

報告番号	甲 第 13413 号
------	-------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 配布型 BLE タグを用いた屋内位置推定手法
(Indoor Location Estimation Method
using Mobile BLE Tag)

氏 名 浦野 健太

論 文 内 容 の 要 旨

コンピュータの小型化・高性能化にともなって、情報システムが我々の生活を自然に援助してくれるユビキタスコンピューティング社会が身近になった。スマートフォンでの位置情報取得が可能になり、地図ナビゲーションやライフログ作成など様々なアプリケーションが提供されている。また、多数の人や車両からの位置情報の収集により、道の混雑度や人の移動度の分析が可能になった。GPS の電波が遮蔽されやすい屋内でも位置取得の需要は大きく、用途や対象環境に合わせて様々な位置推定手法が提案されてきた。本研究では、位置推定が求められる環境として、期間限定で開催される展示会や博覧会などの屋内イベントに注目する。屋内イベントでは、来場者の位置をもとに行う、会場内の混雑度や人気の展示の分析に対する需要がある。

このためには、主催者側が会場全域で来場者の位置を継続的に追跡する必要があるが、既存の位置推定や人流分析の利用が難しかった。スマートフォンで動作する位置推定はインストールや継続的な稼働の面で来場者の負担が大きく、来場者への負担が軽い監視カメラや無線 LAN パケット収集による人流分析は同一人物の追跡が難しい。来場者の負担が少なく、同一人物を追跡できるのは、周囲に情報を送信するタグを配布し、会場内のスキャナと合わせて位置を推定する方式である。来場者の負担は小さいが、スキャナ機材の設置場所に注意が必要、機材が高価などの理由で超音波や UWB 電波の使用は難しい。

本研究では来場者への負担や機材コスト・同一人物の追跡性などの面から、配布型 BLE (Bluetooth Low Energy) タグを用いた屋内位置推定を提案する。BLE は低消費電力や低価格を主眼にする Bluetooth の仕様の一部である。BLE デバイスは情報を定期的に広告する

ビーコン動作が可能で、情報通知や位置推定での利用が期待されている。BLE を用いた位置情報サービスで現在一般的なものは、建物内の部屋や廊下に BLE デバイスを設置し、人が持つデバイスとの近接度を調べて、滞在している部屋・エリアを判定するものである。対して本研究は、BLE タグを用い、広い空間における具体的な位置を推定する手法を、期間限定のイベントという実環境に注目して構築する。

屋内イベント環境は会場が広く、準備期間が短いうえ、これまで配布型 BLE タグを用いてデータ収集を行った例がない。そのため、[ハードウェア面]データ収集用システムの構築と、実際のイベントで一般来場者も交えたデータ収集を行い、得られたデータを分析すること、[アルゴリズム面]短期間・長期間のイベントを考えて、それぞれでの利用に適した位置推定手法を考え、実際のイベントで得たデータを用いて精度を確認すること、という 2 つの面から提案手法の実現を目指す。

第 3 章ではハードウェア面について述べる。BLE パケットの収集を行う BLE スキャナは仕様自由度が高い。本研究では Linux が動作する小型コンピュータ Raspberry Pi と市販 Bluetooth アダプタという安価で容易に入手できるデバイスを用いる。Linux で利用できる Bluetooth プロトコルスタックの BlueZ や、ログ転送ツールの fluentd を利用し、複数の BLE スキャナからリアルタイムに BLE パケットの情報をサーバに集約する基礎部分を実装し、ユーザ情報を管理する部分を追加してデータ収集システムを構築した。このデータ収集システムを用いて、東京都の日本科学未来館で開催され、3 日間でのべ 18,000 人超の来場者を集めた展示会イベントの G 空間 EXPO2015 でデータ収集実験を行った。BLE スキャナは日本科学未来館 1 階の全域に 30 台を設置した。1 秒に 1 度パケットを送信するカード型 BLE タグを配布し、会期中に一般の来場者も交えてのべ 185 名分のデータを収集した。正解位置を記録していた被験者のデータを確認したところ、BLE スキャナによって記録されていたパケット数が大きく異なり、BLE タグが送信したパケットが受信されない、パケットロスの問題が明らかになった。

パケットロスを減少させるには、BLE タグのパケット送信頻度を増やすか、BLE スキャナが安定的にパケットを受信するかの 2 つの方法がある。パケットの送信に衝突防止機構がない BLE では、送信頻度を増やすとパケット衝突も増えるため、本研究では BLE スキャナの受信性能の強化を考えた。BLE スキャナの安価性を保ちつつ、容易に受信性能を強化できる方法として、1 台で複数個の Bluetooth アダプタを備えるタンデム BLE スキャナを構築した。タンデム BLE スキャナを用い、G 空間 EXPO2016 でデータ収集実験を行った。会場は同様に日本科学未来館の 1 階で、タンデム BLE スキャナ 11 台と通常の BLE スキャナ 27 台をメイン会場に設置した。BLE タグはパケット送信頻度などの設定が異なる 3 枚を 1 セットにして被験者に配布した。データ収集システムにも改善を施し、QR コードで実験状況を管理できる機能や、BLE スキャナの死活監視機能などを追加した。さらに、正解位置情報の収集を商用の UWB タグを用いて行った。展示会には 3 日間で 19,000 人以上が来場し、実験ではのべ 260 名分のデータを収集した。

得られたデータから、実環境でもタンデム BLE スキャナでパケットロスを低減できることを確認した。また、正解データを用いて被験者の位置と BLE パケットのデータを結びつけ、被験者の位置と BLE スキャナの位置をもとに、距離と信号強度の分布を作成し、BLE スキャナと BLE タグが近距離にあっても弱い信号強度が観測されて信号強度が安定しないことを確認した。

第 4 章からは推定アルゴリズムについて述べる。第 4 章では、BLE タグと BLE スキャナ間の距離推定とパーティクルフィルタを組み合わせた手法を用い、G 空間 EXPO2016 のデータで推定精度を確認する。イベント環境では準備期間が 1 日前後と短く、その期間中にも展示ブースの設営で環境が変化するため、電波マップを用いた高精度な推定に必要な事前のデータ収集が難しい。そこで、少ない準備期間でも利用できる手法として、三角測量の考え方をもとにした推定を行う。まず各 BLE スキャナが得た信号強度から、会場内で推定対象がいる可能性が高い領域を示す重みのマップを作る。信号強度は電波の反射や干渉の影響で不安定であるため、スライド窓を用いて過去一定秒数の最大値を取るが、それでも時刻ごとに重みの大きい領域が大きく変化する。そこで、パーティクルフィルタを用いて、前回時刻の推定位置周辺で重みの大きい場所を探し、推定位置を出力する。

推定精度の評価では、推定位置と正解位置の距離で誤差を評価し、最も誤差が小さい場合に平均誤差 3.6m となった。また、異なる設定の BLE タグで精度を確認すると、10Hz でパケットを送信するものが 4Hz で送信するものより高精度となった。また会場内に設置していた 38 台の BLE スキャナの一部を使わない設定では、大きな精度の低下はなく、少ない台数でも推定を行えることがわかった。タンデム BLE スキャナの Bluetooth アダプタを制限しての推定では、特定の番号の Bluetooth アダプタを使うかどうかで精度に大きく差が生じたものの、多数の Bluetooth アダプタが利用可能なほうが高精度に推定できたため、推定にタンデム BLE スキャナが有効に作用することがわかった。

第 5 章では、より高精度な推定を行うための深層学習の利用について述べる。期間が限られるイベントでも、長い会期なら環境の電波的な特徴を学習するためのデータを収集できる。そこで、深層学習を用いた(1)信号強度の補正と、(2)信号強度の時系列からの直接の位置推定の 2 つを考えた。まず(1)では、第 4 章の手法を高精度に実行するため、ある時刻に各 BLE スキャナが観測した信号強度からノイズを除去する検討を行った。入力した信号を再構築するオートエンコーダの教師データに、入力に使う信号強度の組のかわりに、正解位置から計算した信号強度の理想値を与え、ノイズの除去や欠損値の推定を行うように学習させた。結果、再構築された信号強度は欠損値をうまく推定するものの、送受信間の距離が近いときに発生する信号強度の急峻な変化を再現できず、この信号強度データを第 4 章の手法に入力しても推定を行えなかった。

そこで、(2)信号強度の時系列からの位置推定を検討した。信号強度の時間的な特徴を LSTM で認識し、入力した時系列の最新時刻における位置を出力するモデルを考えた。モデルは入力側に全結合層を、その後 LSTM 層を配置し、最後に全結合層で 2 次元の推定位

置を出力するよう構成した。また、損失関数でも工夫を施し、進行方向の評価や、推定位置の距離的な飛躍の評価を行うようにした。推定精度の評価では、まず全結合層の数・LSTM層の数について 10 パターンから調べ、全結合 1 層・LSTM1 層の単純な構成で誤差平均 1.92m を達成した。また、全結合層の出力特徴数や LSTM の隠れ状態の大きさなどのパラメータを変更しての精度評価も行った。さらに、実環境におけるトラブルとして、少ない量のデータでの学習や、BLE スキャナが故障した場合の精度も検証し、結果として、データ量の多寡と精度が必ずしも相関せず、また利用できない BLE スキャナのパターンによっては大きな精度の低下が見られた。以上から、深層学習を用いた信号強度の時系列からの直接位置推定は第 4 章の手法を上回る精度だが、学習データや BLE スキャナの稼働状況に影響されやすいことがわかった。そのため実際の位置推定の運用では、推定システムの構成を、同時に複数手法を実行できるようにし、会期の最初は第 4 章の手法を用い、学習データが集まったら第 5 章の手法に切り替え、BLE スキャナが故障したら第 4 章の手法に戻すといった、状況に合わせて適当な推定手法を用いる必要があるといえる。

最後に第 6 章では、本研究の内容をまとめ、提案手法の応用や、今後の展望について述べる。本研究では、配布型 BLE タグを用いた位置推定を提案した。期間が限られた屋内イベントに注目し、実環境でデータ収集を行い、位置推定でもそのデータを用いた。技術的な貢献として、タンデム BLE スキャナによる受信能力の向上や、タンデム BLE スキャナの位置推定での有効性の確認、深層学習を用いた信号強度時系列からの直接位置推定などが挙げられる。提案手法の応用として、イベント環境以外での利用はもちろん、BLE タグの小型・低消費電力性を活かし、モノへの貼付によるモノの位置推定、BLE と IoT 機器の相性の良さを生かした IoT 機器向け位置情報基盤の構築などが考えられる。また、最新の Bluetooth 規格で導入されている安定通信機能や信号到来方向の推定機能などを取り込んだ高精度化が今後の展望に挙げられる。