

高速なファイル検索，取得のための 障害回復力のある P2P 論理網構築手法

笹部 昌弘[†] 若宮 直紀^{††} 村田 正幸^{††}

[†] 大阪大学サイバーメディアセンター 〒 560-0043 大阪府豊中市待兼山町 1-32

^{††} 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

E-mail: [†]m-sasabe@cmc.osaka-u.ac.jp, ^{††}{wakamiya,murata}@ist.osaka-u.ac.jp

あらまし P2P ファイル共有システムではピアは論理網を利用して所望するファイルの検索を行うため，論理網の構造が下位の物理網の負荷及び検索効率に影響を及ぼす．そこで本稿では，Barabási-Albert (BA) モデルに基づく高速なファイル検索，取得のための論理網構築手法を提案する．提案手法では，物理網特性を考慮した論理網を構築することにより，下位の物理網の負荷を抑えるとともに，ピアはより物理的に近い取得先ピアをより早く発見することができる．さらに，動的に論理リンクを切り替えることにより，論理網の構造を改善し，ピア消失などの障害から回復することができる．現実的な物理網トポロジを用いたシミュレーションにより，BA モデルに比べて最大で約 60% 程度到達率を向上させるとともに，隣接ピアが物理的にも近く，また，障害回復力を有する論理網を構築できることを示した．

キーワード P2P ファイル共有システム，論理網，物理網特性，パワー則，障害回復力

A Construction Method of a Low-Diameter, Location-Aware, and Resilient P2P Network

Masahiro SASABE[†], Naoki WAKAMIYA^{††}, and Masayuki MURATA^{††}

[†] Cybermedia Center, Osaka University Machikaneyamacho 1-32, Toyonaka-shi, Osaka, 560-0043 Japan

^{††} Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

Yamadaoka 1-5, Suita-shi, Osaka, 565-0871, Japan

E-mail: [†]m-sasabe@cmc.osaka-u.ac.jp, ^{††}{wakamiya,murata}@ist.osaka-u.ac.jp

Abstract Since a peer searches for its desired file in a P2P file sharing system, the structure of an overlay network determines the effectiveness of search in terms of network load and search latency. In this paper, based on the Barabási-Albert (BA) model, we propose a novel method to construct a low-diameter and location-aware overlay network where peers can find physically-close providers without introducing much load on underlying physical networks. We also propose a rewiring method to improve the structure of the overlay network and a recovery method to cope with random peer departures and malicious attacks. Through several simulation experiments using real physical topologies, we found that the proposed methods could construct a resilient overlay network that improved reachability up to 60% compared with BA model while shortening physical distance from neighboring peers.

Key words P2P file sharing system, overlay, low-diameter, location-aware, power-law, resilience

1. はじめに

P2P ファイル共有システムには中央集中型 (centralized), 分散構造型 (decentralized-structured), 分散非構造型 (decentralized-unstructured) の 3 種類があるが，現在のインターネットにおいて主流である Gnutella [1], KaZaA [2] に代

表される分散非構造型 P2P システムでは，ピアやファイルの位置を管理するサーバが存在しないため，ピアは論理網上で検索メッセージをフラッディングすることにより所望のファイルを発見する．ピアは検索に対して返信される応答メッセージからファイル所有者の情報を獲得し，それら取得先候補ピアの中から適切なピアを選択し，ファイルを取得する．

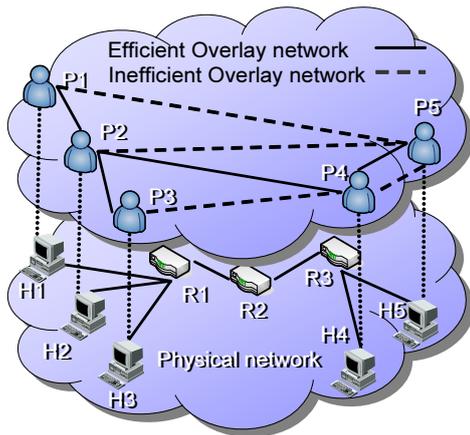


図1 論理網と物理網との関係

論理網の構造は検索における下位の物理網への負荷とユーザ QoS である検索効率に影響を与える。論理網が物理網トポロジを考慮せずに構築された場合には、物理的に遠いピアが隣接関係を持つ可能性があり、その結果、論理網上でメッセージのやりとりによって物理網に冗長なトラフィックが発生する。また、検索メッセージに対して早く応答メッセージを返信したピアが必ずしも物理的に近いとは限らないため、ピアは、より近く、高速にファイル取得が行えるピアを発見するため、複数の応答メッセージの受信を待たなければならない。さらに、検索速度の向上のためには、検索メッセージが効率的に論理網上で拡散するのがよく、同じピア数に対してより直径の小さい論理網を構築するのが望ましい。

図1は同じ物理網上に構築された2種類の論理網の例を表している。物理網は5台のホスト(H1~H5)と3台のルータ(R1~R3)からなり、論理網上のピア(P1~P5)はそれぞれのホストに対応している。実線で表される物理網トポロジを考慮した効率の良い論理網では、ピアP2が物理的に近いピアP1及びP3と論理リンクを持つものに対し、点線で表される論理網では、物理的に遠いピアP5と隣接関係を構築している。その結果、ピアP2の検索対象のファイルをピアP1とピアP4が所有している場合、後者の論理網では、より遠いピアP4の応答メッセージが先に返信され、また、物理的に近いピアP1からの応答メッセージがピアP2に到達するためには物理的に8ホップの遅延がかかる。

そこで本稿では、P2Pファイル共有システムにおける高速なファイル検索、取得のため、直径が小さく、かつ物理網特性を考慮した論理網の構築手法を提案する。直径の小さい論理網の構築手法としてはすでにいくつか研究が行われている[3, 4]。BAモデル[3]は度数分布がパワー則に従うネットワークの成長モデルとして広く知られている。BAモデルは優先的選択(PA: Preferential Attachment)に基づいており、ネットワーク内のノード*i*が新規参加ノードから接続される確率 P_i はノード*i*の隣接ノード数、すなわち度数 k_i に比例し、 $P_i = \frac{k_i}{\sum_{j \in S_n} k_j}$ で与えられる。なお、 S_n はネットワークに存在するノードの集合を表す。BAモデルでは、多数の度数の低いノードが少数の度数の高いハブノードに接続するスケールフリーネットワーク

が構築され、ネットワークの直径が小さくなる。

Phenix[4]も同様に度数分布がパワー則に従うネットワークを構築することができる。BAモデルでは、新規参加ノードの接続先を決定するために全ノードの度数に関する情報を必要とする集中型制御であるのに対し、Phenixは局所的な制御情報のみを用いる。Phenixでは、新規参加ピアはブートストラッピングノードから一部のピアの情報を得て、さらにそれらのピアよりその隣接ピアの情報を取得する。得られたピアのリストに対して出現回数の頻度に応じてPAを適用し、接続先を決定することで、パワー則に従うネットワークを構築する。

BAやPhenixなどの論理網構築メカニズムでは下位の物理網トポロジを考慮していないため、P2Pファイル共有システムに適用すると、物理網への負荷が大きくなる。そこで本稿では、ピアはブートストラッピングノードから取得した接続先候補ピアのうち、物理的に近いピアのみに対してPAを適用する論理網構築手法を提案する。提案手法により、ピア間の論理的な距離と物理的な距離に正の相関があり、直径の小さい論理網が構築される。なお、提案手法においては新規ピアは参加時に接続先候補のピアに対して物理的な距離を測定する必要があるが、検索時には、物理的な近さの順で応答メッセージが返信されるため、取得先ピアを決定するための遅延や計測負荷を抑えることができる。

さらに、ブートストラッピングノードから知ることのできる接続先候補ピアの集合は限られており、論理網には物理的により近く、度数の高いピアが存在する可能性があることから、提案手法では、構築した論理網の特性改善のための動的なリンク切り替えを行う。論理網の再構築のためのリンクの切り替え手法はすでにいくつか提案されている[5-7]。例えば、Location-Aware Topology Matching (LTM)[5]では、Gnutellaプロトコルによって構築された論理網を物理網特性を考慮してリンクを張り替えることで改善する。LTMでは、ピアPは定期的に観測用のパケットを送信することで、論理網上で2ホップ以内に存在する他のピアとの遅延情報を収集する。得られた遅延情報をもとに、Pは2ホップ以内の論理トポロジを推測し、Pに対して複数の経路を有するピアSを探す。SP間の複数の経路上の論理リンクの中で、自身の隣接ピアとの間で確立されている論理リンクの遅延が最も大きい場合にはそのリンクを切断する。ただし、新たなリンクはGnutellaプロトコルに従って確立される。LTMは遅延に基づいて論理網を改善するが、リンクの新たな接続先をGnutellaプロトコルによってランダムに決定しているため、論理網の直径が小さくなるとは限らず、また、物理的に近いピアが隣接ピアになるわけではない。一方、文献[7]は、リンクの切り替えを考慮したBAモデルを提案し、構築される論理網の度数分布がパワー則に従う条件について検討しているが、切断する論理リンクをランダムに決定しており、また接続の際にも物理網特性を考慮していない。

提案手法では、ピアはGnutellaと同様に定期的に隣接ピアとPing-Pongメッセージを交換することで隣接ピアの持つピアの情報を取得する。得られたピアのリストに現在の隣接ピアより度数が高くかつ物理的に近いピア存在すればリンク切り替

えを試みる。また、ピアの消失、離脱や悪意のあるユーザからの攻撃などにより発生する論理網の障害に対しては、新たに物理的に近く次数の高い接続先を見つけ、論理リンクを確立することにより障害回復を行う。本稿では、パワー則に従う現実的な物理網である Abilene と Sprint を用いたシミュレーションにより提案手法の有効性を評価する。論理網上での到達率、隣接ピア間の物理的な距離に基づき、提案手法と BA, LTM を比較評価することにより、提案手法を用いることで高速なファイル検索、取得が可能な論理網を構築できることを示す。

以下、2章で提案手法について述べ、3章でシミュレーション結果を示す。最後に、本稿のまとめと今後の課題について4章で述べる。

2. 高速なファイル検索、取得のための障害回復力のある P2P 論理網構築手法

本章では、高速なファイル検索、取得のための物理網特性を考慮した論理網構築手法を提案する。まず、PA の適用に際して物理的な距離を考慮して接続先候補ピアを与える手法を提案し、次に、論理網構造を改善するための論理リンク切り替え手法について述べる。最後に障害発生時の対策についてもあわせて述べる。

2.1 物理網特性を考慮した論理網構築

新規参加ピアが次数が高くかつ物理的に近いピアに接続するよう、提案手法は、文献 [8] で提案されている BA モデルの拡張版をもとに、PA の対象となるピアの集合を制限する。文献 [8] のモデルでは、ファイルに対するユーザの好みなど、新規ピアと既存ピアの類似性に基づき、接続候補先ピアを選択し、それらノードに対して PA を適用することで接続先を決定する。文献 [8] では、シミュレーション評価により、類似度を用いた接続先ノードの制限度合いによらず、論理網のパワー則が保たれることを示している。提案手法では物理的な距離、すなわちピア間の最短経路における物理ホップ数を用いることにより、物理的に近いピアが接続されたパワー則に従う論理網を構築する。

ピア i が論理網に参加する時、以下のアルゴリズムに従って m 個のピアを接続先として選択する。

(1) x 個のピアからなる接続先候補ピア集合 S_p をブートストラッピングノードから取得する。

(2) traceroute など既存の手法により、 S_p の各ピアについて物理的な距離を計測する。

(3) S_p から物理的な距離の昇順に μx 個のピアを選出し、物理的に近い接続先候補ピアの集合 S_c を得る。ここで μ は $(0, 1]$ の値を取る制御パラメータである。 μ が 1 の場合、この手法は接続先候補ピアが制限された BA モデルと等しくなる。一方、 μ を小さくすることにより、ピアの次数よりも物理的な近さがより重視された論理網が構築される。

(4) PA に従って S_c から m 個のピアを選出する。次数 d_j のピア $j \in S_c$ が選ばれる確率 $P_n(d_j)$ は次式で与えられる。

$$P_n(d_j) = \frac{d_j}{\sum_{k \in S_c} d_k} \quad (1)$$

2.2 リンクの切り替え

新規参加ピアはブートストラッピングノードから一部のピアの情報しか取得できないため、参加時には十分に次数が高く物理的に近いピアを発見できない可能性がある。そこで提案手法では効率の悪い論理リンクを切断し、より次数が高く物理的に近いピアに接続し直すリンク切り替えを行う。提案手法は文献 [7] で提案されている手法に着想を得ているが、切断するピアの選出方法が異なる。文献 [7] のモデルではランダムに切断する論理リンクを選択するが、提案手法では最も物理的に遠いピアとの論理リンクを切断する。

ピアは Gnutella と同様に隣接ピア間で定期的に Ping-Pong メッセージを交換することで隣接ピアの知るピアについての情報を得る。Gnutella では、Ping の送信間隔は数分程度となっている。取得したピア情報に新たなピアが含まれている場合、ピアはリンクの切り替えを試みる。まず、ピアは新たなピアとの物理的な距離を計測する。その後、隣接ピアのうち最も物理的に遠いものと、隣接ピアでないピアのうち物理的に近いピアの集合から、新たな隣接ピアを PA に基づいて決定する。アルゴリズムの詳細を以下に示す。

(1) 現在の隣接ピアの中から最も物理的に遠いピアの集合 S_w を計算する。ただし、次数が 1 の隣接ピアは切り替えによって論理リンクが切断されると孤立するため、 S_w には含まない。 S_w に含まれるピアとの物理的な距離を h_w で表す。

(2) 隣接ピア以外のピアの中で物理的な距離が h_w 以下であるピアの集合 S_m を求める。

(3) 集合 $S_w \cup S_m$ に PA を適用し、ピアを選出する。次数 d_j のピア j が接続先として選択される確率 $P_r(d_j)$ は次式で与えられる。

$$P_r(d_j) = \frac{d_j}{\sum_{k \in S_w \cup S_m} d_k} \quad (2)$$

選ばれたピアが S_m に含まれる、すなわち現在の隣接ピアでない場合、 S_w からランダムに選ばれた隣接ピアと切り替える。

2.3 障害回復

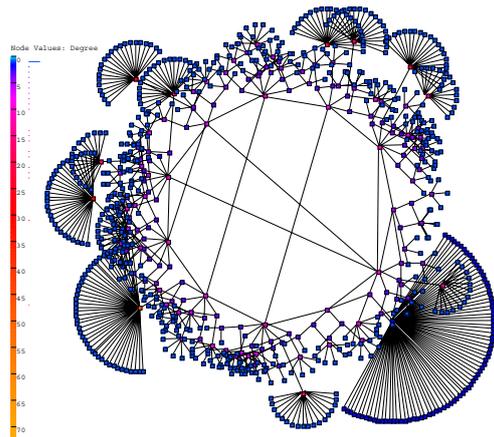
ユーザの離脱、ルータの故障などによるランダムなピアの消失や、悪意のあるユーザからの次数の高いピアへの攻撃により隣接ピアが消失すると、ピアは自身の有するピアの情報をもとに新たな接続先を見つける。接続先の決定には、2.1 節のアルゴリズムにおいて $m = 1$ 、 S_p を隣接ピア以外の自身の知るピアの集合とし、ステップ 3 から始める。

3. シミュレーション評価

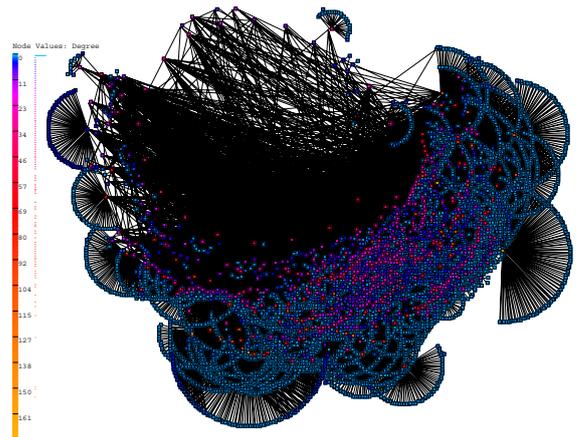
提案手法による論理網構築、改善の有効性をシミュレーションにより評価する。到達率により検索メッセージの伝播効率を、また、隣接ピア間の物理的な距離により、物理的な近さと論理的な近さの相関を測る。

3.1 シミュレーションモデル

物理網には次数分布がパワー則に従う、実在する Abilene [9] と Sprint [10] のトポロジデータを用いた。教育向けインターネットのバックボーンである Abilene は Internet2 の一部でもあり、階層的な構造を持つことが知られている。Abilene ネット



(a) Abilene network



(b) Sprint network

図 2 物理網トポロジ

トワークは、ルータは少数の広帯域回線用ポートまたは多数の狭帯域回線用ポートを有するという技術的制約を反映しており、メッシュ状に接続された少数のコアルータと、多数のエッジルータから構成される。一方、Sprint は米国における主要な ISP ネットワークである。Sprint のルータレベルのトポロジは Rocketfuel [10] と呼ばれる計測ツールにより得られている。図 2 は Abilene と Sprint それぞれの物理網トポロジを表している。シミュレーションでは、ピアはエンドユーザであると想定し、次数が 1 のノードにのみピアを配置した。その結果、ピア数は Abilene と Sprint でそれぞれ 698, 6478 となった。なお、提案手法ではホップ数を、LTM では遅延に基づいて論理網を構成することから、比較のため、すべての物理リンクの遅延は等しいものとした。

Gnutella に基づく手法である LTM では、ピアは設定された次数の上限値に達するまで定期的に新規接続を確立しようとするため、シミュレーションでは文献 [5] の値をもとにピアの次数の上限値を 8 とした。一方、BA モデルと提案手法における新規参加時の接続数 m として $\lceil \frac{d_l}{2} \rceil$, $\lfloor \frac{d_l}{2} \rfloor$ の 2 つを用いた。ここで、 d_l は LTM により構築された論理網における平均次数を表し、以降のシミュレーション結果では、 d_l は Abilene と Sprint でそれぞれ 5, 4.8 であった。新規ピアの到着間隔は平均 120 秒の指数分布に従うものとし、LTM におけるリンク切り替えの間隔及び提案手法における Ping メッセージの送信間隔も同様に 120 秒とした。これにより LTM と提案手法においてリンクの切り替えのために発生するメッセージ負荷はほぼ同じであるとみなすことができる。提案手法については、新規ピアが参加時に得られるピア数 x を制限しない場合、 $x = 20$ とした場合、さらに $x = 20$ とし切り替え手法を用いた場合の 3 通りの手法を評価の対象とした。なお、 μ の値を変更してシミュレーションを行ったが、以降ではページ数の制限により、ピア数 1 から開始し、すべてのピアが参加し終わった時点での論理網について $\mu = 0.2$, $m = 3$ の場合の結果のみを示す。

3.2 到達率に関する評価

図 3 はホップ数に対する到達率の変化の様子を示す。到達率は、総ノード数に対するノードから送出された検索メッセージ

が到達したノード数の割合であり、同じホップ数に対して到達率が高いほど論理網の直径が小さいことを意味する。まず、提案手法と BA モデルではピアの次数分布がパワー則に従うため、論理網にハブとなるピアが存在しない LTM に比べて直径の小さい論理網を構築できている。ブートストラッピングノードから情報を取得するピア数 x に制限がある場合、提案手法の到達率が BA よりも低くなるが、リンク切り替えによる論理網トポロジの改善によって到達率が向上する。特に Sprint の場合には、BA モデルでは 3 ホップで 20% 程度の到達率であるのに対し、切り替えありの提案手法では 80% 程度まで到達率を向上させている。

なお、Abilene に比べて Sprint の方が手法による到達率の差が大きい。これは、Sprint の方がネットワークの規模が約 10 倍程度大きく、シミュレーション時間も比例して長くなるため、リンク切り替え手法の実行回数が多いためであると考えられる。すなわち、提案手法では、リンク切り替えを行うことにより論理網トポロジが改善されていく。

3.3 隣接ピア間の物理的な距離に関する評価

図 4 は論理網における隣接ピア間の物理ホップ数の累積度数分布を示している。LTM は遅延に基づき物理的に遠い隣接ピアとの接続を切断することにより、BA モデルに比べて隣接ピア間の物理的な距離を短くできている。提案手法においては、接続先候補ピアの選択に物理的な近さを考慮することで BA と比較してよい特性を示しており、さらにリンク切り替えを行うことにより、LTM と同等、あるいはそれ以上の性能を達成することができる。

なお、図 3 とは逆に図 4 では Abilene の方が Sprint に比べて手法による性能格差が大きい。これは図 2(a) に示されるように、Abilene ではエッジルータがハブノードとなっているため、物理的に 2 ホップだけ離れたピアが Sprint に比べて多く、これらを隣接ピアとすることによって論理網特性を効率的に向上できるためである。

表 1 にピア間の論理的な距離と物理的な距離の相関を示す。LTM と提案手法は BA モデルに比べて高い相関を示しており、論理的に近くに位置するピアは物理的にも近いことがわかる。

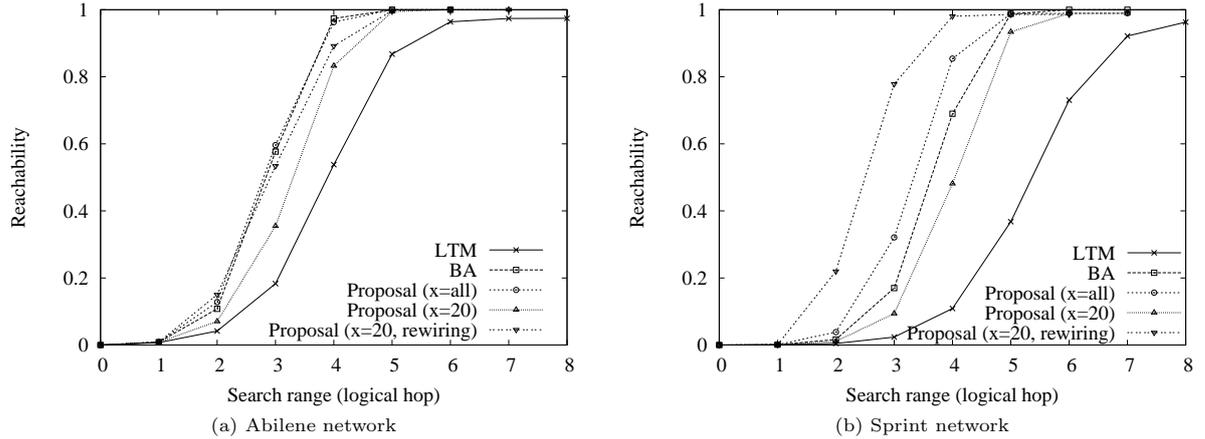


図3 到達率

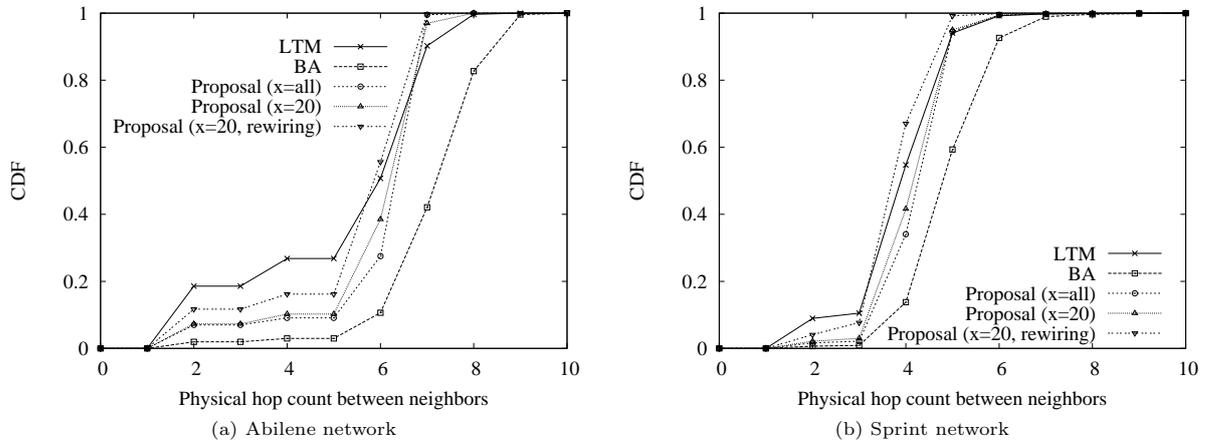


図4 隣接ピア間の物理的な距離

表1 論理的な距離と物理的な距離の相関係数

	LTM	BA	Proposal with rewiring
Abilene	0.19	-0.01	0.45
Sprint	0.46	-0.17	0.42

3.4 障害回復力に関する評価

ピアの離脱、消失などの障害発生に対してシステムが安定して稼動し続けるためには、局所的な障害回復によりシステム全体として障害発生前の状態に復旧できるのが望ましい。本稿では、ユーザのP2Pファイル共有アプリケーション停止などによるピアのランダムな消失と、システム停止を意図した悪意のあるユーザからの高次数ピアへの攻撃に対するシステムの回復力について、ピア消失後の到達率及び隣接ピアの物理的な距離に基づき評価する。なお、以降では、Abileneにおける結果のみを示しているが、Sprintでもほぼ同様の結果が得られている。

新規ピアの参加時に確率 P_d でランダムに選択されたピアが消失する場合の結果を図5に示す。ピアの消失確率 P_d を0, 0.1, 0.2, 0.3と変化させた。図5(a)において、ピアの消失により到達率が向上しているが、これは、ピア数の減少により論理網の直径が小さくなっているためである。一方、図5(b)において、新規ピア参加時に10%の確率でピアが一つ消失する場合にはリンクの補充によって消失なしの場合とほぼ同じ性能を達成できている。消失確率が高い場合には、隣接ピア間の物理

的な距離が大きくなるが、性能劣化の度合いはそれほど高くなく、提案手法はピアのランダム消失に対する障害回復力を有しているといえる。

次に、悪意のあるユーザによって次数の高いピアが攻撃され、停止した場合の提案手法の回復力を評価する。まず、すべてのピアが参加した状態から次数の降順に N_d 個のピアを同時に取り除く。その後、シミュレーションを継続し障害回復及びリンク張り替えを行った場合(シナリオ1)と、消失したピア以外のピアだけからなる論理網を構築しなおした場合(シナリオ2)についてシミュレーションを行った。なお、シナリオ1におけるピアの消失後、再構築に要する時間とシナリオ2においてすべてのピアが参加し終わるまでの時間は等しくした。シナリオ1で構築された論理網がシナリオ2で構築された論理網に近い特性を示せば、悪意のあるユーザからの攻撃に対して回復力を有するといえる。

消失ピア数 N_d を1, 5, 10とした場合の結果を図6に示す。図6(b)より、消失ピア数によらず、シナリオ1の到達率はシナリオ2より低い。シナリオ1では高次数ピアが消失すると、その隣接ピアは物理的に近いピアの中で次数の高いピアに接続しようとする。しかしながら、高次数であっても物理的に遠いピアは接続先候補として選ばれにくく、その結果、シナリオ2と比較してピアの次数の偏り、成長の度合いが低くなる。一方、

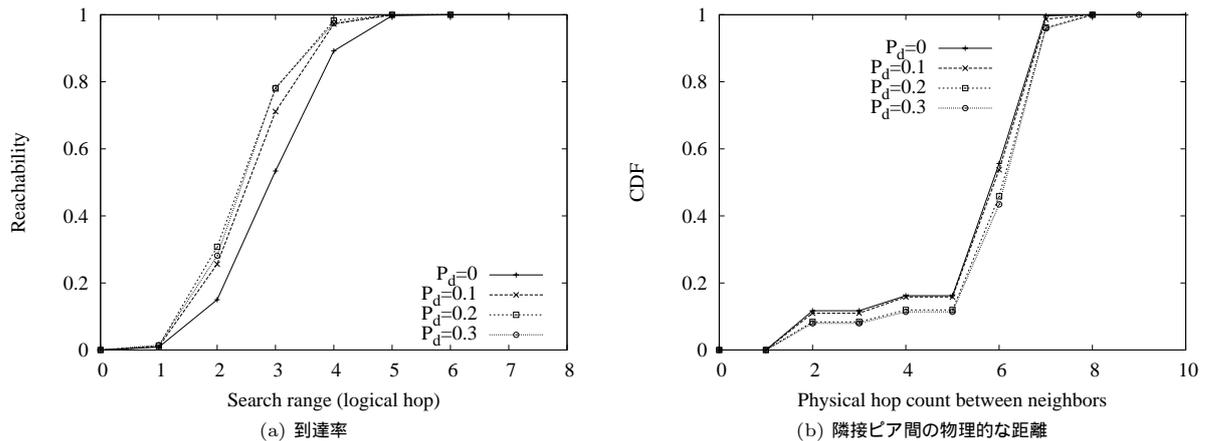


図 5 ランダム消失 (Abilene)

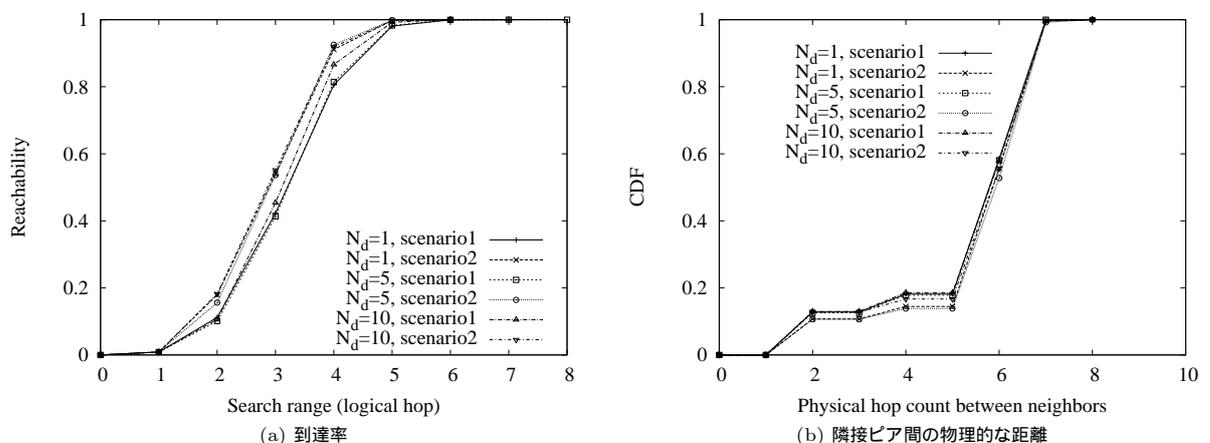


図 6 悪意のあるユーザからの攻撃 (Abilene)

図 6(b) より，隣接ピア間の物理的な距離に関してはほとんど差がない．到達率における低下の度合いは小さいことから，悪意のあるユーザからの攻撃に対しても回復力を備えているといえる．

4. おわりに

本稿では，高速なファイル検索，取得のための障害回復力のある P2P 論理網構築手法を提案した．シミュレーション評価を通して，BA モデルに比べて最大で約 60%程度到達率を向上できるとともに，LTM と同様に隣接ピアが物理的にも近い論理網を構築できることを示した．さらに，ピアのランダム消失，悪意のあるユーザからの攻撃のいずれに対しても障害回復力があることを示した．

今後の課題としては，物理ホップ数だけでなく，利用可能帯域や遅延など動的に変化する指標を考慮して論理網を構築することの有効性について検討する．物理網の負荷変動に応じて論理網を構築，再構築することにより，トラフィック集中などによって輻輳の発生している物理リンクを避けて論理網を構築できると考えられる．しかしながら，物理網の負荷状態を計測するためのトラフィックやリンク切り替え回数が増加するため，オーバーヘッドが高くなる．

謝辞 本研究の一部は，科学研究費補助金若手研究 (B)

No.17700058 及び文部科学省 21 世紀 COE プログラム (研究拠点形成費補助金) によるものであり，ここに謝意を表す．

文 献

- [1] Gnutella. available at <http://gnutella.wego.com>.
- [2] KaZaA. available at <http://www.kazaa.com>.
- [3] A.-L. Barabási and R. Albert: “Emergence of Scaling in Random Networks”, *Science*, **286**, (1999).
- [4] R. H. Wouhaybi and A. T. Campbell: “Phenix: Supporting Resilient Low-Diameter Peer-to-Peer Topologies”, *Proceedings of INFOCOM 2004*, Hong Kong (2004).
- [5] Y. Liu, X. Liu, L. Xiao, L. M. Ni and X. Zhang: “Location-Aware Topology Matching in P2P Systems”, *Proceedings of INFOCOM 2004*, Hong Kong (2004).
- [6] A. Beygelzimer, G. Grinstein, R. Linsker and I. Rish: “Improving Network Robustness”, *Proceedings of ICAC 2004*, pp. 322–323 (2004).
- [7] R. Albert and A.-L. Barabási: “Topology of Evolving Networks: Local Events and Universality”, *Physical Review Letter*, **85**, 24 (2000).
- [8] J. Gómez-Gardenes and Y. Moreno: “Local versus Global Knowledge in the Barabási-Albert Scale-Free Network Model”, *Physical Review E*, **E69**, 037103, pp. 1–4 (2004).
- [9] L. Li, D. Alderson, W. Willinger and J. Doyle: “A First-Principles Approach to Understanding the Internet’s Router-Level Topology”, *Proceedings of ACM SIGCOMM 2004*, Portland, pp. 3–14 (2004).
- [10] N. Spring, R. Mahajan, D. Wetherall and T. Anderson: “Measuring ISP Topologies with Rocketfuel”, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, **12**, 1, pp. 2–16 (2004).