アドホックネットワークにおけるk最近傍データ検索手法

駒井友香[1,a)]　佐々木勇和[1,b)]　原 隆浩[1,c)]　西尾章治郎[1,d)]

概要：位置依存情報の検索方法として，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 個の位置依存データ（k 最近傍データ）を取得する，k 最近傍検索がある．アドホックネットワークにおいて，k 最近傍検索を実現する方法として，特定の端末が全てのデータを収集し，集中管理することが考えられる．しかし，この手法を実現するためには，データが発生する毎にある特定の端末にデータの転送を行わなければならず，大きなトラヒックが発生する．さらに，特定の端末周辺にトラヒックが一時的に集中するため，転送されたデータやクエリのパケットロスにより，取得精度が低下する．本稿ではアドホックネットワークにおいて集中管理をすることなく，トラヒックの削減および取得精度の維持を可能にする，k 最近傍データ検索手法を提案する．

1. はじめに

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．

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，周辺情報の収集等，位置に依存したデータを検索するような位置依存サービスが求められている．例えば，各端末が自身が存在する地点の温度や騒音等の環境情報を収集するセンサの役割をし，その他の端末が特定の地点の情報を検索することが考えられる．位置依存情報の検索方法として，ユーザが指定した特定の位置の近くに関連したデータを取得する，k 最近傍（k-Nearest Neighbor，kNN）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（クエリポイント）に対して，その位置から距離の近い上位 k 個の位置依存データ（k 最近傍データ）を検索することにより，必要なデータを効率的かつリアルタイムに取得することができる．

これまでに筆者らの研究グループでは，アドホックネットワークにおいて k 最近傍端末を検索する EXP 法を提案した [5]．この手法では，検索の対象をクエリポイントに最も近い k 個の端末とし，クエリポイントに最も近い端末にクエリを送信した後，k 個の端末が高確率で存在する範囲を推定して，その範囲内の端末の情報を取得する．しかし，k 最近傍検索を位置依存データに対して行う場合，端末自体を検索する場合と異なる点が存在する．具体的には，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，データを保持したまま端末が移動すると，データが発生した位置から離れてしまう．そのため，クエリポイント付近のみを検索する EXP 法をそのまま適用した場合，必要な情報を取得できない可能性が高い．一方，全ての端末にクエリを送信し検索を行うと必要なデータを取得することができるが，無駄な端末へのクエリの送信やデータの返信によるトラヒックが増加してしまう．

この問題を解決する単純な方法として，ある特定の端末が全てのデータを収集し，集中管理すれば，特定の端末にアクセスすることにより必要なデータを取得することができる．しかし，この方法を実現するためには，データが発生する毎に特定の端末にデータを転送する必要がある．特に，領域サイズが大きい場合や，データの更新が頻繁な場合には，データの転送に非常に大きなトラヒックが発生する可能性がある．また，全てのクエリが特定の端末に送信

[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
〒 565-0871 大阪府吹田市山田丘 1-5
[a)] komai.yuka@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

ⓒ2012 Information Processing Society of Japan

されるため，一時的にその周辺への負荷が大きくなってしまう．そのため，特定の場所にデータを集中させるのではなく，ネットワーク内で分散的に k 最近傍検索を処理する技術が必要となる．

そこで，本稿ではアドホックネットワークにおいて位置依存データを集中管理をすることなく，トラヒックの削減および取得精度の維持を可能にする，k 最近傍データ検索手法を提案する．提案手法では，端末が自身の保持するデータの発生位置から一定の距離（保証距離）以上離れた場合，そのデータをデータの発生位置に最も近い端末へデータを転送する．これにより，データを発生位置付近に留めておくことができる．検索では，EXP 法を拡張し，端末の移動を考慮して k 最近傍データが存在する範囲を推定し，範囲内の端末の持つデータを検索することで k 最近傍データを取得する．提案手法により，一箇所にデータを集めたり，ネットワーク全体へクエリを転送する必要がないため，トラヒックの削減および特定の端末に負荷を集中させることなく，位置依存データに対して k 最近傍検索を行うことができる．

シミュレーション実験の結果，提案手法が単純な手法に比べ，取得精度を維持しつつ，トラヒックを削減できることを確認した．

以下では，2. で関連研究について述べる．次に，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，位置依存サービスにおけるデータの取り扱いに関する従来研究，および，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．

2.1 位置依存サービスにおけるデータの取り扱い

文献 [3] では，センサネットワークにおいて帯状の範囲に存在する端末に全てのデータを収集し，配置することで，その範囲内の端末へのアクセスによりデータを取得する手法を提案している．この文献により，端末からの平均的なホップ数が小さくなるため，ネットワークの中心にデータを配置することが有効であることが示されている．しかし，この手法では，k 最近傍検索を考慮しておらず，また，位置依存データについての効率的な配置については対象としていない．文献 [9] では，アドホックネットワークにおいて位置依存データの共有を行うための複製配置手法を提案している．この方法では，効果的に複製を配置することで，データへの高いアクセス成功率を達成している．この研究では，特定の位置に関する一つのデータへのアクセスを想定しているが，本研究では特定の位置に近い複数のデータを取得することを目的としている．ここで，複製を配置することは k 最近傍検索においても効果的であるが，本研究では，複製の配置を想定していない．文献 [12] では，センサネットワークにおいてインフラを用いることなく位置依存サービスを提供するシステムを提案している．このシステムでは，エージェントが端末間を移動し，特定のエリア内にエージェントを留めることを目的としている．本稿では，データを発生位置付近に留める手法として，この方法を参考にしている．

2.2 センサネットワークにおける k 最近傍検索

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．

文献 [8] では，クエリ発行端末が移動する環境において，クエリ発行端末周辺の k 最近傍物体の検索手法を提案している．この手法では，サーバに全てのデータが収集できていることを前提としている．この研究では，クエリ発行端末は移動するが，検索対象の物体は固定されていることを想定しており，本研究とは想定が異なる．文献 [11] では，センサネットワークにおいて継続的に周辺の k 最近傍物体を監視する手法を提案している．具体的には，センサが目的地周辺を移動する物体を追跡する環境において，指定された位置からの 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おり，アドホックネットワークには適用できない．また，検索対象はセンサがセンシングしている物体であり，位置依存データを検索対象とする本研究とは想定が異なる．文献 [2], [10] では，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 最近傍端末の検索を行う方法を提案している．これらの手法では，ネットワーク内のクエリ処理により k 最近傍端末を検索することができる．しかし，端末自体を検索対象としており，位置依存データを対象とすることを想定していない．また，これらの手法では，ビーコン等により周辺の端末の情報を正確に取得しておかなければならず，アドホックネットワークには適していない．

3. 位置依存データに対する k 最近傍検索手法

本章では，本稿で提案する位置依存データに対する k 最近傍検索手法を説明する．以下では，まず想定環境および本稿で用いるジオルーティングについて述べる．その後，データの移動および，k 最近傍データの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，位置依存データに対して k 最近傍検索を行う環境を想定する．位置依存データは，位置情報を保持しており，データはその位置に関連しているものとする．具体的には，デー

ⓒ2012 Information Processing Society of Japan

タを収集した端末のその時点での位置をデータの発生位置とする．k 最近傍検索を行う端末は，ある位置（クエリポイント）を指定した検索クエリを発行し，ネットワーク内の位置依存データの中から，データの発生位置がクエリポイントから近い上位 k 個のデータを取得する．ネットワーク内には m 個のデータが存在し，一意の識別子が付与されているものとする．各データには，有効期限があり，発生した時刻から一定時間経過すると，無効となる．データの発生位置に偏りはないものとし，簡単化のため，すべてのデータのサイズは等しいものとする．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, $\cdots$,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，ネットワーク内のデータ数 m，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．各端末には，取得したすべてのデータを保持できる記憶領域があるものとする．この想定は，実環境では必ずしも正しくないが，いくつかの端末で保持するデータを分担する等，簡単な拡張により取り除くことができる．

3.2 ジオルーティング

本手法では，文献 [4] で提案されている手法を拡張した，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，指定した位置により近い端末へのメッセージの転送を行う．

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，返信元端末へメッセージを送信する．これを繰り返し，指定位置に最も近い端末までメッセージを伝搬する．

このジオルーティング手法により，1 本の経路で転送が行えるため，少ないトラヒックで指定した位置に最も近い端末までメッセージを伝搬することが可能である．

3.3 データの移動

データを保持している端末がデータを保持したままデータの発生位置を離れると，効率よく k 最近傍データを検索することができない．データをその発生位置付近に留めることで，クエリポイント周辺を検索するだけで，効率的に k 最近傍データを取得できる．そのため，提案手法では，データ保持端末がその発生位置から閾値 d（保証距離）以上離れた場合，3.2 節で述べたジオルーティングにより，発生位置に最も近い端末までデータを伝搬する．

図 1 を用いてデータの移動例について説明する．データ

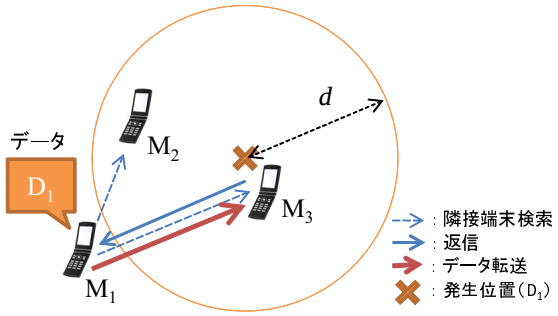


図 1 データ移動のジオルーティング例

D_1 を保持する端末 M_1 が自身の位置とデータ D_1 の発生位置との距離が閾値 d 以上離れたら，データの移動を開始する．端末 M_1 は，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 M_2，M_3 は端末 M_1 よりデータ D_1 の発生位置に近いため，返信待ち時間を設定する．返信待ち時間は D_1 の発生位置と各端末の位置を基に設定され，D_1 の発生位置に最も近い端末 M_3 が端末 M_1 へ返信を行う．M_3 からの返信を受信した端末 M_1 はデータ D_1 を端末 M_3 へ転送する．端末 M_2 は D_1 の発生位置に最も近いため，自身が D_1 の発生位置から閾値 d 以上離れるまで D_1 を保持する．

この方法により，位置依存データを発生位置付近に留めることができる．d を小さく設定するほど，位置依存データをより発生位置近くに留めるため，k 最近傍検索時の検索範囲を小さくできるが，データの移動も頻繁に発生する．そのため，d の値は，移動速度など様々な要因により適切な値が決定する．この値の影響については，4.2 節で詳しく議論する．

3.4 k 最近傍データを持つ端末へのクエリの転送，返信

k 最近傍データは，3.3 節で述べた方法により，データの発生位置周辺に存在しているため，クエリポイント付近の端末が k 最近傍データを保持している．そのため，まず 3.2 節で述べたジオルーティング手法により，クエリポイントに最も近い端末までクエリを転送する．その後，クエリポイントに最も近い端末が，領域の大きさと全データ数，要求データ数 k，および保証距離 d の値から，k 最近傍データが高確率で存在する範囲（クエリポイントを中心とした半径 R の円）を推定し，その範囲内の端末の持つデータのうち発生位置とクエリポイントの距離が $R - d$ 以内となるデータを取得する．

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) クエリ発行端末 M_s はクエリポイント，および要求データ数 k を決定し，3.2 節で示したジオルーティング手法を用い，クエリポイントに最も近い端末へ検索クエリを転送する．このメッセージには，要求データ数 k，メッセージ発行端末 M_s の識別子と位置情報，

ⓒ2012 Information Processing Society of Japan

およびクエリポイントの位置情報が含まれる．

(2) 検索クエリを受信したクエリポイントに最も近い端末 M_p は，要求データ数 k が存在すると推定される範囲の半径 R を以下の式により決定する．

$$R' = \alpha \cdot \sqrt{\frac{k \cdot area}{\pi \cdot m}}. \quad (1)$$

$$R = R' + d. \quad (2)$$

ここで，m はネットワーク内の全データ数，$area$ は領域の大きさ，d はデータの保証距離，および α はパラメータである．R' は，ネットワーク内のデータの平均的な密度を基に推定した要求データ（k 個）の発生位置が含まれる範囲である．データは端末の移動に伴い，最大で保証距離 d だけ離れる場合があるため，式 (2) により，R を R' より d だけ大きな範囲とすることで必要なデータの取りこぼしを防いでいる．

(3) 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，クエリポイントの位置情報，M_p の位置情報，要求データ数 k，および R 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，送信元端末をローカル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，かつ自身とクエリポイントの距離が 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．

$$WT = \beta \cdot \left(\frac{R}{r}\right) \cdot \left(1 - \frac{a}{R+b}\right). \quad (3)$$

ここで，a は M_p と M_q との距離，b はクエリポイントと M_p との距離，および 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，自身とクエリポイントの距離が 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，クエリポイントとデータの発生位置との距離が $R'(R-d)$ より小さいデータを保持している場合，そのデータの識別子と位置情報を含む位置依存データを，返信データとしてクエリ返信メッセージに添付する．ここで，返信メッセージに含まれるデータ数が k を超えた場合，クエリポイントにより近い k 個のデータのみメッセージに添付する．作成したクエリ返信メッセージを自身のローカル親端末に送信する．

(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，自身の保持するデータを統合して，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データ数が k を超えた場合，クエリポイントにより近い k 個のデータのみメッセージに添付する．自身がクエリポイント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，ローカル親端末へ返信し，手順 (5) へ戻る．自身がクエリポイントに最も近い端末の場合，手順 (7) へ進む．

(7) クエリポイントに最も近い端末 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 最近傍データ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，3.2 節のジオルーティング手法を用いて返信を行う．

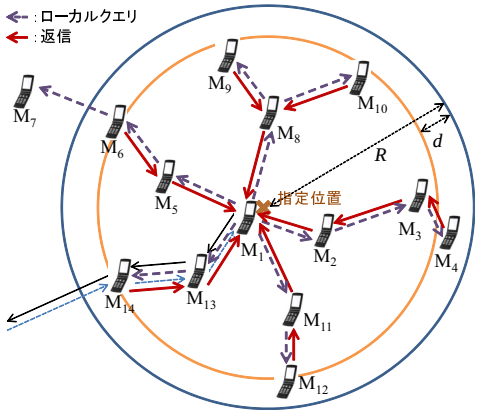


図 2 k 最近傍データ検索例

図 2 を用いて，クエリポイントに最も近い端末 M_1 が，データ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．クエリポイントを中心とし，半径 R の円内に存在する M_5 は，このメッセージを受信すると，M_1 をローカル親端末として記録し，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_6 は M_5 をローカル親端末とし，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_7 は自身が半径 R の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 へ自身の保持するデータのうちクエリポイントと発生位置との距離が $R'(R-d)$ 以下であるデータを添付した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 の保持するデータのうちクエリポイントと発生位置との距離が $R'(R-d)$ 以下であるデータ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 は半径 R の円内の端末の保持する必要なデータを取得できる．M_1

ⓒ2012 Information Processing Society of Japan

表 1 パラメータ設定

パラメータ	意味	値
k	要求データ数	50（1〜50）
I	データ発生間隔 [s]	200（10〜2,000）
v	最大速度 [m/s]	1.0（0.5〜6.0）
n	端末数	500（100）

は WT 経過後，クエリポイントに近い上位 k 個のデータのみ，クエリ発行端末へ返信する．

この方法では，クエリポイント付近の端末のみにクエリを転送することにより，トラヒックを抑えつつ必要な位置依存データを取得することができる．また，保証距離 d を考慮することにより端末がデータを保持したまま多少移動しても，必要なデータを取得することができる．

4. 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[7] を用いた．

4.1 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 n 台の端末（M_1,$\cdots$,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〜v[m/s] の速度で移動し，停止時間は 3[s] 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．各端末は I[s] ごとにデータを発生させるものとし，各データの有効期限は I[s] とした．ネットワーク全体では 500 個のデータがある環境となっている．各端末において発生するデータのサイズは 32[B] である．ここで，式 (1) 中の α は，半径 R' が十分に k 個のデータを含むように，準備実験を基に 1.0 と設定した．また，式 (3) 中の β は，準備実験を基に $n/500$ と設定した．

ここで，比較手法として，領域の中心に最も近い端末に全てのデータを集める方法を用いる．具体的には，各端末はデータ発生後，すぐに領域の中心地点（500,500）に最も近い端末へデータを送信するものとし，クエリ発行端末はこの端末に対して k 最近傍クエリを送信する．中心地点に最も近い端末は 1[s] 間隔で隣接端末検索メッセージを送信し，自身より中心地点に近い端末からの返信を受信した時点で自身の持つ全てのデータを中心地点に最も近い端末へ送信する．この手法を本評価実験では単純手法と呼ぶ．

本実験のパラメータを表 1 に示す．各項目の影響を調べる際に，括弧内の値で変化させる．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，200[s] 経過後，20[s] ごとに 100 回ランダムに選択した端末がクエリポイントを (500, 500) とした k 最近傍検索クエリを発行し，以下の評価値を調べた．

表 2 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
データ移動	16+32p
クエリ	64
ローカルクエリ（提案手法）	64
クエリ返信（提案手法）	16+32p
クエリ応答	44+32p
返信受信 Ack	16

- トラヒック
  データの転送および 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 2 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 はメッセージに含まれるデータの数である．
- 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 [6]．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．

$$AP_i = \frac{1}{k}\sum_{j=1}^{h}\frac{x}{j}\cdot e. \tag{4}$$

$$MAP = \frac{1}{querynum}\sum_{i=1}^{querynum} AP_i. \tag{5}$$

  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．

$$e = \begin{cases} 1 \\ (j \text{ 番目の解が正解集合に含まれる}). \\ 0 \\ (j \text{ 番目の解が正解集合に含まれない}). \end{cases} \tag{6}$$

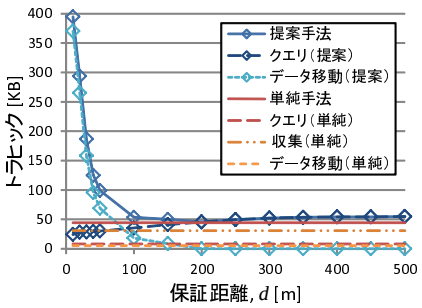
  したがって，MAP は，クエリ発行時点のクエリポイントに近い上位 k 個のデータのうち，より上位のデータを取得できているほど，高い値となる．
- 応答時間
  クエリ発行端末が検索クエリを発行してからクエリ応答を受信するまでの平均時間 (1 クエリ当たりの平均)．

4.2 データの保証距離の影響

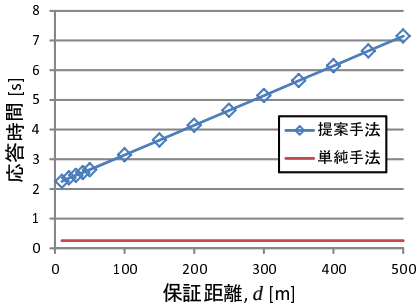
データの保証距離 d を 10〜500 まで変化させた場合の結果を図 3(a), 3(b), および 3(c) に示す．これらの図中のグラフにおいて，横軸はデータの保証距離 d[m] を表し，縦軸は，図 3(a) はトラヒック，図 3(b) は応答時間，図 3(c) は取得精度を表す．

図 3(a) より，提案手法では d が小さい場合にトラヒッ

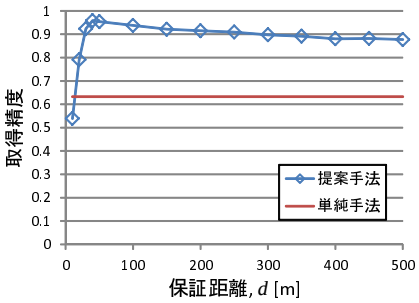
ⓒ2012 Information Processing Society of Japan



(a) トラヒック

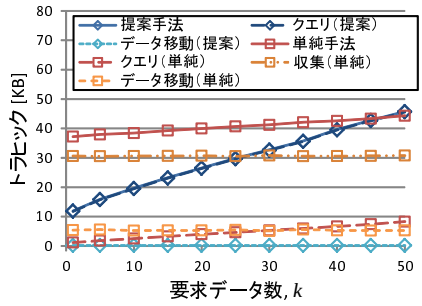


(b) 応答時間

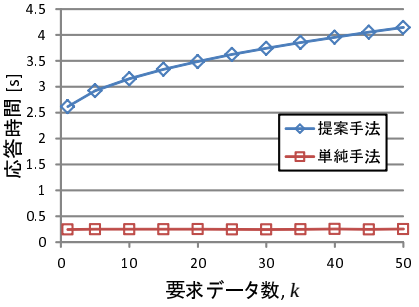


(c) 取得精度

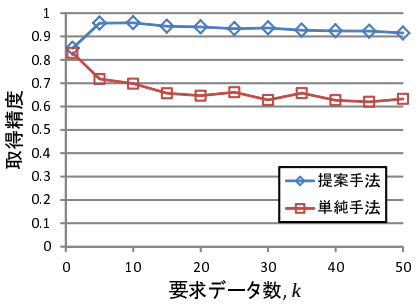
図 3 データの保証距離の影響



(a) トラヒック



(b) 応答時間



(c) 取得精度

図 4 要求データ数の影響

クが大きくなっていることがわかる．これは，d が小さいほど端末がデータの発生位置から保証距離以上離れる機会が頻繁となり，データの転送にかかるトラヒックが大きくなっているためである．一方，クエリ処理にかかるトラヒックは d が大きくなるほど大きくなっている．これは，d が大きいほど検索範囲を大きく設定するため，ローカルクエリの送信範囲およびデータの返信ホップ数が大きくなるためである．d が 200 以上の時にデータの移動をしていない．これは，データの有効期限および端末の速度の関係により，端末がデータ発生位置から 200[m] 離れるより前に，データの有効期限が切れるためである．単純手法では，特定の端末への収集によるトラヒックが多く発生していることがわかる．データが発生する毎に特定の端末へデータを送信するのは，大きなトラヒックが発生する原因となる．一方，クエリ処理にかかるトラヒックは特定の端末までのクエリ転送とデータ返信のみであるため，提案手法に比べて小さい．提案手法において，適切に d を設定することにより，単純手法と同等のトラヒックに抑えることができる．

図 3(b) より，提案手法では d が大きいほど取得時間が大きくなっている．これは，提案手法における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 に依存しており，保証距離 d が大きくなるほど R が大きく設定され，WT も大きな値となるためである．単純手法では，特定の端末までの往復時間のみで取得を行えるため，短い時間で必要なデータを取得することができる．

図 3(c) より，提案手法では d が小さい場合に取得精度が低下している．これは，提案手法において取得精度を維持するためには，データ発生位置から d[m] 以内に端末が存在することが必要となるが，d が小さい場合，一時的に d[m] 以内に端末がいない場合が頻繁に発生してしまうためである．一方，d が大きい場合に取得精度が若干低下している．これは R が大きくなることにより，クエリポイントに最も近い端末への返信ホップ数が長くなり，パケットロスの機会が増えるためである．単純手法では，データを収集した端末の移動により，データを移動させる場合，わずかではあるがタイムラグが発生する．特に，データの収集によりデータの移動が妨げられる場合が発生し，クエリを中心地点に最も近い端末へ送信してもデータの移動がされておらず，全くデータが返信されない場合があるため，取得精度が低下している．

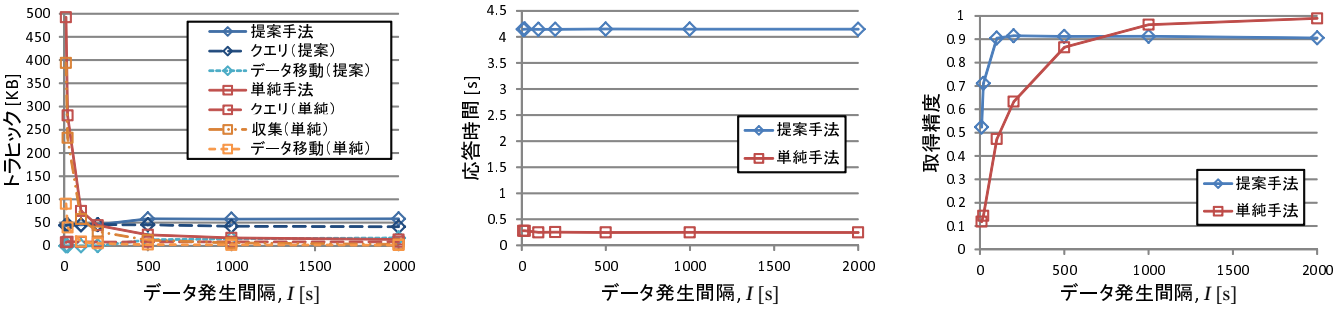
以降の評価では，提案手法におけるデータの保証距離 d は 200[m] とする．

4.3 要求データ数の影響

要求データ数 k を 1〜50 まで変化させた場合の結果を図 4(a), 4(b), および 4(c) に示す．これらの図中のグラフにおいて，横軸は要求データ数 k を表し，縦軸は，図 4(a) はトラヒック，図 4(b) は応答時間，図 4(c) は取得精度を表す．

図 4(a) より，提案手法では k が大きくなるほどトラヒックが増加している．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．単純手法では，k が大きくなるほどトラ

ⓒ2012 Information Processing Society of Japan



(a) トラヒック　(b) 応答時間　(c) 取得精度

図 5　データ発生間隔の影響

ヒックは増加するが，提案手法に比べて緩やかに増加する．これは，単純手法のトラヒックで k に依存するのは，クエリ応答のメッセージサイズのみであるためである．

図 4(b) より，提案手法では k が大きいほど応答時間が大きくなっている．要求データ数 k が大きくなるほど R が大きく設定され，WT も大きな値となるためである．単純手法では，特定の端末までの往復時間のみで取得を行えるため，k の値に関係なく一定の小さな時間で必要なデータを取得することができる．

図 4(c) より，単純手法では k が大きくなるにつれ，取得精度が下がっているが，これは全てのデータを中心地点にその時点で最も近い一つの端末に収集することができていないことが原因である．特に，k が大きいほど下がっているのは，中心地点から遠い端末で発生したデータほど特定の端末までの転送が遅くなり，k 最近傍データを中心に最も近い端末がクエリ受信時に保持していないため，取得精度が下がる．提案手法においても k が大きくなるにつれ取得精度が下がっているが，これは R が大きくなることにより，クエリポイントに最も近い端末への返信ホップ数が長くなり，パケットロスの機会が増えるためである．ここで，提案手法において，k が 1 のとき取得精度が小さいが，これは R が小さく設定され，この範囲内で発生したデータが存在しない場合があるためである．

4.4　データ発生間隔の影響

データ発生間隔（有効期限）I[s] を 10〜2,000 まで変化させた場合の結果を図 5(a), 5(b), および 5(c) に示す．これらの図中のグラフにおいて，横軸はデータ発生間隔 I を表し，縦軸は，図 5(a) はトラヒック，図 5(b) は応答時間，図 5(c) は取得精度を表す．

図 5(a) より，単純手法では，I が小さい場合，トラヒックが大きい．これは，単純手法ではデータが発生すると，特定の端末へデータの転送を行わなければならないためである．一方，I が大きい場合，トラヒックは小さい．これは，データの収集頻度が小さくなるためである．一方，提案手法ではデータ発行間隔に関係なく，トラヒックがほぼ一定となっていることがわかる．これは，提案手法は単純手法と違い，新しくデータが生成された場合に特別な動作をする必要がないためである．

図 5(b) より，提案手法および単純手法の応答時間はデータ発行間隔にほとんど影響を受けないことがわかる．上述のように提案手法の動作は，データ発生間隔に依存しないため，応答時間はほぼ一定となる．また，単純手法ではデータ発生間隔が短い場合に，トラヒックの増加による衝突の発生によりクエリおよび返信の再送が行われ，わずかに応答時間が増加しているが，その影響は非常に小さい．

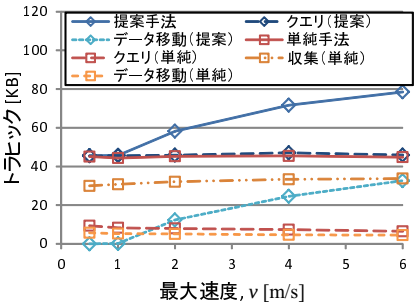
図 5(c) より，単純手法では I が小さい場合，取得精度が低い．これは，特定の端末へのデータ転送が頻繁に起こることにより，特定の端末付近が混みあい，データの転送およびクエリの送信が困難となるためである．一方，I が大きい場合，高い取得精度となっている．このことから，データの更新が頻繁ではない環境では，単純手法は有効であることがわかる．提案手法においても，I が小さい場合，取得精度が低下している．これは，提案手法では単純手法に比べてデータ取得に長い時間がかかり，データ取得中にデータの発生，および消滅が起こってしまうためである．I が大きい場合，高い取得精度を維持できる．しかし，データの発生間隔が非常に長い場合，単純手法より精度が低い．これは，提案手法では，R 内の端末へのクエリの転送および返信による，パケットロスの機会が多いためである．

4.5　端末の移動速度の影響

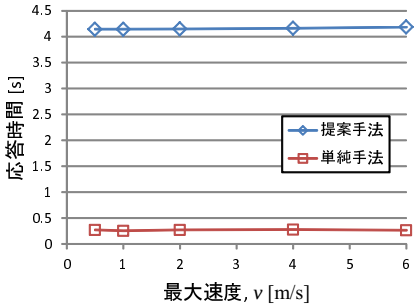
端末の最大速度 v を 0.5〜6.0 まで変化させた場合の結果を図 6(a), 6(b), および 6(c) に示す．これらの図中のグラフにおいて，横軸は端末の最大速度 v[m/s] を表し，縦軸は，図 6(a) はトラヒック，図 6(b) は応答時間，図 6(c) は取得精度を表す．

図 6(a) より，単純手法ではほぼ一定のトラヒックとなっている．一方，提案手法では v が大きくなるにつれてトラヒックが大きくなっている．これは，端末の移動する速度が大きくなったことでデータの発生位置から離れる機会が増え，頻繁にデータを移動するためである．今回は保証距離を一定（200[m]）として評価を行ったため，トラヒックが大きく増加したが，それぞれの環境に適切な保証距離 d

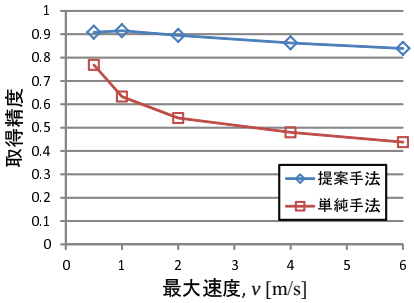
ⓒ2012 Information Processing Society of Japan



(a) トラヒック

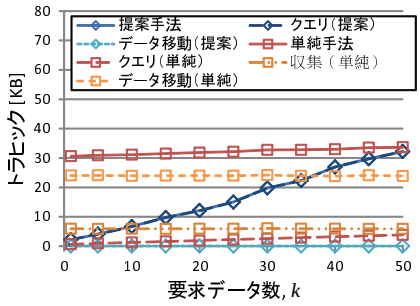


(b) 応答時間

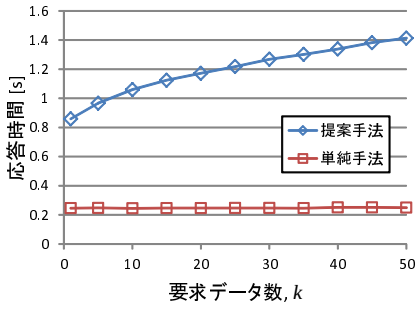


(c) 取得精度

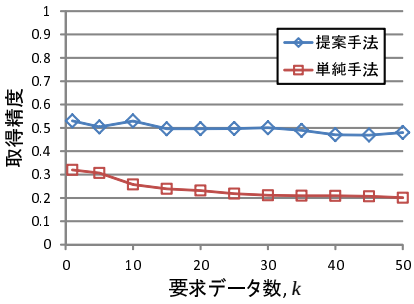
図 6 端末の移動速度の影響



(a) トラヒック



(b) 応答時間



(c) 取得精度

図 7 端末数 100 台の場合

を設定することでトラヒックの増加を抑制することができる．

図 6(b) より，提案手法および単純手法の応答時間は端末の速度に依存しないことがわかる．提案手法では，応答時間は WT に依存するため，端末の速度に影響を受けない．また，応答時間はクエリおよび返信の転送に依存するが，提案手法および単純手法で用いているジオルーティングでは，転送時に端末を選択することで端末の移動に対応しており，実験を行った速度では影響をほとんど受けない．

図 6(c) より，v が大きくなるほど提案手法，単純手法ともに取得精度が低下している．提案手法では，v が大きい場合ほどデータ移動の失敗の機会が多くなるため低下している．しかし，単純手法に比べ低下の程度は小さい．単純手法では，v が大きくなると頻繁に中心に最も近い端末が入れ替わり，その時点では中心地点に近いがデータを収集できていない端末へ検索クエリを転送してしまう．端末の移動により正確にデータの転送を行うためには隣接端末の検索をより頻繁に行わなければならないが，これはトラヒックが大きく，アドホックネットワークには適していない．

4.6 端末密度が低い場合（端末数 100 台）の性能

端末密度が低い場合の提案手法の性能を調べるために，端末数を 100 台として，同様の評価を行った．要求データ数 k を 1〜50 まで変化させた場合の結果を図 7(a), 7(b), および 7(c) に示す．これらの図中のグラフにおいて，横軸は要求データ数 k を表し，縦軸は，図 7(a) はトラヒック，図 7(b) は応答時間，図 7(c) は取得精度を表す．なお，端末数を 250 台（500 台の場合の半数）として同様の実験を行ったが，取得精度は数%低下したものの，端末数 500 台の場合とほぼ同様の結果となったため，本稿では結果の詳細を割愛する．

図 7(a) より，提案手法および単純手法ともに端末数 500 台の場合に比べてトラヒックが若干小さくなっている．これは，端末数の減少によりネットワーク内の端末の密度が低くなり，クエリおよび返信の転送が失敗する機会が増加したことによるものである．

図 7(b) より，提案手法では端末数 500 台の場合に比べて応答時間が小さくなっている．これは，WT 内のパラメータ β がメッセージの衝突を防ぐために，端末数（端末の密度）に応じて設定されるからである．一方，単純手法では，500 台の場合とほぼ同程度の応答時間でデータを取得している．

図 7(c) より，端末数 500 台の場合に比べて提案手法および単純手法ともに，取得精度が 40%程度低下している．これは，端末密度が低いため，発行端末からクエリポイントおよび特定の端末間のジオルーティングにおいて，送信端末より指定位置に近い端末が存在しない場合が頻繁に発生するからである．この結果から，ジオルーティングが頻繁に失敗するように端末が疎な環境では，ネットワーク内で効果的に k 最近傍データを検索するのが困難であることがわかる．

ⓒ2012 Information Processing Society of Japan

5. 結論

本稿では，アドホックネットワークにおいて位置依存データを集中管理することなく，トラヒックの削減および取得精度の維持を可能にする，k 最近傍データ検索手法を提案した．提案手法では，各端末が自身の保持するデータの発生位置から一定の距離（保証距離）以上離れた場合，そのデータをデータの発生位置に最も近い端末へ転送する．これにより，データを発生位置付近に留めておくことができる．検索では，EXP 法を拡張し，保証距離を考慮して k 最近傍データが存在する範囲を推定し，範囲内の端末の持つデータを検索することで k 最近傍データを取得する．提案手法により，一箇所にデータを集めたり，ネットワーク全体へクエリを転送する必要がないため，トラヒックの削減および検索精度の維持を達成することができる．

シミュレーション実験の結果から，提案手法では，保証距離 d の値によって性能が大きく変化することがわかった．d を小さく設定すると頻繁に発生位置付近へのデータ転送が起きる一方，d を大きく設定するとクエリによる検索時にトラヒックが大きくなってしまう．そのため，d の適切な設定を行うことが必要である．また，データの発生や消滅が頻繁に起こる環境において，提案手法は大きな影響を受けることなく効率的に検索を実行できることを確認した．さらに，速度が大きくなる場合にも，提案手法では取得精度の低下を抑制できていた．これらの結果から，提案手法はアドホックネットワークに適していることを確認した．

本稿においては，複製の配置を想定していなかったが，トラヒックや応答時間の削減に有効である場合があると考えられる．そのため，今後は複製を考慮した k 最近傍データの検索手法について検討を行う予定である．

参考文献

[1] T. Camp, J. Boleng, and V. Davies, “A Survey of Mobility Models for Ad Hoc Networks Research,” *Wireless Communications and Mobile Computing* (*WCMC*2002), 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] E.B. Hamida and G. Chelius, “A Line-Based Data Dissemination Protocol for Wireless Sensor Networks with Mobile Sink,” *Proc. Int. Conf. on Communications*, pp. 2201-2205, 2008.

[4] 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.

[5] 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.

[6] C.D. Manning, P. Raghavan, and H. Schütze, “Introduction to Information Retrieval,” *Cambridge University Press*, 2008.

[7] Scalable Network Technologies: “Qualnet,” http://www.scalable-networks.com/.

[8] Z. Song and N. Roussopoulos, “K-Nearest Neighbor Search for Moving Query Point,” *Proc. Int. Symposium on Spatial and Temporal Databases*, pp.79-96, 2001.

[9] G. Tsuchida and S. Ishihara, “Replica Arrangement for Location Dependent Data in Consideration of Network Partition in Ad Hoc Networks,” *International Journal of Communication Networks and Distributed Systems*, Vol.2, No.4, pp. 401-423, 2009.

[10] 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.

[11] Y. Yao, X. Tang, and E.P. Lim, “Continuous Monitoring of kNN Queries in Wireless Sensor Networks,” *Proc. Int. Conf. on Mobile Ad−hoc and Sensor Networks*, pp. 663-674, 2006.

[12] 屋代智之, T.F.L Porta, “Nomadic Agent System: インフラに依存しない位置情報サービス提供システム,” 情報処理学会論文誌, Vol.46, No.12, pp. 2952-2962.

ⓒ2012 Information Processing Society of Japan