

－ 博士論文速報 －

都市環境分析における ヒューマンインザループセンシングの研究

松田 裕貴^{1,2,a)}

概要：近年、スマートフォンを始めとするスマートデバイスが広く一般に普及したことにより、人々や環境の状況（コンテキスト）に応じて適切な情報を提供する「コンテキストウェア」なサービスが実現可能となりつつある。この「コンテキスト」は、従来では混雑度や天気といった客観的なコンテキストが中心であったが、近年では環境内の人の抱く心理状態（感情・満足度など）といった主観的なコンテキストにも注目が集まっている。こうした中で、都市環境に置けるコンテキストウェアシステムを実現するためには、広大かつ複雑な空間において時間的・空間的な網羅性の高い情報収集が難しいことが課題となる。そこで本研究では、都市環境に存在する人をセンシングシステムの一部として巻き込むセンシングフレームワーク（ヒューマンインザループセンシングと呼ぶ）を提案する。ヒューマンインザループセンシングは、「人がセンサを持ち運ぶ役割」を担うセンシング、「人自身がセンサの役割」を担うセンシング、の2つの関与レベルから構成される。本稿では、1) ヒューマンインザループセンシングによる客観的・主観的コンテキストの収集手法、2) 持続可能なデータ収集を実現するためのセンシング基盤、について取り組んだ著者の博士論文 (<http://library.naist.jp/dspace/handle/10061/13263>) について概説する。

－ Doctoral Dissertation Report －

Study on Human-in-the-loop Sensing in Urban Environment Analysis

YUKI MATSUDA^{1,2,a)}

1. 研究背景

21世紀の情報通信技術の発展に伴い、モバイルデバイスユーザは50億人を超え、スマートフォンやウェアラブルデバイスは我々の生活に欠かせないものとなった[1]。モバイルデバイスを活用することによって、都市環境などの屋外においても周囲の環境やユーザ自身の状況に応じて最適なサービスを提供するシステム（コンテキストウェアシステム）が実現可能となる。コンテキストウェアシステムにおいては、時空間的に網羅性の高い情報が重要となるため、これまで様々な情報収集手法が提案されてきた。

例えば、環境内にセンサを散在させることにより情報を収集するセンサネットワークは古くより研究されており[2]、Internet of Things (IoT) の登場により改めて注目が集まっている。また、近年のSNSの流行を受け、ソーシャルデータを分析することで環境情報を抽出する研究もなされている[3]。しかし、センサネットワークは導入・保守・管理コストが大きいという性質、ソーシャルデータ分析は意図した時間・空間の情報を収集できない場合がある（ユーザの発信をコントロールできない）という性質を持っているため、時空間的な網羅性を維持することが難しい。

そこで本研究では、都市環境センシングシステムに「人」を組み込むことで、上述の問題を解決した新たな情報収集手法（ヒューマンインザループセンシングと呼ぶ）の確立を目指している。図1は、ヒューマンインザループセンシングの枠組みを示している。ヒューマンインザループセン

¹ 奈良先端科学技術大学院大学

Nara Institute of Science and Technology

² 理化学研究所 革新知能統合研究センター (AIP)

RIKEN Center for Advanced Intelligence Project (AIP)

^{a)} yukimat@is.naist.jp

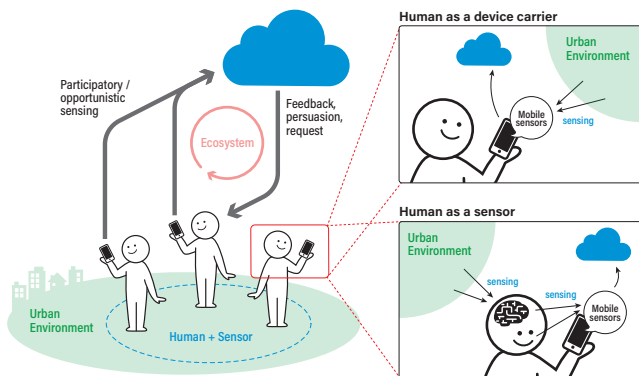


図 1 ヒューマンインザループセンシングによる都市環境情報収集

シングは、ユーザ参加型センシング [4] を基盤技術とした 2 つのセンシング方式から構成される。

Human as a device carrier (HaaDC)

人を“デバイス運搬者”としてセンシングシステムに組み込む方式。人々が有するスマートフォンなどのモバイルデバイスに搭載されたセンサを用い、直接的なセンシングを行うことで客観的な都市環境情報を収集する。人はデバイスを持って都市環境を移動する役割を果たすことでシステムに貢献する。

Human as a sensor (HaaS)

人を“センサ”としてセンシングシステムに組み込む方式。人が五感を用いて都市環境を観測した際の「反応」をモバイルデバイスで収集することにより、通常のセンサでは測定できないような主観的な都市環境情報（例えば、ある場所で人が抱く感情）を収集する。人は都市環境の状況によって出力を変えるセンサとしての役割を果たすことでシステムに貢献する。

2 章では、ヒューマンインザループセンシングの各方式 (HaaDC・HaaS) について、それぞれ一つの題材を取り上げ環境情報収集手法を提案する。

ヒューマンインザループセンシングは、収集可能な情報の幅を広げつつ時空間的網羅性を満たすため、あえて人をシステムに組み込む枠組みである。人は少なからず利己的であるため、人が介在するシステムにおいては貢献することに対するモチベーションを維持すること、つまり「システムの持続可能性」が大きな問題となる。そこで、3 章では、持続可能な都市環境情報収集を実現するためのセンシング基盤を提案する。

2. 客観的・主観的都市環境情報の収集手法

2.1 NightRoadScanner: モバイルセンサを用いた客観的都市環境情報の収集手法

本節では、客観的都市環境情報として「夜間道の明るさ」を題材として取り上げる。街に設置された防犯照明は他の防犯対策との複合的な要因により、犯罪抑止へ繋がることが実例により明らかとなっているため [5]、夜間道の明る

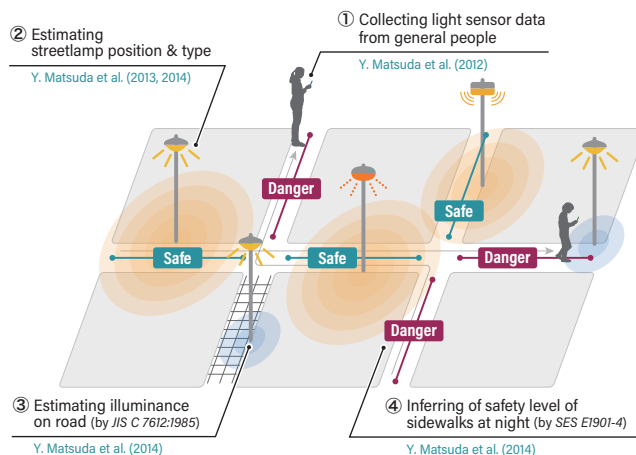


図 2 NightRoadScanner のワークフロー

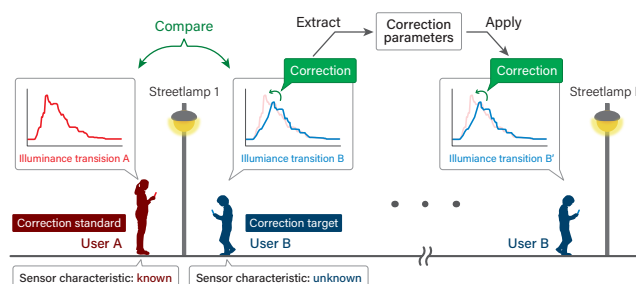


図 3 スマートフォン搭載照度センサ特性の校正手法

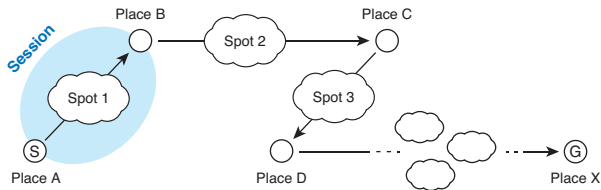
さ [6] は都市環境における重要な情報である。

我々はこれまでの研究を通して、人々が街を歩いている時にスマートフォン搭載センサを用いて位置情報付き照度データを収集・分析することで街灯照度の推定手法を検討してきた。図 2 はそのワークフローを示している。各段階の提案手法については次の論文を参照されたい：街灯設置位置推定 [7]、街灯種判定 [8]、街灯照度推定 [9]。

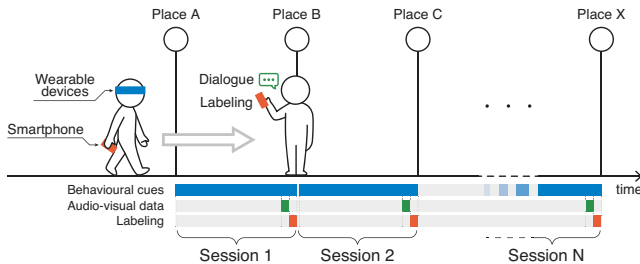
これまでの研究を通して、スマートフォンの機種間だけでなく、同機種間においても照度センサの特性が異なることが明らかとなった。すなわち、ユーザ参加型センシングによるデータ収集では、特性が異なる多数の照度センサによって測定されたデータを扱う必要がある。このことから、センサデータの校正が課題となる。そこで本研究では、図 3 に示すように、センサ特性が既知の照度センサによって測定されたデータと、未知のセンサによるデータを比較することにより校正パラメータを抽出することで、相対的に照度測定データを校正する手法を提案した [10]。

提案手法の有効性を検証するため、特性の異なる 4 台の端末（内 1 台を校正の基準端末とする）を用いた照度データ収集実験を行い、1,613 の検証サンプルを得た。収集した生データを用いて街灯照度を推定する場合は、平均絶対誤差が 2.33 lx となったのに対し、提案手法により校正を施したデータを用いて推定する場合は、平均絶対誤差 0.55 lx となった。この結果から、提案手法を適用することにより 76.3%の精度向上を実現した。

Step 1: Split whole tour into "session"



Step 2: Sensing & labeling for each session



Step 3: Building the emotion and satisfaction estimation model

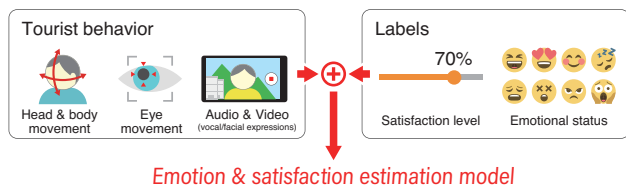


図 4 EmoTour のワークフロー

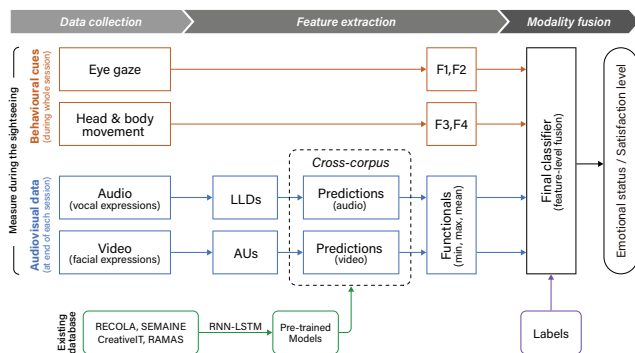


図 5 感情・満足度推定モデル構築の流れ

2.2 EmoTour: 人の仕草・反応をセンサとして用いた主観的都市環境情報の収集手法

本節では、主観的都市環境情報として「観光客の心理状態」を題材として取り上げる。これまでは都市環境情報の多くが客観的に測定可能なものであったが、今後より人に寄り添ったコンテキストウェアシステムを提供するためには、「人がどう感じるか?」という観点が非常に重要となる。そこで、都市環境で感情や満足感が変動することが考えられるドメインの一つとして観光に注目する。

現在、観光におけるユーザの感情や満足度の収集は、オンラインユーザレビューが主流である。しかしながら、オンラインユーザレビューには、投稿を行う動機付けのアンバランスさや、心理的バイアスの影響によって信頼性を担保するのが難しいと行った指摘がなされている [11]。そこ

で、観光中の無意識的な仕草・生体反応のセンシングに基づき、ユーザの抱く感情・満足度を推定する手法を提案する。図 4 はそのワークフローを示している。この手法では、観光中のユーザが行う仕草（視線・身体運動・音声・表情）をスマートフォンやウェアラブルデバイスを用いて計測し、抽出した特徴量を組み合わせることにより、マルチモーダルなモデルを構築する（図 5）。

提案手法の有効性を検証するため、2つの異なる観光地（ドイツ・ウルム、日本・奈良市）において、計 22 名の観光客のデータを収集する実験を行った。その結果、感情状態の 3 クラス分類タスク（ポジティブ・ニュートラル・ネガティブ）において、50% の UAR (Unweighted Average Recall), 満足度の 7 段階回帰タスクにおいて 1.08 の MAE (Mean Absolute Error) という精度での感情・満足度推定を実現した [12], [13], [14], [15], [16], [17]。

3. ParmoSense: 持続可能なデータ収集を実現するためのセンシング基盤

上述の都市環境情報収集システムを実世界に適用するためには、「ユーザ参加型」という仕組みの持続可能性を維持するための基盤が必須である。その解決方策の一つとして、市民協働と情報技術を組み合わせたシビックテックコミュニティとの連携が挙げられる。しかしながら、シビックテックの主役である、一般市民や行政職員は非技術者である場合も多く、参加型センシングシステムを新たに導入することは容易ではないのが実情である。既存の主要なユーザ参加型センシング基盤・フレームワーク [18], [19], [20], [21], [22], [23] は、研究者による利用が前提となっており、システム運用やセンシングへの参加には高い情報技術スキルが必要である。また、他の基盤 [24], [25] では、一般市民や行政職員などによる利用を想定した容易な運用・参加を実現している一方で、機能が非常に限定的であり柔軟なデータ収集が難しいといった課題がある。

そこで本研究では、非技術者でもシステムの構築・運用を容易に行うことができるセンシング基盤を提案する。図 6 にシステムの概要を示す。この基盤では、センシングシステムに必要な様々な機能をモジュール化し、それらを GUI で組み合わせ「シナリオ」として定義することができる Web アプリケーションを提供することにより、柔軟かつ容易なシステム構築・運用支援を実現した [26], [27]。これにより、ユーザ参加型センシングシステムをノンプログラミングで開発・配布・運用することが可能となる。

提案システムの有効性を検証するため、一般市民を巻き込んだ約 2 年に渡る 17 のケーススタディを実施した。この運用実験およびアンケート調査を通じて、システムの有用性をセンシングの主催者および参加者の両面から確認した。

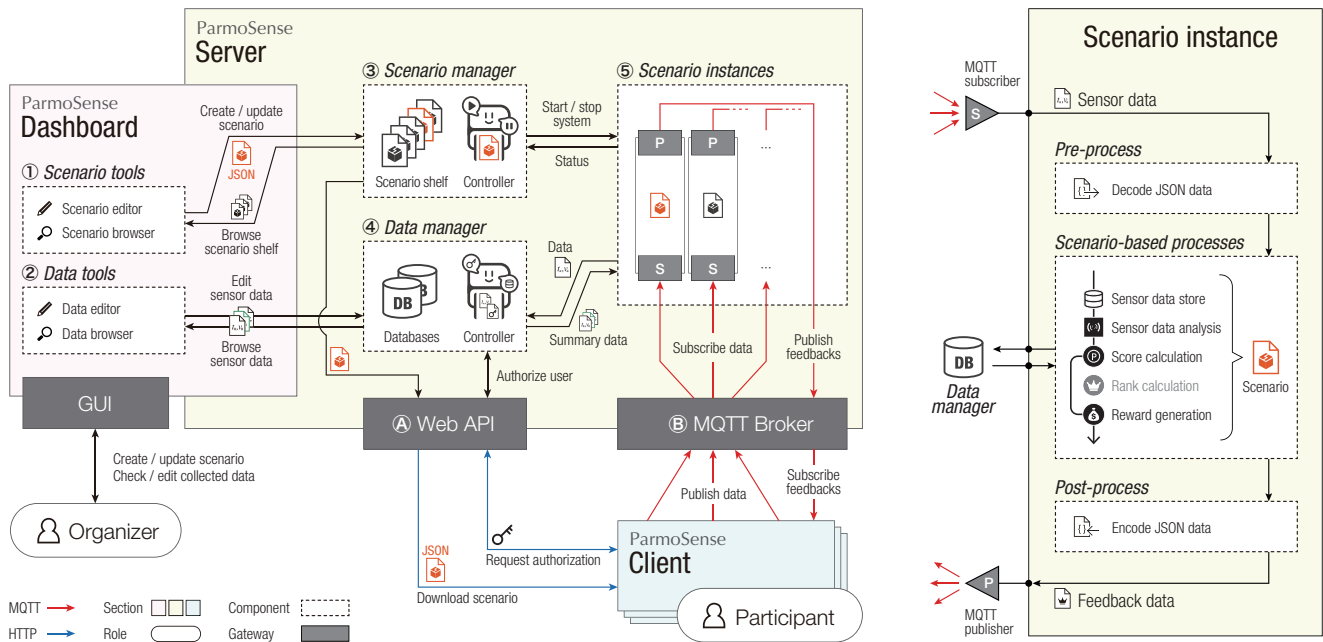


図 6 ParnoSense のシステム構成

4. まとめ

本稿では、都市環境センシングシステムに「人」を組み込む新たな都市環境情報収集手法（ヒューマンインザループセンシング）を提案した著者の博士論文（和題：都市環境分析におけるヒューマンインザループセンシングの研究，英題：Study on Human-in-the-loop Sensing in Urban Environment Analysis）^{*1} についての概要をまとめた。

参考文献

- [1] GSMA. *The Mobile Economy 2018*. <https://www.gsma.com/mobileeconomy/>.
- [2] Ian F Akyildiz, Weilian Su, Yogesh Sankarasubramanian, and Erdal Cayirci. Wireless sensor networks: a survey. *Computer networks*, Vol. 38, No. 4, pp. 393–422, 2002.
- [3] Charu C. Aggarwal and Tarek Abdelzaher. Social sensing. In *Managing and mining sensor data*, pp. 237–297. Springer, 2013.
- [4] Jeffrey A. Burke, D. Estrin, Mark Hansen, Andrew Parker, Nithya Ramanathan, Sasank Reddy, and Mani B. Srivastava. Participatory sensing. *Center for Embedded Network Sensing*, 2006.
- [5] 日本防犯設備協会. 防犯照明ガイド vol.5.1. 入手元 <http://www.ssaj.or.jp/> (2015).
- [6] Japanese Industrial Standards Committee. Lighting for roads. *JIS Z 9111:1988*, 1988.
- [7] 松田裕貴, 新井イスマイル. スマートフォン搭載照度センサの集合知による街灯照度安全性判定システムの開発. 情報処理学会研究報告 (2013-UBI-37 (52)), pp. 1–8, 2013.
- [8] Yuki Matsuda and Ismail Arai. A safety assessment system for sidewalks at night utilizing smartphones' light sensors. *Adjunct Proceedings of the*

2014 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing (UbiComp '14 Adjunct), pp. 115–118, 2014.

- [9] 松田裕貴, 新井イスマイル. スマートフォン搭載照度センサの集合知による網羅的な街灯情報収集システムの開発. 情報処理学会論文誌, Vol. 55, No. 2, pp. 750–760, 2014.
- [10] Yuki Matsuda, Ismail Arai, Yutaka Arakawa, and Keiichi Yasumoto. A correction method for individual differences among smartphones' light sensor to measure streetlamps' illuminance for sidewalks at night. *IPSI Journal*, Vol. 57, No. 2, pp. 520–531, 2016.
- [11] Sinan Aral. The problem with online ratings. *MIT Sloan Management Review*, Vol. 55, No. 2, p. 47, 2014.
- [12] Yuki Matsuda, Dmitrii Fedotov, Yuta Takahashi, Yutaka Arakawa, Keiichi Yasumoto, and Wolfgang Minker. Estimating user satisfaction impact in cities using physical reaction sensing and multimodal dialogue system. *The Ninth International Workshop on Spoken Dialog System Technology (IWSDS '18)*, pp. 1–6, 2018.
- [13] 高橋雄太, 松田裕貴, Dmitrii Fedotov, 荒川豊, Wolfgang Minker, 安本慶一. 観光中の内的状態推定に向けた観光客の無意識的しぐさの分析. 電子情報通信学会技術研究報告, ヒューマンプロブ研究会 (HPB), 2018.
- [14] Dmitrii Fedotov, Yuki Matsuda, Yuta Takahashi, Yutaka Arakawa, Keiichi Yasumoto, and Wolfgang Minker. Towards estimating emotions and satisfaction level of tourist based on eye gaze and head movement. *Proceedings of The Fourth IEEE Conference on Smart Computing (SMARTCOMP '18)*, pp. 399–404, 2018.
- [15] Yuki Matsuda, Dmitrii Fedotov, Yuta Takahashi, Yutaka Arakawa, Keiichi Yasumoto, and Wolfgang Minker. Emotour: Multimodal emotion recognition using physiological and audio-visual features. *Proceedings of the 2018 ACM International Joint Conference and 2018 International Symposium on Pervasive and Ubiquitous Computing and Wearable Computers (UbiComp '18)*, pp. 946–951, 2018.
- [16] Yuki Matsuda, Dmitrii Fedotov, Yuta Takahashi, Yutaka Arakawa, Keiichi Yasumoto, and Wolfgang

^{*1} <http://library.naist.jp/dspace/handle/10061/13263>

- Minker. EmoTour: Estimating emotion and satisfaction of users based on behavioral cues and audiovisual data. *Sensors*, Vol. 18, No. 11, 2018.
- [17] Dmitrii Fedotov, Yuki Matsuda, Yuta Takahashi, Yutaka Arakawa, Keiichi Yasumoto, and Wolfgang Minker. Towards real-time contextual touristic emotion and satisfaction estimation with wearable devices. *2019 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops '19)*, pp. 358–360, 2019.
- [18] Denzil Ferreira, Vassilis Kostakos, and Anind K. Dey. AWARE: Mobile context instrumentation framework. *Frontiers in ICT*, Vol. 2, No. 6, pp. 1–9, 2015.
- [19] Haoyi Xiong, Yu Huang, Laura E. Barnes, and Matthew S. Gerber. Sensus: A cross-platform, general-purpose system for mobile crowdsensing in human-subject studies. In *Proceedings of the 2016 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing*, UbiComp '16, 2016.
- [20] Moo-Ryong Ra, Bin Liu, Tom F. La Porta, and Ramesh Govindan. Medusa: A programming framework for crowd-sensing applications. In *Proceedings of the 10th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services*, MobiSys '12, pp. 337–350, New York, NY, USA, 2012. ACM.
- [21] Nadav Aharony, Wei Pan, Cory Ip, Inas Khayal, and Alex Pentland. Social fMRI: Investigating and shaping social mechanisms in the real world. *Pervasive and Mobile Computing*, Vol. 7, No. 6, pp. 643–659, 2011.
- [22] Hongsuda Tangmunarunkit, Cheng-Kang Hsieh, Brent Longstaff, S Nolen, John Jenkins, Cameron Ketcham, Joshua Selsky, Faisal Alquaddoomi, Dony George, Jinha Kang, Z. Khalapyan, J. Ooms, Nithya Ramanathan, and Deborah L Estrin. Ohmage: A general and extensible end-to-end participatory sensing platform. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology*, Vol. 6, No. 3, pp. 38:1–38:21, 2015.
- [23] Waylon Brunette, Mitchell Sundt, Nicola Dell, Rohit Chaudhri, Nathan Breit, and Gaetano Borriello. Open Data Kit 2.0: Expanding and refining information services for developing regions. In *Proceedings of the 14th Workshop on Mobile Computing Systems and Applications*, HotMobile '13, pp. 10:1–10:6, New York, NY, USA, 2013. ACM.
- [24] Mina Sakamura, Tomotaka Ito, Hideyuki Tokuda, Takuro Yonezawa, and Jin Nakazawa. MinaQn: Web-based participatory sensing platform for citizen-centric urban development. In *Adjunct Proceedings of the 2015 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing and Proceedings of the 2015 ACM International Symposium on Wearable Computers*, UbiComp/ISWC'15 Adjunct, pp. 1607–1614, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- [25] Misako Mishima, Takashi Matsumoto, Shigeru Takano, and Osamu Matsuda. Kokopin app: A mobile platform for biogeography. In *Proceedings of the 2Nd ACM International Workshop on Multimedia Analysis for Ecological Data*, MAED '13, pp. 35–40, 2013.
- [26] Yuki Matsuda, Yutaka Arakawa, and Keiichi Yasumoto. Design and evaluation of participatory mobile sensing platform for diverse sensing and gamification scenarios. *Proceedings of the 14th Annual International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services Companion (MobiSys '16 Companion)*, p. 57, 2016.
- [27] 松田裕貴, 荒川豊, 安本慶一. 多様なユースケースに対応可能なユーザ参加型モバイルセンシング基盤の実装と評価. マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICO 2016) シンポジウム論文集, pp. 1042–1050, 2016.