PDR と複数チャンネルの Wi-Fi を組み合わせたスマートフォンによる屋内自己位置推定

佐々木佑輔1 下園幸一2 升屋正人2

概要:スマートフォンを利用した位置推定方法として、屋外では人工衛星からの電波を利用する GNSS が用いられる。しかしこの方法は、屋内や地下では利用できない。屋内測位技術は多く検討されているものの、低コストかつ高精度な方法は少なく、位置情報サービスを提供するために必要な精度を得ることができていない。そこで本研究では、1台のスマートフォン内で連携が可能な PDR(歩行者自律航法)によるものと複数チャンネルの Wi-Fi によるもの、これら2つの技術を組み合わせた屋内位置推定方法を提案し、まずは加速度センサによるステップ検出を実装して評価した。

キーワード: 慣性センサ, RSS (Receive Signal Strength), UKF (Unscented Kalman Filter), 高速フーリエ変換

Integration of PDR and multiple Wi-Fi for Indoor Positioning with Smartphone Sensors

YUSUKE SASAKI¹ KOICHI SHIMOZONO² MASATO MASUYA²

Abstract: GNSS, a constellation of satellites providing signals from space, is used for outdoor positioning with smartphone. However, this is not available indoors or underground. Although many indoor positioning technologies have already been studied, there are few low-cost and high-precision methods, and the adequate accuracy for various location services has not yet been obtained. Therefore, we propose an indoor positioning method that integrates two technologies; PDR (Pedestrian Dead Reckoning) and RSS (Receive Signal Strength) from multiple Wi-Fi. First, we implemented and evaluated walking step detection using the accelerometer in smartphone.

Keywords: Inertial sensor, RSS (Receive Signal Strength), UKF (Unscented Kalman Filter), Fast Fourier Transform

1. はじめに

スマートフォンによる位置情報を利用したサービスの提供には、正確な位置の推定が不可欠である。位置推定の方法として、屋外では人工衛星からの電波を利用する GNSS (全球測位衛星システム)を用いることができる。しかし、屋内や地下では電波が届かず測位ができない。屋内における屋内位置推定には GNSS に代わる技術が必要となる。

これまでに提案されている屋内測位技術として,アクセスポイントからの電波強度を用いる Wi-Fi 測位,Bluetoothの信号強度を用いる iBeacon,GNSS と同じ原理を屋内で用いる UWB や IMES,RFID や超音波発信機による誤差補正と PDR(Pedestrian Dead Reckoning:歩行者自律航法)を組み合わせた方法などがある[1]. しかし,信号を認識できる距離が短いことや精度が低いこと,新たな機器の導入が必要なためコストが増加してしまうことなど,多くの問題がある.

スマートフォンによるサービス提供を前提とした場合, 内蔵の機能のみで位置推定ができればコストの問題は生じ ない.こうした研究の一つに PDR と Wi-Fi の組み合わせによる, 低コストでの運用, 高精度の維持などを目的としたもの[2]がある.この研究では, 追加のハードウェアを必要としない, 加速度センサや地磁気センサなどの慣性センサを用いた PDR と, スマートフォンで受信した Wi-Fi アクセスポイントからの電波の強度 (RSS) の両者に UKF (Unscented Kalman Filter: 非線形カルマンフィルターの一種)を組み合わせた方法を提案している. UKF は, 2 次のテイラー級数展開に正確な無階調変換を行い, 状態ベクトルの平均と共分散行列を推定するアルゴリズムである[3].

研究[2]では、PDR と UKF を組み合わせることで、位置推定の精度と計算コストのバランスを保つことを実現した. しかしながら、PDR と RSS の組み合わせによる位置推定の問題である、屋内無線環境における RSS の測定誤差及びノイズによる精度の低下と、スマートフォンに内蔵された慣性センサのノイズにより蓄積される誤差を解決することはできていない。これは、RSS の利用に際して、単一のチャンネルの情報しか用いていないためと考えられる.

そこで本研究では、PDRによる位置推定と、複数のWi-

¹ 鹿児島大学大学院理工学研究科

Graduate School of Science and Engineering, Kagoshima University

 ² 鹿児島大学学術情報基盤センター Computing and Communications Center. Kagoshima University

Fi アクセスポイントからの RSS の同時利用による位置推定, 1台のスマートフォン内での連携が可能なこれら2つの技術を統合した新たな屋内位置推定方法を提案することにした.

2. 提案システム

本研究で提案するシステムは、スマートフォンに内蔵されている慣性センサ(加速度センサ、ジャイロスコープ、地磁気センサ)の計測値を利用して位置を推定する"PDRモジュール"と、複数のWi-FiのアクセスポイントからのRSSを利用して位置を推定する"RSSモジュール"の2つから構成されている。

図1にシステムの概要を示す.3つの慣性センサからの値は UKF を用いるなどしてノイズ成分を除去した後にPDR モジュールに入力する.また、PDR モジュール、RSS モジュールからの出力を組み合わせる際にも UKF を用いることで高い精度で位置推定を実現することにした.

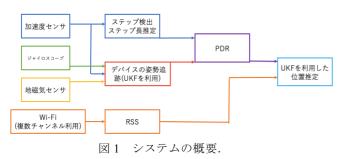


Figure 1 System structure overview.

2.1 PDR モジュール

PDR モジュールでは、スマートフォンに内蔵されている加速度センサ、地磁気センサ、ジャイロスコープの計測値を組み合わせることでスマートフォンを持つ被験者の移動量や移動方向を推測する. PDR には、移動体の動きに合わせて計測を繰り返す場合、誤差が蓄積してしまう問題があるが、本研究のシステムでは絶対位置の計測ができる RSSを組み合わせることで解決することにした. 本研究のシステムの PDR モジュールの詳細について、以下に述べる.

加速度センサの計測値は、3 軸 (x, y, z) の値で構成されている。本研究ではその3 軸の値を合成した値を使用する。各軸の加速度を a_x , a_y , a_z として3 軸合成の加速度aを以下の式で求めた。

$$a = \sqrt{(a_x)^2 + (a_y)^2 + (a_z)^2}$$

PDR モジュールにおける位置推定では、初期位置からの 移動の方向と距離の情報を用いることになるが、スマート フォンはその移動に際して、把持者の歩行による上下動が 加わる.このため歩行における上下動の周期を示すステップの検出が必要となる.このステップは加速度のピークを利用して検出することにした.まず,停止状態で最初の5秒間の計測値を取得し,平均値を求めて閾値とする.その閾値を上回り,次に下回るまでの間の計測値の最大値と,閾値を下回り次に上回るまでの間の計測値の最小値を加速度のピークとする方法である.

デバイスの姿勢追跡は、地磁気センサ、ジャイロスコープの計測値を測定し、歩行時のスマートフォンの傾きを計測して、スマートフォンが被験者にどのような状態で把持されているのかを推測することで行う。計測値にはノイズが含まれているため、UKFを適用することで精度の向上を図った。

本研究のシステムでは、加速度センサの計測値のピークを利用して検出したステップと、地磁気センサとジャイロスコープの計測値から推測したデバイスの姿勢追跡を組み合わせることでスマートフォン把持者の移動量や移動方向を推測する。しかし、加速度センサ、ジャイロスコープ、地磁気センサの3つの慣性センサの計測値には、歩行による振動以外の要因により発生するノイズも含まれる。このため、前処理として Java で記述された高速フーリエ変換ライブラリである JTransforms [4]を利用して、振幅にフィルタを適用することでノイズを取り除くことにした。JTransforms の出力値は実部、虚部が交互に配列に格納された複素数になっている。出力値の配列をs、振幅の配列をbとすると、振幅の配列bの要素数は、実部と虚部を1組とした値であるため配列sに格納されている要素数iの半分となる。振幅bは、

$$b[n] = \sqrt{(s[2n] * s[2n] + s[2n+1] * s[2n+1])}$$

$$(n = 0, 1, 2, ..., i/2)$$

の式により計算する.

周波数 f[n]は、サンプリング周波数を f_s 、全データ数をNとして、

$$f[n] = \frac{f_s}{N} * n \quad (n = 1, 2, ..., N)$$

の式により求める.

2.2 RSS モジュール

RSS モジュールでは、Wi-Fi のアクセスポイントから発信されているビーコン信号を受信し、その受信電波強度 (RSS) からアクセスポイントとの距離を推定することで位置を推定する。この方法には、複雑な無線環境により精度が低下してしまうことや精度が低いという問題がある. PDR と組み合わせることで精度の向上を見込めるが、完全な解決はできていない[1].

そこで本研究では、Wi-Fi のチャンネルを複数利用することで精度の向上を目指す、Wi-Fi には、 $2.4 \, \mathrm{GHz}$ 帯と $5 \, \mathrm{GHz}$ 帯の規格が存在しそれぞれ $14 \, \mathrm{fr}$ ヤンネル、 $20 \, \mathrm{fr}$ ヤンネルを国内では使用できる、 $2.4 \, \mathrm{GHz}$ 帯で干渉なく使用できるチャンネル数は最大 $4 \, \mathrm{fr}$ チャンネルであるため、 $2.4 \, \mathrm{GHz}$ 帯と $5 \, \mathrm{GHz}$ 帯あわせて最大 $24 \, \mathrm{fr}$ ヤンネルを同時に使用できることになる。

3. システムの実装と評価

Android Studio を用い Java を使用して、提案システムのうち PDR モジュールのステップ検出を実装したアプリケーションをまず制作した. OS が Android 10 の ASUS_Z01RD (ASUS ZenFone 5Z) でアプリケーションを動作させ、図 2 のように掌の上に水平に置いた状態で約 30m の距離を直進歩行することで動作を検証した.



図2 検証時のスマートフォンの把持方法.

Figure 2 How to grasp the smartphone during evaluation.

3.1 加速度センサのピークによるステップ検出

加速度センサの計測値を、x, y, z 軸方向それぞれについてグラフ化したものを図 3 に、この計測値に対してピークを検出したものを図 4 に示す。この 2 つのグラフは、いずれも横軸を時間、縦軸を加速度としている。図 4 を見ると青、緑、赤、3 つの枠で囲まれた部分でピークが誤検出されている。左の青い枠で示した範囲では青色の折れ線で示したx 軸方向の計測値の負のピークが他のピークに比べて短い時間間隔で検出されている。中央の緑色の枠で示した範囲では黄緑色の折れ線で示したz 軸方向の計測値の正のピークが短い時間間隔で検出されている。右の橙色の枠で示した範囲では青色の折れ線で示したx 軸方向の計測値の正のピークが短い時間間隔で検出されている。これらの誤検出は、スマートフォンを持つ手の揺れが原因であると考えられ、ピークを用いて歩行のステップを検出するには改善が必要である。

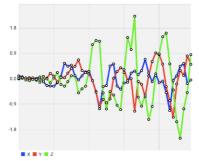


図 3 加速度センサの計測値の時間変化. 青色がx軸方向,赤色がy軸方向,黄緑がz軸方向の加速度をそれぞれ示す.

Figure 3 Time shift of measured accelerations. Blue line indicates the acceleration in the x-axis direction, red line in the y-axis direction, and yellow-green line in the z-axis direction, respectively.

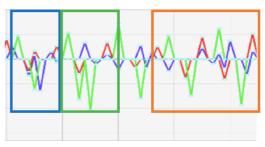


図 4 加速度のピーク検出の結果、青枠内では青色で示した x 軸方向の負のピークが、緑枠内では黄緑色で示した z 軸方向の負のピークが、橙枠内では x 軸方向の正のピークが、それぞれ誤検出されている.

Figure 4 Results of acceleration peak detection. In the blue frame, negative peaks in the *x*-axis direction shown in blue, in the green frame, negative peaks in the *z*-axis direction shown in yellow-green, and in the orange frame, positive peaks in the *x*-axis direction were detected incorrectly.

3.2 加速度センサの計測値のノイズ除去

ノイズはスマートフォンを持つ手の揺れなどにより発生していると考えられるため、ピーク検出に先立ってノイズを除去することにした. 高速フーリエ変換を、x 軸方向、y 軸方向、z 軸方向それぞれの加速度の計測後に行って作成したグラフを図 5、図 6、図 7 に示す. これら 3 つのグラフとも、横軸は周波数、縦軸は振幅である. 全ての軸で大きな振幅が 1 回だけ計測されており、それ以外の計測値は振幅が小さい. 大きい振幅は、歩行のステップによって計測された加速度を示し、その他の小さい振幅は、ノイズであると考えられる. 歩行の際は体が上下に大きく揺れるため、図 7 に示す上下の加速度を計測する z 軸方向の計測値の最大の振幅が x 軸方向および y 軸方向の最大の振幅に比べ大きくなっている.

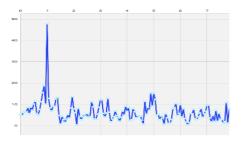


図5 x 軸方向の加速度をフーリエ変換した結果.

Figure 5 The result of Fourier transform of the acceleration in the *x*-axis direction.

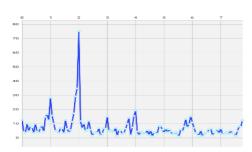


図6 y軸方向の加速度をフーリエ変換した結果.

Figure 6 The result of Fourier transform of the acceleration in the *y*-axis direction.

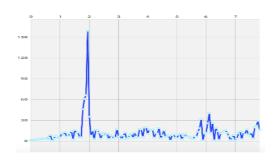


図7 z軸方向の加速度をフーリエ変換しや結果.

Figure 7 The result of Fourier transform of the acceleration in the *z*-axis direction.

図 8, 9, 10 は,最大の振幅以外のノイズと見られる振幅を全て 0 にするフィルタを適応することでノイズを削除し逆フーリエ変換を行ったグラフである.青い線が加速度の計測値,赤い線が高速フーリエ変換によるノイズ除去後の加速度の変化を示している.これら 3 つのグラフとも,横軸は時間,縦軸は加速度である.図 8 を見ると,体の左右方向である x 軸方向にノイズが多く入っていたことがわかる.これは歩行する際に右足を出せば体が右に,左足を出せば左に傾くため,歩行のステップに併せてスマートフォンが左右に動くためと考えられる.

高速フーリエ変換を用いた振幅フィルタにより3軸とも ノイズが除去され、歩行により発生した加速度のみを残す ことができた.

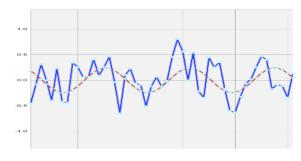


図 8 ノイズ除去の前(青)と後(赤)の x 軸方向の加速 度の時間変化.

Figure 8 Time shift of acceleration in the *x*-axis direction before (blue) and after (red) noise elimination.

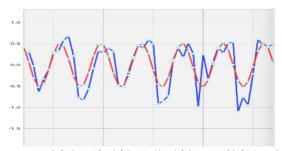


図 9 ノイズ除去の前 (青) と後 (赤) の y 軸方向の加速 度の時間変化.

Figure 9 Time shift of acceleration in the *y*-axis direction before (blue) and after (red) noise elimination.

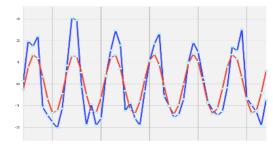


図 10 ノイズ除去の前(青)と後(赤)の z 軸方向の加速度の時間変化.

Figure 10 Time shift of acceleration in the *z*-axis direction before (blue) and after (red) noise elimination.

3.3 ステップの検出

ステップ以外の要因で発生したノイズの削除後の加速度を3軸合成した結果を図11に示す. 横軸は時間, 縦軸が加速度である. 等間隔でピークが生じており, 赤色と水色の枠で示した範囲ごとに一歩進んでいることがわかる. この3 軸合成の加速度に対してステップを取得するためのピークを検出して, ステップとステップ長を取得することができた.

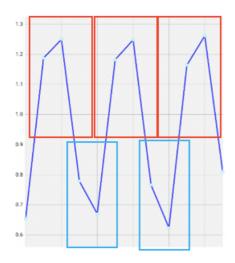


図 11 ノイズ削除後の加速度を 3 軸合成した結果.この 等間隔に現れたピークに基づいてステップとステップ長を 検出できた.

Figure 11 The result of 3-axis synthesis of acceleration after noise elimination. The walking step and walking step length could be detected based on peaks that appeared at the same interval of time.

3.4 姿勢追跡と RSS モジュール

PDR モジュールにおける姿勢追跡は、加速度センサ、地磁気センサの2つで行い、被験者の進行方向をジャイロスコープの計測値により推定する予定である。また、RSSモジュールにおける位置推定は、ビーコン情報を複数受信し、その RSS を結合した値からアクセスポイントとの距離を推定する予定である。

4. まとめ

本研究では、1 台のスマートフォン内での連携が可能なPDRによるものと複数チャンネルのWi-Fiによるもの、これらの2つの技術を統合した組み合わせた屋内位置推定方法を提案し、PDRモジュールについて加速度センサの計測値を利用したステップ検出を実装した。今後、地磁気センサ、ジャイロスコープを組み合わせたPDRモジュールにおける姿勢追跡とWi-Fiモジュールを実装した後に、本システムの有効性を評価する予定である。

参考文献

- [1] 中尾浩一:屋内測位技術の動向について, OGI Technical Reports, Vol.22, pp.47-72 (2014).
- [2] Yu, J., Na, Z., Liu, X. and Deng, Z.: WiFi/PDR-integrated indoor localization using unconstrained smartphones, EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking 2019, No.41 (2019).
- [3] 山北昌毅: UKF (Unscented Kalman Filter) って何?, システム/制御/情報, Vol.50, No.7, pp. 261-266 (2006).
- [4] Piotr Wendykier: JTransforms,入手先< https://sites.google.com/site/piotrwendykier/software/jtransforms > (参照 2022/01/09).