

モバイルアドホックネットワークにおける ユーザ利用時間に基づく消費電力公平化ルーティング制御

市川 潤紀¹ 阪田 史郎¹ 小室 信喜¹

概要: 一般に無線ネットワークでは, 端末のバッテリー容量は限られており, 各端末における消費電力は公平であることが望ましい. 一方, ユーザ自身のネットワーク利用形態を考えると, 端末の通信開始時刻, 連続通信時間が利用者によって異なることが想定される. 端末のユーザ視点から, 公平にリソースを消費する制御方式のためには, ネットワークの利用時間を考慮することが必要であるが, そのような研究は少ない. 本論文では, 著者らの従来研究である, 利用者のネットワーク利用時間あたりの消費電力公平化ルーティング方式を, マルチチャネル環境に発展させて配信率と公平性のさらなる向上を図る. これは, 経路探索動作などを行う制御チャネルとは別のチャネル上でデータ送信を行うことで, データ送信時の信号を受信して電力を消費する端末を限定させるものである. シミュレーション評価では, 代表的なルーティングプロトコルである AODV(Ad hoc On-demand Distance Vector), 負荷分散方式として代表的な LBAODV(Load Balancing AODV), 著者らの従来方式, 本論文の提案方式を比較し, 提案方式が有効であることを示す.

Fair Energy Consumption Routing Control among Terminals for Mobile Ad hoc Networks

JUNKI ICHIKAWA¹ SHIRO SAKATA¹ NOBUYOSHI KOMURO¹

1. はじめに

近年, 無線 LAN(Local Area Network) などの無線通信を用いたネットワークの普及を背景に, 災害発生時やイベント会場などにおける迅速なネットワークインフラの構築が求められている. 固定のインフラを必要とせず, 無線通信を用いて各端末が移動しながら自律的にネットワークを構築できる, モバイルアドホックネットワーク (以下, MANET) の研究が盛んに行われている [1][2]. MANET では, 無線ネットワークによって基地局を介さず端末間での通信を行う. データの送り先が自分の通信範囲外に存在する場合には, 中継端末がバケツリレー方式に次々と転送することで通信が可能となる.

ここで, 通信端末とそのユーザについて着目する. MANET で用いられる携帯電話のような小型の端末は, バッテリー容量が小さいことが想定されるため, そのユー

ザにとっては貴重なリソースとなる. また, ユーザ自身のネットワーク利用形態を考えると, それぞれ任意の時刻に通信を開始し, 終了する時刻もばらばらであることが想定される. 端末のユーザ視点から, 公平にリソースを消費する制御方式のためには, ネットワークの利用時間を考慮することが必要であるが, そのような研究は少ない.

そこで, 著者らの従来研究では, ユーザが通信開始時刻から現在時刻までネットワーク内に滞在する時間を利用時間と定義し, その利用時間における端末のバッテリー消費量を全端末間で公平にするルーティング方式を提案した [3]. これにより, ネットワーク内の端末の公平性を改善することができたが, その効果がいま一つ小さい点や, 配信率が大きく低下してしまうといった課題があった.

本論文では, 公平性の改善度が低い原因を, 無線通信特有の受信電力消費問題にあると考え, この問題の現実的な解決策として, 通信を周波数上で切り分けて電力消費の影響を低減できる, マルチチャネル環境に着目する. 従来方式をマルチチャネル環境に適用させるため, 通信時のチャ

¹ 千葉大学大学院融合科学研究科
Chiba University, Inage, Chiba 263-8522, Japan

ネル割り当て・チャネル切り替えを行うマルチチャネル MAC 制御を導入する。

提案方式は2つの制御に基づく。1つ目は、データ配信専用のチャネルを用いて通信を行うため、端末間で使用するチャネルを一意に決定する、マルチチャネル MAC 制御である。2つ目は、従来方式と同様に評価関数を用いて次に送信する端末を選択し、利用時間あたりのバッテリー消費量に偏りのある端末を避ける、公平化ルーティング制御である。これらによって、マルチチャネル環境において周波数上で通信を切り分け、ネットワーク利用時間あたりのバッテリー消費を分散させながらデータ配信を行い、さらなる公平化と配信率の向上を図る。

シミュレーション評価では、端末の利用時間あたりの消費電力を評価値として用い、公平化指標である Fairness Index によって測った公平性、および配信率を、著者らの従来方式、本論文の提案方式、代表的なルーティングプロトコルである AODV[4] とその負荷分散型方式である LBAODV[5] の4方式で比較し、提案方式が有効であることを示す。

2. 関連研究

2.1 AODV

AODV は、Hop-by-hop のルーティングを行っており、パケットを受け取ったノードは自分が持っているルーティングテーブルから次にどのノードに転送するべきか判断する [4].

2.1.1 経路探索

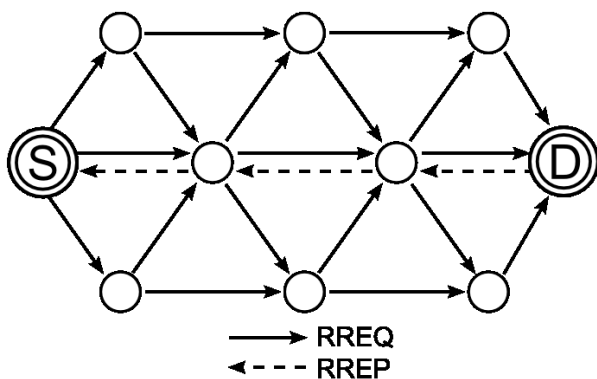


図 1 AODV 経路探索動作

AODV の経路探索動作は、Route Request パケット（以下、RREQ）フラッディング、Route Reply パケット（以下、RREP）ユニキャストによって行われる。これを図 1 に示す。通信要求が発生したノード（送信元）は、宛先への経路を持っていない場合、ネットワーク中に RREQ をフラッディングする。RREQ を受け取ったノードは、送信元ノードへの経路（逆方向経路）を作成する。RREQ が宛先ノードまで届くと、宛先ノードは RREP を送信元まで

ユニキャストで送信する。このパケットは、RREQ 受信時に作成した逆方向経路をたどることで、送信元まで到達できる。RREP を転送した経路中の中継ノードは、宛先ノードへの経路（順方向経路）を作成する。

2.1.2 データ配信

送信したいデータパケットがあり、宛先ノードまでの経路情報を持っている場合、データパケットを送信できる。この際、データパケットを送りたい宛先に対して、次に転送すべきノードを経路表から参照する。転送先のノードは、自分が宛先ノードでない場合、同様にして宛先ノードまでパケットを転送する。

2.2 LBAODV

LBAODV は、AODV をもとにした負荷分散型ルーティング方式である [5]. LBAODV の特徴として、AODV を元に変更された経路探索およびデータ配信手法が挙げられる。

2.2.1 経路探索

基本的な処理手順は AODV と同じく、RREQ フラッディングおよび RREP ユニキャストによって経路情報が取得される。大きく異なるのは、RREQ フラッディング時、中継したノードのアドレス情報を次々に格納する点である。宛先へ RREQ が届いた時、宛先ノードは中継ノード情報を逆に辿って送信元ノードへ RREP を送り返す。この時、RREP を受信した中継ノードは、自身がいくつ RREP を受信したかをカウントしておく。これを *CountReply* 値と呼び、自身から宛先へ向かう経路がいくつ存在するかを示す値となる。

2.2.2 データ配信

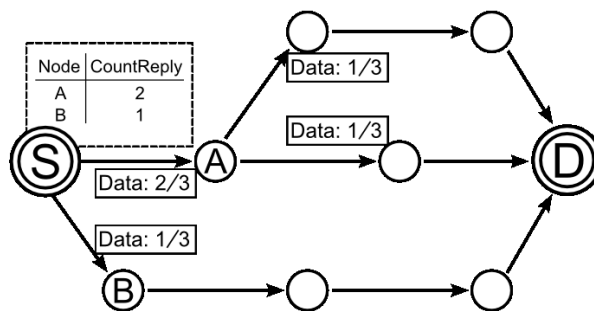


図 2 LBAODV データ分散配信動作

送信すべきデータパケットを分割し、経路探索によって得られた複数経路へそれぞれ配信する。この時、候補となる経路の *CountReply* 値を参照し、*CountReply* 値が大きい経路には少ない経路よりも大きな分割パケットを割り振る。これによって、候補経路の経路分岐を見据えた負荷分散が可能になる。この様子を図 2 に示す。

2.3 AODV および LBAODV の問題点

MANET では、通信端末が比較的小型であることから、

搭載されるバッテリーの容量は限られる。このバッテリーは主に制御パケットやデータパケットの送受信によって消費されるが、端末のユーザにとっては貴重なリソースであり、他の端末と比べて公平に消費されることが望ましい。

AODVのように、リンク障害が発生するまで最短経路を使い続ける方式では、各端末のバッテリー消費が偏り、不公平性が生じる可能性が高い。また、LBAODVのように、経路探索時に発見した候補経路全てを用いて負荷分散を図る方式では、経路探索時に発見できなかった端末に対する効果が見込めない。そうした状況は、ユーザそれぞれの通信開始時刻、連続通信時間が異なるような実環境に近い場合に頻発することが考えられ、公平性の保証としては不十分である。

3. 著者らの従来方式

2.3節で挙げた問題点を解決し、ユーザの通信開始時刻や連続通信時間が異なるような環境でも端末のリソース消費の公平性を保証する制御方式を提案した [3]。これは、各端末の通信開始時刻および現在時刻から算出されるネットワーク利用時間と、端末のバッテリー消費量をもとに、利用時間あたりのバッテリー消費量を算出し、ルーティングに適用するものである。

従来方式はAODVを基に、制御パケットへのバッテリー情報の付加、データ配信時の次ホップ先選択制御を主に拡張した。

3.1 制御パケット拡張

表 1 バッテリー情報詳細

Parameter	bit field
バッテリー消費量	8 bit
バッテリー残量下限値超過	1 bit
ネットワーク参加時刻	32 bit

各ノードは、RREQやRREPといった制御パケットを転送する際に、表1のようなバッテリー情報フィールドをヘッダに記載して送信する。これらのパケットを受信したノードは、パケットのヘッダからバッテリー情報を読み取り、転送元のノードの状態を知ることができる。

3.2 複数経路を用いたデータ配信

3.1節によって拡張された制御パケットを用いて経路探索を行うことで、経路の候補となっている全てのノードは、宛先ノードに対して次に送信すべき隣接ノード（次ホップ先ノード）とそのバッテリー情報を把握することができる。この情報と式(1)に示す評価関数を用いて、候補経路のRouteCostを算出する。このRouteCostが最小である次ホップ先の経路を選択し、データを送信する。

$$RouteCost = \frac{P_{next}}{T_{current} - T_{next}} \quad (1)$$

P_{next} : 次ホップ先ノードのバッテリー消費量 [mAh]

T_{next} : 次ホップ先ノードのネットワーク参加時刻 [h]

$T_{current}$: 現在時刻 [h]

3.3 従来方式の問題点

従来方式の導入により、ネットワーク利用時間あたりのバッテリー消費量という指標のもと、ネットワーク内端末における公平性を改善することができたが、その効果がいま一つ小さいという課題を残した。本論文では、この原因を、無線通信特有の受信電力消費問題にあると考える。

無線通信では一般的に無指向性通信を用いているため、図3のように、同一チャンネル上で送信端末の電波伝搬範囲内にある全ての端末は、受信電力の消費を免れない。これにより、従来方式が行う、バッテリー消費量の多い端末を避けるような経路選択制御の効力が薄れてしまう難点がある。回避策としては、端末が受信をしないスリープ状態を利用することが考えられるが、配信率が端末数と通信範囲に依存するMANETの性質上、通信に参加しない状態を作ることは難しい。

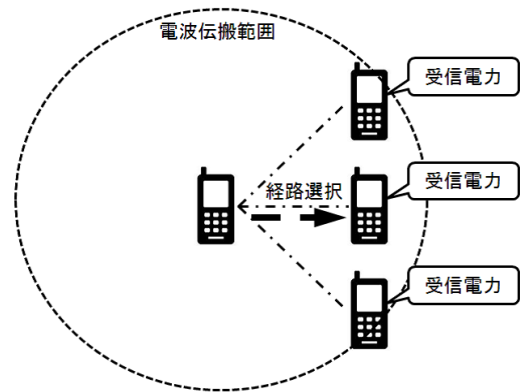


図 3 無指向性通信における近隣端末の受信電力消費

本論文では、この問題の現実的な解決策として、通信を周波数上で切り分けて電力消費の影響を低減できる、マルチチャンネル環境に着目する。これは、全く異なるチャンネル同士では通信の干渉が起こらず、お互いの通信による受信電力も発生しないためである。従来方式をマルチチャンネル環境に適用させるため、通信時のチャンネル割り当て・チャンネル切り替えを行うマルチチャンネルMAC制御を導入する。

4. 提案方式

本論文では、著者らの従来方式を発展させ、3.3節で挙げた問題を解決し、利用時間における消費電力の公平性、

および配信率を改善する方式を提案する。提案方式は、マルチチャンネル MAC 制御と、著者らの従来方式である公平化ルーティング制御からなる。

4.1 マルチチャンネル MAC 制御

提案方式では、公平化ルーティング制御の後に選択された次ホップ先ノードに対して、異なるチャンネル上でデータ送信を行うことで、非選択近隣ノードの受信電力消費をカットすることを目的としている。ここで、データパケットの送信に利用するチャンネルをデータチャンネル、それ以外の制御パケットの送信に利用するチャンネルを制御チャンネルとする。AODV の制御パケットである RREQ, RREP, RERR に用いる MAC 層フレーム RTS/CTS/DATA/ACK の他、データパケットの送信における RTS-MC/CTS-MC を制御チャンネル上で送信する。データパケットの送信における MAC 層フレーム DATA/ACK はデータチャンネル上で送信する。

提案方式におけるマルチチャンネル MAC では、各ノードは近隣のチャンネル利用状況を記録したチャンネルリストを保持している。このチャンネルリストには、利用ノード数と利用期限がチャンネル数分記録されており、ノードはこのチャンネルリストを参照して利用可能なチャンネルを決定する。

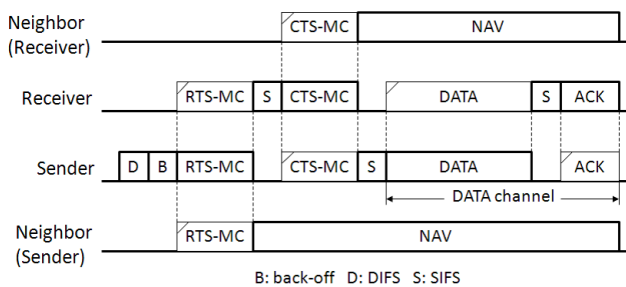


図 4 マルチチャンネル MAC 制御動作

図 4 に MAC 動作を示す。まず送信ノードが自身のチャンネルリストから利用可能な候補チャンネルを参照する。これらの候補チャンネルを、RTS を拡張した制御フレーム RTS-MC に格納し、送信する。RTS-MC を受信した次ホップ先ノードは、フレームに記述された候補チャンネルと自身のチャンネルリストから、データ通信に使用するチャンネルを 1 つ選択する。これを CTS を拡張した制御フレーム CTS-MC に格納して送信し、送信終了後はそのチャンネルに切り替えてデータフレームを待つ。CTS-MC を受信した近隣ノードは、NAV になると同時に自身のチャンネルリストの当該チャンネルエントリに利用期限を設定する。CTS-MC を受信した送信ノードは、フレームに記述されたチャンネルに切り替えてデータフレームを送信する。データフレームを受信した次ホップ先ノードは、データチャンネル上で ACK を送信し、送信終了後は制御チャンネルに切り替える。ACK を受

信した送信ノードは制御チャンネルに切り替える。

4.2 公平化ルーティング制御

ルーティング制御は従来方式と同様に行う。4.1 節で導入したマルチチャンネル環境において、図 5 のように経路探索は制御チャンネル上で、データ配信はデータチャンネル上で行うことによって、周波数上で通信を切り分け、ネットワーク利用時間あたりのバッテリー消費を分散させながらデータ配信を行い、さらなる公平化と配信率の向上を図る。

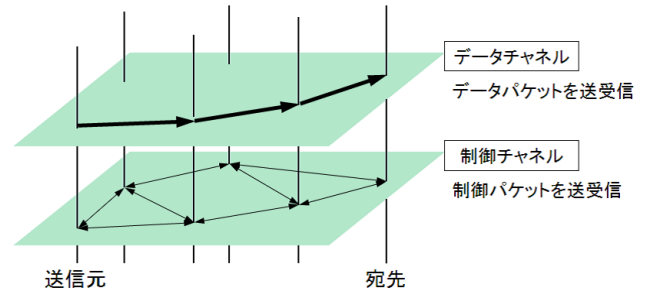


図 5 マルチチャンネルルーティング制御

5. シミュレーション評価

5.1 評価項目

5.1.1 公平性

公平性を示す指標として代表的な、Jain's Fairness Index[6] を用いる。これは以下の式 (2) で定義される。

$$FairnessIndex(x_1, x_2, \dots, x_n) = \frac{\left[\sum_{i=1}^n x_i \right]^2}{n \times \sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (2)$$

n : ノード総数

x_i : $\frac{\text{ノード } i \text{ のバッテリー総消費量}}{\text{ノード } i \text{ のネットワーク総利用時間}}$

5.1.2 配信率

配信率は以下の式 (3) で定義される。

$$\text{配信率} = \frac{\text{宛先ノードが受信したパケット数}}{\text{送信元ノードで生じたパケット数}} \quad (3)$$

5.2 シミュレーション条件

提案方式の有効性を確認するために、ネットワークシミュレータ (QualNet 5.0) による評価を行った。提案方式のほかに、従来方式、AODV, LBAODV についてもシミュレーションを行い評価対象とする。シミュレーション諸元は表 2 に示す。

また、各ノードは「常時接続」「途中参加」「途中離脱」の

3つのグループのいずれかに属するものとする。これは、端末のユーザの通信動作をモデル化したもので、「常時接続」はシミュレーション開始から終了まで常にネットワーク内に存在し、「途中参加」はシミュレーション時刻 T_{join} において途中からネットワークに参加する。「途中離脱」はシミュレーション時刻 T_{leave} において途中でネットワークから離脱する。これを図6に示す。

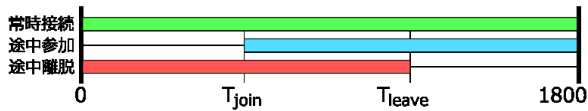


図6 シミュレーション時刻におけるノードの利用状態

評価シナリオ1では、「途中参加」「途中離脱」に属すノード数の割合を変化させ、評価時間後に公平性がどのように変化するかを調べる。評価シナリオ2では、「途中参加」「途中離脱」を設定する場合において、ノードの最大移動速度の変化によって公平性にどのような影響があるかを調べる。

表2 シミュレーション諸元表

Parameter	Value
Simulation area	500m × 500m
Simulation time	1800 sec
Number of nodes	240
Transmission range	100 m
Number of flow	1
Transmits packets	1 packets/sec
Packet payload size	512 bytes
Physical model	802.11b
Channel capacity	2 Mbit/sec
Mobility model	Random waypoint
Max speed of nodes	2 m/sec
Pause time	30 sec
TX-current-load	280.0 mA
Energy-rx-current-load	204.0 mA
Energy-operational-voltage	3.0 V
Battery-model	Liner
Battery-initial-charge	1200 mAh

5.3 シミュレーション結果

5.3.1 評価シナリオ1

図7は、ネットワーク内のノードが途中参加・途中離脱に属する割合に対する、評価時間終了時における全ノードの公平性をとったものである。ここで、全ノードの内、途中参加および途中離脱を設定したノードの割合を、途中参加・途中離脱ノード率と定義する。20%および100%の場合について、図9、10に示す。図7では、割合が高くなる

ほど全体的な公平性は下がっているが、AODV や負荷分散手法である LBAODV と比べ Fairness Index 1.0 程度の改善を維持し、最もノードの出入りが激しい 100% 時でも Fairness Index 0.75 以上を保っている。

図8では、従来方式と比べて提案方式の配信率が改善している。これは、マルチチャネル MAC 制御の効果により、ノード間でのデータ通信の成功確率が上がったためと考えられる。また、従来方式、提案方式ともに、途中参加・離脱ノード率が高くなるにつれて配信率が向上するのは、経路再構築を行う頻度が多くなるためである。従来方式や提案方式ではマルチパスを構築するため、リンク障害発生時に代替経路に切り替え、すぐに経路再構築には移らない。ノードの出入りが激しくなることで通常よりも経路再構築を行う頻度が多くなり、通信時により新しい経路を利用することで配信率が向上している。

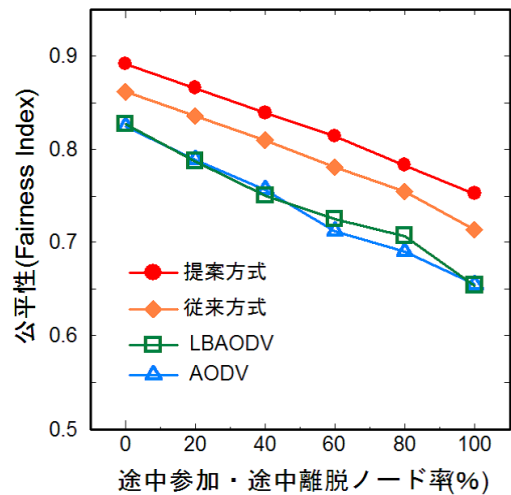


図7 途中参加・途中離脱ノードの割合に対する公平性

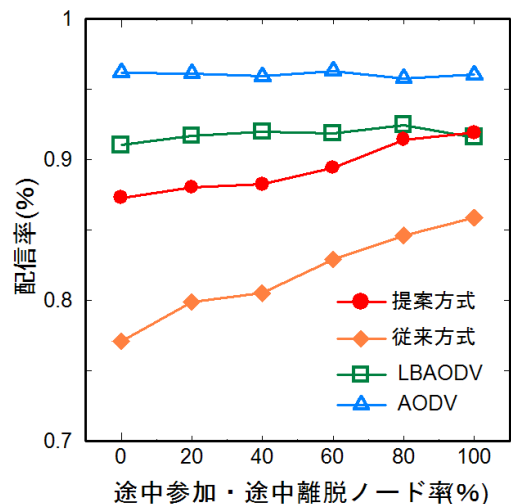


図8 途中参加・途中離脱ノードの割合に対する配信率

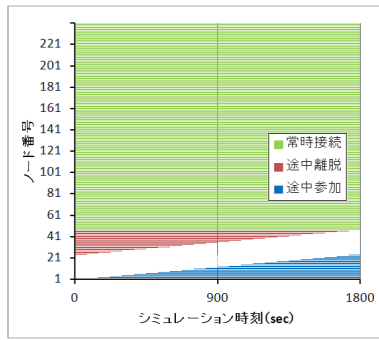


図 9 途中参加・途中離脱ノード率 20%

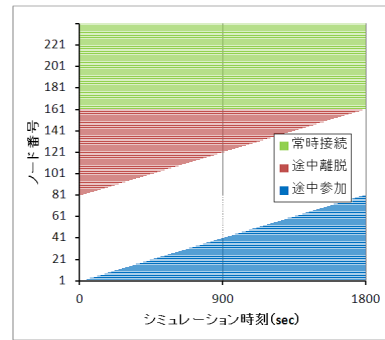


図 12 ノードの利用時間設定 (均等割り当て)

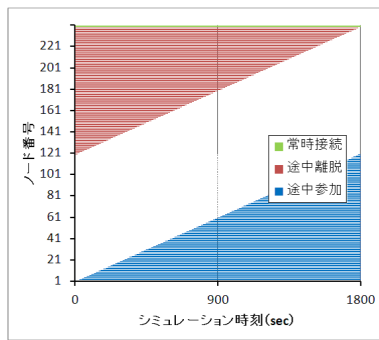


図 10 途中参加・途中離脱ノード率 100%

5.3.2 評価シナリオ 2

図 11 は、ランダムウェイポイントにおける最大移動速度の変化に対する、評価時間終了時における全ノードの公平性をとったものである。各ノードのグループ分けについては図 12 のようにスケジューリングした。提案方式は従来方式と比べ公平性が改善しており、これはマルチチャネル MAC による受信電力の周波数上での切り分けの効果によるものである。

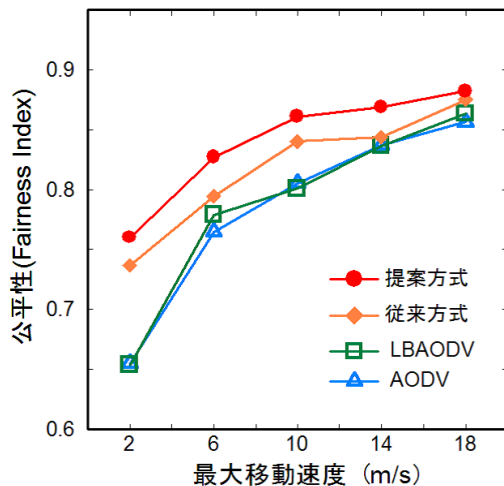


図 11 最大移動速度変化に対する公平性

6. まとめ

本論文では、著者らの従来の方式である、端末の利用時間あたりのバッテリー消費量の公平性を考慮した複数経路データ配信方式を、マルチチャネル環境に適用した。提案方式は、制御チャネル、データチャネルに分けて通信を行うマルチチャネル MAC 制御と、従来の公平化ルーティング制御からなる。これは、通信端末のユーザからみた、ネットワーク利用時間における消費電力の不公平性を解決し、利用時間に応じて公平にバッテリーを消費するネットワークの構成を実現するものである。シミュレーション評価により、提案方式が従来方式の公平性・配信率を改善していることを示した。

参考文献

- [1] C. S. R. Murthy and B. S. Manoj, "Ad Hoc Wireless Networks: Architectures and Protocols," Prentice Hall, 2004.
- [2] Internet Engineering Task Force (IETF) Mobile Ad Hoc Networks (MANET) Working Group Charter, <http://www.ietf.org/html.charters/manet-charter.html>, 2008.
- [3] 市川潤紀, 阪田史郎, 小室信喜, "モバイルアドホックネットワークにおけるノード間消費電力公平化ルーティング方式," DICOMO2012, pp.1659-1665, July. 2012.
- [4] C. E. Perkins, and E. M. Royer, "Ad-Hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing," RFC 3561, July. 2003.
- [5] Darehshoorzadeh. A, Javan. N.T, Dehghan. M and Khalili. M, "LBAODV: A New Load Balancing Multipath Routing Algorithm for Mobile Ad hoc Networks," NCTT-MCP 26-28 pp.344 - 349, Aug. 2008
- [6] R. Jain, W. Hawe, and D. Chiu, "A Quantitative Measure of Fairness and Discrimination for Resource Allocation in Shared Computer System," Tech. Rep. DigitalEquipment Corp., Sept. 1984.