

モバイルセンサネットワーク上の 欠損データ再収集のためのエージェント制御方式

松尾 和哉^{1,a)} 後藤 啓介^{1,b)} 神崎 映光^{2,c)} 原 隆浩^{1,d)} 西尾 章治郎^{3,e)}

受付日 2015年5月29日, 採録日 2015年9月2日

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データを収集することが望まれる. これを実現するため, 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, 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. そこで本論文では, エージェント再配置方式を拡張し, 複数のエージェントを制御することで, エージェントの再配置失敗により生じた欠損データを再収集する方式を提案する.

キーワード: エージェント, データ収集, モバイルセンサネットワーク

An Agent Control Method for Regathering Missing Data in Mobile Sensor Networks

KAZUYA MATSUO^{1,a)} KEISUKE GOTO^{1,b)} AKIMITSU KANZAKI^{2,c)} TAKAHIRO HARA^{1,d)}
SHOJIRO NISHIO^{3,e)}

Received: May 29, 2015, Accepted: September 2, 2015

Abstract: In dense mobile sensor networks, to reduce traffic for gathering sensor data, it is desirable to gather sensor data from the minimum number of nodes necessary to guarantee the application requirement. For this aim, a data gathering method using mobile agents and a mobile agent redeployment method have been proposed assuming dense mobile sensor networks. However, these methods do not assume situations where some mobile agents cannot be deployed. In such a situation, a part of gathering sensor data is missing. In this paper, we extend the mobile agent redeployment method in order to regather sensor data even when the agent redeployment is failed. The extended method introduces some new agents in order to achieve missing data regathering.

Keywords: mobile agent, data gathering, mobile sensor network

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,
Suita, Osaka 565-0871, Japan

² 島根大学大学院総合理工学研究科総合理工学専攻
Collaborative Course in Science and Engineering, Inter-
disciplinary Graduate School of Science and Engineering,
Shimane University, Matsue, Shimane 690-8504, Japan

³ 大阪大学
Osaka University, Suita, Osaka 565-0871, Japan

a) matsuo.kazuya@ist.osaka-u.ac.jp

b) goto.keisuke@ist.osaka-u.ac.jp

c) kanzaki@cis.shimane-u.ac.jp

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

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

1. はじめに

近年, センサデバイスの小型化や低価格化が進み, スマートフォンなどの携帯端末に, 気温や湿度といった環境情報を測定する機能が搭載されつつある. これらの端末の普及にともない, 端末を持ち歩いている人々からその場の環境情報を提供してもらい, 市街地の気象観測などに役立てるユーザ参加型センシングへの関心が高まっている [1], [6].

一般に, ユーザ参加型センシングは, 携帯電話回線などの通信インフラを用いたデータ収集が想定されている. しかし, 通信インフラの帯域は有限であり, また多数の既存

のアプリケーションが通信帯域を共用しているため、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、通信インフラの帯域を消費することは好ましくない。そのため、通信インフラを介さないデータ収集の手段として、端末間の無線通信をデータ収集に使用するモバイルセンサネットワークが注目されている [10]。

ここで、ユーザ参加型センシングを利用する気象観測などのアプリケーションは、ある領域を対象とした 100 [m] 四方単位での気温のモニタリングといった、地理的に一定の粒度でデータを要求するものが多いものと考えられる。一方、繁華街などの人通りの多い場所においては、端末が多数存在する場合が多く、仮に対象領域内のすべての端末からデータを収集すると、過剰にデータを集めることとなり、通信帯域や端末のバッテリーを浪費してしまう。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データを収集することが望まれる。

このような背景のもと、筆者らは、文献 [3], [4] において、観測領域を格子状の領域（サブ領域）に分割し、各サブ領域から 1 つのデータを要求するアプリケーションを対象として、エージェントを用いた効率的なデータ収集方式を提案している。ここでエージェントとは、端末上で自律的に動作するアプリケーションプログラムである。この方式（従来方式）は、各サブ領域内の端末にエージェントを配置し、各エージェントに自律的にデータを送信させることで、アプリケーション要求を満たす最小限のデータのみ収集している。また、収集データの転送において、各エージェントを節点、データを集約・管理する端末であるシンクを根とする木構造ネットワーク（転送木）を構築し、この転送木に沿って、各節点でデータを集約しながらシンクへデータを送信することで、収集データの転送で生じるトラフィックを削減している。

しかし、従来方式は、すべてのサブ領域内に端末が多数存在している環境のみを想定しており、端末数が少なくエージェントを配置できないサブ領域が存在する場合、節点となるエージェントが消失し、転送木を保てなくなってしまう。そのため、エージェントが消失したサブ領域のデータおよびその子孫にあたるエージェントが存在するサブ領域のデータが欠損してしまい、アプリケーション要求が満たせなくなるという問題が発生する。これはアプリケーションが要求する地理的粒度（サブ領域数）や観測領域内の端末数に依存して発生する問題である。たとえば人々が持つスマートフォンからのデータ収集を想定すると、たとえ同じ場所であっても、昼間は端末数が多く、早朝や夜間は少ないといったように、端末数が時間帯によって大きく異なることが考えられ、サブ領域内の端末数が少ない場合、エージェントが配置できないサブ領域が現れ、上記の問題が発生する可能性がある。このような環境では、各サブ領

域に多数の端末が常時存在することを想定した従来方式の運用は現実的ではない。

そこで本論文では、端末がすべてのサブ領域において常時多数存在するとは限らず、従来方式においてエージェントが配置できない環境においても、アプリケーションが要求するデータを可能な限り収集できるように、従来方式を拡張する。提案方式では、基本的に従来方式によるデータ収集を行い、収集データに欠損が発生した場合のみ追加の処理により欠損したデータ（欠損データ）の再収集を行うことで、効率的なデータ収集を行いつつ、収集データの欠損を抑制する。具体的には、転送木上の子にあたるエージェントからデータを受信できなかった節点のエージェントが、そのエージェントが送信するはずだったデータが欠損したものと判断し、自端末上で、欠損データを持つエージェントからのデータの再収集を行う別のエージェントを起動する。このエージェントは、欠損データに関する情報を所持しながら、自身の子孫に該当するエージェントが存在するサブ領域、すなわち欠損データが発生したサブ領域へ向けて端末間を移動する。該当サブ領域においてエージェントが消失している場合は、欠損データに関する情報を基に、周囲の端末に専用のエージェントを配置し、各端末が所持しているデータから欠損データを探索する。

以下では、まず 2 章で本論文の想定環境について述べる。3 章で従来方式について概説し、4 章で提案方式について述べる。5 章でシミュレーション実験の結果を示す。6 章で関連研究について述べ、最後に 7 章で本論文のまとめと今後の課題について述べる。

2. 想定環境

2.1 端末の構成

本論文では、歩行する一般ユーザが所持するスマートフォンなどの携帯端末をセンサ端末（以降、端末）として想定する。各端末の無線通信範囲は等しく、半径 r の円とする。端末間の距離が r 以下である端末、すなわち互いに直接通信可能な端末を、隣接端末と表現する。各端末は領域内を自由に移動し、互いに無線マルチホップ通信で接続している。また、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。データを収集する端末（シンク）の位置は固定されており、アプリケーションが指定する観測周期ごとに、観測領域のある一定の地理的粒度を保証するように観測する。一方、シンク以外の端末は、アプリケーション要求を把握していないものとする。

2.2 端末のデータ管理方法

各端末は温度などの環境情報を測定した値（観測値）および位置情報を、想定される観測周期より短い周期で定期的に取得している。本論文では、観測値と位置情報を、ま

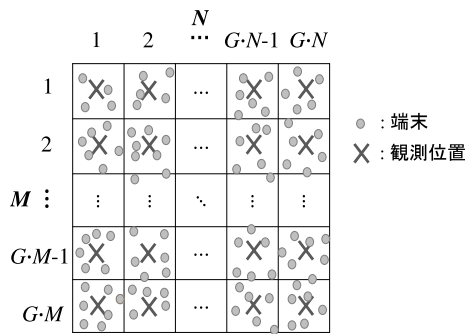


図 1 観測領域と観測位置

Fig. 1 A sensing area and sensing points.

とめてデータと表現する．各端末は，自身が観測したデータを保持するための一定の記憶容量を持っており，新たなデータを取得したとき，記憶容量に収まらないデータは，過去に取得したものから順に破棄するものとする．

2.3 アプリケーション要求

対象となる観測領域は縦横の比が $M : N$ の長方形を想定する．アプリケーションは， $G^2 \cdot M \cdot N$ ($G=1, 2, \dots$) で表される整数値を指定する．これを基に，シンクは観測領域を縦横それぞれ $G \cdot M$ と $G \cdot N$ に等分割し，正方形のメッシュを生成する．このとき，個々の正方形をサブ領域，サブ領域の総数である $G^2 \cdot M \cdot N$ を地理的粒度と呼び，それぞれのサブ領域の中心点を観測位置と定める（図 1）．アプリケーションがあるサブ領域のデータとして要求するデータは，以下の条件をともに満たすものである．

- 該当するサブ領域内で取得された．
- 前回の観測時刻から今回の観測時刻の間で取得された．

シンクは，この条件を満たす各サブ領域のデータを観測周期 $C[s]$ ごとに収集する．以降，周期 $C[s]$ で訪れるアプリケーションがデータを要求する時刻を観測時刻と呼ぶ．

3. 従来方式

本章では，筆者らが文献 [4] 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．従来方式では，3.2 節で述べる方法に従って，端末上で自律的に動作し，観測時刻ごとにデータの送信を行うアプリケーションプログラムである転送エージェント（Transmission Agent: TA）を，観測位置に最も近い端末に配置する．転送エージェント配置後は，図 2 で示すフローチャートに従って，各観測時刻にシンクまでデータを収集する．また，各処理でパケットを転送する際は，3.1 節で述べるジオルーティングを用いる．

3.1 ジョルーティング

従来方式では，端末 n_i (i は端末の識別子) およびシンクは，文献 [5] で提案された方式を基にしたジオルーティ

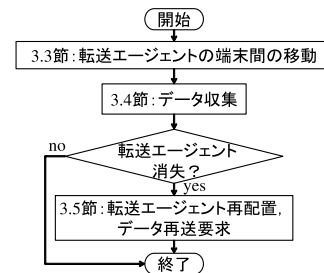


図 2 各観測時刻前後における動作のフローチャート

Fig. 2 The flowchart of operations before and after each sensing time.

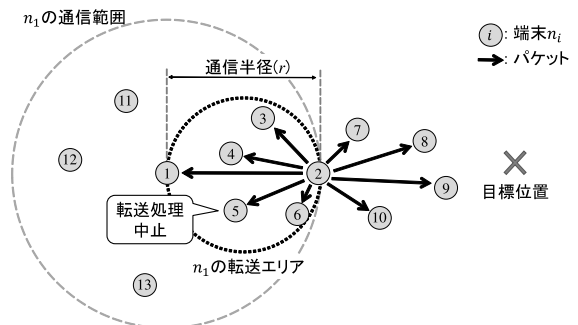


図 3 ジョルーティングにおけるパケット転送

Fig. 3 Packet forwarding in geo-routing.

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， n_i がパケットを送信した場合，そのパケットを受信した n_i の隣接端末が， n_i の位置，通信半径 r および目標位置から転送エリア (n_i よりも目標位置に近く，かつ転送エリア内の隣接端末が互いに直接通信可能な領域) を算出する．自身が転送エリア外に位置している場合は，受信したパケットを破棄する．たとえば図 3 において， $\{n_2, \dots, n_6, n_{11}, n_{12}, n_{13}\}$ は， n_1 が送信したパケットを受信している． n_1 の転送エリア外に位置する $\{n_{11}, n_{12}, n_{13}\}$ は，受信したパケットを破棄する．転送エリア内の隣接端末 $\{n_2, \dots, n_6\}$ は，目標位置に近いほど短くなる待ち時間を設けてパケットを転送する．ここでは，最も目標位置に近い n_2 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パケットを受信した場合，同様の待ち時間を設けて ACK を送信する．この ACK は，目標位置を中心とする半径 $r/2$ 以内のすべての隣接端末が検知できるため，ACK を受信したこれらの端末は，目標位置に最も近い端末を把握できる．

3.2 転送エージェント配置

シンクは，各サブ領域内の端末にアプリケーション要求に関する情報を配布しつつ，効率的に各サブ領域のデータを収集するために，各サブ領域に転送エージェントを配

表 1 TA データの転送方向

Table 1 Forwarding directions of TA data.

TA データの送信元	TA 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

表 2 転送エージェントに関する記号表記

Table 2 Symbol representations regarding transmission agents.

意味	記号
TA_i の親にあたる転送エージェント	$pTA(TA_i)$
TA_i の子にあたる転送エージェントの集合	$children(TA_i)$

置する. 具体的には, シンクが, 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: 以降 TA データ) を生成し, 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に最も近い端末へ送信する. TA データには, アプリケーション要求に関する情報 (観測周期, 観測粒度, シンクの位置) が含まれている. 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. 起動した転送エージェントは任意のタイミングでセンシングを行い, また, 同時並列的に転送エージェントを配置するために, 表 1 に示すルールに従い, ジオルーティングを用いて, 隣接サブ領域の観測位置に最も近い端末へ TA データを転送する. この転送処理は, 観測領域の上下端に位置するサブ領域に転送エージェントが配置されるまで繰り返される. この TA データが転送された順に, 転送エージェント間またはシンクと転送エージェントを論理的につないで親子関係を構築した木構造ネットワークを, 転送木と呼ぶ. 各転送エージェントは, 自身を配置したシンクや転送エージェントを転送木上の親として認識し, 自身が配置した転送エージェントを転送木上の子として認識する.

以降では, 転送エージェント TA_i に対し, 上記で述べた転送木上の親子にあたる転送エージェントを, 表 2 に示す記号で表現する. また説明の都合上, 転送木上で子が存在しない, すなわち転送木上の葉ノードにあたる転送エージェントを葉エージェントと呼び, それ以外, すなわち転送木上の内部ノードにあたる転送エージェントを内部エージェントと呼ぶ. さらに, ある転送エージェントを TA_i と表記した際は, TA_i 以外の転送エージェントを TA_i と区別するために i 以外の添字を用いて表記する. 転送木上におけるこれらのエージェント間の関係を, 転送木とともに図 4 に示す.

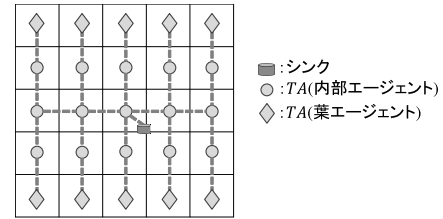


図 4 転送木および葉エージェントと内部エージェントの関係

Fig. 4 A forwarding tree and the relationship between leaf agents and inner agents.

3.3 転送エージェントの端末間の移動

転送エージェント TA_i は, 後述するデータ収集において, ジオルーティングを用いて送信されたパケットを受信できるようにするために, データ収集中は自身が担当する観測位置から $r/2$ の範囲内にいなければならない. そこで TA_i は, 観測時刻の $\tau[s]$ 前に, 自身の位置と観測位置の距離が α より大きいかどうかを確認する. ここで, α は, データ収集の途中で TA_i が観測位置から $r/2$ の範囲内から出ないようにするために設定するためのパラメータであり, $r/2$ 未満の値とする. 自身の位置と観測位置の距離が α より大きい場合, TA_i は端末間の移動を開始する. 具体的には, TA_i が, ジオルーティングを用いて, 観測位置に最も近い端末に向けて TA データを送信した後, 自身の動作を終了する. これにより, 観測位置から $r/2$ 以内に端末が存在する場合, その中で最も観測位置に近い端末が TA_i を起動する. なお, ここでの処理にはジオルーティングを用いるため, 転送エリア内, または観測位置から $r/2$ の範囲内に端末が存在しない場合, TA_i の移動が失敗し, 移動を試みた TA_i は消失する.

3.4 データ収集

葉エージェント TA_i は, 観測時刻ごとにジオルーティングを用いて, $pTA(TA_i)$ へ, 自身が取得したデータを含むデータパケットを送信する. 一方, 内部エージェント TA_j は, $children(TA_j)$ に含まれるすべての転送エージェントからデータパケットを受信した後, 受信したデータおよび自身のデータを 1 つのパケットにまとめて, ジオルーティングを用いて, $pTA(TA_j)$ へ送信する. パケットサイズが送信可能なパケットの最大容量を超えている場合, 下位層で積載可能な最小数のパケットに分割して送信する. 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データを 1 つのパケットにまとめて, シンクへ送信する. なお, 転送エージェントがジオルーティングによってパケットを受信した場合, 待ち時間なしで ACK を送信することで, ジオルーティングを終了する. この処理により, 観測領域の端から順に, データを集約しながらシンクへ送信し, データ収集時のトラフィックを削減する.

3.5 転送エージェント再配置，データ再送要求

内部エージェント TA_i は，観測時刻から $\delta[s]$ 経過しても， $TA_j \in \text{children}(TA_i)$ からデータパケットを受信できなかった場合，ジオルーティングを用いて， TA_j へデータ要求メッセージを送信する．このメッセージを受信した TA_j は，すでに $TA_i (= pTA(TA_j))$ へデータパケットを送信していた場合，ジオルーティングを用いて，そのデータパケットを TA_i へ再送信する．一方， $\text{children}(TA_j)$ に含まれるすべての転送エージェントからデータパケットを受信していない場合は，ジオルーティングを用いて，生存メッセージを TA_i へ返信する． TA_i は， $\text{children}(TA_i)$ に含まれるすべての転送エージェントからデータパケットを受信した場合，受信したデータおよび自身のデータを1つのパケットにまとめて，ジオルーティングを用いて， $pTA(TA_i)$ へ送信する．データ要求メッセージ送信後，さらに $\delta[s]$ 経過しても TA_j からの応答がない場合， TA_i は， TA_j が消失したものと判断し， TA_j の再配置を行う．

消失した TA_j の再配置は， $TA_i (= pTA(TA_j))$ が，対象となるサブ領域の観測位置に最も近い端末へ，ジオルーティングを用いて TA 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，TA データを受信した後， TA_j を起動する．起動した TA_j は，自身が葉エージェントである場合，ジオルーティングを用いて， TA_i へデータパケットを送信する．自身が内部エージェントである場合，ジオルーティングを用いて， $\text{children}(TA_j)$ に含まれる各転送エージェントへデータ要求メッセージを送信する．一方， TA_j が消失していないにもかかわらず，TA データが送信されてきた場合， TA_j が TA 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．

4. 提案方式

本章では，まず従来方式の問題点について述べる．次に，提案方式の設計方針と概要について述べ，その後，提案方式の詳しい手順について説明する．

4.1 従来方式の問題点と設計方針

従来方式では，3.1 節で述べたジオルーティング，および 3.5 節で述べた再配置方法において，4.1.1 項および 4.1.2 項で述べる問題点がある．本節では，それぞれの問題点，および解決のための設計方針について説明する．

4.1.1 ジョルーティングにおける問題点および解決方法

3.1 節で述べたジオルーティングでは，必要最小限のメッセージ数およびホップ数で目標位置までパケットを転送できるものの，転送エリア内に端末がない場合，パケットの転送に失敗する．

そこで提案方式では，転送エリア内に端末がない場合，転送エリアを避けながら目標位置へパケットを転送できる

ように，直接通信可能な端末の中で最も目標位置に近い端末を探索する方法 [8] を，3.1 節で述べたジオルーティングプロトコルと組み合わせ，パケットの転送に使用する．

4.1.2 再配置における問題点および解決方法

3.5 節で述べた再配置方法では， $TA_j (\in \text{children}(TA_i))$ が消失し，かつ TA_i からのジオルーティングによるパケット転送が失敗した，あるいは再配置先の観測位置から $r/2$ の範囲内に端末がない場合， TA_j を再配置できず，収集データに欠損が生じる．つまり，消失した TA_j の再配置に失敗したサブ領域のデータ，および TA_j を送信先としていたデータパケット ($\text{children}(TA_j)$ に含まれる各転送エージェントが送信したデータパケット) が欠損してしまい，その観測時刻におけるアプリケーション要求を満たせなくなる．以降では，これらのデータを欠損データと呼び，欠損データのうち，上記の TA_j がセンシングすべきであったデータ（再配置に失敗したサブ領域のデータ）を消失データ， $\text{children}(TA_j)$ が送信したデータパケットを宛先不明データと表現する．

この問題を解決するため，提案方式では，以下に示すアプローチをとる．

1. 消失データの探索・収集：2.1 節で述べたとおり，転送エージェントを起動していない端末はアプリケーション要求を把握していないため，2.3 節で述べた条件を満たす消失データを探索するためには，このデータを所持する端末へ，アプリケーション要求に関する情報を配布する必要がある．一方，消失データを所持する端末は，該当するサブ領域内またはその付近に位置している可能性が高いため，消失データが存在する領域内の端末のみへアプリケーション要求に関する情報を配布すれば，十分に消失データを探索でき，さらに探索に要するトラフィックの増大を抑制できる．
2. 宛先不明データの要求・収集： $\text{children}(TA_j)$ が消失していない場合，これらの転送エージェントは送信すべきデータパケットを所持している．しかし，それらのデータパケットの宛先は TA_j であるため， TA_j が消失している場合，宛先不明データとなり，そのままではシンクまで収集できない．そのため， TA_j を経由しない経路を一時的に構築し， $pTA(TA_j)$ から $\text{children}(TA_j)$ へ宛先不明データを要求し，再収集する．一方， $\text{children}(TA_j)$ が消失している場合，アプローチ 1 によって消失データを探索し，そのさらに子孫にあたる転送エージェントに対してアプローチ 2 を適用する．

提案方式では，アプローチ 1 を実現するために，端末にアプリケーション要求を配布しながら消失データを探索する探索エージェント (Search Agent: SA) を新たに導入する．また，アプローチ 2 を実現するために，宛先不明データを所持する転送エージェントまでの経路構築とデータ再送要

求を行うデータ要求エージェント (Data-Request Agent: DRA) を導入する。以降では、データ要求エージェントおよび探索エージェントを、表 3 に示す記号を用いて表現する。

4.2 動作概要

提案方式では、従来方式と同様に、3.2 節で述べた方法に従って転送エージェントを配置し、その後は図 2 に示すフローチャートに従って動作する。ただし、転送エージェント消失の判定および 3.5 節の処理 (図 2 の後半) は、図 5 に示すフローチャートに従う。

まず、4.4.1 項で述べる手順に従って、内部エージェント TA_i がタイマを設定する。タイマが切れた時点で $TA_j \in \text{children}(TA_i)$ からデータパケットを受信できていない場合、データ要求エージェント DRA_j を用いて TA_j の再配置およびデータ再送要求を行う。この DRA_j が、 TA_j を再配置可能かどうかを判断し、 TA_j を発見、または再配置可能な場合は、4.4.2 項で述べる手順に従い、発見した TA_j へのデータパケットの再送要求、または TA_j の再配置を行う。 TA_j が再配置できないと判断した場合、4.4.3 項および 4.4.4 項で述べる手順に従い、 $\text{children}(TA_j)$ に含まれる転送エージェントごとにデータ要求エージェントを用いて宛先不明データを再収集し、探索エージェント

表 3 データ要求エージェントと探索エージェントに関する記号表記
Table 3 Symbol representations regarding data-request and search agents.

意味	記号
TA_i を再配置するデータ要求エージェント	DRA_i
TA_i のデータを探索する探索エージェント	SA_i

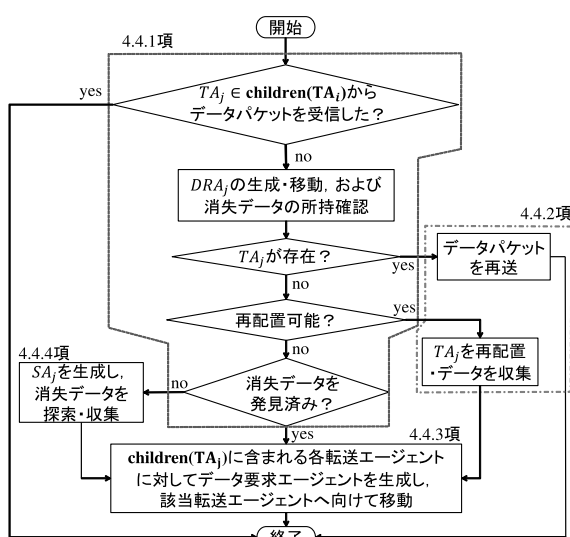


図 5 転送エージェントの再配置および欠損データ再収集のフローチャート

Fig. 5 The flowchart of redeploying a transmission agent and regathering missing data.

SA_j を用いて消失データを再収集する。以上の処理により、4.1.2 項で述べた問題点を解決する。

さらに提案方式では、4.1.1 項で述べた問題点を解決するために、各処理におけるジオルーティングを拡張し、4.3 節で述べる手順に従ってパケットを転送する。

4.3 拡張ジオルーティング

本節では、提案方式で用いるジオルーティングについて説明する。転送エリア内に端末が存在する場合の処理は、3.1 節で述べた方法と同じであるため、転送エリア内に端末が存在しない場合の処理についてのみ説明する。

n_i が 3.1 節で述べた方法に従ってパケットを転送した状況を考える。転送エリア内に存在する隣接端末がパケットを受信し、その中で最も目標位置に近い端末がパケットを転送した場合、 n_i はそのパケットの転送を検知できる。一方、転送エリア内に隣接端末がない場合、次ホップのパケット転送が行われないため、 n_i はパケット転送を検知できない。そのため n_i は、自身がパケットを転送してから一定時間経過しても、次ホップのパケット転送を検知できない場合、転送エリア内に隣接端末がないものと判断し、目標位置の座標を含む隣接端末検索メッセージを全隣接端末へ送信する。このメッセージを受信した隣接端末は、自身が n_i より目標位置に近い場合、目標位置に近いほど短くなる待ち時間を設定し、 n_i へ応答メッセージを返信する。待ち時間内に他の端末からの応答メッセージを検知した場合は、返信を中止する。 n_i は、応答メッセージを最初に返信した端末へパケットを送信する。たとえば図 6 において、データパケットを持つ n_1 は、自身の転送エリア内に隣接端末がないため、他の隣接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隣接端末のうち、 n_1 より目標位置に近い n_2 および n_4 が、 n_1 へ応答メッセージを返信する。 n_1 は、応答メッセージを最初に返信した n_4 へパケットを送信する。

4.4 転送エージェント再配置、データ再送要求

本節では、提案方式における転送エージェント再配置処理およびデータ再送要求処理について説明する。

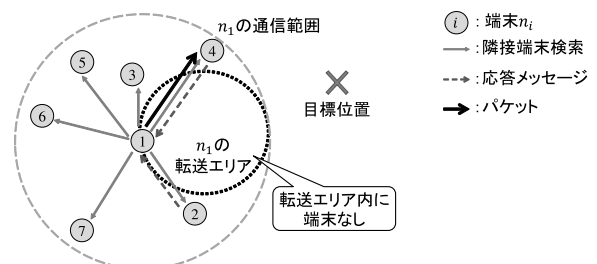


図 6 転送エリア内に端末がない場合の処理

Fig. 6 Message forwarding when no node exists in the forwarding area.

4.4.1 データ要求エージェントの生成と移動

内部エージェント TA_i は、観測時刻ごとにタイマを設定し、タイマが切れた時点でデータパケットを受信できていない $TA_j \in \text{children}(TA_i)$ の再配置およびデータパケットの再送要求を行う。タイマ T は以下の式に従って決定する。

$$T = \frac{Dist_{max} - (|x_{sink} - x| + |y_{sink} - y|)}{Grain} t_a. \quad (1)$$

ここで、シンクが位置するサブ領域の観測位置の座標を (x_{sink}, y_{sink}) 、自身が担当するサブ領域の観測位置の座標を (x, y) 、隣接するサブ領域の観測位置間の距離を $Grain$ とする。 $Dist_{max}$ とは、シンクが位置するサブ領域の観測位置から、一番遠い観測位置までのマンハッタン距離である。 t_a は転送木上の親または子にあたる転送エージェントへデータパケットを送信するために要する時間であり、観測位置間の距離 $Grain$ と、ジオルーティングを用いてパケットを1ホップ転送するのに必要な時間より決定する。このようにタイマを設定することで、転送木上のシンクから遠い転送エージェントから順に再配置処理が行われる。タイマが切れた時点で TA_j からデータパケットを受信していない TA_i は、TA データおよび自身が担当する観測位置の情報を所持する DRA_j を生成し、自端末上で起動させる。起動した DRA_j は、 TA_j が担当する観測位置を自身の目標位置に設定し、以下の手順に従って端末間を移動する。

- (1) DRA_j は、自身が起動している端末が消失データを所持しているかどうかを確認する。所持している場合、ジオルーティングを用いて消失データを TA_i へ転送する。これにより、再配置処理と同時並行的に消失データの探索ができる。
- (2) DRA_j は、自身が移動した経路の情報（以降、移動経路情報）として、自身が起動している端末の識別子を記録し、移動メッセージ（自身のコピーおよび消失データを発見済みかどうかを示す情報を含む）をブロードキャストする。
- (3) 目標の観測位置から $r/2$ の範囲内の端末が移動メッセージを受信した場合、4.4.2 項で述べる処理を行う。
- (4) 目標の観測位置からの距離が $r/2$ 以上である端末が移動メッセージを受信した場合、 DRA_j のコピーである DRA_j^{copy} を起動する。起動した DRA_j^{copy} は、目標の観測位置に近いほど短くなる待ち時間を設定し、移動メッセージ送信元の DRA_j へ、候補メッセージを返信する。待ち時間内に他の DRA_j^{copy} からの候補メッセージを検知した場合、返信を中止し、自身の動作を終了する。
- (5) DRA_j^{copy} から候補メッセージを受信した DRA_j は、最初に候補メッセージを返信した DRA_j^{copy} へ移動依頼メッセージを送信し、自身の動作を終了する。たと

えば図 7(a) において、 n_1 上で起動している DRA_j が送信した移動メッセージに対し、その通信範囲内にいる $\{n_2, n_6, n_7\}$ 上で起動している DRA_j^{copy} が候補メッセージを返信している。これらを集めた n_1 上の DRA_j は、目標の観測位置に最も近く、最初に候補メッセージを返信した n_2 上の DRA_j^{copy} へ移動依頼メッセージを送信する。

- (6) 移動依頼メッセージを受信した DRA_j^{copy} は、送信元の DRA_j に代わってオリジナルの DRA_j となり、消失データがこの時点で見つからない場合は手順 (1) から、すでに見ついている場合は手順 (2) から順に処理を行う。
- (7) 移動依頼メッセージの宛先とならなかった DRA_j^{copy} は、自身の動作を終了する。

ここで、手順 (2) において、以下のいずれかの条件を満たす場合、 DRA_j は、目標の観測位置への移動が困難である、すなわち再配置はできないと判断して、端末間の移動を中止する。

- 移動経路情報内に m 個の端末識別子が含まれている。
- 自身が起動している端末の識別子が移動経路情報にすでに含まれている。

上記の m は、 DRA_j が、移動経路情報として記録する端末識別子の数の上限値であり、観測位置間の距離 $Grain$ と直接通信可能な距離 r より決まる定数である。 DRA_j は、移動を中止した場合、4.4.3 項で述べる処理を行う。たとえば図 7(b) において、 DRA_j は、 $\{n_1, n_2, n_3, n_4, n_5\}$ の順に移動している。 n_5 の通信範囲内で最も観測位置に近い端末は n_4 であるため、 n_5 で起動している DRA_j は n_4 へ移動する。 n_4 上で起動した DRA_j は、移動経路情報にすでに自身が起動している端末の識別子が含まれているため、自身の移動を中止する。

4.4.2 データの再送、転送エージェントの再配置

目標の観測位置から $r/2$ の範囲内にいる端末が移動メッセージを受信し、さらに自身が再配置対象となる転送エージェント TA_j を起動している場合、待ち時間なしで ACK

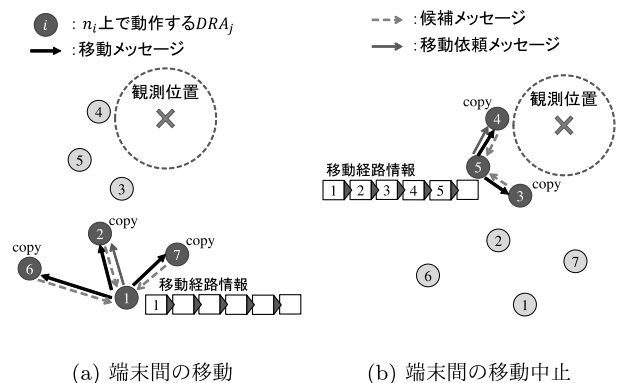


図 7 DRA_j の動作例 ($m = 6$)

Fig. 7 The procedure of a DRA_j ($m = 6$).

をブロードキャストし、ジオルーティングを用いて TA_i へデータパケットを再送する。ACK を受信した DRA_j は、自身の動作を終了する。

一方、 TA_j を起動していない場合は、 DRA_j^{copy} を起動し、目標の観測位置に近いほど短くなる待ち時間を設定して、移動メッセージをブロードキャストする。待ち時間内に他の DRA_j^{copy} がブロードキャストした移動メッセージを検知した場合は、移動メッセージのブロードキャストを中止する。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、 DRA_j^{copy} は、自身が最も観測位置に近いと判断し、 TA_j を起動する。その後、移動メッセージを受信した観測位置から $r/2$ の範囲内にいる端末が TA_j を起動することを防ぐために、ACK を送信し、自身の動作を終了する。起動した TA_j は、 $children(TA_j)$ に含まれる各転送エージェントに対して 4.4.1 項の処理を行い、宛先不明データの再収集を行う。 $children(TA_j)$ に含まれるすべての転送エージェントからデータパケットを受信できた場合、自身のデータとともに、ジオルーティングを用いて、 $TA_i (= pTA(TA_j))$ へデータパケットを送信する。

これにより、 TA_j が消失していない場合、または TA_j の再配置が可能な場合において、 TA_j およびその子孫が配置されるすべてのサブ領域からデータを収集できる。

4.4.3 再配置失敗の検知

4.4.1 項の手順において、観測位置から $r/2$ の範囲内に入る前に DRA_j が端末間の移動を中止した場合、 DRA_j は対象となるサブ領域における TA_j の発見または再配置に失敗している。ここで行うべき処理は、以下の2つである。

まず、この時点で DRA_j が消失データを発見していない場合、当該データを探索する必要がある。そのため DRA_j は、消失データを探索するための探索エージェント SA_j を新たに起動し、4.4.4 項で述べる手順に従ってデータを探索する。

また、再配置に失敗した TA_j が内部エージェントである、すなわち $children(TA_j) \neq \emptyset$ である場合、 $children(TA_j)$ に含まれるすべての転送エージェント、およびその子孫にあたる転送エージェントが持つデータを再収集する必要がある。そのため、 DRA_j は、各転送エージェント $TA_k \in children(TA_j)$ ごとにデータ要求エージェントを起動し、4.4.1 項における手順 (1) から順に処理を行うことで、宛先不明データの再収集を行う。なお、この時点で TA_j が存在しないため、 TA_k が存在するサブ領域内で送信されるデータパケットの宛先は、 TA_j ではなく、 TA_i 、すなわちデータ要求エージェントを起動した転送エージェントとする。これにより、消失した転送エージェント TA_j を経由しない一時的な経路を構築しつつ、欠損データを収集できる。

4.4.4 消失データの探索および再収集

前項の動作により起動した SA_j は、以下の手順に従い、図 8 に示す探索領域内において 2.3 節で述べた条件を満たすデータを所持する端末を探索する。想定される端末の最大速度を基にしたパラメータ u および観測周期を基に設定されるこの領域は、前回の観測時刻にサブ領域内にいた端末が今回の観測時刻までに u 以下の速度で移動可能な範囲となっており、この領域内に該当するデータを持つ端末がない場合、該当するデータが観測領域内にないものと判断する。

1) 隣接端末へのデータ所持確認： SA_j は、自身を起動するためのデータである探索エージェントデータ (SA データ) を含むデータ所持確認メッセージをブロードキャストする。SA データには消失データの条件 (前回と今回の観測時刻、および探索領域) および TA_j が担当する観測位置の情報が含まれている。

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、自身が探索領域内に存在する場合、 SA_j のコピーである SA_j^{copy} を起動する。起動した SA_j^{copy} は、端末の記憶領域を参照し、該当するデータを所持しているかどうかを確認し、所持している場合はデータ所持通知メッセージ、所持していない場合はデータ不所持通知メッセージを、 SA_j へ返信する。ここで、データ不所持通知メッセージには、自身の位置情報を付与する。また、これらのメッセージの返信には、 SA_j から遠い端末ほど短くなる待ち時間を設ける。各 SA_j^{copy} は、データ不所持通知メッセージの返信前に、他の SA_j^{copy} が送信した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。

- データ所持通知メッセージを傍受した。
- 待ち時間内に傍受したデータ不所持通知メッセージを送信した SA_j^{copy} が起動している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た。

3) 消失データの返送： SA_j 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 SA_j^{copy} 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

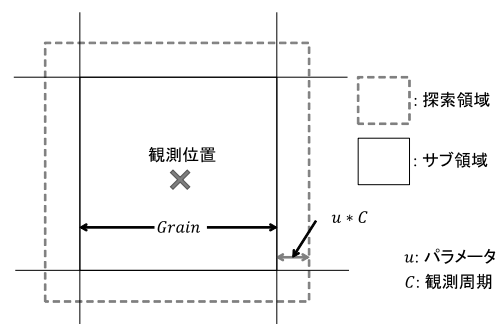


図 8 探索領域

Fig. 8 Searching area.

メッセージを受信した SA_j^{copy} は、ジオルーティングを用いて、自身が持つデータを TA_i へ送信する。たとえば図 9 では、端末 $\{n_2, n_3, n_4, n_5, n_6\}$ 上で起動した SA_j^{copy} のうち、該当するデータを所持している n_3 および n_6 上で起動した SA_j^{copy} がデータ所持通知メッセージを、その他の SA_j^{copy} はデータ不所持通知メッセージを返信する。 n_1 上で動作している SA_j は、データ所持通知メッセージを最も早く送信した、 n_6 上で動作している SA_j^{copy} 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、 n_6 上で動作している SA_j^{copy} は、ジオルーティングを用いて、 TA_i へデータを送信する。

4) データ探索範囲の拡張: SA_j がデータ不所持通知メッセージのみ受信した場合、このメッセージを送信したすべての SA_j^{copy} へ探索依頼メッセージを送信する。このメッセージを受信した SA_j^{copy} は新たな SA_j となり、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 SA_j を起動している端末は、すでに消失データを所持するかどうかを確認済みであるため、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。たとえば図 10(a) では、 $\{n_2, n_3, n_4, n_5, n_6\}$ 上で起動した SA_j^{copy} は、該当するデータを所持していないため、データ不所持通知メッセージを返信する。 n_1 上で動作している SA_j 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 SA_j^{copy} へ探索依頼メッセージを送信する。

ここで図 10(a) では、 n_7 上で動作している SA_j^{copy} 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、

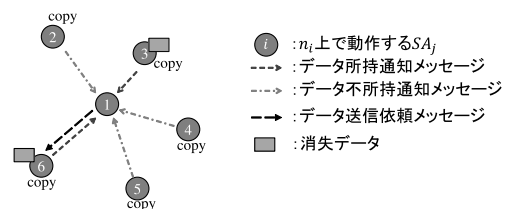


図 9 消失データを検出した場合の例

Fig. 9 An example of detecting a disappearing data.

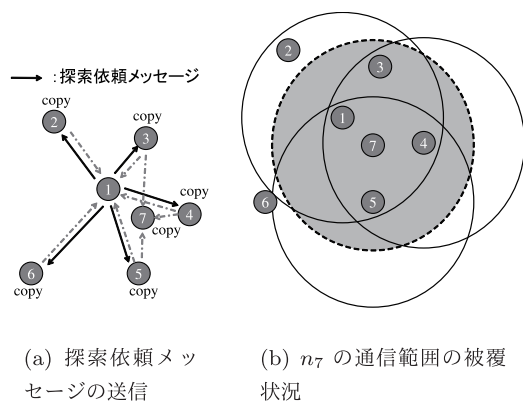


図 10 消失データを検出できなかった場合の例

Fig. 10 An example of not detecting a disappearing data.

図 10(b) に示すとおり、 n_7 の通信範囲全体が、 $\{n_1, n_4, n_5\}$ の通信範囲によって被覆されるためである。このように、通信範囲が重複する SA_j^{copy} への再収集依頼を最小限に抑えることで、最低限のトラフィックで該当するデータを網羅的に探索できる。

以上の処理を、消失データが見つかる、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) 動作の終了および再配置に失敗した転送エージェントの配置: 今回の観測時刻で再配置に失敗した TA_j は、次の観測時刻では配置できる可能性がある。そこで、 DRA_j によって起動された SA_j は、自身が所持する TA データを用いて、次の観測時刻の $\tau[s]$ 前に TA_j を起動し、自身の動作を終了する。起動した TA_j は、3.3 節で述べた方法に従って、観測位置に最も近い端末へ向けて端末間を移動する。また、データ所持確認メッセージにより起動した SA_j^{copy} は、起動から一定時間経過後に自身の動作を終了する。

5. 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 [9] を用いた。また本実験では、4.1.1 項、および 4.1.2 項で述べた問題点がそれぞれ解決できたかどうかを検証するために、比較対象として、従来方式、および従来方式に 4.3 節で述べた拡張ジオルーティングを適用した方式（従来方式（拡張））の性能を調べた。

5.1 シミュレーション環境

1,000 [m] × 1,000 [m] ($M : N = 1 : 1$) の 2 次元平面上に、 S 台 ($1,000 \leq S \leq 3,000$) 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 (420 [m], 420 [m]) の座標に、端末は領域内にランダムに配置した。また、各端末はランダムウェイトモデル [2] に従って移動するものとした。具体的には、各端末は、観測領域内全体からランダムに目標位置を決定し、目標位置ごとに [0.5, 1] [m/s] の範囲内でランダムに速度を決定し、決定した速度で等速移動するものとした。目標位置では 60 [s] 停止する。

シンクは 200 [m] × 200 [m] ($G^2 = 5^2$) 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。シンクおよび各端末は、IEEE 802.11g を使用し、伝送速度 6 [Mbps]、 $r = 100$ [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] [s] の範囲内からランダムに設定した周期で定期的にデータを取得する。各端末が記憶できるデータ数は 1 つとした。

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。TA データと SA データのサイズはいずれも 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 C

は 30 [s] とし、シミュレーションの開始から終了までデータ収集を行うものとする。また、提案方式および従来方式ともに、各転送エージェントは観測時刻の 1 ($\tau = 1$) [s] 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。内部エージェント TA_i が、 $\text{children}(TA_i)$ に含まれる転送エージェントからのデータパケットを受信するまでの待ち時間は、従来方式では各観測時刻から 1 ($\delta = 1$) [s] 後、提案方式は転送エージェントごとに式 (1) で定めた時間とする。4.4.4 項で述べた探索領域の大きさを決めるパラメータ u は、端末の最高速度 ($u = 1$) とした。4.4.1 項で述べた、隣接する転送エージェントへデータパケットを送信するために要する時間 t_a は 400 [ms] とした。この値は、準備実験により決定した。また移動経路情報内に記録できる端末識別子数 m は、 DRA_i が TA_i が担当する観測位置付近まで移動できるように、以下の式に従って決定した。

$$m = 2 \cdot \left\lfloor \frac{Grain}{r} \right\rfloor + 1. \quad (2)$$

以上の環境は、1 章で述べた、気象観測などの環境モニタリングを行うアプリケーションを想定したものである。ここで、環境モニタリングでは、要求に応じて様々な地理的粒度 G^2 や観測周期 C が設定されるものと考えられるが、地理的粒度 G^2 を変化させた場合の結果は、端末数 S を変化させた結果とほぼ同じになり、また観測周期 C を変化させた場合の結果では、提案手法と比較手法との間における性能差への影響は確認できなかった。そのため本章では、地理的粒度 G^2 を 5^2 、観測周期 C を 30 [s] に固定し、端末数 S を変化させた場合の結果のみを示す。

本実験では、上述の環境において、1,000 [s] のシミュレーション実験を 20 回ずつ行い、以下の 3 つの評価値の各平均値を計測した。

- **取得精度**：総観測回数に対して、全観測位置のデータをシンクが収集できた回数の割合。この値が大きいほど、アプリケーション要求を満足できた回数が増える。端末数 S を変化させることにより、アプリケーションが要求する地理的粒度に対して端末数が少なく、転送エージェントが消失する状況における各方式の性能を検証する。
- **トラヒック**：シミュレーション中に、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サイズの合計。この値が小さいほど、ネットワーク全体にかかる通信負荷が小さい。アプリケーション層における各メッセージサイズを表 4 に示す。表中の i は、パケット内に含まれるデータ数を示す。
- **取得待ち時間**：各観測時刻から、全観測位置のデータがシンクに到達するまでに要した時間の平均値。この値が小さいほど、各観測時刻において、シンクがデータを取得するまでの時間が短い。

表 4 メッセージサイズ

Table 4 Message size.

方式	手順	メッセージ名	サイズ [B]
共通	TA 配置・移動	TA データ	83
	データ収集	データパケット	$23 + 18 \cdot i$
	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	DRA 移動	移動メッセージ	100
		候補メッセージ	15
		移動依頼メッセージ	7
	欠損データ (消失) の探索	データ所持通知メッセージ	7
		データ所持通知メッセージ	19
		データ送信依頼メッセージ	7
		データ所持確認メッセージ	92
従来	TA 再配置・ データ再送要求	データ要求メッセージ	25
		生存メッセージ	25

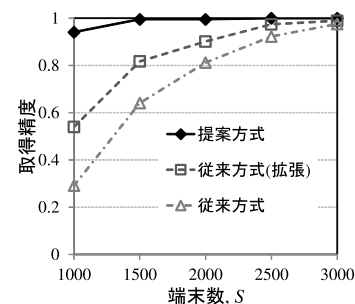


図 11 取得精度

Fig. 11 Delivery ratio.

5.2 評価結果

5.2.1 取得精度

結果を図 11 に示す。グラフの横軸は端末数 S を表し、縦軸は取得精度を表す。

この結果より、端末数の増加にともない、各方式の取得精度が増加することが分かる。これは、サブ領域内の端末数が増加し、転送エージェントが消失しにくい環境になるためである。また、提案方式と従来方式（拡張）が、従来方式に比べて高い取得精度を示すことが分かる。従来方式では、ジオルーティングを用いてパケットを転送する際、転送エリア内に端末が存在しないと、それ以降のパケット転送ができないのに対し、提案方式および従来方式（拡張）では、転送エリア内に端末がいなくても、通信範囲内により目標位置に近い端末が存在すれば、パケット転送を継続できる。また従来方式（拡張）では、観測位置から半径 $r/2$ の範囲内に端末がいなくてもサブ領域が存在すると、データ収集が不可能となるため、端末数が少ないと取得精度が低下する。しかし、提案方式では、観測位置から半径 $r/2$ の範囲内に端末がいなくてもサブ領域においても、消失データの条件を満たすデータを所持する端末がいれば、

そのサブ領域のデータを収集できる。さらに、再配置に失敗した転送エージェント TA_j の子にあたる転送エージェント ($\in \text{children}(TA_j)$) が送信したデータパケットの再収集も行うため、これらの欠損データの再収集に成功すれば、全観測位置のデータを収集できる。そのため、他の方式と比較して、提案方式は高い取得精度を実現できる。ただし、端末数が、1,000 台のときにおいては、欠損データを所持する端末が存在しない場合や、拡張ジオルーティングにおいて、パケットを転送した端末より目標位置に近い端末が存在せず、パケットの転送が中断される場合が発生するため、提案方式においても取得精度が低下する。欠損データが存在するにもかかわらず、拡張ジオルーティングの失敗により、収集データに欠損が生じてしまうという問題を解決するためには、端末密度に依存しないルーティング方式を用いる必要があるものと考えられる。

5.2.2 トラヒック

結果を図 12 に示す。グラフの横軸は端末数 S を表し、縦軸はトラヒックを表す。

この結果より、提案方式のトラヒックが、端末数の増加にともない減少することが分かる。これは、サブ領域内の端末数が増加し、転送エージェントが消失しにくい環境になることで、転送エージェントの消失を条件とする転送エージェントの再配置およびデータ再送要求にともなうトラヒックの発生頻度が低下するためである。一方、従来方式（拡張）および従来方式のトラヒックは、端末数によらずほぼ一定であることが分かる。従来方式（拡張）では、転送エージェント TA_j が消失した場合、その親 ($pTA(TA_j)$) からシンクまでに存在するすべての転送エージェントがデータパケットの再送要求を行うため、それに要するトラヒックが増加する一方で、 TA_j の再配置に失敗すると、データ収集が継続できないため、データ収集に要するトラヒックが減少する。端末数が増加すると、転送エージェントが消失しにくい環境になるため、データパケットの再送要求に要するトラヒックが減少し、データ収集に要するトラヒックが増加する。今回のシミュレーション環境では、上記の要因によるトラヒックの増減が相殺されたため、従来方式（拡張）および従来方式のトラヒックは、端末数に

よらずほぼ一定になった。

また、従来方式のトラヒックが、他の方式より小さいことが分かる。従来方式ではすべての処理を 3.1 節で述べたジオルーティングにより行っているため、ジオルーティングが成功しない環境下では各処理が中断されてしまい、トラヒックが小さくなる。一方、端末数が少ないとき、提案方式のトラヒックが、他の方式より大きいことが分かる。これは、提案方式においてデータ収集に成功する回数が他の方式より多くなることで、データ収集時のトラヒックが大きくなるためである。

上記をより詳細に検証するために、端末数 1,000 台のときのトラヒックの内訳を調査した。結果を図 13 に示す。ここで、図 13 における「再配置・欠損データ再収集」は、提案方式では 4.4 節で述べた処理、従来方式では 3.5 節で述べた処理をそれぞれ示す。この結果より、上述のとおり、提案方式におけるデータ収集に要するトラヒックが、他の方式より大きいことが分かる。一方、提案方式における再配置処理に要するトラヒックが、他の方式より小さいことが分かる。従来方式では、待ち時間までに $\text{children}(TA_i)$ に含まれるすべての転送エージェントからのデータパケットが揃わなかった転送エージェント TA_i が存在する場合、 TA_i からシンクまでに存在するすべての転送エージェントがデータパケットの再送要求を行う。一方、提案方式では、内部エージェント $TA_i = pTA(TA_j)$ が $\text{children}(TA_i)$ に含まれる転送エージェントからのデータパケットを受信するまでの待ち時間を、式 (1) で定めたタイマ時間に設定するため、消失した転送エージェントの親である TA_i のみがデータパケットの再送要求を行う。そのため、提案方式における再配置処理に要するトラヒックが、他の方式より小さくなる。また、従来方式（拡張）における再配置処理に要するトラヒックが、従来方式より小さく、データ収集に要するトラヒックが、従来方式より大きいことが分かる。この結果から、従来方式（拡張）では、拡張ジオルーティングを用いることによって、データ再送要求が始まる前にデータ収集に成功できる場合があることが分かる。

また、提案方式における欠損データの再収集による影響をより詳細に検証するため、端末数 1,000 台のときの欠損

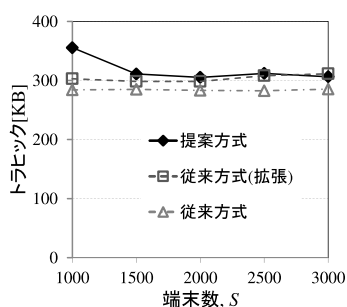


図 12 トラヒック

Fig. 12 Traffic.

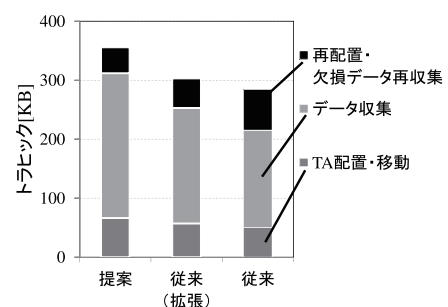


図 13 トラヒックの内訳

Fig. 13 A breakdown of traffic.

データの再収集に要したトラフィックの内訳も調査した。結果を図 14 に示す。この結果より、欠損データの再収集に要したトラフィックのほとんどが、データ要求エージェントの移動であることが分かる。これは、今回のシミュレーション環境において消失データが発生し、かつそのデータの条件を満たすデータを所持する端末が存在する場合、提案方式では、そのほとんどを、4.4.1 項で述べたデータ要求エージェントの移動によって発見できているためである。

5.2.3 取得待ち時間

結果を図 15 に示す。グラフの横軸は端末数 S を表し、縦軸は取得待ち時間を表す。

この結果より、各方式ともに、端末数の増加にともない、取得待ち時間が減少することが分かる。これは、サブ領域内の端末数が増加し、転送エージェントが消失しにくい環境になるためである。また提案方式における取得待ち時間が、他の方式より短いことが分かる。この結果は、転送エージェントの再配置を始めるまでの経過時間の違いによるものである。具体的には、転送エージェントの再配置を始めるまでの経過時間を、提案方式では転送エージェントごとに式 (1) で定めたタイマ時間としているのに対し、従来方式および従来方式 (拡張) では、転送エージェント TA_i が、 $\text{children}(TA_i)$ に含まれる転送エージェントからのデータパケットを受信するまでの待ち時間を、各観測時刻から 1 [s] 後としており、さらにその 1 [s] 後までにデータパケットまたは生存メッセージを受信できなかった場合に転送エージェントの再配置を開始する。そのため、今回の

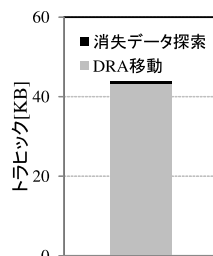


図 14 提案方式における欠損データの再収集に要したトラフィックの内訳

Fig. 14 A breakdown of traffic generated by regathering missing data in our proposed method.

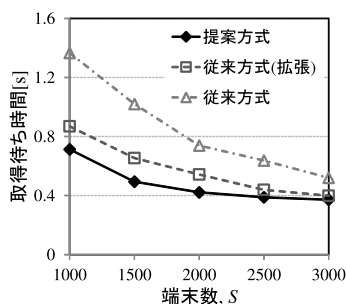


図 15 取得待ち時間

Fig. 15 Delay.

シミュレーション環境では、提案方式は、従来方式より転送エージェントの再配置を始めるまでの経過時間が短くなる。また従来方式 (拡張) の取得待ち時間が、従来方式より短いことが分かる。これは、5.2.2 項で述べたとおり、従来方式 (拡張) では、拡張ジオルーティングを用いることによって、データ再送要求が始まる前にデータ収集に成功し、全観測位置のデータがシンクに到達するまでの時間が短くなる場合があるためである。

6. 関連研究

文献 [7] では、端末密度が疎な環境において、移動型端末を用いてデータを収集する方式を提案している。文献 [7] では、一般ユーザの持つ携帯端末を用いてデータを収集する方式を提案している。携帯端末は、無線センサ端末からデータを受信し、インフラへのアクセスが可能な領域に移動した時点で、データをサーバへアップロードする。この研究は、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データを収集する点が、3 章で述べた従来方式および本研究と異なる。

文献 [11] では、無線センサネットワークにおいて、アプリケーションが要求するデータを効率的にデータを収集する方式を提案している。この方式では、まずシンクがクエリを観測領域内にフラッディングし、アプリケーションが要求するデータを所持する端末 (該当端末) を探索する。次に、互いに地理的に近い該当端末をクラスタ化し、各クラスタを節点とする最小シュタイナー木を構築する。この最小シュタイナー木を用いて該当端末から効率的にデータを収集する。この研究では、アプリケーションが要求するデータを所持する端末を探索する点で類似しているが、欠損したデータの収集を想定していない点、および移動型の端末を想定していない点が本研究と異なる。

文献 [12] では、無線センサネットワークにおいて、ハードウェアの故障や、センサ端末の再配置のコスト抑制により発生したカバレッジホールを、収集する環境情報の空間的相関性を用いて補間する方式を提案している。この方式では、観測領域内の全端末からデータを収集し、収集したデータから空間的相関性のモデルを作成する。このモデルを全端末へ配布することによって、カバレッジホール付近の端末が自律分散的にデータの補間を行う。この研究は、欠損したデータを補う点で本研究の目的と類似しているが、欠損データを収集せず、補間する点が本研究と異なる。

7. まとめ

本論文では、筆者らがこれまでに提案した、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

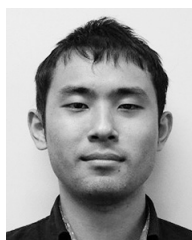
タを再収集するためのエージェント制御方式を提案した。提案方式では、転送エージェントの再配置に失敗した場合に、その転送エージェントの子にあたる転送エージェントが所持するデータ、およびその転送エージェントが送信するはずであったデータパケットを再収集することで、収集データの欠損を防ぎ、取得精度を向上させることができる。シミュレーション実験により、提案方式では、拡張したジオルーティングおよび欠損データの再収集によって取得精度を向上させることができることを確認した。

しかし、5.2.1 項で述べたように、提案方式を用いても収集データに欠損が発生する場合がある。そこで今後は、文献 [12] で提案されている方式のように、収集したデータから欠損データを補間するなど、欠損データが再収集できない環境においてもアプリケーション要求を満たせるように、提案方式を拡張する予定である。

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 (A) (26240013)、および JST 国際科学技術共同研究推進事業 (戦略的国際共同研究プログラム) 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] Burke, J., Estrin, D., Hansen, M., Parker, A., Ramanathan, N., Reddy, S. and Srivastava, M.B.: Participatory Sensing, *Proc. ACM SenSys 2006 Workshop on World-Sensor-Web* (2006).
- [2] 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).
- [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.741–753 (2012).
- [4] 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).
- [5] 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).
- [6] Khan, W.Z., Xiang, Y., Alsalem, M. and Arshad, Q.: Mobile Phone Sensing Systems: A Survey, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol.15, No.1, pp.402–427 (2013).
- [7] Park, U. and Heidemann, J.S.: Data Muling with Mobile Phones for Sensor networks, *Proc. ACM SenSys 2011*, pp.162–175 (2011).
- [8] Ruhup, S. and Stojmenovic, I.: Contention-Based Georouting with Guaranteed Delivery, Minimal Communication Overhead, and Shorter Paths in Wireless Sensor Networks, *IEEE Int. Symposium on Parallel & Distributed Processing 2010*, pp.1–9 (2010).
- [9] Scenargie1.5 Base Simulator revision 8217, Space-Time Engineering (online), available from <https://www.spacetime-eng.com/>.
- [10] Shi, J., Zhang, R., Liu, Y. and Zhang, Y.: PriSense: Privacy-Preserving Data Aggregation in People-Centric Urban Sensing Systems, *Proc. IEEE INFOCOM 2010*, pp.758–766 (2010).
- [11] Umer, M., Kulik, L. and Tanin, E.: Optimizing Query Processing Using Selectivity-Awareness in Wireless Sensor Networks, *Computers, Environment and Urban Systems*, Vol.33, No.2, pp.79–89 (2009).
- [12] Umer, M., Kulik, L. and Tanin, E.: Spatial Interpolation in Wireless Sensor Networks: Localized Algorithms for Variogram Modeling and Kriging, *Geoinformatica*, Vol.14, No.1, pp.101–134 (2010).



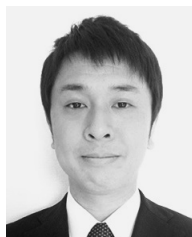
松尾 和哉 (学生会員)

2012 年大阪大学工学部情報システム工学科卒業。2014 年同大学大学院情報科学研究科博士前期課程修了後、同博士後期課程に在学中。モバイル環境におけるデータ収集に関する研究に従事。日本データベース学会学生会員。



後藤 啓介 (学生会員)

2010 年京都工芸繊維大学情報工学課程卒業。2012 年大阪大学大学院情報科学研究科博士前期課程修了後、2012 年より同研究生を経て、現在、同博士後期課程に在学中。モバイル環境におけるデータ収集に関する研究に従事。



神崎 映光 (正会員)

2002 年大阪大学工学部情報システム工学科卒業。2004 年同大学大学院情報科学研究科博士前期課程修了。2005 年同大学院情報科学研究科博士後期課程中退後、同大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻特任助手、2007 年より同助教を経て、2014 年より島根大学大学院総合理工学研究科総合理工学専攻准教授となり、現在に至る。博士 (情報科学)。2008 年、2009 年本学会論文賞受賞。2009 年本学会山下研究記念賞受賞。無線ネットワーク、通信プロトコル、分散処理に関する研究に従事。IEEE, ACM, 電子情報通信学会, 日本データベース学会各会員。



原 隆浩 (正会員)

1995 年大阪大学工学部情報システム工学科卒業。1997 年同大学大学院工学研究科博士前期課程修了。同年同大学院工学研究科博士後期課程中退後、同大学院工学研究科情報システム工学専攻助手、2002 年同大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻助手、2004 年より同大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻准教授となり、現在に至る。工学博士。1996 年本学会山下記念研究賞受賞。2000 年電気通信普及財団テレコムシステム技術賞受賞。2003 年本学会研究開発奨励賞受賞。2008 年、2009 年本学会論文賞、2015 年日本学術振興会賞受賞。モバイルコンピューティング、ネットワーク環境におけるデータ管理技術に関する研究に従事。IEEE、ACM、電子情報通信学会、日本データベース学会の各会員。



西尾 章治郎 (正会員)

1975 年京都大学工学部数理工学科卒業。1980 年同大学大学院工学研究科博士後期課程修了。工学博士。京都大学工学部助手、大阪大学基礎工学部および情報処理教育センター助教授、1992 年より大阪大学工学部教授、2002 年より同大学大学院情報科学研究科教授を経て、2015 年 8 月より大阪大学総長となり、現在に至る。その間、大阪大学サイバーメディアセンター長、大学院情報科学研究科長、理事・副学長を歴任。データ工学に関する研究に従事し、紫綬褒章、立石賞功績賞、文部科学大臣賞等を授与される。本会では理事、副会長を歴任し、論文賞、功績賞を受賞。IEEE、日本工学会、電子情報通信学会フェロー。本会フェロー。