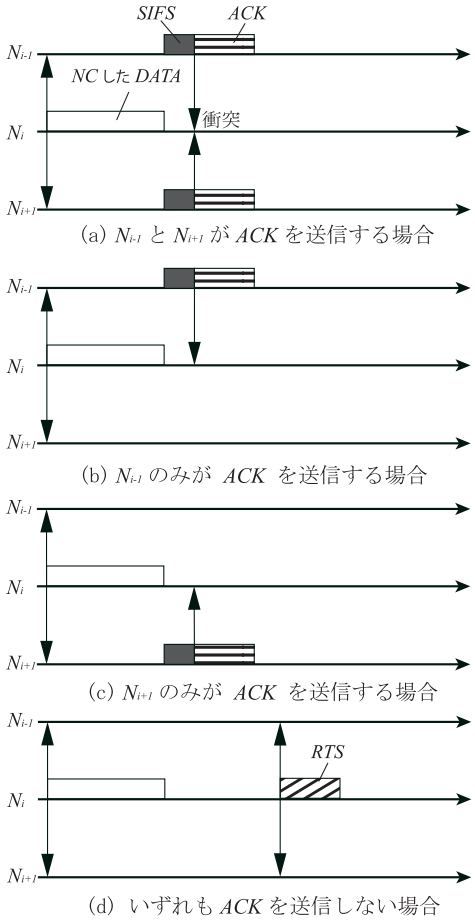


図 8 *ACK* 制御メッセージの衝突による受理.

提案手法では, N_i が送信する *RTS* 制御メッセージに対して N_{i-1} と N_{i+1} が並行に *CTS* 制御メッセージを送信し, その衝突を N_i が検出する. このとき, N_{i-1} と N_{i+1} の両方の無線信号到達範囲に含まれる無線ノードは衝突によって *CTS* 制御メッセージを受信することができない. *RTS* 制御メッセージをこの衝突に先立って受信している無線ノード, すなわち, N_i の無線信号到達範囲に含まれる無線ノードは *RTS* 制御メッセージに含まれる NAV によって通信待機期間を得ることができる. ただし, N_i の無線信号到達範囲に含まれず *RTS* 制御メッセージを受信していない無線ノードは NAV を取得していないことから, 通信待機期間を得ることができない (図 9). この領域の大きさは中継無線ノードの位置によって定まり, ここに含まれる無線ノードによる制御メッセージやデータメッセージ送信による N_{i-1} や N_{i+1} における衝突の発生確率は, これらを無線マルチホップ配送経路に含むデータメッセージ配送の要求頻度に依存する.

3.2 送信権移譲による連続転送

無線マルチホップ配送では, 各中継無線ノードは, 前ホップ隣接中継無線ノードから受信したデータメッセージを必ず次ホップ隣接中継無線ノードへと転送する. MARCH [1]

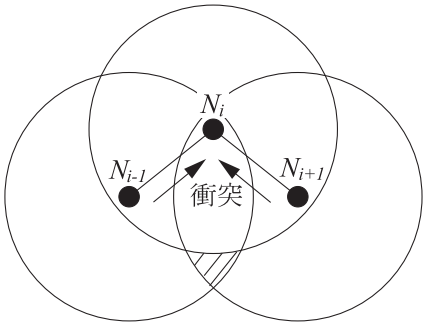


図 9 *CTS* 制御メッセージの衝突により NAV が取得できない領域.

では, この性質を活用して *ACK* 制御メッセージと *RTS* 制御メッセージを重畳し, 中継無線ノードが前ホップ中継無線ノードから受信したデータメッセージを直ちに次ホップ中継無線ノードへと連続転送することによって制御メッセージ数を削減し, データメッセージの配送遅延を短縮している. 本論文では, 双方向にデータメッセージ群が並行に配送される無線マルチホップ通信にネットワークコーディング通信が適用されている場合を対象として, MARCH と同様に *ACK* 制御メッセージと *RTS* 制御メッセージを重畳し, データメッセージの連続転送を行なうことによって制御メッセージ数を削減し, データメッセージの配送遅延を短縮する手法を提案する.

中継無線ノード N_i が隣接中継無線ノード N_{i+1} へと転送するデータメッセージ m_f と隣接中継無線ノード N_{i-1} へと転送するデータメッセージ m_b とをネットワークコーディングしたデータメッセージ m_e を N_{i-1} と N_{i+1} へとブロードキャスト送信した場合, $N_{i+1} \neq N_n$ かつ $N_{i-1} \neq N_0$ であるならば N_{i-1} と N_{i+1} はともに受信した m_b と m_f をそれぞれ N_{i-2} , N_{i+2} へと連続転送することが可能である. このとき, *ACK* 制御メッセージと *RTS* 制御メッセージを重畳することによって制御メッセージ数を削減し, データメッセージの配送遅延を短縮することができる. しかし, 前節で提案した RTS/CTS 制御メッセージ交換手法では, N_{i-1} と N_{i+1} が *ACK* 制御メッセージを同時に送信することから, N_i はその衝突によって *ACK* 制御メッセージの受信を検出できるものの *RTS* 制御メッセージの重畳を検出することはできない (図 10).

さらに, 図 11 に示すように, N_{i-1} と N_{i+1} がともに *RTS* 制御メッセージを重畳した *ACK* 制御メッセージを同時に送信した場合, N_i による *CTS* 制御メッセージ送信に続いて N_{i-1} と N_{i+1} から並行に送信されるネットワークコーディングされたデータメッセージは N_i で衝突することから, N_{i-1} と N_{i+1} におけるネットワークコーディングの効果は皆無となる. そこで, N_{i-1} と N_{i+1} におけるデータメッセージの連続転送は排他的に行なわれることが必要である.

ここで, 双方向にデータメッセージ群が並行に配送され

© 2019 Information Processing Society of Japan

Vol.2019-MBL-93 No.26
Vol.2019-ITS-79 No.26
2019/11/22

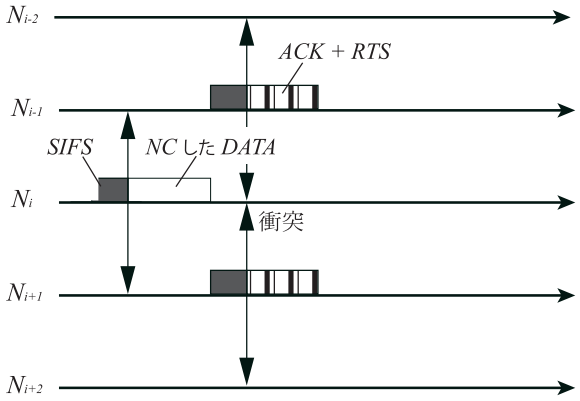


図 10 *ACK* + *RTS* 重畳制御メッセージの衝突.

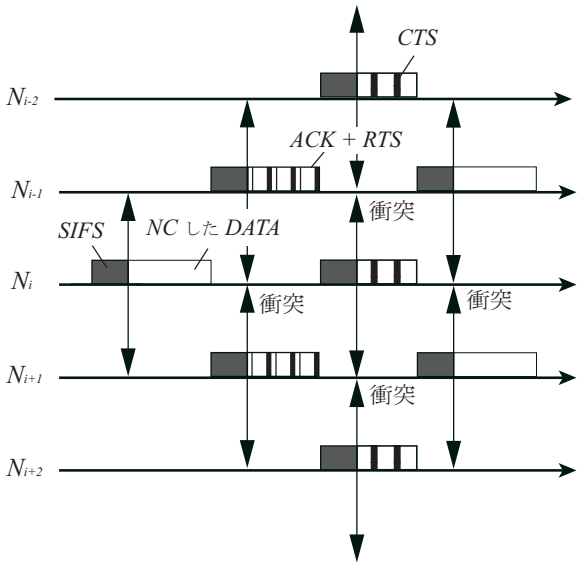
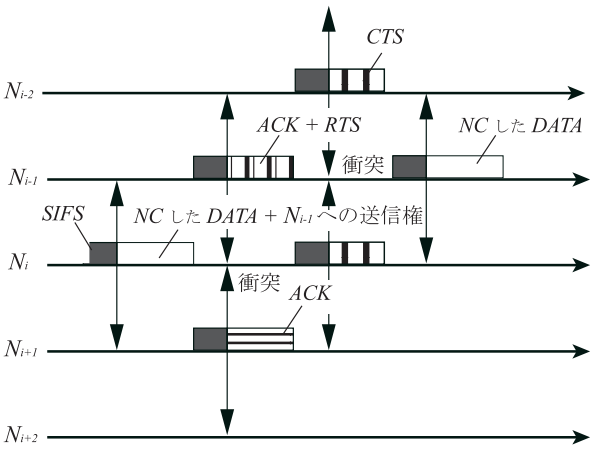
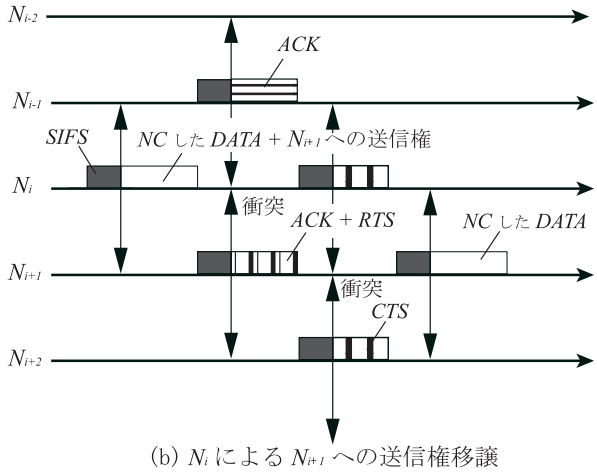


図 11 ネットワークコーディングしたデータメッセージ同士の衝突.

る無線マルチホップネットワークでは, ネットワークコーディング通信を適用する機会が多いほど制御メッセージ数を削減し, データメッセージの配送遅延が短縮されることから, 排他的に行なわれることが必要であるデータメッセージの連続転送は, N_{i-1} と N_{i+1} のうちネットワークコーディング通信が適用可能であるものによって行なわれることが望ましい. すなわち, N_{i-1} と N_{i+1} のうち N_i へ転送するデータメッセージをバッファに保持している隣接中継無線ノードによってデータメッセージの連続転送が行なわれるようにすることが望まれる. ここで, N_{i-1} と N_{i+1} とは直接通信することができないこと, N_{i-1} と N_{i+1} とのいずれかが *ACK* 制御メッセージと *RTS* 制御メッセージを重畳するためには, *ACK* 制御メッセージの送信以前に連続転送する隣接中継無線ノードを決定する必要があること, N_i によって送信されるデータメッセージがいずれの隣接中継無線ノードによって受信されるかは N_i による *CTS* 制御メッセージの受信あるいは衝突検出が行なわれるまで決定されないことから, データメッセージの連続転送を行なう隣接中継無線ノードを N_i が決定し, その情報をデータメッセージに含めて N_{i-1} と N_{i+1} に通知することとする (図 12).



(a) N_i による N_{i-1} への送信権移譲



(b) N_i による N_{i+1} への送信権移譲

図 12 送信権移譲によるデータメッセージの連続転送.

N_{i-1} と N_{i+1} のうちのいずれが N_i へ転送するデータメッセージをバッファに保持しているかは N_i が N_{i-1} と N_{i+1} が送信する *ACK* 制御メッセージを傍受することによって推定する. N_{i-1} と N_{i+1} はそれぞれの隣接中継無線ノードである N_{i-2} と N_{i+2} からのデータメッセージ受信に対して *ACK* 制御メッセージを送信するが, N_i はこれを傍受することが可能である. そして, これらの受信データメッセージのうち N_i に転送されていないものが N_{i-1} と N_{i+1} のバッファに保持されていることになる. なお, N_{i-1} と N_{i+1} の双方が N_i へ転送するデータメッセージをバッファに保持している場合には, これらのどちらが受信データメッセージの連続転送を行なう場合においてもネットワークコーディング通信が適用されることとなる. この場合, N_i は, N_{i-1} と N_{i+1} のうち, それを転送元とする自身のバッファに保持されているデータメッセージの数が少ない方にデータメッセージの連続転送を行なわせることとす

© 2019 Information Processing Society of Japan

る. これは, N_i のバッファに保持されている N_{i-1} と N_{i+1} を転送先とするデータメッセージ数を揃えることによって, N_i におけるネットワークコーディングの機会をより多くするためである. また, N_{i+1} と N_{i-1} のいずれのバッファにも N_i を転送先とするデータメッセージが保持されていないのであれば, これら双方にデータメッセージの連続転送を行なわせることとする. このとき, m_f と m_b はともに N_{i+1} と N_{i-1} によってネットワークコーディングされることなく転送されることから, N_i におけるデータメッセージの衝突は問題とはならない (図 13).

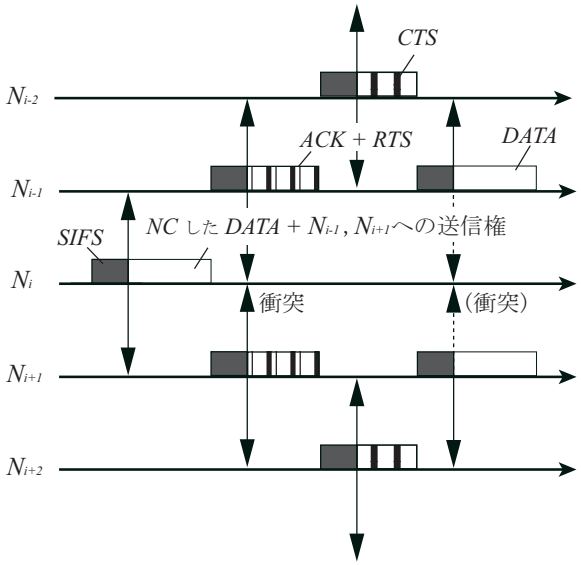


図 13 送信権移譲によるデータメッセージの並行転送.

[送信権移譲先隣接中継無線ノード選択手法]

1) $N_{i+1} = N_n$ または $N_{i-1} = N_0$ であるならば, それぞれ, N_{i-1}, N_{i+1} を送信権移譲先隣接中継無線ノードとする.

2) N_{i+1} または N_{i-1} のいずれか一方のバッファに N_i を転送先とするデータメッセージが保持されていないのであれば, それぞれ, N_{i-1}, N_{i+1} を送信権移譲先隣接中継無線ノードとする.

3) N_{i+1} と N_{i-1} の双方のバッファに N_i を転送先とするデータメッセージが保持されているのであれば, それを転送元とする N_i のバッファに保持されているデータメッセージの数が少ない方を送信権移譲先隣接中継無線ノードとする.

4) N_{i+1} と N_{i-1} のいずれのバッファにも N_i を転送先とするデータメッセージが保持されていないのであれば, N_{i-1} と N_{i+1} の双方を送信権移譲先隣接中継無線ノードとする.□

前節で提案した RTS/CTS 制御メッセージ交換手法では, ネットワークコーディングされたデータメッセージを送信した中継無線ノード N_i において N_{i-1} と N_{i+1} から並行に送信された *ACK* 制御メッセージが衝突するが, データメッセージの連続転送を行なう隣接中継無線ノードを N_i が選択していることから, *ACK* 制御メッセージに *RTS* 制御メッセージが重畳されているか否かを N_i は判断できることから, 必要な *CTS* 制御メッセージの送信を行なうことが可能である.

4. 評価

エンドエンドの無線ノード間で無線マルチホップ配送経路に沿って双方向にデータメッセージ群を並行に配送する無線マルチホップネットワークを対象とした本論文で提案するネットワークコーディング通信手法では, 無線マルチホップ配送経路内での隠れ端末問題に起因する衝突による配送性能の低下を削減/回避するために, 拡張された RTS/CTS 制御手法を用いる. ここでは, ネットワークコーディングされたデータメッセージを送信する中継無線ノードの 2 つの次ホップ隣接無線ノードは, *CTS* 制御メッセージおよび *ACK* 制御メッセージを並行に送信することとし, 中継無線ノードはこれらの衝突を検知することによって, 双方から *CTS* 制御メッセージおよび *ACK* 制御メッセージが送信されたものと解釈する. また, ネットワークコーディングされたデータメッセージを受信した隣接無線ノードはともにその隣接無線ノードへのデータメッセージ転送要求を持つこととなるが, これらがさらにネットワークコーディングを適用したデータメッセージをただちに送信することによる衝突発生を回避するために, あらかじめいずれか一方の隣接無線ノードに送信権を移譲する. このとき *RTS* 制御メッセージと *ACK* 制御メッセージを重畳することで転送遅延を短縮している. 本手法の有効性を確認するために無線マルチホップ配送のシミュレーション実験を行なう.

ここでは, 無線信号到達距離が 101m の無線ノードを 100m 間隔で直線状に配置した無線マルチホップ配送経路を用いる. 各中継無線ノードは IEEE802.11b で隣接無線ノードとの通信を行なうものとし, 無線マルチホップ配送経路はあらかじめ検出済みであり, 各中継無線ノードには適切なルーティングテーブルが設定されているものとする. ここで, 無線マルチホップ配送経路の経路長を 2–20 ホップとして, データメッセージ群を双方向に配送する場合の無線マルチホップ配送のエンドエンドのスループットを測定する. 測定対象は, 提案手法, 提案した *CTS* 制御メッセージと *ACK* 制御メッセージの衝突による受信検出のみを適用した手法, ネットワークコーディングを用いない無線マルチホップ配送手法に加えて, 中継無線ノード N_i がネットワークコーディングされたデータメッセージを隣接中継無線ノード N_{i-1}, N_{i+1} へと転送する際に N_{i-1} と N_{i+1} からの *CTS* 制御メッセージの返送順序を与えることによって *CTS* 制御メッセージ同士の衝突を回避する NC-MAC 手法とする. なお, シミュレータには ns-3 [7] を用いる.

© 2019 Information Processing Society of Japan

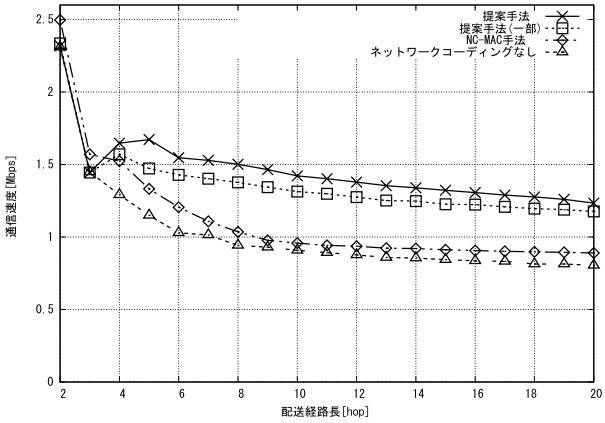


図 14 データメッセージ配送スループット測定結果.

図 14 にエンドエンドのデータメッセージ配送スループットの測定結果を示す. まず, ネットワークコーディングを用いない無線マルチホップ配送のスループットと NC-MAC 手法とを比較すると, 無線マルチホップ配送経路長によらずに一貫して NC-MAC の方がスループットが高くなっていることが分かる. スループットの改善はホップ数が 9 ホップ以下である場合に顕著であり, 平均 11.5%の向上となっている. 9 ホップ以上においては改善率は配送経路長とはほぼ無関係となり, 平均 7.8%の向上となっている. これは, ネットワークコーディングによるデータメッセージの総転送数の削減そのものと, それによる制御メッセージ, データメッセージの衝突回避のための通信待機機会の削減, データメッセージ衝突機会の削減による効果であると考えられる.

提案手法による無線マルチホップ配送のスループットと従来手法である NC-MAC とを比較すると, 無線マルチホップ配送経路長が 2 ホップと 3 ホップの場合には NC-MAC の方がデータメッセージのスループットが提案手法よりも高くなっているが, 経路長が 5 ホップよりも長い場合には従来手法よりも高いスループットのデータメッセージ配送を実現している. 特に, 配送経路長が 4 ホップ以上である場合には, 他の 2 手法が配送経路長 4–9 ホップにおいて配送スループットが低下するのに対して, 提案手法では, 配送経路長 4 ホップ以上においては配送スループットが大きく低下しない. 全体として提案手法は, 従来手法である NC-MAC に対してエンドエンドスループットを 40.3% 改善し, ネットワークコーディングを用いない無線マルチホップ配送に対してエンドエンドスループットを 53.5%改善している. なお, 制御メッセージの並行送信の衝突による検出手法のみを適用した場合は, ネットワークコーディングを行わない場合に対して 42.4%, NC-MAC 手法に対して 30.2%のスループット改善が得られた. 本実験により, 提案手法が双方向のデータメッセージ群配送に対してエンドエンドスループットを改善する有効な手法であることが示された.

5. まとめ

本論文では, 双方向にデータメッセージ群が配送される無線マルチホップ配送において, 中継無線ノードのデータメッセージ転送にネットワークコーディングを導入するための RTS/CTS 制御手法を提案した. 中継無線ノードが双方向の次ホップ中継無線ノードに送信した *RTS* 制御メッセージおよびデータメッセージに対して, これらの中継無線ノードが送信した *CTS* 制御メッセージおよび *ACK* 制御メッセージ同士の衝突を検知することによって, *CTS* 制御メッセージおよび *ACK* 制御メッセージがこれらの中継無線ノードによって送信されたと判断する. また, ネットワークコーディングされたデータメッセージを受信した隣接無線ノードのいずれかが排他的にデータメッセージを連続転送するために送信権を移譲する手法を提案した. これにより, 制御メッセージが重畳されることによる通信オーバヘッドの削減とネットワークコーディング通信の適用機会の増加が見込まれる. 最後に, 提案するネットワークコーディング通信における制御メッセージ交換手法によるデータメッセージ配送スループットの改善をシミュレーション実験により評価し, 従来手法に比べて 40.3%拡大できることを確認した.

参考文献

[1] Toh, C.K., Vassiliou, V., Guichal, G. and Shih, C.H., “MARCH: A Medium Access Control Protocol for Multihop Wireless Ad Hoc Networks,” Proceedings of IEEE/AFCEA Military Communication Conference, pp. 512–516 (2000).

[2] Deng, X. and Yang, Y., “An Efficient MAC Multicast Protocol for Reliable Wireless Communications with Network Coding,” Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference (2011).

[3] Katti, S., Rahul, H., Hu, W., Katabi, D., Medard, M. and Crowcroft, J., “XORs in The Air: Practical Wireless Network Coding,” Proceedings of the International Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications, vol. 36, no. 4, pp. 243–254 (2006).

[4] Xie, J., Das, A. and Nandi, S., “An Improvement to The Reliability of IEEE 802.11 Broadcast Scheme for Multicasting in Mobile Ad Hoc Networks,” Proceedings of the 1st International Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks, pp. 359–366 (2004).

[5] 安藤, 高木, 太田, 玉置., “高効率高信頼双方向通信のためのパッシブ ACK 付きインターフローネットワークコーディング方式の検討,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 115, no. 172, pp. 43–48 (2015).

[6] 梅原, 田野, 寺倉, 杉山., “2 ホップ無線 CSMA ネットワークコーディングにおける RTS/CTS の効果,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 109, no. 276, pp. 65–70 (2009).

[7] https://www.nsnam.org/.

© 2019 Information Processing Society of Japan