

アドホックネットワークにおける Top-k 検索のためのルーティング手法の拡張

天方 大地^{1,a)} 佐々木 勇和^{1,b)} 原 隆浩^{1,c)} 西尾 章治郎^{1,d)}

概要: 筆者らはこれまでに、検索クエリのフラッディングによるトラヒックの増加を防ぐため、アドホックネットワークにおける Top-k 検索のためのルーティング手法を提案した。この手法では、各端末は経路表を用いて、ネットワーク内の上位のデータ、およびそれらのデータを取得するための検索クエリの送信先(宛先)を順位ごとに把握する。検索時には、要求するデータの順位を指定した検索クエリを、その宛先となる端末にユニキャストする。しかし、この手法では、検索クエリの転送経路が各データに対して1本となるため、ネットワークトポロジが頻繁に変化する環境では、検索精度が低下してしまう。そこで本稿では、この手法を拡張した Top-k 検索のためのルーティング手法を提案する。提案手法では、要求するデータの順位のユニキャストは行わず、経路表の k 位までの宛先をメンバとするマルチキャストにより検索クエリを送信する。これにより、上位 k 個のデータまでの検索クエリの転送経路を冗長化し、ネットワークトポロジの動的な変化に対応できるため、取得精度の低下を抑止する。

1. はじめに

近年、ルータ機能をもつ端末のみで一時的な無線ネットワークを形成するアドホックネットワークへの関心が高まっている。アドホックネットワークにおけるデータ検索では、複数の端末が限られた通信帯域を共有するため、膨大なデータの中から必要なデータのみを効率的に取得する必要がある。特に各端末に限られた資源を割り当てる場合や関連性の高い情報のみを収集する場合、検索条件とデータの属性値で決定する何らかの値(スコア)によって順序付けられたデータの上位 k 個のものを検索する Top-k 検索を用いることが有効である。これまでに筆者らの研究グループは、アドホックネットワークにおけるトラヒックの削減と検索結果の取得精度の低下の抑止を実現する Top-k 検索手法を提案した [3], [4], [5]。これらの手法では、フラッディングによるデータ検索を行い、ネットワーク内のデータの k 番目のスコアを推定することにより、検索結果に含まれないデータの返信を可能な限り抑制している。しかし、これらの手法では Top-k 検索に関与する必要のない端末による検索クエリおよびクエリ応答の送信も多く行われてしまう問題があった。

この問題を解決するために、筆者らの研究グループは、文献 [1] において Top-k 検索のためのルーティング手法を提案した。この手法では、経路表によってネットワーク内

の上位のスコアをもつデータ、および検索クエリの転送先を把握する。Top-k 検索を行う端末は、要求する順位を指定した検索クエリをユニキャストにより送信し、検索クエリを受信した端末は、要求された順位のデータのみ返信する。しかし、この手法では、検索クエリの転送経路が各データに対して1本となり、ネットワークトポロジが頻繁に変化する環境では取得精度を維持することが困難であった。

そこで本稿では、この手法を拡張し、アドホックネットワークにおける Top-k 検索のための効率的なルーティング手法を提案する。提案手法では、経路表内の上位 k 個のデータを取得するための宛先をメンバとするマルチキャストにより検索クエリの送信を行う。各端末は自身の経路表、および受信した検索クエリに添付された情報を参照することにより、検索クエリの転送が不要な端末を判断し、上位 k 個のデータを取得するために必要な端末にのみ検索クエリを送信する。これにより、無駄なクエリ転送を抑制しつつ、各データへの経路を複数構築できるため、ネットワークトポロジの変化に対応できる。以下では、2章で想定環境について述べ、3章で先行研究を紹介する。4章で提案手法について説明し、5章でシミュレーション実験の結果を示す。最後に6章で本稿のまとめと今後の課題について述べる。

2. 想定環境

本稿では、アドホックネットワークを構成する各端末が、自身と他の端末のもつデータに対して Top-k 検索を行う環境を想定する。Top-k 検索を行う端末は、検索条件、および要求データ数 k を指定して検索クエリを発行し、ネットワーク内の上位 k 個のスコアをもつデータを取得する。また、各端末は指定される最大の k の値 (k_{max}) を把握し

¹ 大阪大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻
Department of Multimedia Engineering, Graduate School of
Information Science and Technology, Osaka University

a) amagata.daichi@ist.osaka-u.ac.jp

b) sasaki.yuya@ist.osaka-u.ac.jp

c) hara@ist.osaka-u.ac.jp

d) nishio@ist.osaka-u.ac.jp

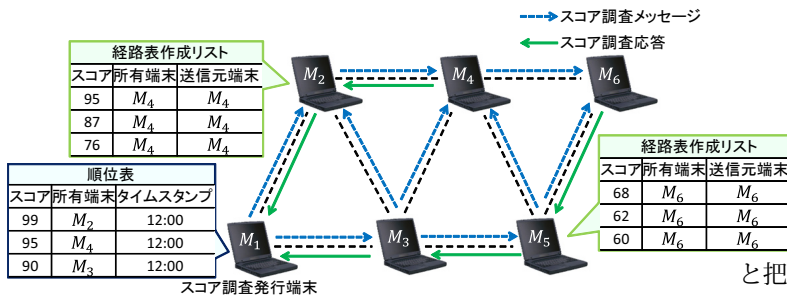


図1 スコア調査

ているものとする。ネットワーク内には n 個のデータが存在し、各々が特定の端末に保持されている。簡単化のため、全てのデータのサイズは等しく、各端末は複製を作成しないものとする。データのスコアは、検索条件とデータの属性値から決定し、何らかのスコアリング関数を用いて算出される。ネットワーク内には、 m 個の端末（識別子： M_1, M_2, \dots, M_m ）が存在し、各々が自由に移動する。

3. 先行研究

これまでに筆者らの研究グループでは、先行研究として、アドホックネットワークにおける Top-k 検索のためのルーティング手法（以下、これを従来手法とする。）を提案した [1]。本章では、この従来手法について説明する。

3.1 従来手法の概要

従来手法では、ネットワーク内のスコアが上位のデータに対する検索クエリの送信先を経路表を用いて管理し、Top-k 検索を行う。ネットワーク内で初めて Top-k 検索を行う端末は、経路表作成のため、ネットワーク内のデータのスコアと、そのデータの所有端末の情報を収集する。収集した情報からネットワーク内のデータの順位表を作成し、ネットワーク全体に伝搬する。各端末は受信した順位表から、データのスコア、所有端末、検索クエリの転送先（宛先）、およびタイムスタンプの情報から構成される経路表を作成する。Top-k 検索時には、要求するデータの宛先となる端末に検索クエリを送信し、各端末は要求されたデータのみ返信する。また、リンク切断を検出した端末は、リンク切断先となる端末への経路探索を行うことにより、検索クエリおよびクエリ応答を送信する。

3.2 経路表の作成手順

Top-k 検索時に自身、および周辺の端末が経路表を保持していない場合、ネットワーク内のデータのスコア調査を行うことにより経路表を作成する。本節では、Top-k 検索で用いる経路表の作成手順について説明する。従来手法、および提案手法で用いる経路表の作成手順はほぼ同様である（差異については4章で述べる）。

3.2.1 順位表の作成

まず、スコア調査メッセージをフラッディングによりネットワーク全体に伝搬する。各端末は初めてスコア調査メッセージを受信した際の送信元端末を親とする。これにより、スコア調査メッセージの発行端末を根とする木構造ネットワークが構築される。また、各端末はスコア調査メッセージを再度受信した際、その送信元端末を隣接端末

表1 各端末の持つデータのスコア

| 端末 | スコア | | | | | | | | |
|-------|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| M_1 | 89 | 88 | 82 | 78 | 70 | 66 | 49 | 30 | 21 |
| M_2 | 99 | 81 | 80 | 77 | 72 | 71 | 69 | 55 | 42 |
| M_3 | 90 | 79 | 53 | 41 | 33 | 29 | 19 | 12 | 11 |
| M_4 | 95 | 87 | 76 | 61 | 58 | 50 | 44 | 37 | 10 |
| M_5 | 85 | 83 | 74 | 67 | 56 | 23 | 18 | 15 | 13 |
| M_6 | 68 | 62 | 60 | 59 | 56 | 40 | 30 | 25 | 22 |

と把握できる。スコア調査応答の返信は、木構造における葉端末から開始する。スコア調査応答では、自身の把握するデータにおいて、スコアの高い上位 k_{max} 個のデータのスコア、およびその所有端末の情報を送信する。スコア調査メッセージの中継端末は、全ての子端末からスコア調査応答を受信するか、スコア調査メッセージを受信してから一定時間経過した時点でスコア調査応答を自身の親に送信する。さらに、経路表作成リストとして、受信した全てのスコア調査応答に含まれるデータ情報のうち、スコアの高い k_{max} 個のものを記録する。経路表作成リストには、データのスコア、そのデータの所有端末、およびそのデータ情報が含まれるスコア調査応答の送信元端末が含まれる。親とのリンク切断を検出した端末は、隣接端末にスコア調査応答を送信する。子端末以外からスコア調査応答を受信した端末は、その送信元端末を新たな子端末と見なし、子端末からのクエリ応答受信と同様の操作を行う。スコア調査メッセージの発行端末は、受信したスコア調査応答と自身のデータから、ネットワークに存在するデータのうち、スコアの高い k_{max} 個に関する順位表を作成する。順位表には、データのスコアとその所有端末、およびタイムスタンプが含まれ、スコアの降順にソートされている。

以上の手順により、スコア調査発行端末は、ネットワーク内に存在するデータのうち、スコアの高い k_{max} 個に対する順位表を作成することができる。さらに、スコア調査応答の中継端末は、自身の子孫のもつデータを把握することができ、そのデータを検索する際の検索クエリの送信先を把握できる。また、自身の親とのリンク切断を検出した端末は、自身の隣接端末にスコア調査応答を送信することにより、順位表の精度の低下を防ぐことができる。

図1を用いて、端末 M_1 が $k_{max} = 3$ の場合のスコア調査を行う例を説明する。各端末のもつデータのスコアを表1に示す。例えば、端末 M_4 がスコア調査メッセージを受信した場合、 M_4 は子端末がないため、自身の持つデータのうち上位3個のスコア（95, 87, 76）と自身の識別子を添付したクエリ応答を返信する。 M_1 は、受信したスコア調査応答からネットワーク内の上位3個のデータに関する順位表を作成する。

3.2.2 経路表の作成

3.2.1 項の手順により順位表を作成した端末は、順位表を添付した順位表伝搬メッセージをネットワーク全体にフラッディングする。順位表伝搬メッセージには、順位表、および送信端末の識別子が含まれる。初めて順位表伝搬メッセージを受信した場合、以下の手順により、経路表を作成する。

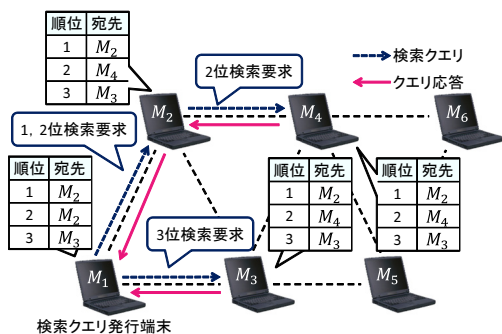


図 2 従来手法における Top-k 検索例

- (1) 受信した順位表中の各データの順位、スコア、および所有端末を経路表に格納する。
- (2) 経路表の全ての宛先を、受信した順位表伝搬メッセージの送信元端末とする。
- (3) 経路表中のある順位のデータの所有端末が自身の場合、そのデータの宛先を自身にする。
- (4) 経路表中のあるデータのスコアと所有端末が、経路表作成リスト中のデータのスコア、および所有端末と一致する場合、そのデータの宛先を経路表作成リストで記録したスコア調査応答の送信元端末にする。

再度順位表メッセージを受信した場合、自身の経路表において、ある順位のデータの所有端末と、順位表伝搬メッセージの送信元端末が一致するならば、その順位の宛先を順位表伝搬メッセージの送信元端末とする。さらに、 k_{max} 位までのデータをもつ端末は、最短経路構築メッセージをフラグディングする。このメッセージには、発行端末の識別子、送信端末の識別子、発行端末からのホップ数が含まれる。このメッセージを初めて受信した端末は、自身の経路表を参照し、データの所有端末とメッセージの発行端末が一致する順位の宛先を送信元端末とする。再度同じメッセージを受信した場合、メッセージに含まれるホップ数が以前受信したものよりも小さいならば、初めて受信した場合と同じ処理を行う。これにより、各端末は k_{max} 位までのデータの最短経路となる宛先を把握し、Top-k 検索における検索クエリの転送にかかるトラフィックを削減できる。

3.3 Top-k 検索の実行

Top-k 検索では、要求するデータの順位を指定した検索クエリを、その順位の宛先となる端末にユニキャストすることにより、Top-k 検索に関与する必要のない端末への送信を防ぎ、検索にかかるトラフィックを抑制できる。検索クエリを受信した端末は、要求されたデータのみ返信することにより、検索結果に含まれないデータの返信を防ぐ。また、経路表における宛先となる端末からのメッセージを受信するごとに、その順位のタイムスタンプは現在時刻に更新される。さらに、クエリ応答受信端末は、クエリ応答に含まれるデータの送信元端末と自身の経路表を参照する。経路表中の宛先と送信元端末が一致しない場合、その順位の宛先をクエリ応答の送信元端末に修正する。

図 2 を用いて、端末 M_1 が $k=3$ として Top-k 検索を行う例を説明する。検索クエリを発行する端末 M_1 は自身の経路表を参照し、要求するデータに対する宛先 (1 位およ

び 2 位: M_2 , 3 位: M_3) に検索クエリを送信する。検索クエリを受信した端末も M_1 と同様に自身の経路表を参照し、検索クエリを送信する。また、要求された順位のデータを返信する。これにより、 M_1 は上位 3 個のデータを取得できる。

3.3.1 リンク切断時

アドホックネットワークでは、端末の移動によりネットワークトポロジが動的に変化する。ここでは、Top-k 検索中にメッセージの送信先とのリンク切断を検出した場合、ホップ数による TTL を設定した経路探索を行う。以下で、この処理について説明する。

● 検索クエリ転送時

検索クエリ転送時にある順位の宛先となる端末とのリンク切断を検出した場合、リンク切断先の端末への別経路を探索するための経路探索メッセージをブロードキャストする。このメッセージには、リンク切断先となる端末と、その端末が宛先となる順位、およびその順位のタイムスタンプが添付された探索リストが含まれる。探索リストに添付された端末以外がこのメッセージを受信した場合、TTL を 1 減らし、その値が 0 より大きいならば経路探索メッセージをブロードキャストする。探索リストに添付されている端末がこのメッセージを受信した場合、経路探索応答を返信する。経路探索応答の中継端末は、受信した経路探索メッセージに含まれる探索リストと自身の経路表を参照し、探索リスト中のタイムスタンプの方が新しいならば、その順位の宛先を経路探索応答の送信元端末に修正する。経路探索メッセージの発行端末は、探索に成功した場合、その経路に沿って検索クエリを送信できる。探索に失敗した場合は検索クエリをブロードキャストする。この検索クエリを受信した端末は、3.3 節の手順を行う。

● クエリ応答返信時

クエリ応答時に検索クエリの送信元端末とのリンク切断を検出した場合、検索クエリの送信元端末と検索クエリの発行端末を探索リストに添付した経路探索メッセージをブロードキャストする。メッセージ処理については、検索クエリ転送時における経路探索と同じ手順である。経路探索メッセージの発行端末は、探索に成功した場合、その経路に沿ってクエリ応答を送信できる。探索に失敗した場合はクエリ応答を破棄する。

3.4 従来手法の問題点

本節では、ネットワークトポロジが頻繁に変化する場合、従来手法が取得精度を維持できない原因について記述する。

● 検索クエリの転送方法

従来手法では、検索要求するデータの順位を指定した検索クエリを宛先ごとにユニキャストする。そのため、上位 k 個のデータを持つ端末までの検索クエリの転送経路は、それぞれ基本的に複数となることはない。アドホックネットワークでは端末が自由に移動するた

め、メッセージの転送経路が限定的である場合、リンク切断の影響を非常に受けやすい。これにより、ネットワークトポロジの変化が頻繁に起こる場合、経路表に最新のネットワークトポロジ（宛先）を反映させることが困難となる。

- 検索クエリ転送時における経路探索の方法
従来手法では、ある宛先とのリンク切断を検出した場合、TTLを設定した経路探索を行い、探索に成功した経路に沿って検索クエリを送信している。この経路探索では、経路探索メッセージの送信、経路探索応答の返信、検索クエリの送信、という手順を踏んでいるため、検索クエリの転送にかかる遅延が大きくなる。遅延が大きい場合、端末の移動によるリンク切断の影響が非常に大きくなる。さらに経路探索によるトラヒックが大きくなり、パケットロスが生じやすくなる。これらにより、経路表を正確に維持することが困難となる。

4. 提案手法

本章では、本稿で提案するルーティング手法について説明する。提案手法で用いる経路表は、従来手法で用いる経路表とほぼ同様であるが、タイムスタンプは含まれない。従来手法では、トラヒック削減のために上位 k 個のデータまでの経路がそれぞれ単一となるように、要求するデータの順位を指定し、検索クエリを送信した。しかし、単一経路ではネットワークトポロジが激しく変化する場合は、メッセージの到達率が低下し、検索結果の取得精度が低下してしまう。そこで、提案手法では、メッセージの到達率を向上させるため、複数経路での検索クエリの送信を行う。従来手法の検索クエリの伝搬において、検索クエリを受信した端末が自身の経路表の k 位までの全ての宛先に検索クエリを送信するという拡張を行うことにより、検索クエリの複数経路による転送を実現できる。しかし、従来手法では宛先ごとに検索クエリをユニキャストしており、宛先が多い場合は送信トラヒックが非常に大きくなる。そこで、提案手法では、経路表の k 位までの宛先をメンバとするマルチキャストにより検索クエリを送信する。さらに、受信した検索クエリのマルチキャストメンバや隣接端末の送信した検索クエリの傍受により、検索クエリを転送する必要のない端末を把握する。これにより、各端末の検索クエリの送信回数、および不要な検索クエリの送信先を削減しつつ、複数経路による検索クエリの転送を行う。

ここで、従来手法で行った最短経路の構築は、各データに対して検索クエリを送信する従来手法では有効であった。しかし、各端末ごとにデータ所有端末までの最短経路が異なるため、マルチキャストを用いる場合、不要に複数の経路での検索クエリの伝播が起きてしまう。そのため、提案手法では、最短経路の構築は行わない。

以下に、提案手法の詳細を示す。

4.1 検索クエリの転送

本節では、検索クエリ発行端末 M_p 、および検索クエリ

の中継端末の処理について説明する。以下にその手順を示す。

- (1) 検索クエリ発行端末 M_p は、経路表の k 位までの宛先をマルチキャストメンバとした検索クエリを送信する。検索クエリには、発行端末の識別子 (M_p)、検索条件、 k 、クエリ識別子、マルチキャストメンバ、親のマルチキャストメンバ（発行端末の場合 NULL）、送信端末の識別子 (M_p)、および経路リストが含まれる。経路リストには、発行端末から自身までの中継端末の識別子が含まれる。
 - (2) 検索クエリを初めて受信したマルチキャストメンバである端末 M_q は、検索クエリの送信元端末を親とし、受信確認のための ACK_{parent} を親に送信する。 M_q は、自身の経路表の k 位までの宛先をメンバ候補とする。その中から、受信した検索クエリのマルチキャストメンバ、親が受信したクエリのマルチキャストメンバ、経路リストに添付されている端末を除外する。メンバ候補となる端末数が1以上である場合、メンバ候補を記録し、ランダム時間のタイマを設定する。メンバ候補となる端末数が0である場合、4.2節のクエリ応答に進む。
 - (3) ACK_{parent} を受信した端末は、その送信元端末を子端末として記録する。
 - (4) 自身がメンバとなる検索クエリを再度受信した端末は、検索クエリの送信元端末をメッセージ送信元端末リストに加える。メッセージ送信元端末リストには、検索クエリの送信元端末の識別子、および送信元端末の検索クエリ発行端末からのホップ数が含まれる。さらに、受信確認のための $ACK_{neighbor}$ を検索クエリの送信元端末に送信する。また、自身がメンバに含まれない検索クエリを傍受した際、その検索クエリの送信元端末が自身が記録しているメンバ候補である場合、その送信元端末を $ACK_{neighbor}$ 受信リストに加える。
 - (5) $ACK_{neighbor}$ を受信した端末は、その送信元端末を $ACK_{neighbor}$ 受信リストに加える。自身が送信した検索クエリの全てのマルチキャストメンバから $ACK_{neighbor}$ を受信した場合、クエリ応答の返信を開始する。
 - (6) タイマが発火した端末 M_q は、メッセージ送信元端末リスト、および $ACK_{neighbor}$ 受信リストに含まれる端末をメンバ候補から除外する。メンバ候補となる端末数が1以上の場合、その端末をマルチキャストメンバとする検索クエリを作成し、送信する。メンバ候補となる端末数が0の場合、クエリ応答の返信を開始する。
- 検索クエリの転送では、受信した検索クエリの情報と自身の経路表を参照してマルチキャストメンバを決定することにより、不要にマルチキャストメンバを増やすことなく、上位 k 個のデータをもつ端末まで検索クエリを転送できる。さらに、既存手法と異なり、順位を指定した検索を行わないため、同じ端末が同様の検索クエリを複数回受信する場合があります。隣接端末を把握できる。また、上位 k 個

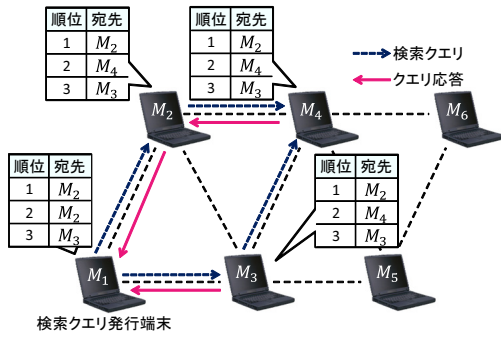


図 3 提案手法における Top-k 検索例

のデータ持つ端末まで複数の経路で検索クエリが伝搬されるため、検索クエリの到達率を向上できる。ACK_{neighbor}の受信により、クエリ応答の返信を待つべきマルチキャストメンバを把握できる。さらに、メッセージ送信元端末リストにより、不要なマルチキャストメンバの削除、および隣接端末の管理ができる。

4.2 クエリ応答の返信

4.1 節の手順により検索クエリを転送した後、各端末がクエリ応答を返信する動作について説明する。

- (1) クエリ応答の返信を開始する端末 M_r は、クエリ応答を自身の親に送信する。クエリ応答には、クエリ識別子、送信端末の識別子、データリストが含まれる。データリストには、経路表の k 位以上のスコアをもつデータのうち、自身が保持するものが含まれる。
- (2) クエリ応答を受信した端末 M_s は、自身の経路表において、クエリ応答に含まれるデータの順位の宛先を参照する。クエリ応答の送信元端末と宛先が一致しない場合、そのデータの宛先をクエリ応答の送信元端末に修正する。さらに、その宛先が自身の送信した検索クエリのマルチキャストメンバである場合、そのメンバが宛先となる全ての順位の宛先をクエリ応答の送信元端末に修正し、マルチキャストメンバからその端末を削除する。
- (3) 全てのマルチキャストメンバからクエリ応答を受信した端末 M_s は、受信したデータ、および経路表の k 位以上のスコアをもつ自身のデータを含むデータリストを添付したクエリ応答を自身の親に送信する。
- (4) クエリ応答送信後、新たなデータを受信した場合、再度クエリ応答を作成し、自身の親に送信する。この際、送信済みのデータはデータリストから除外する。

クエリ応答の返信では、経路表中の k 位以内のデータのみ返信する。これにより、不要なデータの返信を抑制できる。また、クエリ応答受信時に経路表の修正を行うことにより、経路表の精度の維持にかかるオーバーヘッドを削減できる。

図 3 を用いて端末 M_1 が $k = 3$ として Top-k 検索を行う例を説明する。検索クエリを発行する端末 M_1 は、自身の経路表を参照し、 k 位までの宛先となる端末 (M_2 , および M_3) をメンバとする検索クエリを送信する。この検索クエリを受信した M_2 , M_3 も同様に、自身の送信する検索クエ

リのマルチキャストメンバ候補を経路表から抽出する。この場合、 M_2 の送信する検索クエリのマルチキャストメンバ候補は M_3 および M_4 であり、 M_3 の送信する検索クエリのマルチキャストメンバ候補は M_2 および M_4 である。このとき、自身の受信した検索クエリから M_2 は M_3 を、 M_3 は M_2 をメンバ候補から除外できる。 M_2 , および M_3 はメンバ候補の数が 1 であるため、 M_4 をマルチキャストメンバとした検索クエリを送信する。 M_4 は、 M_2 および M_3 から検索クエリを受信する。ここで、 M_2 からの検索クエリを先に受信した場合、 M_4 は M_2 を親とする。また M_3 を隣接端末として記録し、ACK_{neighbor}を送信する。マルチキャストメンバがない M_4 , および ACK_{neighbor}の受信によりマルチキャストメンバがいなくなった M_3 はクエリ応答を親に送信する。これにより、 M_1 は上位 3 個のデータを取得できる。また、この例からわかるように、不要にマルチキャストメンバを増やすことなく検索クエリを送信しており、さらに M_4 までの複数経路を実現している。これにより、不要なトラフィックを抑えつつ、上位 k 個のデータを持つ端末までの検索クエリの到達率を向上できる。

4.3 リンク切断への対応

本節では、検索クエリ、およびクエリ応答の送信の際に送信先の端末とのリンク切断を検出した際の動作について説明する。

4.3.1 検索クエリ転送時

検索クエリ転送時に、マルチキャストメンバとのリンク切断を検出した端末は、その端末への別経路を探索する。また、検索クエリに含まれる情報を経路要求メッセージ RREQ(Route REQuest) に添付することにより、可能な限り遅延を小さくしつつ、検索クエリの転送を継続する。以下では、その手順について説明する。

- (1) あるマルチキャストメンバとのリンク切断を検出した端末は、RREQ をブロードキャストする。このメッセージには、自身の送信した検索クエリの情報、探索リスト、RREQ 発行端末、および TTL が含まれる。探索リストには、リンク切断先の端末の識別子、およびその端末が宛先となる順位が含まれる。また、リンク切断先の端末をマルチキャストメンバから削除する。さらに、RREQ の送信元端末が、経路表中のデータ所有端末と一致する場合、その順位の宛先を RREQ の送信元端末に修正する。
- (2) RREQ を受信した端末は、探索リストに含まれる端末が、自身のメッセージ送信元端末リスト、子端末、および ACK_{neighbor} 受信リストに含まれるか確認する。
 - 含まれている場合、または自身が探索リストに含まれる場合：

RREQ の送信元端末に経路要求返信メッセージ RREP(Route REPLY) を送信する。このメッセージには、RREQ の発行端末の識別子、RREP の送信端末の識別子、検索クエリの識別子、応答リストが含まれる。応答リストには、RREQ 中の探索リストにお

いて、自身が把握している端末の識別子、その端末のクエリ受信状況（すでに他の端末からの検索クエリを受信している場合は1、未受信の場合は0）が含まれる。さらに、自身が探索リストに含まれている端末であり、検索クエリを受信していない場合、検索クエリを初めて受信した時と同様の処理を行う。

● 含まれない場合：

受信した RREQ の送信元端末を記録する。また、RREQ の TTL を 1 減らし、TTL が 0 でないならば、RREQ をブロードキャストする。

- (3) RREQ の発行端末が RREP を受信した場合、RREP 中の応答リストに含まれる端末識別子が、自身の経路表における宛先と一致するならば、その順位の宛先を RREP の送信元端末に修正する。また、クエリ受信状況を参照し、自身が探索している端末のすべてが検索クエリを受信していた場合、クエリ応答の返信を開始する。RREQ の中継端末が RREP を受信した場合、受信した RREQ 中の探索リストに含まれる順位の宛先を RREP 送信元端末に修正し、RREP を、記録した RREQ の送信元端末に送信する。

以上の手順により、マルチキャストメンバとのリンク切断が生じた場合においても、経路探索を行うことにより、検索クエリの転送を継続できる。RREQ を受信した端末は、自身が探索されていない端末でも、検索クエリや ACK の受信状況から RREP の返信ができ、不要な RREQ の転送によるトラヒックの増加を抑止できる。同時に、1 ホップ以内の上位 k_{max} 個のデータをもつ端末を宛先にできる。また、従来手法における経路探索と異なり、RREQ に検索クエリの情報を添付することにより、経路探索と検索クエリの転送を同時に行い、可能な限り検索クエリの転送遅延を抑止することができ、探索リスト中に含まれる端末のみが検索クエリ受信時と同様の処理を行うことから、検索クエリの不要な転送を防ぐことができる。

4.3.2 クエリ応答返信時

クエリ応答返信時に親とのリンク切断を検出した端末は、メッセージ送信元端末リストに含まれる端末にクエリ応答を送信する。メッセージ送信元端末リストが空の場合、自身の受信した検索クエリ転送経路上の端末への経路探索を行う。以下では、その手順について説明する。

- (1) 親とのリンク切断を検出した端末は、メッセージ送信元端末リストが空であるか確認する。空でない場合、検索クエリ発行端末からのホップ数が最小の端末を親とし、クエリ応答を送信する。空の場合、RREQ をブロードキャストする。このメッセージには、検索クエリ識別子、RREQ の発行端末、RREQ の送信元端末、検索クエリ受信時の経路リスト、TTL が添付されている。
- (2) RREQ を受信した端末は、自身、または自身の親端末が探索リストに含まれるか確認する。含まれる場合、RREP を RREQ の送信元端末に送信する。RREP には、クエリ識別子、RREQ の発行端末の識別子、送

信端末の識別子、リンク切断を発見した端末の識別子が含まれる。経路リスト中に自身の把握している端末が存在しない場合、RREQ の TTL を 1 減らし、TTL が 0 より大きいならばブロードキャストする。また、4.3.1 項と同様に、RREQ の送信元端末が経路表中のデータ所有端末と一致する場合、その順位の宛先を RREQ の送信元端末に修正する。

- (3) RREP を受信した RREQ 発行端末は、受信した RREP 中の情報を記録する。RREP を受信した RREQ の中継端末は、RREP を RREQ の送信元端末に送信する。この際、検索クエリを受信していない RREP 受信端末は、RREP の送信元端末を親端末とし、検索クエリ発行端末からのホップ数は ∞ とする。
- (4) 一定時間経過後、RREQ 発行端末は、RREP を受信しているならば、記録した RREP の情報を参照し、以下の優先順位で親端末を変更する。
- (a) 自身の親端末への経路を把握している端末
 - (b) 検索クエリ発行端末への経路を把握している端末
 - (c) その他の、自身が記録している経路リスト中に存在する端末への経路を把握している端末
- 親に変更した端末以外はメッセージ送信元端末リストに加え、再びリンク切断を検出した場合は、手順 (1) に戻る。RREP を受信していない場合、クエリ応答を破棄する。

以上の手順により、親端末とのリンクが切断された場合においても、別経路に沿ってクエリ応答を返信することにより、取得精度の低下を抑止できる。また、RREQ のブロードキャストにより、1 ホップ以内の上位 k_{max} 個のデータをもつ端末を宛先にできる。

5. シミュレーション評価

本章では、提案手法の性能評価のために行ったシミュレーション実験の結果を示す。本実験では、ネットワークシミュレータ Qualnet4.0^{*1}を用いた。

5.1 シミュレーション環境

800[m]×500[m] の 2 次元平面状の領域に 100 台の端末 (M_1, M_2, \dots, M_{100}) が存在する。各端末はランダムウェイポイント [2] に従い、 v [m/秒] の速度で移動する。停止時間は 60[秒] とした。各端末は、IEEE802.11b を使用し、伝送速度 11[Mbps]、通信伝搬距離が 100[m] 程度となる送信電力でデータを送信する。提案手法におけるマルチキャストは、MAC 層ではブロードキャストを用い、アプリケーション層で検索クエリに添付されたマルチキャストメンバにより端末が受信判定を行うことで実現した。ネットワーク内には、100[Byte] のサイズのデータが 2,000 個存在するものとし、各端末はそれぞれ 20 個のデータをもつものとした。データのスコアは正規分布に従い、取り得る値は [1, 999] の範囲に含まれる整数とした。ここで、提案手法、

^{*1} Scalable Network Technologists: Creators of QualNet Network Simulator Software, <URL: <http://www.scalable-networks.com/>>.

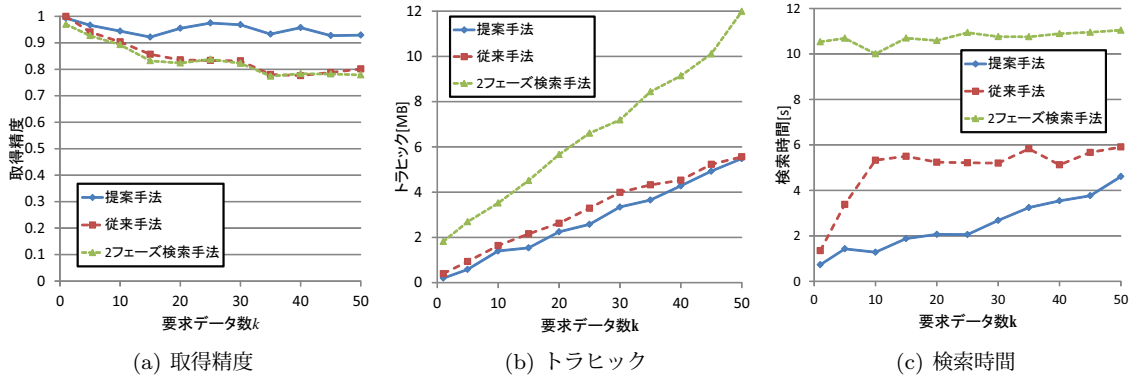


図 4 要求データ数 k の影響

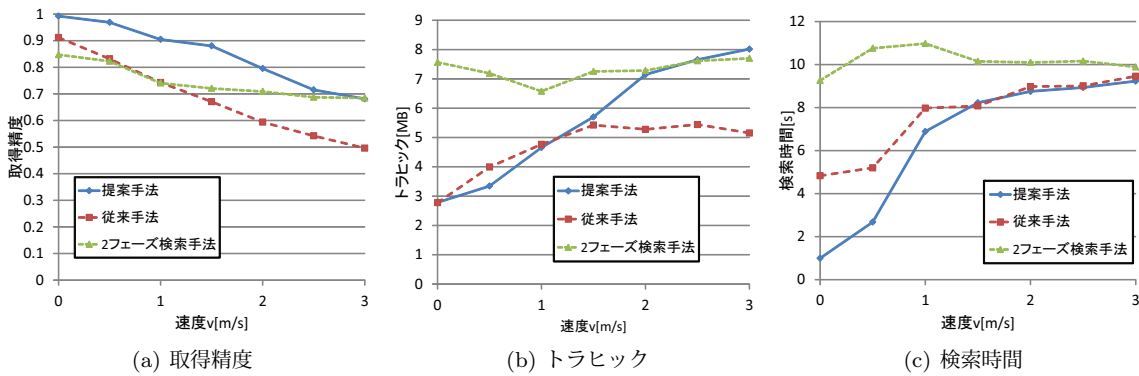


図 5 速度 v の影響

および従来手法において、経路表に保持する順位 k_{max} を 50 とし、経路表要求メッセージ、および検索クエリ転送時やクエリ応答返信時にリンク切断を検出した際の経路探索の TTL は 2 とした。

Top- k 検索手法として、提案手法、従来手法、および文献 [5] で提案された 2 フェーズ検索手法を用いた。2 フェーズ検索手法は、スコアの収集とデータの取得を 2 つのフェーズに分けて行う。具体的には、まず検索クエリをフラッディングし、ネットワーク内のデータのスコアを収集し、取得した k 番目のスコアを閾値に設定する (検索フェーズ)。その後、設定した閾値を添付した検索クエリをフラッディングし、各端末は閾値以上のデータのみを返信する (収集フェーズ)。

本実験では、要求データ数 k は基本的に 30 とし、5.2 節では 1~50 の間で変化させた。また、端末の移動速度 v は基本的に 0.5[m/秒] とし、5.3 節では 0~3[m/秒] の間で変化させた。以上のシミュレーション環境において、各端末の初期位置をランダムに決定し、3[秒] 毎にランダムに選ばれた端末が Top- k 検索を行う。シミュレーション開始から 600[秒] 経過した際の以下の評価値を調べた。

● 取得精度

順位付き検索結果の性能を測る MAP (Mean Average Precision) の値を取得精度とする。MAP は、各クエリの平均精度 AP (Average Precision) を平均化したものである。AP および MAP は以下の式で求める。

$$AP_i = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \frac{x}{j} \cdot e \quad (1)$$

$$MAP = \frac{1}{querynum} \sum_{i=1}^{querynum} AP_i \quad (2)$$

AP_i は i 番目のクエリの平均精度である。 x は、取得した解の上位 j 個のうち正解集合の j 位以内である解の個数である。 $querynum$ はクエリの発行数を示す。また、 e は以下のように定義される。

$$e = \begin{cases} 1 & (j \text{ 番目の解が正解集合に含まれる}) \\ 0 & (j \text{ 番目の解が正解集合に含まれない}) \end{cases} \quad (3)$$

したがって、MAP は、より上位のデータを取得できているほど、高い値となる。

● トラフィック

発行した全ての検索クエリを処理するために送信された全てのメッセージの総バイトをトラフィックとする。

● 検索時間

全検索クエリに対する、検索クエリ発行端末が検索クエリを発行してから検索結果を取得するまでの平均時間を検索時間とする。

5.2 要求データ数 k の影響

要求データ数 k を変化させた時の各手法の性能を図 4 に示す。これらの図において、横軸は要求データ数 k を表し、縦軸は図 4(a) では取得精度、図 4(b) ではトラフィック、および図 4(c) では検索時間を表す。

図 4(a) の結果より、提案手法は他の 2 つの手法よりも取得精度を高く維持できていることがわかる。これは、従来手法よりも上位 k 個のデータをもつ端末までの検索クエリの到達率が高いためである。また、クエリ応答返信時にリンク切断が生じて、隣接端末への返信、または効率的な経路探索を行い、検索クエリの発行端末までデータを返信できているためである。ここで、2 フェーズ検索手法は、検索フェーズにおいて、パケットロスなどにより設定する閾値が正確でない場合もあり、不要なデータの送信が起きてしまう。そのため、不要なデータの返信によるトラヒックの増加から、パケットロスの影響が提案手法よりも大きい。

図 4(b) の結果より、 k が大きくなると全ての手法においてトラヒックが大きくなっている。これは、返信するデータ数が多くなり、クエリ応答のサイズが大きくなるためである。また、従来手法は検索クエリを宛先ごとにユニキャストにより送信しているのに対して、提案手法では、検索クエリをマルチキャストにより送信している。さらに、クエリ応答時のリンク切断の際は、従来手法では必ず経路探索を実行する。しかし、提案手法では隣接端末を把握している場合、経路探索を実行せず、隣接端末にクエリ応答を送信するため、経路探索の機会が従来手法よりも少ない。これらの影響により、提案手法のトラヒックは従来手法のトラヒックより小さくなっている。

図 4(c) の結果より、提案手法は他の 2 つの手法よりも検索時間が短いことがわかる。これは、検索クエリの受信状況や、傍受により、検索クエリの転送の必要がない場合、すぐにクエリ応答の返信を行っているためである。また、提案手法と従来手法はフラッディングによる検索クエリの転送を行わないため、子端末数が 2 フェーズ検索手法よりも少ない。そのため、2 フェーズ検索手法に比べて、クエリ応答のパケットロスにより、子端末からのクエリ応答を待つ時間が長くなる機会が少なくなる。従来手法が提案手法より検索時間が長いのは、従来手法は提案手法よりも限定的な検索クエリの転送を行っているため、経路探索の機会が多くなるためである。

5.3 移動速度 v の影響

移動速度 v を変化させた時の各手法の性能を図 5 に示す。これらの図において、横軸は移動速度 v を表し、縦軸は図 5(a) では取得精度、図 5(b) ではトラヒック、および図 5(c) では検索時間を表す。

図 5(a) の結果より、提案手法では、従来手法よりも取得精度が高いことがわかる。これは、提案手法では、データ所有端末まで、または中継端末まで複数の経路で検索クエリを転送することが多く、検索クエリの到達率が向上したためである。さらに、検索クエリ転送時における経路探索では、遅延を可能な限り抑制しているため、従来手法よりもトポロジの変化に対応できているためである。また、 $v = 3[\text{m}/\text{秒}]$ のとき、提案手法の取得精度は 2 フェーズ検索手法よりもわずかに低い。これは、提案手法は検索クエリの中継端末が頻繁に経路探索を行い、パケットロスの機

会が多くなるためである。

図 5(b) の結果より、移動速度が大きくなるとトラヒックが大きくなっていることがわかる。これは、移動速度の増加に伴い、リンク切断の機会が多くなり、多くの検索クエリの中継端末が経路探索を行ってしまうためである。

図 5(c) の結果より、提案手法、および従来手法では、移動速度が大きくなると、検索時間が長くなる。これは、図 5(b) の結果で述べた理由に加え、クエリ応答が中継端末で破棄される機会が増加し、検索クエリの中継端末は最大待ち時間までクエリ応答を待つ機会が多くなるためである。

6. おわりに

本稿では、アドホックネットワーク上の Top-k 検索において、トラヒックを削減しつつ、検索結果の取得精度の低下を抑止するためのルーティング手法を提案した。提案手法では、各端末が経路表を用いて、要求するデータ取得のための検索クエリの転送先を把握する。さらに、自身の経路表、および受信した検索クエリの情報からマルチキャストメンバを決定し、検索クエリを送信する。検索クエリを受信した端末は、経路表中の k 位のスコア以上のスコアをもつデータのみを返信することにより、検索結果に含まれないデータは返信しない。また、リンク切断を検出した端末は、経路探索を行うことにより、目的の端末までのメッセージの到達率の低下を抑止する。シミュレーション実験の結果から、提案手法は、トラヒックを削減しつつ、取得精度の低下を抑止できることを確認した。

ここで、端末が疎な環境では、リンク切断の機会が増加し、上位 k 個のデータをもつ端末に検索クエリを転送できない可能性が高くなる。そこで今後は、このような環境に対応するため、データの複製を作成することにより、提案手法の拡張を行う予定である。

謝辞 本研究の一部は、文部科学省研究費補助金・基盤研究 S (21220002)、および基盤研究 B (24300037) 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] 天方大地, 佐々木勇和, 原 隆浩, 西尾章治郎 : アドホックネットワーク上の効率的な Top-k 検索のためのルーティング手法, 情報処理学会マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO 2012) シンポジウム論文集, Vol. 2012, No.1, pp.1236-1244 (2012).
- [2] Camp, T., Boleng, J. and Davies, V.: A survey of mobility models for ad hoc network research, *Wireless Communications and Mobile Computing (WCMC)*, Vol.2, No.5, pp.483-502 (2002).
- [3] Hagihara, R., Shinohara, M., Hara, T. and Nishio, S.: A message processing method for top-k query for traffic reduction in ad hoc networks, *Proc. Int. Conf. on Mobile Data Management*, pp.11-20 (2009).
- [4] 佐々木勇和, 原 隆浩, 西尾章治郎 : アドホックネットワーク上のスコア分布推定による Top-k 検索手法, 情報処理学会論文誌, Vol.52, No.1, pp.175-186 (2011).
- [5] Sasaki, Y., Hara, T. and Nishio, S.: Two-phase top-k query processing in mobile ad hoc networks, *Proc. Int. Conf. on Network-Based Information Systems*, pp.42-49 (2011).