

自律航法を使った屋内ナビゲーションシステムの実装検討

中込瑞大^{†1} 齋藤彰吾^{†1} 森信一郎^{†1}

概要: 現在 GPS は衛星からの信号を利用して行うため屋内環境における高精度な測位は難しいと言える。屋内における高精度なナビゲーションを行う技術は多く提案されているが環境の影響を受けやすく利用が困難である。そこで環境依存がない自律航法技術が提案されているが基準点を環境から取得しているため、利用開始までの時間が長い、測位精度のばらつきが大きいなど問題が報告されている。そこで、環境内に物理的なキャリブレーションを設置した自律航法システムの検討を行った。端末の姿勢、端末の向き及び位置情報を QR コードや NFC を通して取得し、地図情報との差異を修正しながら移動にともなう位置推定を持続的に行う。屋内での実験を通して誤差の修正方法などの比較を行い、最適な誤差修正手法アルゴリズムを考案したので報告する。

キーワード: 自律航法 キャリブレーション ナビゲーション

A study of a navigation system using Dead Reckoning

MIO NAKAGOME^{†1} SYOGO SAITO^{†1} SHINICHIRO MORI^{†1}

Abstract: Because of GPS uses signals from satellites, high-accuracy positioning is difficult to do in the building. There are some suggestions that provides the way to do high-accuracy positioning, but most of them can be affected by environment. Other suggestions to avoid it they use Pedestrian Dead Reckoning also has problems that takes long time to be available, there is large variation in accuracy, and so on. Therefore, in this paper, we set up a calibration stand and tried positioning with Pedestrian Dead Reckoning. Obtaining information such as pose, facing and position of phone from QR code or NFC, and it continuously estimates position with correcting difference with map. Through indoor experiments we made comparisons such as error correction methods and report an optimal error correction method as we devised.

Keywords: Dead Reckoning Calibration Navigation

1. 背景

現在屋外でのナビゲーションシステムは GPS(Global Positioning System)を用いた手法が確立しているといえる。しかしながら GPS は衛星からの信号を利用して行うため、屋内環境での高精度な測位は難しい。ショッピングモールや駅の地下街を訪れたときにその中にある特定の店舗に行きたい場合、そこを熟知している人であれば何も頼らずにたどり着くことができる。しかし、初めて訪れた人はインフォメーションに並んで説明を受けたり、他の人に聞いて目的の店舗を探したり、建物内の地図を探したりする必要がある。屋内のビーコンや RFID、周囲の電波の状況をキャッチすることで現在位置を取得するナビゲーションシステムも存在するが、周囲に存在する人の影響や新しく屋内にオブジェクトを設置した場合周囲の環境に影響を受けやすい。また周囲の電波強度から現在位置を推定する方法は現在位置や進行方向などを高精度に推定する必要があり、そのためナビゲーションを開始するまでに予備的な歩行が必要なため時間がかかってしまう。

2. 関連研究

2.1 iBeacon

ナビゲーションを行う場所の周囲にインフラを整備して、現在位置を推定する方法として BLE(Bluetooth Low Energy) ビーコンを用いる位置推定の手法[1]が提案されている。多数設置された BLE ビーコンの電波強度を取得することで現在位置を推定するというものである。Bluetooth を使用できるデバイスが増えていて様々な機器で活用することが出来る。しかし通信量の増加に伴い電波が混信する可能性があり、周囲の状況に大きく左右されるという欠点がある。

2.2 Wi-Fi 測位

周囲の電波状況を利用して現在位置を推定する手法の一つに Wi-Fi 測位[2]が上げられる。周囲に存在する無線 LAN のアクセスポイントから発信される電波状況を事前に取得してマップを作る。現在地点で測定した電波状況と比べることで位置を推定する方法が提案されている。市販されている無線 LAN を利用できることでインフラ投資を安価に抑えられる。しかし環境変化に伴って電波状況を更新する必要があるなど保守が難しい

2.3 磁場測位

絶対的な指標を用いてのナビゲーションの研究として地

^{†1} (株)千葉工業大学
Chiba Institute of Technology

磁気を用いたナビゲーション[3]が提案されている。屋外において周囲の地場を利用したナビゲーションであり、均一でない地場を利用することで地場が変わる場所を記録することで走行距離を修正させることでナビゲーションの精度を上げている。安定して走行距離を修正できているが、磁場の変化が少ないところでは精度が落ちてしまう。また走行場所の磁場マップが必要であることから屋内においては物の配置が少し変わるだけで磁場が変わってしまうので屋内においてナビゲーションを行うことは困難であると言える。

3. 提案手法

本論では自律航法でナビゲーションを行うために基準点を設け、その基準点から誤差の蓄積がナビゲーション可能な範囲を超える付近で再度基準点を經由することで持続的なナビゲーションを行うシステムを提案する。本手法は「位置推定モジュール」「速度推定モジュール」「方位推定モジュール」「キャリブレーションモジュール」の4つのモジュールから構成される。図1にモジュール構成図を示す。基準点ではナビを開始する前に端末のキャリブレーションを行う。端末に搭載されているセンサーの値や端末が向いている方位、端末の傾きを取得するために行う。図2のように透明なキャリブレーション台を用いて角にスマートフォンをはめ込み、QRコードを読み取ることでキャリブレーションを行う。このキャリブレーション台は事前に特定の向き及び台の傾きなどが調整され、その場所の位置情報と共に調整情報がQRコードに書き込まれている。図2にキャリブレーション台の画像を示す。

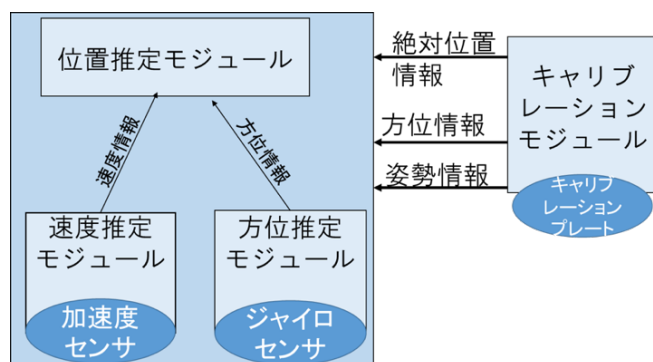


図 1 システム構成図



図 2 キャリブレーション台

3.1 速度推定モジュール

端末を持って歩行した際の端末の加速度を用いて周波数を計測する。1秒に50回データを取り5秒間のデータをFFT変換して振幅の最も高い周波数を歩行周波数とする。人の歩行周波数から歩行速度を算出する式①を用いてユーザーの歩行速度を算出する。図3に歩行周波数の算出方法を示す。縦軸は振幅、横軸は周波数を示す。図3より1.8Hzの振幅が大きいことがわかる。歩行においては歩行による振動が最も大きいためこの周波数が歩行周波数であると言える。取得した歩行周波数から歩行速度を推定する方法[4]を用いて歩行速度を推定する。算出式を式①に示す。

$$V = f / 18.59^{(1/0.42)} \quad \text{①}$$

f=歩行周波数

式①がどの程度の精度で歩いた距離を算出できるのかを身長が違う3人(169m、174m、179m)に86mの道を5回ずつ歩いてもらい検証した。実験結果を表1に示す。5回行った結果の平均値を取り、実際に歩いた距離との差から誤差率を算出した。この誤差率から身長が変わると歩いた距離が変わることがわかった。

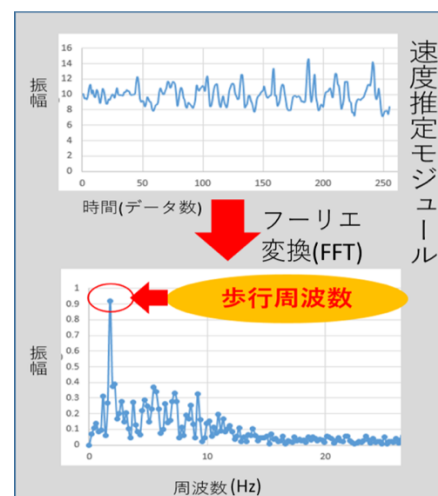


図 3 歩行周波数の推定

表 1 実験結果

身長(cm)	169	174	179
試行 1(m)	76.49	75.9	97.75
試行 2(m)	72.51	77.28	97.71
試行 3(m)	75.58	89.16	98.18
試行 4(m)	77.99	84.52	97.87
試行 5(m)	78.93	78.29	94.92
平均(m)	76.30	81.03	97.29
誤差(m)	9.70	4.97	-11.29
誤差率(%)	-11.28	-5.78	13.12

そこで歩行周波数と身長を用いた歩行速度を推定する方法[5]を用いて歩行速度の推定を行う。歩行速度を推定する式が式②である。

$$V = (0.001f)^2 + 0.37Hf \quad \text{②}$$

f=歩行周波数

H=身長[m]

この式を用いて同じ実験を行った。その結果を表 2 に示す。表 2 の誤差率を見ると表 1 の時と比べて誤差が少なくなっていることから個人差が抑えられていることがわかる。式②の身長を使用して歩行速度を求めると、身長によって実際の速度と推定した速度の差が少なくなり精度が向上したことがわかった。本論では式②の身長を考慮した歩行速度推定の式を使用する。

表 2 実験結果

身長(cm)	169	174	179
試行 1(m)	83.45	87.34	87.65
試行 2(m)	80.8	84.67	84.74
試行 3(m)	81.88	85.6	86.86
試行 4(m)	81.1	88.1	87.41
試行 5(m)	81.29	87.45	87.26
平均(m)	81.70	86.63	86.78
誤差(m)	4.30	-0.63	-0.78
誤差率(%)	-5.00	0.73	0.91

3.2 方位推定モジュール

端末のセンサーを用いて方位を取得する方法は複数存在する。その中でも一般的なものが地磁気を利用した方位推定方法である。水平面の地磁気センサーを使った方位は式③で求めることができる。

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{H_y}{H_x}\right) \quad \text{③}$$

H_x : x 軸の地磁気

H_y : y 軸の地磁気

式③を用いて 20 階建ての建物の 1 階と 12 階で方位を取得した。取得した方位を図 4、図 5 に示す。縦軸が方位を示していて、0 が北を示している。横軸は時間を示している。破線が正しい方位を示していて、実線が測定した方位を示

している。1 階では地磁気が安定しているが 12 階では地磁気の値が終始安定していない。

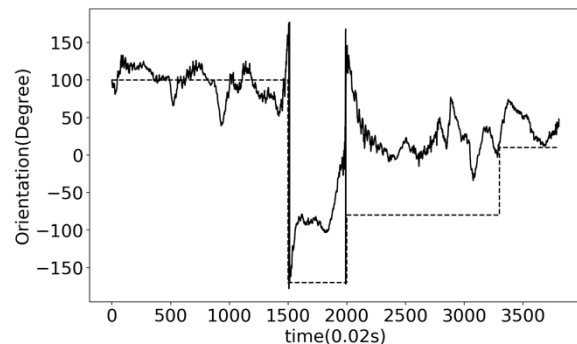


図 4 地磁気を用いた方位 (1 階)

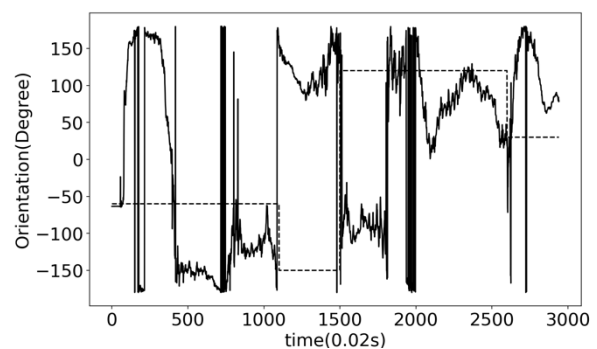


図 5 地磁気を用いた方位(1 2 階)

原因を調べるために 20 階建ての建物の 1 階と 12 階、20 階で地磁気について調べた。図 6 図 7 図 8 に各階における結果を示す。Bcomp の値が磁力線の量を示している。図 6 と図 7、図 8 から 1 階や 20 階に比べて 12 階は磁力線の数が少ないのがわかる。日本において磁力線は約 49 度(東京)で突入してくる。その水平成分を使って方位を算出するが、ビルの 12F では磁力線の量が 1F や 20F と比較して半減している。12F の方位が安定しないのはこれが原因と思われる。実験を行ったのは 20F 建てのビルである。つまり屋内において地磁気を用いて方位推定を推定することは安定しないことがわかった。



図 6 磁力線(1 階)

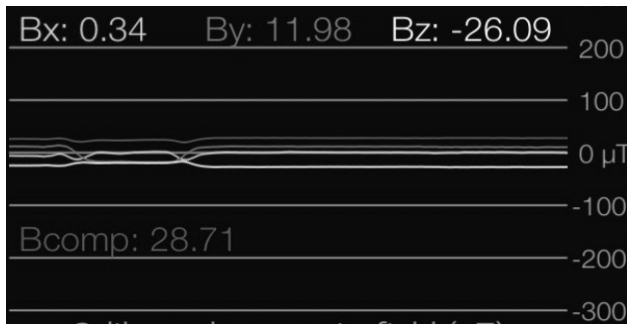


図 7 磁力線(12階)

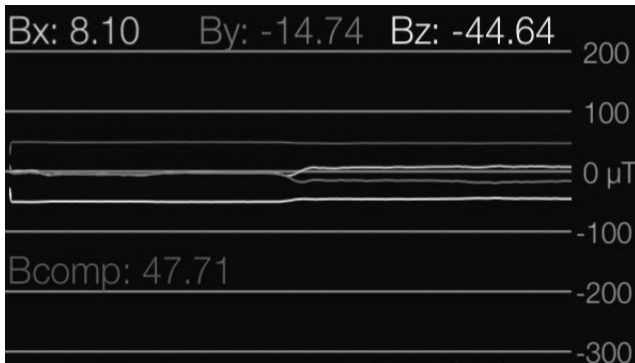


図 8 磁力線 20 階

本論では端末のジャイロを使った方位推定方法を提案する。端末のジャイロセンサから角速度を取得し、得られたデータにサンプリングレートで積分することで角度を算出する。

$$\text{rad}(n) = \int_{t1}^{tn} \text{rad} * dt \quad (4)$$

rad(n) : 現在の推定角度(rad)

rad : 角速度 (rad/s)

t1 : 計測開始時点での時間(ms)

tn : 現時点での計測時間(ms)

dt : サンプリングレート(ms)

ジャイロを利用して方位を推定する場合は最初に端末が向いている方向を外部から入力する必要がある。本提案ではナビゲーション開始時にキャリブレーション台に端末を設置して QR コードを読み取ることで最初の方位を取得する。この方式を用いて取得した方位が図 9 である。縦軸は方位、横軸は時間を表している。破線が正しい方位で実線が式④を用いて取得した方位である。正しい方位と比べてジャイロで推定した方位がだんだんずれていってしまっていることがわかる。この方位と速度推定モジュールで算出した速度を用いて算出した歩行軌跡を図 10 に示す。X 軸 Y 軸は地表面を示している。破線が最初の角を曲がるまでの求めるべき軌跡で実線が式①と式④を用いて算出した歩行軌跡である。長方形の廊下を 3 周したことはわかるが 1 周目に比べ、2 周目や 3 周目では方位が求めるべきものと異なっていることがわかる。ジャイロを用いた方位推定では端末のジャイロのヨー軸を用いて方位を推定しているので端末

の姿勢が地面と水平のときに正しい方位が算出される。そのため歩く際の振動や曲がるときに端末が斜めになることで 90 度を推定する精度が落ちてしまい、実際に曲がった角度よりも小さい角度が出てしまう。

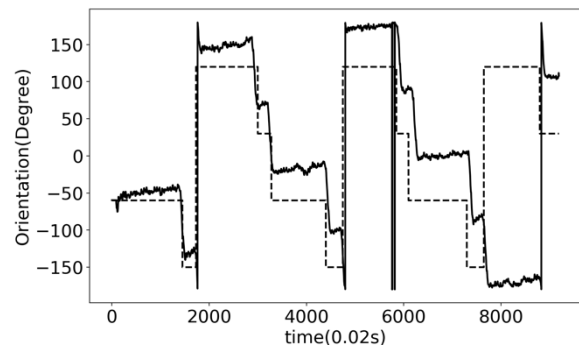


図 9 ジャイロを用いた方位推定

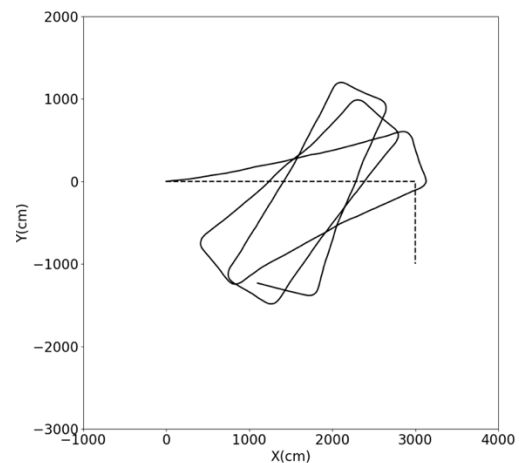


図 10 ジャイロを用いた歩行軌跡

そこで端末のジャイロセンサを用いて端末の姿勢を推定することでジャイロを用いた方位取得の精度の向上を狙う。端末の姿勢推定に、式⑤の状態方程式を用いた。

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \sin \phi \tan \theta & \cos \phi \tan \theta \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi \sec \theta & \cos \phi \sec \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \quad (5)$$

ϕ, θ, ψ : 世界座標系におけるロール・ピッチ・ヨー角

$\dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi}$: 世界座標系におけるロール・ピッチ・ヨー角速度

$\omega_x, \omega_y, \omega_z$: 端末座標系における x, y, z 軸周りの角速度
 この方程式では端末の世界座標系における回転および端末座標系における回転を、任意の回転軸周りの回転に変換したものである。右辺にジャイロセンサより得た角速度の値を代入することで、世界座標系におけるロール・ピッチ・ヨーの角速度を得ることができる。これを時間で積分して ϕ, θ, ψ を更新していくことで端末の姿勢を推定する。また以下の観測方程式を用いることで、世界座標系におけるロール・ピッチ角の補正を行った。式⑥に観測方程式を示

す。

$$\begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g \sin \theta \\ -g \sin \phi \cos \theta \\ -g \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix} \quad (6)$$

ω_x 、 ω_y 、 ω_z : 端末座標系における xyz 軸の加速度
 g : 重力加速度

このようにして推定した姿勢から世界座標系におけるヨー角 ψ を取り出し、これを方位として利用した。姿勢制御を行って取得した方位を図 11 に示す。縦軸は方位、横軸は時間を示している。破線が求めるべき方位で実線が姿勢推定を行って取得した方位である。姿勢制御を行わなかった図 4 と比べて 1 周目と 2 周目、3 周目で正しい方位と同じ方位を示していることから誤差が減少していることがわかる。この方位と速度推定モジュールで推定した速度を用いて算出した歩行軌跡を図 12 に示す。X 軸 Y 軸は地表面を示している。破線が最初の角を曲がるまでの求めるべき軌跡で実線が姿勢制御を行って取得した歩行軌跡である。姿勢制御を行わなかった図 10 と比べると歩行軌跡の広がりや抑えられ、同じところを周回したことがわかるようになっている。

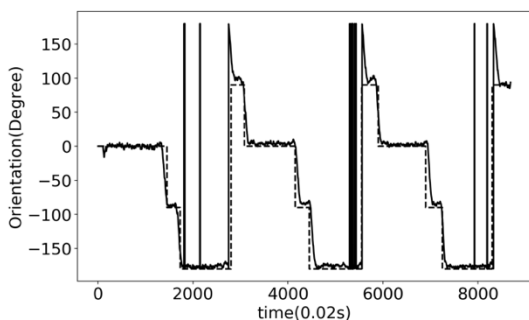


図 11 姿勢推定を用いたジャイロでの方位推定

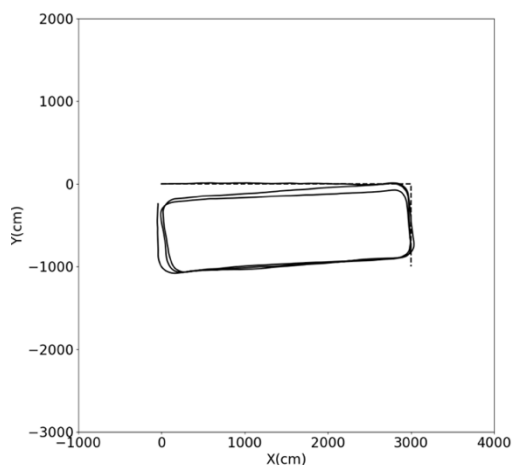


図 12 姿勢推定を用いた歩行軌跡

3.3 位置推定モジュール

速度推定モジュールで使用者の速度を算出し、方位推定モジュールから曲がった角度を算出してサンプリング間隔

ごとに掛け合わせることで、どの方向にどの程度進んだのかを推定する。位置を推定する際には XY の二次元座標を使用する。ナビゲーションをする際にはナビゲーションを行う場所の道路情報を必要とする。図 13 に道路情報を示す。X 軸 Y 軸は地表面を表している。線は道路を示している。ナビゲーション開始時に QR コードを読み取ることで現在位置の座標と端末が向いている方向を取得する。ナビゲーションが開始したら速度推定モジュールから算出した速度と方位推定モジュールから推定した方位を用いて現在位置を更新する。これを持続的に行うことでナビゲーションを行う。

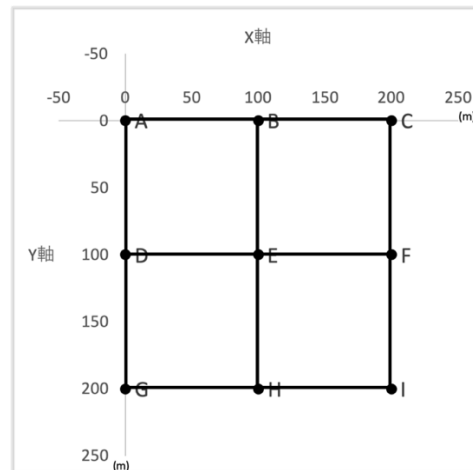


図 13 道路情報

位置推定モジュールの誤差を調べるために端末をキャリブレーション台に載せ、キャリブレーションを行った後に、40m 直進し 90 度曲がる実験を 10 回行い、角度がどの程度ずれるのか実験を行った。結果を表 3 に示す。実験の結果、角度の最大誤差が 3.04 度であり、距離にして 2m になることがわかった。これはキャリブレーション時の誤差であると言える。誤差が蓄積するとナビゲーションに影響を与えてしまい正しいナビゲーションが行えなくなってしまうので修正をする必要がある。

表 3 実験結果

回数	誤差(角度)
1	-2.31188241
2	-3.04996109
3	2.96888319
4	2.25224681
5	2.0620703
6	1.24414371
7	-1.36860018
8	1.62522573
9	1.41446393
10	1.70797276

3.4 キャリブレーションモジュール

位置推定モジュールで発生した誤差を取り除くために、

定期的にキャリブレーションを行う。今回はマップマッチングを使用したキャリブレーションを提案する。図13の道路情報を使用する場合を考える。今回実験する道路におけるキャリブレーションに必要なデータを表4に示す。道路マップ上の道路が交差する場所にAからIまでのポイントを設置する。各ポイントにはXとYの地平面上的座標を所持している。また道を外れて壁に向かわないように、道がつながっている方向への単位ベクトルを持っている。表4のデータを用いてキャリブレーションを行う。図13のD点からE点を通りF点まで直進し、F点を左に90度曲がりC点に移動する場合を考える。DからFまでは位置推定モジュールによる座標取得を行う。Fに到達する頃には距離及び角度に誤差が蓄積する。そこである時間以内に方位が一定以上変化した場合はポイントを曲がったと認識させる。曲がったと認識したら現在座標と全てのポイントの座標との距離を測定する。その中で一番近いポイントへ現在座標を移動させる。曲がり終えた時点での方位とポイントに設定されている移動可能な方位の中で、最も近いものに方位を修正する。図14に座標を移動させたときの軌跡を示す。線が歩行軌跡を示して四角が現在位置を示している。図14では円で示されたF点を通り過ぎていたが、現在の位置および方位を補正することによって曲がった後の軌道を修正し、C点までたどり着けていることがわかる。

表4 キャリブレーション用データ

ポイント	X	Y	ベクトル
A	0	0	[1,0],[0,1]
B	100	0	[1,0],[-1,0],[0,1]
C	200	0	[-1,0],[0,1]
D	0	100	[1,0],[0,1],[0,-1]
E	100	100	[1,0],[-1,0],[0,1],[0,-1]
F	200	100	[-1,0],[0,1],[0,-1]
G	0	200	[1,0],[0,-1]
H	100	200	[1,0],[-1,0],[0,-1]
I	200	200	[-1,0],[0,-1]

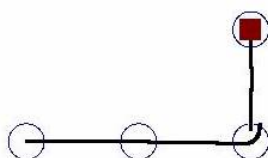


図14 座標の移動

3.5 使用条件

提案する方法でナビゲーションを行う場合にはいくつか制限が存在する。速度推定モジュールと方位推定モジュール

を使用して位置を推定する際に誤差が発生することを3.3で確認した。この誤差を補正する方法を3.4で提案したが補正できる範囲が存在する。現在の交差点と次の交差点をそれぞれ点P1、P2としPIP2間の距離をXとおいた場合、P2の周囲半径 $X \tan(3^\circ)$ (m)に別の点が存在しないならば補正をしてナビゲーションを行うことが出来る。もしこの範囲に別の点が存在する場合は現在位置を移動させるときに近くの違い点に移動してしまう可能性がある。

4. 実験

4.1 実験目的

提案手法で示したシステムを携帯端末に実装し、ナビゲーションの精度を評価する。システムはAndroidを使用しJava言語で作成した。各センサーの値をJava内に実装されたセンサーマネージャを介して取得し、計算等の処理をタイマー割り込みの繰り返しで動作させる。図15にプログラムのスタック図を示す。

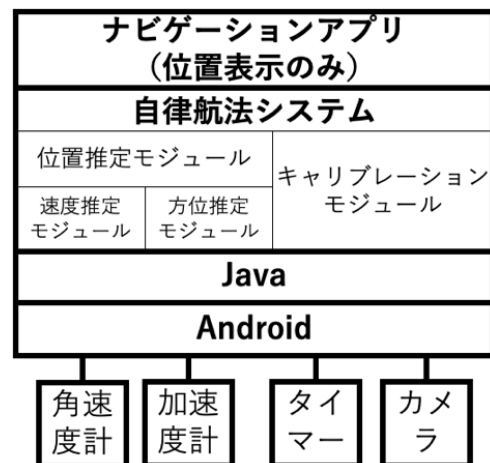


図15 プログラムのスタック

4.2 実験方法

千葉工業大学2号館1階の道が交差する場所にポイントを設置したマップを図16に示す。X軸Y軸は地表面を示している。表5にマップマッチング用のキャリブレーションデータを示す。提案するナビゲーションシステムを用いてマップ上のI点を開始地点とした。端末の水平状態と位置情報及び端末の向き情報の取得はキャリブレーション時に端末を置いてアプリを起動することで取得した。その後手のひらに載せて決められたルート歩く。今回歩くルートは図12のマップをI→J→G→H→L→K→E→F→B→C→G→H→D→A→E→F→Iの順番で移動する。左右に7回ずつ曲がり、曲がるまでに短い距離と長い距離の直線を歩き、すべてのポイント通るようにルートを設定した。同じ実験を3回行う。歩き終えたら端末内部の歩行軌跡を取得して正しくマップ通りに動いているか検証する。3人に3回行いばらつきも調査する。図17に実装した端末の画面を示す。1には歩行軌跡及び現在位置、ポイントの場所が示されていて2には現在のXY座標、速度や歩いている方

位などが示されている。3のボタンは開始時と終了時に押す。

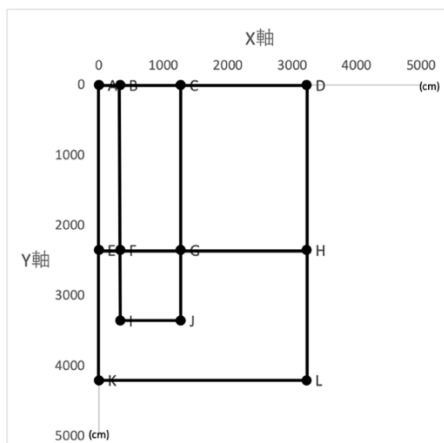


図 16 実験環境の道路マップ

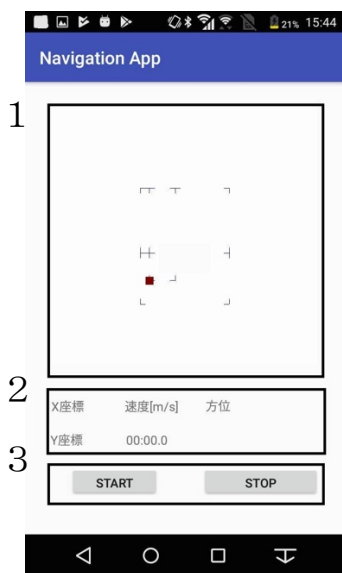


図 17 アプリの画面

表 5 ポイントの座標とベクトル

ポイント	X	Y	ベクトル
A	0	0	[1,0],[0,1]
B	330	0	[1,0],[-1,0],[0,1]
C	1270.5	0	[1,0],[-1,0],[0,1]
D	3217.5	0	[-1,0],[0,1]
E	0	2351.8	[1,0],[0,1],[0,-1]
F	330	2351.8	[1,0],[-1,0],[0,1],[0,-1]
G	1270.5	2351.8	[1,0],[-1,0],[0,1],[0,-1]
H	3217.5	2351.8	[1,0],[-1,0],[0,1],[0,-1]
I	330	3355	[1,0],[0,-1]
J	1270.5	3355	[-1,0],[0,-1]
K	0	4207.5	[1,0],[0,-1]
L	3217.5	4207.5	[-1,0],[0,-1]

4.2.1 実験結果

図 18～図 20 に実験結果として歩行軌跡の例を示す。X軸 Y軸は地表面の座標を示している。実験の結果、角を曲がったときに全てのポイントにおいて正しくマップマッチングをすることができた。また移動後のベクトルも正しい方向を向いていた。結果を見ると所々でポイントを通り過ぎてから曲がったり直線の道の歩行軌跡がゆっくり曲がっていたりしている事があった。しかし角を曲がるタイミングでのキャリブレーションを行うことで誤差を持続的に修正し、ナビゲーションを行った4分間の間正しく現在位置の座標を取りつづけることができた。また同じ人が歩いた軌跡は同じ形になっているのでアプリによる誤差は無視できる範囲だということがわかった。

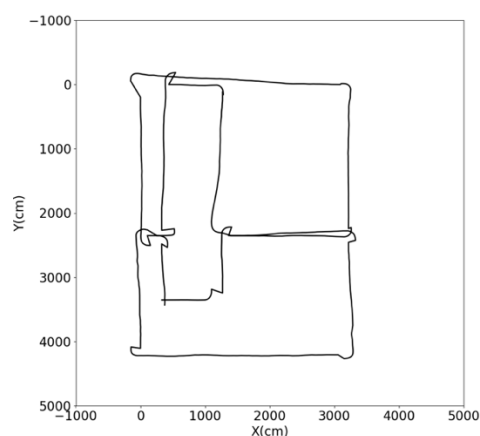


図 18 結果 1

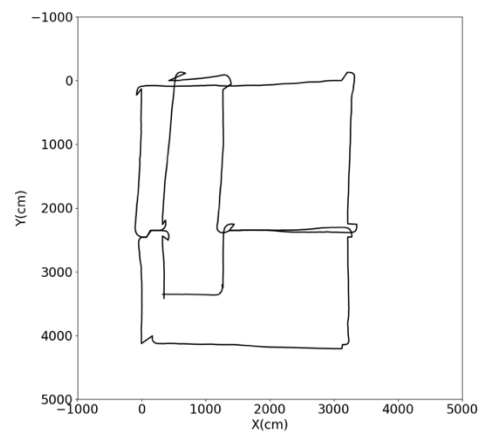


図 19 結果 2

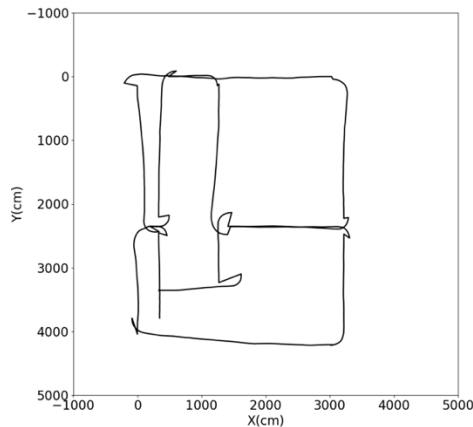


図 20 結果 3

5. 考察

今回提案したナビゲーションシステムで使用したマップマッチングの手法では事前に指定したポイントにおいて利用者が曲がったことを判断することが可能であるが、ホールのような広い場所で曲がった場合その場から最も近いポイントに現在座標が移動してしまうため、うまく歩行軌跡を取得することができない。この場合、一番近いポイントとの距離が一定以上離れている場合には現在位置の補正を行わないようにすることで回避が可能であると考えられる。

速度に関しては過去およそ 5 秒間の加速度センサのデータを FFT 変換して算出した周波数を用いているため、計測開始直後の歩行速度の取得が困難である。現状では計測開始時の速度を一定値で入力することで対処しているが、利用者の身長による誤差が生じてしまう。そのため加速度センサで歩行の振動を取得し、その分だけ身長から推定される歩幅を移動距離とすることで開始直後の速度を推定するという方法が有効と考えられる。

姿勢推定を行うことで端末がロール・ピッチ軸に傾いている状態でも方位推定が可能ではあるが、オイラー角を利用している都合上角度をつけすぎるとジンバルロックを引き起こして正しい方位が得られなくなる。ジンバルロックに関してはクォータニオンの利用によって改善できると考えられる。また本論におけるナビゲーションでは利用者が端末を進行方向に向けた状態で持ち歩くことが前提となっているため、ポケットに入れたり横向きで持ったりしている状態では正しい方位が得られない。ジンバルロックの問題を解消した上で端末姿勢の追跡を行うことができれば、端末がどのような向きでも開始時の姿勢からの相対的な変化を見ることで継続的に方位を推定することできると思われる。

6. まとめ

本研究では周囲の環境に影響を受けない位置推定の手法

として、キャリブレーション台(図 2)を用いてナビゲーション開始時に端末の傾きやセンサーの値、現在位置などのデータを読み込むことで自律航法を用いて長時間ナビゲーションを行う方法を提案した。また提案手法のナビゲーションシステムを適用できる条件を示し、その条件を満たしていれば正しくナビゲーションが出来ることを示した。また今回実装したのは位置推定システムであり、ナビゲーションはまだできていない。今後は提案した位置推定システムを用いて実際にナビゲーションを行えるようなシステムを作る予定である。

参考文献

- [1] BLE 位置測位および PDR を用いたハイブリッド型屋内位置測位手法の提案 情報処理学会研究報告 Vol.2015-MBL-76No.13
- [2] 個人向け屋内外シームレス測位に向けた Wi-Fi を使用した屋内測位技術の屋外への適用検討 情報処理学会論文誌 コンシューマ・デバイス&システム Vol.5 No.4 132-143(Oct.2015)
- [3] 日本ロボット学会誌 Vol.32No.4, pp.395-402, 2014 磁場の実験的解析に基づく磁気ナビゲーション法の実装
- [4] ヒトの歩行-歩幅、歩調、速度およびエネルギー代謝の観点から-(1)山崎昌廣(2)佐藤陽彦 J.Anthrop.Soc.Nippon 人類誌
- [5] 移動形態と歩行速度を考慮した消費カロリーの無拘束推定 計測自動制御学会東北支部第 202 回研究集会資料番号 202-11
- [6] 歩行者自律測位における行動センシング知識の利用 マルチメディア、分散、協調とモバイル(DICOMO2014)シンポジウム
- [7] 上坂大輔、村松茂樹、岩本健嗣、横山浩之.手に保持されたセンサを用いた歩行者向けデッドレコニング手法の提案 情報処理学会論文誌、Vol.52, pp.558-570, 2011.
- [8] 安齋恵一、岡島匠吾、坪川宏 スマートフォンを用いた屋内位置の推定と歩行ナビゲーションシステム マルチメディア、分散協調とモバイルシンポジウム 2011 論文集、第 2011 巻、pp.921-927, 2011.安齋恵一、岡島匠吾、坪川宏
- [9] スマートフォンを用いた屋内位置の推定と歩行ナビゲーションシステム マルチメディア、分散協調とモバイルシンポジウム 2011 論文集、第 2011 巻、pp.921-927, 2011.
- [10] NTT データ地磁気を用いた高精度屋内位置情報サービスを提供開始 <https://www.nttdata.com/jp/ja/news/services.info/2018/050101/> (閲覧日)2019 年 7 月 26 日
- [11] 田島洋.マルチボディダイナミクスの基礎 3次元運動方程式の立て方.東京電機大学出版局,2006. EBSCOhost,<https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=nlebk&AN=217064&lang=ja&site=eds-live>(閲覧日)2019 年 7 月 26 日