

F-16

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

A Data Gathering Method Using Mobile Agents in Dense Mobile Sensor Networks

後藤 啓介†
Keisuke Goto

佐々木 勇和†
Yuya Sasaki

原 隆浩†
Takahiro Hara

西尾 章治郎†
Shojiro Nishio

1 はじめに

近年の半導体技術の発展により、小型で安価なセンサデバイスの開発が容易になり、無線センサネットワークへの注目が高まっている[7]。無線センサネットワークでは、多数のセンサデバイスが環境情報をセンシングし、センサデータをシンクへ転送する。また、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[4, 5]。アドホックネットワークでは、端末のみで自律分散的にネットワークを構築できる。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、センサノード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ものと考えられる。一方、アプリケーションの観点からは、過度に密なセンサデータは必要ではなく、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。そこで、データ収集において不要なトラフィックを抑えるためには、シンクへセンサデータを送信する端末を制御し、アプリケーションが要求するセンシング粒度を保証する必要最小限の端末数のみで効率的にデータを収集することが望まれる。

端末は自由に移動するため、センシングすべき地点を観測可能な端末集合は時間的に変化する。センシングを行うタイミングごとに、シンクがセンシング端末を決定する方法も考えられるが、一般に端末とシンクは地理的に離れているため、この処理にメッセージ交換のトラフィックと大きな遅延が発生する。

本稿では、密なモバイルセンサネットワークにおいて、センサ端末の管理をエージェントに行わせることにより、効率的にセンサデータを収集する手法を提案する。ここで、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る。提案手法におけるエージェントは、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。端末の移動に伴い、エージェントは必要に応じて、より観測位置に近い別の端末に移動する。エージェントが、センシングを行っている端末上からセンサデータの送信を制御することにより、センサ端末の管理に

必要なトラフィックは最小限に抑えられる。

以下では、2章で関連研究を紹介する。3章で本稿の想定環境について述べ、4章で提案手法について述べる。最後に5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

本章では、密な無線センサネットワークにおけるデータ収集、および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に関する既存研究について述べる。

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[2]では、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、端末間に階層構造が存在し、下位の端末は、自身のセンサデータを上位の端末へ送信する。シンクへのセンサデータの送信は最上位の端末によって行われる。この方式では、上位の端末が下位端末から集めたセンサデータを集約および圧縮することにより、トラフィックを削減している。文献[1]では、シンクが生成したエージェントが、センサ端末を巡回することによりデータを収集する手法を提案している。この手法では、エージェントがセンサデータを圧縮しながら巡回することにより、トラフィックを削減している。

しかし、これらの研究では、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していない。また、ある一定のセンシング粒度を保証したデータの収集を想定する本研究とは異なる。

文献[6]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、その位置に依存した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、局所的な情報をその地点の近傍にのみ提供しており、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。

3 想定環境

本稿では、無線通信機能を備え、温度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。ネットワークを構成する各端末は、他の端末と無線マルチホップ通信を行う。アプリケーションからの要求に基づいて、シンクは定期的もしくは不定期に、観測領域をある一定の地理的粒度で観測する。具体的には、ある特定のタイミングで特定の観測位置に存在するセンサ端末からセンサデータの収集を行う。

† 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

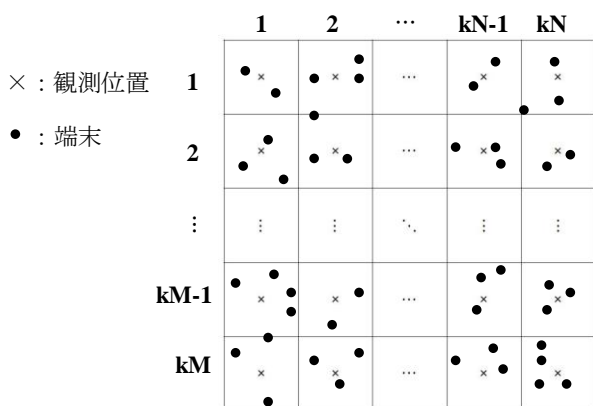


図1. 観測領域と観測位置

3.1 観測領域と観測位置

対象とする観測領域は縦横がM:Nの整数比となる2次元平面とする。アプリケーションは、 $k^2 \cdot M \cdot N$ ($k = 1, 2, \dots$)の整数値として、センシング粒度を指定する。シンクは観測領域を $k \cdot M \times k \cdot N$ の格子状のサブ領域に分割し、各サブ領域の中心点 ($k^2 \cdot M \cdot N$ 個) をセンシング対象となる観測位置とする (図1)。

3.2 端末の構成

ネットワークを構成する移動型センサ端末として、一般の歩行者が所持しているPDAやスマートフォンなどの情報機器を想定している。端末が存在する領域では既存の通信基盤が利用できず、端末間で構成される無線アドホックネットワークを用いてセンサデータを収集する。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、位置情報に基づくマルチホップ通信が可能とする。端末の位置は経度と緯度で表されるものとする。

各端末は領域を自由に移動するが、データを収集するシンクは、センサデータを取得している間、移動を行わずその場に停止しているものとする。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て、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。

3.3 位置情報に基づくデータ転送

端末は位置情報に基づくルーティングプロトコルを備えており、目標の座標を持つデータをその座標へ転送する。本研究では、Heissenbüttelらが文献[3]において提案している位置情報に基づくルーティングプロトコルを想定する。

まず、このプロトコルでは、送信すべきデータ packets を持つ発信端末は、目標位置を決定し、自身の現在位置と共にその座標を packet ヘッダに書き込む。発信端末は隣接端末へ packet をブロードキャストする。その packet を受信した端末は、packet ヘッダ内の送信端末および目標位置の情報から、自身が転送エリア内にいるかどうかを判定する。転送エリア内にいる端末は、packet ヘッダ内の送信端末の位置情報を自身の位置情報に置き換え、packet を再転送する。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すべての端末が互いの通信半径 r 以内に存在するような領域である。具体

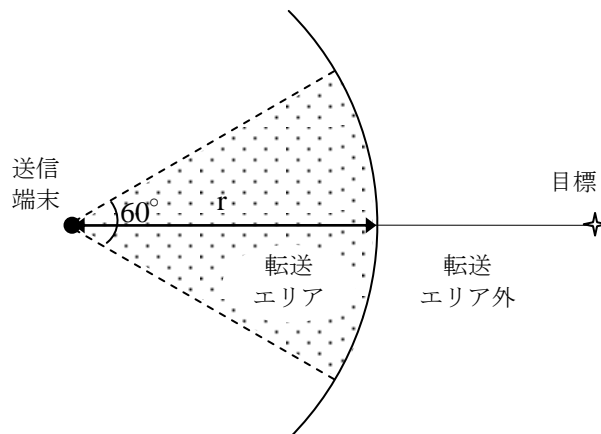


図2. 転送エリアの例

的には転送エリアとして、送信端末を円心 (半径 r) とし、目標位置への向きの60°分の扇形領域を想定する (図2)。

packet を中継する端末は転送待ち時間 (Dynamic Forwarding Delay: DFD) を設ける。DFDの値は、自身、送信端末、および目標位置の座標の位置関係によって定める。送信に必要なホップ数を抑えたい場合、送信端末との距離が大きい端末ほどDFDが小さい値を取るようになるため、次式を用いればよい。

$$DFD = \text{Max_delay} \cdot \left(\frac{r-p}{r} \right) \quad (1)$$

ここで、Max_delayは事前に設定される正の定数であり、 p は送信端末と受信端末の距離である。転送エリア内においてDFDが最小の端末が最初にpacketを転送する。転送エリア内の他の端末は、このpacketの転送を検知できるため、同じpacketの転送を中止する。

この処理は、packetが目標位置に到達するまで繰り返される。目標位置にいる端末がpacketを受信した場合、即座に隣接端末へACKを返信し、処理を終了する。

なお、本研究では、観測位置を目標位置として設定し、それに最も近い端末がpacketを受信した時点で、packetの転送を停止する必要がある。ここで、端末は移動するため、目標位置に最も近い端末は時間的に変化する。したがって、目標位置に最も近い端末がpacketを受信したことを周辺端末が確認できる仕組みが必要となる。そこで本研究では、目標位置から $r/2$ 以内の端末がpacketの送信端末となった場合、そのpacketを受信した端末 (送信端末を含む) は式(1)ではなく、次式に基づいてACKの送信待ち時間を決定する。

$$DFD' = \text{Max_delay} \cdot \frac{d}{r} \quad (2)$$

ここで、 d は目標位置と受信端末の距離を表す。目標位置から $r/2$ 以内の端末が送信したpacket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受信するため、最も早くACKを返信した端末が目標位置 (観測位置) に最も近いことが保証される。この処理により、packetの転送を停止するとともに、周辺端末が観測位置に最も近い端末かどうかを知ることができる。

表1. エージェント・データの転送方向

エージェント・データの送信元	エージェント・データの転送方向
シンク	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 エージェントを用いたデータ収集方式

本章では、まず提案手法の概要について述べる。その後、エージェントの観測位置への配置方法、センサデータのシンクへの送信方法、およびエージェントの移動について説明する。最後に、提案手法を考察する。

4.1 提案手法の概要

提案手法では、まずシンクによるエージェントのデータの生成、および配置が行われる。シンクは、3.1節で述べた方法で決定した $k^2 \cdot M \cdot N$ 個の観測位置を目標位置として、エージェントのソースデータ（プログラムおよび観測位置、頻度などの情報。以降では、単にエージェント・データと呼ぶ）の転送を行う。エージェント・データは、4.2節で説明するエージェントの配置方法に基づいて、観測位置に最も近い端末が受信する。エージェント・データを最終的に受信した端末はエージェントを起動する。

センシングの実行後、エージェントは、4.3節で説明するセンサデータの送信方法に基づいて、センサデータをシンクへと転送する。また、エージェントは、自身が配置されている端末が観測位置から離れてしまった場合、4.4節で説明する方法に基づいて、観測位置に最も近い端末へと移動する。

4.2 エージェントの配置

本節では、エージェントの配置方法について述べる。エージェントを配置するための最も単純な方法は、シンクがすべての観測位置に対するエージェント・データを生成し、3.3節の方法に基づいて、各観測位置へ個別に送信する方法である。しかし、この方法では多数の観測位置に対する個別のエージェント・データの転送により、大きなトラヒックが発生する。そのため、提案手法ではエージェント・データを個別に転送するのではなく、エリアの位置関係に基づく転送木を構築して転送することにより、トラヒックを削減する。以下では、エージェント・データの転送におけるシンクとエージェントの動作について述べる。

- (1) シンクは、エージェント・データを生成し、自身がいるサブ領域の観測位置へ、3.3節の方法に基づいてエージェント・データを送信する。エージェント・データには、観測位置、観測頻度、シンクの位置の情報が含まれる。
- (2) エージェント・データを受信した観測位置に最も近い端末は、エージェントを動作させる。起動したエージェントは、初期動作として、エージェント・データを隣接サブ領域の観測位置に再転送する。表1は、図1のグリッド状のサブ領域において、エージェント・データを転送する方向を表している。例えば、

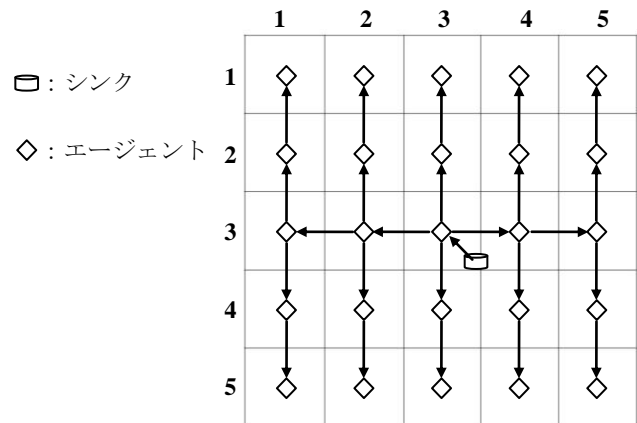


図3. エージェントの配置の例

受信したエージェント・データの送信元がシンクの場合は上, 下, 左, 右, 左隣のサブ領域内のエージェントの場合は、上, 下, 右にエージェント・データを転送する。領域端のサブ領域に存在する場合、観測位置の存在しない方向へは送信しない。手順(2)へ戻る。

図3を用いて、シンクが観測位置にエージェントを配置する例を示す。観測領域は 5×5 のサブ領域に分割され、シンクは(3,3)のサブ領域に位置する。まず、シンクが自身がいるサブ領域の観測位置へエージェント・データを送信する。動作を開始したエージェントは、隣接する4箇所サブ領域の観測位置へエージェント・データを転送する。その後、シンクが位置するサブ領域の上, 下, 左, 右のサブ領域においてエージェントが起動され、表1の規則に従ってエージェント・データの転送を行う。以降、同様の処理を繰り返すことにより、すべての観測位置にエージェントを配置できる。

4.3 センサデータの送信

観測位置（付近）に配置されたエージェントは、シンクに与えられた設定に従い、センシングの実行およびセンサデータの送信を開始する。センサデータの送信における、最も単純な方法は、各エージェントがシンクの位置へ3.3節の方法に基づいてセンサデータを送信する方法である。しかし、この方法では、個別送信によりトラヒックが大きくなってしまふ。さらに、データ送信のための各パケットの転送経路がシンク周辺で合流するため、パケット衝突が発生しやすい。そのため、提案手法では、エージェントを配置した際の転送経路（転送木）の逆向きにセンサデータを送信する。以下では、センサデータ送信時における領域端のサブ領域に位置するエージェントとその他のエージェントの動作について述べる。

- (1) 領域端のサブ領域に位置するエージェントは、指定された観測周期ごとに、センサデータを、エージェント・データの転送元のサブ領域の観測位置に向けて送信する。基本的には、3.3節の方法に基づいてセンサデータが送信されるが、観測位置から $r/2$ 以内の端末が転送したデータは、観測位置に最も近い端末ではなく、エージェントが動作する端末が受信し、他の端末は破棄する。ここで、各エージェントは、4.4節で説明するエージェントの移動により、自身が担当する観測位置からの距離が $r/2$ 以内の端末上で動

作しているため、必ずこのセンサデータを受信できる。

- (2) 領域端およびシンクが存在するサブ領域以外のサブ領域に位置するエージェントは、自身がエージェント・データを転送したすべてのサブ領域のエージェントからのセンサデータを受信した場合、自身のセンサデータと受信したセンサデータを集約および圧縮し、エージェント・データの転送元サブ領域の観測位置に向けて送信する。手順(2)に戻る。
- (3) シンクが存在するサブ領域に位置するエージェントは、センサデータをシンクに送信する。

センサデータの送信では、各エージェントが、隣接サブ領域のエージェントから受信したセンサデータと自身のセンサデータを集約および圧縮することにより、トラヒックを削減できる。

4.4 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位置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、観測位置に最も近い端末へ移動する。ここで、エージェントの移動頻度が大きいとトラヒックが大きくなってしまふ。そこで、センシングを継続しつつ、エージェントの移動頻度をできる限り抑えることが重要である。

エージェントは、自身の位置と観測位置の距離が閾値 α 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 $r/2$ 、および端末のセンシングカバレッジの半径以下の値とする。 α を可能な範囲で大きな値に設定することで、エージェントの移動頻度を抑えることができる。

エージェントは観測位置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は、式(2)で与えられる待ち時間 DFD' を設け、隣接端末へACKを返信する。前述のように、最初にACKを返信した端末が観測位置に最も近い端末であるため、この端末は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の返信を中止する。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。

4.5 考察

提案手法では、エージェントを用いて、センシングを行っている端末上からセンサデータの送信を制御することにより、アプリケーションが要求するセンシング粒度を保証する必要最低限の端末数のみでセンサデータを収集する。また、各エージェントが自律的に隣接サブ領域の観測位置にエージェント・データを転送することにより、エージェント・データの転送に要するトラヒックを削減できる。さらに、センサデータを集約および圧縮してシンクへ送信することにより、データ収集のためのトラヒックを削減できる。エージェントが観測位置からある程度離れてしまったときには、観測位置により近い端末へと、エージェントが移動する。

提案手法では、エージェントが動作している端末はネットワークから離脱しないことを想定している。しかし、実環境では、端末の離脱によりエージェントが消失すること

も考えられる。アプリケーションの動作中にエージェントが消失した場合、早急にエージェントを再配置する必要がある。また、消失したエージェントを経由しない転送経路を構築し、残されたエージェントのセンサデータをシンクまで転送する必要がある。

さらに、提案手法では、データを収集するシンクは、センサデータを取得している間、移動を停止することを想定している。しかし、実環境では、シンクが移動することも考えられる。センサデータの取得中に、シンクが移動する場合、シンクの位置を管理する必要がある。

5 まとめ・今後の課題

本稿では、密なモバイルセンサネットワークにおいて、エージェントを用いて、センサ端末を管理することにより、アプリケーションが要求するセンシング粒度を保証する必要最小限の端末数のみで効率的にデータを収集する手法を提案した。

今後は、エージェントが消失した際の、エージェントの再配置手法およびセンサデータ送信のための迂回経路の構築手法について検討する予定である。また、シンクが移動する場合を想定したシンクの位置管理手法について検討する予定である。さらに、提案手法の性能をシミュレーション実験により評価する予定である。

参考文献

- [1] M. Chen, T. Kwon, Y. Yuan, V. C. M. Leung, "Mobile agent based wireless sensor networks," JCP 1(1): 14-21 (2006)
- [2] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, H. Balakrishnan, "Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks," Proc. HICSS (2000)
- [3] M. Heissenbüttel, T. Braun, T. Bernoulli, M. Wälchli, "BLR: beacon-less routing algorithm for mobile ad hoc networks," Computer Communications 27(11): 1076-1086 (2004)
- [4] D. B. Johnson, "Routing in ad hoc networks of mobile hosts," Proc. IEEE WMCSA'94: 158-163 (1994)
- [5] C. E. Perkins, and E. M. Ooyer., "Ad-hoc on-demand distance vector routing," Proc. IEEE WMCSA'99: 90-100 (1999)
- [6] 屋代智之, T. F. LaPorta, "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 46(12): 2952-2962 (2005)
- [7] J. Yick, B. Mukherjee, D. Ghosal, "Wireless sensor network survey," Computer Networks 52(12): 2292-2330 (2008)