

ノードモビリティの変化に適応した MANET クラスタリングの 自己組織化

小田亮太郎[†] 大田 知行^{††} 角田 良明^{††}

[†] 広島市立大学大学院 情報科学研究科

〒 731-3194 広島市安佐南区大塚東三丁目 4 番 1 号

E-mail: [†]toda@info.hiroshima-cu.ac.jp, ^{††}{ohta,kakuda}@hiroshima-cu.ac.jp

あらまし 自律分散ネットワークの一形態として、モバイルアドホックネットワーク (MANET) が存在する。そして、MANET の大規模化に対し効率的なルーティングを行う手法として、自律分散クラスタリングを提案してきた。自律分散クラスタリングは MANET を複数のクラスタと呼ばれるサブネットワークに分割して分散的に管理することで、MANET の大規模化に対する高い適応性を示している。自律分散クラスタリングはクラスタの管理を定期的に送信される制御パケットを用いて行う。しかしながら、制御パケットを一定間隔で送信するため、各クラスタは動的に変化するノードモビリティには適応していない。クラスタごとに異なるノードモビリティの変化に対する適応性を高めるためには、クラスタごとに制御パケットの送信間隔を調整することが重要となる。本稿では、自律分散クラスタリングの自己組織化の一例として、クラスタのノードモビリティの変化に対する制御パケットの送信間隔制御手法を提案する。提案手法は、クラスタのノードモビリティの変化に適応して制御パケットの送信頻度を調整することで、安定性の高いクラスタ構築を行う。

キーワード アドホックネットワーク, 自律分散クラスタリング, ノードモビリティ, 自己組織化

A Self-Organizing Control Scheme Adapting to Node Mobility in MANET Clustering

Ryotaro ODA[†], Tomoyuki OHTA^{††}, and Yoshiaki KAKUDA^{††}

[†] Graduate school of Information Sciences, Hiroshima City University

3-4-1 Ozuka-Higashi Asa-minami-ku, Hiroshima 731-3194, Japan

E-mail: [†]toda@info.hiroshima-cu.ac.jp, ^{††}{ohta,kakuda}@hiroshima-cu.ac.jp

Abstract Mobile ad-hoc networks (MANETs) belong to the type of autonomous distributed networks. In order to manage large-scaled MANETs efficiently, we had proposed an autonomous clustering with high scalability and adaptability. In the autonomous clustering, a MANET is divided into disjoint sub-networks (called clusters), and they are maintained using periodically sending control messages within the clusters. However, it can not adapt to node mobility which is dynamically changing, because of periodically transmitting control messages. We propose a new transmitting rate control scheme of control messages to adapt node mobility. The proposed scheme is one of self-organizing control schemes in autonomous clustering. The proposed scheme dynamically changes the interval for transmitting control messages, adapting to variation of node mobility in each cluster. The proposed scheme can contribute to enhance its scalability and adaptability.

Key words Ad Hoc Networks, Autonomous Clustering, Node mobility, Self-Organizing

1. はじめに

新世代ネットワーク技術戦略で述べられている、トラスタブルな端末・インフラ・サービスアプリケーションを実現するには、アシュアランスネットワーク技術が不可欠である。アシュ

アランスネットワークは、ネットワークの大規模化や、ネットワーク環境の変動、セキュリティに対する攻撃や故障を引き起こすフォールトが存在した場合においても、期待される情報通信サービスをリアルタイムに実行するネットワークである [1]。本稿では、アシュアランスネットワーク技術の一つの事例とし

て、モバイルアドホックネットワーク (以下, MANET) クラスタリングの自己組織化技術について議論する.

MANET は基地局や有線網を用いない, モバイル端末 (以下, ノード) のみで構成される自律分散ネットワークの一形態である. MANET はノードの移動が想定されており, 時間の経過とともにネットワークポロジが頻繁に変化する. 我々は, このような MANET の大規模化に対し効率的なルーティングを行う手法として, 自律分散クラスタリングと自律分散クラスタリングに基づく階層ルーティングを提案してきた [2], [3]. 自律分散クラスタリングは MANET をクラスタと呼ばれるサブネットワークに分割して管理する. 各クラスタは常に一定のノード数となるように構成されており, MANET 内のノード数の増加した場合でも制御パケットのオーバーヘッドを抑えたノードの管理を行うことができる.

MANET ではノードの移動速度や移動方向などのモビリティは均一ではなく, 場所や時刻によってノードのモビリティや分布密度が頻繁に変化する. そのため, モビリティや密度の変化に動的に適應可能なルーティングが必要となる. 自律分散クラスタリングでは定期的にブロードキャストする制御パケットを用いてクラスタの管理を行っており, 制御パケットの送信間隔に応じてルーティング性能が変化する. しかしながら, ノードモビリティが頻繁に変化する場所では送信間隔を一意に決定することが困難である. 例えば, モビリティの高い環境で送信間隔を長く設定した場合には, 頻繁に発生するリンク切断によってデータパケットの到達性能が悪化する. また, モビリティの低い環境では制御パケットのオーバーヘッドの増加を抑えるため, 必要以上の制御パケットを送信しないことが望ましい. そのため, 制御パケットの送信間隔を周辺のノードモビリティに合わせて動的に設定する必要がある.

一方, ノードの分布密度が動的に変化する環境では, 全てのノードが最大送信電力で通信を行うことは非効率的である. 例えば, ノード密度の高い場所で最大送信電力を用いてパケットの送信を行う場合, パケットの衝突や電波干渉によるパケットロスの発生頻度が増加すると考えられる. ここで, 自律分散クラスタリングの密度の変化への適應手法は文献 [4] で述べている. 文献 [4] では, 各ノードが周辺のノードの分布密度に適應してパケットの送信電力を調整する手法を提案し, データパケットの到達性能をそれほど低下させずにパケットの衝突や消費電力の削減効果を示している.

自律分散クラスタリングは MANET をクラスタに分割して場所ごとに管理することができるため, クラスタ単位でノードのモビリティや密度の変化に自律的に対応可能である. 本稿では, 自律分散クラスタリングの自己組織化制御の一例として, クラスタのノードモビリティの変化に対する制御パケットの送信間隔制御手法を提案する. 提案手法は, クラスタのノードモビリティの変化に適應して制御パケットの送信頻度を調整することで, モビリティの変化に対応したクラスタ管理を行うことが可能となる.

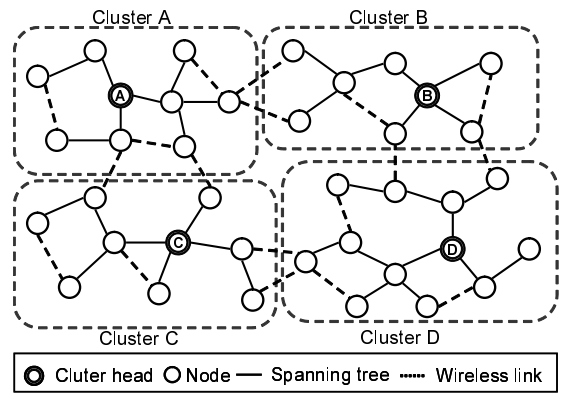


図 1 クラスタの構成例

2. 自律分散クラスタリング

2.1 概要

自律分散クラスタリングはネットワークを階層的に管理するため, MANET をクラスタに分割して管理する. 各クラスタはクラスタを管理するクラスタヘッド (以下, CH), 及び, その他のノード (以下, メンバ) から構成され, CH のノード ID がそのクラスタの ID となる.

CH はクラスタ内に自身を根とするクラスタヘッドベースツリー (以下, CHBT) を構築することでクラスタの構築, 管理を行う. クラスタの管理を行うために MEP (MEMBER Packet), MAP (Member Ack Packet) と呼ばれる 2 種類の制御パケットを使用する. クラスタヘッドは定期的に MEP をブロードキャストする. MEP を受信したノードは MEP に記載されているクラスタ ID と自身のクラスタ ID を比較する. クラスタ ID が同じならば MEP を隣接ノードへブロードキャストし, 違うならばそのクラスタ ID を隣接クラスタとして保存し MEP を破棄する. ここで, MEP は Hello パケットの役割も担っており, MEP を受信したノードはその 1 ホップ前のノードを隣接ノードとして認識する. そして, MEP を受信したノードは MEP に対する応答メッセージとして, 一定時間後に自身の ID と隣接クラスタ情報を付加した MAP を CH に向けて送信する. ここで, MAP は CH のホップ数が長いメンバほど早く送信されるように設定されており, 中継ノードはそれまでに受信した MAP の内容を集約しながら CH まで転送することができる. この MEP, MAP を定期的に送受信することで CH は自身を根とする CHBT を構築し, メンバ情報, 及び, 隣接クラスタ情報の収集やクラスタ内ルーティングに利用している. 図 1 に自律分散クラスタリングの例を示す. 図 1 は A, B, C, D の 4 つのクラスタを示し, 各クラスタは CH を根とする CHBT を構築している.

また, 各メンバは周辺のノードのクラスタ ID を調べることで自身のいるクラスタを認識し, 自身の所属クラスタを遷移させる. ノードの移動に対し, 各ノードが自律的に所属クラスタを変化させることでクラスタの維持を行うことができる. 加えて, 自律分散クラスタリングではクラスタの大きさを制限するために, クラスタを構成するノード数 (以降, クラスタサイズ) にはあらかじめ下限値 L と上限値 U を設定している. CH は

MAP からメンバ数を測定し、クラスタサイズが下限値 L を下回る場合は隣接クラスタと結合を行う。このとき、CH は隣接クラスタ情報を用いて全隣接クラスタのノード数をチェックし、結合後のクラスタサイズが上限値 U を超えないクラスタと結合を行う。クラスタサイズが上限値 U を上回ると、CH はメンバから新たな CH を指定し、二つのクラスタに分割する。メンバの移動などによるクラスタサイズの変化に対し、結合、分割を行うことでクラスタを安定させている。自律分散クラスタリングについての詳細な説明は文献 [2] で述べている。

2.2 階層ルーティングプロトコル Hi-AODV

Hi-AODV [3] は、自律分散クラスタリングに基づいた階層ルーティングプロトコルである。Hi-AODV はクラスタ内ルーティングとクラスタ間ルーティングの二つの処理に分類される。クラスタ内ルーティングはデータパケットの送信は CHBT を用いて行う。データパケットは、まず CH に送信され、そこから目的のノードまで CHBT を用いて配信される。クラスタ間ルーティングでは一つのクラスタを仮想ノードとみなし、AODV [5] の概念に基づいたルーティングを行う。クラスタ間ルーティングに用いるための経路表は各クラスタの CH のみが管理しており、経路の探索・維持はクラスタ単位で行う。また、制御パケットの処理は CH のみが行い、他のノードは転送のみを行うことでルーティング時のオーバーヘッドを抑えている。

以降、本手法を従来手法と呼ぶ。

3. 提案手法

従来手法では MEP の送信間隔がルーティング性能に影響を及ぼすため、ノードモビリティが動的に変化する環境での送信間隔の設定が難しい。また、ノードモビリティは MANET 全体で均一ではなく場所によって異なるため、場所ごとに適応した送信間隔を設定する必要がある。そのため、自律分散クラスタリングにおける、ノードモビリティの変化に対する制御パケットの送信間隔制御手法を提案する。提案手法はクラスタのノードモビリティをその局所情報に基づいて推測し、モビリティに応じて MEP の送信間隔を動的に制御する手法である。以下に、ノードモビリティを推測するための指標と MEP 送信間隔の選択手法を示す。

3.1 ノードモビリティの推測

提案手法はクラスタのノードモビリティの指標を、クラスタ内とクラスタ間の各ノード (v_i) における MEP 送信時間当たりの隣接ノードの変化数 (Dv_i) と定義する。 Dv_i の計算式を以下の式 (1) に示す。ここで、 $D_{link}v_i$ はノード v_i の隣接ノードのうち、任意時間内に新しく隣接ノードとなった、または、隣接ノードではなくなったノードの個数を示し、リンクの変化により CHBT の構成に影響するノード数を表す。また、 $D_{link}v_i$ は式 (2) で計算される。ここで、 Nv_it_j, Nv_it_{j+1} はそれぞれ時刻 t_j, t_{j+1} ($t_j < t_{j+1}$) における、ノード v_i の隣接ノードの集合である。

一方、 $D_{clst}v_i$ は $D_{link}v_i$ に含まれず、クラスタ ID が変化したノードの個数であり、クラスタ ID が変化してクラスタに加入、または、脱退したノードの個数である。 $D_{clst}v_i$ はノード v_i

とのリンクが変更されなかったが、移動によって他のクラスタに移ったノードの集合を示し、クラスタ間のノードモビリティを表す。 $D_{clst}v_i$ は式 (3) から求められ、 Cv_it_j, Cv_it_{j+1} はそれぞれ時刻 t_j, t_{j+1} における、ノード v_i の隣接ノードのうちノード v_i とクラスタ ID が同じノードの集合である。

また、式 (1) の w_1, w_2 は各評価値に対する重みであり、その値によってクラスタ内、クラスタ間のどちらの変化に重点を置くかを示す。

$$Dv_i = w_1 \times D_{link}v_i + w_2 \times D_{clst}v_i \quad (1)$$

$$D_{link}v_i = |(Nv_it_j \cup Nv_it_{j+1}) - (Nv_it_j \cap Nv_it_{j+1})| \quad (2)$$

$$D_{clst}v_i = |(Nv_it_j \cap Nv_it_{j+1}) \cap \{(Cv_it_j \cup Cv_it_{j+1}) - (Cv_it_j \cap Cv_it_{j+1})\}| \quad (3)$$

Dv_i は各ノードが MAP 送信時に計測し、MAP に付加して CH に送信する。CH は MAP 受信後、MEP を送信する際に各ノードが計測した Dv_it_j の最大値 $D_{max}t_j$ を求め、この値をクラスタのノードモビリティと設定する。

3.2 MEP 送信間隔の選択

以下に、MEP 送信間隔の選択手法を示す。提案手法では、CH が MAP によって得られた D_{max} の値を基に MEP の送信間隔を選択する。MEP 送信間隔の選択手順を以下に示す。

まず、MEP の送信間隔 (Tp) を Tp_0, Tp_1, \dots, Tp_4 ($0 < Tp_0 < Tp_1 < \dots < Tp_4$) の 5 通り設定する。 $D_{max}t_j$ に対する閾値を Th_0, Th_1, Th_2, Th_3 ($0 \leq Th_0 \leq Th_1 \leq Th_2 \leq Th_3$) と設定する。そして、 $D_{max}t_j$ と閾値を比較して以下のように送信間隔を設定する。ここでは、現在の送信間隔が $Tp = Tp_i$ の場合について説明する。

- (1) $D_{max}t_j \leq Th_0$ かつ $D_{max}t_{j-1} \leq Th_0$ の場合、 $Tp = Tp_{i+1}$ と設定する。
- (2) $Th_0 < D_{max}t_j \leq Th_1$ の場合、変更しない。
- (3) $Th_1 < D_{max}t_j \leq Th_2$ の場合、 $Tp = Tp_{i-1}$ と設定する。
- (4) $Th_2 < D_{max}t_j \leq Th_3$ の場合、 $Tp = Tp_{i-2}$ と設定する。
- (5) $D_{max}t_j > Th_3$ の場合、 $Tp = Tp_{i-3}$ と設定する。

上記の条件式では、隣接ノード数の変化が少ない場合は Tp を長く調整し、変化が多い場合は Tp を短く設定する。送信間隔を長く設定した場合にはクラスタの構成に直接影響があるため、(1) の条件は過去二回計測した D_{max} がともに閾値以下の場合のみ送信間隔の増加を行っている。また、ノードモビリティが高い場合はリンク切れによりクラスタの維持ができなため、全体的に Tp を短くなるように設定している。CH は MEP を送信する際に、上述した条件式から得られた Tp を次の MEP 送信時刻に設定し、MEP をブロードキャストする。以上のように、CH が MEP の送信間隔を動的に制御することで、ノードモビリティへの対応を行う。

4. 評価実験

提案手法の有効性を示すため、シミュレーション実験により従来手法との比較、評価を行った。

4.1 実験環境

本実験における実験環境を表 1 に示す。また、表 2 は従来手

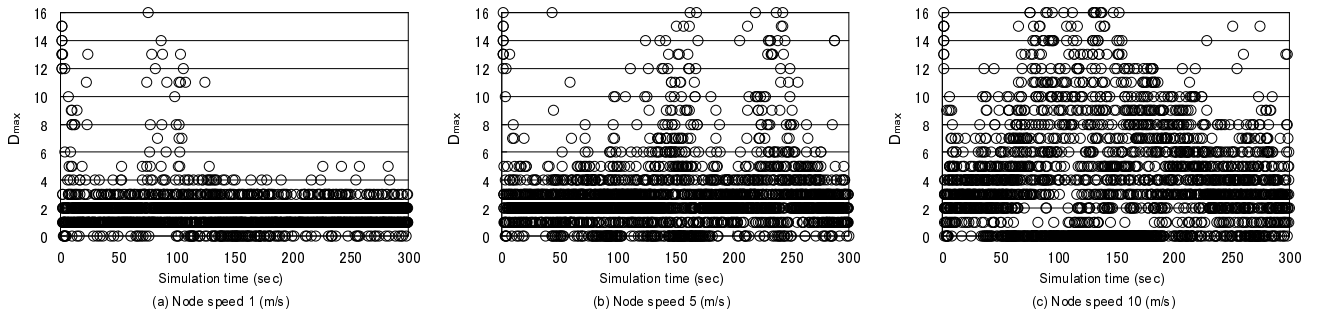


図 2 隣接ノードの変化数

表 1 実験環境

シミュレータ	QualNet ver.4.5 [6]
ノード数	300
フィールドサイズ (m^2)	3000 × 2500
ノードの移動モデル	Random Way Point [7]
ノードの停止時間 (s)	0
シミュレーション時間 (s)	300
パケットタイプ	CBR
パケットサイズ (byte)	512
送信間隔 (s)	0.25
SD ペア数	30

表 2 各手法におけるパラメータ

クラスタサイズ (L, U)	(20, 50)
MEP 送信間隔 (s) Tp_i ($i = 0, 1, \dots, 4$)	(1, 2, 3, 4, 5)
閾値 (Th_0, Th_1, Th_2, Th_3)	(3, 6, 9, 12)
重み (w_1, w_2)	(1, 1)

法, 提案手法で用いるパラメータである. ここで, 表 1 より, SD ペア数とはデータパケットの送受信を行う送信ノードと宛先ノードのペア数を示している. また, 本実験では移動速度が最大移動時間と最小移動時間の間でランダムに変化する環境と, 移動速度が時間とともに段階的に変化する環境において実験を行った.

4.2 予備実験

提案手法では MEP の送信間隔を閾値 Th を用いて行っているため, Th の値が重要なパラメータとなる. 次節以降のシミュレーション実験では提案手法における閾値を $\{Th_0, Th_1, Th_2, Th_3\} = \{3, 6, 9, 12\}$ と設定した. そこで, 予備実験として設定した Th の値の妥当性を調べる. 予備実験では従来手法を用いて, ノードの移動速度に対する D_{max} を計測する. そして, 得られた傾向から Th の評価を行う. 本実験では従来手法の MEP 送信間隔を 1(sec) と設定する. また, ノードの移動速度は 1, 5, 10(m/s) の 3 パターン設定する. ここで, 本実験ではノードの移動速度に対する D_{max} を計測するため, ノードの移動速度はシミュレーション終了まで一定であり, すべてのノードが同じ速度で移動する環境を対象としている.

実験結果を図 2 に示す. 図 2 は各 CH が計測した D_{max} の値を時間ごとにプロットしたものである. 同図の x 軸はシミュレーションの経過時間を示し, y 軸はその時刻における D_{max} の値を示している. また, 図 2 の (a), (b), (c) はノードの移動

速度を 1, 5, 10(m/s) と設定した場合を示している.

まず, 図 2(a) に着目する. 図 2(a) はノードモビリティが低い環境であり, D_{max} の値は全体的に低くなる傾向にある. 特に D_{max} が 3 以下となる割合が高くなっている. ここで, 3.2 節より, 提案手法において MEP 送信間隔を長くする条件は $D_{max} \leq Th_0$ である. MEP 送信間隔を長くする場合は, ノードモビリティが低くなっていることが望ましいため, ノードの移動速度 1(m/s) の場合を一つの指標として Th_0 の値を 3 と設定する. 同様に, 図 2(b) から, D_{max} は 6 以下の割合が高くなっているため, Th_1 を 6 と設定した. また, 図 2(c) から D_{max} が 12 を超えることは稀であり, もし超えた場合はノードモビリティが高くなっていると判断し, 送信間隔を迅速に短くする必要がある. そのため, 送信間隔を最低値に設定するための閾値 $Th_3 = 12$ と設定した. そして, Th_2 は Th_1 と Th_3 の中間値として, $Th_2 = 9$ と設定した.

4.3 シミュレーション実験 1

本実験では, 移動速度が最大移動速度と最小移動速度の間でランダムに変化する環境において, 提案手法と従来手法との比較を行った. 本実験では移動モデルとして, Random Way Point モデルを使用し, 最小移動速度を 1(m/s), 最大移動速度を 1, 5, 10(m/s) と設定した. また, 従来手法は MEP 送信間隔を 1, 2, ..., 5(sec) としたものを評価した. 図 3, 図 4 に各手法におけるデータパケットの到達率, 制御パケットの総バイト数のグラフを示す. ここで, 図 4 は, 送信された制御パケットのうちクラスタ内ルーティングのために送信された制御パケット (主に MEP, MAP) のパケットサイズの合計値を示す. 各図の x 軸はノードの最大移動速度を示す. 図 3 の y 軸はデータパケットの到達率を示し, 図 4 の y 軸は制御パケットの総バイト数を示す. また, 各図の Previous scheme 1, 2, ..., 5 はそれぞれ従来手法で MEP 送信間隔を 1, 2, ..., 5(sec) としたものを示している. そして, 図のエラーバーは 90%の信頼区間を示している.

まず, 従来手法に着目する. 図 3 から, 従来手法は MEP 送信間隔を長くした場合にデータパケット到達率が減少する. また, ノードの移動速度が 1(m/s) の場合は Previous scheme 1 と Previous scheme 2 の間にほとんど差はない. しかしながら, ノードの移動速度が 5, 10(m/s) と増加した場合には Previous scheme 2 は Previous scheme 1 と比べて約 10%低下する. Hi-AODV ではクラスタ内のルーティングを, MEP,

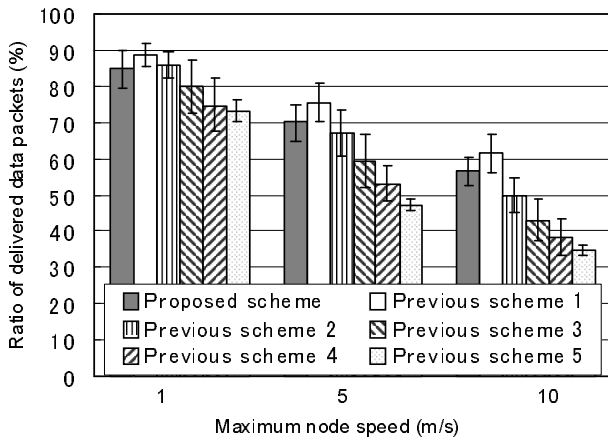


図3 データパケット到達率

MAPの送受信によって構築されるCHBTのみに頼っているため、MEP送信間隔を長くした場合はノードの移動によるリンク切断に迅速に対応できない。また、ノードの移動速度が増加するとリンク切断頻度も増加するため、MEP送信間隔を長くした場合には経路の修復が間に合わずデータパケット到達率が悪化したと考えられる。このことから、ノードモビリティの高い環境でデータパケット到達率を向上させるには、MEPの送信間隔を短く設定する必要があると言える。一方、図4から、従来手法はMEP送信間隔を長くした場合、MEP送信間隔に反比例して送信する制御パケット量が減少することがわかる。従来手法におけるクラスタ内ルーティングでは、制御パケットを定期的に送信しているので、その送信間隔によって送信される制御パケット量が変化する。そのため、制御パケットのオーバーヘッドを削減するためにはMEPの送信間隔を長く設定する必要がある。

次に、提案手法と従来手法の比較を述べる。図3より、提案手法はPrevious scheme 1と比較して、ノードの移動速度にかかわらず5%程度データパケット到達率が減少する。提案手法は制御パケットの送信数を動的に変更している。そのため、Previous scheme 1と比べると、ノードモビリティの高い場合においてもMEP送信間隔が長くなるため、データパケット到達率が低下したと考えられる。一方、図4から、提案手法はPrevious scheme 1と比較して、制御パケットの総バイト数を30~50%ほど削減できたことがわかる。このことから、提案手法の制御パケット削減効果がわかる。以上から、Previous scheme 1と比較した場合のデータパケット到達率の減少は5%程度となっており、また、制御パケット量を抑えたルーティングを行うことができる。そのため、提案手法はノードモビリティに対応して高いデータパケット到達率を維持したまま、制御パケットの送信量を削減できる効率的な手法だといえる。

4.4 シミュレーション実験2

本実験では提案手法の制御パケットの送信間隔制御機能を評価するために、MANET内のノードモビリティが動的に変化する環境を用いて実験を行った。ノードの移動方法はRandom Way Pointモデルを基本にし、各ノードの移動速度をシミュレーション時刻に応じて段階的に設定する。シミュレーション

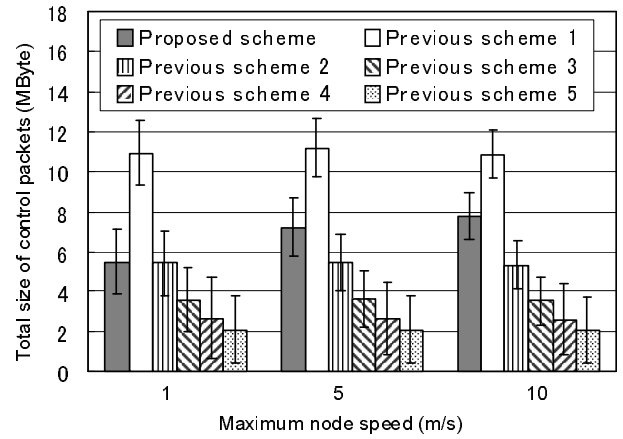


図4 制御パケットの総バイト数

時刻が0(sec)から100(sec)、及び、200(sec)から300(sec)では移動速度を1(m/s)と設定し、100(sec)から200(sec)では移動速度を10(m/s)と設定する。また、シミュレーション中の任意の時刻では全てのノードが同じ移動速度を用いるものとする。

図5、図6に各手法におけるデータパケットの到達率、制御パケットの総バイト数のグラフを示す。各図のx軸は、提案手法、及び、従来手法でMEP送信間隔を1, 2, 3(sec)としたものを示している。また、図5のy軸はデータパケットの到達率を示し、図6のy軸は制御パケットの総バイト数を示す。そして、図のエラーバーは90%の信頼区間を示している。

図5、図6に着目する。図から、従来手法は、MEP送信間隔を長くするとデータパケット到達率、及び、制御パケットの総バイト数ともに減少している。そして、提案手法はPrevious scheme 1と2のほぼ中間の性能を示しており、シミュレーション実験1で示した結果とほぼ同じ傾向を示したことが分かる。

次に図7、図8にシミュレーション時刻に対する、各ノードが送信したMEPの総数とスループットのグラフを示す。各図のx軸は、シミュレーションの経過時刻を示している。また、図7のy軸はMEP送信数の時間変化を示す。ここで、MEP送信数は、ある時刻からそれ以前の10秒間に送信されたパケット数を集計し、それを1秒あたりのMEP送信数に計算してプロットしている。図8のy軸はあて先ノードに到達したデータパケット量から計算されたスループットを2秒単位でプロットしている。

まず、図7に着目する。図7から、従来手法はシミュレーション時刻に依存せずほぼ一定数のMEPを送信していることがわかる。また、MEP送信数はMEP送信間隔によって異なるため、その差が図6で示した制御パケットの総バイト数の差となるといえる。ここで、Previous scheme 2, 3、及び、提案手法はシミュレーション時刻がおよそ20(sec)あたりまでは制御パケットの送信数が高くなっている。この理由として、シミュレーション開始当初はクラスタが安定しておらず、クラスタサイズが(L, U)の間に収束するまでに時間がかかる。クラスタサイズを安定させるために制御パケットを多く送信するため、最初の数十秒はMEPの送信数が多くなったと考えられる。一方、提案手法は110(sec)から210(sec)の間でMEP送信数が

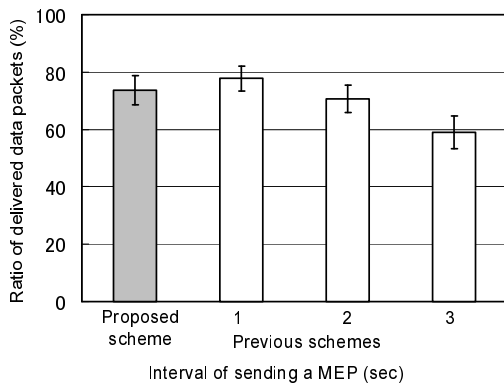


図 5 データパケット到達率

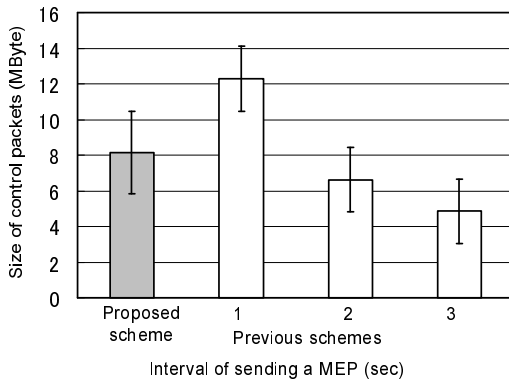


図 6 制御パケットの総バイト数

増加している．本実験では 100(sec) から 200(sec) までノードの移動速度を増加させている．そのため，クラスタのノードモビリティが増加し MEP の送信間隔が短くなるため，MEP の送信数が増加するのだと考えられる．また，ノードモビリティが低いときには制御パケットの送信を抑えていることがわかる．

次に，図 8 に着目する．図 8 は各時刻におけるスループットを示している．シミュレーション時刻が 100(sec) あたりまでは多少のばらつきがあるものの，各手法に差異は見られなかった．しかしながら，100(sec) を越えたあたりで Previous scheme 2, 3 はスループットが低下する．本実験では 100(sec) からノードの移動速度を増加させているため，その影響でスループットが低下したと考えられる．ここで，提案手法は Previous scheme 2, 3 と比べてスループットの低下を抑えている．提案手法はモビリティの増加とともに，MEP の送信間隔を短く設定するため，ノードモビリティの増加によるリンク切断に対応できると考えられる．

5. まとめ

本稿では，ノードモビリティの変化に適応してクラスタ構築のための制御パケット送信間隔を自律的に制御する手法を提案した．また，提案手法と従来手法をシミュレーション実験により比較，評価した．その結果，提案手法はノードモビリティの変化が起こるネットワーク環境において，制御パケットの送信間隔を調整し，制御パケット量を抑えながらスループットを向上させるために有効であることを示した．本手法は，ネットワーク環境の変化を局所情報から推測し，それに基づいて自律

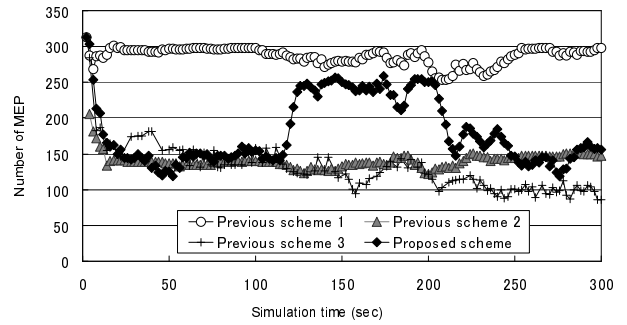


図 7 単位時間当たりの MEP 送信数

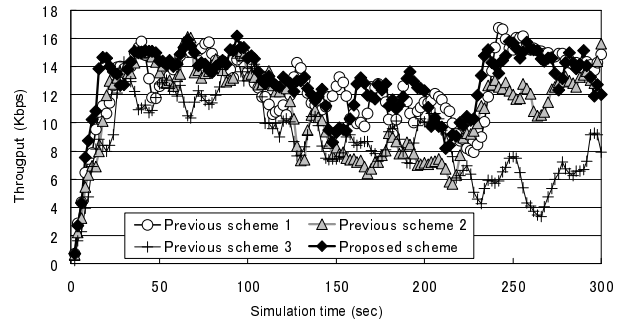


図 8 スループットの時間変化

分散クラスタリングを自己組織化する手法の一例として示した．今後は，ノードの分布密度の変化も考慮した自己組織化手法を検討していく予定である．

謝辞 本研究の一部は，独立行政法人情報通信研究機構高度通信・放送研究開発委託研究/新世代ネットワーク技術戦略の実現に向けた萌芽的研究(課題番号 145-9)，及び，独立行政法人日本学術振興会科学研究費補助金(基盤研究(B) 課題番号 21300028)のもとに実施したものである．ここに記して謝意を表す．

文 献

- [1] Yoshiaki Kakuda, "Assurance Networks: Concepts, Technologies, and Case Studies," Invited Talk, Proc. Second International Symposium on Multidisciplinary Emerging Networks and Systems (MENS), October 2010, to appear.
- [2] T.Ohta, S.Inoue, Y.Kakuda, and K.Ishida, "An adaptive multihop clustering scheme for ad hoc networks with high mobility," IEICE Trans. Fundamentals, vol.E86-A, no.7, pp.1689-1697, 2003.
- [3] T.Ohta, M.Fujimoto, R.Oda, and Y.Kakuda, "A class of hierarchical routing protocols based on autonomous clustering for large mobile ad hoc networks," IEICE Trans. Commun., vol.E87-B, no.9, pp.2500-2510, 2004.
- [4] 小田亮太郎, 日高大輔, 大田知行, 角田良明, "アドホックネットワーククラスタリングにおける隣接ノード数に基づく適応型電力制御法," 電子情報通信学会論文誌 B, vol.J93-B, no.2, pp.211-229, 2010.
- [5] C. Perkins, E. Belding-Royer, and S. Das, "Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing," IETF RFC 3561, 2003.
- [6] "Qualnet network simulator by scalable network technologies," <http://www.scalable-networks.com/>.
- [7] J.Broch, D.A.Malts, D.B.Johnson, Y.C.Hu, and J.Jetcheva, "A performance comparison of multi-hop wireless ad hoc network routing protocols," Proc. ACM/IEEE MOBI-COM'98, pp.85-97, 1998.