

密なモバイルセンサネットワークにおける複数シンクの データ収集条件を考慮したエージェント制御方式

後藤 啓介[†] 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

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

あらまし 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、カバレッジ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が望まれる。筆者らはこれまでに、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を提案している。しかし、この方式では、1台のシンクがセンサデータを収集する環境を想定しており、周期や地理的粒度が異なる複数のシンクがセンサデータを収集する場合、効果的にトラフィックを削減できない。そこで、本稿では、複数シンクのカバレッジを保証し、効率的にセンサデータを収集する、エージェント制御方式を提案する。提案方式では、シンク間で重複した観測位置のエージェントを共通化し、配置されたエージェントは複数シンクの収集データを集約して転送する。これにより、取得精度を維持しつつ、さらなるトラフィックの削減を可能とする。

キーワード モバイルセンサネットワーク, データ収集エージェント, ジオルーティング

Keisuke GOTO[†], Yuya SASAKI[†], Takahiro HARA[†], and Shojiro NISHIO[†]

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

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

1. はじめに

近年の半導体技術や無線通信技術の発展に伴い、多数のセンサデバイスが環境情報をモニタリングする無線センサネットワーク、およびルータ機能をもつ無線通信端末のみで一時的な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。最近では、これら二つの技術を統合し、センサデバイスを搭載した携帯端末で構成されるモバイルセンサネットワークが注目されている。

本研究では、センサデバイスを搭載した PDA やスマートフォンを所持する一般のモバイルユーザをセンサ端末とする、モバイルセンサネットワークを想定する。このような環境では、センサ端末の数が非常に多く、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ものと考えられる。一方、アプリケーションの観点からは、地理的に一定の粒度のデータを要求するケースが多いと考えられる。そこで、トラフィック削減のために、アプリケーションが要求する地理的粒度である、カバレッジを保証する必要最低限の端末のみからデータを収集することが望まれる。

筆者らは文献 [3] において、センサ端末の動作をエージェントによって制御することにより、効率的にセンサデータを収集す

る方式を提案した。エージェントとは、端末上で自律的に動作し、端末間の移動が可能なアプリケーションであり、シンクによって生成され、観測位置周辺の端末に配置される。エージェントが、観測位置をセンシング可能なセンサ端末上からセンサデータの送信を制御することにより、データ収集におけるトラフィックを削減している。しかし、文献 [3] の方式では、1台のシンクがセンサデータを収集する環境を想定しており、複数のシンクがセンサデータを収集する場合、シンクごとにエージェントを設置して、独立してセンサデータを収集するため、効果的にトラフィックを削減できない。

そこで、本稿では、周期や地理的粒度が異なる複数シンクのカバレッジを保証し、効率的にセンサデータ収集する、エージェント制御方式を提案する。提案方式では、役割の異なる 2 種類のエージェントとして、管理エージェントと転送エージェントを用いてセンサデータを収集する。管理エージェントは、シンクによって観測領域の中心点に配置され、ネットワーク上で実行中のデータ収集およびその収集条件を管理する。転送エージェントは、管理エージェントによって観測位置に配置され、観測位置のセンシングを保証できるように端末間を移動し、観測周期ごとにセンサデータをシンクへ転送する。シンク間で重複する観測位置では、転送エージェントを共通化し、1台の

転送エージェントが、複数のシンクへセンサデータを転送する。また、転送エージェントは、複数シンクの収集データを一時的に集約して、各シンクへセンサデータを転送する。これにより、取得精度を維持しつつ、さらなるトラヒックの削減をめざす。

以下では、2. で関連研究を紹介する。3. で本研究の想定環境について述べ、4. で提案方式について述べる。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

まず、密な無線センサネットワークにおけるデータ収集に関する既存研究を紹介する。文献[4]では、無線センサネットワークにおける階層的なデータ収集方式を提案している。この方式では、センサ端末間に上下関係を設定し、下位のセンサ端末が上位のセンサ端末へセンサデータを送信し、最上位のセンサ端末はシンクへ集約されたセンサデータを送信する。上位の端末が下位の端末から受信したセンサデータを集約および圧縮することで、トラヒックを削減している。文献[2]では、無線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を提案している。エージェントはシンクによって生成され、センサ端末を訪問してセンサデータを収集する。この方式では、エージェントがセンサ端末を訪問する毎にセンサデータを圧縮することで、データ収集におけるトラヒックを削減している。しかし、これらの研究では、センサ端末の移動を考慮しておらず、ネットワークトポロジの動的な変化に対応できない。また、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ないため、本研究とは異なる。

次に、アドホックネットワークにおけるエージェントを用いた位置情報サービスを紹介する。文献[8]では、アドホックネットワークにおける位置情報サービスを想定し、エージェントが端末間を移動することにより、特定の地理的エリアに長時間にわたって存在し続け、データの収集および提供を行う手法を提案している。この研究では、配布端末によって生成された、位置依存情報を付近の移動型端末へ配布するサービスを想定しており、観測位置から離れたシンクへのデータ送信を想定する本研究とは異なる。

最後に、モバイル P2P システムに関する既存研究を紹介する。文献[6]では、モバイル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手法を提案している。データに対応する座標から通信半径の $1/2$ の距離内にいる端末がそのデータを保持するように、端末間でデータを交換することで、データに対応する座標へのパケットルーティングによるデータへのアクセスを保証している。文献[7]では、モバイルファイル共有システムのための P2P に基づく分散文書検索サービスを提案している。文書を検索するクエリが転送される際、クエリを転送する端末が自身の保持するクエリに該当する文書の情報をクエリに添付することにより、同一の文書を複数の端末が返信することを防いでいる。これらの研究では、インターネットあるいは端末が保持する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

	1	2	...	$kN-1$	kN
× 観測位置 1	×	×	...	×	×
2	×	×	...	×	×
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
$kM-1$	×	×	...	×	×
kM	×	×	...	×	×

図 1 観測領域と観測位置

センシングの地理的粒度を保証したデータ収集を想定する本研究とは異なる。ただし、文献[6]におけるデータを特定位置の周辺に留ませる手法は、本稿におけるエージェントを観測位置に留ませる手法に近いアイデアを用いている。

3. 想定環境

3.1 システム構成

本稿では、無線通信機能を備え、音や光などの物理現象の定期的な観測（センシング）を行う、移動型センサ端末が構成する密なモバイルセンサネットワークを想定する。端末が存在する領域では既存の通信基盤が利用できず、各端末は他の端末と無線マルチホップ通信を行う。シンクは固定されており、アプリケーションからの要求に基づいて、観測領域を一定期間、一定の地理的粒度で周期的（観測周期）に観測する。以降では、シンクの位置情報およびアプリケーションからの要求内容を合わせてデータ収集条件と呼ぶ。

対象とする観測領域は、縦横が $M : N$ の整数比となる 2 次元平面とし、アプリケーション $app_i (i = 1, 2, \dots)$ は $k_{app_i}^2 \cdot M \cdot N (k_{app_i} = 1, 2, \dots)$ の整数値として観測粒度を指定する。アプリケーションから要求を受け取ったシンクは、観測領域を $k_{app_i} \cdot M \times k_{app_i} \cdot N$ の格子状のサブ領域に分割し、各サブ領域の中心点 ($k_{app_i}^2 \cdot M \cdot N$ 個) をセンシング対象となる観測位置とする (図 1)。ここで、アプリケーションおよびシンクは複数存在し、各シンクはそれぞれ周期や地理的粒度が異なるアプリケーションからの要求を受け取る。

ネットワークを構成する移動型センサ端末は、自由に移動し、各端末の無線通信範囲を r とする。各端末は GPS あるいはそれに類する測地装置を備えており、位置情報に基づくデータ転送 (3.2 節) が可能とする。また、領域内には多くの端末が存在し、領域内の任意の位置に対し、その位置をセンシング可能な端末が常に複数存在するものとする。

3.2 ジョルーティング

シンクおよびセンサ端末（端末）は、文献[5]において提案されている手法をもとにした、ジョルーティングプロトコルを備えていることを想定する。

このプロトコルでは、目標位置および送信端末の位置情報からなるパケットヘッダを用いて目標位置までデータを転送する。送信すべきデータパケットを持つ発信端末は、目標位置および自身の現在位置の座標をパケットヘッダに書き込み、隣接端末へパケットをブロードキャストする。パケットの受信端末は、

パケットヘッダ内の目標位置および送信端末の位置情報から、自身が転送エリアにいるかどうかを判定する。ここで、転送エリアとは、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の通信範囲 r 以内に存在する領域である。

転送エリア内にいる端末は、転送待ち時間を設け、転送待ち時間内に他の端末からのパケットの転送が確認できなかった場合、自身がパケットを転送する。転送待ち時間を、転送エリア内においてより目標位置に近い端末程小さい値をとるように設定することにより、転送エリア内において目標位置に最も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、このパケットを検知できるため、転送処理を中止する。同様の処理を繰り返すことにより、パケットは目標位置付近へと転送され、最終的に目標位置に最も近い端末がパケットを受信する。

4. 複数シンクのデータ収集条件を考慮したエージェント制御方式

提案方式では、ネットワーク内で最初のアプリケーション app_1 から要求を受け取ったシンクは、4.1 節で説明するエージェントの配置方法に基づいて、観測領域の中心点に管理エージェントを配置する。シンクによって配置された管理エージェントは、 $k_{app_1}^2 \cdot M \cdot N$ 個の観測位置に転送エージェントを配置する。管理エージェントによって配置された転送エージェントは、4.2 節で説明する転送木の構築方法に基づいて、転送木上の親子関係を決定する。その後、転送エージェントは、観測周期に従い、自身が動作するセンサ端末がセンシングしたデータを、4.3 節で説明するセンサデータの転送方法に基づいて、シンクへと転送する。また、管理エージェントは、新たにシンクが参入するごとに、追加の転送エージェントを配置し、4.4 節で説明する転送木の再構築方法に基づいて、データ収集条件を転送エージェントへ配布する。転送エージェントは、より効率的な転送木を計算し、親子関係を更新する。さらに、管理エージェントおよび転送エージェントは、自身が動作するセンサ端末がそれぞれ観測領域の中心点や観測位置である担当地点から離れてしまった場合、4.5 節で説明するエージェントの移動方法に基づいて、担当地点に最も近いセンサ端末へと移動する。

4.1 エージェントの配置

提案方式では、複数のシンク間で重複した観測位置の転送エージェントを共通化することで、転送エージェントの数を減少し、エージェントの移動によるトラヒックを削減する。

まず、アプリケーションから要求を受け取ったシンクが、管理エージェントを起動するためのデータである管理エージェントデータを作成する。その後、作成した管理エージェントデータに、アプリケーションからの要求内容および自身の位置情報からなるデータ収集条件を添付して、3.2 節の方法に基づいて、観測領域の中心点へ送信する。観測領域の中心点に最も近いセンサ端末は、管理エージェントデータを受信し、管理エージェントを起動する。ここで、既に起動状態の管理エージェントが存在する場合、その管理エージェントが、観測領域の中心点に最も近いセンサ端末の代わりに、管理エージェントデータを受信する。

新しく起動した、または管理エージェントデータを受信した管理エージェントは、管理エージェントデータに添付されているデータ収集条件を参照して、転送エージェントを起動するためのデータである転送エージェントデータを作成する。ここで、管理エージェントは、4.2 節で述べる転送木の構築方法に基づいて構築される転送木およびその収集トラヒックを、すでに構築されている転送木のそれぞれを利用した場合、およびこれらの転送木を利用せず、独立した転送木を構築する場合について求める(4.2.2 項で詳述)。既存の転送木のいずれかを利用した場合の収集トラヒックが、独立した転送木を構築した場合と比べて小さい場合、収集トラヒックが最小となる既存の転送木のデータ収集条件を転送エージェントデータに添付する。なお、収集トラヒックとは、管理エージェントデータに添付されているデータ収集条件に対応したデータ収集時に発生するトラヒックを指す。

その後、管理エージェントは、3.2 節の方法に基づいて、自身が位置す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。観測位置に最も近いセンサ端末は、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。転送エージェントデータを受信した転送エージェントが、自身の観測位置と受信した転送エージェントデータ内の観測位置が同じ場合、自身のデータ収集に加えて、受信した転送エージェントデータに基づいたデータ収集を実行することで、ネットワーク全体のエージェント数が減少する。このように、単一の転送エージェントが複数のシンクに対するデータ収集を行うことで、エージェントの移動によるトラヒックを削減できる。

新しく起動した、または転送エージェントデータを受信した転送エージェントは、すべての観測領域に転送エージェントを配置するために、転送エージェントデータを自身が位置するサブ領域に隣接するサブ領域の観測位置へ転送する。この転送エージェントデータの転送は、管理エージェントが存在するサブ領域に対して、横方向、続いて縦方向へと伝搬し、最終的にすべての観測位置に転送エージェントを配置できる。

4.2 転送木の構築

提案方式では、複数の異なるシンクにより生成された転送エージェント間でも転送木を構築することで、収集トラヒックを削減する。以下では、転送エージェントがエージェント配置時に最初に構築する転送木(初期転送木)の構築手順について述べた後、初期転送木および既存の転送木を利用した効率的な転送木を構築する方法について述べる。以降、説明のため、転送木の節点を観測位置として動作を述べる。

4.2.1 初期転送木の構築

最初のアプリケーションにおける管理エージェントおよび各転送エージェントは、次の手続きに従って、当該アプリケーションにおける初期転送木を構築し、転送木上における各転送エージェントの親を決定する。

(1) 以下の手続きにより、シンクから遠い順にソートした観測位置 $\{p_1, p_2, \dots, p_P\}$ の順に転送木上の親をそれぞれ決定する。

(2) 観測位置 p_i を担当する転送エージェントがシンクへ

転送するセンサデータの個数 D_{p_i} を、 p_i の転送木上の子の数に 1 を加えた値に設定する。なお、転送木上の子がない場合は、 D_{p_i} の値を 0 に設定する。

(3) p_i とシンクが位置するサブ領域の観測位置を対角に持つ矩形領域に対して、 p_i 、シンクが位置するサブ領域の観測位置、およびシンクに近い方の頂点がなす三角形領域に存在する Q 個の観測位置 $\{q_1, q_2, \dots, q_Q\}$ およびシンクを、 p_i の親候補とする。なお、矩形領域の頂点のうち、 p_i およびシンクが位置するサブ領域の観測位置を除く 2 点とシンクとの距離が等しい場合は、シンクが位置するサブ領域の観測位置と縦方向の座標が等しい方の頂点を三角形領域の頂点として選択する。

(4) p_i においてセンシングしたセンサデータおよび子から受信したセンサデータを、直接シンクへ転送する際の収集トラヒックを次式によって導出する。

$$Traffic_{p_i, sink} = Hop_{p_i, sink} \cdot (D_{p_i} \cdot Size_{S_Data} + Size_{Header}). \quad (1)$$

ここで、 $Hop_{x, sink}$ 、 $Size_{S_Data}$ 、 $Size_{Header}$ はそれぞれ、観測位置 x からシンクへの転送ホップ数、センサデータのサイズ [B]、パケットヘッダのサイズ [B] である。転送ホップ数は 2 地点間の地理的距離を 1 ホップあたりの平均転送距の推定値 $\gamma (0 < \gamma < r)$ で割った値とする。 γ は提案方式のパラメータである。

(5) p_i においてセンシングしたセンサデータを、 $\{q_1, q_2, \dots, q_Q\}$ のいずれかを經由してシンクへ転送する際の転送トラヒック $Traffic_{p_i, q_j}$ を導出する。この値は、 p_i から q_j へのセンサデータおよびパケットヘッダの収集トラヒックと、 q_j からシンクへのセンサデータの収集トラヒックの和とし、次式で与えられる。

$$Traffic_{p_i, q_j} = Hop_{p_i, q_j} \cdot (D_{p_i} \cdot Size_{S_Data} + Size_{Header}) + Hop_{q_j, sink} \cdot D_{p_i} \cdot Size_{S_Data}. \quad (2)$$

ここで、 $Hop_{x, y}$ は観測位置 x から y への転送ホップ数である。

(6) 手順 (4) および (5) で導出した収集トラヒックの値が最小となる観測位置またはシンクを p_i の親に定める。 p_i の親となった観測位置は、自身の子の数を 1 加算する。

図 2 は、手順 (3) における p_i の親候補が存在する領域の例を表している。図 2 において、(2, 5) のサブ領域の観測位置 p_i は、(2, 6) のサブ領域の観測位置を子にもつため、 D_{p_i} の値は $2 (= 1 + 1)$ となる。まず、シンクの位置する (4, 2) のサブ領域の観測位置、(2, 2) および (4, 5) のサブ領域の観測位置を角とする矩形領域を、 p_i の親候補が含まれる領域と定める。その後、 p_i 、シンクの位置するサブ領域の観測位置 q_6 、および矩形領域においてシンクにより近い角にあたる (2, 2) のサブ領域の観測位置 q_1 を角とする三角形領域に含まれる観測位置 q_1, q_2, \dots, q_6 を p_i の親候補とする。次に、 p_i がもつ $D_{p_i} = 2$ 個のセンサデータを直接シンクへ転送する際の収集トラヒック $Traffic_{p_i, sink}$ 、および、 p_i から $\{q_1, q_2, \dots, q_6\}$ のそれぞれを經由してシンクへ転送する際の収集トラヒック $\{Traffic_{p_i, q_1}, Traffic_{p_i, q_2}, \dots, Traffic_{p_i, q_6}\}$ を、式 (1)、および式 (2) を用いてそれぞれ求める。

以上のように、初期転送木の構築では、管理エージェントお

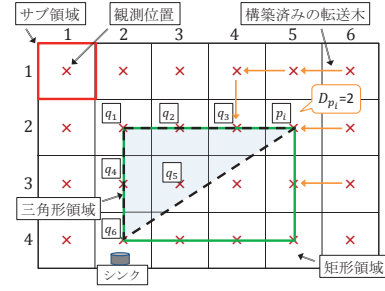


図 2 矩形領域と三角形領域の例

よびすべての転送エージェントが、共通の手続きで転送木上の親子関係を求める。これにより、転送木構築のために転送エージェント間で親子関係を確立するためのメッセージ交換が不要となり、余計なトラヒックを発生させずに転送木を構築できる。

4.2.2 既存の転送木の利用

既存の転送木を利用して転送木を構築する際は、既存の転送木の節点および枝を利用した転送経路の構築も考慮して、各転送エージェントの親を決定する。なお、ここでの転送木の構築に利用される既存の転送木における節点を被利用地点とよび、既存の転送木を利用する側の観測地点を利用地点とよび、既存の転送木 e を利用する転送木を構築する場合も、前項の手続きにおける手順 (5) まで実行し、 p_i に対する収集トラヒック $Traffic_{p_i, sink}$ および $\{Traffic_{p_i, q_1}, Traffic_{p_i, q_2}, \dots, Traffic_{p_i, q_Q}\}$ を導出する。その後、以下の手順に従って、転送木 e 上の転送経路を利用する転送木を導出する。

(1) すべての被利用地点において、 p_i からの距離に近い順にソートした A 個の観測位置 $\{a_1, a_2, \dots, a_A\}$ を対象に、以下の手続きを行う。

(a) 転送木 e において a_k が a_k のシンクへセンサデータを転送する際に經由する H 個の観測位置 $\{h_1, h_2, \dots, h_H\}$ における l 番目の観測位置 $h_l (l = 1, \dots, H)$ を選択する。

(b) すべての被利用地点のうち、選択した h_l からの距離が近い順にソートした B 個の観測位置 $\{b_1, b_2, \dots, b_B\}$ の観測位置の中から、観測位置 $b_m (m = 1, \dots, B)$ を選択する。

(c) p_i から $a_k, h_1, h_2, \dots, h_l, b_m$ を順に經由してシンクへセンサデータを転送する際の収集トラヒック $Traffic_{p_i, a_k, h_1, b_m}$ を求める。 $Traffic_{p_i, a_k, h_1, b_m}$ は、 p_i から a_k へのセンサデータおよびパケットヘッダの収集トラヒック、 a_k から $\{h_1, h_2, \dots, h_{l-1}\}$ を經由した h_l へのセンサデータの収集トラヒック、 h_l から b_m へのセンサデータの収集トラヒック、および b_m からシンクへのセンサデータの収集トラヒックの和とし、次式で与えられる。

$$Traffic_{p_i, a_k, h_1, b_m} = (Hop_{p_i, a_k} + Hop_{h_l, b_m}) \cdot (D_{p_i} \cdot Size_{S_Data} + Size_{Header}) + (Hop_{a_k, h_1} + \sum_{o=1}^{l-1} (Hop_{g_o, h_{o+1}}) + Hop_{b_m, sink}) \cdot D_{p_i} \cdot Size_{S_Data}. \quad (3)$$

(d) 手順 (1) において選択できるすべての組合せ、および前項の手順 (4) および (5) で導出した収集トラヒックが最小となる観測位置またはシンクを p_i の親に定める。

4.2.3 転送エージェントの動作

転送エージェントは、4.2.1項および4.2.2項で述べた手順に従い、自身が担当する観測位置 p_i の親を決定する。また、 p_i の親が被利用地点である場合は、自身が担当する観測位置の親である転送木 e 上の観測位置 a_n へ、転送エージェントのデータ収集条件を送信する。 a_n を担当する転送エージェントは、データ収集条件を受信し、 p_i を a_n の子に設定する。その後、 a_n を担当する転送エージェントは、 p_i を担当する転送エージェントから受信したデータ収集条件および自身のデータ収集条件を用いて、 p_i と同様の手順により、 p_i のセンサデータの転送経路を求める。

4.3 センサデータの転送

観測位置またはその付近のセンサ端末に配置された転送エージェントは、観測期間の間、観測周期に従って、自身が動作するセンサ端末がセンシングしたデータをシンクへ送信する。このとき、構築した転送木に沿ってデータを送信し、データを集約しながらシンクへ返信することで、トラヒックを削減する。

まず、転送木上の子を持たない観測位置を担当する転送エージェントが、観測周期ごとに、センサデータを親に向けて送信する。このとき、他のデータ収集における観測地点（被利用地点）を利用する転送木を構築している転送エージェントは、被利用地点により構成される転送木とデータ収集が重なる時刻においては4.2.2項で求めた転送木を、データ収集が重ならない時刻においては4.2.1項で求めた転送木をそれぞれ用いる。センサデータは、3.2節の方法に基づいて転送され、宛先の観測位置またはその付近のセンサ端末上で動作中の転送エージェントが受信する（他のセンサ端末は受信したデータを破棄する）。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、自身のデータおよび受信したデータを集約し、自身の親へ送信する。以降、同様の処理を繰り返すことにより、シンクは自身が位置するサブ領域の転送エージェントから、すべての観測位置のデータを受信できる。

ここで、既存の転送木を利用したデータ収集が行われた場合、被利用地点を担当する転送エージェントが、利用地点においてセンシングされたセンサデータを含むパケットを受信する。この場合、転送エージェントは、以下の手順に従って、利用地点におけるセンサデータの転送先を決定する。

- (1) 自身の子が利用地点である場合、自身の親（被利用地点）を転送先とする。このとき、転送するパケットには、利用地点によるデータ収集条件を付与する。
- (2) 利用地点によるデータ収集条件が付与されたパケットを受信した場合は、4.2.2項の手順に従い、対応する利用地点からシンクまでの転送経路のうち、収集トラヒックが最小となるものを導出する。
- (3) 手順(2)の結果、自身の次に経由する観測地点が被利用地点となった場合、自身の親（被利用地点）を転送先とする。
- (4) 手順(2)の結果、自身の次に経由する観測地点が利用地点となった場合は、利用地点でセンシングされたセンサデータのみを分離し、対応する観測地点に送信する。

4.4 転送木の再構築

管理エージェントは、シンクから管理エージェントデータを受信するごとに、すべての転送木を再構築した場合のトラヒックの削減量を計算し、この量が再構築に要するオーバーヘッドを上回る場合、すべてのデータ収集について転送木を再構築する。

まず、実行中のデータ収集について、それぞれの初期転送木を4.2.1項の手続きを用いて求める。その後、最も地理的粒度が大きいデータ収集から順に、他のデータ収集における転送木を利用していないデータ収集のそれぞれについて、その初期転送木を利用して（被利用木として）構築する転送木（利用木）とその収集トラヒックを、4.2.2項の手続きを用いて求める。

続いて、求めた利用木のそれぞれについて、初期転送木を用いてデータ収集を行う場合と比較して、利用木と被利用木によるデータ収集のいずれかが終了するまでの残り時間までに削減できるトラヒックの総量を、次式によって算出する。

$$\sum_{i \in O} \sum_{j \in O, j \neq i} (Traffic_{i_j} - Traffic_{i_{default}}) \cdot Syn_sensing_{i_j} \quad (4)$$

上式の O は、管理エージェントがこれまでに受信した（管理エージェントデータに添付されている）データ収集条件のデータ収集を要素としてもつデータ収集の集合、 $Traffic_{x_y}$ は、データ収集 x がデータ収集 y の初期転送木を用いた利用木における収集トラヒック、 $Traffic_{x_{default}}$ は、データ収集 x が初期転送木を用いた場合の収集トラヒック、 $Syn_sensing_{x_y}$ はデータ収集 x が、自身の残りの観測期間内にデータ収集 y の初期転送木を被利用木として利用して、データ収集を行う回数である。この値を累積トラヒック削減量とよぶ。

算出した値が最も大きくなる利用木を転送木として選択する。ただし、初期転送木を用いた場合の収集トラヒックが最小となる場合は、初期転送木を選択する。その後、すべてのデータ収集について各観測位置にデータ収集条件を再配布することで発生するトラヒックの推定値 θ を算出する。 θ はデータ収集ごとの転送エージェントへのデータ収集条件配布によるトラヒック、すなわち、観測位置数、隣接するサブ領域の観測位置間の転送ホップ数、およびデータ収集条件のデータサイズの積をすべてのデータ収集について足し合わせた値である。

導出したすべての組合せにおける累積トラヒック削減量の和が閾値 θ 以下である場合、転送木の再構築によるトラヒックの削減が見込めないと判断し、再構築を行わずに処理を終了する。

閾値 θ を上回った場合、実行中のデータ収集ごとに、選択した転送木（被利用木）のデータ収集条件が添付された転送木再構築メッセージを作成する。初期転送木を用いる場合は、空の転送木再構築メッセージを作成する。その後、作成した転送木再構築メッセージを管理エージェントから最も近い観測位置へ送信する。転送木再構築メッセージの宛先である観測位置を担当する転送エージェントは、転送木再構築メッセージを受信し、自身の転送木上の親を4.2.2項の手続きによって更新する。転送木再構築メッセージが空の場合は、初期転送木上の親を転送木上の親として設定する。その後、転送木再構築メッセージは、4.1節で述べた転送エージェントデータと同様に、管理エージェ

ントが位置するサブ領域に対して、横方向、続いて縦方向に位置するサブ領域へと順に転送され、すべての転送エージェントが、転送木を更新する。

4.5 エージェントの移動

エージェントが動作している端末が観測領域の中心点や観測位置、すなわち担当地点から離れてしまった場合、エージェントはセンシング可能な領域を離脱する前に、担当地点に最も近い端末へ移動する。

具体的には、管理エージェントと転送エージェントは、自身の位置と担当地点の距離がそれぞれ閾値 α, β より大きくなったら移動を開始する。ここで、 α は自身より観測位置に近いすべての端末と通信が可能な距離 $r/2$ 以下、 β は $r/2$ 以下かつセンサ端末が観測位置をセンシング可能な距離とする。エージェントは担当地点に最も近い端末へ移動するために、自身のエージェントデータを複製したパケットを作成し、このパケットをブロードキャストする。パケットを受信した端末のうち、3.2節と同様の方法を用いて、観測位置に最も近い端末が最初にACKを送信し、エージェントを起動する。他の端末は、このACKを検知できるため、同じACKの送信を中止する。元のエージェントは、ACKを検知することにより、自身よりも観測位置に近い端末がパケットを受信したことを確認し、動作を終了する。

5. シミュレーション評価

本章では、拡張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^(注1)を用いた。

5.1 シミュレーション環境

1,080[m] × 1,080[m] の2次元平面上に2,000台の移動型センサ端末 (M_1, \dots, M_{2000}) および2台のシンク (S_1, S_2) が存在する。 S_1, S_2 はそれぞれ、領域左端および下端から (40 [m], 40 [m]), (W_2 [m], W_2 [m]) の座標に静止している。各センサ端末はランダムウォークモデル [1] に従って移動し、50 [秒] おきに、0 [m/秒] から 1 [m/秒] の速度でランダムに決定した方向に移動する。シンクおよび各センサ端末は、IEEE 802.11a を使用し、伝送速度 6 [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。各センサ端末は、継続的に領域をセンシングしており、センシングの有効距離を 100 [m] とする。 S_1, S_2 はそれぞれ、観測領域を $6 \times 6, 1,080/\sqrt{G_2}$ [m] × $1,080/\sqrt{G_2}$ [m] の大きさの格子状の 36、および G_2 個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。

S_1 はシミュレーション開始から 380 [秒] が経過した時点で、領域左端および下端から (540[m], 540[m]) の座標に管理エージェントを配置し、管理エージェントは S_1 の各観測位置へエージェントを配置する。 S_1 の観測周期は 30 [秒] とし、 S_1 はシミュレーションの開始から終了まで、 $400 + 30m$ ($m = 0, 1, 2, \dots$) [秒] の時刻 (S_1 の観測時刻) にセンサデータを収集する。 S_2 は、

表 1 パラメータ設定

パラメータ	意味	値
W_2	S_2 の座標 (W_2 [m], W_2 [m])	250 (160 ~ 860)
G_2	S_2 のサブ領域数	4 (4 ~ 36)

680 [秒] の時刻に、領域左端および下端から (540[m], 540[m]) の座標に管理エージェントデータを転送し (S_1 が配置した管理エージェントが S_2 の管理エージェントデータを受信する)、管理エージェントは S_2 の各観測位置へエージェントを配置する。 S_2 は、シミュレーションの開始から終了まで、 $700 + 30m$ [秒] の時刻 (S_2 の観測時刻) にセンサデータを収集する。管理エージェントデータと転送エージェントデータのサイズは 128 [B] とし、各センサ端末は事前にこれらのエージェントのソースコードを所持しているものとした。また、提案方式のパラメータを $A = 5, B = 5, \gamma = 80$ に設定した。

提案方式の比較対象として、管理エージェントを用いず、各シンクが転送エージェントを配置する方式 (比較方式) の性能を調べた。転送エージェントは、自身が担当するデータ収集条件しか持たないため、センサデータの転送の際、4.2.1 項で述べた初期転送木を用いてセンサデータを転送する。また、管理エージェントによる転送木の再構築は行われず、提案方式、および比較方式ともに、エージェントは、自身の動作するセンサ端末が観測位置から 47 [m] ($\alpha = \beta = 47$) 以上離れた場合、観測位置に最も近いセンサ端末へと移動する。

表 1 に本実験で用いたパラメータを示す。各パラメータは基本的には定数値をとるが、そのパラメータの影響を調べる際には括弧内の範囲で変化させた。以上のシミュレーション環境において、108[m] × 108[m] の矩形領域毎の端末数が同数となるように、各センサ端末の初期位置をランダムに決定した。 S_1, S_2 の観測の終了時刻は共に、4,000 [秒] とし、以下の3つの評価値を調べた。

- **平均取得精度:** 各観測周期において、すべての観測位置のセンサデータをシンクが取得した場合、データ取得に成功したと定める。取得精度は、観測回数に対してデータ取得に成功した回数の、データ要求の総数 (観測回数) に対する割合、平均取得精度は、シンク S_1, S_2 の取得精度の平均値。
- **平均取得待ち時間:** 取得待ち時間は、各観測時刻からデータ取得に成功した時刻までの平均経過時間シンク S_1, S_2 の取得待ち時間の平均値。
- **トラヒック:** シミュレーション時間内にすべてのシンクおよびすべてのセンサ端末が送信したパケットの MAC 層におけるデータサイズを合計した値。表 2 にアプリケーション層における各メッセージサイズを表す。ここで、 i は、返信メッセージに含まれるデータ数を表す。また、各メッセージサイズに 64 [B] (ヘッダ分) を加えた値を MAC 層におけるトラヒックとする。

5.2 シンク間の位置関係の影響

S_2 の座標を決定するパラメータ W_2 を変化させたときの実験結果を図 3 から図 5 に示す。これらの図において、グラフの横軸は W_2 を表し、縦軸は、図 3 では平均取得精度、図 4 では

(注1) : Scenargie 1.5 Base Simulator revision 8217, Space-Time Engineering, <http://www.spacetime-eng.com/>

表 2 メッセージサイズ

手順	メッセージ名	サイズ [B]
エージェント配置	配置メッセージ	192
データ返信	返信メッセージ	$64 + 32 \cdot i$
エージェント移動	移動メッセージ	160
転送木再構築	転送木再構築メッセージ	192

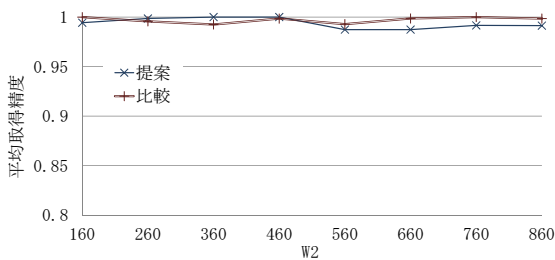


図 3 平均取得精度

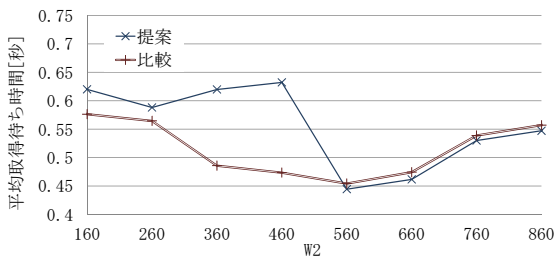


図 4 平均取得待ち時間

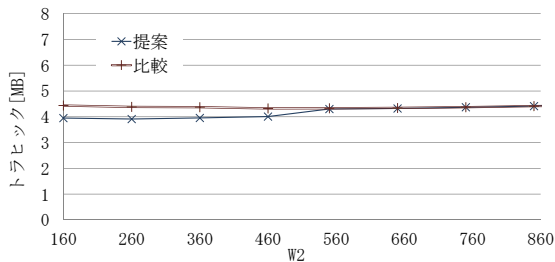


図 5 トラフィック

平均取得待ち時間，図 5 ではトラフィックを表す。

図 3 より，提案方式，比較方式ともに平均取得精度が高いことがわかる。また，シンクが取得したすべてのセンサデータは有効，すなわち観測位置をセンシングしたデータであった。

図 4 より， W_2 が 160 から 560 の範囲内において，比較方式は W_2 が 560 に近づくにつれて，平均取得待ち時間が短くなる。これは，シンクが観測領域中央に近いほど，シンクと各観測位置との平均距離が短くなり，かつ転送木の高さが小さくなるためである。提案方式の平均取得待ち時間が比較方式と比べて大きいのは， S_2 が S_1 の転送木を利用しており， S_2 の木の高さが大きくなるためである。例えば， $W_2 = 160$ の転送木は図 6 となり， S_2 の転送木の高さは提案方式では 7，比較方式では 3 となり，提案方式における転送経路が比較方式と比べて長くなる。一方， W_2 が大きいとき，提案方式と比較方式との平均取得待ち時間の差が小さくなる。これは， W_2 の値が増加し， S_2 が領域中心をまたいで S_1 と反対方向に位置することで，提案方式において S_2 が S_1 の転送木を利用しにくくなるためである。例えば， $W_2 = 460$ の転送木は，図 7 となっており， S_2 の転送木の高さは提案方

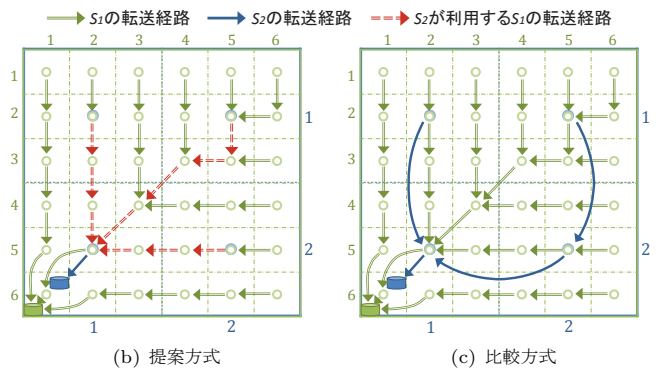


図 6 $W_2 = 160$ の時の転送木

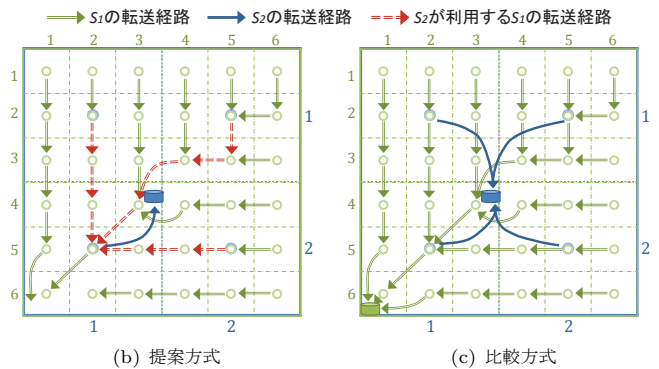


図 7 $W_2 = 460$ の時の転送木

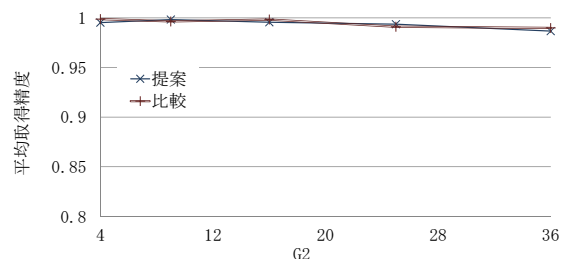


図 8 平均取得精度

式では 7，比較方式では 1 となり，図 6 の場合と同様に，提案方式における転送経路が比較方式と比べて長くなるが， W_2 が 560 より大きい場合，両方式の転送木は同じになる。そのため，両方式の平均取得待ち時間の差はわずかとなる。

図 5 より， W_2 が 160 から 460 の範囲内において，提案方式のトラフィックは比較方式と比べて小さいことがわかる。これは，提案方式では， S_2 が S_1 の転送木を利用しており，宛先であるシンクが異なるセンサデータを集約可能なためである。また， W_2 が 560 より大きい場合，両方式は同一の転送木を用いてセンサデータを転送するため，両方式のトラフィックはほぼ同等となる。

5.3 サブ領域数の影響

S_2 のサブ領域数 G_2 を変化させたときの実験結果を図 8 から図 10 に示す。これらの図において，グラフの横軸は G_2 を表し，縦軸は，図 8 では平均取得精度，図 9 では平均取得待ち時間，図 10 ではトラフィックを表す。

図 8 より，両方式ともにサブ領域数が増加すると取得精度が

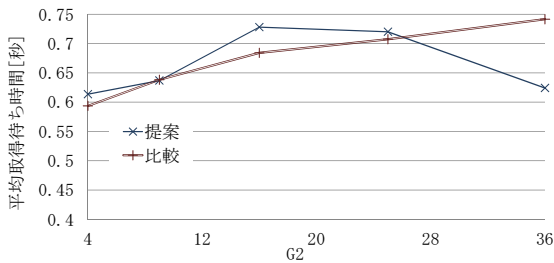


図9 平均取得待ち時間

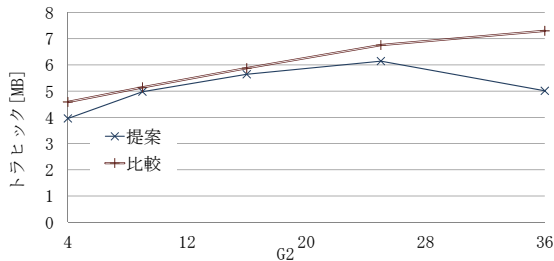


図10 トラフィック

わずかに低くなることわかる。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。

図9より、両方式ともにサブ領域数が増加すると平均取得待ち時間が大きくなる傾向にあることがわかる。これは、サブ領域数の増加によって、シンクがセンサデータを収集する観測位置数が増加し、転送木の高さが大きくなるためである。転送木の高さが大きくなると、最も深い葉のエージェントのセンサデータをシンクが受信するまでの転送ホップ数が増加する。これにより、ジオルーティングの転送待ち時間の累積値が増加し、平均取得待ち時間が増加する。また、 $G_2 = 9$ の時、両方式の平均取得待ち時間が一致している。これは、提案方式において、利用木が構築されず、比較方式と同じ転送木を用いてセンサデータを転送したためである。また、 $G_2 = 36$ の時、提案方式の平均取得待ち時間が比較方式と比べて大幅に小さくなることわかる。これは、 S_1, S_2 のすべての観測位置が一致し、提案方式においてすべての転送エージェントが共通化されることにより、データ収集に必要なメッセージ交換が減少したためである。送信キューにメッセージを持つセンサ端末は、MAC層においてパケット衝突を回避するために、自身以外のメッセージを検出した場合、送信タイミングを遅らせる。その結果、センサデータ転送のためのメッセージ数が増加すると、平均取得待ち時間が増加する。比較方式では、1つの観測位置に2台のエージェントが動作しており、地理的に非常に近い2台のセンサ端末、もしくは1台のセンサ端末上で2台のエージェントがほぼ同時にパケットを送信するため、上記現象が発生しやすくなるが、提案方式は、転送エージェントの共通化によって同じ観測位置から送信されるパケットは1つであるため、上記現象の発生頻度が小さく、平均取得待ち時間が小さくなる。一方で、既存の転送木を用いた転送木は、被利用木における各節点の子の数が増加し、多くの場合、シンクごとに個別に構築する転送木と比べて高さが大きくなるため、提案方式の平均取得待ち時間は比較方式と比べて大きくなっている。

図10より、提案方式のトラフィックが比較方式より小さくなることわかる。これは、 S_1 の観測粒度が小さいことで S_1 の転送木が被利用木として利用しやすいためである。特に、 $G_2 = 36$ の時、提案方式におけるトラフィックが、比較方式より大幅に小さくなることわかる。これは、 S_1, S_2 のすべての観測位置が一致し、提案方式においてすべての転送エージェントが共通化されることにより、各観測位置において送信されるセンサデータ数が減少したためである。

6. おわりに

本稿では、複数シンクのデータ収集条件を考慮したエージェント制御方式を提案した。この提案方式では、複数のシンクがセンサデータを収集する観測位置において、その観測位置で動作するエージェントを共通化し、さらに宛先であるシンクが異なるセンサデータを、より細かい粒度で配置されたエージェントが自身のセンサデータに集約して転送する。シミュレーション実験の結果から、より粒度の細かい転送木を部分的に利用してセンサデータを転送し、トラフィックを削減していることを確認した。提案方式では、センサ端末数が少ない環境や、データ収集の対象となる観測領域内で端末が疎な領域を含む場合、エージェントの配置や移動が失敗する可能性がある。そこで、今後は、エージェントが不在となった観測位置のセンシング方法について検討する予定である。

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 network research”, *Wireless Communications and Mobile Computing* 2(5), pp. 483-502 2002.
- [2] M. Chen, T. Kwon, Y. Yuan, and V. C. M. Leung “Mobile agent based wireless sensor networks”, *Journal of Computers* 1(1), pp. 14-21 2006.
- [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* 53(2), 2012 (掲載予定).
- [4] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan “Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks”, *Proc. HICSS 2000*, pp. 1-10 2000.
- [5] M. Heissenbüttel, T. Braun, T. Bernoulli, and M. Wälchli “BLR: beacon-less routing algorithm for mobile ad hoc networks”, *Computer Communications* 27(11), pp. 1076-1086 2004.
- [6] O. Landsiedel, S. Götz, and K. Wehrle “Towards scalable mobility in distributed hash tables”, *Proc. P2P 2006*, pp. 203-209 2006.
- [7] C. Lindemann, and O. P. Waldhorst “A distributed search service for peer-to-peer file sharing in mobile applications”, *Proc. P2P 2002*, pp. 73-80 2002.
- [8] T. Yashiro “A new paradigm of V2V communication services using nomadic agent”, *Proc. V2VCOM 2006*, pp. 1-6 2006.