

無線アドホックネットワークにおける 建物などの影響を考慮した Greedy Forwarding

本間 真司^{1,†1} 山本 潮^{1,a)}

受付日 2016年5月24日, 採録日 2016年11月1日

概要: Greedy Forwarding は無線アドホックネットワークにおける経路制御法の1つであり, 隣接ノードの位置情報を用いて宛先ノードへ送信するための転送先ノードの選択を行う. 本論文では, 道路沿いに建物などの障害物がある状況において, Dijkstra アルゴリズムと転送成功の信頼度を用いる経路制御方式を提案する. Dijkstra アルゴリズムにより道路網形状を考慮した転送ノードの選択が行え, 転送成功の信頼度により障害物の影響を考慮した転送ノードの選択が行えるようになる. 提案方式によりパケット到達率や転送遅延などの通信性能の向上が期待でき, シミュレーションによりその効果を確認する.

キーワード: 無線アドホックネットワーク, Greedy Forwarding, Dijkstra アルゴリズム, 転送成功の信頼度

Greedy Forwarding with Considering Effect of Buildings for Wireless Ad-hoc Networks

SHINJI HONMA^{1,†1} USHIO YAMAMOTO^{1,a)}

Received: May 24, 2016, Accepted: November 1, 2016

Abstract: Greedy Forwarding is one of the most effective routing methods for wireless ad-hoc networks, and each node selects the forwarding node to the destination node by using the position information of its neighbor nodes. In this paper, we propose a greedy forwarding method with Dijkstra algorithm and transmission reliability, with considering the effect of obstacles such as buildings along the roads. In our approach, each node can select the forwarding node with considering the topology of roads by using Dijkstra algorithm, and also with considering the effect of the obstacles by using the transmission reliability. Our approach can improve the communication performance such as packet arrival rate and end-to-end delay.

Keywords: wireless ad-hoc networks, Greedy Forwarding, Dijkstra algorithm, transmission reliability

1. はじめに

無線アドホックネットワークは, 基地局やアクセスポイントなどのインフラがなくても無線通信機能を持つノードのみでネットワークを自律分散的に構築して相互に通信を行うことができる. そのために, 一時的なイベントや災害時の通信など様々な状況に適應することができ, 将来的な利用が期待されている. しかし, ネットワークを構築するノードが移動することも想定されており, それによりネッ

トワークトポロジが頻繁に変化する可能性がある. このため, 無線リソースの効率的な使用を考慮したうえで無線アドホックネットワークに適した経路制御方式を開発することが重要な研究項目の1つとなっている.

無線アドホックネットワークの経路制御方式には, 送信元から宛先までの経路を事前あるいは通信開始時に探索・構築してからパケット送信を開始する方式 [1] や, 宛先までの経路は構築せずにある指標に基づいて次の転送先ノードを選択し転送を繰り返す方式が提案されている. 特に各ノードが大きく移動する場合には構築した宛先までの経路が利用できなくなる可能性が高くなるため, 後者の方式が有効であるといわれている.

後者の経路制御方式において, 次の転送先ノードを選択

¹ 群馬大学大学院理工学部
Graduate School of Science and Technology, Gunma University, Kiryu, Gunma 376-8515, Japan

^{†1} 現在, シャープ株式会社
Presently with Sharp Corporation

^{a)} kansuke@cs.gunma-u.ac.jp

するために用いられている指標の1つが各ノードの位置情報である。各ノードはGPSなどのデバイスにより現在の位置情報を取得できると想定し、この位置情報を定期的に隣接ノードに送信しあうことで自身の隣接ノードの位置を把握する。位置情報を利用した経路制御法は Position-based Routing と呼ばれており、Greedy Forwarding と呼ばれる方式ではパケット転送時にその位置情報を使用して宛先と隣接ノード間の距離などの基準により次の転送先ノードを選択し、パケットの転送を行う [2]。

ここで、自動車や自転車、人間などの移動体は道路上を移動することが多く、そのため送信元ノードから宛先ノードまでのパケット転送も道路に沿って行われると考えられる。つまり隣接ノードの位置だけでなく道路網の形状を考慮した転送先ノードの選択を行うことが効果的であると考えられ、そうでなければ適切な転送先ノードが存在しなくなってしまう可能性がある。

本論文では、主に都市部のような環境における自動車間の通信を想定する。たとえば、タクシーのような業務車間での連絡手段としての通信が考えられる。このような環境では、道路沿いに建物などの通信における障害物が存在していることが多く、隣接ノードから取得した位置情報だけをそのまま利用して転送先ノードを選択してしまうとそのノードと障害物との位置関係によって通信状況が悪い状況で転送を行おうとしてしまい、結果として通信効率を下げってしまう可能性がある。

本論文では、道路沿いに建物などの障害物がある状況での Greedy Forwarding を用いた経路制御において、Dijkstra アルゴリズムと転送成功の信頼度を用いる経路制御方式を提案する。Dijkstra アルゴリズムにより道路網形状を考慮した転送ノードの選択が行え、転送成功の信頼度により障害物の影響を考慮した転送ノードの選択が行えるようになる。これらを用いた提案方式によりパケット到達率や転送遅延などの通信性能の向上が期待できる。

本論文の構成は以下のとおりである。2章で Greedy Forwarding に関する関連研究について述べる。3章では本論文での提案方式である障害物の影響を考慮した Greedy Forwarding について述べる。4章では計算機シミュレーションを用いて提案方式の性能を評価し考察を行う。最後に、5章でまとめと今後の課題を述べる。

2. 関連研究

位置に基づく経路制御 (Position-based Routing) プロトコルは、各ノードがGPSなどにより取得した自身の位置情報をパケットの転送に利用する。パケット送信前に送信元ノードから宛先ノードまでの経路を構築する経路制御方式においても位置情報を利用する方式が提案されている [3], [4] が、特にノードの移動によるトポロジ変化が大きい場合には、構築した経路がすぐに利用できなくなる

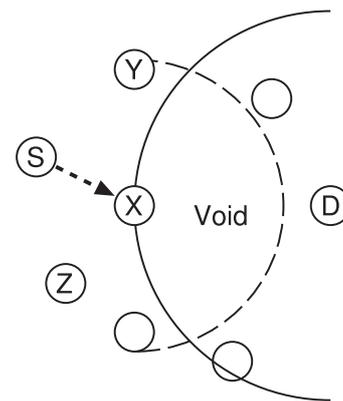


図 1 ノード X の空白地域 (void)
Fig. 1 Void of node X.

可能性がある。Greedy Forwarding は初期的に経路を構築せず、隣接ノードの位置情報に基づいて次に転送するノードを選択して転送することを繰り返し、宛先ノードまでパケットを到達させる方式である。転送先ノードの選択基準としては、自身よりも宛先ノードに近く、かつ宛先ノードに最も近いノードを選ぶなどがある。このように、Greedy Forwarding はノードの位置情報に基づいて宛先ノードに最も近いノードを転送先ノードとして選択するヒューリスティックアプローチをとることで、宛先ノードに効率良くパケットを転送しようとする手法である。

しかし、自身よりも宛先に近いノードが存在しない状況が発生する可能性がある。図 1 では、ノード S が宛先がノード D であるパケットを転送する際に、最も宛先ノードに近いノード X を選択してパケットの転送を行った状況を示している。ここで、点線の円弧はノード X の通信可能範囲を表し、実線の円弧はノード X と宛先 D の距離と同距離の地点を表す。ノード S からのパケットを受信したノード X は、自分宛のパケットではないので次の転送先ノードを選択しようとするが、自身より近い隣接ノードが存在していないために転送先ノードを選択することができない。

このような状況を回避するためには、Greedy Forwarding の選択基準だけでなく別の基準を用いて次に転送するノードを選択することが必要となる。たとえば、GPSR [5] では Right-Hand Rule という法則に従って (反) 時計回りにノードを選択する方式を用いてこのような空白地域 (void) を回避する動作を行うようにしている。

ここで、自動車や自転車、人間などの移動体は道路上を移動することが多く、そのため送信元ノードから宛先ノードまでのパケット転送も道路に沿って行われると考えられる。つまり道路網の形状を考慮した転送先ノードの選択を行うことが効果的であると考えられ、そうでなければ適切な転送先ノードが存在しなくなってしまう可能性がある。

このことから、道路網の形状を考慮した経路制御方式が提案されている。GPCR [6] では、都市部のような環境に

おける通信を想定したうえで交差点に着目し、交差点にいる隣接ノードを優先して転送先ノードとして選択する。また、適切な転送先ノードが選択できないときにパケットを交差点まで戻して別の方向に存在するノードへ転送することを試みる。また、GpsrJ+ [7] ではGPCRの空白地域に到達した際の回避動作の問題点を指摘したうえで、各ノードが都市のマップ情報を保持していると仮定しそれを利用して転送を行うことでその問題点を解決しようとしている。

また、道路沿いには建物などの通信における障害物が存在している可能性もあり、隣接ノードから取得した位置情報だけをそのまま利用して転送先ノードを選択してしまうとそのノードと障害物との位置関係によって通信状況が悪い状況で転送を行おうとしてしまい、結果として通信効率を下げってしまう可能性がある。文献 [8], [9] では、道路沿いに障害物があり見通しが悪い交差点における受信状況の特性解析を行っており、交差点からの距離が遠くなると指数関数的に減衰するという結果が得られている。これにより、障害物が存在する環境においては、転送先ノードを選択する際には隣接ノードの位置情報に基づいて計算される距離関係だけでなく、自身と隣接ノードの間にある障害物との位置関係についても考慮する必要があると考えられる。

3. 障害物の影響を考慮した Greedy Forwarding

本論文では、2章で述べた道路沿いに建物などの障害物がある状況での Greedy Forwarding における問題点を改善するために、Dijkstra アルゴリズムと転送成功の信頼度を用いる経路制御方式を提案する。Dijkstra アルゴリズムにより道路網形状を考慮した転送ノードの選択が行え、転送成功の信頼度により障害物の影響を考慮した転送ノードの選択が行えるようになる。提案方式では、各ノードはGPSなどにより自身の位置情報を取得することができると仮定する。また、カーナビゲーションシステムなどに搭載されている電子地図を利用することが可能であり、道路網形状や建物の配置状況などの情報が利用できると仮定する。

以下、転送先ノードの選択における Dijkstra アルゴリズムを利用した選択方法と転送成功の信頼度を用いた選択方法について説明する。

3.1 Dijkstra アルゴリズムの利用

自動車や自転車、人間などの移動体は道路上を移動することが多く、そのため送信元ノードから宛先ノードまでのパケット転送も道路に沿って行われると考えられる。そこで、道路網の形状を考慮して転送先ノードの選択を行うために Dijkstra アルゴリズムを利用する。Greedy Forwarding における Dijkstra アルゴリズムを利用した転送先ノードの選択方法については文献 [10] でも提案されているが、提案方式では Greedy Forwarding の部分だけでなく、空白地域に

到達した際の回避動作においても Dijkstra アルゴリズムを利用する。Dijkstra アルゴリズムの適用においては、隣接ノードから宛先ノードまでの道路に沿った距離（道路距離）を計算し、その値が最も小さいノードを転送先ノードとして選択する。ここで、道路距離の計算に使用するグラフの頂点は交差点、隣接ノードと宛先ノードとし、辺は道路とする。Dijkstra アルゴリズムを導入して次の転送先ノードを選択することによって、従来の Greedy Forwarding では空白地域として認識される状況であったとしても宛先までの道路距離で見た場合には最適と判断される隣接ノードを転送先ノードとして選択することが可能になる。

道路網形状に応じて転送先ノードを選択していくとしても、宛先までの経路上に転送可能なノードが存在する保証はない。そのため、上記だけでも空白地域に到達してしまう可能性があり、回避動作を用意する必要がある。提案方式においては、回避動作における転送先ノードの選択においても Dijkstra アルゴリズムを利用する。ただし、道路と交差点、隣接ノードと宛先ノードによるグラフをそのまま用いると、転送できない箇所の方へ再度選択してしまう可能性がある。そこで、空白地域に到達した場合には、グラフからその部分の道路に対応する辺を削除したうえで Dijkstra アルゴリズムを用いて道路距離を計算する。

この動作を実現するために、回避動作実行時に送受信されるパケットには、空白地域に到達したノードの位置情報のリストをヘッダに追加する。この情報を含むパケットを受信したノードは次の手順により転送先ノードを選択する。

- (1) パケットを受信したノード N は、そのパケットに含まれるリスト L から位置情報 P_i を取り出し、グラフの頂点として追加する。
- (2) P_i の存在する道路上の両端の交差点 PC_1, PC_2 を取得し、 PC_1, PC_2 を両端とする辺をグラフから削除する。
- (3) PC_1, PC_2 のうち、ノード N に近い方を PC_1 とすると、 PC_1 と P_i を両端とする辺をグラフに追加する。
- (4) リスト L が空でなければステップ (1) に戻る。
- (5) 修正されたグラフを用いた Dijkstra アルゴリズムにより転送先ノードを選択する。

たとえば、図 2(a) のようにノード S がノード D にパケットを送信しようとして隣接ノードの中から D への道路距離が最も短いノード X が選択されてパケットが転送されたとする。ここで、点線の円弧はノード X の通信可能範囲を表すとする。この場合、ノード X よりも宛先に近い隣接ノードがないため X は自身の位置と宛先への経路上の次の交差点の間の道路部分の辺を削除したグラフを用いて道路距離が最も短いノード Y を転送先ノードとして選択し、パケットに X の位置情報を含めて Y に転送する(図 2(b))。このパケットを受信したノード Y は、ノード X と同様にパケット内の X の位置情報に基づいて辺を削除したグラフを用いて次に転送すべきノードを選択する。

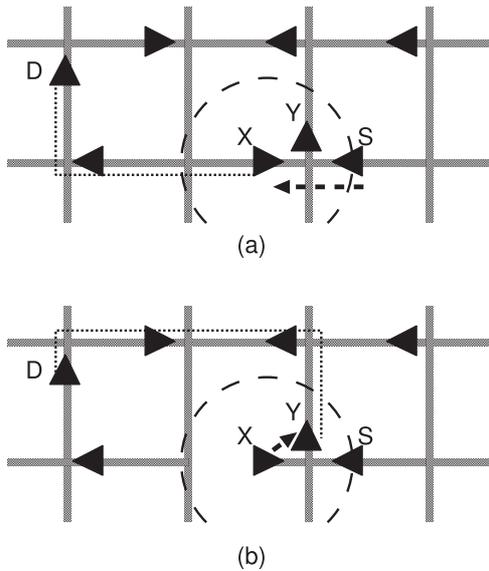


図 2 空白地域の回避
Fig. 2 Recovery from void.

3.2 転送成功の信頼度

2章で述べたように、自身と転送先ノードとの直線距離の間に建物などの障害物が存在する見通しが悪い状況では、パケットの転送成功率に影響を及ぼすと考えられる。ある隣接ノードの宛先ノードまでの道路距離が最も短い場合であったとしても、そのノードに転送できなければ意味がない。そこで、転送先ノードの選択において、障害物の影響も考慮するようにする。本論文では、自身と転送先ノードとの直線距離の間に存在する障害物をまたぐ長さに基づいて転送成功の信頼度を設定する。この転送成功の信頼度を用いることによって、宛先ノードまでの距離だけでなく障害物による影響を考慮したうえで隣接ノードに優劣を付けることが可能になる。

以下に、提案方式における転送先ノードの選択手順を示す。ここで、ノード N_i からノード N_j への Dijkstra アルゴリズムにより計算される道路距離を $D(N_i, N_j)$ とする。また、ノード N_i とノード N_j の間での転送成功の信頼度を $R(N_i, N_j)$ とする。

- (1) ノード N_s がノード N_d 宛のパケットを転送する場合、 $D(N_s, N_d)$ を求める。
- (2) 隣接ノード N_i について、 $D(N_i, N_d)$ を求め、以下のようにノード N_i のスコアを計算する。

$$S_i = (D(N_s, N_d) - D(N_i, N_d)) \times R(N_s, N_i)$$

- (3) 最もスコアが高い隣接ノードを転送先ノードとして選択し、パケットの転送を行う。

4. 性能評価と考察

本提案方式の性能を確認するために、計算機を用いたネットワークシミュレーションによる評価を行う。計算機

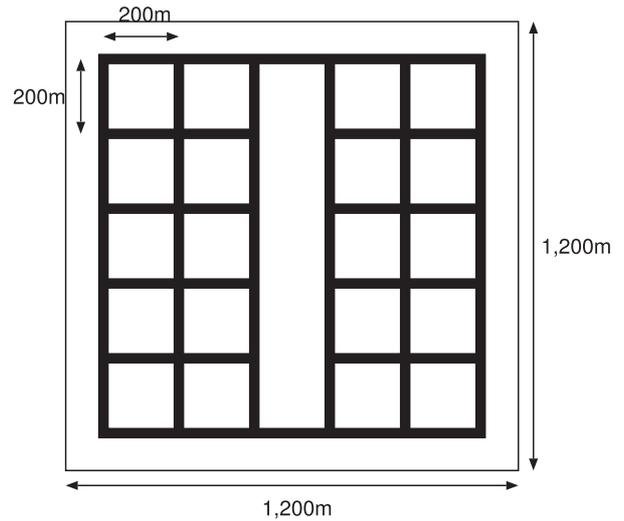


図 3 通信エリア
Fig. 3 Communication area.

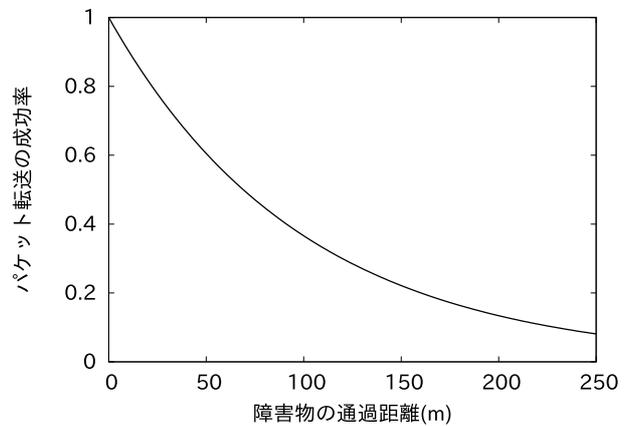


図 4 障害物の影響
Fig. 4 Effect of obstacles.

シミュレーションにはネットワークシミュレータ ns-2 [11] を用い、Web [12] で公開されている ns-2 用の GPSR のソースコードをベースに作成した。ノードの移動パターンの生成には VanetMobiSim [13] を用いた。シミュレーションは、図 3 に示すような 1,200 m × 1,200 m のエリアにおいて道路上を移動体が移動する。VanetMobiSim による移動パターンの生成では、道路を片側 2 車線の双方向、全交差点の半分を信号機付き交差点として信号機の間隔を 30 秒とし、ノードの移動速度を 0~60 km/h に設定した。通信は IEEE802.11b 無線 LAN 規格を使用した任意の 2 地点間の UDP による通信が行われる状況を想定する。また、障害物による影響については道路沿いに建物が存在していると仮定し、本論文では一例として障害物をまたぐ直線距離 d におけるパケット転送成功確率 p を以下の式により計算される値 (図 4) として設定した。

$$p = 0.99^d$$

この値は、転送先ノードの選択における転送成功の信頼

表 1 シミュレーションパラメータ
Table 1 Simulation parameters.

エリアサイズ	1,200 m × 1,200 m
ノード数	50~200
ノード移動速度	0~60 km/h
パケット受信可能範囲	半径 250 m
MAC プロトコル	IEEE802.11b 11 Mbps
電波伝播モデル	TwoRayGround
アプリケーションプロトコル	CBR (UDP)
パケットサイズ	128 bytes
パケット送信間隔	0.1 秒, 0.25 秒
通信フロー数	6, 12~20
シミュレーション時間	270 秒
データ送信開始時間	120 秒

度としても使用した。

提案方式との比較対象は GPCR と GpsrJ+とした。評価指標はパケット到着率と遅延時間とする。遅延時間は、送信元ノードでのパケット生成からそのパケットが宛先ノードに到達するまでの時間とする。シミュレーションはノードの移動パターンを 100 種類用意し、それらについて得られた結果の平均値を算出した。シミュレーションにおいて使用したパラメータは表 1 のとおりである。

4.1 既存方式との比較結果

まず、既存方式との比較結果を示す。図 5 と図 6 は 1 フローのパケット送信間隔が 0.25 秒で 6 フローによる通信が行われた場合のノード数を変化させたときのパケット到着率と遅延時間のグラフである。グラフの横軸はノード数を表す。図 5 から、ノード数が少ないときは、提案方式および比較方式である GPCR と GpsrJ+とは差があまりないが、ノード数が多くなるにつれてパケット到着率に差が見られるようになることが分かる。また、提案方式ではノード数の増加に比例してパケット到着率も上昇している。それに対して、比較方式である GPCR と GpsrJ+ではノード数 150 を境にして、パケット到着率は徐々に減少している。一見、ノード数が多くなると転送可能なノード数も増加してパケット到着率が上昇するように思われるが、信号の影響によりノード密度に偏りが発生してしまい、通信環境を好転させるほどの影響がなかった場合があった。また、隣接ノードから位置情報を受信した際には見通しが悪い状況でも運良く受信できたような場合にその位置情報のみをそのまま利用すると転送に失敗してしまう可能性が高くなるが、ノードが増加するとそのような状況も多く発生してしまい、結果として適切な転送先ノードが選択できずにパケット到着率が低下したのではないかと考えられる。提案方式では、自身と隣接ノードとの位置関係を考慮して転送成功の信頼度により転送先ノードを選択するようにしているため、選択した隣接ノードへの転送が成功する

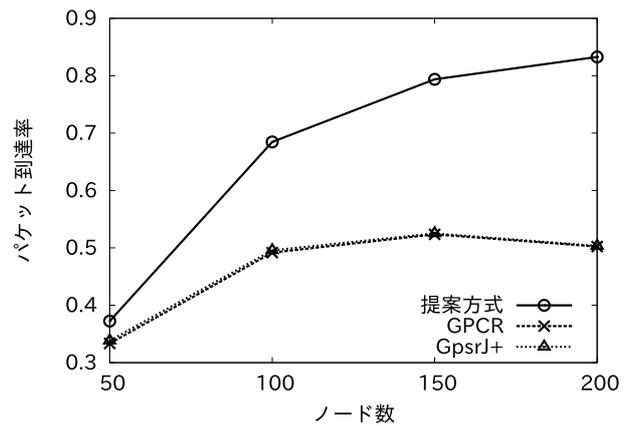


図 5 パケット到着率 (ノード数: 50-200)
Fig. 5 Packet arrival rate (Number of nodes: 50-200).

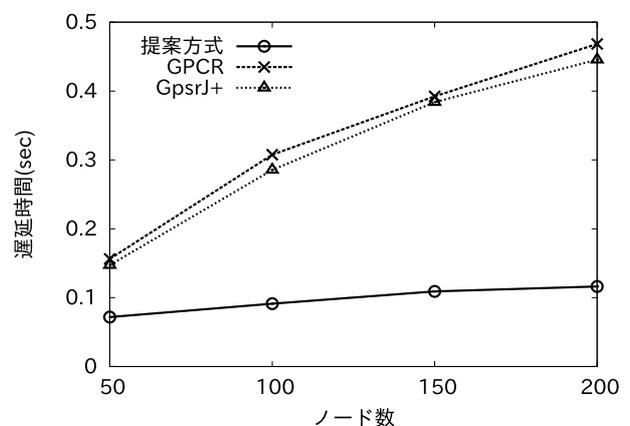


図 6 遅延時間 (ノード数: 50-200)
Fig. 6 End-to-end delay (Number of nodes: 50-200).

確率が上昇し、結果としてパケット到着率が高い値を維持できたと考えられる。ただし、本論文での提案方式によるシミュレーションでは隣接ノードから受信した位置情報を利用する際には、その情報をそのまま利用しており、実際には隣接ノードの位置が変化している可能性がある。たとえば文献 [14], [15] にあるような隣接ノードからの情報による現在位置の位置予測を導入することで、より適切な転送先ノードの選択が行えるようになることが期待される。

図 6 の遅延時間の結果から、GPCR よりも GpsrJ+の方が遅延時間が抑えられていることが分かる。これは、GPCR が必ず交差点にいるノード (コーディネータ) に転送する動作を行うが、GpsrJ+はコーディネータの隣接ノード状況から転送しても意味がない場合には転送しないようにすることで無駄な転送を省く動作を行うことの効果であると考えられる。提案方式は GPCR や GpsrJ+よりも遅延時間が低い値となったが、これは提案方式が転送成功の可能性が高い隣接ノードを転送先ノードとして選択していることから MAC 層での再送失敗やネットワーク層での別の転送先を選択して転送するなどの確率を GPCR や GpsrJ+よりも低く抑えることができるため、転送にかか

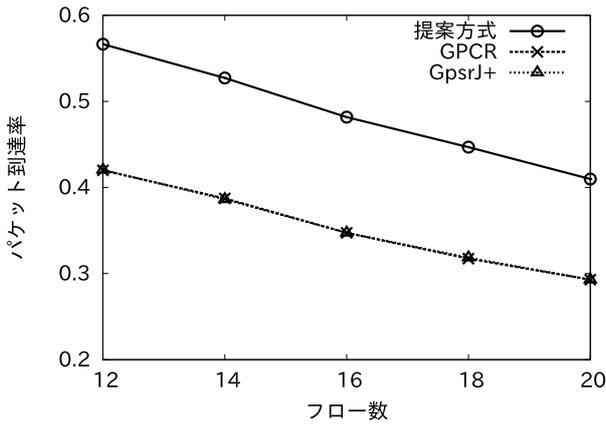


図 7 パケット到達率 (フロー数: 12-20)

Fig. 7 Packet arrival rate (Number of flows: 12-20).

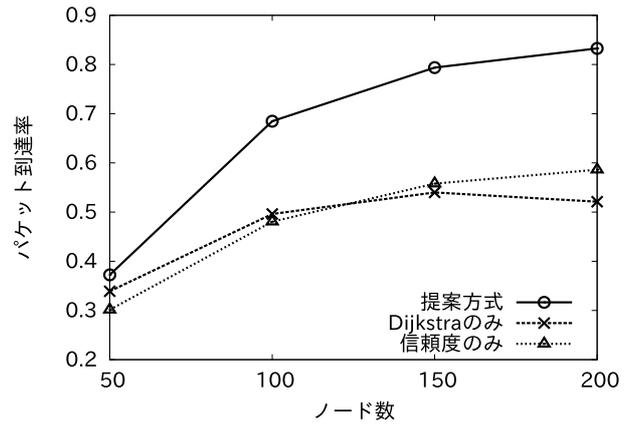


図 9 パケット到達率 (ノード数: 50-200)

Fig. 9 Packet arrival rate (Number of nodes: 50-200).

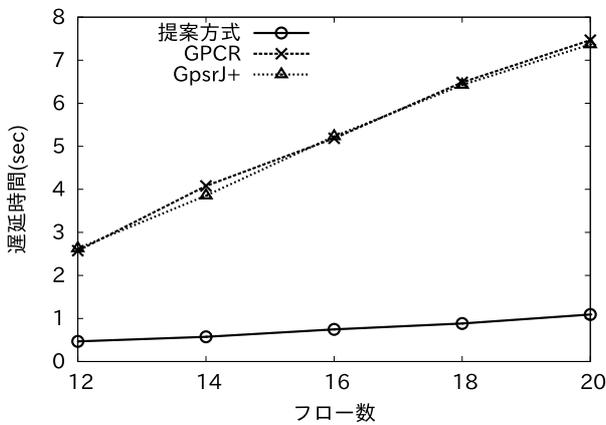


図 8 遅延時間 (フロー数: 12-20)

Fig. 8 End-to-end delay (Number of flows: 12-20).

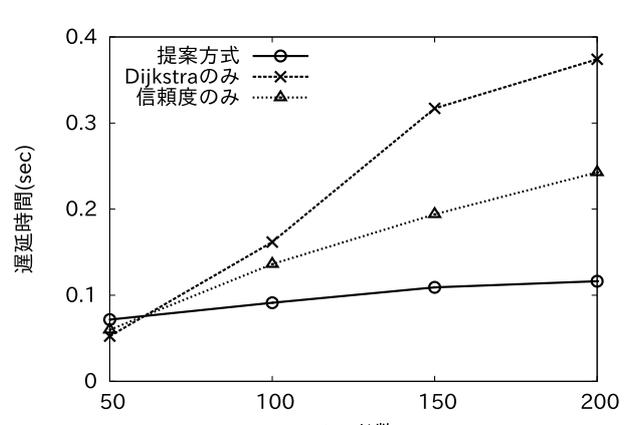


図 10 遅延時間 (ノード数: 50-200)

Fig. 10 End-to-end delay (Number of nodes: 50-200).

る時間を短縮できたからだと考えられる。

次に、通信負荷を大きくした場合の結果を示す。図 7 と図 8 は 1 フローのパケット送信間隔が 0.1 秒でノード数を 100 に固定し、フロー数を変化させたときのパケット到着率と遅延時間のグラフである。グラフの横軸はフロー数を表す。通信負荷が高い状況においても、提案方式が GPCR や GpsrJ+ よりもパケット到達率や遅延時間において良い結果を示している。

4.2 選択基準の比較

次に、提案方式で用いた Dijkstra アルゴリズムと転送成功の信頼度について、それぞれを用いた場合の結果を確認して、どちらも利用することの効果調べる。ここでは、提案方式のほかに、Dijkstra アルゴリズムのみを用いた場合、転送成功の信頼度のみを用いた場合についてシミュレーションを行った。

図 9 と図 10 は 1 フローのパケット送信間隔が 0.25 秒で 6 フローによる通信が行われた場合のノード数を変化させたときのパケット到着率と遅延時間のグラフである。パケット到達率のグラフを見ると、興味深いのは Dijkstra ア

ルゴリズムとパケット転送の成功の信頼度についてどちらか一方のみを用いただけではあまり良い結果を示しておらず、どちらも使用した提案方式の結果が良くなっていることが分かる。Dijkstra アルゴリズムの使用だけでは障害物の影響により選択した転送先ノードへの転送が失敗することが多くなり、また、転送成功の信頼度だけでは空白地帯に到達することが多くなるため、これらの影響がパケット到達率の増加につながらなかったからと考えられる。

遅延時間についてはどちらも用いる提案方式が最も良い結果になったが、パケット到達率とは少し傾向が異なり、Dijkstra アルゴリズムのみを用いた場合が最も遅延時間が大きくなっている。これは、道路距離による転送先ノードの選択によりホップ数が大きくなる場合があることと、転送成功の信頼度を用いていないために MAC 層での再送失敗やネットワーク層での別の転送先を選択して転送する回数が多くなり、遅延時間が大きくなったのではないかと考えられる。これらの結果から、提案方式のようにどちらか一方だけではなくどちらも使用することがより効果的に通信を行うために必要であることが分かった。

4.3 転送成功の信頼度のぶれの影響

本論文でのシミュレーションでは、障害物の影響による転送成功率と各ノードが用いる転送成功の信頼度として用いる値はどちらも図4に示すグラフを利用している。しかし現実的には、パケット送信を行うごとにこれらには違いが生じると考えられる。そこで、障害物の影響による転送成功率にぶれを生じさせた場合の結果を確認してその影響を調べる。ここでは、パケット転送を行う際に障害物をまたぐ距離に応じて設定されたパケット転送の成功率を10%~20%分変動させた場合のシミュレーションを行った。

図11と図12は1フローのパケット送信間隔が0.25秒で6フローによる通信が行われた場合のノード数を変化させたときのパケット到着率と遅延時間のグラフである。パケット到着率については変動率が小さい場合には結果の違いは小さくなっているが、これは信頼度のぶれにより転送先として選択した隣接ノードへの成功確率が低下すると考えられるが、MAC層での転送失敗後に別の転送先ノードを選択し転送するため、パケット到着率に大きな変化はなかったと考えられる。遅延時間については変動率が大きくなるにつれて遅延時間もより大きくなっている。これは、

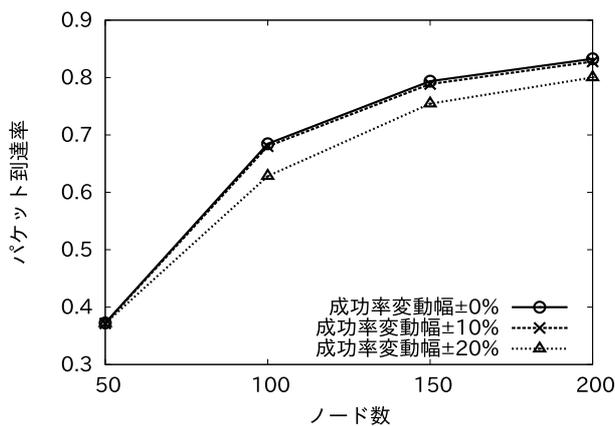


図11 パケット到着率 (ノード数: 50-200)

Fig. 11 Packet arrival rate (Number of nodes: 50-200).

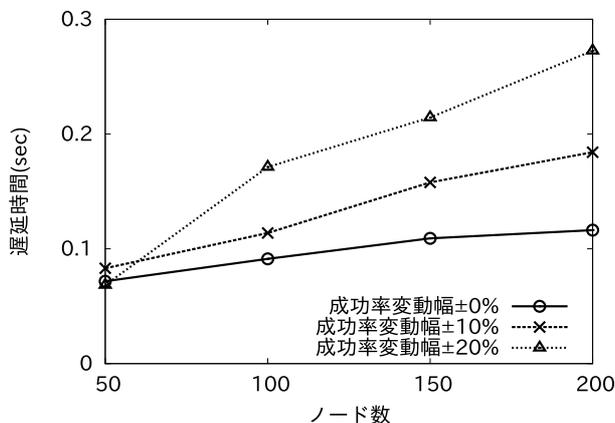


図12 遅延時間 (ノード数: 50-200)

Fig. 12 End-to-end delay (Number of nodes: 50-200).

MAC層での転送が失敗する可能性が高くなることでMAC層での再送回数が多くなることや、MAC層での転送失敗でネットワーク層で別の転送先を再選択して転送することを行うためにより多くの時間がかかったためだと考えられる。この結果から、転送成功の信頼度の正確性は遅延時間に対して大きな影響を持つことが分かる。

5. まとめと今後の課題

本論文では、道路沿いに建物などの障害物がある状況下のマルチホップ無線ネットワークでの Greedy Forwarding において、Dijkstra アルゴリズムと転送成功の信頼度を用いることで効率的な通信が可能となる経路制御方式を提案した。Dijkstra アルゴリズムにより道路形状を考慮した転送ノードの選択が行え、転送成功の信頼度により、障害物の影響を考慮した転送ノードの選択が行えるようになる。シミュレーション結果では、提案方式は既存方式に対して通信性能が向上していることが確認できた。

今後の課題としては、特にノード密度が低い場合における対処法を検討する必要がある。たとえば適切な転送先が発見できない場合にはストアアンドフォワード方式を導入するなどが考えられる。また、本論文でのシミュレーションでは障害物の影響については一例として設定を行ったが、より現実的な数値を用いてシミュレーションを行うことで提案方式の効果を検証する必要があると考えられる。同様に、転送成功の信頼度に関してもより現実的な環境を想定することを検討する必要があると考えられる。

参考文献

- [1] Perkins, C. and Royer, E.: Ad-hoc on-demand distance vector routing, *Proc. 2nd IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications*, pp.90-100 (1999).
- [2] Takagi, H. and Kleinrock, L.: Optimal transmission ranges for randomly distributed packet radio terminals, *IEEE Trans. Comm.*, Vol.32, No.3, pp.246-257 (1984).
- [3] Ko, Y.-B. and Vaidya, N.H.: Location-aided routing (LAR) in mobile ad hoc networks, *Proc. 4th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking*, pp.66-75 (1998).
- [4] 中川裕士, 石田賢治: MANET における位置情報を利用したオンデマンド型ルーティング方式, *電子情報通信学会技術研究報告*, Vol.104, No.275, IN2004-78, pp.95-100 (2004).
- [5] Karp, B. and Kung, H.T.: GPSR: Greedy perimeter stateless routing for wireless networks, *Proc. 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, pp.243-254 (2000).
- [6] Lochert, C., Mauve, M., Füßler, H. and Hartenstein, H.: Geographic Routing in City Scenarios, *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, Vol.9, No.1, pp.69-72 (2005).
- [7] Lee, K.C., Häerri, J., Lee, U. and Gerla, M.: Enhanced Perimeter Routing for Geographic Forwarding Protocols in Urban Vehicular Scenarios, *2007 IEEE Globecom Workshops*, pp.1-10 (2007).

- [8] 伊藤義信, 多賀登喜雄: 車車間通信環境における見通し外伝搬損失推定, 電子情報通信学会総合大会講演論文集通信 (1), p.61 (2008).
- [9] 丹後俊宏, 岩井誠人, 村上裕一, 佐々木邦彦, 堀松哲夫: レイトレーシングを用いた車々間通信における交差点見通し外での伝搬損失特性解析, 信学技報, AP2007-6, pp.31–36 (2007).
- [10] Matar, Y., Villas, L. and Pazzi, R.: Dual-mode optimum distance routing scheme for vehicular ad hoc networks, *Proc. 3rd ACM International Symposium on Design and Analysis of Intelligent Vehicular Networks and Applications*, pp.15–22 (2013).
- [11] UCB/LBNL/VINT: The Network Simulator - ns-2, Information Sciences Institute (online), available from <http://www.isi.edu/nsnam/ns/> (accessed 2016-05-23).
- [12] Kieß, W. and Ogilvie, T.: HLS patch for ns-2.29 and for ns-2.33, University of Dusseldorf (online), available from <http://www.cn.uni-duesseldorf.de/alumni/kiess/software/hls-ns2-patch> (accessed 2012-11-05).
- [13] Härrri, J., Fiore, M., Filali, F. and Bonnet, C.: Vanet-MobiSim, Institut Eurècom (online), available from <http://vanet.eurecom.fr/> (accessed 2016-05-23).
- [14] Saqour, R., Shanudin, M. and Ismail, M.: A Prediction Scheme to Enhance The Routing Process in Geographical GPSR Ad Hoc Protocol, *Proc. MoMM2006*, pp.91–100 (2006).
- [15] Creixell, W. and Sezaki, K.: Routing Protocol for Ad Hoc Mobile Networks using Mobility Prediction, *International Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing*, Vol.2, No.3, pp.149–156 (2007).



本間 真司

平成 25 年群馬大学工学部情報工学科卒業。平成 28 年同大学大学院理工学府理工学専攻修士課程修了。現在、シャープ株式会社勤務。在学中、アドホックネットワーク, VANET 等に関する研究に従事。



山本 潮 (正会員)

平成 4 年東北大学工学部情報工学科卒業。平成 9 年同大学大学院情報科学研究科博士後期課程修了。博士 (情報科学)。同年より群馬大学工学部情報工学科助手。現在, 群馬大学大学院理工学府准教授。アドホックネットワーク, 無線メッシュネットワーク, オーバレイネットワーク等に関する研究に従事。電子情報通信学会会員。