

エナジーハーベスティング技術を用いた 人の滞留把握のためのセンシングデバイスの研究

渡邊 幸樹^{†1} 稲村 浩^{†1} 中村 嘉隆^{†1}

概要：近年，Bluetooth Low Energy (BLE)ビーコンを活用した参加型センシングによる人の流動・滞留を把握するサービスの提案や研究が活発に行われている．しかし，多数のBLEビーコンの設置が必要なため，運用コストが問題になる．さらに専用アプリケーションの導入はユーザ負担となっており，広い参加を妨げる要因である．我々はメンテナンスコストとユーザ負担を減らすことが可能な滞留把握のためのセンシングデバイスの検討を行った．本デバイスは，エナジーハーベスティングにて得た電力で間欠動作を行う．本デバイスの有用性を確認し，適切な動作間隔を設定するために，集客イベントにおいて人の滞留行動の計測を実施し得られたデータを用いて行動分析を試みた．特定の行動を取った訪問者の抽出という事例に対して，設定すべき間欠動作間隔を明らかにした．

キーワード：BLE ビーコン，エナジーハーベスティング，滞留行動，省電力，RSSI，位置推定

1. はじめに

近年，屋内環境における人流の把握が注目されている．人流は大きく流動と滞留の2つに分類することができる．なかでも滞留は明確な目的が存在する場合や，外的要因によって行動が阻害された場合などに発生する．滞留状況を把握することができれば，目的や要因に合わせた混雑緩和や広告設置の検討など様々な応用が期待される．

現在，屋内環境での流動・滞留を把握する方法として，スマートデバイスを所有するユーザを前提にBLEビーコンを活用したサービスの提案や研究が活発に行われている[1,2]．しかし，BLEビーコンを活用した流動・滞留検知システムの構築と導入を行う場合，多数のBLEビーコンが必要となる．BLEビーコンは一般的にバッテリーで駆動するため，バッテリー交換や定期的なメンテナンスコストが必要となり，運用コストが増加する問題がある．さらに，従来のBLEビーコンを活用した滞留把握は，ユーザのスマートフォンに専用アプリケーションをインストールしてもらうことが前提となっている[2]．そのため，インストールしていないユーザの滞留を検知できないことに加えて，インストールやアップデートの手間がユーザの負担となっている．

本研究では，屋内環境での人の流動・滞留を把握するための，メンテナンスコストとユーザ負担を抑えた，人の滞留把握のためのセンシングデバイスを実現する．これを用いることにより，多くのユーザのシステムへの無意識的な参加が見込めるためデータ数が増加し，より正確にかつ低コストで人の滞留行動を把握するためのデータ取得が可能となる．

本論文は以下の通りに構成する．2章で関連研究とその課題について，3章では人の滞留把握のためのセンシング

デバイスの実現のためのアプローチを述べ，4章ではその課題と解決を説明する．5章は集客イベント実験で計測したデータから滞留者の行動特徴の抽出について述べる．6章では行動特徴の抽出とそれを用いたデータの選択に基づいた本デバイスの動作間隔について述べ，7章でまとめる．

2. 関連研究

2.1 バッテリー交換を不要にする技術

太陽光や電波などの環境エネルギーでデバイスを動作させるエナジーハーベスティング技術が注目されている[3,4,5]．この技術によりバッテリー交換などのメンテナンスが不要となる．しかし，場所や時間によって得られる電力は変動する[6]ため，電力を安定化する試みがなされている[7,8,9]が，二次電池の寿命の問題を解決することはできていない．長期運用のためには二次電池を不要にすることが望ましい．加えて，この技術によって得られる電力は微小であるため，デバイスの動作に必要な電力を常に賄うことは困難である[6]．そのため，図1のようにデバイスは電力の充放電を繰り返す間欠動作を行う必要がある[10]．このような特性から蓄電池にはEDLC(Electric Double-Layer Capacitor: 電気二重層キャパシタ)が用いられる．EDLCは蓄電に化学反応を用いないため，2次電池を利用した場合よりも長期の使用に耐える[11]．

正確な人の滞留行動の把握のためには図1に示す電力モデルに見られる充放電サイクルを管理する必要がある．従来のバッテリー駆動のデバイスを想定したセンシングで可能な連続的な観察は充放電動作を前提とする間欠動作のもとでは難しい[12]．従って適切な動作間隔を設定し，かつ，センシングに必要な電力消費を抑える必要がある．

^{†1} 公立はこだて未来大学システム情報科学部
Future University Hakodate

大規模な滞留行動の把握においては多数の BLE ビーコンを使用するため、製造コストの削減や容易に設置が行えるように小型化が求められる。そのため、BLE ビーコンに利用する発電部品の性能や大きさは必要最低限に抑える必要がある。

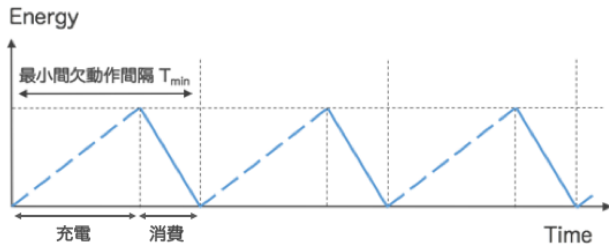


図1 エナジーハーベスティング技術の電力モデル

2.2 従来の人の流動・滞留行動の検知システム

ユーザ負担を最小化するためにアプリケーションのインストールのみで、能動的動作なしにセンシングを可能にする試みがなされている[2,13]。しかし、多数のユーザの参加と参加者の積極性が必要で、参加型センシングに興味を持つ一部のユーザのみを想定したシステムとなっている。このシステムのボトルネックとなっている専用アプリケーションのインストール負担をなくし、滞留状況のセンシングを可能にしたシステムの提案はまだなされていない。

3. アプローチ

我々は前記の課題を踏まえ、メンテナンスコストとユーザ負担を減らすことが可能な人の滞留把握のためのセンシングデバイスを提案する。本デバイスは周囲の滞留者が保持する移動端末の BLE の稼働を検知することで滞留を把握する。検知手法に応じて可能な場合は距離を計測する機能を持ち、人の滞留の状況を調べることができる。さらに、長期の使用に耐えるためにエネルギーハーベスティングにて電力を得て、省電力化のために間欠動作を行う。以下に実現に当たっての課題とそれらに対するアプローチを述べる。

3.1 不安定環境下における滞留検知に必要な動作の保証

エネルギーハーベスティングで得られる電力による間欠動作時の電力制約について述べる。時間あたりの発電量 $g(t)$ 、最小間欠動作間隔 T_{min} 、間欠動作サイクルあたりの蓄電量 C_{max} とした時、その関係式は次式の通りである。 C_{max} は最小間欠動作間隔において、そのサイクルごとに消費されるものとする。

$$\int_0^{T_{min}} g(t)dt = C_{max}$$

上記の関係式より、図1に示した最小間欠動作間隔を可能な限り延伸することで、発電部品の性能を必要最低限に抑えることができる。さらに、十分な蓄電期間を確保で

きるため、センシングに必要な動作を保証できる。本研究では、以降の5章で述べる調査と実験に基づき、滞留状況の把握に適切なセンシング間隔を設定することで最小間欠動作間隔の延伸を試みる。

3.2 専用アプリのインストール負担なしで滞留検知

BLE プラットフォームである Eddystone-URL のリゾルバ自動要求と BLE の信号検知手法を用いることでユーザ負担がない無意識的なユーザの参加による滞留状況の把握を実現する。Eddystone-URL は Android 端末側に Chrome がインストールされている場合、BLE ビーコンから発信されるアドバタイズメント・パケットを自動受信して関連情報をリゾルバへ要求する。この処理の流れを滞留検知に利用する。しかし、iOS 端末ではこのような利用者の操作なしの自動受信が期待できない。そのため、その検知には本デバイスの周辺の BLE 機器をスキャンする方法を用いる。端末の種類に応じた検知手法によって、実際の滞留者数と検知された移動端末数の一致を狙う。スキャンによる検知を行った際に同時に得られる信号受信強度を示す RSSI 値を用いた滞留者の行動特徴の分析を試みる。

4. 提案手法とデバイスの設計

4.1 iOS 端末を所有する滞留者の検知方法

iOS 端末を所有している滞留者を検知するシステムの処理の流れを図3に示す。センシングデバイスは周辺の滞留者が所有する移動端末を含む BLE 機器の探索を行い(1)、探索結果から BD アドレスのベンダーコードに着目し、iOS で仕様されているチップセットであるかを判断しカウントする(2)。検知数を ZigBee でサーバへ送信する(3)。

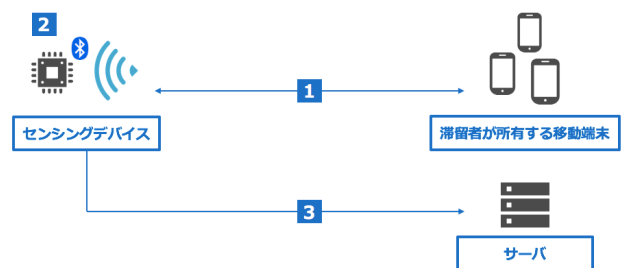


図3 システム処理の流れ(iOS 端末検知)

4.2 Android 端末を所有する滞留者の検知方法

Android 端末を所有している移動端末を検知するシステムの処理の流れを図2に示す。Central 側となるセンシングデバイスは、URL 情報をペイロードに含んだパケットデータを一定の間隔でアドバタイズする(1)。Peripheral 側となる滞留者が所有する移動端末は、パケットデータを自動受信後、URL 関連の情報を取得するためにリゾルバへ要求を自動的に行う(2)。要求を受けたリゾルバは、関連情報を

web サーバから取得し、移動端末へ情報を送信する(3)。

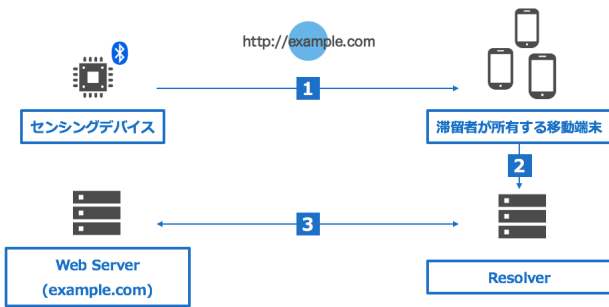


図2 システム処理の流れ(Android 端末検知)

4.3 センシングデバイスのハードウェア構成

提案するセンシングデバイスのハードウェア構成を図4に、試作中のセンシングデバイスの外観を図5に示す。本デバイスは、環境発電モジュール、PMIC(Power Management IC), EDLC, MCU(Micro Controller Unit), BLEモジュール, ZigBeeモジュールで構成される。本研究は、屋内における人の滞留状況の把握を目的としているため、屋内で比較的安定して確保できる光エネルギーを電気エネルギーへ変換するソーラーパネルを用いる。動作の流れとしては、まず、照明から得られる光エネルギーをソーラーパネルにより電気エネルギーへ変換する。変換された電力はPMICを経由してEDLCに蓄電される。PMICでは、センシング動作に必要な電力がEDLCに蓄電されている場合は電力を消費する。逆に不足している場合はEDLCへ蓄電しながら設定電圧に達した時にセンシング動作するように制御を行う。

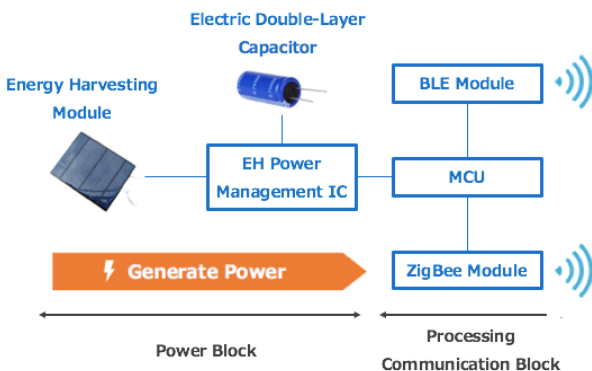


図4 センシングデバイスのハードウェア構成図

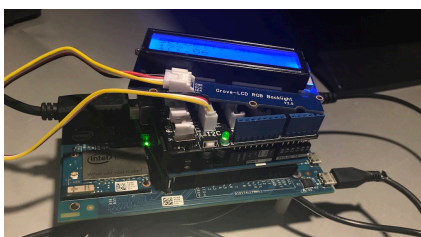


図5 試作中のセンシングデバイス

5. 滞留者行動の実態把握のための調査

5.1 調査の概要

センシングデバイスの有用性を示すために、公立はこだて未来大学のオープンキャンパス(2017年8月6日)の研究室ブース周辺(図6)で、イベントにおける訪問者の集団行動の計測を試みた。ここでは、潜在顧客と訪問者を以下の通りに定義する。

- 滞留者 : 同じ場所で停止行動を行う訪問者。
- 潜在顧客 : 展示に対して関心はあるがまだスタッフ説明を受けていない訪問者。

イベントにおいては関心のある訪問者に漏れなく展示説明を実施することが重要なため、潜在顧客を自動的に発見できないか検証を行う。実際には滞留者の全てが潜在顧客ではない。その行動の特徴を明らかにし、検知された滞留者のなかから潜在顧客を抽出できないか試みる。

オープンキャンパスの開始1時間前の9時から終了16時までの7時間において、2台のビデオカメラによる撮影を行い、実際の状況の確認に用いる検証映像データとし、2次電池で駆動するプロトタイプの実験用センシングデバイス1台を使って滞留者の持つ移動端末から発信されるBLE信号を検知しデータを収集した。今回の調査ではデバイスのセンシング間隔は2sに設定し、ひとまず滞留行動の定義は6s以上の停止行動であるとした。



図6 研究室ブース周辺の様子

5.2 イベントにおける滞留の実態

検知できた移動端末数の合計は280台あり、時間帯別に集計すると、オープンキャンパス開始直後の10時台が64台と他の時間帯と比較して最も検知数が多かったため、この時間帯における滞留者の行動を分析する。システムが検知したRSSI値に基づく各時間帯における滞留者の位置分布を図7に示す。10時台に着目すると、図8におけるブースIからブースIIまでのほぼ全ての距離において滞留者が存在していることがわかる。検証映像データを目視で確認した結果から、10時台のおおよその滞留地点A~Dを図8に示す。A・C地点では「展示物を見る」「スタッフの話を聞く」、B地点では「スマホを見る」「パンフレットを見る」「周りを見わたす」、D地点では「3Dプリンタ体験」参加による滞留が確認できた。A・C地点の展示物を見ている滞留者に対してスタッフが展示説明の対応ができたかどうか、目視で映像を確認しそれぞれの件数と平均滞留時間を

表 1 に示す。

確認の結果、図 8 と表 1 に示すように、展示物周辺に複数の滞留が発生しており、周囲に滞留しながらまだ説明を受けていない訪問者、つまり潜在顧客は、20 秒程度の滞留を行うことがわかった。

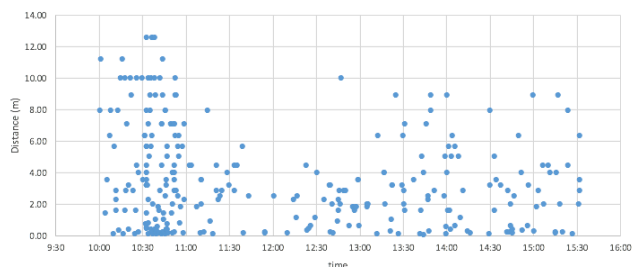


図 7 検出した滞留者の推定位置分布

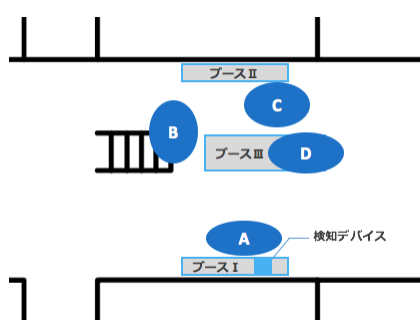


図 8 計測した会場周辺の滞留地点

表 1 展示物を見る滞留行動の件数と平均滞留時間

滞留行動	件数(件)	滞留時間(s)
展示物を見る	47	220
展示物を見る ※スタッフ対応	10	960
展示物を見る ※スタッフ対応なし	37	20.5

5.3 滞留者の滞留場所選択と行動パターンに基づく潜在顧客の行動特徴の抽出

検証映像データを目視で分析した結果、既に発生している滞留場所に基づいて場所を選択した以下のような行動が起こることが分かった。

- 既に滞留が存在する場所にさらに滞留者が加わる (図 9)。スタッフはその場の滞留者に対して説明対応を行う。そのため、新たな滞留者が現れた場合、その滞留者に気付くことができず説明機会を逃しているケースが映像から確認された。
- 滞留が存在する場所を避けて、別の場所に新たな滞留が発生 (図 10) する。展示物に興味を持ったが、周辺に滞留者が多く存在する場合、一度別の場所で滞留し、対象の展示物周辺の滞留者が減少した時に再度現れる。



図 9 滞留している場所に滞留する例



図 10 別の場所に滞留する例

滞留場所の選択がなされた後の行動に着目し、以下のような行動における特徴が確認できた。スタッフ対応なしの滞留者が示す複数回の往復は滞留者が機会をうかがっている様子であるため潜在顧客による迷い行動と呼ぶ。この迷い行動の期間はスタッフにとって潜在顧客への展示説明の機会であるため検知し見つける価値がある。

- 1人で滞留している場合、滞留地点と滞留開始前にいた地点を複数回往復し、それぞれの位置で滞留行動を行う傾向がある。
- 3人以上の滞留の場合、背後に壁などの物的環境が存在しない傾向にある。
- 会話を伴う滞留の場合、滞留地点と滞留開始前にいた地点を複数回往復する傾向にある。また滞留地点では、背後に壁などの物的環境が存在しない傾向にある。

以上の観察結果と分析により抽出した潜在顧客の行動の特徴は以下の通りである。

- 潜在顧客の各滞留地点における滞留時間は 20 秒程度である。
- 展示物に興味を示した場合、滞留地点と滞留行為開始前にいた別の滞留地点を複数回往復する迷い行動が生じる。

6. 滞留者からの潜在顧客の発見

6.1 潜在顧客の行動特徴に基づく行動パターン作成

観測された多数の滞留者から潜在顧客を発見するために、イベント実験で収集した滞留者による BLE 信号の検知データから迷い行動を示すデータを選択できるかどうかを検証する。迷い行動を示すデータを抽出するために、この行動に特徴的な信号変化を観察する実験を行った。5.3 節で判明した潜在顧客の迷い行動を模倣的に再現し、その行動

再現時に発生する RSSI 値の変化を取得した。模擬的に再現した行動パターンを図 11 に示す。A 地点で 20s 間滞留を行い(1), B 地点に向かって 1.0m/s の速さで移動する(2)。B 地点に到着後, A 地点と同様に 20s 間滞留を行い(3), A 地点に向かって 1.0m/s の速さで移動する(4)。最後に A 地点で 20s 間滞留を行う(5)。これを 2 往復して RSSI 値の変化を計測する。B-C 地点も同様の計測を行う。

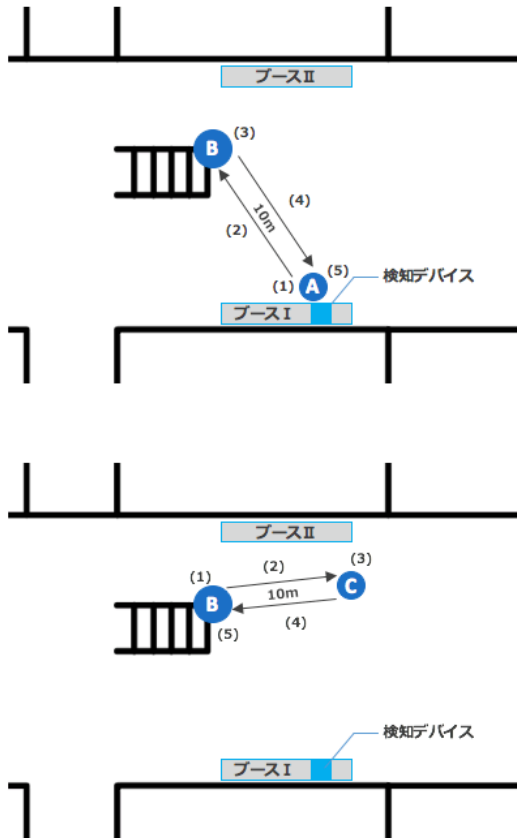


図 11 潜在顧客の行動パターン

6.2 潜在顧客の迷い行動に特徴的な信号変化の把握

計測した RSSI 値の変化をセンシングデバイスからの距離に変換し, 潜在顧客が所有する移動端末の位置の変化を時系列に表したグラフを図 12 に示す。A 地点-B 地点と B 地点-A 地点へ移動した際に, 検知した BLE 機器の距離が大きく変動していることが読み取れる。1 往復目の B 地点での滞留位置はセンシングデバイスから 8m~10m 先であった。2 往復目も同様の滞留位置に BLE 機器を検知した。この結果から, 移動後の滞留位置の距離がおおよそ等しくなった場合, A 地点-B 地点を複数回往復する迷い行動のパターンを検知できたとと言える。

B-C 地点間の移動に関しては, 取得した RSSI 信号の変化から移動によって生じるはずの変化を検知することができなかった。そのため, 同じ手法による同地点間における迷い行動の検知は現段階では不可能である。この問題に関しては今後の課題とする。

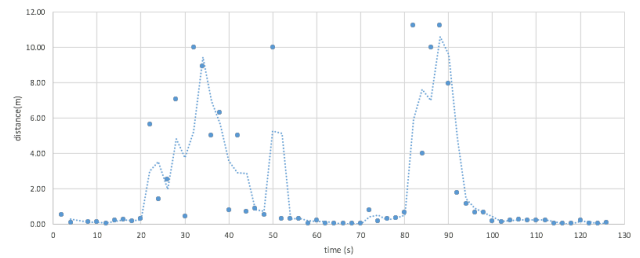


図 12 再現した迷い行動における移動端末の位置の変化

6.3 潜在顧客の迷い行動を示す移動端末の抽出

6.2 節で得られた潜在顧客の迷い行動に特徴的な信号変化の結果を用いて, イベント実験で収集した群衆計測データから迷い行動を示す移動端末の一群を抽出する。展示物を見ているときにスタッフ対応がなかった潜在顧客の人数を計測映像から目視で確認する。目視で確認できたときの時間と, センシングデバイスで検知したときのタイムスタンプを参考に, 10 時台に A-B 地点を往復する潜在顧客から, 6.2 のような特徴の抽出を試みる。その結果, スタッフ対応なし 37 件の内, 6.2 と同様な特徴を抽出できたのは 2 件であった。以下に抽出した潜在顧客 A・B が所有する移動端末までの距離すなわち位置の変化の時系列のグラフを図 13 と図 14 に示す。

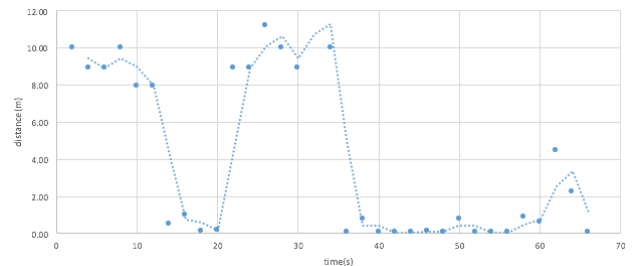


図 13 潜在顧客 A の移動端末の位置の変化

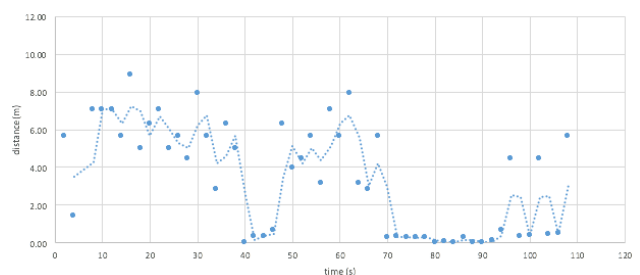


図 14 潜在顧客 B の移動端末の位置の変化

6.4 最小間欠動作間隔の設定

前節に示した通り, イベント実験で収集した滞留者の持つ移動端末が発信する BLE 信号の検知データに含まれた迷い行動を示すデータは, RSSI 値の変動パターンにおける特徴に基づいて抽出が可能であった。最小間欠動作間隔を決定に関しては, 周期約 20 秒の信号の検出が必要であったため約 10s に設定することで RSSI 値の大きな変化を検

出し、潜在顧客を抽出することができると思われる。しかし、本検証は計測データのうちの 10 時台のデータのみであり抽出数も少ない。適切な最小間欠動作間隔の決定には、対象範囲を広げ、間欠動作に相当したサンプリングデータを用いた検証が必要である。

7. おわりに

7.1 まとめ

システム維持コストとユーザ負担を減らすことが可能な人の滞留把握のためのセンシングデバイスを実現するために、電源供給が不安定な環境下における検知に必要な動作を保証する方法の検討を行った。さらに、専用アプリケーションのインストール負担なしで正確に滞留検知を行うことができる方法の検討を行った。実験では、最小間欠動作間隔の設定のため、センシングデバイスのプロトタイプとカメラを使用して集客イベントで集団行動の計測を行った。イベント時における人の滞留行動の実態を分析することで、滞留に参加している訪問者のうち、滞留地点を複数回往復する潜在顧客の行動特徴を抽出することができた。抽出した行動特徴を模擬した動作時に発生する RSSI 値の変化を行動データのテンプレートとして、イベント実験において収集した群衆計測データから迷い行動を示す移動端末の一群の抽出を試みた。その結果、最小間欠動作感覚を約 10s に設定することで、RSSI 値の大きな変化を計測できる可能性があることが分かった。

7.2 今後の課題

今回の試みで明らかになった課題を以下に列挙する。

- 迷い行動の特徴抽出を 10 時台のみならず、計測を行った全ての時間帯で行い、最小間欠動作間隔の決定を試みる。BLE 信号の検知データ量が非常に多いため、効率の良いパターンマッチングの自動化の方法を検討する。
- イベント実験で取得した情報から潜在顧客の迷い行動の特徴を抽出する際、類似している特徴を有するデータは複数件確認されたが、期待した信号変化を示しておらず抽出数に含めることを見送ったものがある。状況から判断して人体による電波の減衰による波形の変化と思われるため、これらを考慮した抽出方法の検討が必要である。
- 滞留地点 B-C(センシングデバイスに対して左右の動き)からは、計測された RSSI 値に大きな変化が確認できず、B-C 地点を往復する潜在顧客を検知できなかった。センシングデバイスの数を増やすことを含めた可能性を検討する。

参考文献

- [1] 国土交通省. 東京駅周辺屋内外シームレス測位サービス実証実験グループ検討結果報告書. 入手先 <https://www.mlit.go.jp/common/001127073.pdf> (参照 2017-7-13).
- [2] 美原義行 他.: BLE ビーコンを利用した混雑度可視化サービス. 情報処理学会研究報告, Vol.2017-UBI-54, No.7, pp.1-8(2017)
- [3] Joseph A. Paradiso et al.: Energy Scavenging for mobile and Wireless Electronics, IEEE Pervasive Computing, Vol.4, No.1, pp.18-27(2005)
- [4] Paul D. Mitcheson et al.: Architectures for Vibration-Driven Micro Power Generations, Journal of Microelectromechanical Systems, Vol.13, No.3, pp.429-440 (2004)
- [5] Yasser Ammar et al.: Wireless Sensor Network Node with Asynchronous Architecture and Vibration Harvesting Micro Power Generator, Proc. 2005 Joint Conference on Smart Objects and Ambient Intelligence, pp.287-292 (2005)
- [6] 稲葉友紀 他. 環境発電型 WSNs におけるデータ到達率向上のための送信電力制御方式について. DICOMO2012 論文集. pp.1487-1495(2012)
- [7] Pei Zhang et al.: Hardware Design Experience in ZebraNet, Proc. 2nd ACM Conference on Embedded Networking Sensor System (SenSys'04), pp.227-238 (2004)
- [8] Leo Selavo et al.: LUSTER: Wireless Sensor Network for Environmental Research, Proc. 5th ACM Conference on Embedded Networking Sensor System (SenSys' 07), pp.103-116 (2007)
- [9] Prada Dutta et al.: Trio: Enabling Sustainable and Scalable Outdoor Wireless Sensor Network Developments, Proc. 4th ACM Conference on Embedded Networking Sensor System (SenSys' 06), pp.407-415 (2006)
- [10] Zhi Ang Eu et al. Opportunistic : Routing in Wireless Sensor Networks Powered by Ambient Energy Harvesting, Computer Networks, Vol.54 , No.17, pp.2943-2966 (2010)
- [11] Andrew Burke: Ultracapacitors: Why, How, and Where is the Technology, Journal of Power Sources. Vol.91, No.1, pp.37-50 (2000)
- [12] 小島祥平, 吉廣卓哉.: 受信ノード主導型 MAC プロトコルに基づいた管理コストが低い無線センサネットワーク, 情報処理学会論文誌, Vol. 57, No.2, pp.489-493 (2016)
- [13] 水上貫晶 他. センサ主導の無意識参加型センシングシステムの基本設計. 情報処理学会報告. Vol.2014-MBL-73, No.3, pp.1-6 (2014)