

ユーザ参加型環境センシングにおける効率的なシステム運用モデルの構築とユーザ分析

青木 俊介^{1,2,a)} 劉 広大² 清水 和人^{1,2} 岩井 将行³ 瀬崎 薫^{2,4}

概要：スマートフォンの爆発的普及を背景に、一般ユーザの持つスマートフォンを新たなセンシング機器として活用し、都市地域の環境情報を取得するユーザ参加型環境センシングの実現が期待されている。このユーザ参加型環境センシングによって、詳細な環境地図を構築し、都市生活環境の再評価や国土の有効活用のために用いることができる。我々は、この参加型環境センシングの社会的意義と可能性を示すために、東京都世田谷区内全域でセンシング実験を行い、大規模環境情報データベースを構築した。本稿では、この参加型センシングのために開発した効率的なセンシングシステムの設計及び運用を示す。また、実際の参加型センシング実験を都市地域で行うことによって得られた、新たな知見を示す。

Efficient System Operation and User Analysis in Participatory Environmental Sensing

SHUNSUKE AOKI^{1,2,a)} LIU GUANGWEN² KAZUTO SHIMIZU^{1,2} MASAYUKI Iwai³ KAORU SEZAKI^{2,4}

1. はじめに

GPS 受信機やマイク、加速度センサなど多種のセンサを搭載したスマートフォンが、爆発的に普及している。このような背景から、一般ユーザの持つスマートフォンを新たなセンシング機器として活用し、都市地域の環境情報を取得するユーザ参加型環境センシングの実現が期待されている [1]。この参加型センシングでは、一般のユーザがスマートフォンを持ち歩く中で、センサ情報を取得する。このため、高粒度・低コストでのセンシングが可能となる。しかし、参加型環境センシングには、スマートフォンのセンサ情報からのユーザプライバシー情報の侵害という問

題 [2], [3] や、一般ユーザをセンシングに巻き込むインセンティブ付与の問題 [4], [5] など、多くの課題が残る。また、従来の専用の測定機器を用いずに、スマートフォン搭載のセンサを用いるため、センサ精度が大きく低下する事が考えられる。これらの課題があるため、スマートフォンを用いる参加型センシングは、実社会では未だ活用されていない。この現状をふまえ、スマートフォンによる参加型環境センシングの意義と可能性を示すために、我々は実際に東京都世田谷区内全域でセンシング実験を行い、大規模環境情報データベースの構築を行った。

従来の JIS 規格に基づいた環境情報の測定法 [18] では、特定の測定機器を用いて、特定の時間・特定の地点のみをセンシングしていたため、限られた情報のみが取得されていたが、このスマートフォンを用いた参加型環境センシングを実用化することで、より実態に即した環境情報地図を構築できる。

本稿の構成としては、まずユーザ参加型センシング実験を効率的に行うための、システムの設計及び運用の手法について述べる。更に、センシング実験におけるユーザの選択と行動を分析することによって、従来のインセンティブモデルでは考慮されていない「地域人気度」が存在するこ

¹ 東京大学 情報理工学系研究科
Graduation School of Information Science and Technology,
The University of Tokyo
² 東京大学 生産技術研究所
東京都目黒区駒場 4-6-1
Institute of Industrial Science, The University of Tokyo
³ 東京電機大学 未来科学部 情報メディア学科
Department of Information Systems and Multimedia Design,
Tokyo Denki University
⁴ 東京大学 空間情報科学研究センター
Center for Spatial Information Science, The University of
Tokyo
a) shun@mcl.iis.u-tokyo.ac.jp

とを示す。2章では、今回行ったセンシング実験の概要について述べ、3章では参加型環境センシングの関連研究及びユーザの参加を促す手法に関する研究について述べる。次に、4章では、システムの設計やセンシング地域の分割など、実際のセンシング実験を効率的に行うための手法について述べる。5章では、センシング実験におけるユーザの行動と選択、そして取得した環境情報を分析した結果を示し、実社会において参加型センシングを実現するためのインセンティブ要素となる「地域人気度」について述べ、6章で本研究をまとめる。

2. 参加型環境センシング実験

我々は、スマートフォンの各種センサを用いた参加型環境センシングの意義と可能性を示すために、東京都世田谷区内全域、約60[km²]で、のべ40人のユーザによる参加型センシング実験を行い、位置情報に紐づいた騒音情報、悪臭情報、大気情報を取得した。本センシング実験では、Android端末を用い、Android SDKのAPIを用いたアプリケーションを開発した。また、0.5[sec]ごとにセンシングを行うことによって、ユーザの歩行に沿った高粒度なセンシングを実現した。

センシング歩行実験では、歩行時に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、図1のように、アームバンドを用いてスマートフォンを固定した。この参加型環境センシングで構築できる環境情報地図の例として、騒音情報を統合処理したものを図2に示す。また、拡大したものを図3に示す。この図3から明らかなように、ユーザの歩行に沿ったセンシングが可能となっている。

3. 関連研究

スマートフォンによる参加型センシングを実現するために、一般ユーザの積極的な参加を促すためのインセンティブに関する研究や、スマートフォンのセンサ情報の利活用

の可能性を示す研究が盛んになされている。

3.1 参加型センシングへの参加を促すための研究

一般ユーザが参加型センシングに参加するためには、ユーザにとっての利益・インセンティブが重要な要素となる。スマートフォンでセンシングを行う場合、電池消費やユーザの労力、そしてプライバシー情報の侵害の危険性が存在するためである。G. Denzisらの研究[6]では、特に位置情報からのプライバシー情報に注目し、ユーザの精神的ストレスと経済的な観点から、適切な対価を導出する手法を提案している。また、J. Leeらの研究[4]では、参加型センシングを継続的に続けていくためには、ユーザがアプリケーションから離れていくことを防ぐ必要があると指摘している。このために、リバースオークションを用いて、ユーザのセンシングへの対価をダイナミックなものとするインセンティブモデルを提案している。L. G. Jaimesらは[5]、このダイナミックなインセンティブモデルに、GBMCアル

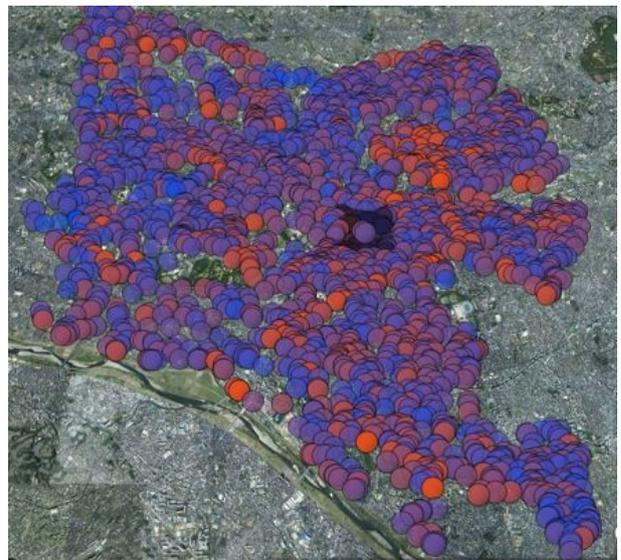


図2 世田谷区内全域の騒音センシングのデータの可視化の例。



図1 スマートフォンを用いたセンシング歩行実験の様子。



図3 あるユーザの足跡に沿った騒音センシングのデータ。

ゴリズム [7] を適用することによって、空間的なカバレッジを最大にするためのモデルを構築している。限られた予算を用いて、ユーザのより高品質なセンシングデータを取得するためには、適切な対価を設定する必要がある。

また、ゲーミフィケーションの手法を用いて、ユーザの動機付けを行う研究も盛んになされている。I. G. Marti[8]らは、スマートフォン搭載のマイクによる参加型環境センシングにゲーミフィケーションを適用し、複数ユーザ間で競争を行うシステムを提案している。D. N. Crowley[9]らは、ソーシャル web と参加型センシングを連動させ、ユーザ個々のセンシング参加率・貢献度を可視化・共有するフレームワークを提案している。Persuasive technology と呼ばれる、個人の動機付け技術を活用することによって、ユーザがより積極的にセンシングに参加すると考えられる。

3.2 参加型環境センシング

スマートフォンの普及に伴い、人口密度の高い都市部での参加型環境センシングの活用が期待されている。Noise-Tube[10]では、都市地域における騒音情報をスマートフォンによってセンシングし、高粒度な環境騒音地図を構築している。この際、スマートフォン搭載のマイクの精度・信頼性を向上させるために、専用の測定機器との周波数特性を考慮した校正手法を提案している。

また、PEIR[11]やHaze Watch[12]では、都市地域における大気汚染度やユーザへの影響を測定している。これらの研究では、外部センサを取り付けることによって、大気情報を取得しているが、大気センサの小型も徐々に進んでいるため、今後スマートフォンへ搭載されることも期待される。

CarTel[13]では、ユーザが自動車に乗っている場面を想定し、加速度センサ情報と位置情報を取得することによって、道路交通情報や、渋滞状況を取得・共有するシステムを構築している。

GPS 受信機からの位置情報を利用せずに、ユーザの位置を推定する手法 [14], [15] も提案されており、スマートフォン搭載のセンサ情報を組み合わせることによって、様々な都市環境をモニタリングすることが可能になる。

4. 効率的な参加型センシングを実現するためのシステム

本研究で行う歩行センシング実験の準備として、効率的にセンシングを行うためのシステムを実装し、また時間的、人的コストという制約のある中で、最適にセンシングを進めるための領域分割を行った。

4.1 一般ユーザによるセンシングを想定した

ユーザインターフェース

参加型センシングでは、一般のユーザの手によってセン



図 4 Android 端末による環境センシングアプリケーションのインターフェース。kml ファイルと Google マップを用いた。

サデータを取得する。しかし、全ての一般ユーザがスマートフォンやモバイル端末の操作に精通しているとは言えない。このことを考慮し、一般ユーザへの負担を最小限にセンシングを行うシステムの実装を目指す。ユーザへの負担を抑えるために、アプリケーションに3つの機能を搭載した。これを以下に示す。

- (1) 効率的にセンシングを行うために、ユーザの現在地に近接した3つのセンシングポイントを推薦する機能。また、センシング地点と現在地点の距離と相対的な方角を提示することによって、ユーザの都合にあわせたセンシングを実現する。
- (2) センシングポイントへ近付いた時に、ユーザに通知をする機能。GPSの精度も考慮に入れて、10[m]以内に近付いたと判定できた時に、ユーザに通知を行う。ユーザが地図を確認する時間・回数を減らすことを目的とする。
- (3) センシングの途中経過を記録するグラフィカルユーザインターフェース (GUI)。ユーザのタップによって、センシング済かどうかを確認・記録することができる。図4のように、地図上に途中経過を表示する。

以上の機能を搭載することによって、ユーザの負担を最小限に抑えた。センシングポイントを最短距離で巡回する経路を提示する事も可能であるが、工事区域や通行止めが存在する事や、歩きにくい道(歩けない道)が存在する。このため、本システムでは、センシング地点との距離・方角のみを提示し、経路選択の余地を与えることによって、ユーザの精神的負担を軽減する。

4.2 センシング地域の分割

今回、環境情報を取得する世田谷区は全域で約60[km²]の面積を持つ。本実験では、2700のセンシングポイントを設定し、その地点を通過するようにセンシングを行った。

センシング参加者が効率的にセンシング地点を周回するために、あらかじめ *k*-means 法を用いて、クラスタリング

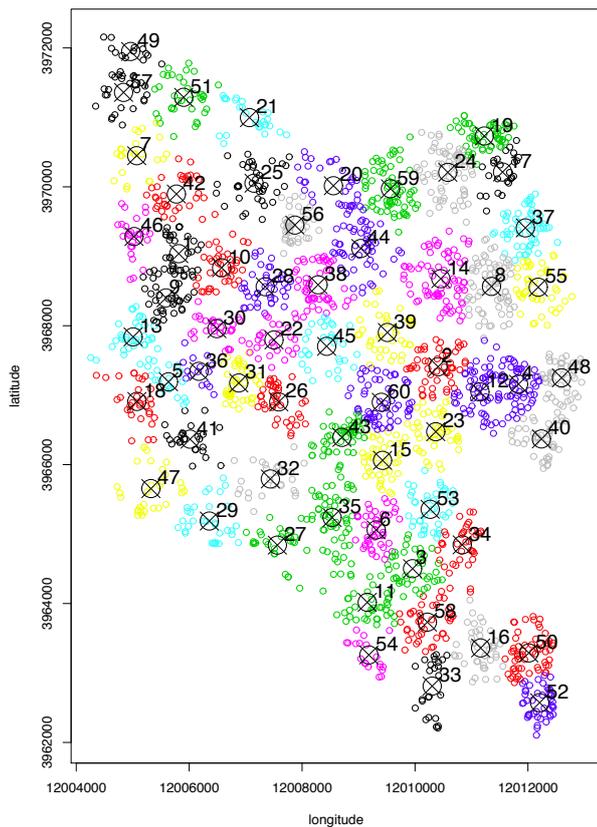


図 5 k -means 法によって 60 に分割したセンシング領域。

をし、センシング地域を小地域に分割する。今回は、センシング参加者の歩行時間と実験の時間的制約から、センシングエリアを 60 の小地域に分割する。この k -means 法の具体的な手順は次の通りである。

まず、それぞれのノード (センシング地点) が、 k ($= 60$) 個のクラスターのうち、ランダムに 1 つのクラスターに属しているものとする。次に、それぞれのクラスターごとの重心 V_j ($j = 1, 2, \dots, k$) を、クラスターに属する全てのノードの座標から導出する。その後、全てのノードの所属クラスターを、重心がノードに最も近いクラスターへ変更する。この重心の導出、クラスターの変更を繰り返し、全てのクラスターの重心が変化しなくなった時点でクラスターリングを終了する。最終的なクラスターリングが、センシングのための小地域に対応する。

この k -means 法を用いて、世田谷区を 60 の小地域に分割したものを図 5 に示す。

5. センシング実験におけるユーザ行動と環境情報に関する分析

本センシング実験を通して、得た知見を本章で示す。ユーザの行動を分析することによって、既存研究では考慮されていないインセンティブの要素である「地域人気度」が存在することが明らかとなった。また、従来のセンサネット

ワークとは異なり、人の持つスマートフォンをセンサとしたために、センシング参加者自身の存在によって環境情報が変化していることが確認された。

5.1 インセンティブとなる地域人気度

既存の研究から、ユーザのセンシングへの対価の計算方法として、センシングしたデータの量や、センシングに貢献した総時間が考えられる。本実験では、センシングに貢献した時間に応じて対価を支払い、ユーザが自らのセンシング地域を決定した。また、本実験では k -means 法によるセンシング地域の分割を行ったが、領域の面積を基準に分割したため、センシングポイント数に大きな差異が生まれた。センシングポイントの数が多いほど、ユーザには負担がかかる。このため、センシング面積のみではなく、センシング数 (ノード数) を考慮に入れた領域分割を用いる必要がある。また、このセンシングポイント以外にも、人気の高い地域と人気の低い地域を決定する要素が存在することが、本実験を運用する中で明らかとなった。

東京都世田谷区の中でも、高級住宅地や多摩川周辺など、歩行者に優しい地域や、主要路線の駅からの距離が近い地域はセンシングの地域人気度が高い。これに対して、国道 246 号線などの歩行しにくい道や自動車通行量の多い道、主要路線の駅からの距離が遠い・センシングポイントが多い地域はセンシングの地域人気度が低い。

今後、ユーザ参加型環境センシングを一般社会で活用していくためには、この地域人気度をインセンティブモデルに組み込んで、よりユーザの精神的負担を考慮した形で対価を支払う必要がある。

5.2 センシング実験による環境情報の変化

取得したセンサデータの分析を行うことで、実社会において人の持つスマートフォンをセンサとして活用する際に発生する新たな問題点が確認された。

本実験では、都市の騒音情報を取得するために、スマートフォン搭載のマイクを用いた。しかしながら、取得した Wave データ分析したところ、ユーザがその地点を歩行・通過することによって発生する環境騒音が存在することが確認された。具体的には、繁華街や商店街では、ユーザの通過時に勧誘・声掛けがあり、等価騒音レベルの上昇が確認された。また、住宅街では、番犬の鳴き声や警察官からの職務質問があり、等価騒音レベルの上昇が確認された。これらの音声情報は、フーリエ変換による周波数スペクトル解析を行うことによって、ある程度クラスターリングすることができる。しかしながら、スマートフォン上の計算資源・電源は限られたものとなるため、計算量の大きな高速フーリエ変換をリアルタイムにかけ、判定を行うことは難しい。

従来の固定的なセンサを用いたセンサネットワークによ

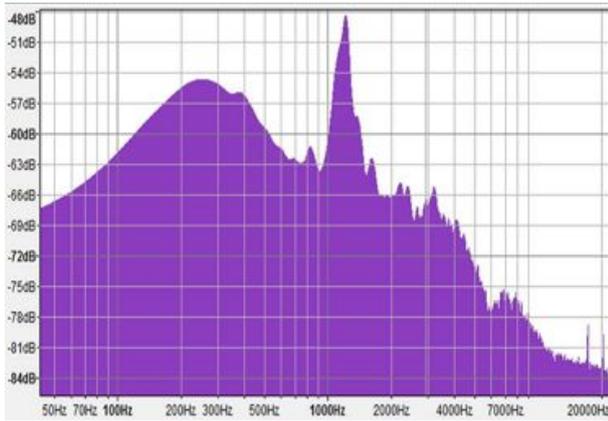


図 6 カラスの鳴き声を含む音声データの周波数スペクトル解析の結果 1.

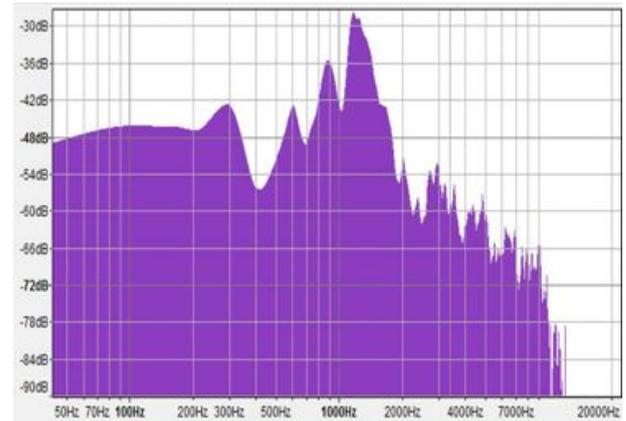


図 7 カラスの鳴き声を含む音声データの周波数スペクトル解析の結果 2.

る観測や、JIS 規格に基づく騒音調査法では、上記のようなユーザの通過に伴う騒音発生は起こらない。今回は歩行実験後に、騒音レベルの高い値を示す地域の音声 Wave データを切り出し、確認作業を行った。しかし、スマートフォンを用いたセンシングを実社会で活用するためにも、より労力・コストのかからない判定手法の開発が重要である。

5.3 鳥類の生態調査での利用

従来の参加型環境センシングは、人が居住する都市の住生活環境や人への影響を評価するために用いられてきた。しかし、今回の歩行センシング実験から、スマートフォンによる参加型環境センシングによって、鳥類の生態調査が実現できる可能性が示唆された。

スマートフォンのマイクから取得した Wave ファイルを、オープンソース・ソフトウェアである Audacity[19] を用いて周波数スペクトルを行った結果、カラスの鳴き声を含む音声データが特徴的な周波数成分を含むことが明らかとなった。このカラスの鳴き声の音声データの周波数スペクトル解析の結果を 6, 図 7 に示す。このスペクトル解析には Hanning 窓を用いた。

これら 2 つのデータは、それぞれ異なるユーザのセンサから取得されたものであるが、1200[Hz] 付近の成分を多く含んでいることがわかる。また、マイク情報の解析から、スズメの鳴き声を抽出することも可能であった。

これらの結果から明らかなように、位置情報に紐づいたセンサデータから、カラスやスズメの位置を取得する事が可能である。周波数スペクトルを行うためのフーリエ変換の計算量の問題や、ある鳥類の鳴き声にも多くのパターンがあることなど、信頼性の面で課題は残る。しかしながら、本実験のデータを解析することによって、都市における、人と人工物(工場、電車、飛行機、自動車等)からの環境騒音の関係だけでなく、都市環境の中で生活する動物自然環境の調査を、低コストで実現できる可能性が示唆された。

5.4 実社会で用いるための課題

本節では、本実験を行う中で明らかとなった、実社会で参加型センシングを利活用するための課題を示す。

我々の実験では、図 4 のように、ユーザの精神的ストレス・負担を減らすシステムを構築した。このように、センシングポイントを視覚化し、わかりやすいインターフェースを用意したにも関わらず、データの欠損が確認された [20]。

本実験では、センシング参加者に対してアプリケーションの説明を口頭で行ったにも関わらず、データ欠損が起こった。スマートフォンやモバイル端末に慣れ親しんでいない一般ユーザを用いて、センシングを行うためには、計測などを、より自動化する必要があると考えられる。

6. おわりに

本研究では、世田谷区全域の環境情報を効率的にセンシングするシステムとモデルを構築し、またセンシング実験を行う中で得られた 4 つの知見を示した。参加型センシング実験を行うためには、大量のセンシング参加者を集める必要があり、また処理するデータ量も膨大なものとなるため、非常に労力がかかる。本稿では、この参加型センシング実験を実際に都市地域で行うことで、既存研究では考慮されていないインセンティブ決定要因や、生態調査での利用の可能性などを示すことができた。

本研究の目的である、スマートフォンによる参加型センシングの社会的意義を示すためには、本センシング実験で構築した環境情報データベースを、閲覧のしやすい形に加工し、実社会に公開する必要がある。このための適切なデータ可視化は今後の課題である。

謝辞 無響室の利用においてご協力いただいた東京大学生産技術研究所 坂本研究室の横山栄様に感謝いたします。都市における自然環境調査法について、貴重なアドバイスをくださった東京大学 空間情報科学研究センター 特任助教の小林博樹様に感謝いたします。また、世田谷区内における歩行センシング実験にご協力いただいた慶応義塾大

学 徳田研究室, 青山大学 戸辺研究室, 東京大学 瀬崎研究室, 東京電機大学 岩井研究室の研究員の方々に感謝いたします。

参考文献

- [1] B. Burke, D. Estin, M. Hansen, A. Parker, N. Ramanathan, S. Reddy and M. B. Srivastava “Participatory Sensing,” Proc. *World Sensor Web Workshop’06 at Sensys(WSW)*, ACM (2006).
- [2] M. M. Groat, B. Edwards, J. Horey, W. He and S. Forrest, “Enhancing Privacy in Participatory Sensing Applications with Multidimensional Data,” Proc. *IEEE PerCom*, pp. 144-152, Mar 2012.
- [3] 青木 俊介, 岩井 将行, 瀬崎 薫, “ユーザ参加型環境センシングにおける状態依存型プライバシー保護手法,” 電子情報通信学会 技術研究報告, vol. 113, no. 38, ASN2013-14, pp. 73-78, May 2013.
- [4] J. Lee and B. Hoh, “Dynamic Pricing Incentive for Participatory Sensing,” Elsevier Pervasive and Mobile Computing, vol. 6, no. 6, pp. 693-708, Dec 2010.
- [5] L. Jaimes, I. Vergara-Laurens, M. Labrador, “A Location-based Incentive Mechanism for Participatory Sensing Systems with Budget Constraints,” Proc. *IEEE PerCom*, pp. 103-108, Mar 2012.
- [6] G. Danezis, S. Lewis, R. Anderson, “How much is location privacy worth?,” Proc. *4th Workshop on the Economics of Information Security(WEIS 05’)*, 2005.
- [7] S. Khuller, A. Moss, and J. Naor, “The budgeted maximum coverage problem,” Proc. *Inf. Process. Lett.*, vol. 70, no. 1, pp. 39-45, 1999.
- [8] I. G. Marti, L. E. Rodriguez, M. Benedito, S. Trilles, A. Beltran, L. Diaz, and J. Huerta, “Mobile Application for Noise Pollution Monitoring through Gamification Techniques,” Elsevier Entertainment Computing (ICEC 2012), Lecture Notes in Computer Science, vol. 7522, pp. 562-571, 2012.
- [9] D. N. Crowley, J. G. Breslin, and P. Corcoran, “Gamification of Citizen Sensing through Mobile Social Reporting,” Games Innovation Conference (IGIC), pp. 1-5, Sep 2012.
- [10] E. D’Hondt, M. Stevens, and A. Jacobs, “Participatory noise mapping works! An evaluation of participatory sensing as an alternative to standard techniques for environmental monitoring,” Pervasive and Mobile Computing(2012), doi: 10.10.16/j.pmcj.2012.09.002.
- [11] M. Mun, S. Reddy, K. Shilton, N. Yau, J. Burke, D. Estrin, M. Hansen, M. E. Howard, R. West, and P. Boda, “PEIR: the personal environmental impact report as a platform for participatory sensing systems research,” ACM MobiSys, pp.55–68 (2009).
- [12] J. Carrapetta, N. Youdale, A. Chow and V. Sivaraman, Haze project, <http://www.pollution.ee.unsw.edu.au>, 2010.
- [13] B. Hull, V. Bychkovsky, Y. Zhang, K. Chen, M. Goraczko, A. Miu, E. Shih, H. Balakrishnan, and S. Madden, “CarTel: A Distributed Mobile Sensor Computing System,” in Proceedings of the 4th ACM International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys), 2006, pp. 125–138.
- [14] S. P. Tarzia, P. A. Dinda, R. P. Dick, and G. Memik, “Indoor Localization without Infrastructure using the Acoustic Background Spectrum,” in Proc. of the *9th ACM Int. Conf. on Mobile Systems, Applications, and Services(MobiSys ’11)*, pp.155-168, 2011.
- [15] Y. Chon, D. Lane, F. Li, H. Cha, and F. Zhao, “Automatically Characterizing Places with Opportunistic CrowdSensing using Smartphones,” in Proc. of the *2012 ACM Int. Conf. on Ubiquitous Computing(UbiComp ’12)*, pp. 481-490, 2012.
- [16] S. Santini, B. Ostermaier, and R. Adelman, “On the Use of Sensor Nodes and Mobile Phones for the Assessment of Noise Pollution Levels in Urban Environments,” 6th International Conference on Networked Sensing Systems 2009(INSS), pp.1-8, 2009.
- [17] N. Maisonneuve, M. Stevens, and B. Ochab, “Participatory noise pollution monitoring using mobile phones,” *Information Polity*, Vol. 15, No. 1-2, pp. 51-71 (2010).
- [18] 財団法人日本規格協会, “JIS Z 8731 環境騒音の表示・測定方法,” 1999.
- [19] Audacity, <http://audacity.sourceforge.net/>
- [20] 重田 航平, 青木 俊介, 劉 広大, 岩井将行, 瀬崎 薫, “モバイル端末を用いたユーザ参加型環境センシングにおけるデータ欠損の検知および処理に関する考察,” マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2013) シンポジウム, 2A-3.