

配布型 BLE タグを用いた IoT 位置トラッキングシステムの構築

タンデム BLE スキャナを用いた人流計測に関する基礎的検討

浦野 健太[†] 廣井 慧^{††} 河口 信夫^{†,††}

[†] 名古屋大学大学院工学研究科 〒464-8601 愛知県名古屋市千種区不老町

^{††} 名古屋大学未来社会創造機構 〒464-8601 愛知県名古屋市千種区不老町

E-mail: [†]{vrano,k.hiroi}@ucl.nuee.nagoya-u.ac.jp, ^{††}kawaguti@nagoya-u.jp

あらまし Bluetooth Low Energy (BLE) は, GPS の信号が弱い屋内での位置トラッキングに利用可能であると考えられる. 固定 BLE スキャナと配布型 BLE タグを用いた過去の位置推定実験において, スキャナの位置により BLE パケットの受信率と受信強度が大きく異なることが判明した. 本研究では, 複数の BLE 受信機を 1 台に備えたタンデム BLE スキャナを構築し, 受信位置の変化により BLE パケットの受信強度に変化が現れるかを検討する.

キーワード BLE, 位置, 人流計測, 屋内位置推定

IoT Location Tracking System using BLE Tags

Basic Study of Tandem BLE Scanner for Human Flow Analysis

Kenta URANO[†], Kei HIROI^{††}, and Nobuo KAWAGUCHI^{†,††}

[†] Graduate School of Engineering, Nagoya University Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, Aichi 464-8601 Japan

^{††} Institute of Innovation for future Society, Nagoya University Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, Aichi 464-8601 Japan

E-mail: [†]{vrano,k.hiroi}@ucl.nuee.nagoya-u.ac.jp, ^{††}kawaguti@nagoya-u.jp

Abstract Bluetooth Low Energy(BLE) seems to be useful for indoor location tracking, where GPS signal tends to be weak. We have confirmed that at previous location estimation experiment using location-fixed BLE scanners and BLEs distributed to people, signal strength and reception significantly change by BLE scanners' locations. In this study, we examine how BLE signal strength changes show up from small position gaps by using a tandem BLE scanner, which has multiple BLE scanning dongles at single terminal.

Key words BLE, Location, Human Flow, Indoor Location Estimation

1. ま え が き

ショッピングモールでの購買や, イベントにおけるブースの移動などにおいて, 人流計測技術は重要である. 個人を特定しない方法を用いる場合, どの通路をどれだけの人が通過したのか, 施設内での動線がどうなっているのかを把握できる. これに加え, 個人が特定できる場合はどの店舗からどの店舗へ移動したのか, どの店舗での滞在時間が長かったのか等の情報を知ることが可能となる.

屋内における人流計測や位置推定では, 位置計測で一般的な GPS は信号が届かず利用できない場合がある. そこで GPS に頼らない様々な手法が提案されている. 人流計測では高精度に人を検出可能なレーザを用いることが多い. この場合, レーザ

では個人を特定できないため, プライバシーに配慮できるが, 行動の追跡は不可能である.

追跡が可能な新しい方法として, BLE (Bluetooth Low Energy) ビーコンが注目されている. 環境に設置された BLE ビーコンの発するアドバタイジングパケットには複数の ID を設定できるため, それを受信したスマートフォンで位置推定を行い, 推定した位置に基づいてユーザにナビゲーションや情報推薦のサービスを提供可能である. しかし, 固定位置の BLE ビーコンの電波をスマートフォンアプリケーションで処理するこの方式では, ユーザがアプリケーションをインストールする必要があり, アプリケーションをインストールしていない端末は検出されないため, 人流計測には不向きであると考えられる.

我々はスマートフォンアプリケーションを必要としない, 固

定型の BLE スキャナと配布型 BLE タグによる位置推定を提案 [1], [2] し, 実際の展示会において位置推定実験を行った. 実験においては, 会場内各所にスキャナとなる小型コンピュータを配置した. しかし, スキャナが受信する BLE タグからのアドバタイジングパケットの量や受信電波強度はその配置場所によって大きく差があった.

本研究ではアドバタイジングパケットの受信率向上や, 受信電波強度の差を利用したアドバタイジングパケットの受信方向の推定をねらい, 複数の Bluetooth 受信機を 1 台に備えたタンデム BLE スキャナを構築した. Bluetooth 受信機の並べ方は全方位からの受信をねらった十字型や三次元的な受信方向を観測できる可能性がある xyz 軸に沿った配置が考えられるが, 今回は位置変化による電波受信強度の変化の観測と前方通過時の通過方向の検出をねらい, 一列に配置した. タンデム BLE スキャナを用いた受信電波強度の測定実験では, 送受信間の距離や Bluetooth 受信機に応じて受信電波強度の差が観測された. この際, 送受信間の距離が変動しない状態で数段階の受信電波強度が得られたため, アドバタイジングパケットの送信に使うチャンネルを固定したところ, 利用チャンネルによる受信電波強度の違いがあることがわかった. 送信機を持つての前方通過時の方向検出実験では, 人の接近により強い受信電波強度が観測されたが, 通過方向が明らかな結果は得られず, Bluetooth ドングルの配置や通過方向の検出方法などに課題が残った.

2. 関連研究

屋内における人流計測手法は, レーザレンジスキャナやカメラを利用するものが多い. Zhao ら [3] は, 一次元レーザレンジスキャナを環境中に複数設置して, 歩行軌跡の取得に成功している. レーザによる人体の検出と追跡では複数人がすれ違いと追跡をロストする場合があります, 対策としてカメラを同時に利用して追跡の続行を試みる方法 [4] が提案されている. しかし, カメラの映像を利用する場合, トラッキングを拒否する——カメラに写らない——ことは難しい.

一方, 屋内での位置推定にはしばしばスマートフォンが用いられ, 端末が内蔵する加速度センサや地磁気センサを利用した自律航法 [5] や, 無線 LAN 基地局の電波強度を用いる方式 [6] が提案されている. 無線 LAN 基地局の電波を利用する手法に関連するものとして, RFID(Radio Frequency IDentification) や UWB(Ultra Wide Band) など無線通信を利用した位置推定手法があげられる [7], [8]. 無線通信を利用する場合, 電波のマルチパスにより送信側と受信側の間に見通しがなくても通信ができる一方で, 壁や床での反射による複数の経路が生じ信号の干渉が起きる. 手法によっては, マルチパスを検出して推定対象の位置を推定する試みを行っている [9], [10].

3. タンデム BLE スキャナの提案

我々が位置推定実験 [1], [2] で利用した BLE スキャナは, 小型コンピュータである Raspberry Pi(Model B) [11] に市販の USB 接続型 Bluetooth ドングル(受信機)を取り付けたものであった. 1 台の Raspberry Pi が 1 つの Bluetooth ドングルを



図 1 タンデムスキャナ

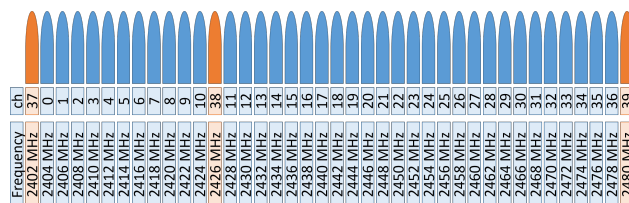


図 2 Bluetooth Low Energy のチャンネル

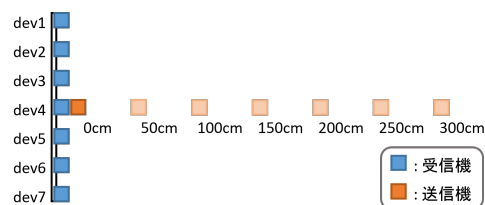


図 3 送信機の配置

制御していたため, スキャナが近い位置に複数設置されていても台数分の Raspberry Pi が必要となり, 端末コストや電源, ネットワークの確保などの点で不利である. そこで, 端末数を削減する, あるいはパケットの受信率を高めるために 1 台の Raspberry Pi に複数の Bluetooth ドングルを取り付けた, タンデム BLE スキャナを構築する.

3.1 タンデム BLE スキャナ

Raspberry Pi 上では OS として Linux(raspbian) が動作しており, Linux で利用可能な Bluetooth プロトコルスタックである BlueZ [12] を利用して複数台の Bluetooth ドングルを個別に制御可能である. Raspberry Pi 3 に USB ハブを経由して複数の Bluetooth ドングルを取り付け, アドバタイジングパケットを記録できるタンデム BLE スキャナを構築した. アドバタイジングパケットの記録には BlueZ の Python 向けモジュールである PyBluez を用い, 他 Bluetooth ドングルと受信処理が競合しないよう Bluetooth ドングルごとにひとつずつスレッドを生成した. 今回はタンデム BLE スキャナの使用時に Bluetooth ドングルを順番に接続し, 動作確認を毎回行ったが, 労力の削減のために各 Bluetooth ドングルを自動で認識するよう構成する必要がある. 図 1 に示すように, 今回は 7 台の Bluetooth ドングルを延長ケーブルを介してシャフトに一列に固定する構成とした. Bluetooth ドングルの間隔は 2.4GHz の 1 波長分である 12.5cm とした.

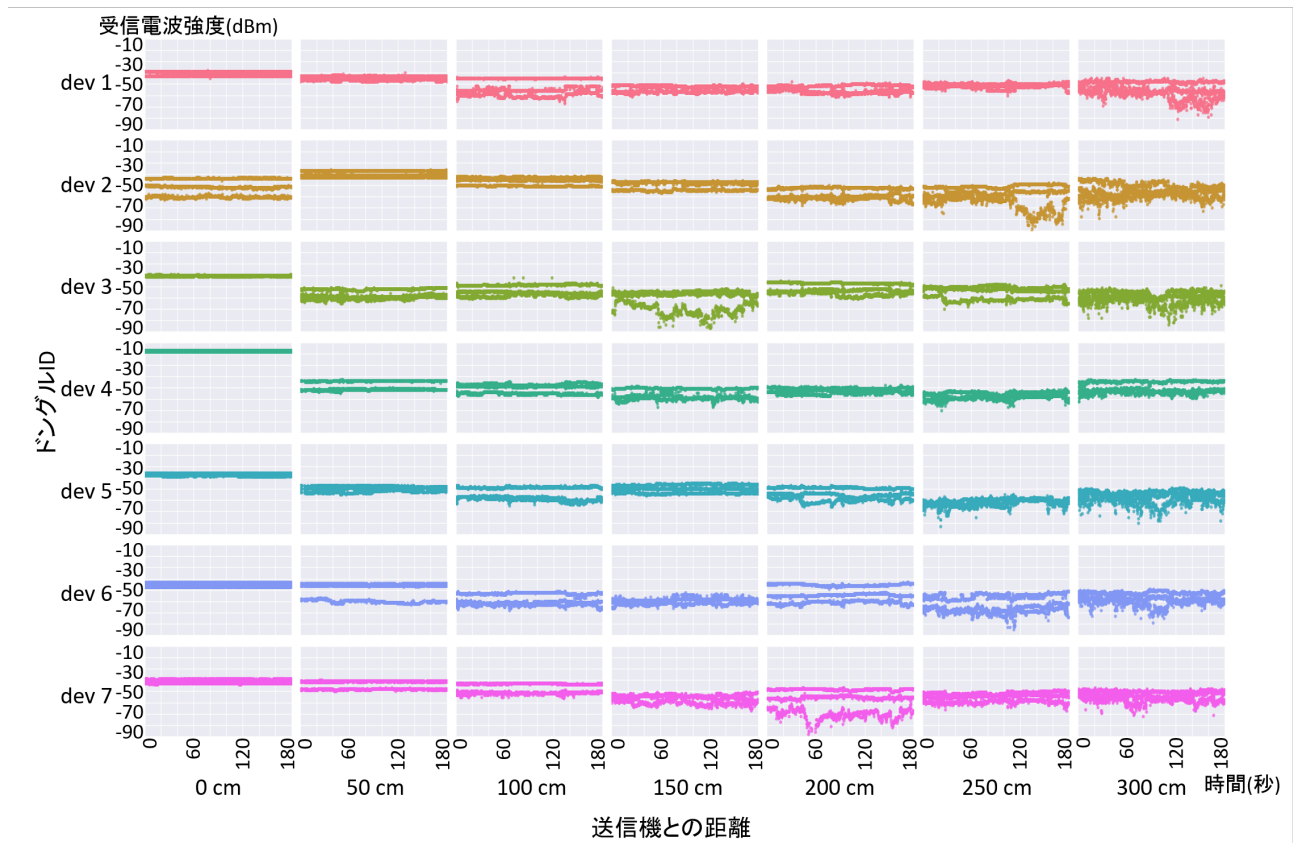


図 4 距離-受信電波強度

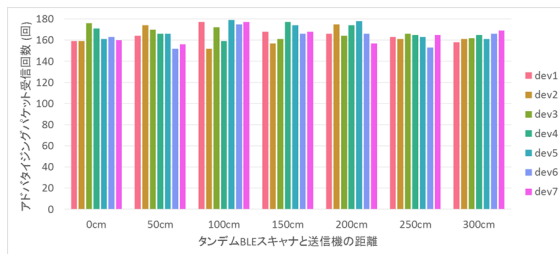


図 5 アドバタイジングパケットの受信回数

3.2 チャンネル制御可能な BLE ピーコン送信機

BLE ピーコンが自身の情報を周囲にアドバタイズする場合は、BLE で利用される 40 チャンネルのうち、無線 LAN のチャンネルと衝突しないように設定された 3 チャンネル (ch37/38/39) が利用可能である。図 2 に橙色の網掛けで利用されるチャンネルの周波数を示す。これらのチャンネルはそれぞれ周波数が異なり、マルチパスやアンテナパターンの影響も異なると考えられる。一般の BLE ピーコンではアドバタイジングパケットの送信時にランダムにチャンネルが選択されるが、受信側では使用チャンネルを把握できないため、チャンネルを固定できるように設定したプログラムが動作する Raspberry Pi を BLE ピーコン送信機として利用する。送信機は、送信チャンネル情報 (1byte) を含む独自形式のパケットを送信する。

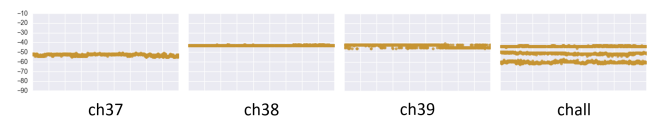


図 6 dev2-0cm のみのグラフ

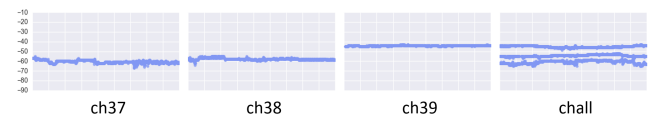


図 7 dev6-200cm のみのグラフ

4. 実験と考察

4.1 パケット受信率

3.2 節で開発した BLE ピーコン送信機を使用し、アドバタイジングパケットの受信数を観察した。図 3 に示すように、タンデム BLE スキャナの 7 台の Bluetooth ドングルのうち中央 (dev4) の正面に BLE ピーコン送信機を設置した。実験に利用した環境は、机や壁、ディスプレイなどマルチパスの要因になりうるものが多い研究室内である。電波強度は設定を変更せず標準のままとし、1Hz でアドバタイジングパケットを送信し、0cm から 50cm 刻みで 300cm まで位置を移動させたときの電波強度を記録した。各距離で 180 秒間記録を取り、受信回数を図 5 にまとめた。

図 5 からは 180 秒で送信される 180 個のアドバタイジング

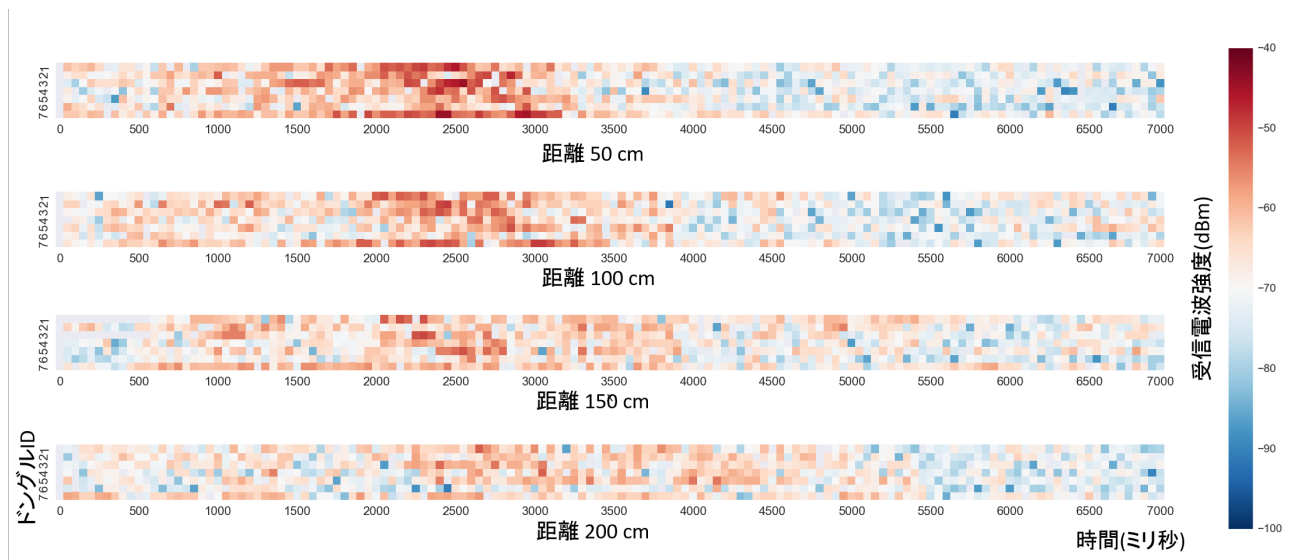


図 8 通過時の時間-受信電波強度

パケット全てが受信されるわけではないことが分かる。しかし、パケットの受信時刻を確認したところ、ある時刻においてタンデム BLE スキャナのすべての Bluetooth ドングルがアダプタイジングパケットを受信していない状態は確認できなかったため、タンデム BLE スキャナの利用によりパケットロスを減らせると考えられる。

4.2 距離による受信強度変化の測定

4.1 節と同様に図 3 に示す送受信機の配置で、受信電波強度を測定した。電波強度は設定を変更せず標準のままとし、10Hz でアダプタイジングパケットを送信し、0cm から 50cm 刻みで 300cm まで位置を移動させたときの電波強度を記録した。送信時のチャンネルについては、チャンネル制御を行わない(全チャンネルを使用する)設定とした。この結果を図 4 に示す。図の各行はそれぞれタンデムスキャナの Bluetooth ドングルに対応し、列は dev4 と送信機との距離に対応する。各グラフの横軸は計測開始からの経過秒数 (0 から 180 秒) を、縦軸は受信電波強度 (-10dBm から -90dBm) を示す。

図 4 より、各 Bluetooth ドングルの受信電波強度は概ね上下に対称で、距離が離れるにつれ減少し、分散が大きくなる傾向を見せるが、dev2-50cm や dev3-200cm では逆にひとつ前の距離より受信電波強度が上がっている。また図内のグラフには、受信電波強度が複数本の線で現れているものがある。タンデム BLE スキャナの各 Bluetooth ドングルの間隔は 12.5cm としたが、位置や角度の変化で電波受信強度に変化が現れてしまうことが分かる。

また図 4 内のグラフには、受信強度の線が 1 本になっているものと、複数に分かれているものがある。この傾向は dev2-0cm や dev6-200cm および dev7-200cm など顕著である。そこで、送信機の送信チャンネル制御を行い、ch37 のみを使用、ch38 のみを使用、ch39 のみを使用したときの受信電波強度を記録した。この結果から、図 4 で三種類の受信強度が確認できる dev2-0cm と dev6-200cm について、全チャンネル使用時、ch37 のみ、ch38 のみ、ch39 のみのグラフを比較する。図 6 および図 7 がそれ

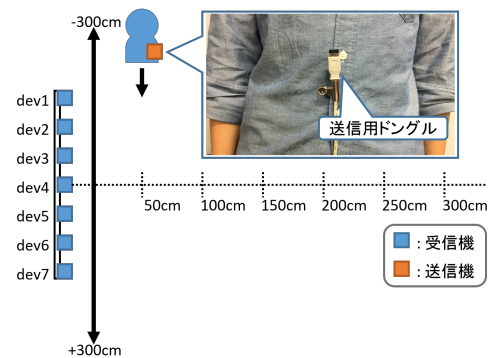


図 9 通過方法

ぞれ dev2-0cm と dev6-200cm に対応する。2 つの図のいずれもチャンネルごとに受信電波強度が異なることが分かる。

この実験では、タンデム BLE スキャナと BLE ピーコン送信機の間に見通しがあったため、使用するチャンネルに関わらず送信側から受信側に直接電波が届いたはずである。しかし、実際はタンデム BLE スキャナのドングルやチャンネルによって受信電波強度が異なった。これはマルチパスによる干渉が起きているためだと考えられる。干渉は信号の周波数と信号の経路長によって変化するため、干渉しない位置、距離と干渉する位置、距離が存在し、それが図 4 のような結果になったと思われる。また、他の原因として Bluetooth ドングルのアンテナ特性も考えられる。この確認にはアンテナの角度や方向を変更しての実験が必要になる。

4.3 タンデム BLE スキャナ前方通過時の電波受信強度変化

今回開発したタンデム BLE スキャナでは、Bluetooth ドングルを一列に配置している。その前方を通過した際に、移動に合わせて受信電波強度の変化が観測できるかを調べる。大学の講義棟内の廊下にタンデム BLE スキャナを設置し、図 9 に示すように、タンデム BLE スキャナ正面-300cm(dev1 側) から +300cm(dev7 側) までを 7 秒間で歩き、その間の受信電波

強度を記録した。タンデム BLE スキャナとの歩行時の距離はその前方 50cm から 50cm 刻みで 200cm までとした。

このときの各距離での各 Bluetooth ドングルの受信電波強度をヒートマップの形で図 8 に示す。図において、各グラフの横軸は歩行開始からの時間 (0 から 7000 ミリ秒) を、縦軸は Bluetooth ドングル ID を表し、ヒートマップの各セルの色は右側のカラーバーに対応しており受信電波強度 (-100 から -40dBm) を表す。

図からは、おおきく 2 つのことが読み取れる。距離が遠くなると、赤で示される強い受信電波強度が観測されなくなり時間方向の分散が大きくなる点と、人が近づいて離れていった様子は検出できるが、必ずしも移動方向 (dev1 dev7) に合わせて強い受信電波強度が観測されるわけではない点である。BLE が利用する 2.4GHz 帯は、水分子と共振する帯域であるため、人体が送受信機の間に入った際に影響が強くと考えられる。図においても、人体が送受信機の間に入る後半 (概ね 5000 ミリ秒) では受信電波強度が弱くなっている。

5. 結 論

本稿では、BLE を用いた位置推定、人流計測におけるアドバタイジングパケットの受信状況に関して、1 台の端末に複数台の Bluetooth ドングルの備えたタンデム BLE スキャナを開発し、実験を行った。Bluetooth ドングルの配置について、今回はすべての Bluetooth ドングルが一行に並ぶ構成とした。タンデム BLE スキャナの前に BLE ビーコン送信機を設置して受信電波強度を記録する実験ではマルチパスの影響と考えられる、チャンネルにより異なる受信電波強度が記録される結果が得られた。また、タンデム BLE スキャナの前方を通過する実験では、通過に応じた受信強度変化が観測されたが、通過方向を検出できる強度変化ではなかった。今後は、今回とは違う Bluetooth ドングルの配置を用いての実験や、チャンネルごとのマルチパスの変化やアンテナ特性、人体の影響の検討と、受信方向や通過方向の検出を試みる。

文 献

- [1] 浦野健太, 廣井慧, 梶克彦, 河口信夫: “大規模展示会における来場者分析のための配布型 BLE タグを用いた位置推定手法”, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2016) シンポジウム, pp. 1236–1243 (2016).
- [2] K. Urano, K. Hiroi, K. Kaji and N. Kawaguchi: “A Location Estimation Method using BLE Tags Distributed Among Participants of a Large-Scale Exhibition”, International Workshop On Mobile Ubiquitous Systems, Infrastructures, Communications, And Applications (MUSICAL 2016) (2016).
- [3] H. Zhao and R. Shibasaki: “A Novel System for Tracking Pedestrians Using Multiple Single-Row Laser-Range Scanners”, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans, pp. 283–291 (2005).
- [4] 中村克行, 趙卉菁, 柴崎亮介: “レーザスキャナと画像センサの融合による歩行者追跡”, 第 11 回画像センシングシンポジウム 講演論文集, pp. 177–180 (2005).
- [5] S. Beauregard and H. Haas: “Pedestrian Dead Reckoning: A Basis for Personal Positioning”, Proceedings of the 3rd Workshop on Positioning, Navigation and Communication,

- pp. 27–35 (2006).
- [6] P. Bahl and V. N. Padmanabhan: “RADAR: An In-building RF-based User Location and Tracking System”, INFOCOM 2000. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE, pp. 775–784 (2000).
- [7] H. Liu, H. Darabi, P. Banerjee and J. Liu: “Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems”, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, pp. 1067–1080 (2007).
- [8] Y. Gu, A. Lo and I. Niemegeers: “A Survey of Indoor Positioning Systems for Wireless Personal Networks”, Communications Surveys & Tutorials, IEEE, pp. 13–32 (2009).
- [9] J. Wang and D. Katabi: “Dude, Where’s My Card?: RFID Positioning That Works with Multipath and Non-Line of Sight”, ACM SIGCOMM Computer Communication Review, pp. 51–62 (2013).
- [10] X. Li, S. Li, D. Zhang, J. Xiong, Y. Wang and H. Mei: “Dynamic-MUSIC: Accurate Device-Free Indoor Localization”, Proceedings of the 2016 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing, pp. 196–207 (2016).
- [11] “Raspberry Pi”, <https://www.raspberrypi.org/>.
- [12] “BlueZ”, <http://www.bluez.org>.