

位置情報に基づく P2P ネットワークにおけるエリアの階層化

金子 雄[†] 春本 要^{††} 福村 真哉[†] 下條 真司^{†††} 西尾章治郎[†]

[†] 大阪大学大学院情報科学研究科 〒 565-0871 大阪府吹田市山田丘 1-5

^{††} 大阪大学大学院工学研究科 〒 565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1

^{†††} 大阪大学サイバーメディアセンター 〒 567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘 5-1

E-mail: †{yu,fukumura,nishio}@ist.osaka-u.ac.jp, ††harumoto@eng.osaka-u.ac.jp,

†††shimojo@cmc.osaka-u.ac.jp

あらまし 近年、ユビキタス環境の浸透に伴い、場所や時間などの状況を考慮して動作するコンテキストウェアサービスが注目を集めている。コンテキストのなかでも場所は特に重要であるため、コンテキストウェアサービスの構築には位置をキーとする情報検索メカニズムが重要となる。そこで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 を提案する。LL-Net は緯度、経度によって世界をエリアに分割する。各ピアはエリアを階層的に捉えて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エリア間のリンクを構築する。このようなネットワークを端末の移動や故障に応じて動的に構築することで、LL-Net が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、シミュレーションによって示す。

キーワード P2P ネットワーク, コンテキストウェア, ユビキタス, モバイル

Hierarchizing Area in a Location-Based Peer-to-Peer Network

Yu KANEKO[†], Kaname HARUMOTO^{††}, Shin'ya FUKUMURA[†], Shinji SHIMOJO^{†††}, and

Shojiro NISHIO[†]

[†] Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University 1-5 Yamadaoka, Suita-shi, Osaka, 565-0871 Japan

^{††} Graduate School of Engineering, Osaka University 2-1 Yamadaoka, Suita-shi, Osaka, 565-0871 Japan

^{†††} Cybermedia Center, Osaka University 5-1 Mihogaoka, Ibaragi-shi, Osaka, 567-0047 Japan

E-mail: †{yu,fukumura,nishio}@ist.osaka-u.ac.jp, ††harumoto@eng.osaka-u.ac.jp,

†††shimojo@cmc.osaka-u.ac.jp

Abstract With the popularization of ubiquitous environment, context-aware services which utilizes various context informations such as location of user, time, have been noticed. To realizing context-aware services, it is very important to provide a retrieval mechanism that efficiently retrieves location-dependent context information because location is a important context. In this paper, we propose a location-based P2P network LL-Net. The LL-Net divides world into areas. Each peer constructs inter-area links to nearby areas densely and to far areas thinly. We evaluate the LL-Net by simulation and show that the LL-Net handles location-dependent queries efficiently by constructing such a network.

Key words P2P network, Context-aware, Ubiquitous, Mobile

1. はじめに

近年、携帯電話や PDA 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端末に情報を格納、参照できるモバイル環境が整っている。またモバイル環境とともに、いた

るところに存在するコンピュータをいつでも利用できるユビキタス環境も整いつつある。このようなモバイル環境とユビキタス環境が融合した環境（以降はユビキタス環境とする）では、従来の固定端末に加え、携帯端末やいたるところに設置された GPS をはじめとするセンサ類、情報家電などもネットワーク

に接続されるようになる．そして、それらの端末から得られる様々な情報を、場所や時間などの状況（コンテキスト）に基づいて考慮し動作するコンテキストウェアサービス [1], [7], [9] が実現できる．例えば現在はユーザが予算や人数などの情報を入力することで、それらの条件に合致する飲食店を推薦してくれるサービスが存在するが [19]、今後はユーザの場所や時間、店の空席情報などのコンテキストも自動的に考慮し、より適切な店舗情報を推薦できるサービスが可能となる．

このようなコンテキストウェアサービスでは、様々なコンテキストを考慮し、ネットワークを介してユーザへ推薦する情報を検索する必要がある．また様々なコンテキストのなかでも、場所は特に重要である．なぜなら場所によって、そこに存在するユーザや、ユーザへの推薦対象となる飲食店や娯楽施設などが大きく異なってくるからである．したがってコンテキストウェアサービスの実現には、任意の領域内に存在する情報資源を効率よく探索できるメカニズムが重要となる．

このメカニズムをサーバ・クライアント型ネットワークで構築した場合、サーバに問い合わせることで、任意の領域内に存在する情報資源を容易に取得することができる [3], [16]．しかし、ユビキタス環境では遍在するコンピュータから膨大な情報が発生するため、サーバへの負荷集中や設備投資などに関して問題が生じる．そこで我々は P2P (Peer-to-Peer) ネットワークに注目する．P2P ネットワークは、各端末が各自で情報を管理する論理ネットワークであり、情報の量に対する拡張性に優れている．ただし既存の P2P ネットワークにおける情報探索手法は端末の位置を考慮していないため、そのままでは位置をキーとする情報探索に利用できない．

以上のことを考慮し、過去に我々はコンテキストウェアサービスにおいて重要な情報である端末の位置情報に基づく P2P 論理ネットワーク LL-Net (Location-based Logical Network) の構築手法と、LL-Net を利用した情報探索手法を提案した [10]．LL-Net では緯度、経度によって格子状に区切った領域をエリアと定義する．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、周囲のエリアに位置する他の端末とリンクを構築する．LL-Net は端末の移動に対応し、このようなネットワークを維持する．本論文では、LL-Net におけるエリアを階層的に捉えることで、位置をキーとするような問い合わせをさらに効率良く処理できることを、シミュレーションによって示す．また、端末の故障や端末数の増加を考慮した評価も行う．

本論文では第 2 章で関連研究について述べる．第 3 章で LL-Net について説明し、第 4 章で LL-Net の評価と考察を行う．最後に第 5 章で本論文をまとめる．

2. 関連研究

P2P ネットワークにおける情報探索手法には、主にフラッディングと DHT (Distributed Hash Table) の 2 つがある．フラッディングは、ピアが受け取ったクエリを隣接する全てのピアに転送する方法である．フラッディングでは、TTL (Time To Live) による転送制限を設けることでクエリの増産を防いでいるが、ピア数が多くなるとクエリが大量に発生し、ネット

ワークの負荷が増大してしまう．実際、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 では、そのフラッディング機能のためメッセージストームが発生したことが報告されている．文献 [8] は、各ピアのもつ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、目的の情報を検索する手法を提案している．また、文献 [5], [6] は、各ピアのもつコンテンツを考慮してピアをグルーピングすることで、フラッディングする範囲を限定する手法を提案している．

これに対し DHT では、キーと値のペア（ハッシュ表）を、キーのハッシュ値に近いハッシュ値をもつピアに管理させ、さらに独自の論理ネットワークを構築することで、フラッディングすることなく情報探索が行える．Chord [15], CAN [12], Pastry [13], Tapestry [18] は DHT を用いることで、情報を発見するまでのクエリのホップ数を $O(\log n)$ に抑えている (n は P2P ネットワークに参加している端末の数である)．ただしこれらの手法ではクエリに単一のキーしか指定できず、範囲検索などの柔軟な検索が行えない．これに対し PeerSearch [17] や Squid [14] では、DHT と他の技術を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、コンテンツ内容を考慮したキーワード検索を可能としている．VSM とは $tf * idf$ を利用してドキュメントをベクトル化する技術であり、LSI とは VSM によって計算されたドキュメントベクトルを意味ベクトルへと変換する技術である．また、Squid は DHT と SFC (Space-Filling Curve) を組み合わせることで、キーワードによる検索や範囲検索を実現している．SFC とは局所性を維持し、 d 次元空間を 1 次元空間へマッピングする技術である．

端末の情報を考慮して論理ネットワークを構築する手法も提案されている．文献 [4] は端末がもつドキュメントに $tf * idf$ を適用し、意味的に近いドキュメントをもつ端末を P2P ネットワーク上で近くに配置する手法を提案している．また文献 [11] は端末間の通信時間を考慮することで、物理ネットワークトポロジに近い P2P ネットワークトポロジを構築する手法を提案している．

しかし、上記の手法はどれも端末の物理的な位置を考慮しておらず、位置をキーとするような問い合わせ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、モバイル端末は物理的な移動を行う．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ため、そのままでは利用できない．

3. LL-Net の設計

本章では、LL-Net の基本要素と、LL-Net を構築、維持するためのプロトコル、LL-Net を利用した情報探索について説明する．

3.1 LL-Net の基本要素

LL-Net では、エリアとピアという基本要素を考える．

3.1.1 エリア

LL-Net では検索領域を緯度、経度 (x, y 座標) によって格

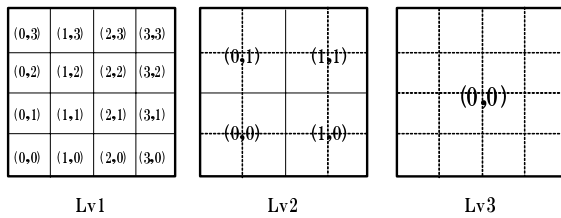


図 1 エリアの ID と階層構造

Fig.1 Area ID and area hierarchy.

子状に区切り，その各領域をエリアと定義する．エリアは全て等しい大きさの正方形であり， xID と yID の 2 つの ID をもつ．以降， xID が x ， yID が y のエリアの ID を (x, y) と表記する．

LL-Net ではエリアとエリア ID 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(Lv1) のエリアとし，それ以上のレベルにおいては， LvN のエリアが 4 つで $Lv(N+1)$ のエリアを形成すると定義する．図 1 は，レベル 3 までのエリアの階層化の様子を表している．このように階層化することで， (x, y) の LvN エリアは， $(2x, 2y)$ ， $(2x+1, 2y)$ ， $(2x, 2y+1)$ ， $(2x+1, 2y+1)$ の 4 つの $Lv(N-1)$ エリアを含むことになる．また， LvN エリアは 4^{N-1} つの $Lv1$ エリアを含むことになる．ある座標における LvN のエリア ID は，その座標を LvN エリアの 1 辺の長さ（エリアサイズ）で割った値の整数部である．例えば $Lv1$ のエリアサイズが 100 だったとき，座標 $(320, 160)$ のエリア ID は， $Lv1$ において $(3, 1)$ ， $Lv2$ において $(1, 0)$ ， $Lv3$ 以上において $(0, 0)$ となる．

このようにエリアを定義することで，ピアをその位置によって分類することができる．そして，各ピアがエリア間にリンクを構築することで，任意のエリアまでのクエリ転送が可能となる．

3.1.2 ピア

LL-Net における全てのピアは，ピアに固有のピア ID をもつ．ピアにはスーパーピア，ランデブーピア，ノーマルピアの 3 種類がある（図 2）．以下，スーパーピアを S ピア，ランデブーピアを R ピア，ノーマルピアを N ピアと表記する．S ピアは全てのピアにとって既知の存在であり，全エリアの R ピアのピア ID と，R ピアが位置しているエリアの ID を管理する．

R ピアは各 $Lv1$ エリアに 1 つずつ存在し，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る．各 $Lv1$ エリア内において，R ピアと N ピアは R ピアをルートとする木構造ネットワークを構築する．R ピアは自身の座標と木構造ネットワークにおける子ピアの情報，存在エリアの ID，リンクを構築している外部エリアのピア情報をもつ．存在エリアとはそのピアが位置しているエリアのことであり，外部エリアとは存在エリア以外のエリアのことである．

N ピアは R ピア以外のピアである．N ピアは R ピアがもつ情報情報に加えて，存在エリアの R ピア情報と木構造ネットワークにおける親ピアの情報をもつ．

3.2 ネットワーク維持プロトコル

ネットワーク維持プロトコルによって，LL-Net はモバイル端末の移動や故障などに動的に対応する．本節ではネットワー

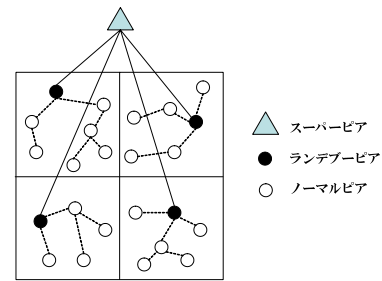


図 2 ピアの関係

Fig.2 Relation of peers.

ク参加プロトコル，外部リンク構築プロトコル，エリア間移動プロトコル，故障回復プロトコルを説明する．

3.2.1 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 に参加するときのプロトコルである．以下，新たにネットワークに参加するピアを新規ピアと呼ぶ．次にプロトコルの内容を示す．

(1) 新規ピアは S ピアへ，自身の存在エリアの R ピア情報と，外部エリアの R ピア情報を問い合わせる．

(2) S ピアは新規ピアへ，新規ピアの存在エリアの R ピア情報を返す．新規ピアの存在エリアの R ピア情報をもっていない場合は，新規ピアをそのエリアの R ピアとして記憶し，それを存在エリアの R ピア情報として返す．

また，S ピアは，外部エリアの 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返す．次に，S ピアが新規ピアに返す外部 R ピア情報の詳細を記す．

- $Lv1$ の外部 R ピア情報

新規ピアが (x, y) の $Lv1$ エリア内に位置している場合，その周囲の 8 エリア $((x, y+1), (x+1, y+1), (x+1, y), (x+1, y-1), (x, y-1), (x-1, y-1), (x-1, y), (x-1, y+1))$ の R ピア情報を返す．

- $Lv2 \sim$ 最大 Lv の外部 R ピア情報

LvN の外部 R ピアを選択する際，まず，新規ピアと同じ $Lv(N+1)$ のエリア内に含まれ，かつ新規ピアが位置しない 3 つの LvN のエリアを選択する．例えば $Lv2$ の外部 R ピア情報を選択する場合，新規ピアが (x, y) の $Lv3$ エリア内かつ $(2x, 2y)$ の $Lv2$ エリア内に位置しているとするとき，同じ (x, y) の $Lv3$ エリア内に含まれ，かつ新規ピアが位置しない $Lv2$ エリアである $(2x+1, 2y)$ ， $(2x, 2y+1)$ ， $(2x+1, 2y+1)$ の 3 つのエリアを選択する．

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} つの $Lv1$ エリアの中から，ランダムでそれぞれ 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 ピア情報として返す．

(3) 新規ピアは R ピア情報を受け取り，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．

(4) 新規ピアは存在エリアの木構造ネットワークに参加するために，存在エリアの R ピアに参加要求メッセージを送信する．また外部リンク構築プロトコルに従い，外部リンクを構築

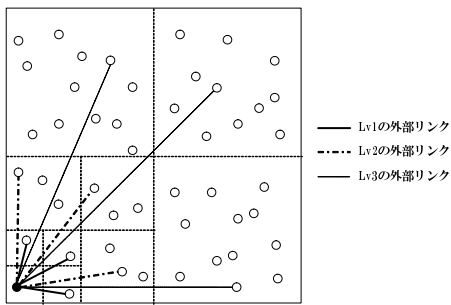


図 3 外部リンクの一例

Fig.3 Example of inter-area links.

する．外部リンク構築プロトコルは 3.2.2 節で説明する．

(5) 参加要求メッセージ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許可メッセージを新規ピアに返す．参加許可メッセージには、自身もつ子ピアの数と木構造における自身の深さの情報を含める．許可しない場合は、参加要求メッセージを全ての子ピアへ転送する．

(6) 一定時間後、新規ピアは得られた参加許可メッセージを参照し、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参加確認メッセージを送信する．

(7) 参加確認メッセージを受け取ったピアは、新規ピアを子ピアとして記憶する．

3.2.2 外部リンク構築プロトコル

外部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．ここで、リンクを構築するとは他ピアのピア ID 情報などを記憶し、通信可能な状態にしておくという意味であり、常にコネクションを確立しておくという意味ではない．ピアは LL-Net に参加するとき、ネットワーク参加プロトコルに従い、S ピアから外部 R ピア情報を取得する．このとき、どの外部エリアの R ピア情報を取得するかは 3.2.1 節のプロトコルの動作 (2) で述べたとおりである．その後、この外部リンク構築プロトコルに従い、ピアはリンク要求を外部 R ピアに送り、Lv1 において 8 つ、それ以上の Lv において 3 つずつのリンクを構築する (図 3)．ただし、図 3 のようにピアの存在エリアが物理領域の 4 角である場合は、Lv1 において 3 つのリンクしか構築しない．各ピアがこのようなリンクを構築することで、任意の領域に位置するピアに効率良くクエリを転送でき、またクエリ転送の負荷を全ピアに分散させることができる．以下、外部リンクを構築するピアのことを新規ピアと呼ぶ．次に、LvN の外部リンクを構築する場合のプロトコルの動作を示す．

(1) 新規ピアは、S ピアから取得した LvN の外部 R ピアにリンク要求メッセージを送信する．

(2) リンク要求メッセージを受け取ったピアは、新規ピアにリンク許可メッセージを返す．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、リンク要求メッセージを転送する．リンク許可メッセージには自身がもつ外部リンクの数と、木

造における自身の深さの情報を含める．

(3) 一定時間後、新規ピアは得られたリンク許可メッセージを参照し、外部リンク数が少ないピアを LvN の外部リンクピアとして決定する．外部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．外部リンクピアを決定した後、新規ピアはリンク確認メッセージを外部リンクピアへ送信する．

(4) リンク確認メッセージを受け取ったピアは、新規ピアを LvN の外部リンクピアとして記憶する．

3.2.3 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 Lv1 のエリア間を移動するときのプロトコルである．想定する環境では移動する端末も存在するため、端末の移動に対して LL-Net を維持する必要がある．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、座標情報から自身が位置しているエリアの 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．以下、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呼ぶ．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で新規 R ピアを選び、自身の子ピアと S ピア、外部リンクピアに新規 R ピア情報を送信する．子ピアをもっていない場合は、S ピアと外部リンクピアに自身の情報を消去してもらう．

(2) 新規 R ピア情報を受け取った子ピアは、もしその情報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、そのピアに参加要求メッセージ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、自身の子ピアと外部リンクピアに新規 R ピア情報を転送し、この処理を繰り返す．

新規 R ピア情報を受け取った外部リンクピアと 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 の外部リンクピアに移動確認メッセージを送信する．例えば (0, 0) の Lv1 エリアから (1, 0) の Lv1 エリアに移動した場合は Lv1 エリア間での移動のみだが、(1, 0) の Lv1 エリアから (2, 0) の Lv1 エリアに移動した場合は Lv1 と Lv2 のエリア間での移動が生じることになる．

(4) 移動確認メッセージを受け取ったピアは、外部リンクピア情報の中から移動ピアの情報を消去する．移動ピアに代わる外部リンクピア情報をもっていない場合は、外部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、参加要求メッセージを送信する．

後はネットワーク参加プロトコルと同様の処理を行う．ただし、移動ピアは外部 R ピア情報を S ピアに問い合わせる必要はない．移動先エリアのピアから、参加許可メッセージとともに外部 R ピア情報を返してもらい、外部リンクプロトコルに従って外部リンクを構築する．その後、不必要となった外部リンクピア情報、子ピア情報などを消去する．

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、子ピアに移動確認メッセージを送信する。

(2) 移動確認メッセージを受け取った親ピアは、子ピア情報の中から移動ピアの情報を消去する。

移動確認メッセージを受け取った子ピアは、存在エリアの R ピアに参加要求メッセージを送り、新たに親ピアを決定する。

(3) 移動ピアは、移動が生じた L_v の外部リンクピアに、移動確認メッセージを送信する。後は R ピアが移動した場合と同様の処理を行う。

3.2.4 故障回復プロトコル

故障回復プロトコルは、ピアがネットワークから突然切断された場合に、LL-Net を維持するためのプロトコルである。想定環境では無線による通信を行う端末も存在するため、ネットワークから突然切断されることが起こりうる。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ネットワークを修復する。以下、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呼ぶ。

• 外部リンクピアの故障を検知した場合

検知ピアは外部リンクピア情報の中から故障ピアの情報を消去する。もし故障ピアに代わる外部リンクピア情報をもっていなければ、外部リンク構築プロトコルによって新たに外部リンクを構築する。またこの場合、ピアはクエリを他の外部リンクピアへと転送する。

• 親ピアの故障を検知した場合

– 故障ピアが N ピアだった場合、検知ピアは故障ピアの情報を消去し、R ピアに参加要求メッセージを送信する。

– 故障ピアが R ピアだった場合、検知ピアは故障ピアの情報を S ピアに送信する。

S ピアは送られてきた故障ピアの情報と、自身が管理している R ピア情報を比較し、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 ピア情報として検知ピアに返す。等しくない場合は自身の管理している R ピア情報を返す。

検知ピアは、受け取った R ピア情報が自身のピア情報と等しい場合は自身を R ピアだと認識し、等しくない場合は新規 R ピアに参加要求メッセージを送信して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、検知ピアは新規 R ピア情報をエリア内ネットワークへ送信する。

• 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。

3.3 検索プロトコル

3.3.1 領域指定検索プロトコル

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)。これにより、ある場所に存在するセンサから温度情報を取得したり、周囲の友人端末を検索したりできる。またエリアを階層的に捉えることにより、最大でも $\log_4 n$ のホップ数で任意のエリアまでクエリ伝搬することができる(n は L_{v1} エリアの数である)。以下、クエリを伝搬する際に指定する領域のことを目的領域、クエリを発信するピアのことを発

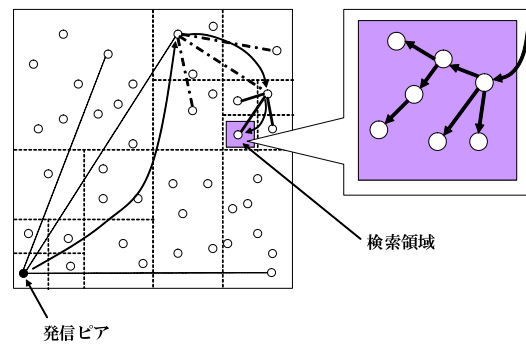


図 4 領域指定検索

Fig. 4 Region-specified retrieval.

信ピアと呼ぶ。次に領域指定検索プロトコルの内容を示す。

(1) 発信ピアは目的領域を座標で指定する。目的領域と重複する領域をもつ L_{v1} エリアが目的エリアとなる。

(2) 発信ピアはクエリを用意する。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 L_v などの情報が含まれる。

(3) 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 L_v は 0 とする。

(4) 目的エリアが外部エリアを含む場合、発信ピアは外部リンクピア情報を参照し、目的エリアに位置している外部リンクピア情報を探す。見つかった場合、その外部リンクピアへクエリを転送する。外部リンクピアへクエリを転送するとき、クエリの転送 L_v はその外部リンクピアの L_v とする。目的エリアに位置している外部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 L_{v2} から最大 L_v まで順番に、外部リンクピア情報を参照する。 L_{vN} の外部リンクピア情報を参照する際、そのピアが位置する L_{vN} 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外部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外部リンクピアが見つからなかった場合は、次の処理を行う。

(6) 発信ピアは L_{v1} から順番に、外部 R ピア情報を最大 L_v まで参照し、(5) と同様の処理を行う。

(7) 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。

(8) 発信ピアは自身が持っているピア情報の中で最も目的エリアに近いエリアに位置しているピアにクエリを転送する。

(9) クエリを受け取ったピアはクエリ ID を参照し、そのクエリが過去に受け取ったことがあるクエリで、かつ転送 L_v が 0 の場合はそのクエリを破棄する。受け取ったことがなければ、そのクエリ ID を記録する。また、エリア内ネットワークへ参加中の場合、もしくは外部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。自身が目的領域内に位置し

表 1 環境パラメータ

Table 1 Environmental setup.

シミュレーション領域	$2^{20} \times 2^{20}$
検索領域	$2^{15} \times 2^{15}$
シミュレーション時間	10000
ピアの移動アルゴリズム	ランダムウェイポイント
単位時間あたりのピアの移動速度	1
単位時間あたりの検索を行う確率	0.0001
木構造の子数 (LL-Net のみ)	5

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、発信ピアと同様にクエリを転送する。

4. 評価

本章ではシミュレーション評価の環境と結果について述べる。

4.1 シミュレーション環境

シミュレーションでは検索成功率、1 度の検索で得られるレスポンス数の平均、検索が成功した場合のクエリのホップ数の平均、トラフィックを計測した。ピアは検索の際にランダムに検索領域を決定してクエリを発信するものとし、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を成功とした。また LL-Net のトラフィックには、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、ピアがエリア間を移動したときなどに発生する LL-Net を維持するためのメッセージの量である。ピアからピアへクエリやメッセージが伝搬した場合を 1 トラフィックとした。

LL-Net の比較対象として Random ネットワークと PLRG (Power Law Random Graph) ネットワークを想定した。Random ネットワークは、各ピアの隣接ピアが一定数で、かつランダムに決定されるネットワークである。Random ネットワークの隣接ピア数は、Gnutella におけるデフォルトの隣接ピア数と同じ 4 とした。PLRG ネットワークは、少数のピアが多くリンクをもち、大多数のピアはほとんどリンクをもたないネットワークである。文献 [2] では、Gnutella などの 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。比較対象ネットワークでは検索トラフィックのみが発生するものとし、その検索手法はフラディングとした。

シミュレーションは表 1 の環境に従う。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した。また環境の動的な性質を考慮して評価するため、全てのピアを移動させた。

4.2 比較対象ネットワークとの比較評価

図 5 ~ 図 8 はピア数を 10000 とし、エリア数を変化させた場合のシミュレーション結果である。比較対象におけるクエリの TTL は、Gnutella におけるデフォルトの TTL 値と同じ 7 とした。また LL-Net では、TTL による制限を設けない場合と、TTL を 7 とした場合を評価した。LL-Net はクエリを単純にフラディングするわけではないため、TTL による制限を設け

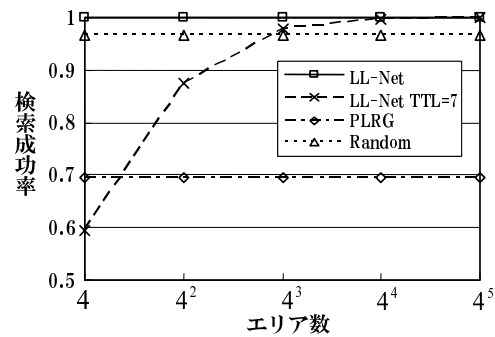


図 5 検索成功率

Fig. 5 Success ratio of retrieval.

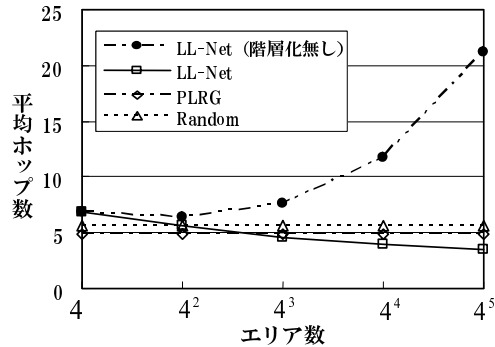


図 6 平均ホップ数

Fig. 6 Average number of hop counts.

る必要はないが、等しい条件で比較するために TTL を 7 とした場合についても評価した。

図 5 より、LL-Net は比較対象に比べて高い成功率を得られることがわかる。これは LL-Net が端末の位置を考慮してネットワークを構築しているためである。LL-Net において検索が失敗するのは、外部リンク構築中またはネットワーク参加中のピアがクエリを受けとった場合、そのクエリを転送せずに保持するためである。この仕組みは正確なクエリの転送を実現するために有効だが、レスポンスが得られるまでの時間を増加させる。そのため、一定時間内にレスポンスが得られない事態が生じ、失敗となる。TTL が 7 の場合は、エリア数の増加に伴い成功率が増加している。これはエリア数が少ない場合はエリアあたりのピア数が多いため、エリア内ネットワークを伝搬している間に TTL が 0 になってしまうからである。

図 6 より、エリア数が 4³ 以上のとき、LL-Net は比較対象よりもホップ数を抑えられることがわかる。LL-Net はエリア間のリンクを階層的に構築するため、エリア数が増えても目的のエリアまでのホップ数の増加を抑えることができる。また、エリア数が増加するとエリアあたりのピア数が減少するため、目的エリアに到達してからのホップ数が大きく減少する。そのため LL-Net ではエリア数が増加するにつれホップ数が減少する。エリアを階層化しない場合はホップ数が右肩上がりに増加していることから階層化の効果がある。

図 7 は検索 1 回あたりのトラフィックを表している。ただし、LL-Net の値は検索トラフィックとネットワーク維持トラフィック

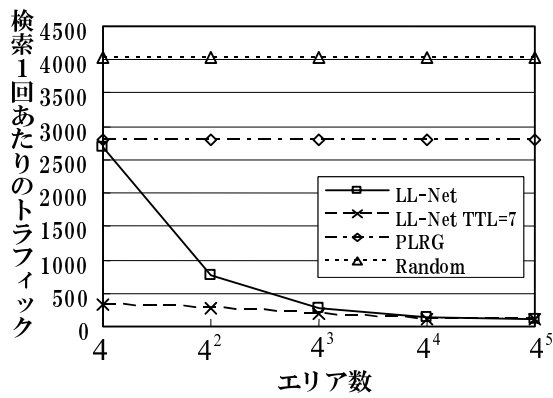


図 7 検索 1 回あたりのトラフィック

Fig.7 Traffic per one retrieval.

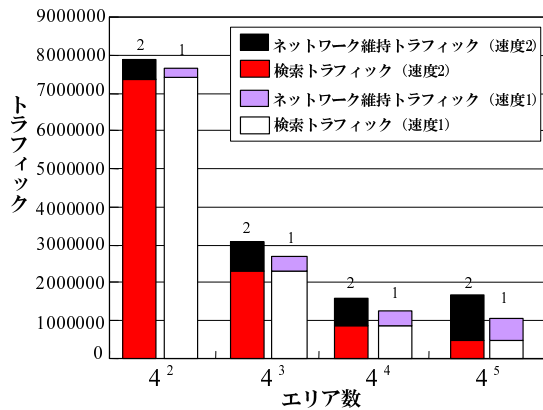


図 8 LL-Net のトラフィック

Fig.8 Traffic of the LL-Net.

クの総和を総検索回数で割った値である。したがって、LL-Net はネットワークを維持するためのトラフィックを含めても、比較対象よりもトラフィックを抑えられることがわかる。これは、LL-Net はクエリをフラッディングする領域を任意のエリア内だけに制限できるからである。

図 8 は、ピアの移動速度が 1 の場合と 2 の場合の、エリア数の増加（エリアサイズの減少）による、検索トラフィックとネットワーク維持トラフィックの変化の様子を示している。エリアサイズが減少するにつれ、無駄なフラッディングが行われなくなるため検索トラフィックは減少する。しかしピアのエリア間の移動回数が増加するためネットワーク維持トラフィックは増加する。そのため、ピアの移動速度が 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る。このことから、エリア数は検索頻度や移動頻度を考慮して決定すべきだということがわかる。

4.3 ピア数の増加を考慮した評価

図 9, 図 10 はピア数を 10000, 20000, 40000 とした場合の評価結果である。

図 9 より、ピア数が増加しても妥当な数のレスポンスを得られていることがわかる。ここでいう妥当な数とは、検索領域あたりに含まれる平均ピア数のことである。

図 10 より、検索あたりのトラフィックはピア数に比例して増

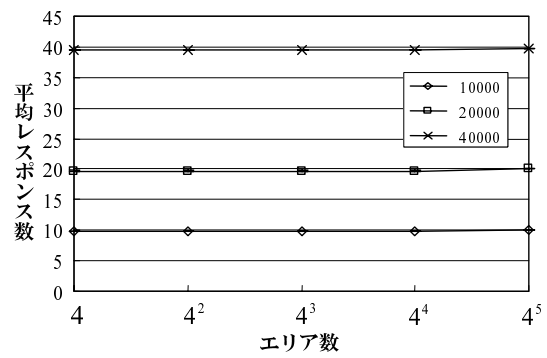


図 9 ピア数の増加と平均レスポンス数

Fig.9 Increase of number of peers and number of responses.

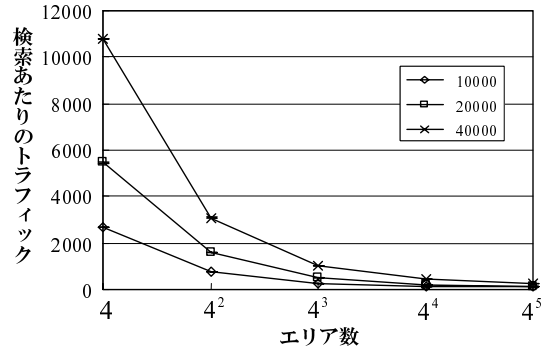


図 10 ピア数の増加と検索あたりのトラフィック

Fig.10 Increase of number of peers and traffic per one retrieval.

加することがわかる。LL-Net では検索の際に、目的エリア内で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の増加に伴い検索あたりのトラフィックも増加する。トラフィックの増加を抑えるためには、ピア数に応じてエリアを動的に階層化する必要がある。

4.4 故障を考慮した評価

ピアの故障を考慮したシミュレーションの結果を図 11, 図 12 に示す。ここでピアの故障とは、そのピアがネットワークから完全に切断されることを意味する。ピアが故障した後、再びネットワークに参加する確率を毎時間 0.0001 で一定とし、故障する確率を変化させて評価した。ピア数は 10000 とした。各グラフでは、故障が生じない場合と、故障が生じるが故障回復プロトコルを利用する場合、故障が生じるが故障回復プロトコルを利用しない場合を比較している。

図 11 より、ピアの故障が生じた場合でも、故障回復プロトコルによって検索成功率を高く保てる事がわかる。今回は全てのピアをモバイル端末として想定したため、故障が頻繁に生じるように設定したが、固定端末などの常時ネットワークに接続している端末も考慮すれば、故障確率や故障するピアの割合は、今回の環境におけるそれよりも小さくなる。したがって、故障回復プロトコルは検索に対する応答を十分に保証できると言える。

図 12 より、ピアの故障が生じた場合でも、故障回復プロトコルを利用することで、妥当な数のレスポンスが得られることがわかる。例えば故障確率が $\frac{1}{40000}$ のときは、故障が生じない

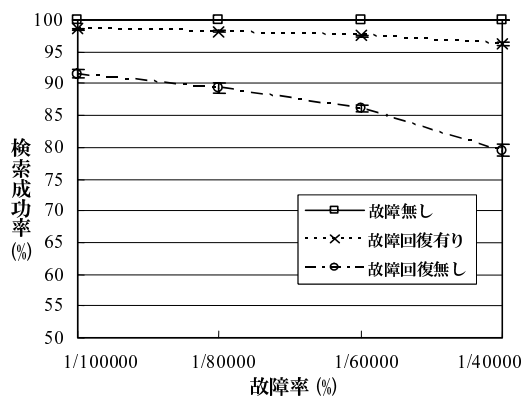


図 11 故障を考慮した場合の検索成功率

Fig. 11 Success ratio in consideration of breakdown.

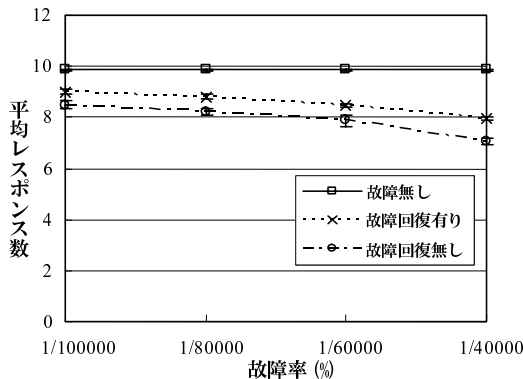


図 12 故障を考慮した場合の平均レスポンス数

Fig. 12 Number of responses in consideration of breakdown.

場合の約 80% のレスポンスしか得られていない。しかしこの故障率の場合、常に約 20% 弱のピアは故障しているため、生存中のピアには正確にクエリを転送できていると言える。

5. まとめ

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 を提案し、シミュレーションによって評価した。LL-Net は、コンテキストウェアサービスにおいて重要なコンテキストとなる位置をキーとする問い合わせを効率良く処理する。シミュレーション評価によって、LL-Net は比較対象に比べて少ないトラフィックで任意の領域までクエリを伝搬することができることを明らかにした。また、端末が故障した場合にも十分な検索成功率とレスポンス数を保証できることを示した。

今後は、ピア数の増加やピアの位置分布に偏りが生じた場合に対応できるように、エリアを動的に階層化する手法を考案する。

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。

文 献

- [1] Abowd, G., Atkeson, C., Hong, J., Long, S., Kooper, R., and Pinkerton, M.: Cyberguide: A Mobile Context-Aware Tour Guide, *ACM Wireless Networks*, pp. 421-433 (1997).
- [2] Adamic, L., Lukose, R., Puniyani, A., and Humberman, B.: Search in Power Law Networks, *press, Phys. Rev. E*, Vol. 64, pp. 46135-46143 (2001).
- [3] 秋山 豊和, 原 隆浩, 西尾 章治郎: 位置情報データベースの統合利用に関する一考察, 情報処理学会研究報告 (データベースシステム研究会 2001-DBS-125(1)), Vol. 2001, No. 70, pp. 209-216 (2001).
- [4] Bawa, M., Manku, G., and Raghavan, P.: SETS: Search Enhanced by Topic Segmentation, *Proc. ACM SIGIR*, pp. 306-313 (2003).
- [5] Barbosa, M., Costa, M., Almeida, J., and Almeida, V.: Using Locality of Reference to Improve Performance of Peer-to-Peer Applications, *ACM SIGSOFT*, Vol. 29, pp. 216-227 (2004).
- [6] Crespo, A. and Garcia-Molina, H.: Semantic Overlay Networks for P2P Systems, *Technical report, Computer Science Department, Stanford University*, October (2002).
- [7] Dey, A. and Abowd, G.: CybreMinder: A Context-Aware System for Supporting Reminders, *Proc. Second International Symposium on Handheld and Ubiquitous Computing*, pp. 172-186 (2000).
- [8] Ishikawa, N., Sumino, H., Omata, E., Hjelm, J., Yu, Y., and Zhu, Z.: Semantic Content Search in P2P networks based on RDF schema, *PACRIM Communications, Computers and signal Processing*, Vol. 1, pp. 143-148 (2003).
- [9] 金子 雄, 福村 真哉, 春本 要, 下條 真司, 西尾 章治郎: P2P 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論文集, Vol. 4, pp. 187-188 (2003).
- [10] 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端末の位置情報に基づく P2P ネットワークの提案と評価, 電子情報通信学会データ工学ワークショップ論文集, (2004).
- [11] Kwon, M. and Fahmy, S.: Topology-Aware Overlay Networks for Group Communication, *Proc. Int'l workshop on network and operating systems support for digital audio and video*, pp. 127-136 (2002).
- [12] Ratnasamy, S., Francis, P., Handley, M., Karp, R., and Shenker, S.: A Scalable Content-Addressable Network, *Proc. ACM SIGCOMM*, pp. 161-172 (2001).
- [13] Rowstron, A. and Druschel, P.: Pastry: Scalable, Distributed Object Location and Routing for Large-Scale Peer-to-Peer Systems, *IFIP/ACM Middleware*, pp. 329-350 (2001).
- [14] Schmidt, C. and Parashar, M.: Enabling Flexible Queries with Guarantees in P2P Systems, *IEEE INTERNET COMPUTING MAY/JUNE*, pp. 19-26 (2004).
- [15] Stoica, I., Morris, R., Karger, D., Kaashoek, M., and Balakrishnan, H.: Chord: A Scalable Peer-to-Peer Lockup Service for Internet Applications, *Proc. ACM SIGCOMM*, pp. 149-160 (2001).
- [16] 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).
- [17] Tang, C., Xu, Z., and Mahalingam, M.: Peer-to-Peer Information Retrieval Using Self-Organizing Semantic Overlay Networks, *Proc. ACM SIGCOMM*, pp. 175-186 (2003).
- [18] Zhao, B., Kubiawicz, J., and Joseph, A.: Tapestry: An Infrastructure for Fault-tolerant Wide-area Location and Routing, *Technical Report, UCB/CSD-01-1141*, April (2001).
- [19] GOURMET NAVIGATOR INC: ぐるなび, <http://www.gnavi.co.jp/>.