

アドホックネットワークにおける端末の疎密を考慮した 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[†]

[†] 大阪大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻 〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 1-5

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

あらまし 近年、アドホックネットワークにおける位置依存サービスへの関心が高まっている。位置依存サービスにおいて、ある指定した位置から距離の近い上位 k 個の端末の情報を検出する、 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。筆者らはこれまでに、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取得精度の維持が可能な k 最近傍検索手法を提案した。この方法では、端末の疎密がある環境において効果的な検索ができない。本稿では、アドホックネットワークにおいて、端末の疎密を考慮して検索の範囲を動的に設定し、範囲内の端末の情報を取得する k 最近傍検索手法を提案する。

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

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

[†] Dept. of Multimedia Eng., Graduate School of Information Science and Tech., Osaka University

1-5 Yamadaoka, Suita, Osaka, 565-0871 Japan

E-mail: †{komai.yuka,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、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。そのため、例えば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 20 人にクーポンや情報の配布を行うような応用が考えられる。

筆者らの研究グループでは、これまでの研究において、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取得精度の維持を目的とした k 最近傍検索手法である EXP 法を提案した [4]。この手法では、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によりクエリを転送し、その後、指定位置を中心とした特定の円範囲 (k 最近傍推定円) に存在する端末にクエリをフラッディングする。このクエリを受信した円内の端末は、フラッディングを開始した端末に自身の端末の情報を返信し、その後、クエリ発行端末まで取得結果を返信する。この方法により、トラヒックを削減しつつ取得精度を維持して k 最近傍検索が行えることを示した。

ここで、 k 最近傍推定円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、 k 最近傍推定円を大きく設定すると、検索結果に入らない端末も返信する可能性が高く、無駄なトラヒックが大きくなる。 k 最近傍推定円の大きさは、性能に大きく影響するため適切に設定することが重要となる。文献 [4] で提案している EXP 法では、ネットワーク全体の端末数、および領域の大きさを利用して、

k 最近傍推定円の大きさを設定した。しかし、実環境ではこれらの情報を事前に知ることが困難な場合がある。また、ネットワーク内で端末の密度に疎密がある場合には、ネットワーク全体の端末数や領域数を把握していても k 最近傍推定円を適切に設定することは難しいと考えられる。

そこで、本稿では EXP 法を拡張し、端末の疎密がある場合にも、事前にネットワークの情報を取得することなく、トラヒックの削減および取得精度の維持が可能な手法を提案する。提案手法では、 k 最近傍推定円を設定するために必要な情報を、クエリ処理中のメッセージ交換により取得し、指定位置に最も近い端末が k 最近傍推定円を動的に設定する。 k 最近傍推定円の設定方法として、1 ホップの端末情報を用いる方法および過去のクエリ情報を用いる方法を提案する。1 ホップの端末情報を用いる方法では、クエリを受信した指定位置に最も近い端末がクエリをブロードキャストし、これを受信した隣接端末からの返信により、指定位置周辺の端末の密度を取得し、 k 最近傍推定円を設定する。一方、過去のクエリ情報を用いる方法では、クエリの応答時に、クエリ実行時の端末の密度情報を中継端末に記録し、次のクエリ実行時にこの情報から指定位置付近の端末の密度を推定し、 k 最近傍推定円を設定する。提案手法により、ネットワークの情報を事前に取得することなく、さらに端末の密度に疎密がある場合にも k 最近傍推定円を適切に設定することができる。

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 EXP 法と同等の高い取得精度を実現し、さらにトラヒ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、その後、3. で先行研究について述べる。次に、4. で提案手法について述べ、5. でシミュレーション実験の結果を示す。最後に、6. 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、センサネットワークにおける k 最近傍検索に関する従来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。

センサネットワークにおいて、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。このうち、 k 最近傍端末が存在すると考えられる範囲を推定し、この範囲内の端末の情報を取得することにより k 最近傍検索を行うものについて述べる。

文献 [2], [6] では、各センサがビーコン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において、 k 最近傍検索を行う方法を提案している。これらの手法では、まず指定位置付近にクエリを転送し、クエリ転送中に取得した情報を用いて、 k 最近傍端末が存在するであろう範囲を推定する。文献 [6] では、クエリ転送時に、クエリを転送する各端末が自身と指定位置までの距離、および自身の隣接端末のうち送信元端末の通信範囲外に存在する端末の数をクエリに添付する。クエリを受信した指定位置に最も近い端末は、添付されている各端末までの距離を小さいものから順に参照し、その距離を半径とする円内に k 個以上の端末を含むかどうかを推定

し、 k 個以上の端末を含む最小の円を範囲として設定する。一方、文献 [2] では、クエリ転送経路上の端末でカバーできる通信範囲の総面積およびその範囲に存在する端末数を更新しながらクエリに添付し、指定位置に最も近い端末で端末の平均密度を算出することにより、範囲を設定する。その後、これらの方法によって設定した範囲を分割し、それぞれの範囲ごとに事前に設計した経路に従ってクエリを伝搬することにより、 k 最近傍端末の情報を取得する。これらの研究は、各センサがビーコンメッセージの頻繁な交換などにより隣接端末の正確な位置情報を把握している場合を想定しており、端末の移動により頻繁にトポロジの変化するアドホックネットワークには、適していない。

文献 [7] では、 k 最近傍端末が存在すると推定した範囲内で、木構造の論理ネットワークを動的に構築し、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方法として KBT を提案している。この手法において、 k 最近傍端末が存在するであろう範囲を設定する方法として、クエリ転送時のホップ数より見積もりを行う方法等、いくつか提案し比較検討を行っている。しかし、これらの設定方法では、基本的に k 個以上の端末を取得することを保証するため大きめの範囲を設定するため、返信端末数の増加による無駄なトラヒックが生じる。また、この研究は基本的に静的なネットワーク環境を想定しており、移動端末を検索対象とする本研究とは異なる。

文献 [3] では、三次元空間での k 最近傍検索を扱っており、モバイルエージェントを用いて、できるだけ効率的な経路による検索を行う手法を提案している。この手法では、端末は均一に配置され、かつネットワークのサイズおよび端末数は既知であることを想定しており、これにより算出したネットワークの平均端末密度を基に k 最近傍端末が存在する領域 (球) を推測し、 k 最近傍検索を行う。しかし、現実には、端末の配置に疎密がある場合や、ネットワーク内の情報を事前に取得できない場合も考えられ、本研究ではこのような環境も考慮している。

3. 先行研究：EXP 法

本章では、先行研究 [4] において提案した k 最近傍端末の検索手法である EXP 法について簡単に述べる。

3.1 指定位置へのクエリの伝搬

EXP 法では、3 ウェイハンドシェイクを用いたジオルーティングにより、指定位置により近い端末へのクエリ転送を繰り返し、指定位置に最も近い端末までクエリを伝搬する。

具体的には、まず、送信元端末が隣接端末検索メッセージをブロードキャストし、これを受信した端末が送信元端末より指定位置に近い場合、返信待ち時間を設定する。この返信待ち時間は、指定位置に近ければ近いほど短く設定されるため、指定位置に最も近い端末が最も早く送信元端末へ返信を行う。返信を受け取った送信元端末は、返信元端末へクエリを送信する。これを繰り返し、指定位置に最も近い端末までクエリを伝搬する。

このジオルーティング手法により、1 本の経路でクエリの転送が行えるため、少ないトラヒックで指定位置に最も近い端末

までクエリを伝搬することが可能である。

3.2 k 最近傍端末へのクエリの転送, 返信

EXP 法では, 各端末はネットワーク全体の領域の大きさとしてネットワーク内に存在する端末数を既知であると想定している。そのため, クエリ発行端末はまず, 領域の大きさと全端末数, 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, 3.1 節で述べ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まで, k 最近傍推定半径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, 返信待ち時間 WT を指定位置から遠いほど小さな値に設定し, WT 経過後, 位置情報を含む自身の情報を添付したクエリ返信メッセージを, ローカルクエリ送信元端末へ送信することを繰り返し, 指定位置に最も近い端末まで送信する。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, クエリ発行端末までクエリ転送時の経路を用いて返信する。ただし, クエリ転送経路上でリンクの切断を検出した場合は, クエリ発行端末の位置を指定位置として, 再びジオルーティングを行うことにより, リンク切断に対応する。

図 1 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。まず, M_1 は隣接端末にローカルクエリメッセージを送信する。 k 最近傍推定円 (半径 R) 内の M_5 は, このメッセージを受信すると, 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_6 もローカルクエリメッセージを隣接端末へ送信するが, これを受信した M_7 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_6 は設定された WT 経過後, M_5 へクエリ返信メッセージを送信する。これを受信した M_5 は自身が設定した WT の経過後, M_5 と M_6 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, 指定位置に最も近い端末が 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, 取得精度を維持しつつトラフィックを削減できる。EXP 法では, 既知である領域の大きさと全端末数を基に k 最近傍推定半径 R を設定をする。しかし, 実環境では, ネットワーク全体の端末数, および領域の大きさを必ずしも事前に知ることができない。さらに, 領域内の端末の密度が一定ではない場合, R を適切に設定することができない。

4. 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, 1 ホップの端末情報を用いた k 最近傍検索手法の検索手順について説明する。次に, 過去のクエリ情報を用いた k 最近傍検索手法の検

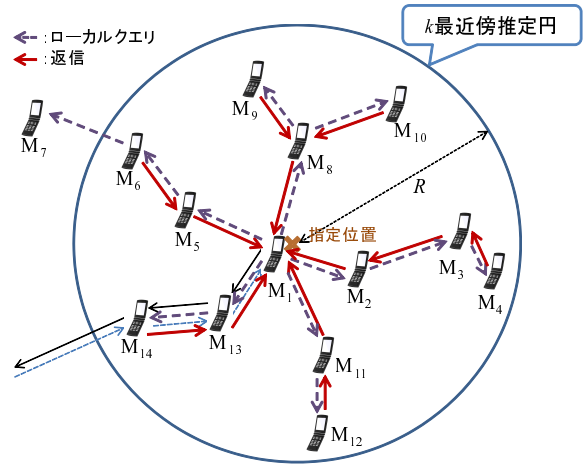


図 1 EXP 法におけるクエリ転送例

索手順について説明する。

4.1 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に近い上位 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。各端末は, 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。

4.2 1 ホップの端末情報を用いた k 最近傍検索手法

k 最近傍端末は, 指定位置の周辺に存在しているため, 適切な k 最近傍推定円を設定するためには, 指定位置付近の端末の密度を取得できることが好ましい。特に, 端末の密度に疎密がある場合, ネットワーク全体の密度の情報を取得できても指定位置付近の情報を取得できなければ, 適切な k 最近傍推定円を設定することができない。そこで, 指定位置付近の端末の密度を取得するため, 指定位置に最も近い端末はクエリを受信した後, 隣接する端末へメッセージを送信し, これらの端末の情報を取得する。これにより, リアルタイムに指定位置付近の端末の密度を算出することができ, k 最近傍推定円の大きさを適切に設定することができる。

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。なお, 手順 (6) 以降は, 従来の EXP 法と同様である。

(1) クエリ発行端末 M_s は指定位置, および要求端末数 k を決定し, EXP 法同様, 3.1 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, および指定位置の位置情報が含まれる。

(2) 検索クエリを受信した指定位置に最も近い端末 M_p は, 1 ホップ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, M_p の識別子および指定位置の位置情報が含まれる。

(3) 1 ホップクエリメッセージを受信した端末 M_q は、指定位置から自身までの距離が通信半径以内である場合、送信元端末へ1 ホップ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、その端末 (M_q) の識別子と位置情報が含まれる。

(4) 1 ホップクエリ返信メッセージを受信した端末 M_p は、受信したメッセージ中の返信データを保存する。ここで、保存した返信データ数 (つまり返信した端末数) 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し、手順 (11) へ進む。

(5) 端末 M_p は、受信した返信データおよび自身に関する情報を用いて、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 を以下の式により決定する。

$$R = \alpha \cdot l \cdot \sqrt{\frac{k}{n'}} \quad (1)$$

ここで、 l は M_p が返信を受信した端末のうち指定位置から最も遠い端末と指定位置との距離であり、 n' は返信した端末数 (自身を含む)、 α はパラメータである。

(6) 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。

(7) 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。

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

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 との距離であり、 β はパラメータである。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。

(8) 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、端末の識別子と位置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。

(9) クエリ返信メッセージを (子端末から) 受信した端末は、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

末へ返信し、手順 (8) へ戻る。自身が指定位置に最も近い端末の場合、手順 (10) へ進む。

(10) 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、返信データに k 個以上の端末の情報が含まれている場合、手順 (11) へ進む。返信データに含まれるデータが k 個未満の場合、 k 最近傍推定円の再推定を行い、メッセージを再送する。この再推定および再送の回数は T 回までとし、再送回数が T 未満の場合、手順 (5) へ戻る。 T に達した場合、手順 (11) へ進む。

(11) 端末 M_p は、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端末へ送信する。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、3.1 節のジオルーティング手法を用いて返信を行う。

この方法により、指定位置付近の端末の密度を算出することができ、適切な大きさの k 最近傍推定円を設定することができる。そのため、 k 最近傍端末に含まれないような端末へのクエリ伝搬および返信による、無駄なトラフィックを削減することができる。また、 k 最近傍推定円を小さく設定してしまい、 k 最近傍端末の情報を取得できなかった場合においても、 k 最近傍推定円の再推定および再送を行うため、取得精度を維持することが可能である。

4.3 過去のクエリ情報を用いた k 最近傍検索手法

連続的にクエリが発行される場合、以前の検索時の情報を共有することにより、より広範囲でネットワークの端末の密度情報を正確に取得することができる。そこで、クエリ応答時に、取得した端末の情報より算出した密度情報を、クエリ応答の中継端末が記録する。その後発行されるクエリにおいて、この記録した情報を、ジオルーティング中のメッセージに添付する。指定位置に最も近い端末は、クエリに添付された密度情報を用いて k 最近傍推定円の大きさを決定する。これにより、端末間で特別なメッセージの交換をすることなく、ネットワークの密度情報を広範囲に取得することができるため、より適切に k 最近傍推定円の大きさを設定することができる。

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) クエリ発行端末 M_s は、指定位置、および要求端末数 k を決定する。端末 M_s が過去のクエリ情報 (クエリログ) を保持している場合、以下の条件を満たすクエリログを、クエリに添付する。

- 保持しているクエリログの指定位置および発行時間が、既にクエリに添付済みもしくは保持しているほかのクエリログのいずれに対しても、現在のクエリの指定位置により近い、もしくは、発行時間がより新しい、のいずれかを満たす。

3.1 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、およびクエリログ (指定位置、クエリ発行時間、要求端末数 k_{past} 、指定位置から k_{past} 番目の端末までの距離) のリストが含まれる。

(2) ジオルーティング中、クエリを受信した中継端末 M_t は、自身がクエリログを保持している場合、手順 (1) に示した条件に当てはまるクエリログにさらに添付してクエリを転送する。

(3) 指定位置に最も近い端末 M_p が検索クエリを受信する。検索クエリにクエリログが添付されていない、かつ、自身もクエリログを保持していない場合、4.2節の手順 (2) から (9) までの動作を行い、手順 (4) へ進む。それ以外の場合、 M_p は、クエリに添付されたクエリログおよび自身が保持するクエリログに対して、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 を次の式により決定する。

$$R' = l' \cdot \sqrt{\frac{k}{k_{past}}} \quad (3)$$

$$R = R' \cdot \left(1 + \frac{d}{\gamma}\right) \cdot \left(1 + \frac{t}{\theta}\right) \quad (4)$$

ここで、 l' はこのクエリログに該当するクエリ（前クエリと呼ぶ）における指定位置と k_{past} 番目の端末までの距離、 k_{past} は前クエリの要求端末数である。また、 d は前クエリの指定位置と現在のクエリの指定位置との距離、 t は現在のクエリと前クエリの発行時間の差、 γ および θ はパラメータである。この式を用いることで、クエリログが現在のクエリの指定位置からより遠く、さらに、より古いものである場合、より大きく k 最近傍推定円を設定することで、推定誤差による取得精度の低下を防いでいる。なお、対象となるクエリログが複数存在する場合、各クエリログにおいて R を算出し、このうち最も小さいものを k 最近傍推定円の半径とする。その後、4.2節の手順 (6) から (9) までの動作を行い、手順 (4) へ進む。

(4) 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、返信データに k 個以上の端末の情報が含まれているもしくは再送回数が T に達している場合、手順 (5) へ進む。再送回数が T 未満、かつ返信データに情報が含まれる端末数が k 個に満たない場合、4.2節の手順 (5) から (9) までの動作を再度行う。

(5) 端末 M_p は、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端末へ送信する。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、3.1節のジオルーティング手法を用いて返信を行う。この時、端末 M_p 、中継端末、およびクエリ発行端末 M_s にこのクエリのクエリログ（指定位置、クエリ発行時間、要求端末数 k 、指定位置から k 番目の端末までの距離）を記録する。

この方法では、過去のクエリの情報を利用することで、指定位置付近の密度を推定できるため、特別なメッセージ交換することなく k 最近傍推定円を設定できる。また、添付するクエリログは添付済の他のクエリログよりも正確に k 最近傍推定円を設定できる可能性が高いもののみを選択しているため、無駄にメッセージサイズが大きくなることを防いでいる。

5. 性能評価

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 [5] を用いた。

5.1 シミュレーション環境

1,000[m] × 1,000[m] の2次元平面上の領域に500台の端末 (M_1, \dots, M_{500}) 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 100[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。ここで、式 (1) 中の α 、式 (2) 中の β 、および式 (4) 中の θ は、事前実験を基にそれぞれ 1.1、1、500 と設定した。ここで、 γ は本実験では影響しないため、任意の値 ($\neq 0$) とする。

比較手法として、EXP 法 [4] を使い、 k 最近傍推定半径 R を2種類の方法で設定した。まず、1つ目は、各端末がネットワーク内の端末数 n 、および端末が存在する領域の大きさを把握しているものとし、指定位置に最も近い端末が k 最近傍推定半径 R を次式のように設定する。

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

ここで、 n はネットワーク内の全端末数であり、 $area$ は領域の大きさ ($area = 1,000 \times 1,000$) である。2つ目の方法は、理想値として、指定位置から k 番目に近い端末と指定位置との距離を k 最近傍推定半径 R に設定した。これを、実験結果においては「理想値」と表記する。

以上のシミュレーション環境において、要求端末数 k を 1~100 まで変化させ、各手法の性能を評価した。ここで、移動モデルの特性よりネットワークに疎密ができる（十分時間が経つと中央付近が密となる）ため、クエリ発行端末によって指定される位置は常に (500, 500) とし、ネットワーク内の平均の端末密度よりも密な指定位置の場合を評価した。また、各端末の初期位置をランダムに決定し、1時間経過後、20秒ごとに100回ランダムに選択した端末が k 最近傍検索クエリを発行し、以下の評価値を調べた。

• トラヒック

k 最近傍検索クエリを処理するために送信された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、 p はクエリに添付されているクエリログの数、 q はメッセージに情報が含まれる端末の数である。

• k 最近傍推定円内の端末数

指定位置に最も近い端末が k 最近傍推定半径 R を設定した時点で、指定位置から自身の距離が R 以下の範囲に存在した平均端末数（1クエリ当たりの平均）。提案手法において、1ホップクエリメッセージにより k 個の端末の情報が取得できた場合、指定位置から通信半径以内に存在する端末の数を k 最近傍推定円内の端末数とする。

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]
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)	16
クエリ (1 ホップ, 比較手法)	64
クエリ (クエリログ)	64+32 <i>p</i>
1 ホップクエリ	32
1 ホップ返信	16
ローカルクエリ	64
クエリ返信	16+16 <i>q</i>
クエリ応答 (1 ホップ, 比較手法)	44+16 <i>q</i>
クエリ応答 (クエリログ)	60+16 <i>q</i>
返信受信 Ack	16

• 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。

$$AP_i = \frac{1}{h} \sum_{j=1}^h \frac{x}{j} \cdot e \quad (6)$$

$$MAP = \frac{1}{querynum} \sum_{i=1}^{querynum} AP_i \quad (7)$$

AP_i は i 番目のクエリの平均精度である。 h は正解集合の数であるため、要求端末数 k に相当し、 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し、本実験では 100 となる。また、 e は以下のように定義される。

$$e = \begin{cases} 1 & (j \text{ 番目の解が正解集合に含まれる}) \\ 0 & (j \text{ 番目の解が正解集合に含まれない}) \end{cases} \quad (8)$$

したがって、MAP は、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、より上位の端末の情報を取得できているほど、高い値となる。

• 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)。

5.2 要求端末数 k の影響

要求端末数 k を変化した場合の結果を図 2, 3, 4, および 5 に示す。これらの図中のグラフにおいて、横軸は要求端末数 k を表し、縦軸は、図 2 はトラヒック、図 3 は k 最近傍推定円内の端末数、図 4 は取得精度、図 5 は応答時間を表す。図中で、1 ホップの端末情報を用いた提案手法、および過去のクエリ情報を用いた提案手法は、それぞれ 1 ホップ、クエリログと示し、これらについては、再送を行わない場合 ($T=0$) と再送を 1 度のみ行う場合 ($T=1$) の 2 種類を評価した。

図 2 の結果より、要求端末数 k の値が大きくなると、全ての

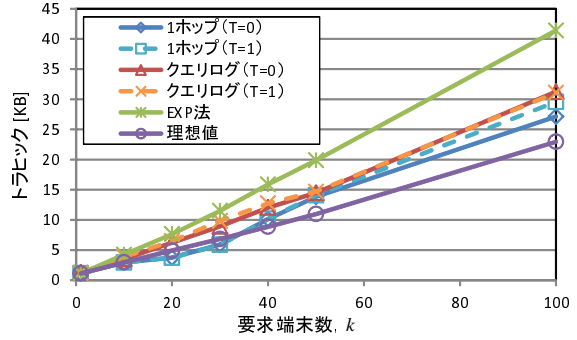


図 2 トラヒック

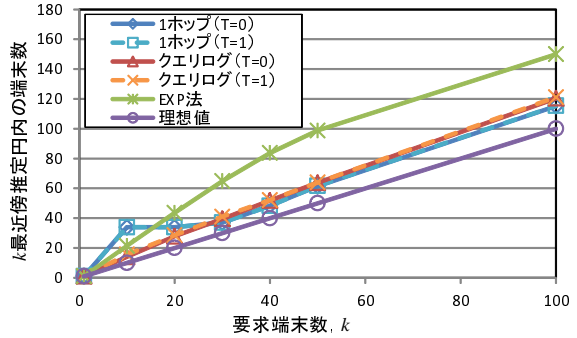


図 3 k 最近傍推定円内の端末数

手法でトラヒ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、およびクエリ応答のメッセージサイズが増加するためである。ここで、EXP 法は非常に大きなトラヒックが発生している。これは、本実験の指定位置は、ネットワーク全体の端末密度に比べて密となっていたため、ネットワーク全体の平均端末密度から k 最近傍推定半径 R を設定する EXP 法では R を過度に大きく設定してしまったためである。一方、1 ホップの端末情報を用いた手法では k が 10 以上で 30 以下の場合、理想値を設定した方法よりもトラヒックが小さくなっている。これは、1 ホップクエリメッセージで取得できる端末の数が k 個以上となり、ローカルクエリを送信することなく、クエリ応答を返信することができるためである。理想値を設定した手法では、1 ホップ内で k 個の端末が取得できているにも関わらず、 R 内の端末はローカルクエリメッセージを再度送信するため、余計なトラヒックが発生してしまう。提案手法では、図 3 から分かるように、理想値に近い端末を含む半径 R を推定できており、EXP 法と比べて、小さいトラヒックで k 最近傍検索ができています。また、一度目の見積みにより k 個の端末の情報を取得できず、 R の再推定および再送を行う場合 ($T=1$) でも、EXP 法よりも小さなトラヒックとなることがわかる。

図 4 の結果より、全ての手法で取得精度が 1 となっていない。これは、返信の際の衝突により、全ての端末の情報を取得することができないためである。ここで、EXP 法が理想値を設定する手法より取得精度が低くなるのは、 R を大きく設定したことによる返信数の増加により、パケットの衝突がより頻繁に起こるためである。一方、1 ホップの端末情報を用いた手法 ($T=0$)

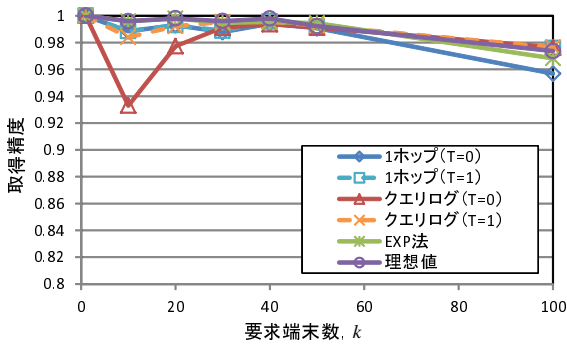


図 4 取得精度

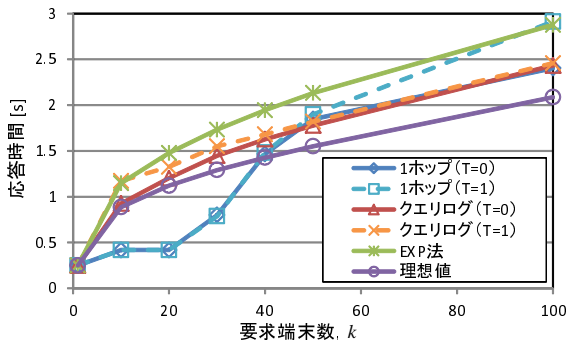


図 5 応答時間

では、 k が小さいとき、高い取得精度を保つことができているが、 k が大きくなると、取得精度が下がってしまう。これは、1ホップの端末情報を用いた手法では、1ホップクエリメッセージにより指定位置付近の端末の密度を取得するため、 k が小さいときには、正確に見積もりを行えるが、 k が大きく、端末の密度が指定位置付近とは異なるような場合には、 R の推定精度が下がるためである。ここで、図 3 より、1ホップの端末情報を用いた手法において、 k 最近傍推定円内の端末数が k を超えているが、 k 個未満の端末しか含まない R を設定する場合も存在し、この影響が取得精度に影響している。また、過去のクエリ情報を用いた手法 ($T=0$) では、 k が大きいときに、理想値と同等の取得精度を維持できているが、 k が小さい場合に取得精度が低くなっている。これは、端末の移動により、推定に用いるクエリログの密度と現在の密度が大きく異なる場合、 k が小さいほど、その影響が取得精度に大きく反映されるためである。しかし、提案手法 ($T=1$) からわかるように、 R の再推定および再送により、取得精度を維持することができるがわかる。

図 5 の結果より、トラヒック同様、要求端末数 k が大きくなるほど、全ての手法で応答時間が大きくなっていることがわかる。これは、応答時間は返信待ち時間 WT に大きく影響を受けるが、 WT は R に依存しているため、要求端末数 k が大きくなるほど k 最近傍推定半径 R が大きく設定され、 WT も大きな値となるためである。そのため、 R を大きく設定している EXP 法では、応答時間が最も大きくなる。一方、1ホップの端末情報を用いた手法では、 k が 30 以下の場合、小さい応答時間で k 最近傍端末の情報を取得できていることが分かる。

これは、先に述べたとおり、ローカルクエリを送信することなく、クエリ応答を返信することができるためである。また、 k が大きくなったときに過去のクエリ情報を用いる手法および理想値を設定する手法よりも応答時間が大きくなっているが、これは、1ホップクエリ返信メッセージの取得待ち時間の増加に伴い、応答時間が大きくなるためである。過去のクエリ情報を用いた手法 ($T=0$) では、 k が大きいときにも、過去のクエリ情報を用いて有効な R が設定できるため、小さい応答時間で k 最近傍端末の情報を取得できる。さらに、提案手法の $T=1$ の場合には、再送を行うため応答時間は大きくなるが、この場合にも EXP 法と同程度の応答時間であることがわかる。

6. 結 論

本稿では、アドホックネットワークにおいて、ネットワーク内の端末の疎密を考慮して、トラヒックを削減しつつ、検索結果の取得精度の維持が可能な k 最近傍検索手法を提案した。提案手法では、筆者らが先行研究において提案した EXP 法を拡張し、 k 最近傍推定円を設定するために必要な情報を、クエリ処理中のメッセージ交換により取得し、指定位置に最も近い端末が k 最近傍推定円を動的に設定する。 k 最近傍推定円の設定方法として、1ホップの端末情報を用いる方法および過去のクエリ情報を用いる方法を提案した。1ホップの端末情報を用いる方法では、クエリを受信した指定位置に最も近い端末がクエリをブロードキャストし、これを受信した隣接端末からの返信により、指定位置周辺の端末の密度を取得し、 k 最近傍推定円を設定する。一方、過去のクエリ情報を用いる方法では、クエリの応答時に、クエリ実行時の端末の密度情報を中継端末に記録し、次のクエリ実行時にこの情報から指定位置付近の端末の密度を推定し、 k 最近傍推定円を設定する。提案手法により、ネットワークの情報を事前に取得することなく、さらに端末の密度に疎密がある場合にも k 最近傍推定円を適切に設定することができる。これにより、無駄な端末からの返信を防ぐことができるため、トラヒックを削減することができる。

シミュレーション実験の結果から、提案手法では、EXP 法と比べて k 最近傍推定円を適切に設定することにより、取得精度を維持しつつトラヒックを削減できていることを確認した。また、 k 最近傍推定円を小さく見積もってしまった場合にも、 k 最近傍推定円を再推定し、円内の端末の情報の取得を行うことで、取得精度の維持を達成できることも確認した。特に、 k が小さいとき、1ホップの端末の情報を用いる方法は有効であり、また、 k が大きいときにも、過去のクエリ情報を用いることで小さな取得時間で有効な R が設定できていることがわかった。

なお、本稿の性能評価では、クエリの指定位置を固定的に選択していたため、特に k が大きい場合に過去のクエリ情報を用いる方法に有利な環境となっていた。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、指定位置をランダムに選択して提案手法を評価する必要がある。また、2つの提案手法を組み合わせるもしくは適切なタイミングで切り替えることにより、ネットワーク内の情報を取得することなく、より正確な k 最近傍推定円の設定ができるように、手法を拡張す

る予定である。

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、および文部科学省科学研究費補助金・基盤研究S(21220002)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 (WCMC2002)*, Vol.2, No.5, pp.483-502, 2002.
- [2] T.Y. Fu, W.C. Peng, and W.C. Lee, “Parallelizing Itinerary-Based KNN Query Processing in Wireless Sensor Networks,” *Knowledge and Data Engineering*, Vol.22, No.5, pp.711-729, 2010.
- [3] P.P. Jayaraman, A. Zaslavsky, and J. Delsing, “Cost-Efficient Data Collection Approach Using K-Nearest Neighbors in a 3D Sensor Network,” *Proc. Int. Conf. on Mobile Data Management (MDM2010)*, pp.183-188, 2010.
- [4] 駒井友香, 佐々木勇和, 原 隆浩, 西尾章治郎, “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,” データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム (DEIM 2011), 2011.
- [5] Scalable Network Technologies: “Qualnet,” <http://www.scalable-networks.com/>.
- [6] S.H. Wu, K.T. Chuang, C.M. Chen, and M.S. Chen, “Toward the Optimal Itinerary-Based KNN Query Processing in Mobile Sensor Networks,” *Knowledge and Data Engineering*, Vol.20, No.12, pp.1655-1668, 2008.
- [7] 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.