

応答転送状況に基づいたP2Pネットワークのトポロジ再構築アルゴリズムの評価

A Topology Re-formation Algorithm for P2P Networks Based on Response Statistics

中野 宏一[♡] 春本 要[♠]
西尾 章治郎[♠]

Hirokazu NAKANO

Kaname HARUMOTO Shojiro NISHIO

近年、P2P ネットワークを利用したアプリケーションが普及している。Gnutella に代表されるフラッディングベースのP2P ネットワークは、クエリによるトラフィックの増大が大きな問題である。また、ピアのもつ情報を考慮せずに論理ネットワークを形成するため、検索精度は低い。そこで本論文では、P2P 論理ネットワークのトポロジを再構築するアルゴリズムを提案する。

提案するアルゴリズムでは、ピアはレスポンスの転送状況を監視し、レスポンスの転送頻度からその転送経路の重要度を計算する。そして、その重要度を基に、レスポンスの転送量が多い経路のホップ数が短縮されるように、局所的にネットワークを再構築する。これにより、ピアの要求する情報を保持するピアが近くに配置され、より検索精度の高い検索を実現できる。

また本論文ではシミュレーション実験によって、提案アルゴリズムの適用により検索精度が向上することを示す。

Recently, Peer-to-Peer (P2P) applications are becoming popular. The flooding-based P2P networks such as Gnutella have a problem that they generate a huge network traffic. Moreover, their recall ratio is generally not good because they are constructed regardless of information peers have. In this paper, we propose a topology re-formation algorithm for flooding-based P2P networks. It locally re-forms the topology of a P2P network based on the importance of paths so that a peer can be allocated near the peers that have information the peer often requests. By simulation experiments, we show that the proposed algorithm improves the recall ratio.

[♡] 学生会員 大阪大学大学院情報科学研究科博士前期課程
nakano.hirokazu@ist.osaka-u.ac.jp

[♠] 正会員 大阪大学大学院工学研究科
harumoto@eng.osaka-u.ac.jp

[♠] 正会員 大阪大学大学院情報科学研究科
nishio@ist.osaka-u.ac.jp

1. はじめに

近年、Gnutella などの P2P ネットワークを利用したアプリケーションが数多く普及している。P2P ネットワークにおける代表的な検索手法として、クエリのフラッディングがある。フラッディングでは、ピアが情報を検索する場合、TTL (Time To Live) を定めたクエリを全ての隣接ピアに転送する。クエリを受け取ったピアがクエリにマッチする情報を保持している場合、その情報をレスポンスとしてクエリを転送してきたピアへ返信する。また、クエリを発行したピアからの論理ネットワーク上のホップ数が TTL の値を超えない限り、そのクエリはさらに隣接ピアへ転送される。

しかしフラッディングでは、TTL を大きな値に設定するほどトラフィックが指数関数的に増加し、ネットワーク全体のパフォーマンスが低下するという問題がある。逆に、TTL を小さな値に設定すると、クエリがフラッディングされる範囲外にある情報を取得することができない。つまり、TTL の値とレスポンス数の間にトレードオフが存在する。

TTL の値を小さく抑えながら多くのレスポンスを得るためには、各ピアが保持する情報や各ピアが発するクエリに注目し、クエリが届く範囲内にできるだけ多くの該当情報をもつピアが存在するように P2P ネットワークを構成すればよいと考えられる。しかし従来の P2P ネットワークのトポロジは静的であるため、これを実現するためには何らかの基準によって P2P ネットワークのトポロジを動的に変化させるアルゴリズムが必要である。

Rewiring方式[1]では、レスポンスによるトラフィック量の増減を考慮してリンクを繋ぎ換える手法を提案した。これにより検索精度は向上した。しかし、ピアの保持するリンク数を考慮していないため、繋ぎ換えにより一部のピアのリンク数が増加することになり、クエリがこれらのピアを経由することによるトラフィックの増大を招いていた。また、1回の繋ぎ換えでは1つの経路に着目してそのホップ数の短縮を図るため、ピアの各リンクにおけるレスポンスの転送頻度に大きな偏りがない場合には繋ぎ換えが発生しないという問題があった。

Rewiring方式を拡張したSwapping方式[2]では、ピアがリンクの接続要求を受信した際に、隣接ピアの中から接続要求を送信してきたピアとリンクを入れ換えるピアを決定する。これによりピアの保持するリンク数は一定に保たれ、トラフィックの増大は軽減された。しかし、Swapping方式では、Rewiring方式と同じく、1回の入れ換えでホップ数が短縮されるのは1つの経路だけである。そのため、レスポンスの転送頻度に偏りがない場合には入れ換えが発生しないという問題があった。加えて、入れ換えによりホップ数が延長される経路数はRewiring方式よりも増えるため、入れ換え1回あたりの効果が小さく、検索精度の向上はわずかであった。

そこで本研究では、Re-formation方式と題し、より小さな TTL 値の設定でより多くのレスポンスを得ることができるような論理ネットワークのトポロジ再構築アルゴリズムを提案し、シミュレーション実験によりその性能を評価する。

2. 関連研究

Pure型P2Pネットワークにおける検索手法の代表的なものとしてフラッディングの他には分散ハッシュテーブル (DHT: Distributed Hash Table) による方式がある。

DHTによる方式では非常に少ないメッセージ数で検索を行うことができる。しかし、DHTでは検索時に情報の識別子

を指定しなければならないため、一度に複数の情報を取得したい場合や、キーワードの部分一致などによる情報検索には不向きである。

フラッディングによる検索手法は、複雑な条件比較などを含む任意のクエリに対応できる反面、前章で述べたように検索トラフィックの増大の問題がある。これを解決する手法として、RI (Routing Indices) [3] やSONs (Semantic Overlay Networks)[4]などの手法が提案されている。

RIでは、クエリをフラッディングするかわりに、隣接するピアのもつ情報を考慮し、応答の期待できるピアへクエリを転送する方式を提案している。ピアは隣接するピアのもつ情報を管理し、クエリを受信すると、隣接する各ピアから得られる応答の期待値を算出し、その期待値の一番大きいピアへそのクエリを転送するというのを繰り返す。この手法では応答の期待できるピアにのみクエリを転送するため、不必要なクエリの発生を抑えることができる。しかしRIでは論理ネットワークは静的であるため、情報を保持するピアが論理ネットワーク上の離れたところに存在する場合、ピアは情報を取得できない可能性がある。

SONsではピアのもつ情報を考慮し、情報のジャンル別にネットワークを形成する。SONsでは情報のファイル名とその情報に対応するジャンル名を格納するデータベースが存在する。このデータベースを参照することにより、情報に対応するジャンルを一意に決定できる。ジャンルはroot, style, substyleの順に階層化されている。ピアは、自身が持つファイルのジャンルに該当するネットワーク(SON)に参加し、そのSON内に属する他のピアとリンクする。検索の際は、情報の分類と同様にクエリをジャンルに分類し、該当するSONへ転送する。SONsでは情報のジャンルごとにネットワークを形成するため、検索精度が非常に高い。ただしこの手法は情報が明確にジャンルに分類できる場合に限る。

3. 提案アルゴリズム

3.1 想定環境

ピアは必ず1つ以上のピアとの双方向のリンクをもち、リンク先のピアを隣接ピアとする。各ピアは、ネットワークに参加している任意のピアとのリンクを構築できるものとする。ピアは全体で1つの論理ネットワークを形成し、論理ネットワークが分断することはないものとする。

3.2 転送履歴の参照

ピアは自身を経由したレスポンスについて、2ホップ以内の転送経路を履歴として保持する。ピアから2ホップ以内の範囲をピアのエリアと表現する。ピアは自身のレスポンス転送履歴を定期的に参照し、経路図を作成して経由レスポンス数を算出する。転送履歴を参照することによりピアが把握したトポロジが図1のような場合、作成する経路図は図2のようになる。数字は経由レスポンス数を表す。なお、経路を含む経路のうち、経路長が1ホップだけ長い経路を経路の親経路といい、この2つの経路は親子関係にあると表現する。経路長が1ホップの経路はリンクと呼ぶことにする。

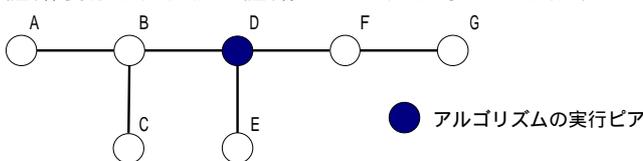


図1 経路図の例

Fig.1 An Examples of Grasped Topology

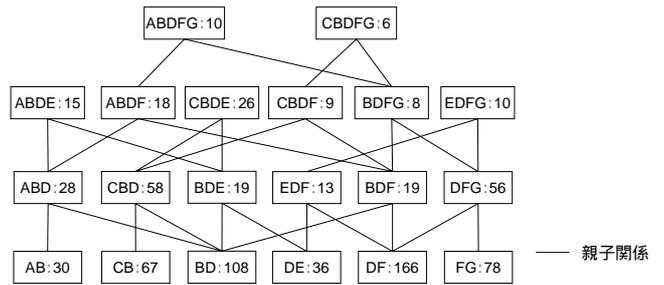


図2 経路図の例

Fig.2 An Examples of a Path Tree

3.3 経路の経由率および重要度

トポロジの再構築によりホップ数が短縮される経路においては検索精度が向上するが、ホップ数が延長される経路においては検索精度が低下する。図1において、経路ABDFG間のリンクを全て切断し、ピアAG間のリンクを構築して経路の短縮を行う場合、経路ABDFGおよびその子経路を経由したレスポンスは、再構築後に転送経路が変わりホップ数が増減する。経路ABDFGを経由したレスポンスについてはホップ数が短縮される。一方、経路ABDFを経由したレスポンスのうち、ピアGを経由していないレスポンスおよび経路BDFGを経由したレスポンスのうち、ピアAを経由していないものは、ホップ数が増加する。よって、経路ABDFおよび経路BDFGを経由したレスポンスのうち経路ABDFGを経由している割合が大きい場合には、経路ABDFGを短縮した方がよいことになる。この割合を経由率と表現する。経由率は次の計算式により与える。

$$P = \frac{R}{R}$$

R , R はそれぞれ、経路、経路 を経由したレスポンス数である。経路 に対する経路 の経由率 P が高い場合は、経路 を経由したレスポンスが経路 も経由している割合が高いということの意味する。よって、経路 ではなく経路 の短縮を図った方がよいことになる。図2において、経路ABDFに対する経路ABDFGの経由率は、経路ABDFG、経路ABDFの経由レスポンス数がそれぞれ10, 18であるから、 $10 / 18 = 0.56$ となる。

また、経路図から短縮すべき経路の候補を選択する際の基準として、経路に重要度を設定する。重要度は以下の式により算出する。

$$Q = R \cdot P$$

経路 に対する経路 の重要度 Q が大きいほど、その経路のホップ数を短縮することによる検索精度の向上の度合いが高いということの意味する。

経路長が1の経路であり子経路をもたないため、経由率は0とし、重要度は以下の計算式により算出する。

$$Q_{ij} = \max\left(\frac{R_{ij} - E_i}{i}, \frac{R_{ij} - E_j}{j}\right)$$

i, j はピアであり、 R_{ij} はリンク ij を経由したレスポンス数である。ピア i, j それぞれにおいて保持する各リンクを経由したレスポンス数の平均値 E_i, E_j および標準偏差 i, j を計算する。そして、算出した平均値および標準偏差により

リンク ij を経由したレスポンス数を正規化し、2つの値のうち最大のものをリンク ij の重要度 Q_{ij} とする。図3において、リンクBDを経由したレスポンス数は108であり、ピアB,ピアDにおいて、各リンクを経由したレスポンス数の平均値と標準偏差で正規化した値はそれぞれ-1.03, 0.96となる。よってリンクBDの重要度は0.96である。

3.4 ネットワーク再構築の手順

ピアは定期的にレスポンスの転送履歴を参照し、トポロジ再構築アルゴリズムを実行する。以下にその手順を示す。

- (1)ピアはレスポンスの転送履歴の情報を基に経路図を作成し、各経路を経由したレスポンス数をカウントする。その値をもとに各経路の経由率および重要度を算出する。
- (2)自身を含めエリア以内に存在するピア数を N とした場合、エリア内でスパニング木を構成するのに必要な $N-1$ 本のうち4割の経路を、重要度が高いもの順に選択する。ここで経路を選択するとは、再構築後のネットワークにおいて、その経路の両端のピア間にリンクを構築することを意味する。
- (3)選択された経路について、経由率がより大きい親経路が存在するかどうかを調べる。
- (4)経由率がより大きい親経路が存在する場合には、その経路の選択を解除して新たにその親経路を選択し、手順3に戻る。存在しなければ、手順5に進む。
- (5)手順2, 3, 4で選択された経路数と同数のリンクを重要度が高い順に選択する。
- (6)スパニング木となるまで、経路図中にあるリンクとは無関係にリンクをランダムに設定する。
- (7)経路図中の全ての経路に対して、再構築によるレスポンスのトラフィックの増減を計算し、その総和を評価値とする。
- (8)手順6, 7を数回繰り返して複数のトポロジを作成し、評価値が最小となるトポロジを再構築後のトポロジの候補とする。
- (9)評価値が正である場合は、トポロジの再構築により検索精度が低下すると判断し、アルゴリズムを終了する。評価値が負の場合は、再構築後のトポロジとして決定する。
- (10)エリア以内のピアに対して、再構築後のトポロジ情報を付与したメッセージを送信する。メッセージを受信したピアはトポロジ情報を元にトポロジを再構築する。

図4は図1のトポロジにRe-formation方式を適用して再構築したトポロジの一例である。図2において、重要度が高いのは経路ではCBDおよびDFG、リンクではBDおよびDFであり、それらを優先的に選択している。リンクAEおよびDEは、トポロジがスパニング木となるようにランダムに構築されたリンクである。

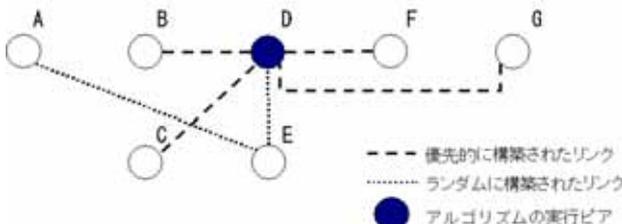


図3 トポロジの再構築の例

Fig.3 An Example of Re-formation of a Topology

Re-formation方式では、隣接行列を用いてエリア内の論理ネットワークのトポロジを把握している。隣接行列を用いる

ことでトポロジのループや分断を検出することができる反面、トポロジ候補の作成には多数の行列計算が必要となる。エリア内のピア数を測定したところ、TTLが5の場合は10程度、TTLが6の場合は20程度であった。また、シミュレーション実験を行った計算機環境では、1回のアルゴリズムの実行に要した時間はいずれの場合でも0.09秒程度であり、計算量は問題ない程度であると言える。

本論文では優先的に選択する経路およびリンクの数は、必要なリンク数の8割としたが、ランダムに設定する残り2割のリンクは、再構築後のネットワークトポロジをスパニング木とするためのものである。エリア内のピア数の測定結果から、8割を優先的に選択すれば、リンクをランダムに設定することによる悪影響は小さいと考えた。また、経路長が2以上の経路とリンクは重要度の算出方法が異なるため、経路とリンクはそれぞれ同数選択するものとした。

3.5 評価値の算出

トポロジの再構築によるネットワークに対する影響としてレスポンスによるトラフィックの増減を評価値として算出する。経路図中の各経路について、再構築後の接続行列を用いて、経路の両端のピア間のホップ数の増減を決定し、再構築により転送経路が変わるレスポンス数との積を計算し、それらの総和を評価値とする。

評価値が負の場合は再構築により検索精度が向上すると判断する。反対に正の場合は検索精度が低下すると判断する。

4. 評価

シミュレーション実験によりRe-formation方式の性能を評価する。

4.1 評価環境

表1に主な評価環境を示す。情報の種類は5種類とし、各ピアは5つの情報のうち1つを保持している。ピアは自身が保持する情報と同じものに対してクエリを発行する。以下、評価項目を1検索あたりの平均リコール率、同種リンク率とし、Rewiring方式、Swapping方式、Re-formation方式それぞれを適用した場合のシミュレーション結果を示し、考察を行う。

表1 評価環境

Table 1 Simulation Parameters

評価パラメータ	値
ピア数	5000
情報の種類	5
クエリの発行確率	0.001
クエリの TTL	5, 6
転送履歴の参照確率	0.001
転送履歴の保持期間	20

4.2 平均リコール率の推移

1検索あたりの平均リコール率は、ピアが1度の検索で得たレスポンス数と、検索に該当するネットワーク全体の情報数との商の平均によって得ることができ、検索に該当する情報の取得率を表す。各評価対象における1検索あたりの平均リコール率の変化についての評価結果を図5に示す。

Re-formation方式は、Rewiring方式、Swapping方式に比べ、Re-formation方式では、短時間に大きな増加が見られる。TTLが5の場合では、Rewiring方式で2000タイムスロットを要するリコール率に、その半分の1000タイムスロットで到達している。TTLが6の場合は、Rewiring方式で5000タイムスロットを要するリコール率に、500タイムスロットで到達している。この要因と

しては, Rewiring方式とSwapping方式は共に, 1回の実行につきレスポンスの転送頻度が高い経路を1つ短縮することを目的としているため, リコール率が向上するまでに長時間を要するのに対し, Re-formation方式では一度に複数の経路を短縮するため, 短時間で効果が現れるということが考えられる.

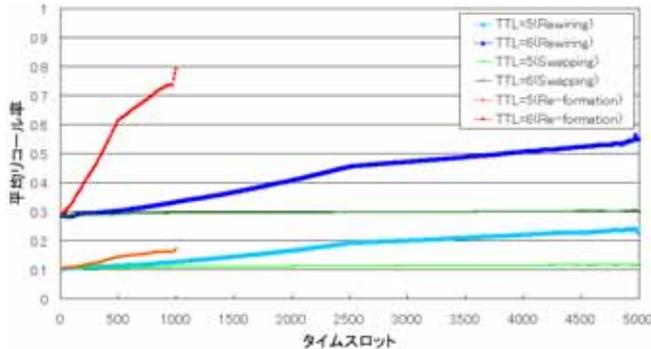


図4 1検索あたりの平均リコール率

Fig.4 Average Recall Ratio

4.3 同種リンク率

同種リンク率とは, 全体のリンク数に対する, 同じ情報を保持するピア同士のリンク数の割合である. この値が大きいくほど, 論理ネットワーク上において同じ情報を保持するピア同士が近隣に配置されるようにネットワークが組織化されと言える. 各方式を適用した場合の同種リンク率の推移を図4に示す. Rewiring方式, Swapping方式では同種リンク率の推移はほぼ同様であるのに対し, Re-formation方式では, 大幅な増加が見られ組織化が急速に進んでいる. Re-formation方式において, 転送履歴により把握したトポロジと実際のトポロジとが必ずしも一致しているとは限らないため, 再構築により全体のリンク数が増加することがある. この影響はTTLが大きいくほど大きくなる. TTLが6の場合のRe-formation方式において, 同種リンク率が増加した後に減少しているのは, このためであると考えられる.

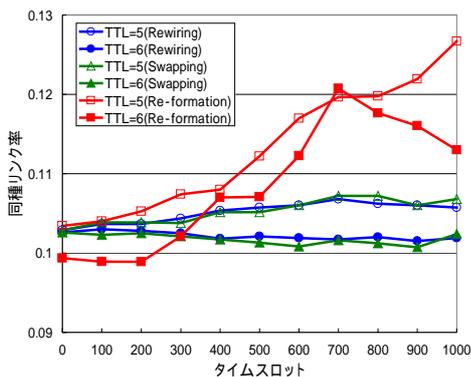


図5 同種リンク率の遷移

Fig.5 Ratio of Links between Same kind of Peers

5. まとめと今後の課題

レスポンスの転送状況を監視し, 転送頻度の高い経路のホップ数が短縮されるように周辺の論理ネットワークのトポロジを再構築するアルゴリズムを提案した. またシミュレーション実験による評価を行った. その結果から, Re-formation

方式では, Rewiring方式, Swapping方式に比べ, 平均リコール率が大きく向上することを確認した. 今後は, ピアの参加, 退出および故障時のアルゴリズムの考案や, リンク数の増大の軽減によるトラフィックの削減を考慮したアルゴリズムへの拡張を行う予定である.

[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.

[文献]

- [1]片山肇, 中野宏一, 春本要, 西尾章治郎: “応答転送状況を用いたP2Pネットワークの繋ぎ換えアルゴリズムの評価”, 日本データベース学会Letters Vol.4, No.1, pp.69-72.
- [2]片山肇, 中野宏一, 春本要, 西尾章治郎: “応答転送状況に基づくP2Pネットワークポロジ変更手法の改善”, 日本データベース学会Letters Vol.4, No.2, pp.33-36.
- [3]A. Crespo and H. Garcia-Molina, “Routing indices for peer-to-peer systems,” In *ICDCS*, 2002.
- [4]A. Crespo and H. Garcia-Molina: “Semantic overlay networks for p2p systems”, Technical report, Computer Science Department, Stanford University, 2002.

中野 宏一 Hirokazu NAKANO

大阪大学大学院情報科学研究科博士前期課程在学中. 2005大阪大学工学部電子情報エネルギー工学科卒業. データベースシステム, マルチメディア情報システムなどの研究に従事. 日本データベース学会学生会員.

春本 要 Kaname HARUMOTO

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などの研究に従事. 電子情報通信学会, 情報処理学会会員, IEEE各会員.

西尾 章治郎 Shojiro NISHIO

1980年京都大学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教授を経て, 2002年より同大学大学院情報科学研究科教授となり, 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. 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, 本学会理事, 電子情報通信学会, 情報処理学会の各フェローを含め, ACM, IEEEなど8学会の会員.