Vol.2018-MPS-118 No.34
Vol.2018-BIO-54 No.34
2018/6/15

混雑時のモバイルアドホックネットワークにおけるルーティング

徳永　潤平[†1,a)]　金光　涼[†1,b)]　榎原　博之[†1,c)]

概要：災害時の避難所やイベント会場等の人が多く集まる環境において，ノードが過密し通信が困難になった状況を想定し，高密度ノード環境に強いモバイルアドホックネットワーク (MANET) ルーティングプロトコルを提案する．この提案手法では，ノード同士で自律的にクラスタリングを行うことにより，混雑時に強いモバイルアドホックネットワークを実現する．ネットワークシミュレーションにより，従来手法と比較してネットワークの混雑に対する高い耐性を確認した．

TOKUNAGA Junpei[†1,a)]　KANEMITSU Ryo[†1,b)]　EBARA Hiroyuki[†1,c)]

1. はじめに

2011 年の東日本大震災では、地震による多くの被害とともに，災害発生後の津波による二次災害が大きな問題となった．また，首都圏を含む多くの地域に被害が拡大し，帰宅困難者の発生や，避難所の混雑などの問題が発生したため，災害発生後に罹災者をいかにしてサポートするかが課題となっている．特に、帰宅困難者による支援は今後の都市型の災害対策として重要である．

都市型の災害において帰宅困難者は，公共交通機関や携帯電話網の損傷によって，帰宅することもできず，情報を得る手段もなく，ただ事態が収束するのを待つことを余儀なくされる．災害に伴う混乱状態の中で待機し続けることは心身ともに消耗するため，帰宅困難者を初めとする罹災者を支援し，この状況を回避するための研究が盛んに行われている．

于らは災害によって発生した通行可能箇所を示した地図情報を提供し帰宅を支援するために，アドホックネットワークを利用した道路通過可能性マッピングシステムを提案している [1]．また浦部らは災害発生後の救助・安否確認のために MANET を利用した情報収集・追跡システムを提案している [2]．災害発生後のアプリケーションの多くの手法は，既存のインフラストラクチャが使用不可能でも，即席で構築できるアドホックネットワークの長所から，MANET や遅延耐性ネットワーク（DTN）を使用している．しかし，既存のアドホックネットワーク用ルーティングプロトコルは災害発生時のような緊急時のネットワークに使用できるほどの信頼性はなく，実現のために必要な課題が多くある．

特に顕著なのはノード数とネットワークフローの増加に対するスケーラビリティの問題で，既存の MANET ルーティングプロトコルはノード数やネットワークフローが増加すると輻輳が多く発生し，通信できなくなる問題がある．このため多くの避難者，つまりノードが存在する都市型の災害に対しては現状のアドホックネットワーク用ルーティングプロトコルは適していない．

この問題に対処するために三鴨らは複数のネットワークフローを別の経路に分割することでパケットロスの発生を防ぐことを試みている [3]．しかし，この手法では Optimized Link State Routing Protocol (OLSR)[4] を拡張するため，経路構築時にネットワーク負荷の高いフラッディングを伴うことは変わらない．このため新しいネットワークフローの生成と共に性能が悪化するおそれがある．またノードの配置や密度によっては常に経路を選択する余地があるとは限らない．

また多くのネットワーク機器は同時に接続できるノード数に制限がある場合が多い．このため，ノード密度が高く，多くの隣接ノードが存在するネットワークでは限られた接

†1 現在，関西大学　理工学研究科
Presently with Graduate School of Science and Engineering, Kansai University
a) yodogawa@homu.sakura.ne.jp
b) k568844@kansai-u.ac.jp
c) ebara@kansai-u.ac.jp

ⓒ 2018 Information Processing Society of Japan

続可能数の中でコネクションの取り合いが起こり，あぶれたノードがネットワーク内に参加することができず，孤立するノードが発生することがある．実際のネットワークで沢山のノードがネットワークに参加する場合，この問題の解決も必要とされる．

Jung らはイベント会場等の混雑した空間において効率的に情報を配信するために，Wi-fi Direct を使用した情報配信方式を提案した [5]．コンテンツ志向ネットワーク（CCN）のネットワーク内にコンテンツをキャッシュとして蓄積する特徴を活かして，100 ノード程度のネットワークにおいてパケット到達遅延や総転送量を減少させることに成功している．

本研究では，災害発生時の駅・避難所や平常時のイベント会場など人が多く集まる場所で，ノードの密度が高くなった状態を想定し，高頻度で通信を行う場合でも信頼性のある通信を行えるクラスタリングを用いたルーティングプロトコルを提案する．そして，ネットワークシミュレータである The ONE Simulator 上に実装し，従来手法との比較を行う．

2. 従来手法

2.1 MANET ルーティングプロトコル

従来の MANET ルーティングプロトコルとして代表的なものに Optimized Link State Routing Protocol (OLSR)[4] や Ad hoc On demand Distance Vector (AODV）[6] が存在する．これらのルーティングプロトコルは図 1 のようにネットワーク全体にメッセージをブロードキャストするフラッディングを行うことで，ネットワークのどんな場所にいても経路の構築のためのパケットが受け取れる仕組みになっている．しかし経路構築のたびにフラッディングを行うと，ネットワークに大きな負荷がかかる．ノードが密集し混雑したネットワークで高頻度な通信を行うと、大量の制御メッセージによって輻輳が起こってしまう．

OLSR では MultiPointRelay (MPR) 集合を利用した，重複するノードへのフラッディングを防ぐ機能を搭載し，AODV と比較して輻輳に強くなっている．しかし，ネットワーク全体にメッセージを送信していることには変わらないため，依然として同様の輻輳が発生してしまう問題点がある．この問題から従来の MANET ルーティングプロトコルはネットワークフローが 2, 3 個では良好な性能を発揮するものの，20, 30 とネットワークフローが増えるにつれてパケットの損失が増加し [7]，多くのノードが同時に通信を行うと，ほとんど通信することができなくなってしまう．

2.2 DTN 用ルーティングプロトコル

遅延耐性ネットワーク（DTN）は，衛星通信や水中通信などの通信遅延が多く発生したり，通信が断続的に途絶えたりする劣悪なネットワークのために開発されたネットワークである [8]．

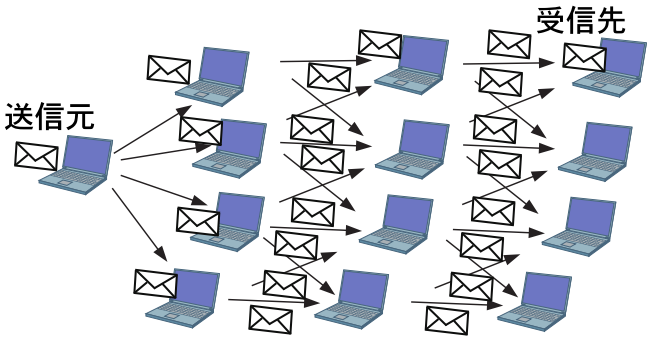

図 1　フラッディングの例

遅延耐性ネットワークの大きな特徴は，転送するデータの単位をメッセージとし，ネットワーク内のノード同士でメッセージを相互に交換することを繰り返し，メッセージの伝搬範囲を広げる形でデータを送信する．メッセージを送信する時，メッセージはノードの持つバッファに一時的に保存し，その複製を送信する．情報を蓄積することで，ノードの移動に伴い遭遇した新しいノードにメッセージを転送することが可能になる．

DTN に使用するノードのバッファは MANET と比較して大きく取る傾向があり，MANET のように転送しきれなかった大量のパケットがバッファから溢れ出すことは無い．ただし，それぞれのノードが持つバッファは有限のため，バッファが一杯になったときは古いメッセージから削除される．ルーティングプロトコルの設計方針により削除する順番は多少前後する．

DTN の代表的なルーティングプロトコルに Epidemic[9] が存在する．これは遭遇したノードに全てのメッセージを送信することを繰り返すことで，ネットワーク全体へのメッセージの浸透を図る．Epidemic は単純な手法によりデータの到達性を最大限に高めようとするプロトコルである．

3. 提案手法

災害時やイベント会場で多くのノードが集まり、高頻度な通信を行い輻輳が発生しやすくなったネットワークを想定した，混雑時のアドホックネットワークに適したルーティングプロトコルを提案する．提案手法では，フラッディングを防ぐためにクラスタリングを用いたネットワークの形成を図る．クラスタリングはネットワークを一定数のノードから構成されるサブネットに分割する手法である．またクラスタ間通信の効率化を図るため，クラスタのクラスタを再帰的に構築する機構を取り込む．さらに DTN のように送受信されるメッセージを蓄積することで，情報の到達率を高める．

3.1 クラスタの形成

フラッディングに頼らなくともネットワークを構築するために，提案手法ではクラスタリングを行う．クラスタはそれぞれのノードが周辺の他ノードと通信を行い，すべて自律的に構成される．提案手法のクラスタを構成するノードはクラスタメンバ，クラスタヘッド，クラスタゲートウェイの 3 種類に分けられる．クラスタの形成のステップは，大きく分けて以下のつのステップに別れる．

1. クラスタヘッドの選出
2. クラスタへの参加
3. クラスタゲートウェイの選出

3.1.1 クラスタヘッドの選出

クラスタヘッドは，クラスタを管理する機能を持つ．1 つのクラスタには必ず 1 つのクラスタヘッドを持つ．ノードの移動やバッテリー切れによりクラスタヘッドが消滅した場合は，そのクラスタは消滅する．この場合クラスタに参加しているクラスタメンバノードは，送受信の失敗により消滅を検知後すぐにクラスタの再構築を試みる．

ネットワーク内でクラスタに所属していないノードは，まず周囲にクラスタヘッドが存在しているかどうかを判定する．クラスタヘッドは自身の存在を示すビーコンを定期的に発信しており，電波到達範囲内に居る他のノードがそれを受信することができる．クラスタヘッドからのビーコンを受信したノードは既存のクラスタがあると判定し，該当するクラスタへの接続を試みる．

ビーコンを受信できない場合や，ビーコンを受信しても既存のクラスタに空きがない場合は自身がクラスタヘッドになる．クラスタヘッドになるかどうかは，ノード起動時にランダムに設定された，自動的にクラスタヘッドに変更するまでの制限時間によって決定する．

多くのネットワーク機器は同時に接続できる端末台数に制限があるため，1 つのクラスタには定員を設定する．図 2 の例では，クラスタの定員をクラスタヘッドを除外した 4 台としている．このため 5 番目にクラスタに参加しようとしたノードは参加することができない．この場合，参加できなかったノードが新たにクラスタヘッドになるか，または接続可能な位置にあるまだ空きのあるクラスタへの接続を試みる．

周辺のクラスタが定員を超過した場合にも自動的にクラスタが追加されることで，端末の同時接続数の制限によりネットワークに参加できないノードが発生することを防ぐ．

3.1.2 クラスタゲートウェイの選出

クラスタゲートウェイは，複数のクラスタ間を接続し，クラスタ間通信を行う機能を持つ．

複数のクラスタヘッドからのビーコンを受信したノードは，クラスタヘッド同士をつなぐクラスタゲートウェイに役割を変更しようとする．クラスタゲートウェイに変更しようとするノードはクラスタヘッドと情報をやりとり

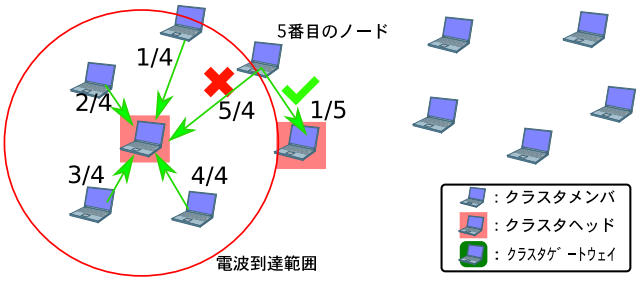

図 2 クラスタへの参加

し，すでにクラスタ間の経路を実現する他のクラスタゲートウェイが存在しない場合のみ，クラスタゲートウェイになることができる．図 3 では，ノード B はクラスタゲートウェイになることができるが，既に同じ経路を実現するノード A が存在するため，クラスタゲートウェイになることを認められない．クラスタゲートウェイは先着順に設定される．またクラスタヘッドは定期的にクラスタゲートウェイとの通信を監視し，接続が失われた場合は新たなクラスタゲートウェイを受け入れる．

図 3 のノード C のように，クラスタゲートウェイは同時接続数の範囲内で，複数のクラスタヘッドに接続することを許可している．

3.2 クラスタヘッドによる情報の蓄積

提案手法では情報の伝達速度を速めるために，DTN の特徴である情報の蓄積を行う．クラスタヘッドはクラスタゲートウェイを介して送受信されるメッセージを常に監視しており，今まで送受信したことのない新しいメッセージを受信した場合は、情報を蓄積する．

情報を蓄積することで，図 4 のように他のノードからの情報の要求があった場合に，本来のノードまでホップする必要がなくなる．これにより制御パケット量とトラフィックを削減するとともに，情報を即座に返信することができるようになる．

送受信されるメッセージには一意な ID を設定し，ID を読み取って新しい情報かどうかを識別する．またメッセージは一定量を超えると古いものから破棄される．

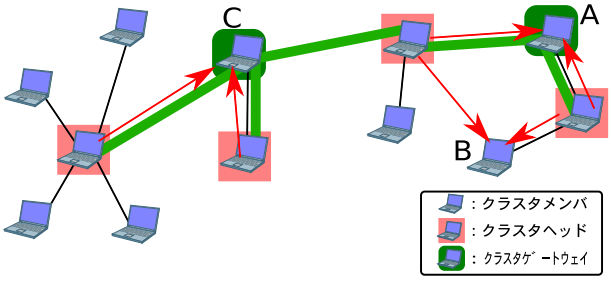

図 3 クラスタゲートウェイの選出

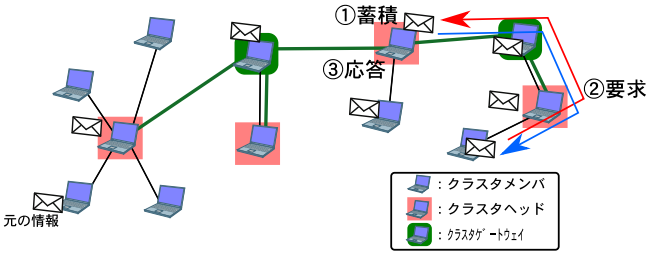

図 4　蓄積された情報の取得

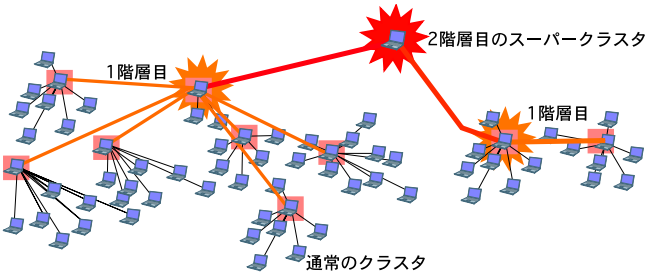

図 5　再帰的なクラスタの形成

3.3　スーパークラスタの形成

提案手法ではクラスタのクラスタである，スーパークラスタを形成する。提案手法ではクラスタに定員を設けているため，ノードが密集すると細かいクラスタが大量に形成される．後述する経路構築の際は必ずクラスタヘッドとクラスタゲートウェイを順番に巡る設計のため，細かいクラスタが大量に生成された時，ホップ数が増えてしまう問題があり，同じ電波の到達範囲内で何度もホップし，一向にパケットが進まない問題がある．これを防ぐために，図 5 のようなスーパークラスタを形成する．

スーパークラスタはクラスタヘッドのみからなるクラスタで，必要であれば再帰的に木構造を形成する．図では 2 階層のクラスタを形成している．

4.　経路構築

提案手法では，AODV を模倣したプロアクティブ型のルーティングプロトコルとして，経路探索の際は RouteRequest(RREQ)，経路構築の際は RouteReply(RREP) の 2 種類のパケットを使用する．経路構築はメッセージ送信の必要が発生したときに行われる．

ノードが情報を送信するとき，まず所属するクラスタのクラスタヘッドに経路を要求する．クラスタヘッドの経路表に経路が用意されていない場合，登録された全てのクラスタゲートウェイに RREQ パケットを送信する．ネットワーク内にスーパークラスタが存在する場合は，そちらに送信する．

RREQ パケットを受信したクラスタゲートウェイは，保持している全てのクラスタヘッドに RREQ パケットを転送する．このとき，ループを防ぐため RREQ パケットにはホップした経路を保存し，一度経由したノードはホップ対象から除外する．また，RREQ を受信したノードは，RREQ パケットに記録されたソースノードの情報とホップ元の情報を，経路表に書き込む．

この動作を繰り返すことにより，RREQ パケットが宛先ノードの存在するクラスタに到達した場合は，宛先ノードを管理するクラスタヘッドが RREP パケットを送信する．

RREP パケットは RREQ パケットのホップ中に生成された経路表を基に，ソースノードまで転送される．ソースノードでは，RREP パケットのホップをバックトラックすることにより，経路を完成させることができる．

ソースノードで複数の RREP パケットを受け取った場合は，いちばん速く到達したパケットの経路を採用する．以上により経路の構築を行う．

5.　シミュレーション評価

5.1　シミュレーション設定

提案手法のパフォーマンスを確認するため，ネットワークシミュレータの The ONE Simulator[10] を使用して，提案手法と比較手法についてシミュレーションを行い比較を行った．

比較手法として，MANET 用のルーティングプロトコルである AODV を OneSimulator 上に実装し用意した．また，Epidemic Routing Protocol は ONE Simulator に同梱されているものを使用した．比較手法と提案手法をそれぞれ図 1 に示すシミュレーションパラメータで実行し，それぞれ 3 回実行した平均を採用した．

シミュレーションエリアは混雑した駅や避難所を想定した 100[m] 四方とし，各ノードはランダムウォークに従って移動する．移動速度は駅や避難所で人が待機・移動している状態を想定した 0.0〜1.5 メートル毎秒の範囲内でランダムに設定される．また，同時接続可能な台数は 16 台までとし，シミュレーション時間は 300[s] とした．

シミュレーション開始後，それぞれのノードは周辺の情報や他のノードの状況等の情報を取得するため，ランダムにノードを選び情報を要求する．このシミュレーションシナリオで，全てのノードが全てのノードについての情報を保持した状態である情報共有率 100 %の段階を目指した．

情報共有率は式（1）で求める．情報共有率の 100 %は，全てのノードが全てのノードに関する情報を入手した状態に相当する．今回のシミュレーションでは，ノード固有のデータ数をそれぞれ 1 つずつに設定した．

また提案手法については，スーパークラスタを作れる範囲内で無制限に作るパターン，スーパークラスタの階層数を 2 階層までとするパターン，そしてスーパークラスタを構築せずに，クラスタ間通信のみで情報を交換するパターンの 3 種類のシミュレーションを実施した．

表 1　シミュレーションパラメータ

項目名	パラメータ値
シミュレーション時間 [s]	300
シミュレーションエリア [m]x[m]	100x100
ルーティングプロトコル	Epidemic, AODV, 提案手法
移動モデル	RandomWalk
移動速度 [m/s]	0.0〜1.5
移動端末数 [台]	1000
Wi-Fi	802.11b 11Mbps
データパケットサイズ [Byte]	40
同時接続台数 [台]	16
1 クラスタあたりの定員 [台]	10
クラスタの階層数	0, 2 , 無制限

$$\text{情報共有率} = \frac{\text{受信したデータの総計}}{\text{ノード固有のデータ数} \times \text{ノード数}} \quad (1)$$

5.2　シミュレーション結果

図 6 に情報共有率についてのグラフを示す．従来手法の Epidemic, AODV と比較して提案手法は早い段階で情報共有率を高めることができている．

AODV を使用した場合は，強い輻輳が発生しほとんど通信することができず，最終的な情報共有率は 1 %に満たなかった．

DTN 用のルーティングプロトコルである Epidemic を利用した場合は，情報共有率の推移がほぼ線形に増加している．Epidemic はコンタクトのあるノードと逐一メッセージを交換することで情報の伝達を行い，経路構築のための制御用パケットが必要ないため輻輳の発生には至らず，順調にデータの交換が進んだと考えられる．しかし Epidemic を使用した場合は，順調にデータを交換することができたものの途中から情報共有率の増加が途絶え，情報共有率の増加が飽和してしまった．Epidemic を使用した場合の最終的な情報共有率は表 2 に示すとおり 100 %に至らなかった．

提案手法のパラメータを変更した 3 つの場合について，積極的に階層化を進める場合は 5 分以内に 100 %に達することができている．2 階層に制限した場合も，最終的に 100 %に至っている．階層化をまったくせずに，クラスタ間通信のみでメッセージを交換する場合は，もっとも高速に情報共有率を高めているが，最終的に 100 %に至ることはできなかった．

情報共有率が 100 %に至らなかった原因の 1 つとして，ネットワークの同時接続数の問題により一部のノードが途中から通信を行う機会を奪われ，孤立してしまったためと考えられる．提案手法においても階層化をしなかった場合，同様の問題により孤立したクラスタが発生し，新たな情報を得ることができない場合があるため，階層化による補助を組み合わせる必要がある．

表 3 に示す情報共有率が 99 %に至るまでの時間は，平均で最大 2 階層に制限した場合が最も速く，Epidemic を使用した場合より 1 分以上早く情報を取得できている．

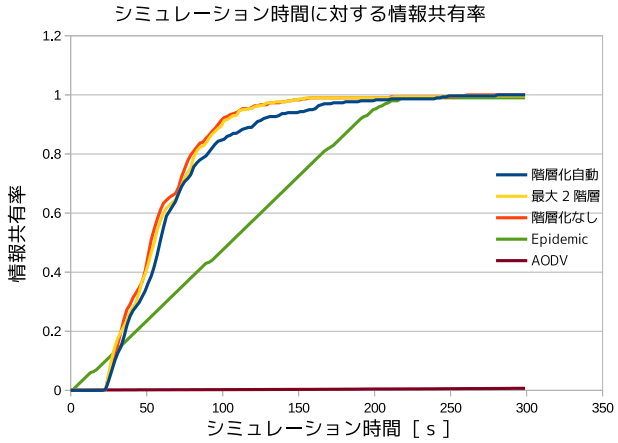

図 6　情報共有率についてのグラフ

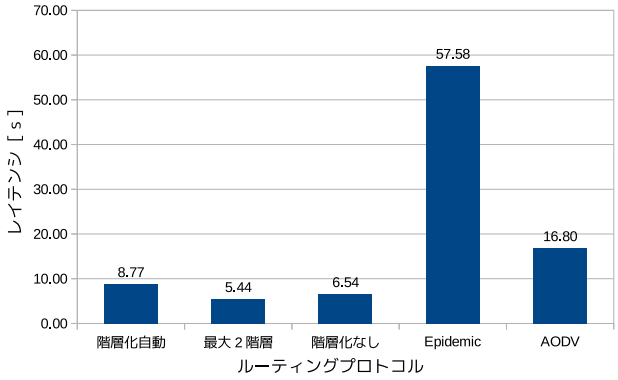

図 7　ルーティングプロトコルごとのレイテンシ比較

次に情報取得レイテンシについてのグラフを図 7 に示す．情報取得レイテンシは，情報の要求から受取までどれぐらいの時間差を必要とするかを表し，情報を受け取った時刻から，情報を要求した時刻を引いて計算する．

提案手法では，階層化を 2 階層に制限した場合が一番少ないレイテンシを実現している，また階層化を無制限に進める場合はレイテンシが大きくなっている．なお，今回のシミュレーションでは最大で 5 階層まで形成された．

階層化数を大きくしすぎると，スーパークラスタ間の通信のためのホップ数が増えるため，レイテンシの増加に繋がったと考えられる．逆に，全く階層化を行わないと，経由しないスーパークラスタには情報が蓄積されないため，情報のヒット率が減少したためレイテンシが増加したと考えられる．また今回クラスタの階層化は木構造になるように構成されるが，この木構造が綺麗な対称になりにくいことも原因として挙げられる．

その他，階層化を進めるほど 1 つのクラスタヘッドが管理するノードが増加し，トラフィックを処理する余裕が減少することも考えられるため，スーパークラスタの構造については検討を要する．

ⓒ 2018 Information Processing Society of Japan

表 2　300 秒経過時点での情報共有率

階層化自動	最大 2 階層	階層化なし	Epidemic	AODV
100%	100%	99.6%	99.0%	0.69%

表 3　99 %に至るまでの到達時間 [秒]

階層化自動	最大 2 階層	階層化なし	Epidemic
241	155	157	219

6. 今後の課題

情報共有の迅速化のために，クラスタのクラスタを作成するスーパークラスタをクラスタリングの一部として採用した．しかし，スーパークラスタの選定は個人が所有するモバイルデバイスを想定した，一般のノードの中から行われている．スーパークラスタヘッドは多くのパケットやメッセージを処理することを要求されるため，他のクラスタの役割と比較して著しく多く電力を消費するおそれがある．このため既存のアクセスポイントやホームサーバーをネットワークに参加させ，それらを優先的にクラスタヘッドやスーパークラスタヘッドとして選択することや，端末のバッテリー残量を考慮したクラスタヘッドの選定を行うことが必要である．

また，経路構築には AODV 等の従来手法を模倣した RREQ, RREP を使用するリアクティブ型の設計としたが，予めクラスタ間通信により経路を交換するプロアクティブ型として再設計することでパフォーマンスが向上する可能性がある．

提案手法の経路構築方法は最短ホップ数を使用する経路として採用する．他のルーティングプロトコルで採用されるような，経路の寿命やホップにかかるコストは考慮されていない．実際のネットワークはノードの移動やネットワークの通信状況などにより最短ホップが最良の経路とは限らないため，経路構築方法についての検討が必要である．また，前述する電力消費に対する考慮を実装する場合は，経路構築で次ホップを選択する方法についても検討する必要がある．

7. まとめ

本稿では，ノードが密集し高頻度な通信が行わる，混雑した MANET に向けたルーティングプロトコルを提案した。本手法では，ネットワーク負荷の大きいフラッディングを防ぐために，クラスタリングを使用した．また，同時接続数の制限により通信ができないことや，ホップ数が増えクラスタ間通信に時間がかかることを避けるために，クラスタのクラスタに相当するスーパークラスタの形成を行った．シミュレーション評価により，従来手法と比較して高速に情報のやりとりを行うことができることが示された．今後の課題として，スーパークラスタを階層化する際，木構造を修正する機能の導入や，階層化されたクラスタに適したデータ交換手法の導入，経路構築手法の見直しなどが挙げられる．またノードのバッテリー消費を考慮したクラスタヘッド・スーパークラスタヘッドの選定方法等が挙げられる．

謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 18K11484 と、JSPS 科研費 17K01309、関西大学大学院理工学研究科高度化推進研究費、関西大学先端科学技術推進機構「緊急救命避難支援のための情報通信技術に関する研究開発」研究グループの助成を受けている。

8. 参考文献

参考文献

[1] 于文龍，榎原博之，松崎頼人，ラガワンベンカテッシュ：帰宅困難者のための GPS を用いたリアルタイム地図作成システム (GPS, 位置, モバイルアドホックネットワーク, モバイル時代を支える次世代無線技術, フィールドセンシング及び一般)，電子情報通信学会技術研究報告. AN, アドホックネットワーク， Vol. 112, No. 494, pp. 229–234 (2013).

[2] 浦部弘章， 塚本淳，佐藤和基，梅津高朗，東野輝夫ほか：MANET を用いた災害時における被災者の位置情報収集・追跡システムの提案，情報処理学会研究報告高度交通システム (ITS)， Vol. 2005, No. 89 (2005-ITS-022), pp. 47–52 (2005).

[3] 三鴨勇太， 旭健作，鈴木秀和， 渡邊晃：アドホックネットワークにおける通信状態を考慮したルーティング手法の提案，電子情報通信学会技術研究報告: 信学技報，Vol. 112, No. 241, pp. 1–6 (2012).

[4] Clausen, T. and Jacquet, P.: Optimized link state routing protocol (OLSR), Technical report (2003).

[5] Jung, W.-S., Ahn, H. and Ko, Y.-B.: Designing content-centric multi-hop networking over Wi-Fi Direct on smartphones, *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2014 IEEE*, IEEE, pp. 2934–2939 (2014).

[6] Perkins, C., Belding-Royer, E. and Das, S.: Ad hoc on-demand distance vector (AODV) routing, Technical report (2003).

[7] Perkins, C. E., Royer, E. M., Das, S. R. and Marina, M. K.: Performance comparison of two on-demand routing protocols for ad hoc networks, *IEEE Personal communications*, Vol. 8, No. 1, pp. 16–28 (2001).

[8] Fall, K.: A delay-tolerant network architecture for challenged internets, *Proceedings of the 2003 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications*, ACM, pp. 27–34 (2003).

[9] Vahdat, A., Becker, D. et al.: Epidemic routing for partially connected ad hoc networks, *Technical Report CS-200006, Duke University* (2000).

[10] Keränen, A., Ott, J. and Kärkkäinen, T.: The ONE simulator for DTN protocol evaluation, *Proceedings of the 2nd international conference on simulation tools and techniques*, ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering), p. 55 (2009).

ⓒ 2018 Information Processing Society of Japan