

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

松田 裕貴^{1,a)} 荒川 豊^{1,b)} 安本 慶一^{1,c)}

概要：いつでもどこでも環境や人の状況を把握、解析し、ユーザへと還元することを可能とするユビキタス社会の実現に向け、より効率的に環境や人をセンシングする手法が求められている。本研究では、ユーザが日常生活において利用する端末機器が環境や人をセンシングする、ユーザ参加型センシングに着目している。ユーザ参加型センシングは、ユーザがセンシングに参加するモチベーションを保つことや、使用端末のセンサ個体差や測定環境の差異を補正することが必要となるといった課題を抱えている。同時に、センシング需要の増加やセンシング対象の多様化に対応するため、より迅速にセンシングシステムを構築することも要求されている。本研究では、ユーザのモチベーションを高める機構や共通するセンサ個体差補正手法をモジュール化し、前述の課題を解決する機能を有したユーザ参加型センシングを誰もが簡単に実施可能とする、ユーザ参加型モバイルセンシング基盤を提案する。本稿では、センシング基盤の設計と実装について報告する。また、システムの評価として、実装容易性の検証、実環境における運用性能実験、スケーラビリティに関する実験を行った結果を報告する。

Design and Evaluation of Participatory Mobile Sensing Platform Adaptable for Various Use Cases.

YUKI MATSUDA^{1,a)} YUTAKA ARAKAWA^{1,b)} KEIICHI YASUMOTO^{1,c)}

1. はじめに

ユビキタスコンピューティングシステムの浸透により、いつでもどこでも環境や人の状況を把握、解析し、ユーザへと還元することが可能となりつつある。しかしながら、これを社会全体に適用するためには、より効率よく環境や人をセンシングする必要がある。環境や人のセンシングを網羅的に行うためには、近年注目を集めている IoT (Internet of Things) によるセンサネットワークや、ユーザ参加型センシングなどの手法が考えられる。しかしながら、環境側にセンサを設置する場合においては、大量のセンサを敷設し、維持するためのインフラコストが、依然として解決できていない課題となっている。その解決手法として、ユー

ザが日常生活において利用する端末機器が環境や人をセンシングする、ユーザ参加型センシング [1] が着目されている。

ユーザ参加型センシングは、都市に点在する一般ユーザがセンシングに参加することから、都市センシングにおいて網羅的なデータ収集やリアルタイムな情報更新が期待される [2], [3], [4], [5]。しかしながら、ユーザがセンシングに参加するモチベーションを保つことや、使用端末のセンサ個体差や測定環境の差異を補正することが必要となるといった課題を抱えている [6]。

多くの既存システムは、これらの課題を解決する手法を独自に提案・実装しているものの [7]、これらの手法は、ユーザ参加型センシングの本来の目的である都市センシングを行うための事前段階・事前処理にすぎず、いわゆる車輪の再発明という状態が繰り返されているのが現状である。さらに、今後はよりセンシング需要の増加やセンシング対象の多様化が予想されるため、それに伴ってアプリやサーバを構築したり、センシング参加者へアプリを配布す

¹ 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科
Graduate School of Information Science, Nara Institute of
Science and Technology

a) yukimat.jp@gmail.com

b) ara@is.naist.jp

c) yasumoto@is.naist.jp

るコストの増大が懸念される。以上から、事前段階の課題を解決する手法を組合せたり再利用することが可能であること、簡便なセンシングシステム構築システムを利用することによる個々のシステム構築にかかるコストを抑えることが、今後求められる。そこで、本研究ではより効率的なユーザ参加型都市センシングシステム構築を実現するために、共通するセンサ個体差補正手法やユーザのモチベーションを高める機構を統合したシステムである、ユーザ参加型モバイルセンシング基盤を開発している。

ユーザ参加型モバイルセンシング基盤は、実環境でのセンシングを考慮し、センシングシナリオ（使用センサ、センサの校正機構など）や、モチベーション生成機構（金銭的インセンティブ、ゲーミフィケーション、割込みなど）などといった、ユーザ参加型センシングの構成要素を組み替えることが可能となっている。これにより、センシング基盤上で構成要素を組み替えるだけで複数アプリの実装・運用が可能となるため、新たにアプリケーションを開発、配布する必要がなく、開発工数やユーザに対する負担を軽減することができる。本稿では、ユーザ参加型モバイルセンシング基盤の基本設計および実装について述べるとともに、実装容易性やスケーラビリティに関するセンシング基盤のシステム評価を報告する。システム評価実験の結果、本基盤は、システム構築にかかる工数を大幅に削減可能とし、異なるユースケースのシナリオにおいても運用可能であることが確認できた。スケーラビリティに関しては、内部システムの分散化により応答時間の改善が見られたが、タスク単位での分散処理による更なる高速化が必要であることがわかった。

2. 取り扱う課題および既存研究

2.1 ユーザ参加型センシングシステムの抱える課題

ユーザ参加型センシングとは、一般ユーザがスマートフォンやウェアラブル機器といったデバイスを用い、都市センシングに寄与するセンシング手法であり、環境の多様な情報を網羅的かつリアルタイムに収集することができる。しかしながら、一般ユーザによるセンシングが行われること、そしてユーザの持つ端末から得られたデータを元に解析を行うことから、以下に挙げる課題が存在することが、これまでの著者らの研究で明らかとなっている [6]。

課題1：センサデータの校正・解析

ユーザの測定環境（端末の保持方法、歩行速度・方法、身体的差異、端末の使用方法・頻度など）は、ユーザによって多種多様であり、センシングの規模が大きくなるにつれ重要な問題となる。また、使用する端末に搭載されているセンサの個体差や精度差が大きいものが存在する。これらの不確定要素を推定したデータを元に、測定対象をセンシングしなければならないため、制約条件を設けない測定、つまり、実環境への導入には大きな障壁がある。

課題2：システムの持続可能性（サステナビリティ）

センシングを行う参加者は、一般的なユーザが対象となるため、そのユーザがセンシングに持続して参加するための“意義”や“モチベーション”を与えなければ、参加が促進されなかったり、参加したとしても持続せずに離脱してしまう問題が生じる。ユーザに対し持続的な参加を促すためには、ユーザ参加型センシングシステムに対し、何らかのモチベーション生成機構を導入する必要があるといえる。モチベーション生成機構としては、金銭的な報酬を与える「金銭的インセンティブ」や、金銭的ではなく“体験”を報酬として与える「ゲーミフィケーション」が挙げられる [8][9]。しかしながら、ユーザに対する報酬に限度があったり、どのような組合せが効率よくモチベーションを与えるのかについては、いまだ解明されていない。

本研究の大局的な課題は、実環境に適用可能な手法により上記の課題を解決することである。

2.2 ユーザ参加型センシング基盤の既存研究

ユーザ参加型センシングシステムの構築および運用を支援するための基盤としては、Tangmunarunkit らが提案している Ohmage^{*1}[10] や、Ferreira らが提案している AWARE^{*2}[11] などが挙げられる。

Ohmage [10] は、テキストや選択肢、動画、画像、音声といった方法によりユーザが回答する項目および、ユーザが回答する際のセンサデータ（GPS 等）を自動収集するシステムを作成することができる。センシング実施者は、システムの作成およびユーザの参加募集、データ収集状況の確認や収集結果の可視化といった、一連のタスクを Ohmage 上で実施することができる。Ohmage は、アプリの作成および管理システムを提供することにより、約 20 の独立したプロジェクトにおいて活用されるという成果を挙げている。しかしながら、基本的に質問ベースの調査を対象としているシステムであるため、本研究の課題として取り上げているセンサデータの校正・解析に関しては存在しないといえる。また、サステナビリティの課題に関しては、ユーザが利用するモバイルアプリケーションにおいて、ユーザのアクティビティ（移動方法やその時間、日による変化）を可視化することにより、ユーザのモチベーションを向上するためのシステムを導入しているが、そのバリエーションは非常に限られたものとなっている。

AWARE [11] は、センサ管理や低消費電力化といった要素をカプセル化することにより、センシング実施者の開発コストを大幅に削減可能としている。また、追加機能をプラグインという形で提供することにより、実施者が AWARE によって作成したアプリを容易に拡張することができる。しかしながら、本研究で課題として取り上げてい

^{*1} <http://ohmage.org/>

^{*2} <http://www.awareframework.com/>



図 1 ユーザ参加型モバイルセンシング基盤の要求機能

る、ユーザのモチベーションを向上するためのシステムは提供される機能の対象外となっている。

本研究においては、スマートフォン端末に搭載されたセンサを用いたセンシングを主体とした調査を対象とし、先述の2つの課題に関する解決手法を組み込むことを可能とするユーザ参加型モバイルセンシング基盤を提案する。

3. ユーザ参加型モバイルセンシング基盤の提案

3.1 ユーザ参加型モバイルセンシング基盤のコンセプト

本章で提案するユーザ参加型モバイルセンシング基盤は、モチベーション生成機構（ゲーミフィケーションなど）を備え、様々なセンシングタスクを実施することが可能なユーザ参加型センシングシステムを構築、運用、評価するための統合センシング基盤である。本センシング基盤では、ユーザ参加型センシングの準備、実施、解析の一連の手続きを実環境において実施することを可能とするため、以下に示す機能を有する（図 1）。

① センシングシナリオ

要求されるセンシングタスクに基づく、使用するセンサや機能などの組合せ

② モチベーション生成シナリオ

ゲーミフィケーションや金銭的インセンティブといった、モチベーション生成機構の組合せ

③ センサデータ収集・解析

収集されたデータの管理、およびデータ校正・解析

次に、ユーザ参加型モバイルセンシング基盤に関する必要要件を整理する。図 2 に、システムのコンセプトを示す。ユーザ参加型センシングには共通する機能が多いため、ユーザ管理や通信プロトコルなど、どのユーザ参加型センシングにおいても利用されるであろう基本的な機能を提供することで、開発コストを抑えることが可能であると考えられる。そこで、ユーザ参加型センシングにおけるシ

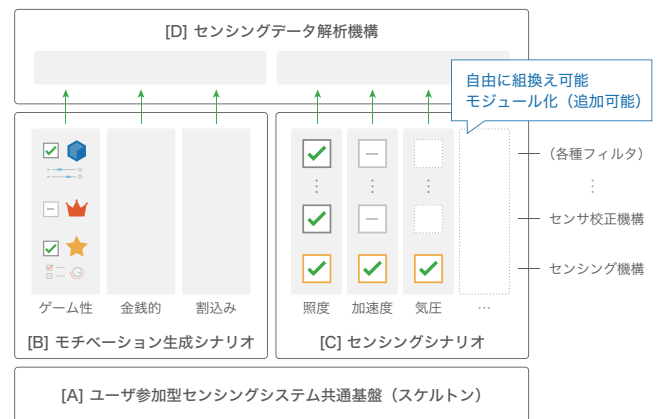


図 2 ユーザ参加型モバイルセンシング基盤のシステムコンセプト

ステム共通基盤（スケルトン）を提案する基盤の土台とする（図 2-A）。

この共通基盤の上に、センシングタスク実施に必要な機能を設けることにより、センシング実施者の実施したいタスクを遂行可能なアプリを作成することができる。これらの特有の機能の開発については、「センシングシナリオ」と「モチベーション生成シナリオ」の2つのシナリオ生成システム（図 2-B,C）を提供する。センシング実施者は、機能の取捨選択や機能の設定・調節といった、GUIの操作によって各機能を作成可能とする。なお、「センシングシナリオ」では、使用するセンサの選択をはじめ、それらのセンサ校正機構（スマートフォンのセンサ個体差にはばらつきが大きいものがある）、他のフィルタといった機能を適用することができる。なお、フィルタの例としては、加速度に対する歩数推定や、気圧に対する標高推定などといったものが挙げられる。これらシナリオ生成システムにおいて、構成要素の自由な組合せや設定変更、要素の追加を実現するために、本提案基盤では、校正機構やフィルタ、ゲーミフィケーションなどのインセンティブ機構を、それぞれ“モジュール化”する。

最後に、センサデータを解析や可視化するためのツール、またはセンサデータを取得することができる API などを提供する（図 2-D）。

3.2 節にて、本節で示したシステムコンセプトを実現するため、「ユーザ参加型センシングシステム共通基盤」を設計・実装するとともに、基本的なセンシング・モチベーション生成シナリオを導入するための枠組みを実装する。

3.2 ユーザ参加型センシング基盤の設計・実装

図 3 に、システム構成を示す。本システムは、ユーザ参加型センシングアプリの作成システム（図 1-a）、および作成したアプリの運用システム（図 1-b）、そしてセンシングに参加するユーザが利用するクライアントアプリケーション（図 1-c）から構成される。センシング実施者（センサデータを収集したいユーザ）と、センシング参

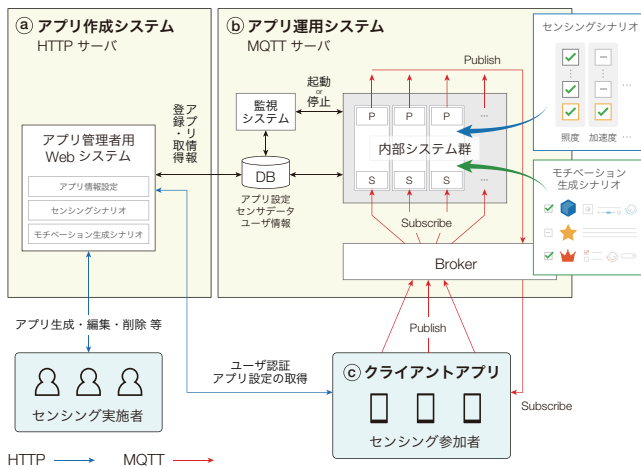


図 3 ユーザ参加型モバイルセンシング基盤のシステム構成

加者（センシングに協力するユーザ）の 2 種類のユーザがこのシステムを介して、図 2 のコンセプトに基づくユーザ参加型センシングシステムの作成から実施運用を行うことができる。以降、それぞれの要素について概説する。

センシングアプリ作成システムは、主にセンシング実施者によって、ユーザ参加型センシングアプリの作成や変更、データの解析、抽出などに利用される。アプリ運用システムは、ユーザ参加型センシングアプリのサーバとして振る舞う役割をにない、作成されたアプリの管理や、センシングシナリオやモチベーション生成シナリオに沿った、センシングデータの内部処理を行いユーザへとフィードバックする。

なお、本論文で提案するセンシング基盤におけるアプリ運用システムでは、クライアントアプリケーションとのプロトコルとして MQTT を採用した。MQTT とは、M2M (Machine-to-Machine)、すなわち機械と機械が互いに通信ネットワークを介して情報をやり取りすることを実現できるプロトコルである [12]。また、Facebook Messenger^{*3} におけるメッセージのやり取りを行うプロトコルとしても採用されている他、近年 IoT (Internet of Things) が注目を集めており、家電や自動車など多種多様な「モノ」がネットワークへ情報を発信することが想定されることから、MQTT を用いた通信を採用するケースが多くなっている。アプリ運用システムにおいて、MQTT を採用した主な要因は以下の 2 つである。

双方向、1 対多の通信が可能

主にゲーミフィケーションにおいて、1 ユーザから発されたデータに基づいて生じた事象が、他の複数ユーザに影響を与える、というシナリオが考えられるが、MQTT を採用することにより、リアルタイムな事象の反映を実現することが可能となる。

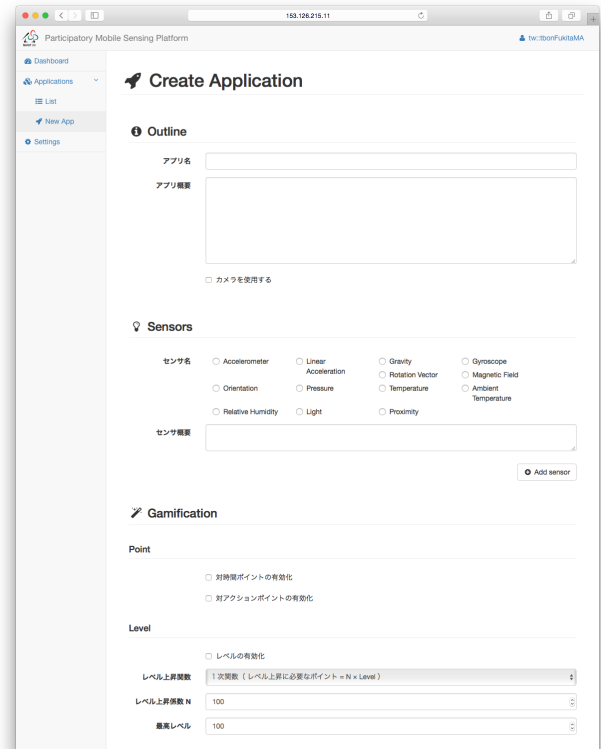


図 4 ユーザ参加型モバイルセンシング基盤（アプリ作成画面）

IoT などの他の設置型センサとの連携が可能

近年注目されている IoT の普及が進めば、ユーザ参加型センシングと固定センサのハイブリッドな環境センシングを実現できる。MQTT を採用することで、IoT デバイスから送信されるセンサデータを組み込むことができる。

以降ではそれぞれのサーバの設計・実装について詳述し、センシング参加者が利用するクライアントアプリケーションの概要を示す。

3.2.1 ユーザ参加型センシングアプリ作成システム

本センシング基盤では、ユーザ参加型センシングアプリの生成・編集・削除・起動・停止などといった、全ての作業をユーザ参加型センシングアプリ作成システム（図 1-①）上で動作する Web アプリケーションで行う。

図 4 に、ユーザ参加型センシングアプリの作成画面を示す。このアプリ作成画面は、「Outline」「Sensors」「Gamification」の 3 つの構成要素に分かれている。「Outline」は、主に参加ユーザへと通知する情報である。アプリ名や概要、免責事項やカメラ利用の有無といった、アプリの基本的な情報を記述する。「Sensors」は、3.1 節で述べた、コンセプト機能の“センシングシナリオ”（図 1-①）に該当する項目である。ここで必要なセンサの指定、校正手法やフィルタの選択を行うことで、“センシングシナリオ”を構築する。「Gamification」は、3.1 節で述べた、コンセプト機能の“モチベーション生成シナリオ”（図 1-②）に該当する

^{*3} <https://www.messenger.com/>

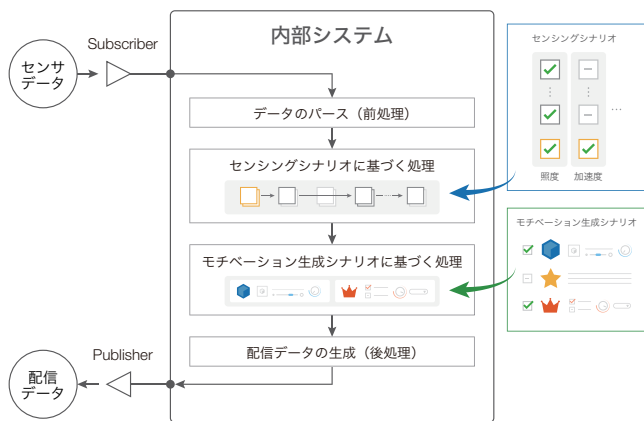


図 5 センシング基盤の内部システム構成

項目である。ここで、ポイントやレベル、バッジの有無や付与条件、ランキングの付け方などゲーミフィケーションに関する設定を行ったり、金銭的インセンティブや割り込みといった他の要素を追加することで、“モチベーション生成シナリオ”を構築する。

本論文では、それぞれの“シナリオ”に対し、基本的なモジュールのみの実装を行っているが、今後、モジュールを増やすことにより、多様なシナリオをシステムに組み込むことができる。

3.2.2 ユーザ参加型センシングアプリ運用システム

ユーザ参加型センシングアプリ運用システム（図 1-⑥）は、「プロセス監視システム」と「内部システム群」の2つの機能によって構成されている。

「プロセス監視システム」は、ユーザ参加型センシングアプリ作成システムによって生成されたアプリの内部システムの稼働状況をモニタリングしており、センシング実施者の操作に対応し、内部システムの起動や停止を行う。また、内部システムの予期せぬトラブルを検知し、システムの停止や再起動などを行う。

「内部システム群」は、それぞれのユーザ参加型センシングアプリに対し、サーバとして振る舞う役割を果たす「内部システム」の集合である。図 5 に、内部システムの仕組みを示す。内部システムが起動する際に、センシング実施者が設定したシナリオ（センシングシナリオ、モチベーション生成シナリオ）に基づき、対応するモジュールプログラムを内部システムにロードする。参加ユーザがセンサデータ投稿（Publish）すると、アプリに対応する内部システムの Subscriber がセンサデータを受信、パースなどの前処理を施し、各シナリオに基づく処理を行う。それらの結果をもとに配信データを作成し、参加ユーザへと返信（Publish）するという流れである。

なお、3.2.1 節で述べた、モジュールを増やし新たなシナリオをシステムに組み込むということは、内部システムにロードされるプログラムを増やし、内部システムでの処理を変更することである。



図 6 センシング参加者用クライアントアプリケーション（アプリ選択画面例）



図 7 センシング参加者用クライアントアプリケーション（アプリ選択後画面例）

3.2.3 センシング参加者用クライアントアプリケーション

センシング参加者用クライアントアプリケーションは、あらゆるセンシングタスクをこなすための機能をもつ統合アプリケーションである。図 6 のようにアプリ上で参加型センシングアプリを選択することができ、ひとつを選択すると、“アプリ設定ファイル”としてこれらの機能の組み合わせをサーバからダウンロード（図 3 を参照）し、アプリ内にて参加型センシングアプリを構築する。その後は、1つのアプリがあらゆる参加型センシングアプリケーションとして振る舞うのである（図 7 はその一例である）。

これらのアプリ配布に関しては、位置情報に基づくフィルタリングや、イベントやグループなどで限定的に配布することにより、効率的なセンシングタスクへの参加を促す

表 1 街灯照度収集アプリケーションの LOC 導出結果

拡張子	内訳	ファイル数	LOC
java	Activity, View (画面)	14	2,744
	Gamification モジュール	10	688
	共有リソース	17	1,853
	小計	41	5,285
xml	レイアウト定義	30	2,154
	定数など	8	508
	小計	38	2,662
合計		79	7,947

方法を検討している。

これにより、センシング実施者は新たに作成したアプリを配布する必要はなく、センシング参加者は本クライアントアプリをインストールするだけで実施可能となる。つまり、作成したアプリの配布という観点においても、センシング実施者・参加者双方の負荷を軽減可能となる。

4. ユーザ参加型モバイルセンシング基盤のシステム評価

本節では、本論文で提案したユーザ参加型モバイルセンシング基盤を評価するために、3つの評価を行う。以降、4.1節にてシステム構築に掛かる工数に基づく実装容易性の評価、4.2節にて実際にセンシング基盤を用いた実証実験に基づく運用性能の評価、4.3節にてセンシング基盤の性能（スケーラビリティ）に関する評価について述べる。

4.1 システム構築に掛かる工数による実装容易性評価

本センシング基盤を用いることにより、センシング実施者に掛かる負担が軽減されるかを検証するために、実際のユーザ参加型センシングシステムとシステム構築工数を比較する。本評価では、本センシング基盤によって提供される1アプリケーションと同等の機能を有するAndroidアプリケーションとして、著者らがこれまでに作成したユーザ参加型センシングシステム（街灯照度収集アプリケーション）を比較対象とする。工数の計算は、ソフトウェアの開発規模・工数の指標であるLOC（Line Of Code）によって計算する。

街灯照度収集アプリケーションのLOC導出結果を表1に示す。合計コード数は、約8,000行となっており、1人月1,500行と仮定した場合、5人月程度の規模であるといえる。また、これに加えて、サーバ側のシステム開発やサーバの環境構築も必要となる。これに対し、本センシング基盤では、WebのGUI操作のみでアプリを自動作成でき、また、サーバ側を意識する必要はないため、センシング実施者への負担は軽減できると考えられる。

現在のセンシング基盤に搭載されていないモチベーション生成機構（ゲーミフィケーションなど）に関しては、必要に応じてモジュールを開発する必要がある。しかしなが



図 8 撮影写真の例

ら、表1に示す街灯照度収集アプリケーションでは、2種類のゲーミフィケーションを搭載しているものの、ゲーミフィケーションモジュールの割合は全体のコード行数に対し4.5%（ $= \frac{688}{7947} \times 100$ ）程度であることから、軽微な追加実装によってすることで拡張可能であると推測できる。

4.2 センシング基盤を用いた実験による運用性能評価

4.2.1 運用実験概要・実験結果

本センシング基盤を用いることで、多様なセンシングタスクを有するユーザ参加型センシングシステムが、異なる実環境において運用可能かどうかの検証を行うため、表2に示す3つの実験を行った。それぞれの実験は異なるシナリオを持ち、異なる実験期間や参加者において実施した。

■ 樹木マッピング型

奈良県生駒市の奈良先端科学技術大学院大学構内を実験フィールドとし、15名の被験者による短時間の写真投稿実験を行った。制限時間を25分と短時間に限定し、「樹木の看板」というミッションを与えることで、Open Street Mapなどのオープンソース地図への情報付加イベント（マッピングパーティ）のようなセンシングシナリオとなっている。モチベーション生成シナリオとしては、ポイント、レベル、ランキングの3機能を搭載し、被験者同士のチェックインをお互いに確認できるものとなっている。被験者は、図8に示すように、ミッションである「樹木の看板」を写真、コメント、センサデータ（加速度、地磁気、気圧など）とともに投稿する。実験の結果、計318枚の写真データおよびセンサデータの収集を行うことができることを確認した。

■ チェックラリー型

図9に示す神奈川県綾瀬市において開催された、サイク

表 2 異なるシナリオを持つ参加型センシングシステムの実環境における運用実験結果

センシングシナリオ	新規 CP	チェックイン	チェックインの共有	ゲーミフィケーション搭載数	期間	参加者数	規定 CP 数	実験結果
樹木マッピング型	○	○	○	3	25 分	15 人	—	318 枚
チェックラリー型	×	○	×	4	1 日	10 人	40	90 枚
定期報告型	×	○	○	3	10 日	12 人	10	515 枚

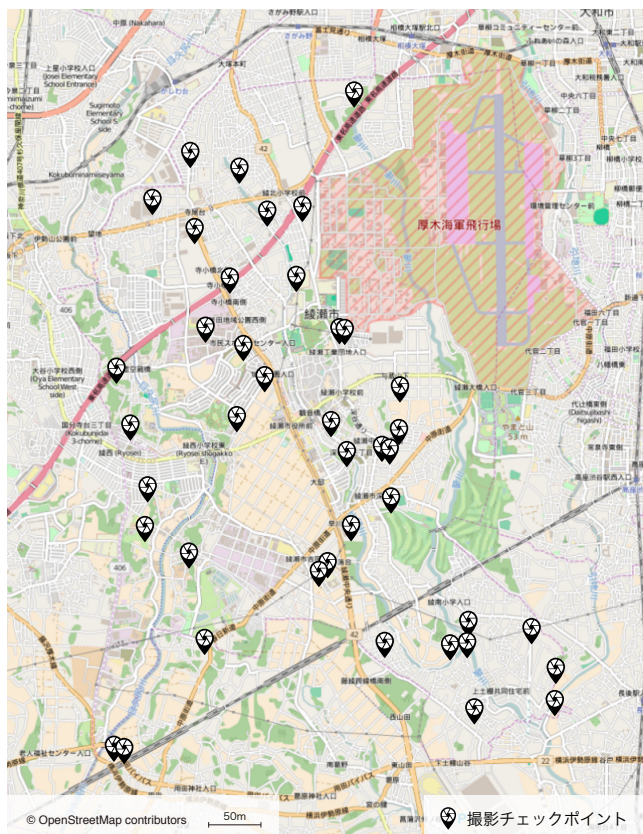


図 9 運用実験フィールド（チェックラリー型）

ルラリーイベント「びゅ〜つとあやせ 2015」を実験フィールドとし、イベント参加者の端末保有者 10 名を被験者とした実験を行った。本実験を通して、イベントの一環としてセンシングタスクを行うというシナリオを適用した場合において、運用が可能であるかを検証する。被験者は、南北 6.5km、東西 5km のエリアに点在するチェックポイントを周り、その地点の写真を撮影、投稿する。モチベーション生成シナリオとしては、前述の 3 機能に加えて、自身のチェックイン（撮影実績）を確認する機能を搭載する。なお、被験者同士のチェックインの共有および新しいチェックポイントの追加は禁止した。実験の結果、1 日の実験期間において、計 90 枚の写真データおよびセンサデータの収集を行うことができたことを確認した。

■ 定期報告型

図 10 に示す奈良県生駒市の実験フィールドにおいて、10 日間の実験期間で 12 名の被験者を募った実験を行った。実験フィールドには、複数箇所にチェックポイントとして、温度計（図 11）や掲示板（図 12）を設置し、それ



図 10 運用実験フィールド（定期報告型）



図 11 CP の例（温度計）

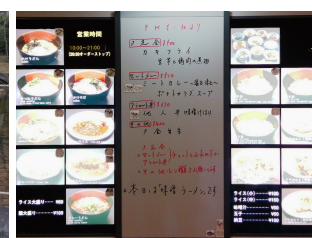


図 12 CP の例（掲示板）

らの日々変化するチェックポイントの写真を、位置情報やセンサデータ（加速度、地磁気、気圧など）とともに定期的に投稿する、というセンシングシナリオで実施した。モチベーション生成シナリオとしては、前述の 3 機能を搭載し、被験者同士のチェックインの共有および新しいチェックポイントの追加は禁止した。実験の結果、計 515 枚の写真データおよびセンサデータの収集を行うことができたことを確認した。

4.2.2 議論と今後の課題

この実験において得られた課題として、通信プロトコルとして MQTT を利用していることによる、センサデータ送信失敗が挙げられる。MQTT は、QoS (Quality of Service) というサービス品質を設定することが可能であり、最高 1 回 (QoS 0)、少なくとも一回 (QoS 1)、正確に一回 (QoS 2) の 3 段階をサポートしている。しかしながら、QoS 1,2 では、ACK や再送などがプロトコルに組み込まれていることから品質と通信容量とのトレードオフを考慮しなければならない。

本稿で実施した「定期報告型」シナリオ実験においては

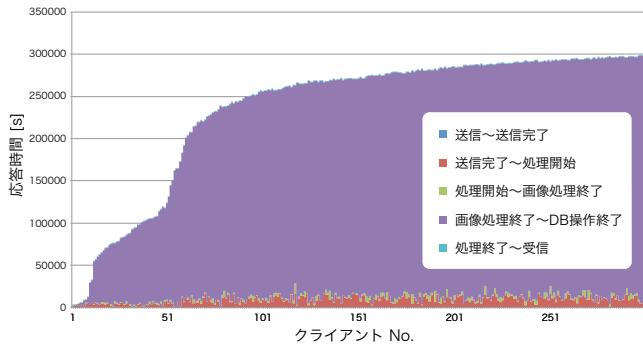


図 13 スケーラビリティ試験結果（仮想クライアント数 300，累計応答時間）

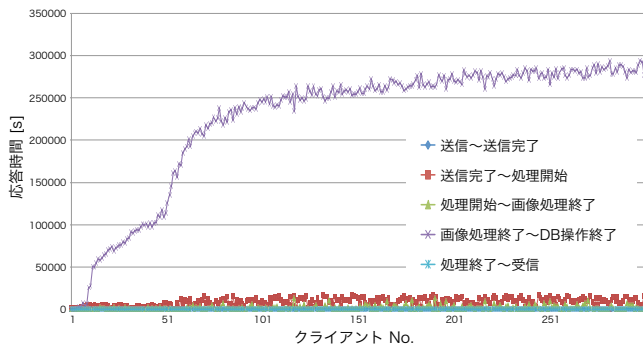


図 14 スケーラビリティ試験結果（仮想クライアント数 300，個別応答時間）

QoS 0 に設定したため，センサデータの送受信は 100%保証されず，送信失敗となるケースが多々確認された。つまり，写真データのような明らかに送信頻度の低いものに関しては QoS 2 として送付することが望ましいといえる。しかしながら，その他のセンサ値に関しては，断続的な送信が行われることが想定されるため，QoS 2 では通信容量が大きく MQTT の利点が損なわれるが，QoS 0 ではデータの欠損が生じる恐れがあるため，適切な QoS を決定する手法を検討する必要があると考えられる。

また，本稿の実験においては，ユーザ参加型センシングシステムのタスクとして写真撮影を取り上げたが，別のセンシングタスクにおいても構成要素のモジュール化を行うことで，実環境における同様の実験を通した検証を行う必要がある。

4.3 センシング基盤の性能（スケーラビリティ）評価

今後，より多くのユーザによるセンシングに対応することが必要となるため，センシング基盤の性能評価として，スケーラビリティの試験を行った。試験に用いた機材は，Linux サーバ（OS：Ubuntu，CPU：3.2GHz Core i7，メモリ：32GB）である。

図 13 および図 14 は，仮想的なクライアント（サブプロセス）を 300 名分生成し，4.2 節にて使用したシステムに，

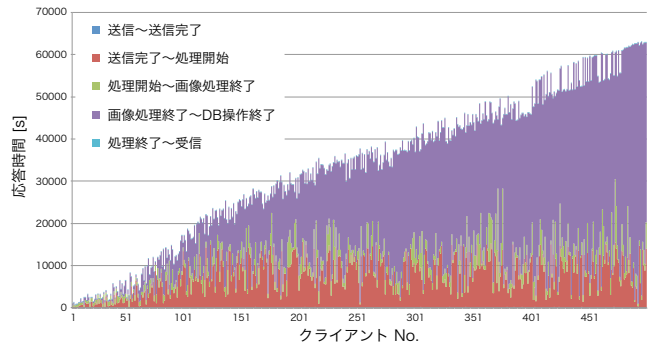


図 15 分散化を行った内部システムに対するスケーラビリティ試験結果（仮想クライアント数 500，累計応答時間）

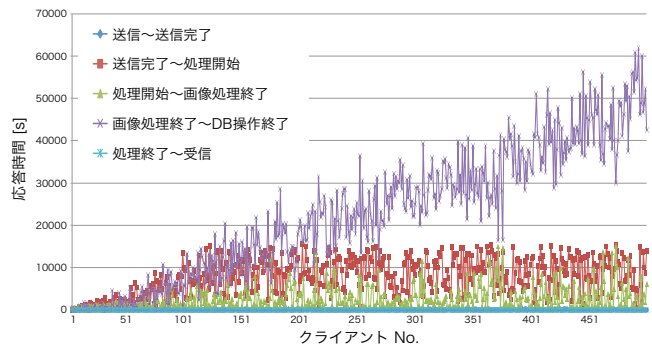


図 16 分散化を行った内部システムに対するスケーラビリティ試験結果（仮想クライアント数 500，個別応答時間）

約 2MB の写真データおよびセンサデータを同時送信した際の，各処理における応答時間（累計，個別）を計測したものである。なお，両グラフとも応答メッセージが到着した順に整列している。

この結果から，本センシング基盤における内部システムは，DB（データベース）操作が圧倒的なボトルネックとなっていることが分かる。これは，全ての要求に対し一つのサーバ（内部システム）が対応していることが原因であるため，内部システムの分散化を行った。図 15 および図 16 は，内部システムを分散化（5 分割）したシステムに対し，仮想的なクライアント（サブプロセス）を 500 名分生成し同様の試験を行った結果を示している。

応答時間を比較すると，大幅な改善が見られ，クライアント数を 300 に揃えた場合において，83.8%の処理時間削減を実現できている。しかしながら，依然として DB 操作がボトルネックになっていることが言えるため，今後の課題として，内部システムの処理をより細かい単位にタスクに分割，分散コンピューティングによる高速化など，改善策を講じる必要があるといえる。

5. おわりに

本研究では，ユーザが日常生活において利用する端末機器が環境や人をセンシングする，ユーザ参加型センシング

に着目し、本稿において、ユーザ参加型センシングの抱える2つの課題である、システムの持続可能性（ユーザがセンシングに参加するモチベーションを保つこと）や、センサデータの校正・解析（使用端末のセンサ個体差や測定環境の差異を補正すること）について取り上げた。同時に、センシング需要の増加やセンシング対象の多様化に対応するため、より迅速にセンシングシステムを構築することも要求されていることから、本研究では、ユーザのモチベーションを高める機構や共通するセンサ個体差補正手法をモジュール化し、前述の課題を解決する機能を有したユーザ参加型センシングを誰もが簡単に実施可能とする、“ユーザ参加型モバイルセンシング基盤”を提案した。

本稿では、センシング基盤のコンセプトを提案し、システムの基本的な設計と実装について述べた。システム評価実験の結果、著者らが過去に作成したユーザ参加型センシングシステムと同等の性能を持つシステムを、GUIによる入力を主とする本基盤を用いることで実現可能であることを確認した。また、それに掛かる工数も大幅に削減可能であることが明らかとなった。さらに、異なる3つのシナリオを適用したシステムを用いて実環境における運用性能実験を行った結果、短期間の情報収集、イベントと組み合わせた情報収集、定期的な情報収集のいずれのユースケースにおいても、運用可能であることが確認できた。しかしながら、データ転送に使用するプロトコルである MQTT の QoS の設定を決定する手法を検討する必要があることが明らかとなった。スケーラビリティに関する実験においては、内部システムの分散化により、約84%の応答時間の改善が見られたが、実用化を目指すためには、より細かい単位で分割したタスクを分散コンピューティングによって処理することで、更なる高速化を行うことが必要であると明らかとなった。

謝辞 本研究は JSPS 特別研究員奨励費 16J09670 の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] J. A. Burke, D. Estrin, M. Hansen, A. Parker, N. Ramanathan, S. Reddy, and M. B. Srivastava. Participatory sensing. *Center for Embedded Network Sensing*, 2006.
- [2] N. Maisonneuve, M. Stevens, and B. Ochab. Participatory noise pollution monitoring using mobile phones. *Information Polity*, Vol. 15, No. 1, p. 51, 2010.
- [3] E. Kanjo. Noiseply: a real-time mobile phone platform for urban noise monitoring and mapping. *Mobile Networks and Applications*, Vol. 15, No. 4, pp. 562–574, 2010.
- [4] 田島誠也, 中下岬, 篠原雅貴, 重田航平, 岩井将行. リアルタイム情報共有を実現するモバイル CO₂ 濃度センシングプラットフォーム. マルチメディア, 分散協調とモバイルシンポジウム 2014 論文集, pp. 853–858, jul 2014.
- [5] Shigeya Morishita, Shogo Maenaka, Daichi Nagata, Morihiko Tamai, Keiichi Yasumoto, Toshinobu

- Fukukura, and Keita Sato. Sakurasensor: Quasi-realtime cherry-lined roads detection through participatory video sensing by cars. *Proceedings of UBICOMP '15*, pp. 695–705, 2015.
- [6] 松田裕貴, 新井イスマイル, 荒川豊, 安本慶一. スマートフォン搭載照度センサの個体差に対応した夜道における街灯照度推定値校正手法の提案. 情報処理学会論文誌, Vol. 57, No. 2, pp. 520–531, feb 2016.
- [7] 山本理絵, 吉野孝. 土地獲得ゲームを活用した地理情報付きデジタル写真収集システムの提案. マルチメディア, 分散協調とモバイルシンポジウム 2014 論文集, pp. 1299–1306, jul 2014.
- [8] Y. Arakawa and Y. Matsuda. Gamification mechanism for enhancing a participatory urban sensing: survey and practical results. *Journal of Information Processing*, Vol. 57, No. 1, 2016.
- [9] Y. Ueyama, M. Tamai, Y. Arakawa, and K. Yasumoto. Gamification-based incentive mechanism for participatory sensing. In *Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops), 2014 IEEE International Conference on*, pp. 98–103, 2014.
- [10] H. Tangmunarunkit, C. K. Hsieh, B. Longstaff, S. Nolen, J. Jenkins, C. Ketcham, J. Selsky, F. Alquaddoomi, D. George, J. Kang, Z. Khalapyan, J. Ooms, N. Ramanathan, and D. Estrin. Ohmage: A general and extensible end-to-end participatory sensing platform. *ACM Trans. Intell. Syst. Technol.*, Vol. 6, No. 3, pp. 38:1–38:21, April 2015.
- [11] D. Ferreira, V. Kostakos, and A. K. Dey. Aware: mobile context instrumentation framework. *Frontiers in ICT*, Vol. 2, No. 6, pp. 1–9, 2015.
- [12] OASIS. Mqtt.org. <http://mqtt.org/>.