

アドホックネットワークにおける k 最近傍端末の検索手法

駒井 友香[†] 佐々木勇和^{††} 原 隆浩^{††} 西尾章治郎^{††}

[†] 大阪大学工学部電子情報工学科

^{††} 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

E-mail: [†]komai.yuka@ise.eng.osaka-u.ac.jp, ^{††}{sasaki.yuya,hara,nishio}@ist.osaka-u.ac.jp

あらまし アドホックネットワークにおける位置依存サービスでは、指定位置の近くに存在する上位 k 個の端末の情報をリアルタイムに検出することができる k 最近傍検索を用いることにより、効率的に必要な情報を取得できる。本稿では、アドホックネットワークにおいて、トラヒックを削減しつつ、検索結果の取得精度の維持を目的とする k 最近傍検索手法を提案する。提案手法では、クエリ発行端末が指定する位置に最も近い端末までジオルーティングを用いてクエリメッセージを転送し、その後、指定位置の周辺の端末にクエリメッセージを伝搬する。このクエリメッセージを受信した周辺端末は、位置情報を含む自身に関する情報をクエリ発行端末に返信する。

キーワード アドホックネットワーク, k 最近傍検索, 位置依存サービス

Methods for Serching k -Nearest Neighbor Nodes in Ad Hoc Networks

Yuka KOMAI[†], Yuya SASAKI^{††}, Takahiro HARA^{††}, and Shojiro NISHIO^{††}

[†] Dept. of Electronic and Information Eng., Faculty of Engineering, Osaka University

^{††} Dept. of Multimedia Eng., Graduate School of Information Science and Tech., Osaka University

E-mail: [†]komai.yuka@ise.eng.osaka-u.ac.jp, ^{††}{sasaki.yuya,hara,nishio}@ist.osaka-u.ac.jp

1. 序 論

近年、無線通信技術の発展と、計算機の小型化や高性能化に伴い、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では、端末が自身の無線通信範囲内に存在する端末と通信する場合、基地局を介さずに直接通信できる。一方、自身の無線通信範囲内に存在しない端末と通信する場合、これらの端末の間に存在する端末がパケットを中継して、マルチホップ通信を行う。アドホックネットワークは既存の通信基盤を必要とせずに、端末のみで自律分散的にネットワークを構築できるため、災害時の救助活動やイベント会場での情報共有、およびセンサネットワークでの情報収集などへの応用が期待されている。

特に、広い領域において多数の端末がアドホックネットワークを構成している状況では、位置依存サービスを始めとして、ユーザが指定した特定の位置の近くに現在存在する端末の情報をリアルタイムに検出する技術が求められている。そのための有効な方法として、位置依存情報の検索に用いられる k 最近傍 (k -Nearest Neighbor, k NN) 検索がある。 k 最近傍検索では、検索要求 (クエリ) 発行端末が指定した位置に対して、その位

置から距離の近い上位 k 個の端末 (k 最近傍端末) を発見する。 k 最近傍検索を行うことにより、必要な端末の情報を効率的かつリアルタイムに取得することができる。

ここで、アドホックネットワークには無線通信帯域の制限や、端末の移動によるネットワークポロジの頻繁な変化といった、従来の有線ネットワークや無線センサネットワークとは大きく異なる特徴がある。そのため、これらのネットワーク分野においてこれまでに提案されている従来の k 最近傍検索手法を、そのままアドホックネットワークに適用することはできない。

例えば、 k 最近傍検索を実現する最も単純な方法として、端末が検索クエリをネットワーク全体にフラッディングし、これを受信した端末が、自身の位置情報を返信することが考えられる。しかし、クエリを受信した全端末が位置情報を返信すると、指定位置から遠く、検索結果に含まれない無駄な返信が多くなり、不要なトラヒックが発生してしまう。この場合、アドホックネットワークでは無線通信帯域が限られているため、パケット衝突による転送遅延の増大や検索結果の精度の低下が予想される。

さらに、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ポロジが動的に変化するため、端末の位置に基づいて静的な論理ネットワークを構成するようなアプローチは機能

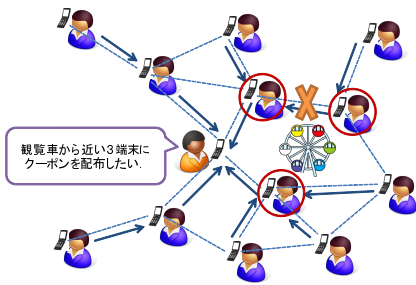


図1 アドホックネットワークにおける k 最近傍検索例

しない。また、クエリ伝搬時と返信時の間にもトポロジが変化することもあるため、端末間のリンクの変化を考慮せずに返信を伝搬すると、検索発行端末が検索結果に含まれるデータを取得できない場合がある。

図1は、イベント会場において、イベント主催者がある場所に近い3人にクーポンや情報の配布を行う例を表わしている。このとき、全ての端末の位置情報を取得すると、無駄に大きなトラフィックが発生する。また、静的なクエリ伝搬木を構築すると、その木においてリンク切断が起こった場合、イベントの主催者は k 最近傍端末の情報を取得できない。

そこで本稿では、アドホックネットワークにおいて、トラフィックを削減しつつ、検索結果の取得精度の維持を目的とする k 最近傍検索手法を提案する。提案手法では、クエリ発行端末が指定する位置に最も近い端末までジオルーティングを用いてクエリメッセージを転送し、その後、指定位置の周辺の端末にクエリメッセージを伝搬する。このクエリメッセージを受信した周辺端末は、位置情報を含む自身の情報をクエリ発行端末に返信する。このとき、周辺端末にクエリを伝搬し、情報を取得する方法として、EXP法とSPI法の二つの手法を用いる。EXP法では、クエリの指定位置に最も近い端末が、クエリ指定位置を中心とした特定の円範囲に存在する端末にクエリメッセージをフラディングし、そのメッセージを受信した端末はフラディングを開始した端末に自身の情報を返送する。SPI法では、クエリ指定位置に最も近い端末を中心に螺旋を描くように、クエリメッセージを伝搬していき、指定位置に近い上位 k 個の端末の情報を取得できたら、返信を開始する。提案手法により、ネットワーク全体にクエリをフラディングする必要がなく、さらに静的な論理ネットワークを構成する必要もないため、通信帯域の制限やネットワークトポロジの変化といったアドホックネットワーク特有の問題を解決できる。

本稿ではさらに、シミュレーション実験により、提案手法が単純な手法よりも高い取得精度を実現し、さらにトラフィックを削減できることを示す。

以下では、2.で関連研究について述べる。その後、3.で提案手法について述べ、4.でシミュレーション実験の結果を示す。最後に、5.で本稿のまとめと今後の課題について述べる。

2. 関連研究

本章では、様々な分野における k 最近傍検索に関する従来研究、およびジオルーティングに関する研究について紹介する。さらに、本研究と従来研究を比較し、その相違点について述

べる。

2.1 k 最近傍検索

様々なネットワーク環境において、これまでに k 最近傍検索に関する研究が数多く行われている。

文献[6]では、センサネットワークにおいて継続的に k 最近傍端末を監視する手法が提案されている。具体的には、センサが目的地周辺を移動している物体を追跡する環境において、クエリ指定位置からの k 最近傍物体の情報を取得する。この研究では、センサは動かないことを想定しているため、アドホックネットワークには適用できない。また、この研究では検索対象はセンサがセンシングしている物体であり、端末自身が検索対象となる本研究とは想定が異なる。文献[5]では、各センサがハローメッセージの交換により周辺センサの位置を把握しているセンサネットワークを想定し、指定位置の k 最近傍端末を検索する技術として、GRT, KBT, IKNNを提案している。GRT, KBTでは木構造の論理ネットワークを構築し、この木に沿ってクエリを伝搬することで k 最近傍端末の情報を取得する。IKNNは木を構築せず、クエリを螺旋状に伝搬することで、 k 最近傍端末の情報を取得する。本研究で提案するSPI法は、IKNNを参考にしているが、これら3つの手法は基本的に固定センサネットワークを想定しており、トポロジの変化が激しいアドホックネットワークに直接適用することはできない。特に、これらの手法では各センサがハローメッセージの交換などにより隣接端末の情報を正確に把握しておく必要があり、非常に大きなトラフィックが発生する原因となる。一方、本研究では各端末はネットワークトポロジや隣接端末を事前に把握しておく必要がないため、アドホックネットワークに適している。

2.2 ジョルーティング

アドホックネットワークにおいて目的地までの効率的なメッセージ転送を目的としたジオルーティングに関する研究は数多く行われている。本稿の提案手法においてもジオルーティングを用いるため、既存の代表的なジオルーティング手法を紹介する。文献[3]では、アドホックネットワークにおいて、不必要なフラディングを抑制するジオルーティング手法を提案している。この手法では、メッセージを受信した端末が送信元端末より目的地に近ければ、メッセージを再転送する。しかし、この手法では、各端末が他の端末の位置を考慮せずにメッセージを転送するため、複数の経路が作成され、メッセージ転送のトラフィックが増加する。文献[2]では、アドホックネットワークにおいて、さらにトラフィックを削減可能なジオルーティング手法を提案している。この手法では、送信元端末からメッセージを受信した端末は、設定された転送エリア内に自身が存在する場合、転送待ち時間を設定する。このとき、目的地に近いほど短い転送待ち時間が設定される。その結果、転送待ち時間が最も小さい(目的地に最も近い)端末が、隣接端末へメッセージの転送を行う。転送エリア内の他の端末は、この転送メッセージを傍受することにより、他の端末がメッセージを転送したことを検知できるため、自身は転送を中止する。この手法では、転送エリア内に受信端末が存在しない場合、メッセージの転送が行えないため、端末が疎な環境には適さない。しかし、端末

が密な環境では、複数経路の構築を抑制し、トラフィックを削減できる。そのため、本稿の提案手法におけるジオルーティングでは、この手法を参考にしている。

3. k 最近傍端末の検索手法

本章では、本稿で提案する k 最近傍端末の検索手法を説明する。以下では、まず想定環境について述べ、その後、提案手法におけるクエリの伝搬および返信の方法について説明する。次に、 k 最近傍端末へのクエリの転送、返信方法の詳細として、EXP 法と SPI 法における検索手順について説明する。

3.1 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、 k 最近傍端末の情報を検索する環境を想定する。 k 最近傍検索を行う端末は、ある位置を指定した検索クエリを発行し、ネットワーク内の端末の中から、指定位置からの距離が近い上位 k 個の端末 (k 最近傍端末) の情報を取得する。

ネットワーク内には、同等の性能を持つ n 個の端末 (識別子: M_1, M_2, \dots, M_n) が存在し、各々が自由に移動する。ネットワークに参加する端末は既知であり、ネットワークを構築する前に各端末に一意の識別子が付与されているものとする。また、簡単化のため、 k 最近傍検索を行っている端末は検索結果を取得するまで移動しないものとする。この想定は実環境では必ずしも正しくないが、提案手法に対して簡単な拡張を行うことにより取り除くことができる。各端末は、ネットワーク内の端末数 n 、端末が存在する領域の大きさ、および、GPS などにより自身の位置情報を把握しているものとする。

3.2 指定位置へのクエリの伝搬および返信方法

提案手法ではトラフィック削減のため、クエリ発行者はまず指定した位置に最も近い端末へジオルーティングを用いてクエリメッセージを転送する。本稿では、Heissenbüttel らが文献 [2] において提案したジオルーティング手法を拡張する。この拡張ジオルーティング手法では、クエリメッセージを受信した端末は隣接端末のうち指定位置に最も近い端末を発見し、クエリメッセージを転送する。これにより、複数の経路が作成されることを防ぎ、指定した位置まで少ないホップ数でメッセージ転送できる。

メッセージ発行端末 M_s から指定位置に最も近い端末へメッセージを転送する手順の詳細を以下に説明する。

(1) メッセージ発行端末 M_s は、全ての隣接端末に隣接端末検索メッセージを送信する。このメッセージには、送信元端末 M_s の識別子と位置情報、およびユーザによって指定された目的地の位置情報が含まれる。

(2) 隣接端末検索メッセージを受信した端末 M_p は、受信したメッセージの送信元端末を自身の親端末として記録する。メッセージ内の情報から、 M_p はメッセージ発行端末 M_s と自身のどちらがより目的地に近いかを判定する。自身の方がより目的地に近く、かつ送信元端末を中心とした探索円 (後述) 内に存在する場合、返信待ち時間 *Reply Delay* (RD) を次式を用いて設定する。

$$RD = Max_delay \cdot \left(\frac{\alpha - d}{\alpha} \right) \quad (1)$$

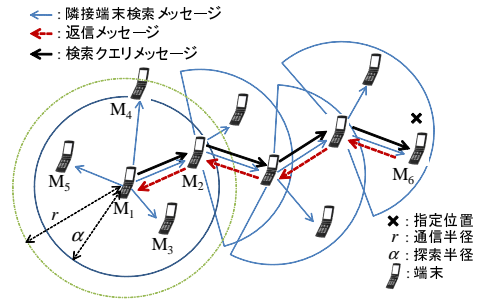


図2 ジョルーティングの例

ここで、 Max_delay は事前に設定される正の定数、 α は探索円の半径を示す。 d は「メッセージ発行端末 M_s と目的地を結ぶ直線」と「その直線を受信端末 M_p から下ろした垂線」との交点と、メッセージ発行端末 M_s の距離を示す。

この式を用いることにより、目的地に近い端末ほど RD を小さく設定するため、目的地に最も近い端末が始めに送信元端末へ返信メッセージを送信する。返信メッセージには、受信端末 M_p の識別子が含まれる。

ここで、探索円の半径は、端末の移動速度などの状況に基づいて決定されるが、基本的に通信半径よりも小さく設定される。これは、探索円を通信範囲と同程度に設定した場合、クエリの処理中に各端末とその親端末の間のリンク切断が頻繁に発生するためである。

(3) 返信メッセージを受信した端末は、それが初めて受信したものであれば、返信元端末 M_p へ検索クエリメッセージを送信する。ここで、返信メッセージを一つも受信しない場合、自身が目的地に最も近い端末であるか、もしくは隣接端末がないかのいずれかである。そこで、自身の位置が、EXP 法において k 最近傍推定半径 R 内 (3.3 節で記述)、もしくは、SPI 法において目的地を包含する六角形内 (3.4 節で記述) の場合、自身が目的地に最も近い端末であると判断し、 k 最近傍端末の情報の取得を開始する。一方、上記の条件に当てはまらない場合、隣接端末検索メッセージを再送信する。

(4) クエリメッセージを受信した端末 M_p は、手順 1 と同様に、全ての隣接端末に隣接端末検索メッセージを送信する。このメッセージには、送信元端末 M_p の識別子と位置情報、および受信したクエリにより指定された目的地の位置情報が含まれる。手順 2 へ戻る。

なお、上記の手順により、各端末は自身の親端末を知ることができるため、返信時の経路を把握できる。

図 2 を用いて、端末 M_1 がクエリを発行した場合のジオルーティング手法の動作例を説明する。メッセージ発行端末 M_1 は、隣接端末に隣接端末検索メッセージを送信する。隣接端末検索メッセージを受信した端末 M_2 、および M_3 は返信待ち時間 RD をそれぞれ設定する。端末 M_4 は探索円内ではないため、また端末 M_5 は M_1 より目的地から遠いため、このメッセージを無視する。 RD が最も小さく設定された (目的地に最も近い) 端末 M_2 は、 RD 経過後、返信メッセージを (M_3 より早く) M_1 へ送信する。端末 M_2 から返信メッセージを受信した端末 M_1 は、端末 M_2 へ検索クエリメッセージを送信する。その後、

端末 M_2 が隣接端末検索メッセージを送信し、同様の動作により、目的地に最も近い端末 M_6 へ検索クエリメッセージが転送され、処理が完了する。

3.3 k 最近傍端末へのクエリの転送, 返信: EXP 法

EXP 法では、クエリ発行端末はまず、領域の大きさで端末数、および k の値から、 k 最近傍端末が高確率で存在する範囲 (k 最近傍推定半径 R) を推定する。そして、3.2 節のジオルーティング手法を用いて、指定位置に最も近い端末まで、 k 最近傍推定半径の情報を添付した検索クエリメッセージを送信する。その後、指定位置に最も近い端末が、指定位置を中心とする半径 R 内の端末にローカルクエリメッセージをフラディングする。これを受信した端末は、位置情報を含む自身の情報を添付した返信メッセージを、指定位置に最も近い端末に送信する。最後に、指定位置に最も近い端末は、指定位置に近い上位 k 個の端末の情報を、クエリ発行端末に返信する。

以下では、検索クエリを発行した端末 M_s と検索クエリメッセージを受信した端末の動作について説明する。

(1) 端末 M_s は指定位置、および要求端末数 k を決定する。また、領域の大きさ、端末数、および k から、要求端末数 k が存在すると推定される k 最近傍推定半径 R を決定する。

(2) 端末 M_s は、3.2 節で示したジオルーティング手法を用い、指定位置付近の端末へ検索クエリを転送する。このメッセージには、要求端末数 k 、メッセージ発行端末 M_s の識別子と位置情報、指定位置の位置情報、および k 最近傍推定半径 R が含まれる。

(3) 3.2 節で示した手順により、指定位置に最も近い端末 M_p へ検索クエリが転送される。端末 M_p は、ローカルクエリメッセージを全ての隣接端末に送信する。このメッセージには、指定位置の位置情報、 M_p の位置情報、要求端末数 k 、および k 最近傍推定半径 R の情報が含まれる。

(4) ローカルクエリメッセージを受信した端末 M_q は、送信元端末を EXP 親端末として保持する。ローカルクエリメッセージを初めて受信し、かつ自身と指定位置の距離が k 最近傍推定半径 R より小さければ、応答返信待ち時間 (*Wait Time*: WT) を次式のように設ける。

$$WT = \left(\frac{R}{r}\right) \cdot \left(1 - \frac{a}{R+b}\right) \quad (2)$$

ここで、 a は M_p と M_q との距離であり、 b は指定位置と M_p との距離である。この式を用いることで WT の値は、端末 M_p から遠い子端末ほど小さくなる。

上記の処理に加えて、全ての隣接端末にローカルクエリメッセージを送信する。

一方、受信したローカルクエリメッセージが、既に受信したものである場合、もしくは、自身と指定位置の距離が k 最近傍推定半径 R より離れている場合、このメッセージを破棄する。

(5) WT の値が小さい (M_p からの距離が遠い) 端末から、クエリ返信を開始する。 WT 経過した (子を持たない) M_q は、位置情報を含む自身の情報を返信データとして、クエリ返信メッセージに添付し、自身の EXP 親端末に送信する。

(6) クエリ返信メッセージを (子端末から) 受信した端末

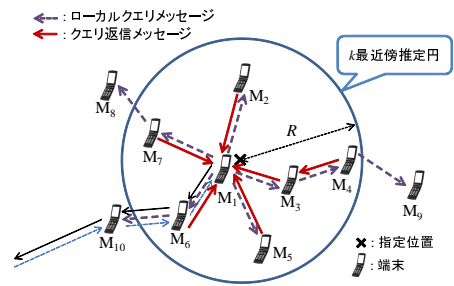


図3 EXP 法におけるクエリ転送例

は、受信したメッセージ中の返信データと、それまでに他の端末から受信したクエリ返信メッセージ中の返信データ、および、自身の情報を統合して、自身の返信データを作成する。ここで、作成した返信データに情報が含まれる端末数が k を超えた場合、指定位置により近い k 個の端末以外の情報を破棄する。

自身が指定位置に最も近い端末でない場合、 WT 経過後、作成した返信データを添付したクエリ返信メッセージを、EXP 親端末へ返信する。手順 5 へ戻る。

自身が指定位置に最も近い端末の場合、手順 7 へ進む。

(7) 指定位置に最も近い端末 (ローカルクエリメッセージ発行端末) M_p は、 WT 経過後、検索クエリメッセージの伝搬経路に沿って、 k 最近傍端末の情報を含むクエリ応答をクエリ発行者へ送信する。経路上の端末がリンク切断している場合、リンク切断を検出した端末はクエリ発行端末の位置を指定位置として、3.2 節のジオルーティング手法を用いて返信を行う。

図3を用いて、指定位置に最も近い端末 M_1 が EXP 法により、周辺情報を取得する例を説明する。例えば、 k 最近傍推定円 (半径 R) 内の M_3 は、 M_1 の発行したローカルクエリメッセージを受信すると、 M_1 を EXP 親端末とし、ローカルクエリメッセージを隣接端末へ送信する。同様に、 M_4 は M_3 を EXP 親端末とし、ローカルクエリメッセージを隣接端末へ送信する。これを受信した M_9 は自身が k 最近傍推定円内に存在しないため、このメッセージを破棄する。 M_4 は設定された WT 経過後、 M_3 へクエリ返信メッセージを送信する。これを受信した M_3 は自身が設定した WT の経過後、 M_3 と M_4 の情報を返信データとして、 M_1 へクエリ返信メッセージを送信する。同様の処理を全ての端末で行うことにより、 M_1 は k 最近傍推定半径 R 内の端末の位置情報を取得できる。 M_1 は WT 経過後、指定位置に近い上位 k 個の端末のみの情報を、クエリ発行端末へ返信する。

EXP 法では、ローカルクエリメッセージを送信する際に動的に木構造を構築し、その木に沿って特定の範囲内の端末の情報のみを収集することができる。指定位置に最も近い端末は、 k 最近傍推定半径 R 内の端末の位置を把握できるため、必要な情報 (指定位置に近い上位 k 個の端末の情報) のみを返信できる。これにより、クエリ応答のトラフィックを削減できる。しかし、この方法では、適切な k 最近傍推定半径 R を設定する必要がある。 R を小さく設定すると、すべての k 最近傍端末の情報を取得できない可能性が高くなる。一方、 R を大きく設定すると、無駄なトラフィックが大きくなる可能性が高い。さらに、実

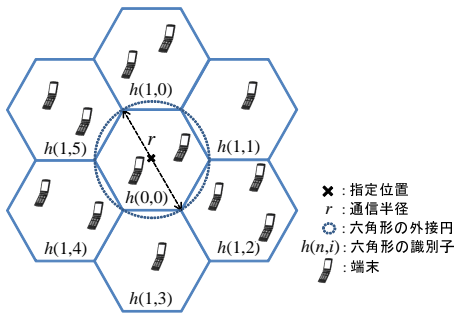


図 4 SPI 法におけるエリアの分割

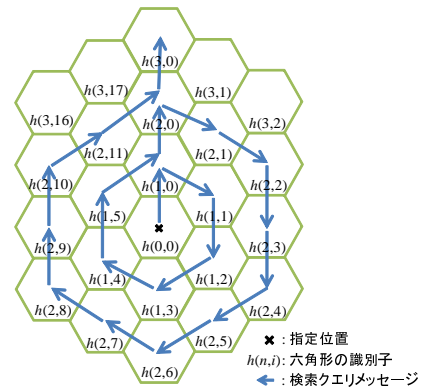


図 5 SPI 法におけるクエリ転送

環境では、ネットワーク全体の端末数や、領域の大きさ、および端末の密度を必ずしも事前に行うことができないため、 R を適切に設定することが困難な場合がある。

3.4 k 最近傍端末へのクエリの転送, 返信: SPI 法

SPI 法では、領域を動的に正六角形に分割し、それぞれの六角形内の端末を訪問することによって k 最近傍端末の情報を取得する。以下では、まず、領域の分割法について説明し、その後、SPI 法のメッセージ処理手順を説明する。

3.4.1 領域の分割

検索クエリによって指定された指定位置を中心とし、領域を均等に正六角形で分割する。ここで、ある六角形内に存在する任意の端末が、その六角形内の他の全ての端末に 1 ホップで通信を行えることを保証するため、六角形の外接円の半径を通信半径の半分 ($r/2$) とする。

SPI 法では、指定位置に近い上位 k 個の端末の情報を把握できたと判断すると、クエリ発行端末へ k 最近傍端末情報の返信を開始する。したがって、指定位置を含む六角形の外接円内に、 k 個以上の端末が存在する場合、他の六角形を訪問する必要がない。一方、指定位置を含む六角形の外接円内に k 個以上の端末が存在しない場合、指定位置を含む六角形に外接する六角形を訪問する。ここで、指定位置を含む六角形を 0 周目の六角形とし、それに外接する六角形を 1 周目の六角形、さらに 1 周目の六角形に外接する六角形を 2 周目の六角形と定義する。それぞれ n 周目の六角形の識別子を時計回りの順に $h(n, i)$ ($i = 0, \dots, 6n-1$) とする。

図 4, 5 はそれぞれエリアを六角形で分割する例、および、クエリが六角形を訪問する例を示している。図 4 において六角形 $h(0,0)$ の中心点はクエリの指定位置であり、点線の円はこの六角形の外接円でその直径は通信半径と同じである。0 周目の六角形 $h(0,0)$ に外接する六角形の識別子は $h(1,0)$ から $h(1,5)$ となっている。図 5 では、クエリの転送が $h(0,0)$ から始まり 1 周目の六角形、2 周目の六角形へと順に転送される様子を表している。

3.4.2 メッセージ処理手順

SPI 法では、3.4.1 項で説明した六角形を順に訪問することにより、端末の情報を取得する。

以下では、検索クエリメッセージを発行した端末 M_s と検索クエリメッセージを受信した端末の動作について説明する。

(1) 端末 M_s は、クエリの指定位置、および要求端末数 k を決定し、3.2 節に示したジオルーティング手法を用いて、指

定位置に最も近い端末へ検索クエリメッセージを転送する。このメッセージには、要求端末数 k 、指定位置の情報、およびメッセージ発行端末 M_s の識別子とその位置情報が含まれる。

(2) 3.2 節で示した手順により、指定位置に最も近い端末 (指定位置を包含する六角形内に位置する) M_p へ検索クエリが転送される。指定位置に最も近い端末 M_p は、自身が存在する六角形の責任者 (M_c) として、隣接端末にローカルクエリメッセージを送信する。このメッセージには、指定位置の情報、現在の六角形の識別子、および六角形の中心点の位置情報を含む。

(3) ローカルクエリメッセージを初めて受信した端末 M_t は、送信元端末と同じ六角形の外接円内に存在する場合、送信元端末へクエリ返信メッセージを送信する。このメッセージには、返信データとして、端末の識別子と位置情報を含む自身の情報が含まれる。

(4) 端末 M_t は指定位置の位置情報、現在訪問中の六角形の識別子、およびその六角形の中心点の位置情報を記録し、その後、次に訪問する予定の六角形の中心点の計算を行う。このとき、自身が次に訪問する六角形の外接円内、もしくは現在の六角形の外接円内で、受信したローカルクエリメッセージ発行者よりも次の六角形の中心点に近い場合、クエリ要求メッセージ送信のための待ち時間 WT を次式のように設ける。

$$WT = Max_delay \cdot \frac{h}{r} + \alpha \quad (3)$$

ここで、 Max_delay はクエリ要求メッセージの最大待ち時間で、事前に設定される正の定数である。 h は次に訪問する予定の六角形の中心点と自身の距離、 r は通信半径、 α はクエリ返信メッセージを待つためのマージンである。この式より、 WT は次に訪問する六角形の中心点との距離が小さい端末ほど小さくなる。 WT 経過した端末 M_t は、受信したローカルクエリメッセージの送信元端末 M_c へ M_t の識別子を含んだクエリ要求メッセージを送信する。

(5) クエリ返信メッセージを受信した端末 M_c は、受信したメッセージ中の返信データと、それまでに他の端末から受信したクエリ返信メッセージ中の返信データ、および自身に関する情報を統合して、自身の返信データを作成する。ここで、作成した返信データに情報が含まれる端末数が k 個を超えた場合、指定位置により近い k 個の端末以外の情報を破棄する。自身が、 n 周目の最後の六角形 $h(n, 6n - 1)$ 内に存在する場合、

手順 8 へ進む。

(6) クエリ要求メッセージを初めて受け取った端末 M_c は検索クエリメッセージをクエリ要求メッセージ送信元端末 M_t へ送信する。このメッセージには、クエリ指定位置、要求端末数 k 、クエリ発行者の識別子 M_s とその位置情報、および自身が作成した返信データが含まれる。

(7) 検索クエリメッセージを受信した端末 M_t は、自身が次に訪問予定の六角形内に存在していれば、その六角形の責任者 (M_c) として、全ての隣接端末にローカルクエリメッセージを送信し、手順 3 へ戻る。一方、自身が次に訪問予定の六角形内に存在していない場合、ローカルクエリメッセージを送信しても次に訪問予定の六角形内の全端末の情報を取得できない可能性が高い。そのため、ローカルクエリメッセージの代わりに、端末探索メッセージを隣接端末へ送信する。このメッセージを受信した各端末は手順 4 と同様の操作を行う (手順 4 へ戻る)。

(8) 端末 M_c は、クエリ発行端末 M_s の位置を指定して 3.2 節に示したジオルーティング手法を用い、自身の返信データ (k 最近傍端末の情報) を含むクエリ応答をクエリ発行端末へ返信する。このとき、自身もしくは隣接端末が、クエリ発行端末から M_p (クエリ指定位置に最も近い端末) までのパス上に存在する場合、改めてジオルーティングは行わず、そのパスに沿ってクエリ応答を返信する。また、経路上の端末がリンク切断していた場合、リンク切断を検出した端末はクエリ発行端末の位置を指定位置として、3.2 節のジオルーティング手法を用いて返信を行う。

SPI 法では、指定位置に最も近い端末から、 k 最近傍端末の情報を取得するまで検索範囲を広げていくため、EXP 法における R のように探索範囲を事前に設定しておく必要はない。しかし、 k が大きく、端末の密度が低い場合などには、多数の六角形にクエリ転送を行う必要があるため、応答時間が大きくなる。さらに、応答時間が大きくなりすぎた場合、クエリ処理中にネットワークのトポロジが変化し、 k 最近傍端末が変化してしまうため、取得精度が低下してしまう。

4. 性能評価

本章では、提案手法 (EXP 法, SPI 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 [4] を用いた。

4.1 シミュレーション環境

2,500[m] × 2,500[m] の 2 次元平面上の領域に n 台の端末 (M_1, \dots, M_n) が存在する。各端末はランダムウェイポイント [1] に従い、0.5 ~ 1.0[m/秒] の速度で移動し、停止時間は 3[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 250[m] 程度となる送信電力でデータを送信する。また、各端末は自身の位置を常に把握しているものとした。クエリ発行端末によって指定される位置は常に (1500, 1500) とした。また、式 (1)、(3) 中の Max_delay 、および k 最近傍推定半径 R は次式のように定めた。

$$Max_delay = \frac{0.01 \cdot n \cdot \pi \cdot r^2}{area}. \quad (4)$$

表 1 メッセージの種類とサイズ

メッセージの種類	サイズ [B]
クエリ (比較手法)	48
返信 (比較手法)	24
隣接端末検索 (ジオルーティング)	48
返信 (ジオルーティング)	8
クエリ (EXP 法)	56
クエリ (SPI 法)	48
ローカルクエリ (EXP, SPI 法)	56
端末探索 (SPI 法)	24
クエリ要求 (SPI 法)	8
クエリ転送 (SPI 法)	72+16 <i>i</i>
クエリ返信およびクエリ応答 (EXP, SPI 法)	32+16 <i>i</i>
返信受信 Ack	8

$$R = 1.3 \sqrt{\frac{k \cdot area}{\pi \cdot n}}. \quad (5)$$

ここで、 n はネットワーク内の全端末数であり、 r は通信半径 250[m]、 $area$ は領域の大きさ ($area = 2,500 \times 2,500$) である。2 つの定数、0.01 および 1.3 は事前実験を基に決定した。

比較手法として、クエリ発行端末がクエリを隣接端末に送信し、その後、文献 [3] で提案されているジオルーティングを用いて、特定の範囲内までクエリを転送する手法を用いた。この手法では、各端末が検索クエリメッセージを受信した際、送信元端末より自身の位置が指定位置に近い場合、もしくは自身が k 最近傍推定半径 (EXP 法と同様) 内に存在する場合、隣接端末に検索クエリを再転送する。さらに、自身が k 最近傍推定半径内に存在する場合、クエリ発行端末まで自身の情報をクエリ応答に添付して返信 (クエリを集約しない) する。以上の動作により、 k 最近傍端末の情報を取得する。

以上のシミュレーション環境において、要求端末数 k を 1 ~ 25 まで変化させ、端末数 500 (図 6)、250 (図 7)、1000 (図 8) の三通りの場合で、各手法の性能を評価した。具体的には、各端末の初期位置をランダムに決定し、ランダムに選択した端末がクエリを発行するという処理を 500 回繰り返し、以下の評価値を調べた。

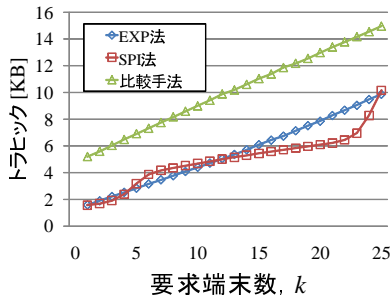
- ・トラフィック: k 最近傍検索クエリを処理するために送信された検索クエリメッセージ、およびクエリ応答メッセージの平均バイト数 (1 クエリ当たりの平均)。表 1 は提案手法、および比較手法における全てのメッセージのサイズを示す。この表において、 i はメッセージに情報が含まれる端末の数である。

- ・応答時間: クエリ発行端末が検索クエリを発行してからクエリ応答を受信するまでの平均時間 (1 クエリ当たりの平均)。比較手法では、クエリ発行端末が、検索クエリを発行してから最後のクエリ応答を受信するまでの時間を応答時間とする。

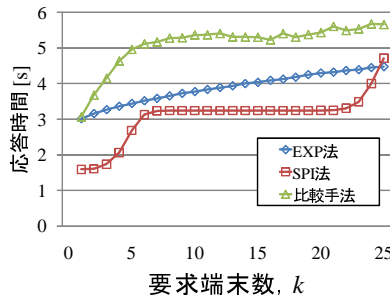
- ・取得精度: クエリ発行時点の指定位置に近い上位 k 個の端末のうち、クエリが情報を取得できた端末数の割合 (1 クエリ当たりの平均)。

4.2 端末数 500 台の場合

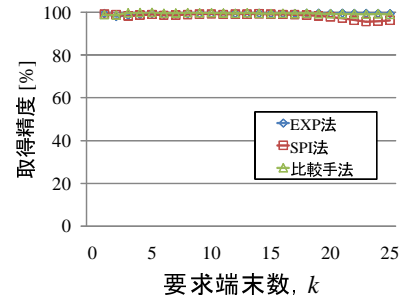
端末数 500 台の場合の結果を図 6 に示す。これらのグラフにおいて、横軸は要求端末数 k を表し、縦軸は、図 6(a) はトラフィック、図 6(b) は応答時間、図 6(c) は取得精度を表す。



(a) トラフィック

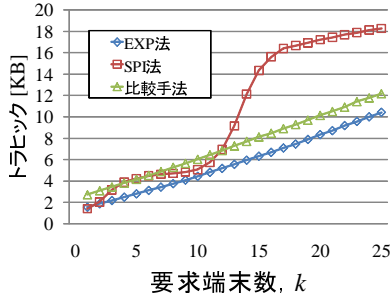


(b) 応答時間

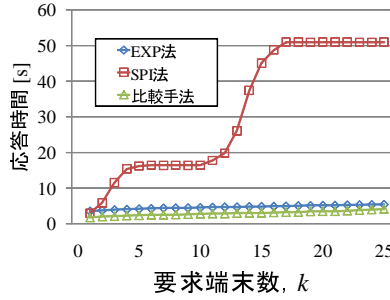


(c) 取得精度

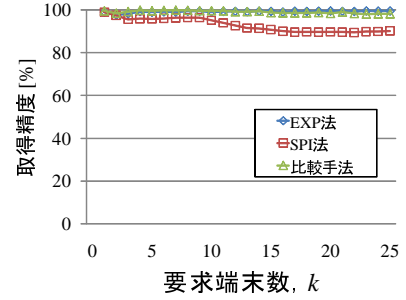
図 6 端末数 500 台の場合



(a) トラフィック



(b) 応答時間



(c) 取得精度

図 7 端末数 250 台の場合

図 6(a) の結果より、要求端末数 k の値が大きくなると、全ての手法でトラフィックが大きくなることがわかる。これは、 k 最近傍検索によるクエリの伝搬範囲、およびクエリ応答に情報が含まれる端末数が増えるためである。提案手法は、ジオルーティングにより、 k 最近傍検索のクエリメッセージを少ないホップ数かつ一本の経路で送信できるため、比較手法よりもトラフィックを削減できている。SPI 法では、トラフィックが、訪問する六角形の周数に大きく影響されるため、階段状に大きくなっている。

図 6(b) の結果より、提案手法は比較手法と比べて応答時間が小さいことが分かる。提案手法では、ジオルーティングにおける RD 、および k 最近傍端末の情報取得時の返信待ち時間 WT が応答時間に大きく影響する。特に、EXP 法では返信時に各端末で待ち時間 WT が発生するので待ち時間が大きくなる。一方、比較手法では、このような待ち時間を必要としないが、トラフィックの増加によるパケットロスが起こりやすいため、パケットの再送の影響により、結果的に提案手法よりも応答時間が大きくなる。

図 6(c) の結果より、全ての手法で高い取得精度を維持できていることが分かる。しかし、提案手法では常に 100% を維持することは難しい。これは、提案手法ではクエリの転送に時間がかかり、そのため端末の位置が移動によって変化し、クエリ発行時と異なる k 最近傍端末の情報取得されたためである。一方、比較手法は、クエリ転送時に待ち時間を設定しないため、高い取得精度を維持できる。 k が大きい場合、EXP 法では取得精度が維持されているのに対して、SPI 法では取得精度が若干下がっている。これは、SPI 法では、六角形の外接円内のみの端末の情報を取得しているため、外接円から若干外れているが k 最近傍端末となりうる端末の情報を取りこぼす場合があるか

らである。

4.3 端末数 250 台の場合

次に、端末数 250 台（低密度）の場合の結果を図 7 に示す。これらのグラフにおいて、横軸は要求端末数 k を表し、縦軸は、図 7(a) はトラフィック、図 7(b) は応答時間、図 7(c) は取得精度を表す。

図 7(a) の結果より、比較手法におけるトラフィックが端末数 500 台の場合より小さいことが分かる。これは、検索クエリメッセージ数が減少するためである。一方、EXP 法では、端末数 500 台の場合と比べ、トラフィックはほぼ変わらない。これは、提案手法で用いているジオルーティング手法では、端末の密度にほぼ関係なく少ないホップ数で、指定位置までクエリメッセージの転送が行われるためである。また、 k 最近傍推定半径は密度を基に決定しているため、密度に関係なく返信データ数がほぼ一定であることにも起因している。SPI 法では、端末数 500 台の場合と比べ、トラフィックが増加している。特に、 k が 11 より大きい場合、急激にトラフィックが増加する。これは、低密度な環境の場合、より多くの六角形を訪問する必要があるためである。また、端末数が 250 台の場合では、一つの六角形内の端末数は平均 1~2 台であるため、クエリの訪問先の六角形内に端末が存在しない可能性がある。このとき、次の六角形内の端末にクエリが転送できるまで再送を繰り返すため、トラフィックが急激に増加する。

図 7(b) の結果より、端末数 500 台の場合と比べて SPI 法の応答時間が大きいことが分かる。これは、SPI 法では、先に述べたように、六角形内に端末が存在しないときに再送を繰り返すため、検索に大きな時間がかかる場合があるためである。したがって、SPI 法は端末の密度が低い環境に適していないことが分かる。他の手法は、端末数 500 台の場合と比べて応答時間

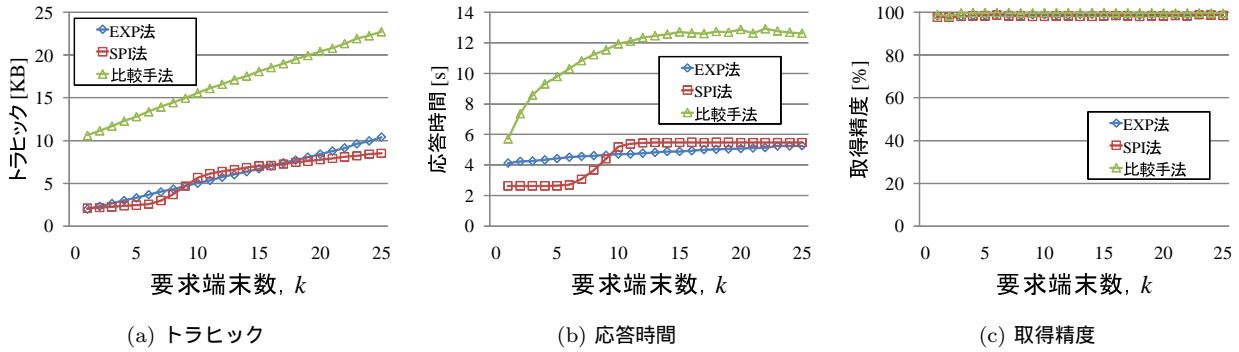


図 8 端末数 1000 台の場合

が小さくなっている．比較手法の応答時間が小さいのは端末数 500 台の場合と比べて、パケットロスが少ないためである．

図 7(c) の結果より、EXP 法および比較手法では、端末数 500 台の場合と同様に高い取得精度を維持できていることが分かる．EXP 法は、 k 最近傍推定半径 R を決定する場合に、端末の密度を考慮しているため、低密度の環境でも高い取得精度を維持することができる．一方、SPI 法では、端末数 500 台の場合より取得精度が低くなっている．これは、先に述べたように、クエリの転送時間が大きくなってしまい、クエリ発行時点と比べて k 最近傍端末が変化したためである．さらに、探索の周数が大きくなるにつれて、六角形の外接円外の端末の情報を取りこぼす機会が多くなったためである．

4.4 端末数 1000 台の場合

最後に、端末数 1000 台の場合の結果を図 8 に示す．これらのグラフにおいて、横軸は要求端末数 k を表し、縦軸は、図 8(a) はトラフィック、図 8(b) は応答時間、図 8(c) は取得精度を表す．

図 8(a) の結果より、端末数 500 台の場合と比べて、比較手法ではトラフィックが非常に大きいことが分かる．これは、検索クエリメッセージ数が増加するためである．一方、提案手法は先に述べたように、端末の密度にほとんど影響を受けることなく、指定位置までクエリを転送することができる．そのため、提案手法は比較手法に比べてトラフィックを削減することができる．また、図 8(b) が示すように、比較手法では応答時間も非常に大きくなっている．

5. 結論

本稿では、アドホックネットワークにおいて、トラフィックを削減しつつ、検索結果の取得精度の維持を目的とする k 最近傍検索手法を提案した．提案手法では、クエリの指定位置に最も近い端末までジオルーティングを用いて、検索クエリメッセージを転送し、その後、指定位置周辺の端末がクエリ応答を行う．周辺の端末の情報を取得する方法として、EXP 法と SPI 法を用いた．EXP 法では、指定位置に最も近い端末が、指定位置を中心とした円内へクエリをフラディングし、その円内の端末は指定位置に最も近い端末へ自身の情報を返信する．SPI 法では、指定位置に最も近い端末から螺旋を描くように、検索クエリメッセージを伝搬していき、指定位置に近い上位 k 個の端末を把握できたら、クエリ発行者へ k 最近傍端末情報の返信を開始する．これらの手法では、エリア全体へのクエリのフラディングや、静的な論理ネットワークの構築の必要がないため、

アドホックネットワーク特有の狭い帯域や動的なトポロジの変化といった問題を解決できる．

シミュレーション実験の結果から、提案手法は、比較手法と比べ、トラフィックを削減しつつ、検索結果の取得精度を維持できることを確認した．特に、EXP 法は、どのような端末密度の場合でもトラフィックの削減と取得精度の維持が達成できている．一方、SPI 法は高密度の場合により結果が得られたが、疎な環境にはあまり適さない．さらに、端末の情報を取得する範囲を六角形の外接円としており、取得精度が下がる原因となっているため、今後、指定位置からの距離を考慮して端末の情報を取得するように拡張する必要がある．なお、本稿の性能評価では、各端末の配置はランダムに決定しており、端末の分布にほとんど偏りのない環境になっていた．これは、領域全体の端末の密度により検索範囲を決定する EXP 法にとって有利であったと考えられる．そのため、今後の課題として、端末の分布に偏りのある環境においても、提案手法を評価をする必要がある．

謝辞

本研究の一部は、(財) 近畿移動無線センター・モバイルワイヤレス助成金、文部科学省科学研究費補助金・基盤研究 S(21220002)、特定領域研究 (18049050)、および総務省委託研究「ユビキタスサービスプラットフォーム技術の研究開発」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] T. Camp, J. Boleng, and V. Davies "A Survey of Mobility Models for Ad Hoc Networks Research," *Wireless Communications and Mobile Computing (WCMC)*, Vol.2, No.5, pp.483-502, 2002.
- [2] M. Heissenbüttel, T. Brtnoulli, and M. Walchli "BLR: Beacon-Less Routing Algorithm for Mobile Ad-Hoc Networks," *Computer Communications*, Vol.27, No.11, pp.1076-1086, 2004.
- [3] Y.B. Ko, and N.H. Vaidya "Flooding-Based Geocasting Protocols for Mobile Ad Hoc Networks," *Mobile Networks and Applications*, Vol.7, No.6, pp.471-480, 2002.
- [4] Scalable Network Technologies: "Qualnet," <http://www.scalable-networks.com/>.
- [5] Y. Xu, T.Y. Fu, W.C. Lee, and J. Winter "Processing k Nearest Neighbor Queries in Location-aware Sensor Networks," *Signal Processing*, Vol.87, No.12, pp.2861-2881, 2007.
- [6] Y. Yao, X. Tang, and E.P. Lim "Continuous Monitoring of k NN Queries in Wireless Sensor Networks," *Proc. International Conference on Mobile Sensor Network*, pp.663-674, 2006.