

UAV-MANETのための安定ルート選択方式の提案

清水 健之郎¹ 佐藤 文明^{2,a)}

受付日 2015年5月13日, 採録日 2015年11月5日

概要: 近年, 無人航空機 (UAV-Unmanned Aerial Vehicle) の性能の進化は著しい. 元々は軍用としての用途が強かったものが, 民間企業での活用も検討されており, その可能性に大きな注目が集まっている. その中でも MANET (Mobile Ad-Hoc NETworks) を利用した通信は, 遠隔地に一時的なネットワークを提供したり, センサから素早くデータを収集したりするといった, さまざまな適用方法が考えられる. しかし, 既存の MANET ルーティングプロトコルをそのまま UAV ネットワークに適用すると, UAV の持つ高機動性により通信の安定性が損なわれる可能性がある. 本研究では, 位置情報を利用して安定経路の構築を行う LRAR (Long lifetime Route Acquisition Routing) を, UAV ネットワークに適用する. しかし, LRAR にも中間端末が制御メッセージである RREQ を重複して受け取ったときに参照を行わないため, 最も良い経路を選択できないという問題がある. 本研究では, 重複受信時の動作を改良することにより, さらなる性能の向上を目指した. また, 急な方向転換に対応するため, 経路構築時にバックアップ用の経路を構築する方式についても検証を行った. この2つの方式について, シミュレーションにより AODV, LRAR と比較を行い, 提案方式の有効性を確認した.

キーワード: MANET, ルーティング, UAV, 安定経路選択, バックアップ経路選択

A Stable Route Selection Method for UAV-MANET

KENSHIRO SHIMIZU¹ FUMIAKI SATO^{2,a)}

Received: May 13, 2015, Accepted: November 5, 2015

Abstract: In recent years, advances in the performance of UAV (Unmanned Aerial Vehicle) is significant. Although the UAV have been used as military applications, now some private companies have planned to use for monitoring, delivery and an aerial photograph. Among this, communication using a UAV-MANET (Mobile Ad-Hoc NETworks) provides a temporary network in a remote place, the gathering data from the sensors quickly, and many other applications. However, because of the high mobility of the UAV, the existing MANET routing protocol is not applicable to the UAV-MANET. In this study, LRAR (Long lifetime Route Acquisition Routing) is applied to the UAV-MANET in order to select the stable route by utilizing the location information. However, LRAR has a problem that it is impossible to choose the best route because that the intermediate node does not check the later duplicated RREQ packets even if the packets have a good condition. The purpose of this research is to improve the performance by enhancing the operation of the intermediate node at the time of duplicated RREQ reception. Moreover, in order to cope with sudden changes in direction, the construction method of the backup route is proposed and evaluated. These two methods are evaluated by the simulation and are compared to the AODV and LRAR, and we confirmed the effectiveness of the proposed methods.

Keywords: MANET, routing, UAV, stable route selection, backup route selection

¹ NEC ソリューションイノベータ株式会社
NEC Solution Innovators, Ltd., Koto, Tokyo 136-8627,
Japan

² 東邦大学理学部
Faculty of Science, Toho University, Funabashi, Chiba 274-
8510, Japan

a) fsato@is.sci.toho-u.ac.jp

1. はじめに

近年, コンピュータの小型化, 高機能化は急速に進んでおり, 携帯電話やゲーム機だけではなくテレビなどの家電や車, 一部ではメガネや時計など, さまざまなものにコンピュータが搭載されるようになっている. それらをつなぐ

ネットワークも多様な形態をとるようになり、いつでもどこでもだれでもネットワークに接続できる、ユビキタスネットワークが現実のものになろうとしている。その中、移動端末間の通信手段の1つとして、MANET (Mobile Ad-Hoc NETWORKS) の研究がさかんに行われている [1]。MANET は固定インフラを使用しないため、一般的なクライアント/サーバ型の通信と比べ耐故障性に優れ、災害時などでの活躍も期待できる。

そしてもう1つ急速に進化を続けているものとして無人航空機 (UAV-Unmanned Aerial Vehicle) があげられる。元々は軍用の偵察機としての役割が大きかったが、技術の進歩により、民間企業での活用も現実になってきている。米 Amazon では UAV に荷物を載せ、顧客宅まで直接配送する「Amazon Prime Air」構想を発表しており、現在実験飛行を実施している [2]。ほかにも Google [3] や Facebook [4] も UAV の利用を検討しており、法整備など課題は多くあるが、これからも UAV への注目はさらに高まっていくと考えられる。

UAV を用いたネットワークについてもさかんに研究が行われている。衛星などの固定インフラを介したものも考えられるが、そういった固定インフラに頼らず、UAV のみでネットワークを構築できる、アドホックネットワークもさまざまな利用方法が考えられる。しかし通常の MANET で用いられるルーティングプロトコルを UAV 間 MANET に適用すると、UAV の高い機動性のため、トポロジの変化が大きく、構築した経路を使用できる期間が極端に短くなってしまふ場合があり、安定した通信が行えないという問題がある [5]。

この問題の解決策として、端末の位置情報を経路探索に利用し、経路の生存時間 (Lifetime) を推定して安定した経路を構築する LRAR (Long lifetime Route Acquisition Routing) が提案されている [6]。しかし、LRAR においても UAV のようにノードが高速に移動する環境では Lifetime が短くなり、AODV の性能に近づいていく傾向があった。また LRAR においては、中継端末が重複して受け取った制御メッセージは捨てられて参照されず、Lifetime の長い経路が選ばれない可能性があった。本研究では、この LRAR の問題に対応するため、制御メッセージの重複受信時の処理を改善することで UAV のように高速にノードが移動する環境においても安定した経路を構築するルーティング方式を提案する。また、通常の LRAR では対処できない急な方向転換に対応するため、経路構築時に HELLO メッセージを交換し、代替経路を用意しておく手法についても実装を行った。

以下、2章で MANET とそのルーティング手法、UAV のネットワークについて述べ、3章では関連研究として、今回 UAV ネットワークに用いる LRAR、また別のアプローチで UAV ネットワークのルーティングを行った方式につ

いて解説し、4章で提案方式の概要を述べる。5章では今回行ったシミュレーションの環境および、結果についてまとめ、6章で結論を述べる。

2. MANET と UAV

2.1 MANET ルーティングの特徴

MANET のルーティングプロトコルは大きくリアクティブ型とプロアクティブ型の2つに分けられる。代表的なリアクティブ型のプロトコルには DSR [7], AODV [8], DYMO [9] があり、プロアクティブ型のルーティングプロトコルには OLSR [10], TBRPF [11], OLSRv2 [12] がある。主に経路探索のタイミングに違いがあり、リアクティブ型ではデータ転送を行う際に経路探索を行い、プロアクティブ型では、つねに制御パケットをやりとりすることで各ノードへの経路を維持しておく。それぞれ一長一短を持っており、リアクティブ型ではデータの転送要求が来から経路を探索するため探索遅延が生じるが、データの転送が行われない場合では無駄な制御パケットが流れることはない。プロアクティブ型では逆に、データ転送が行われない場合でもパケットを送受信する必要があるが、その反面、通信要求からの遅延は経路探索を行わない分少なく済む。

2.2 位置情報利用型ルーティング

これまでに説明した2つのルーティングプロトコルはトポロジ利用型と呼ばれ、経路構築にフラッディングを行うなど、大量の制御パケットを使用する。これは、比較的小規模なネットワークでは負荷は少ないが、ノード数が数百にも及ぶ大規模なネットワークで使用すると、負荷が大きくなりすぎてしまい、配送性能が低下するという恐れがある。そういったスケラビリティの問題に対処するルーティング方法として、位置情報利用型が提案されている。この方式では、各ノードが GPS など自身で自身の位置情報を取得でき、ロケーションサービスなどを用いて、ほかのノードについても、アドレスから位置情報を取得できるようになっている必要がある。そして、宛先の位置情報と、ローカルな位置情報 (自身と隣接ノードなどの位置情報) だけを利用して通信を行う。

位置情報利用型のルーティング方式は次ホップ転送方式と指向性フラッディング方式の2つに分類される。次ホップ転送方式では、各ノードはあらかじめ HELLO メッセージなどを用いて隣接ノードの位置情報を保持しておく。そして実際に通信を行う際には、宛先に最も近づくノードを次のホップに選択し、パケットをユニキャストで送信する。このとき重要になるのが HELLO メッセージの周期で、正確な隣接ノードの位置を保持しておくためにはなるべく頻りに HELLO メッセージをやりとりする必要があるが、それは無線帯域への負荷の増大につながる。ノードの移動度に応じて、適切に HELLO 周期を設定する必要がある。

指向性フラッディング方式は、基本的にフラッディングを用いてパケット配送を行うが、送信する際に送信元ノードと終点ノードを含む範囲で転送ゾーンを設定する。その範囲内のノードだけが再ブロードキャストを行うようにし、範囲外のノードがパケットを受け取った場合には破棄する。このようにすることで、単純なフラッディングによる通信よりも大幅にオーバーヘッドを削減できる。転送ゾーンを広くすることによってパケットの到達率を改善することができるが、再ブロードキャストを行うノード数も増えるのでオーバーヘッドが増えてしまう。転送ゾーンの最適設定についてはさまざまな提案がされている。

2.3 UAV とネットワーク

UAV (Unmanned Aerial Vehicle) とは人の搭乗していない航空機である。大きさは、全長 30 メートルを超えるものから、数十センチ程度のもので存在し、種類も旅客機のような形状をした固定翼機や、ヘリコプタのような回転翼機などさまざまである。元々の開発目的は軍用の爆撃機や偵察機としての側面が強かったが、現在では民間のさまざまな産業分野で利用または、数年以内での利用を目指しているなど、その能力にはさまざまな方面から期待が集まっている。現在でもすでに、農薬散布や、架線の工事、空中写真の撮影、災害調査など、人間の立ち入ることのできない場所への調査や、上空での作業でその有用性を発揮している。また世界的な大企業でも、UAV を荷物の配達などに利用しようという試みがあり、これから先 UAV への注目はさらに高まっていくと考えられる。

なかでも、UAV を用いた無線通信はこれから先の活躍が大きく期待される分野になっており、UAV にアクセスポイントのような役割をさせることで、遠隔地にインターネット接続を提供しようという試みもある。そのほかの利用方法としては、あらかじめ配置されたセンサまたは UAV 自身が収集したデータを高速に回収して転送したり、他の端末間通信の中継地点になったりと、さまざまな活用方法が考えられる。インターネット接続を提供する場合、衛星などを用いた通信方法なども考えられるが、センサなどから集めたデータを近くの拠点に集めるといった状況では、MANET を用いた運用が望ましいと考えられる。しかし、MANET に使われているルーティングプロトコルをそのまま UAV 間 MANET に適用しようとする、UAV の持つ高い機動性のため、有効期間が極端に短いリンクができるなど、安定した動作をしない可能性がある。

3. 関連研究

3.1 LRAR

MANET の安定性を向上させるために、LRAR (Long lifetime Route Acquisition Routing) が考案されている [5]。これは、AODV をもとにしたルーティング方式であり、位

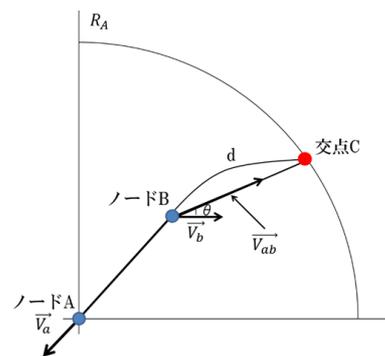


図 1 通信可能時間 LT の算出方法
Fig. 1 Calculation method of the lifetime LT.

置情報を利用することで通常の AODV よりも格段に安定した経路を構築する。通常の AODV では、ホップ数を経路選択の基準としている。そのため、相対速度の大きいノードや、通信可能な境界付近に存在するノードを経路に含んでしまい、通信が不安定になる恐れがある。その問題点に対応するため、経路がどのくらい使用できるか (Lifetime) を経路選択の基準とし、より安定した経路を構築しようとするのが LRAR である。

(1) ルーティング方法

LRAR ではノード間の相対速度ベクトルを用いて、端末が通信可能範囲を出るまでの時間を推定する。図 1 のように、ノード A の座標を (x_A, y_A) 、ノード B の座標を (x_B, y_B) 、送信範囲外に移動するときの境界線との交点を (x_C, y_C) とする。ノード A を中心とし、A の送信半径を R_A とすると円の関数は、式 (1) のように求まる。

$$(x_C - x_A)^2 + (y_C - y_A)^2 = R_A^2 \quad (1)$$

また、ノード A, B の相対速度ベクトル \vec{v}_{AB} の直線上に交点 C があることから、その直線は式 (2) のように求まる。

$$y_C = \frac{(y_B + |\vec{v}_{AB}| \sin \theta) - y_B}{(x_B + |\vec{v}_{AB}| \cos \theta) - x_B} (x_C - x_B) + y_B \quad (2)$$

これら 2 式から交点 C の座標を求めることでノード B が通信範囲外に出るまでの距離 d を求めることができる。よって、通信可能時間 LT は式 (3) のようになる。

$$LT = \frac{d}{\vec{v}_{AB}} \quad (3)$$

ルーティングの際には RREQ に位置や移動方向、速度の情報を付加し、それを受け取ったノードは、自身の移動情報も用いて前ホップとの Lifetime を計算し、それも RREQ に付加して中継する。Lifetime も記載されている場合は、計算して得られた Lifetime と RREQ に記載された Lifetime を比較し、小さい方を RREQ に記載する。このようにすることで、RREQ が通ったルートの中継点となる Lifetime を知ることができ、それを経路の Lifetime (RLT) とする。宛先端末では RREQ 初受信時から一定時間待機し、受信した RREQ のうち最も長い RLT を確保

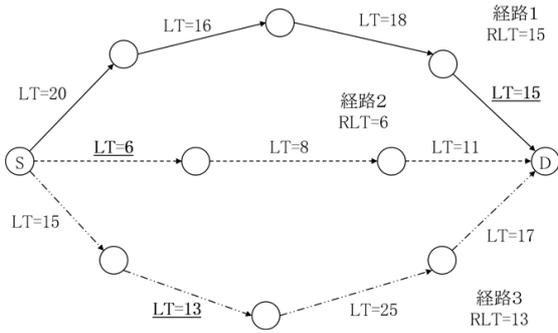


図 2 LRAR のルート選択例
Fig. 2 Route selection of LRAR.

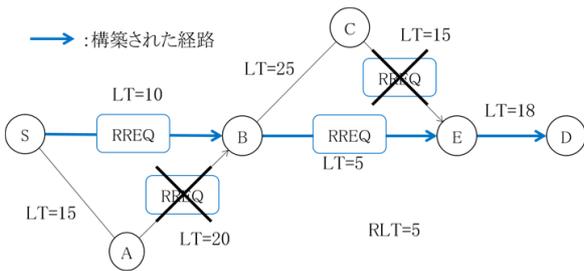


図 3 LRAR の問題点
Fig. 3 Problem of LRAR.

できる経路に対し、RREP を返信する。そして送信元が RREP を受け取ることで、Lifetime の長い経路を用いて通信が開始される。

図 2 のように RREQ が 3 つの経路を通ってきた場合、経路 1 では $LT = 15$ のリンクがボトルネックになるので $RLT = 15$ 、同様に経路 2 では $RLT = 6$ 、経路 3 では $RLT = 13$ となる。よって、通常のアオドブでは最もホップ数の少ない経路 2 が選ばれる確率が最も高いのに対し、LRAR では最も通信可能時間が長い経路 1 を通って通信が行われる。

(2) LRAR の問題点

この方式はノードの移動を考慮して経路構築するため、動的なネットワークにも対応できる。ルーティング方法の説明で述べたとおり、宛先端末では RREQ 初受信時から一定時間待機し、受信した RREQ のうち RLT が最も長い経路に対し、RREP を返信する。しかし、RREQ を待機するのが宛先ノードだけであるため、中間ノードは RREQ の重複受信時にはそれを破棄してしまい、RLT の長い経路を発見できないという問題がある。

図 3 のような状況の場合、ノード A やノード C を通った場合の方が RLT は格段に良くなるが、ノード B に先に到着した RREQ がノード S からの場合、ノード A からの RREQ は破棄される。同様に、ノード E に先に到着した RREQ がノード B からのものであると、ノード C からの RREQ は参照されず破棄される。そのため、 $RLT = 15$ になるノード A, C を通る経路ではなく、 $RLT = 5$ にしかない $S \rightarrow B \rightarrow E \rightarrow D$ の経路が選択されてしまう。

3.2 Predictive-OLSR

UAV 間アドホックネットワークの機動性に対応するため、Predictive-OLSR が考案されている [14]。通常 OLSR では、ネットワークトポロジの変化を HELLO メッセージで知るため、UAV のような機動性の高い端末間の通信を安定して行うためには HELLO メッセージの間隔を非常に小さくしなければならず、回線帯域の使用率から考慮しても効率率が著しく悪くなってしまいます。そのため Predictive-OLSR では、経路選択に相対速度を加味することで安定した経路構築を行っている。

(1) ETX

通常の OLSR では経路の評価をホップ数で行っている。しかし、無線リンクは距離や遮蔽物の影響、リンクどうしの干渉などで、リンクごとの性能には大きな差がある場合が多い。そのため、最小ホップ数の経路が単純に良い経路とはならない場合がある。そのためさまざまな経路評価手法が提案されており、その 1 つが ETX (Expected Transmission Count) である。これは各リンクでのパケット到達率を使用したもので、パケットを送信するための平均送信回数で表される。そのため値が小さいほど優秀なリンクということになる。ノード i, j 間のリンク ETX は式 (4) のように求めることができる。

$$ETX^{i,j} = \frac{1}{r^f r^r} \quad (4)$$

このとき r^f は順方向到達率、 r^r は逆方向到達率である。そして経路 R の経路 ETX は式 (5) として求められる。

$$ETX^R = \sum_{(i,j) \in R} ETX^{i,j} \quad (5)$$

(2) Speed-Weighted ETX

ETX は効率の良い経路評価手法であるが、複数回のパケット通信の到達率から求めるため、比較的静的なアドホックネットワークでは効果を発揮するが、UAV 間 MANET のような動的なネットワークには向いていない。

そこで、各ノードのスピードを加味した ETX として Speed-Weighted ETX が考案されている。Speed-Weighted ETX では、ETX に相対速度を用いるので、HELLO メッセージに自身の位置情報を付加し、 l 回目の HELLO メッセージを受け取った際の i, j の相対速度を $\tilde{v}_l^{i,j}$ 、2 ノード間の距離を $d_l^{i,j}$ 、受け取った時刻を t_l とし、式 (6) のように求める。

$$\tilde{v}_l^{i,j} = \frac{d_l^{i,j} - d_{l-1}^{i,j}}{t_l - t_{l-1}} \quad (6)$$

このとき、実際に使用する際には式 (7) のように前回までの相対速度を加味した値にする。

$$v_l^{i,j} = \gamma \tilde{v}_l^{i,j} + (1 - \gamma) v_{l-1}^{i,j}, \quad 0 \leq \gamma \leq 1 \quad (7)$$

これを用い、リンク ETX は以下の式 (8) のように表さ

れる。

$$ETX^{i,j} = \frac{e^{v_i^{i,j}\beta}}{r^f r^r} \quad (8)$$

β は非負のパラメータである。分母で表される到達率の積が等しい場合、相対速度の低いリンクが優先されることになるため、比較的長く使うことのできるリンクを選択することができる。このようにして算出される Speed-Weighted ETX を用いて経路評価、構築を行うのが Predictive-OLSR である。各ノードの相対速度を経路評価に用いることで HELLO メッセージを増やさずに動的なネットワークに対応することができる。

4. 提案方式

本研究では、LRAR 方式をもとにし、UAV-MANET の高機動性に対応し、通信時の到達率向上、遅延時間や制御オーバーヘッドの減少を目的とする。UAV ネットワークでは、端末の高機動性以外にも、端末の直線運動が多い、通信を上空で行うため遮蔽物が少なく、通信可能範囲にばらつきが少ない、などの特徴があり、LRAR で推定した Lifetime の正確性が高くなると考えられる。よって、シミュレーションによって、UAV-MANET での LRAR の有用性を示す。

また、LRAR では中間ノードは RREQ 重複受信時に参照せず破棄してしまい、最も RLT の長い経路が使用されないという問題がある。この問題を解決するため、中間ノードの RREQ 重複受信時に参照を行いつつ、制御パケットの上昇量を抑える方式を提案する。ほかにも LRAR の Lifetime 計算はそのまま直線運動を続けることを前提として計算しているため、急な方向転換には対応できないという問題がある。これに対応するため、経路構築時に HELLO メッセージを送ることで迂回ルートを作成しておく手法についても検討を行う。

4.1 提案概要

(1) Advanced-LRAR の提案

本来、LRAR では重複受信した RREQ は、参照が行われず破棄されるが、提案方式では重複受信した RREQ についても Lifetime を計算し、後に受信した経路の RLT の方が優れているならば、自身の持つ経路表を変更する。この状態で RREP を返信すると、RREQ が通った経路とは別の経路を通して RREP が送られ、優れた Lifetime を持つ順方向経路が構築される。

本研究で提案するルーティング手法を図 4 に示す。ノード B はまず S からの RREQ を受け取り、RREQ の転送を行う。このとき、S への経路の RLT を 10 と計算する。その後、ノード B が S→A を通った RREQ を受け取ると、すでに受け取った RREQ であるため再転送は行わないが、RLT の計算を行う。すると A を通った場合の S への RLT

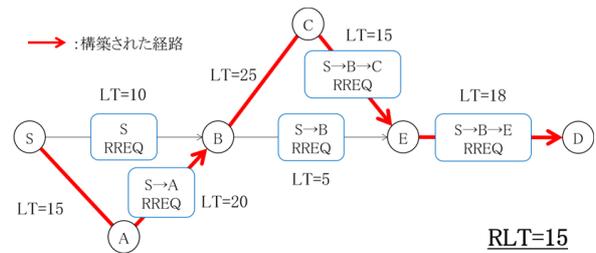


図 4 LRAR の改良方式
Fig. 4 Enhancement of LRAR.

は 15 であり、現在保持している S への RLT よりも優れているため、ノード B は経路表の S への経路を、A を経由するものに変更する。同様にノード E でも最初に受信した S→B を通った RREQ の持つ RLT より、後に受信する S→B→C を通る RREQ の持つ RLT の方が高いので、E の持つ S への経路を、C を経由するものに変更する。そのため D が実際に受け取る RREQ は S→B→E を通ったものであるが、RREP は途中ノードの持つ経路表に従い、D→E→C→B→A を通って S へと返信される。これにより順方向経路が S→A→B→C→E→D で構築され、通信が開始される。

通信が開始されたとき、逆方向経路は Lifetime やホップ数が異なっている可能性が高い。図 4 を例にすると、ノード E は S→B→C を通った RREQ をもとに S への経路を作成している。よって、RLT は 10、ホップ数は 3 となっている。しかし順方向経路では、A を経由して通信を行っているため、S への RLT は 15、ホップ数 4 で通信を行うことができる。このように、各ノードが逆方向経路を正しく保持できていない場合がある。

アプリケーション層のプロトコルにおいては、データに対する ACK が返信される場合があり、逆方向経路が正しくないと、Lifetime の短い経路を使って返信が送られる。この場合、経路の切断と再構築が早期に起こり結局アプリケーション層の性能低下につながる。これに対応するため、通信が開始された後、送信元ノードから宛先ノードへ向けて RREP をさらに送信する。送信元からの RREP は、返信の経路を Lifetime の長い送信側の経路と一致させる効果があり、またユニキャストのためオーバーヘッドは小さいと考えられる。オーバーヘッドを増やさないために送信元からの RREP の送信をしなくても問題はない。しかし、不正確な経路情報によって経路の切断と再構築が起きることに比べると、双方向でパケットをやりとりするような通信の場合、経路探索の回数を減らすことができる。その結果、制御メッセージの量を抑制することができる。

(2) HELLO-LRAR の提案

LRAR で計算される Lifetime は、同じ速度や角度で動き続けることを前提としており、途中での方向転換は考慮されていない。これに対応するため、経路構築時に HELLO

表 1 HELLO メッセージ記載内容
Table 1 Contents of the Hello message.

経路情報	代替経路を作ろうとしている経路の情報. 送信元アドレス, 宛先アドレス, RREQ 送信時のシーケンス番号など.
Lifetime	自身から宛先ノードまで, 自身から送信元ノードまでの2つを記載 (自身が宛先, または送信元の場合, 0).
ホップカウント	自身が送信元ノードから何ホップ目かを記載.
次ホップアドレス	宛先ノードへ行くための次ホップアドレス.

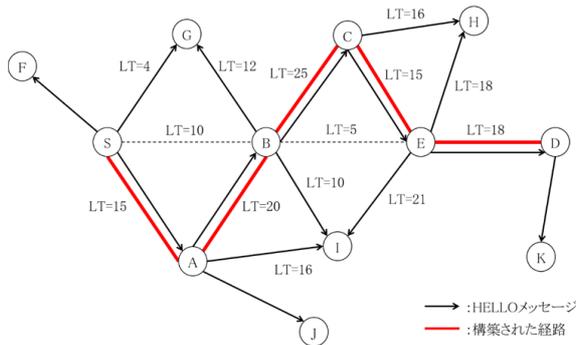


図 5 代替経路作成処理
Fig. 5 Backup route construction process.

メッセージを追加し, リンク切断時に切り替える代替経路を作成する手法を提案する.

RREP が送信元ノードに届くまでは上記, LRAR の改良方式と同様である. その後, 通信を開始すると同時に送信元ノードは HELLO メッセージを周囲のノードに向けブロードキャストする. HELLO メッセージは表 1 の内容を含む. HELLO メッセージを受け取ったノードは, 自身の HelloSeenTable に受け取った HELLO メッセージの送信元ノード番号とその通し番号を記載する. これは, 再度同じ HELLO メッセージが到着したことを判定し, 再処理を行わずに廃棄できるようにするためである. また次ホップアドレスに指定されているノードが HELLO メッセージを受け取ると, HELLO メッセージの再送を行う. これが繰り返されることで, 経路上のノードに隣接するすべてのノードに HELLO メッセージを送信する. そして, 経路上以外のノードが HELLO メッセージを受け取ると, 一定時間待機を行う. 待機時間終了後, 同じ経路上の2つ以上のノードから HELLO メッセージを受信したノードは, 自身を代替経路候補と認識し, 自ノードを経由した場合の RLT を計算する. 算出した値が元々の RLT を下回らない場合, 自身を代替経路に用いることのできるノードとし, 経路上のノードに対し HELLOACK メッセージを送信する. HELLOACK メッセージを受け取ったノードは, メッセージの送信元ノードを代替経路テーブルに追加する.

代替経路作成処理の例を図 5 に示す. ノード S は, RREP を受け取り, 通信を開始するとともに, HELLO メッセージをブロードキャストする. これを受け取った F, G はほ

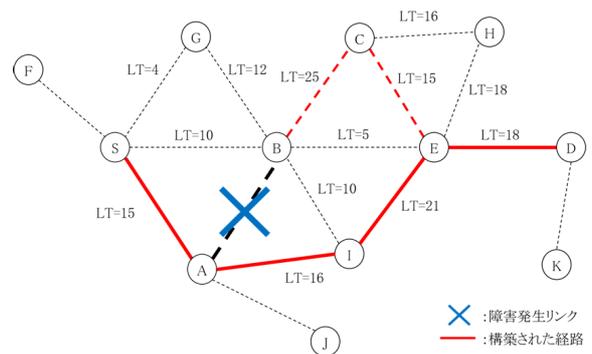


図 6 経路切替処理
Fig. 6 Route change process.

かの HELLO メッセージを待つための待機を始める. A は次ホップに指定されているため, HELLO メッセージのブロードキャストを行う. これが繰り返され S, A, B, C, E, D の隣接ノードすべてに HELLO メッセージが行きわたる. 待機時間終了後, 各ノードは HELLO メッセージを複数受信しているかの確認を行う. 例で複数受信しているのは G, I, H である. この各ノードは自身を通った場合の RLT を計算する. ノード G を見てみると, 自身を通った場合の RLT は 4 になってしまうため, 代替経路としては適さない. I では A, E の経由ノードとして自身を利用する場合には RLT が下回らないため, A, E に向け HELLOACK メッセージを送信する. 同様に H でも, C, E の経由ノードになった場合には元々の RLT を維持することができるので, C, E に HELLOACK メッセージを送信する. こうして HELLOACK メッセージを受け取った A は D への代替経路として I を経由する経路を代替経路テーブルに追加する. E は S への代替経路として I を経由する経路を代替経路テーブルに追加する. C, E も同様である.

実際に経路障害を感知すると, 代替経路テーブルに使用できる代替経路がない場合, 通常処理どおり RERR を送信する. 代替経路がある場合は経路表を切り替え, 経路が変わったことを通知するための RREP メッセージを送信元, 宛先の両方に向け送信する. これによって切替えが完了する. 経路切替の例を図 6 に示す. A, B 間で障害が発生すると, A は, S への経路を代替経路にある I を経由する経路に変更する. このようにすることで元々の, S→A→B→C→E→D を通る経路から, S→A→I→E→D を通るルートに変更し, 通信を続行する.

5. シミュレーション

5.1 シミュレーション概要

ネットワークシミュレータ QualNet [15] を用いて, AODV, LRAR, 改良型 LRAR (Advanced-LRAR), 代替経路を発見する HELLO-LRAR の性能を検証する. まず AODV, LRAR, Advanced-LRAR の比較を行い, 次に Advanced-LRAR と HELLO-LRAR を比較する. AODV

表 2 シミュレーションパラメータ
Table 2 Parameters of the simulation.

パラメータ	値
ノード数	50, 100, <u>150</u> , 200
フィールドエリア	3000m × 3000m
ノードの送信半径	500m
移動モデル	ランダムウェイポイント
Pause Time	0s
ノードの最高移動速度 (km/h)	50, <u>100</u> , 150

は QualNet にあらかじめ実装されているものを使用し、それ以外については、実装された AODV を修正して使用した。比較するパラメータは、メッセージの到達率、メッセージの送信要求から到着するまでの総遅延時間、経路探索を開始した回数 (RREQ 発信回数) である。

比較対象として、Predictive-OLSR などのプロアクティブ型のルーティング方式との比較も必要であるが、今回は制御メッセージの削減も目標の 1 つであるため、制御メッセージが多いプロアクティブとの比較は行わなかった。

5.2 シミュレーション環境

今回のシミュレーションで使用したパラメータを表 2 にまとめる。今回は単純化のため 2 次元平面のフィールドとした。ノードの配置はランダムであり、それぞれのノードはランダムウェイポイントで動く。ランダムウェイポイントとは、各ノードは定められた目標地点まで動き、到達後一定時間停止 (Pause Time) して、また次の目的地点まで動くという動作を繰り返すモデルである。Pause Time は実際の UAV を意識し、0 に設定した。つまり停止することなく、動き続ける移動モデルである。ノード数、ノードの最高速度はシミュレーションによって変化させている値である。特に指定のない場合、ノード数は 150、最高速度は 100 km/h を使用している。

ノードの送信半径については、LRAR の参考文献の中で十分低いロス率を達成するのに必要な送信半径として指摘されている値 500 m を用いている。また、ノードの最高速度としては、たとえば米国 Lockheed Martin 社の DESERT HAWK [16] をはじめ、多くの UAV は 100 km/h 程度の最高速度を有していることから、このような値を設定した。

シミュレーション時間は 1,000 秒間である。送信トラフィックは、CBR セッションが 3 本で、512 バイトの packets が 1 秒間隔で送信される。無線 MAC は IEEE802.11b を想定している。また各ノードの RREQ packets の待機時間は 50 m 秒に設定した。

5.3 パケット到達率

以下図 7、図 8 にパケット到達率の推移を示す。図 7 はノード数に対するパケット到達率を表しており、ノード

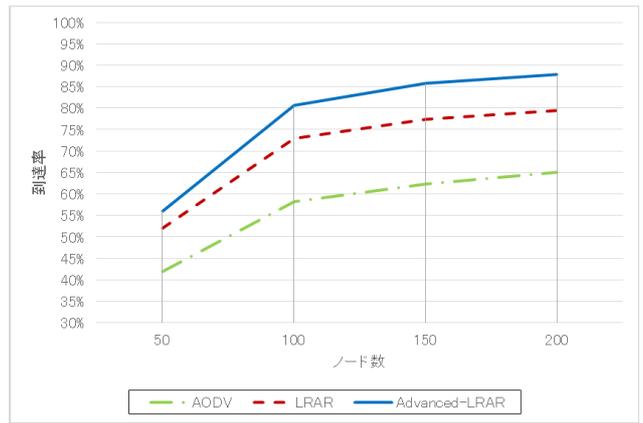


図 7 ノード数ごとのパケット到達率
Fig. 7 Packet delivery rate for the number of nodes.

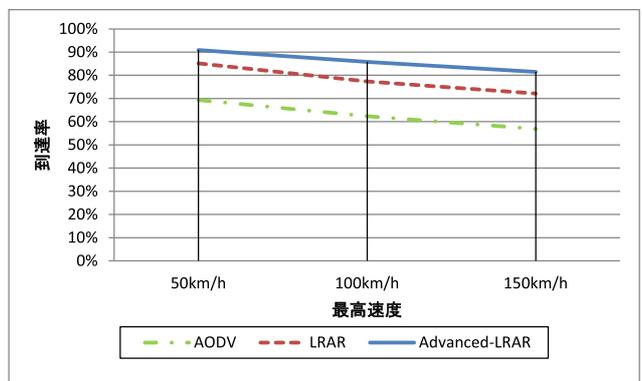


図 8 速度によるパケット到達率の変化
Fig. 8 Packet delivery rate for the mobility.

の移動速度は最高 100 km/h である。パケット到達率とは、送信したパケットのうち、送信元から宛先ノードまでパケット配送に成功した割合である。提案方式は LRAR より到達率が改善されていることが分かる。どのノード数でも改善は見られるが、ノード数の少ない状況よりもノード数の多い状況の方が大きく上昇している。これは、ノード数が増えることによりルート選択の幅が増え、Lifetime の差も激しくなるためと考えられる。この結果からも、長い Lifetime を持つ経路の方が、パケットロスが少なく安定した通信を行えることが分かる。

図 8 は、各方式の最高速度ごとの到達率の推移を示している。ノード数はすべて 150 でシミュレーションを行った。提案方式はその他の方式に比べ、ノードの移動量が多くてもパケット到達率を大きく下げることなく通信を行っていることが分かる。

5.4 平均総遅延時間

以下図 9、図 10 に平均総遅延時間のシミュレーション結果を示す。図 9 はノード数に対する遅延時間の推移である。Lifetime を基準に経路を構築する場合、遅延時間に与える影響は大きく分けて 2 つあると考えられる。1 つは探

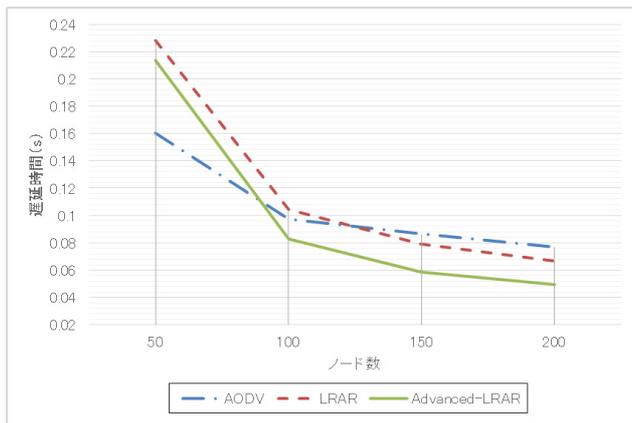


図 9 ノード数ごとの通信遅延時間
Fig. 9 Delay time for the number of nodes.

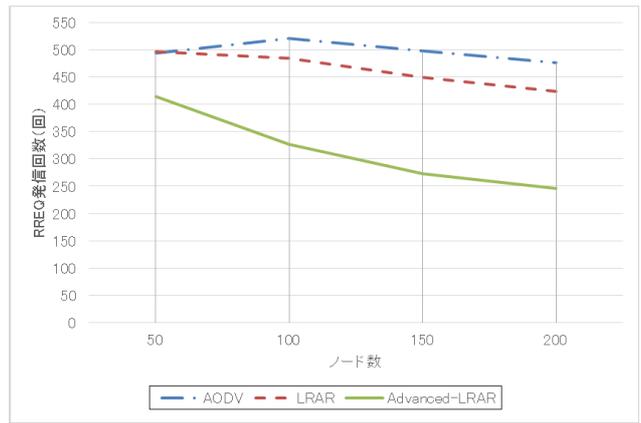


図 11 ノード数ごとの RREQ 発信回数
Fig. 11 RREQ packets for the number of nodes.

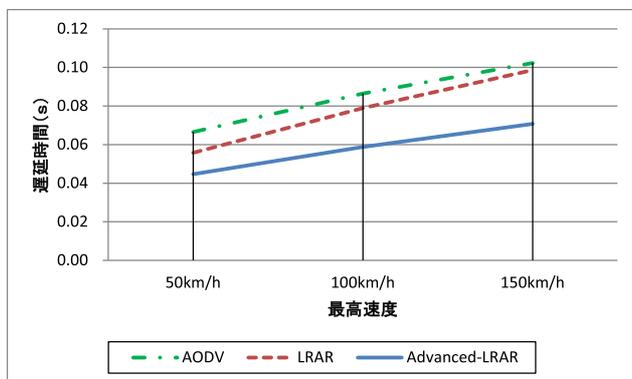


図 10 速度による通信遅延時間の変化
Fig. 10 Delay time for the mobility.

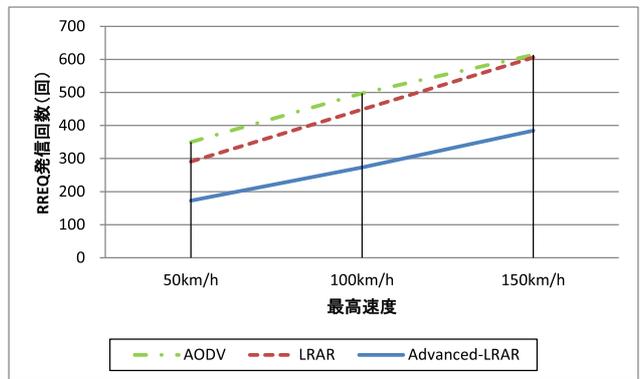


図 12 速度による RREQ 発信回数の変化
Fig. 12 RREQ packets for the mobility.

索回数の減少である。高い Lifetime を持つ経路を構築することで、経路の維持時間が長くなり、経路の探索回数が少なくなる。これにより探索遅延を抑える効果がある。もう 1 つはホップ数の上昇である。高 Lifetime の経路を構築しようとするため、最小ホップ数でルーティングを行っている通常の AODV と比べると、構築する経路のホップ数は大きくなってしまふ。これにより、転送遅延が大きくなる。提案方式は、ノード数が多い状況では遅延時間が改善できていることが分かる。これはホップ数の増加による転送遅延の上昇よりも、探索回数の減少による探索遅延の減少の効果が大きいと考えられる。しかし、ノード数 50 では、遅延時間は AODV が最も少なくなっている。これは、ノード数が少ないため、経路維持時間をそれほど伸ばすことができず、探索回数の減少による恩恵よりも、ホップ数の上昇による転送遅延の増加の影響が大きいと考えられる。

図 10 は各方式の最高速度ごとの平均遅延時間を表している。ノード数は 150 である。高速度下では、LRAR は AODV とあまり変わらない遅延時間になっているが、提案方式は、高速度下でも遅延時間を低く保っていることが分かる。

5.5 RREQ 発信回数

図 11, 図 12 に RREQ の発信回数のシミュレーション結果を示す。RREQ は通信要求が来たときに宛先への経路がない場合にフラッディングされるので、経路探索回数と同義である。図 11 はノード数による RREQ 発信回数の推移である。提案方式は、AODV, LRAR に比べ大きく削減できていることが分かる。特にノード数が多い環境下では、AODV 方式の半分程度の発信回数であり、その効果は顕著に現れている。

図 12 は各方式の最高速度ごとの RREQ の発信回数である。ノード数は 150 である。速度によらず、RREQ 発信回数が大きく削減できていることが分かる。特に、速度が増加するにつれて、LRAR は正確な安定経路が見つけられずに AODV と同様の経路構築回数となるのに対して、Advanced-LRAR の経路構築回数は AODV に近づくことはなかった。

5.6 提案手法比較

図 13, 図 14, 図 15, 図 16, 図 17, 図 18 に Advanced-LRAR と HELLO-LRAR の 2 つの提案手法の比較結果を示す。図 13, 14, 15 で今までと同じ最高速度が 100 km/h

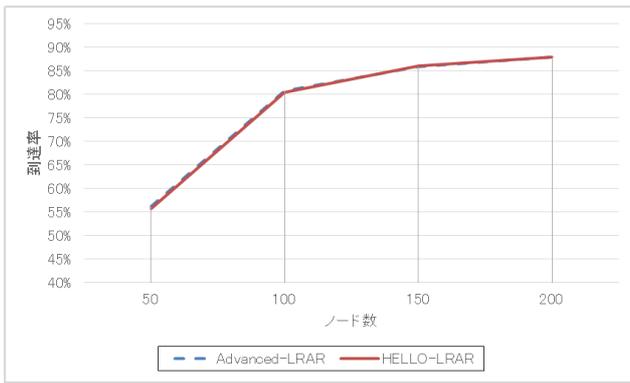


図 13 パケット到達率による 2つの提案手法の比較
 Fig. 13 Comparison of the packet delivery rate.

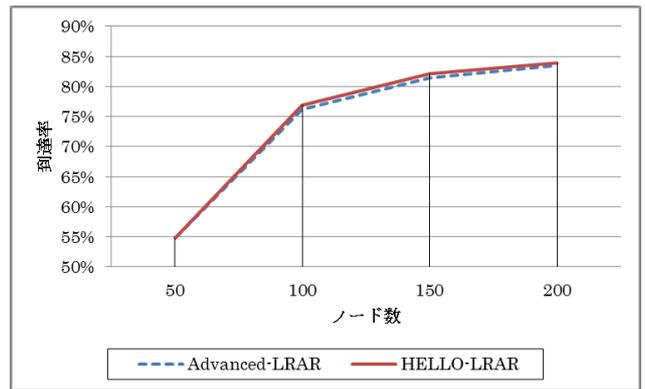


図 16 パケット到達率による 2つの提案手法の比較
 (速度 = 150 km/h)
 Fig. 16 Comparison of the RREQ packets
 (Speed = 150 km/h).

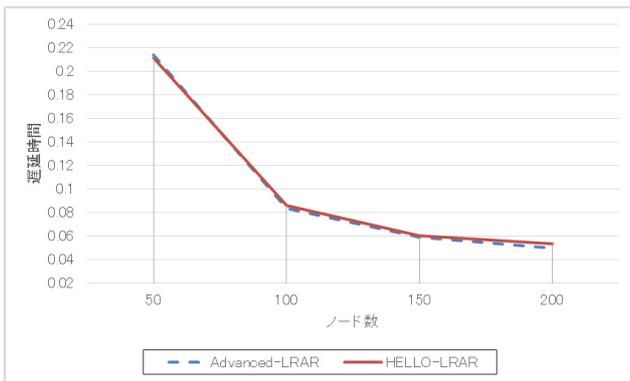


図 14 2つの提案手法の通信遅延時間の比較
 Fig. 14 Comparison of the delay time.

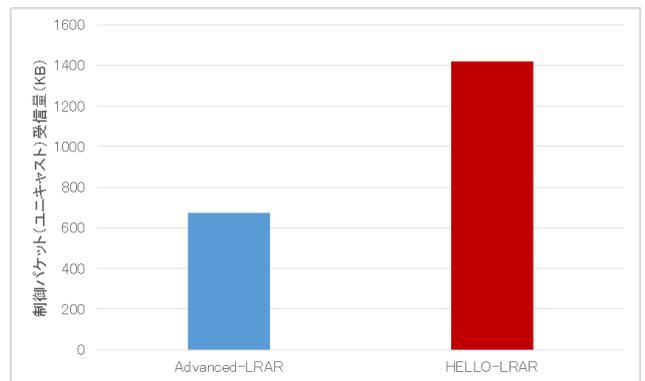


図 17 ユニキャスト制御パケット受信量の比較
 Fig. 17 Comparison of the unicast control packets.

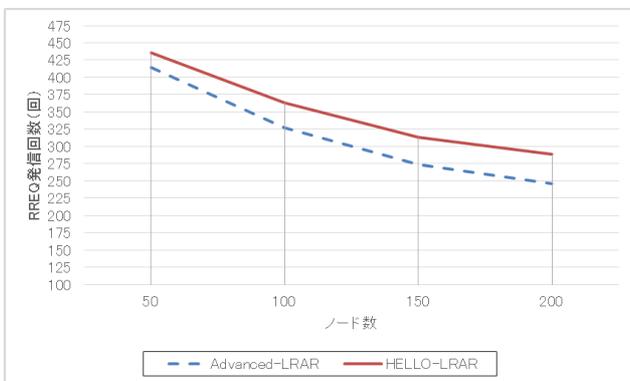


図 15 提案手法の RREQ 発信回数の比較
 Fig. 15 Comparison of the RREQ packets.

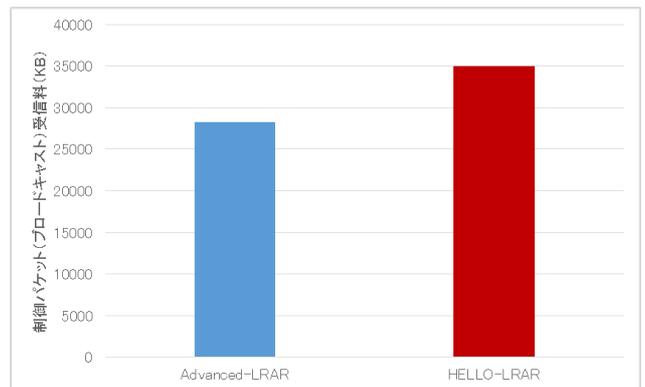


図 18 ブロードキャスト制御パケットの受信量の比較
 Fig. 18 Comparison of the broadcast control packets.

のときの性能を比較した。また、図 16 では最高速度が 150 km/h のときのパケット到達率の比較を示した。図 17 では RREP のようなユニキャストの制御パケットの受信量、図 18 では RREQ や HELLO メッセージのようなブロードキャストの制御パケットの受信量について比較した。これらを見ると非常に高速な場合に HELLO-LRAR が到達率をわずかに改善したものの、その他の条件では HELLO-LRAR の性能は LRAR の改善方式とほぼ同等、または下回っており、制御メッセージは大きく上回っているという結果になった。つまり、HELLO メッセージによ

る代替経路作成処理には顕著な効果がなかった。これは Advanced-LRAR による通信可能時間の長い経路選択が正確であること、ノードの方向転換によるリンクの切断が起きた場合、代替経路も使用できなくなっている可能性が高いことなどが考えられる。

6. まとめ

本研究では、UAV 間 MANET に用いることができる

ルーティングプロトコルとして LRAR の改良方式である Advanced-LRAR, HELLO メッセージを用いて代替経路をあらかじめ作成する手法である HELLO-LRAR について提案し, シミュレーションで AODV, LRAR と比較することにより, その有効性を検証した.

評価の結果, Advanced-LRAR 方式は, 高機動端末で構成されたアドホックネットワークで有効であることが示された. Lifetime の長い経路を選択できたことで, 到達率を 10%弱改善し, 経路探索回数が半分程度に減少し, その結果制御パケットによるオーバーヘッドを削減することができた. しかし HELLO-LRAR では高速移動の場合 Advanced-LRAR を到達率でわずかに上回るものの, その他の条件では Advanced-LRAR と同等か下回る結果となった. 要因としては, 代替経路を作成しても, ノードの方向転換によるリンクの切断が起きた場合, 代替経路も使用できなくなっている可能性が高いことなどが考えられる.

また LRAR を利用したルーティングの性能は, ノードの密度に大きく左右されることが示された. これはノード数が多い場合は経路候補も多く, その中から選ぶため優秀な経路を構築することができる. しかしノード数が少ないと, 経路選択の余地がなく, 通常 AODV と大きくは変わらない経路になってしまうためと考えられる.

今回は制御メッセージの削減も目標であったため, プロアクティブ型のルーティングプロトコルとの比較は行わなかったが, 位置情報利用型プロトコルなど, 他のコンセプトに基づく方式との比較も必要であると考えられる. また, アプリケーションを想定したノードの移動モデルを設定した性能評価を実施することも, 今後の課題である.

謝辞 本研究の一部は JSPS 科研費 25330115 の助成を受けたものです. また, 本研究の一部は東北大学電気通信研究所における共同プロジェクト研究の助成によるものです.

参考文献

[1] 阪田史郎, 青木秀憲, 間瀬憲一: アドホックネットワークと無線 LAN メッシュネットワーク, 信学論 (B), Vol.J89-B, No.6, pp.811-823 (2006).

[2] Amazon Prime Air - Amazon.com, available from <http://www.amazon.com/b?node=8037720011> (参照 2015 年 1 月).

[3] BBC News - Google tests drone deliveries in Project Wing trials, available from <http://www.bbc.com/news/technology-28964260> (参照 2015 年 1 月).

[4] Announcing the Connectivity Lab at Facebook, available from <http://internet.org/press/announcing-the-connectivity-lab-at-facebook> (参照 2015 年 1 月).

[5] Ozgur Koray Sahingoz: Networking Models in Flying Ad-Hoc Networks (FANETs): Concepts and Challenges, *J. Intell Robot Syst.*, Vol.74, pp.513-527, Amazon Prime Air - Amazon.com (2014).

[6] 高尾哲也, 岡本佳久, 井上富晴, 六浦光一, 岡田博美: アドホックネットワークにおけるロングライフルート獲得ルー

ティング, 信学技報, NS2004-233, NS2004-233 (2005-2).

[7] Johnson, D., Hu, Y. and Maltz, D.: The Dynamic Source Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks, Internet Draft (Feb. 2007).

[8] Perkins, C., Belding-Royer, E. and Das, S.: Ad Hoc on-demand distance vector (AODV) routing, IETF, RFC3561 (July 2003).

[9] Perkins, C., Ratliff, S., Dowdell, J. and Steenbrink, L.: Dynamic MANET On-demand (AODVv2) Routing, IETF Internet-Draft, draft-ietf-manet-aodvv2-06 (Dec. 2014).

[10] Clausen, T. and Jacquet, P.: Optimized Link State Routing Protocol (OLSR), IETF, RFC3626 (Oct. 2003).

[11] Ogier, R., Templin, F. and Lewis, M.: Topology Dissemination Based on Reverse-Path Forwarding (TBRPF), IETF, RFC3684 (Feb. 2004).

[12] Clausen, T., Dearlove, C., Jacquet, P. and Herberg, U.: The Optimized Link state Routing Protocol Version 2, IETF, RFC7181 (Apr. 2014).

[13] 間瀬憲一: 車々間通信とアドホックネットワーク, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J89-B, No.6, pp.824-835 (2006).

[14] Rosati, S., Kruzelecki, K., Traynard, L. and Rimoldi, B.: Speed-Aware Routing for UAV Ad-Hoc Networks, arXiv:1307.6350v1 [cs.NI] (July 2013).

[15] ネットワークシミュレータ QualNet, 構造開発研究所, 入手先 (<http://network.kke.co.jp/products/qualnet/>) (参照 2015 年 1 月).

[16] DESERT HAWK, Lockheed Martin 社, 入手先 (<http://www.lockheedmartin.com/us/products/desert-hawk.html>) (参照 2015 年 9 月).



清水 健之郎

2015 年東邦大学理学部卒業. 同年 NEC ソフト株式会社 (現在, NEC ソリューションイノベータ株式会社) 入社. アドホックネットワーク, 組み込みソフトウェアの研究開発に従事.



佐藤 文明 (正会員)

1984 年岩手大学工学部電気工学科卒業. 1986 年東北大学大学院工学研究科博士前期課程修了. 同年三菱電機株式会社入社. 1995 年より 2005 年まで静岡大学工学部および情報学部准教授, および教授. 2005 年 10 月より東邦大学理学部教授, 現在に至る. モバイルコンピューティング, アドホックネットワーク, P2P コンピューティング, 分散処理, 通信ソフトウェアに関する研究に従事. 電子情報通信学会, IEEE, ACM 各会員.