

## ピアツーピアシステムにおけるコンテンツ複製配置の最適化 Optimization of Content Replication in Peer-to-Peer System

川崎陽平†  
Yohei Kawasaki

吉田紀彦†  
Norihiro Yoshida

### 1. まえがき

ピアツーピア (Peer-to-Peer, P2P) システムは、従来のクライアントサーバシステムにおいてサーバへ集約されていたコンテンツを各ピアに分散させることによって実現される、コンテンツの分散共有システムである。

P2P システムではコンテンツの所在が分散するため、その検索方法が重要となり、システムも検索方法に基づいて分類される。検索法として、P2P ネットワーク内のブロードキャスト (flooding) を用いる Gnutella[1] をはじめとした Pure P2P では、その特徴に起因する多量のトラフィックが問題となる。この問題に対して、コンテンツの複製を配置することは有効な改善法の一つである [2][3]。

コンテンツの複製配置に関する研究は、すでに複数の研究機関で進められているが、コンテンツの人気を考慮したものは少ない。各ピアの検索には必ず偏りがあるため、コンテンツには必ず人気・不人気が生じる。本研究ではこのことに着目し、コンテンツの人気に応じた複製の配置を動的に行ない、P2P ネットワーク全体のストレージ利用率を抑えると同時に、Pure P2P 特有の問題の更なる改善のための方式を提案する。シミュレーションによる提案方式の効果の実証も行なった。

### 2. コンテンツ複製配置方式

P2P ネットワーク内にコンテンツの複製を配置する際、配置の仕方によって、複製がシステムに与える影響は大きく変わってくる。どのピアに複製を配置するかを決定するための、既存の複製配置方式を以下に述べる。

(1) **Owner Replication** あるコンテンツの検索が成功したとき検索元ピアのみに配置する。単純かつコスト最小の方式であるが、複製がネットワーク内に広まるのに十分な時間を要する [2]。

(2) **Path Replication** 検索に成功した検索パケットの通過した経路 (検索パス) 上すべてに複製を配置する。検索性能は向上するが、資源の無駄が多い [2]。

(3) **Path Random Replication** 検索パス上の各ピアにおいて確率的に判定して複製を配置する。あらかじめ配置確率を決定しておく必要がある [4]。

### 3. 複製配置による効果と対象検索方式

P2P システムでは、インデクスサーバが存在する Hybrid P2P やハッシュ法を用いた分散ハッシュテーブル (Distributed Hash Table, DHT) が検索面で優れている。しかし、前者はインデクスサーバが高負荷となること、後者はネットワークの構造化が必要となることが問題となる。一方、Pure P2P はインデクスサーバやネットワークの構造化は必要としないが、検索性能、特に検

索パケットの flooding によるトラフィックの増大は最大の欠点である。

P2P システムにおいてコンテンツの複製配置を行うと、次のような効果が期待できる。

- 検索成功率の上昇と成功までのホップ数減少に伴うトラフィック削減
- コンテンツ1つあたりのアクセス分散に伴うピアの負荷分散

これらの効果は、多量の検索パケットがネットワークとピアの両方に負荷をかける Pure P2P において特に得られるものである。そこで、本研究では Pure P2P を対象にすることとし、以降、Pure 型を対象にしたものとして述べていく。

### 4. コンテンツの人気に基づく複製配置

P2P ネットワークで扱われるコンテンツには人気・不人気が生じる。コンテンツの人気度は各ピアが行なう検索に偏りがあることによって生じる。以下に、コンテンツの人気度の分布に関する考察を述べた上で、人気に基づく複製配置法を提案する。

#### 4.1 コンテンツの人気

web 上には様々なコンテンツが存在するが、それらの人気を計る方法の一つは、個々のコンテンツの参照回数をカウントすることである。web 上のリソースへのアクセス数と、最多アクセス数のリソースを最高位としたランクの間には、べき乗則 (power-law) が成立つことが分かっている [5]。この関係は、ユーザのリソースに対するニーズによるものであり、システムに左右されることなく普遍的であるため、P2P システムにおいても成立つと考える。

#### 4.2 複製数と複製配置位置

コンテンツの複製を配置するには、複製数とその配置位置 (配置ピア) を決定しなくてはならない。極めて単純に考えると、すべてのコンテンツの複製をすべてのピアに配置すれば検索のための通信は不必要となり、トラフィック削減の目的を容易に達成できるという結論に至る。しかし、この結論はピアのストレージ資源が有限である点において現実と合致しない。反対に、ストレージ資源の節約を考慮し複製数をごく少数にすると、コンテンツの発見が困難となる上に、検索パケットによるトラフィックは増大する。

以上のことより、複製数についてストレージ資源と検索効率の2点から見ると、両者が満足する最適点の存在が浮かぶ。最適点はコンテンツごとに人気によって左右される。最適点を取る、つまり、人気の高いコンテンツの複製は多数配置し、人気が高い場合は複製数を抑えるような配置を行なうこととする。

コンテンツの人気を予見することは、基本的には不可能である。また、複製の配置場所や数によって、P2P ネット

†埼玉大学 Saitama University

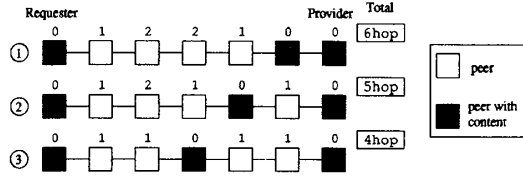


図1: 検索パス上でのコンテンツアクセスホップ数

ネットワーク内でも部分部分でトラフィック量やピアの負荷が異なる。このような動的要因のため、複製の配置も状況に適應するように動的に行う。また、ネットワークのトポロジやコンテンツに関する事前の情報を必要としない動的な配置によって、P2P システムのスケラビリティを確保することができる。

既存の複製配置方式では、アクセスされたコンテンツはその人気度を考慮することなく全て複製として配置するが、本研究では、複製配置位置を決定しても即座に複製を配置せず、人気の高いコンテンツを優先して複製配置するようにする。

4.3 提案方式

本研究の提案方式を、あるピアが行なった検索が成功した状況から順を追って説明する。

(1) 複製配置位置

複製配置位置は、検索を行なったピア (Requester) と検索がヒットしたピア (Provider) 間の検索パスの中間ピアとする。但し、3hop 以下でヒットした場合は、すでにコンテンツが近くに存在するため複製配置しない。

図1は6hopで検索がヒットした際の検索パス上の複製の置き方による、検索ホップ数の違いを示した図である。各ピアの上の数値がヒットするまでにかかるホップ数を示しており、③のように複製を検索パスの中間に配置したときに合計ホップ数が最小となることが分かる。

(2) インデクスによる複製配置予定の明示

(1) で決定した複製配置位置には即座に複製を配置せず、まずはインデクス情報のみを配置する。インデクスは Provider を指しており、検索がインデクスでヒットした場合に誘導される。インデクスでは参照回数をヒットするごとに1ずつカウントし、回数がピアで定める閾値を超えた場合に実際に複製配置を行なう。このような方法を用いることで、不人気コンテンツの複製数を抑制できる。また、インデクスのはたらきにより、実際に複製が配置されるまでのタイムラグは問題にならない。

加えて、インデクスには Requester が複製を保持した際の通知によって所在情報が追加される。2つの所在情報を交互に返答することで、ピアの負荷分散を行なう。

(3) コンテンツ人気を考慮した複製の置き換え法

ストレージが消費され一杯となったピアが、新たにオリジナル・複製コンテンツを配置するには既存の複製と置き換えする必要がある。置き換え対象の複製は“最も参照の少ないもの”とし、対象が複数存在すればその中の“最も古いもの”とする。

5. 実験

本研究の提案方式の効果を実証するために、作成したシミュレータを用いて1台の計算機上での仮想ネット

表1: 実験条件

ピア数	2000 台
検索パケット TTL	実験① 7, 実験② 5
初期コンテンツ最大数	60 個
ストレージ容量	100 個
複製配置閾値	15 回

表2: 人気度ごとのコンテンツ数と検索要求率

人気度数	検索要求率 (%)	コンテンツ数 (個)
(Low) 1	5	2500
2	10	1000
3	20	400
4	25	150
(High) 5	40	50

ワークによる実験を行なった。ピアに関する実験条件を表1にまとめる。

実験開始前に、各ピアにはランダムな個数のコンテンツを初期コンテンツ最大数を上限として持たせた。ピアの検索要求率を5段階に分けることで人気を作り出し、人気と個数の関係がべき乗則に近くなるよう表2のように設定した。P2P ネットワークのトポロジは、実験中に変化は起きないものとし、実験①ではGridトポロジを、実験②では次節に述べる power-law ランダムトポロジを使用した。

全体で8万回の検索を行ない、2千回ごとの推移を結果に示す。

5.1 Power-Law ランダムトポロジ

P2P システムはIPネットワークの上に論理ネットワークを形成する。IPネットワークは power-law の性質を持っており、その上で動作する P2P ネットワークも同様に power-law の性質を持つことが報告されている [6]。そこで実験では、ごく少数のピアが大多数のリンクを持ち、大半のピアはリンクが極めて少ないという、べき乗則に従うトポロジを作成して使用した。リンク数が最大のピアは全ピアの約1割にあたるおよそ200のリンクを持ち、半分以上のピアは1か2のリンクしか持たないようなトポロジを、リンク数だけに注目し、接続はランダムに行なうことで構成している。

5.2 結果と考察

実験① 提案方式中の詳細方式別性能測定

本研究の提案方式として4.3節の(1)(2)で述べたインデクス情報による複製配置法と、(3)で述べた複製置き換え法を提案したが、まずはじめにそれぞれの効果を明らかにするため、一方の方式のみを有効にした実験を行なった。

インデクスによる効果を確認するために、複製置き換え法をFIFO(First In First Out)に固定し、インデクスに代わり複製を配する方法 (Index OFF) とインデクスを使用する方法 (Index ON) での比較を行なった。

5万4千回前後までは Index ON のほうが総パケット数が多くなった (図2) のは、小さいデータサイズゆえ多量のインデクスを配置できる Index ON において、ヒッ

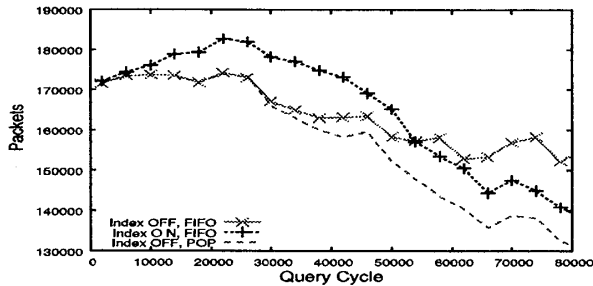


図 2: 方式組み合わせ別の総パケット数

ト率が Index OFF の場合よりも高くなったことによるヒットパケットの増分の差である。Index ON では人気コンテンツの複製数が増えていき、検索ヒットまでのホップ数も短くなるため 5 万 4 千回付近で逆転が起り、結果として Index ON の方が総パケット数を削減できた。

複製置き換え法の効果の確認には、Index OFF とし FIFO と POP での比較を行なった。図 2 に示すように、2 万 6 千回付近から両者の違いが現れた。明らかに、高人気コンテンツの複製を残す方がヒット率上昇やヒットまでのホップ数削減につながり、総パケット数を削減できている。

#### 実験② 提案方式の性能測定

本研究の提案方式 (Proposal) の他、Owner Replication, Path Replication, Path Random Replication (配置率 10%) を比較対象とした。

総パケット数の推移 (図 3) では、提案方式において急激な減少が見られたのに対し、その他の方式は減少することなく緩やかな推移であった。また、ストレージ利用率 (図 4) においても、提案方式が最も低く、少ない複製数でもトラフィックの削減を達成できている。

提案方式によりトラフィックを削減できたのは、高人気コンテンツの複製が多数配置されたことと、人気に基づく複製置き換え動作によるものである。power-law ランダムトポロジでは多くのリンクを持つピアに多数の複製が配置され、複製の入れ替えも頻繁に起こる。人気の高いコンテンツが優先的に配置されることで検索成功率が向上し、flooding によるパケットの広がりが増えられ、トラフィック削減につながる。また、低人気コンテンツは複製が生成されにくいことにより、ストレージ利用率が抑えられている。一方で、多くの複製を配置しているにもかかわらず、比較対象の方式がトラフィックの削減をできていないのは、不人気コンテンツの複製も多く配置されているためである。提案方式では、全体としての複製数が少なくても、高人気コンテンツの複製は十分に配置されることやインデクスによる分散誘導によって、一部のピアだけにコンテンツ要求の負荷が集中しないことも実験によって確認している。

## 6. まとめと今後の展望・課題

本論文では、検索要求の偏りによって生じるコンテンツの人気に着目し、人気に基づく複製配置方式を提案した。提案方式ではコンテンツ参照回数を人気の指標として、人気の高いコンテンツの複製を多く配置かつ優先的に残すようにし、ユーザのニーズに適した形となるよう

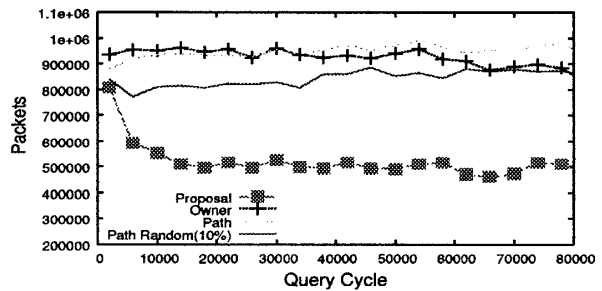


図 3: 総パケット数

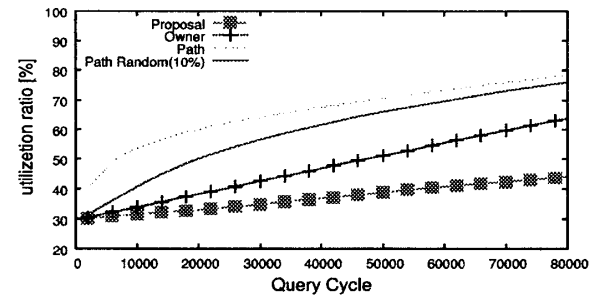


図 4: P2P ネットワーク全体のストレージ利用率

にした。実験の結果、提案方式において、比較した方式よりもトラフィック量削減やストレージ利用率抑制等の点で優れていた。インデクスや複製により検索成功率が向上しても、検索が成功したパス以外にはなお flooding によるトラフィック増大の影響が残るため、別の検索手法との組み合わせを考えたい。現状では、検索 TTL を変化させ徐々に検索範囲を拡大していく Expanding Ring[2] が有効であると思われる。課題としては、複製配置の契機となる、インデクスの閾値をいかに決定するかということが挙げられる。

## 参考文献

- [1] Gnutella website, "http://www.gnutella.com/"
- [2] Q. Lv, P. Cao, E. Cohen, K. Li, and S. Shenker, "Search and Replication in Unstructured Peer-to-Peer Networks" in Proceedings of 16th ACM International Conference on Supercomputing(ICS'02), June 2002.
- [3] E. Cohen and S. Shenker, "Replication Strategies in Unstructured Peer-to-Peer Networks" in The ACM SIGCOMM'02 Conference, August 2002.
- [4] 丸田大輔, 山本寛, 尾家祐二, "P2P ネットワークにおけるストレージ負荷分散実現のための複製配置手法", 電子情報通信学会 技術研究報告, NS2003-319, IN2003-274, pp.131-136, 2004.
- [5] 佐藤進也, 風間一洋, 清水奨, "アクセス履歴を使用した web サーバの状態の推定" http://www.ingrid.org/w3conf-japan/97/sato/paper.html .
- [6] L. A. Adamic, R. M. Lukose, A. R. Puniyani and B. A. Huberman, "Search in power-law networks", Physical Review E, Vol.64 46135-46143, 2001.
- [7] 川崎陽平. ピアツーピアシステムにおけるコンテンツ複製配置の最適化. 埼玉大学卒業論文, 2005.