

# 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

金子 雄<sup>†</sup> 春本 要<sup>††</sup> 福村 真哉<sup>†</sup>  
下條 真司<sup>†††</sup> 西尾 章治郎<sup>†</sup>

近年、携帯端末の普及やセンサ技術の発展にともない、場所や時間に依存せずに遍在する情報を利用できるユビキタス環境が整いつつある。ユビキタス環境では、場所や時間などの状況を自動的に考慮して人々の意思決定を支援するコンテキストウェアサービスが実現できる。多くの場合、人々は行動を起こす際に自分や各種施設の位置を考慮するため、コンテキストウェアサービスでは任意の位置に存在する情報資源を効率良く検索できる機構が重要となる。そこで本研究では端末の位置情報に基づく P2P ネットワークである LL-Net (Location-based Logical Network) を提案する。LL-Net では緯度、経度によって物理領域を格子状のエリアに分割する。各端末はエリア内でネットワークを構築し、またエリアを階層的にとらえてエリア間にリンクを構築する。これにより、LL-Net はクエリをフラッディングする範囲を任意の領域のみに制限できる。また本研究ではシミュレーションによって、LL-Net が任意の領域へ効率良くクエリを転送できることを示す。

## A Location-based Peer-to-Peer Network in a Ubiquitous Environment

YU KANEKO,<sup>†</sup> KANAME HARUMOTO,<sup>††</sup> SHIN'YA FUKUMURA,<sup>†</sup>  
SHINJI SHIMOJO<sup>†††</sup> and SHOJIRO NISHIO<sup>†</sup>

With the popularization of mobile devices and the development of advanced sensor devices, it is becoming feasible to realize a ubiquitous environment that enables us to publish and utilize information independent of location and time. In a ubiquitous environment, a number of context-aware services will be developed which provide services depending on various contexts such as location and time. It is indispensable for such services to retrieve location-dependent information efficiently. In this paper, we propose a location-based P2P network called the LL-Net (Location-based Logical Network). The LL-Net divides the world into areas by latitude and longitude. Terminals in each area construct an intra-area network, and each terminal establishes inter-area links hierarchically. By constructing such a network, the LL-Net can limit the message flooding range only to a specified region. The simulation results show that the LL-Net can efficiently propagate a query to a specified region compared to the existing P2P networks.

### 1. はじめに

近年、携帯電話やノートパソコン、PDA (Personal Digital Assistants) などの携帯端末の普及にともない、場所や時間に依存することなく情報を格納、参照できるモバイル環境が整っている。特に携帯電話は日本国内において契約者数が 8,000 万人を超えており、多くの人が通話や電子メールなどの目的で利用している。2000 年以降から国内で普及しはじめた第 3 世代

携帯電話では大容量のデータ転送も可能となり、携帯電話ユーザは位置情報やスケジュール情報だけでなく、インターネットを利用して画像や動画、音楽などのマルチメディアコンテンツをいつでも取得できるようになった。

またモバイル環境をさらに発展させたユビキタス環境の構築に向けた研究開発が近年進められている。ユビキタス環境では固定端末だけでなく、携帯電話をはじめとする携帯端末、インターネット家電、車載端末や車載センサ、街角に設置されたディスプレイやセンサ類など、さまざまな端末がネットワークに接続され、相互に情報やサービスを活用できるようになると期待されている。現在は携帯端末や車載端末といった移動する端末は情報を検索するクライアントとしての機能しか持たない場合が多いが、通信環境、処理能力、パッ

<sup>†</sup> 大阪大学大学院情報科学研究科  
Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

<sup>††</sup> 大阪大学大学院工学研究科  
Graduate School of Engineering, Osaka University

<sup>†††</sup> 大阪大学サイバーメディアセンター  
Cybermedia Center, Osaka University

メモリ容量などの制限が緩和されていくにつれて、これらの端末もまた情報やサービスの提供が可能になっていくものとする。たとえば、すでに携帯電話や車両はGPS装置を備えており、それによって得られる位置情報を共有することによって利用者や車両の位置に基づいたサービスが可能になるが、実際にそのようなサービスはすでに実用化されている。また、携帯端末でスケジュール管理をしている利用者は多く、それを特別なサーバに頼ることなく共有できれば利用価値も高まる。カメラ付き携帯電話で撮影した写真を即座に共有することにより、より鮮度の高い映像情報が共有可能になる。さらに、さまざまな物にICタグが取り付けられるようになり、利用者が持ち歩く携帯端末や車載センサがそれを読み取ることによって、さまざまな情報を移動しながら取得できるようになると考えられる。本論文においては、このように固定端末と移動する端末が混在する環境において、すべての端末が情報の発信源となる環境を想定する。

このようなユビキタス環境では、状況に適したサービスを提供するコンテキストウェアサービスの開発が可能となる<sup>1)~3)</sup>。コンテキストウェアサービスとは、場所や時間などのコンテキスト(状況)を自動的に考慮し、人々の意思決定を支援するサービスのことである。本論文で想定するコンテキストウェアサービスの一例として、集合場所検索サービスがある<sup>3)</sup>。利用者らはGPS装置などの位置センサを備えた携帯端末にスケジュールや嗜好などの情報を格納し、友人間で情報共有を行っているとする。集合場所検索サービスは、サービス利用者の近辺にいる友人を検索し、その友人らの状況として位置やスケジュール、嗜好などの情報を取得する。また、集合場所候補となる店舗に関する情報は、各店舗に設置された固定端末や、店舗の近辺に設置されたセンサなどから取得する。集合場所検索サービスはサービス利用者の状況、友人らの状況、店舗の状況を総合的に判断し、サービス利用者にとって適切な集合場所候補を提示する。

このようなサービスを実現するためには、サービス利用者の位置に基づいて近辺にいる友人を検索したり、集合場所候補となる範囲内に存在する店舗に設置された端末やその近辺に設置されたセンサから店舗に関する情報を取得したりする必要がある。また、車で移動中ならばその移動ルート上にある店舗を検索対象とするなど、位置を考慮した情報検索が必須となる。このように、一般にコンテキストウェアサービスにおいては位置情報をキーとする情報検索要求が頻繁に発生するため、それを効率良く処理できるメカニズムが特

に重要となる。

このような位置情報をキーとした情報検索をサーバ集中型のアーキテクチャで構築した場合、サーバが情報資源の位置をすべて管理することになる<sup>4)</sup>。しかしユビキタス環境では莫大な数の端末が存在するため、それらから発生する情報量は膨大なものとなる。情報資源自体ではなくその位置だけを管理する場合でも、サーバ集中型のアーキテクチャでは端末の移動に対する処理をすべてサーバで行う必要があり、負荷集中が生じることが明らかである。また、それに対応するための設備投資や運用・保守などの負担も大きくなる。

そこで本研究では、P2P(Peer-to-Peer)ネットワークに注目する。P2Pネットワークとは、各端末が各自で情報を管理し、他の端末と直接通信を行う論理ネットワークである。情報を集中管理するサーバ集中型アーキテクチャに比べ、端末やネットワークの負荷を分散することができる。代表的なP2PネットワークとしてGnutellaやFreenet<sup>5)</sup>があり、それらのP2Pネットワークでは数百万単位の端末が協調して巨大な情報共有システムを実現している。またP2Pネットワークにおける各端末は自律的に動作し、環境の変化に対応してネットワークを維持する性質を備えている。そのため、P2Pネットワークは多くの端末や情報が遍在するユビキタス環境に適したネットワーク技術の1つとして注目されており、主に情報検索に焦点を置いて研究が進められている。しかし、P2Pネットワークにおける既存の情報検索手法は、そのままでは位置をキーとする検索要求を効率良く処理できない。

以上のことを考慮し、本論文では、端末の位置情報に基づくP2PネットワークLL-Net(Location-based Logical Network)の構築手法と、LL-Netを利用した情報検索手法を提案する。LL-Netは緯度、経度によって物理領域を格子状のエリアに分割する。各端末は各エリア内で木構造のネットワークを構築し、またエリアを階層的にとらえて、周囲のエリアに位置する他の端末とリンクを構築する。各端末は近くのエリアに対しては密に、遠くのエリアに対しては疎にリンクを構築することになる。LL-Netはこのようなネットワークを維持することで、クエリをフラッディングする範囲を任意の領域に存在する端末のみに制限できる。また本論文では、LL-Netが位置をキーとする検索要求を効率良く処理できることを、シミュレーション評価

文献 4) では、日本に存在する 7,000 万台の車両の 20% が稼動している状態で、1 分間隔で位置情報の登録を行い、移動中の車両の 10% が 5 分間隔で検索要求が発生する場合、計 85 台のサーバが必要になると推定している。

によって示す．

以降、本論文では 2 章で関連研究について述べ、3 章で LL-Net の概念を説明する．4 章では LL-Net を構築、維持するプロトコルについて説明し、5 章でシミュレーションによる評価と考察を行う．最後に 6 章で本論文をまとめる．

## 2. 関連研究

P2P ネットワークの構造は、非構造型 (unstructured) と構造型 (structured) に大別できる．非構造型 P2P ネットワークは、P2P ネットワークに参加するピアが特段の規則性なく相互接続された論理ネットワークを構成し、情報検索は隣接するすべてのピアにクエリを転送していくフラッディング手法が主に用いられる．この手法はピア数が多くなるとクエリが大量に発生してしまい、ネットワークの負荷が増大してしまうことが問題となっている．そのため近年では、ピアが持つコンテンツを基準にピアを分類することで、クエリをフラッディングする範囲を制限する手法が多く提案されている．SONs (Semantic Overlay Networks)<sup>6)</sup> は、各ピアが保持するコンテンツのジャンルを考慮してクエリをルーティングすることで、目的の情報を高い精度で検索する手法である．SETS<sup>7)</sup> はピアが保持するドキュメントに tf-idf を適用し、意味的に近いドキュメントを持つピアが論理ネットワーク上で近くに配置されるようにすることによって検索効率を高めている．文献 8) では、ピアが持つコンテンツとクエリを RDF を用いて表記することで、コンテンツの意味を考慮したクエリのルーティングを実現している．

一方、構造型 P2P ネットワークはある規則に従って論理ネットワークを構成することによって検索効率やスケーラビリティの向上を図る手法であり、一般に DHT (Distributed Hash Tables) と呼ばれている．DHT の代表的な手法である Chord<sup>9)</sup>、Pastry<sup>10)</sup>、Tapestry<sup>11)</sup> では、情報を発見するまでのクエリのホップ数を  $O(\log n)$  に、CAN (Content-Addressable Network)<sup>12)</sup> では  $O(dn^{1/d})$  に抑えている ( $n$  は P2P ネットワークに参加している端末数、 $d$  は CAN における次元数である)．ただしこれらの手法で実現できるものは単一のキー値に基づく検索のみであり、範囲検索をはじめとする柔軟な検索はできない．これに対し、PeerSearch<sup>13)</sup> や Squid<sup>14)</sup> では、DHT と他の技術を

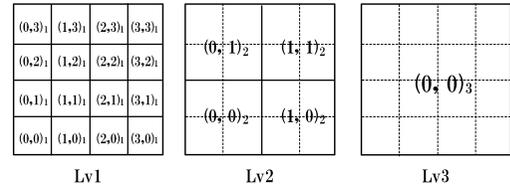


図 1 エリア ID と階層構造

Fig. 1 Area IDs and hierarchical area structure.

組み合わせることで問題を解決している．PeerSearch では DHT と VSM (Vector Space Model)、LSI (Latent Semantic Indexing) を組み合わせることで、類似文書検索を可能としている．また、Squid は局所性を維持し、 $d$  次元空間を SFC (Space-Filling Curve) によって 1 次元空間へマッピングすることによって、DHT の上でキーワードによる検索や範囲検索を実現している．

上記の手法はいずれも端末の物理的な位置を考慮しておらず、位置をキーとする検索要求の処理には適していない．また、ユビキタス環境では多くの情報が頻繁に生成され、変化する．さらに、移動を行う端末も存在する．上記の手法はそのような動的な環境において適用することを想定していない．本研究で提案する LL-Net は端末の位置を考慮し動的にネットワークを構築することで、コンテキストウェアサービスで発生する位置をキーとする検索要求を効率良く処理する．

## 3. LL-Net の概念

本章では LL-Net におけるエリア、ピア、リンクの定義について説明する．また LL-Net を利用した検索手法である領域指定検索について述べる．

### 3.1 エリア

LL-Net では物理領域を緯度、経度 ( $x, y$  座標) によって格子状に区切り、その各領域をエリアと定義する．エリアはすべて等しい大きさの正方形であり、 $x$  座標の ID と  $y$  座標の ID を持つ．

LL-Net ではエリアを階層的に考える．最も小さいサイズのエリアをレベル 1 のエリアとし、それ以上のレベルにおいては、レベル  $N$  のエリアが 4 つでレベル  $(N+1)$  のエリアを形成すると定義する．以下、レベル  $N$  のエリアを  $LvN$  と記述する．図 1 は、 $Lv1$  から  $Lv3$  までのエリアの階層化の様子を表している．レベルが 1 つ上がると、エリアの 1 辺の長さ (エリアサイズ) は 2 倍になり、エリアの面積は 4 倍になる．以降、 $x$  座標の ID が  $x$ 、 $y$  座標の ID が  $y$  の  $LvN$  のエリアを、 $(x, y)_N$  と表記する．ある座標における  $LvN$  のエリア ID は、その座標を  $LvN$  エリ

P2P ネットワークを利用した代表的なアプリケーションである Gnutella は、そのフラッディング機能のため、メッセージストームを発生させたことが報告されている．

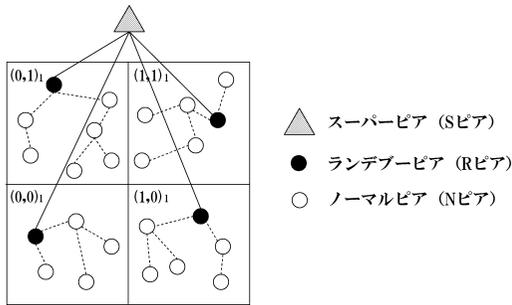


図 2 ピアの種類とその関係

Fig. 2 Types of peers and their relationships.

アのエリアサイズで割った値の整数部と定義する．たとえば  $L_{v1}$  のエリアサイズが 100 だったとき、座標  $(320, 160)$  は、 $(3, 1)_1$ 、 $(1, 0)_2$ 、 $(0, 0)_3$  に含まれることになる．また、図 1 から分かるように、 $(x, y)_N$  は  $(2x, 2y)_{N-1}$ 、 $(2x+1, 2y)_{N-1}$ 、 $(2x, 2y+1)_{N-1}$ 、 $(2x+1, 2y+1)_{N-1}$  の 4 つの下位エリアを含むことになる．また、 $(x, y)_N$  は  $4^{(N-1)}$  個の  $L_{v1}$  エリアを含むことになる．

### 3.2 ピア

本論文では、固定端末、携帯端末、センサなど、情報を検索したり提供したりする端末はすべて LL-Net に参加するピアとする．各ピアは位置情報などのコンテキスト情報や、個別の情報を管理、提供しており、常時ネットワークに接続しているものとする．

LL-Net では、スーパーピア、ランデブーピア、ノーマルピアの 3 種類のピアを考える (図 2)．以降、スーパーピア、ランデブーピア、ノーマルピアをそれぞれ S ピア、R ピア、N ピアと表記する．

N ピアと R ピアは、各  $L_{v1}$  エリア内において R ピアをルートとする木構造の論理ネットワーク (エリア内ネットワーク) を構成する．エリア内ネットワークを木構造とするのは、LL-Net の論理ネットワーク構造を構築、維持するアルゴリズムを簡潔にするためである．R ピアは新規ピアからのエリア内ネットワークへの参加要求を受け付けるピアであり、各  $L_{v1}$  エリアに 1 つずつ存在する．N ピアと R ピアは自身の ID と座標、エリア内ネットワークの木構造における親ピア情報と子ピア情報、および、次節で説明するリンク先のピア情報を持つ．ピア情報とは、そのピアの ID や座標、そのピアが現在位置しているエリア (存在エリア) の ID などである．R ピアと N ピアの違いは LL-Net を構築、維持する際の役割のみであり、R ピアが N ピアと比べて特殊な端末である必要はない．

S ピアはすべてのピアにとって既知の存在であり、全エリアの R ピアの情報を管理する特別なピアである．

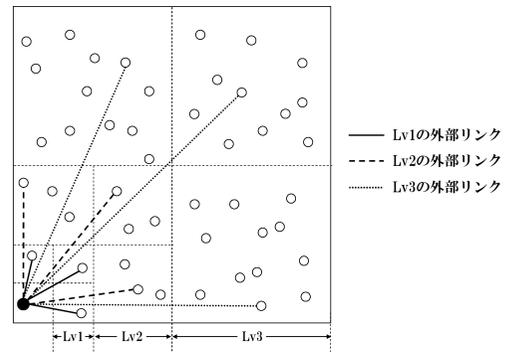


図 3 リンクの一例

Fig. 3 Example of inter-area links.

S ピアは LL-Net に参加していても参加してなくてもよいが、ネットワークへの接続が安定している固定端末を想定する．LL-Net に参加するピアは、LL-Net への参加要求を送信すべき R ピア情報を取得するために、S ピアから自身の存在エリアの R ピア情報を取得する．また、次節で説明するリンクを構築する際にも S ピアから R ピア情報を取得する．

Gnutella をはじめとする P2P ネットワークでは、新規にネットワークに参加するピアからの参加要求を受け付ける well-known なピアが存在する．well-known なピアの IP アドレスなどの情報は Web ページで公開されている．LL-Net での S ピアはその well-known なピアに相当し、LL-Net への入り口となる存在である．本論文では、S ピアの故障やネットワークからの退出などにより他のピアから S ピアにアクセスできない状況は発生しないと仮定する．

### 3.3 リンク

N ピアと R ピアはエリアを階層的にとらえ、外部エリアに位置する N ピアあるいは R ピアとリンクを構築する．外部エリアとは、存在エリア以外のエリアのことである．またリンクを構築するとは、リンク先のピア (リンクピア) の情報を記憶しておくという意味であり、つねに通信コネクションを確立しておくという意味ではない．

図 3 は左下角のエリアに位置するピアが持つリンクの例を示している．存在エリアの周囲の  $L_{v1}$  エリアへのリンクを  $L_{v1}$  のリンクと定義する． $L_{v1}$  のリンクは周囲のすべての  $L_{v1}$  エリアに対して構築するため、最大で 8 つ構築することになる．図 3 では周囲に 3 つしか  $L_{v1}$  エリアがないため、 $L_{v1}$  のリンクも 3 つとなっている．また、自身と同じ  $L_{v(N+1)}$  エリアに位置し、かつ自身が位置しない  $L_{vN}$  エリアに含まれるピアとの間に構築するリンクを、 $L_{vN}$  のリ

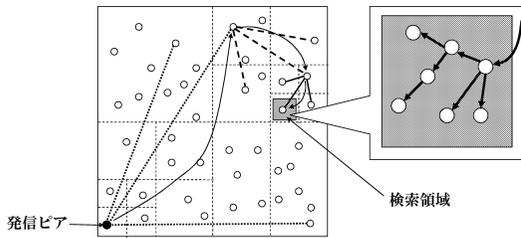


図 4 領域指定検索

Fig. 4 Region-specified search.

リンクと定義する．ただし  $N$  は 2 以上である．図 3 のように， $L_v N$  のリンクは 3 つずつ構築することになる．各ピアがこのようなリンクを持つことで， $L_v 1$  エリアの数を  $n$  とすると，任意のエリアまでのクエリのホップ数を最大でも  $\log_4 n$  に抑えることができる．

### 3.4 領域指定検索

領域指定検索とは，位置情報をキーとする検索手法である．領域指定検索ではクエリをフラディングする範囲を任意のエリアに含まれるピアのみに制限できる（図 4）．これは 3.2 節，3.3 節で述べたように，LL-Net では各ピアがエリア内においてネットワークを構築し，エリアを階層的にとらえてリンクを構築するからである．領域指定検索によって，たとえば自身の周辺に存在している友人の端末や，ある駅の周辺に設置してあるセンサに効率良くクエリを送ることが可能となり，それらからコンテキスト情報を取得できるようになる．

領域指定検索を行う際，クエリを発信するピア（発信ピア）はクエリを送りたい領域（検索領域）を座標で指定する．このとき，検索領域と重複する領域を持つエリアが目的エリアとなる．各ピアは自身が持つリンクピア情報を参照し，目的エリアに最も近いエリアに位置しているリンクピアへとクエリを転送する．ただし，エリア内ネットワークへの参加中，もしくはリンクの構築中にクエリを受け取った場合は，クエリを正確に転送できない可能性が高いため，それらの処理が終わってからクエリを転送する．目的エリアに位置しているピアがクエリを受け取った場合は，エリア内ネットワークへのフラディングを開始する．以上が領域指定検索の概要である．領域指定検索の詳細は付録を参照いただきたい．

## 4. ネットワーク維持プロトコル

本章では，LL-Net を構築，維持するためのプロトコルであるネットワーク維持プロトコルの概要について述べる．ネットワーク維持プロトコルによって，LL-Net はピアのネットワークへの参加や退出，移動

や故障に対応して LL-Net の論理ネットワークを維持する．各プロトコルの詳細は付録で述べる．

### 4.1 ネットワーク参加プロトコル

ネットワーク参加プロトコルはピアが新規に LL-Net に参加する際のプロトコルである．以降，新規にネットワークに参加するピアを新規ピアと表記する．新規ピアはまず S ピアへ必要な R ピア情報を問い合わせる．必要な R ピア情報とは，存在エリアの R ピア情報とリンクを構築する外部エリアの R ピア情報である．3.3 節で述べたように， $L_v 1$  のリンクは周囲の 8 エリアに対して， $L_v 2$  以上のリンクはそれぞれ 3 つのエリアに対して構築する必要がある．したがって最大の  $L_v$  を  $N$  とすると，全部で  $8 + 3 \times (N - 1)$  個の外部 R ピア情報を取得することになる．

新規ピアは R ピア情報を取得すると，存在エリアの R ピアへエリア内ネットワークへの参加要求を送信する．参加要求を受け取ったピアは自身の子ピアの数を参照し，その数が閾値以下であれば参加を許可し，閾値以上であれば参加要求を子ピアへ転送する．新規ピアは許可を返してくれたピアの中から親ピアを決定し，エリア内ネットワークへ参加する．このとき，木構造のルートに近く，子ピアの数が少ないピアを優先して選択する．また新規ピアはエリア内ネットワークに参加すると同時に，次節で説明するリンク構築プロトコルに従ってリンクを構築する．

LL-Net から退出したピアが再び LL-Net に参加する際は，S ピアに R ピア情報を問い合わせず，以前 LL-Net に参加した際に取得した R ピア情報を利用してエリア内ネットワークへの参加，リンクの構築を行う．これによって，S ピアへの負荷集中を避けることができる．

### 4.2 リンク構築プロトコル

リンク構築プロトコルは，エリア間のクエリ転送を行うためのリンクを構築するプロトコルである．新規ピアは S ピアから外部エリアの R ピア情報を取得した後，このプロトコルに従って階層的なリンクを構築する（図 3）．また，エリア間を移動したピアもこのプロトコルに従ってリンクを再構築する．

リンクを構築するピア（リンク元ピア）は外部 R ピアにリンク要求を送信する．リンク要求を受け取ったピアはリンクを許可し，また自身の子ピアの中からランダムに 1 つピアを選択し，リンク要求を転送する．すべての子ピアにリンク要求を転送しないのは，トラフィックの増大を避けるためである．リンク元ピアは許可を返してくれたピアの中から，リンク先ピアとしてピアを 1 つ選択する．このとき，リンクの数が少な

いピアを優先して選択する．リンク元ピアはリンク先ピアへ自身の情報を伝え、双方向のリンクを構築する．

#### 4.3 エリア間移動プロトコル

エリア間移動プロトコルはピアが  $L_{v1}$  のエリア間を移動するときのプロトコルである．想定環境には携帯端末も存在するため、このプロトコルによって対応する．各ピアは GPS や RFID などから定期的に自身の座標情報を取得し、座標情報から存在エリアの ID を計算することで、エリアを移動したことを認識するものとする．以降、エリア間を移動するピアのことを移動ピア、移動した先のエリアを移動先エリアと表記する．以下、R ピアが移動した場合と N ピアが移動した場合について説明する．

##### 4.3.1 R ピアが移動した場合

移動ピアは自身の子ピアの中からランダムに 1 つピアを選び、そのピアに R ピアの役割を委任する．また移動ピアは S ピア、エリア内のピア、リンクピアに新規 R ピアの情報を送る．新規 R ピアに選ばれなかった子ピアは、新規 R ピアの子ピアとなる．新規 R ピア情報を受け取ったピアは R ピア情報を更新する．

次に移動ピアは、移動したエリアのレベルを考慮し、リンクピアに対して移動することを伝え、自身の情報を消去してもらう．たとえば  $(0, 0)_1$  から  $(1, 0)_1$  に移動した場合は、 $L_{v1}$  エリア間での移動のみなので、 $L_{v1}$  のリンクピアに対してのみ移動を伝えるが、 $(1, 0)_1$  から  $(2, 0)_1$  に移動した場合は、 $L_{v1}$  と  $L_{v2}$  のエリア間での移動となるため、 $L_{v1}$  と  $L_{v2}$  のリンクピアに対して移動を伝える．このようにすることで、不必要となったリンクピア情報のみを消去することができる．移動ピアの移動を知ったピアは、移動ピアがいたエリアへのリンクをほかに持っていない場合、リンク構築プロトコルによって再構築する．

移動ピアは自身が記憶している周囲 8 エリアの R ピアの情報の中から、移動先エリアの R ピア情報を探し、エリア内ネットワークへの参加要求を送る．新規に LL-Net に参加した際に S ピアから周囲 8 エリアの R ピア情報を取得しておくことで、エリア間を移動するたびに S ピアに R ピア情報を問い合わせる必要がなくなり、S ピアへの負荷集中を避けることができる．移動ピアは親ピアを決定してエリア内ネットワークに参加し、また親ピアから外部 R ピア情報を取得することで必要なリンクを再構築する．

##### 4.3.2 N ピアが移動した場合

移動ピアは親ピア、子ピアに移動を伝える．移動ピアの移動を知った親ピアは、子ピア情報の中から移動ピアの情報を消す．また移動ピアの移動を知った子ピ

アは、存在エリアの R ピアに参加要求を送り、新たに親ピアを決定する．後は R ピアが移動した場合と同様の処理を行う．

#### 4.4 故障回復プロトコル

故障回復プロトコルは、物理的な故障および通信障害によってネットワークから突然切断されたピアが発生した場合に、LL-Net を修復するためのプロトコルである．ピアは、クエリを転送しようとしたが、転送先との間に通信コネクションが確立できなかった場合に、転送先が故障したと判断して修復処理を行う．想定するユビキタス環境では無線による通信を行う端末も存在する．無線通信を利用する場合は、有線通信を利用する場合と比べるとネットワーク切断が生じる可能性が高い．ネットワーク切断が生じる環境においても LL-Net を維持するために、故障回復プロトコルを用意する．

ただし、故障回復プロトコルは R ピアや N ピアが故障した際に LL-Net の構成を修復するためのプロトコルであり、S ピアの故障については別の対策が必要である．S ピアの故障に対しては、たとえば S ピアを多重化し、S ピアが管理する R ピア情報のデータベースの一貫性を 2 相コミットを用いて保持するといった一般的な方法をとることが考えられる．

#### 4.5 リンク確認プロトコル

リンク確認プロトコルは、リンク情報の不備を補うプロトコルである．各ピアは定期的に自身の持つリンク情報に不備がないかを確認し、不備が見つかった場合はリンク構築プロトコルに従ってリンクを再構築する．想定環境は動的な環境であるため、ピアのネットワーク切断やエリア間移動が同時に多数生じることにより、エリア内ネットワークやリンクの再構築が正確に行われない可能性がある．リンク確認プロトコルを利用することで、そのような場合にエリア内ネットワークやリンクを正確に再構築することができる．またピアが存在しないエリア（無人エリア）が発生した場合も、リンク確認プロトコルによって対応可能である．

## 5. 評価と考察

本章では LL-Net のシミュレーション評価結果を示し、それに対する考察を行う．このシミュレーション評価は、j2sdk1.4 を用いて仮想的に想定環境を構築することで行った．

評価環境は一部の評価を除いて表 1 に従う．LL-Net の適用範囲は世界全体を想定しているが、今回のシミュレーションでは一部の領域に適用した場合を想定して

表 1 シミュレーションの環境設定  
Table 1 Environmental setup.

|                  |                        |
|------------------|------------------------|
| シミュレーション領域       | $2^{20} \times 2^{20}$ |
| 検索領域             | $2^{15} \times 2^{15}$ |
| 総ピア数             | 16,600                 |
| 総検索回数            | 5,000                  |
| 単位時間あたりの移動速度     | 1                      |
| 単位時間あたりの検索開始率    | 1/60,000               |
| 単位時間あたりのリンク確認実行率 | 1/1,000                |
| 木構造ネットワークの子ピア数   | 5                      |
| 検索領域を決定する傾向      | ランダム                   |
| ピアの移動モデル         | ランダムウェイポイント            |

評価する。日本のインターネット人口は 62,844,000 人であり<sup>15)</sup>、また日本の国土面積は 377,906.97 km<sup>2</sup> である。シミュレーションでは端末の存在位置の偏りを考慮しないため、1 km<sup>2</sup> あたりのピア数は約 166 となる。シミュレーション領域は 100 km<sup>2</sup> (= 10 km × 10 km) を想定し、ピア数は 166 × 100 = 16,600 とする。メッセージやクエリが 1 ホップする時間をシミュレーションの単位時間とする。検索領域はシミュレーション領域内からランダムに指定する。LL-Net が想定する環境では固定端末やセンサなど移動しないピアも多く含まれるが、本シミュレーション評価においては、環境の動的な変化を重視して評価するために、すべてのピアを携帯端末だと想定し、移動させる。ピアの移動モデルはランダムウェイポイントとする。ランダムウェイポイントとは、各ピアがランダムで目的座標を決定し、目的座標に向かって一直線に移動する移動モデルである。またピアの性能差や故障は考慮しない。

LL-Net の比較対象として Random と PLRG (Power Law Random Graph) を想定する。Random は各ピアの隣接ピアがほぼ一定数で、かつランダムに決定されるネットワークである。今回、各ピアの隣接ピア数は Gnutella におけるデフォルトの隣接ピア数である 4 とする。PLRG は各ピアの隣接ピア数が Power Law (べき法則) に基づくネットワークである。Power Law に基づくことで、少数のピアに多くのリンクが集中し、大多数のピアはほとんどリンクを持たないネットワークとなる。文献 16)、17) では、Gnutella をはじめとする多くの P2P ネットワークは PLRG の形になるということが述べられている。

今回のシミュレーションでは物理ネットワークを考慮しない。しかし、実環境において端末の位置と物理ネットワークにおける距離は相関性がある。したがって、LL-Net の論理ネットワークは端末の位置情報に基づくため、物理ネットワークとの相関性を持っている。また比較対象においても、物理ネットワークとの相関性を考慮し、各ピアの隣接ピアをその近隣のピア

から選択する。

シミュレーションにおける各評価項目の定義を以下に示す。

- 検索の成功

各ピアは一定確率で検索を行う。LL-Net における各ピアは領域指定検索手法による検索を行う。また比較対象における各ピアはフラディングによる検索を行い、クエリの TTL は Gnutella におけるデフォルトの TTL である 7 とする。検索の際、発信ピアは正方形の検索領域を指定してクエリを発信する。検索領域内に位置するピアは、クエリを受け取ると発信ピアへレスポンスを返す。一定時間内に検索領域内に位置するピアから 1 つでもレスポンスが得られた場合、その検索を成功とし、レスポンスが得られない場合を失敗とする。シミュレーションでは検索が成功する確率を計測する。

- ホップ数

ホップ数とはクエリが発信されてから、検索領域内に位置するピアに到達するまでに転送された回数を表す。シミュレーションでは、検索が成功した場合のクエリのホップ数の平均値を計測する。

- レスポンス数

レスポンス数とは 1 度の検索で得られるレスポンスの総数である。シミュレーションではレスポンス数の平均値を計測する。

- トラフィック

トラフィックには検索トラフィックとネットワーク維持トラフィックがある。検索トラフィックとは検索を行ったときに生じるクエリの量であり、ネットワーク維持トラフィックとは LL-Net を維持するためのメッセージの量である。ネットワーク維持トラフィックはピアがエリア間を移動した場合や、ピアの故障を検知した場合などに発生する。シミュレーションではクエリやメッセージが 1 ホップした場合を 1 トラフィックとして計測する。

### 5.1 比較対象との比較

本節では LL-Net と比較対象の評価結果について考察する。LL-Net と比較対象を比較した結果を表 2、表 3、図 5、図 6 に示す。表 2 より LL-Net では比較対象よりも高確率で検索が成功することが分かる。LL-Net はピアの位置情報に基づいてネットワークを構築するため、ほぼ確実に任意の領域へクエリを転送できる。LL-Net においてクエリ転送が失敗するのは、ネットワーク参加中またはリンク構築中のピアがクエリを受け取った場合、それらの処理が終了するまでク

表 2 各ネットワークの検索成功率

Table 2 Retrieval success ratios.

| ネットワーク名 | LL-Net | PLRG   | Random |
|---------|--------|--------|--------|
| 検索成功率   | 1      | 0.7342 | 0.9524 |

表 3 各ネットワークの平均レスポンス数

Table 3 The average number of responses.

| ネットワーク名  | LL-Net  | PLRG     | Random   |
|----------|---------|----------|----------|
| 平均レスポンス数 | 16.2536 | 4.937074 | 3.864133 |

表 4 各ネットワークの検索成功率 (位置依存)

Table 4 Retrieval success ratios (location-dependent).

| ネットワーク名 | LL-Net | PLRG  | Random |
|---------|--------|-------|--------|
| 検索成功率   | 1      | 0.736 | 0.9562 |

表 5 各ネットワークの平均レスポンス数 (位置依存)

Table 5 The average number of responses

(location-dependent).

| ネットワーク名  | LL-Net  | PLRG     | Random  |
|----------|---------|----------|---------|
| 平均レスポンス数 | 16.3206 | 5.427446 | 4.06233 |

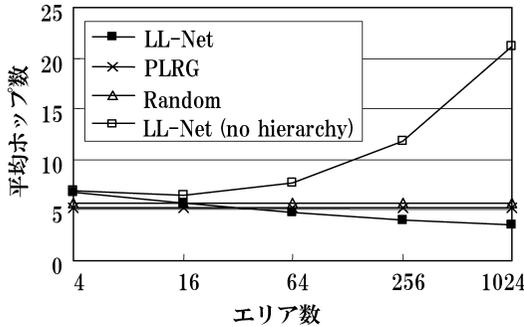


図 5 各ネットワークの平均ホップ数

Fig. 5 The average number of hop counts.

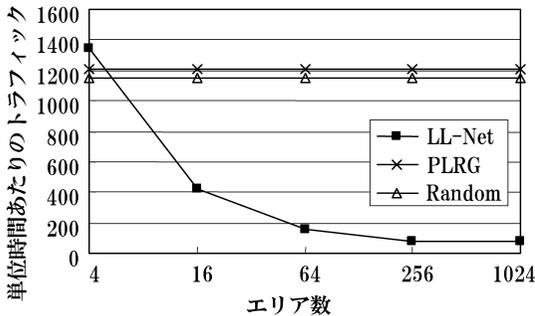


図 6 各ネットワークの単位時間あたりのトラフィック

Fig. 6 The amount of traffic per unit time.

エリを転送しないからである。このアルゴリズムは正確なクエリの転送を実現するために役立つが、レスポンスを得るまでの時間を増大させる。そのためクエリを発信してから一定時間内にレスポンスを得られない可能性が生じる。サービスによっては素早いレスポンス応答を必要とする場合もあるため、状況に応じて正確な転送と素早い転送を使い分ける必要がある。

表 3 より LL-Net は比較対象よりも多くのレスポンスを得られることが分かる。検索領域に含まれるピア数の期待値は、総ピア数  $\times$  (検索領域/シミュレーション領域) であり、今回の評価環境では約 16.2 となる。したがって LL-Net では検索領域内に含まれるピアに

正確にクエリを転送できていることが分かる。

図 5 よりエリア数が 64 以上の場合、LL-Net は比較対象よりもホップ数を抑えてクエリを転送できることが分かる。エリア数が増加すると目的のエリアに到達するまでのクエリのホップ数が増加する。しかしエリアあたりのピア数が減少するため、目的のエリア内に到達した後のクエリのホップ数が減少する。エリア数の増加にともない全体のホップ数が減少していることから、エリアあたりのピア数の影響が大きいと分かる。またエリアを階層化しない LL-Net (no hierarchy) と比べて、ホップ数を短縮できていることが分かる。

図 6 は各ネットワークの単位時間あたりに発生するトラフィックを比較したグラフである。LL-Net では検索トラフィックだけでなく、ネットワーク維持トラフィックも発生するが、それを含めても比較対象よりもトラフィックを抑えられることが分かる。これは 3.4 節で述べたように、LL-Net はクエリをフラッディングする範囲を任意のエリアに含まれるピアのみに制限できるため、比較対象よりも大幅に検索トラフィックを削減できるからである。

検索傾向を Zipf 分布に基づく位置依存とした場合の評価も行った。この評価において、各ピアは自身に近い領域を多く検索する。表 4、表 5 より、検索傾向を位置依存にすることで、比較対象における検索成功率、平均レスポンス数は増加することが分かる。また各ネットワークにおける平均ホップ数は、検索傾向がランダムな場合よりも約 0.1 減少した。各ネットワークで発生するトラフィックはピア数とクエリの TTL に依存するため、検索傾向を変えても変化はない。以上より、いずれの評価項目においても、各ネットワークの優劣関係に大きな変化はないことが分かる。自身の周辺を検索する傾向をさらに強めれば、比較対象の検索成功率はさらに上昇する。ただし検索領域を決定する傾向はサービスに依存して決まるため、一概にすべてのピアが自身の周辺を検索する傾向にあるとはいえない。したがって、LL-Net の比較対象に対する優

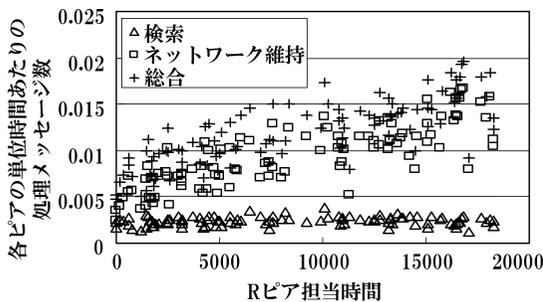


図 7 R ピア担当時間と処理メッセージ数の関係 (エリア数=256)  
Fig. 7 Relationships between the number of processed messages per unit time and time duration the peer behaved as an R-Peer (# of areas = 256).

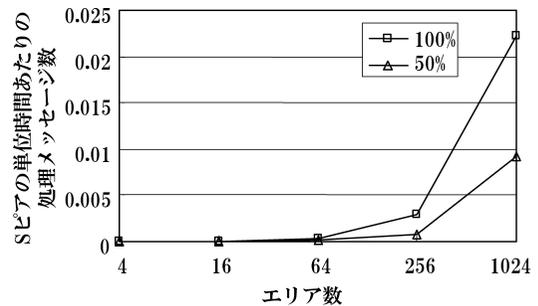


図 8 移動するピアの割合と S ピアの処理メッセージ数の関係  
Fig. 8 Relationships between mobile peer ratio and the number of messages processed by the S-Peer.

位性には変わりはないといえる。

## 5.2 LL-Net の詳細評価

本節では LL-Net について詳細に考察する。図 7 はエリア数が 256 の場合の、各ピアの処理メッセージ数を比較したグラフである。x 座標は R ピアとして行動した時間を、y 座標は単位時間あたりに処理した検索クエリやネットワーク維持メッセージの数を表している。図 7 より、各ピアが処理する検索クエリの量は少ないことが分かる。単位時間あたりの検索開始率は  $1/60,000$  としているため、たとえば各ピアが 10 分間に 1 回検索を行う環境を想定しても、1 秒に 0.2~0.3 個のクエリを処理すればよい。想定するサービスである集合場所検索サービスでは、各ピアから 1 日に数回の検索要求が発生する程度なので、各ピアのクエリの処理負荷は小さいといえる。また R ピアを担当する時間が長いピアほどネットワーク維持メッセージを多く処理していることが分かる。これはエリア内ネットワークへの参加要求やリンク構築要求などが、まず最初に R ピアへと送信されるためである。メッセージ処理による負荷が大きい場合には R ピアの役割を子ピアなどに委任する必要がある。しかし、今回のシミュレーションではすべての端末を移動端末と想定したが、実環境では移動しない端末も多数存在する。したがって、実環境では端末のエリア間の移動回数が少なくなるため、ネットワーク維持トラフィックによる処理負荷は、今回の評価結果よりも小さくなる。

図 8 は移動するピアの割合と、S ピアの単位時間あたりの処理メッセージ数の関係を表している。図 7 が示す各ピアの処理メッセージ数と比較してみると、S ピアの処理メッセージ数は多くないことが分かる。ま

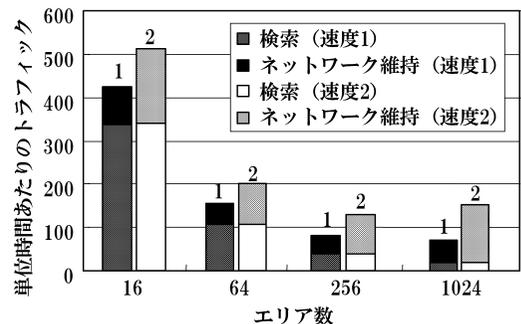


図 9 ピアの移動速度とトラフィックの関係

Fig. 9 Relationships between peers' moving speed and traffic.

た移動するピアの割合が少ないほうが、処理メッセージ数は減少することが分かる。S ピアが処理するメッセージの多くは、R ピアがエリア間を移動した際に発生する新規 R ピア情報を含む更新メッセージである。エリア数が増加する、つまりエリアサイズが小さくなると、R ピア数および R ピアのエリア間の移動回数が増加するため、S ピアの処理メッセージも増加する。しかし、移動しないピアがいる場合は R ピアのエリア間の移動回数が大幅に減少する。なぜなら、R ピアの役割の委任を繰り返せば、いずれは移動しないピアが R ピアを担当することになり、そのピアがその後エリア間を移動することはないからである。想定環境では携帯端末よりも固定端末のほうが多く存在するため、ある程度の時間が経過すれば各エリアの R ピアはすべて固定端末が担当することになり、R ピア情報の更新は生じなくなる。したがってピア数が増加したとしても、S ピアの負荷が増大することはない。

図 9 はピアの移動速度の変化による、単位時間あたりのトラフィックへの影響を表している。各エリア数において、左の棒グラフは移動速度が 1 の場合、右の棒グラフは移動速度が 2 の場合のトラフィックを表し

日本のインターネット人口は 62,844,000 人、携帯電話でのみインターネットを利用している人口は 8,760,000 人である<sup>15)</sup>。

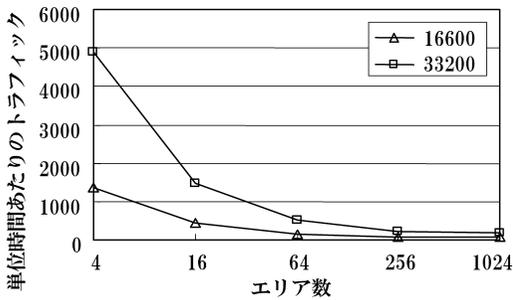


図 10 ピア数の変化によるトラフィックへの影響

Fig. 10 Impact on traffic by the increased number of peers.

ている。また各棒グラフにおいて、上部はネットワーク維持トラフィックを、下部は検索トラフィックを表している。図 9 よりエリア数が増加するにつれ、検索トラフィックが減少することが分かる。これは LL-Net では目的エリア内のネットワークにクエリをフラッディングするため、エリアあたりのピア数が検索トラフィックに大きな影響を与えるからである。また、移動速度が増すとネットワーク維持トラフィックが増加することが分かる。これは移動速度が増すと、ピアのエリア間の移動回数が増加するためである。以上より、移動速度が 1 の場合と 2 の場合では、総合トラフィックが最小となるエリア数が異なってくる。このように LL-Net では検索頻度や移動速度によってトラフィックが最小となるエリア数が変化する。これに関しては 6 章で述べる。

図 10 はピア数の変化による単位時間あたりのトラフィックへの影響を表している。ピア数を 2 倍にすると単位時間あたりのトラフィックは 2 倍以上になることが分かる。これは、1 度の検索で発生するトラフィックが増えるからである。LL-Net では目的のエリア内のネットワークにクエリをフラッディングするため、エリアあたりのピア数が増加すると検索トラフィックが増大する。TTL による転送制限を設けることでトラフィックの増大を防ぐこともできるが、それでは任意の領域へクエリを転送できなくなる可能性が生じるため、LL-Net の本来の目的を損なうことになる。この問題に関しても 6 章で述べる。

ピアの故障を考慮した評価も行った。ここで、故障とはネットワークから突然切断されることを意味する。図 11 ではピアが故障しない場合と、ピアは故障するが故障回復プロトコルを利用する場合、ピアは故障するが故障回復プロトコルを利用しない場合の検索成功率を比較している。図 11 はエリア数が 64 の場合の結果であり、 $x$  座標は単位時間あたりのピアの故障率を

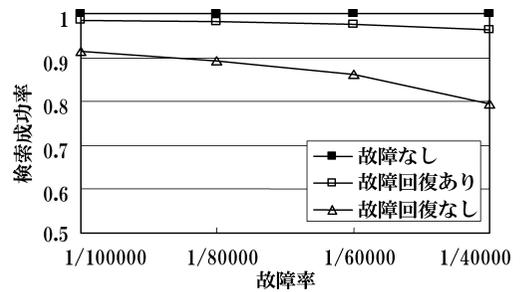


図 11 ピアの故障による検索成功率への影響 (エリア数=64)

Fig. 11 Impact on retrieval success ratio by failure of peers (# of areas = 64).

表している。故障した後、LL-Net に再参加する確率は毎時間 1/10000 で一定とした。図 11 より、ピアが故障することで検索成功率は減少するが、故障回復プロトコルを利用することで減少を抑えられることが分かる。実環境では有線通信を利用する端末が多く存在するため、ネットワークから突然切断される確率の平均値は、今回の評価における故障率よりも低くなる。したがって故障回復プロトコルはピアの故障に対応できるといえる。

## 6. まとめと今後の課題

本論文では端末の位置情報に基づく P2P ネットワーク LL-Net の構築手法と、LL-Net を利用した情報検索手法を提案した。LL-Net はコンテキストウェアサービスで発生する位置をキーとする情報検索要求を効率良く処理することを目的とする。シミュレーションによる評価では、LL-Net が比較対象よりも検索成功率、レスポンス数、ホップ数、トラフィックの面で優れていることを示した。また LL-Net における各ピアの負荷やピアの故障などについても考察した。今後の課題を以下に示す。

- ネットワーク維持プロトコルの改良  
具体的には、参加要求やリンク要求などのネットワークを維持するためのメッセージに、送信先エリアの ID を含める。これによってメッセージが誤ったエリアに送信された場合に、メッセージを受け取ったピアが誤送信を検知することができ、より正確に LL-Net を維持することができる。
- エリアの動的分割、統合手法の考案  
5.2 節で述べたように、LL-Net ではピアの移動速度や検索頻度によって、トラフィックが最小となるエリア数が変化する。またエリアあたりのピア数が増加すると検索トラフィックが増大する。これらの問題を解決するには、エリアを動的に分

割, 統合する必要がある. 現在は物理領域を均一に分割, 階層化しているが, 各領域のエリアの階層度を動的に決定することで, ピア数の増加にともなう検索トラフィックの増加を抑えることができる. ここで, 分割, 統合を行う際の判断基準が重要となる. 検索領域, ピア数, 検索頻度, 移動速度, 分割統合処理による各ピアへの負荷などを考慮し, トラフィックが最小となるように分割統合を行うべきである.

#### ● シミュレーション環境の改良

今回のシミュレーション評価では端末の性能差や正確な物理ネットワーク, S ピアの故障, 端末の存在位置の偏りなどを考慮していないため, 今後はそれらも考慮し, より実環境に近い環境を想定して評価を行う必要がある.

謝辞 本研究の一部は, 平成 15 年度総務省「ユビキタスネットワーク認証・エージェント技術の研究開発」の研究助成によるものである. また, 本研究の一部は, 文部科学省 21 世紀 COE プログラム「ネットワーク共生環境を築く情報技術の創出」(研究拠点形成費補助金)の研究助成によるものである. ここに記して謝意を表す.

#### 参 考 文 献

- 1) Abowd, G.D., Atkeson, C.G., Hong, J., Long, S., Kooper, R. and Pinkerton, M.: Cyberguide: A Mobile Context-Aware Tour Guide, *ACM Wireless Networks*, Vol.3, No.5, pp.421-433 (1997).
- 2) Dey, A.K. and Abowd, G.D.: Cybreminder: A Context-Aware System for Supporting Reminders, *Proc. 2nd Int. Symp. on Handheld and Ubiquitous Computing*, pp.172-186 (2000).
- 3) 金子 雄, 福村真哉, 春本 要, 下條真司, 西尾章治郎: モバイル環境における P2P 型通信を用いた状況依存型集合場所検索サービスの構築, 情報科学技術フォーラム (FIT2003) 論文集, Vol.4, pp.187-188 (2003).
- 4) Takeuchi, S., Watanabe, Y. and Teraoka, F.: The GLI System: A Global System Managing Geographical Location Information of Mobile Entities, *Trans. IEICE*, Vol.E84-B, No.8, pp.2066-2075 (2001).
- 5) Clarke, I., Sandberg, O., Wiley, B. and Hong, T.W.: Freenet: A Distributed Anonymous Information Storage and Retrieval System, *Proc. ICSI Int. Workshop on Design Issues in Anonymity and Unobservability*, pp.46-66 (2000).
- 6) Crespo, A. and Garcia-Molina, H.: Semantic Overlay Networks for P2P Systems, Technical report, Computer Science Department, Stanford University (2002).
- 7) Bewa, M., Manku, G.S. and Raghavan, P.: SETS: Search Enhanced by Topic Segmentation, *Proc. 26th Annual ACM SIGIR Conf. on Research and Development in Information Retrieval*, pp.306-313 (2003).
- 8) Ishikawa, N., Sumino, H., Omata, E., Hjelm, J., Yu, Y. and Zhu, Z.: Semantic Content Search in P2P Networks Based on RDF Schema, *Proc. 2003 IEEE Pacific Rim Conf. on Communications, Computers and Signal Processing*, Vol.1, pp.143-148 (2003).
- 9) Stoica, I., Morris, R., Karger, D., Kaashoek, M. and Balakrishnan, H.: Chord: A Scalable Peer-to-Peer Lookup Service for Internet Applications, *Proc. ACM SIGCOMM'01*, pp.149-160 (2001).
- 10) Rowstron, A. and Druschel, P.: Pastry: Scalable, Distributed Object Location and Routing for Large-Scale Peer-to-Peer Systems, *Proc. IFIP/ACM Int. Conf. on Distributed Systems Platforms (Middleware)*, pp.329-350 (2001).
- 11) Zhao, B., Kubiawicz, J. and Joseph, A.: Tapestry: An Infrastructure for Fault-Tolerant Wide-Area Location and Routing, Technical report, U.C. Berkeley, UCB/CSD-01-1141 (2001).
- 12) Ratnasamy, S., Francis, P., Handley, M., Karp, R. and Shenker, S.: A Scalable Content-Addressable Network, *Proc. ACM SIGCOMM'01*, pp.161-172 (2001).
- 13) Tang, C., Xu, Z. and Mahalingam, M.: Peer-to-Peer Information Retrieval Using Self-Organizing Semantic Overlay Networks, *Proc. ACM SIGCOMM'03*, pp.175-186 (2003).
- 14) Schmidt, C. and Parashar, M.: Enabling Flexible Queries with Guarantees in P2P Systems, *IEEE Internet Computing*, Vol.8, No.3, pp.19-26 (2004).
- 15) 財団法人インターネット協会: インターネット白書 2004, インプレス (2004).
- 16) Adamic, L.A., Lukose, R.M., Puniyani, A.R. and Huberman, B.A.: Search in Power-Law Networks, *Physical Review E*, Vol.64, No.4, pp.046135-1-046135-8 (2001).
- 17) Saroiu, S., Gummadi, P. and Gribble, S.: A Measurement Study of Peer-to-Peer File Sharing Systems, *Proc. Multimedia Computing and Networking* (2002).

## 付 録

### A.1 領域指定検索

LL-Net では任意の領域を指定してクエリを送ることが可能である(図4)。以下、領域指定検索の詳細を示す。

- (1) 発信ピアは目的領域を座標で指定し、クエリを用意する。目的領域と重複する領域を持つLv1 エリアを目的エリアとする。クエリには、発信ピア、中継ピア、TTL、目的領域、目的エリア、クエリID、転送Lvなどの情報が含まれる。
- (2) 発信ピアは自身の存在エリアが目的エリアに含まれているか確認する。含まれている場合は親ピアと子ピアへクエリを転送する。親ピアや子ピアへクエリを転送するとき、クエリの転送Lvは0とする。
- (3) 目的エリアが外部エリアを含む場合、発信ピアはリンクピア情報を参照し、目的エリアに位置しているリンクピアを探す。見つかった場合、そのリンクピアへクエリを転送する。リンクピアへクエリを転送するとき、クエリの転送LvはそのリンクピアのLvとする。目的エリアに位置しているリンクピアが見つからなかった場合は、次の処理を行う。
- (4) 発信ピアはLv2から最大Lvまで順番に、リンクピア情報を参照する。LvNのリンクピア情報を参照する際、そのピアが位置するLvNのエリアに、目的エリアが含まれているか確認する。含まれている場合はそのリンクピアへクエリを転送する。目的エリアを含むエリアに位置しているリンクピアが見つからなかった場合は、次の処理を行う。
- (5) 発信ピアはLv1から順番に、外部Rピア情報を最大Lvまで参照し、(4)と同様の処理を行う。
- (6) 発信ピアは親ピア、子ピア情報を参照し、目的エリアに位置しているピア情報が見つければクエリを転送する。見つからなかった場合、次の処理を行う。
- (7) 発信ピアは自身が持っているピア情報の中から最も目的エリアに近い場所に位置しているピアを選択し、クエリを転送する。
- (8) クエリを受け取ったピアは、まずクエリIDを参照する。過去に受け取ったことがあるクエリで、かつ転送Lvが0の場合はそのクエリに関する処理を中止する。受け取ったことがなければ、そのクエリのIDを記憶する。自身が目的領域内に位置している場合は、発信ピアへレスポンスを返す。その後、クエリのTTLが0でなければ、(2)以降の処理を行いクエリを転送する。ただし、エリア内ネッ

トワークへ参加中の場合もしくはリンクの構築中である場合は、クエリを正確に転送できない可能性が高いため、それらの処理が終わってからクエリを転送する。

### A.2 ネットワーク維持プロトコル

各ネットワーク維持プロトコルの詳細な動作を述べる。ネットワークを維持するためにピア間で交わされるメッセージは、メッセージタイプ情報を含んでおり、ピアはそれを参照して動作する。メッセージタイプは整数で表現される。またメッセージはメッセージを発信したピアの情報も含む。以降、メッセージタイプ情報がNのメッセージのことを、メッセージNと表記する。

#### A.2.1 ネットワーク参加プロトコル

ネットワーク参加プロトコルはピアがLL-Netに初めて参加する場合のプロトコルである。以下、プロトコルの内容を示す。

- (1) 新規ピアはSピアへメッセージ1を送る。
- (2) Sピアは新規ピアへ、メッセージ2を送る。メッセージ2には新規ピアの存在エリアのRピア情報を含める。新規ピアの存在エリアのRピア情報を持っていない場合は、新規ピアをそのエリアのRピアとして記憶し、それをメッセージ2へ含める。またメッセージ2には外部エリアのRピア情報を含める。Sピアは外部Rピア情報を、階層化されたLv1から最大Lvまでのエリアごとに選択する。次に、各Lvにおける外部Rピア情報の選択方針を示す。

- Lv1の外部Rピア情報

新規ピアが $(x, y)_1$ に位置している場合、その周囲の8エリア $((x, y + 1)_1, (x + 1, y + 1)_1, (x + 1, y)_1, (x + 1, y - 1)_1, (x, y - 1)_1, (x - 1, y - 1)_1, (x - 1, y)_1, (x - 1, y + 1)_1)$ のRピア情報をLv1の外部Rピア情報とする。ただし、新規ピアの存在エリアの位置によっては、周囲のエリアが3つまたは5つしかない場合がある。

- Lv2~最大Lvの外部Rピア情報

LvNのRピアを選択する際、まず、新規ピアが存在するLv(N+1)のエリア内に含まれ、かつ新規ピアが存在しないLvNの3つのエリアを選択する。たとえばLv2のRピア情報を選択する場合、新規ピアが $(0, 0)_3$ 内かつ $(1, 0)_2$ 内に位置しているとすると、 $(0, 0)_2, (0, 1)_2, (1, 1)_2$ の3つのLv2エリアを選択する。

次に、選択した3つのLvNエリアにそれぞれ含まれている、 $4^{N-1}$ 個のLv1エリアの中から、ラ

ングダムにそれぞれ 1 つずつ、計 3 つのエリアを選択する．その選択した 3 つの  $Lv1$  エリアの R ピア情報を  $LvN$  の外部 R ピア情報とする．

- (3) 新規ピアはメッセージ 2 を受け取ると、R ピア情報を記憶する．存在エリアの R ピア情報が自身のピア情報である場合は、自身が R ピアに任命されたと認識する．自身のピア情報でない場合は、エリア内ネットワークに参加するために、存在エリアの R ピアにメッセージ 3 (参加要求) を送る．メッセージ 3 は木の深さを測る変数  $h$  を含む．変数  $h$  の初期値は 0 である．またリンク構築プロトコルに従い、リンクを構築する．
- (4) メッセージ 3 を受け取ったピアは、自身の子ピアの数を参照し、その数が閾値以下であればメッセージ 4 (参加許可) を新規ピアに返す．メッセージ 4 は、自身の持つ子ピアの数と木構造における自身の深さを表す変数  $h$  を含む．許可しない場合は、変数  $h$  の値を 1 増やし、メッセージ 3 をすべての子ピアへ転送する．
- (5) 一定時間後、新規ピアは得られたメッセージ 4 を参照し、木構造における深さが低いピアを自身の親ピアとして決定する．深さが等しい場合は、子ピアの数が小さいピアを優先する．親ピアを決定した後、新規ピアは親ピアへメッセージ 5 を送る．
- (6) メッセージ 5 を受け取ったピアは、新規ピアを子ピアとして記憶する．

以上の動作はピアが LL-Net に初めて参加する場合の動作である．LL-Net に再参加する場合は、以前取得した R ピアの情報を利用してエリア内ネットワークへの参加およびリンクの構築を行うため、S ピアには問い合わせる必要はない．

#### A.2.2 リンク構築プロトコル

リンク構築プロトコルはピアがリンクを構築する際のプロトコルである．各ピアは  $Lv1$  から最大  $Lv$  までの外部 R ピアへリンク要求を送ることでリンクを構築する．どの外部 R ピア情報を取得するかはネットワーク参加プロトコルの節で述べたとおりである．次に、 $LvN$  のリンクを構築する場合のリンク構築プロトコルの動作を示す．

- (1) リンク元ピアは、 $LvN$  の外部 R ピアにメッセージ 6 (リンク要求) を送る．メッセージ 6 は  $Lv$  を表す変数  $lv$  と、木の深さを表す変数  $h$  を含む．変数  $lv$  の値は  $LvN$  の値と同じであり、変数  $h$  の初期値は 0 である．
- (2) メッセージ 6 を受け取ったピアは、新規ピアにメッセージ 7 (リンク許可) を返す．メッセージ 7

は  $Lv$  を表す変数  $lv$ 、木の深さを表す変数  $h$ 、自身が持つリンク数を表す変数  $n$  を含む．また自身の子ピアの中からランダムで 1 つピアを選択し、メッセージ 6 を転送する．

- (3) 一定時間後、新規ピアは得られたメッセージ 7 を参照し、リンク数が少ないピアを  $LvN$  のリンク先ピアとして決定する．リンク数が等しい場合は木構造における深さが低いピアを優先する．リンク先ピアを決定した後、新規ピアはメッセージ 8 をリンク先ピアへ送る．
- (4) メッセージ 8 を受け取ったピアは、新規ピアを  $LvN$  のリンクピアとして記憶する．

#### A.2.3 エリア間移動プロトコル

エリア間移動プロトコルはピアがエリア間を移動する場合のプロトコルである．まず、R ピアが移動した場合について説明する．

- (1) 移動ピアは自身の子ピアの中からランダムに新規 R ピアを選び、自身の子ピアと S ピアにメッセージ 21 を送る．また、リンクピアにメッセージ 22 を送る．メッセージ 21 とメッセージ 22 は新規 R ピア情報を含む．子ピアを持っていない場合は、S ピアと外部リンクピアにメッセージ 29 を送り、R ピア情報を消去してもらう．
- (2) メッセージ 21 を受け取った子ピアは新規 R ピア情報を参照し、もしそれが自身のピア情報と等しい場合は、自身が R ピアに任命されたと認識する．等しくない場合は、新規 R ピア情報を新たな存在エリアの R ピアとして記憶し、そのピアにメッセージ 3 を送ることで再び親ピアを決定する．また、等しい場合も等しくない場合も、自身の子ピアにメッセージ 21 を、リンクピアにメッセージ 22 を転送する．  
メッセージ 22 を受け取ったリンクピアは、新規 R ピアをそのエリアの新たな R ピアとする．またメッセージ 21 を受け取った S ピアは、R ピア情報を更新する．
- (3) 移動ピアは、移動が生じた  $Lv$  のリンクピアに、メッセージ 23 を送る．たとえば  $(0,0)_1$  から  $(1,0)_1$  に移動した場合は  $Lv1$  エリア間での移動のみだが、 $(1,0)_1$  から  $(2,0)_1$  に移動した場合は  $Lv1$  と  $Lv2$  のエリア間での移動が生じることになる．
- (4) メッセージ 23 を受け取ったピアは、リンクピア情報の中から移動ピアの情報を消去する．この処理によって移動ピアがいたエリアへのリンク情報が失われた場合は、リンク構築プロトコルによって必要なリンクを再構築する．

(5) 移動ピアは自身が記憶している周囲 8 エリアの R ピアの情報の中から、移動先エリアの R ピア情報を探し、メッセージ 24 (エリア間移動後の参加要求) を送る。ただし、移動ピアが R ピアの場合は一定時間経過してからメッセージ 24 を送る。これは、R ピア情報の更新が終わる前にメッセージ 24 を送ってしまうと、その後、古い外部 R ピア情報が返される可能性があるからである。

(6) メッセージ 24 を受け取ったピアは、自身の子ピアの数を参照し、その数が閾値以下であればメッセージ 25 (参加許可) を新規ピアに返す。メッセージ 25 は、自身の持つ子ピアの数と木構造における自身の深さを表す変数  $h$ 、外部 R ピア情報を含む。許可しない場合は、変数  $h$  の値を 1 増やし、メッセージ 24 をすべての子ピアへ転送する。

(7) 一定時間後、移動ピアは得られたメッセージ 25 を参照し、木構造における深さが低いピアを自身の親ピアとして決定する。深さが等しい場合は、子ピアの数が小さいピアを優先する。親ピアを決定した後、新規ピアは親ピアへメッセージ 26 を送る。また外部 R ピア情報を参照し、必要なリンクを再構築する。

(8) メッセージ 26 を受け取ったピアは、移動ピアを子ピアとして記憶する。

次に N ピアが移動した場合について説明する。

(1) 移動ピアは親ピア、子ピアにメッセージ 26 を送る。

(2) メッセージ 26 を受け取った移動ピアの親ピアは、子ピア情報の中から移動ピアの情報を消す。メッセージ 26 を受け取った移動ピアの子ピアは、存在エリアの R ピアにメッセージ 3 を送り、新たに親ピアを決定する。

(3) 以降、R ピアが移動した場合と同様の処理を行う。

#### A.2.4 故障回復プロトコル

故障回復プロトコルによって、ピアがネットワークから突然切断されても LL-Net を維持することができる。ただし、S ピアが故障することは考慮しない。ピアは、クエリを転送しようとしたが、転送先との間にコネクションが確立できなかった場合に、転送先が故障したと判断して LL-Net を修復する。以降、ネットワークから切断されたピアを故障ピア、それを検知したピアを検知ピアと表記する。故障回復プロトコルの内容を以下に記す。

##### ● リンクピアの故障を検知した場合

検知ピアはリンクピア情報の中から故障ピアの情報

を消去する。故障ピアに代わるリンク情報を持たない場合は、リンク構築プロトコルによって必要なリンクを再構築する。また検知ピアはクエリを目的のエリアに最も近いエリアに存在するリンクピアへと転送する。

##### ● 親ピアの故障を検知した場合

(1) 故障ピアが N ピアだった場合、検知ピアは親ピアの情報を消去し、存在エリアの R ピアにメッセージ 3 を送り、新たに親ピアを決定する。故障ピアが R ピアだった場合、検知ピアは S ピアにメッセージ 33 を送る。メッセージ 33 は、故障ピアの情報を含む。

(2) S ピアはメッセージ 33 を受け取ると、故障ピアの情報と自身が管理している R ピア情報を比較し、検知ピアにメッセージ 34 を送る。比較した R ピア情報が等しい場合は検知ピアを新規 R ピアとして記憶し、それを新規 R ピア情報としてメッセージ 34 に含める。等しくない場合はすでに R ピア情報の更新が行われていると判断し、自身の管理している R ピア情報をメッセージ 34 に含める。

(3) 検知ピアはメッセージ 34 に含まれる R ピア情報が自身のピア情報と等しい場合、自身を R ピアだと認識する。等しくない場合は新規 R ピアにメッセージ 3 を送り、新たに親ピアを決定する。また等しい場合も等しくない場合も、自身の子ピアにメッセージ 21 を、リンクピアにメッセージ 22 を送る。メッセージ 21 とメッセージ 22 には、自身のピア情報を新規 R ピア情報として含める。

##### ● 子ピアの故障を検知した場合

検知ピアは子ピア情報の中から故障ピアの情報を消去する。

#### A.2.5 リンク確認プロトコル

リンク確認プロトコルによって、各ピアは定期的に自身の持つリンク情報に不備がないかを確認する。外部 R ピア情報が不完全な場合は S ピアにメッセージ 41 を送る。メッセージ 41 には取得したい R ピアの Lv と、エリア ID を含める。リンク情報が不完全な場合は、リンク構築プロトコルに従うことで外部リンクを再構築する。親情報が欠落しており、自身が R ピアでない場合は、R ピアにメッセージ 3 を送ることで親ピアを決定する。

(平成 17 年 3 月 18 日受付)

(平成 17 年 8 月 24 日採録)

(担当編集委員 原嶋 秀次)



金子 雄

2003 年大阪大学工学部電子情報エネルギー工学科卒業。現在、同大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻博士前期課程在学中。コンテキストウェアネス、P2P ネット

ワークの研究に従事。



春本 要 (正会員)

1992 年大阪大学基礎工学部情報工学科卒業。1994 年同大学院基礎工学研究科博士前期課程修了。同年大阪大学大学院工学研究科情報システム工学専攻助手。1999 年大阪大

学大型計算機センター講師，2000 年同大学サイバーメディアセンター講師を経て，2004 年同大学院工学研究科助教授となり，現在に至る。博士（工学）。データベースシステム，マルチメディア情報システム等の研究に従事。電子情報通信学会，IEEE 各会員。



福村 真哉 (正会員)

2000 年大阪大学工学部電子情報エネルギー工学科卒業。2002 年同大学院工学研究科博士前期課程修了。現在，同大学院情報科学研究科博士後期課程在学中。マルチメディアコン

テンツの配信・適応機構，Web ページの個人化等の研究開発に従事。



下條 真司 (正会員)

1981 年大阪大学基礎工学部情報工学科卒業。1986 年同大学院基礎工学研究科博士後期課程修了。工学博士。同年大阪大学基礎工学部情報工学科助手。1989 年同大学大型計

算機センター講師。1991 年同助教授。1998 年同教授。2000 年同大学サイバーメディアセンター教授。同年サイバーメディアセンター副センター長，2005 年サイバーメディアセンター長となり現在に至る。その間，米国カリフォルニア大学アーバイン校客員研究員。グリッド技術，データベースとネットワークに関連したマルチメディア応用システム，P2P コミュニケーションネットワーク，コピキタスネットワークシステムの開発に従事。情報処理学会国際担当理事，日本学術振興会インターネット技術第 163 委員会副委員長。



西尾章治郎 (正会員)

1975 年京都大学工学部数理工学科卒業。1980 年同大学院工学研究科博士後期課程修了。工学博士。京都大学工学部助手，大阪大学基礎工

学部および情報処理教育センター助教授，大阪大学大学院工学研究科情報システム工学専攻教授を経て，2002 年より同大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻教授となり，現在に至る。2000 年より大阪大学サイバーメディアセンター長，2003 年より大阪大学大学院情報科学研究科長を併任。この間，カナダ・ウォータールー大学，ピクトリア大学客員。データベース，マルチメディアシステムの研究に従事。現在，Data & Knowledge Engineering 等の論文誌編集委員。本会理事を歴任。電子情報通信学会フェローを含め，ACM，IEEE 等，8 学会の会員。