

# ウェアラブルカメラと慣性センサ群の データ統合に基づくパーソナルポジショニング

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

〒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 本稿では、ウェアラブルカメラから得られる画像と、利用者の頭部と腰部に装着された慣性センサ群から得られるデータを統合することで、位置・方位情報を取得するパーソナルポジショニング手法について述べる。提案手法では、撮影された位置・方位が既知である画像データベースとウェアラブルカメラの画像との位置合わせによって絶対的な位置・方位を推定する。さらに、利用者の歩行動作に着目して慣性センサ群を用いて相対的な位置移動量・方位を推定するデッドレコニングを行う。これらの推定結果をカルマンフィルタの枠組を用いて統合することで、より信頼性の高い位置・方位取得を実現する。

キーワード パーソナルポジショニング, センサフュージョン, 画像間位置合わせ, デッドレコニング, 歩行動作解析

## A Method of Personal Positioning Based on Sensor Data Fusion of a Wearable Camera and Self-Contained Sensors

Masakatsu Kouroggi      Takeshi Kurata

Intelligent Systems Institute,

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

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 that uses images taken from a wearable camera and data from self-contained sensors attached to the user through Kalman filter as a data fusion mechanism. The proposed method estimates the user's position and direction by image registration between the images and a set of images captured at various points of environment beforehand as a database. It updates the estimation of the user's position and direction with pedestrian dead-reckoning by detecting unit cycle of walking behavior of the user and by estimating the heading direction of the body with the self-contained sensors.

**Keywords** personal positioning, sensor fusion, image registration, dead-reckoning, pedometry

### 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。このような利用スタイルに適した有効な応用例を提供するためには、計算機が利用者の置かれている状況(コンテキスト)を逐一理解していることが不可欠である。筆者らは、視覚やセンサ群などのデータフュージョンを介して認識されるコンテキスト情報を入力として動作す

るウェアラブルビジュアルインターフェース *Weavy*[1] の研究を進めている。

計算機が理解すべき最も重要なコンテキストの一つとして利用者の位置・方位情報が挙げられる。このコンテキストを得ることによって、例えば、利用者の位置と視線方位に応じて、利用者視点のライブ映像上に注釈情報を重畳提示する拡張現実システムを実現することが可能となる [3][4][6][7][8]。そこで、本研究では、屋内・屋外環境を歩行移動する利用者を対象とし、その位置と方位を取得する実時間パーソナルポジショニングの問題を取り扱う。

パーソナルポジショニングについては、多くの従来研究がなされている。利用者視点の画像を情報源に用いた従来研究として、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 [5]。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 [6][7][8]。画像のみを用いたパーソナルポジショニング手法では、環境側に特別なインフラを必要としない利点がある。しかしながら、利用者が移動しうるすべての場所において照合のためのデータが存在していることが前提となるため、煩雑な事前のデータ取得作業と膨大なデータ量を必要とし、広域環境への適用が難しい。

一方で、センサ群を用いた利用者の動作計測に基づく位置取得手法がいくつか提案されている。Goldingらは、加速度と磁気、温度、光量を計測するセンサから得られるデータの統計的解析に基づいた屋内環境におけるナビゲーション手法を提案している [9]。しかしながら、統計的に有意なデータを収集するためにナビゲーション時に一定時間を要するため、位置・時間分解能は低く、即応性を要求する応用例への適用は困難である。また、Leeらは、加速度センサを用いて計測される人間の歩行動作に着目して、相対的な位置移動を認識する手法を提案している [10]。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。

さらに、人間の歩行動作に着目したデッドレコニング (DR) と絶対位置取得方法を組み合わせたパーソナルポジショニング手法がいくつか提案されている。米 Point Research 社 [12] の Levi らは GPS (Global Positioning System) を用いた絶対位置取得と、加速度センサによる歩行検出と移動距離推定、磁気センサによる絶対方位取得を組み合わせた DR による相対位置・方位変化量を測定し、これらを組み合わせることで利用者の位置・方位を取得する手法を提案している [13][14]。しかしながら、屋内環境では、GPS 衛星からの信号はほぼ完全に遮断されてしまう上に、屋内に設置された様々な電子機器や建築構造物等が引き起こす磁場の乱れが存在することが多く、一般に磁気センサから継続的に安定した絶対方位を取得することは難しい。このため、屋内環境を歩行する利用者への適用は困難である。天目らは、赤外線ビーコンを用いて絶対位置を取得し、相対的な移動量を歩行検出と、磁気センサを用いた絶対方位計測による DR に基づいた位置・方位取得手法を提案し、屋内と屋外環境において位置・方位に基づく注釈提示を実現している [11]。しかしながら、環境側に現在位置を明示的に与える赤外線ビーコン群をインフラとして常時設置する必要があり、大規模な広域環境

への適用は難しい。

## 2 提案手法

本手法では、下記の 4 種類のセンサモジュールを用いてパーソナルポジショニングを実現する。

1. 頭部に装着されたウェアラブルカメラ：疎密度に事前登録された画像データベースとウェアラブルカメラから得られる画像を照合することで、絶対位置と頭部方位を間欠的に取得できる。
2. 頭部に装着された姿勢角センサ：頭部方位を連続的に取得できるが、時間経過によるドリフトが存在する。
3. 腰部に装着された加速度センサ：歩行動作を検出、移動距離を取得できる。
4. 腰部に装着された磁気センサとジャイロセンサ、重力加速度 (傾斜角) センサ：腰部の絶対姿勢角を取得できる。3 と組み合わせることによって、歩行動作に基づく DR モジュールを構築できる。

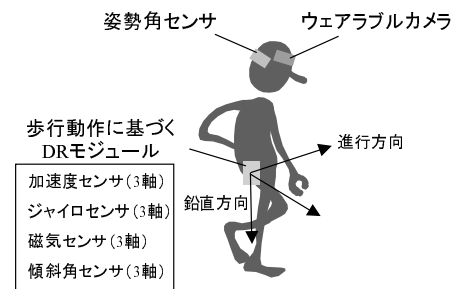


図 1: ウェアラブルカメラとセンサ群の装着配置図

図 1 にウェアラブルカメラとセンサ群の利用者への装着配置図を示す。これらの情報源から得られるデータをカルマンフィルタの枠組を用いて統合することによって、最終的な推定結果とその確からしさを得る。

### 2.1 カルマンフィルタによるデータ統合

本手法では、利用者に装着されたカメラとセンサ群から得られるデータをカルマンフィルタの枠組で統合し、推定結果の確からしさを評価する。まず、離散時刻  $k$  における状態ベクトル  $x_k$  を次のように定義する。

$$x_k = [x_k, y_k, \alpha_k, \beta_k, \gamma_k, \psi_k, \theta_k, \phi_k]^T. \quad (1)$$

ここで、 $(x_k, y_k)$  は平面上での利用者の位置、 $(\alpha_k, \beta_k, \gamma_k)$  は頭部の絶対姿勢角、 $(\psi_k, \theta_k, \phi_k)$  は腰部の絶対姿勢角である。なお、ここでの姿勢角はオイラー角 (ヨー・ピッチ・ロール角) による表記法とする。

外部入力を受ける線形システムにおけるカルマンフィルタの枠組 [15] では、以下の式、

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{f}(\mathbf{x}_k) + \mathbf{D}_k(\mathbf{x}_k)\mathbf{u}_k + \mathbf{G}_k\mathbf{w}_k \quad (2)$$

によって、状態ベクトルは更新される。ここで、 $\mathbf{w}_k$  はシステム誤差ベクトルである。本手法では、この枠組に歩行動作に基づく DR を適用する。外部入力として、歩行動作距離  $u_k$  を与え、 $\mathbf{f}(\mathbf{x}_k) = \mathbf{x}_k$ 、 $\mathbf{D}_k(\mathbf{x}_k) = [\cos \psi_k, \sin \psi_k, 0, \dots, 0]^T$  とする。システム誤差  $\mathbf{w}_k$  は DR によって発生する位置推定の蓄積誤差であると解釈できる。このため、 $\mathbf{G}_k = \mathbf{I}$  と見なすことができる。

カルマンフィルタにおけるフィルタ方程式によって、以下の式 (3) に基づいて状態ベクトルの最適推定値  $\hat{\mathbf{x}}_k$  は更新され、

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1|k} = \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}_{k|k}) + \mathbf{D}_k(\hat{\mathbf{x}}_{k|k})\mathbf{u}_k \quad (3)$$

観測の結果として、以下の式 (4) により  $\hat{\mathbf{x}}_k$  は更新される。

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k} = \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} + \mathbf{K}_k[\tilde{\mathbf{y}}_k - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1})] \quad (4)$$

ここで、 $\mathbf{K}_k$  はカルマンゲイン、 $\tilde{\mathbf{y}}_k$  は観測ベクトルである。本手法では、ウェアラブルカメラおよびセンサ群に基づく観測によって取得される観測ベクトルを、

$$\tilde{\mathbf{y}}_k = [\hat{x}_k, \hat{y}_k, \hat{\alpha}_k, \hat{\beta}_k, \hat{\gamma}_k, \hat{\psi}_k, \hat{\theta}_k, \hat{\phi}_k]^T \quad (5)$$

とおく。したがって、 $\mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}_k) = \hat{\mathbf{x}}_k$  である。観測ベクトルと状態ベクトルは以下の式 (6) を満たす。

$$\tilde{\mathbf{y}}_k = \mathbf{h}(\mathbf{x}_k) + \mathbf{v}_k \quad (6)$$

ここで、 $\mathbf{v}_k$  は観測誤差ベクトルである。

カルマンゲイン  $\mathbf{K}_k$  は以下の式 (7) によって更新される。

$$\mathbf{K}_k = \hat{\Sigma}_{k|k-1}\mathbf{H}^T(\mathbf{H}\hat{\Sigma}_{k|k-1}\mathbf{H}^T + \Sigma_{v_k})^{-1} \quad (7)$$

ここで、 $\hat{\Sigma}_k$  は状態ベクトルの最適推定値  $\hat{\mathbf{x}}_k$  の分散・共分散行列であり、 $\Sigma_{v_k}$  は観測誤差ベクトル  $\mathbf{v}_k$  の分散・共分散行列である。また、本手法における関数  $\mathbf{h}$  の定義より、 $\mathbf{H} = \mathbf{I}$  である。

カルマンフィルタにおける共分散方程式に基づいて、分散・共分散行列  $\hat{\Sigma}_k$  は以下の式 (8)(9) によって更新される。

$$\hat{\Sigma}_{k|k} = \hat{\Sigma}_{k|k-1} - \mathbf{K}_k\mathbf{H}\hat{\Sigma}_{k|k-1} \quad (8)$$

$$\hat{\Sigma}_{k+1|k} = \mathbf{F}\hat{\Sigma}_{k|k}\mathbf{F}^T + \mathbf{G}_k\Sigma_{w_k}\mathbf{G}_k^T \quad (9)$$

ここで、 $\Sigma_{w_k}$  は、システム誤差ベクトル  $\mathbf{w}_k$  の分散・共分散行列である。また、本手法における関数  $\mathbf{f}$  の定義より、 $\mathbf{F} = \mathbf{I}$  である。

画像による照合結果を情報源として利用できる場合、絶対位置  $(\hat{x}_k, \hat{y}_k)$  と頭部の絶対姿勢角  $(\hat{\alpha}_k, \hat{\beta}_k, \hat{\gamma}_k)$  が観測ベクトルとして与えられ、センサ群を情報源とする場合、頭部の絶

対姿勢角  $(\hat{\alpha}_k, \hat{\beta}_k, \hat{\gamma}_k)$  と腰部の絶対姿勢角  $(\hat{\psi}_k, \hat{\theta}_k, \hat{\phi}_k)$  が観測ベクトルとして与えられる。

観測誤差ベクトル  $\mathbf{v}_k$  は、カルマンフィルタにおいては、関数  $\mathbf{h}$  によって予測される観測ベクトルと、実際に観測された観測ベクトルとの誤差を表す。本手法では、前時刻の推定結果から DR によって更新された状態ベクトルをそのまま予測として用いている。このため、センサ群を情報源とする観測ベクトルにおいては、ドリフトによって累積誤差が発生する頭部の姿勢角センサの出力  $(\hat{\alpha}_k, \hat{\beta}_k, \hat{\gamma}_k)$  の観測誤差の分散・共分散行列成分は時間経過に伴って増大すると見なせる。一方で、腰部の姿勢角出力  $(\hat{\psi}_k, \hat{\theta}_k, \hat{\phi}_k)$  に関しては、地磁気と重力方向を絶対基準に用いているため、十分に小さく一定であると見なすことができる。ウェアラブルカメラの入力画像を情報源とする観測ベクトルにおいては、撮影された絶対位置と方位が登録されているデータベースを基準とするため、位置と頭部方位に関する観測誤差の分散・共分散行列成分は、十分に小さく一定であると見なすことができる。

本手法の状態ベクトルの更新ループにおいては、式 (3) に基づく DR によるシステム誤差の累積により、位置の最適推定値の分散・共分散行列成分は時間経過に伴ってインクリメンタルに増加し、また、頭部絶対姿勢角の最適推定値については、姿勢角センサのドリフトによって、観測誤差の分散・共分散行列成分が増加するため、頭部姿勢角の最適推定値の分散・共分散行列成分はインクリメンタルに増加すると考えられる。一方で、腰部姿勢角については、観測誤差の分散・共分散行列成分が一定であると見なせるため、増加しないと考えられる。画像に基づく観測が得られたとき、インクリメンタルに増加した位置と頭部姿勢角の分散・共分散行列成分を一定の範囲内に収束させることができるものと考えられる。

図 2 に本手法によるカルマンフィルタのシステムのデータの流れを示す。

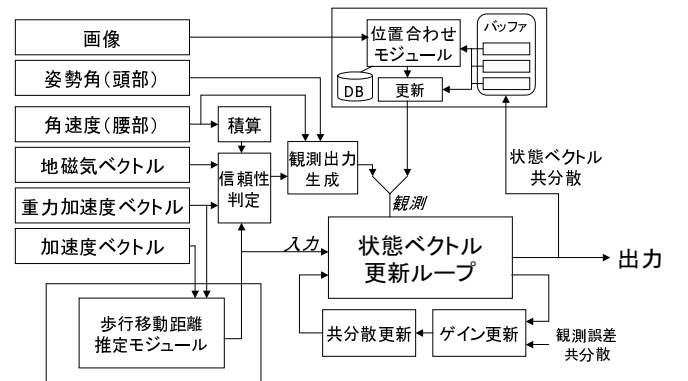


図 2: カルマンフィルタのシステム図

## 2.2 画像照合に基づく位置・頭部方位取得

ウェアラブルカメラから得られる入力画像に基づく位置と頭部方位推定に用いる画像データベースとして、撮影された位置と方位が既知であるフレーム画像群を用いる。フレーム画像間の位置合わせ手法としては、文献 [17] に示される画像間のグローバルなアフィン動きパラメータの推定手法を用いる。この手法から得られたパラメータを用いて位置合わせされた画像間の輝度の正規化相互相関値を算出し、これが一定のしきい値以上であるとき、入力画像がデータベースの画像と照合に成功したと見なす。照合に成功したとき、データベースの画像の位置と方位を観測ベクトルとして、カルマンフィルタの状態ベクトルの更新ループに渡す。

画像照合の処理は計算コストが高く、また、実用的には、データベースには疎密度な画像群しか登録されていないことが想定されるため、ある時刻  $k$  に入力画像が与えられたとき、画像照合が必要であるかを正確に判定することは重要である。本手法では、現在の位置と頭部方位の推定結果、および、分散・共分散行列  $\hat{\Sigma}_k$  における、位置と頭部姿勢角の分散・共分散成分（推定結果の確からしさ）に基づいて決定される。すなわち、現在の位置と頭部方位を中心としたこの確からしさの範囲内で撮影された画像がデータベース中に登録されているとき、画像照合の処理を実行するものとする。

## 2.3 歩行移動距離推定モジュール

### 2.3.1 加速度センサを用いた歩行動作検出

人間の歩行動作は、重心の運動が鉛直方向の加速度に典型的なパターンを作り出すため、腰部（概ね重心と一致する）に装着された加速度センサを用いて容易に観測することができる。図 3 に歩行動作による加速度の出力パターン（鉛直・進行方向への加速度）の一例を示す。

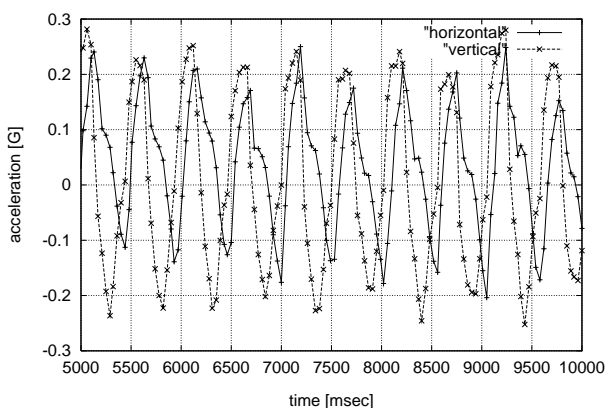


図 3: 歩行動作による加速度

しかしながら、単純な鉛直方向の加速度のピーク検出のみを用いて歩行動作の検出を試みると、直立状態でその場で向きを変える動作などを、歩行動作と誤認識することがある。

そこで、本研究では、鉛直方向の加速度に加えて、進行方向への加速度に着目する。鉛直方向の加速度のピーク検出によって推測される歩行動作の開始時刻から半サイクル分の期間における進行方向への加速度を積分し、この値が一定値以上であれば歩行動作があったものと検出する。

### 2.3.2 歩行移動距離の推定

歩行動作が検出されないときには 0 を、検出されたときは、標準的な歩幅（身長  $\times 0.45$ ）を歩行移動距離の出力結果として与えることとする。歩行動作の有無の検出精度は高いが、実際の歩幅にはばらつきがあるため、システム誤差の分散・共分散行列  $\Sigma_{w,k}$  においては、歩行動作検出時には分散の値を大きく取り、それ以外の場合は、歩行動作の誤検出・未検出の可能性を考慮して、一定の小さな値を取るよう設定する。

## 2.4 腰部の絶対姿勢角の推定

### 2.4.1 磁気センサと重力加速度センサに基づく絶対姿勢角の推定

磁気センサと重力加速度センサを用いて、地磁気ベクトルと重力加速度ベクトルを計測することによって、絶対姿勢角を算出することが原理的には可能である。しかしながら、磁気センサを用いて、安定して信頼できる地磁気ベクトルを取得することは難しい。特に屋内環境においては、電子機器や建築構造物などが引き起こす磁場の乱れが存在するからである。そこで、本手法では、地磁気ベクトルと水平面とのなす角である伏角（図 4）に着目する。伏角は場所（緯度と経度）によって、一意に定まるため、例えば、国土地理院が発行している地磁気マップを利用することによって、経度と緯度から伏角を算出することができる。

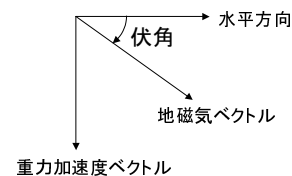


図 4: 伏角

本手法では、磁気センサによって計測される地磁気ベクトルと重力加速度センサから計測される重力加速度ベクトルから算出される伏角と本来あるべき伏角を比較することによって、その地点における地磁気ベクトルの信頼性を評価する。しかしながら、磁場の乱れの影響を受けている磁気センサの計測結果から算出される伏角が偶然によって本来あるべき伏角と一致することはありうる。

そこで、利用者が移動している一定期間において、磁気センサの出力から算出される伏角と正しい伏角が連続的に一致

しているときのみ、得られる地磁気ベクトルを信頼できるものと見なす。伏角の一致と移動の有無を組み合わせることによって、精度の高い信頼性判定を実現できる。移動の有無の判定は歩行移動距離推定モジュールの出力に基づく。

一方、Ladettoらは、局所的な磁場の乱れによる影響を受けた磁気センサの出力をジャイロセンサを用いて補正する手法を提案している [16]。この手法に対して、提案手法では、磁場の乱れが広範囲に渡っている環境下においても、正しい地磁気ベクトルを与える場所を見つけることができると期待される。それ以外の場所においては、後述のジャイロセンサ出力の積算に基づく処理を委ねることで、磁場の状態が安定しない屋内環境への適用を可能とする。

### 2.4.2 ジャイロセンサ出力の積算処理に基づく姿勢角推定

磁気センサの出力が信頼できると判定されたときに得られる地磁気ベクトルと重力加速度ベクトルを組み合わせる推定される絶対姿勢角を基準として、ジャイロセンサによって計測される角速度ベクトル ( $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ ) を用いて、現在の姿勢角を更新する。一般にジャイロセンサの出力にはドリフト成分が存在するため、時間の経過に伴って、カルマンフィルタにおける観測誤差ベクトルの分散・共分散行列は増大するものとして設定する。

## 3 実験

### 3.1 実装

#### 3.1.1 ハードウェア

本研究では、頭部に装着される姿勢角センサとして、InterSense社のInterTrax<sup>2</sup>を用いる。腰部に装着される加速度センサと磁気センサ、重力加速度(傾斜角)センサ、ジャイロセンサについては、MicroStrain社の3DM-Gを用いる。3DM-Gには前述のセンサがすべて内蔵されており、シリアルポートを介して、各々のデータをタイムスタンプ付で取得することができる。加速度センサ(および重力加速度センサ)としては、Analog Devices社のADXL202JE(計3軸)が、ジャイロセンサとしては、村田製作所のENC-03JA(計3軸)が、磁気センサとしては、Honeywell社のHMC1052(計3軸)がそれぞれ内蔵されている。これらのセンサはいずれも非常に小型であり、また量産型であるため大変安価で入手可能である。慣性航行装置(IMU)に搭載されるセンサと比べて重量・サイズと経済性の面で大幅に優位である。動画像の入力には、Web画像サーバ(YOKOGAWA, IPV8532)を用いている。ウェアラブルPCとしては、Cell Computing社のCardPC(CPU: Mobile Pentium-III 700MHz, OS: Linux-2.4)を用いる。利用者への表示装置としては、頭部着用型ディスプレイである、MicroOptical社のClipOn Displayを用いる。

#### 3.1.2 システムの構成

筆者らは、Weavyを備えた複数のタイプのウェアラブルシステムWyvern[1]を開発している。前述のハードウェアから構成される本システムを図5に示す。提案手法を実装したソフトウェアはウェアラブル側ですべて処理される。データに関しては、画像群データベースと地図情報をサーバ側に配置し、ウェアラブル側から必要に応じて無線ネットワーク経由で取り出せる構成となっている。また、無線ネットワークの接続が途絶えた場合においても、ウェアラブル側にキャッシュされているデータベース情報が存在する範囲内では、動作できるように設計されている。

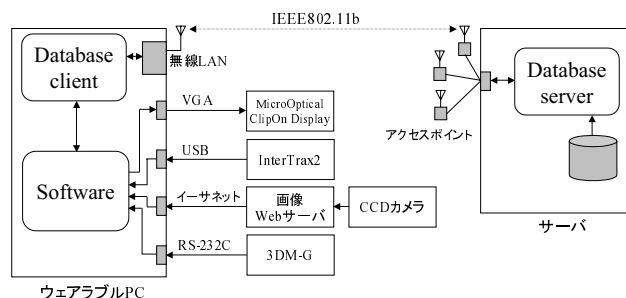


図5: Wyvern パーソナルポジショニングシステムの構成

### 3.2 実験結果

屋内環境を歩行移動したときの位置の推定結果から得られた移動軌跡を図6に示す。図中では、印で示された5箇所において、画像による位置補正が行われている。この結果より、オフィス機器や鉄筋コンクリート柱による磁場の乱れが存在する環境においても、十分な精度を与えられていることを確認できる。

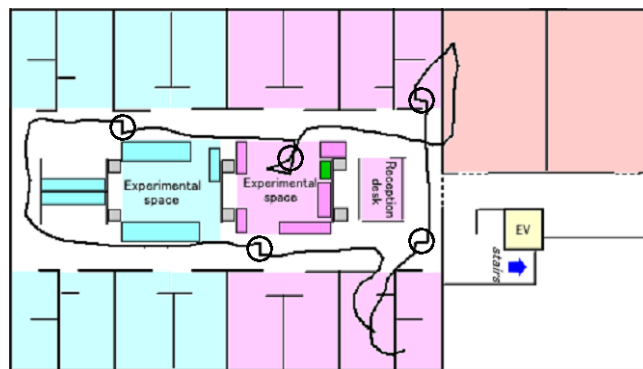


図6: 移動軌跡の推定結果

屋内および屋外環境における注釈提示結果の一例を図7に示す。

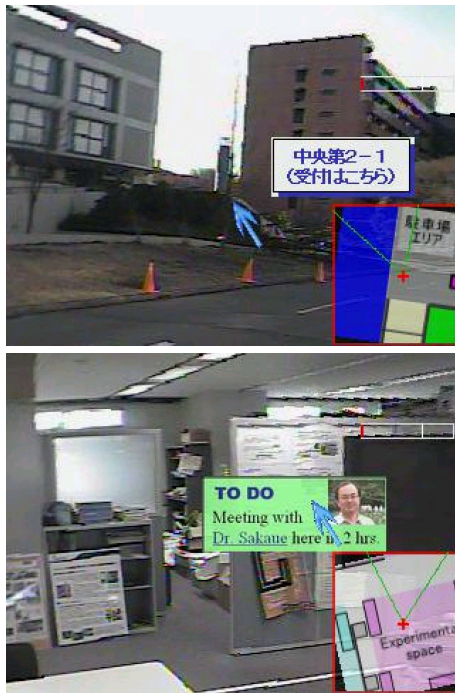


図 7: 注釈提示の例

## 4 まとめ

本稿では、歩行者のためのパーソナルポジショニング手法を提案した。本手法をウェアラブルシステム上に実装し、良好な結果を得た。

今後の課題としては、歩行移動距離の取得方法（現在は固定値を用いている）を改良することが挙げられる。次に、本手法は歩行動作に基づく DR と頭部装着の姿勢角センサによる誤差の蓄積を除去するためには、画像照合により位置・頭部方位を補正する必要がある。すなわち、利用者は視線の方向をデータベースに登録されているシーンに向ける必要がある。そこで、位置補正用の画像が利用者の付近に存在するときは、その方位への注視を促すような工夫が必要になると思われる。

## 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。

## 参考文献

[1] *Weavy: Wearable Visual Interfaces*, <http://www.is.aist.go.jp/weavy/>

[2] Steve Mann, “Wearable Computing: A First Step Toward Personal Imaging,” *Computer*, Vol. 30, No. 2, pp. 25–32,

1997.

[3] Steven Feiner, Blair MacIntyre, Tobias Höllerer and Anthony Webster, “A Touring Machine: Prototyping 3D Mobile Augmented Reality Systems for Exploring the Urban Environment,” in *Proc. Int’l Symp. on Wearable Computers (ISWC99)*, pp. 74–81, 1999.

[4] 廣瀬通孝, 廣戸健一郎, “屋外領域展示空間における画像と対象物の重ね合せ”, 日本バーチャルリアリティ学会第5回大会論文集, pp. 385–388, 2000.

[5] Hisashi Aoki, Bernt Schiele and Alex Pentland, “Realtime Personal Positioning System for Wearable Computers,” in *Proc. Int’l Symp. on Wearable Computers (ISWC99)*, pp. 37–43, 1999.

[6] 興梠正克, 蔵田武志, 坂上勝彦, “ウェアラブル拡張現実システムのための利用者のビューベース位置・方位取得手法”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol. 7, no. 2, pp. 139–150, 2002.

[7] Masakatsu Kourogi, Takeshi Kurata and Katsuhiko Sakaue, “A Panorama-based Method of Personal Positioning and Orientation and Its Real-time Applications for Wearable Computers,” in *Proc. Int’l Symp. on Wearable Computers (ISWC2001)*, pp. 107–114, 2001.

[8] 興梠正克, 蔵田武志, 坂上勝彦, 村岡洋一, “パノラマ画像群を位置合わせに用いたライブ映像上への注釈提示とその実時間システム”, 信学論 (D-II), Vol. J84-D-II, No. 10, pp. 2293–2301, 2001.

[9] Andrew Golding and Neal Lesh, “Indoor Navigation Using a Diverse Set of Cheap, Wearable Sensors,” in *Proc. Int’l Symp. on Wearable Computers (ISWC99)*, pp. 29–36, 1999.

[10] Seon-Woo Lee and Kenji Mase, “Incremental Motion-Based Location Recognition,” in *Proc. Int’l Symp. on Wearable Computers (ISWC2001)*, pp. 123–130, 2001.

[11] 天目隆平, 神原誠之, 横矢直和, “赤外線ビーコンと歩数計測を用いたウェアラブル型注釈提示システム”, 信学技報, PRMU2002–68, pp. 71–76, 2002.

[12] Point Research Corporation, <http://www.pointresearch.com/>

[13] Robert Levi and Thomas Judd, “Dead Reckoning Navigational System Using Accelerometer to Measure Foot Impacts,” U.S. Patent Number 5,583,776, 1996.

[14] Thomas Judd, “A Personal Dead Reckoning Module,” in *Proc. the Institute of Navigation, GPS’97*, pp. 169–170, 1997.

[15] 片山徹, “新版 応用カルマンフィルタ”, 朝倉書店, 2000.

[16] Quentin Ladetto and Bertrand Merminod, “Digital Magnetic Compass and Gyroscope Integration for Pedestrian Navigation,” in *9th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems*, 2002.

[17] 興梠正克, 村岡洋一, “動画像のグローバルアフィン動きパラメータの実時間推定手法”, 信学論 (D-II), Vol. J82-D-II, No. 7, pp. 1161–1170, 1999.