

推薦論文

# 参加型センシングにおけるセンシング誤差を考慮した サンプリングレート制御手法

倉沢 央<sup>1,a)</sup> 佐藤 浩史<sup>1</sup> 山本 淳<sup>1</sup> 川崎 仁史<sup>1</sup> 中村 元紀<sup>1</sup> 松村 一<sup>1,†1</sup> 山下 靖貴<sup>2</sup> 鈴木 誠<sup>2</sup>  
森川 博之<sup>2</sup>

受付日 2013年11月18日, 採録日 2014年6月17日

**概要:** ユーザ参加型センシングは、ユーザが集う時空間領域において必要以上に測定値が集まってトラフィックが大きくなってしまったり、測定の誤差や多様なセンサの混在によって個々の測定値の信頼性が低いことが懸念される。測定値の信頼性を考慮せずにトラフィック抑制を行うと、誤差が大きく精度の低い移動型センサノードの影響によって、測定結果が不正確になりうるという問題があった。これに対して、我々は、センサデータの収集トラフィックを抑制しつつ、時空間領域における測定値の母平均の信頼区間幅を狭めて測定結果の信頼性を確保する、サンプリングレート制御手法を提案する。提案手法は、時空間領域における測定値の信頼区間幅を基準に分布の推定に十分なセンサデータの量を算出し、すべての移動型センサノードに均一な低いサンプリングレートを設定して、集めるセンサデータの量を削減する。実験では、収集対象の移動型センサノードを間引く手法よりも、誤差の影響を抑えられることを確認した。また、測定値の信頼区間幅を指定した大きさ以下にする条件下で、つねに一定のサンプリングレートで収集するよりも9分の1にまでトラフィックを抑制できることを確認した。

**キーワード:** 参加型センシング, トラフィック抑制, サンプリングレート, 信頼区間

## Adaptive Sampling for Estimating True Values in Participatory Sensing Environment

HISASHI KURASAWA<sup>1,a)</sup> HIROSHI SATO<sup>1</sup> ATSUSHI YAMAMOTO<sup>1</sup> HITOSHI KAWASAKI<sup>1</sup>  
MOTONORI NAKAMURA<sup>1</sup> HAJIME MATSUMURA<sup>1,†1</sup> YASUTAKA YAMASHITA<sup>2</sup> MAKOTO SUZUKI<sup>2</sup>  
HIROYUKI MORIKAWA<sup>2</sup>

Received: November 18, 2013, Accepted: June 17, 2014

**Abstract:** Participatory sensing causes huge network traffic in spatiotemporally dense areas where participants upload large numbers of sensor values. Furthermore, sensor values of participatory sensing are often inaccurate due to both measurement error and variations in the sensing accuracy of devices. Thus, if we control the network traffic regardless of the accuracy of sensor values, the measurement results will be unreliable. We propose a method to control a sampling rate of devices while maintaining high reliability of the measurement results. This method involves calculating a sufficient number of sensor values to estimate the true value on the basis of the confidence interval for a population mean of sensor values from a spatiotemporal area. The same sampling rate is then set for all sensing devices in the area based on that amount, and network traffic is reduced. Empirical evaluations show that our method is less affected by inaccurate sensor values than a conventional method that also samples devices in order to reduce network traffic. Moreover, our method reduces the network traffic to one ninth that required by another conventional method that maintains a fixed sampling rate under the condition that the confidence interval for the population mean of sensor values is below a given threshold.

**Keywords:** participatory sensing, network traffic reduction, sampling rate, confidence interval

## 1. はじめに

各種センサを搭載したスマートフォンの急速な普及に後押しされ、参加型センシング [7], [8] が注目を集めている。参加型センシングは、固定型センサノードを実世界に配備して実世界の様々なデータを測定するのではなく、ユーザが持ち運ぶスマートフォンなどの移動型センサノードを利用して測定するのが特徴である。我々は、これまで固定型センサノードで検討されてきた多様なユビキタスアプリケーションを、参加型センシングによって実現することを考えてきた。

参加型センシングには、固定型センサでは膨大にかかった設置・運用コストを大幅に低減させることができるというメリットがある [3]。しかしながら、参加型センシングでは、ユーザの保持するセンサを測定に利用するため、ユーザが集う時空間領域において必要以上に測定値が集まって収集トラフィックが大きくなってしまったり、実際的なアプリケーションで必要となる測定値の信頼性が低いことが懸念される。これらの問題のうち、トラフィック抑制については従来研究で取り組まれてきたが、測定値の信頼性については十分に検討されていない。

我々は測定値の信頼性が低い要因として2つ認識している。1つめは、測定の誤差である。参加型センシングでは、固定型センサで使われるプロユースの専用センサに比べて一般的に誤差の大きいセンサが使われたり、測定環境が劣悪だったりするため、測定するたびに生じる誤差が固定型センシングよりも大きくなりうる。2つめは、多様なセンサの混在である。すべてのセンサノードが同じ仕様である保証がなく、偶然誤差や系統誤差の大きさが異なる多様なセンサが混在しうる。各センサノードの精度は不明なことが多い。

測定値の信頼性を考慮せずにトラフィックを抑制すると、測定値を集約して得られる測定結果が不正確になりうる。たとえば、移動型センサノードから集める測定値の量を減らしすぎると、測定値の分布を確率的に推定することが難しくなる。また、測定値の収集対象とする移動型センサノードを間引くと、誤差が大きく精度が低い移動型センサノードを収集対象に選んでしまった場合に、測定値の分布を確率的に推定することがよりいっそう難しくなる。

そこで我々は、参加型センシングにおいて、移動型センサノードからセンサデータを収集するのに必要なトラフィッ

クを抑制しつつ、時空間領域における測定値の母平均の信頼区間幅を狭めて測定結果の信頼性を確保する、サンプリングレート制御手法を提案する。測定値のばらつき度合いによって、測定値の母平均の範囲を確率的に推定するのに必要なセンサデータの量は異なる。提案手法はこの点に着目し、時空間領域における測定値の母平均の信頼区間幅を基準に分布の推定に十分なセンサデータの量を算出して、サンプリングレートを設定する。また、この際、すべての移動型センサノードに均一な低いサンプリングレートを設定して、集めるセンサデータの量を削減する。これにより、測定値の分布を確率的に推定するのに十分な量にまでトラフィックを抑制しつつ、誤差が大きく精度の低い移動型センサノードから偏ってセンサデータを収集してしまうことを避けることを実現する。

参加型センシングを模したシミュレーションで評価した結果、提案手法は測定に誤差が生じやすい環境や、誤差の大きさが異なる多様なセンサが混在している環境においても、信頼区間幅以下に抑えつつ、サンプリングレートを適応させてトラフィックを抑制できることを確認した。実験では、収集対象の移動型センサノードを絞らずに低いサンプリングレートに設定したほうが、誤差の影響を抑えられることを確認した。また、測定値から計算される信頼区間幅を指定した大きさ以下に抑える条件下で、すべての移動型センサノードでつねに一定のサンプリングレートで収集する場合と比べて9分の1にまで収集するセンサデータの量を削減できた。

## 2. 参加型センシングにおける誤差

参加型センシングにおける誤差は、センサノードに由来の測定誤差と、センサノードを取り巻く環境の特性に由来する測定環境誤差に分類できる。前者の測定誤差は、さらに偶然誤差と系統誤差の2つに分類される。偶然誤差は、測定のために偶然的に起こる誤差である。一方、系統誤差は、同じ条件のもとで測定する限り繰り返し起こる誤差である。後者の測定環境誤差は、センサの所持の仕方やユーザコンテキストに依存する誤差である。

我々は、参加型センシングは固定型センシングよりも、集まったセンサデータに含まれる誤差が大きいと見込んでいる。参加型センシングでは、一般的に固定型センサと比べて安価で汎用的なセンサノードが使われるため、センサノードに由来した偶然誤差や系統誤差が大きいと想定される。また、多様な環境で測定されるため、測定環境誤差も同様に大きいと想定される。

本研究では、測定誤差のみを取り扱う。測定環境誤差の

<sup>1</sup> 日本電信電話株式会社 NTT 未来ねっと研究所  
NTT Network Innovation Laboratories, NTT Corporation,  
Musashino, Tokyo 180-8585, Japan

<sup>2</sup> 東京大学  
The University of Tokyo, Meguro, Tokyo 153-8904, Japan

<sup>11</sup> 現在, NTT アドバンステクノロジー株式会社  
Presently with NTT Advanced Technology Corporation,  
Kawasaki, Kanagawa 212-0014, Japan

a) kurasawa.hisashi@lab.ntt.co.jp

本論文の内容は2013年7月のマルチメディア, 分散, 協調とモバイルシンポジウム2013 (DICOMO2013) にて報告され, ユビキタスコンピューティングシステム研究会により情報処理学会論文誌への掲載が推薦された論文である。

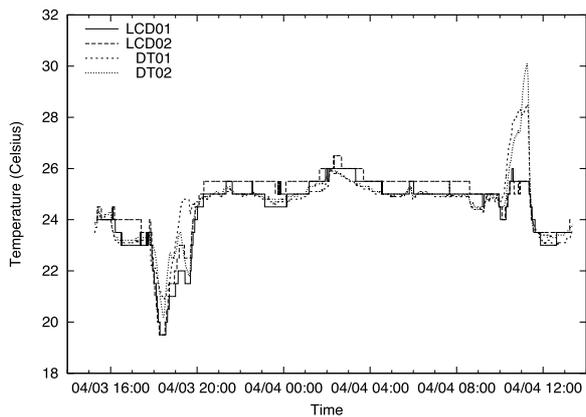


図 1 温度センサ値

Fig. 1 Values of temperature sensors.

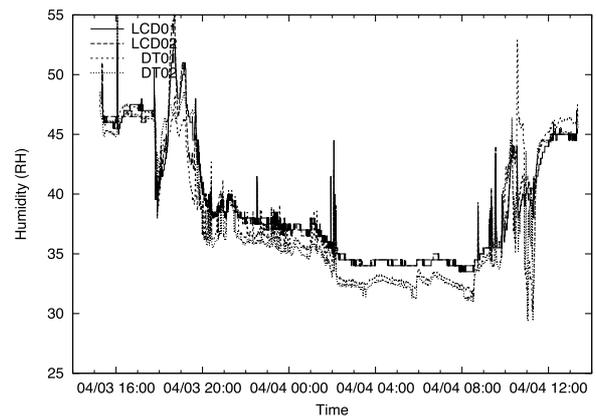


図 2 湿度センサ値

Fig. 2 Values of humidity sensors.

抑制にデータ工学的アプローチで取り組むと、センサを保持するユーザの行動分析 [33] やセンサ装着場所推定 [11] といった技術が必要となる。これらの技術は参加型センシングで収集を目的とした種類以外のセンサデータも必要としたり、消費電力や計算量といった点で負担が大きくなったりするため望ましくない。一方で、収集対象のセンサを保持の仕方を制約する形状のものに限ったり、ユーザのセンシング行為を画一化させる仕掛けをいれたりするといったデータの分析を必要としない工夫 [34] でも測定環境誤差を抑制できる。それゆえ、提案手法は、測定環境誤差は状況に応じて適切な技術を取捨選択して解決するものとし、比較的データ工学的アプローチで解決が見込める測定誤差を対象とした手法とした。

我々は、参加型センシングを模した環境で測定したセンサデータにどの程度の測定誤差が生じるか検証した。実験には、温度と湿度センサを搭載したデータロガの EL-USB-2-LCD を 2 台、温度と湿度、気圧センサを搭載したデータロガの DT-174 を 2 台、気圧センサを搭載したスマートフォンの Galaxy Note II を 1 台使用した。筆者が、合計 5 台を一括して携帯して、各種センサ値を記録した。

図 1, 図 2, 図 3 はそれぞれ、4 つのセンサノードの温度、4 つのセンサノードの湿度、3 つのセンサノードの気圧値の時間変化を表している。これらの図から、すべてのセンサノードを同じ時刻でかつ同じ位置に携帯していたにもかかわらず、異なる値を測定していることは明らかである。この誤差を偶然誤差と系統誤差に分類して検証していく。

厳密に誤差の大きさを求めることは難しいため、誤差の生成と真の値の変化量を単純化して考えた。本実験では、測定値は真の値と偶然誤差、系統誤差の 3 つの和のみ構成され、偶然誤差の大きさは測定値ごとに異なり、一方、系統誤差は各センサノード固有の一定値とした。そして、各センサノードの連続した前後 5 つの測定値の移動平均が、真の値にセンサノード固有の大きさの系統誤差を加えた値

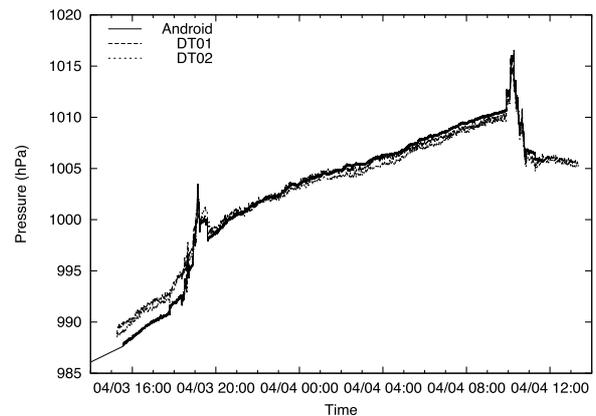


図 3 気圧センサ値

Fig. 3 Values of pressure sensors.

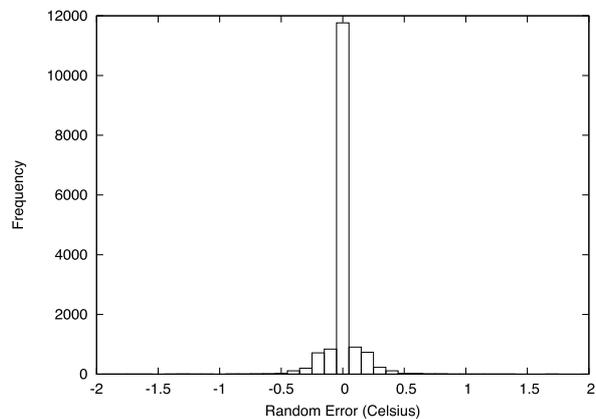


図 4 温度センサの偶然誤差 (EL-USB-2-LCD)

Fig. 4 Random error of temperature sensor (EL-USB-2-LCD).

に等しいと仮定した。

まず、温度の値を使って、偶然誤差の分布について検証した。連続した前後 5 つの測定値の移動平均を基準として測定値のずれの大きさを計算した。図 4 は EL-USB-2-LCD, 図 5 は DT-174 の偶然誤差の分布を表している。センサノードの種類によらずに偶然誤差が生じていて、ほぼ正規分布に一致していることが分かる。標準偏差は EL-USB-2-LCD が 0.160, DT-174 が 0.596 であった。

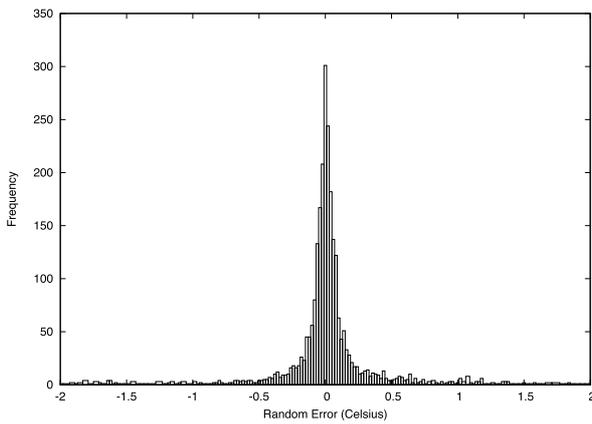


図 5 温度センサの偶然誤差 (DT-174)

Fig. 5 Random error of temperature sensor (DT-174).

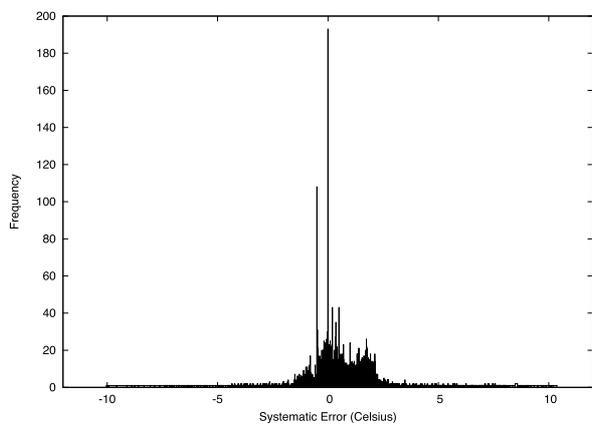


図 6 温度センサの系統誤差

Fig. 6 Systematic error of temperature sensors.

次に、同様に温度の値を使って、系統誤差の分布について検証した。同時刻の各センサノードの移動平均間のずれの大きさを計算した。図 6 がその結果を表している。偶然誤差と比べて、若干歪んでいる分布となった。これは、センサノードの数が 4 つしかなく、サンプル数が非常に少ないためと考えられる。標準偏差は 1.66 であった。

以上のように、参加型センシングを模した環境で複数のセンサノードを携帯して測定した結果から、偶然誤差や系統誤差を確認できた。参加型センシングにおいて測定結果の信頼性を確保するためには、これらの誤差を起因とした測定値のばらつきを考慮しなければならない。本実験では偶然誤差よりも系統誤差のほうが大きい結果となったが、系統誤差の影響を小さくするには、センサノード 1 つあたりの測定回数を増やすよりも、センサノードの数を増やしたほうがよい。この考えに基づいて、提案するサンプリングレート制御手法はできるだけ多くの移動型センサノードから測定値を集める設計とした。

### 3. 関連研究

参加型センシングは、街中へ大量の固定型センサを配置しなくても各種センサの情報収集が可能なのが最大のメ

リットである。これまで、タクシーからのプローブデータをもとに交通量の推定をしたり [3]、多様な車から燃費情報を集めて燃費効率の良いルートを検索したり [12]、街なかの騒音マップを構築したりする [25] といったアプリケーションが検討されている。今後は、従来の固定型センサノードで検討されてきた山火事検知 [16] や橋梁モニタリング [9] といった多様なアプリケーションを、参加型センシングで実現することが期待されている。

参加型センシングは、よく整備されたセンシング環境を構築するよりも広い範囲を低コストで観測できるという利点を持つ反面、センサデータの収集量に位置や時刻によって偏りがあることや、不正確な測定値が含まれうるという欠点を持つ [7], [8], [35]。これらの欠点は、センサデータの収集量が各センサを携帯するユーザの移動や行動に依存したり、参加型センシングでは固定型センサに比べて一般的に誤差の大きいセンサが使われたりするといった、参加型センシング特有のセンシング環境による。従来研究の多くは、2 つの欠点のうち前者のセンサデータの収集量の偏りについてのみ取り組まれている。センサデータの収集量が少ない時空間ではカバーエリア拡大が、収集量が多い時空間ではトラフィック抑制が課題となっている。

カバーエリア拡大に向けては、センサデータをより多く集めるアプローチと、収集量の少ない時空間領域の分割単位を調整するアプローチと、存在しないセンサデータを推定値で補うアプローチの 3 つがある。1 つめは、ユーザのデータ提供意欲をゲーミフィケーションなどにより高める手法 [18], [19], [28], [30], [37] や、プライバシー [1], [6], [10], [13], [21], [23], [29] やユーザの端末の消費電力 [15], [24], [27], [29] に対する懸念を解消する手法が提案されている。2 つめは、統計的にほぼ同一の分布をした時空間を統合する手法 [36] が提案されている。3 つめは、欠損を補完する手法 [17], [20], [38] が提案されている。

一方、トラフィック抑制に向けては、ほぼ同一と見なせる時空間領域のセンサデータの収集を抑制するアプローチと、近似や圧縮の過程で過剰な情報量と見なせるセンサデータの収集を抑制するアプローチの 2 つがある。前者は、移動型センサノードが密に存在するエリア [5], [22], [29] や、時間変化の乏しいエリア [26] において、測定する移動型センサノードや測定値を間引く手法が提案されている。後者は、回帰近似による圧縮 [4], [14] や、低ランク行列の特徴を用いた圧縮センシング [2] でセンサデータの収集量を削減する手法が検討されている。

上記の手法はいずれも、不正確な測定値が含まれうることは十分に考慮されていない。上記研究において議論されているセンサデータの精度は、交差検定の Mean Squared Error や不可逆圧縮後の復元率といったもので、予測値の平均的な正確性に関するものであった。つまり、そもそも実測値の正確性に関して議論されていない。目指す予測値

の正確性についても、最大誤差を最小化する設計でなく平均誤差を最小化する設計がなされているため、個々の予測値が誤りうる範囲は明確になっていない。

我々は、従来の固定型センサノードの役割を参加型センシングが担うには、参加型センシングによって提供されるセンサ値の信頼性について検討すべきだと考えた。センサデータの収集量が少ない時空間では信頼性よりもデータの有無のほうが重要だろうが、ある程度の収集量が見込める時空間では確からしい測定値を提供できたらよい。統計学の分野では、離散値の母平均の確からしさを表す基準として信頼区間幅がよく使われる。これによると、離散的な測定値がある値の範囲内にどのくらいの確率で存在するかを算出できる。この信頼区間幅を参加型センシングに適用すると、たとえば、ある時空間領域における温度センサの値は95%の信頼水準で23.0度から23.5度の範囲に測定される、といった信頼性に関する保証を付与することができる。我々は、この信頼区間幅をトラフィック抑制手法に導入することにした。

#### 4. 誤差を考慮したサンプリングレート制御手法

我々は、参加型センシングにおいて、測定値の収集トラフィックを抑制しつつ、信頼性の高い測定結果を得ることを目的とした、サンプリングレート制御手法を提案する。本手法では、測定結果の信頼性を、測定値の母平均の信頼区間幅の大きさで表す。提案手法は、測定値の母平均の信頼区間幅がつねに条件とする大きさ以下になるサンプリングレートに抑制する。提案手法は、対象とする時空間領域における測定値の母平均の範囲とその信頼水準を測定結果として提供する。たとえば、「2008年2月3日の11時0分から11時10分に北緯39.90度から39.91度、東経116.39度から116.40度の区画で測定される気温の測定値は、信頼水準90%で1.7度から1.9度の範囲にある」という測定結果を返す。

##### 4.1 特徴

提案手法は2つの特徴を有する。

1つめは、測定値の信頼性の尺度である。提案手法は、測定値の信頼性を「同一の時空間領域で測定された値から推定される母平均の確からしさ」とし、これを統計学の信頼区間幅を尺度として測る。この特徴は、測定値の分布を確率的に推定するのに十分な量にまでトラフィックを抑制する効果がある。母平均  $\mu$  の95%信頼区間は、

$$\bar{X} - \frac{1.96 \cdot s}{\sqrt{n}} < \mu < \bar{X} + \frac{1.96 \cdot s}{\sqrt{n}} \quad (1)$$

と定義される。 $\bar{X}$  は標本平均、 $s$  は標本標準偏差、 $n$  は標本数を表す。母平均の信頼区間幅は、測定値のばらつきが小さい場合にも、収集データ量が大きい場合にも、小さく

なる。つまり、母平均の信頼区間幅を用いることで、測定値のばらつき度合いと収集データ量の2つを同時に考慮できる。さらに、一般に外れ値は信頼区間から逸脱した値として処理されるため、大きな誤差の影響を抑制できる。先行研究の多くは収集データ量に特化して参加型センシングにおけるデータの質を議論しているのに対して、提案手法は各測定値に含まれる誤差にも着目して両者を1つの尺度で測っている点で異なる。

もう1つは、すべての移動型センサノードに均一な低いサンプリングレートを設定する点である。つまり、誤差が大きく精度が低い移動型センサノードから偏ってセンサデータを収集してしまうことを避ける。この特徴は、誤差の大きさが異なる多様なセンサの混在の影響を抑えつつ、トラフィックを抑制する効果がある。先行研究ではの多くは移動型センサノードを間引くことで収集データ量を調整しているのに対して、提案手法は個々の移動型センサノードの測定値を間引く点で異なる。

提案手法は、これら2つの特徴によって、センサ値の信頼性を確保したトラフィック抑制を、測定値の信頼区間幅に応じてサンプリングレートを抑制することで実現する。サンプリングレートを抑制することは、測定行為自体の回数を削減することを意味する。これはつまり、測定値のオリジナルデータ量を根源的に削減する効果があり、トラフィック量の最悪値を抑制するうえで有用である。これは、極度にメモリの小さいノードや圧縮率が低い測定値といった最悪ケースでもトラフィック削減効果を見込めるものである。また、本手法はサンプリングレートのみを制御するため、キャッシュを使った一括送信といった通信頻度を削減する工夫や、複数測定値のデルタ圧縮といった通信量を削減する工夫といった、個々の移動型センサノードの内部処理によるトラフィック抑制手法と組み合わせて適用できるものである。

##### 4.2 時空間領域の設定

提案手法は、対象とする時空間領域の測定値の母平均の範囲とその信頼水準を測定結果として提供するため、時空間領域の大きさを適切に決めることは重要である。時空間領域の大きさは、ダストや騒音のような時空間的に局所性の高い事象の測定値が当該時空間の母平均に及ぼす影響度合いと、当該時空間で集まる測定値の量の2つに大きく関係する。

時空間的に局所性の高い事象の測定値は、大きな時空間領域が設定されている場合には外れ値として扱われるのに対して、小さな時空間領域が設定されている場合には母平均に大きな影響を与えるものとして扱われる。つまり、提案手法は、時空間的に局所性の高い事象の測定値に対して、広い空間の長期間の平均的な動向を知りたいときは大きな空間領域を設定し、狭い空間の瞬間的な動向を知りたいと

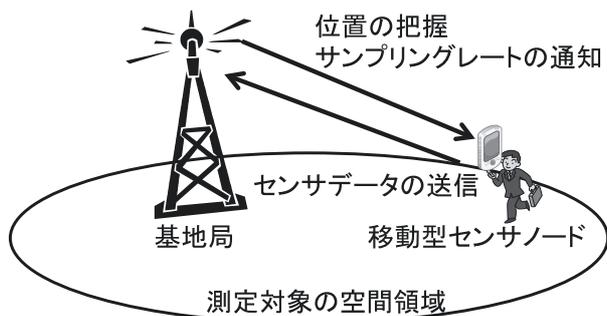


図 7 システムの概要図

Fig. 7 System architecture.

きは、小さな時空間領域を設定することが推奨される。騒音値を例にあげると、街の喧騒度合いを知りたいときは大きな時空間領域として時間粒度も空間粒度も荒くすることが、店頭の宣伝音量を知りたいときは小さな時空間領域として時間粒度も空間粒度も細かくすることが、適切となる。

一方、対象とする時空間領域の大きさと当該時空間領域で集まるセンサデータの量はトレードオフの関係にある。小さな時空間領域ほど、そこで得られる測定値の量は減る。測定値の量が減ると母平均の推定は難しくなるため、提案手法がうまく機能しなくなる恐れがある。

以上をふまえると、提案手法は測定値の広い空間の平均的な動向を知りたいときを得意とし、一方、狭い空間の瞬間的な動向を知りたいときを苦手とする。

### 4.3 設計

提案手法は、基地局が移動型センサノードのサンプリングレートを制御する。提案手法では、図 7 に示すように、基地局と移動型センサノードで構成されるシステムを前提としている。基地局は、測定対象となっている時空間領域に存在する移動型センサノードを把握を行い、サンプリングレートを通知したり、センサデータを集める役割を担ったりする。基地局による移動型センサノードの位置把握方法として、移動型センサノードは自身の属する空間領域を変えるたびに基地局にそれを伝えるような方式を想定している。移動型センサノードは、基地局から通知されたサンプリングレートで測定して、「測定時刻」と「測定値」を基地局に送信する。たとえば、時刻「2012-01-31 09:15:00」に温度「25.4 度」といったような測定結果を送信する。

移動型センサノードは、サンプリングレートとサンプリングレート更新間隔の初期値を事前に設定する。たとえば、0.01 Hz のサンプリングレート、およびサンプリングレート更新間隔 10 分というように設定する。

また、基地局には、サンプリングレートを制御するパラメータとして用いる信頼係数と信頼区間幅、サンプリングレート更新間隔が事前に設定される。たとえば、信頼係数 0.95、信頼区間幅 0.4、サンプリングレート更新間隔 10 分というように設定される。

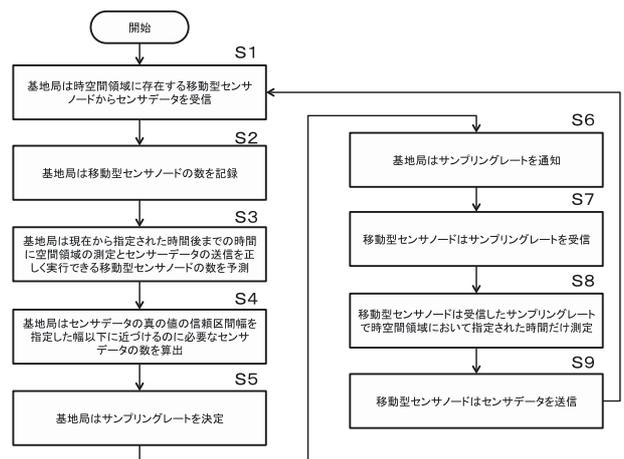


図 8 提案手法のフロー

Fig. 8 Procedure.

時間	移動型センサノードの数	サンプリングレート
2012-01-31 09:00	10	0.01
2012-01-31 09:10	13	0.01
2012-01-31 09:20	10	0.01
2012-01-31 09:30	8	0.02
2012-01-31 09:40	6	0.02
2012-01-31 09:50	4	0.05
2012-01-31 10:00	4	0.02
2012-01-31 10:10	6	0.02
2012-01-31 10:20	8	0.01

図 9 移動型センサノードの数とサンプリングレートの例

Fig. 9 Example history of No. of mobile sensor nodes and sampling rates.

このサンプリングレート更新間隔が、母平均の信頼区間を算出する際の時間粒度のパラメータとなる。

提案手法は 9 つのステップから構成される。図 8 に提案手法のフローの詳細を示す。下記に、ステップ S1 から S9 について順番に説明する。

ステップ S1 において、基地局は時空間領域に存在する移動型センサノードからセンサデータを受信する。提案手法では、移動型センサノードのサンプリングレートを制御するが、測定時刻は同期することを前提としていない。このため、計測時刻は等間隔になるとは限らない。

ステップ S2 において、基地局は移動型センサノードの数を記録する。図 9 の例は、時間「2012-01-31 09:00」から「2012-01-31 10:20」の 10 分おきの期間で空間領域に存在した移動型センサノードの数を表している。

ステップ S3 において、基地局は、現在から次のサンプリングレート更新時刻までに空間領域の測定とセンサデータの送信を正しく実行できる移動型センサノードの数を予測する。上述したとおり、基地局にはサンプリングレート

更新間隔「10分」を設定したので、10分間に空間領域を測定できる移動型センサノードの数を予測する。提案手法では、この予測値は、基地局で記録した過去の移動型センサノードの数をもとに算出する。たとえば、フーリエ変換で算出した時間的周期性を用いた方法や、類似した時間変移があった別の時空間領域の変化をもとにした方法、自己回帰や移動平均によるモデル化をもとにした方法などが有効であると考えられる。さらに、センサノードの数や時空間情報以外にも、気象情報や移動型センサノードの所有者の属性情報のような説明変数を使った方法も有効と考えられる。予測方法の最も単純な例として1次微分を使ったものは、時刻  $t_i$  と  $t_{i-1}$  の移動型センサノードの数を  $x(t_i)$ ,  $x(t_{i-1})$  とすると、時刻  $t_{i+1}$  の移動型センサノードの数の予測値  $x(t_{i+1})$  を、

$$x(t_{i+1}) = x(t_i) + \frac{x(t_i) - x(t_{i-1})}{t_i - t_{i-1}} \times (t_{i+1} - t_i) \quad (2)$$

で求める。この予測方法で、図9の時刻「2012-01-31 10:30」の移動型センサノードの数の予測値  $x(2012-01-31 10:30)$  を時刻「2012-01-31 10:20」の移動型センサノードの数  $x(2012-01-31 10:20)$  と時刻「2012-01-31 10:10」の移動型センサノードの数  $x(2012-01-31 10:10)$  から求めると、 $x(2012-01-31 10:30) = 8 + 2 = 10$  が求まる。時刻「2012-01-31 10:20」から時刻「2012-01-31 10:30」にかけて、移動型センサノードの数が8から10に増えるという予測値が得られた。なお、この移動型センサノード数の予測精度は測定値の母平均の信頼区間幅に影響を及ぼす。ノード数が期待よりも極度に少ない場合は測定値の母平均の信頼区間幅が広くなり、ノード数が期待よりも多い場合は信頼区間幅が狭まる。

ステップS4において、基地局はセンサデータの真の値の信頼区間幅を指定した幅以下に近づけるのに必要なセンサデータの数を算出する。基地局はまず、移動型センサノードごとに測定値の平均値を計算する。たとえば、時刻「2012-01-31 10:20:00」から「2012-01-31 10:30:00」の間に、移動型センサノードから25.449, 25.364, 25.663, 25.542, 25.535, 25.692のセンサデータが収集されていたとする\*1。上述の例において、基地局には信頼係数0.95, 信頼区間幅0.4, サンプルングレート更新間隔10分を設定していた。この6つの値の標準偏差は0.12451である。標本数6なので、信頼度95%のときの信頼区間は、統計学における定義を用いると、25.441から25.640の範囲と計算される。この信頼区間幅は0.199である。信頼区間幅を0.4以下にする条件であったのに対してこの信頼区間幅はほぼ0.2であるため、必要なセンサデータは現在の4分の1の数で十分

\*1 本説明では簡単のため、測定されたセンサデータの数を6としたが、時刻「2012-01-31 10:20:00」の移動型センサノードの数が8でサンプルングレートは0.01Hzのとき10分間に測定されるサンプル数は6を上回るだろう。

であると算出される。

ステップS5において、基地局のサンプルングレート決定部はサンプルングレートを決定する。ステップS3では移動型センサノードの数は  $x(2012-01-31 10:20)$  から  $x(2012-01-31 10:30)$  で8から10に増えると予測され、ステップS4では信頼区間幅を「0.4」以下にする条件ならばセンサデータは現在の4分の1の数で十分だと分かった。また、時刻「2012-01-31 10:20」のサンプルングレート  $R(2012-01-31 10:20)$  は、図9によると「0.01」と設定されていた。以上の条件から、時刻「2012-01-31 10:30」のサンプルングレート  $R(2012-01-31 10:30)$  は、

$$\begin{aligned} &R(2012-01-31 10:30) \\ &= R(2012-01-31 10:20) \\ &\quad \times (\text{移動型センサノードの増加率の逆数}) \\ &\quad \times (\text{信頼区間幅の条件を満たすための標本数の増加率}) \\ &= 0.01 \times \frac{8}{10} \times \frac{1}{4} = 0.002 \end{aligned} \quad (3)$$

と求める。

ステップS6において、基地局の送信部はサンプルングレートを送信する。ステップS5で算出された0.002Hzを新しいサンプルングレートとして、移動型センサノードに送信する。

ステップS7において、空間領域に位置する移動型センサノードはサンプルングレートを受信し、ステップS8において、移動型センサノードの観測部は受信したサンプルングレートで指定されたサンプルングレート更新までの時間だけ測定する。つまり、時刻「2012-01-31 09:15」までは0.01Hzで10分間だけ測定していたのを、0.002Hzで10分間だけ測定するように変更する。なお、空間領域に途中から入ってくる移動型センサノードに対しては、入ってきたタイミングでサンプルングレートを通知する。

さらに、ステップS9について説明する。移動型センサノードの送信部はセンサデータを送信し、ステップS1からの手順を繰り返す。

以上の手順で、基地局は、現在から指定されたサンプルングレート更新時間までの期間に時空間領域に居合わせると予測される移動型センサノードの数や、集まる測定値のばらつき度合いに応じた、測定のサンプルングレートを、収容するすべての移動型センサノードに対して通知することが可能となる。

## 5. 評価

提案手法が、測定結果の信頼性を確保しながら移動型センサノードからセンサデータを収集するのに必要なトラフィックを抑制できるかをシミュレーション実験で評価した。実験では、基地局が指定した区画に居合わせた移動型センサノードにサンプルングレートを通知し、移動型セン

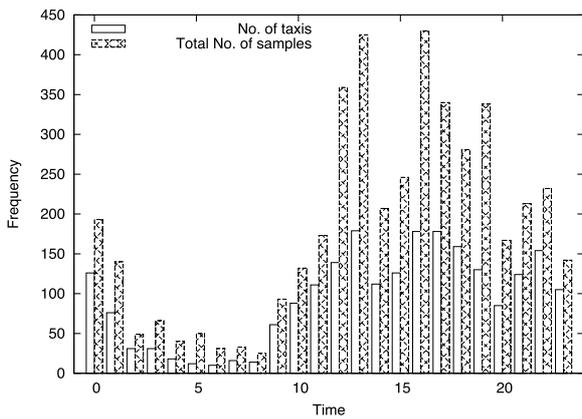


図 10 タクシーの台数と総サンプル数

Fig. 10 No. of taxis and total No. of samples.

サノードは基地局に温度の測定値を送信する状況を想定した。

### 5.1 シミュレーション設定

参加型センシングの環境を模したシミュレーションとするために、指定した区画に居合わせた移動センサノードの数の時間変移、測定値の真の値の時間変移、測定値の偶然誤差と系統誤差、比較手法は以下のように設定した。

移動センサノードの数の時間変移は、北京市内のタクシーの移動経路データセットの T-Drive Data [31], [32] を使って設定した。T-Drive Data は、北京市内を走行する 2008 年の 2 月 2 日から 8 日の期間に、10,357 台のタクシーに装着した GPS の測定値で構成されたデータセットである。GPS の測定頻度は一律ではないが、平均で 177 秒おきで 623 メートルの間隔で位置情報が取得されている。すべての測定値には位置情報のほか、タクシーの ID も付与されている。本実験では、2008 年 2 月 3 日の 0 時から 23 時に北緯 39.90 度から 39.91 度、東経 116.39 度から 116.40 度の区画に居合わせたタクシーの ID を利用した。参考までに、この区画は天安門広場に面した大通りのおよそ 1 キロメートル平方である。図 10 は、この区画に居合わせたタクシーの台数と収集された GPS の測定値の総数を表したものである。横軸は時刻を表している。この図から、早朝の時間帯のタクシーが少ないことが分かる。

測定値の真の値の時間変移は、気象庁観測の気温を使って設定した。上述の北京の区画の気象データを得ることができなかったため、同日の 2008 年 2 月 3 日の 0 時から 23 時に東京（北緯 35 度 41.4 分、東経 139 度 45.6 分、標高 6.1 メートル）で観測された 1 時間おきの気温を使った。提案手法は測定時刻の同期をせずにサンプリングレートだけを共有する方式のため、シミュレーション実験では任意の時刻の気温の真の値を必要とする。我々は任意の時刻の真の値を、近傍 2 時刻の気温の線形補間で計算した値とした。この線形補間に関しては、気象庁公開の 6 年分の 2 月 3 日

の気温値を使った予備実験により本実験への影響が小さいことを確認した。

各移動型センサノードの測定値は、上述の東京で観測された気温に偶然誤差と系統誤差を加えた値とした。偶然誤差と系統誤差の大きさは、2 章の実験で得た誤差の分布を参考に設定した。この実験では、偶然誤差の標準偏差は 0.160 と 0.596、系統誤差の標準偏差は 1.66 であった。系統誤差のほうが偶然誤差よりも大きい値であった。そこで、系統誤差のほうが偶然誤差よりも平均的に大きくなるように、タクシーの ID（移動型センサノード）ごとに誤差のパラメータを定めた。具体的には、偶然誤差のパラメータは 0 から 0.8 の範囲の一様分布で、系統誤差は 0 から 2 の範囲の一様分布で設定した。偶然誤差はこのパラメータを標準偏差とする正規分布で測定のために生成した。系統誤差はこのパラメータを標準偏差とする正規分布でタクシー ID に対して 1 つ生成した。

参加型センシングにおいて精度を考慮したデータ収集手法は、筆者らの知る限り、過去に存在しない。そこで、一定のサンプリングレートで測定した場合の信頼区間幅と比較した。サンプリングレートは、測定値の信頼区間幅がつねに提案手法が条件とする大きさ以下になるように設定した。これを Uniform sampling と呼ぶ。さらに、参考までに、1 時間おきに区画に居合わせた移動型センサノードの中からランダムに 1 つを選んで測定した場合の結果とも比較した。これを One sample と呼ぶ。

提案手法のパラメータとして必要な信頼係数は 0.95 に、サンプリングレート更新時間は 1 時間に設定した。移動型センサノードの数の予測に関しては、簡単のため本シミュレーションでは省略して、正しい移動型センサノードの数をシミュレータに与えることとした。

本シミュレーション実験では、サンプリングレートの通知に必要なトラフィックは評価から除いている。通知手段に関しては今後の課題として認識しており、「エリアメール」のように一斉同報のプロトコルなどが有効であると考えている。

### 5.2 信頼区間幅

提案手法が、母平均の 95% 信頼区間幅が 0.5 度以内を満たすようにサンプリングレートを制御した場合の、気温の測定値の信頼区間を表したものが図 11 である。縦軸が温度を、横軸が時刻を表している。真の値、提案手法、Uniform sampling、そして、One sample の結果を表している。

One sample の結果は、誤差の影響によって真の値から大きく外れた測定値が混在していた。一方、提案手法と Uniform sampling は比較的正しい測定結果であった。提案手法と Uniform sampling は、測定する移動型センサノードの数を絞らず、すべての移動型センサノードに均一な低

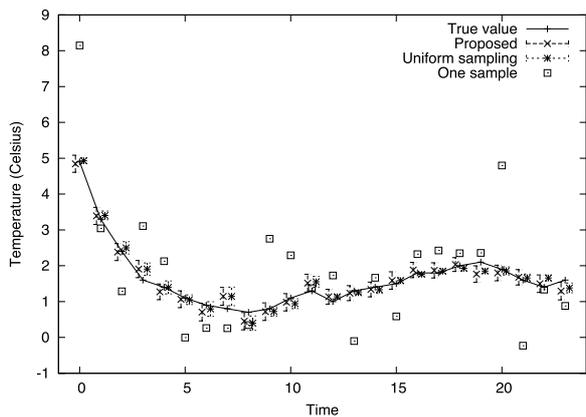


図 11 気温の測定値の信頼区間  
Fig. 11 Confidence interval of temperature.

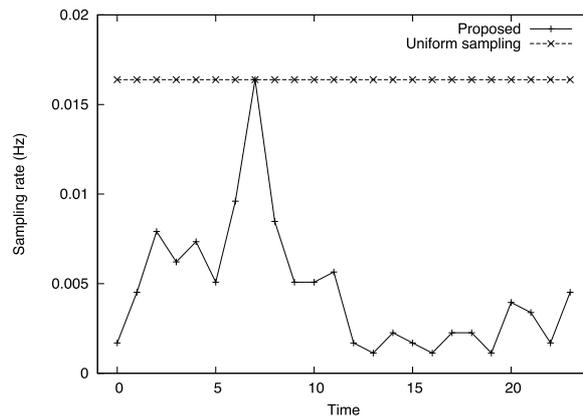


図 12 サンプリングレート  
Fig. 12 Sampling rate.

いサンプリングレートを設定することで、系統誤差の影響を抑えることができたと考えられる。つまり、誤差が大きく精度の低い移動型センサノードから偏ってセンサデータを収集してしまうことを避けることができたといえる。

提案手法と Uniform sampling を比較すると、たとえば 22 時の結果のように、Uniform sampling よりも提案手法の総測定回数が大幅に下回るような時間帯において、Uniform sampling の信頼区間幅の結果が小さくなっているが、真の値に近づいていなかった。これは以下のように解釈できる。サンプリングレートが低いと、移動型センサノードが測定するタイミングに該当区画に居合わせる確率が小さくなり、結果として測定する移動型センサノードの数が小さくなる。一方、ある程度サンプリングレートを高くしていき、測定する移動型センサノードの数が上限に達すると、1つの移動型センサノードで測定する回数が増加する。前者の状況では、測定する移動型センサノードの数が変化するため、偶然誤差と系統誤差の両方の影響を抑える効果が期待できる。しかし、後者の状況では、測定する移動型センサノードの数は変化しないため、偶然誤差の影響のみを抑える効果となる。Uniform sampling では、後者の状況となっていて、提案手法よりもサンプリングレートが高くなっているにもかかわらず精度がさほど向上していなかったと考えられる。

### 5.3 サンプリングレートと総測定回数

提案手法が、母平均の 95%信頼区間幅が 0.5 度以内を満たすようにサンプリングレートを制御した場合の、サンプリングレートと総測定回数を表したものが図 12 と図 13 である。横軸は時刻を表している。提案手法と Uniform sampling の結果を表している。

図 12 から、提案手法は Uniform sampling と比べて大幅にサンプリングレートを抑制できていることが分かる。最も効果的な時刻のサンプリングレートでは、提案手法は Uniform sampling のおよそ  $\frac{1}{10}$  にまで抑制できている。平

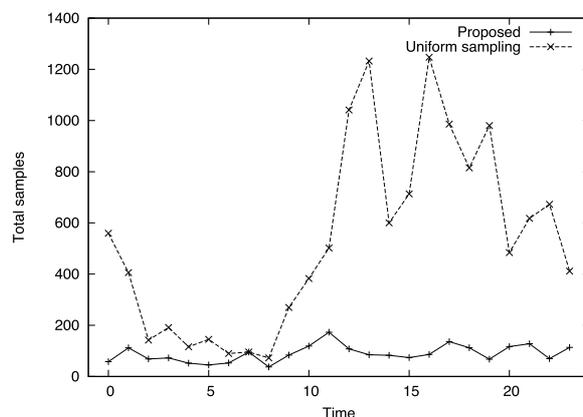


図 13 総測定回数  
Fig. 13 Total samples.

均的にも  $\frac{2}{7}$  にまで抑制できている。また、図 13 から、提案手法の総測定回数は、区画に居合わせたタクシーの台数に関係なく、ほぼ一定の値となっていることが分かる。総測定回数は、平均で提案手法は Uniform sampling のおよそ  $\frac{1}{9}$  にまで抑制できていた。以上より、本研究の目的としていた、センサデータの精度を保証しながら、移動型センサノードからセンサデータを収集するのに必要なトラフィックを抑制するようなサンプリングレートの制御ができていると分かる。

図 10 と図 12 を比較すると、必ずしもサンプリングレートは移動型センサノードの数（タクシーの台数）の逆数になっているわけではないが、これは、提案手法は、単純に区間に居合わせた移動型センサノードの数だけでなく、測定値の分散度合いにも適応してサンプリングレートを定めているためであると考えられる。

### 5.4 通信トラフィック

本手法で生じる通信トラフィックは、基地局による測定対象となっている時空間領域に存在する移動型センサノードの把握と、基地局からそれら移動型センサノードに対する一定時間ごとのサンプリングレート通知、そして、移動

型センサノードから基地局への測定値の送信, の3つのステップで生じる. 1つめの移動型センサノードの把握と2つめのサンプリングレート通知は, 移動型センサノードの数  $x(t_i)$  に応じた通信トラフィックを必要とする. 3つめの測定値の送信は, 時空間領域の測定値のばらつきに応じた量の通信トラフィックを必要とする. 一定のサンプリングレートで測定する手法と比べると, 提案手法は移動型センサノードの位置把握とサンプリングレート通知の通信トラフィックを余計に必要とする. この通信トラフィック量が提案手法による測定値の送信の通信トラフィックの削減量に比べて十分小さいかを検証する.

図10のタクシー台数では, 移動型センサノードの位置把握と1時間おきにサンプリングレートの一斉同報をするのに, 移動型センサノードと基地局間で合計4,526回の通信が発生する. 図13の総測定回数は, 提案手法が3,577回なのに対して, 比較手法は18,061回である. この差分よりも移動型センサノードの位置把握とサンプリングレートの一斉同報の通信回数は小さいことから, 提案手法のトラフィック削減効果が見込めることが分かる.

なお, 実際の環境で提案手法を使う場合は, 移動型センサノードの位置把握とサンプリングレート通知の頻度は, 測定したい時空間領域の粒度に合わせて調整するものと想定している.

## 6. おわりに

本論文では, 参加型センシングにおいて, 測定値の母平均の信頼区間幅がつねに条件とする大きさ以下になるサンプリングレートに制御して, 移動型センサノードからセンサデータを収集するのに必要なトラフィックを抑制する, サンプリングレート制御手法を提案した. 提案手法は, 参加型センシングで集まるセンサデータの信頼性の確保とトラフィック抑制を実現し, 実世界情報を活用するアプリケーションで参加型センシングを利用しやすくするものである.

現在の手法は測定値の母平均がどのような範囲の値をとるか推定するものであるが, 将来的には真の値を推定するように改善したい. 厳密に真の値を推定するには, 真の値の時空間領域における分布を考えたい. さらに移動型センサノードごとの偶然誤差と系統誤差を推定する必要がある. 現在の手法では, ある程度サンプリングレートを高くしていき測定する移動型センサノードの数が上限に達した場合, 1つの移動型センサノードで測定する回数が増加するため, 系統誤差の影響が大きくなってしまふ. また, 測定対象の時空間領域が大きすぎると, 真の値が時空間ごとに大きく異なるため, 誤差との区別がつけにくい. この問題に関しては, センサ値に基づいた時空間領域統合の先行研究 [36] と合わせて今後検討を深めたい. 他にも, 将来の検討課題として, 測定環境誤差の解消や, 多様な誤差生

成過程に関するより深い分析, 移動型センサノードの時刻や位置情報の誤差, 基地局と移動型センサノードで構成されるネットワークの設計や移動型センサノードへのサンプリングレートの通知方法, 位置情報のアップデート方法といった実装面での課題が残っている. 現在, 実環境での評価を進めている.

## 参考文献

- [1] Ahmadi, H., Pham, N., Ganti, R., Abdelzaher, T., Nath, S. and Han, J.: Privacy-aware regression modeling of participatory sensing data, *Proc. 8th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys '10)* (2010).
- [2] Akimura, D., Kawahara, Y. and Asami, T.: A Compressed Sensing Method for Human Activity Sensing using Mobile Phone Accelerometers, *Proc. 9th International Conference on Networked Sensing Systems (INSS '12)* (2012).
- [3] Aslam, J., Lim, S., Pan, X. and Rus, D.: City-scale traffic estimation from a roving sensor network, *Proc. 10th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services (MobiSys '12)*, pp.141–154 (2012).
- [4] Banerjee, T., Chowdhury, K. and Agrawal, D.P.: Tree based data aggregation in sensor networks using polynomial regression, *Proc. 8th International Conference on Information Fusion*, pp.25–29 (2005).
- [5] Boutsis, I. and Kalogeraki, V.: Dynamic QoS-aware event sampling for community-based participatory sensing systems, *Proc. 6th ACM International Conference on Distributed Event-Based Systems (DEBS '12)* (2012).
- [6] Boutsis, I. and Kalogeraki, V.: Privacy Preservation for Participatory Sensing Data, *Proc. 11th IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom '13)* (2013).
- [7] Burke, J., Estrin, D., Hansen, M., Parker, A., Ramanathan, N., Reddy, S. and Srivastava, M.B.: Participatory sensing, *Proc. Mobile Device Centric Sensor Networks and Applications (WSW '06)*, pp.117–134 (2006).
- [8] Campbell, A.T., Eisenman, S.B., Lane, N.D., Miluzzo, E., Peterson, R.A., Lu, H., Zheng, X., Musolesi, M., Fodor, K. and Ahn, G.: The Rise of People-Centric Sensing, *IEEE Internet Computing*, Vol.12, No.4, pp.12–21 (2008).
- [9] Chebroly, K., Raman, B., Mishra, N., Valiveti, P.K. and Kumar, R.: Brimon: A sensor network system for railway bridge monitoring, *Proc. 6th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services (MobiSys '08)*, pp.2–14 (2008).
- [10] Cornelius, C., Kapadia, A., Kotz, D., Peebles, D., Shin, M. and Triandopoulos, N.: Anonymsense: Privacy-aware people-centric sensing, *Proc. 6th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services (MobiSys '08)* (2008).
- [11] Fujinami, K., Xue, Y., Murata, S. and Hosokawa, S.: A Human-Probe System that Considers On-body Position of a Mobile Phone with Sensors, *Proc. 1st International Conference on Distributed, Ambient and Pervasive Interactions (DAPI '13)* (2013).
- [12] Ganti, R.K., Pham, N., Ahmadi, H., Nangia, S. and Abdelzaher, T.F.: GreenGPS: A participatory sensing

- fuel-efficient maps application, *Proc. 8th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services (MobiSys '10)*, pp.151–164 (2010).
- [13] Ganti, R.K., Pham, N., Tsai, Y. and Abdelzaher, T.F.: PoolView: Stream privacy for grassroots participatory sensing, *Proc. 6th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys '08)* (2008).
- [14] Guestrin, C., Bodi, P., Thibau, R., Paski, M. and Madden, S.: Distributed regression: an efficient framework for modeling sensor network data, *Proc. 3rd International Symposium on Information Processing in Sensor Networks (IPSN '04)*, pp.1–10 (2004).
- [15] Hao, T., Iwai, M., Tobe, Y. and Sezaki, K.: ESMO: An Energy-Efficient Mobile Node Scheduling Scheme for Sound Sensing, *IEICE Trans. Commun.*, Vol.E93-B, No.11, pp.2912–2924 (2010).
- [16] Hartung, C., Han, R., Seielstad, C. and Holbrook, S.: FireWxNet: A multi-tiered portable wireless system for monitoring weather conditions in wildland fire environments, *Proc. 4th International Conference on Mobile Systems, Applications and Services (MobiSys '06)*, pp.28–41 (2006).
- [17] Hasenfratz, D., Saukh, O., Walser, C., Hueglin, C., Fierz, M. and Thiele, L.: Pushing the Spatio-Temporal Resolution Limit of Urban Air Pollution Maps, *Proc. 12th IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom '14)* (2014).
- [18] Kawasaki, H., Yamamoto, A., Kurasawa, H., Sato, H., Nakamura, M. and Matsumura, H.: Top of Worlds: Method for Improving Motivation to Participate in Sensing Services, *Proc. 14th International Conference on Ubiquitous Computing (Ubicomp '12)*, pp.594–595 (2012).
- [19] Koutsopoulos, I.: Optimal incentive-driven design of participatory sensing systems, *Proc. 32nd Annual IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM '13)* (2013).
- [20] Kurasawa, H., Sato, H., Yamamoto, A., Kawasaki, H., Nakamura, M., Fujii, Y. and Matsumura, H.: Missing Sensor Value Estimation Method for Participatory Sensing Environment, *Proc. 12th IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom '14)* (2014).
- [21] Li, Q. and Cao, G.: Providing Privacy-Aware Incentives for Mobile Sensing, *Proc. 11th IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom '13)* (2013).
- [22] Mendez, D.: Density Maps: Determining Where to Sample in Participatory Sensing Systems, *Proc. 2012 3rd FTRA International Conference on Mobile, Ubiquitous, and Intelligent Computing (MUSIC)*, pp.35–40 (2012).
- [23] Pham, N., Ganti, R.K., Uddin, Y.S., Nath, S. and Abdelzaher, T.: Privacy-preserving reconstruction of multidimensional data maps in vehicular participatory, *Proc. 7th European Conference on Wireless Sensor Networks (EWSN '10)* (2010).
- [24] Rachuri, K.K., Mascolo, C., Musolesi, M. and Rentfrow, P.J.: SociableSense: Exploring the trade-offs of adaptive sampling and computation offloading for social sensing, *Proc. 17th International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom '11)* (2011).
- [25] Rana, R.K., Chou, C.T., Kanhere, S.S., Bulusu, N. and Hu, W.: Ear-phone: An end-to-end participatory urban noise mapping system, *Proc. 9th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN '10)*, pp.105–116 (2010).
- [26] Sharaf, M.A., Beaver, J., Labrinidis, A. and Chrysanthis, P.K.: TiNA: A scheme for temporal coherency-aware in-network aggregation, *Proc. 3rd ACM International Workshop on Data Engineering for Wireless and Mobile Access (MobiDe '03)*, pp.69–76 (2003).
- [27] Sun, Z., Liu, C.H., Bisdikian, C., Branch, J.W. and Yang, B.: QoI-aware energy management in Internet-of-Things sensory environments, *Proc. 8th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON '11)* (2012).
- [28] Ueyama, Y., Tamai, M., Arakawa, Y. and Yasumoto, K.: Gamification-Based Incentive Mechanism for Participatory Sensing, *Proc. 1st International Workshop on Crowdsensing Methods, Techniques, and Applications (CROWDSENSING '14)* (2014).
- [29] Vergara-Laurens, I., Mendez, D. and Labrador, M.A.: Privacy, Quality of Information, and Energy Consumption in Participatory Sensing Systems, *Proc. 12th IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom '14)* (2014).
- [30] Yang, D., Xue, G., Fang, X. and Tang, J.: Crowdsourcing to smartphones: Incentive mechanism design for mobile phone sensing, *Proc. 18th International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom '12)* (2012).
- [31] Yuan, J., Zheng, Y., Zhang, C., Xie, W., Sun, G. and Huang, Y.: T-drive: Driving directions based on taxi trajectories, *Proc. 18th SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems (GIS '10)*, pp.99–108 (2010).
- [32] Yuan, J., Zheng, Y., Xie, X. and Sun, G.: Driving with knowledge from the physical world, *Proc. 17th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD '11)*, pp.316–324 (2011).
- [33] Zhan, K., Faux, S. and Ramos, F.: Multi-scale Conditional Random Fields for First-Person Activity Recognition, *Proc. 12th IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom '14)* (2014).
- [34] 高橋公海, 草野孔希, 川崎仁史, 秦 崇洋, 倉沢 央: ゲームを用いたセンサデータ収集方法のデザイン, 人工知能学会全国大会 (2014). (to appear)
- [35] 佐藤浩史, 山本 淳, 倉沢 央, 川崎仁史, 中村元紀, 松村一: 仮想センサ環境の実現へ向けて—参加型センシングの可能性と課題, 信学総大 (2013).
- [36] 山本 淳, 川崎仁史, 倉沢 央, 佐藤浩史, 中村元紀, 松村一: 参加型センシングのためのデータ精度を考慮した仮想センサの提案, 第 11 回情報科学技術フォーラム (FIT 2012) 論文集, Vol.4, pp.17–20 (2012).
- [37] 川崎仁史, 山本 淳, 倉沢 央, 佐藤浩史, 中村元紀, 松村一: 多次元階層型集合でのランキング提示によるサービスへの参加意欲向上手法, 信学総大, pp.654–654 (2012).
- [38] 倉沢 央, 佐藤浩史, 山本 淳, 川崎仁史, 中村元紀, 松村一: 不完全センサデータの重回帰における変数選択手法, 信学技報, USN2012-54 (2012).

推薦文

本論文は、参加型センシングにおいて、測定値の平均値の信頼区間幅に基づいてサンプリングレートを決定するという新たな方法を提案しており、実用的かつ実践的である。

(ユビキタスコンピューティングシステム研究会主査  
角 康之)



倉沢 央 (正会員)

2006年東京大学工学部電子情報工学科卒業。2011年同大学院情報理工学系研究科電子情報学専攻博士課程修了。博士(情報理工学)。同年日本電信電話(株)入社。類似検索、分散情報検索システム、コンテキストウェア

の研究に従事。電子情報通信学会、日本データベース学会各会員。



佐藤 浩史 (正会員)

1994年東北大学理学部数学科卒業。1996年同大学院・理学研究科博士課程前期修了。同年NTT入社。NTTコミュニケーション科学基礎研究所にて、人工知能、特に言語理解などの曖昧性をともなう知識処理技術の研究に

従事。2004年よりNTT環境エネルギー研究所にて気象データ処理技術の研究に従事。2007年よりNTT未来ねっと研究所にてセンサデータ処理技術の研究に従事。現在、NTT未来ねっと研究所主任研究員。1999年情報処理学会大会優秀賞受賞。日本知能情報ファジィ学会会員。



山本 淳 (正会員)

2001年九州大学工学部電気情報工学科卒業。2003年同大学院システム情報科学府情報工学専攻修士課程修了。同年日本電信電話株式会社入社。同社未来ねっと研究所研究主任。広域ユビキタスデータ共有機構、大規模分散

データ処理基盤、ユーザ参加型センシング技術の研究開発に従事。電子情報通信学会会員。



川崎 仁史 (正会員)

2007年慶應義塾大学理工学部情報工学科卒業。2009年同大学院修士課程修了。同年日本電信電話(株)入社。説得工学、センサアプリケーションの研究に従事。電子情報通信学会会員。



中村 元紀 (正会員)

1990年名古屋大学工学部情報工学科卒業。1992年同大学院修士課程修了。同年日本電信電話(株)入社。以来、通信システムにおける分散プログラム構造、アドホックネットワークにおけるストレージシステム、ユビキタス

サービスのためのソフトウェア構造などの研究に従事。現在、NTT未来ねっと研究所主幹研究員。平成9年本学会大会奨励賞受賞。電子情報通信学会会員。



松村 一

1987年徳島大学工学部卒業。1989年同大学院修士課程修了。同年日本電信電話(株)入社。以来、電子交換機用共通プラットフォーム、分散処理システム、サーバ型通信放送サービスシステム、ユビキタスネットワークシステム

の研究開発に従事。現在、NTTアドバンステクノロジー(株)担当部長。工学博士。電子情報通信学会シニア、IEEE会員。



山下 靖貴

2013年東京大学工学部電子情報工学科卒業。現在、同大学院工学系研究科電気系工学専攻修士課程。無線センサネットワークの研究に従事。



鈴木 誠 (正会員)

2005年東京大学工学部電気工学科卒業。2007年同大学院新領域創成科学研究科基盤情報学専攻修士課程修了。2010年同大学院同研究科同専攻博士課程修了。科学博士。2008～2010年日本学術振興会特別研究員。2010～2012年東京大学先端研特任助教。現在、同大学院先端研助教。ユビキタスコンピューティング，無線センサネットワーク，M2M等の研究に従事。2010年電子情報通信学会論文賞。電子情報通信学会，IEEE，ACM各会員。



森川 博之 (正会員)

1987年東京大学工学部電子工学科卒業。1992年同大学院博士課程修了。現在、同大学先端科学技術研究センター教授。工学博士。1997～1998年コロンビア大学客員研究員。2002～2006年情報通信研究機構モバイルネットワークグループリーダー兼務。ユビキタスネットワーク，センサネットワーク，ビッグデータ/M2M，無線通信システム等の研究に従事。本会論文賞，電子情報通信学会論文賞(3回)，ドコモモバイルサイエンス賞，志田林三郎賞，情報通信功績賞，総務大臣賞等受賞。電子情報通信学会フェロー，新世代M2Mコンソーシアム会長，OECD/CDEP副議長等。