P2P 型コンテンツ検索システムにおける コンテンツ分布を考慮した Top-k 検索処理手法

寺田 努[†] 松波 秀和[††] 西尾 章治郎[†††]

近年，P2P 型ネットワークを利用したコンテンツ共有への注目が高まっている．このようなシステムでは，システム拡張のためのコストは小さいが，一般にフラッディングを用いて検索クエリを拡散させるため，検索結果の件数が多い場合にクエリ応答が大量のトラフィックを発生させる．そこで本研究では，P2P 型ネットワークにおける効率的な Top-k クエリの処理手法を提案する．一般に，ユーザは上位の検索結果しか必要としないことに着目し，コンテンツ分布の偏りを考慮したクエリ応答抑制手法を用いることで，トラフィックを削減するとともに検索にかかる時間を削減する．さらに，本稿ではシミュレーション評価により，提案手法の有効性を明らかにする．

An Efficient Top-k Query Processing Method Considering Contents Distribution on a P2P-based Contents Retrieval System

Tsutomu Terada,[†] Hidekazu Matsunami[†††] and Shojiro Nishio[†††]

Recently, there has been increasing interest on researches for the contents sharing on peer-to-peer (P2P) networks. Since such a system employs flooding for query processing, the replies for the query may bring about heavy traffic in the case where each peer replies many search results. Therefore, we propose a new efficient query processing method for top-k query on P2P networks. In our past research, focusing that users usually need search results only with higher score, we reduce the reply traffic and the turn-around time by controlling the number of query replies. However, since this method does not consider the deviation of contents distribution, it does not work well in actual environments. Therefore, in this paper, we propose a new query processing method considering the deviation of contents distribution by propagating a part of query results. Moreover, we show the availability of our method by simulation studies.

1. はじめに

近年，ネットワーク環境の整備により，WWW（World Wide Web）上で公開されているウェブコンテンツの量が飛躍的な速度で増加しつつある．ユーザは Yahoo!や Google といったユーザの問合せに適している順にコンテンツを提示してくれるサービスを利用することにより，膨大なコンテンツの中から必要な情報を効率良く探し出すことができる．

一方，近年 P2P（Peer to Peer）型のネットワークを利用したコンテンツ共有への注目が高まっている．クライアントがサーバからサービスの提供を受けるサーバ/クライアント型のシステムとは異なり，P2P 型のシステムでは，ピアと呼ばれるコンピュータどうしが相互に接続し平等な関係の下で直接リソースやサービスをやりとりする．一般に P2P 型のシステムで検索を行う場合，**図 1** のように，クエリ発行ピアは直接接続している隣接ピアのすべてに検索クエリを送信する．検索クエリを受信した各ピアは，検索クエリを送信元を除くすべての隣接ピアに送信する．これを TTL として指定された回数だけ繰り返す．また，検索クエリに合致するコンテンツに関する情報をクエリ応答として検索クエリに対して返信し，クエリ発行ピアが受信するまで検索クエリの送信経路をたどるよう転送する．サーバ/クライアント型のシステムではシステム提供者が利用者の増加に応じてシステムやネットワークを拡張する必要があるのに対して，P2P 型のシステムでは特定のコンピュータに負荷が集中しないた

† 大阪大学サイバーメディアセンター
Cybermedia Center, Osaka University
†† デジタルプロセス株式会社
DIGITAL PROCESS LTD.
††† 大阪大学大学院情報科学研究科
Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

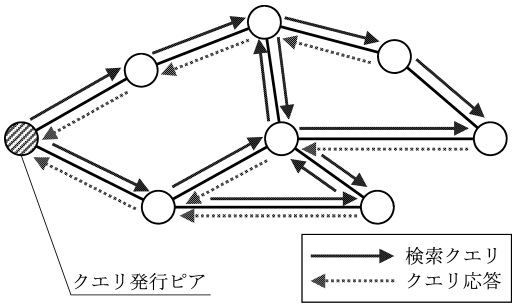


図 1 P2P 型システムにおける検索動作
Fig. 1 Contents retrieval on P2P-based systems.

めシステム提供者の負担が小さいという特徴がある．

ここで，例として P2P 型のシステムを用いてウェブコンテンツの検索を行うことを考える．文献 1) に示されるように，特別なサーバを用意することなく，各ユーザがローカルに保存したウェブコンテンツを共有することで，重要な（= 他人が興味を持っている）コンテンツを見つけたり，すでに削除されてしまったデータや複数バージョンが存在するデータを取得したりするシステムが実現できる．また，Freenet [2] のように，新しいウェブコンテンツを作成して P2P 型システム上で流すことで，従来のクロール型検索エンジンの新着情報への対応の遅さが解消され，情報が削除されたときにも他のピアからそのコンテンツを入手できる．

ただし，従来のサーバ/クライアント型のシステムでは，Google のように検索キーワードに対してサーバが適切な検索結果を一定件数返信するため，P2P 型コンテンツ検索システムに比べると総トラフィック量および情報を見つける手間は小さい．一方，文献 1) のシステムを含む多くの P2P 型コンテンツ検索・共有システムでは，各コンテンツについて検索条件に合致するかどうかのみを判断しているため，キーワード指定によるコンテンツの検索を実行すると，検索結果が多くなり，キーワードへの関連度が高いコンテンツを適切に得ることは難しい．

以上の背景をふまえて，筆者らの研究グループではこれまで，P2P 型コンテンツ検索・共有システムにおいてコンテンツとキーワードの関係からスコアが求まる環境，たとえばウェブ検索においてキーワードを指定すると各コンテンツとの関連度が求まる環境を想定し，スコアが上位 k 個の検索結果を得る，いわゆる Top-k クエリのための効率的な問合せ処理手法を提案してきた[3]．クエリ発行ピアからのホップ数に応じて各ピアが返信するクエリ応答の数を抑制する Delayed Reduce-k Query（DR）手法を提案し，高い再現率を確保しながらクエリ応答によるトラフィックを大幅に減少させた．しかし，この手法をコンテンツ分布に偏りのある環境に適用すると，再現率が低下してしまうという問題があった．

そこで本研究では，DR 手法の問題点を解決し，コンテンツ分布に偏りがある環境においても精度の高い検索結果が得られる Top-k クエリ処理手法を提案する．提案手法を用いることで，トラフィックを増大させることなく再現率を向上させることができる．また，シミュレーション評価により提案手法の有用性を明らかにする．

以下，2 章で関連研究について述べ，3 章で提案手法について説明する．4 章では，シミュレーションによる性能評価を行い，最後に 5 章で本研究のまとめを行う．

2. 関 連 研 究

中央サーバを利用しないピュア P2P 型ネットワークのシステムは，大きく分けて，ネットワークのトポロジやコンテンツ配置が規定されている構造型検索トポロジを用いたものと，非構造型検索トポロジを用いたものに分けられる．

構造型検索トポロジを用いたシステムとしては CAN [4]，Chord [5]，Pastry [6]，Tapestry [7] があげられる．これらのシステムでは，コンテンツのファイル名やキーワードにハッシュ関数を適用することによりハッシュ値を算出し，このハッシュ値から分散ハッシュテーブルを利用してコンテンツ配置を決定する．コンテンツ検索時には，検索キーワードにハッシュ関数を適用し，ここで求まるハッシュ値からコンテンツが存在するピアを求められるため，コンテンツ検索時のネットワーク負荷が小さいという特徴がある．1 つのコンテンツに対してヒットするキーワードの数が多い全文検索システムにこれらのシステムを適用すると，多くのキーワードに対するハッシュ値を算出し，多くのピアにコンテンツまたはそのコンテンツを示すインデックス情報を配置する必要があるため，構造型検索トポロジを用いたシステムは全文検索システムには不向きである．

pSearch [8] では，CAN をベースとしてコンテンツ中の重要なキーワードを用いるアルゴリズムと，semantic vector を用いて同じようなキーワードを含むコンテンツをハッシュ空間上の近い位置に配置するアルゴリズムにより，効率的な全文検索を実現している．しかし，文章中に含まれるすべての単語を検索対象とするには膨大なインデックスが必要となり，ピアの参

加や退出が発生する環境においてはインデックスの維持が課題となる．

非構造化検索トポロジを用いたシステムとしては，Gnutella や Freenet [2] などがあげられる．これらのシステムでは，ネットワーク構成やコンテンツ配置に特別な制約がないため，ピアどうしで検索前に情報交換する必要がないという利点があり，実用化されている P2P システムのほとんどはこの形である．しかし，精度の高い検索結果を得るためには多くのピアにクエリを送信する必要があるため，構造化検索トポロジを用いたシステムよりもネットワーク負荷は増大する．

Top-k クエリを非構造化検索トポロジを用いた P2P ネットワーク上で実現しているシステムとして Kalnis らのシステム[9] があげられる．この手法では，検索クエリにクエリ応答の要求数 k を含めてフラッディングする．この検索クエリを受信した各ピアは検索クエリで指定した条件によりコンテンツを順位付けし，上位 k 個のコンテンツについてのクエリ応答を返信する．また，各ピアにおける負荷を抑制する必要がある場合には，クエリの転送を凍結したり，TTL を強制的に減少させたりする．しかし，この手法ではクエリ応答自体のサイズが非常に小さい環境を想定しており，各ピアが返信するクエリ応答はすべてクエリ発行ピアまで転送される．本研究ではクエリ応答に数百バイトのメタデータを含むことを想定しており，この手法を適用するとクエリ応答によるトラフィックが増大する．

また，同様に Balke らは 1 回のクエリ送信に対して 1 個の応答を受信し，Top-k 検索の結果を得る手法を提案している[10]．この手法では，Top-k 検索における 1 個の結果に対して 1 個のクエリが必要となるため，k が大きい場合にはクエリ遅延が大きくなるが，クエリ応答によるトラフィックを抑制できる点で優れている．

3. 提案手法

筆者らの研究グループではこれまで，P2P 型ネットワークにおいて非構造化検索トポロジを用いたコンテンツ検索システム（以降，Gnutella 型システム）を対象とした Top-k 検索処理手法として，Fixed-k query 手法，Reduce-k query 手法，Delayed Fixed-k query（DF）手法，および Delayed Reduce-k query（DR）手法を提案してきた[3]．

これらの手法では，図 1 のように検索クエリの送信およびクエリ応答の返信を行うが，効率的な Top-k 検索を実現するため，各ピアが返信するクエリ応答は，スコアが一定順位以内のものに制限する．Fixed-k query 手法および DF 手法では，各ピアにおいて上位 k 位以内のスコアを持つものに限ってクエリ応答を返信する．また，Reduce-k query 手法および DR 手法では，さらにクエリ応答のトラフィックを削減するため，クエリ発行ピアから離れたピアほど，クエリ応答返信数を小さくする．このクエリ応答返信数の決定方法を以下に説明する．クエリ発行ピアから i ホップ離れたピアにおけるクエリ応答返信数を k_i とする．各ピアは，クエリ転送時に自ピアにおけるクエリ応答返信数 k_i と，検索クエリのパラメータとして指定するクエリ応答返信減少数余裕率 r_m，自ピアの検索クエリ転送先となるピア数 n_{p_i} を利用してクエリ転送先ピアにおけるクエリ応答返信数 k_{i+1} を決定する．ただし，k_i の初期値である k_0 は，システムが設定することとした．

k_{i+1} の値は，まず仮の値 k'_{i+1} を

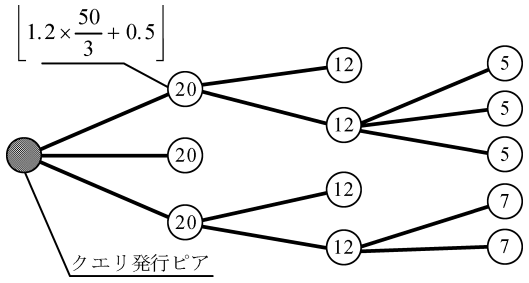
$$k'_{i+1} = \left\lfloor \frac{k_i r_m}{n_{p_i}} + 0.5 \right\rfloor \tag{1}$$

としたうえで，次式により決定する．

$$k_{i+1} = \begin{cases} k_i & \left(k_i \leq k'_{i+1}\right) \\ k'_{i+1} & \left(2 \leq k'_{i+1} < k_i\right) \\ 2 & \left(k'_{i+1} < 2\right) \end{cases} \tag{2}$$

$\lfloor\rfloor$ は，$\lfloor$ と $\rfloor$ で囲まれた値を超えない最大の整数を意味する記号であり，四捨五入とするために 0.5 を加算している．ここで，各隣接ピアから受信するクエリ応答のうち自ピアにおいて転送対象となるものの数は隣接ピアの数に反比例すると考えられる．その数は，仮に各隣接ピアから受信するクエリ応答のスコア分布が均等であるとすると，隣接ピアから受け取るクエリ応答のうちで実際に自ピアで転送するクエリの数は，自ピアの転送クエリ数を隣接ピア数で割ったもの（k_i/n_{p_i}）になる．しかし，隣接ピア数の不一致やコンテンツ分布の偏りを考慮すると，高い再現率を実現するためにはクエリ応答返信数に余裕を持たせる必要がある．したがって，この手法ではクエリ応答返信数減少余裕率 r_m という値を導入し，k_i/n_{p_i} に r_m をかけた値を各ピアのクエリ応答返信数としている．$k_0 = 50$，$r_m = 1.2$ の場合における k_i の計算例を**図 2** に示す．

また，Fixed-k query 手法および Reduce-k query 手法ではクエリ応答を受信した瞬間にスコアが返信すべき順位以内であればただちにクエリ応答を転送するが，DF 手法および DR 手法ではすべての隣接ピアからのクエリ応答受信を完了後にスコアが返信すべき順位以内であるクエリ応答を検索クエリ送信元ピアに返



- $k_0 = 50$，$r_m = 1.2$
- 円中の数字は当該ピアのクエリ応答返信数 k_i

図 2 DR 手法におけるクエリ応答返信数
Fig. 2 The number of query-replies on DR method.

信する．

しかし，Fixed-k query 手法および DF 手法では，クエリ到達範囲内のピアにおける上位 k 位以内の検索結果を確実に受信できる一方で，トラフィックが Reduce-k query 手法および DR 手法に比べて大きくなっている．また，Reduce-k query 手法および DR 手法では，トラフィックは Fixed-k query 手法および DF 手法に比べて小さいが，再現率が 100%とならない．特に，検索クエリに合致するコンテンツが一部のピアに偏っている環境では再現率が低下し，再現率を向上させるために r_m を大きくするとトラフィックが増大する．

この問題に対処するため，DR 手法および DF 手法を拡張することより，Delayed Reduce-k and Score Propagating query（DRSP）手法，ならびに Delayed Fixed-k and Score Propagating query（DFSP）手法を提案する．

3.1 Delayed Reduce-k and Score Propagating query（DRSP）手法

Delayed Reduce-k and Score Propagating query（DRSP）手法では，クエリが自ピアに到達するまでに通過したピアのコンテンツ情報を利用する．そのために，クエリ発行ピアは自ピアで発見したコンテンツのうち上位 k 個のスコアをスコア情報として送信する．また，スコア情報を受信した各ピアは，スコア情報を自ピアで発見したコンテンツのスコアを加えて上位 k 個のスコアとなるように更新し転送する．

各ピアは，DR 手法における算出方法と同じ方法で決定したクエリ応答返信数 k_i を用い，基本的に DR 手法と同様に上位 k_i 位以内のスコアを持つクエリ応答を返信する．しかし，スコア情報に含まれるスコアに比べて高いスコアを持つクエリ応答が多い場合，自ピアではスコアの高いクエリ応答を多く保持しており，クエリ発行ピアにおいて上位 k 位以内に入る可能性が高いと考えられる．そこで，スコア情報内クエリ応答スコア送信順位 k_p を定義し，スコア情報のうち k_p 位のスコア以上のスコアを持つクエリ応答は，自ピアにおいて k_i 位以内でない場合であっても返信する．

ただし，スコア情報とあわせるとスコアが k 位以内に入らないクエリ応答，およびクエリが自ピアに到達するまでに通過したピアがすでに返信したクエリ応答に含まれるコンテンツについては返信せず，トラフィックを削減する．

DRSP 手法の処理手順を**図 3** を用いて説明する．

(1) クエリの生成と送信

クエリ発行ピア（図 3 における P_0）が検索クエリを生成し，生成した検索クエリをすべての隣接ピア（図 3 における P_1，P_8）に送信する．このクエリには以下の情報を含める．

- クエリを一意に識別する ID（クエリ ID）
- コンテンツの検索条件
- クエリ応答要求数 k
- このクエリを受信したピアにおけるクエリ応答返信数 k_i
- クエリ応答送信数減少余裕率 r_m
- クエリ応答送信順位 k_p
- クエリの生存時間（TTL）

同時に，クエリ発行ピアは，自身が保持しているコンテンツを対象としたコンテンツ検索を行う．コンテンツ検索とは，保持しているコンテンツを対象として検索条件に合致するコンテンツを検索し，同時にその検索条件とコンテンツからスコアを算出することである．

(2) クエリの転送

検索クエリを受信したピアは，まず同じクエリ ID を持つクエリを過去に受信していないか検索し，受信したことがある場合（図 3 の P_{10}，P_6 において，それぞれ P_6，P_{10} から受信したクエリ）は循環クエリとして受信したクエリを破棄し，クエリ応答返信終了メッセージを返信して処理を終了する．

そうでない場合は，クエリの TTL を 1 つ減少させ，この TTL が 1 以上の場合には，クエリ応答送信数 k_i の値を更新したうえでクエリ送信元ピアを除くすべての隣接ピアにクエリを転送する．

また，同時に自ピアにおけるコンテンツ検索を行う．

(3) スコア情報メッセージの送信

クエリ発行ピアにおいて，(1) に示したコンテンツ検索処理が完了すると，見つかったコンテンツのスコアのうち上位 k 位以内のもののスコア，およびコンテンツを一意に識別するコンテンツ ID をスコア情報メッセージとしてクエリ送信先のピアに送信する．

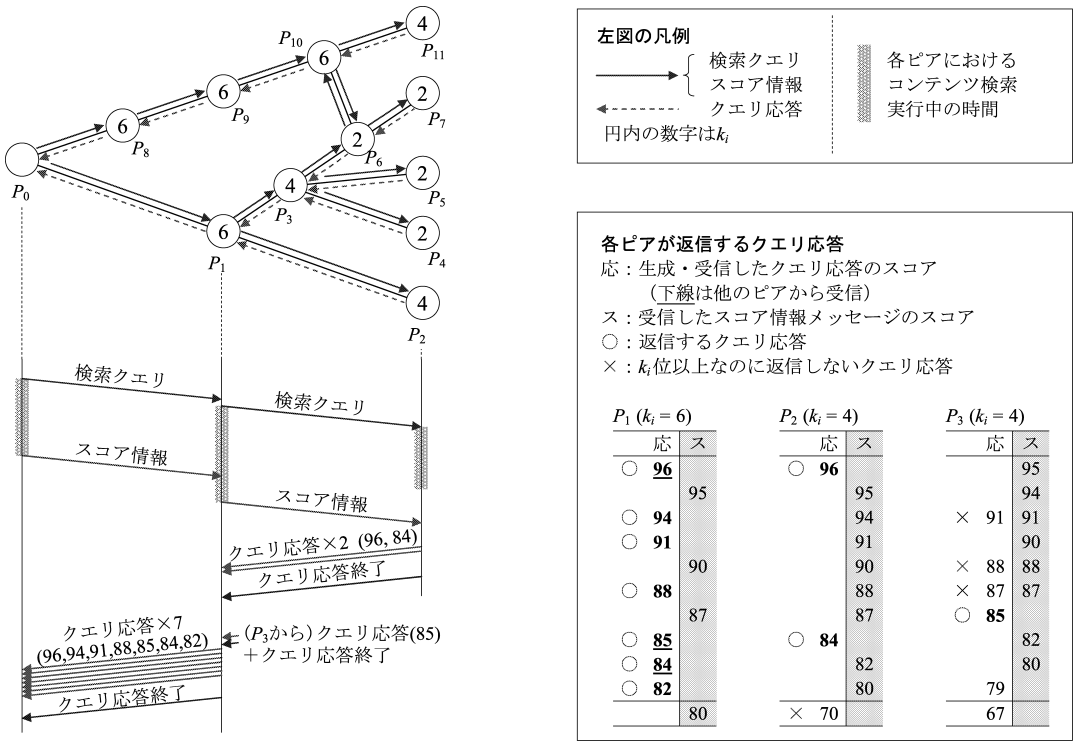


図 3 DRSP 手法における検索手順と各ピアが返信するクエリ応答の例
Fig. 3 Query processing and examples of query-replies which a peer sends on DRSP method.

(4) スコア情報メッセージの転送

クエリ発行ピア以外のピアでは，(3) のスコア情報メッセージを受信し，かつ (2) に示した自ピアにおけるコンテンツ検索が完了すると，スコア情報メッセージのスコアとコンテンツ ID を，自ピアでの検索結果とあわせて上位 k 位以内のものに更新し，クエリ転送先ピアに送信する．

(5) クエリ応答の返信

スコア情報を受信したがスコア情報を送信しなかったピア，およびクエリ送信先の全ピアからクエリ応答返信終了メッセージを受信したピアは，クエリ応答およびクエリ応答返信終了メッセージの返信を行う．

ここで，返信するクエリ応答の例を図 3 を用いて説明する．P_3 では，上位 4 個のクエリ応答を返信することとなっているが，スコアが 91，88，87 の各クエリ応答は，P_1 または P_0 が保持しているため，返信対象から除外する．P_2 では，スコアが 70 のクエリ応答は確かに上位 4 位以内に入っているが，スコア情報と合わせてみると，クエリ到達範囲内において上位 k（= 10）位以内になることがありえないため，返信対象から除外する．逆に，P_1 では，スコアが 82 のクエリ応答は k_i（= 6）位以内に入っていないが，スコア情報における k_p（= 4）位以内に入っているため，このクエリ応答は返信する．

3.2 Delayed Fixed-k and Score Propagating query（DFSP）手法

DRSP 手法においては，DR 手法に比べるとコンテンツ分布の偏りに強いが，理論的に再現率がつねに 100%になるとは限らないため，Delayed Fixed-k and Score Propagating query（DFSP）手法を提案する．DFSP 手法では，DRSP 手法のうち，各ピアにおける k_i および k_p を k と等しくすることにより，クエリ到達範囲内において上位 k 位以内のスコアを持つコンテンツについてのクエリ応答を確実に取得する．したがって，クエリ到達範囲内において再現率を 100%にすることが必要な場合は DFSP 手法を用いればよいことになる．

4. 性能評価

提案手法の有効性を明らかにするため，コンテンツ検索にかかる時間，再現率，およびコンテンツ検索に必要なトラフィック量について，シミュレータを用いて性能評価を行った．

4.1 シミュレーション環境

本稿では，P2P ネットワークを用いたウェブコンテンツ全文検索システムを想定し，シミュレーション環

表 1 シミュレーション評価におけるパラメータ
Table 1 Simulation parameters.

シミュレーション環境	
総ピア数 N_p	10,000
R	-0.4
$w_{\max}$	100
コンテンツの種類数	1,000,000
各ピアでの平均クエリ発生間隔	1000 sec.
通信速度	2 Mbps
ピア内コンテンツ検索にかかる時間	0.1 sec.
各メッセージのサイズ	
検索クエリ	140 B
クエリ応答	640 B
クエリ応答終了メッセージ	64 B
コンテンツ本体（平均値）	40 kB
検索条件	
TTL	5
クエリ応答要求数 k	30

（本文中で異なる値を示している場合，その値を優先する）

境を設定する．シミュレーションのパラメータを**表 1** に示す．パラメータは，多数のユーザがウェブコンテンツの共有システムを利用することを想定し，総ピア数 10,000 とした．また，各ピアはそれほど高機能なものではないと想定されるため，各ピアの最大リンク数は 100 であるとした．ここで，総ピア数を 100,000 や 500,000 に増加させたときも，クエリ到達端末数が大きく増えることはないため，結果に大きく影響しないことを予備実験により確認している．各メッセージのサイズに関しては，システムにおいてウェブコンテンツが検索されることを想定し，コンテンツのメタデータを含むクエリ応答サイズおよび実際のコンテンツ本体のサイズを決定した．

4.1.1 ネットワークのトポロジ

Gnutella における各ノードの隣接ノード数は，文献 11) の先行研究によりべき法則の性質に従うことが示されている．本稿におけるシミュレータでは，トポロジの生成にべき法則（PLRG，Power-Law Random Graph）を利用し，各ピアの隣接ピア数がべき法則に従うこととする．PLRG では，rank exponent R と，最大隣接ピア数 $w_{\max}$ という 2 つのパラメータを使用し，ネットワークの総ピア数を N_p とするとピア番号 j における隣接ピア数 d_j は次式で与えられる．

$$d_j = \lfloor w_{\max} \cdot j^R \rfloor \quad (1 \le j \le N_p) \tag{3}$$

4.1.2 コンテンツの配布

本研究におけるシミュレータでは，簡単のためコンテンツを 31 ビットの整数とし，この整数の中心値と範囲を検索条件として指定することにより検索を行う．P2P ネットワークにおけるコンテンツ分布は Zipf 分布に基づくことが知られており[12]，シミュレータも $\alpha = -0.9$ とした Zipf 分布に基づいてコンテンツを各ピアに配布する．人気順位とコンテンツ配布先のピア数の関係を**図 4** に示す．ただし，これは総ピア数 $N_p = 10{,}000$ の場合である．

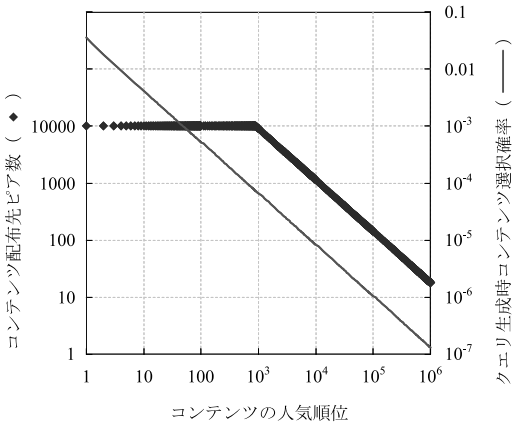


図 4 コンテンツ配布先ピア数とコンテンツ選択確率
Fig. 4 Number of peers vs. probability of contents selection.

さらに，各ピアが保持するコンテンツは，そのピア（ユーザ）の嗜好により偏りを持つと考えられるため，すべてのコンテンツを 100 のグループ（ジャンル）に分割し，各ピアは所属するグループを 2 個ランダムに選択したうえで，保持するコンテンツのうち 80%は，各ピアが所属するグループのコンテンツが占めることとした．残りの 20%はコンテンツ全体からランダムに取得し，またグループ n に属するコンテンツのうち 20%は，グループ $n+1$ にも属するとすることで，ユーザがジャンルにかかわらず蓄積するデータの存在およびコンテンツのジャンル間の重なりを表現した．

4.1.3 コンテンツの検索

クエリに含まれる検索条件は 31 ビットの整数の中心値 c_c と，範囲 r で構成することとした．c_c は，図 4 に示すコンテンツ選択確率に従って，ネットワーク中に存在するコンテンツ中から選択する．r は検索時に全コンテンツのうち検索条件にヒットするコンテンツの割合であるヒット率から求めることとした．このヒット率は，実際の環境においてはクエリごとに様々な値になると考えられるが，本研究ではヒット率の違いによる性能評価を行うため，各シミュレーション中で発生するすべてのクエリについて，同じヒット率とする．

クエリ応答におけるスコア s は，コンテンツである 31 ビット整数値 c および c_c，r から，次式により求めることとした．

$$s = \begin{cases} 2(r - |c - c_c|) + 1 & (c \geq c_c) \\ 2(r - |c - c_c|) + 2 & (c < c_c) \end{cases} \quad (4)$$

これにより，c が c_c に近いほど s は大きくなる．$s > 0$ の場合にコンテンツ c は検索クエリにヒットしたこととする．本研究におけるシミュレータでは，1 個のクエリに対しては，同じコンテンツでなければ同じスコアにならないこととしている．

また，コンテンツはクエリ応答と同様に目的のピアから P2P ネットワークを通じて順次ピア伝いに転送されることとしている．クエリ発行ピアは検索終了の 10 秒後に最低 1 個，最大で 10 個のコンテンツを取得する．

4.1.4 評価項目

本稿では，検索所要時間，再現率，および送信メッセージ量の 3 点について評価を行う．

検索所要時間は，クエリ発行ピアにおいてクエリを発行してから最後に上位 k 位以内に入るスコアを持つクエリ応答を受信するまでの時間とする．

再現率は，検索クエリを受信したピアすべてのコンテンツのうち上位 k 位以内のコンテンツに関するクエリ応答のうち，クエリ発行ピアで得られた割合を示す．

送信メッセージ量は，シミュレーション時間中に各ピアが送信したコンテンツ検索に関係するメッセージのデータ量の平均である．コンテンツ取得に関わるトラフィックは含まないこととする．

4.2 DRSP 手法における k_p およびクエリ応答返信数減少余裕率の影響

まず，予備的評価として，$k = 30$ の場合において DRSP 手法を適用する場合における k_p および r_m のパラメータの設定がクエリ応答返信数および再現率に与える影響を評価した．k_0 は 30 とし，r_m を 1 と 8 の間で変化させた．また，比較のため，k_0 が 30 の場合における DR 手法の場合についても示す．

DR 手法および DRSP 手法における r_m，再現率，および送信メッセージ量の関係を**図 5** に示す．DR 手法においては，r_m を大きくするほど再現率は高くなるが，メッセージ量は増大する．コンテンツ分布の偏りによる影響があるため，トラフィックと再現率の双方を向上させることは困難である．

一方，DRSP 手法においては，k_p が再現率および送信メッセージ量に大きな影響を与える．k_p を 2 以上とすることにより，再現率を 89%以上にできる．また，スコア情報を受信することにより，返信する必要のないクエリ応答を判別できるため，k_p が 1 の場合でも，DR 手法と同じ再現率を得る場合においてもトラフィックを削減することができる．

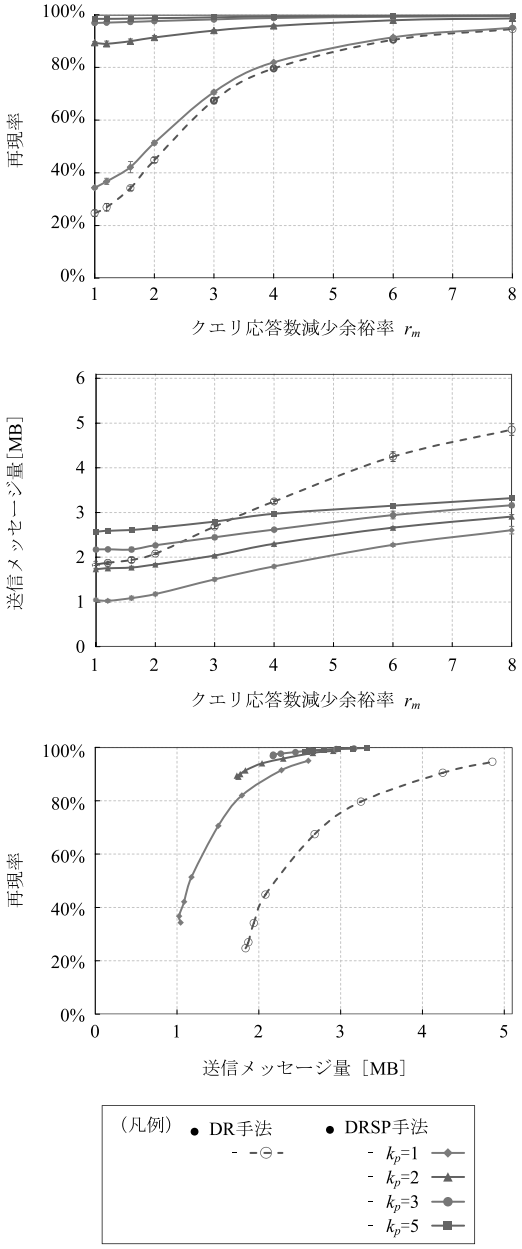


図 5 r_m の変化に対する再現率およびメッセージ量，およびメッセージ量の変化に対する再現率
Fig. 5 r_m vs. messages and recall, messages vs. recall.

また，DRSP 手法においては，k_p がいずれの値をとる場合においても r_m を大きくすることにより再現率は向上する．しかし，同時にメッセージ量も増大するため，r_m を大きくせずに k_p を大きくすることにより，同じ再現率が得られる場合においてもトラフィックを削減することができる．

4.3 ヒット率を変化させた場合の評価

ヒット率を 0.001〜10%の間で変化させた場合における所要時間，再現率，および送信メッセージ量について比較を行った．また，Balke らが提案している手法[10] を比較対象とする．ただし，提案手法と同じネットワークトポロジ上に適用し，インデックスを用いないものとする．この動作を簡単に説明する．

(1) クエリをフラッディングし，各ピアがクエリ送信先ピアから受信したものを含めてスコアが最も高い 1 個のクエリ応答のみを返信する．
(2) クエリ発行ピアでは，受信したクエリ応答のうち最もスコアの高いものを Top-k 検索結果として確定させる．
(3) 確定された検索結果を返信したピアに対して，次にスコアの高いクエリ応答を要求する．
(4) 確定していない検索結果のうち最もスコアの高いものを Top-k 検索結果として確定させる．
(5) Top-k 検索結果が k 個得られるまで，(3) および (4) の処理を繰り返す．

DR 手法では $k_0 = 30$，$r_m = 6$ とする．DRSP 手法では $k_0 = 30$，$r_m = 1.2$ とし，k_p が 3 の場合について示した．

以上の結果を**図 6** に示す．

まず，再現率は，Balke らの手法，DF 手法，DFSP 手法でそれぞれほぼ 100%となっているが，ネットワーク帯域を超えたメッセージが送受信され，メッセージが届かなくなる場合があるため一部で再現率が 99.5%程度となっている．DRSP 手法では 97%程度，DR 手法では 90%前後である．

所要時間は，Balke らの手法における手法，および DF 手法で他の手法と比べて約 11 倍，約 6 倍と長くなっている．これら以外の手法では，DFSP 手法で DR 手法および DRSP 手法に比べて若干長くなっているが，本研究における評価環境では問題になるほどの差ではない．

送信メッセージ量は，DF 手法では，Balke らの手法の約 9 倍と大きくなっている．また，DR 手法でも Balke らの手法の 2.6 倍である．一方，DRSP 手法では，$k_p = 3$ の場合で 97%の再現率を確保し，所要時間も大幅に短縮しながら送信メッセージ量を Balke らの手法の場合より 12%削減している．

この点から，DRSP 手法ではクエリ到達範囲内において上位 k 位以内のスコアとなるコンテンツについてのクエリ応答を確実にすべて取得することはできないが，比較的高い再現率を少ないトラフィックおよび短い所要時間で実現できるため，自ピアで取得できないクエリ応答がある程度あったとしても問題のない環境では有用であるといえる．一方，DFSP 手法は Balke らの手法に比べると，ヒット率が高い場合において送信メッセージ量が 2 倍程度となっているが，所要時間が 12%に削減される．さらに，ヒット率が低い場合には Balke らの手法よりも送信メッセージ量を削減することができる．このことから，高速に検索したい場合には DFSP 手法を利用すると効率的である．

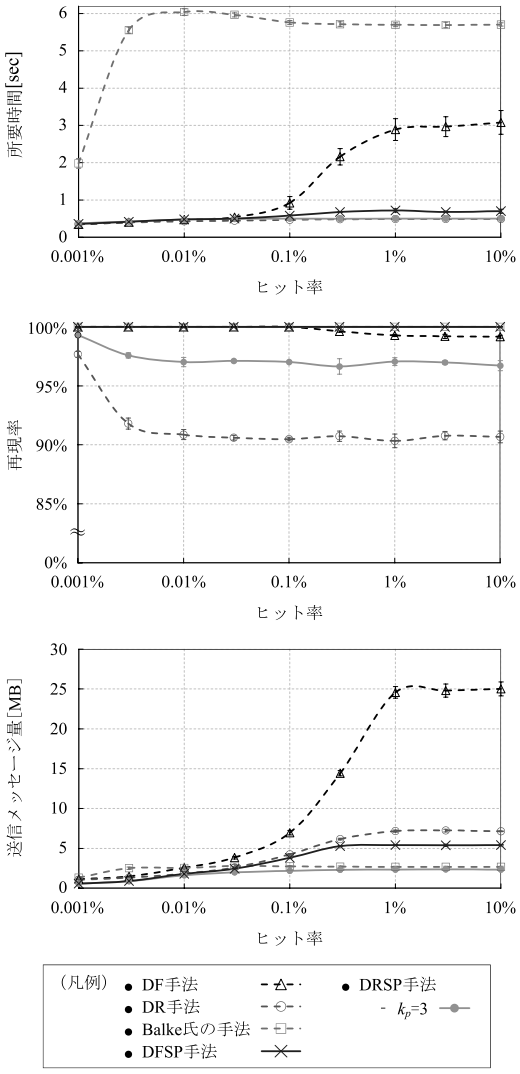


図 6 ヒット率の変化に対する所要時間，再現率，送信メッセージ量
Fig. 6 Hit-rate vs. turn-around time, recall, and message.

5. おわりに

本研究では，P2P ネットワーク上においてコンテンツ分布の偏りを考慮したうえで Top-k クエリを効率的に行う手法を提案した．また，シミュレーションにより提案方式の性能評価を行った．その結果から，

DRSP 手法を利用することにより，過去の提案手法である DR 手法に比べて再現率の向上およびトラフィックの削減を実現した．また，DFSP 手法を利用することにより，再現率を 100%としたうえで，DF 手法に比べてトラフィックおよび所要時間の削減を実現した．

今後は，Gnutella 型の P2P ネットワークに限定せず，より効率的に Top-k クエリを実現する手法を提案する．また，ネットワークトポロジの構成方法やコンテンツの複製配置，検索結果のキャッシュなどの手法を提案手法にあわせて適用した場合についての評価を行う予定である．

謝辞 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」，および基盤研究（A）(17200006）の研究助成によるものである．ここに記して謝意を表す．

参 考 文 献

1) 中村聡史，塚本昌彦，西尾章治郎：コンテンツ流通制御を考慮したウェブコンテンツ共有システムの実現，情報処理学会論文誌，Vol.45, No.1, pp.74–83 (2004).
2) Larke, I., Sandberg, O., Wiley, B. and Hong, T.: Freenet: A distributed anonymous information storage and retrieval system, *ICSI Workshop on Design Issues in Anonymity and Unobservability*, pp.46–66 (2000).
3) Matsunami, H., Terada, T. and Nishio, S.: A query processing mechanism for top-k query in p2p networks, *The International Special Workshop on Databased For Next Generation Researchers In Memoriam Prof. Yahiko Kambayashi* (*SWOD 2005*), pp.84–87 (2005).
4) Ratnasamy, S., Francis, P., Handley, M., Karp, R. and Shenker, S.: A scalable content-addressable network, *2001 conference on Applications, technologies, architectures and protocols for computer communications*, pp.161–172 (2001).
5) Stoica, I., Morris, R., Karger, D., Kaashoek, M.F. and Balakrishnan, H.: Chord: A scalable peer-to-peer lookup service for internet application, *SIGCOMM'01*, pp.149–160 (2001).
6) Rowstron, A. and Druschel, P.: Pastry: Scalable, decentralized object location, and routing for large-scale peer-to-peer systems, *Middleware 2001*, pp.329–350 (2001).
7) Zhao, B., Kubiatowicz, J. and Joseph, A.: Tapestry: An infrastructure for wide-area fault-tolerant location and routing, Technical report, U.C. Berkeley Technical Report USB//CSD-01-1141 (2001).
8) Tang, C., Xu, Z. and Mahalingam, M.: pSearch: Information retrieval in structured overlays, *ACM SIGCOMM Computer Communications Review*, Vol.33, pp.89–94 (2003).
9) Kalnis, P., Ng, W., Ooi, B. and Tan, K.-L.: Answering similarity queries in peer-to-peer networks, *International World Wide Web Conference*, pp.482–483 (2004).
10) Balke, W.-T., Nejdl, W., Siberski, W. and Thaden, U.: Progressive distributed top-k retrieval in peer-to-peer networks, *the 21st International Conference on Data Engineering* (*ICDE 2005*), pp.174–185 (2005).
11) Zeinalipour-Yatzi, D. and Folias, T.: A quantitative analysis of the gnutella network traffic, Technical report, Dept. of Computer Science, University of California (2002).
12) 亀井 聡，森 達哉，大井恵太，木村卓巳：P2P ファイル共有ネットワークの現状，第 14 回インターネット技術第 163 委員会研究会 (2003). http://www.itrc.net/report/meet14/NGN/kamei.pdf

(平成 19 年 2 月 12 日受付)
(平成 19 年 6 月 27 日採録)

(担当編集委員 都司 達夫)

寺田 努（正会員）

1997 年大阪大学工学部情報システム工学科卒業．1999 年同大学院工学研究科博士前期課程修了．2000 年同大学院工学研究科博士後期課程退学．同年より大阪大学サイバーメディアセンター助手．2005 年より同講師．現在に至る．2002 年より同大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻助手，2005 年より同講師を併任．2004 年より特定非営利活動法人ウェアラブルコンピュータ研究開発機構理事，2005 年より同機構事務局長を兼務．工学博士．アクティブデータベース，ウェアラブルコンピューティング，ユビキタスコンピューティングの研究に従事．IEEE，電子情報通信学会，日本データベース学会の各会員．

松波　秀和（正会員）

2004 年大阪大学工学部電子情報エネルギー工学科卒業．2006 年同大学院情報科学研究科博士前期課程修了．在学中は P2P ネットワークの研究に従事．現在，デジタルプロセス株式会社所属．

西尾章治郎（正会員）

1975 年京都大学工学部数理工学科卒業．1980 年同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情報システム工学専攻教授を経て，2002 年より同大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻教授となり，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．この間，カナダ・ウォータールー大学，ビクトリア大学客員．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．本会理事を歴任．電子情報通信学会フェローを含め，ACM，IEEE 等，8 学会の会員．