

スマートフォン内蔵センサを用いた 歩行位置推定に関する基本実験と評価

鈴木惇也^{†1}, 秋山征己^{†2}, 田中博^{†2}, 五百蔵重典^{†2}

広域なエリアの測位ではセンサを一樣に多数設置する必要があり, 経済的な測位システムを実現しづらい. そこで, 我々は屋内での高精度で広域な位置検出として, 超音波センサおよび慣性センサを使用した測位法を検討している. 慣性センサによる測位は, 誤差があるものの, 有効な手段の一つと考えられる. そこで, スマートフォンに内蔵されているセンサのみを用いて, どこまで屋内位置推定ができるかを考察する. 具体的には, 加速度センサを用いた移動距離の推定, ジャイロセンサを用いた曲がりの推定, 屋内施設の構造や歩行特性を加味したマップマッチングによる補正を行う. そして屋内位置検出精度を評価する.

Experiments and Evaluation of Walking Position Estimation Using Sensors with a built-in Smart Phone

JUN'YA SUZUKI^{†1} MASAKI AKIYAMA^{†2}
HIROSHI TANAKA^{†2} SHIGENORI IOROI^{†2}

Since it is necessary to install many sensors in wide area positioning, it is hard to realize an economical positioning system. Then, we are examining the positioning method which uses an ultrasonic sensor and an inertial sensor as wide area position detection with indoor in highly precision. Although the positioning by an inertia sensor is with having a margin of error, it is considered to be one of the effective means. Then, it is considered in what accuracy indoor position estimate can be performed only using the sensor built in the smart phone. Specifically, we perform a presumption of migration length using an accelerometer, a presumption of the rotation using a gyroscope sensor, and compensation by map matching.

1. はじめに

屋内での測位が可能になると, 屋外では実用レベルにある道案内などのアプリケーションが, 屋内でも利用できるようになり非常に便利である. 加えて, 屋内での測位をさらに発展させると, 人の正確な位置を知ることができるだけでなく, 屋内での人の動線を知ることができる. そして, 人の行動の70%は屋内であると言われているため, 様々なビジネスチャンスが期待されている. そのため, 多くの企業や研究者が, 屋内測位に関する様々な方法を提案している.

我々は専用センサを人が所持することで, 所持している人の行動推定に関する研究を行っている. センサを手につけるか腰に付けた場合の歩数検出に関しては99%, センサを手につけた場合の曲がり検出に関しては100%の検出方法を得ている^[1].

現在 Android 端末をはじめとする携帯機器に, 多種類高機能なセンサが内蔵されることが多くなった. 携帯機器は人が携帯するのが常なため, この携帯機器に内蔵されているセンサを使って, 人の行動を推定することが多く行われている^[2].

従来の研究では, 腰にセンサを付けた場合, 曲がり角が推

定できないという問題があった. そこで, 本研究では, 腰にセンサを付けた場合に正しく動くための適切なパラメータを実験により模索する. さらに, マップマッチング技術による位置補正の実証実験を行う.

2. 屋内測位システム

屋内でのナビゲーションはまだ実験段階であるため, 屋内での測位を使ったアプリケーションも数が少ない. 用途によって異なるため, 正確には述べることはできないが, 屋内での測位は2~3m程度以下, できれば1m程度の測位精度が求められると思われる. しかし, 現状では10m(5m)程度の測位精度になっているのが現状である.

屋内測位の方法は, 数多く提案されているが, 決定打となる方法が無いのが現状である. 屋内測位の方法は, 大別すると, 現在の位置情報を配信する方法, および距離を求める方法に大別できる^[9].

2.1 現在の位置情報を配信する測位方法

測位方法として, 現在の位置情報を配信および受信方法がある. この代表的な例として IMES^[4]がある. IMES は GPS 信号と同じ電波を使い, 現在の位置を配信する. そのため, ソフトウェア的な改修は必要になるが, ハードウェアとしては GPS 信号の受信機を利用できるという利点がある.

^{†1} 神奈川工科大学 情報学部 情報工学科
Kanagawa Institute of Technology. Faculty of Information Technology
^{†2} 神奈川工科大学 情報工学専攻
Kanagawa Institute of Technology. Graduate School of Information and Computer.

現在の位置情報を配信する代わりに ID を配信する方法がある。この方法では、配信された ID から、データベースを参照する。ID の配信装置としては、アクティブ RFID タグ、および無線ビーコン (Sticker^[5]) などがある。

ID を発信する機器として、電波ではなく、可視光光線を用いた実装もある^[11]。

これらの測位方法では、電波が照射されている範囲に存在するかが判定可能である。測位精度を上げるためには、電波の照射範囲を絞り、電波を発信する機器を稠密に配置する必要がある。そのため、求める精度に応じて、設置コストが高くなるという特徴がある。

ID から現在の位置を直接もとめるのではなく、無線 LAN の SSID を複数受信し、受信した SSID の組と、あらかじめ調査し保存しておいた SSID の組と現在の位置のペアから、現在の位置を類推する Place Engine^[6]および Locky^[7]と呼ばれる方式もある。

2.2 距離を用いた測位

GPS のように、正確な位置が分かっている基準点と現在の位置からの距離を求めて、三角測量的に現在の位置の座標を求める方法がある。この方法は距離を求める (測距) 精度が重要になる。

2.2.1 電波の到達時間を用いた測位

電波の到達時間を用いた測距では、電波を発信する機器の場所は与えられているとする。そして、その電波発信機器から電波を受信する到達時間により距離を求める。この電波発信機器の位置と電波の到達時間の組を、3 個以上の電波発信機から得て、三角測量により、電波受信位置を求める方法である^[10]。

2.1 節で述べた方法は、電波の照射されている範囲が測位精度であった。一方、電波の到達時間を用いる測位は、理論的には正確な位置を測定可能である。しかし、電波の速度は非常に速いため、1ms でも 299,792m 進んでしまうため、ほんの僅かな計測誤差ですら、大きな誤差を生んでしまう。そのため、10m 程度の測位精度になってしまっているのが現状である。

2.2.2 音波の到達時間を用いた測位

電波の代わりに (超) 音波を使って距離を求め、測位する方法がある^[3]。超音波は電波よりも遅いため、高精度が期待できる方式であるが、音波は電波よりも到達距離が短いという欠点がある。[3]は、天井に超音波受信装置を配置し、測位する物体が超音波送信装置を持ち、天井に向けて超音波を発信する。この方式は、受信機と送信機が時刻的同期をとっていないため、音波の到達時間も未知数になる。そこで 4 個以上の受信機で音波を受信し、受信機と送信機の時刻のずれも計算によって求める。これは、GPS の受信

側と送信側が逆になっている方式で、計算方法は GPS の計算方法と同じになる。この超音波を用いた逆 GPS 方式では、水平方向の精度は数 cm 程度である。

2.2.3 電波強度を用いた測位

電波強度を用いた測位とは、電波の到達時間ではなく、電波強度を用いて、電波発信機との距離を測る方法を用い、これを複数の電波発信機と組み合わせることで、測位する方法である^[8]。

電波強度は、マルチパスや外部の要因に影響を受けやすい。特に人が移動するだけで変化してしまう。著者らの実験では、測距するののままならないと感じている。

2.3 今までの研究成果

我々が今まで行ってきた測位に関する研究を整理すると次の通りである。

[1]は、将来的にはスマートフォンで実装することを想定して、専用センサを使った実験である。そのため、スマートフォンの形状を模擬した治具を製作し、その中に専用センサを埋め込み実験を行った。[1]では、以下のことまでが実現できている。

- ・専用センサを用いた実験である
- ・手に専用センサを持つことでの歩数検出
+ 傾き 2 種類 (地面に並行, 30~60°)
- ・手に専用センサを持つことでの曲がり検出
+ 傾き 2 種類 (地面に並行, 30~60°)
- ・腰に専用センサをつけての歩数検出
+ 腰に専用センサをつけての曲がり検出はできない

[2]は、[1]の実験を踏まえ、スマートフォン内蔵のセンサを用いて実装しなおした。[1]と[2]では判定基準は同じであるが、アルゴリズムは異なっている。これは、専用センサはセンサから値を読み込むことで値を取得できるが、スマートフォンではセンサ値の変化によりイベントが発生し、そのイベント内でセンサ値を処理するなどの、センサ値の取得方法に違いがあるためである。また、専用センサからは一定間隔で値を取得できるが、スマートフォンからはややバラつきがあるという点も異なる。[2]では、以下のことが実現できている。

- ・スマートフォン内蔵センサを用いた実験である
+ スマートフォンはセンサ値取得間隔が一定ではないが、これに対応した。
- + センサ値の取得がイベントの捕捉になっているため、これに合わせてアルゴリズムを変更した
- ・[1]で検出できたことは、検出できている

+ ただし、検出精度には差があり

3. 測位に必要なデータの精度向上

我々の研究では、歩数および曲がりを検出し、これに基づき、現在の位置を測位することを目的としている。そのため、測位精度を向上させるためには、歩数および曲がりを出来るだけ正確に検出する必要がある。

今までの我々の研究では、スマートフォンを腰に付けた場合の曲がり判定ができないなどの問題があった。そこで、これらを改良するアルゴリズムを考案する。

3.1 曲がり判定開始間隔を任意にする

従来研究^{[1][2]}は時間を 1 秒間隔に区切り、その 1 秒間で 15 度以上の角度変化を検知したら、曲がりだと判定していた。そして、次の 1 秒間隔でもこの閾値 (15 度) を超えていたら曲がり継続していると判定し、閾値を下回っていたら曲がり終了した、と判定している。図で示すと、図 1 の上部の時間間隔で判定を行っている。

このような判定方法のため、以下に述べる不具合が発生する可能性がある。たとえば 1 秒間で θ 度曲がったが、それが判定区間で 2 分割されてしまった時、それぞれの判定区間で $\theta/2$ 度曲がったと判断され、どちらの区間でも閾値を超えず曲がりだと判断されない。この不具合を修正するために、以下に示す方法を採用した。

現在時刻から曲がり判定に使用する区間内 (ここでは 3 秒) に取得したジャイロセンサ値を使って積分し、曲がり角度を求める。曲がり角度が閾値 (ここでは 50 度) を超えたら、曲がりだと判定する。次の検出タイミングで再び曲がりだと判断されたら、曲がり中であると判断し、閾値を超えなかったら、曲がり終了と判定する。図で示すと、図 1 の下部の時間間隔で判定を行っている。

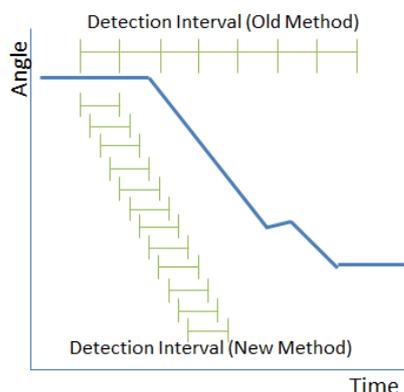


図 1 検出間隔 (上部: 従来, 下部: 現在)

Figure 1 Detection interval (upper part: former, lower: present).

このように変更することにより、曲がり判定を見逃す可

能性は減らすことができる。しかし、判定間隔を頻繁にしたため、曲がり終了したと誤判定されることが多くなるという問題点が発生した。

特に、この問題は、腰に装着した時に起きる。なぜなら腰に装着すると、歩きによる足の動きと併せて、骨盤が前後に動いている。この腰の回転の動きが、曲がり判定の波形に正・負の合成波形を与えてしまい、波を打ったような波形になる (図 2)。積分によるローパスフィルタ的な補正を期待したが、腰の動きが波形に表れてしまう。

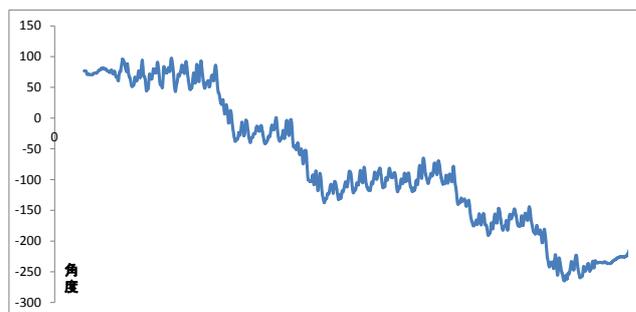


図 2 腰にセンサを装着したときの進行角度

Figure 2 An advance angle with a sensor on the waist .

これは判定間隔が細くなることにより値の揺れに敏感になったためである。誤判定する例を図 3 に示す。図 3 の下側の「Rotating」で示される個所が曲がっている区間であるとする。この時、左側の赤い縦棒は閾値以上の角度を曲がっているため、曲がりだと判定される。しかし右側の赤い縦棒は閾値以下なので曲がり終了されたと判定されてしまう。

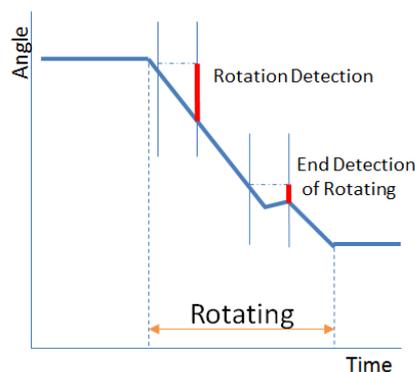


図 3 曲がり検出の例

Figure 3 The example of rotattion detection.

そこで、本研究では、曲がり判定の開始と終了が 1 秒以内で起こった場合は、曲がりではなかったと判定している。

上記で述べたアルゴリズムで実験を行う。実験の条件は以下の通りであり、1 人当たり 160 回の曲がり判定を行う。

- ・被験者は 5 人

- ・時計回り・反時計回り
- ・曲率半径 1m・2m
- ・センサの取り付け位置：手持ち，腰に取り付け，胸に取り付け，腕に取り付け
- ・各実験 40 回

センサの取り付け位置を複数個所にしたのは，スマートフォンをナビゲーション装置として利用する場合は，スマートフォンを手に持って使用することが多いと思われるためである．また，スマートフォンを持った人を捕捉したいなどの用途では，スマートフォンは腰，胸および腕などに付けた状態で利用するとも思われるためである．

実験結果を表 1 に示す．

表 1 曲がり検出確率

Table 1 Probability of rotation detection

	手	腰	胸	腕
A	100%	91%	99%	95%
B	100%	76%	88%	96%
C	100%	94%	73%	89%
D	100%	42%	99%	100%
E	99%	45%	96%	99%
全体	99.8%	69.6%	90.9%	96.0%

手に持った時が，もっともよい判定確率で，全体で 99.8% の確率である．最も悪いのは腰で，70%を下回ってしまう．スマートフォンを手に持つと，ダンバーが装着されたように，余計な振動を拾わないが，スマートフォンを腰に付けると，腰の動きをダイレクトに波形に反映させてしまうからではないかと，推測している．

3.2 曲がり判定時間の短縮

3.1 節では，曲がり判定に要するセンサ値を，3 秒間積分し，50 度以上曲がったときに，曲がりとする設定している．十分な曲がり検出を行うことができたが，これでは，3 秒以内に 2 回角を曲がる判定ができない．そこで，この時間を短くする実験を行う．センサを手に持って，反時計回りで 10 回の曲がり判定を行う．

表 2 曲がり判定時間を短縮した，曲がり検出回数（曲率半径 1m のとき）

Table 2 The number of times of rotation detection which shortened bend judging time (in the case of 1m curvature radius).

	A	B	C	D	E
1.4s	10	10	10	10	10
1.5s	10	10	10	10	10
2.0s	10	10	10	10	10
3.0s	10	10	10	10	10

表 2 に示すように，曲率半径が 1m のときは，100% の確率で曲がり判定できる．しかし，曲率半径が 2m のときは，個人差が出てしまう（表 3）．

表 3 曲がり判定時間を短縮した，曲がり検出回数（曲率半径 2m のとき）

Table 3 The number of times of rotation detection which shortened bend judging time (in the case of 2m curvature radius).

	A	B	C	D	E
1.4s	10	1	5	3	0
1.5s	10	1	10	5	0
2.0s	10	10	10	10	10
3.0s	10	10	10	10	10

人に依存する部分が多く，被験者 A および B では，1.4 秒まで判定時間を短くすることが可能である（表 2，表 3）．しかし，被験者 C では，1.5 秒までしか短くすることができない．しかし，手に関してのみであるが，3.1 節では 3.0 秒で判定していたが，2.0 秒まで縮めることが可能なことが分かる．

4. マップマッチング補正を用いた測位

歩行による現在位置を推定するために，3 章では，歩数検出と曲がり検出の精度を示した．これらで用いた装置を用い，測位を行う．

歩行者の位置推定を行うために，マップマッチングによる補正を行う．マップマッチングとは，カーナビゲーションで良く用いられているシステムで，あらかじめ与えられた地図情報を元に，正しい現在の位置を推定する技術である．

カーナビゲーションの場合，あらかじめ与えられた道路の情報をを用いて，位置を補正する．例えば，道から外れた位置を測位した場合，最寄りの道へ位置を修正する．

我々が行ったマップマッチングは，地図情報に曲がり角

の情報を含んでいる。歩行者は曲がり角でしか曲がれないという制約から、歩行者の曲がり角を検知することにより、曲がった角を特定する。つまり、現在の位置から最寄りの角を曲がったと判定する。そして、地図情報にある曲がり角を、現在の位置として補正する。

実験として、良く使われるであろう場所として、事務所などのフロアおよび図書館のような空間を想定した実験を行う。

4.1 歩行者の位置推定の実験

4.1.1 フロアでの実験

具体的なフロアとして、本学科の研究室のあるフロアでのマップマッチングの実験を行った。フロアのレイアウトを、図 4 に示す。

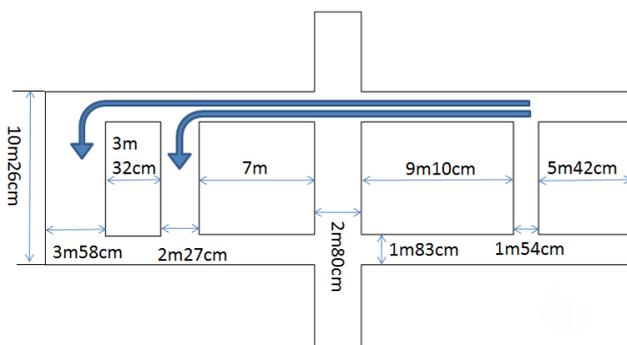


図 4 フロアのレイアウト図

Figure 4 The layout chart of a floor.

歩行距離が長くなれば長くなるほど、誤差が蓄積する。長い歩行距離の後、一定間隔で存在する角があるとき、誤差が生じやすいと感じたため、これを確認する実験を行う。図 4 の長い矢印が 2705cm 歩いて曲がる軌跡であり、短い矢印が 2081cm 歩いて曲がる軌跡である。被験者 5 人で、右方向および左方向に曲がる実験を各 10 回行う。実験の結果を表 4 に示す。

表 4 マップマッチングによる補正

Table 4 Correction by map matching.

被験者(歩幅)	曲がり箇所	曲がり成功回数		修正距離平均		標準偏差		歩数平均	
		右	左	右	左	右	左	右	左
A(71cm)	2081cm先	10	10	53.6	18.1	59.9	62.2	28.4	28.9
	2705cm先	10	10	-3.1	25.3	70.6	47.9	38.1	37.7
B(75cm)	2081cm先	10	10	-142.5	-67.5	53.0	81.0	29.5	28.5
	2705cm先	10	10	-238.0	-200.5	47.4	50.6	39.2	38.7
C(72cm)	2081cm先	10	10	-140.6	-25.2	96.4	104.3	30.7	29.1
	2705cm先	10	10	-127.6	-98.8	83.5	124.5	39.3	38.9
D(65cm)	2081cm先	10	10	94	68	69.9	79.9	30.4	30.8
	2705cm先	10	10	63	17.5	82.2	43.9	40.6	41.3
E(82cm)	2081cm先	10	10	-201.4	-184.2	55.3	66.9	27.7	27.6
	2705cm先	10	10	-323.8	-323.8	81.5	71.8	36.9	36.9

一般的なフロアを想定した実験であるが、適切に曲がり角を判定し、マップマッチングによって補正できることを確認した。

図 5 に、マップマッチングをしない場合とした場合の測位の様子を示す。図 5 に示すフロアの左下をスタート地点とし、右方向に進み始める。各曲がり角を左、右、右、左、左と 6 回曲がった後、長い直線を突き当たりまで進んだ後、左へ 1 回曲がり、元の位置に戻る実験を行う。図 5 にその結果を示す。青い点は、マップマッチングなしで位置推定を行った場合である。赤い点は、曲がり角によるマップマッチングを行った場合である。

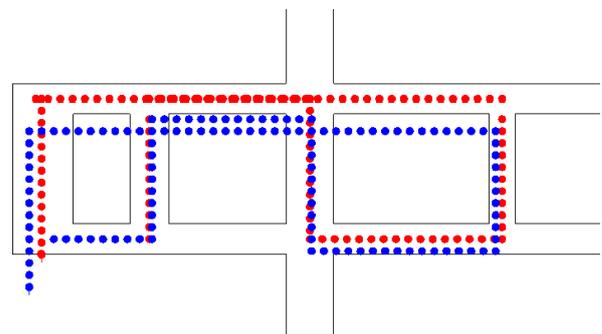


図 5 移動のプロット図 (赤：補正あり．青：補正無)

Figure 5 The plot figure of movement (Red: correcting.

Blue: no correcting.

青い点は、やや左下にずれてしまっている、赤い点は正確に測位できている。また、赤い点のプロット間隔に着目すると、左上では行き過ぎたところを補正し、右上は距離が足りなかったところを補正していることが分かる。

4.1.2 図書館による実験

位置推定の別の例として、図書館での位置推定を行う。図書館のレイアウトは図 6 の通りである。歩く距離が長いほど、誤差が大きくなるため、この誤差を補正できるかを確認する実験を行う。そこで、ある程度長い距離である、1008cm 歩いた後、曲がり、マップマッチングを行う実験を行う。曲がり角は、1 直線状に配置した。配置間隔は 0cm から 168cm 刻みで 13 か所設置した。そして、実際に曲がった箇所は、1008cm, 1176cm, 1344cm, 1512cm および 1680cm の箇所である。この箇所は、曲がり角の 6 番目から 10 番目に該当する。

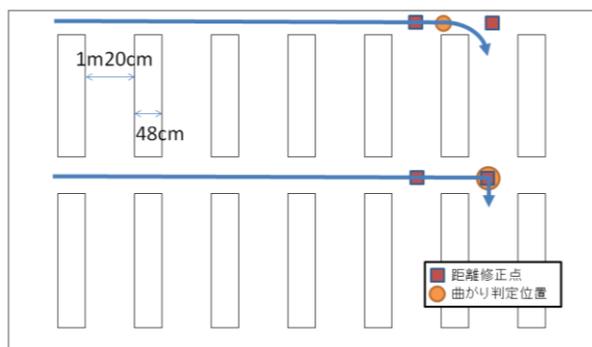


図 6 図書館のレイアウト図

Figure 6 The layout chart of library.

実験した結果、マップマッチングにより、誤った補正が起きることが多いことが分かった (表 5)。

表 5 曲がり判定時間を短縮した実験結果

Table 5 The experimental result which shortened rotation judging time.

曲がり箇所	歩数平均		修正距離平均		曲がり成功回数	
	右	左	右	左	右	左
1008cm	13.2	13.3	-24.6	-32.1	3	3
1176cm	16.1	15.9	-13.3	1.3	6	5
1344cm	17.6	17.7	6.7	-0.9	4	4
1512cm	19.7	19.8	-37.3	-45.7	1	1
1680cm	21.3	21.8	-13.0	-27.7	0	1

単位: 歩 単位: cm (n/10)

これは、人間はある程度の曲率でまがる。これが、図書館のように曲がり角が細かく設定されている場合、図 6 の上部のオレンジ色の丸で示すように、曲がりを検知する箇所が、本来の曲がりよりも手前の位置になる。そのため、手前の曲がり角を補正值として認識してしまいという、間違っただ補正が行われてしまう。

この対策として、曲がり判定の開始を曲がり開始位置にしていることが考えられる。曲がり区間の真ん中にすることで、適切に補正することができると考えられる。

5. 考察

波形の形的には、加速度センサによる歩数検出よりも、ジャイロセンサによる曲がり検出の方が、動きを想定しやすい。しかし、これを機械的に判定するのは容易ではない。

歩数検出では、センサは体に密着させた方が、良い検出結果が得られている^{[1][2]}。同様に、曲がり検出でも、体に密着させた方が、計測精度は上がると思われたが、体の動きを拾ってしまうため、検出が難しいことが分かった。

また、曲がりの検出よりも曲がりの終了を判定する方が難しいこともわかった。

曲がり角による補正は、非常に簡単で強力なツールにな

りえると思えたが、図書館のような曲がり箇所が多い場所では上手くいかなかった。曲がり箇所が多いときに、うまくいかないことは想像していた。しかし、曲がり判定位置が大事であるという点は、実験により気づかされた。

6. おわりに

一般的に普及しつつあるスマートフォンに内蔵されているセンサを利用して、歩数および曲がりを検出する研究を行った。これらの測位精度をあげるために、様々な実験を行った。

また歩数および曲がり得られた情報を元に、測位を行った。測位の際にマップマッチングの技術を用い、測位地の修正も行った。

事務所などの一般的なフロアでは、十分な測位結果が得られているが、図書館では間違っただ測位を行ってしまう確率が高いことが分かった。今後、改良をしていく予定である。

将来的には、超音波などによる、他の屋内位置測定システムと連動させることにより、有用なサービスを提供することを目指すものである。

謝辞 本研究は文部科学省科学技術研究費基盤(C)課題番号 24500219 の補助を得て行った。

参考文献

- 1) 須永光, 齊木拓実, 秋山征己, 五百蔵重典, 田中博, 山本富士男: 慣性センサを用いた歩行者の屋内位置推定法に関する基本実験と評価. 電子情報通信学会 ユビキタス・センサネットワーク研究会 (USN). 2012.
- 2) 鈴木博也, 秋山征己, 田中博, 五百蔵重典: スマートフォンを用いた歩行者の屋内位置推定に関する基本実験と評価. 電子情報通信学会ソサイエティ大会 (富山大学) A-17-5. 2012
- 3) 秋山征己, 須永光, 五百蔵重典, 田中博: 超音波センサを用いた広域屋内測位システムの構成と検証実験. 測位航法学会論文誌 Vol. 3 No.3 2012
- 4) 村田正秋, 瀬川爾朗, 鳥本秀幸: IMES の技術動向: シームレス三次元測位・航法の新技術, 電子情報通信学会誌, ISN-09135693, vol. 95, No.2, page:119-124, 2012
- 5) 岡龍太, TranXuanDuc, 新井イスマイル, 西尾信彦: 位置特定インフラ専用無線 LAN アクセスポイントの試作と測位精度制御の検討評価, 情報処理学会 全国大会講演論文集, No.1 pp275-277. 2011
- 6) 暦本純一, 塩野崎敦, 末吉 隆彦: PlaceEngine--実世界集合知に基づく WiFi 位置情報基盤, インターネットコンファレンス論文集, pp95-104, 2006
- 7) 梶克彦, 河口, 信夫: indoor.Locky:UGC を利用した無線 LAN 屋内位置情報基盤, 情報処理学会論文誌, ISSN-03875806, 情報処理学会, Vol.52, No12, pp3263-3273, 2011
- 8) P. Bahl and V.N. Padmanabhan: "RADAR: An In-Building RF-based User Location and Tracking System". Proceedings of Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFCOM 2000) Vol.2 pp.775-784 (2000)
- 9) 稲村裕之, 飯田康隆, 難波由樹, 屋内位置検知システム用 950MHz 帯無線受信機, 東芝レビュー Vol.66 No.4 pp20-23.2011

- 10) 荻野敦,恒原克彦,矢野隆,渡辺晃司,加藤猛,鈴木秀哉,無線 LAN 統合アクセスシステム(1)-位置検出システムの検討-,電子情報通信学会総合大会,B-5-203.仙台.2003-3,電子情報通信学会.2003,p662
- 11) 上野秀樹,佐藤義之,片岡淳,可視光 ID システム, 東芝レビュー-Vol.62 No.5 pp44-47.2007