

端末特性を考慮した SkipGraph 構成方法の提案

安友洋平^{†1} 中村嘉隆^{†2} 高橋 修^{†2}

SkipGraph はデータ構造である SkipList を P2P に適応したオーバーレイネットワークである。SkipGraph はハッシュ値を扱わないために DHT では実現が困難な範囲検索などが容易にできる特徴を持つ。従来の SkipGraph は、ピアの性能や通信環境などを考慮しておらず、すべてのピアを一様に扱う。しかし、実環境においては、端末毎に通信環境や性能は異なる。そのために、このような実環境を考慮した際、SkipGraph のトポロジの構成によっては検索効率を悪化させる。本研究では、このようなピアの特性のなかでも通信環境について主に考慮し、通信速度や帯域などの点からそれらを 4 つに分類し、伝送遅延が小さいピアほど優先的に検索を行うような SkipGraph を構築する手法を提案する。

A construction method of efficient SkipGraph based on terminal properties

YOHE YASUTOMO^{†1}
YOSHITAKA NAKAMURA^{†2} OSAMU TAKAHASHI^{†2}

1. はじめに

P2P(Peer to Peer)技術は一般的なサーバクライアント型システムと異なり、サーバの存在を必要とせず多数の端末間でデータ交換することができ、耐故障性、スケラビリティ、負荷分散に優れた技術として注目されている。P2P ネットワークではネットワークに参加するすべての端末が協調してオーバーレイネットワークを構成し、データの検索・転送を行っている。このオーバーレイネットワークの構成手法は数多く提案されており、その代表例として DHT(Distributed Hash Table)[1]や SkipGraph[2]などがある。DHT はデータのキーをハッシュ関数によって変換することで、ピアとデータを同じ空間にマッピングし、複数のピア間で分散管理することでデータの検索を効率的に行う技術である。検索にハッシュ値を用いているためにキーの順序が崩れてしまい、DHT において範囲検索を行うことは困難である。SkipGraph は確率的アルゴリズムによって作成される片方向連結リンク状のデータ構造である SkipList[3]を P2P に適用したオーバーレイネットワークである。SkipGraph は DHT とは異なり、ハッシュ値を扱わないために範囲検索などが容易にできる特徴を持つ。

一方、スマートフォンやタブレット端末などモバイル端末の性能向上、および 3G 回線や Wi-Fi など無線通信技術の発達に伴い、このような P2P 技術を利用したサービスをモバイル端末で利用する機会が増加している。しかし、一

般にモバイル端末は固定端末に比べて端末性能が低く、主に無線通信を利用するために伝送遅延が大きいなど、端末性能・通信環境の格差が生じ、中継端末として多くのモバイル端末が存在する場合、P2P ネットワーク全体の検索性能に悪影響を与えてしまう。

このように端末の性能差や異なる通信環境に起因する問題に対して、端末の特性を考慮してネットワーク構成およびデータ転送処理を行う非対称型 P2P 技術[4]やスーパーノードを用いた階層型 P2P 技術[5]が提案されている。しかし、これらの研究は、P2P の構成手法の中で DHT を主に対象としており、範囲検索への対応に問題が残る。

本研究は、通信環境および端末性能が異なる端末が混在するような P2P ネットワークを想定し、各端末を通信環境や端末性能から 4 つに分類する。周囲の端末への伝送遅延が小さく、かつ処理性能が高い端末に優先的に検索処理をさせ、伝送遅延が大きく、検索などの処理に多くの時間を要すると考えられる端末はそのような処理の機会を制限し、従来の SkipGraph より検索時間を短縮することを目的とした新たな SkipGraph 構築手法を提案する。

2. 既存研究

2.1 SkipGraph

SkipGraph は SkipList と呼ばれるデータ構造を用いた構造化オーバーレイである。SkipGraph は複数の階層(Level)を持ち、図 1 のような構造になっている。数字が書かれている四角はピアを表しており、その中の数字は各ピアが保持しているデータのキーである。また、SkipGraph では、

^{†1} 公立はこだて未来大学大学院
Graduate School of System Information Science, Future University Hakodate
^{†2} 公立はこだて未来大学
Future University Hakodate

ピアが保持しているデータのキーがノード ID の役割を果たし、キーの順にピアが並ぶ。各ピアの下に書かれている数字は Membership vector と呼ばれるランダムな 2 進数である。SkipGraph は各 Level でピアは双方向のリンクを持ち、どのピア同士がリンクするかは Membership vector の値によって決定する。具体的には、Level n では Membership vector の接頭辞が n 桁一致するピア同士がリンクする。リンクしている複数のピアをまとめてリストと呼ぶ。また Level 0 では全てのピアがキー順にリンクする。

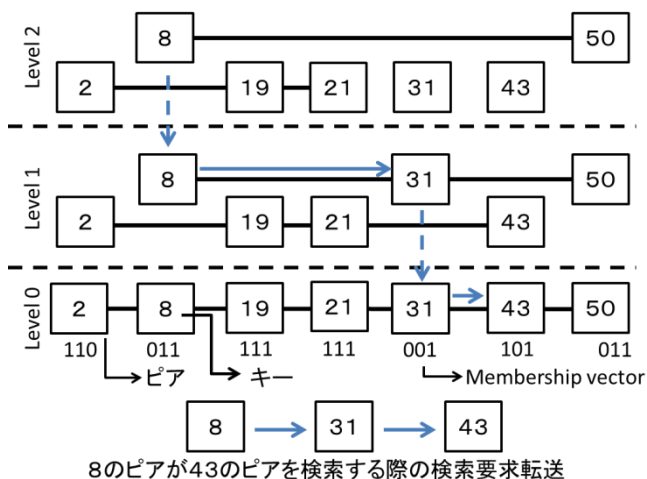


図 1 SkipGraph

2.1.1 SkipGraph における検索

SkipGraph は最上位 Level から検索を開始する。ピアは検索メッセージを受け取ると、検索するキーと自身のキーを比べる。キーが一致するならば検索完了のメッセージを検索メッセージの送信元へと送信する。検索のキーが自身のキーより大きい場合は、検索メッセージを受け取った Level で、検索のキーを超えない値を持っている隣接ピアを探す。逆に、検索のキーがピア自身のキーより小さい場合は、検索メッセージを受け取った Level で、検索のキーを下回らない値を持っている隣接ピアを探す。もし見つからない場合は、Level を 1 つ下げて再度検索を行う。検索完了までに要する平均ホップ数は全体のピア数を N とした場合 $\log N$ である。このような構造を持つために、上位 Level ではより遠いピアへのショートカットが可能となり、SkipGraph での検索の効率化を達成している。

図 1 を例に SkipGraph での検索方法を説明する。キー 8 を保持するピアがキー 43 のデータを検索する場合を考える。キー 8 のピアは最初に隣接ピアを持つ最も高い Level である Level 2 から検索を行と目的のキーが 43 なので、Level 2 においてキーが 43 より小さく、かつキーが 8 より大きいピアを探す。Level 2 ではこの条件を満たすピアが見つけれないために Level を 1 つ下げて Level 1 で同様に検索を行う。この場合、キーが 31 のピアが見つかることがで

き、このピアに検索メッセージを転送する。検索メッセージを受け取ったキー 31 のピアは Level 1 において、先ほどと同様に目的となるピアを探す。キー 31 のピアは Level 1 では検索メッセージを送ることができるピアを見つけれないために、Level を 1 つ下げて再度検索を行う。Level 0 では、キー 31 のピアはキー 43 のピアを見つけ、検索メッセージを送信して検索が完了する。

2.1.2 SkipGraph における参加と離脱

SkipGraph への参加時には、ピアはすでに参加している他のピア(仲介ピア)に参加を知らせるメッセージを送信する。仲介ピアは参加するピアのキーをもとに、Level 0 における参加ピアの隣接ピアを調べ、参加するピアにその隣接ピアを知らせる。その後、参加するピアは自身に設定された Membership vector の値を Level 0 における隣接ピアに送信し、Level 1 における隣接ピアを調べる。これを繰り返すことによって Level 1 以上での隣接ピアを調べ、SkipGraph への参加を完了する。ピア参加における、平均メッセージ数は全体のピア数を N とした場合 $\log N$ である。

SkipGraph からの離脱時には、離脱を知らせるメッセージを、最も高い Level から順に全ての Level の隣接ピアに送信する。隣接ピアはこのメッセージをもとに離脱ピアが離脱した後のトポロジの再構築を行う、離脱における平均メッセージ数は $\log N$ である。

2.1.3 SkipGraph の拡張

SkipGraph に関する研究動向としては、多次元の範囲検索[6]や単一ピアへの複数のキーの割り当て[7]などといった検索機能の拡張が主流となっている。

また、ピアの近接性を考慮した SkipGraph の構築手法として、文献[8]が提案されている。従来の SkipGraph は、ピアの物理的な位置やピア間の通信時間を考慮していないために、部分的には通信時間が非常に大きいリンクが存在する場合がある。これを解決するために隣接ピア間の通信速度を計測し、より通信速度が小さくなるようにトポロジの構築を行っている。

2.2 モバイルピア向け P2P 技術

モバイルピアは無線通信網に接続されていることもあり、その伝送遅延によって処理完了までの時間が固定ピアより増大する問題や、ピアの移動に伴ったアクセスポイントの切り替えによる位置不安定性の問題がある。従来の P2P ネットワークでは各ピアは他の全てのピアに対して到達性を持つように構築されているが、非対称型 P2P ネットワーク[4]では他のモバイルピアに対して到達性を持たないように構築する。これにより、モバイルピアが中継ピアにならないようにし、処理に要する時間を低減させている。

3. 提案手法

3.1 提案手法概要

SkipGraph では、検索を開始するピアの最上位 Level から検索を行う。上位の Level であるほど、検索を行うピアのキーからより離れたキーを持つピアへ検索メッセージを転送する形になっているため、上位 Level での転送効率は検索などの処理において重要となる。このため、メッセージ転送などの処理に長い時間を要するようなピアは転送処理にはできるだけ参加しないことが望ましい。

一方、実環境での P2P ネットワークに参加するピアは、伝送遅延や処理能力は、性能と通信環境に依存し、以下の4つに分類できる。

ISP 管理ピア ISP(Internet Service Provider)が管理する、バックボーンネットワーク付近に存在するサーバタイプのピアを ISP 管理ピアと呼ぶ。ISP 管理ピアは他のピアと比較して、広帯域かつ大容量の転送が可能である。

固定ピア 一般的な有線によってネットワークへ接続するピアを固定ピアと呼ぶ。固定ピアは有線で接続しているために無線通信に比べて安定した通信が可能である。

無線ピア Wi-Fi などの無線通信の中でも比較的広帯域の方式を利用したピアを無線ピアと呼ぶ。無線ピアは移動ピアに比べ、通信速度が速いが外的環境による影響があるためにその通信は安定していない。

移動ピア 携帯電話・スマートフォンやタブレット端末などの移動端末を移動ピアと呼ぶ。移動ピアは 3G 回線などの携帯電話回線を利用するために他の通信環境と比べて大きな伝送遅延を有する。また、移動に伴うアクセスポイントの切り替えなどによって IP アドレスが頻繁に変更されるなど、通信環境は他のピアに比べて不安定といえる。

従来の SkipGraph では、各ピアに設定される Membership vector の値がランダムに決定されるために場合によっては図2のようなトポロジが構築される。

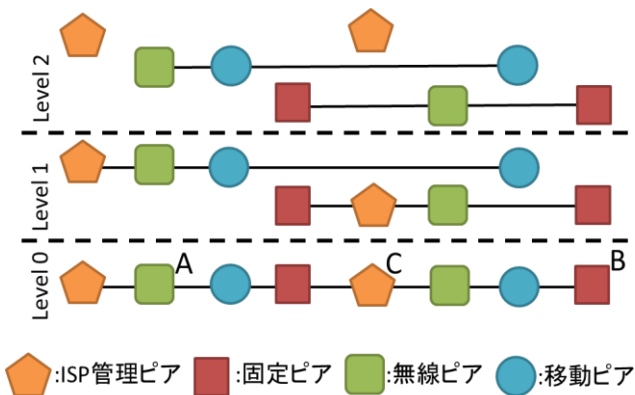


図2 一般的な SkipGraph

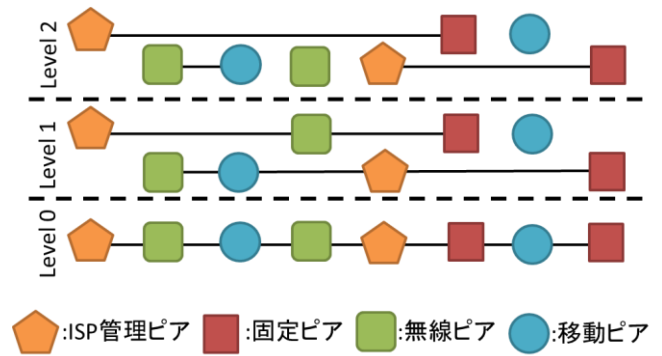


図3 提案手法を用いた SkipGraph

この場合、A ピアが B ピアを検索する際は、Level 3 から検索を開始するが、2つの移動ピアを経由するために遅延が大きくなってしまふことが考えられる。また、C ピアは、ISP 管理ピアであり他のピアよりメッセージの転送遅延が小さいにも関わらず、隣接ピアを持つ最も上位の Level が Level 2 であるために近接のピアにしか転送を行わない。

提案手法では、図3のように、下位の Level では4種類のピア全てが混在し、上位の Level になるほど ISP 管理ピアと固定ピアが多く存在するようなトポロジを構築する。そのため、分類された4種類のピアに対し、それぞれの特性にあった SkipGraph への参加および SkipGraph 再構築手法を用いる。無線ピアと ISP 管理ピアについては、トポロジ全体での隣接ピアを持つ最も上位の Level の各ピアの平均値を基準に、ISP 管理ピアは平均以上、逆に無線ピアは平均以下の Level に属するようなトポロジの構成となるように Membership vector を設定し、通信環境が良いピアほど、検索を優先的に行えるようにする。また、移動ピアに関しては、検索等の転送処理を行うこと自体がコストとなるため、保持しているキーが近く、より高性能な種類のピアにそれらの処理を委託し、受信のみを行うようにする。

以下、各ピアにおける隣接ピアを持つ最も上位の Level を最上位 Level、全ピアの最上位 Level の平均を平均 Level とする。平均 Level を調べるために提案手法では SkipGraph へ参加している全ピア数の情報を保持するピアが存在していることを前提とし、これを参加管理ピアとする。

次節から、提案手法の全体の流れ、ISP 管理ピア、無線ピア、移動ピアの3種類についての各処理の詳細を述べる。なお、固定ピアに対しては、通常の SkipGraph への参加方法を用いるために参加・再構築手法については割愛する。

3.2 提案方式フロー

ピアは SkipGraph へ参加する際に、仲介ピアから Level 0 での隣接ピアの情報に加えて、現在の平均 Level と全ピア数を保持しているピアの情報も同時に教えてもらう。参加ピアは、ピアの種類によって定められた参加手法によって SkipGraph へ参加する。また、仲介ピアは新たにピアが参加したことを参加管理ピアに対してメッセージを送信し、

通知する。参加管理ピアは、その保持しているピア数をもとに現在のトポロジにおける平均 Level を計算し、平均 Level に変動があった場合、全てのピアに対して新たな平均 Level を通知する。通知を受けた ISP 管理ピアと無線ピアは新しい平均 Level をもとに提案方式を用いてトポロジの再構築を行う。

平均 Level は全体のピア数を N とした場合 $\log N$ で計算することができる。ピアへ通知する平均 Level は $\log N$ を四捨五入した整数値とし、下がる場合は小数点以下を切り捨てた整数値とする。これは、頻繁な平均 Level の通知を避けるためである。例えば平均 Level を四捨五入の値に設定してしまうと $\log N$ の値が 3.5 付近で変動する場合、平均 Level は 3 か 4 のどちらかに頻繁に変動するために、その都度全てのピアに対して平均 Level の変動を通知しなければならない。

3.3 ISP 管理ピアの参加・再構築手法

ISP 管理ピアは通常の SkipGraph と同様に参加を行い、平均 Level を基準とし ISP 管理ピアの最上位 Level が平均 Level を下回る場合、トポロジを再構築し、最上位 Level が平均 Level 以上になるようにする。これにより、他種のピアに比べて ISP 管理ピアに平均 Level 以上での転送を担当させることができ、検索などの処理時間を短縮することができる。

ISP 管理ピアの最上位 Level を Level i とする。Level i における隣接ピアへメッセージを送信し、Level $i+1$ で現在自身が所属していない方のリストに参加していた場合の最上位 Level を調べる。これが平均 Level より高い Level を満たしている場合はそのリストへ移動するようにトポロジの再構築を行う。他のリストへ移動しても最上位 Level が平均 Level 以上に達しない場合は、Level i から順次 Level を 1 つずつ上げて同様に隣接ピアにメッセージを送信し、他のリストに参加した場合の最上位 Level を調べる。参加するリストが決定した後、ISP 管理ピアの Membership vector の更新を行う。Membership vector は、所属していない方のリストに参加する Level と同じ桁の値を反転する。この Membership vector をもとにトポロジの再構築を行う。例えば、Membership vector が 11111 である ISP 管理ピアが Level 3 における所属していない方のリストへの参加が決定した場合、Membership vector の接頭辞の 3 桁目を 1 から 0 に入れ替える。トポロジの再構築にあたって、ISP 管理ピアは所属していない方のリストへ参加を決定した Level まで離脱を行い、その Level から更新した Membership vector をもとに再び参加処理を行う。

3.4 無線ピアにおける参加・再構築手法

無線ピアに対して最上位 Level を平均 Level 以下に設定することで、無線ピアの上位 Level での転送処理を制限する。これにより、上位 Level での無線ピアによる検索などの処理に要する時間の増大を抑制することができる。

無線ピアは SkipGraph へ参加した時点で、平均 Level を基準にした最上位 Level の上限(上限 Level)を設定する。Membership vector の上限 Level の値より高い桁にマスクをかける。その後、マスクをかけた Membership vector をもとに参加処理を行う。また、SkipGraph へ参加後に、平均 Level が上がる場合、その上がった Level 分だけのマスクを取り除き、新たな Membership vector をもとに現在の最高位 Level から参加処理を行う。平均 Level が下がる場合は、Membership vector にマスクを追加でかけ、離脱処理を行い、上限 Level を下げる。また、上限 Level の設定に関して、平均 Level から下げる値を一定の値として定数 K を置き、平均 Level から K を引いた値を上限 Level としている。

無線ピアの処理を、図 4 を用いて説明する。無線ピアであるピア 19 は Level 1 以上での参加処理を行う前に Membership vector にマスクをかける。この場合だと、 K は 2 かつ平均 Level が 3 なので、上限 Level は 1 となり、2 桁以降で Membership vector にマスクをかける。2 桁以降ではマスクがかかっているために 1 桁の Membership vector として参加処理を行う。これにより従来の参加方式であると最上位 Level が 2 になるところを、ピア 19 の最上位 Level を平均 Level より低い Level 1 に設定することができる。

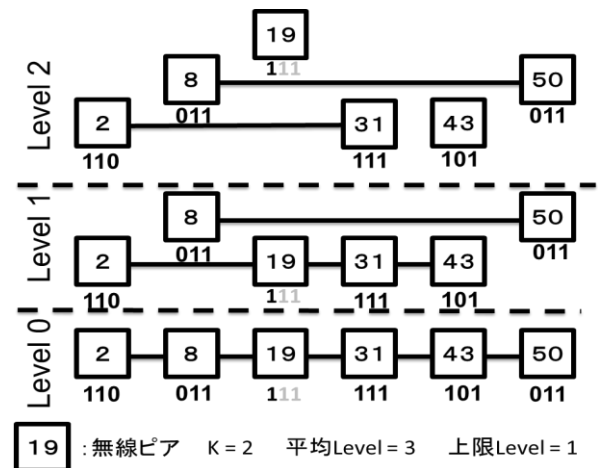


図 4 提案方式の無線ピアへの適用

3.5 移動ピアにおける参加・再構築手法

移動ピアはキーが最も近いピアからのみメッセージなどの到達性を持つようにし、それ以外のピアからの到達性を持たないようなトポロジを構成する。これにより、移動ピアが検索メッセージの中継などを行わないようにし、検索などの処理完了時間を低減させる。

ピアへの到達性をなくすために、移動ピアは全ての Level において隣接ピアを持たないようにする。そのために、移動ピアは SkipGraph へ参加時に、自身の Membership vector をもとに隣接ピアを調べるなどの従来の SkipGraph の参加処理を行わない。まず、移動ピアは仲介ピアからキーの最も近いピアを教えてもらう。移動ピアはそのピアに対して

自身のキーなどの情報を含んだ、検索などの処理を委託するための委託メッセージを送信する。委託メッセージを受けたピア(委託ピア)は、自身のキーと委託されたキーの複数のキーを保持する。複数のキーを保持するために検索の際に隣接ピアがどちらのキーをもとに検索メッセージを送信するかを判断することができなくなる。これを回避するために、委託ピアは複数のキーの内、隣接ピアのキーの値に近い方のキーを隣接ピアに知らせる。つまり、委託ピアの左右の隣接ピアから見た委託ピアのキーは異なることになる。

図1において、キー21のピアを移動ピアとした場合の提案方式を用いた際のトポロジを図5に示す。移動ピアは検索など処理を委託するために自身のキーに最も近いキー19のピアに対して、委託メッセージを送信する。キー19のピアはキー21のピアの委託ピアとして、キーを19と21の2つを保持する。次に、各Levelの隣接ピアに対して、キーの更新処理を行う。これにより、キー31のピアが隣接ピアのキーを調べる際には委託ピアのキーは21に見える。また、キー8のピアからは委託ピアのキーは19に見える。

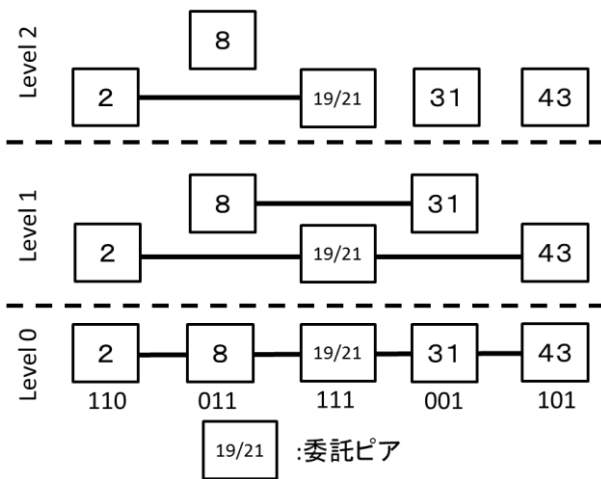


図5 提案 SkipGraph における移動ピアの処理

移動ピアが検索を行う際には、委託ピアに対して検索要求を行う。委託ピアは検索要求をもとに従来の SkipGraph と同様に検索を開始し、検索結果のメッセージが委託ピアに届くと、そのメッセージを移動ピアに転送する。移動ピアの持つキーを対象とした検索の場合には、委託ピアが移動ピアのキーを保持しているために、このキーをもとに委託ピアが検索メッセージの送信元へ移動ピアの情報を送信する。メッセージの中継に関しても委託ピアが移動ピアのキーをもとに行う。

移動ピアが離脱する際は、委託ピアに離脱を知らせるメッセージを送信する。委託ピアは離脱を知らせるメッセージを受信したら、移動ピアとのリンクを切り、隣接ピアに対して全ての Level においてキーの更新処理を行う。

4. 評価実験

提案手法の実験として、各種の中でも、実環境で多くの割合を占めていると考えられる、固定ピアと無線ピアが混在した環境を想定し、従来の SkipGraph と提案方式を用いた SkipGraph の性能を比較する。

提案手法をオープンソースプラットフォームである PIAX[9]に実装し、性能評価実験を行った。全ピア数は1000とし、その内に占める無線ピア数を100, 200の2パターンで実験を行った。検索などの処理メッセージの中継を行う際に、固定ピアは2msec、無線ピアには5msecの遅延を発生させ、それ以外の処理にはピア間で差はないものとする。ピアには、0~1000の範囲でランダムに決定された数値をキーとして保持させる。また、ピア数が1000の場合における平均Levelは10となる。

実験では、ランダムに選出されたピアにランダムなキーを検索させる。このとき、キーの値に対して0から50までの範囲でランダムな範囲検索を実行させ、検索完了までの時間を計測する。Kの変化に伴う、検索完了までの時間の変化を図6に示す。なお、検索完了までの時間は100試行を行った結果の平均である。Kの値が0における検索完了時間は従来の参加手法によって構築されたトポロジにおいて計測されたものである。

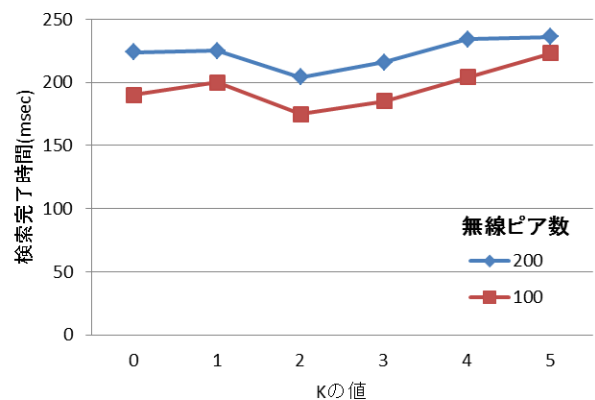


図6 Kの値の変化に伴う検索完了時間

従来方式と比べて、Kが1から3の範囲では検索完了時間が短縮していることが分かる。また、その中でもKの値が2のときに最短となっている。一方、Kの値が3より大きくなると検索完了時間は増大していく。

実験結果から、無線ピアに上限Levelを設定し、上位Levelにおける検索を制限する提案手法は検索完了時間の短縮に効果があることがわかった。検索完了時間を短縮できるのはKが1から3までの範囲、すなわち、無線ピアの上限Levelを平均Levelより1から3程度低くした場合に検索完了時間が短縮しており、この範囲が提案方式の有効範囲であるといえる。また、Kが3より大きくした場合、上位

Levelに存在するピア数が少なくなり上位Levelでの検索要求転送が十分にできないまま、下位Levelでの転送に移行してしまう。下位Levelでは上位Levelに比べて近くのピアに検索要求を転送するために、検索完了までに必要なホップ数が増加し、検索完了時間の増大を及ぼしていると考えられる。この問題に対しては、提案手法のISP管理ピアへの対応に従って、平均Level以下に存在する、高性能かつ通信環境の良いピアを平均Levelより上に参加させ、上位Levelにおけるピア数を増加させる手法を用いることで解決できると考えられる。また、全ピア数の内に占める無線ピアの割合によって、最も有効に働くKの値が変動することも考えられるために、これについて、今後検討が必要であると考えられる。

次に全体のピア数を変動させ、従来手法と提案方式の検索完了時間を比較した。固定ピアとモバイルピアの割合は8:2に固定している。この実験では、ランダムなキーを与え、そのキーから0から20までの範囲でランダムに範囲検索をさせている。また、Kの値は、先の実験で最も有効な結果が得られた2を設定した。なお、検索完了までの時間は100試行を行った結果の平均である。この実験結果を図7に示す。

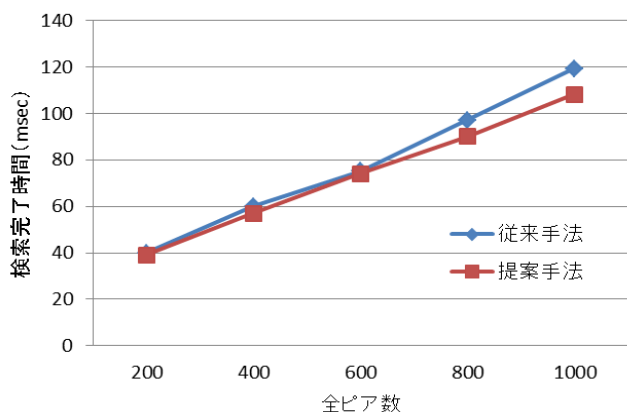


図7 全ピア数の増加に伴う検索完了時間

ピア数によらず提案手法は従来手法より短い検索完了時間を実現できている。また、全ピア数が600以上になると、検索完了時間の差が拡大している。

実験結果より、従来方式に比べ、提案方式はピア数が増加するほど検索完了時間が改善している。これは、ピア数の増加に伴い、従来手法では上位Levelに存在する無線ピアも増加するため、無線通信の遅延が検索のオーバーヘッドになっているのに対し、提案手法はそれらの無線ピアを下位Levelに移動させているために、検索完了時間を短縮できていると考えられる。全ピア数が少ない場合では、検索完了時間が提案方式と従来方式で同程度となっている。これは提案方式が、対象とする無線ピアは、平均Levelよ

り上位に存在する無線ピアであるので、全ピア数が少ない環境では、そのような無線ピアもすくなくなっているためである。そのため、この実験の全ピア数が200の場合においては、実質10程度の無線ピアに対してしか、メッセージのフォワーディングの制限がされておらず提案手法が有効に働いていないと考えられる。

5. おわりに

本稿では、端末の特性を考慮し、端末をISP管理ピア、固定ピア、無線ピア、移動ピアの4つに分類し、端末毎に異なる参加手法を用いて、ISP管理ピアなどの通信環境が良い端末は優先して検索などの処理を行い、逆に無線ピアや移動ピアなど通信が不安定な端末には制限するようなSkipGraphのトポロジを構築する手法を提案した。固定ピアと無線ピアが混在した環境を想定し、提案手法の有効性を確認するためのシミュレーション実験を行った。この結果として、無線ピアに上限Levelを設定し、上位Levelでの検索を制限する提案手法によって検索完了までの時間が短縮できることがわかった。今後は、移動ピアの電波の不安定性などから発生すると考えられる正規の方法によらない離脱について考慮したSkipGraphの構築手法の検討を行う。

参考文献

- 1) Ratnasamy, S., Francis, P., Handley, M., Karp, R., and Shenker, S.: A scalable content-addressable network, Proceedings of the 2001 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications (SIGCOMM '0), pp.161-172 (2001).
- 2) Aspnes, J., and Shah, G.: Skip Graphs, ACM Transactions on Algorithms, Vol.3, No.4, pp.37:1-37:25 (2007).
- 3) Pugh, W.: Skip lists: a probabilistic alternative to balanced trees, Communications of the ACM, Vol.33, No.6, pp.668-676 (1990).
- 4) 田上敦士, 阿野茂浩: 固定・モバイル端末を考慮した非対称型P2Pネットワークの設計と実装, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル(DICOMO2011)論文集, pp121-126,(2011).
- 5) Garces-Erice, L., Biersack, E. W., Ross, K. W., Felber, P. A., and Urvoy-Keller, G.: Hierarchical P2P Systems, Proceedings of ACM/IFIP International Conference on Parallel and Distributed Computing, pp.643-657 (2003).
- 6) Zhang, C., Krishnamurthy, A. and Wang, R. Y.: SkipIndex: Towards a Scalable Peer-to-Peer Index Service for High Dimensional Data, Technical Report TR-703-04, Technical Report, Department of Computer Science, Princeton University(2004).
- 7) 小西佑治, 吉田幹, 竹内亨, 寺西裕一, 春本要, 下條真司: 単一ノードに複数キーを保持可能とするSkip Graph 拡張, 情報処理学会論文誌, Vol.49, No.1(2008).
- 8) 牧川文紀, 土屋達弘, 菊野亨: ピアの近接性を考慮したスキップグラフの構築, 情報処理学会研究報告, EIP, Vol.46, No5, pp. 1-8, (2009).
- 9) PIAX: <http://www.piax.org>