

研究終了報告書

「人の知覚を用いた参加型 IoT センサ調整基盤の創出」

研究期間：2020年11月～2024年3月

研究者：松田 裕貴

1. 研究のねらい

本研究では、IoT センサが都市の至る所に設置される未来のスマートシティにおいて、データに基づく人に寄り添ったサービスを提供できる世界を実現することを目指し、都市 IoT センサを「人々の知覚」によって調整することで、IoT が人の体感に合った環境の測定できるようにする「ユーザ参加型 IoT センサ調整基盤」を創出することを目的とする。一般人の有するスマートフォンなどのデバイスを用いた“参加型センシング”の枠組みによって「人の知覚データ」を収集し、IoT センサデータを入力値・収集した「人の知覚データ」を真値とする“知覚模倣モデル”を構築することによって、人の体感を推定可能な IoT、すなわち Internet of “Perception-aware” Things (IoPT) の実現を目指す。この研究課題を実施するにあたって、次の 3 つの研究項目を掲げる。[研究項目1: ユーザ参加型知覚データ収集機構] まず、本研究で採用する“参加型センシング”の手法の性質上、人々に正確な知覚データを提供してもらうことが重要となるが、しばしば、人々はタスクに対して適切な認知コストを払わない状態 (Satisficing) に陥ることが知られている。そこで、人々がデータ提供に協力する際に「不良回答の検知」および「不良回答の防止・改善」の手法の研究に取り組むことで、データ収集の信頼性の向上を達成する。[研究項目2: 人の知覚による IoT センサの調整] 次に、体感混雑度や体感温度といった具体的な IoPT ユースケースを題材として取り上げ、IoT センシングシステム・知覚データ収集システムを用いた実験を通じて収集したデータに基づき、“知覚模倣モデル”を構築する方法の研究に取り組む。[研究項目3: 複数の実環境での検証] 最後に、仮想空間および実空間の複数環境において、異なるシナリオに基づく実証実験を行うとともに、ユーザ参加型データ収集におけるプラットフォームの構築およびその運用を含めた“仕組み”のデザインに取り組む。上記の研究項目を、民間企業・自治体・地域コミュニティと連携しつつ実践的に取り組むことによって、IoPT の学術的・社会的な価値を示すことを狙う。

2. 研究成果

(1) 概要

本研究では、「ユーザ参加型 IoT センサ調整基盤」を創出することを目的とし、3 つの研究項目について取り組んだ。まず、**研究項目1**に関しては、参加型センシングの枠組みによるデータ収集の抱える課題である「不良回答」を対象とし、不良回答の検知および防止・改善の方法の確立に取り組んだ。不良回答の検知については、回答者の画面操作ログのセンシングによって、従来必要であった引っ掛け問題を要さず、検出率 85.9%での不良回答の検知が可能であることを示した。不良回答の防止・改善については、認知バイアスを活用する回答者の態度改善方法として、回答前に自身の立場(真面目に回答する意思)を表明させる「立場表明手法」を考案した。実証実験の結果、立場表明を求める場合と求めない場合において、不良回答率に統計的有意差が現れることを確認した。次に、**研究項目2**に関しては、複

数のユースケースを題材とし、人の体感を推定可能な IoT の構築に取り組んだ。その一つとして、公共施設や飲食店、公共交通機関といった“公共空間”における体感混雑度を取り上げ、BLE スキャナから得られるデータを入力値として、体感混雑度を推定するモデルを構築した。その他、マルチモーダルセンシングによる観光客や美術作品鑑賞者の心理状態(感情・満足度)の推定、VR 空間内における視覚刺激(色や混雑度)が体感音量に与える影響調査、レンタカーのドライブレコーダ映像の「観光地らしさ」の推定による動画要約、気象データや地理空間データに基づく局所的体感温度(じぶん温度)の推定といった研究に取り組んだ。最後に、**研究項目 3** に関しては、民間企業や自治体、地域コミュニティといった幅広い外部機関との研究協力体制を構築し、社会実装を見据えたセンシング基盤とデータ収集の“仕組み”の両面から設計・実装した。その一つとして、生駒市民向けのスマートシティアプリ「ためしば」を一般公開し、住民の日常生活に参加型センシングへの導線を取り入れる取り組みを行った。実際に奈良県生駒市と連携した参加型センシング実験を実施し、研究項目 2 の体感混雑度データ収集実施を経てその有用性を検証している。その他、スマートフォンを有する層以外からの体感データ収集のため、小学生の体感を集める地域のデジタル図鑑システムを生駒市内の小学校全校児童を対象とし 3 年間にわたり運用し、その有用性を確認した。

(2) 詳細

研究項目 1: ユーザ参加型知覚データ収集機構

[研究項目 1-1] Satisficing 状態の検出手法

従来のアンケート形式のデータ収集における Satisficing 状態に起因する信頼性の低い回答(以降、不良回答)の検出は、アンケート内に引っ掛け問題(指示文や矛盾をみる問い)を仕掛けることが中心となってきたが、回答者を疑うような質問を用いるため、回答者に心理的負担を与えてしまう。スマートフォンの画面上での回答操作が回答に対する関心・態度を反映していると仮定し、画面操作ログを用いた不良回答検出モデルを構築した。特徴量としては、図 1 に示すように画面操作ログから直接的に得られる特徴量(スクロール長・速度、回答時間、回答の変更など)に加えて、①通常操作を基準としてどの程度質問票への回答操作と差があったのかを回答者ごとに示す「ベースラインとの差分特徴量」、および②他の回答者の操作とどの程度差があったのかを示す「回答者間偏差特徴量」を使用した(①②をあわせて相対的特徴量と呼ぶ)を採用した。正解ラベルとしては、従来の引っ掛け問題による不良回答検出結果を使用した。クラウドソーシングを用いて 5,692 人に主観的な回答タスクを依頼し、同時に画面操作ログを収集した。得られたデータを元にモデルの性能評価を行った結果を表 1 に示す。直接的に得られるデー

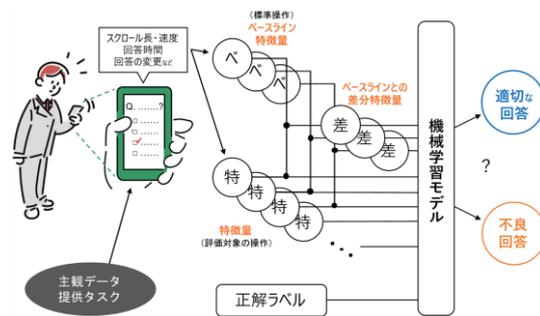


図 1. 不良回答検出モデル構築の概要

表 1. 不良回答検出モデルの評価結果

評価指標	オリジナルモデル	相対的特徴量追加モデル	特徴選択モデル
Accuracy	0.844	0.850	0.862
Precision	0.841	0.848	0.864
Recall	0.849	0.852	0.859
F1 Score	0.845	0.850	0.862

タのみを用い構築したモデル(オリジナルモデル)と比べ、相対的特徴量を加えたモデル(相対的特徴量追加モデル)では全ての評価指標について向上がみられ、さらに各特徴量間の相関分析に基づく特徴量選択アルゴリズムを導入し構築したモデル(特徴量選択モデル)では、最も高い Recall (85.9%)を示すことを確認した。本手法については、特許出願を行っている(特願 2020-202984)ところである[業績 3]。

表 2. 立場表明(EIC)手法の評価実験結果

立場表明方法	総回答数	不良回答数	正答率 [%]
立場表明無し	99	7	92.9
ボタンをタップ	113	3	97.3
スマホを振る	90	3	96.7

[研究項目 1-2] Satisficing 状態の防止・改善手法

参加型センシングにおける不良回答を防止・改善するために、質問内容の問い掛け方法を変更するアプローチを模索した。その一つとして、認知バイアスを活用することによる回答者の態度改善方法として、回答前に自身の立場(真面目に回答する意思)を表明させる「立場表明手法」を考案した。立場表明方法としてボタンタップとスマホを振る動作の 2 種類を実装した。手法の効果を検証するため、混雑度の回答を依頼する参加型センシングタスクを題材に、20 名による 2 週間の検証実験を実施した。その結果(表 2)、立場表明を求める場合と求めない場合において、不良回答率に統計的有意差が存在することを明らかにした。

研究項目2: 人の知覚による IoT センサの調整

[研究項目 2-1] 曖昧な「人の知覚」の表現手法

まず、人の知覚を用いた参加型 IoT センサ調整基盤の実現を目的とする本研究の根幹を成す「人の知覚は環境状況に応じて変化するか?」という問いについて検証した。題材として、感染症の流行が人の体感混雑度に与える影響を調査するためクラウドソーシングを用いて 1100 人を対象としたオンラインアンケート調査を実施した。有意水準 $p=0.05$ のマンホイットニーの U 検定によって 2 群間の比較を行った結果、都市環境の混雑度に対する人の体感(体感混雑度)は新型コロナウイルス感染症の流行前後において、有意に変化していることを明らかにした(図 2)。

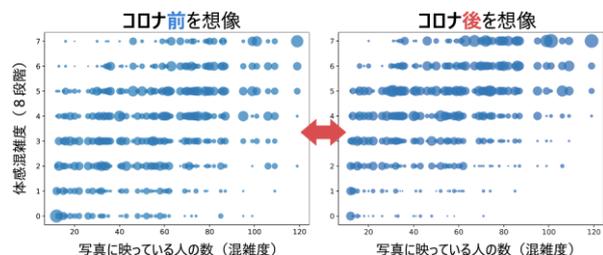


図 2. 屋外版 BLE スキャナと設置の様子



図 3. BLE スキャナの開発状況

[研究項目 2-2] 「人の知覚」模倣モデルによる IoT センサ調整手法

◎代表的なユースケース(体感混雑度: BLECE プロジェクト)

研究項目 2-1 の結果を受け、体感混雑度の推定手法に取り組んだ。IoT 側のデータとして、空間や状況にロバストな情報源とするため、スマートフォンなど

のモバイル端末から発信されるBLEのアドバタイジングパケットのシグナル強度等のデータを用いることとした。このデータを継続的に収集するためのシステムを開発した(図3)。対象とする空間に合わせたデバイスを用い、共通のデータフォーマットでBLEスキャンを実現する、屋内向け・屋外向け・公共交通機関向けのノード(BLECE ノード)を開発した。いずれも複数の民間企業・自治体・地域コミュニティと連携し、市立図書館や飲食店(屋内向け)、商店街や街路(屋外向け)、路線バス(公共交通機関向け)に実際にノードを配備し、定常的なデータ収集を達成した。基本的な分析として、これらのデータを用いた客観的な混雑度(人数や人流)の推定モデルを構築した結果、いずれの空間においても混雑度推定が可能であることが示された。加えて、被験者48名に実際に路線バスに乗りしてもらい、「知覚データ(体感混雑度データ)」を収集、路線バス内での体感混雑度推定のモデル構築を行った。従前の客観的な混雑度を推定するモデルの入力をベースとした特徴量を抽出し訓練したモデルを用いて評価を行った結果、6段階の体感混雑度について、Accuracy 52.8%での推定が可能であるという結果(図3)が得られた[業績2]。

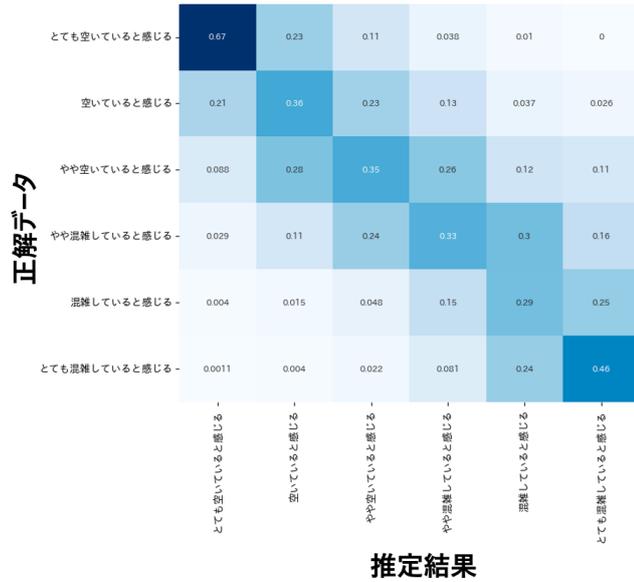


図3. 体感混雑度の推定結果

◎その他のユースケース

上記以外のユースケースとしては、下記を題材として取り上げ研究に取り組んできた。

- マルチモーダルセンシングによる観光客の心理状態(感情・満足度)の推定
- 美術館における音声ガイドダンスを利用した作品鑑賞中の心理状態・態度の推定
- VR空間内における視覚刺激(色や混雑度)が体感音量に与える影響調査
- レンタカーのドライブレコーダ映像の「観光地らしさ」の推定による、動画キュレーション
- 気象データや地理空間データに基づく、ピンポイント体感温度(じぶん温度)の推定

[研究項目 2-3] IoT センサ調整手法の異なるセンサ群・エリアへの転用手法

異なるエリアへの転用方法に関して、空間の混雑度を題材として研究に取り組んだ。屋内用ノードを用いたデータ収集では、図4に示すように、図書館や飲食店など、部屋のサイズや形が大きく異なる環境を対象とした。得られたデータを

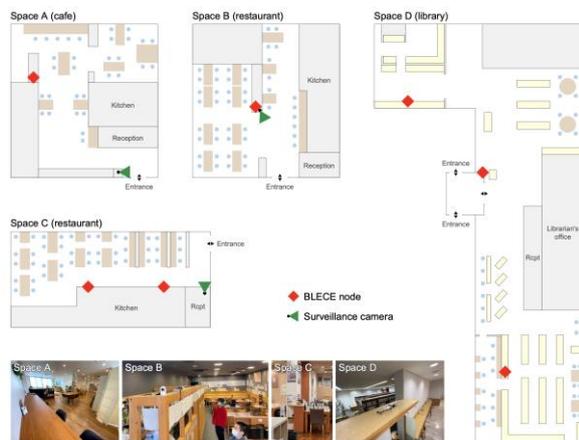


図4. 異なる4つの公共空間の概要(縮尺は異なる)

用いて、混雑度推定モデルを未知のエリアに適用できるようモデルの汎化を試みた。その結果、ノードの数に依存しないモデルの構築が可能であることを確認したが、来客層が大きく異なる空間では、ファインチューニング・ドメイン適応の導入が必要であることが明らかとなった。

研究項目3: 複数の実環境での検証

本研究は、民間企業や自治体、地域コミュニティといった幅広い外部機関との研究協力体制を構築し、センシングプラットフォームとデータ収集を実現する“仕組み”を両面からデザインすることによって、社会実装を見据えた、調査・実験を行った。

◎プラットフォーム事例1(生駒市民向けアプリ)

生駒市民向けのスマートシティアプリ「ためしば」(図 5)を 2022 年 4 月に一般公開しており、市内外問わず誰でも利用可能な状態となっている(<https://tameshiba.iopt.jp/>)。このシステムを用いることで、住民の日常生活に参加型センシングの接点を導入でき、研究項目 2-2 のユースケース(体感混雑度)に関する知覚データを長期に渡って収集できることを確認している。本取り組みは、奈良県生駒市と研究者所属機関の包括連携協定に基づき(この協定の締結には本研究課題での取り組みが大きく寄与した)、デジタル推進課(スマートシティ担当部署)および拠点形成課(都市計画担当部署)との連携で実施している。



図 5. ためしばアプリ

◎プラットフォーム事例 2(小学生の体感を集める地域のデジタル図鑑システム)

小学児童に配布されている GIGA スクール端末(Chromebook)上で動作可能な、児童の体感を集める地域のデジタル図鑑システム「にしよロボくん」(<https://www.iopt.jp/nishorobo>)を開発している。小学児童が街で発見・体感したモノ・コトの情報を投稿することが可能となっており、生駒市立生駒南第二小学校の全校児童 193 名を対象に 1 年間の調査を実施した(図 6)。2021 年度にシステム運用を開始し、現在は 3 年度目が実施されており、世代交代を繰り返しながら同一プラットフォーム上でのシステム運用ができることを確認している(2023 年度は小学校で自走できる形での運用に移行した)。本取り組みは、生駒市教育指導課(子育て・教育の担当部署)および生駒市立の複数小学校との連携により実施している[業績 1]。



図 6. 小学生による街の調査・データ入力の様子

◎プラットフォーム事例 3(ゴミ拾い用トングの IoT 化による街センシング基盤: Tongar)

ゴミ拾い用トングにセンサを搭載することで、一般市民がゴミ拾いをするだけで街のポイ捨てゴミ分布状況のデータ化を可能とする、情報収集プラットフォームを開発した (<http://research.ubi-lab.com/tongar/>)。本システムの実証実験のため、日本たばこ産業や地域清掃ボランティア団体など実際の企業や市民と連携したゴミ拾い活動を実施しており、この活動を通じて本研究全体を推し進めるための地域コミュニティとの接点を開拓した。これまでに、延べ 10 地域、400 人の参加者とのデータ収集を達成している。また、生駒市 SDGs 推進課(地域課題の解決やまちづくりを体外的な連携により取り組む部署)との連携により、市民を対象としたデータ収集を実践している。

3. 今後の展開

本研究は、実環境におけるデータ収集・モデル構築に主眼をおいて実施しており、今後の展開についても議論を進めている。具体的には、研究項目 2-2 の体感混雑度に関して、奈良交通株式会社(奈良県最大の路線バス事業者)との連携を行っているが、現段階ですでに市内循環バス 10 台に本研究で開発した BLE スキャナ機能が運賃箱システム内に導入されている。今後、この規模を拡大する議論を進めている段階であり、本研究の成果である混雑度(人数)・体感混雑度の推定モデルを組み込むことで、近年中での社会実装が可能と考えている。また、生駒市民向けスマートシティアプリ「ためしば」については、アプリ提供の仕組み(自治体がすべての機能を提供するトップダウン方式ではなく、市民参加型でアプリを構築していくボトムアップ式を採用している)が他のスマートシティアプリ・スーパーアプリとは大きく異なることから、民間事業者との共同にて、他の自治体への導入を推し進めるための議論を進めている。ゴミ拾いトングのセンシング基盤「Tongar」についても、民間事業者との連携ですでに定期的な運用がなされているところであるが、指導学生が研究成果を社会実装していくためのスタートアップを 2023 年 10 月に設立、また、データ収集を促進していくためのコンソーシアムを 2024 年 5 月に設立するなど、今後実社会での運用がさらに拡大することを予定している。その他の取り組みに関しても、研究レベル～社会実装レベルの間で差はあるものの、今後も継続して研究開発が可能な体制を構築できている。

4. 自己評価

研究目的の達成状況については、個々の要素技術・プラットフォームに関しては複数のユースケースを通じて考案・実証を進められており、一定の成果を挙げることができていると考えているが、全ての技術の一つに統合した本研究の最終目的(ユーザ参加型 IoT センサ調整基盤)の構築および社会への実装までは十分に達成できていない状況であると考えている。研究の進め方として、関係者(自治体や民間企業)との連携を前提とした研究計画を立てていたが、当初予定していたよりも関係構築に時間を要したこと、また、新型コロナウイルス感染症の影響の長期化により、一般市民を巻き込んだ実験が憚られたことから、研究を円滑に進めることが容易ではなかった。これは本研究で掲げた「実環境でのデータ収集」に固執したからこそ生じた課題であるが、シミュレーションなどを用いた実験を代替案として検討しておくことで、影響を緩和できた可能性がある。

一方で、「実環境でのデータ収集」に固執したからこそ、前述で述べた通り、自治体や民間企業と

の密な連携により社会実装が可能な形で研究開発を推し進められており、社会・経済への波及効果が期待できると考えている。

5. 主な研究成果リスト

(1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数： 27件

1. 松田裕貴, 尾崎えり子, 日高興人, 吉田友子, 小野博之, 仲林政子, 西浦弘望, 久保進也, 城野聖一: “にしよロボくん: 地域の魅力発信アプリの共創を題材とする GIGA スクール端末を用いた全校縦割り活動の実践,” 情報処理学会論文誌デジタルプラクティス (TDP), Vol.4, No.2, pp.55-66 2023.
小学児童に配布されているギガスクール端末(Chromebook)上で動作可能な, 小学児童の視点で見た街のすがた(小学児童の体感)のデータを収集するシステム・データ収集の仕組みを提案した. 実証実験として, 生駒市立生駒南第二小学校の全校児童 193 名を対象に 1 年間の調査を実施した. その結果, 小学児童が意欲的にデータ収集に参加できていること, データ収集が可能であることを確認した.
2. Yuji Kanamitsu, Eigo Taya, Koki Tachibana, Yugo Nakamura, <u>Yuki Matsuda</u> , Hirohiko Suwa, Keiichi Yasumoto: “Estimating Congestion in a Fixed-Route Bus by Using BLE Signals,” Sensors, Vol.22, No.3:881, pp.1-15, 2022.
カメラなどを用いないプライバシーに配慮した路線バス車内の乗客数(混雑度)の推定手法として, 路線バスの車内に設置した BLE アドバタイジングパケットのスキヤナによって取得されるデータを利用する方法を提案した. 実際の路線バス 39 ルートから 662 バス停間のデータを収集し提案手法を評価した結果, MAE 2.49 人(MAPE 38.8%)の誤差での乗客数推定が可能であることを示した.
3. Masaki Gogami, <u>Yuki Matsuda</u> , Yutaka Arakawa, Keiichi Yasumoto: “Detection of Careless Responses in Online Surveys Using Answering Behavior on Smartphone,” IEEE Access, Vol.9, pp.53205-53218, 2021.
クラウドソーシングを用いたアンケート調査において, 回答者が適切な認知コストを払わずに回答してしまう状況(Satisficing)を検知するため, タップやスクロールを始めとする画面操作ログに基づく不良回答検知手法を提案した. クラウドソーシングプラットフォーム上で募集した 5,692 名の被験者による実験を行った結果, 提案手法では Recall 85.9%での不良回答を行ったユーザの検知が可能であることを確認した.

(2) 特許出願

研究期間全出願件数： 2件(特許公開前のもものは件数にのみ含む)

1	発 明 者	立花巧樹, 中岡黎, 宮地篤士, 富田周作, 松田裕貴, 諏訪博彦
	発 明 の 名 称	情報処理システムおよび情報処理方法
	出 願 人	国立大学法人 奈良先端科学技術大学院大学
	出 願 日	2022 年 5 月 30 日
	出 願 番 号	特願 2022-087843

	概要	ゴミ拾い用トングにセンサを搭載することで、一般市民がゴミ拾いをするだけで街のポイ捨てゴミ分布状況のデータ化を可能とする、情報収集プラットフォームに関する特許.
2	発明者	後上正樹, 荒川豊, 松田裕貴, 安本慶一
	発明の名称	モデル構築装置および評価装置
	出願人	国立大学法人 奈良先端科学技術大学院大学
	出願日	2020年12月7日
	出願番号	特願 2020-202984
	概要	アンケート回答時の画面操作ログの分析によって、回答者の適切な認知コストが支払われていない状況 (Satisficing) を検知する手法に関する特許.

(3) その他の成果 (主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

1. Yuki Matsuda, Shogo Kawanaka, Hirohiko Suwa, Yutaka Arakawa, Keiichi Yasumoto: “ParmoSense: Scenario-based Participatory Mobile Urban Sensing Platform with User Motivation Engine,” Sensors and Materials, Vol.34, No.8, pp.3063-3091, 2022. (国際ジャーナル)
2. Yuki Matsuda: “IoPT: A Concept of Internet of Perception-aware Things,” The 12th International Conference on the Internet of Things (IoT '22), pp.201-204, Nov. 7-10, 2022. (国際会議プロシーディングス)
3. 松田裕貴, 田谷瑛悟, 諏訪博彦, 安本慶一: “BLECE: BLEを用いた公共施設・飲食店の混雑度推定手法,” 電子情報通信学会技術研究報告, センサネットワークとモバイルインテリジェンス研究会 (SeMI), Vol.122, No.46, pp.40-45, 2022年5月. (国内研究会)
【2022年度優秀発表賞, および2022年度若手研究奨励賞を受賞】
4. 松田裕貴: “みんなの手で創る, 人にやさしいIoT,” 情報処理学会 IPSJ-ONE 2023, 2023年3月. (招待講演)
5. 第5回日本ICT教育アワード「経済産業大臣賞」, 教員からのボトムアップで推進する生駒市のやさしいICT教育改革, 2022年11月. (受賞)