

# モバイルセンサネットワークにおける データ処理技術 ～動きまわるセンサが拓く未来～

神崎映光（島根大学） 原 隆浩 義久智樹 西尾章治郎（大阪大学）

センサネットワーク。本誌でもしばしば見かける言葉であり、また本誌以外でも目にした、あるいは耳にしたことがある読者諸氏も多いのではないだろうか。このセンサネットワークに、移動性を意味する「モバイル」という言葉を付した「モバイルセンサネットワーク」に関する研究開発が、ここ数年の間に盛り上がりを見せている。本稿では、モバイルセンサネットワークを対象とした研究開発について、最近の動向と今後の展開を紹介する。

## モバイルセンサネットワークとは？

### ▶ センサネットワーク+モバイル

センサネットワークとは、その名のとおりに、実世界で起こっている事象を観測するセンサをネットワークでつないだものである。一般的には、センサ間の通信に無線を用いるものを指すことが多く、通信機能を備えたセンサは、センサノード、あるいは単にノードと呼ばれる。このようなシステムは、温度や湿度といった環境情報の監視や、防犯・防災、動植物の生態調査をはじめとして、さまざまな用途でのサービス展開が期待されている。

本稿で解説する「モバイル」センサネットワークは、センサネットワークを形成する個々のノードが動きまわる環境を指す。このような環境を考える背景として、人々が持ち歩くモバイル機器の高機能化が挙げられる。その最たる例として挙げられるのがスマートフォンであろう。ご存知のとおり、スマートフォンには、GPS (Global Positioning System)

やカメラはもちろんのこと、加速度、温度、音など、さまざまな事象を観測できるセンサが搭載されている。当然、これらモバイル機器には無線通信機能が搭載されているため、これらもセンサノードである、と考えることができる。

### ▶ モバイルセンサネットワークがもたらすもの

先ほど例に挙げたスマートフォンは、ここ数年で急速に普及した。また、近年普及しつつあるウェアラブル機器もセンサノードとなり得る。これらにとどまらず、近い将来、センサノードとなり得る膨大な数の機器が、動きまわりながらさまざまな事象を観測できるようになるものと考えられる。これらの機器が取得したセンサデータを利活用できれば、あらゆる場所において取得された膨大な量かつ高精細なセンサデータの集合を用いて、以下をはじめとしたさまざまなサービスが容易に実現できるようになるものと期待されている。

- 一 街中を移動中のユーザが、これから向かうエリアの混雑度や温度分布などの情報を、当該エリア内にいるノード群から集める。
- 一 都市部を動きまわるノード群が観測した温度などのデータを蓄積し、ゲリラ豪雨やヒートアイランド現象などの解析に利用する。

### ▶ モバイルセンサネットワークの形態と技術課題

このように幅広いサービス展開が期待されるモバイルセンサネットワークであるが、構築されるネットワーク、およびセンサデータの利用方法において、

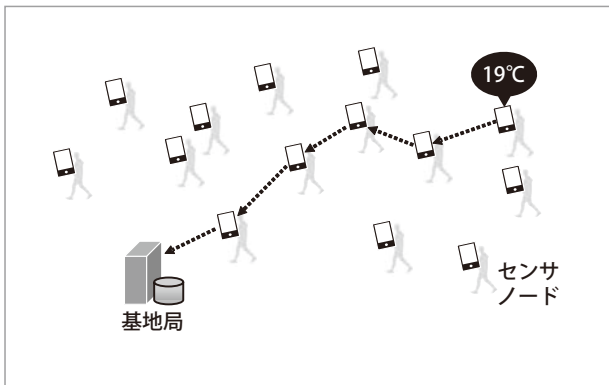


図-1 分散型のネットワーク形態

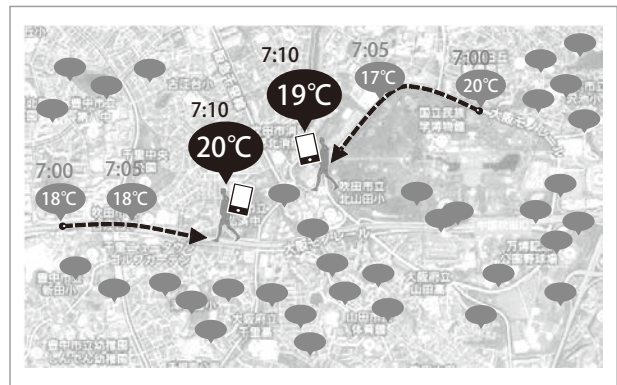


図-2 モバイルセンサノードが取得するデータ

それぞれ複数の形態が考えられる。

### ネットワーク形態

まずネットワークの形態としては、「インフラ型」と「分散型」に分類できる。前者は、各ノードが携帯電話網をはじめとした通信インフラに直接接続している形態であり、各ノードが取得したセンサデータは、このインフラを介してサーバ等に直接アップロードされる。一方の后者は、図-1に示すように、無線によるノード間の直接通信によりネットワークを構築する形態であり、基地局等へのデータ収集は、複数のノードがパケットを中継するマルチホップ通信を用いる。モバイルではない（ノードが動きまわらない）従来型のセンサネットワークは、多くの場合この形態をとる。

### センサデータの利用形態

次にデータの利用形態としては、「蓄積型」と「オンデマンド型」に分類できる。前者は、各ノードが取得したセンサデータを基地局やサーバ等にいったん蓄積しておき、必要に応じて利用する形態である。一方の后者は、基地局等において発生したデータ要求に応じて問合せを発行し、これを受けたノードがデータを返送する形態である。特にオンデマンド型においては、上述したインフラ型のネットワークにおいてサーバ等で問合せや収集データの処理を行う形態と、分散型のネットワークにおいて個々のノードが処理を行う形態が考えられる。

以上のように、さまざまな形態に分類されるモバイルセンサネットワークにおいて、膨大な数のノード

が取得したセンサデータを有効に活用するためには、以下の2点について考慮する必要がある。

### センサデータをいかにして「集める」か？

ネットワーク形態にかかわらず、各ノードが取得したセンサデータの収集には、有線と比べて低速かつ不安定な無線通信を用いることになる。そのため、無線通信帯域への負荷を最小限に抑えながら、必要なデータを効率的に集める方法が必要になる。また、オンデマンド型の利用形態においては、動きまわるノード群の中から、データ要求が発生したタイミングにおいて集めるべきデータを持っているノードを探し出す方法も必要になる。

### 集めたセンサデータをどのように「提供する」か？

上記については有効な手法が確立され、基地局等にデータが集められたとしよう。しかしこの時点では、個々のノードが取得したデータの集合が得られたに過ぎない。また、ノードが動きまわりながら観測を行うため、図-2に示すように、個々のデータが観測された場所や時刻が広範囲かつ不均一に分散した状態にある。このようなデータの集合に対し、たとえば「1時間前の大阪市内の温度分布を見たい」といったようなサービス要求を満足するためには、個々のセンサデータの観測値、観測場所、観測時刻等を考慮して、集めたデータ群からサービス利用者が求めるもののみを抽出するなど、データの加工を適切に行う必要がある。

上記のように、モバイルセンサネットワークでは、「集める」と「提供する」というステップそれぞれ

において、ノードが動きまわることを考慮に入れた効果的な技術を新たに確立する必要がある。以下では、それぞれのステップにおいて、モバイルセンサネットワーク特有の課題に取り組んだ研究開発について、筆者らが進めてきたもの<sup>☆1</sup>を交えながら解説する。

## 「集める」技術

先述のとおり、ここで重要なのは、無線通信帯域にかかる負荷を最小限に抑えることである。膨大な数のノードが観測を行うセンサネットワークでは、すべてのノードが取得したデータをそのまま収集すると、通信量が非常に大きくなってしまい、パケット衝突の頻発などによる通信効率の著しい低下を招いてしまう。これを防ぐには、データを集めるための通信量を可能な限り抑える必要がある。

この点については、従来型のセンサネットワーク、特に分散型のネットワーク形態を対象とした研究開発が永年にわたって行われており、センサデータを利用するサービスに必要な最小限のデータのみを集めることで通信量を抑えている。たとえば、「大阪駅付近」におけるデータ分布を得ようとした場合、対象となる「大阪駅付近」に設置されたノードのみからデータを集めればよく、他のノードが通信を行う必要はない。

ただし、モバイルセンサネットワークが対象となると、このアイデアをそのまま適用するわけにはいなくなる。たとえば「大阪駅付近」からデータを集めようとした場合、ノードが動きまわるモバイルセンサネットワークでは、その時点でどのノードが「大阪駅付近」にいるか分からない。また、個々のノードがオンデマンドに問合せを発行する場合は、問合せが発行されるまで、どの位置で問合せが発行されるかも分からない。つまり、モバイルセンサネットワークを対象とし、必要最小限のデータの

<sup>☆1</sup> 筆者らは「モバイルセンサネットワークのための効率的なデータ処理機構に関する研究」(科学研究費補助金・基盤研究(S))として、5年間にわたって研究開発を行ってきた。

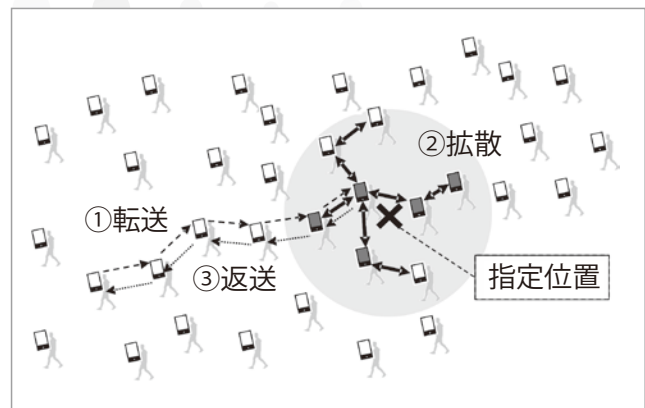


図-3 k最近傍検索(k=5)

を集めようとした場合、個々のノードの位置が時間経過とともに変わることや、データの取得・収集に用いるノードを適切に選択する技術が必要となる。

ここでは、上記の問題が特に顕著に現れる分散型かつオンデマンド型の環境において、センサネットワークにおいてよく用いられるいくつかのデータ要求を紹介し、モバイルセンサネットワークにおいて効率的にデータを「集める」ための研究事例について概説する。

### ▶ k最近傍(k-Nearest Neighbor:kNN) 検索

まず紹介するのはk最近傍検索である。これは、ある指定された位置に対して、その位置に近い位置に関連付けられた上位k個のデータを探す検索である。ここで、問合せ発行時点での最新の情報を得ようとした場合は、指定位置に近い上位k個のノードのみからデータを集められればよい。

このような検索を、通信量を抑えながら実現する研究としては、特に従来型のセンサネットワークを対象としたものがいくつか行われている。たとえば、近い位置にいるノード間で互いの存在を認識している前提で、k最近傍検索のためのネットワークを構築しておき、このネットワークに沿って端末を探す手法が提案されている<sup>6)</sup>。

ノードが動きまわる環境においても有効な手法として、データ要求が発生したタイミングにおいて、ノードの位置情報を用いてその場的にネットワーク



を構築する問合せ手法が提案されている<sup>3)</sup>。この手法の動作を、図-3を用いて説明しよう。あるノードにおいて問合せが発行された場合、まず指定位置に向けて問合せを転送する。このとき、指定位置に近づく方向にのみ問合せを転送することで、問合せの転送にかかる通信量を最小限に抑える(図中の①)。指定位置に最も近い位置にいるノードは、問合せを受信した後、指定位置を中心とした、ある限られた範囲内のみ問合せを拡散し、範囲内にいるノード群からデータを集めることで、指定位置に近い(図中でグレーに着色された)k個のノード群が持つデータを得る(図中の②)。最後に、得られたデータを、問合せを発行したノードがいる位置に向けて返送する(図中の③)ことで、最小限の通信で、必要なデータが集められる。

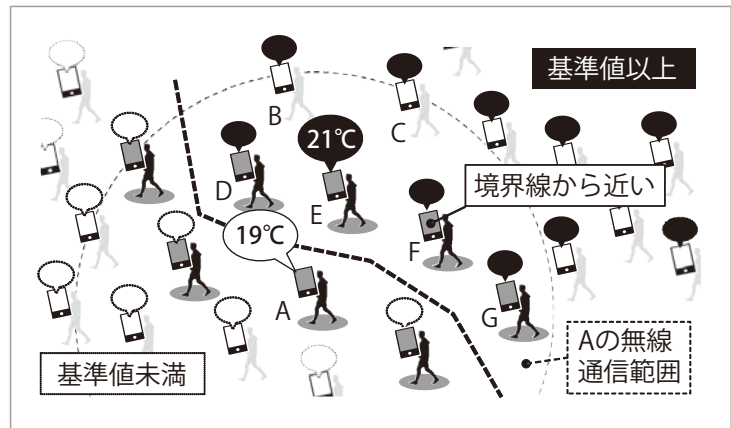


図-4 境界線の検出 (基準値: 20°C)

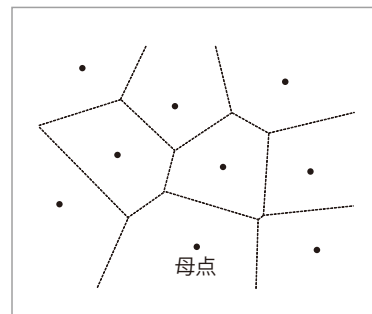


図-5 ボロノイ図

### ▶ 境界線の検出

次に紹介する境界線の検出は、たとえば等温線など、ある観測値を基準として、その値以上の観測値となる領域を導出するような場合に用いられる。このような境界線は、図-4のように、基準値以上の観測値を観測したノードの位置と、それ以外のノードの位置との間に線を引くことで求められる。このような線を引くには、境界線から近い位置にいる(図中で色の濃くなっている)ノード群、言い換えれば、自分の近くに基準値をまたいだ観測値を持つノードがいるノード群のみからデータを集められればよい。

このような考え方に基づいて通信量を抑える研究としては、特に従来型のセンサネットワークを対象に数多くの手法が提案されている<sup>5)</sup>。これらの手法では、各ノードが近くにいるノードと観測値を交換した上で、自分が境界線の近くにいるかどうかを判定する。この判定には、ボロノイ図と呼ばれる領域分割がよく用いられる。ボロノイ図とは、図-5に示すように、母点と呼ばれる点群の位置に基づいて領域を分割した図であり、ある母点に対し、その母点を含む部分領域と隣接する部分領域内に存在する

母点は、他の母点より近い位置に存在するという特徴を持つ。この特徴を利用し、各ノードの位置を母点としたボロノイ図を作っておけば、部分領域が隣接する2ノード間の観測値が基準値をまたぐ関係にある場合に、それらのノードが境界線の近くにいるものと判定できる。

ここで、ノードが動きまわる環境では、ボロノイ図を作るための母点間の位置関係が時間とともに変化するため、従来型のセンサネットワークのように、事前にボロノイ図を作っておくことができない。そのため、境界線検出が要求されたタイミングで、ボロノイ図の作成と観測値の比較を同時に行う必要がある。これを実現するものとして、無線通信の傍受を用いた手法が提案されている<sup>4)</sup>。この手法の動作について、先の図-4を用いて説明しよう。図においてノードAがデータを発信した場合、その無線通信範囲内にいる全ノードがデータを傍受し、これらのうち{B, ..., G}が境界線をまたいだことを認識する。ただし、この時点では、データを傍受した各ノードは、自身とAの位置しか把握していな

い。そのため、境界線から遠い位置にいるBやCも、自分が境界線の近くにいるものと判定してしまう。これを防ぐため、境界線をまたいだことを認識したノードが、データを発信したAからの距離が小さいほど早くデータを発信するような制御を加える。これにより、Aにより近い位置にいるDやEがBやCより先にデータを発信し、これらを傍受したBやCは、DやEの位置を用いたボロノイ図から、自分の観測値が集める対象にならないことを認識でき、データの発信を取りやめる。このようにして、境界線検出が要求されたタイミングにおいて、境界線に近いノードのみがデータを発信し、集めるべきデータ量を最小限に抑えられる。

### 「提供する」技術

次に述べるのは、集めたデータを提供する技術である。この段階では、データの収集はすでに完了しているため、蓄積型のデータ利用形態を考えることとなる。このステップで考慮すべきは、集めた個々のデータが観測された位置や時刻が広範囲かつ不均一に分散している点である。このような分散したデータを用いて、何らかのサービスを提供する際には、データ数の時間的・空間的な偏りを考慮する必要がある。

また、データが集められているとはいえ、すべてのデータが1カ所に集約されているのではなく、たとえば携帯キャリアやアプリ開発者といった単位で、複数の異なる主体がそれぞれの目的に沿ってデータを集めることが考えられる。このように複数拠点で管理されているデータを、ネットワークを介して横断的に利用できるようになれば、各拠点が個別にデータを提供する場合よりも、データの量・質ともに格段に向上する。しかし、この場合、ある場所や時間帯が指定され、その範囲内にあるセンサデータを得ようとした場合、対象となるデータを持っている拠点と持っていない拠点が混在することになる。そのため、各拠点到蓄えられているデータの時間的・空間的な特性を考慮し、データを提供する際に適切

な拠点を取捨選択する技術が必要となる。

ここでは、上記の問題を考慮し、蓄積されているセンサデータを効率的に「提供する」ための研究事例について概説する。

#### ▶ データの検索

複数の拠点において管理されているデータをネットワーク越しに利用しようとした場合、先に述べたとおり、ある時空間的な範囲内にあるセンサデータを得ようとする、どの拠点が対象となるデータを持っているか分からず、すべての拠点到問合せを行わなければならない。この場合、対象となるデータを持っていない拠点への問合せは無駄となるため、データを持っている拠点のみに問合せを行える技術が必要となる。

このような技術として、各拠点到データを持っている時空間的な範囲に関する情報を1カ所にまとめて管理する手法がいくつか提案されている。情報を1カ所にまとめておくことで、問合せの対象となるデータを持っている拠点を事前に確認でき、データを持っていない拠点への無駄な問合せを防ぐことができる。ただし、各拠点到蓄積されている個々のデータすべてに関する情報を1カ所に集約することは現実的でないため、多くの手法では、時空間全体をいくつかの部分領域に分割し、各部分領域単位でデータの有無を管理する。また、文献1)の方法などに基づいて各部分領域を階層的に管理する木構造を構築することで、問合せによって指定された範囲内のデータを効率よく検索できるようにしている。

ここで、モバイルセンサデータが対象となった場合、先に述べたとおり、蓄積されるデータが空間的・時間的に広範囲かつ不均一に分散する。そのため、図-6のように、木構造で管理する部分領域も、データの分散に応じて設定されることが望ましい。さらに、個々の拠点到設定された部分領域に関する情報を1カ所で管理するための効率的な仕組みも必要となる。これらを実現する手法も提案されており<sup>2)</sup>、各拠点到において新たなデータが追加される際や、各拠点到管理している部分領域の情報を1カ所に集約

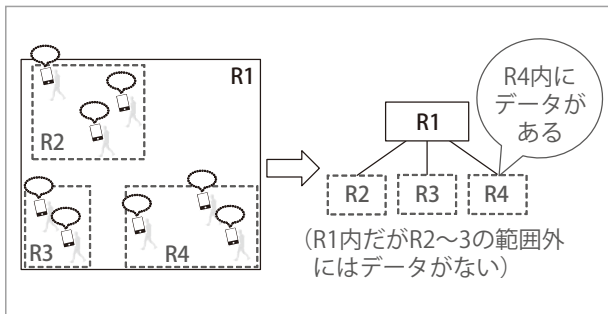


図-6 複数データを統合して構築した木構造

する際、検索を高速に行えるように部分領域の併合を行う。これにより、複数拠点で管理される不均一なデータをできるだけ少ない部分領域数で管理でき、時空間範囲が指定された問合せに対し、対象となるデータを持つ拠点の取捨選択が高速で行えるようになる。

### 最近の研究動向と将来の展望

本稿で解説したものをはじめとして、モバイルセンサネットワークにおいて「集める」「提供する」技術に関する研究開発は、国内外を問わず活発化しつつある。また、スマートフォン等のモバイル端末から実センサデータを集めるシステムもいくつか登場しており、モバイルセンサデータの利活用に関する研究開発が今後一層加速していくことであろう。

本稿では、温度や湿度など、従来型のセンサを用いて観測できる事象をセンサデータとして扱った技術について解説した。一方、Twitterをはじめとしたソーシャルメディアに投入されるテキストや写真など、動きまわる人間が能動的に入力する情報も、実世界の事象をデータ化するという点でセンサデータと捉えることができる。このような観点から、「人」をセンサとして扱い、実世界の事象を観測しようとする動きが国内外を問わず盛り上がりを見せつつある<sup>☆2</sup>。

☆2 筆者らも、「モバイルユーザが生成する『人』センサデータの共有基盤システムの構築」(科学研究費補助金・基盤研究(A))として、本稿執筆時点で研究開発を行っている。

これらの技術が確立し、さらに本稿で解説した技術と融合することで、実世界のあらゆる事象が観測可能となり、これまで考えられなかったようなまったく新しいサービスが実現されていくであろう。モバイルセンサネットワークの持つ底知れないポテンシャルに、今後も目が離せない。

#### 参考文献

- 1) Hose, K., Lemke, C. and Sattler, K. U. : Processing Relaxed Skylines in PDMS Using Distributed Data Summaries, Proc. ACM CIKM 2006, pp.425-434 (2006).
- 2) Kawasumi, R., Yoshihisa, T., Hara, T. and Nishio, S. : An Indexing Method Using Sensing Information on Integrated Sensor Networks, Proc. IEEE PACRIM 2015 (2015).
- 3) Komai, Y., Sasaki, Y., Hara, T. and Nishio, S. : kNN Query Processing Methods in Mobile Ad hoc Networks, IEEE Trans. on Mobile Computing, Vol.13, No.5, pp.1090-1103 (2013).
- 4) Matsuo, K., Goto, K., Kanzaki, A., Hara, A. and Nishio, S. : Overhearing-based Efficient Boundary Detection in Dense Mobile Wireless Sensor Networks, Proc. IEEE MDM 2014, pp.225-234 (2014).
- 5) Srinivasan, S., Dattagupta, S., Kulkarni, P. and Ramamritham, K. : A Survey of Sensory Data Boundary Estimation, Covering and Tracking Techniques Using Collaborating Sensors, Pervasive and Mobile Computing, Vol.8, No.3, pp.358-375 (2012).
- 6) Xu, Y., Fu, T. Y., Lee, W. C. and Winter, J. : Processing k Nearest Neighbor Queries in Location-aware Sensor Networks, Signal Processing, Vol.87, No.12, pp.2861-2881 (2007).

(2015年6月30日受付)

神崎映光 (正会員) kanzaki@cis.shimane-u.ac.jp

2004年大阪大学大学院情報科学研究科博士前期課程修了。2005年同博士後期課程中退後、同特任助手、助教を経て、2014年より島根大学大学院総合理工学研究科准教授。博士(情報科学)。無線ネットワークに関する研究に従事。

原 隆浩 (正会員) hara@ist.osaka-u.ac.jp

1997年大阪大学大学院工学研究科博士前期課程修了。同年同博士後期課程中退後、同助手、助教を経て、2004年より同准教授。工学博士。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。

義久智樹 (正会員) yoshihisa@ist.osaka-u.ac.jp

2005年大阪大学大学院情報科学研究科博士後期課程修了。同年京都大学学術情報メディアセンター助教、大阪大学サイバーメディアセンター講師を経て、2009年より同准教授。博士(情報科学)。インターネット放送およびセンサネットワークに関する研究に従事。

西尾章治郎 (正会員) nishio@ist.osaka-u.ac.jp

1980年京都大学大学院工学研究科博士後期課程修了。工学博士。1992年大阪大学工学部教授、2002年より同大学院情報科学研究科教授を経て、2015年同大総長。同理事・副学長等を歴任。本会の理事、副会長を務める。データ工学に関する研究に従事。本会フェロー。