

人の知覚の集合知による 参加型IoTセンサ調整プラットフォームの設計

松田 裕貴^{1,2} 中村 優吾³ 諏訪 博彦¹ 安本 慶一¹

概要：数え切れないほどのIoTデバイスが我々の生活環境に溶け込み、人や環境を絶え間なく観測・把握したうえで多様なサービスを提供できるようになっている。しかしながら、IoTセンサが観測する情報と人々が知覚する情報は完全に一致するものではないため、その相違がサービスの質に影響を与える可能性がある。この問題を解決するため、本研究では、街ゆく人々の「知覚」を参加型センシングの仕組みで収集するとともに、IoTセンサデータと組み合わせることにより、人の知覚を理解できるIoT (Internet of “Perception-aware” Things : IoPT) を実現することを目指している。本稿では、まず本研究における仮定の是非を確認するための予備調査を実施した。その結果、IoTセンサと人の知覚には一定の関係性はあるものの差異が存在すること、人の知覚はその人や社会の状況によって大きく変動することが明らかとなった。この結果に基づき、本研究のコンセプトを実現するための参加型IoTセンサ調整プラットフォームの設計を行うとともに、達成に向けての解決すべき課題について整理する。

Design of Participatory IoT Sensor Tuning Platform Utilizing Collective Human Perception

YUKI MATSUDA^{1,2} YUGO NAKAMURA³ HIROHIKO SUWA¹ KEIICHI YASUMOTO¹

1. はじめに

Internet of Things (IoT) の技術革新はめざましく、数え切れないほどのIoTデバイスが我々の生活環境に設置される、あるいは複数のIoTデバイスを我々自身が持ち歩くことが当たり前の「世界観」がそう遠くない未来にやってくる事が予想される。多数の人々が生活する都市環境においてはより顕著であり、様々な企業・自治体・個人の有するIoTデバイスが街に設置され、街中から絶えずデータが生みだされる状況が想定される。そうした種々のIoTデバイスから得られるデータを活用し、スマートシティサービス(例えば、観光ナビゲーション)を提供するにあたって、いかに実際に使用する「人」に寄り添ったサービスを提供できるか? という観点は、スマートシティの概念を人々に受容してもらえるかの重要なファクターであると考えられる。

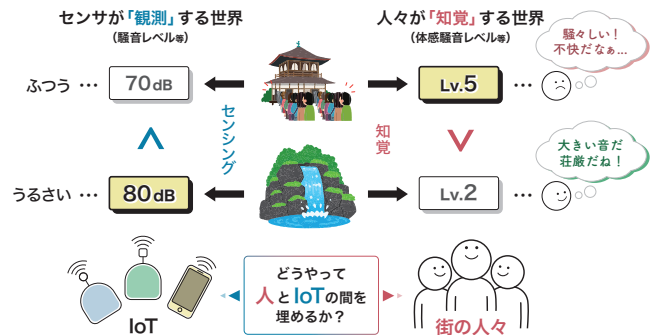


図1 本研究のモチベーション (IoT と人の観測する世界の相違)

現状提供・開発されているサービスではIoTセンサデータに基づく環境情報が用いられることがあるが、人間の「知覚」は騙されやすく、機械的に正しいデータが必ずしも人の「体感」と一致するとは限らない。騒音レベルを例に上げると(図1)、混雑している寺(70dB)と滝に程近い寺(80dB)において、環境センサは騒音レベルを測定可能であるが、その状況は理解できないため、単純に音量という軸で比較することになる。これに対し人の感じる「騒

¹ 奈良先端科学技術大学院大学

Nara Institute of Science and Technology

² 国立研究開発法人科学技術振興機構 さきがけ, JST PRESTO

³ 九州大学, Kyushu University

音」は、環境音によって与えられる不快感の影響を受け人の知覚する環境情報が変化すると考えられる（この例では、体感の騒音レベルが前者は「騒がしい」、後者は「荘厳だ」というように、実測データと体感が入れ替わる可能性がある）。これは、温湿度、混雑度、安心感、快適性、景観のよさなど、人が感覚器官を通じて認識する様々な対象について同様に生じると考えられる。実際に、日本気象協会*1は、機械的に取得された気象データに加えて、体感温度指数や不快指数といった、人の体感に近い情報を独自に提供している。このことから、人にとってサービスがより有用なものとなるためには、IoT センサが人の知覚を理解し、人に寄り添ったデータを出力可能となることが今後求められると考えられる。

こうした人の知覚を集める方法として、SNS のデータを蓄積・分析することによるソーシャルマイニングや、実際にその場にいる人に直接データを提供してもらうユーザー参加型センシングといったアプローチが提案されてきた [1], [2], [3]。しかしながら、ソーシャルマイニングは、日和見的に発信されるユーザーの投稿から情報を汲み取る仕組みであるため、意図する場所・タイミングでのデータ収集が困難という問題が存在する。また、参加型センシングは人にデータ提供を依頼できるという強みがあるものの、人が居ない場所のデータが取得できないという問題が依然として存在する。

本研究では、街ゆく人々の「知覚」を参加型センシングの仕組みを活用しつつスペースに収集するとともに、対応する場所の IoT センサデータと組み合わせることにより、人の知覚を理解できる IoT、すなわち **Internet of “Perception-aware” Things (IoPT)** を構築するための基盤実現を目指している。本稿では、まず本研究における仮定の是非を確認するための予備調査を実施した。その結果、IoT センサと人の知覚には一定の関係性はあるものの差異が存在すること、人の知覚はその人や社会の状況によって大きく変動することが明らかとなった。この結果に基づき、本研究のコンセプトを実現するための参加型 IoT センサ調整プラットフォームの設計を行う。

2. 予備調査

本研究で想定する、IoT センサと人の知覚の間の差異が実際にどのような形で現れるのかを確認するため、予備調査を実施した。サンプル数を十分に確保するために、調査はクラウドソーシングによって実施した。オンライン環境での回答が可能である題材として、本調査では「視覚」で捉える「体感混雑度」を選択した。具体的なタスクは、図 2 に示すように、ある街の様子を撮影した写真を与えて自身が実際にその場所にいることを想定してもらい、「あなた

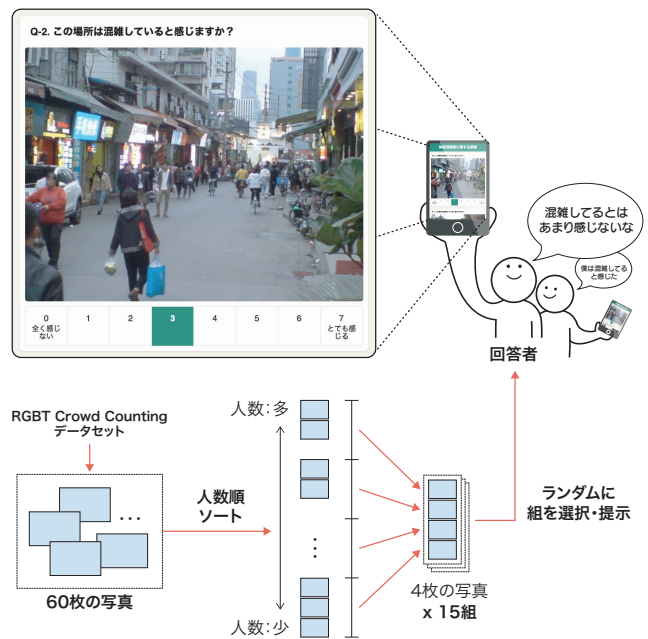


図 2 予備調査の概要

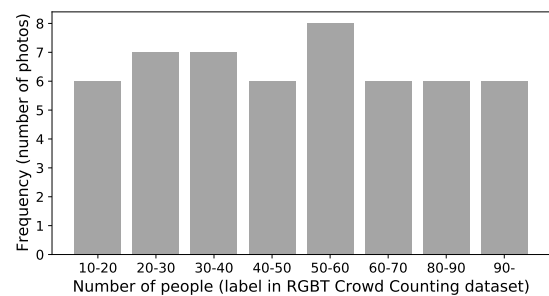


図 3 予備調査に使用する写真に映り込んでいる人数の分布

が写真の場所に居る場合に、混雑していると感じるかどうか？」という質問に 8 件法（0：全く感じない～7：とても感じる）で回答するというものである。

提示する写真は、RGBT Crowd Counting データセット [4] の中から、一人称視点で撮影された人の往来する街の写真という条件のもと 60 枚を選定した。また、各写真について画像中に映っている人数がラベルデータとして付与されている（このラベルを画像認識等で正確に推定することが想定されている）ため、本調査における「IoT の観測する世界」データとして使用する。なお、写真に映り込んでいる人数は図 3 に示すとおり 10～120 名の間でばらばらっている。

本調査では、上述の 60 枚の写真の中から 1 名の回答者につき 4 枚の写真を提示し、それらに対する回答を依頼することとした（図 2）。4 枚の写真は、写真を人数ラベル順にソートし分割した 4 群からそれぞれ 1 枚ずつ抽出することで、回答者による人数の偏りを小さくするようにした（結果として、被りのない 15 組の写真セットが得られる）。アンケートシステムは、15 組の写真セットからランダムに 1 組を回答者に提示する。

*1 <https://tenki.jp/>

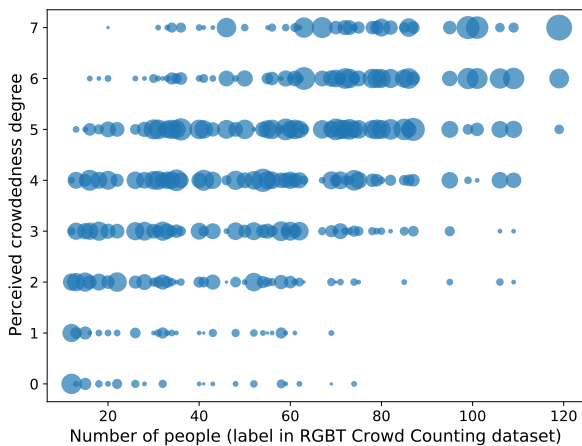


図 4 人数ラベルと体感混雑度の関係 (状況指定なし)

調査には Yahoo!クラウドソーシング*2を使用し、2021年5月3日～4日に合計1,100人の回答者にタスクを依頼した。事前処理として、不適切回答を除去するスクリーニング(4問中3問以上の同一回答を条件とした)を施すことにより、937人分(3,748サンプル)の有効回答を得た。実際の人数と体感混雑度の関係を図4に示す。横軸はデータセットの人数ラベルデータ、縦軸は本調査で収集した体感混雑度、プロットの円の大きさは回答の頻度を表している。人数ラベルデータと体感混雑度データの相関分析の結果、相関係数は $r = 0.56$ ($p = 0.00$)となり、弱い正の相関があることが確認された。一方、人が知覚した情報は非常に大きなばらつきを有するものであることも確認できる。このばらつきは、提示する写真の道幅や人の距離によって人数以上の情報を解釈していることや、その解釈の個人差が大きいことが要因の一つと考えられる。このばらつきは、本研究で仮定するセンサデータと知覚データの逆転現象を生じさせる一因になると考えられる。また、回答の分布がグラフ左上にシフトしていることも確認できる。この点について、本調査のタスク最終問として設けた本調査に対する感想(フリーテキスト形式)の回答結果を確認したところ、複数の回答者が「新型コロナウイルス感染症」に関して言及していた。本調査期間は東京・大阪・京都・兵庫に緊急事態宣言が発令されている期間であったため、感染症を意識した回答が暗黙的になされていた可能性がある。

上記結果を受け、新型コロナウイルス感染症による影響がある状況(以降、コロナ後)／ない状況(以降、コロナ前)を回答者に想像してもらった上での追加調査を実施した。それぞれの状況を想像してもらうために、図5(a), (b)の状況指定文を追加した。提示する写真セットは上記と完全に同一である。状況ごとに別のクラウドソーシングタスクを作成し、2021年5月6日・7日に回答者1,100人ずつにタスクを依頼した。上記同様の不適切回答スクリーニングを施した結果、それぞれ834人分(3,336サンプル)、

*2 <https://crowdsourcing.yahoo.co.jp/>

以下の質問では、次の状況をしっかり頭の中に想像しながら、回答してください。

1. 新型コロナウイルス感染症があなたがいる地域でも感染拡大しており、緊急事態宣言が発令されている状況です。
2. あなたは写真に映っている道をこれから歩いて通過します。
3. 写真に映っている人々は、一般市民です。

(a) 状況指定文《コロナ後》

以下の質問では、次の状況をしっかり頭の中に想像しながら、回答してください。

1. 新型コロナウイルス感染症の問題が発生する“前”(コロナ前)を思い出してください。
2. あなたは感染症の心配をしなくてよく、自由に外出できる状態です。
3. あなたは写真に映っている道をこれから歩いて通過します。
4. 写真に映っている人々は、一般市民です。

(b) 状況指定文《コロナ前》

図 5 状況指定文



図 6 人数ラベルと体感混雑度の関係 (状況指定あり：コロナ後)

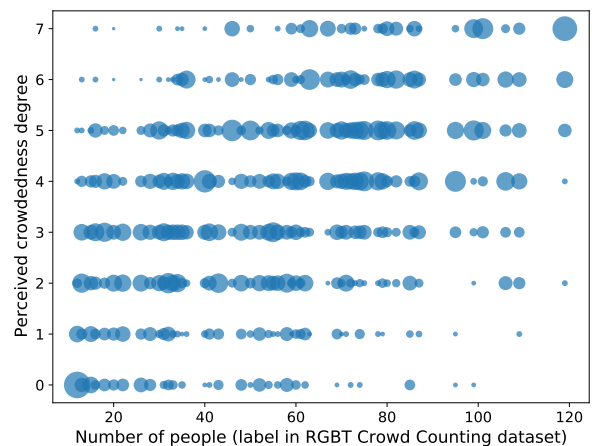


図 7 人数ラベルと体感混雑度の関係 (状況指定あり：コロナ前)

603人分(2,412サンプル)の有効回答数を得た。各状況における実際の人数と体感混雑度の関係を図6および図7に示す。コロナ後を状況指定した場合(図6)に関しては、調査実施期間に回答者がすでに置かれている状況とほぼ同等の状況を想像することを指示しているため、状況指定な

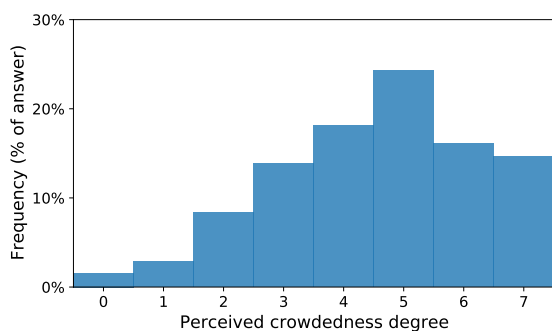


図 8 状況指定（コロナ後）における回答の分布

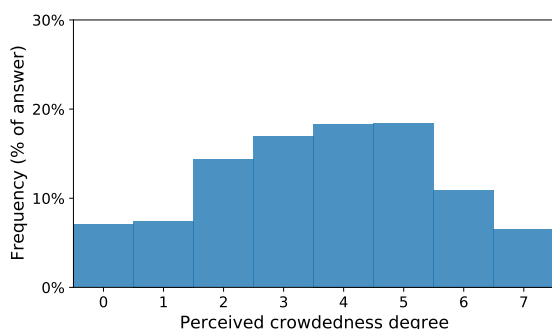


図 9 状況指定（コロナ前）における回答の分布

しの場合（図 4）と同様の結果が得られた。これに対して、コロナ前を状況指定した場合（図 7）に関しては、その他とは大きく異なる回答分布が得られた。

そこで、これら 2 つの状況における回答分布（図 8, 図 9）が有意に変化しているのかを 2 群間の統計検定によって確認する。まず、不適切回答スクリーニングによって各写真に対する回答数が各状況で異なっているため、それらが一致するようにランダムサンプリングを行った結果、回答数が一致している 2,412 サンプルをそれぞれ得た。次に、各分布の正規性を確認するため、有意水準 0.05 にてコルモゴロフ・スミルノフ検定 (Kolmogorov-Smirnov Test) を行った結果、いずれも $p = 0.00$ ($p < 0.05$) となった。各分布ともに正規性が認められなかったため、有意水準 0.05 のマンホイットニーの U 検定 (Mann-Whitney U Test) によって 2 群間の比較を行った。結果は、 $p = 0.00$ ($p < 0.05$) となり、コロナ後・コロナ前における人の体感混雑度の間には有意差が認められた。この結果から、人の知覚が自身が置かれた状況によって変動することが示された。

以上の結果から、次の 2 点が明らかとなった：

- IoT センサと人の知覚には一定の関係性はみられるものの、人の知覚は大きなばらつきを有するものであるため IoT センサとの相違が生じる状態が発生する。
- 人の知覚は人や社会の状況（コンテキスト）によって有意に変化することから、IoT センサとの関係性も動的に変化する。

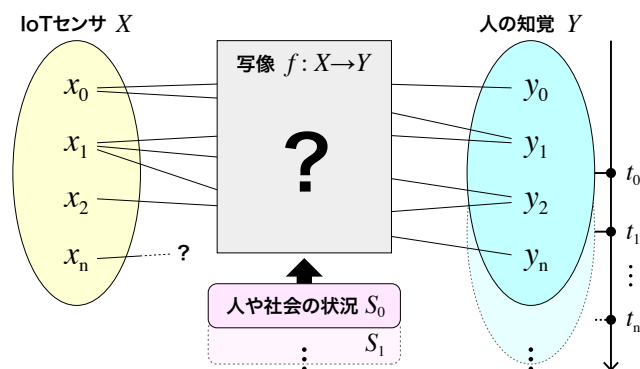


図 10 IoT センサと人の知覚の関係

3. 参加型 IoT センサ調整プラットフォーム

予備調査の結果から、IoT センサを活用しつつも人に寄り添ったスマートシティサービスを提供可能とするためには、人の知覚を機械的に得られるデータから推定する必要があることが示された。本研究では、人の知覚を IoT センサへと教え込むことによって人の知覚を理解できる IoT、すなわち **Internet of “Perception-aware” Things (IoPT)** を構築するための参加型 IoT センサ調整プラットフォームを提案する。

3.1 人の知覚による参加型 IoT センサ調整手法

人の知覚による IoT センサの調整は、IoT センサ (IoT が観測する世界) と人間の知覚 (人間が観測する世界) の写像を構成することといえる。しかし前述の通り、人の知覚にはばらつきがありかつ状況や時間によって大きく変動するものであることから、写像は図 10 に示すように動的に変化すると想定される。そこで、街ゆく人々の「知覚」を参加型センシングの仕組みを活用しつつスパースに収集するとともに、対応する場所の IoT センサデータと組み合わせることにより、IoT センサと人の知覚の関係性をモデル化することでこの課題を解決する。

図 11 に手法の概要を示す。まず、街に実際に居る人々を対象とした電子アンケートを、一般市民が利用する端末 (スマートフォン等) を介して配信し人の知覚データを収集する。ここで得られる人の知覚データは、間隔尺度といった定量的データや自由回答 (テキスト形式) といった定性的データを想定している。定量的データについては、図 11 右上に示すように、人の知覚データを「ばらつき」を包含する分布として取り扱う。また、定性的データに関しては 4 章にて示す感性工学の手法を取り入れることで数値化したうえで取り扱う。さらに、同地点における都市環境に設置された IoT センサデータや都市属性、人・社会のコンテキストを入力し、人の知覚データを正解とする **IoPT モデル** を構築する。なお、構築するモデルは、入力に対してひとつの推定値を出力するのではなく、ばらつき情報を保持

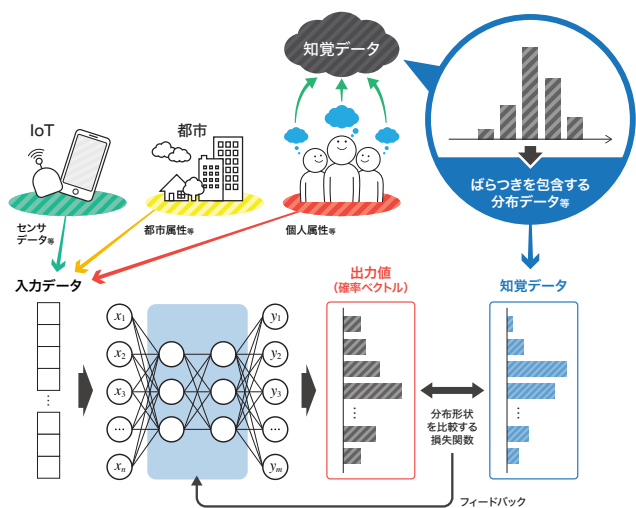


図 11 人の知覚による参加型 IoT センサ調整手法

したデータ表現によって結果を出力する。例えば、図 11 右下に示すように、分類モデルにおける出力信号（活性化関数によって導出される各クラスの確率ベクトル）を用いて分布を表現することなどが考えられる。また、知覚データの収集はモデル構築後も継続し随時モデルをアップデートすることにより、人・社会のコンテキスト変化によるモデルの劣化を防ぐ仕組みをもたせる。

3.2 プラットフォームの振る舞い設計

人の知覚による参加型 IoT センサ調整手法を時系列で整理すると、1) 導入フェーズ、2) 知覚獲得フェーズ、3) 運用フェーズ、の3段階が存在すると考えられる。本稿で提案するプラットフォームに求められる役割は各段階において異なると想定されるため、本節では IoT センサ調整の進行度ごとのプラットフォームの振る舞いを設計する(図 12)。

1) 導入フェーズ

ある環境に IoT センサを導入したばかりの初期段階である。この段階では、センサデータ・知覚データが十分に収集できていないため、IoPT モデルは構築できない。しかしながら、コールドスタート問題を回避するためには、この段階からサービスを提供できることが望ましい。そこで、数式的に定義されたモデル(単純な例では線形モデル)を IoPT モデルの初期状態として与える。なお、他の環境ですでに類似条件での IoPT モデルが構築済みである場合は、構築済みモデルを初期状態として与えることも考えられる。

2) 知覚獲得フェーズ

IoT センサからのデータおよび人々から知覚データを蓄積する段階である。知覚データは参加型センシングの仕組みを用いて収集するが、収集する知覚の種類や対象環境に応じて、人々の持つパーソナルデバイス(スマートフォン等)だけでなく、公共端末(インタラクティブサイネージ等)も加えて利用することが考

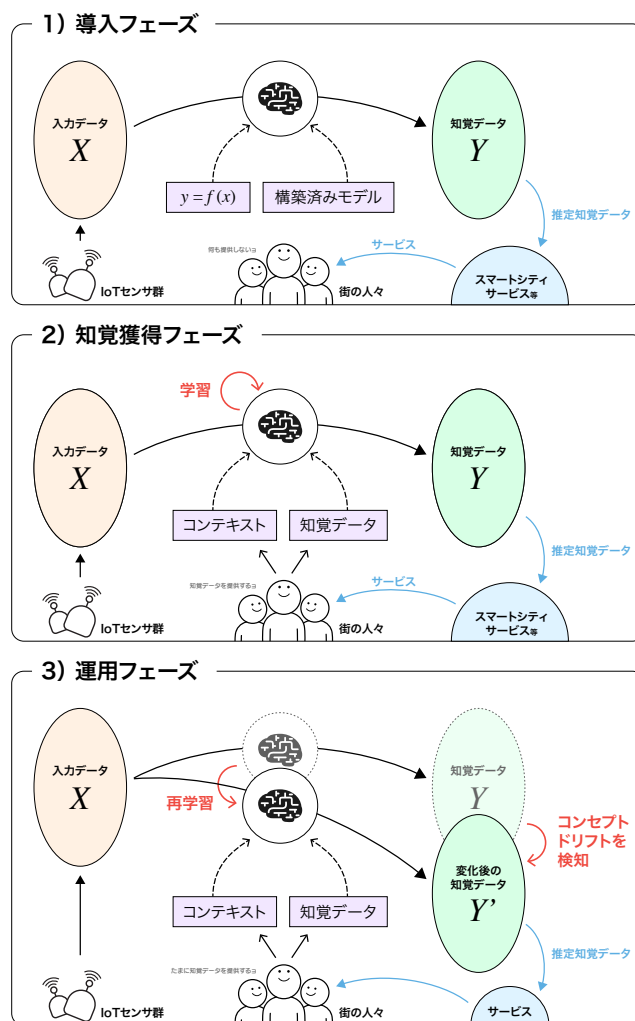


図 12 参加型 IoT センサ調整プラットフォームの振る舞い

えられる。また、知覚データの問い方については、直接的に質問を投げかけるだけでなく、回答することの対価として体験を提供するゲーミフィケーション [5] や、つい回答したくなるナッジ(あえて誤った情報を示して訂正してもらう、等)を導入することで、知覚データの質・量を確保する。IoT データ・知覚データがある程度収集された段階で、IoPT モデルを構築する。全ての条件を網羅したモデルは多量のデータを要するため、条件を限定したモデルを順次構築するとともに初期状態として与えたモデルを置換していくことで、段階的な知覚獲得を実現する。

3) 運用フェーズ

構築された IoPT モデルへの置換が十分に進み、主として運用される段階である。短-中期的には構築済みモデルでの対応が可能であるが、長期的には人や社会の状況変化による知覚の変化、すなわちコンセプトドリフト [6] が生じることが想定される。そのため、モデル構築後も知覚データを随時収集することで、コンセプトドリフトの検出およびモデルの更新を行う。

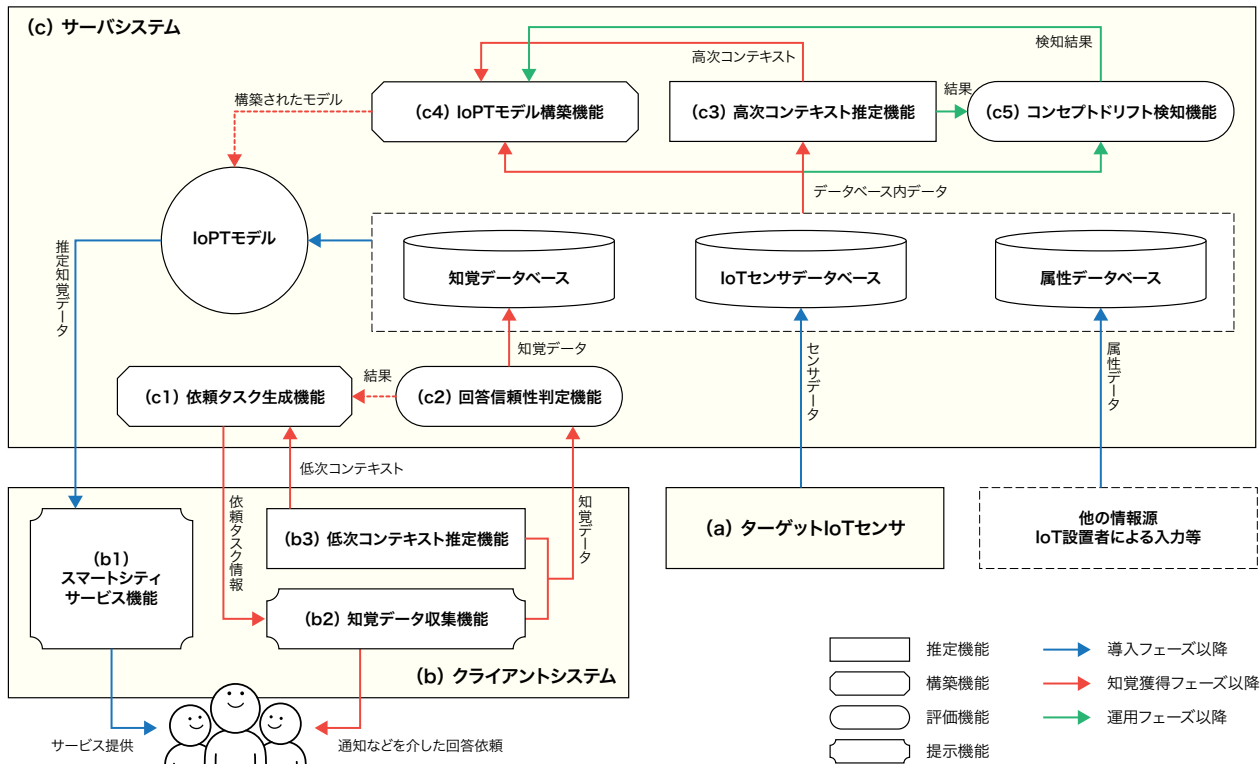


図 13 参加型 IoT センサ調整プラットフォームのアーキテクチャ

3.3 プラットフォームのアーキテクチャ設計

人の知覚による参加型 IoT センサ調整プラットフォームのアーキテクチャを設計する。それぞれの構成要素について図 13 および以下に示す。

(a) ターゲット IoT センサ

ある地域に設置された調整対象の IoT センサ。なお、IoT センサの集合（環境センサなど）、IoT センサデータを用いて特定の環境情報を推定するシステム（LiDAR を用いて混雑度を推定するシステムなど）などが対象となりうる。得られたデータは、IoT センサデータベースに格納される。

(b) クライアントシステム

ユーザ視点での機能（スマートシティサービスを提供するシステム）と、プラットフォーム視点での機能（知覚データを収集するシステム）の 2 面性を持つシステム。ユーザが持つパーソナルデバイス（スマートフォン等）や公共端末（インタラクティブサイネージ）などのデバイス上で動作するアプリケーションとして実装される。

(b1) スマートシティサービス機能

IoT が観測したデータやその他の情報源から得たデータを元に、ユーザへのスマートシティサービス（ナビゲーション機能やチャットボット機能等）を提供する機能。

(b2) 知覚データ収集機能

サーバシステム (c1) が生成した回答タスクを、

通知等を利用してユーザに配信し回答を依頼する機能。ゲーミフィケーションやナッジなどを活用した回答促進の仕組みや、回答の信頼性判定 (c2) に用いる画面操作ログ収集の仕組みも合わせて有する。

(b3) 低次コンテキスト推定機能

ユーザの行動認識や移動モード認識などによって、現在のユーザの状況（低次コンテキスト）を推定する機能。

(c) サーバシステム

IoT センサデータおよび知覚データを集約し、IoPT モデルを構築するためのシステム。

(c1) 依頼タスク生成機能

クライアントシステム (b3) が推定した低次コンテキストを元に、依頼先（誰に依頼するか）、依頼タイミング（どのタイミングで依頼するか）、依頼内容（どのような知覚の回答を依頼するか）を決定する機能。また、過去の回答信頼性判定 (c2) の結果から、信頼性が低下しやすい状況ではその防止機能（報酬の変更、ナッジの適用など）の動的な指定を行う。

(c2) 回答信頼性判定機能

知覚データの収集結果が信頼できるかどうかを、回答者の振る舞い [7] や回答内容によって判定する機能。適切な回答であると判断されたデータは、知覚データベースに格納される。

(c3) 高次コンテキスト推定機能

複数人に関する低次コンテキストを分析することで、高次コンテキスト（社会的な状況）を推定する機能。

(c4) IoPT モデル構築機能

IoT センサデータ、低次・高次コンテキスト、属性データを入力とし、知覚データをラベルとした機械学習モデル構築を行う機能。

(c5) コンセプトドリフト検知機能

IoT センサデータや高次コンテキスト（入力データ）、知覚データ（ラベル）を過去のモデル構築時点でのデータと比較することで、大きな変動（コンセプトドリフト）を検知する機能。

4. 関連研究

4.1 人の知覚・体感に関する研究

人の知覚・体感に着目した研究は、生活環境（住環境や乗り物）の設計に関する分野をはじめとし、様々な分野で古くから取り組まれている。

体感の数値化

体感を数式的に表現する方法としては、ウェーバー・フェヒナーの法則が知られている。この法則は、感覚量 P は刺激量 I の対数に比例する ($P = k \log I$, k は定数) ことを示すものであり、体感重量や体感音量などはこれに従うとされる。以下では、体感の数値化およびその応用に関する研究について述べる。

体感振動： 人が知覚できる振動の閾値を振動数 Hz と振幅 dB の二次元空間上に描くカーブによって表現可能とする「Reiher-Meister 感覚曲線」が 1930 年代に提案されており、現代では ISO-2631 などを始めとする国際標準規格としての定義が進められている [8]。しかし、多数の定義は存在する一方で、曖昧な人の知覚を取り扱うものであることから、統一的な指標は確立されていない。

体感温度： 室内に居る人の体感温度を、熱画像データから推定される部屋形状や輻射熱、人の姿勢や人自身の温度といった情報をもとに推定し、空調設備を自動制御する手法を三輪らが提案している [9]。また、三栖らは、室内の温度が一定であったとしても照明の色によって体感温度が変化することを明らかにしている [10]。

体感音量： 寺田は、ある音を提示した時の体感音量が、提示前・提示中に聞こえる周辺の雑音によって変化することを明らかにしており、この影響を考慮した上で正確な情報を人に伝えるための音情報提示システムを提案している [11], [12]。

体感時間： Karşilar らは、歩行アニメーションの速度の違いによって映像の時間経過の感じ方が異なることを明らかにしている [13]。また長谷川らは、スマートグラス上で再生される動画速度が視聴後の作業速度に影響を与えること

を明らかにしている [14]。

安心感： 安心感は人間の五感にはないが、それらの情報から人が解釈した結果と考えられる。夜道の安心感（夜道における視認性・見通し）を例に上げると、松本らは照明基準を満たしている街路灯について、十分な視認性効果が得られる場所と得られない場所が存在することを指摘している [15]。また、小林らは高照度の街路灯よりも低照度の街路灯を分散的に配置するほうが、夜道の見通しが良くなることを確認している [16]。

感性の数値化

人のある事物に対する感覚・印象・価値観を「感性」と定義し取り扱う研究分野として、感性工学がある。例えば、中村らは、照明刺激を変化させた際の「くつろぎ感」が、心理的指標および生理的指標（脳波や心電）とどのように対応付けられるのかを明らかにしている [17]。飛谷らは、CG で構築した人の素肌の質感が視覚的にどのような印象を与えるのかの調査を通じて、素肌の物理特性情報から人に与える印象を推定可能にした [18]。このように、直接的に IoT などセンシングされた情報とは結びつかない高次な感覚（感性）に関しても、数値化に向けた研究が進められている。

4.2 都市環境センシングに関する研究

都市環境を対象としたセンシング手法はこれまで多くの提案がなされている。以下では、本研究で取り扱う設置型デバイスを用いた都市環境センシング、およびパーソナルデバイスを用いた都市環境センシングについて述べる。

設置型デバイスを用いた都市環境センシング

街の様々な場所に設置されたデバイス・センサによる都市環境センシングは、センサネットワークなど古くから数多くの研究が取り組まれてきた。ここでは特に、本稿で題材とした混雑度や人の動きに関する研究について述べる。混雑度や人の動きのセンシングには、Wi-Fi や BLE などの電波データ、カメラによる映像データ、測域センサによる点群データなど様々なデータに基づく手法が提案されている。Fukuzaki らは、Wi-Fi のプローブリクエストパケットを受信することにより、人流を推定する手法を提案している [19]。Nakashima らは、路線バスに搭載されているドライブレコーダーの車内映像から画像認識による乗車人数の推定手法を提案している [20]。また山田らは、路線バス車内の測域センサにより得られる点群から乗車人数・乗降人数を推定する手法を提案している [21]。

設置型デバイスによるセンシングは、ある場所に設置すると常時データ収集が可能であるメリットがありつつも、長期の運用のためにはセンサの調整（リキャリブレーションなど）にコストがかかることや、本研究の問題意識である人の知覚を考慮できていない点においてデメリットがあると考えられる。

パーソナルデバイスを用いた都市環境センシング

スマートフォンなど一般人が個人で利用するデバイス（パーソナルデバイス）の普及に伴って、それらのセンサや通信機能を活用した都市センシングが広まりつつある。ここでは特に、参加型センシングとソーシャルセンシングに関する研究について述べる。

参加型センシング：参加型センシングは、都市に関する情報収集を、都市に点在する一般人（市民や訪問者）に対して依頼する手法である。その多くは、各人の有する自身のパーソナルデバイス（スマートフォンなど）を用いて情報を提供することが特徴である。これまで著者らは、スマートフォンに搭載されている照度センサを用いて、街灯照度を推定し夜道の明るさ・安全性を推定する手法を提案している [1]。また、参加型センシングを用い体感情報を収集する例として、荒牧・北らは、街なかで位置情報付きつぶやきを投稿することにより、街の様相をオノマトペや量的尺度などで表現する 100 ninmap を提案している [3]。

参加型センシングは人にデータ提供を依頼できるという強みがあるものの、人が居ない場所のデータが取得できないという問題が依然として存在する。

ソーシャルセンシング：ソーシャルセンシングは、SNS のデータを蓄積・分析することによって、社会の様子を明らかにする手法である。Resch らは、人が危険だと感じる街の場所を SNS やセンシングデータを元に明らかにする手法を提案している [2]。また、Wakamiya らは、経路案内を行う際に人の記憶に残りやすい直感的な推薦経路を、ソーシャルネットワークや群衆データをもとに生成する仕組みを提案している [22]。

しかしながら、ソーシャルマイニングは、日和見的に発信されるユーザの投稿から情報を汲み取る仕組みであるため、意図する場所・タイミングでのデータ収集が困難という問題が存在する。

4.3 本研究の立場と議論・展望

関連研究を踏まえての、本研究の立場を図 14 に示す。本研究で取り扱う 2 つの都市環境センシング技術（参加型センシングおよび設置型 IoT センシング）には、それぞれ図 14 に示すような長所・短所がある。本研究は、設置型 IoT センサに人の知覚を教え込むアプローチを取ることによって、設置型 IoT センサがあたかもその場に人がいるかのように都市環境センシングを実行することを可能とするものである。つまり、本来その場所にいる「人」がするしかなかった知覚データの生成を「IoT」にオフロードすることにより、参加型センシングのパフォーマンスを向上させることが期待できる。また、参加型センシングで継続的な知覚データ収集を行うことで IoPT モデルの更新が可能となるため、両手法のハイブリッド運用は有用と考える。

しかしながら、本稿でおこなった予備実験の結果から人

	長所	本研究の立場 補い合って 解決する	短所
参加型 センシング	街に居る人々に 状況を聞くことが可能		人がその場に居ないと データが取得できない (時空間網羅性の問題)
設置型 IoT センシング	設置することで 継続的にデータ収集可能		人の「体感・知覚」に合う データが取得できない

図 14 これまでの技術の長所・短所と本研究の立場

の知覚は想定以上にばらつきが大きいことも明らかとなった。IoT が人の知覚を具体的に再現するためには、推定したい対象の人の状況あるいは属性を限定することが求められると想定される。この場合、参加型センシングによる知覚データ収集の網羅性の問題が無視できない。今後のプラットフォーム・手法を構築していくにあたっては、いかに知覚データを少数に抑えつつ効率よく IoT センサ調整を行うかについて検討する必要がある。

5. おわりに

本研究では、IoT が観測する世界（センシングによって得られるデータ）と人が観測する世界（知覚によって解釈されたデータ）の間に差異が存在する可能性に着目し、この隔たりを埋める仕組みを構築することで、より人に寄り添ったスマートシティの実現を目指している。

本稿では、まず我々が仮定する「IoT センサと人が観測する世界に差異が存在する」という状況が存在するのかを確認するため、クラウドソーシングを用いた予備調査を実施した。異なる人数が映り込んでいる街の写真に対する体感混雑度を収集・分析したところ、両者の間に差異が存在することが確認された。また、自身の置かれている状況によって人の知覚は有意に変動することも明らかとなった。

この予備調査を踏まえ、参加型センシングの仕組みによって人の知覚を IoT に獲得させる、IoPT (Internet of “Perception-aware” Things) の概念およびその構築手法について提案するとともに、提案手法を実現するためのプラットフォームの設計を行った。予備調査の結果から、提案手法の実現に対する懸念も明らかとなったため、今後はプラットフォームおよび IoPT 構築手法の研究を進めていくとともに、それらの懸念点への対応も検討する。

謝辞 本研究の一部は、JST さきがけ (JPMJPR2039) の助成を受けて行われたものです。

参考文献

- [1] 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.
- [2] Bernd Resch, Anja Summa, Günther Sagl, Peter Zeile, and Jan-Philipp Exner. Urban emotions – geo-semantic emotion extraction from technical sensors, human sensors and crowdsourced data. In *Progress in Location-Based Services 2014*, pp. 199–212, 2014.

- [3] 荒牧英治, 北雄介, 宮部真衣, 若宮翔子, 河合由起子, 清田陽司. 広がり続ける 100 ninmap project —街歩きから不動産検索まで—. 人工知能, Vol. 32, No. 4, pp. 563–568, 2017.
- [4] Lingbo Liu, Jiaqi Chen, Hefeng Wu, Guanbin Li, Chenglong Li, and Liang Lin. Cross-modal collaborative representation learning and a large-scale rgbt benchmark for crowd counting. In *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2021.
- [5] Yutaka Arakawa and Yuki Matsuda. Gamification mechanism for enhancing a participatory urban sensing: Survey and practical results. *Journal of Information Processing*, Vol. 57, No. 1, pp. 31–38, 2016.
- [6] Jie Lu, Anjin Liu, Fan Dong, Feng Gu, Joao Gama, and Guangquan Zhang. Learning under concept drift: A review. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, Vol. 31, No. 12, pp. 2346–2363, 2018.
- [7] Masaki Gogami, Yuki Matsuda, Yutaka Arakawa, and Keiichi Yasumoto. Detection of careless responses in online surveys using answering behavior on smartphone. *IEEE Access*, Vol. 9, pp. 53205–53218, 2021.
- [8] 櫛田裕. 床の振動性状と最適環境を考慮した設計法に関する研究: 床振動評価基準に関する考察. 日本建築学会計画系論文報告集, Vol. 404, pp. 1–7, 1989.
- [9] 三輪祥太郎, 渡邊信太郎, 平位隆史, 松本崇. 体感温度を制御するエアコン. 日本ロボット学会誌, Vol. 32, No. 3, pp. 218–221, 2014.
- [10] 三栖貴行, 小田原健雄, 渡部智樹, 一色正男. Led 照明の光色変化による心理的影響と体感温度の変化. 日本色彩学会誌, Vol. 42, No. 3+, pp. 205–208, 2018.
- [11] 寺田努. 主観的コンテキストに基づく情報提示システム. マルチメディア, 分散, 協調とモバイルシンポジウム (DICOMO2012) 論文集, pp. 737–743, 2012.
- [12] 寺田努. ウェアラブルセンサを用いた行動認識技術とその応用 (<特集>アンビエント情報基盤). 人工知能, Vol. 28, No. 2, pp. 201–208, 2013.
- [13] Hakan Karşilar, Yağmur Deniz Kisa, and Fuat Balci. Dilation and constriction of subjective time based on observed walking speed. *Frontiers in psychology*, Vol. 9, p. 2565, 2018.
- [14] 長谷川瑛一, 磯山直也, 酒田信親, 清川清. 動画の再生速度が視聴後の作業速度に与える影響. インタラクシオン 2021 論文集, pp. 41–48, 2021.
- [15] 松本隆太郎, 金利昭. 街路照明環境を再検討するための基礎的研究 (<特集>安全・安心・快適を向上する街のあかり). 照明学会誌, Vol. 98, No. 4, pp. 190–193, 2014.
- [16] 小林茂雄, 鈴木竜一, 角館政英. 分散配置型の低照度街路照明の整備と評価 岐阜県白川村平瀬地区での実践. 日本建築学会技術報告集, Vol. 18, No. 38, pp. 233–238, 2012.
- [17] 中村透, 上垣百合子, 藤原ゆり, 奥谷晃久, 山本松樹, 長田典子. 照明刺激環境下のくつろぎ感に関する心理生理学的研究. 電子情報通信学会論文誌 D, Vol. 96, No. 6, pp. 1536–1544, 2013.
- [18] 飛谷謙介, 松本達也, 谿雄祐, 藤井宏樹, 長田典子. 素肌の質感表現における印象と物理特性の関係性のモデル化. 映像情報メディア学会誌, Vol. 71, No. 11, pp. J259–J268, 2017.
- [19] Yuki Fukuzaki, Masahiro Mochizuki, Kazuya Muraio, and Nobuhiko Nishio. A pedestrian flow analysis system using wi-fi packet sensors to a real environment. In *Adjunct Proceedings of the 2014 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing (UbiComp '14 Adjunct)*, p. 721–730, 2014.
- [20] Hayato Nakashima, Ismail Arai, and Kazutoshi Fujikawa. Passenger counter based on random forest regressor using drive recorder and sensors in buses. In *2019 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops)*, pp. 561–566, 2019.
- [21] 山田遊馬, 廣森聡仁, 山口弘純, 東野輝夫. 測域センサを利用した高精度な路線バス乗降計測システム. 第 25 回マルチメディア通信と分散処理ワークショップ論文集, pp. 24–32, 2017.
- [22] Shoko Wakamiya, Hiroshi Kawasaki, Yukiko Kawai, Adam Jatowt, Eiji Aramaki, and Toyokazu Akiyama. Lets not stare at smartphones while walking: Memorable route recommendation by detecting effective landmarks. In *Proceedings of the 2016 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing (UbiComp '16)*, pp. 1136–1146, 2016.