Vol.2019-MBL-93 No.27
Vol.2019-ITS-79 No.27
2019/11/22

無線マルチホップ配送における経路切断時の配送データ救済手法

浅山 裕伸[1,a)]　桧垣 博章[1,b)]

概要：AODV (Ad-Hoc Ondemand Distance Vector) ルーティングプロトコルによって検出された無線マルチホップ配送経路が中継無線ノードの移動によって切断されるとき, 切断を検出した中継無線ノードから送信先無線ノードまでの経路を探索, 検出することによって経路を修復する方法がある. このとき, 切断された無線マルチホップ経路に沿って配送される途中のデータメッセージは, 中継無線ノードの通信バッファに保持され, 送信先無線ノードまで配送されるか否かは不定である. 本論文では, この配送途中のデータメッセージを修復された無線マルチホップ配送経路に沿って送信先無線ノードまで配送する救済手法を提案する. 無線マルチホップ配送では, 中継無線ノード間のデータメッセージ転送が順次行なわれることから, 送信順序を保存した受信が自然に実現されている. 提案する救済手法では, 救済される切断経路を配送される途中であったデータメッセージを送信元無線ノードが送信したものと同じ順序で送信先無線ノードが受信する.

キーワード：無線マルチホップ配送, AODV, ルーティング, 経路回復, 順序を保存した配送.

Ordered Delivery of Data Messages in Route Reconfiguration in Wireless Multihop Networks

Hironobu ASAYAMA[1,a)]　Hiroaki HIGAKI[1,b)]

Abstract: Due to mobility of intermediate wireless nodes, a wireless multihop transmission route in a mobile ad-hoc network detected by AODV (Ad-Hoc Ondemand Distance Vector) routing protocol is sometimes broken during transmissions of a sequence of data messages. Some route recover methods in which a wireless multihop transmission route from an intermediate wireless node detecting a broken wireless link to its next-hop intermediate node to the destination wireless node have been proposed. However, in any recovery method, though a wireless multihop transmission route is reconfigured, data messages in transmission along the broken wireless multihop transmission route may be lost and their retransmissions are depend on the upper-layer protocol. This paper proposes a route recovery method which also supports recovery of data messages in transmission by using the reconfigured wireless multihop transmission route. Here, all the recovered data messages reach the destination wireless node in the same order as the transmission order in the source wireless node, i.e., less communication buffers in the destination node, shorter transmission delay for each data messages and no retransmissions of data messages in the source node are expected to be realized.

Keywords: Wireless Multihop Transmissions, AODV, Routing, Route Recovery, Ordered Delivery.

[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)] asa@higlab.net
[b)] hig@higlab.net

© 2019 Information Processing Society of Japan

Vol.2019-MBL-93 No.27
Vol.2019-ITS-79 No.27
2019/11/22

1. はじめに

互いに無線信号到達範囲に含まれない無線ノード間のデータメッセージ配送を中継無線ノード列による順次転送で実現する無線マルチホップネットワークには, 無線アドホックネットワーク, 無線センサネットワーク, 無線メッシュネットワーク等がある. これらの無線マルチホップネットワークは, 無線通信基地局を中心とする集中制御型の無線ネットワークと異なり, 自律的に動作する対等な無線ノード群で構成される分散制御型の無線ネットワークである. このため, 集中制御型の無線ネットワークである Cellular 無線ネットワークにおいては Point of Failure となる無線通信基地局の故障が直接的にネットワーク切断の原因となるのに対して, 無線マルチホップネットワークでは, 単一の無線ノードの故障が必ずしも直ちにネットワーク切断には結びつかず, 構成無線ノード群による協調的なルーティングプロトコルが機能することによって動的に新たな無線マルチホップ配送経路への切り替えを行なうことが可能である. 特に, Cellular 無線ネットワークが位置を変えない固定無線基地局と移動無線ノードによって構成されるのが一般的であるのに対して, 無線マルチホップネットワークが移動無線ノードのみから構成されることから, 送信元無線ノードから送信先無線ノードまでの無線マルチホップ配送経路の中継無線ノードの移動によっても経路が切断されるという不安定性をも同時に持つという問題点がある.

オンデマンド型ルーティングプロトコルである AODV(Adhoc Ondemand Distance Vector) [4] によって検出される無線マルチホップ配送経路では, 各中継無線ノードが送信先無線ノードへの無線マルチホップ配送経路の次ホップ無線ノードのアドレスをルーティングテーブルに保持している. この無線マルチホップ配送経路が中継無線ノードの移動によって切断した場合, 次ホップ中継無線ノードとの無線通信リンクが切断した中継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経路を探索, 検出することによって, 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経路を修復する手法が提案されている [4]. このとき, 切断前の無線マルチホップ配送経路を配送されていたデータメッセージ, すなわち, 中継無線ノードのいずれかの通信バッファに保持されていたデータメッセージは, この中継無線ノードが修復された無線マルチホップ配送経路の中継無線ノードとなるとは限らないことから, 修復された無線マルチホップ配送経路, あるいはこれとは異なる送信先無線ノードに至る無線マルチホップ配送経路に沿って送信先無線ノードまで配送されるか, いずれかの中継無線ノードによって破棄されるかのいずれかとなる. いずれのデータメッセージが送信先無線ノードまで配送され, いずれのデータメッセージが中継無線ノードによって破棄されたのかを送信元無線ノードが検知することは困難である.

これまでに提案されている無線マルチホップ配送経路修復手法においては, この配送途中で元の無線マルチホップ配送経路の中継無線ノードの通信バッファに保持されているデータメッセージを回復させること, すなわち, 修復された無線マルチホップ配送経路を用いて送信先無線ノードまで配送することについては検討されていない. そこで, 本論文では, 切断された無線マルチホップ配送経路の中継無線ノードの通信バッファに保持されたデータメッセージを修復された無線マルチホップ配送経路を用いて送信先無線ノードまで配送することが可能な経路修復手法を提案する. ここでは, 通信バッファに配送途中のデータメッセージを保持する中継無線ノードが修復された無線マルチホップ配送経路の中継無線ノードとはならない場合においても, これらのデータメッセージを送信先無線ノードまで配送することを可能とする. また, AODV によって探索, 検出された無線マルチホップ配送経路に沿って配送されるデータメッセージ列は, 中継無線ノード間のデータメッセージ転送が FIFO(First-In First-Out) に従って行なわれ, 単一の無線ネットワークインタフェースを用いて IEEE802.11 等の半二重通信である無線 LAN プロトコルに従ってなされることから, 送信元無線ノードの送信順序を維持して送信先無線ノードに到達する. 本論文では, 無線マルチホップ配送経路切断時に配送途中であったデータメッセージをも送信元無線ノードによる送信順序と同順序で送信先無線ノードが受信する経路修復手法を実現する.

2. 従来手法

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 $R = ||N_0 \dots N_n\rangle\rangle$ は, 各中継無線ノード N_i からその次ホップ中継無線ノード N_{i+1} への無線通信リンク $|N_i N_{i+1}\rangle$ が存在する中継無線ノード列から構成される. データメッセージは, 各 N_i から N_{i+1} へと $|N_i N_{i+1}\rangle$ を通して順次転送されることによって, N^s から N^d へと無線マルチホップ配送される. この無線マルチホップ配送経路を探索, 検出する無線アドホックルーティングプロトコルには, 送信元無線ノードにおける通信要求の発生時点で経路を探索, 検出するオンデマンド型のルーティング手法を用いるのが一般的である. これは, 無線アドホックネットワークが自律的に移動する無線ノードから構成され, 無線マルチホップ配送経路が中継無線ノードの移動によって切断されることから, 各無線ノードを送信先無線ノードとする無線マルチホップ配送経路の次ホップ無線ノードのアドレスをルーティングテーブルに保持し, 無線ノードの移動に従ってこのルーティングテーブルを更新するルーティングプロトコルの適用は適切で

© 2019 Information Processing Society of Japan

はないからである. オンデマンド型の無線アドホックルーティングプロトコルでは, 送信元無線ノードが送信先無線ノードへのデータメッセージ配送要求が発生する時点で無線マルチホップ配送経路を探索, 検出し, この経路に沿ってデータメッセージが配送される. このオンデマンド型の無線アドホックルーティングプロトコルには, 無線ノードの位置情報を用いずに経路探索要求制御メッセージ *Rreq* のフラッディングによって経路探索を行なう手法と無線ノードの位置情報を用いてデータメッセージごとに配送経路を決定する手法がある.

AODV(Adhoc Ondemand Distance Vector) [4] や DSR(Dynamic Source Routing) [2] では, *Rreq* 制御メッセージのフラッディングによって経路探索を行なう. 送信元無線ノードは, 送信先無線ノードのアドレスを含む *Rreq* 制御メッセージを自身の無線信号到達範囲に含まれるすべての隣接無線ノードにブロードキャスト送信する (図 1). この *Rreq* 制御メッセージを初めて受信した無線ノードは, 送信元無線ノードと同様に, 受信した *Rreq* 制御メッセージを自身の無線信号到達範囲に含まれるすべての隣接無線ノードにブロードキャスト送信する. 同一の *Rreq* 制御メッセージを受信済みであり, 既にそのブロードキャスト送信を終えている無線ノードは, この *Rreq* 制御メッセージを再度ブロードキャスト送信することはない. これによる *Rreq* 制御メッセージのブロードキャスト送信の繰返しであるフラッディングによって, 送信元無線ノードから送信先無線ノードまでの無線マルチホップ配送経路が存在するのであれば, そのうちのひとつに沿って *Rreq* 制御メッセージが送信先無線ノードに到達する. そこで, この検出した無線マルチホップ配送経路に沿って逆方向に送信先無線ノードから送信元無線ノードへと経路探索応答制御メッセージ *Rrep* を無線マルチホップ配送することにより, 各中継無線ノードのルーティングテーブルにこの無線マルチホップ配送経路の次ホップ中継無線ノードのアドレスを格納することができる. 本手法では, すべての無線通信リンクが双方向であることを前提としている. すなわち, 無線通信リンク $|N_iN_j\rangle$ が存在するならば, 無線通信リンク $|N_jN_i\rangle$ が存在する. このとき, N_i と N_j は双方向無線通信リンクで接続された隣接無線ノードである.

一方, GEDIR(Geographic Distance Routing) [6], GPSR(Greedy Perimeter Stateless Routing) [3], Face [1] などの無線ノードの位置情報を用いる無線アドホックルーティングプロトコルでは, データメッセージごとに配送時点における無線ノード位置に基づいて各中継無線ノードが次ホップ中継無線ノードを決定し, データメッセージを転送する. このとき, 各中継無線ノードによる次ホップ中継無線ノードの決定には, 無線アドホックネットワークを構成するすべての無線ノードの位置情報を必要としない. いずれの無線アドホックルーティングプロトコルにおいて

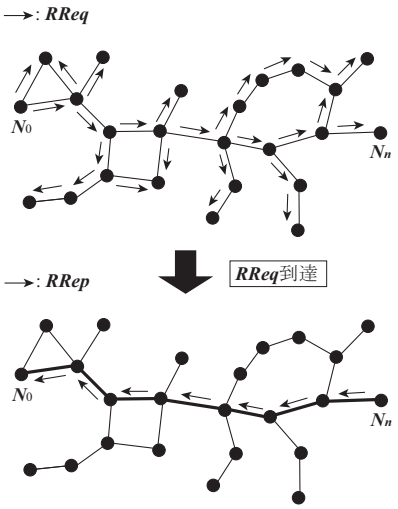


図 1 AODV による無線マルチホップ配送経路検出.

も, データメッセージを前ホップ中継無線ノードから受信した中継無線ノードは, 自身の位置情報, 送信先無線ノードの位置情報, すべての隣接無線ノードの位置情報 (前ホップ中継無線ノードを含む) を用いて, それぞれの手法により次ホップ中継無線ノードを決定する. 各中継無線ノードは, GPS(Global Positioning System) 受信機等の位置情報取得デバイスを備えることで自身の位置情報を取得し, これを含む位置情報通知制御メッセージを自身の無線信号到達範囲に含まれるすべての隣接無線ノードにブロードキャスト送信する. これを受信することによって, 各無線ノードはすべての隣接無線ノードの位置情報を取得する. なお, 送信先無線ノードの位置情報は送信元無線ノードがデータメッセージに含めることで, 各中継無線ノードが取得することができる. 各無線ノードは, 定期的に自身の位置情報を取得するとともに, それを隣接無線ノードに通知することによって, 各中継無線ノードは取得した最新の位置情報を用いてデータメッセージごとに転送する次ホップ中継無線ノードを決定する. そのため, 無線マルチホップ配送経路が切断するという概念そのものが存在しない.

AODV によって検出された無線マルチホップ配送経路は, 中継無線ノードの移動によって切断することがある. 図 2 に示す送信元無線ノード $N^s = N_0$ 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 $||N_0 \dots N_n\rangle\rangle$ では, 中継無線ノードの移動によって中継無線ノード N_p と N_{p+1} が互いの無線信号到達範囲に含まれない位置に移動し, 無線通信リンク $|N_pN_{p+1}\rangle$ と $|N_{p+1}N_p\rangle$ が切断される. このとき, N^s から N^d に無線マルチホップ配送されるべきデータメッセージ群のすべてが配送されていないのであれば, 経路を再構成しなければならない. この再構成には, N^s から N^d への無線マルチホップ配送経路を再探索, 再検出する手法 [4], 切断された無線通信リンクの両端の中継無線ノードである N_p と N_{p+1} を接続する無線マルチ

© 2019 Information Processing Society of Japan

ホップ配送経路を探索, 検出することで切断された無線マルチホップ配送経路を修復する手法 [5], 切断された無線通信リンクの送信元無線ノード側の中継無線ノード N_p から N^d への無線マルチホップ配送経路を探索, 検出することで, N^s から N^d までの無線マルチホップ配送経路を修復する手法が提案されている [4]. N_p から N^d への無線マルチホップ配送経路の探索は, AODV における経路探索要求制御メッセージ *Rreq* のフラッディングによって実現できる. すなわち, 図 3 に示すように N_p を送信元無線ノード N^d を送信先無線ノードとする無線マルチホップ配送経路を探索する *Rreq* 制御メッセージのフラッディングを N_p から開始する. 各無線ノードのブロードキャスト送信によってフラッディングされた *Rreq* 制御メッセージのうちのひとつが N^d に到達することによって, N_p から N^d までの無線マルチホップ配送経路が検出される. 検出された無線マルチホップ配送経路に沿って逆方向に N^d から N_p へと経路探索応答制御メッセージ *Rrep* を無線マルチホップ配送し, 各中継無線ノードがルーティングテーブルに次ホップ中継無線ノードのアドレスを格納することによって, N_p から N^d へのデータメッセージの無線マルチホップ配送が可能となり, N^s から N^d までの無線マルチホップ配送経路が修復される.

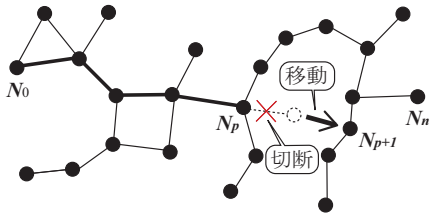


図 2 無線ノード移動による無線マルチホップ配送経路の切断.

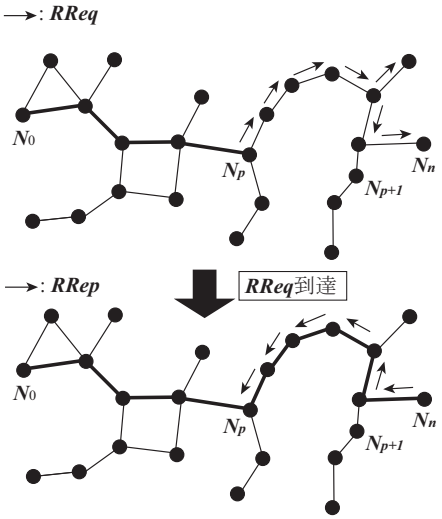


図 3 切断された無線マルチホップ配送経路の修復.

図 4 に示すように, 無線マルチホップ配送経路の切断時には, 配送途中のデータメッセージがいずれかの中継無線ノードの通信バッファに保持されている. これまでに切断された無線マルチホップ配送経路を修復する手法では, この配送途中のデータメッセージを修復された無線マルチホップ配送経路を用いて配送する救済手法について議論されていない. 配送途中で中継無線ノードの通信バッファに保持されているデータメッセージには, 経路修復手法によって送信先無線ノードまで無線マルチホップ配送されるものもあれば, 配送されないものもあるとしており, 配送されないデータメッセージについては上位層のプロトコルの機能によってエンドエンドの再送信機能が働くことによってすべてのデータメッセージを送信先無線ノードへと到達させる. しかし, 無線マルチホップ配送経路の切断時点でいずれのデータメッセージが配送途中であるかを送信元無線ノードが正確に把握することはできないことから, 上位層プロトコルの再送信機能に依存する場合には, 無線マルチホップ配送済みのデータメッセージを重複して再送信すること, 無線マルチホップ配送経路を途中まで配送されているデータメッセージを送信先無線ノードまで配送することなく中継無線ノードが破棄することによる通信オーバヘッドの拡大が問題となる.

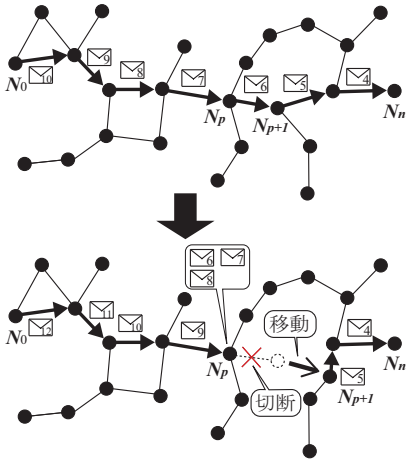


図 4 経路切断時点の配送途中データメッセージの中継無線ノードによるバッファリング.

3. 提案手法

3.1 問題点

前章で述べたように, 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 $||N_0 \ldots N_n\rangle\rangle$ の中継無線ノード N_p とその次ホップ中継無線ノード N_{p+1} との間の無線通信リンク $|N_pN_{p+1}\rangle$ および $|N_{p+1}N_p\rangle$ が無線ノードの移動によって切断された場合に, N_p からの経路探索要求制御メッセージ *Rreq* のフラッディングによって N_p から N^d への無線マルチホップ配送経路を探索, 検出を行なうことによって, N^s から N^d

© 2019 Information Processing Society of Japan

への無線マルチホップ配送経路を修復する場合における配送途中のデータメッセージの問題点について検討する．ここで, 無線マルチホップ配送の途中で N_p およびそれよりも N^s に近い中継無線ノード N_i $(0 \leq i \leq p)$ の通信バッファに保持されている N^d を送信先とするデータメッセージは各中継無線ノードのルーティングテーブルに従って次ホップ中継無線ノードへと転送され, N_p までは無線マルチホップ配送される．しかし, 無線通信リンク $|N_pN_{p+1}\rangle$ が切断していることから, N_p による N_{p+1} へのデータメッセージ転送は失敗し, N_p から N^d までの無線マルチホップ配送経路が検出されるまでの間, データメッセージが N_p によって破棄されることとなる (図 5).

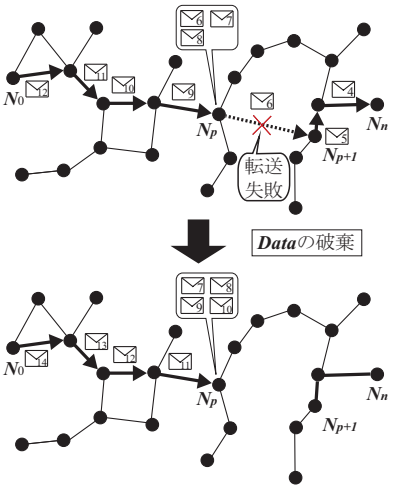


図 5 無線マルチホップ配送経路切断による配送途中データメッセージの破棄.

また, 図 6 に示すように, 検出された N_p から N^d への無線マルチホップ配送経路に N^s から N_{p-1} までの中継無線ノードを含まない場合と, 図 7 に示すように, 検出された N_p から N^d への無線マルチホップ配送経路に, N_q から N_{p-1} の中継無線ノードが含まれる場合がある．前者の場合は,N^d を送信先無線ノードとするデータメッセージが各中継無線ノードが自身のルーティングテーブルに従って次ホップ中継無線ノードへと転送することによって無線マルチホップ配送経路 $||N^s \ldots N_p\rangle\rangle$ と 無線マルチホップ配送経路 $||N_p \ldots N^d\rangle\rangle$ を連結した無線マルチホップ配送経路に沿って配送される．このとき, 各データメッセージは無線マルチホップ配送経路を順方向に順次配送されており, 中継無線ノード間で無駄なデータメッセージ転送は行なわれない．また, 経路切断と経路修復が行なわれない場合と同様に, データメッセージ列は送信元無線ノードから送信されたのと同じ順序で送信先無線ノードに到達する．一方, 後者の場合は, N^d を送信先無線ノードとするデータメッセージのうち, 無線マルチホップ配送経路の修復時点で中継無線ノード N_i $(0 < i \leq q)$ の通信バッファに保持されている配送途中のデータメッセージおよび無線マルチホップ配送経路の修復以降に N^s から送信されたデータメッセージは, 各中継無線ノードが自身のルーティングテーブルに従ってデータメッセージを次ホップ中継無線ノードへと転送することにより, 無線マルチホップ配送経路 $||N^s \ldots N_q\rangle\rangle$ と無線マルチホップ配送経路 $||N_q \ldots N^d\rangle\rangle$ を連結した無線マルチホップ配送経路に沿って配送される．また, 無線マルチホップ配送経路修復時点で中継無線ノード N_i $(q < i \leq p)$ の通信バッファに保持されているデータメッセージは, 各中継無線ノードが自身のルーティングテーブルに従ってデータメッセージを次ホップ中継無線ノードへと転送することにより, 無線マルチホップ配送経路 $||N_p \ldots N_q\rangle\rangle$ と無線マルチホップ配送経路 $||N_q \ldots N^d\rangle\rangle$ すなわち N_p からの $Rreq$ 制御メッセージのフラッディングによって検出された N^d への無線マルチホップ配送経路に沿って配送される．そのため, N^d への無線マルチホップ配送経路の修復時点で中継無線ノード N_i $(q+1 \leq i \leq p)$ の通信バッファに保持されたデータメッセージは $N_q, \ldots, N_i$ を中継無線ノードとする無線マルチホップ配送経路を往復する分だけ無駄に無線マルチホップ配送されることとなる．また, N_i $(q+1 \leq i \leq p)$ の通信バッファに保持されている配送途中のデータメッセージは, N_q を経由して N^d へと配送されることから, 無線マルチホップ配送経路 $||N_p \ldots N_q\rangle\rangle$ の切断前とは逆方向に配送されること, これらの配送経路と無線マルチホップ配送経路 $||N_0 \ldots N_q\rangle\rangle$ で配送されるデータメッセージと N_q で合流することから, 無線マルチホップ配送経路 $||N_q \ldots N^d\rangle\rangle$ で配送されるデータメッセージの配送順序は N^s で送信された順序とは異なるものとなり, N^d において受信順序を整えるための通信バッファが必要となるとともに, 配送遅延の延長が避けられない問題がある．

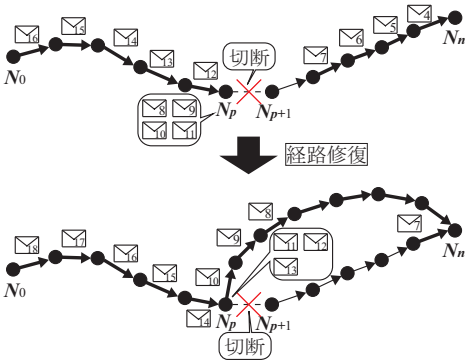


図 6 修復経路を用いた配送途中データメッセージの救済 (1).

なお, 無線マルチホップ配送の途中で N_{p+1} およびそれよりも N^d に近い中継無線ノード N_i $(p+1 \leq i < n)$ の通信バッファに保持されているデータメッセージは, N^d まで無線マルチホップ配送経路 $||N_{p+1}N_n\rangle\rangle$ が接続しており, 一般的に, N_q から N^d までの無線マルチホップ配送経路が

© 2019 Information Processing Society of Japan

Vol.2019-MBL-93 No.27
Vol.2019-ITS-79 No.27
2019/11/22

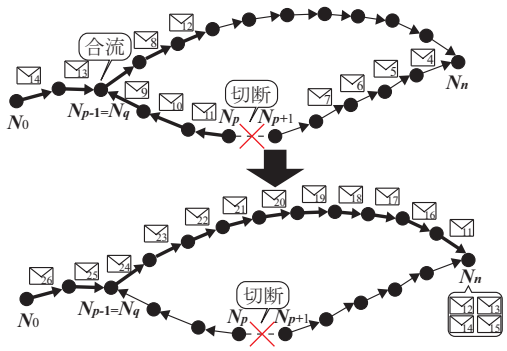


図 7 修復経路を用いた配送途中データメッセージの救済 (2).

探索, 検出され, 修復された経路を用いてデータメッセージが N^d まで配送される以前に N^d までの無線マルチホップ配送を終えていることが十分期待できることから, N^d まで無線マルチホップ配送によって到達すること, N^d における受信順序が N^s における送信順序と同一であることがいえる.

3.2 配送途中データメッセージ救済手法

本節では, 前節で述べた問題点, すなわち, 無線マルチホップ配送経路が中継無線ノードの移動によって切断されたときに, 次ホップ中継無線ノードへの無線通信リンクが切断された中継無線ノードから送信先無線ノードまでの無線マルチホップ配送経路を探索, 検出することによって, 送信元無線ノードから送信先無線ノードまでの無線マルチホップ配送経路を修復する際に, 切断時点で配送途中であり, いずれかの中継無線ノードの通信バッファに保持されているデータメッセージを救済し, 送信元無線ノードで送信された順序を保持して送信先無線ノードまで配送する手法を提案する. ここでは, 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が中継無線ノードの移動によって無線通信リンク $|N_pN_{p+1}\rangle$ が切断することで切断されるものとする. ここで, N_p が経路探索要求制御メッセージ *Rreq* のフラッディングによって自身から送信先無線ノード N^d までの無線マルチホップ配送経路を探索する. 検出された N_p から N^d までの無線マルチホップ配送経路が N^s から N_p までの無線マルチホップ配送経路の中継無線ノードの一部, すなわち, N_q $(0 \leq q \leq p)$ から N_p までの中継無線ノード列を逆順序で含むならば, 中継無線ノード N_i $(0 \leq i \leq q)$ の通信バッファに保持されている配送途中のデータメッセージと以降に N^s からの配送を開始するデータメッセージは, N^s の送信順序に従って配送され, N^d に受信される.

ここで, すべての配送途中のデータメッセージを送信元無線ノードの送信順序に従って送信先無線ノードまで配送するためには, 中継無線ノード N_i $(0 \leq i \leq q)$ の通信バッファに保持されている配送途中のデータメッセージに先立って, 中継無線ノード N_j $(q < j \leq p)$ の通信バッファに保持されている配送途中のデータメッセージを N^d へと無線マルチホップ配送することが必要である. さらに, 前節で述べたように, 切断された無線マルチホップ配送経路に沿ったデータメッセージの配送が継続され, N_p において N_{p+1} への規定回数以上の再送信がなされることによって N_p に破棄されるデータメッセージを削減し, また, N^s から N_p への無線マルチホップ配送経路を N_q を越えて配送されるデータメッセージは無線マルチホップ配送経路が修復された後に N_q へと逆方向に同じ経路に沿って配送されなければならないことから, N_p における無線通信リンク $|N_pN_{p+1}\rangle$ の切断が検出されたならば, 中継無線ノード N_i および N_j によるデータメッセージ転送を一時的に停止することが適切である. このデータメッセージ転送の一時停止を要求する制御メッセージを N_p から N^s まで中継無線ノードが順次転送することによって通知することが可能であるが, N_p から N^d への無線マルチホップ配送経路を探索するための *Rreq* 制御メッセージがこれらの中継無線ノードのすべてに到達可能であることから, *Rreq* 制御メッセージの配送が中継無線ノードへのデータメッセージ転送の一時停止の通知を兼ねることとする. すなわち, 中継無線ノード N_i および N_j は, N_p から N^d への修復用の無線マルチホップ配送経路の探索のためにフラッディングされる *Rreq* 制御メッセージを受信したならば, 通信バッファに保持されているデータメッセージの転送を一時的に停止する.

このとき, *Rreq* 制御メッセージは, N_p から N^s まで切断された無線マルチホップ配送経路の中継無線ノードを逆順序に順次ブロードキャスト送信されなければならない. すなわち, 図 8 上のようにブロードキャスト送信されることによって, N_p から N^d までの無線マルチホップ配送経路に N_p から N_q までの中継無線ノードを順次含むことが可能となり, 図 8 下のようにブロードキャスト送信されると中継無線ノードの通信バッファに保持されている配送途中のデータメッセージを後述する手法で N^s が送信したのと同じ順序で N^d が受信するように救済することができなくなる. そこで, N^s から N_p までの無線マルチホップ配送経路の中継無線ノードである N_i および N_j は, 他の無線ノードに先んじて *Rreq* 制御メッセージをブロードキャスト送信することとする. これの実現方法としては, 通常 DIFS 時間だけ待つデータメッセージ転送セッション間の待ち時間を中継無線ノードに限って SIFS とすることや, DIFS 待ち時間の後に中継無線ノードのみがバックオフタイマの値を 0 として *Rreq* 制御のブロードキャスト送信を行なうことが考えられる [7].

フラッディングされた *Rreq* 制御メッセージのひとつが N^d に到達すると, この配送経路に沿って逆順序に *Rrep* 制御メッセージが N^d から N_p まで順次転送されることにより, その中継無線ノードのルーティングテーブルに N^d

© 2019 Information Processing Society of Japan

Vol.2019-MBL-93 No.27
Vol.2019-ITS-79 No.27
2019/11/22

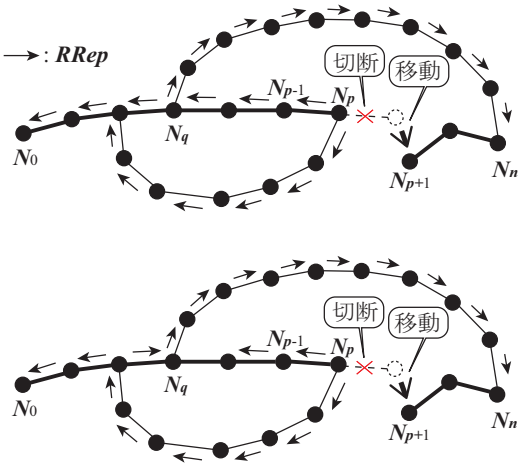


図 8 *Rreq* 制御メッセージのブロードキャスト送信順序.

を送信先無線ノードとする次ホップ中継無線ノードのアドレスが格納される. これによって, N_j $(q \leq j \leq p)$ の通信バッファに保持されている配送途中のデータメッセージを N^d まで無線マルチホップ配送することは可能となる. しかし, これらのデータメッセージを N^s が送信した順序と同一順序で N^d が受信するために, N_j については, N^s すなわち N_q から遠いものから順に通信バッファに保持されているデータメッセージの転送を再開する. これは, 無線マルチホップ配送経路の切断前には, N^s が先に送信したデータメッセージほど N^d により近い中継無線ノードまで配送されているからである. なお, 各中継無線ノードでは, 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 FIFO 順で次ホップ中継無線ノードに転送することから, 通信バッファに格納された配送途中のデータメッセージの救済においても, FIFO 順にデータメッセージの配送再開を行なえばよい. N_j の通信バッファに保持されたデータメッセージを救済する際には, 中継無線ノード N_k $(q \leq k < j)$ においては, 自身の通信バッファに格納された配送途中のデータメッセージの転送は行なわず, N_{k+1} から受信した救済対象データメッセージを N_{k-1} へ転送する. *Rrep* 制御メッセージを受信した N_p が自身の通信バッファに保持されたすべての配送途中のデータメッセージを N_{p-1} に転送したならば, 救済転送終了通知制御メッセージ *RFNotify* を N_{p-1} に送信する. N_{j+1} から *RFNotify* 制御メッセージを受信した N_j は, N_{j+1} から転送されたデータメッセージを N_{j-1} へ転送することを終えたならば, 自身の通信バッファに保持されている配送途中のデータメッセージを N_{j-1} へと転送し, 最後に *RFNotify* 制御メッセージを N_{j-1} に送信する. こうして, *RFNotify* 制御メッセージが N_q に到達すると, すべての N_j の通信バッファに保持されていたすべての配送途中のデータメッセージが救済配送される. このとき, データメッセージは N^s が送信した順序と同じ順序で N^d に到達する.

N_i $(0 < i < q)$ の通信バッファに保持されているデータメッセージは, 修復無線マルチホップ配送経路においても切断された無線マルチホップ配送経路と同様に N_{i+1} を次ホップ中継無線ノードとしてここに転送される. したがって, N_i については N_j とは異なり, N_j の通信バッファに保持されている配送途中のデータメッセージが N_q からその次ホップ中継無線ノードへと転送された以降であれば, いつでも配送途中データメッセージの転送を再開することができる. そこで, N_q が *RFNotify* 制御メッセージを N_{q+1} から受信したならば, 直ちに N_{q-1} に転送する. また, N_i においても同様に N_{i+1} から *RFNotify* 制御メッセージを受信したならば, 直ちに N_{i-1} に転送する. *RFNotify* 制御メッセージを転送したならば, 各 N_i は通信バッファに保持された配送途中データメッセージの配送を再開する. ここでは, N^s が *RFNotify* 制御メッセージ受信後に再開する新たなデータメッセージの N^d への無線マルチホップ配送を含めて, 各 N_i が FIFO 順にデータメッセージの転送を行なう.

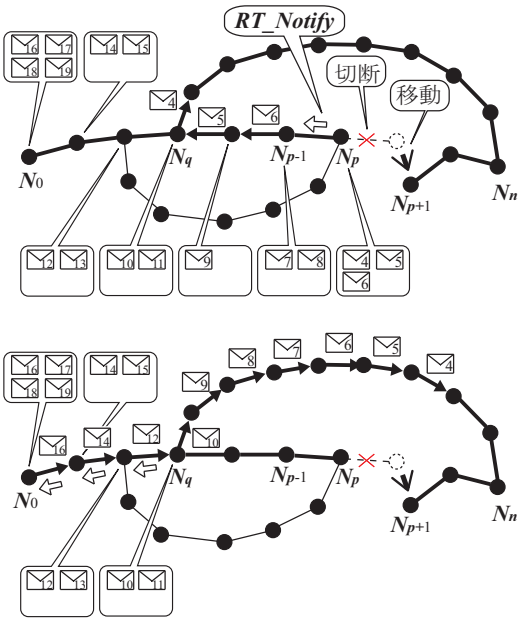


図 9 配送途中データメッセージの救済.

4. 評価

本論文で提案した手法の有効性を評価するシミュレーション実験について述べる. 無線マルチホップ配送経路が切断された後に経路修復を行ない, 中継無線ノードの通信バッファに保持されていたデータメッセージを修復された無線マルチホップ配送経路に沿って送信先無線ノードまで配送する場合に, 送信先無線ノードにおけるデータメッセージの到達順序が本論文の提案する手法を用いる場合と用いない場合でどのように異なるのかシミュレーション実験を行なった. ここでは, 無線マルチホップネットワークの各データメッセージにはシーケンス番号を格納した UDP データグラムが含まれており, 送信元無線ノードにおける

© 2019 Information Processing Society of Japan

送信順序と送信先無線ノードにおける受信順序とがどのように異なるかを確認する．なお, ここでは経路修復のために探索, 検出される中継無線ノード N_p から N^d までの無線マルチホップ配送経路と切断された N^s から N^d への無線マルチホップ配送経路とに共通に含まれる中継無線ノード $N_q, \ldots, N_p$ の数を 1, 2, 3 とした場合の結果をそれぞれ図 10, 図 11, 図 12 に示す．従来手法, すなわち, 無線マルチホップ配送経路の修復とともに, データメッセージの到達順序を考慮せずに配送途中のデータメッセージを修復経路に沿って配送する手法では, 送信順序と受信順序が異なるデータメッセージが多数発生していることがわかる．また, このようなデータメッセージは, 切断された無線マルチホップ配送経路と修復された無線マルチホップ配送経路の共通の中継無線ノードの増加にともなって増加する．これに対して提案手法では, 送信順序と受信順序が異なるデータメッセージは少数であり, 共通の中継無線ノード数が増加しても大きく増加しない．ただし, 提案手法でも少数のデータメッセージの送信順序と受信順序が異なる点については, その原因を検討しなければならない．

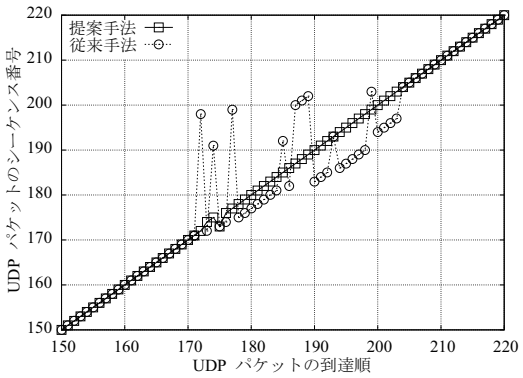


図 10 経路切断時のデータメッセージ送信順序と受信順序の差異 (共通中継無線ノード数 1).

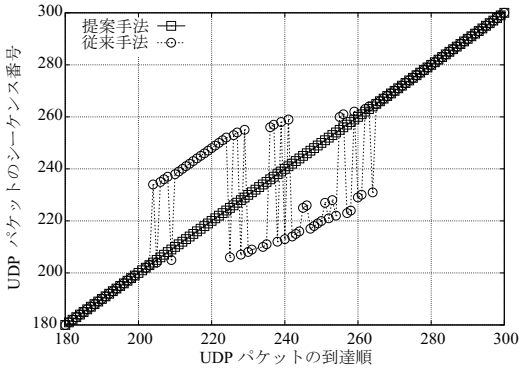


図 11 経路切断時のデータメッセージ送信順序と受信順序の差異 (共通中継無線ノード数 2).

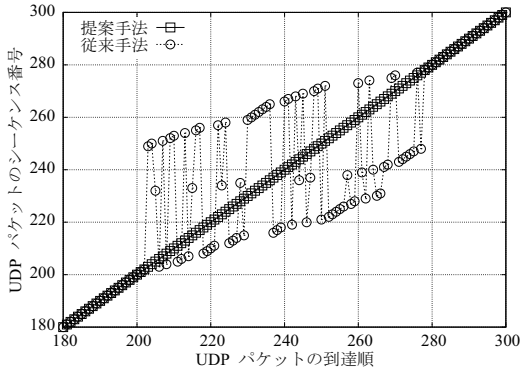


図 12 経路切断時のデータメッセージ送信順序と受信順序の差異 (共通中継無線ノード数 3).

5. まとめ

AODV アドホックルーティングプロトコルによって検出された無線マルチホップ配送経路が中継無線ノードの移動によって切断した場合の経路修復時における配送途中データメッセージの救済手法を提案した．ここでは, 経路切断を検出した中継無線ノードから送信先無線ノードまでの無線マルチホップ配送経路を検出することによって送信元無線ノードから送信先無線ノードまでの無線マルチホップ配送経路を構成するのみでなく, 切断された経路に沿って配送される途中であるデータメッセージを救済して送信先無線ノードまで到達させる経路も同時に構成する．さらに, データメッセージ列の無線マルチホップ配送が自然に実現する送信元無線ノードによる送信順序を保存した送信先無線ノードにおける受信を実現するために, 中継無線ノードが通信バッファに保持する配送途中データメッセージの配送を一時停止した後に順次再開する手法を提案した．シミュレーション実験により, 本論文の提案手法によってデータメッセージの受信順序が大きく改善していることが確認できた．今後は, 実験条件を変えながら多数の実験結果を取りまとめることで, 送信先無線ノードに求められる通信バッファ容量の削減効果, エンドエンドの配送遅延の短縮効果を評価するとともに, 一部に送信順序が保存されない受信が発生する原因を明らかにし, その解消方法を検討する．

参考文献

[1] Bose, P., Morin, P., Stojmenovic, I. and Urrutia, J., “Routing with Guaranteed Delivery in Ad hoc Wireless Networks,” Wireless Networks, Vol.7, pp. 609–616 (2001).
[2] Johnson, D.B., Maltz, D.A., Hu, Y.C. and Jetcheva, J.G., “The Dynamic Source Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks,” Internet Draft, draft-ietfmanet-dsr-04.txt (2000).
[3] Karp, B. and Kung, H.T., “GPSR: Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Networks,” Proceedings of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, pp. 243–254 (2000).

© 2019 Information Processing Society of Japan

[4] Perkins, C.E. and Royer, E.M., “AODV: Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing,” RFC 3561 (2003).
[5] Sharma, D.K., Patra, A.N. and Kumar, C., “P-AODV: A Priority Based Route Maintenance Process in Mobile Ad Hoc Network,” Springer, pp. 4381–4402 (2017).
[6] Stojmenovic, I. and Lin, X., “GEDIR: Loop-Free Location Based Routing in Wireless Networks,” Proceedings of the International Conference on Parallel and Distributed Computing and Systems, pp. 1025–1028 (1999).
[7] 兼松, 吉田, グエン, 関屋, “キャプチャ効果による無線 LAN の端末間の不公平性の解析的評価と改善,” 電子情報通信学会技術研究報告, SeMI2019-20, pp.13–18 (2019).

© 2019 Information Processing Society of Japan