

# 慣性センサ内蔵 HMD による位置推定とナビシステムへの応用

小坪勇亮<sup>†1</sup> 法月佑太<sup>†2</sup> 五百蔵重典<sup>†1†2</sup> 田中博<sup>†1†2</sup>

位置推定手法として、慣性センサを用いた方法は一つの有力な手法である。筆者らの検討手法の特徴は、メガネ型 HMD に内蔵されている慣性センサを用いることにある。保持方法が限定されていること、および建物の構造や人間の歩行の性質を考慮することにより、位置推定が容易になる。本報告では、HMD 内蔵センサを利用した位置推定手法を述べ、実験によりその精度評価を行った結果を示す。さらに、HMD が透過型であることを利用した AR ナビゲーションシステムの実現を目標に、HMD 上に実際の風景とブラウザを用いた地図情報や、位置推定結果を表示する方法を検討し、基本的な動作結果を行った結果を示す。

**キーワード**：屋内測位、慣性センサ、HMD、地図情報

## Position Estimation by Inertial Sensors implemented in HMD and Application to Navigation System

YUSUKE KOAKUTSU<sup>†1</sup> YUTA NORIZUKI<sup>†2</sup>  
SHIGENORI IOROI<sup>†1†2</sup> HIROSHI TANAKA<sup>†1†2</sup>

Method of indoor positioning using inertial sensors is one of the promising methods. The position estimation could be easy for fixed attachment method, by taking characteristics of buildings structure and human walking into account. This report describes position estimation using inertia sensors implemented in the HMD and shows the evaluation experimental results for estimation accuracy. In addition, the realization of AR navigation system has been investigated using the HMD, which can superimpose the map information including estimated position on real scenery. The basic functional test result is also shown by using the positioning result.

**Keywords**: Indoor Positioning, Inertial Sensor, Head Mounted Display, Map Information

### 1. はじめに

屋外測位では GNSS が標準的な方式となり、地図情報と連携したカーナビゲーションなど多くのサービスが普及している。一方、屋内測位に関しても人の位置・動きや搬送車両の自動誘導、場所に応じた情報提供など多くのニーズがある。その中で、WiFi の電波強度[1]や RFID タグ[2]、人間の耳では聞こえない音を用いた測位システム[3]など多くの方式が検討され、一部実フィールドでの実証実験もなされている。

一方、慣性センサを用いた慣性測位技術は従来から多くの検討がなされている。近年は複数のセンサが搭載されているスマートフォンや、ウェアラブル端末が普及していることにより、一般ユーザは慣性測位技術を利用しやすい環境にある。しかし、端末に表示される測位結果などの情報を歩行中のユーザが確認する行為は「歩きスマホ」[4]と呼ばれ、近年問題になっている。ユーザは情報を確認する度に静止しなければならず、ナビゲーションの利便性が失われている。そこで筆者らは、慣性センサ内蔵の透過型の

HMD に着目し、実風景とともに歩行しながら透過型画面内の地図と位置情報を確認できる屋内ナビゲーションシステムと HMD における慣性測位手法を検討する。

本論文では、建物内の通路の形状や通路での人間の歩行の特徴を用い、歩行速度による移動距離の推定と曲り検出、および蓄積誤差の補正からなる位置推定手法を提案するとともにその評価実験結果を述べる。また、当研究室で開発中の屋内測位プラットフォームを用いた HMD への表示の結果について述べる。

### 2. 関連研究

前述で述べたとおり、慣性センサを用いた研究は既に多くの提案と実証がなされている。上坂ら[5]は加速度と地磁気センサから得られたデータを用いて、手振りをした時に起きる振り子運動に着目し、携帯電話の手持ちと手振りの 2 種類に対応した、歩行者向け PDR 手法を提案している。興枡ら[6]は、歩行者を対象として、歩行者に装着された自蔵センサ（加速度・角速度・地磁気）から得られたデータに基づいて、歩行動作による移動距離と方位をカルマンフィルタによる枠組みを用いて推定し、基準位置からの相対移動量を推定する手法を提案している。そして、

<sup>†1</sup> 神奈川工科大学 情報学部 情報工学科  
Department of Information & Computer Sciences, Kanagawa Institute of Technology.

<sup>†2</sup> 神奈川工科大学大学院 工学研究科 情報工学専攻  
Course of Information and Computer Sciences, Graduate School of Kanagawa Institute of Technology

1. 平坦なフロア上での歩行
  2. 事前に歩行速度を推定するための回帰係数を取得
- 上記の2つの条件を設けることにより、興梠らの手法は保持条件に制約がなく、曲り方位を限定しない高精度かつ、汎用的な屋内測位を可能としている。その処理手順を図1に示す。

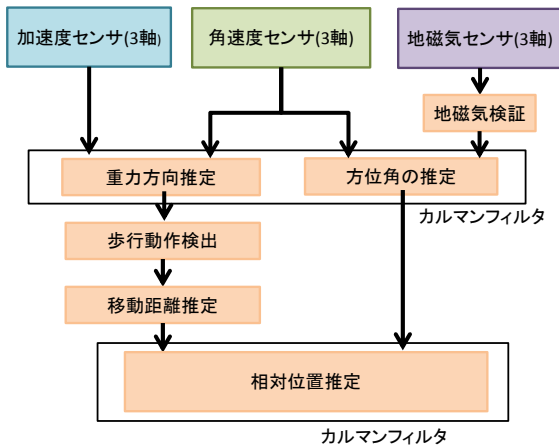


図1 興梠らの位置推定処理手順

### 3. 位置推定

#### 3.1 前提条件

興梠らの手法をベースに、平坦なフロア上での歩行を条件とし、事前に歩行のデータを取得する。またこの条件に加え、所持方法を限定し、建物の構造や人の歩行の特徴を取り入れ、目的位置までのナビゲーションへの適用という点に絞って検討する。この条件から、より簡易に位置推定が可能になると考えられる。

筆者らは位置表示と実風景の確認のために、図2に示す透過型のHMD (MOVERIO BT-200AV) を利用する。結果として、装着方法は眼鏡と同様となり、またセンサの検出軸も固定される。また MOVERIO[7]には、図2に示しているようにレンズ部横に各3軸の加速度、角速度、地磁気を搭載している。

1. 装着方法は眼鏡と同様 (HMD 内蔵センサの利用)
2. 建物の構造や人の歩行の特徴
  - 直進方向は壁と平行に歩行する。
  - 曲りは $\pm 90^\circ$  と仮定する。
  - Uターンの場合は $\pm 180^\circ$  と仮定する。
  - 回遊などは対象外とする。
  - 廊下中央を歩行する。(マップマッチングの適用)

上記の2つの条件と図2の装着条件を考慮にすると図3に示す、慣性センサによる屋内測位の技術項目として、歩行速度を用いた移動距離推定と、曲りの正確な検出に限定できると考えられる。

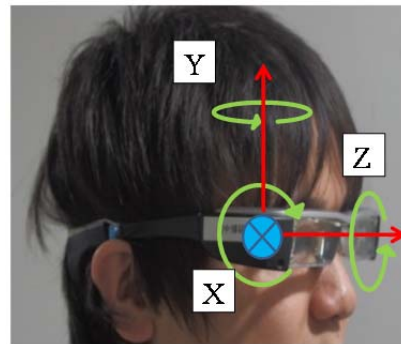


図2 HMDの装着と検出軸

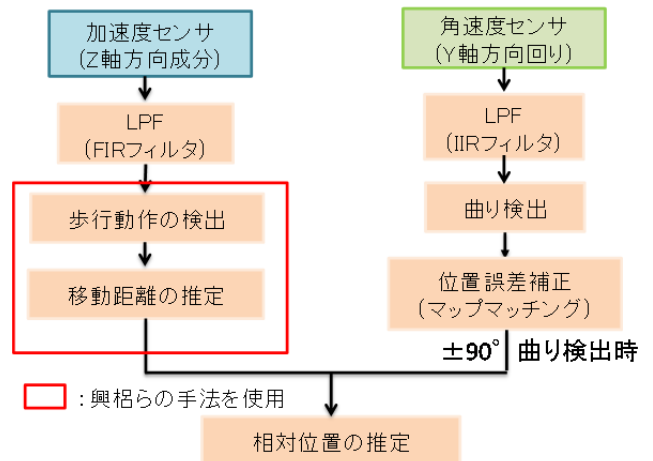


図3 本検討手法の位置推定処理手順

#### 3.2 推定手法

##### 3.2.1 歩行動作の検出

筆者らは、興梠らの手法である、一步の歩行動作の検出に、加速度センサから取得したZ軸方向の加速度のデータを用いる。加速度データにおける一周期ごとの最大値と最小値から求めた傾き(最大値から最小値に減少)が、一定の閾値を超えた時に一步の歩行動作として検出する [9]。また、加速度データに含まれる高周波成分を、ローパスフィルタ (FIR, 10次, カットオフ周波数: 1.5[Hz]) を適用し除去する。

歩行動作の検出に用いる閾値は、事前に通常の歩行を行ったときの歩行データを被験者から10回取得し、それを基に被験者の適切とされる閾値を式(1)を用いて算出する。

$$T = \alpha \times 0.8 \quad (1)$$

ここで、

$\alpha$ : 10回の歩行データから求めた傾きの平均値である。なお係数0.8は事前実験により求めた値である。

また移動距離推定のために、図4に示しているように、加速度データが0[G]を超えてから一周期の時間を一步の所要時間として計測する。

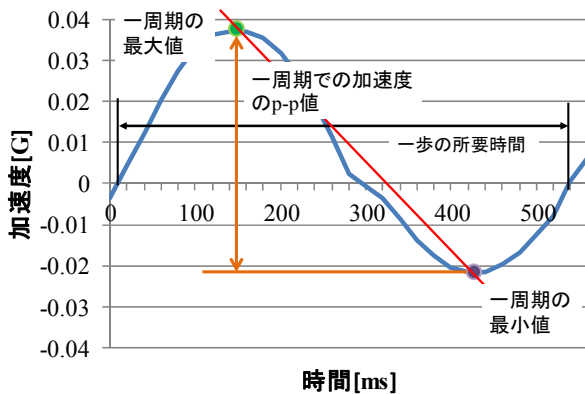


図4 一步分のZ軸方向の加速度成分

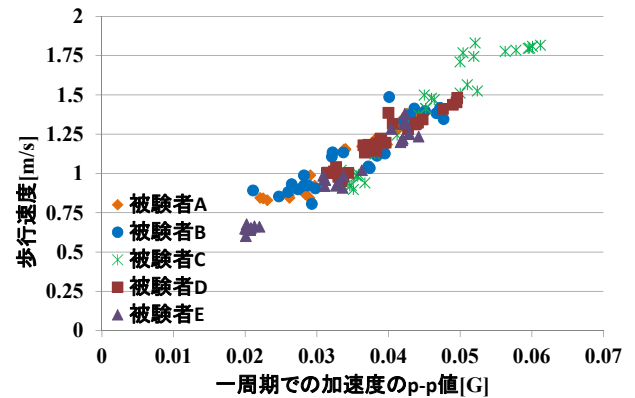


図5 Z軸方向の加速度成分の回帰直線

### 3.2.2 歩行速度推定

筆者らは、興枙らの手法を踏襲し、歩行速度の推定に図4に示す一周期での加速度の p-p 値を用いる。一周期での加速度の p-p 値を、図5に示す興枙らと同じく事前に求めた一周期での加速度の p-p 値と歩行速度の回帰直線に代入することで、歩行速度を推定する[8].

歩行速度を推定するための回帰係数の算出には、ある一定の歩行速度で歩行した時の全ての最大値と最小値の差分値の平均と、実際の歩行速度の計測値を用いる。一周期での加速度の p-p 値と、実際の歩行速度を回帰分析により、歩行速度を推定するための回帰係数と相関係数を求める。回帰分析のために、歩行速度を変えて、p-p 値と歩行速度のデータを取得する。

図5に示す5人の被験者の回帰係数は、被験者 A=27.5, B=25.7, C=36.1, D=28.1, E=29.4 で、相関係数は、被験者 A=0.97, B=0.95, C=0.95, D=0.95, E=0.97 であった。一周期での加速度の p-p 値と歩行速度には強い相関関係であるが、歩行速度を推定する回帰係数には被験者間のばらつきがあるため、被験者ごとに回帰係数を事前に求めることが必要である。

移動距離の推定は、歩行速度推定後に式(2)を用いて算出する。

$$D = \sum_{i=1}^n v_i \times \Delta t_i \quad (2)$$

ここで、

$D$  : 推定する移動距離

$n$  : 歩数の検出回数

$v_i$  :  $i$ 番目の歩数の推定速度

$\Delta t_i$  :  $i$ 番目の歩数の所要時間

である。

### 3.2.3 曲り検出手法

筆者らは、曲りの検出として、角速度センサから取得した Y 軸方向の角速度のデータを用いる。角速度のデータを用いた曲り検出を行う手法を図6に示す[9]. 建物内の曲り角は、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$  曲りなどが予想されるが、本検討手法では前提条件でも述べた  $\pm 90^\circ$ 、 $\pm 180^\circ$  曲りに限定した曲り検出のみ行う。また、角速度データに含まれる高周波成分を、ローパスフィルタ(IIR, 2次, 時定数: 0.03, Q 値: 0.5)を適用し除去する。

またアルゴリズムで使用している閾値のパラメータは、事前に  $\pm 90^\circ$  と  $\pm 180^\circ$  の曲がりを行ったときの角速度データを取得し、実験により最適と思われる閾値を求める。本検討手法ではローパスフィルタ (IIR) を適用した角速度データ  $\omega'$  の絶対値が、判定条件を満たした時に曲り開始を検出する。曲り開始検出から 1 秒後に  $\omega'$  の変化が  $90^\circ$  判定の閾値  $20[\text{deg/s}] \leq \omega' < 60[\text{deg/s}]$  以内であった時、 $90^\circ$  の曲りとして検出し、 $180^\circ$  判定の閾値  $60[\text{deg/s}]$  以上であった時、 $180^\circ$  の曲りとして検出する。どちらも取得した  $\omega'$  の正負を判定し左右判定をしている。なお 1 秒後に閾値以上の  $\omega'$  の変化がなければどちらの曲りも検出しない。

### 3.2.4 マップマッチングによる位置補正

一般に PDR において、歩幅や歩数の未検出・誤検出による誤差が蓄積することが知られている。音による絶対測位や、マップマッチングの適用により蓄積誤差の補正を行う研究もある。本検討手法では、幾何解析マップマッチング手法を適用し、PDR における蓄積誤差を補正する。左右  $90^\circ$  の曲りを検出した際に、推定した位置から最も近い廊下中央にあるノード (あらかじめ曲り角の中央に設置された座標値) の座標値に補正することで推定した移動距離の蓄積誤差を補正する。図7にマップマッチングによる補正の有無による測位結果の一例を示す。

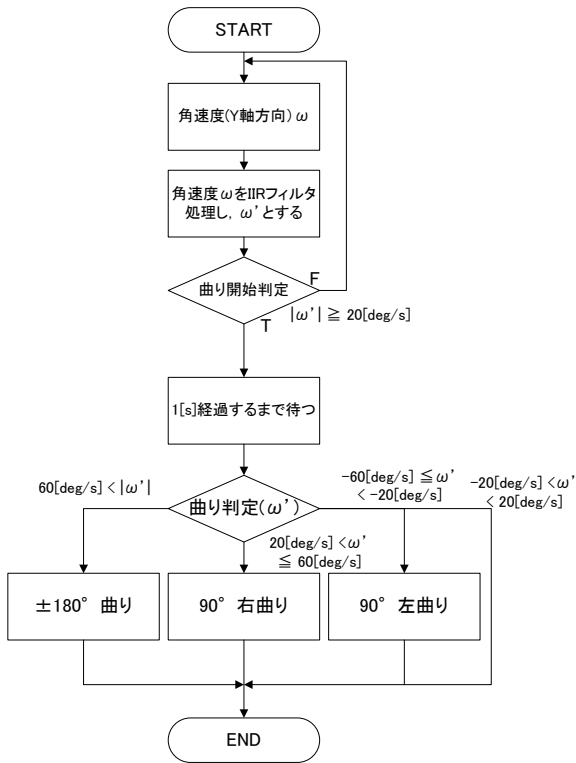


図6 曲り検出フロー

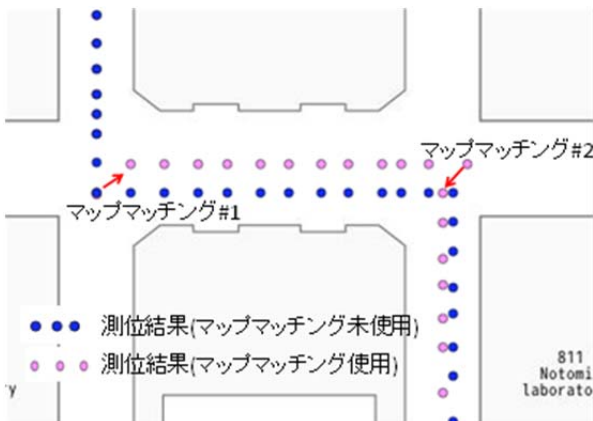


図7 マップマッチングによる補正

## 4. 評価実験

### 4.1 歩行速度推定の精度確認

本評価実験においては、被験者を20代成人5名とし、ストップウォッチで歩行者の歩行時間を計測する協力者と、被験者1名が直線距離35[m]を歩行する。条件として、廊下の中央を歩行かつ、歩行速度を通常の歩行と、早歩きの種類に分け、各10回試行する。歩行速度を推定するために、3章で述べた被験者ごとの回帰係数を用いる。実際の歩行速度はストップウォッチで計測した時間と、歩行距離から求めた。実験により結果を10回の平均値と、括弧の中に最大値と最小値を求め、表1、表2に示す。

実験の結果から、回帰係数を用いた歩行速度の推定手法

では、実際の歩行速度の90[%]以上の精度で推定が可能であり、歩行速度に左右されずに推定することが可能であることを確認した。測定値・推定値ともに、歩行速度の最小値と最大値は0.2[m/s]程度のばらつきが見られることを確認した。

表1 歩行速度(通常の歩行)

被検者	測定値[m/s]	推定値[m/s]	精度[%]
A	1.17(1.12 ~ 1.21)	1.08(0.98 ~ 1.15)	92
B	1.16(0.99 ~ 1.23)	1.05(1.06 ~ 1.27)	91
C	1.45(1.31 ~ 1.56)	1.37(1.22 ~ 1.49)	94
D	1.12(1.02 ~ 1.21)	1.10(1.13 ~ 1.25)	98
E	0.98(0.90 ~ 1.02)	0.90(0.85 ~ 1.05)	92

表2 歩行速度(早歩き)

被検者	測定値[m/s]	推定値[m/s]	精度[%]
A	1.35(1.28 ~ 1.38)	1.24(1.15 ~ 1.29)	92
B	1.39(1.33 ~ 1.48)	1.33(1.28 ~ 1.46)	96
C	1.80(1.74 ~ 1.91)	1.67(1.61 ~ 1.83)	93
D	1.39(1.28 ~ 1.48)	1.38(1.19 ~ 1.43)	99
E	1.27(1.19 ~ 1.37)	1.16(1.07 ~ 1.29)	91

### 4.2 曲り検出評価

曲り検出評価において、ローパスフィルタ(IIR)を用いた曲り検出手法の評価を行う。被験者は歩行速度推定の精度確認と同様の被験者5人とし、図8に示す指定の経路を歩行する。90°の曲り検出は時計回り、反時計回り(曲率半径1[m], 2[m])で行う。180°曲り(Uターン曲率半径1[m]と引き返し)検出についても、時計回り、反時計回りで評価実験を行う。各20回試行した。

曲る際の前提として、曲り角であらかじめ曲率半径1[m], 2[m]に沿ってテープを貼り、そのテープ上を歩行した。90°, 180°曲りの検出結果を表3に示す。

実験の結果から、90°の曲りと180°の曲りに関して、曲率半径1[m], 2[m]の場合で、90%以上と検出率が極めて高いことを確認した。被験者によっては、180°曲り検出を、閾値を越えないため90°曲り検出と誤検出をしてしまうことがあった。

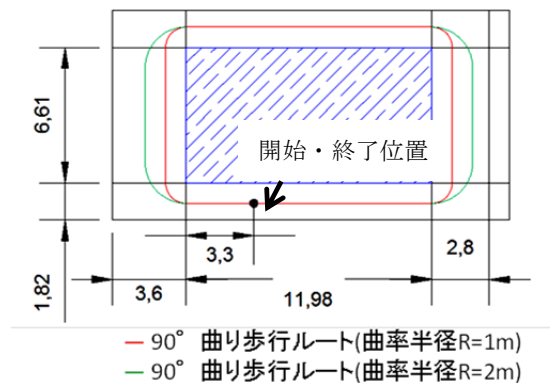


図8 実験歩行ルート

表3 曲り検出結果

被検者	検出経路	曲率半径1[m]		曲率半径2[m]		引き返し	
		右回り	左回り	右回り	左回り	右回り	左回り
A	90° 曲り	20	20	19	19	-	-
	180° 曲り	20	20	-	-	18	19
B	90° 曲り	19	19	19	19	-	-
	180° 曲り	18	19	-	-	19	20
C	90° 曲り	20	18	18	18	-	-
	180° 曲り	20	20	-	-	18	20
D	90° 曲り	19	20	18	20	-	-
	180° 曲り	19	19	-	-	18	19
E	90° 曲り	20	19	20	19	-	-
	180° 曲り	20	19	-	-	19	18

n(検出数)/20

表4 通常の歩行の評価結果

被験者	マップマッチングによる補正			
	曲り検出誤りなし		曲り検出誤り	
	無	有	無	有
A	0.7, 0.9	0.0, 0.7	7.5, -7.7	7.0, -7.2
B	0.6, 0.9	0.0, 0.6	7.9, -8.9	7.5, -8.3
C	0.8, 0.9	0.0, 0.7	-	-
D	0.8, 0.9	0.0, 0.7	-	-
E	0.7, 1.1	0.0, 0.9	7.6, -8.5	7.3, -9.1

[m]

4.3 総合評価

本評価実験では、3章で述べた推定手法と、前節までの評価実験に基づき、屋内位置推定の評価実験を行った。被験者は、歩行速度推定の精度確認、曲り検出評価と同様の5名で行った。被験者は図9に示す8の字状のルート（総歩行距離:84.6[m]）を歩行する。本実験では開始と終了位置は同一であり、座標値は(0, 0)とする。曲り歩行は本評価実験環境下では、曲率半径 R=1[m]での曲りとする。曲り検出の評価実験と同様に曲るルートには事前にテープで道筋を貼った。また、蓄積誤差の補正にはマップマッチングによる誤差補正を行った。本実験では、通常の歩行と早歩きを各10回試行し、曲り検出誤りなしの測位結果の平均と、曲り検出誤りの場合の測位結果の平均を表4、表5に示す。

表5 早歩きの評価結果

被験者	マップマッチングによる補正			
	曲り検出誤りなし		曲り検出誤り	
	無	有	無	有
A	0.6, 1.1	0.0, 0.8	-	-
B	0.8, 0.9	0.0, 1.0	7.1, -9.1	7.6, -8.1
C	0.7, 0.8	0.0, 0.7	-	-
D	0.6, 0.9	0.0, 0.8	7.8, -8.2	7.2, -7.6
E	0.5, 0.6	0.0, 0.6	7.5, -7.9	8.0, -9.0

[m]

実験の結果から、本評価実験環境下において、曲り検出誤りなし、かつマップマッチングによる補正有の場合では、マップマッチングによる補正によりX軸の座標の誤差は距離が短いこともあり、0[m]となった。また、Y軸の座標も終了位置から1[m]以内の推定が行えていることを確認した。マップマッチング補正が行われていない場合においても1[m]前後の誤差で推定出来ることを確認した。直線距離が短いため、比較的誤差が小さいが、その区間が長くなるほど通常の歩行と早歩きの誤差の相違は大きくなる。曲り検出に誤りがある場合においては、大きな誤差となり、何らかの補正手段が必須となることを確認した。

5. 推定位置表示

得られた測位結果を用いた現在の位置確認、移動軌跡の確認や経路探索、ナビゲーションなどアプリケーション開発のためには、地図情報とのリンクは不可欠である。スマートフォン内に地図を持つこともアプリケーションによっては最適な方法であるが、本検討手法においては図10に示す、場所に応じたプラットフォーム側からの情報提供、地図の共有と端末の負荷軽減などを考慮し、サーバに地図を格納する構成を用いた[11]。また、MOVERIOを装着したユーザは測位結果の送受信を行うために、MOVERIOとスマートフォンのWiFiテザリングを用いた。さらに現在の位置と、移動軌跡は図11に示すようにMOVERIOにインストールされているブラウザを用いて測位結果を表示した。

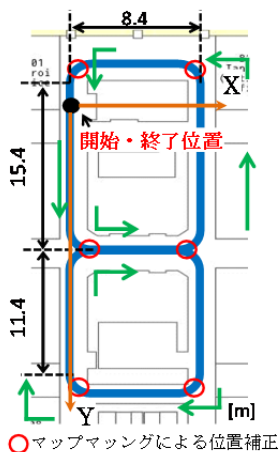


図9 総合評価実験ルート

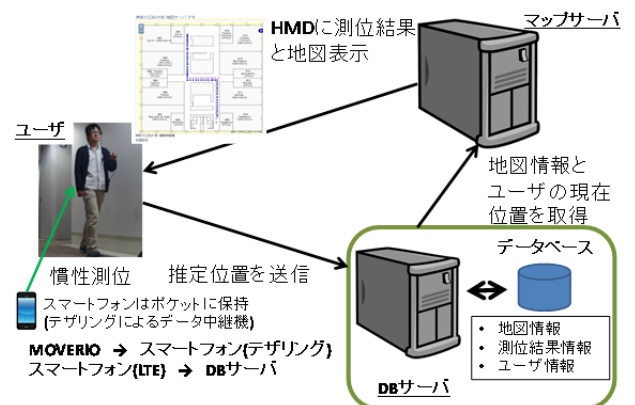


図10 プラットフォームの構成





図 11 MOVERIO 上での測位結果の表示

マップサーバ[12]を用いた地図と推定位置の表示の処理手順を図 12 に示す。スマートフォンが DB サーバと通信を開始した時、マップサーバは地図をブラウザ上に表示する。地図の表示後、ユーザは歩行により現在位置の推定を行い、結果をスマートフォンの WiFi テザリングで送信する。送信後は、データベースにユーザ情報と、測位結果情報を格納する。マップサーバは、データベースから測位結果とユーザ情報を対応付けさせ、事前に表示した地図上に現在の位置と、移動軌跡を表示する。

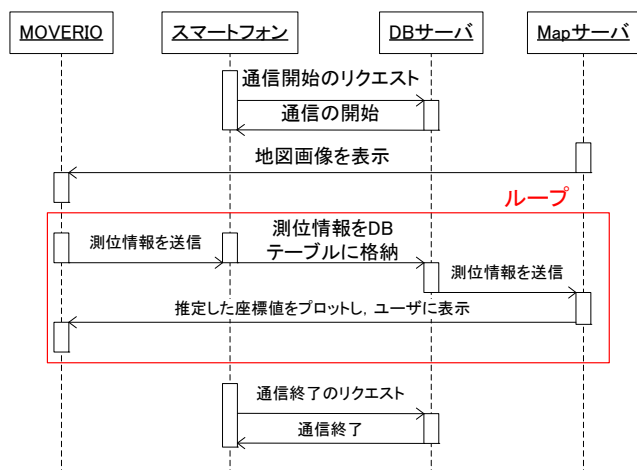


図 12 推定位置表示の処理手順

## 6. まとめ

本報告では、慣性センサ内蔵の透過型 HMD を利用することによってセンサの所持方法を固定し、さらに建物の構造や人の歩行の特徴を考慮することによる簡易な位置推定手法について述べた。移動距離を求めるための加速度の変化に基づく歩行速度の推定、曲り検出、および位置推定誤差補正の方法を検討した。そして、これらの個別要素を実験によって評価するとともに、HMD 上への位置表示を含めた総合評価を行った。

被験者ごとに歩行速度を推定する回帰係数を取得することで、被験者間のばらつきを吸収し、歩行速度に左右されず推定が可能であることを示した。

曲り検出においても、ローパスフィルタ (IIR) を用いた

手法により  $90^\circ$  の曲りと  $180^\circ$  の曲りに関して、曲率半径  $1[m]$ ,  $2[m]$  の場合で  $90\%$  以上の検出率であることを確認した。そして、マップマッチングによる補正を用いることで、本実験環境下においては、終了位置から誤差  $1[m]$  以内での推定が可能であることを示した。

また透過型の HMD を用いることで、実風景上に地図と移動軌跡、現在位置を表示できることを確認した。今後は、曲り検出誤りがある場合の補正方法を検討し、より高精度な位置推定手法を構築していく必要がある。

## 参考文献

- [1] 木下泰三, 荻野敦, "無線 LAN と UWB の Indoor 測位," 測位航法学会 GPS/GNSS シンポジウム 2010, pp.94-101, 2010.
- [2] 細川直史, 高梨健一, 滝澤修, "電子タグによる屋内測位を利用した携帯電話からの通報システム," Theory and Applications of GIS, Vol.18, No.1, pp.79-85, 2010.
- [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.1, pp.1-8, 2012.
- [4] "歩きスマホ," <http://www.tfd.metro.tokyo.jp/lfe/topics/201403/mobile.html>
- [5] 上坂大輔, 村松茂樹, 岩本 健, 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, No.2, pp.558-570, 2011.
- [6] 興梠正克, 大隈隆史, 蔵田武志, "歩行者ナビのための自蔵センサモジュールを用いた屋内測位システムとその評価," シンポジウム「モバイル 08」予稿集, pp.151-156, 2008.
- [7] "MOVERIO," <https://moverio.epson.com/>
- [8] 興梠正克, 蔵田武志, "慣性センサ群とウェアラブルカメラを用いた歩行動作解析に基づくパーソナルポジショニング手法," 信学技報, PRMU2003-260, pp.25-30, 2004.
- [9] 鈴木洋平, 屋良朝克, 五百蔵重典, 田中博, "HMD 搭載慣性センサの利用を想定した屋内位置推定とその評価," HCG シンポジウム 2014, A-2-1, pp.57-62, 2014.
- [10] "2nd order IIR LPF," <http://www.finetune.co.jp/~lyuka/technote/iir/>
- [11] Chokatsu Yara, Yuta Noriduki, Shigenori Ioroi, Hiroshi Tanaka, "Design and Implementation of Map System for Indoor Navigation," International Symposium on Inertial Sensors and Systems 2015, ISISS2015, pp.70-73, Hawaii, USA, 2015.
- [12] "MapServer," <http://mapserver.org>.