

ノードの位置情報に基づくオーバーレイネットワーク LL-Net の拡張

金子 雄[†] 春本 要^{††}

[†] (株) 東芝 研究開発センター 通信プラットフォームラボラトリー

^{††} 大阪大学大学院 工学研究科

E-mail: [†]yu1.kaneko@toshiba.co.jp, ^{††}harumoto@eng.osaka-u.ac.jp

あらまし モバイルインターネット環境の実現に伴い、ロケーションアウェアサービスの需要が増加している。なかでも位置情報に基づく情報配信サービスは、ユーザーに新しい利便性や安全性を提供できる。本稿では、位置情報に基づく情報配信を実現するために、ノードの位置情報に基づくオーバーレイネットワークである LL-Net を拡張した eLL-Net を提案する。LL-Net はエリアという概念を利用することで位置に基づく情報配信を実現するが、エリアのサイズが静的であるためにトラヒックが増加するという問題がある。eLL-Net では、情報配信の対象領域のサイズに応じてエリアを動的に分割することにより、トラヒックの増加を抑えることができる。また本稿では、シミュレーションによってトラヒックやホップ数などを計測し、ランダムグラフネットワークよりも抑えられることを検証する。

キーワード ロケーションアウェアサービス、オーバーレイネットワーク、アプリケーションレイヤマルチキャスト

eLL-Net: A Enhanced Location-based Logical Network

Yu KANEKO[†] and Kaname HARUMOTO^{††}

[†] Communication Platform Laboratory, R&D Center, Toshiba Corporation.

^{††} Graduate School of Engineering, Osaka University

E-mail: [†]yu1.kaneko@toshiba.co.jp, ^{††}harumoto@eng.osaka-u.ac.jp

Abstract The demands of location-aware services become large with the developments of mobile internet environments. In particular, information broadcast services based on geographical information could provide people with new convenience. In this paper, we propose a location-based overlay network eLL-Net, which is an enhancement of the LL-Net that we have formerly proposed. Although the LL-Net can perform efficient information broadcast on a geographical region by using concept of areas, a problem exists that network traffic increases due to the static area division. The eLL-Net can reduce traffic because it divides areas adaptively according to the target region of information broadcast. We show some simulation results measuring traffic and hop count by which we show that the eLL-Net can reduce them compared with a random graph network.

Key words location aware service, overlay network, application layer multicast

1. はじめに

ノートパソコンや携帯電話などのモバイルノードの高機能化および無線インフラの整備によって、モバイルノードを利用してインターネットに接続可能な、モバイルインターネット環境が実現されている。2006 年度末時点における国内インターネット利用者数は推計 8754 万人であり、その中の 7086 万人はモバイル端末からの利用経験がある [16]。これは、全インターネット利用者数の約 80.9%にあたり、日本の人口の約 55.4%にあたる。今後はさらにインターネットに接続するための地理的障壁は取り払われ、常時接続可能な環境が整備されていくと言える。

モバイルインターネット環境の普及に伴い、ノードの位置情

報を考慮したサービスの需要が高まっている。携帯電話では、総務省により、2007 年 4 月以降に発売される第 3 世代携帯電話端末への GPS 測位方式および位置情報通知機能の搭載が求められている。モバイルノードが位置情報を取得することにより、現在位置を地図上に表示するサービスや、周辺に存在する飲食店などを検索するサービスが利用可能となる [15]。これらの位置情報を自律的に考慮して動作するサービスを、ロケーションアウェアサービスと呼ぶ。

ロケーションアウェアサービスの 1 つの形式として、ノードの位置情報に基づく情報配信サービスがある。位置情報に基づく情報配信は、人々に新しい利便性や安全性を提供できる。例えば、地震の P 波を検知した場合に、地震警報情報を予測被災

地域の住人の携帯電話や家庭のテレビなどに配信することで、S波が到着する前に人々の注意を喚起することができる。また、交通渋滞情報や駐車場の空車情報などを、近隣の道路を走行中の自動車に配信することで、ドライバの運転を補佐することもできる。街中にいる人々が持つ携帯電話などに店舗の広告情報を配信することで、人々と店舗の間につながりを作ることができる。

位置情報に基づく情報配信を実現するためには、モバイルノードに限らず、インターネットへの接続性を持つ全ノードの位置情報を何らかの方法で管理する必要がある。また、情報を配信する領域に位置する複数のノードに対して、効率良く情報を配信する仕組みが必要となる。

位置情報の管理方法は、集中管理型と分散管理型の2つに分類できる。集中管理型の場合、膨大な数のノードの位置情報を集中管理するため、情報管理コストや単一障害性が大きくなる。また、各サービス提供者が全ノードの位置情報を管理する必要が生じるため、サービス提供のための敷居が高くなる。一方、分散管理型の場合、情報管理コストや単一障害性は小さくなる。サービス提供者が全ノードの位置情報を管理する必要はない。したがって、本研究では分散管理型に注目する。

情報の配信は、情報を配信するノードから配信領域に位置する複数のノードに対して行われるため、マルチキャスト型の配信方式が適している。IPマルチキャストはノードの位置情報に基づいて情報を配信する機能を持たないため、アプリケーション層においてノードの位置情報を考慮したマルチキャストツリーを構築し、それに基づいて情報を配信する必要がある。このような、アプリケーション層で実現されるマルチキャストのことを、Application Layer Multicast (ALM) と呼ぶ。また本稿では、特定の領域に位置するノードに対するALMのことを、Location-based ALM (LALM) と呼ぶ。

以上の要件を考慮し、過去に我々は、ノードの位置情報に基づくオーバーレイネットワークであるLL-Net [12] を提案した。LL-Net はエリアという緯度と経度で指定される四角形の物理領域を定義する。各ノードは、自身の位置するエリア内においてランダムグラフのオーバーレイネットワークを構築し、エリア間において各ランダムグラフを接続するためのリンクを構築する。各ノードが自身の位置するエリア内および周囲のエリア内のノードの情報を部分的に管理することで、全ノードの位置情報の分散管理を実現する。また、エリア間のリンクとエリア内ネットワークを併用することで、LALMを実現する。エリア間のリンクを利用することで、エリア単位で情報を転送することができるため、物理的に遠い領域へホップ数を抑えて配信できる。

LL-Net はエリアのサイズを静的に決定するため、エリアのサイズと配信領域のサイズの差が大きい場合に、LALM やネットワークを維持するためのトラフィックが増加するという課題がある。そこで、本稿ではLL-Netの拡張であるeLL-Netを提案する。eLL-Netは配信領域のサイズに応じてエリアを動的に分割する。これによって、エリアのサイズと配信領域のサイズの差が大きくなることを避けられ、トラフィックの増加を抑えら

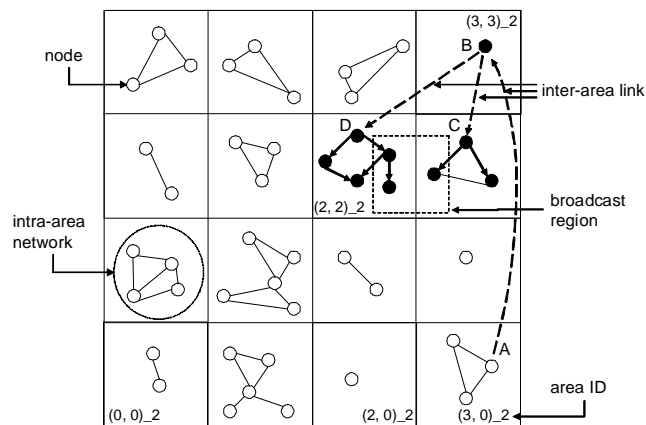


図1 LL-Netの全体図。四角で区切られた領域がエリアである。各ノードはエリア内およびエリア間でオーバーレイネットワークを構築する。エリア間リンクは一部のみ点線で表示している。

れる。

以下、2節でLL-Netの概要について、3節でeLL-Netの詳細について説明する。また4節ではシミュレーションによる評価結果について述べ、エリアが適切に分割されることや、ホップ数が抑えられることを検証する。5節では関連研究について述べ、6節でまとめる。

2. LL-Netの概要

LL-Netはインターネットに接続されている複数のノードによって構築されるオーバーレイネットワークである。オーバーレイネットワークとは、アプリケーション層におけるノード間の論理的なリンクから構成されるネットワークである。ノード間の論理的なリンクは、相手ノードとの通信に必要な情報を認識することで確立される。通信に必要な情報として、例えばIPアドレスとポート番号のセットなどが挙げられる。これらの情報によって、ノードを識別可能であるため、本稿ではこれらの情報をノードのID(ノードID)と呼ぶ。

LL-Netではエリアという概念を定義する。エリアは緯度と経度で指定される四角形の物理領域である。LL-Netに参加する各ノードは、エリアの座標と自身の位置情報に基づいて2種類のオーバーレイネットワークを構築する。1つ目は、エリア内におけるオーバーレイネットワークである。ノードは、同一のエリアに位置しているノードと、ランダムグラフのオーバーレイネットワークを構築する。2つ目は、エリア間におけるオーバーレイネットワークである。各ノードは、異なるエリアに位置しているノードに対してリンクを構築する。以下、1つ目のオーバーレイネットワークをエリア内ネットワーク、2つ目のオーバーレイネットワークをエリア間リンクと呼ぶ。図1はLL-Netのエリアとオーバーレイネットワークを表している。エリア間リンクは一部しか表示していないが、実際には各ノードがエリア間リンクを構築している。

LL-Netでは、エリア内ネットワークとエリア間リンクを利用して、LALMを実現する。サービス提供者は、情報を配信する領域を座標で指定する。以下、サービス提供者が指定した領

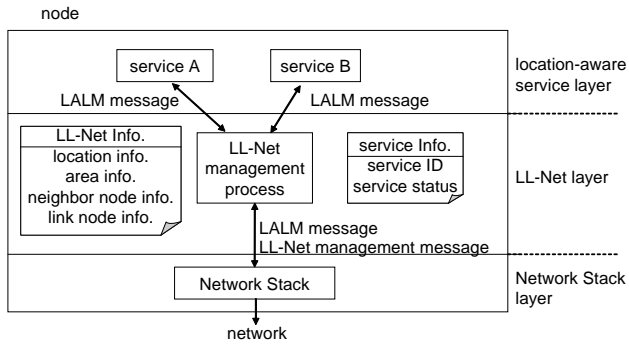


図2 LL-Netに参加するノードのアーキテクチャ。

域を配信領域と呼び、ノード間で交換される配信情報を含むパケットをメッセージと呼ぶ。各ノードは、自身の位置するエリアが配信領域と重複しない場合は、エリア間リンクを使用して配信領域に近づくようにメッセージを転送する。配信領域と重複する場合は、エリア内ネットワークの隣接ノードにメッセージを転送する。図1では、ノードAが点線で囲まれた配信領域に対してLALMを実行した様子を表している。黒色のノードは、メッセージを受信したノードである。ノードAとノードBはエリア間リンクを利用してメッセージを配信領域と重複するエリアまで転送している。ノードCとノードDはエリア内ネットワークにメッセージを転送する。エリア間リンクを利用することで、エリア単位でメッセージを転送できるため、物理的に遠い領域へホップ数を抑えて転送できる。また、各ノードは、他のノードが位置しているエリアを把握しておくだけでメッセージを転送できる。他のノードの正確な座標を把握する必要がないため、位置情報の更新頻度を抑えられる。ただし、エリア単位で他のノードの位置を把握するため、メッセージの転送先を細かく制御することはできず、LALMの配信領域とエリアの領域が一致しない場合には、配信領域外に位置するノードに対してメッセージが転送される可能性がある。例えば、図1におけるノードCやノードDは配信領域外に位置しているが、メッセージが転送されている。本稿で提案するeLL-Netは、このような余分なメッセージの転送を抑えるために、配信領域のサイズに応じてエリアを動的に分割する機構を備えている。

LL-Netの特徴を以下にまとめる。

- エリアという物理領域に基づいてオーバーレイネットワークを構築することで、任意の領域内のノードへの情報配信を実現する。
- 位置情報の頻繁な更新を避けられる。
- 物理的に遠い領域へホップ数を抑えて転送できる。

最後に、LL-Netに参加するノードのアーキテクチャについて説明する(図2)。LL-Netに参加するノードは、LL-Net management process (LLMP) を実行する。LLMPは、オーバーレイネットワークの構築や、メッセージの送受信処理を行う実体である。LLMPはGPSなどから取得した位置情報やLL-Netにおける隣接ノードの情報、ノード上で動作しているロケーションウェアサービスの情報を管理する。ロケーションウェアサービスは、LLMPに対してLALMのメッセージ

を渡す。メッセージのルーティングは、各ノード上のLLMPによって行われるため、ロケーションウェアサービスはルーティングに注意を払う必要はない。また、LLMPは、自ノード宛のメッセージを受信すると、適切なロケーションウェアサービスにそれを渡す。

3. eLL-Netの詳細

LL-Netにおいて、情報配信の配信領域とエリアのサイズは重要である。配信領域よりエリアのサイズが大きい場合、配信領域外のノードにメッセージが転送されるため、LALMのトラフィックが増加する。また、配信領域よりエリアのサイズが小さい場合は、ノードのエリア間移動が頻繁に発生するため、ネットワークを維持するためのトラフィックが増加する。したがって、配信領域とエリアのサイズの差は小さいことが望ましいが、LL-Netはエリアのサイズを静的に決定するため、差を小さくすることは困難であった。本稿で提案するeLL-NetはLL-Netの拡張であり、配信領域のサイズに応じてエリアを動的に分割する機能を備える。この機能により、配信領域とエリアのサイズの差を小さくでき、トラフィックの増加を抑えられる。

3.1 エリアとトポロジ

eLL-Netのトポロジはエリアに基づいて構築される。エリアとは、緯度と経度で指定される四角形の物理領域であり、 x , y , $level$ の3つの要素で構成されるエリアIDを持つ。 x と y は、それぞれ経度と緯度から決まる要素であり、 $level$ はエリアの分割度(レベル)を表す。以下、エリアIDを $(x, y)_{level}$ と表記する。

初期状態において、eLL-Netにはエリアは1つしか存在しない。以下、このエリアのことをルートエリアと呼ぶ。ルートエリアの領域は、ロケーションウェアサービスを適用する領域であり、サービス提供者が指定する。例えば、ある都市に位置するノードに対してサービスを提供するのであれば、ルートエリアの領域はその都市を覆うように設定する。ルートエリア内に位置していないノードはeLL-Netに参加できない。全てのノードは、eLL-Netに参加する際にルートエリアの座標情報を取得する。ここで、エリアの座標情報とは、エリアの4角の緯度と経度の情報のことである。また、ルートエリアのIDは $(0, 0)_0$ である。

エリア分割の際には、エリアは必ず十字で4等分される。分割されたエリアのIDは分割前のエリア(親エリア)のIDによって決まる。親エリアのIDが $(x, y)_d$ の場合、4つの子エリアのIDは、右上から時計回りに $(2x+1, 2y+1)_{(d+1)}$, $(2x+1, 2y)_{(d+1)}$, $(2x, 2y)_{(d+1)}$, $(2x, 2y+1)_{(d+1)}$ となる。分割後のエリアのレベルは、親エリアのレベルに1を加えた値となる。図3は、ルートエリアが分割され、分割後のエリアIDが決定される様子を示している。このように、エリアIDは規則的に一意に決まる。

ノードはルートエリアの座標情報を知っているため、エリアIDからそのエリアの座標情報を計算することができる。したがって、ノードは、GPSなどから取得した自身の座標情報とエリアの分割状況から、自身が位置しているエリアのIDを判断

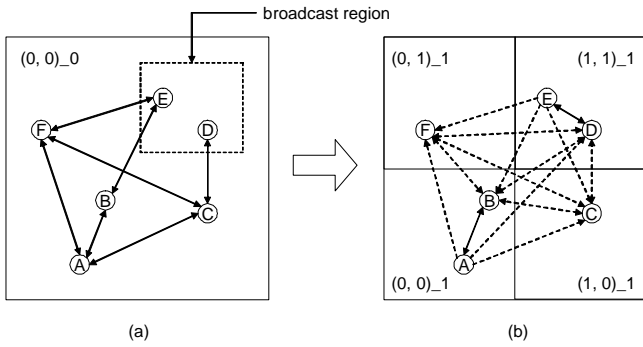


図3 エリアの分割の処理. 丸はノードを表しており、ノード間の実線はエリア内ネットワークを、点線の矢印はエリア間リンクを表している. エリアが分割されると、エリア内ネットワークが再構築され、エリア間リンクが新たに構築される.

できる. 以下、各ノードにおいて、そのノードが位置するエリアのことをホームエリアと呼ぶ.

エリアが分割されている場合、ノードは各レベルごとにホームエリアを持つ. 例えば図3(b)のノードDのホームエリアは(0,0)_0と(1,1)_1の両方である. また、ルートエリアを除く各レベルのホームエリアに関して、兄弟エリアという概念を定義する. 兄弟エリアとは、任意のレベルにおけるホームエリアと同じレベルであり、かつ親エリアが等しい3つのエリアのことを指す. 図3(b)のノードDのレベル1ホームエリアにおける兄弟エリアは、(0,0)_1, (1,0)_1, (0,1)_1である.

各ノードはレベルが最大であるホームエリア内において、エリア内ネットワークを構築する. エリア内ネットワークはランダムグラフのオーバーレイネットワークである. また、各ノードはルートエリアを除く各レベルのホームエリアにおいて、各兄弟エリアに位置する1つのノードとの間にエリア間リンクを構築する.

エリアという概念を使用することによる利点は、各ノードが、他のノードの正確な座標情報を把握せずにオーバーレイネットワークを構築および維持できる点である. 各ノードは他のノードが位置しているエリアを把握するだけでよいから、ノードの移動による位置情報の更新を抑えられる. また、エリア間リンクを使用することで、エリア単位でメッセージを転送できるため、物理的に遠い領域へホップ数を抑えて転送できる.

3.2 LALM: Location-based Application Layer Multicast

eLL-NetにおけるLALMの実現方法は、LL-Netにおける実現方法にほぼ等しい. 以下、LALMを実行するノードのことをinitiatorと呼ぶ.

initiatorはメッセージの配信領域を指定し、LALMを開始する. まずinitiatorは自身の最大レベルのホームエリアの領域が、配信領域と重複しているかどうかを確認する. 重複していれば、エリア内ネットワークの隣接ノードにメッセージを送信する. また、配信領域が兄弟エリアと重複している場合は、エリア間リンクを使用して、その兄弟エリアに位置しているノードにメッセージを送信する. 配信領域と重複する兄弟エリアが

複数存在する場合には、その全てにメッセージを送信する.

エリア内ネットワークの隣接ノードからメッセージを受信したノードは、自身が配信領域内に位置しているかどうかを確認する. 配信領域内に位置している場合は、メッセージを適切なロケーションウェアサービスに渡し、またメッセージを隣接ノードに転送する. 配信領域内に位置していない場合は、メッセージを隣接ノードに転送する. また、どちらの場合もinitiatorに対してレスポンスを返す. このレスポンスは、次節で説明するエリア分割を行うための情報を含む.

エリア間リンクによって転送されたメッセージを受信したノードは、initiatorと同様にメッセージを処理する. このようにメッセージを転送することで、配信領域と重複するエリアに位置する全てのノードにメッセージが配信される. また、各ノードは、重複したメッセージやTTLが閾値を超えているメッセージを受信した場合、それを破棄する.

図1は、ノードAが点線で囲まれた配信領域に対してLALMを実行する様子を表している. ノードAの最大レベルのホームエリア(3,0)_2は配信領域と重複しないため、ノードAはエリア間リンクを使用して、兄弟エリアに位置するノードBにメッセージを転送する. ノードBはノードAと同様にメッセージをノードC, Dに転送する. ノードC, Dの最大レベルのホームエリアである(2,2)_2と(3,2)_2は配信領域と重複するため、ノードC, Dはエリア内のノードにメッセージを転送する. このように、メッセージは配信領域と重複するエリアまではエリア間リンクを介して転送され、配信領域と重複するエリアに到達した後はエリア内ネットワークに転送される. エリア単位でメッセージを転送するため、物理的に遠い領域へホップ数を抑えて転送できる.

3.3 エリア分割

初期状態においてLL-Netにはルートエリアしか存在しないが、LALMの配信領域のサイズに応じて分割される. 3.1節で述べたように、エリアは十字で4等分され、分割されたエリアのIDは親エリアのIDによって規則的に決まる. 図3はルートエリアが分割される様子を示している.

エリアの分割を開始する主体は、LALMを実行した任意のノードである. LALMの実行ノードであるinitiatorは、メッセージを受信したノードからレスポンスを返してもらう. レスポンスは、受信ノードの最大レベルのホームエリアのIDと、受信ノードの位置情報を含む. initiatorは、レスポンスに含まれるホームエリアを分割したと仮定し、分割後の4つのエリアの中で、自身が実行したLALMの配信領域と重複するエリアの数を数える. 配信領域の形を長方形とすると、分割後のエリアにおいて配信領域と重複するエリアの数は、1, 2, 4のいずれかとなる. 重複するエリアの数が1か2であれば、分割することでメッセージを受信するノードの数を減らせると期待できる. さらに、全受信ノードに対する配信領域外に位置している受信ノードの割合が閾値を超えた場合に、initiatorはそのレスポンスに含まれるホームエリアを分割可能だと判断する. なぜなら、全ての受信ノードが配信領域内に位置している場合は、エリアを分割しても、メッセージを受信するノードの数は減ら

ないためである。毎回の LALM において配信領域を大きく変更する場合は、一度の LALM でエリアを分割することは望ましくないため、エリアごとに分割可能であると判断した回数を記憶しておき、回数が閾値を超えた場合にエリアを分割を開始する。例えば、図 3 (a) におけるノード A が点線で囲まれた配信領域へ LALM を実行したとする。この段階ではルートエリアしか存在しないため、メッセージは全ノードに転送される。ノード A は、各ノードのレスポンスを参照し、各ノードのホームエリアが (0, 0)₀ であることを知る。ノード A は、仮に (0, 0)₀ を分割した場合、分割後のエリアにおいて配信領域と重複するエリアは (1, 1)₁ だけということを確認する。この場合、ノード A はエリア (0, 0)₀ を分割可能だと判断し、エリア分割を開始する。分割後、LALM のメッセージは、ノード D, E のみに転送されることになる。

分割を開始すると、まずノード A は分割通知を送信する。分割通知は、3.2 節と同様の方法で分割対象エリアに位置する全ノードに転送される。図 3 の場合、分割対象エリアはルートエリアとなるため、分割通知はノード B, C, D, E, F に転送される。分割通知を受信した各ノードは、分割後のエリアの座標と自身の座標情報から新しいホームエリアの ID を計算し、ノード A に返す。分割後のエリアの座標は、ルートエリアの座標情報から計算可能であり、自身の座標情報は GSP などから取得できる。ノード A は各ノードがどのホームエリアに位置しているかを把握すると、その情報を分割完了通知として分割対象エリアの全ノードに送信する。分割完了通知を受信した各ノードは、各ノードのホームエリア情報を参照し、同じホームエリアに位置するノード同士でエリア内ネットワークを再構築する。また、3つの兄弟エリアに位置するノードから1つずつノードを選択し、エリア間リンクを追加する。図 3 の (b) では、ノード A とノード B、ノード D とノード E がエリア内ネットワークを再構築している。また、各ノードは兄弟エリアに位置する1つのノードに対してエリア間リンクを構築している。

このようにエリアを分割することで、LALM の配信領域とエリアの領域の差を小さくでき、余分なメッセージの転送を抑えることができる。

3.4 参加と脱退

ノードは eLL-Net に参加するために、すでに eLL-Net に参加しているノードに参加要求を送る必要がある。すでに参加しているノードの ID を取得する方法の1つは、Web ページで公開されている情報を取得することである。ここでは、サービス提供者が、サービスを提供するノードの ID を Web ページなどで公開していると仮定する。Gnutella [14] などの Peer-to-Peer ネットワークでも、すでに参加しているノードの情報を Web で公開している。以下、ID が一般的に公開されているノードのことを公開ノードと呼ぶ。また、新たに eLL-Net に参加するノードのことを参加ノードと呼ぶ。

eLL-Net に参加するために、参加ノードは公開ノードに参加要求を送る。公開ノードは過去に自身を経由して eLL-Net に参加したノードの ID をキャッシュしており、キャッシュからランダムで複数のノード ID を選択し、参加ノードに返す。参加ノード

は公開ノードから取得した参加済みノードにエリア参加要求を送り、エリア内ネットワークに参加する。ここで、公開ノードから取得した参加済みノードのホームエリアが、参加ノードのホームエリアと異なる可能性がある。この場合は、エリア参加要求を受信したノードが、エリア間リンクを使用して、エリア参加要求を参加ノードのホームエリアに位置しているノードへ転送することで処理する。参加ノードはエリア内ネットワークに参加すると、隣接ノードから兄弟エリアとエリア間リンクの情報を教えてもらい、エリアの分割状況を把握する。

eLL-Net から脱退する際は、エリア内ネットワークにおける隣接ノードに脱退通知を送信する。脱退通知には隣接ノードの ID を含める。これによって、脱退するノードの隣接ノード同士が隣接ノードとなることができ、エリア内ネットワークを分断せずにすむ。また、兄弟エリアに位置しているノードや、自身が eLL-Net に参加する際に経由した公開ノードにも脱退通知を送信し、自身の情報を削除してもらう。

3.5 エリア移動

モバイルノードがエリア間を移動すると、eLL-Net を維持するための処理が行われる。以下、エリア間を移動したノードを移動ノードと呼ぶ。

移動ノードは、エリア内ネットワークにおける隣接ノードに移動通知を送信する。移動通知には隣接ノードの ID を含める。これによって、移動ノードの隣接ノード同士が隣接ノードとなることができ、エリア内ネットワークを分断せずにすむ。また、エリア間リンクを介して兄弟エリアに位置しているノードに移動通知を送る。兄弟エリアに送る移動通知には、自身の代替となるノード ID を含める。これによって、移動ノードに対してエリア間リンクを構築していたノードは、リンクを再構築できる。

次に、移動ノードは、自身が保持するエリア間リンクの情報から、移動先エリアに位置するノードを探し、該当ノードにエリア参加要求を送信する。エリア内ネットワークに参加すると、隣接ノードから兄弟エリアとエリア間リンクの情報を教えてもらい、移動先エリアの分割状況を把握する。移動先エリアに位置するノードが見つからなければ、公開ノードに参加要求を送り、あらためて eLL-Net に参加する処理を行う。

4. シミュレーション評価

本稿で提案する eLL-Net において、エリアの分割やメッセージの転送が正しく行えることや、発生するトラフィック量などをシミュレーションによって検証する。

4.1 評価環境

シミュレータは C 言語で構築した。シミュレーションの単位時間は 0.1ms とした。ルータレベルの物理トポロジは、BRITE [5] によって生成し、ルータ間の通信時間は BRITE によって生成された値を使用した。ルータとノードの通信時間は 1ms とし、ノードのメッセージ処理時間は無視した。

各ノードはトランスポート層として TCP を、ネットワーク層として IPv6 を使用することを想定した。また、モバイルノードは Mobile IPv6 を使用することを想定しており、ホームエージェントを介して通信を行うものとした。各ノードのデフォルト

表 1 評価パラメータ. 全ノード数の半数を自動車とした.

simulation period	6 hour
average of LALM interval	10 minute
data size of LALM	5KByte
number of nodes	2048
size of root area	64km × 64km
size of target region of LALM	2 - 8km
speed of mobile node (car)	30km/h

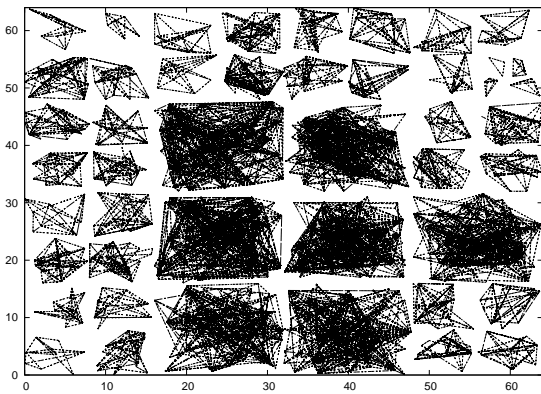


図 4 エリア内ネットワークを描画した図. エリア間リンクは表示していない. レベル 3 のエリアが多く生成されていることがわかる.

トゲートウェイは, そのノードに最も物理的に近いルータとした.

評価では, 情報配信ノードが, 特定の領域に位置する自動車に対して交通渋滞情報や空き駐車場情報などを配信する状況を想定した. ここで, 自動車はモバイルノードにあたる. 配信領域は長方形とし, 1 辺のサイズは 2km から 8km までの値とした. 配信領域と重複する分割後のエリア数が 2 または 1 であり, 配信領域外に位置するノードが存在する場合にエリア分割可能だと判断するとした. また, ノードごとに特定の領域に対して情報配信を行うとし, 1 度エリア分割可能だと判断した場合にエリア分割を実行するようにした. 自動車は格子状に敷かれている道路上を東西南北に無作為に移動する. 道路の幅は 50m, 1 区画のサイズは 950m とした. ノードの脱退や故障は無視した. その他の評価パラメータを表 1 に示す.

4.2 評価項目

評価では, eLL-Net と LL-Net, ランダムグラフネットワークにおける平均ホップ数やトラフィックなどを計測した. LL-Net のエリア分割度は 1 とした. 分割度が 1 の状態とは, ルートエリアを 1 度だけ分割した状態である.

LALM のメッセージが, 配信領域に位置するノードに到達するまでに転送された回数をホップ数とした. 一度の LALM で複数のノードがメッセージを受信する可能性があるため, メッセージを受信した各ノードごとにホップ数を計測し, その平均値を平均ホップ数とした. ルータによる転送回数も考慮した物理ホップ数と, ノードによる転送回数のみを考慮した論理ホップ数の両方を計測した.

トラフィックとして, オーバーレイネットワークの構築や維持のために交換されるメッセージと LALM のメッセージを計

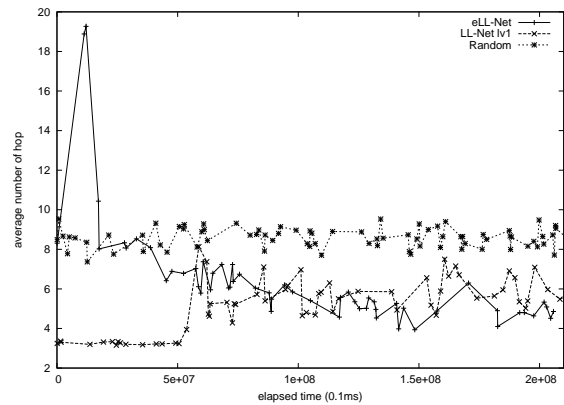


図 5 LALM 毎の平均論理ホップ数. x 軸はシミュレーションの経過時間を表している.

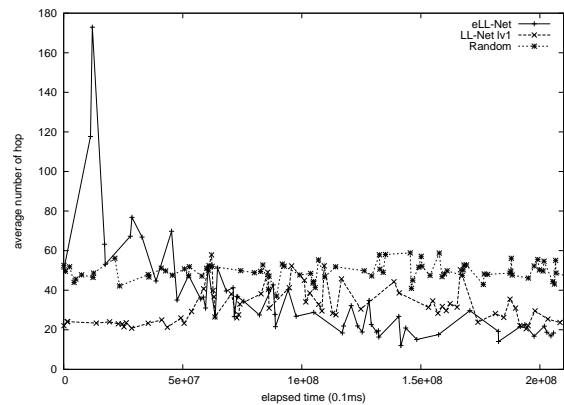


図 6 LALM 毎の平均物理ホップ数. x 軸はシミュレーションの経過時間を表している.

測した. TCP の 3-way hand shake や ack, IPv6 の Neighbor Discovery などの, トランスポート層以下のプロトコル単独のトラフィックは計測していない.

4.3 評価結果

シミュレーションにおける eLL-Net のエリア内ネットワークを図 4 に示す. エリア内ネットワークは最大レベルのホームエリアごとに生成されるため, 図 4 から分割度が 3 のエリアが多く生成されていることがわかる. 分割度 3 のエリアのサイズは $64/2/2/2 = 8\text{km}$ である. 今回のシミュレーションでは, 配信領域の一辺のサイズを 2km から 8km のランダム値とした (表 1). 図 4 の結果は, 配信領域のサイズに応じてエリアが分割されていることを示している. また eLL-Net は, LALM によって配信領域内に位置する全てのノードにメッセージを転送することができた.

平均論理ホップ数の計測結果を図 5 に示す. シミュレーションの経過に伴い, eLL-Net のホップ数は小さくなっていく. これは, エリアの分割が進み, エリア間リンクを使用して, 少ないホップ数で配信領域のノードにメッセージを転送できるようになったためである. その結果, 途中からランダムグラフネットワークよりもホップ数を小さく抑えられている. LL-Net と比較しても, わずかにホップ数を小さく抑えられている. 平均物理ホップ数の計測結果を図 6 に示す. 物理ホップ数におい

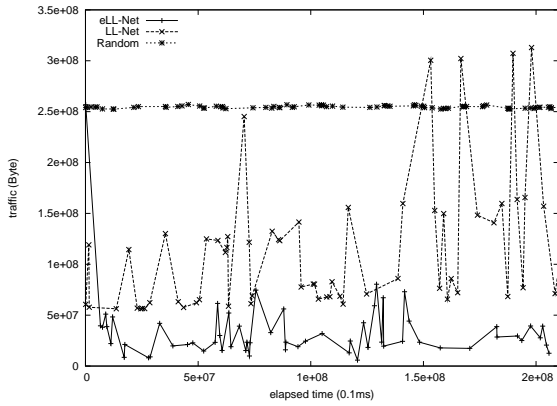


図7 LALM 毎の発生トラフィック. x 軸はシミュレーションの経過時間を表している.

表2 LALM あたりの平均トラフィックと維持トラフィック

network	ave. of LALM (KByte)	maintenance (KByte/s)
eLL-Net	29984.29	259.95
LL-Net lv1	87795.75	284.45
Random	245444.16	0

でも、シミュレーションの経過に伴い、eLL-Net のホップ数が LL-Net やランダムグラフネットワークよりも小さくなっている。このことから、エリアを配信領域に合わせて分割することによる効果がわかる。

1 回の LALM によって発生したトラフィックを図7に示す。ランダムグラフネットワークは、常にメッセージをネットワーク全体にフラディングするため、トラフィック量はほぼ一定である。eLL-Net は、ルートエリアが分割されるまではランダムグラフネットワークとほぼ等しいトラフィックとなる。しかしエリアの分割が進むと、メッセージを転送するノードを絞り込めるようになるため、トラフィックは小さくなる。一方、LL-Net は最初からルートエリアが4つに分割されているが、配信領域が4つのエリアと重複している場合は、ランダムグラフネットワークとほぼ等しいトラフィックが発生する。配信領域が2つのエリアと重複している場合は、ランダムグラフネットワークの約半分のトラフィックが発生する。eLL-Net は配信領域に応じてエリアを分割するため、LL-Net よりメッセージを転送するノードを絞り込める。

LALM あたりのトラフィックの平均値と、1秒あたりに発生する維持トラフィックの計測結果を表2に示す。eLL-Net は配信領域に応じてエリアを分割するため、LALM あたりのトラフィックの平均値を小さく抑えられる。LL-Net やランダムグラフネットワークは、配信領域外に位置する多くのノードにメッセージを転送してしまうため、eLL-Net よりもトラフィックが大きくなる。維持トラフィックとは、オーバーレイネットワークを維持するための処理に伴って発生するトラフィックである。eLL-Net や LL-Net では、ノードのエリアの移動に伴い維持トラフィックが発生する。また、eLL-Net はエリアを分割する際に維持トラフィックが発生する。eLL-Net と LL-Net では、維持トラフィックに大きな差はない。eLL-Net は配信領域に応じてエリアを分割

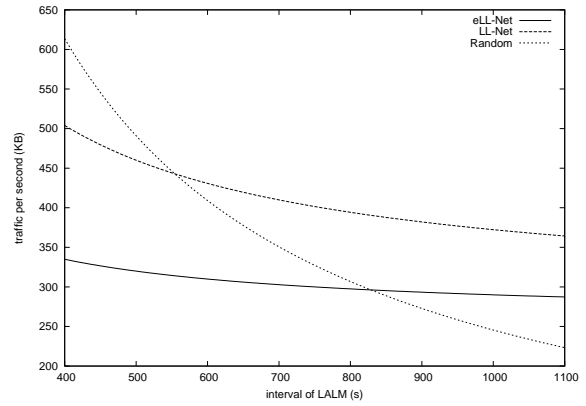


図8 1秒あたりに発生するトラフィックと LALM の実行頻度の関係.

するため、配信領域が小さいと、小さなエリアが発生することになり、ノードのエリアの移動が頻繁に発生する。一方、分割度1の LL-Net のように、エリアのサイズが大きい場合、エリアの移動の発生度は小さいが、移動後にエリア内ネットワークに参加する際に発生するトラフィックが大きくなる。エリアの概念のないランダムグラフネットワークでは、LALM 以外のトラフィックは発生しない。

表2の値から、LALM が発生する間隔とネットワークに1秒あたりに発生するトラフィックとの関係を導くと、図8のようになる。LALM の発生間隔が約850秒よりも短ければ、eLL-Net はランダムグラフネットワークよりもトラフィックを抑えられる。LALM の発生間隔が長くなると、総トラフィックにおける維持トラフィックの割合が大きくなるため、eLL-Net のほうがトラフィックが大きくなる。eLL-Net を適用する際には、LALM の発生頻度を考慮する必要があると言える。

5. 関連研究

任意の領域に位置するノード群に対してメッセージを配信する手法として、GGCAST [6] や GeoPeer [1] がある。これらの手法では、ノードの位置情報に基づいてオーバーレイネットワークを構築する。GGCAST における各ノードは、任意の領域内に位置するノード同士でオーバーレイネットワークを構築する。各領域の座標情報や領域内のノードの情報は、ディレクトリサービスによって集中管理する。ノードはディレクトリサービスを利用することで、位置情報をキーとして情報を取得し、ノード群に対して ALM を実行できる。領域やノードの情報を集中管理するという点において、eLL-Net とは手法が異なる。GeoPeer における各ノードは、周辺ノードの位置情報に基づいて Delaunary triangulation を計算し、オーバーレイネットワークを構築する。GeoPeer では、ノードが移動した場合には Delaunary triangulation が保たれていることを確認するために再計算を行う必要がある。eLL-Net ではノードがエリア間を移動しない限り、オーバーレイネットワークの維持のための処理は発生しない。

任意の領域内に位置するノードに対するメッセージ配信は、モバイルアドホックネットワークの分野においても研究されており、GPSR (Greedy Perimeter Stateless Routing) [4] や、

GRSS (Geographical Region Summary Service) [3] などがある。GPSR は隣接ノードの位置情報を含めてルーティングテーブルを作成し、目的地に近いノードに対してメッセージを転送することで、特定位置に位置するノードにメッセージを配信する。GRSS では、エリアごとにエリア内に位置するノードの要約情報を生成し、要約情報をエリア間で共有することで、特定のエリアへのメッセージ配信を実現する。これらの手法と eLL-Net は、目的は似ているが、想定環境と手段が異なる。eLL-Net が対象とする環境では、全てのノードがインターネットへの接続性を持っており、デスクトップ PC などの移動しないノードとモバイルノードが混在している。また通信手段は無線に限らない。

データの分散配置および検索を効率良く行うために、DHT (Distributed Hash Table) を使用した手法として、Chord [9] や Tapestry [11], CAN [7] などがある。Chord と Tapestry は、データの ID からハッシュ値を計算し、そのハッシュ値に基づいて情報を分散管理する手法である。z-ordering [8] などの空間充填曲線を使用し、緯度経度のような 2 次元情報を 1 次元にマッピングすることで、ノードの位置情報に基づいてノードの IP アドレスを分散管理できる。しかし、本来 1 次元空間のある 1 点を指定してメッセージを配送する手法であるため、範囲指定によるメッセージ配送には適さない。また、ハッシュ値の桁数によって空間のサイズおよびデータの分散度が静的に決定されるため、情報配信する領域が変動する場合に追従できない。一方、CAN は d 次元の直交座標空間を扱うため、2 次元情報を扱うことができる。CAN における各ノードは空間の一部 (ゾーン) を管理しており、隣接するゾーンを管理しているノードの IP アドレスを、隣接ノード情報として保持する。各ノードは隣接ノードへメッセージを転送することで、目的の領域へとメッセージを配送する。したがって、CAN の 2 次元空間では、LL-Net と同じように、特定の領域に位置するノードへメッセージを配送できる。ただし、離れたゾーンへメッセージを転送する場合に、オーバーレイネットワークにおけるホップ数が大きくなる。また、1 つまたは小数のノードに対してゾーンを割り当てるため、ノード数が増加するとゾーンのサイズが小さくなる。このため、モバイルノードが存在する環境では、ノードのゾーン間の移動頻度が増加し、頻繁に隣接ノード情報の更新が発生する。CAN を拡張した eCAN [10] は、ホップ数が大きくなる問題を解決している。しかし、ノード数が増加した場合にゾーンのサイズが小さくなる点は同じである。eLL-Net では、ノードの数ではなく、配信領域に応じてエリアを分割するため、必要以上にエリアを分割することを避けられる。

Skip Graph [2] と空間充填曲線を用いた LL-Net の実装も存在する [13]。Skip Graph を利用することで、ノードの分布に偏りがある場合にも、メッセージの転送効率を $O(\log N)$ に安定させることができる。LL-Net on Skip Graph は、位置情報から ID を計算し、その精度は静的に決まる。eLL-Net は配信領域のサイズに応じて動的にエリアを分割する、すなわち位置情報を管理する精度を変更するため、配信領域が変動する場合に追従できる。

6. まとめ

本稿では、位置情報に基づく情報配信を実現するオーバーレイネットワークである LL-Net を拡張した、LL-Net の拡張である eLL-Net は、配信領域に応じてエリアを動的に分割する機能を備えているため、トラヒックの増加を抑えることができる。シミュレーションによる評価では、対象領域に応じてエリアが分割されることを検証し、eLL-Net が LL-Net よりもトラヒックやホップ数を抑えられることを確認した。

eLL-Net はエリアを常に 4 分割する。このことはオーバーレイネットワークを構築するアルゴリズムを単純化しているが、一方で、エリア形成の柔軟性を弱めている。したがって、今後はより柔軟にエリアを形成し、そのエリアに基づいて情報を配信できる手法を検討する。また、エリア内ネットワークにおいて、効率的なメッセージ転送機能と耐障害性を備えたオーバーレイネットワークの構築手法を検討する。

文 献

- [1] F. Araujo, and L. Rodrigues. GeoPeer: A Location-Aware Peer-to-Peer System. *IEEE NCS04*, (2004).
- [2] J. Aspnes and G. Shah. Skip Graphs. *Proc. of 14th ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms (SODA)*, pp. 384-393, (2003).
- [3] P. Hsiao. Geographical Region Summary Service for Geographical Routing. *Mobile Computing and Communications Review, ACM SIGMOBILE*, vol. 5, pp. 25-39, (2001).
- [4] B. Karp, and H. T. Kung. GPSR: Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Networks. *Proc. of the 6th annual international conference on Mobile computing and networking*, pp. 243-254, (2000).
- [5] A. Medina, A. Lakhina, I. Matta, and J. Byers. BRIT: An Approach to Universal Topology Generation. *MASCOTS*, (2001).
- [6] K. Mitsuya. GGCAS - A Location Based Multicast. *Master thesis*, Keio University, (2004).
- [7] S. Ratnasamy, P. Francis, M. Handley, R. Karp, and S. Shenker. A Scalable Content-Addressable Network. *ACM SIGCOMM*, pp. 161-172, (2001).
- [8] S. Shekhar and S. Chawla. *Spatial Databases*. Prentice Hall, 2002.
- [9] I. Stoica, R. Morris, D. Karger, M. F. Kaashoek, and H. Balakrishnan. Chord: A Scalable Peer-to-Peer Lookup Service for Internet Applications. *Proc. ACM SIGCOMM*, pp. 149-160, (2001).
- [10] Z. Xu, and Z. Zhang. Building low-maintenance expressways for p2p systems. *Technical Report*, HPL-2002-41, (2002).
- [11] B. Y. Zhao, J. D. Kubiatowicz, and A. D. Joseph. Tapestry: An Infrastructure for Fault-tolerant Wide-area Location and Routing. *Technical Report*, UCB/CSD-01-1141, (2001).
- [12] 金子雄, 春本要, 福村真哉, 下條真司, 西尾章治郎. ユビキタス環境における端末の位置情報に基づく P2P ネットワーク. *情報処理学会論文誌 データベース*, vol. 46, pp. 1-15, (2005).
- [13] 吉田幹, 寺西裕一, 春本要, 下條真司. マルチオーバーレイと分散エージェントの機構を統合化した P2P プラットフォーム PIAX. *情報処理学会研究報告 2006-DPS-128*, pp. 43-48, (2006).
- [14] Gnutella. <http://gnutella.wego.com>.
- [15] EZ ナビウォーク. <http://www.au.kddi.com/ezweb/service/ez-naviwalk/index.html>.
- [16] 平成 18 年通信利用動向調査の結果. <http://www.soumu.go.jp/s-news/2007/pdf/070525.1.lt.pdf>.