

Cluster-by-Cluster ルーティングにおける クラスタヘッド選出手法に関する検討

鳴海寛之[†] 白石陽[‡] 高橋修[‡]

高移動・高通信頻度の大規模アドホックネットワークにおける従来のリアクティブ型プロトコルを用いた通信では、通信経路が長経路となった場合、中継ノードの移動による経路切断や経路構築要求メッセージのネットワーク全体へのフラッディングによって発生する輻輳によりパケット到達率等の通信信頼性が低下することが分かっている。こうした高移動頻度環境への対応能力を向上させる代表的な手法としてクラスタリングが用いられるが、従来のアルゴリズムでは効率的な経路構築が実現可能となるものの、長経路通信によって信頼性が低下するという問題が残されている。そこで筆者らは、クラスタリングにおけるビーコン送受信の仕組みを利用し、長経路通信を複数の短経路通信に分割する手法を提案し、高移動頻度環境において高い効果を発揮することを示した。

本稿では、クラスタリングにおけるクラスタヘッドの選出に焦点を当て、最適なクラスタヘッドをクラスタ内で動的に交替する手法を提案する。また、計算機シミュレーションにより提案手法の有効性を検証する。

A Study on Cluster Head Election Algorithm in the Cluster-by-Cluster Routing

HIROYUKI NARUMI[†] YOH SHIRAISHI^{‡‡}
OSAMU TAKAHASHI^{‡‡}

Existing reactive routing protocols in Mobile Ad-hoc Network (MANET) decrease the packet delivery ratio in the high mobility and traffic environments. This is because the temporary congestion occurs by the flooding of control packets for the route establishment and by the route break in the long route communication. Generally, clustering is effective method to improve the capacity to deal with the node mobility. However, existing algorithm have the problem of the long route communication. Consequently, we proposed clustering and Cluster-by-Cluster routing algorithms that rein the emergence of the long route communication, and showed our approach provides

[†]公立はこだて未来大学大学院
Graduate School of Future University-Hakodate

[‡]公立はこだて未来大学
Future University-Hakodate

the high communication reliability than ever before. In this paper, we focus on a cluster head election in the clustering, and propose the algorithm elect optimal cluster head dynamically.

1. はじめに

近年、無線通信技術の発達と移動無線端末（ノード）の小型化・高性能化に伴い、モバイルアドホックネットワーク（MANET）に関する研究が活発に行われている。MANET は、基地局などの既存インフラに依存せずにノードが即席で形成する自律分散型のネットワークである。MANET ではマルチホップ通信と呼ばれる通信方式を採用しており、通信経路上に位置するノード（中継ノード）がデータを転送することによってエンド-エンド間の通信が実現される。MANET におけるルーティングプロトコルとして、DSR^[1]や AODV^[2]などに代表されるリアクティブ型プロトコルがある。これらのプロトコルでは、データ通信時に利用する通信経路が長経路であるほど、経路構築処理やパケット転送処理によってネットワークに負荷がかかり、パケット到達率やルーティングオーバーヘッドなどの通信信頼性が低下することが知られている。さらに、高移動頻度環境において複数のノードが同時に通信を行うような状況では、長経路通信による輻輳が生じやすくなり、著しく通信信頼性が低下する。そのため、高移動・高通信頻度のネットワークにおいて安定した通信を実現するためには、長経路通信の発生を抑制する必要がある。高移動頻度環境への対応能力を向上させる代表的な手法としては、クラスタリングを用いた階層型ルーティングが挙げられる^{[3]-[7]}。一般的な階層型ルーティングでは、クラスタリングによる経路構築処理の効率化によって、ルーティングオーバーヘッドの削減やパケット到達率の向上などといった効果を得ることができる。しかし、長経路通信が発生するという問題は依然として残ったままである。そこで本研究ではこれまでに、階層型ルーティングをベースとし、クラスタリングの仕組みを応用することによって長経路通信を複数の短経路通信に分割するという Cluster-by-Cluster ルーティングを提案し、従来よりも通信信頼性を向上できることを示した^[8]。しかし、この手法はクラスタの代表ノードであるクラスタヘッドが固定的に配置されていることを前提としていたため、全ノードが移動するような環境には適用することが難しかった。

そこで本稿では、Cluster-by-Cluster ルーティングの拡張という位置付けのもと、クラスタヘッドも含めたネットワーク上の全ノードが移動する場合を考慮し、クラスタ内で最適なクラスタヘッドを動的に選出・交替する手法を提案する。提案手法は計算機シミュレーションによって評価を行い、その有効性について検証する。

2. 関連研究

ここでは、MANET における一般的な階層型ルーティングについて触れ、長経路通

信という視点からみた場合の課題について述べる。

2.1 階層型ルーティング

高移動頻度のネットワーク環境下で高信頼の通信を提供するために、これまでに CBRP (Cluster Based Routing Protocol) ^[4]をはじめとする様々な階層型ルーティングアルゴリズムが提案されている。一般的な階層型ルーティングにおけるクラスタリングの概念図を図 1 に示す。MANET におけるクラスタリングでは、物理的に近いノード同士がクラスタヘッド (CH: Cluster Head) を中心とするクラスタを形成する。CH は自クラスタに現在所属しているノードの情報を集中管理する。異なるクラスタの境界に位置するノードはクラスタゲートウェイ (CG: Cluster Gateway) として、クラスタを跨ぐ通信時の橋渡しとしての役割を担う。CH 及び CG 以外のクラスタに参加しているノードはメンバノード (MN: Member Node) と呼ぶ。

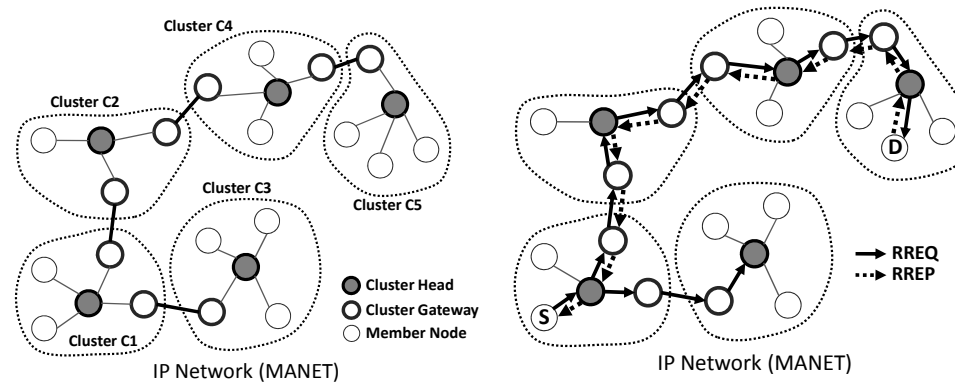


図 1 MANET におけるクラスタリング

ネットワークを複数のクラスタに分割することにより、経路探索時に発生する制御メッセージ(RREQ: Route Request^a及びRREP: Route Reply^b)を大幅に抑制することが可能となる。既存のアドホックルーティングプロトコルにおける経路探索処理では、最悪の場合、経路構築の際にネットワーク上のほぼ全てのノードが経路構築に参加する必要があり、制御メッセージ(RREQ, RREP)がネットワークの広範囲にフラディング

a) Route Request: 経路探索の際に送信元ノードを基点として周囲に送信される経路要求メッセージ。
b) Route Reply: 経路探索の際に宛先ノードが送信元ノードに返信する、経路探索処理によって構築された宛先ノードまでの経路情報が付加されている。

されてしまう。これに対し、階層型ルーティングではクラスタを形成することによりネットワーク上の各CHにのみ経路要求メッセージ(RREQ)を送信するだけでよい(図 2)。各CHは自身が管理するクラスタに所属しているノードのリストを参照し、宛先ノードが含まれていなければRREQを破棄もしくは隣接するクラスタに転送する。この仕組みにより、任意のノードに対する経路を低負荷かつ素早く形成することができるため、クラスタリングベースのルーティングプロトコルは既存のアドホックルーティングプロトコルに比べてノード移動への対応能力が高いということが知られている。

しかし、ノード数の多い大規模ネットワークにおいて送信元ノードと宛先ノードとの距離が大きい場合、従来の階層型ルーティングアルゴリズムでは経路探索によって構築される通信経路は必ずと多くの中継ノードを介す長経路通信となってしまう(図 2, 図 7b)。このような経路を利用してパケットを送信した場合、中継ノードの移動による経路切断の可能性が高まり、パケット到達率が低下するという悪影響を及ぼす。CBRP など一部の階層型ルーティングアルゴリズムには既存のリアクティブ型プロトコルが備えるような経路修復や経路メンテナンスと同等の機能を備えているものもあるが、長経路通信の発生自体を抑制するというアプローチはほとんど存在しない。そこで本研究では、オーバーレイネットワークの概念を導入し、パケットの転送経路を短く区切りながら転送する“Cluster-by-Cluster ルーティング”というアプローチを提案した^[8]。

3. Cluster-by-Clusterルーティング

本章では、Cluster-by-Cluster ルーティングの概要と課題について述べる。

3.1 クラスタリング基本戦略

Cluster-by-Cluster ルーティングでは、オーバーレイネットワーク上でクラスタリングを行う。そして、複数のクラスタを跨ぐ場合に発生する長経路通信を複数の短経路通信に分割するために、ネットワーク上に存在しているクラスタの位置関係を各クラスタで調査する。この処理は、CH がクラスタ内に定期的にブロードキャストするビーコンメッセージを利用して Neighbor Feedback と呼ばれる各クラスタの“隣接クラスタ情報”を取得することで行われる。例えば、ノード A がクラスタ C2 に属していた場合、A が C1 の CH に返信する Neighbor Feedback には、これまで C2 からのビーコン受信時にローカルに保存していた隣接クラスタ情報に加え、“C2 は C1 に隣接している”という旨を新たな隣接クラスタ情報としてセットする。この Feedback によって、各クラスタの CH は自クラスタに隣接するクラスタの情報を収集することができる(図 3)。そして、クラスタ C1 の CH が次回ビーコンをクラスタ内にブロードキャストする際は、ビーコンに“C1 に隣接するクラスタは C2 である”という情報を追加し、さらにこれまで収集した最新の隣接クラスタ情報をセットして送信する。この処理を

各クラスタが定期的に行うことにより、最終的にネットワークに参加している全ノードが現在ネットワーク上に存在している全てのクラスタの隣接クラスタ情報を集めることができる(図4)。

このビーコン送信と Neighbor Feedback 返信の仕組みにより、各クラスタに属するノードは自クラスタを基点とするネットワーク上の他クラスタとの相対的な位置関係を把握することができる(図5)。このクラスタの相対的な位置関係をクラスタマップと呼ぶ。

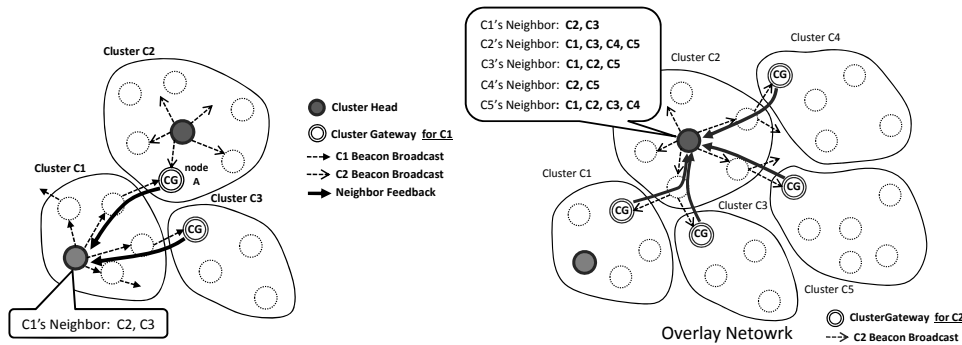


図3 Neighbor Feedbackによる隣接クラスタ情報の収集(1)

図4 Neighbor Feedbackによる隣接クラスタ情報の収集(2)

の場合は、各クラスタのCGをオーバレイネットワーク上の宛先ノードとして指定することで、クラスタ単位で通信が自動的に分割される(図6)。これにより、従来での送信元ノードから宛先ノードまでの一本の長経路が、各クラスタを単位とする短経路に分割される(図7a)。また、パケットの転送に使用される短経路はCHのビーコンの送受信時に各ノードが経路をキャッシュすることにより、パケット転送時に経路探索を行う必要がないため、高いパケット到達率を実現するだけでなくルーティングオーバーヘッドの削減も可能となる。

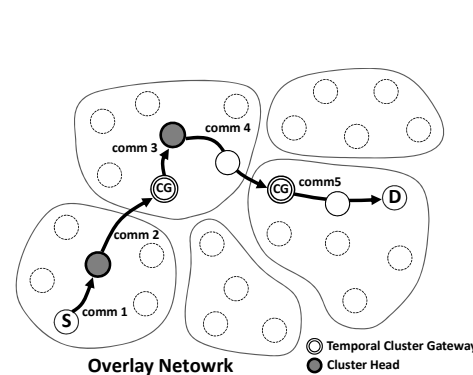
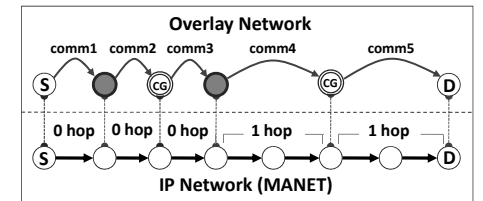
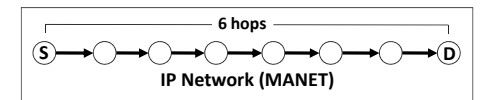


図6 Cluster-by-Cluster ルーティング

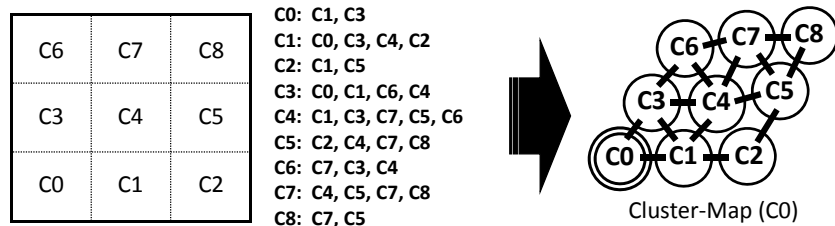


a) Cluster-by-Cluster ルーティングにおける通信分割



b) 従来の階層型ルーティングの通信経路

図7 従来の階層型ルーティングと Cluster-by-Cluster ルーティングの違い



a) C0のCHが収集した隣接クラスタ情報

b) C0で生成されるクラスタマップ

図5 隣接クラスタ情報からのクラスタマップ生成

3.2 ルーティング (通信分割)

ノードがパケットを送信する際は、クラスタの位置関係をもとに宛先ノードが所属するクラスタまで Cluster-by-Cluster でパケットを転送していく。クラスタを跨ぐ通信

3.3 課題

従来までの Cluster-by-Cluster ルーティングスキームは、CHを固定的に配置した状態でのみルーティング可能であったため、CHを含む全ノードが移動するような高移動頻度のネットワーク環境ではこの方式を適用することが難しかった。そこで本稿では、全ノードが移動する環境下でも動作するよう、Cluster-by-Cluster ルーティングにおける最適なCH選出手法を提案する。

4. 提案手法

本章では、まず4.1節で Cluster-by-Cluster ルーティングにおけるクラスタリングに求められる要件について述べる。4.2節で提案手法の基本的な考え方を、4.3節ではCH選出アルゴリズムの構成要素について述べる。そして4.4節以降でCH選出アルゴリズムをはじめとする、各種クラスタリング手法を提案する。

4.1 Cluster-by-Clusterルーティングにおけるクラスタリング要件

Cluster-by-Cluster ルーティングでは、各ノードはパケットを送信する際に、自クラスタを基点とするクラスタマップを基に宛先ノードまでのオーバレイネットワーク上の経路（通過するクラスタ）を決定する。各クラスタでは、他クラスタからのビーコンによって伝播されてくる隣接クラスタ情報から、自クラスタを基点とするクラスタマップを把握する。そのため、他クラスタで隣接するクラスタに変化があった場合、自クラスタが最新の情報を入手するまでに数回のビーコン送信を待たなければならない。図8は、クラスタC1と隣接していたクラスタC3がCHの移動に伴いクラスタ自体が移動し、クラスタC2に隣接した場合のクラスタマップの更新の最短の流れを示したものである。C3が移動した後、C2のCHがビーコンを送信すると、C3からNeighbor Feedbackが返信される。これによりC3のクラスタマップが更新される。次に、C1のCHがビーコンを送信すると、同様にC2の隣接クラスタ情報に変化があったことを知り、自身のクラスタマップを更新する。最終的に、C0がC2の隣接クラスタに変化があったことを知るまでに、少なくとも各クラスタ1回ずつのビーコン送信を待たなければならない。

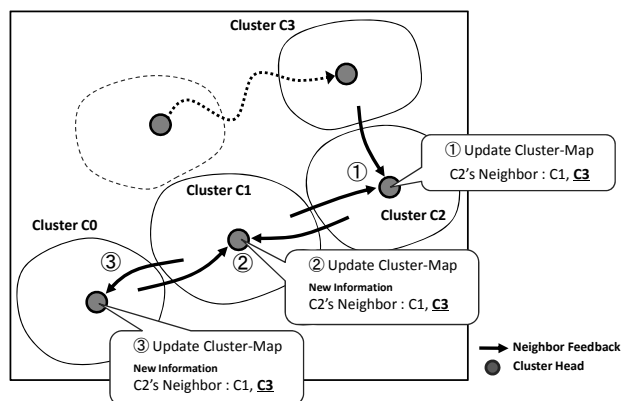


図8 他クラスタの更新情報の取得

こうした理由から、それぞれのクラスタで頻繁に隣接するクラスタが変わってしまうと、それぞれのクラスタで保持するクラスタマップの内容に大きな差異が生まれ、クラスタのオーバレイネットワーク上の経路制御に乱れが生じやすくなる可能性がある。例えば、図9に示すように、クラスタC0に属する送信元ノードSが、クラスタC6に属する宛先ノードDにパケットを送信する場合を考える。図の各クラスタマップにおけるクラスタ同士を結ぶ実線は、それらのクラスタが隣接していることを表し

ている。まず、クラスタC6がCHの移動に伴いクラスタC5の隣に移動したとする。このとき、クラスタC5及びC4のビーコン送信によってC4までクラスタマップが更新されたとする。しかし、ノードSが属するクラスタC0はまだその更新情報を取得していないため、ノードSは現在のクラスタマップからノードDが属するクラスタまでのオーバレイネットワーク上の経路（通過するクラスタ）を決定する。ノードSがクラスタマップを基に“C0⇒C1⇒C4⇒C6”という経路を構築し、パケットをCluster-by-ClusterでC1、C4と転送していったとすると、クラスタC4の転送ノードFは自クラスタのクラスタマップを参照し、宛先クラスタC6が現在C4に隣接していないことを検知する。このような状況ではクラスタC4からクラスタC6までの新鮮な短経路を使用することができないため、転送ノードFは迂回経路（“C4⇒C5⇒C6”）を作成して転送するか、そのまま直接送信するなどの例外処理を行わなければならない。このように、多くのクラスタが頻繁に移動すると、パケットを転送する際に例外処理が頻発し、最悪の場合パケットの転送に失敗してしまう可能性がある。

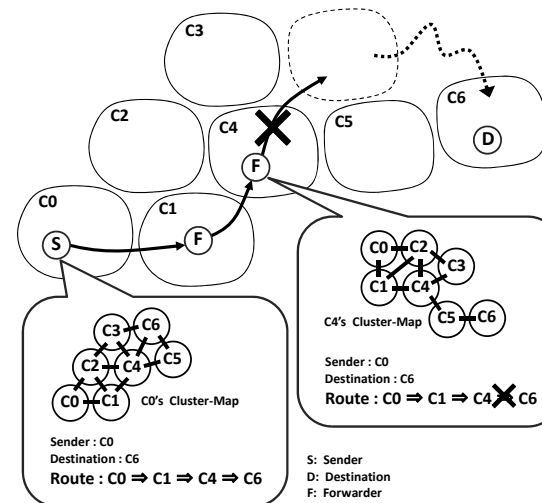


図9 クラスタの移動による経路制御の乱れ

以上の理由から、最も効率的にCluster-by-Clusterルーティングを行うためには、

- CHが移動する場合でもクラスタ自体は初期位置から移動しないこと
- 各クラスタの相対的位置関係に大きな変化が生じないようにCHを選出・交替すること

の2点が求められる。よって提案手法では、この要件を満たすCH選出アルゴリズム

ムを設計する必要がある。

4.2 基本的な考え方

提案手法では、CHが移動してもクラスタの位置が変化しないよう、あらかじめシステムパラメータとしてクラスタの配置ポイントを位置情報によって指定する。このクラスタを配置するポイントを、クラスタポイントと呼ぶ。クラスタ内でのCHの選出は、評価値 E_n と呼ばれる指標を用いて各ノードが自律的に動作することで行い、基本的にCH選出のためのノード間での通信は発生しない。そして E_n の値が最小であるノードがCHとして選出され、ビーコンをクラスタ内にブロードキャストすることで、常にクラスタポイントに近い位置でクラスタを形成する(図10)。さらに、CHは自クラスタに属するノードのアドレスを管理する。パケットを送信しようとするノードが“現在宛先ノードがどのクラスタに属しているか”を調べる際には、各CHに問い合わせを行うことで知ることができる。

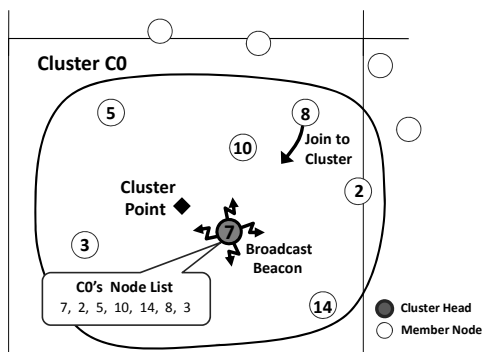


図10 クラスタリングの概要

4.3 CH選出アルゴリズムの構成要素

提案手法では、各ノードが位置情報を取得できることを前提とする。近年、GPS (Global Positioning System) 等の位置情報を測定する技術の進歩に伴い、多くの移動無線端末に自身の位置情報を測定する機能が搭載されている。LAR^[9]やGPSR^[10]などといった位置情報を使用した通信プロトコルも数多く研究されているなど、この前提は現実的なものであるといえる。提案手法ではクラスタポイントと呼ばれる位置情報と、各ノードの現在の位置情報及び平均移動速度をもとに、クラスタ内で最適なCHを選出する。

(1) クラスタポイント

提案手法ではあらかじめクラスタの配置ポイントを位置情報によって指定する。こ

の位置情報によるクラスタの設置ポイントを、クラスタポイントと呼ぶ (CP: Cluster Point, 図11の菱形図形)。ネットワーク上のノードは、このクラスタポイントを基準点としてクラスタを形成する。クラスタポイントは、ネットワークを起動する際に、1つの初期CHに対して1つのクラスタポイントを割当てて。そして各CHがビーコンを送信すると返信されてくるNeighbor Feedbackによって他クラスタのクラスタポイントの情報を収集する。それを隣接クラスタ情報の伝播と同様、自クラスタに属しているノードにビーコン情報の一部として再度通知することでネットワーク上の全ノードが各クラスタポイントを把握することができる。

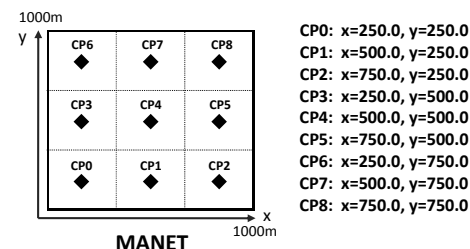


図11 クラスタポイント

(2) ノードリスト

一般的な階層型ルーティングと同様、CHは自クラスタに現在所属しているノードのアドレスを管理している。このノードアドレスのリストを提案手法ではノードリストと呼ぶこととする。

(3) ビーコンメッセージ

ビーコンメッセージに付加されている情報のうち、以下の情報をCH選出の際に使用する。

- 隣接クラスタ情報 (クラスタ ID)
- シーケンス番号
- ビーコン送信元クラスタのノードリスト

4.4 CH選出アルゴリズム

4.4.1 評価値 E_n

提案手法では、クラスタヘッドを選出するための指標として評価値 E_n を導入する。クラスタ n のクラスタポイントとの距離を d 、ノードの平均移動速度を v_{avg} としたとき、ノードは、次の式(a)によってクラスタ n に対する評価値 E_n を算出する。 C は距離 d に対する E_n の変化量を調整するための定数である。

$$E_n = C \times d + \sqrt{v_{avg}} \log_{10}(v_{avg} + 1) \quad (a)$$

位置情報を取得する時などを契機に、各ノードは各クラスタポイントに対する E_n を定期的に算出する。この定期的な算出に加えて、各ノードがビーコンを受信した際にも、ビーコン送信元クラスタのクラスタポイントに対する E_n を算出する。

提案手法では、“クラスタポイントに近く、かつ平均移動速度がより低速である”ノードを最も適した CH とみなす。つまり、クラスタ n において CH として選出されるノードは、 E_n の値が最小となるノードである。

4.4.2 新規CHの選出

クラスタ n に属しているノードが CH からのビーコンを受信した際、以下の処理を行い、新たな CH を選出する。

- i) 自クラスタ n のビーコンを受信した各ノードは、受信直後から $BASE_INTERVAL$ 秒間待機する (図 12)。その間各ノードは移動している。
- ii) $BASE_INTERVAL$ 秒経過後、各ノードは自身の現在位置とクラスタ n のクラスタポイント間との距離 d を算出する。そして d とある一定期間の自身の平均移動速度を元に、各ノード固有の E_n を算出する。
- iii) さらに各ノードは E_n 秒間待機する (図 13)。
- iv) 最終的に最も早く E_n 秒を消化し終えたノードが、新たな CH としてビーコンを送信する。ビーコンを送信する際は、前回自分がクラスタのメンバノードとして受信したビーコンの情報を流用する。具体的には、隣接クラスタ情報とノードリストはそのまま流用し、シーケンス番号は前回のビーコンの値をインクリメントしてセットする (図 14)。
- v) 新たなビーコンを受信したメンバノードは、その時点で待機を止め、ビーコンの情報をローカルに保存する。CH であったノードが他ノードから新たなビーコンを受信した場合は、新 CH に自分が管理していたノードリストを転送し、CH からメンバノードに遷移する (図 14)。
- vi) 新 CH は旧 CH から受信した最新のノードリストをローカルに保存する。
- vii) (1)に戻る。

上記の手順により、ビーコンの受信を契機にクラスタ内で常に最適な CH が選出されることになる。

4.4.3 重複ビーコンの抑制

CH 選出処理では、最も早く E_n 秒を消化したノードが新たな CH となる。そのため、 E_n の値が非常に近いノードが複数存在する場合、ほぼ同時に新 CH としてビーコンを送信し始めてしまう可能性がある。そこで提案手法では、以下の手順によってビーコンの重複送信を抑制し、無駄な制御メッセージの発生を防ぐ。

- i) 同一クラスタから既に受信したビーコンのシーケンス番号と同じ値のビーコン (重複ビーコン) を受信した場合、クラスタ内には複数の CH が存在していると判断する。

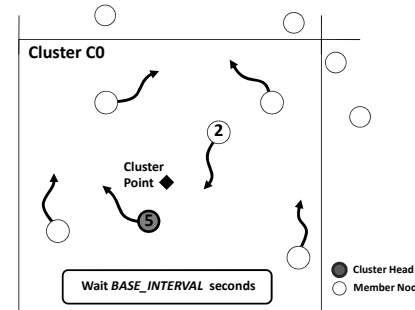


図 12 新規 CH の選出(1)

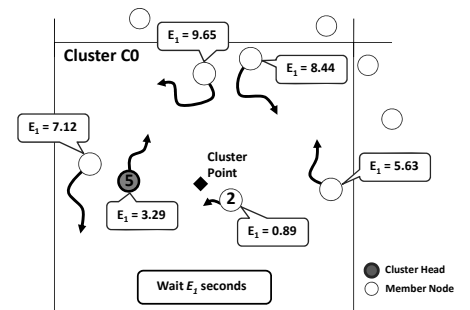


図 13 新規 CH の選出(2)

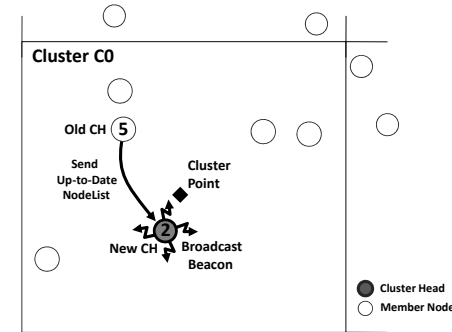


図 14 新規 CH の選出(3)

- ii) ビーコンの転送回数の制限を超えていなくても、受信した重複ビーコンは破棄する (転送しない)。

4.5 隣接クラスタへの移動

4.5.1 基本方針

ノードがクラスタの境界に位置している場合、自クラスタだけでなく隣接するクラスタからのビーコンも受信することになる。このとき、現在所属しているクラスタに対する評価値と隣接するクラスタに対する評価値を比較し、より適切なクラスタへの移動処理を行う。隣接クラスタへの移動処理は以下の条件と手順のもとで行う。

- i) 現在参加中のクラスタ m に対する評価値を E_m 、隣接クラスタ n に対する評価値を E_n とすると、以下の条件式(b)を満たす場合のみノードは隣接クラスタ n に移動する (図 15)。

$$E_m - E_n > ID_UPDATE_THRESHOLD \quad (b)$$

- ii) 条件式(b)を満たす場合、ノードは現在所属しているクラスタ m の CH に“離脱メッセージ”を送信する。さらに、移動先クラスタ n の CH に“参加メッセージ”を送信する。以上でクラスタの移動が完了する。評価値の差が閾値を超えない限りクラスタを移動できないようにすることで、クラスタの境界付近を右往左往するノードの無駄なクラスタ移動を防ぐことができる。
- iii) 条件式(b)を満たさない場合、ノードはクラスタ間の境界ノードとしてビーコンの送信元であるクラスタ n の CH に Neighbor Feedback を返信する。

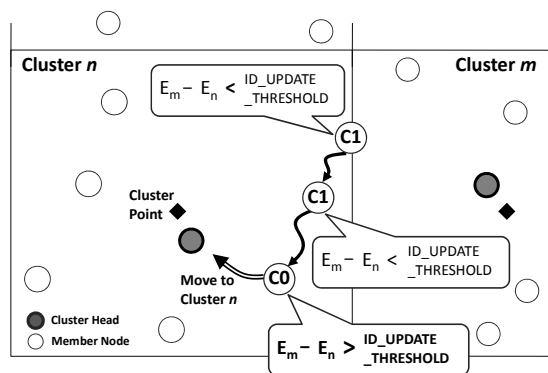


図 15 閾値による ID 更新の判断

(1) クラスタ離脱処理

ノードが現在所属しているクラスタから離脱する場合、以下の処理を行う。

- i) ノードは離脱するクラスタの CH に“離脱メッセージ”を送信する。
- ii) 離脱メッセージを受信した CH は、自身が管理するノードリストから離脱ノードのアドレスを削除する。そして離脱ノードに“ACK メッセージ”を返信する。

(2) クラスタ参加処理

ノードが新たにクラスタに参加する場合、以下の処理を行う。

- i) ノードは参加するクラスタの CH に“参加メッセージ”を送信する。
- ii) 参加メッセージを受信した CH は、自身が管理するノードリストに新規参加ノードのアドレスを追加する。そして新規参加ノードに“ACK メッセージ”を返信する。

4.6 クラスタの消滅

全てのノードがクラスタから離脱すると、そのクラスタは消滅する。提案手法では、クラスタに残る最後のノードは CH であり、この CH が隣接クラスタに移動した時点でそのクラスタが消滅することになる。

4.7 新規クラスタの生成

あるクラスタポイントに対するクラスタがまだ存在していない場合、以下の 2 つの条件のいずれかを満たすときのみノードはクラスタの生成を試みる。

- (1) クラスタポイントに対する評価値 E が閾値 R 未満となり、かつそのクラスタからのビーコンを一定期間受信していない場合、クラスタの生成を試みる (図 16)。
- (2) 一定時間どのクラスタからもビーコンを受信できなかった場合、最寄りのクラスタポイントに対するクラスタの生成を試みる (図 17)。

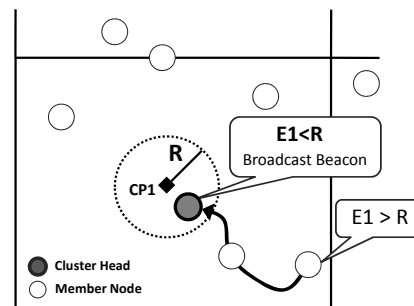


図 16 クラスタの生成(1)

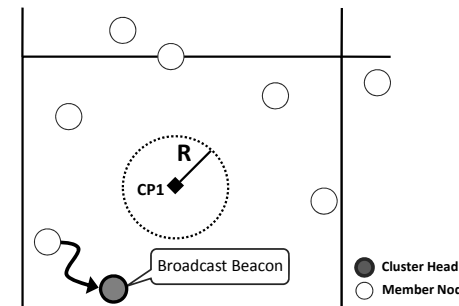


図 17 クラスタの生成(2)

5. 実装と評価

5.1 シミュレーション条件

今回、提案手法を代表的なリアクティブ型プロトコルである DSR の上位に実装し、ns-2^[11]による性能評価を行った。主なシミュレーションパラメータを表 1 に示す。DSR の Flow State 拡張は RFC4728 においてオプション機能として定義されているが、本稿では使用しない。ネットワークサイズは 1000m×1000m、及びノード数は 100 で固定とする。各ノードはランダムな目的座標に最小移動速度 V_{min} (1.4m/s で固定) から最大移動速度 V_{max} (1.4m/s から 10.0m/s) での移動速度でランダム時間直進し、また新たな目的座標を選択し移動する、という動作を繰り返す。このとき、ポーズタイムを 0.0 秒としているため、各ノードは停止すること無く絶えず移動し続ける。つまり、本実験において構築されるネットワークは高移動頻度のネットワークであるといえる。

以上の条件のもと、シミュレーション開始直後に初期 CH がビーコンの送信を開始し、クラスタリングを行う。各初期 CH に与えるクラスタポイントは図 11 に示した例と同じ設定を使用し、クラスタポイント 0 (CP0: Cluster Point 0) を中心に形成される

クラスタをクラスタ 0 (C0 : Cluster 0) と呼ぶこととする。評価値 E_n の算出には式(a)を使用する。なお、今回ノードは一切のデータ通信を行わず、純粋にクラスタリング処理のみを行う。

5.2 性能評価と考察

5.2.1 定数Cの最適値

本項では、評価値 E_n の算出の際に使用した式(a)において、定数 C の最適値について評価する。

表 1 シミュレーションパラメータ一覧

ネットワークパラメータ	
ネットワークサイズ	1000m × 1000m
ノード数	100
シミュレート時間	1200秒
ノード移動速度($V_{min} - V_{max}$)	1.4 - 1.4, 1.4 - 2.5, 1.4 - 5.0, 1.4 - 7.5, 1.4 - 10.0 (m/s)
移動モデル	Random Waypoint
ポーズタイム	0.0秒
無線伝達半径	250m
帯域幅	2Mbps
DSRの主なオプションパラメータ	
dsragent_salvage_with_cache	true
dsragent_use_tap	true
dsragent_ring_zero_search	true
dsragent_enable_flowstate	false
提案方式の主なオプションパラメータ	
クラスタ(クラスタポイント)数	9
ビーコン送信間隔(非常状態)	2秒
BASE_INTERVAL(定常状態)	15秒
ID_UPDATE_THRESHOLD	2.0
平均移動速度	最大15秒間の平均値
ビーコンTTL(k)	1
Neighbor Feedback最大返信数(p)	3

(1) CH 交替数による比較

式(a)の定数 C の値を 0.01 から 0.05 まで変化させた場合の、ノード移動速度に対するシミュレーション時間中の CH 交替回数の合計を図 18 に示す。C=0.01 の場合、 E_n の値が他の定数値よりも小さくなり、ビーコン送信間隔が短くなる。そのため、CH がビーコンを送信する(新たな CH を選出する)機会が増え、ノード移動速度が高速になるにつれて CH の交替数が増加したものと考えられる。C=0.02 から 0.05 に関しては大きな差がみられないため、CH 交替数だけでは最適値を判断することは難しい。ただし、これらは C=0.01 と比べて全体的にノード移動速度が高速になるにつれて CH 交替数の増加を抑えられていることが分かる。これは、C=0.01 よりも式(a)における距離 d が与える E_n への変化量の割合が大きくなったためである。ノード移動速度が高速

なネットワーク環境下では、クラスタポイントから離れている低速ノードよりも、多少高速に移動していてもよりクラスタポイントに近いノードが CH として選出されるようになる(クラスタポイントに近く、かつその中で最も低速なノードが選ばれる)。その結果、CH としての動作時間が長くなり、結果的に C=0.01 よりも CH 交替数の増加率を抑えられたと考えられる。

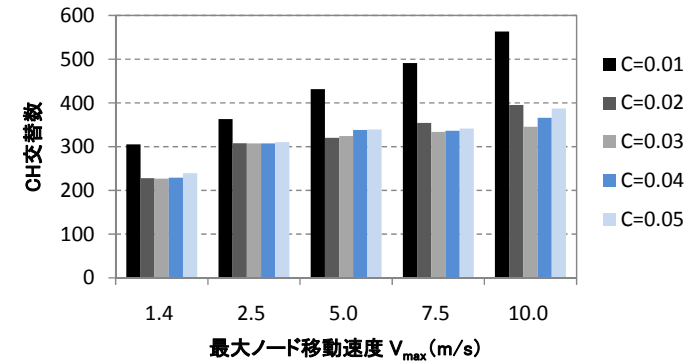


図 18 ノード移動速度に対する CH 交替回数

(2) オーバヘッドによる比較

次に、式(a)の定数 C の値を 0.01 から 0.05 まで変化させた場合の、ノード移動速度に対するオーバヘッドを図 19 に示す。ここでオーバヘッドとは、クラスタリングを行うために発生した全ての制御メッセージ数の合計を指す。グラフが示すように、定数 C の値が大きくなるにつれてオーバヘッドも減少し、C=0.05 の場合に最も少ないことが分かる。これは、C の値を大きくすると E_n の値が大きくなることでビーコン送信間隔が長くなり、それに伴う Neighbor Feedback の返信処理やクラスタ離脱・参加処理の機会が減少することによるものであると考えられる。この過程を支持するデータとして、各定数値におけるノード移動速度に対する CH の評価値 E の平均値を図 20 に示す。グラフが示すように、C=0.01 の場合を除いて、C の値を大きくすると評価値の値も大きくなることが分かる。CH のビーコン送信間隔は (BASE_INTERVAL + E_n) 秒であることから、C の値を大きくするとビーコン送信間隔が長くなり、シミュレーション時間中のビーコン送信回数が減少し、結果としてオーバヘッドも減少することになる。また、ノード移動速度が高速になるにつれて評価値は高くなっていく。これは式(a)において、第 2 項 (速度) の変化量が大きくなったことが要因として挙げられる。

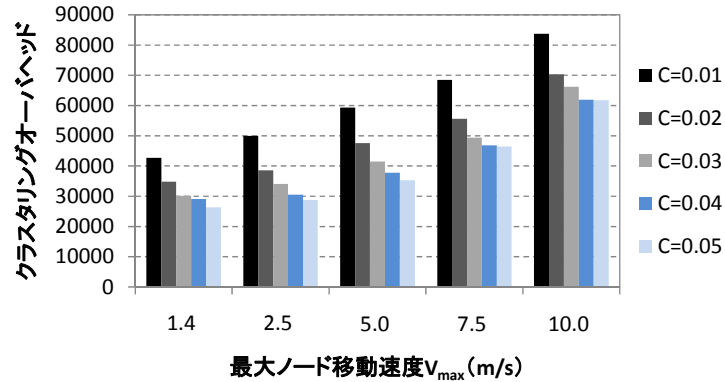


図 19 ノード移動速度に対するクラスタリングオーバーヘッド

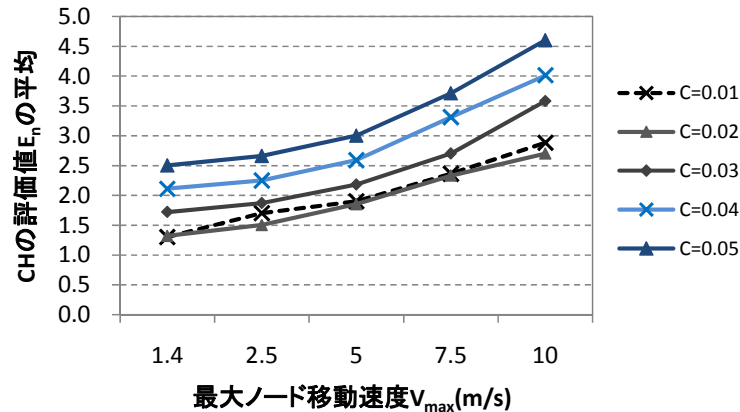


図 20 ノード移動速度に対する CH の評価値の平均

(3) 結論

提案手法において、評価値 E_n の算出に式(a)を用いる場合、クラスタリングのオーバーヘッドが最も少なくなる $C=0.05$ が最適値であるといえる。また、Cluster-by-Cluster ルーティングでは、ビーコン送信/Neighbor Feedback 返信を契機に、各ノードが自身の使用する短経路を生成・更新するため、ノードが高速に移動する場合 (10.0m/s) の CH のビーコン送信間隔は 20 秒未満に設定しなければならないことが分かっている。ビーコン送信間隔は $(BASE_INTERVAL + E_n)$ 秒であり、今回のシミュレーションでは $BASE_INTERVAL=15.0$ 秒と設定している。図 20 より、 $V_{max}=10.0m/s$ のとき、 $C=0.05$ の場合の CH の評価値 E_n の平均値は 4.6 であり、このビーコン送信間隔の条件を満た

している。

5.2.2 クラスタの位置関係

$C=0.05$, $V_{max}=5.0m/s$ の場合の式(a)における、時間経過ごとのクラスタの位置関係を図 23~25 に示す。図 21 はシステムパラメータであるクラスタポイントによって指定したクラスタの形成位置である。そして図 22 は、設定したクラスタポイント (図 11) をもとに、動的に選出された各クラスタの CH がビーコンを送信した際の座標をプロットしたものである。各 CH が互いに混ざり合うことなくビーコンを送信していることが分かる。このように、CH が常にクラスタポイント付近でビーコンを送信することで、クラスタの絶対的な位置関係が変わりにくくなり、ルーティングの際に必要なクラスタの相対的な位置関係の情報 (クラスタマップ) にもほとんど変化を与えずにクラスタを形成することが可能となる。

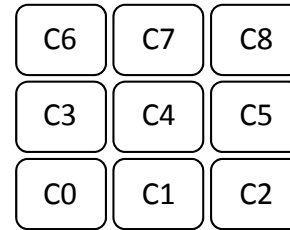


図 21 クラスタポイントにより指定したクラスタ形成位置

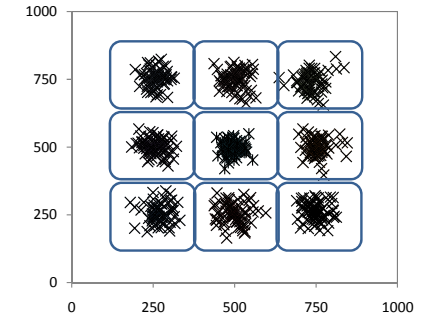


図 22 クラスタヘッドのビーコン送信位置

次に、指定したそれぞれの位置に時間経過後もクラスタが位置し続けているかを評価する。図 23 はクラスタ生成直後を表したもので、図 21 とほぼ同位置に各クラスタが形成され、かつ全ノードがクラスタに参加できていることが分かる。さらに、図 24 及び図 25 はそれぞれ 500 秒経過後と 1000 秒経過後を表したものである。これらの図が示すように、ノードが頻繁に移動する環境下でも各クラスタポイントの周辺にクラスタを形成し、CH を交替しながらも 5.0 秒経過後とほぼ同じ位置にクラスタを維持し続けていることが分かる。Cluster-by-Cluster ルーティングでは、オーバーレイネットワーク上のクラスタの相対的な位置関係 (クラスタマップ) をもとに経路制御を行う。そのため、クラスタの位置関係を初期状態のまま維持し続けることが、効率的にルーティングを行うために最も不可欠な要素である。これらの図が示す結果から、提案手法は、4.1 節で述べた Cluster-by-Cluster ルーティングにおけるクラスタリング要件を満たしている」と結論づける。

6. おわりに

本稿では、これまでの Cluster-by-Cluster ルーティングの課題であった CH の移動に対応するべく、クラスタポイントという概念を導入し、動的に CH を選出するアルゴリズムを提案した。また、高移動頻度環境下において Cluster-by-Cluster ルーティングが安定して動作するよう、クラスタの位置関係を崩さずに CH を選出するという要件を設定し、ns-2 によるシミュレーションによって提案手法がその要件を満たしていることを確認した。ただし、今回評価値 E_n の算出に使用した式(a)については、ノードの移動方向なども考慮に入れるなど、さらなるチューニングを行う必要があると考えている。今後は今回提案した手法をもとに、CH を含む全ノードが移動する環境下での Cluster-by-Cluster ルーティングの通信信頼性等の性能評価を予定している。

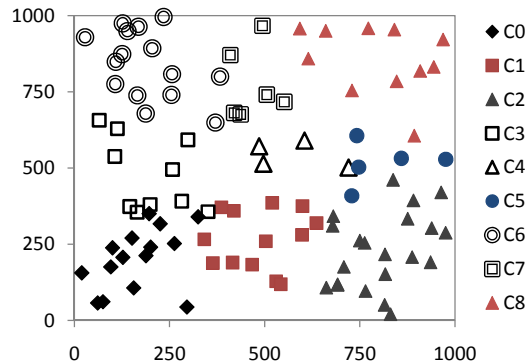


図 23 クラスタの位置関係 (5.0 秒経過後)

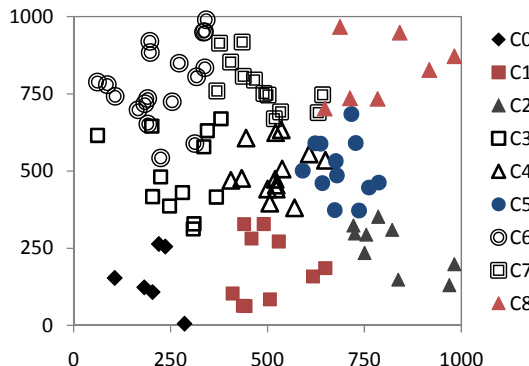


図 24 クラスタの位置関係 (500 秒経過後)

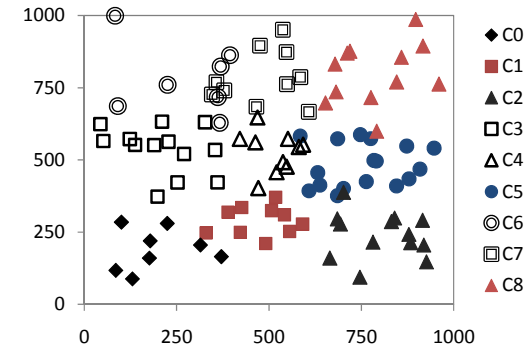


図 25 クラスタの位置関係 (1000 秒経過後)

7. 参考文献

- [1] DSR (Dynamic Source Routing):RFC4728, <http://www.ietf.org/rfc/rfc4728.txt>
- [2] AODV (Ad-hoc On-Demand Distance Vector):RFC3561, <http://www.ietf.org/rfc/rfc3561.txt>
- [3] J.Y.Yu and P.H.J.Chong, "A survey of clustering schemes for mobile ad hoc networks," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol.7, no.1, pp.32-48, 2005
- [4] M.Jiang, J.Li, and Y.C.Tay, "Cluster based routing protocol (CBRP)," functional specification, IETF Internet Draft, MANET working group, draft-ietf-manet-cbrp-spec-01.txt, Aug. 1999.
- [5] 小田亮太郎, 大田知行, 角田良明, "モバイルアドホックネットワークにおける経路情報の分散管理手法を用いた階層ルーティング," 電子情報通信学会技術報告, Vo L.107, no.193, pp.7-12, 2007年8月.
- [6] Thomas Zahn and Jochen Schiller. "DHT-based Unicast for Mobile Ad Hoc Networks". In Proc. of IEEE Percom. March 2006.
- [7] R.Winter, T.Zahn, and J.Schiller. "Random Landmarking in Mobile, Topology-Aware Peer-to-Peer Networks," In Proc. of FTDCS, May 2004.
- [8] 鳴海寛之, 高橋修, "MANETにおけるCluster-by-Clusterルーティングアルゴリズムの提案と実装・評価," 情報処理学会研究報告, Vol.2009, No.8, pp.1-8, 2009年1月.
- [9] Young-BaeKo and Nitin H. Vaidya, "Location-aided routing (LAR) in mobile ad hoc networks," In Proc. of MobiCom, October 1998.
- [10] Brad Karp and H.T.Kung, "GPSR:greedy perimeter stateless routing for wireless networks," In Proc. of MobiCom, August 2000.
- [11] The Network Simulator version 2 (ns-2), <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>