

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

興梠 正克[†] 蔵田 武志^{†‡}

[†] 産業技術総合研究所 知能システム研究部門

[‡] ワシントン大学

〒 305-8568 つくば市梅園 1-1-1 中央第 2

E-mail: m.kouroggi@aist.go.jp

あらまし 本研究では、屋内・屋外において移動可能なウェアラブル拡張現実システムのための位置・方位推定手法を提案する。利用者は、腰部に慣性センサ群（角速度，地磁気，加速度センサ）と，頭部に装着された慣性ヘッドトラッカーとウェアラブルディスプレイ，カメラを装着する。本手法は，人間の歩行動作による相対移動の推定結果と，絶対位置と頭部の方位の推定結果をカルマンフィルタの枠組で統合するセンサフュージョンを用いる。前者は腰部の慣性センサ群の出力の解析結果に基づき，後者は着用型カメラからの画像と事前に撮影された画像群データベースとの照合結果とヘッドトラッカーの出力に基づいている。

キーワード パーソナルポジショニング，歩行動作解析，デッドレコニング，センサフュージョン，ウェアラブル AR

Personal Positioning Based on Walking Locomotion Analysis with Self-Contained Sensors and a Wearable Camera

Masakatsu Kouroggi[†] Takeshi Kurata^{†‡}

[†] Intelligent Systems Institute,

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

[‡] University of Washington

Tsukuba Central 2, 1-1-1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki, 305-8568, Japan

E-mail: m.kouroggi@aist.go.jp

Abstract In this paper, we propose a method of personal positioning for a wearable Augmented Reality (AR) system that allows a user to freely move around indoors and outdoors. The user is equipped with self-contained sensors, a wearable camera, an inertial head tracker and display. The method is based on sensor fusion of estimates for relative displacement caused by human walking locomotion and estimates for absolute position and orientation within a Kalman filtering framework. The former is based on intensive analysis of human walking behavior using self-contained sensors. The latter is based on image matching of video frames from a wearable camera with an image database that was prepared beforehand.

Keywords personal positioning, pedometry, dead-reckoning, sensor fusion, wearable AR

1 はじめに

近年，計算機とその入出力機器の高性能化や小型軽量化，省電力化が進んだことにより，計算機を常時装着・作動させて利用するウェアラブルコンピューティング [2] が現実的なものとなってきている。本研究では，このような技術を通して，非常に広範囲な環境を歩き回ることができ，位置・方位に適したサービスを受けることができるウェアラブル拡張現

実 (AR) システムの開発を目指している [1]。

Feiner らは，位置情報取得のための DGPS (Differential Global Positioning System) と方位情報取得のための磁気センサ，頭部方位取得のための慣性ヘッドトラッカーの組合せによって，モバイル AR システムを構築し，屋外環境におけるナビゲーションと注釈提示の応用例を実現した [3]。しかしながら，オフィス環境や展示会場などの屋内環境におい

ては GPS の信号は容易に遮断される上に、方位取得のために参照する地磁気の磁場はコピー機や CRT のような電子機器や建築構造物などによって容易に乱される。

青木らは、ウェアラブルカメラから得られる動画の色ヒストグラムの時系列を事前に登録されたデータベースと DP マッチングにより照合することで、利用者の位置と移動軌跡を取得する手法を提案している [4]。また、筆者らは、ウェアラブルカメラから得られる入力画像を事前に取得しておいたパノラマ画像群と位置合わせすることで、利用者の位置と方位を取得する手法を提案している [5]。一般に、画像情報に基づくパーソナルポジショニング手法は周囲にインフラ施設を必要としない反面、利用者が移動可能なすべての地点に位置合わせのための画像データベースが必要である。大規模な屋内環境においては、このようなデータベースを構築することは非常に時間がかかる難しい作業である。

一方で、航空機や潜水艦などでナビゲーションを目的として用いられている慣性航法システム (INS: Inertial Navigation System) は外部の情報源を必要としないという利点がある。最新のマイクロマシンシステム (MEMS) 技術の導入によって、INS に組み込まれている慣性センサ群は小型化され、IMU (Inertial Measurement Unit) と呼ばれる一つのユニットへとパッケージ化することが可能となった。これらのユニットは、すでに商用化されており、Crossbow Technologies 社や American GNC 社などのメーカーから入手可能である。しかしながら、ウェアラブルシステムの利用者向けとしては、サイズや重量の面で適しているとは言えない。

Judd らは、人間の歩行動作が引き起こす鉛直方向への加速度のピーク検出による歩行動作検出とその加速度の周波数解析に基づく歩幅推定、磁気センサによって得られる方位情報と組み合わせたデッドレコニング手法を提案、開発し、小型で軽量なモジュールとしてパッケージ化した [6][7]。このモジュールは Point Research 社からすでに入手可能である。しかしながら、地磁気ベクトルは屋内環境においては容易に乱されるため磁気センサによる安定的な計測は難しい。さらに、提案手法は歩行動作が一定期間連続していることを前提としているため、多様な歩行シーンに対して適用することは難しい。

Lee らは、加速度センサに基づく歩行動作検出と磁気センサに基づく方位取得による相対的な位置移動推定手法を提案している [8]。しかしながら、絶対位置を取得する外部手段との統合方法については検討されておらず、また、事前に測定された地点間のみの移動を検出するにとどまっている。

本研究では、人間の相対的な移動を歩行動作の解析によって推定し、そのほかのいくつかの絶対位置推定手法をカルマンフィルタの枠組を用いて統合するアプローチを取る [10]。

まず第一に、歩行動作によって引き起こされる運動の時系列パターンを解析することで、歩行動作による相対移動の検出、計測を可能とするため、加速度センサとジャイロセンサ、

磁気センサ (各 3 軸) を利用者の腰部に取り付ける。人間の運動に関する臨床研究から、歩行中の人間の重心位置 (概ね腰部の中央部に位置する) の運動とそこに印加される力のパターンは、個人差によらずほぼ一意に定まることが知られている [9]。したがって、個人差を吸収する仕掛けを必要とせずに、加速度ベクトルと角速度ベクトルの時系列データの解析によって人間の歩行動作の検出と計測が可能である。

次に、絶対位置と頭部方位をそれぞれ推定するため、ウェアラブルカメラと慣性ヘッドトラッカーを頭部に取り付ける。その際に、カメラの視線方位と実際の視線方位を概ね一致させる。さらに、環境中の数箇所において様々な方位から事前に撮影された画像群を撮影位置・方位と結びつけてデータベースとして格納する。ウェアラブルカメラから得られる画像はデータベース中の画像とフレーム間の画像間位置合わせ手法 [5] に基づいて画像間を照合する。位置合わせによる照合が成功した場合、利用者の絶対位置と頭部の絶対方位が取得される。

本稿では、腰部に装着された慣性センサ群から取得される加速度ベクトルと角速度ベクトル、磁気ベクトルの解析に基づいて、平坦な歩行動作を検出し、歩行速度と歩幅を計測する手法と、階段の昇降動作、エレベータの昇降動作を検出する手法について述べる。そして、ウェアラブルプロトタイプシステムへの提案手法の実装について述べ、本システムによる精度評価について述べる。

2 歩行動作に基づくデッドレコニング

本節では、人間の歩行動作によって引き起こされる移動量を推定する手法について述べる。本研究では、以下に示す 3 種類の歩行動作を解析の対象とする。

1. 平坦なフロア上での歩行動作
2. 階段の昇降動作
3. エレベータによる昇降移動

図 2 には平坦なフロア上の歩行動作によって引き起こされる鉛直方向および進行方向の加速度成分の典型的なパターンを示す。また、各軸の定義を図 3 に示す。

なお、これらの時系列データ信号は MicroStrain 社の 3DM-G とよばれる加速度センサ、ジャイロセンサ、磁気センサがパッケージ化された単一の小型ユニットから得られたものであり、本研究中で慣性センサ群として用いられている。各加速度成分は、ノイズ成分を除去するため、ローパスフィルタ (FIR1 タイプ, 10 段, カットオフ周波数単位: 0.4) によって処理されている。

図 1 には、歩行動作の一単位周期の定義を示し、各ステージと鉛直方向および進行方向の加速度成分の変化との関係を示している。

図 5 に、図 1 に示された各加速度成分のパターンの詳細な解析を示す。ここで、正のピークの時刻と負のピークの時刻

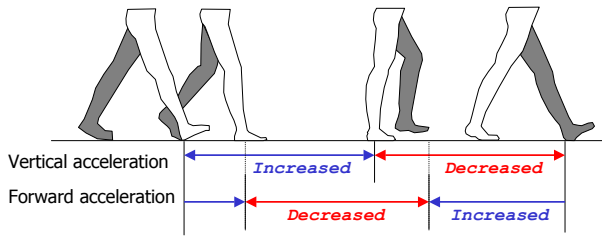


図 1: 歩行ステージと加速度成分パターンとの関係

の位置について着目されたい．鉛直方向の成分については，正のピークが先に現われ，負のピークがすぐに続いている．一方，進行方向の成分については，負のピークが先行し，正のピークがそれに続くパターンとなっていることが分かる．また，進行方向の成分では，負のピーク位置から正のピーク位置までの勾配値は小さく，正のピーク位置から負のピーク位置までの勾配値は大きく急峻であることが読み取れる．このような現象は，鉛直方向の成分では見られない．

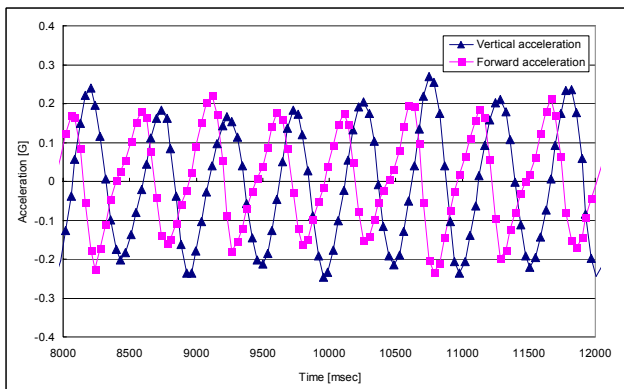


図 2: 平坦なフロア上の歩行動作による鉛直方向および進行方向への加速度成分の典型的なパターン

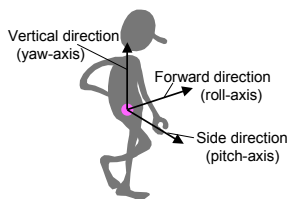


図 3: 各軸の定義

したがって，加速度の各成分のピーク位置検出と進行方向の加速度成分の勾配値テストが一単位周期の歩行動作検出には欠かせない．

2.1 重力加速度ベクトルの推定手法

重力の方向を取得することは，全体の加速度ベクトルから重力加速度ベクトルを取り除くために必要となる．また，腰部に取り付けられた慣性センサ群の姿勢を取得するためにも

欠かせない．重力加速度ベクトルを推定するために，ここでは，慣性センサ群から得られる加速度ベクトルと角速度ベクトルを情報源として用いる．これらはカルマンフィルタの枠組 [11][12] において，観測ベクトルとみなすことができ，重力加速度ベクトルと角速度ベクトルを状態ベクトルと見なすことができる．したがって，離散時刻 t から $t + 1$ への状態ベクトルの予測方程式は以下の通りである．

$$g_x|_{t+1} = g_x|_t - (\omega_y|_t g_z|_t - \omega_z|_t g_y|_t) \Delta t, \quad (1)$$

$$g_y|_{t+1} = g_y|_t - (\omega_z|_t g_x|_t - \omega_x|_t g_z|_t) \Delta t, \quad (2)$$

$$g_z|_{t+1} = g_z|_t - (\omega_x|_t g_y|_t - \omega_y|_t g_x|_t) \Delta t, \quad (3)$$

ここで， $(g_x|_t, g_y|_t, g_z|_t)$ と $(\omega_x|_t, \omega_y|_t, \omega_z|_t)$ は，それぞれ時刻 t における，重力加速度ベクトルと角速度ベクトルである．

必要な重力加速度ベクトルの誤差共分散行列を取得するため，平坦なフロア上の歩行動作と階段の昇降動作，直立静止状態のときの加速度ベクトルのデータ集合を収集し，その共分散行列を計算した．角速度ベクトルの誤差共分散行列については，用いられているジャイロセンサの仕様書に基づいて計算した．

2.2 進行方向の推定手法

腰部に装着された慣性センサ群は，初期状態においては，装着者の進行方向に対する相対的な姿勢情報が未知である．したがって，センサ群が装着された後に，進行方向を得るためにキャリブレーションが必要である．

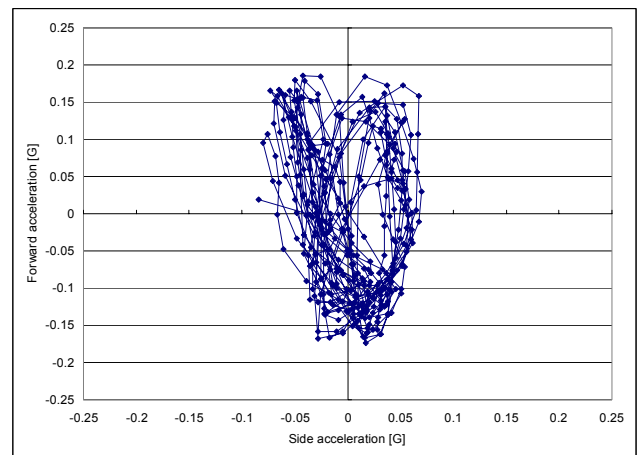


図 4: 進行方向と側方向の加速度成分の時系列データの典型的な分布

図 4に，重力方向に直交する平面上に投影される加速度成分 (a_x, a_y) の時系列データの典型的な分布例を示す．ここで， a_x は側方向の加速度成分であり， a_y は進行方向の加速度成分である．この図より，平面の加速度成分の分布の主成分の軸が進行方向の軸に概ね一致していることが分かる．そこで，まず最初に，全体の加速度ベクトルから，2.1節で述べた手法に基づいて得られる重力加速度ベクトルを取り除く．次に，残差ベクトルの鉛直方向に沿った成分を算出し，これを

取り除く．その結果，重力方向に直交する平面上の加速度成分が算出される．加速度成分の各サンプリング時において，この平面上の加速度成分を算出し，それらに主成分分析を適用して主軸を求めることで，進行方向の軸を推定できる．ただし，軸のどちらの方向が進行方向であるかは判明しない．そこで，装着者は初期化作業として，前進歩行動作を行い，その際に得られた鉛直方向の加速度成分の勾配と進行方向の加速度成分の符号の関係（図5から読み取れるように，進行方向の成分の正のピークは，鉛直方向の増加している区間に位置する）から，進行方向を決定する．

2.3 一単位周期の歩行動作の検出手法

図5で示されるように，一単位周期の歩行動作においては，鉛直方向の加速度成分は，正のピークが先に現われ，負のピークがそれに続くというペアを成している．そこで，提案手法はまず最初に，鉛直方向の加速度成分について，この正負ピークのペアを探索する．もし，このペアが検出された場合，引き続いて，進行方向の加速度成分についても，負正ピークのペアを探索する．ここでも検出された場合，進行方向の加速度成分について，正のピーク位置から負のピーク位置まで変化するときの勾配値が一定の閾値を超えるかテストする．これらの探索とテストにすべて通過した場合，一単位周期の歩行動作が検出されたもののみならず，

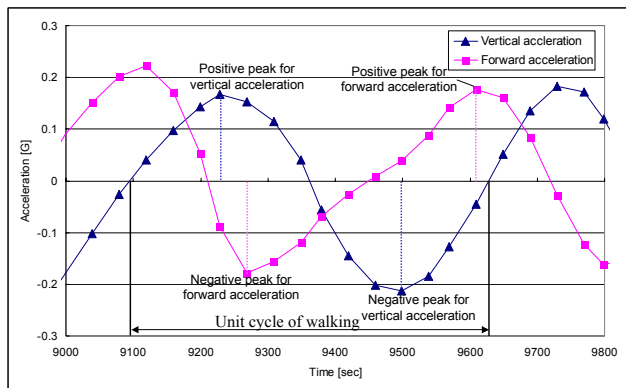


図5: 一単位周期の歩行動作の解析

2.4 歩行速度と歩幅の計測手法

歩行動作によって引き起こされる鉛直・進行方向の加速度成分の正ピーク値と負ピーク値の差分値が，歩行速度と強い相関関係があることが経験的な知見として得られている．

図6に，被験者2名による，進行方向の加速度成分のピーク値の差分値（一定の歩行速度で歩行したときに検出されたすべて歩行において得られた差分値の平均値）と歩行速度の関係を示す．

同様に，鉛直方向の加速度成分のピーク値の差分値と歩行速度の関係を図7に示す．鉛直方向の成分においては，その

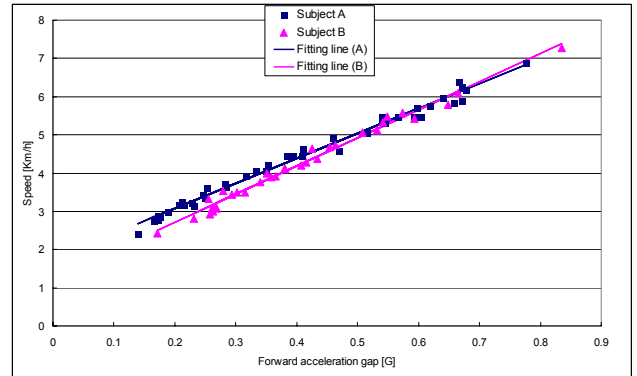


図6: 進行方向の加速度成分のピーク値の差分値と歩行速度の関係（被験者AとBによる）: 回帰分析の結果，相関係数 $R_{f,A} = 0.988$ と $R_{f,B} = 0.986$ が得られた．

ピーク値の差分値と歩行速度の関係には，個人差が少なからず関わっていることが示唆される．

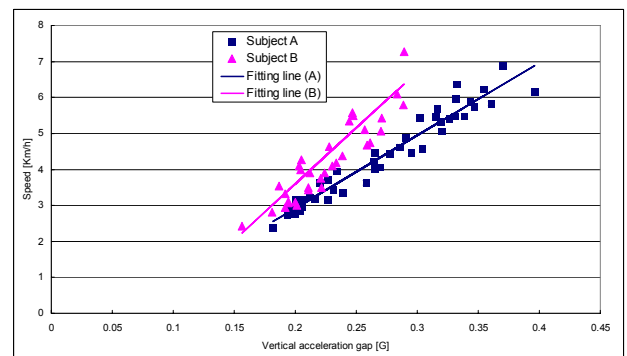


図7: 鉛直方向の加速度成分のピーク値の差分値と歩行速度の関係（被験者AとBによる）: 回帰分析の結果，相関係数 $R_{v,A} = 0.940$ と $R_{v,B} = 0.880$ が得られた．

歩幅は，歩行動作の一単位周期時間に前述の方法で推定される歩行動作を乗じることで得られる．図6と図7の結果より明らかなように，進行方向の加速度成分から歩行速度を推定するほうが精度が高い．しかしながら，連続した途切れない歩行動作においては，その開始時と終了時においては，進行方向の加速度成分の変化は不安定となるため，その成分に基づく歩行速度の推定結果の精度は低下する．そこで，歩行動作が連続的に検出された場合，その開始時と終了時には鉛直方向の成分に基づいて歩行速度を推定し，それ以外については進行方向の成分に基づいて歩行速度を推定する．

2.5 階段における昇降動作の検出手法

階段の昇降時に観測される進行方向および鉛直方向の加速度成分のピーク位置のペアに関するパターンおよび進行方向

の成分の勾配に関するパターンは、平坦なフロア上の歩行動作のそれとほぼ同様である。言い替えると、2.3節で述べた歩行動作検出手法では、階段の昇降動作は歩行動作として検出される。平坦なフロア上の歩行動作との決定的な相違は、階段の昇り動作においては、角速度のパターンに現われ、階段の降り動作においては、鉛直加速度成分のピーク値の差分と進行方向の加速度成分のピーク値の差分の変化となって現われる点である。

2.5.1 階段の昇り動作の検出

階段の昇り動作においては、角速度の roll 軸周りの成分に特徴が現われる。図 8は、被験者が階段を昇っているときに得られた roll 軸周りの角速度成分の典型的なパターンと鉛直方向の加速度成分である。ここで、角速度成分の周期が加速度成分のほぼ 2 倍であることが分かる。この特徴は、他の動作では現われないため、2.3節で述べた手法によって歩行動作が検出されたとき、roll 軸周りの角速度成分の周期と加速度成分の周期の 2 倍を比較テストすることで、階段の昇り動作を検出することができる。

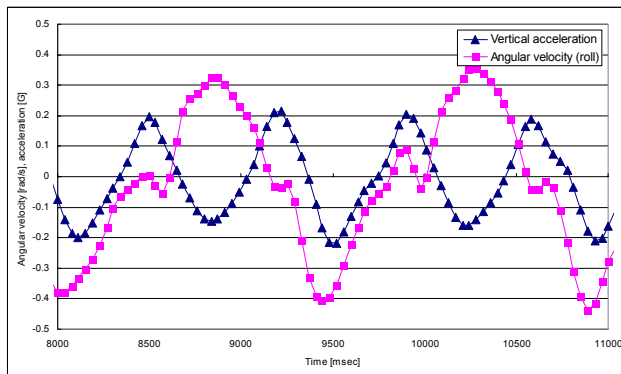


図 8: 階段昇り動作時の角速度成分 (roll 軸周り) と鉛直方向の加速度成分の典型的なパターン

2.5.2 階段の降り動作の検出

図 9に、階段の降り動作中の進行方向と鉛直方向の加速度成分の典型的なパターンを示す。この図から明らかなように、鉛直方向の加速度成分について、そのピーク値の差分値が進行方向の加速度成分のそれと比べて十分に大きいことが読み取れる。このような現象は、平坦なフロア上の歩行動作や階段の昇り動作時には現われない。

2.6 エレベータによる昇降動作の検出

昇降中のエレベータの運動は非常に滑らかであり精密な制御下にあるため、鉛直方向の加速度成分に特徴的なパターンを見出すことができる。しかしながら、エレベータ内での移動や歩行などによって加速度成分に外乱が入る可能性があるため、ここでは、強いローパスフィルタ (FIR1 タイプ, 50 段, カットオフ周波数単位: 0.01) を適用する。図 10に鉛直方向の加速度成分に前述のローパスフィルタを適用した結果

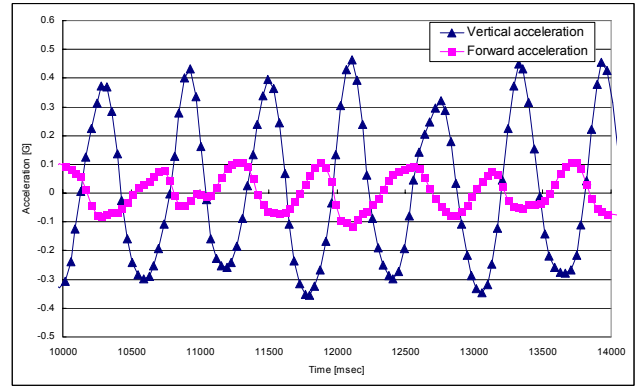


図 9: 階段降り動作時の進行・鉛直方向の加速度成分の典型的なパターン

の一例を示す。この結果より、図中で印で示すような滑らかな谷と山が現われていることが読み取れる。

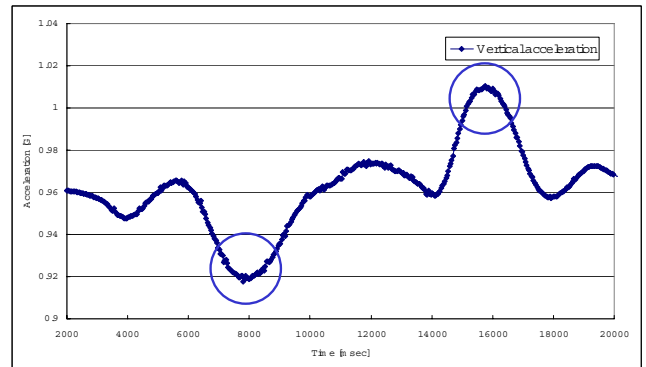


図 10: 降下中のエレベータ内で得られた鉛直方向の加速度成分に強力なローパスフィルタを適用した結果例

すなわち、強いローパスフィルタを適用後の鉛直方向の成分について、十分に大きな谷と山のペアを検索することで、エレベータの昇降動作を検出できる。なお、谷が先に現われた場合は、降り動作であり、山が先に現われた場合は、昇り動作として検出する。

3 実験

3.1 動作検出結果

まず (1) 平坦なフロア上の歩行動作と (2) 階段の昇降動作 (3) エレベータの昇降動作の 3 つの歩行動作を検出する実験を行った。表 1に検出結果を示す。この結果は、750 歩の平坦なフロア上での歩行動作、20 回の階段昇り動作と降り動作、10 回のエレベータでの昇降動作を行った実験から得られたものである。

3.2 ポジショニング

図 11に、被験者が屋内環境 (3 階建て) を移動したときの軌跡の推定結果を示す。この実験では、被験者は 3 階のフロアを歩き回り、階段で 1 階まで降り、そこからエレベータ

表 1: 動作検出結果 (左欄の動作が上欄の動作として認識された割合)

| | 平坦歩行 | 階段昇り | 階段降り | エレベータ |
|-------|------|------|------|-------|
| 平坦歩行 | 95% | 4% | 1% | 0% |
| 階段昇り | 15% | 85% | 0% | 0% |
| 階段降り | 5% | 0% | 95% | 0% |
| エレベータ | 0% | 0% | 0% | 100% |

に乗って3階まで昇り、出発地に戻る経路をたどっている。図 11上の3つの印は、画像に基づく位置補正が実行された箇所であり、図 11下左の印は、エレベータによる昇降動作検出を用いたマップマッチングにより位置補正が実行された箇所である。

次に、大規模展示場の一つである東京ビッグサイトの展示ホール内を本システムを装着して歩き回ったとき(始点と終点は同一である)の軌跡の推定結果と各時点でシステムが出力したAR画面を図 12に示す。なお、各AR画面の下にその時刻情報が示されている。本実験は連続して10分間にわたって行われ、歩行距離は約350メートルに及んでいるが、推定された終点はほぼ始点と一致しており、また、注釈情報の提示位置も正しく、本システムの有効性を示している。なお、本結果は慣性センサ群の出力のみに基づいて得られており、画像による補正は行われていない。

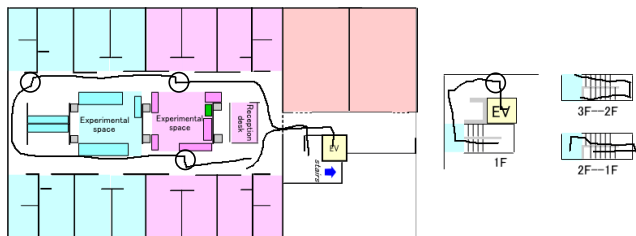


図 11: 軌跡の推定結果

4 まとめ

本稿では、平坦なフロア上の歩行動作と階段昇降動作、エレベータによる昇降動作の3種類の動作を検出、認識する手法を示し、歩行動作の歩行速度と歩幅を推定する手法を提案した。本手法による相対移動推定と画像に基づく絶対位置推定をカルマンフィルタの枠組[10]で組み合わせることで、歩行動作に基づくデッドレコニングを実現した。ウェアラブルARシステムとして実装し、動作の検出精度と位置推定精度を評価し、良好な結果を得た。

謝辞: 研究内容や実装について助言をいただいた、大隈隆史氏、加藤丈和氏、酒田信親氏に深く感謝いたします。また、本研究をサポートいただいた、坂上勝彦知的インターフェースグループリーダーに深く感謝いたします。

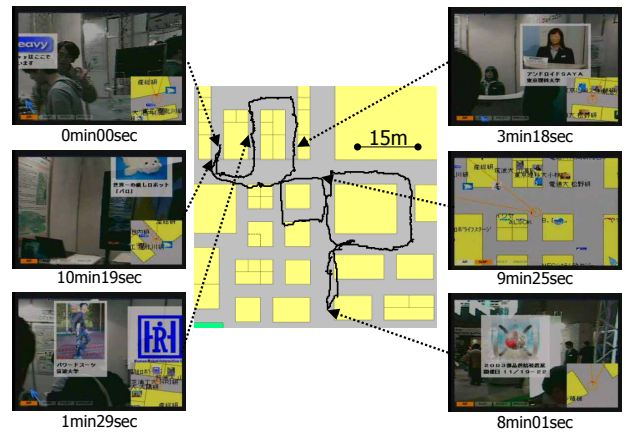


図 12: 軌跡の推定結果と AR 表示画面

参考文献

- [1] Weavy: *Wearable Visual Interfaces*, <http://www.is.aist.go.jp/weavy/>
- [2] S. Mann, "Wearable Computing: A First Step Toward Personal Imaging," *Computer*, Vol. 30, No. 2, pp. 25–32, 1997.
- [3] S. Feiner, B. MacIntyre, T. Höllerer and A. Webster, "A Touring Machine: Prototyping 3D Mobile Augmented Reality Systems for Exploring the Urban Environment," in *Proc. ISWC99*, pp. 74–81, 1999.
- [4] H. Aoki, B. Schiele and A. Pentland, "Realtime Personal Positioning System for Wearable Computers," in *Proc. ISWC99*, pp. 37–43, 1999.
- [5] M. Kourogi, T. Kurata and K. Sakaue, "A Panorama-based Method of Personal Positioning and Orientation and Its Real-time Applications for Wearable Computers," in *Proc. ISWC2001*, pp. 107–114, 2001.
- [6] R. Levi and T. Judd, "Dead Reckoning Navigational System Using Accelerometer to Measure Foot Impacts," U.S. Patent Number 5,583,776, 1996.
- [7] T. Judd, "A Personal Dead Reckoning Module," in *Proc. the Institute of Navigation, GPS'97*, pp. 169–170, 1997.
- [8] S. Lee and K. Mase, "Incremental Motion-Based Location Recognition," in *Proc. ISWC2001*, pp. 123–130, 2001.
- [9] Murray MP, "Gait as a total pattern of movement," in *American Journal of Physiological Medicine*, pp. 290–333, 1967.
- [10] M. Kourogi and T. Kurata, "Personal Positioning based on Walking Locomotion Analysis with Self-Contained Sensors and a Wearable Camera," in *Proc. ISMAR03*, pp. 103–112, 2003.
- [11] R. Brown and Patrick Hwang, "Introduction to random signals and applied Kalman filtering," Wiley, 1997.
- [12] A. Davidson, "Mobile Robot Navigation Using Active Vision," in *Ph. D thesis in University of Oxford*, 1999.