

モバイルセンサネットワーク上のエージェントを用いた データ収集における欠損データ再収集方式

松尾 和哉¹ 後藤 啓介¹ 神崎 映光¹ 原 隆浩¹ 西尾 章治郎¹

概要: 移動型センサ端末が密に存在するモバイルセンサネットワークでは、トラフィック削減のために、アプリケーションの要求を満たす必要最小限の端末のみからセンサデータを収集することが望まれる。筆者らはこれまでに、密なモバイルセンサネットワークにおけるエージェントを用いたデータ収集方式、およびエージェント再配置方式を提案した。しかし、これらの方式では、エージェントが配置できない状態でのデータ収集を想定しておらず、端末密度のばらつきによって一部のエージェントが配置できない場合、収集データに欠損が生じるという問題がある。そこで本稿では、エージェント再配置方式を拡張し、エージェントが配置できないために欠損したセンサデータを再収集する方式を提案する。

1. はじめに

近年、一般ユーザの携帯するスマートフォンなどの移動型センサ端末により、センサデータを収集するユーザ参加型センシングが注目されている。ユーザ参加型センシングにおけるデータ収集方法としては、携帯電話回線などのインフラを用いてインターネットにセンサデータをアップロードすることが考えられる。しかし、多数のアプリケーションが有限な通信帯域を共用するインフラを用いる場合、ユーザ参加型センシングが大量のトラフィックを生成して、通信帯域を占有することは好ましくない。そのため、ユーザの携帯する移動型センサ端末間の直接通信により、インフラを必要としないモバイルセンサネットワークを構築し、センサデータを収集する方法が注目されている [6]。ユーザ参加型センシングにおけるモバイルセンサネットワークでは、端末は音や温度といった環境情報をセンシングし、端末間の無線マルチホップ通信を用いて、データを集約・管理するシンクへ観測値を送信する。

ここで、一般ユーザの携帯するセンサ端末で構成されるモバイルセンサネットワークでは、端末の数が非常に大きくなり、領域内の任意の位置に対して、その位置をセンシング可能な端末が常に多数存在する（これを密なモバイルセンサネットワークと呼ぶ）。一方、アプリケーションの観点からは、地理的にある一定の粒度のデータを要求する場

合が多いものと考えられる。このような環境では、シンクがすべての端末からセンサデータを収集した場合、通信帯域と端末のバッテリーが浪費される。この問題を解決するために、アプリケーションが要求する地理的粒度を保証する必要最小限の端末のみからセンサデータを収集することにより、センサデータの収集におけるトラフィックを削減することが望まれる。そこで筆者らは、文献 [2] において、端末上で自律的に動作するエージェント（転送エージェント）にセンサデータの転送を行わせることにより、効率的にセンサデータを収集する方式を提案した。この方式では、転送エージェントを葉または節点、シンクを根とした木構造ネットワークを用いて、転送エージェントが動作する端末のセンサデータを集約してシンクへ送信することにより、効率的にセンサデータを収集する。また、文献 [3] では、文献 [2] で提案した方式を拡張し、端末のネットワーク離脱などによる転送エージェントの消失を考慮した、エージェント再配置方式を提案した。この方式（以降、従来方式と呼ぶ）では、転送エージェントは観測時刻毎に待ち時間を設定し、待ち時間以内にすべての子からセンサデータを受信できなかった場合、転送エージェントが消失したものと判断し、消失した転送エージェントの再配置を行う。ここで、モバイルセンサネットワークでは、ユーザ端末の移動に偏りが生じるなどの原因により、データ収集のタイミングで転送エージェントを配置できる端末が存在しない状況が発生する可能性がある。しかし、従来方式では、このような状態でのデータ収集を想定しておらず、転送エージェントの再配置に失敗すると、収集データに欠損が生じ、さらに転送エージェントが揃っていないためにすべてのデー

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
{matsuo.kazuya, goto.keisuke, kanzaki, hara, nishio}@ist.osaka-u.ac.jp

タが収集できなくなる。

そこで本稿では、従来方式を拡張し、エージェント再配置に失敗し、データが欠損した場合に、これらのデータを再収集する方式を提案する。提案方式では、転送エージェントの再配置とセンサデータ再送要求を同時に行う。転送エージェントの再配置に失敗した場合、その転送エージェントの子へ再送要求を行うと同時に、再配置に失敗した転送エージェントが取得、転送するはずだったセンサデータ(欠損データ)を再収集する。これにより、転送エージェントの再配置に失敗した場合でも、データ収集を継続できる。

以下では、2章で関連研究を紹介する。3章で本研究の想定環境、4章で従来方式、5章で提案方式について述べ、6章でシミュレーション実験の結果を示す。最後に7章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

文献 [5] では、移動端末が密に存在する環境で、データを地理的に固定させることで、データに効率的にアクセスする方式を提案している。この方式では、データに対応する座標から通信半径の $1/2$ の距離内に存在する端末がそのデータをもつように、端末間でデータを交換する。これにより、データに対応する座標へのジオルーティングを用いたデータへのアクセスを保証している。この研究では、端末がもつ既存データへのアクセスを想定しており、アプリケーションが要求するセンシングの地理的粒度を保証するデータ収集を想定している本研究とは異なる。

文献 [7] では、端末密度が疎な環境下で、複数の移動型端末を経由して、センサ端末からシンクへセンサデータを転送するデータ収集方式を提案している。センサ端末からセンサデータを受信した移動型端末は、一定の確率で、隣接する移動型端末にセンサデータの複製を転送する。いずれかの移動型端末の通信範囲内にシンクが入った場合、その移動型端末は保持しているセンサデータをシンクへ送信し、センサデータの転送が完了する。この研究は、収集対象であるセンサデータの発生地点が地理的に固定である点において本研究の想定と類似しているが、端末の移動特性を利用してセンサデータを収集する点が本研究と異なる。

3. 想定環境

本稿で想定するモバイルセンサネットワークにおいて、センサ端末(端末)は温度などの物理現象を、後述する観測周期より短い周期で定期的にセンシングし、互いに無線マルチホップ通信で接続している。シンクはアプリケーションが指定する観測周期毎に、観測領域をある一定の地理的粒度を保証するように観測する。

対象とする観測領域は縦横が $M : N$ の整数比となる2次元平面を想定する。地理的粒度は $k^2 \cdot M \cdot N$ ($k = 1, 2, \dots$) の整数値として指定される。シンクは観測領域を $k \cdot M \times k \cdot N$

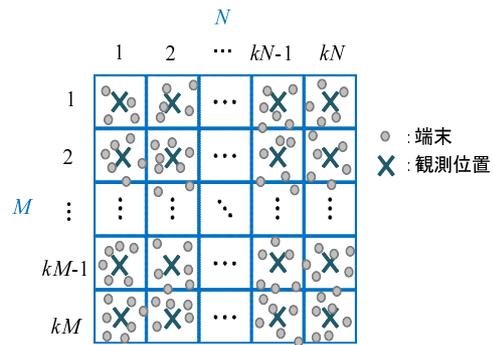


図 1 観測領域と観測位置

の格子状のサブ領域に分割し、各サブ領域の中心点を観測位置と定める(図1)。また、各観測位置に対し、その観測位置を中心とし、対応するサブ領域に内接する円内でセンシングした値を、その観測値とする。

各端末の無線通信範囲は等しく、半径 r の円とする。各端末はGPSなどの測地装置を備えており、位置情報に基づいたマルチホップ通信が可能であるものとする。各端末は領域内を自由に移動するが、シンクの位置は固定されているものとする。

4. 従来方式

本章では、筆者らが文献 [3] において提案した、エージェントを用いたデータ収集のためのエージェント再配置方式について述べる。

4.1 ジョルーティング

端末およびシンクは、文献 [4] で提案された方式をもとにしたジオルーティングプロトコルを備えており、目標位置に最も近い端末までデータパケットを転送できることを想定している。このプロトコルでは、各端末が図2に示す転送エリア(送信端末よりも目標位置に近く、かつ転送エリア内の端末が互いに直接通信可能な領域)を設定し、転送エリア内の端末へパケットを送信する。パケットを受信した各端末は、待ち時間を設けてパケットを転送する。ここで、転送エリア内において目標位置に近い端末ほど待ち時間を短く設定することで、最も目標位置に近い端末が最初にパケットを転送する。転送エリア内の他の端末はパケットの転送を検知して、自身の転送処理を中止する。パケットは転送されるごとに目標位置へと近づき、目標位置から $r/2$ の範囲内に存在する端末が転送したパケットを受信した端末は、パケットを転送する代わりにACKを送信する。このACKは、目標位置を中心とする半径 $r/2$ 以内のすべての端末が検知できるため、目標位置に最も近い端末を把握できる。

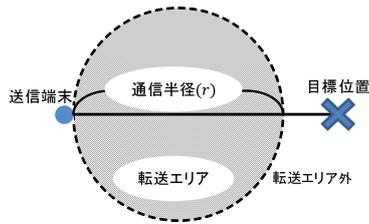


図 2 転送エリア

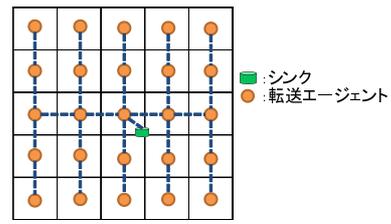


図 3 転送木

表 1 転送エージェントデータの転送方向

転送エージェントデータの送信元	転送エージェントデータの転送方向
シンクが位置するサブ領域	上, 下, 左, 右
右隣のサブ領域	上, 下, 左
左隣のサブ領域	上, 下, 右
下隣のサブ領域	上
上隣のサブ領域	下

4.2 転送エージェント配置

シンクは、観測位置間の地理的關係に基づいて作成するデータ転送のための木構造ネットワークに沿って、転送エージェントを配置する。シンクは、端末が転送エージェントを起動するためのデータ（転送エージェントデータ）を生成し、4.1節で述べたジオルーティングを用いて自身の位置するサブ領域の観測位置へ送信する。転送エージェントデータには、観測周期、観測粒度、シンクの位置の情報が含まれる。観測位置に最も近い端末は、このデータを受信し、転送エージェントを起動する。続いて、起動した転送エージェントが、表1に示すルールに従って、隣接サブ領域の観測位置に転送エージェントデータを転送する。このエージェントによる転送エージェントデータの転送は、観測領域上下端に位置するサブ領域において転送エージェントが起動するまで繰り返される。この転送エージェントデータが転送された順に転送エージェント間をつないだ木構造を転送木と呼ぶ（図3）。

4.3 センサデータ収集

前節の処理によって配置された転送エージェントは、観測時刻の τ 秒前に、自身の位置と観測位置の距離が α より大きい場合に移動を開始する。具体的には、4.1節で述べたジオルーティングを用いて、転送エージェントデータを添付したパケットを目標観測位置へ送信し、自身の動作を終了する。これにより、観測位置に最も近い端末が転送エージェントデータを受信し、転送エージェントを起動する。

観測領域の上下端に位置するサブ領域に存在する転送エージェントは、観測周期ごとにセンサデータを転送木上の親となる転送エージェントが配置された観測位置へ、ジオルーティングを用いて送信する。各転送エージェントは、観測時刻の直前に、自身が担当する観測位置から $r/2$ の範囲内に移動するため、転送木上の子となる転送エージェン

トが送信したセンサデータを受信できる。すべての子からセンサデータを受信した転送エージェントは、受信したセンサデータおよび自身のセンサデータを一つのパケットにまとめて、親へ送信する。この処理を繰り返し、最終的にシンクが存在するサブ領域の転送エージェントが、すべての観測位置におけるセンサデータを一つのパケットにまとめて、シンクに送信する。

4.4 転送エージェント再配置, センサデータ再送要求

各転送エージェントは、観測時刻から δ 秒経過しても子のセンサデータを受信できなかった場合、ジオルーティングを用いて、その子へデータ要求メッセージを送信する。データ要求メッセージを受信した転送エージェントは、すでに親へセンサデータを送信していた場合、センサデータを再送信する。すべての子からのセンサデータを受信しておらず、まだセンサデータを送信できない場合、代わりに生存メッセージを返信する。データ要求メッセージを送信した転送エージェントは、すべての子からセンサデータを受信した場合、センサデータの転送を再開する。データ要求メッセージを送信した後、さらに δ 秒経過してもセンサデータまたは生存メッセージを受信できなかった場合、転送エージェントは、自身の子が消失したものと判断し、その子の再配置を行う。

消失した転送エージェントの再配置は、対象となるサブ領域の観測位置へ転送エージェントデータを送信することにより行う。対象となるサブ領域において、観測位置に最も近い端末は、転送エージェントデータを受信した後、そのサブ領域において実際に転送エージェントが消失している場合、転送エージェントを起動する。起動した転送エージェントは、自身が観測領域上下端に位置するサブ領域にいる場合、センサデータを親へ送信する。その他のサブ領域にいる場合、すべての子にデータ要求メッセージを送信する。一方、転送エージェントが生存しているにもかかわらず、パケットロス等によってセンサデータが届かず転送エージェントデータが送信されてきた場合、転送エージェントが転送エージェントデータを検知した時点でACKを返信し、データ要求メッセージを受信した場合と同様の処理を実行する。

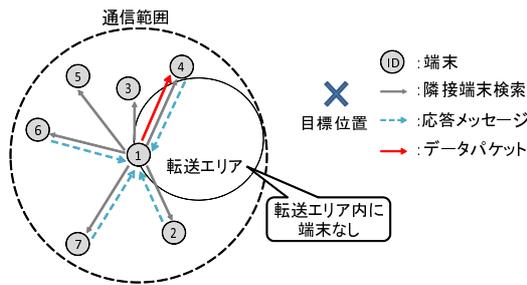


図 4 転送エリア内に端末がない場合の処理

5. 提案方式

従来方式では、転送エージェントが子の消失を検知した場合、その子の再配置を 4.4 節の動作により行う。しかし、データ要求メッセージの送信を 4.1 節のジオルーティングを用いて行うため、再配置先の観測位置から $r/2$ 以内に端末がない場合、子を再配置できず、収集データに欠損が生じる。また、転送エージェントは、すべての子からセンサデータを受信するまでは、親へセンサデータ送信を行わないため、子の再配置ができなかった場合、その観測時刻でのデータ収集動作が停止してしまう。

そこで提案方式では、転送エージェントの再配置に失敗した場合、その転送エージェントの子へセンサデータ再送要求を行うと同時に、転送エージェントの再配置の失敗により生じる欠損データを再収集する。

提案方式では、従来方式と同様に、4.2 節で述べた転送エージェント配置、および 4.3 節で述べたセンサデータ収集を行う。また、5.2 節で述べる方法で転送エージェントの再配置およびセンサデータ再送要求を行い、転送エージェントの再配置の失敗した場合、5.2.5 項の手順によって、欠損データを再収集する。さらに提案方式では、各処理におけるジオルーティングを拡張し、5.1 節で述べる手順に従ってパケットを転送する。

5.1 ジョルーティング

従来方式では、各端末は 4.1 節で述べたジオルーティングプロトコルを備えていることを想定している。しかし、4.1 節で述べたジオルーティングプロトコルでは、転送エリア内に端末がない場合、パケットの転送に失敗してしまう。そこで提案方式では、転送エリア内に端末がない場合にも目標位置へパケットを転送できるよう、ジオルーティングプロトコルを拡張する。

送信すべきデータパケットをもつ送信端末は、基本的には 4.1 節と同様の処理により、転送エリア内の端末を介したパケット転送を行う。一方、転送エリア内に端末がない場合、データパケットを送信した端末はパケットの転送を検知できない。この場合、自身の通信範囲内に存在する全端末へ、目標位置の座標を含む隣接端末検索メッセージ

を送信する。このメッセージを受信した端末は、メッセージの送信元へ応答メッセージを返信する。このとき、目標位置に近いほど短く設定される待ち時間を設け、待ち時間内に他の端末から応答メッセージを受信しなかった場合にのみ、応答メッセージを返信する。隣接端末検索メッセージを送信した端末は、応答メッセージを最初に返信してきた端末へデータパケットを送信する。例えば図 4 において、データパケットをもつ端末 1 は、自身の転送エリア内に端末が存在しないため、自身の通信範囲内の端末へ隣接端末検索メッセージを送信する。このメッセージを受信した各端末は、端末 1 へ応答メッセージを返信する。端末 1 は、応答メッセージを最初に返信した端末 4 へデータパケットを送信する。

5.2 転送エージェント再配置, センサデータ再送要求

従来方式では、転送エージェントが子の消失を検知した場合、その子の再配置を 4.4 節の動作により行う。しかし、再配置ができない状況では、データに欠損が生じ、さらにデータ収集が停止してしまう。そこで提案方式では、後述するデータ要求エージェントおよび再収集エージェントを導入し、転送エージェントの再配置および欠損データの再収集を行う。

5.2.1 動作概要

従来方式では、転送エージェント再配置の際にジオルーティングを用いるため、ジオルーティングが失敗した時点で転送エージェントが起動できなくなる。そこで、データ要求のためのエージェントであるデータ要求エージェントを新たに導入し、このエージェントを観測位置に向けて 1 ホップずつ移動させることで、転送エージェントの再配置およびセンサデータの再送要求を行う。転送エージェントの再配置に失敗した場合、その転送エージェントの子のセンサデータを収集するために、その子へ向けてデータ要求エージェントを移動させる。また、転送エージェントがない観測位置のセンサデータを再収集するために、該当するセンサデータを網羅的に探索するエージェントである再収集エージェントを新たに導入する。

5.2.2 データ要求エージェントの生成と移動

観測時刻から δ 秒経っても子のセンサデータを受信できなかった転送エージェントは、転送エージェントデータを含むデータ要求エージェントを生成し、自端末上で起動させる。このデータ要求エージェントは、自身が移動した経路の情報として、 a 個の端末 ID を記録できる。起動したデータ要求エージェントは、子の観測位置を自身の目的位置に設定し、以下の手順に従って移動する。便宜上、データ要求エージェントを生成した転送エージェントを要求開始エージェントと呼ぶ。

(1) データ要求エージェントは、移動経路情報に自身が起動している端末 ID を記録し、自身のコピーを含む移

- 動メッセージを通信範囲内にブロードキャストする。
- (2) 目標位置から $r/2$ の範囲内にいる端末が移動メッセージを受信した場合、5.2.3 項で述べる処理を行う。
 - (3) 目標位置からの距離が $r/2$ 以上である端末が移動メッセージを受信した場合、データ要求エージェントを起動し、自身の位置情報を、移動メッセージ送信元のデータ要求エージェントへ返信する。
 - (4) 移動メッセージ送信元のデータ要求エージェントは、収集した位置情報を基に、最も目標位置に近いデータ要求エージェントへ移動依頼メッセージを送信し、自身の動作を終了する。
 - (5) 移動依頼メッセージを受信したデータ要求エージェントは、手順 (1) の処理を行う。
 - (6) 移動依頼メッセージの宛先とならなかったデータ要求エージェントは、移動メッセージの傍受によって自身が移動先でないことを把握し、自身の動作を終了する。

例えば図 5(a) において、端末 1 上のデータ要求エージェントが移動メッセージをブロードキャストした場合、その通信範囲内にいる端末 {2, 6, 7} は、端末 1 へ自身の位置情報を返信する。位置情報を収集した端末 1 上のエージェントは、目標位置に最も近い端末 2 へ移動依頼メッセージを送信する。

5.2.3 転送エージェントの発見または再配置の成功

移動メッセージを受信し、目標位置から $r/2$ の範囲内にいる端末は、自身が転送エージェントを起動している場合、ACK をブロードキャストし、4.4 節と同様の手順によってセンサデータの再送信を行う。ACK を受信したデータ要求エージェントは自身の動作を終了する。

一方、自身が転送エージェントを起動していない場合は、前項の手順 (1) の処理を行う。その後ブロードキャストした移動メッセージに対して ACK の返信がない場合、転送エージェントを起動する。起動した転送エージェントは、自身の全ての子に対して前項の処理を行い、全ての子からセンサデータを受信できた場合、自身のセンサデータとともに要求開始エージェントへセンサデータを送信する。

5.2.4 転送エージェントの発見または再配置の失敗

データ要求エージェントは、自身に記録されている移動経路情報を参照し、自身が起動している端末が $(a + 1)$ 個目である場合、これ以上の移動は困難であると判断して、自身の移動を中止する。また、自身が起動している端末 ID が移動経路情報に既に含まれている場合も、自身より目標位置に近い端末への移動は困難と判断し、自身の移動を中止する。

例えば図 5(b) において、データ要求エージェントは、端末 {1, 2, 3, 4, 5} の順に移動している。端末 5 の通信範囲内で最も観測位置に近い端末は端末 4 であるため、端末 5 で起動しているデータ要求エージェントは端末 4 へ移動する。端末 4 は、移動経路情報内に既に自身の端末 ID が

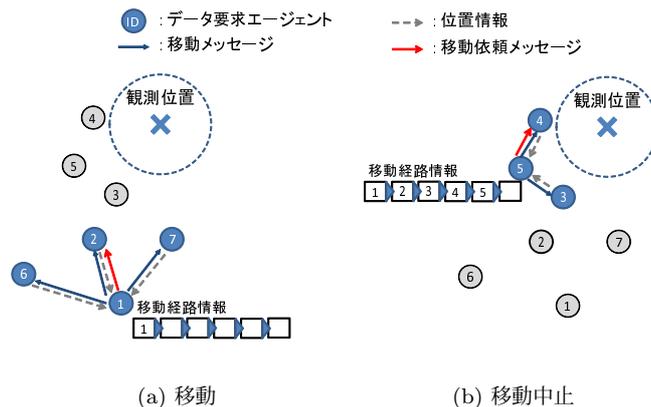


図 5 データ要求エージェントの動作例 ($a = 6$)

含まれているため、データ要求エージェントの移動を中止する。

観測位置から半径 $r/2$ の範囲内に入る前にデータ要求エージェントが移動を中止した場合、対象となるサブ領域における転送エージェントの発見または再配置に失敗している。この場合、データ要求エージェントは、後述する再収集エージェントを起動し、その観測位置付近で取得されたセンサデータを再収集する。また、対象となるサブ領域が観測領域の上下端でない場合、その転送エージェントの子の数だけ、データ要求エージェントを複製し、その子が担当する観測位置へ移動させる。

5.2.5 欠損データ再収集

前項の動作により起動した再収集エージェントは、前回の観測時刻から今回の観測時刻において、センシングが有効な範囲内で取得されたセンサデータを再収集する。

新たに起動した再収集エージェントは、まず自身が該当するセンサデータを保持しているかどうかを確認する。保持している場合、要求開始エージェントへ、5.1 節で述べたジオルーティングを用いて、そのセンサデータを送信する。保持していない場合、以下の処理によって、図 6 に示す再収集対象領域内において該当するセンサデータをもつ端末を探索する。この再収集対象領域は、前回の観測時刻にサブ領域内に存在した端末が今回の観測時刻までに移動可能な範囲となっており、この領域内に該当するセンサデータをもつ端末がない場合、該当するセンサデータが観測領域内に存在しないことが保証できる。

1. 隣接端末へのデータ所持確認

再収集エージェントは、自身のコピーを含むデータ所持確認メッセージを、自身の通信範囲内にブロードキャストする。再収集エージェントデータにはセンサデータの再収集条件 (前回と今回の観測時刻、および再収集対象領域) が含まれる。

2. データ所持状況の返信

データ所持確認メッセージを受信した端末は、自身が再

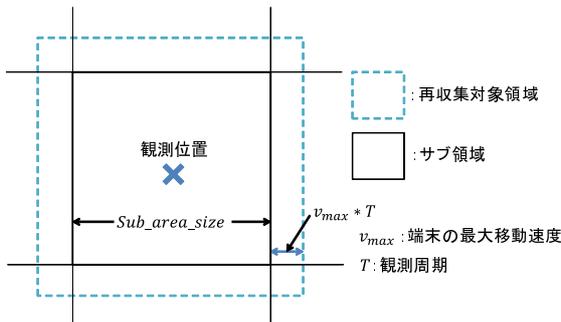


図 6 再収集対象領域

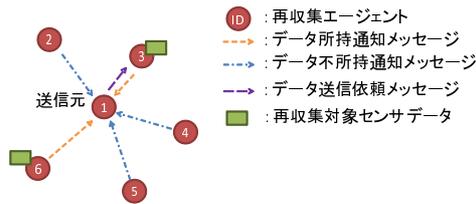


図 7 欠損データ再収集の例 1

収集対象領域内に存在する場合、再収集エージェントを起動し、該当するセンサデータを自身が保持しているかどうかを確認する。保持している場合はデータ所持通知メッセージを、保持していない場合はデータ不所持通知メッセージを、データ所持確認メッセージの送信元である再収集エージェントへ返信する。ここで、データ不所持通知メッセージには、自身の位置座標を付与する。また、これらのメッセージには待ち時間を設け、データ所持確認メッセージの送信元である再収集エージェントから遠い端末ほど早く返信する。

ここで、自身のデータ所持状況を確認した再収集エージェントは、メッセージの返信前に各メッセージを傍受し、以下の条件を満足すれば、メッセージの返信を中止する。

- 傍受したメッセージがデータ所持通知メッセージである。
- 待ち時間内に傍受したデータ不所持通知メッセージの送信元端末の通信範囲によって、自身の通信範囲全体が被覆されている。

3. センサデータの返送

データ所持確認メッセージの送信元である再収集エージェントは、データ所持通知メッセージを受信した場合、このメッセージを最初に送信した再収集エージェントへデータ送信依頼メッセージを送信する。データ送信依頼メッセージを受信した再収集エージェントは、要求開始エージェントへ、自身もつセンサデータを送信する。

例えば図 7 では、再収集エージェント {2, 3, 4, 5, 6} のうち、再収集の対象となるセンサデータを保持しているエージェント 3 および 6 がデータ所持通知メッセージを、その他のエージェントはデータ不所持通知メッセージを返信する。再収集エージェント 1 は、データ所持通知メッセー

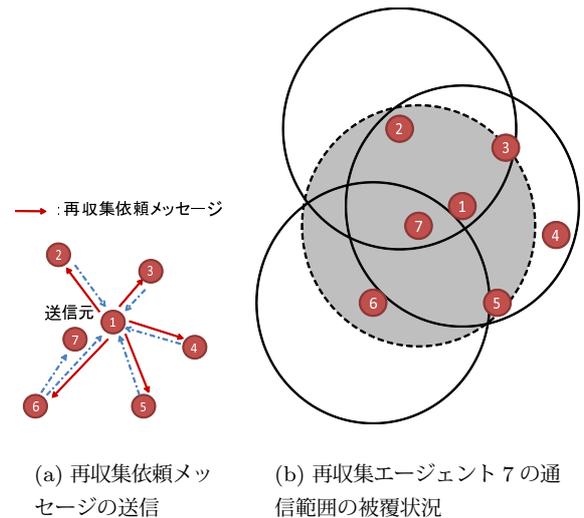


図 8 欠損データ再収集の例 2

ジを最も早く送信した再収集エージェント 3 へ、データ送信依頼メッセージを送信する。このメッセージを受信した再収集エージェント 3 は、要求開始エージェントへセンサデータを送信する。

4. データ再収集範囲の拡張

データ所持確認メッセージの送信元である再収集エージェントは、返信がすべてデータ不所持通知メッセージである場合、データ不所持通知メッセージを返信した全ての再収集エージェントへ再収集依頼メッセージを送信する。再収集依頼メッセージを受信した再収集エージェントは、自身の通信範囲内の端末へ、データ所持確認メッセージをブロードキャストする。このとき、すでに再収集エージェントを起動している端末はこのデータ所持確認メッセージに対して返信を行わない。

例えば図 8(a) では、再収集エージェント 1 がブロードキャストしたデータ所持確認メッセージによって起動した再収集エージェント {2, 3, 4, 5, 6, 7} は、再収集の対象となるセンサデータを保持していない。そのため、これらの再収集エージェントは、データ不所持通知メッセージを返信する。再収集エージェント 1 は、すべての返信がデータ不所持通知メッセージであったため、データ不所持通知メッセージを返信した再収集エージェントへ再収集依頼メッセージを送信する。

ここで図 8(a) では、再収集エージェント 7 はデータ不所持通知メッセージの返信を行わない。これは、図 8(b) に示す通り、再収集エージェント 7 の通信範囲全体が、再収集エージェント {1, 2, 6} の通信範囲によって被覆されているためである。このように提案方式では、再収集エージェントの通信範囲全体が他の再収集エージェントによって被覆されるかどうかを考慮することで、最低限のトラフィックで再収集対象領域内のセンサデータを網羅的に探索できる。

以上の処理を、センサデータが見つかる、もしくはデー

タ所持確認メッセージに対して返信がなくなるまで続ける。
 5. 動作の終了

データ要求エージェントによって起動された再収集エージェントは、次の観測時刻の τ 秒前に転送エージェントを起動し、自身の動作を終了する。起動した転送エージェントは、4.2 節で述べた方法に従って、観測位置に最も近い端末へ移動する。また、再収集メッセージにより起動した再収集エージェントは、起動から一定時間経過後に自身の動作を終了する。

6. 性能評価

本章では、提案方式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 Scenargie 1.5 *1を用いた。比較対象として、提案方式において 5.2.4 項と 5.2.5 項で述べた処理を行わない方式（再収集なし）の性能を調べた。

6.1 シミュレーション環境

1,000[m]×1,000[m] の 2 次元平面上に、1,000 台の移動型センサ端末および 1 台のシンクが存在するものとした。シンクは、領域左端および下端から (400[m], 400[m]) の座標に配置した。各端末はホームエリアをもったランダムウェイポイントモデル [1] に従って移動する。具体的には、観測領域を 200[m]×200[m] の大きさに分割した格子状の各領域をホームエリアとし、80[%] の確率でホームエリア、20[%] の確率で観測領域内全体からランダムに目標位置を決定し、0.5[m/秒] から 1[m/秒] の速度で等速移動する。目標位置では 60[秒] 停止する。

シンクは $1,000/\sqrt{G}$ [m] × $1,000/\sqrt{G}$ [m] の大きさのサブ領域に観測対象領域を分割し、各サブ領域の中心点を観測位置と定める。ランダムウェイポイントモビリティモデルの特性により、ホームエリア中央の端末密度が高くなるため、サブ領域とホームエリアの境界が一致する $G = 25$ のときが最もエージェントの配置に成功しやすく、 G が大きくなるにつれて配置に失敗する可能性が大きくなる。シンクおよび各端末は、IEEE 802.11p を使用し、伝送速度 3[Mbps]、通信伝搬距離が 100 ($r = 100$) [m] 程度となる送信電力でパケットを送信する。各端末は、[10, 30][秒] の範囲内からランダムに設定した周期を自身に設定し、設定された周期で定期的にセンシングを行う。

シンクはシミュレーション開始と同時に、各観測位置へ転送エージェントを配置する。転送エージェントデータサイズと再収集エージェントデータサイズはいずれも 60[B] とし、各端末は事前にエージェントのソースコードを所持しているものとする。観測周期 T は 30[秒] とし、シミュレーションの開始から終了まで、シンクは 30[秒] ごとに

表 2 メッセージサイズ

方式	手順	メッセージ名	サイズ [B]
共通	エージェント配置	配置メッセージ	83
	センサデータ返信	返信メッセージ	23 + 18 <i>i</i>
	エージェント移動	移動メッセージ	83
	隣接端末検索	隣接端末検索メッセージ	23
	応答	応答メッセージ	15
	共通	ACK	23
提案	データ要求エージェント移動	移動メッセージ	100
	データ要求エージェント移動	位置情報	15
	データ要求エージェント移動	移動依頼メッセージ	7
	欠損データ再収集	データ所持通知メッセージ	7
	欠損データ再収集	データ所持通知メッセージ	19
	欠損データ再収集	データ送信依頼メッセージ	7
	欠損データ再収集	データ所持確認メッセージ	92
	欠損データ再収集	再収集依頼メッセージ	7

データ収集を行う。転送エージェントは各観測時刻に観測値をシンクへ送信する。子からのセンサデータを受信するまでの待ち時間観測時刻 δ を 1[秒] とし、各転送エージェントは観測時刻の 1 ($\tau = 1$) [秒] 前に、自身の位置と観測位置の距離が 47 ($\alpha = 47$) [m] 以上離れていた場合に、最も観測位置に近い端末へ移動する。

以上の環境で、サブ領域数 G を [5², 10²] の範囲内で変化させ、1,000[秒] のシミュレーション実験を 15 回を行い、以下の三つの評価値を調べた。

- **取得精度**：データ要求の総数（観測回数）に対して、全観測位置のセンサデータをシンクが収集できた回数の割合。
- **トラヒック**：各観測周期における、シンクおよびすべての端末が送信したパケットのアプリケーション層でのデータサイズの平均値。アプリケーション層における各メッセージサイズを表 2 に示す。
- **取得待ち時間**：各観測周期において、その観測時刻から、全観測位置のセンサデータがシンクに到達するまでに要した時間の平均値。

6.2 取得精度

シミュレーション結果を図 9 に示す。グラフの横軸はサブ領域数 G を表す。

結果より、再収集なしの方式と比較して、提案方式の取得精度が高く保たれることがわかる。再収集なしの方式において、 $G = 25$ 以外の場合に取得精度が大きく下がるのは、観測位置から半径 $r/2$ の範囲内に端末が存在しないサブ領域が存在すると、データ収集が不可能となるためである。一方、提案方式では、観測位置から半径 $r/2$ の範囲内に端末が存在しないサブ領域が存在しても、センサデータの再収集条件を満たす端末が存在していれば、そのサブ領域のセンサデータを収集できる。ここで、提案方式においても、サブ領域数が多くなるにつれて取得精度が低下している。これは、サブ領域数の増加とともにデータ収集に必要なメッセージ交換が増加し、パケット衝突が発生しやすくなるためである。

*1 Scenargie1.5 Base Simulator revision 8217, Space-Time Engineering, <https://www.spacetime-eng.com/>

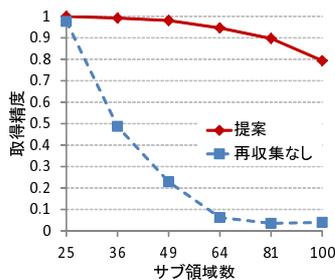


図 9 取得精度

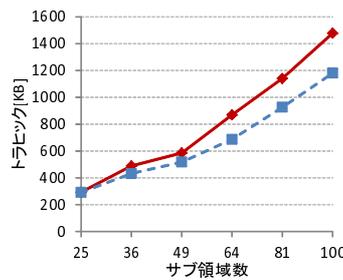


図 10 トラヒック

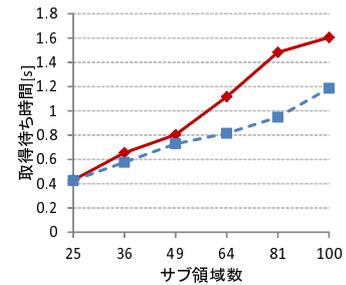


図 11 取得待ち時間

6.3 トラヒック

シミュレーション結果を図 10 に示す。グラフの横軸はサブ領域数 G を表す。

結果より、両方式ともにサブ領域数増加に伴い、トラヒックが増加することがわかる。これは、サブ領域数の増加とともに、収集するセンサデータ数が増加するためである。この増加傾向は、提案方式において特に大きいことがわかる。これは、提案方式において、センサデータの再送要求や、センサデータの再収集によって、多くのメッセージが交換されるためである。一方、再収集なしの方式は、転送エージェントの再配置は行いが、その再配置に失敗した場合、再配置を行った転送エージェントからシンクまでのセンサデータの転送が止まってしまうため、サブ領域増加によるトラヒックの増加傾向が小さい。

6.4 取得待ち時間

シミュレーション結果を図 11 に示す。グラフの横軸はサブ領域数 G を表す。

結果より、再収集なしの方式と比較して、提案方式における待ち時間が大きいことがわかる。これは、センサデータ再送要求や欠損データ再収集によって、各転送エージェントが親にデータを送信するまでに要する時間が長くなるためである。一方、再収集なしの方式は、すべてのサブ領域に転送エージェントが存在するか、消失した転送エージェントが再配置可能な状況でのみ、全観測位置からのセンサデータ収集に成功するため、取得待ち時間が短くなる。

7. まとめ

本稿では、筆者らがこれまでに提案した、密なモバイルセンサネットワークにおける転送エージェントを用いたデータ収集のための転送エージェント再配置方式を拡張し、転送エージェントの再配置に失敗した場合に生じる欠損データを再収集する方式を提案した。提案方式では、転送エージェントの再配置に失敗した場合に、その転送エージェントの子に対してセンサデータの再送要求を行い、またその転送エージェントが取得するはずだったセンサデータを再収集することで、センサデータが収集不可能になることを防ぎ、取得精度を向上できる。シミュレーション実

験により、提案方式の有効性を確認した。

提案方式では、エージェントが配置される一部の端末において多くのトラヒックが発生する可能性がある。しかし、実環境では、一般ユーザの所持する端末を用いてデータを収集するため、端末への負荷を分散させることが重要であると考えられる。そこで、今後はエージェントの動作による端末への負荷を分散させる方式について検討する予定である。

謝辞 本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金・基盤研究 (S)(21220002)、基盤研究 (B)(24300037)、および日本学術振興会科学研究費補助金・若手研究 (B)(23700078) 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] Camp, T., Boleng, J., and Davies, V.: A Survey of Mobility Models for Ad Hoc Network Research, *Wireless Communications and Mobile Computing*, Vol.2, No.5, pp.483-502 (2002).
- [2] 後藤啓介, 佐々木勇和, 原 隆浩, 西尾章治郎: 密なモバイルセンサネットワークにおける地理的粒度を考慮したデータ収集のためのエージェント制御方式, *情報処理学会論文誌*, Vol.53, No.2, pp.754-769 (2012).
- [3] 後藤 啓介, 佐々木 勇和, 原 隆浩, 西尾 章治郎: 密なモバイルセンサネットワークにおけるエージェントを用いたデータ収集のためのエージェント再配置方式について, *電子情報通信学会研究報告*, Vol.111, No.173, pp.7-12 (2011).
- [4] Heissenbüttel, M., Braun, T., Bernoulli, T., and Wälchli, M.: BLR: Beacon-less Routing Algorithm for Mobile Ad Hoc Networks, *Computer Communications*, Vol.27, No.11, pp.1076-1086 (2004).
- [5] Landsiedel, O., Götz, S., and Wehrle, K.: Towards Scalable Mobility in Distributed Hash Tables, *Proc. Intl. Conf. Peer-to-Peer Computing*, pp.203-209 (2006).
- [6] Shi, J., Zhang, R., Liu, Y., and Zhang, Y.: PrisenSense: Privacy-preserving Data Aggregation in People-centric Urban Sensing Systems, *Proc. INFOCOM'10*, pp.758-766 (2010).
- [7] Small, T. and Haas, Z.J.: The Shared Wireless Infostation Model: A New Ad Hoc Networking Paradigm (or Where There is a Whale, There is a Way), *Proc. ACM MobiHoc'03*, pp.233-244 (2003).