

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 10 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656247

研究課題名(和文) 細粒度気象予測に基づいた地域別空調制御・通信システム

研究課題名(英文) Regional air-conditioning management based on fine-grained environmental information

研究代表者

瀬崎 薫 (Sezaki, Kaoru)

東京大学・空間情報科学研究センター・教授

研究者番号：10216541

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円、(間接経費) 900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、様々なメディアを通して細粒度、リアルタイムの環境情報を低コストで収集し、そのデータをエネルギー管理の観点から地域単位での空調制御へ応用することで快適性を確保したまま地域全体の消費電力削減を目指している。研究成果としては、スマートフォンを通じた参加型センシング、ソーシャルメディアに発信された情報からの環境情報取得、動物に取り付けたセンサを用いた長期間、広範囲の自然環境調査など統合的な環境センシングを実現するとともに、複数の情報ソースから得た温度データからルールに応じて家電機器を制御するソフトウェアを開発し、気温などのデータに基づいたエアコンの制御システムを構築した。

研究成果の概要(英文)：This research aims to reduce energy consumption in a certain region by optimizing air-conditioning based on fine-grained environmental information delivered in real-time. In order to collect environmental information at low cost, we studied various sensing techniques such as participatory sensing which utilizes smartphones of users as sensors, sensing from social media texts, sensing by an animal-wearable device. We also developed a privacy-preserving scheme for participatory sensing by using a combination of negative surveys and randomized response techniques. Finally we developed a home automation system that controls various home appliances including air-conditioner based on the analysis of sensor data from multiple information sources. Overall, we studied the whole story of energy management from acquisition of environmental data to the control of air-conditioner based on the analysis of the sensing data.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：システム工学

キーワード：都市環境センシング 地域エネルギー管理 参加型センシング

## 1. 研究開始当初の背景

本研究は都市部の気象予測をセンサネットワークにより細粒度で行い、それら外気の気象予測情報に基づいて地域ごとの空調制御をクラウド側から一括で制御を行う。冷暖房の制御においては、これまでの個別家庭別の制御ではなく、地域単位の群制御を行うことで、都市部の細粒度気象予測、地域空調制御アルゴリズム、地域空調制御ネットワークプロトコルの研究を行う。可視化等を想定したセンサデータの基盤研究は盛んに研究が行われているが[1]、従来の方式では都市部において詳細な環境情報を収集することが困難であった。

近年、欧米の一部の研究者が、参加型センシング[2]およびコミュニティセンシング[3]など都市部で詳細な環境データを市民が主体となって収集することができる手法の研究を行い始めている。しかし既存研究は、地域空調制御の問題に焦点を絞ってデータ収集活動自体の環境負荷まで総合的に考慮した研究成果を出すには至っていない。市街地において大規模な観測を行うには、観測に必要な機材の台数の確保やメンテナンス、また送電や通信コストがかかり実現することは困難であった。

我々は既に館林で運用しているシステムを発展させ気象計測を可能にし、生活圏での細粒度の計測により市内の細粒度の気象の変化の予測を行うことが可能になる。また空調制御の自動化を地域全体で行い、地域全体の省電力を下げた研究事例はなく先進性が高い。

[1] Cuff, D., Hansen, M., Kang, J, "Urban Sensing: out of the woods," Communications of the ACM, Vol. 51, No.3, March 2008.

[2] Burke, Jeffrey A, Estrin, D, Hansen, Mark, Parker, Andrew, Ramanathan, Nithya, Reddy, Sasank et al.: Participatory sensing, 2006.

[3] Common Sense Project.  
<http://www.communitysensing.org/>

## 2. 研究の目的

家庭や企業での電気使用量の中で、空調機器等の電気使用量は年々増加の一途をたどる。部門別二酸化炭素排出量(2008年)において家庭からの間接排出権は235.0億トンを上回る。また日本は諸外国と比べても火力発電の割合が高い。東日本大震災以後、ピーク電力を下げる試みが行われているが、特に空調電力は変動が大きくピーク時を想定して火力発電所により化石燃料の増加させるためCO2排出増大に直結する問題がある。

そこで本研究では細粒度の気象予測に基づいた地域ごとの空調機器制御をネットワーク経由でクラウド側から配信しセンサネットワークを用いて集められた地域・街のブロックごとの細かい外気温予測に基づき、快

適性を失うことなく暖房・冷却の電力効率化を達成する制御を自動で行う。これにより既存の個別家庭・個別企業の単独の空調制御と比較して、ピーク時の電気使用量と総電力使用量を下げることが狙うために、都市をセンシングすると共に、人が立ち入らない地域のためのセンシング技術も併せて開発し、広域での細粒度の観測を実現する。また、参加型センシングにおける重要な課題であるプライバシーの保護に関する研究も強化し参加型センシングの実現性を高める。

## 3. 研究の方法

センシング技術は、センサが動かないスタティックセンサネットワークと、センサがユーザとともに移動するモバイルセンサネットワークの2種類から成る。スタティックセンサネットワークでは、市街地・住宅地にセンサを遍く展開し、環境情報(温度、湿度、照度、CO2濃度等、気圧)を効率良く取得・通信・処理・蓄積・集約し、必要な時に必要な情報を提供されなければならない。本研究では、協調型の地域別センサネットワーク基盤技術を開発し、計算および通信処理に必要な資源を無駄なく効率的に用いて異種センサデータを管理する手法の開発を試みた。

## 4. 研究成果

### 4-1. 多様な協調型センシングの実現

本研究では、多くの人が所有しているスマートフォンを通じた参加型センシング、Twitterなどのソーシャルメディアに発信された情報からの環境情報取得、動物に取り付けたセンサを用いた長期間、広範囲の自然環境調査を想定し多様なセンシング技術の研究を進めた。

スマートフォンを用いた参加型都市環境センシングシステムを構築するために、AndroidSDKのAPIを用いたアプリケーションを開発した。このセンシングアプリケーションのインターフェースを図1に示す。本アプリケーションを用いることによって、位置情報と共に日照度、騒音レベル、高度、3軸加速度情報を同時に取得することができる。また、外部センサを用いて二酸化炭素濃度し、ユーザからの入力によって臭気レベルも同時に取得する。取得するセンサデータの中でも特に、マイク音声情報はビット数16bits、サンプリング周波数44,100Hzで取得し、音声情報のWaveデータから等価騒音レベルの導出には、ISO標準に基づいた処理を行うNoiseTubeの手法を用いた。センサデータは一定時間ごとにCSVファイルに記録し、また、連続的にマイク音声を録音する。

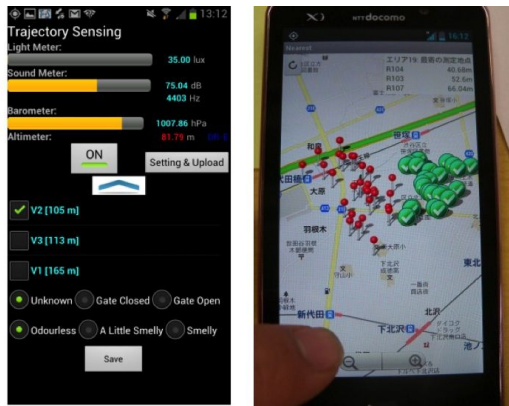


図 1 環境センシングアプリケーション

次に、この実装したセンシングシステムを用いて、総面積約 60 km<sup>2</sup>の東京都世田谷区内全域の環境情報を取得することにより、参加型都市環境センシングで取得するデータの特徴を明らかにした。不動産の市場価値は、1,713 地点ある地価サンプル地点に基づいて決定されている。しかしながら、地価サンプル地点の数に対して、既存の JIS 規格に基づいた騒音情報の取得地点は少ない。本歩行センシング実験では、この地価のサンプル地点に加えて、工場の所在する 869 地点の計 2,582 地点の計測を行うことによって、より実世界に近い、信頼性の高い環境情報地図の構築を目指した。

歩行センシング実験は、計 4 日間行ったが、世田谷区内全域を効率良く調査するために、本実験を行う前に、センシング地点 2,582 をクラスタリングによって分割を行った。各ユーザは、このセンシング実験でクラスタを選択し、センシング実験を行う。本研究では、このクラスタリングのために k-means 法を用いて、センシング地域を 60 の小地域に分割した。

本センシング実験では、世田谷区内全域の騒音情報を取得するために、計 4 日間、のべ 40 人のユーザによるセンシング実験を行った。本実験では、歩行時のセンシングの高さとスマートフォンの状況がほぼ一定となるよう、アームバンドを用いてスマートフォンを固定した。また、ユーザの歩行時には連続的にデータ取得を行うが、同時に、取得する情報の信頼性を確保するために、測定地点の 2,582 箇所では 10 秒間の停止をして測定を行う。測定に用いるスマートフォンとしては、AndroidOS を搭載した複数の機種(GalaxyS3、GalaxyNexus、NexusOne)を用いた。

世田谷区内全域 60[km<sup>2</sup>]の環境騒音情報を統合処理し、地図上に表したものを図 2 に示す。騒音レベルの高い地点のデータは赤で、低い位置のデータは青で記す。交通量の多い交差点付近や、鉄道の駅周辺では等価騒音レベルが高い値を示している。また住宅地として人気である地域の住生活環境が必ずしも良いものではないことがわかる。この実験を

通して、モバイルデバイスを用いた参加型都市環境センシングが、実際の都市調査手法として有効であることが実証された。

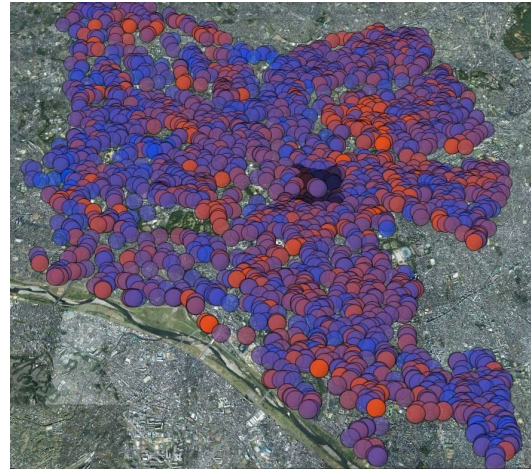


図 2 世田谷区全域の騒音センシングデータ

また、当初研究予定を大きく展開させ、都市部以外の、人がセンシングデバイスを持ち歩くことを想定し難い環境でも同様なセンシングを行うことにも挑戦した。特に人が立ち入り困難な森林地域を想定した場合、動物にセンサを取り付けるセンシングが有効である。

動物を用いたセンシングとして、動物に取り付けた無線センサ機器同士が、お互いの通信半径内に接近したときのみデータを交換する DTN と呼ばれるネットワークを構成するための基礎技術を開発した。特に、機器の電池寿命を延ばすために、動物同士の遭遇を検出したときのみ電源を投入する技術を実現した。

人の立入りが困難な森林地域における環境調査を行うため、動物間マルチホップ転送方式が提案されており、「動物指向クラウドネットワーク」と呼ばれる、動物に取り付けた首輪と動物基地(ねぐら・獣道)に生態音収集マイクとリモートセンサを設置し、動物の個体間接触と集団行動の習性を利用する「動物間ネットワーク」により森全域の生態・環境情報の取得を試みている。従来の調査手法と異なり、動物の習性行動を利用することで効果的な環境調査が可能となる。森林地域で調査員が行っていたセンシングやデータ運搬の役割を動物に移管させることで、長期的な環境調査の負荷を軽減する事ができる。図 3 に提案手法の概要を示す。

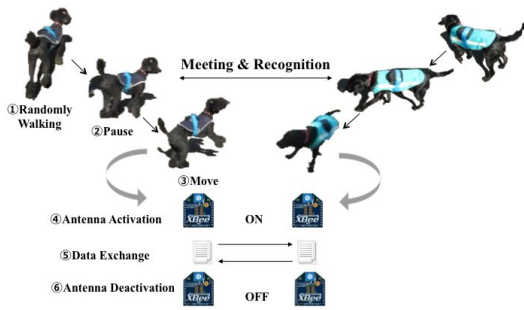


図 3 動物同士のすれ違いを利用したデータ転送

本研究では、動物間マルチホップ転送方式による調査手法の「動物間ネットワーク」の実現のために、動物の個体間遭遇時のデータ運搬に着目した。従来の手法と技術的な課題を整理し、動物の習性行動を逆利用した効率的かつ長期的な調査が可能なデータ運搬手法の提案を行った。具体的には、動物同士が接近した際に生じる習性行動を 3 軸加速度センサで解析し、動物間通信の引き金とすることで動物の習性を利用したデータ転送を実現した。これにより通信時間の省電力化を行い、立入れない森林地域の長期的な環境調査を現実のものとする目途が立った。

提案手法の実現のため、動物個体間の遭遇時における特徴量を 3 軸加速度センサの合成加速度として取得し、閾値で通信機器の Wake 制御を行なう。そのため、動物が森林地域で他の動物個体と遭遇した際、その個体が引き起こす認識、判断、行動の一連動作の分類を行い、特徴量を抽出した。そして、遭遇検知時のデータ転送プロトコルを開発した。図 4 に提案手法の概要を示す。提案手法では、接近を認識した際に動物個体に取り付けられた通信機器が Preamble フレームを送受信する。この時、これまでの遭遇回数に応じて受信回数を変化させ、より広範囲を移動する個体にデータが集まりやすくする。

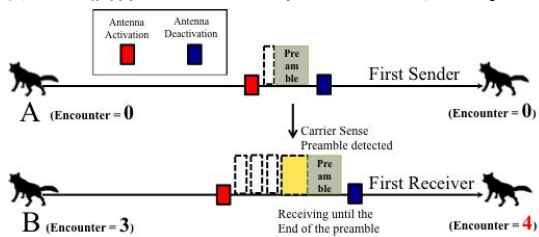


図 4 遭遇回数を考慮したデータ転送プロトコル

本プロトコルを実装し、複数のイヌを用いてイヌ同士の遭遇機会を人為的に作り、遭遇履歴を用いたデータ転送プロトコルの有効性の評価実験を行った。開発した遭遇検知手法は 70%以上の成功率を示しており、高い再現性があると言える。また、提案プロトコルにより通常の CSMA/CD に比べ通信時間が 13.1%~91.1%となっており、各イヌ個体ばらつきがあるものの、大きく削減できている。

また消費電力量も同様に削減できている。

#### 4-2 . プライバシーを保護したセンシングの実現

人が持ち歩くスマートフォンを用いてセンシングを行う場合、特にプライバシーに配慮しなければ実用化は困難である。そこで、センサデータをプライバシーに配慮しながら提供するデータ摂動 (Perturbation) 技術を開発し、盗聴されても個々の値は復元できないが統計的な情報は復元できるセンサデータの提供を可能にした。参加型センシングに用いるスマートフォンは、一般のユーザの生活に関するセンサ情報も同時に取得してしまうため、プライバシーの問題が、参加型環境センシングの活用のためには極めて大きな課題となっている。そこで、位置情報だけでなく、環境情報に含まれるプライバシー情報を保護する Selective Negative Surveys (SNS) を提案する。Selective Negative Surveys では、個々の携帯端末でセンサデータをカテゴリデータとして、プライバシー保護処理を施す。このプライバシー保護処理済データを中央サーバへ伝送し、サーバ側では集計・再構築処理を行う。この処理により、ユーザのプライバシー情報を取得することなく、統計情報を取得することが可能となる。我々は、参加型環境センシングで取得する位置情報と環境情報を想定したシミュレーションを行い、本手法を統計情報の信頼性とプライバシー情報保護の観点から評価を行う。

本研究では、環境情報を取得するための手法として、従来手法の Negative Surveys を改良した SNS を提案する。SNS では、取得したセンシングデータに対して、携帯端末上でプライバシー保護処理を行い、プライバシー保護処理済データを生成する。このプライバシー保護処理済データをサーバに伝送し、サーバはこのプライバシー保護処理済データを収集した後に、再構築処理を施して、統計情報を取得する。SNS では連続値を表現するような多次元の情報を想定しており、各次元において到達先パラメータを設定し、プライバシー保護処理に用いる。この到達先パラメータを用いることにより、細かいデータ区分で表す情報を取得することを可能とする。

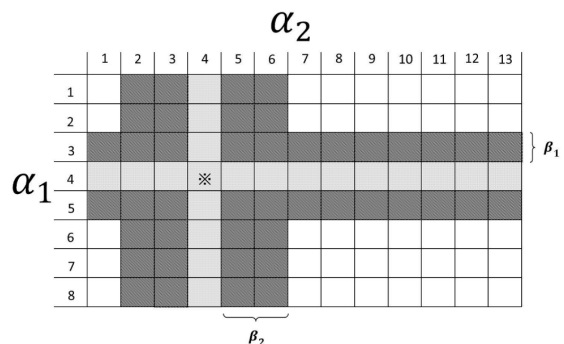


図 5 8x3 の 2次元データの例

**エラー！参照元が見つかりません。**に、8×3の2次元データにおいて、(4, 4)が取得したセンシングデータであった場合の例を示す。この時、各次元に到達先パラメータが設定されているため、白ブロックの中からランダムに1つ選んで伝送することになる。このようなプライバシー保護処理済データは、サーバ側においてNegative Surveysを多次元データに拡張した手法を応用することで再構築処理を施して、個別のデータは分からないが、全体の傾向を把握する統計情報を復元できる。

#### 4-3 . センシングに応じた家電制御の実現

取得したセンサデータを空調制御へ応用するために、複数の情報ソースから得た温度データをデータベースに蓄積し、ルールに応じて家電機器を制御するセンサモニタリング及び自動制御ソフトウェアを開発し、気温などのデータに基づいてエアコンを制御するシステムを構築した。本システムは、クラウド上にあるサーバより、HTTPS 経由でセンサー値を取得する温度(気温)情報取得モジュール、SQLite を用いセンサー値をすべて保存する温度(気温)DB モジュール、センサ値の分析から適切な家電の制御手法を得る制御判断エンジンそれぞれのモジュールから成り立っており、Ruby を用いて開発した。図 6 に、開発したシステムの全体像を示す。

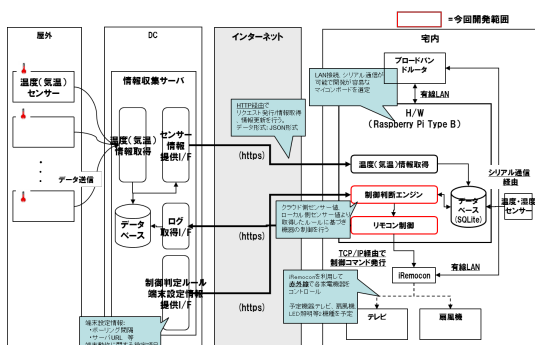


図 6 家電制御システムのモジュール図

本システムでは収集したセンサデータから家電を制御パターンを決定する部分がモジュール化されており、複雑なセンサデータの解析手法や多様なセンサの登場にも対応できるようになっている。今後、エアコンを設置した室内のデータだけでなく、前述の手法で収集した広域の環境情報を入力することで、どれだけ機器制御の精度を向上させられるか、研究を続けてゆく。

#### 5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計7件)

Hao Niu, Li Sun, Masayuki Iwai and Kaoru

Sezaki, "Secrecy-Enhanced Cooperation Scheme with Multiuser Diversity in Wireless Relay Networks," IEICE Communications Express, vol. 2, no. 10, pp. 409-414, Oct. 2013.

Muhammad Asif Hossain Khan, Danushka Bollegala, Guangwen Liu and Kaoru Sezaki, "Delineating Real-Time Events by Identifying Relevant Tweets with Popular Discussion Points", ASE HUMAN Journal, Vol. 1, No. 3 (2013).

Guangwen Liu, Masayuki Iwai and Kaoru Sezaki, "An online method for trajectory simplification under uncertainty of GPS", IPSJ Transactions on Databases, vol. 6-2, June, 2013.

Congwei Dang, Masayuki Iwai, Yoshito Tobe, Kazunori Umeda and Kaoru Sezaki, "A Framework for Pedestrian Comfort Navigation Using Multi-modal Environmental Sensors," Pervasive and Mobile Computing (Elsevier), vol. 9, no. 3, pp.421-436.

Muhammad Asif Hossain Khan, Masayuki Iwai and Kaoru Sezaki, "An Improved Classification Strategy for Filtering Relevant Tweets Using Bag-of-Words Classifiers", Journal of Information Processing (Special Issue on Applications and Internet in Conjunction with Main Topics of SAINT 2012), Vol. 21, No. 3, pp. 507-516 (July, 2013).

青木 俊介, 岩井将行, 瀬崎 薫, "参加型環境センシングを用いた統計情報構築のためのプライバシー保護手法", 電子情報通信学会 論文誌 B, vol. J97-B, no. 1, pp. 41-50, 2014年1月.

〔学会発表〕(計35件)

Keijiro Nakagawa, Hiroki Kobayashi, Kaoru Sezaki, "Carrier Pigeon-like Sensing system: Animal-Computer Interface Design for Opportunistic Data Exchange Interaction for a Wildlife Monitoring Application", 5th Augmented Human International Conference 2014, Kobe, Japan, Mar 07-09 2014.

Guangwen Liu, Masayuki Iwai, Yoshito Tobe and Kaoru Sezaki, "REPSense: On-line Sensor Data Reduction for Mobile Sensing by Preserving Data Diversity", IEEE WiMob 2013, October, France, 2013.

Shunsuke Aoki, Masayuki Iwai, and Kaoru Sezaki, "Privacy-aware Community Sensing using Randomized Response", IEEE 8th International Workshop on Security, Trust, and Privacy(IEEE STPSA 2013), Kyoto, July 22-July 26, 2013.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)  
取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.mcl.iis.u-tokyo.ac.jp>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

瀬崎 薫 (SEZAKI, Kaoru)

東京大学 空間情報科学センター・生産技術研究所・教授

研究者番号：10216541

### (2) 研究分担者

岩井 将行 (IWAJ, Masayuki)

東京電機大学 未来科学部 情報メディア学科 准教授

研究者番号：30458971

### (3) 連携研究者