

IPFSにおける経路キャッシュとピニングを用いた経路探索遅延の低減

福岡 佳奈[†] 上山 憲昭[†]

† 立命館大学 情報理工学部

〒 567-8570 大阪府茨木市岩倉町 2-150

E-mail: jis0687ff@ed.ritsumei.ac.jp, ††kamiaki@fc.ritsumei.ac.jp

あらまし 近年、中央集権的なサーバに依存しない分散型 Web の基盤技術として、IPFS (InterPlanetary File System) が注目を集めている。IPFS は、P2P ネットワーク上の各ピアが自律的に通信を行い、コンテンツ指向のアドレッシングによってデータを効率的に取得・共有するシステムであり、従来の HTTP に代わる耐障害性や検閲耐性に優れたインフラとして期待されている。しかし、IPFS におけるコンテンツ探索は、Kademlia プロトコルに基づく DHT (Distributed Hash Table) を用いた反復的な問い合わせに依存しているため、目的のコンテンツを保持するピアを発見するまでに大きな遅延が発生するという課題がある。具体的には、ネットワーク規模が拡大するにつれて探索に必要なホップ数が $O(\log N)$ で増加することに加え、ノードの頻繁な参加・離脱により探索途中でタイムアウトが発生することが、探索遅延を増大させる要因となっている。そこで本稿では、DHT 探索遅延の低減を目的とし、Provider Record (PR) の「経路キャッシュ機能」と専用ピアによる「ピニング機能」を組み合わせた手法を提案する。本手法は、高人気コンテンツには経路キャッシュによる早期発見を、準人気コンテンツには常時オンラインの専用ピアを用いたピニングを適用し、ピア離脱による再探索を防ぐ。シミュレーションの結果、平均探索ホップ数が低減し、特に準人気コンテンツで大幅な改善が見られる。また、高チャーン環境下でも両機能が補完し合い、探索遅延の低減に有效であることを明らかにする。

キーワード IPFS, キャッシュ, ピニング

Reducing Route Lookup Latency Using Route Caching and Pinning in IPFS

Kana FUKUOKA[†] and Noriaki KAMIYAMA[†]

† College of Information Science and Engineering, Ritsumeikan University

2-150, Iwakuracho, Ibaraki, Osaka 525-8570

E-mail: jis0687ff@ed.ritsumei.ac.jp, ††kamiaki@fc.ritsumei.ac.jp

Abstract In recent years, IPFS (InterPlanetary File System) has gained attention as a foundational technology for a decentralized web that does not rely on centralized servers. IPFS is a system where peers on a P2P network communicate autonomously, efficiently acquiring and sharing data through content-oriented addressing. It is anticipated to serve as an infrastructure superior to traditional HTTP in terms of fault tolerance and censorship resistance. However, content discovery in IPFS relies on iterative queries using a Distributed Hash Table (DHT) based on the Kademlia protocol. This approach suffers from significant delays before locating peers holding the desired content. Specifically, as the network scales, the number of hops required for discovery increases at a rate of $O(\log N)$. Additionally, frequent node joins and leaves cause timeouts during discovery, further exacerbating the delay. Therefore, this paper proposes a method combining “path caching feature” of Provider Record (PR) with “pinning functionality” using dedicated peers to reduce DHT discovery delays. This approach applies path caching for early discovery of highly popular content and pinning using always-online dedicated peers for moderately popular content, preventing re-searches due to peer departures. Simulation results show a reduction in the average number of search hops, with significant improvement observed particularly for moderately popular content. Furthermore, it was demonstrated that both functions complement each other effectively to reduce search latency even in high-churn environments.

Key words IPFS, Caching, Pinning

1. はじめに

近年、コンテンツ数の増加に伴うサーバの障害や検閲などの課題を抱えている HTTP (Hypertext Transfer Protocol) に対して、コンテンツを分散して保存や配布を行う分散ネットワークが注目されている。特に、P2P ネットワーク上で完全自律分散でコンテンツを保存するシステムである IPFS について着目されている [1]。IPFS では、Kademlia プロトコルに基づく DHT を使用することで、どのピアがコンテンツを保持しているかの情報である Provider Record (PR) を探索しコンテンツを取得する。しかし、この DHT による探索プロセスは、IPFS の実用化において大きな障壁となっている。中央集権サーバへの問い合わせと比較し、DHT を用いた探索は、ノードは論理空間上の距離計算を行いながら、複数のピアを経由して目的のデータを持つピアを探索するため、ネットワークのノード数 N に対して $O(\log N)$ のホップ数を要する [2]。特に、地理的に分散したノード間を往復する通信 (RTT) が積み重なることで、コンテンツを見つけるまでの探索時間が増大する [3]。よって、IPFS におけるコンテンツ探索は、ネットワーク規模が拡大することで問い合わせ回数は増加し探索時間が増大するという課題がある [4]。

IPFS のコンテンツ探索では、目的の PR を発見するまで、DHT のアルゴリズムに基づきピアへの問い合わせを反復的に行う必要がある。しかし、この仕組みには大きく 2 つの課題が存在する。第一に、ネットワーク規模が拡大するにつれて、探索で経由すべきピア数が増加し、探索完了までの所要時間が増大することである。第二に、IPFS に参加するピアの接続状態が動的に変化することである。探索途中で問い合わせ先のピアが離脱したりオフラインになったりしている場合、タイムアウトが発生し、これが探索遅延をさらに悪化させる主要因となる。

そこで本稿では、DHT 探索における遅延時間の短縮を目的とし、探索経路上のピアによる PR の経路キャッシュと、特定のピアによる PR のピニングを組み合わせた方式を提案する。従来の IPFS におけるキャッシュ機構では、ガベージコレクション (GC: Garbage Collection) によってコンテンツが削除されると、再度ゼロから探索を行う必要があり、遅延が再発するという問題があった。これに対し、本提案方式では、経路キャッシュによってピアへの問い合わせ回数を削減しつつ、ピニングによって PR の消失を防ぐことで、探索時間を大幅に短縮することを目指す。本稿では、計算機シミュレーションを用いて提案方式の有効性を評価し、従来手法と比較した際の探索時間の短縮効果およびキャッシュヒット率の向上について論じる。

2. 関連研究

2.1 DHT 経路上のキャッシュ

DHT はルックアップ遅延が $O(\log N)$ と高くなっているが、この問題を解決するためにパスキャッシングが用いられる。しかし、一般的なパスキャッシングの効果は限定的であり、既存研究によって平均ホップ数はほとんど短縮できないと示されていた。そこで、Marc らは、DHT の一種である Chord で同一の CID に対する探索経路が共通のノードを通るという経路収束に着目した [5]。探索における経路通過確率を求め、確率が

閾値を超えた経路収束点であるピアにキャッシュを配置する PPR (Proportional Proactive Replication) を提案した。評価としては、経路短縮の効果は一般的なパスキャッシングとのパフォーマンスは同等の効果を示し、キャッシュ数に関しては一般的なパスキャッシングと比較して 1/5 に減少させた。また、経路収束点が存在しないランダム DHT である Symphony を、名前空間を複数の仮想ドメインに分割し各ドメインに局所マネージャを配置することでどの経路でもマネージャを通過する経路収束点を人工的に保証した Symphony++ に構造を変化させた。これらを比較すると、ルーティング性能はほぼ同等でありながら、Symphony++ の方が圧倒的に少ないレプリカ数で同等のキャッシュヒット率を実現した。

2.2 IPFS の PUT 操作における遅延時間の削減

IPFS は、Kademlia ベースの DHT によってコンテンツの保存や検索を行っている。これらの操作の課題として、コンテンツの検索を行う GET 操作は高速であるが、コンテンツを保存する PUT 操作は遅い。PUT 操作は、CID に最も XOR 距離が近い PID を持つピアを 20 個発見し、そのピアに PR の保存が行われる。しかし、このピアを発見する過程においてオフラインなどの到達不能なピアが存在することによって、コンテンツ保存を行われるピアが発見されているのにもかかわらず問い合わせを終了することができないことが原因として挙げられる。そこで、Dennis らは Optimistic Provide を提案した [6]。Optimistic Provide は、動的ネットワークサイズを推定することによって、ピアとの距離に関する閾値を設定しその距離以下のピアには最も距離が近いことが決定する前に楽観的にコンテンツの保存を開始する手法である。これを導入することによって、PUT 操作の課題を解決し PUT 操作の速度と効率を向上させた。また、Fotios らは実環境における Optimistic Provide の評価を行っている [7]。

2.3 Kademlia の物理的距離問題の改善

DHT の一種である Kademlia は、XOR 空間にノードが配置されているが、論理的トポロジと物理的トポロジは異なっている。この課題に着目し、物理的に近いノードを論理空間でも近づけることを目的としている [8], [9]。手法として、同一のネットワーク番号を持つノードは近接しているということを利用し、ノードの IP アドレスのネットワーク番号をノード ID の prefix として埋め込むノード構造の変更を行うことで物理空間で近いノードを論理空間でも近づけた。さらに、Kademlia を改良し中央サーバの役割を担うウルトラノードの選定を行う。ウルトラノードは、LAN 内のノードのノード ID や IP アドレス、ポート番号を保持し、LAN 内の問い合わせを受けたノードのリクエストを受けつける。自身のルーティングテーブルに目的ノードの情報を確認することで探索に要するホップ数を減少させるという手法を理論的に提案した。

3. 提案方式

本節では、経路キャッシングと経路情報のピニングから構成される提案方式について述べる。

3.1 提案方式の概要

IPFS の DHT 探索において、繰り返し行われる反復的探索の反復回数を減少させるために、探索経路上のピアに PR の

キャッシュを配置し、さらに人気コンテンツに関しては PR を永続的に保持するピニング専用ノードを配置することが有効的だと考えられる。その結果、探索時間の削減とキャッシュヒット率の向上の両方を目指す。

3.2 経路キャッシュ

経路キャッシュは、ユーザからのリクエストを受けて探索によって発見された CID の PR に対して行われる。リクエストを受けた CID に対して探索を行い、その CID に対しての PR を発見すると、探索時に通過したすべてのピアに PR をキャッシュする。そして、同一の CID に対してリクエストが来た場合、探索途中にその CID の PR のキャッシュを保持しているピアを通過したとき、そのキャッシュを利用してそのピア以降の探索経路を省略して PR を取得しコンテンツを保持するピアに到達する。以下に、提案する経路キャッシュ法の処理の流れをまとめ、ステップ (1)～(3) について図 1 に例示する。

- (1) ユーザの CID リクエストに従い、DHT 探索を行う。
- (2) リクエストユーザが DHT 探索の際に、同一の CID のリクエストの探索時間短縮のために、通過したピアの PID, IP アドレスを保持する。
- (3) リクエストユーザは、探索によって PR を獲得した後、探索経路上の通過ピアに対してその PR を通知し、各ピアのキャッシュに格納させる。
- (4) 同一の CID に対して再びリクエストがあった場合、探索の際にピアに PR を問い合わせを行うと同時にキャッシュの有無を確認する。
- (5) キャッシュが存在すればキャッシュから PR を取得し、キャッシュが存在しなければ通常と同様に探索を続ける。

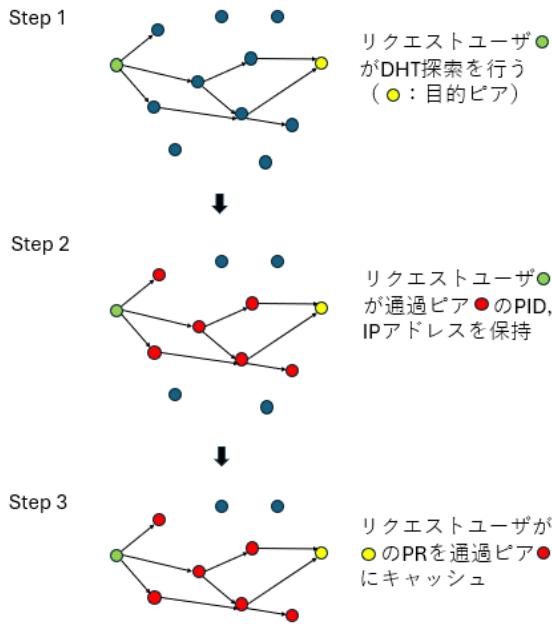


図 1 経路キャッシュ手法

3.3 ピニング

3.3.1 ピニング専用ピアの導入

従来の IPFS におけるピニング機能は、コンテンツデータそのものを永続的に保持するために用いられる。これに対し、本提案方式ではこの機能を応用し、コンテンツの所在情報である PR を永続的に保持する仕組みとして導入する。具体的には、ネットワーク内にピニング専用ピアを作成し、XOR 空間上にランダムに配置する。通常のノードは頻繁に参加や離脱を繰り返すが、このピニング専用ピアは常にオンライン状態を維持し、ユーザからのリクエストを常時受け付けるものと定義する。これにより、探索リクエストがこのピアに到達した時点で、確実にそのピアが保持している PR が返答されることを保証する。

3.3.2 人気度に基づくピニング対象の選定

限られたリソースを有効活用するため、すべての CID に対して一律にピニングを行うのではなく、コンテンツの人気度（リクエスト頻度）に応じた選別を行う。なお、各コンテンツの人気度については、本方式の運用開始前に一定期間の事前探索を行い、そのアクセス頻度の統計に基づいてあらかじめ決定しているものとする。

この人気度の統計に基づきコンテンツを以下の 2 つの層に分類し、戦略的にピニングを適用する。ここで、上位ランクの閾値を T と定義する。

(1) **第 1 層（人気度上位 1 位～ T 位）**：リクエスト頻度が極めて高く、前節で述べた経路キャッシュによってネットワーク上の多数のピアに PR が拡散されている可能性が高い。そのため、本階層のコンテンツに対してはピニングを行わずとも短い探索時間で発見できるため、ピニングの対象外とする。

(2) **第 2 層（人気度 T 位以降）**：一定のリクエスト需要があるものの、上位コンテンツほど頻繁ではないため、経路キャッシュが削除されやすい。経路キャッシュの効果は薄いが、無視できない需要がある層（第 2 層）をピニングのターゲットとする。

4. 性能評価

4.1 評価条件

本節では、提案方式の有効性を検証するために、計算機シミュレーションを用いた性能評価を行う。シミュレーションに用いる主なパラメタを表 1 に示す。キャッシュの置換アルゴリズムには、キャッシュ内のデータ中で最終参照時刻が最も古いものから順に破棄する LRU (Least Recently Used) 方式を用いる。また、P2P ネットワークの動的な性質を再現するため、探索リクエストが 100 回行われるごとに、各ノードのオンライン・オフライン状態を確率的に更新する処理を適用した。具体的には、ピニング専用ピアを除く一般ピアを対象に、一様乱数を用いて状態変更の判定を行った。状態変更の対象として選択されたピアは、設定されたオフライン確率に基づき、新たな状態（オンラインまたはオフライン）へと遷移する。

ただし、ピニング専用ピア数は、総ピア数には含まれない。提案方式の優位性を明らかにするため、以下の 2 つの方式と比較する。

- **従来の IPFS:** キャッシュおよびピニングを行わない標準的な IPFS

表 1 評価に用いたパラメタ

定義	値
総ピア数	10,000
総 CID 数	5,000
総リクエスト数	5,000
経路キャッシュ容量	20
ピニング専用ピア数	1,000
1 ピアあたりのピニング容量	20
オフライン率	50%
第 1 層閾値	5

- **キャッシュ適用 IPFS:** 経路キャッシュのみを導入し, ピニングは行わない IPFS

これらと, 経路キャッシュおよびピニングの両方を導入した提案方式の計 3 手法について, 10,000 回のリクエストを生成し, 平均ホップ数およびキャッシュヒット率の観点から比較評価を行う.

4.2 コンテンツの要求頻度分布とピニング数分布

コンテンツの人気度分布として, 総コンテンツ数 5,000 に対し, 偏りパラメタ $\theta = 0.8$ の Zipf 則を用いる.

図 2 に上位 50 個のコンテンツに対する要求数を示すが, 評価では第 1 層コンテンツの閾値を 5 に設定するため, 赤色で示す上位 5 つのコンテンツが第 1 層となる. また提案方式によって, 各 CID に対して割り振られたピニング数の分布を図 3 に示す. 人気順位 6 番目以降のコンテンツのみがピニング対象となるため, 上位 5 つのコンテンツのピニング数は 0 となる.

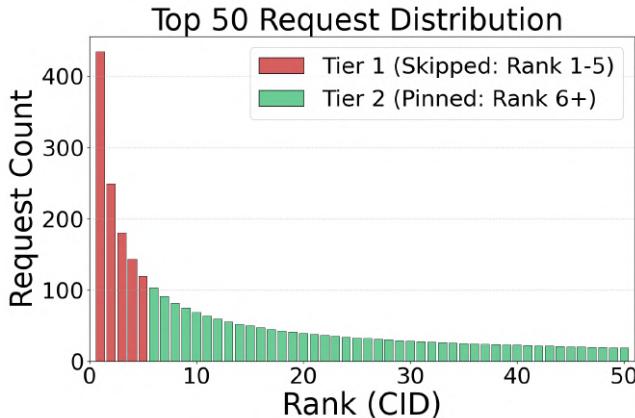
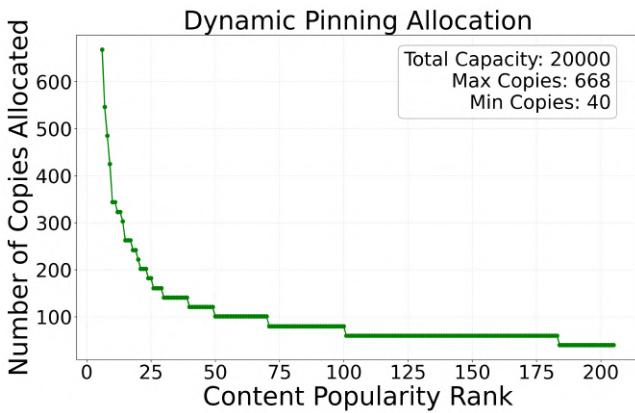
図 2 リクエスト頻度分布 ($T=5$)

図 3 人気度に基づいたそれぞれの CID に対するピニング数

4.3 平均ホップ長

人気上位 200 個の各 CID の平均ホップ長を, CID の人気順位に対して, 図 4 に示す.

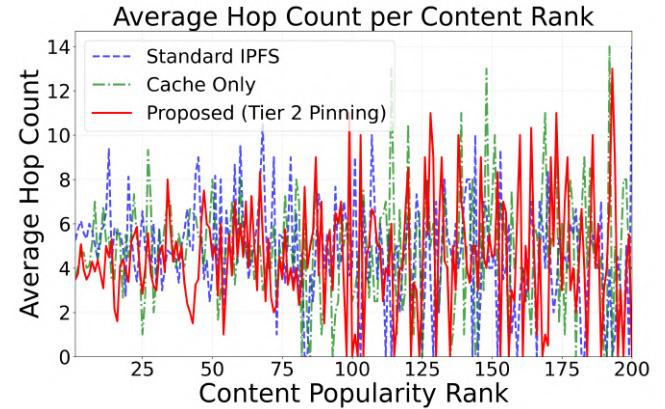


図 4 リクエストの人気度をピニング数に反映させた場合の平均ホップ長

表 2, 表 3, 表 4 に, 各手法における, 全コンテンツ, 人気上位 1 位のコンテンツ, 第 2 層のコンテンツ, の平均ホップ数を各々まとめると.

表 2 全コンテンツの平均ホップ長の比較

従来手法	キャッシュのみ	ピニングとキャッシュ
5.23	4.99	4.75

表 3 人気度第 1 位の平均ホップ長の比較

従来手法	キャッシュのみ	ピニングとキャッシュ
4.94	3.43	3.27

表 4 第 2 層コンテンツの平均ホップ長の比較

従来手法	キャッシュのみ	ピニングとキャッシュ
5.49	4.85	4.22

全体の平均ホップ数は, 従来手法の 5.23 に対し, 提案手法では 4.75 となり, 約 0.48 ホップの短縮が確認された. 特に, 本提案において重点的に対策を行った第 2 層のコンテンツに着目すると, 従来手法では平均 5.49 ホップを要していたのに対し, 提案手法では 4.22 ホップまで短縮された. これは, 第 2 層コンテンツに対してピニング専用ピアによる PR の永続保持が行われたことで, 多数のピアを経由する探索に陥る前に, ピニングピアによって解決されたためであると考えられる.

一方, 第 1 層に関しては, 提案手法においてもピニングを行わず経路キャッシュのみを利用するが, 人気度 1 位のコンテンツの平均ホップ数は 3.27 となった. これは, リクエスト頻度が極めて高いため, ネットワーク内の多数のノードに経路キャッシュが拡散し, 近隣ノードで早期にヒットしたためである. 以上の結果から, 提案手法はコンテンツの人気度に応じた適切なキャッシュとピニングの使い分けにより, ネットワーク全体の探索ホップ数を効果的に削減できることが確認できる.

4.4 キャッシュヒット率

図5に、3つの各方式の各コンテンツのキャッシュヒット率をコンテンツの人気順位に対してプロットする。ただし提案方式においては、経路上のピアのキャッシュか、ピニングのいづれかでヒットした合計のヒット率を示している。また図6に、キャッシュ適用IPFSのピアキャッシュヒット率と、提案方式において、ピアのキャッシュでのヒット率と、ピニングでのヒット率を各々、コンテンツ人気順位に対してプロットする。

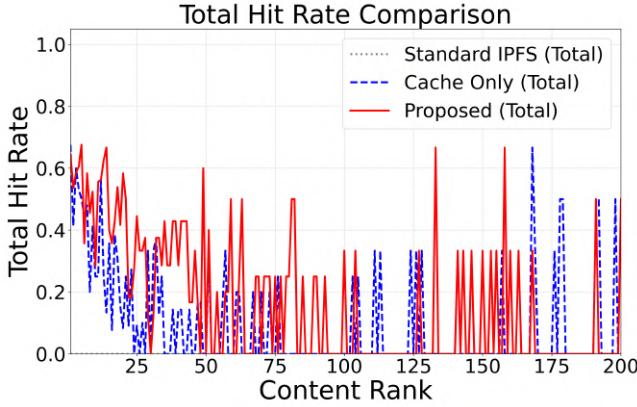


図5 合計キャッシュヒット率の比較

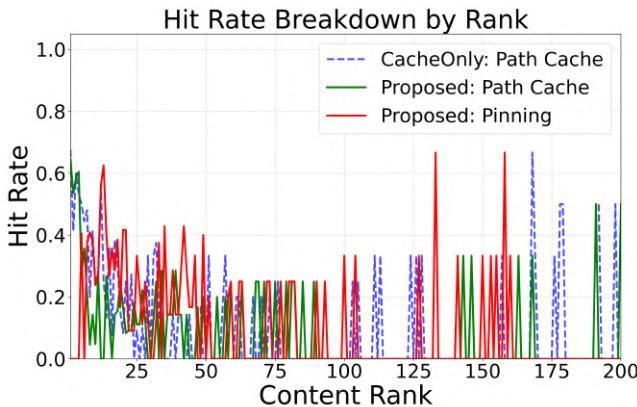


図6 経路キャッシュとピニングのキャッシュヒット率の比較

図5に示す通り、従来手法はキャッシュ機構を持たないため、ヒット率は全ランクにおいて0.0である。経路キャッシュのみの手法は、人気度が1~5の超人気コンテンツに対しては高いヒット率を示しているが、人気度20以降の第2層ではヒット率が急激に低下することが確認できる。これは、本実験環境がオフライン率50%という高Churn環境であるため、キャッシュを保持している一般ピアが頻繁にオフラインとなり、キャッシュが利用不能になるためである。

これに対し提案手法は、超人気コンテンツ領域では経路キャッシュのみと同等の高いヒット率を維持しつつ、準人気コンテンツ領域においても安定して高いヒット率を維持している。特に、経路キャッシュのみの手法でヒット率がほぼ0となる人気度100以降のコンテンツに対しても、提案手法ではピニングによる高いヒット率を示しており、ピニングの効果が明確に表れている。

図6に示す内訳グラフより、提案手法におけるキャッシュとピニングの役割分担が確認できる。

- **Tier 1 (Rank 1-5):** 緑線(Path Cache)が支配的であり、赤線(Pinning)は0である。これは設計通り、人気コンテンツをピアのキャッシュのみで処理できていることを示す。

- **Tier 2 (Rank 6以降):** 人気ランクが下がるにつれて緑線(Path Cache)の効果が減衰する一方で、赤線(Pinning)が立ち上がり、ヒット率を補完している。

特に、オフライン率が高い環境下において、経路キャッシュ(緑線)が不安定になる場合でも、ピニング(赤線)が安定して機能していることが確認できる。これは、ピニング先として常にオンラインの専用ノードを選定した設計が、探索の可用性向上に貢献していることを示している。

5. まとめ

IPFSのDHT探索では、IPFSに参加するピア数が増加するほど探索で行われる反復回数が多くなり、PRを保持するピアを発見するのに要する時間が増加するという問題がある。そこで本稿では、探索経路上のピアへのPRのキャッシュと、PRを永続的に保持するピニングを行う手法を提案した。

経路キャッシュでは、DHT探索によって得られたPRを経路上のピアにキャッシュすることで、後続のリクエストがキャッシュ保持ピアでヒットするよう促し、PR発見までの探索ホップ数および通信遅延を削減した。また、ピニングにおいては、常にオンラインである専用ピアを配置し、経路キャッシュの効果が薄くなる準人気コンテンツのPRを重点的に保持させる手法を提案した。これにより、キャッシュが削除されやすい中程度の人気度を持つコンテンツに対しても、確実なPR提供を可能とした。

計算機シミュレーションによる性能評価の結果、提案方式は従来方式と比較して、平均探索時間を短縮し、キャッシュヒット率が向上することを確認した。特に、アクセス頻度が極めて高いコンテンツには経路キャッシュが、中程度の人気度を持つコンテンツにはピニングが相互補完的に機能することで、ネットワーク全体のリクエスト処理効率が向上することを示した。以上の結果から、本提案方式は大規模化するIPFSネットワークにおいて、コンテンツ探索の高速化に寄与する有効な手法であると示された。今後の研究においては、経路キャッシュとピニングの導入におけるネットワーク負荷などを考慮する予定である。

謝辞 本研究はJSPS科研費(25K03113, 23K28078)の助成を受けたものである。ここに記して謝意を表す。

文 献

- [1] Juan Benet, IPFS - Content Addressed, Versioned, P2P File System (DRAFT 3), arXiv:1407.3561v1 [cs.NI], 2014
- [2] Ruizhe Shi, Ruizhi Cheng, Bo Han, Yue Cheng, Songqing Chen, A Closer Look into IPFS: Accessibility, Content, and Performance, Proceedings of the ACM on Measurement and Analysis of Computing Systems - 2024
- [3] Barbara Guidi, Andrea Michienzi, Laura Ricci, Data Persistence in Decentralized Social Applications: the IPFS approach, 2021 IEEE 18th Annual Consumer Communications and Networking Conference (CCNC)
- [4] Nawras Khudhur, Satoshi Fujita, Siva: The IPFS Search Engine, 2019 Seventh International Symposium on Computing and Networking (CANDAR)
- [5] Marc Sánchez-Artigas, Pedro García-López, Antonio G. Skarmeta,

- On the Relationship between Caching and Routing in DHTs, 2007 IEEE/WIC/ACM International Conferences on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology - Workshops
- [6] Dennis Trautwein, Yiluo Wei, Yiannis Psaras, Moritz Schubotz, Ignacio Castro, Bela Gipp, Gareth Tyson, IPFS in the Fast Lane: Accelerating Record Storage with Optimistic Provide, IEEE INFOCOM 2024 - IEEE Conference on Computer Communications
- [7] Fotios Bistas, George Xylomenos, Evaluating IPFS Optimistic Provide in the Wild, 2024 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN 2024)
- [8] Meng Wei, Guoqing Dong, Improvement of Kademlia Based on Physical Location, 2013 10th Web Information System and Application Conference
- [9] Liang Guangmin, An Improved Kademlia Routing Algorithm for P2P Network, 2009 International Conference on New Trends in Information and Service Science