

組み込み型 GPS・自蔵式センサシステムによる屋内外歩行者ナビ

興梠 正克[†] 蔵田 武志[†]

[†] 産業技術総合研究所 情報技術研究部門 〒305-8568 茨城県つくば市梅園 1-1-1 中央第2

E-mail: [†]m.kouroggi@aist.go.jp, ^{††}kurata@ieee.org

あらまし 本稿では、GPS と自蔵航法を組み合わせた組み込み型歩行者ナビシステムについて述べる。GPS による測位は、その条件によっては必ずしも十分な精度が得られない。そこで、人に装着された自蔵式センサ（加速度・ジャイロ・磁気方位センサ）を用いて歩行動作を計測し、人の相対的な歩行移動ベクトルを推定する。この推定結果と GPS による測位結果を相補的に組み合わせることで測位精度を向上させる。GPS による測位ができない屋内環境においては、事前に環境中に埋め込まれた RFID タグによる測位を行ない、デッドレコニングの結果と統合することで、GPS の場合と同様に相補的に測位精度を向上させる。本手法を装着型組み込みシステムとして実装し、評価した。

キーワード 自蔵航法, 歩行者ナビゲーション, 組み込み型システム, ウェアラブルコンピューティング

Indoor/Outdoor Pedestrian Navigation with an Embedded GPS/Self-contained Sensor System

Masakatsu KOUROGI[†] and Takeshi KURATA[†]

[†] Information Technology Research Institute, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST) Umezono 1-1-1 Central 2, Tsukuba, Ibaraki, 305-8568, Japan

E-mail: [†]m.kouroggi@aist.go.jp, ^{††}kurata@ieee.org

Abstract This paper describes an embedded pedestrian navigation system composed of the Global Positioning System (GPS), Radio Frequency Identification (RFID) tag system and a self-contained navigation system. GPS receivers are widely used for navigation systems outdoors. The GPS signals, however, can be easily degraded by several conditions, and sometimes completely blocked. We therefore use three types of self-contained sensors (accelerometers, gyrosensors and magnetometers) to estimate relative displacement by analyzing human walking locomotion as a self-contained navigation system. In an indoor environment, we use RFID tags sparsely placed in key spot areas such as entrances and walkways. A RFID reader can be used to locate the position of user by detecting the ID signal from the tag. These tags obviously have limited availability and thus self-contained navigation is used to cover the environment. We propose a method of complementary compensation algorithm for the GPS/RFID location and self-contained navigation. A pedestrian navigation system is implemented and evaluated by the proposed method with an embedded wearable system.

Key words self-contained navigation, pedestrian navigation, embedded system, wearable computing

1. はじめに

近年、計算機と周辺機器の小型軽量化・省電力化とバッテリーの高性能化によって、計算機システムを着用しながら利用するスタイルの現実性が高まっている。着用型の計算機システムを快適に利用できるためには、そのシステムが利用者の置かれている状況を常時把握することが必要である。特に、利用者の位置と方位は着用型システムの多くの応用例にとって欠かせない。本研究では、歩行者を対象としてその位置と方位を組み

込み型システムによって取得して、屋内外環境における人ナビゲーションシステムを実現することを目的とする。

屋外環境において位置を取得する最も有望な技術の一つは GPS を用いた測位技術である。しかしながら、GPS による測位精度は様々な要因によって低下する。また、人ナビゲーションに必要な歩幅レベルの精度を GPS 単独で常時達成することは、実装するハードウェアのサイズや重量に制約がある着用型システムにとっては困難である。

そこで本研究では、人の歩行動作を計測する自蔵センサ群を

着用型システムに備え、歩行動作による相対的な移動を計測するデッドレコニングと GPS による測位を組み合わせた統合手法を提案する。歩行動作に基づくデッドレコニングとは、基準位置からの相対的な移動を自蔵センサ群（加速度・ジャイロ・磁気方位センサ）によって歩行動作を計測、解析することで取得する方法で、GPS による測位結果が得られないかその精度が十分でない状況をカバーする。

GPS による測位ができない屋内環境においては、RFID タグを出入口や通路などの移動の要所に事前に配置しておき、利用者がその場所を通過したときに着用型システムがタグの信号を検出することで位置情報を取得する。本研究では、RFID による測位とデッドレコニングを組み合わせた統合手法を提案する。

本研究では、提案手法を位置・方位を出力する組み込み型システムとして実装し、歩行者のナビゲーションを実現する外部アプリケーションと連動させることで、屋内外環境における歩行者ナビゲーションシステムを実現した。

2. GPS とデッドレコニングの測位誤差

筆者らは、GPS による測位結果と歩行動作に基づくデッドレコニングを組み合わせた実験的な試みを文献 [1] で報告した。GPS による測位誤差とデッドレコニングによる相対移動ベクトルの推定誤差を経験的に正規分布にしたがうとみなし、カルマンフィルタの枠組で統合していた。本研究では、GPS による測位誤差と歩行動作に基づくデッドレコニングの誤差を体系的に分析して、それぞれの誤差分布に関する理論的なモデルを構築する。まず、GPS による測位誤差をその原因ごとに分類し、それぞれの原因について誤差モデルの構築を試みる。次に歩行動作に基づくデッドレコニングによる相対移動ベクトルの推定誤差については、デッドレコニングにおける方位誤差と歩幅誤差の二つの原因に分解して解析し、その合成である全体の誤差についてモデル化を行う。

2.1 GPS の測位誤差

GPS による測位誤差は主に以下の 3 つの要因によって引き起こされる [2] [3]。

- (1) マルチパスによる誤差
- (2) 伝搬遅延によるバイアス誤差
- (3) バイアスがないランダム誤差

以下の節で、それぞれの誤差の性質とその対処策について述べる。

2.1.1 マルチパスによる誤差

GPS 信号の反射、回折などによりマルチパスの影響を受けている測位誤差は、その原因が非常に局所的な外部環境にあるためそのモデル化が困難である。特に、GPS アンテナを移動体に取り付けて測位している場合、その外部環境は固定されていないため、一般的なモデルを構築することができない。このような問題を解決する一つの手段として、アンテナ側を工夫する方法がある。マルチパスの影響を受けた信号は反射波であることが多いためその仰角が低いという性質があり、アンテナに仰角マスクを設定して仰角が低い信号を遮断することでマルチパスの影響を軽減することが可能である。しかしながら、仰角

が高い反射波や回折波（高層建築物などによるもの）を除去できず、またアンテナ側に特殊な加工が必要である上、アンテナを固定する必要があるため、システム設計の自由度が損なわれるといった問題がある。本研究では、GPS による測位結果がマルチパスの影響を受けているかを最初に識別して、その測位結果を除外する方針を取る。マルチパスの影響の検出手法については、デッドレコニングによる相対移動ベクトルの推定結果を組み合わせることで実現する（詳細は 3. 節で後述する）。

2.1.2 伝搬遅延によるバイアス誤差

電離層や対流圏を通過するときの信号の伝搬遅延は疑似距離を増大させるため、GPS の測位結果には一定のバイアス誤差が含まれる。この誤差は同一衛星の信号に基づく測位結果に関しては、局所的にほぼ同一である性質を持つ。そのため、ある地点でなされた GPS の測位結果について、観測しうる全衛星が見通せる地点（天空上が遮蔽されない開けた場所）で、これらの衛星のうち測位された 4 個の衛星の組合せを選択して、それらの信号による測位結果のバイアス誤差を観測することで、その地点における GPS 測位で発生するバイアス誤差を除去することができる。DGPS は同様の原理に基づいて誤差を補正している。

2.1.3 ランダム誤差

前述の二つの測位誤差が無視できるほど小さいとき、残りの誤差はバイアスがないランダム誤差であり、これは平均が 0 である正規分布に従うものと見なせる。その誤差分散 σ_r^2 は、衛星配置によって決定される HDOP 値（Horizontal Dilution of Precision：多くの GPS モジュールが出力する）に前述した二つの誤差の影響を受けない場合の疑似距離の誤差分散を乗じたものとして算出可能である。また、前述の全天空を見通せる固定地点で観測された同一衛星群による測位誤差からバイアス誤差成分を除去した成分についてその誤差分散を求めることで、ランダム誤差の分散を直接得ることもできる。

2.1.4 GPS による測位誤差のモデル

まとめると、マルチパスの影響が除外できる GPS による測位結果 $p_{gps}(t)$ は以下の式で表すことができる。

$$p_{gps}(t) = p(t) + e_b(t) + e_r(t) \quad (1)$$

ここで、 $p(t)$ が真の位置、 $e_b(t)$ は 2.1.2 節で述べたバイアス誤差、 $e_r(t)$ が 2.1.3 節で述べた平均 0 で分散がランダム誤差である。 $e_b(t)$ は固定観測局によって与えられるため、式 (1) において、 $p_{gps}(t)$ はカルマンフィルタの枠組で扱える観測ベクトルとなっている。

2.2 歩行動作に基づくデッドレコニングの誤差

歩行動作に基づくデッドレコニングとは、人の歩行動作を自蔵センサ群（加速度センサ・ジャイロセンサ・磁気方位センサ）を用いて検出、計測することで、基準位置からの相対移動ベクトルを一步単位で推定する手法である。その手順は以下に示す通りである。

- (1) 歩行動作の移動方位の単位ベクトル \vec{d}_i を推定する。
- (2) 歩行動作の歩幅 l_i を推定する。
- (3) i 歩目の移動ベクトル $\vec{m}_i = l_i \vec{d}_i$ を算出する。

このようにして得られた移動ベクトルを歩行動作が検出されるごとに積算することで、基準位置からの相対移動ベクトルを算出する。

ここで、基準位置ベクトルを \vec{b} とすると、 n 歩後の位置ベクトル \vec{p}_n は以下の式で表される。

$$\vec{p}_n = \vec{b} + \sum_i^n l_i \vec{d}_i \quad (2)$$

この位置推定結果 \vec{p}_n はデッドレコニングに起因する二種類の誤差の影響を受けている。一つは歩幅 l_i の推定誤差であり、もう一つは移動方位 \vec{d}_i の推定誤差である。 \vec{p}_n の誤差は、これらの二種類の誤差が合成された結果である。以下の節でこの誤差モデルを導出する。

2.2.1 デッドレコニングの誤差モデル

本研究では、歩幅 l_i と移動方位 \vec{d}_i を推定する方法として、文献 [4] で筆者らが提案している手法を用いる。この手法による歩幅 l_i の推定誤差は正規分布を取ることが分かっており、その分散 $\sigma_{l_i}^2$ は歩幅 l_i に比例して決定されることが、様々な歩幅で歩行する反復実験によって示されているため算出可能である。また、移動方位 \vec{d}_i の方位角の誤差も同様に正規分布を取ることが分かっており、その分散 σ_d^2 は高精度な基準姿勢角装置の出力と比較する精度検証実験によって得られている。

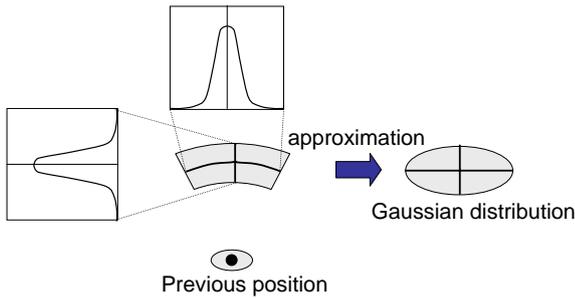


図1 一步分の移動後の誤差分布と正規分布による近似

i 歩目の移動において、移動前の位置を (x_i, y_i) 、推定された歩幅を l_i 、移動方位の単位ベクトルを \vec{d}_i とすると、移動後の位置 \vec{p}_i の分布は図1のように示され、扇形をくり抜いた形状の分布となり、このままでは一般的な解析は困難である。そこで次のような近似を行う。まず、移動方位ベクトルの方位角の誤差は、その標準偏差 σ_d が 0.2–0.4[deg] 程度であることが分かっているため、図1において移動方位の誤差による円弧部分はほぼ接線である直線とみなすことができる。したがって、移動方位の誤差と歩幅の誤差が合成された分布は、移動方位ベクトルに沿った軸とそれに直交する軸を持つ楕円体で表される正規分布として近似できる。

i 歩目の移動前の位置 (x_i, y_i) が分散共分散行列 C_i 、平均ベクトルが m_i の正規分布を取り、 i 歩目の移動単位ベクトル (d_{x_i}, d_{y_i}) はその方位角の平均が θ_i であって分散 $\sigma_{\theta_i}^2$ の正規分布にしたがうものとする。ここで、移動方位ベクトルの誤差を円弧の接線方向に分布する正規分布にしたがう誤差 e_i とし

て近似する（方位角の分散 $\sigma_{\theta_i}^2$ が十分小さいときこの近似は有効であると考えられる）。なお、この近似は図1に模式的に示したものと等価である。移動単位ベクトルの平均ベクトルは $(\cos \theta_i, \sin \theta_i)$ であり、その誤差 e_i は $(-\sin \theta_i, \cos \theta_i)$ の方向に沿った正規分布にしたがうため、平均は0で、分散は $(l_i \tan \sigma_{\theta_i})^2$ となる。

まとめると、移動後の位置 (x_{i+1}, y_{i+1}) は以下の式に示す通り、それぞれの変数の線形結合で表すことができる。

$$\begin{bmatrix} x_{i+1} \\ y_{i+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_i + l_i \cos \theta_i - e_i \sin \theta_i \\ y_i + l_i \sin \theta_i + e_i \cos \theta_i \end{bmatrix} = A_i \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ l_i \\ e_i \end{bmatrix} \quad (3)$$

ここで、 $A_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cos \theta_i & -\sin \theta_i \\ 0 & 1 & \sin \theta_i & \cos \theta_i \end{bmatrix}$ である。

(x_i, y_i, l_i, e_i) が正規分布にしたがうとき、移動後の位置 (x_{i+1}, y_{i+1}) はそれらの変数の線形結合であるから同様に正規分布にしたがう、その平均 m_{i+1} と分散 C_{i+1} は以下の式によって算出される。

$$m_{i+1} = m_i + l_i \vec{d}_i \quad (4)$$

$$C_{i+1} = A_i R_i A_i^T \quad (5)$$

ここで、 R_i は $\begin{bmatrix} x_i & y_i & l_i & e_i \end{bmatrix}^T$ の分散共分散行列である。位置 (x_i, y_i) と l_i, e_i は互いに独立しているため、それぞれの変数間の共分散は0となる。 R_i は以下の式によって表せる。

$$R_i = \begin{bmatrix} C_i & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{l_i}^2 & 0 \\ 0 & 0 & (l_i \tan \sigma_{\theta_i})^2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

以上から、歩行動作に基づくデッドレコニングにより推定される位置 (x_i, y_i) は、式(4)(5)によって平均ベクトル m_i と分散共分散行列 C_i が更新される正規分布によって近似的に表すことができる。

2.2.2 シミュレーションによる誤差モデルの評価

この近似の正確さをシミュレーションによって検証する。歩幅と移動方位について乱数誤差を含む推定値を生成し、デッドレコニング手法によってその相対移動ベクトルを得るシミュレーションを1万回繰り返す。その結果として得られた相対移動ベクトルのヒストグラム（その体積が1となるように正規化されたもの）が、式(4)(5)によって計算される正規分布とどれだけ近いかを調べた。

このシミュレーションでは、歩幅はすべて 0.7 [m]、移動方位は同一方位（30度）に直進するものとした。歩幅の推定誤差の標準偏差 σ_l は、精度検証実験の結果に基づく実測値である 0.014 [m] とし、移動方位の推定誤差の標準偏差は実測値である 0.2 [deg] とした。歩行移動開始前のヒストグラム分布は x 軸と y 軸ともに 0.1 [m] の標準偏差を持つ正規分布に一致させた。

このシミュレーションの結果として、10 歩移動後として生成された正規化ヒストグラムを図 2 に示す。この分布の平均ベクトルと分散共分散行列は式 (4)(5) から算出されるものとほぼ一致している。

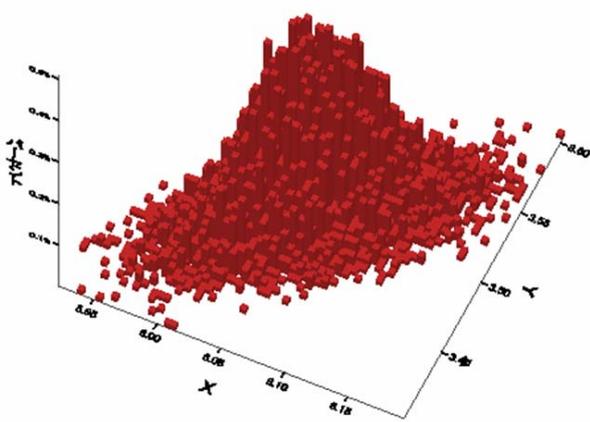


図 2 シミュレーションによって生成された正規化ヒストグラム

計算される正規分布とシミュレーションの正規化ヒストグラムとの一致率は図 2 の例において 95%を超えている。なお、ここでの一致率とはモデルによる正規分布とこのヒストグラムの差の絶対値（体積の差）を 0.01 [m] x 0.01 [m] のパッチ上で計算して、その総和を 1 から差し引いたものである。

3. GPS とデッドレコニングの統合手法

マルチパスの影響が除外されている GPS の測位結果は、式 (1) で示されるように正規分布にしたがうと見なせる。また、歩行動作に基づくデッドレコニングによって得られる基準位置からの相対移動ベクトルの誤差も式 (4)(5) によって正規分布で表せる。そこで、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が可能である。

まず、カルマンフィルタの状態ベクトル s_t を以下のように定義する。

$$s_t = \begin{bmatrix} x_t & y_t & v_{x_t} & v_{y_t} \end{bmatrix}^T \quad (7)$$

(v_{x_t}, v_{y_t}) は速度ベクトルである。この系において直接可能なものは位置なので、観測ベクトル o_t として与えられるのは、GPS による測位結果とデッドレコニングによる位置推定結果である。ところで、2.1.1 節で述べた通り、マルチパスの影響を受けた GPS の測位結果は正規分布にしたがわない誤差を持つ。そこで、歩行動作に基づくデッドレコニングによって更新された位置結果とその分散から導出される 95%信頼領域内に入らない GPS による測位結果は外れ値として除外する。図 3 にその概要を示す。この除外処理によって、マルチパスの影響を受けている可能性がある GPS の測位結果を取り除く。

観測ベクトル o_t の誤差分散共分散行列 R_t には、GPS の測位結果については 2.1.3 節で述べたように HDOP 値に基づいて誤差分散を計算し、デッドレコニングについては式 (5) によって計算される C_i を用いる。GPS による測位結果が得られない

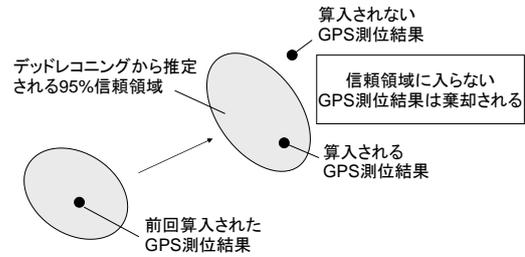


図 3 GPS 測位結果の棄却判定

間は、カルマンフィルタによる状態ベクトルの更新は式 (4)(5) によるものと完全に一致する。有効な GPS による測位結果が得られたとき、以下のカルマンフィルタの更新式によって状態ベクトルを更新する。

$$s_{t+1} = s_t + K_t(o_t - Hs_t) \quad (8)$$

ここで、 K_t はカルマンゲインである。式 (8) による更新前に以下の式によってカルマンゲインを得ておく。

$$K_t = P_t H^T (H P_t H^T + R_t)^{-1} \quad (9)$$

R_t は GPS による測位結果の誤差分散共分散行列で、HDOP 値から算出される。 P_t はカルマンフィルタにおける状態ベクトルの誤差分散共分散行列である。

4. RFID による測位とデッドレコニングとの統合

GPS による測位ができない屋内環境においては、RFID タグを環境に埋め込んでおいて、その ID 信号をリーダによって検出することによって原理的にその位置情報を取得できる。ID 信号が検出されるために必要な RFID タグとリーダ間の距離の設計は、RFID による測位には特に重要である。その距離が大きいと位置を絞り込む能力が低下するのに対して、小さすぎると近接しても ID 信号が読み出せない可能性が高くなるという関係にある。図 4 に RFID による測位能力を模式的に示す。

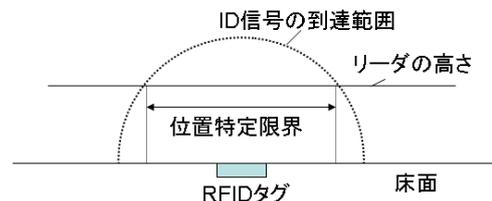


図 4 RFID による測位能力

本研究では、人の腰部付近の高さ（60cm 程度）にリーダがあるものとして、RFID タグは 1.5 [m] 以内で検出可能であるように設計した。この設計では、ID 信号の検出によってその位置を 1 [m] 以内に絞り込む能力を持つことができる。この設計に基づいて構築された RFID タグとリーダシステムを用いた予備実験により、その測位誤差は正規分布として近似できるこ

とを確認し、その標準偏差は 0.3 [m] 程度であった。

RFID タグによる測位結果を式 (8) によってカルマンフィルタに入力することで、GPS による測位結果の場合と同様にデッドレコニングと統合できる。なお、RFID による測位結果は GPS による測位とは異なり、必ず一定の範囲内で位置を特定できるため、外れ値の除去処理は不要である。

本研究では、RFID タグによる測位はピンポイントで実行して、局所的に機能させるものとする。環境中に RFID タグを埋め込む場所としては、出入口や通路などの人が移動するときに必ず通過する要所を選ぶ必要がある。

5. 実装と実験

提案手法を、組み込み型システムのソフトウェアとして実装した。組み込み型システムは GPS モジュールと RFID リーダ、デッドレコニングのための自蔵センサ群を入力として、その位置・方位を推定する。その推定結果の出力形式は、GPS レシーバの標準的な出力フォーマットの一種である NMEA-0183 形式に準拠する。このことによって、既存の地図ソフトウェア（多くの市販製品がこのフォーマットをサポートしている）などの外部アプリケーションとの連携を容易にした。なお、この組み込み型システムの出力結果を受け取って歩行者ナビゲーション画面を表示する目的に、無線 LAN で接続されたハンドヘルド PC を用いる。ナビゲーションソフトウェアとして、屋外環境では Google Earth を、屋内環境では専用に開発した Flash アプリケーションを用いている。

5.1 ハードウェア

提案手法を処理する計算機システムとして、日本 SGI 社の ViewRanger を用いた。これは大きさが 95mm x 65mm x 33mm、重さが 130g の組み込み型システム（OS：NetBSD）である。このシステムの CPU は SH-4 240MHz で、RAM は 64MB である。無線/有線 LAN とシリアルポート（2 個）を備えており、これらを介して外部とデータの入出力ができる。自蔵センサ群（加速度・ジャイロ・磁気方位センサ：各 3 軸）には、MicroStrain 社の 3DM-GX1 を用いた。これらのセンサデータはシリアルポート経由で組み込み型システムに取り込まれる。組み込み型システム側の制約によって、センサデータは 19200bps のボーレートで取り込まれており、そのときのサンプリングレートは 30-50Hz となる。GPS による測位結果の取得には、ストロベリーリナックス社の GPS モジュール（処理 LSI とアンテナが一体化されている）を用いた。このモジュールは L1 帯のみの C/A 信号により単独測位方式で測位する標準的な製品である。その測位結果（HDOP 値を含む）は NMEA-0183 フォーマットで出力され、シリアルポート経由で組み込み型システムに取り込まれる。4 個以上の衛星が同時に見通せる環境下ではこの GPS モジュールは約 1Hz のレートで測位結果を出力する。2.1.2 節で述べた固定 GPS 観測局の測位結果に基づくバイアス誤差の補正においても、この GPS モジュールを用いている。本来は、提案手法を実装するためには、捕捉可能な衛星のうち任意の 4 個の衛星からの信号に基づいた測位結果を出力できる GPS モジュールが必要である。しかしながら、その

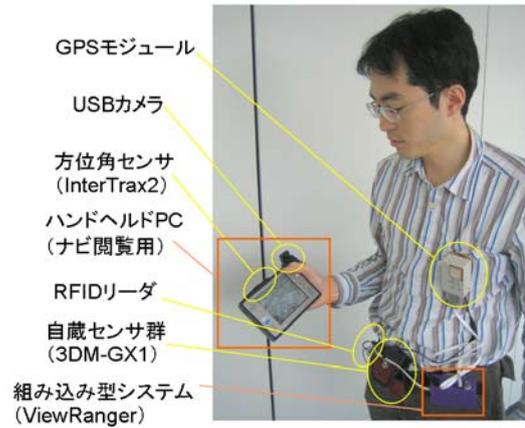


図 5 歩行者ナビゲーションシステムの外観図

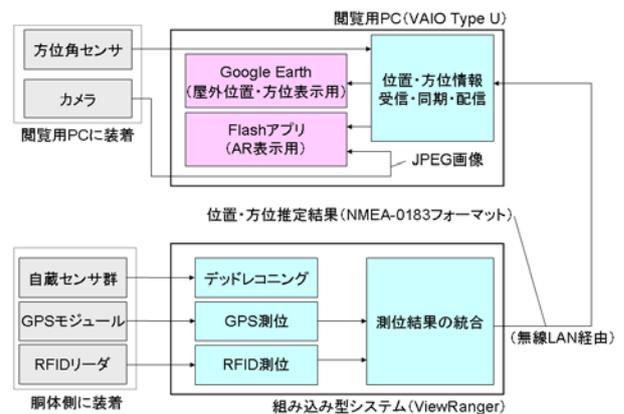


図 6 歩行者ナビゲーションシステムのダイアグラム

ような機能を備える GPS モジュールが入手できなかったため、本実装では、これを汎用的な GPS モジュールで代用している。汎用的なモジュールでは、幾何学的 DOP 値が最小となる 4 個の衛星の組み合わせが自動的に選択され、それらの信号に基づいて測位される。特定の衛星だけを選択して測位結果を与える機能を備えていない。RFID タグとリーダーには、ワイマティック社の無線タグシステム SNODE を用いている。この無線タグのアンテナを調整して、その信号の到達距離が 4. 節で設計した仕様を満たすように設定した。位置・方位推定結果に基づいて歩行者ナビゲーションの出力画面を表示、閲覧するためのハンドヘルド PC として、ソニーの VAIO Type U（VGN-U71P）を用いた。これらのハードウェアによって構築された歩行者ナビゲーションシステムを利用者が装着した外観を図 5 に示し、そのシステムダイアグラムを図 6 に示す。

5.2 ソフトウェア

本実装の組み込み型システムの OS は NetBSD であるため、歩行動作に基づくデッドレコニングと GPS による測位、RFID タグシステムによる測位、これらの統合処理はすべて POSIX に準拠したソフトウェアとして開発されている。位置・方位の推定結果は、NMEA-0183 フォーマット（WGS-84 測地系）に準拠して出力される。出力形式は、ストリーム方式とクエリー方式の二つを備える。ストリーム方式では、出力結果が有効になると、ただちに NMEA-0183 フォーマットのメッセージが出

力される。多くの地図ソフトウェアはこのフォーマットを入力として動作する。クエリー方式では、Web ペースで CGI として呼び出し可能な API を外部に提供するもので、単発的に位置・方位情報が必要となるアプリケーション（Flash アプリを含む）の開発に適している。この方式では、外部からクエリーを受けると、最新の位置・方位を NMEA-0183 フォーマットの RMC メッセージとして返す。

5.3 処理速度評価

本実装システムは処理系の性能が汎用 PC に比べて低いため、最大サンプリングレートにおいて処理性能が十分であるかを評価した。まず、GPS による測位（最大 1Hz）とデッドレコニング（最大 50Hz）が同時にフル稼働した場合でも、CPU 占有率は 30% を上回ることなく、まだ他のアプリケーションを動作させる余力を残していた。RFID による測位は、リーダからのタグ探索が 1Hz で実行されているため、その最大更新レートは 1Hz である。デッドレコニングと同時にフル稼働させた場合でも、その CPU 占有率は常に 20% 以下であった。

5.4 屋外環境における実験結果

図 7 に示す屋外環境（産総研の敷地内）を歩行して測位結果を取得する実験を行なった。GPS 固定観測局は図 7 に示す地点上に配置されている。この実験結果として得られた移動軌跡の一例を図 8 に示す。なお、これらの出力結果は Google Earth の出力画面の一部を切り取ったものである。



図 7 実験をおこなった屋外環境

GPS（単独測位方式）による測位結果では、バイアス誤差が無視できないほど大きく（5 [m] 以上の測位誤差が見られた）、歩行者ナビゲーションに必要な精度を達成していなかった。GPS 固定観測局からの補正情報に基づいて得られる測位結果では、信号の遮蔽やマルチパスの影響が存在しない条件下では一定の精度を保っているが、高層建築物の周辺などにおいて離散的に大きな誤差が観測された。GPS（バイアス補正あり）とデッドレコニングを組み合わせた軌跡においては、そのような条件下でも正しく動作することができた。

しかしながら、上記とは別の場所で実施された屋外実験では、GPS 固定観測局から与えられる補正值ではバイアス誤差が十分に除去することができず、3-4 [m] の測位誤差がバイアスと

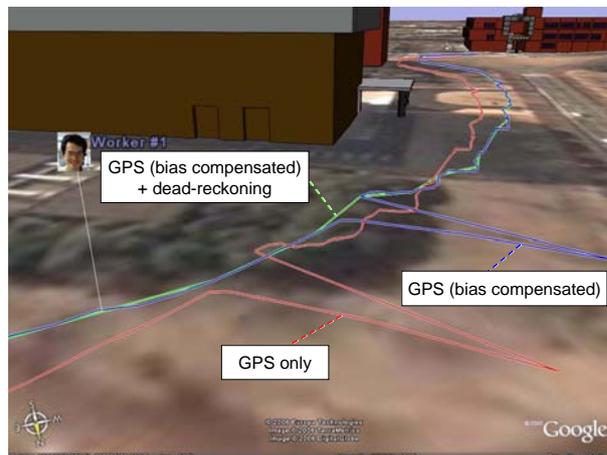


図 8 本システムによる移動軌跡の一例

して発生するケースが見られた。この原因は、本稿で述べた実装システムでは、GPS 固定観測局が任意の 4 個の衛星からの信号に観測されるバイアス誤差を得られる保証がないことに起因すると考えられる。

5.5 屋内環境における実験結果

RFID タグを幅 2 [m] の出入口と通路に 1 個ずつ配置された屋内環境において、RFID とデッドレコニングに基づく測位結果を取得する実験を行なった。利用者がその地点を通過すると、タグからの ID 信号が受信されたときは即時に位置が補正され、正しく動作することが確認された。

しかしながら、本実験においては、RFID タグからの信号到達可能距離が短く設定されており、歩行速度が速い場合（1 [m/s] 以上）、タグからの信号が検出されないことがあった。信号到達可能距離をより長く設定すると信号の未検出を防止できるが、その測位精度が低下してデッドレコニングの位置推定結果を補正するだけの精度を得ることが難しいため、ピンポイントに位置を補正する目的には適さなかった。

6. ま と め

本研究では、まず、GPS/RFID タグによる測位とデッドレコニングについて、それぞれの誤差モデルを構築した。次に、これらの誤差モデルに基づいてカルマンフィルタの枠組でそれぞれの測位結果を統合し、屋内外環境における位置・方位情報を取得する手法を確立した。この手法を、外部アプリケーションとの連携が容易なソフトウェアとして開発し、組み込み型システムとして実装した。最後に、歩行者ナビゲーションを実現する外部アプリケーションと連動させて、その性能を検証した。

文 献

- [1] “GPS と歩行動作解析に基づくデッドレコニングの統合によるパーソナルポジショニング,” 興梠, 蔵田, 第 19 回人工知能学会, IA3-03, 2005.
- [2] “Global Positioning System: Theory and Applications,” Vol. 1, Ed. by B. W. Parkinson and J. J. Spilker, 1996.
- [3] “GPS: 理論と応用”, B. ホフマン-ウェレンホフ, H. リヒテネガー, J. コリンズ, シュプリンガー・フェアラーク東京, 2000.
- [4] M. Kouroggi and T. Kurata, “Personal positioning based on walking locomotion analysis with self-contained sensors and a wearable camera,” in *Proc. ISMAR2003*, pp. 103-112, 2003.