

GPS測位情報とセンサ情報に基づく 位置推定システムに関する研究

小河原 亮^{1,a)} 羽多野 裕之^{1,b)} 藤井 雅弘^{1,c)} 伊藤 篤^{1,d)} 渡辺 裕^{1,e)}

受付日 2014年3月31日, 採録日 2014年10月8日

概要: 位置情報を用いた様々なサービスを提供するためには, 移動体端末において位置を正確に推定する技術が必要である. 現在, Global Positioning System (GPS) を用いた絶対位置推定が主流であるが, 屋外であっても周囲に建築物が存在するような環境では推定位置に大きな誤差を発生する可能性があり, また, 地下街などの屋内では GPS 衛星が観測できずに位置推定自体が行えない場合がある. 携帯端末を保持して移動する歩行者を対象とした位置推定を目的としたとき, その移動にともない, GPS の受信環境が時々刻々と変化することが考えられ, GPS の受信環境の変化に頑強な位置推定が必要である. 一方で, GPS の受信環境に依存せず, 移動体の相対的な移動をセンサによって測定することで, 移動を追従する Dead Reckoning (DR) 技術がある. 最近のスマートフォンに代表される携帯端末でも, DR に利用可能なセンサ群が搭載されており, 移動体の位置を追従可能であると考えられる. そこで, 本論文では, 携帯端末上において GPS 測位による絶対位置情報と, センサ測定による相対移動情報を組み合わせた位置推定システムを提案する. GPS による絶対位置推定情報とセンサによる相対移動推定情報をカルマンフィルタによって組み合わせ, より高精度な位置推定を実現する. また, 絶対位置推定精度を GPS 衛星の観測情報と関連付け, カルマンフィルタのパラメータ設定に活用する手法について論ずる. 提案システムを携帯端末上で実装し, フィールド実験を通じて, その有効性を示す.

キーワード: 携帯端末, 位置推定, GPS, デッドレコニング, カルマンフィルタ

Location Estimation System Based on GPS Positioning and Sensor Information

RYO OGAWARA^{1,a)} HIROYUKI HATANO^{1,b)} MASAHIRO FUJII^{1,c)} ATSUSHI ITOH^{1,d)} YU WATANABE^{1,e)}

Received: March 31, 2014, Accepted: October 8, 2014

Abstract: Recently, it is possible to use various network connections at any time or any place using mobile devices. There are some services for mobile devices using the network connectivity. In the services such as navigation systems, it is necessary to accurately estimate the location of the mobile devices. We can use Global Positioning System (GPS) in order to obtain the absolute position of the device. However, the absolute position estimation by the GPS strongly depends on circumference environment. So, we need a robust location estimation system which is able to adapt to the GPS environment change. On the other hand, there are some relative movement estimation methods by Dead Reckoning (DR) techniques. The DR can estimate the relative movement by the sensors. The latest mobile devices such as the smartphone are equipped with some sensors to capture the behavior of the device. In this paper, we propose a new location estimation method which combines the absolute location information by the GPS with the relative movement information by the sensors. From the results of our experiments, we show that the proposed method using the sensor information outperforms the conventional one.

Keywords: mobile device, location estimation, global positioning system, dead reckoning, Kalman filter

1. まえがき

近年、様々な場所において携帯端末による無線ネットワーク接続が可能になり、ネットワークを利用した携帯端末向けの多様なサービスが提供されている。そのサービスの1つとして、携帯端末の位置情報を用いたものがあり、たとえば、携帯端末の現在地情報から周辺に存在する飲食店のレビューやクーポン情報を取得したり、友人や家族の現在地情報の確認や交換といったサービスなどがある。現在、携帯端末の位置情報を取得する方法としてGPS (Global Positioning System) [1], [2] が主流であるが、歩行者のような移動体を対象とした位置推定を行う場合、GPSの受信環境が時々刻々と変化することが想定される。そのため、上空に存在するGPS衛星からの信号を受信することで測位を行うGPSは、受信環境によっては正確に測位を行えない場合がある。たとえば、測位地点によっては周囲の建築物などによるGPS信号の反射や回折の影響により、数十メートル以上の測位誤差が生じる可能性が報告されている。特に、地下街などの屋内環境では遮蔽物の影響によるGPS信号の減衰や観測可能なGPS衛星数の減少によって測位自体が不可能な場合がある。

一方で、絶対位置の測位を行うGPSに対して、Dead Reckoning (DR) と呼ばれる相対的な移動を測定する方法がある。DRはカーナビゲーションシステムなどでも採用されており、ある位置からの相対的な移動を加速度センサや地磁気センサなどのセンサ群によって測定することで位置を追跡する。そのため、GPSのように受信環境に依存することなく相対的な移動を測定することが可能である。また、最近のスマートフォンに代表される携帯端末には、DRに利用可能なセンサの搭載により、携帯端末の相対的な移動を測定できると考えられる。

そこで本研究では、携帯端末上でGPSによって測位した絶対位置情報と、搭載センサによって測定した相対移動情報を組み合わせた位置推定システムを提案する。絶対位置情報と相対移動情報の組合せにカルマンフィルタ [3] を用いることで、それぞれ単独の情報のみによる位置推定と比較して、提案手法の優位性について報告する。これまで我々は、取得した絶対位置情報と相対移動情報にはそれぞれ、GPS測位とセンサ測定による誤差が含まれていることを考慮し、適切なパラメータを設定したカルマンフィルタにより、両情報の信頼性のバランスをとることで、それぞれ単独での位置推定より精度の改善が可能であることを示

してきた [4]。これまでの検討で、絶対位置情報と相対移動情報の誤差における最適なパラメータは正比例の関係にあることが明らかにされたが、その比例係数の決定方法の指針が不明であった。そこで、本論文では絶対位置情報の測位誤差をGPSの受信環境と関連付け、カルマンフィルタのパラメータ設定に活用するシステムを提案する。これにより、時々刻々と変化するGPS受信環境に適応し、適切なパラメータを自動的に設定でき、つねに適切なカルマンフィルタで位置推定を行うことが可能となる。提案システムを携帯端末上で実装し、フィールド実験を通じて、その有効性を示す。

2. システムモデル

図1に、想定するシステムの動作例を示す。携帯端末上で、GPSによる測位とセンサによる測定はそれぞれ一定のサンプリング間隔で動作し続けており、カルマンフィルタは原則、GPSによる測位タイミングに合わせて動作する。このとき、歩行者の相対移動情報はそれまで取得したセンサ情報によって測定し、GPSによって測位した絶対位置情報をカルマンフィルタにより組み合わせることで位置を推定する。ただし、GPSの受信環境の悪化により、あるサンプリングタイミングでGPS測位が不可能であった場合、最後に取得した絶対位置情報と、GPSの受信環境に依存しないセンサ測定による相対移動情報を組み合わせることで、擬似的に同一の周期で位置推定を行う。その後、GPSの受信環境の改善により、GPSによる測位が可能となった場合、その時点に取得した絶対位置情報と相対移動情報を組み合わせて位置を推定する。以降、GPSによる測位が可能であれば、測位タイミングに合わせてカルマンフィルタによる位置推定を行い、不可能であれば、最後に取得した絶対位置情報を用いて擬似的な位置推定を行う。

本システムでは、図2に示すように歩行者の相対的な移

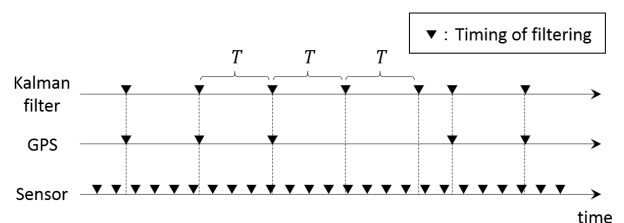


図1 システムの動作例

Fig. 1 An example of behavior timing of system.

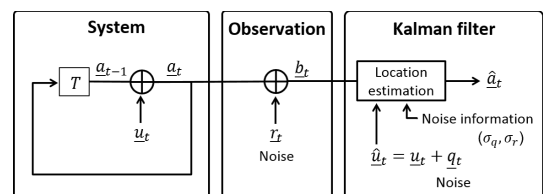


図2 カルマンフィルタの構成

Fig. 2 Kalman filter structure.

¹ 宇都宮大学
Utsunomiya University, Utsunomiya, Tochigi 321-8585, Japan

a) ogawara@degas.is.utsunomiya-u.ac.jp

b) hatano@is.utsunomiya-u.ac.jp

c) fujii@is.utsunomiya-u.ac.jp

d) at.ito@is.utsunomiya-u.ac.jp

e) yu@is.utsunomiya-u.ac.jp

動を表現したシステム系と、GPSによる測位を表現した観測系によって移動と観測が構成されることを仮定し、この仮定の下でカルマンフィルタにより位置推定を行う。カルマンフィルタによる位置推定は T 間隔で動作し、その動作する離散時刻を t で表す。

2.1 システム系

二次元空間での位置推定を想定し、時刻 t における歩行者の真の位置を

$$\underline{a}_t = \begin{bmatrix} x_t & y_t \end{bmatrix}^T \quad (1)$$

と表す。ここで、 x_t と y_t は時刻 t における歩行者の $x-y$ 絶対座標、もしくは、限定された歩行空間における $x-y$ 相対座標を示す。また、本論文では、 $\underline{\cdot}$ は縦ベクトルを、 $\cdot^T$ は転置を意味する。

システム系は、携帯端末の移動にともなう位置の変化を表しており、時刻 t における歩行者の真の位置 $\underline{a}_t$ は時刻 $t-1$ における真の位置 $\underline{a}_{t-1}$ と歩行者の相対的な移動 $\underline{u}_t$ の和として

$$\underline{a}_t = \underline{a}_{t-1} + \underline{u}_t \quad (2)$$

で与えられると仮定する。ここで、 $\underline{u}_t$ は歩行者が時刻 $t-1$ から t までに移動した真の相対的な移動であり、この $\underline{u}_t$ を携帯端末に搭載されているセンサ群によって測定する。しかし、センサによる測定では雑音などの影響により誤差がともなうため、真の相対的な移動 $\underline{u}_t$ の推定には誤差成分が含まれると考えられる。そこで、携帯端末に搭載されたセンサによって測定される歩行者の相対移動の推定値は

$$\hat{\underline{u}}_t = \underline{u}_t + \underline{q}_t \quad (3)$$

で与えられるものと想定する。ここで、 $\underline{q}_t$ はセンサによる測定誤差などに基づくシステム系雑音であり、 $E\{\underline{q}_t\} = \underline{0}$ 、 $E\{\underline{q}_{t_1} \underline{q}_{t_2}^T\} = \underline{Q}_{t_1} \delta_{t_1, t_2}$ を満たすガウス確率過程に従う確率変数ベクトルの標本とする。ただし、 δ_{t_1, t_2} はクロネッカーのデルタを意味する。また、 $\underline{Q}_{t_1}$ は時刻 t での相対移動誤差の共分散行列を意味する。

2.1.1 センサによる相対的な移動 $\underline{u}_t$ の測定

各時刻における相対的な移動 $\underline{u}_t$ は、歩行者の進行方向を θ_t 、相対移動距離を d_t とすると

$$\underline{u}_t = \begin{bmatrix} d_t \cos \theta_t & d_t \sin \theta_t \end{bmatrix}^T \quad (4)$$

で与えられる。本システムでは、携帯端末に搭載されている地磁気センサにより進行方向 θ_t を測定し、加速度センサにより相対移動距離 d_t の測定を行う。一般に、センサによる相対移動 $\underline{u}_t$ の推定には、携帯端末の姿勢推定が必要であるが、本検討では、歩行者は携帯端末を地面に対して平行になるように手で固定保持しており、相対移動推定への端末の姿勢の影響は十分に無視できるものと想定する。

また、本論文では、加速度センサと地磁気センサの情報を、それらの相対関係から組み合わせた方位センサによって端末の方位を推定し、それを歩行者の進行方向とする。

一般の歩行者ナビゲーションシステムでは、画面を見ずに手振り歩行やポケットなどに収納することも考えられるため、携帯端末の持ち方や携帯場所に依存しない相対移動測定を行う必要性がある。これまで、手に保持された携帯端末のセンサを利用した相対的な移動の測定方法[5]や、携帯端末を手以外の場所に携帯した場合における搭載センサを利用した相対的な移動の測定方法[6]などの研究が活発になされている。歩行者の相対的な移動は、固定保持された携帯端末の加速度を用いるとき、原理的には加速度を2回積分することによって相対移動距離に換算できるが、実際にはセンサ性能に依存する分解能力や雑音などの影響により、正確に相対移動距離を測定することは困難である場合が多い。一方で、歩行における加速度の周期的な変化に着目し、歩数と歩幅を利用した万歩計方式での相対移動距離の測定方法がある。この手法では、一定区間内での加速度の変化に着目し、閾値を設けることで歩数を判定する。ただし、閾値による歩数推定の問題点として、個人差や歩行場所（アスファルトや芝生など）により、加速度の値域が変化するため、最適な閾値の設定が困難である。また、相対移動距離を推定するためには、歩数情報に加えて、歩幅情報も必要である。このために、通常歩行における平均的な歩幅を固定値として与え、歩数×歩幅により相対移動距離を推定する手法などがある。ただし、この手法では一定値とした歩幅と歩行者の実際の歩幅の間の誤差が累積されるため、長距離での相対移動距離推定には不向きである。このような個人差を解決するために、あらかじめ歩幅を測定する方法や歩行者の身長により歩幅を算出する手法[7]が存在するが、こちらも歩行場所（坂道や階段など）によって最適な歩幅の決定が困難であるという問題点がある。したがって、歩数と歩幅を用いる場合、個人差と歩行場所における問題点を解決する必要がある。他にも、体に固定設置したセンサによる相対的な移動の測定方法[8]、[9]も存在するが、別途装置の準備やコストが必要になる。そこで、本システムでは歩数と歩幅を用いず、収集した加速度時系列に対して短時間フーリエ変換を行う鵜沼らの手法[10]を採用し、相対移動距離 d_t を測定する。

まず、加速度センサにより継続的に加速度変化を計測する。図3に取得したz軸加速度の時系列データの例を示す。この試行では、歩行時の端末の姿勢による加速度ベクトルの向きの影響を極力排除するために、端末座標系でのz軸方向が歩行面に対して鉛直方向に一致するような保持状態を維持して実験を行った。横軸は時間[s]、縦軸は重力加速度を除いた加速度[m/s²]を表しており、横軸の $t-2$ 、 $t-1$ 、 t はカルマンフィルタによる位置推定の時刻を表している。たとえば、時刻 t における相対移動距離 d_t を測

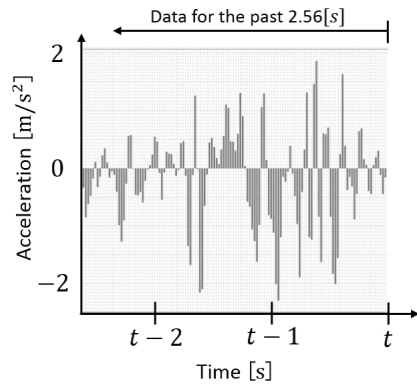


図 3 z 軸加速度の時系列データ

Fig. 3 Time-series data of acceleration along z-axis.

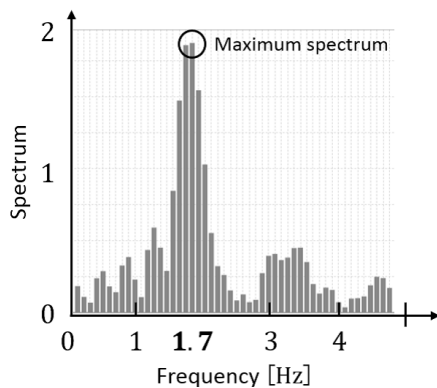


図 4 短時間フーリエ変換後

Fig. 4 Short-time Fourier transform.

定するとき、図 3 のように t 時点から過去 2.56 [s] の加速度データに対してフーリエ変換を行う。この処理のためには、片足の動きの 1 周期分 (2 歩分) 以上の加速度データが必要であり、通常歩行の場合、1 [s] 間に 2 歩程度移動することを考慮し、ゆっくり歩行する場合を考慮して、倍の 2 [s] 以上となる観測時間のデータを利用した。また、フーリエ変換による演算の高速化を図るために、5 章で加速度を 0.02 [s] ごとに計測することを考慮し、処理データ点数が 2 の冪乗となるように 2.56 [s] と設定した。その区間での加速度時系列をフーリエ変換したものは歩調スペクトルを表しており、その例を図 4 に示す。横軸は周波数 [Hz]、縦軸はスペクトル強度を表しており、スペクトル強度が最大である周波数に着目する。図 4 から、最大スペクトルの周波数は 1.7 [Hz] であり、これは歩行者の両足の着地間隔に相当している。これを用いて事前測定によって求められた図 5 の近似直線により速度を推定する。横軸は周波数 [Hz]、縦軸は歩行者の速度 [m/s] を表しており、図中のプロットは直線 30 [m] を一定の速度で歩行し、10 回の施行で得られた加速度データに対してフーリエ変換を行ったときの最大歩調スペクトルをとる周波数とそのときの速度の実測値である。また、点線は最小二乗法により近似した直線である。たとえば、周波数が 1.7 [Hz] である場合、近似

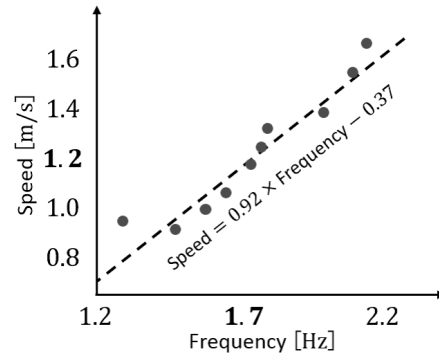


図 5 スペクトルと速度の関係

Fig. 5 A relationship between frequency and speed.

直線から 1.2 [m/s] の速度が得られるため、一時刻前の位置推定時刻からの時間を乗算することで相対移動距離 d_t を算出することができる。

進行方向 θ_t は、方位センサの出力である絶対方位をそのまま歩行者の進行方向と見なすことができるため、相対移動距離 d_t と同じく過去 2.56 [s] の測定方位の平均値を利用する。

2.2 観測系

次に観測系は、各時刻における歩行者の位置を GPS により測位したモデルを表している。観測系においても、システム系と同様に時刻 t における測位には雑音成分が含まれていると想定される。そこで、時刻 t における GPS の測位位置 $\hat{b}_t$ は真の位置 $\underline{a}_t$ に測位誤差などの観測系雑音 r_t が加法的に付加され

$$\hat{b}_t = \underline{a}_t + r_t \quad (5)$$

で与えられるものと想定する。一般に、GPS による測位誤差は、その時刻における GPS 衛星の位置や観測衛星数と周辺の建築物などの環境により、その誤差がある特定の方向に傾くことが知られている。GPS の測位誤差の分布の非一様性は、GPS 衛星の移動や測位地点の変化により時々刻々と変化し、事前にその分布を知ることは困難である。そこで、本システムでは、 r_t は $E\{r_t\} = 0$, $E\{r_{t_1} r_{t_2}^T\} = R_{t_1} \delta_{t_1, t_2}$ を満たすガウス確率過程に従う確率変数ベクトルの標本として扱う。ただし、 R_t は時刻 t での観測系雑音の共分散行列を意味する。この仮定は最適ではないが、GPS による測位誤差の分布が未知である場合は実用上、有効な仮定であると考えられる。

2.3 カルマンフィルタ

2.1 節のシステム系と 2.2 節での観測系の仮定のもとで時刻 t における真の位置 $\underline{a}_t$ の推定位置はカルマンフィルタにより

$$\hat{\underline{a}}_{t|t} = \hat{\underline{a}}_{t|t-1} + K_t(\hat{b}_t - \hat{\underline{a}}_{t|t-1}) \quad (6)$$

で与えられる。ただし、

$$\hat{a}_{t|t-1} = \hat{a}_{t-1|t-1} + \hat{u}_t \quad (7)$$

$$\mathbf{K}_t = \mathbf{P}_{t|t-1}(\mathbf{P}_{t|t-1} + \mathbf{R}_t)^{-1} \quad (8)$$

$$\mathbf{P}_{t|t-1} = \mathbf{Q}_t + \mathbf{P}_{t-1|t-1} \quad (9)$$

$$\mathbf{P}_{t|t} = \mathbf{P}_{t|t-1} - \mathbf{K}_t \mathbf{P}_{t|t-1} \quad (10)$$

とする。ここで、 $\hat{a}_{t|t-1}$ は時刻 t における時刻 $t-1$ までの観測に基づく推定位置、 $\mathbf{K}_t$ はカルマンゲイン、 $\mathbf{P}_{t|t-1}$ は時刻 t における推定位置 $\hat{a}_{t|t-1}$ の推定誤差共分散行列、 $\mathbf{P}_{t|t}$ は時刻 t における推定位置 $\hat{a}_{t|t}$ の推定誤差共分散行列を示す。本論文では、システム系雑音は x, y 軸において互いに無相関であり、 $\mathbf{Q}_t = \sigma_{q_t}^2 \mathbf{I}$ で与えられるものと想定する。また、観測系雑音も x, y 軸において互いに無相関であり、 $\mathbf{R}_t = \sigma_{r_t}^2 \mathbf{I}$ で与えられるものと想定する。一般に、センサ個体の計測精度に依存する相対移動推定誤差分散 $\sigma_{q_t}^2$ は時刻 t に依存しないが、GPS の測位精度に依存する絶対位置推定誤差分散 $\sigma_{r_t}^2$ は時刻 t に依存する。カルマンフィルタを実装するためには、センサ測定による相対的な移動 $\hat{u}_t$ とその測定誤差の分散である $\sigma_{q_t}^2$ 、および GPS による測位位置 $\underline{b}_t$ とその測位誤差の分散である $\sigma_{r_t}^2$ の知識が必要である。ここで、 $\hat{u}_t$ は搭載センサによって測定された相対移動情報を利用し、 $\underline{b}_t$ は GPS によって測位された絶対位置情報を利用できるが、誤差分散の $\sigma_{q_t}^2$ と $\sigma_{r_t}^2$ は一般に未知であるため、カルマンフィルタを実装するために適切に設定する必要がある。センサ測定による相対移動情報の信頼度は $\sigma_{q_t}^2$ に反比例し、GPS 測位による絶対位置情報の信頼度は $\sigma_{r_t}^2$ に反比例する。たとえば、 $(\sigma_{q_t} \neq 0, \sigma_{r_t} = 0)$ とした場合、GPS 測位による絶対位置推定値には測位誤差が含まれていないと想定し、カルマンフィルタはセンサ測定による相対移動推定値を利用せず、GPS 測位による絶対位置推定値が推定位置となる。これは、GPS 測位による絶対位置情報には誤差が含まれていない $\sigma_{r_t} = 0$ という想定に従えば当然のことである。逆に、 $(\sigma_{q_t} = 0, \sigma_{r_t} \neq 0)$ とした場合、センサによる相対移動推定値に誤差が含まれないと想定し、カルマンフィルタは GPS による絶対位置推定値を利用せず、センサによる相対移動推定値が推定位置となる。このように誤差パラメータ ($\sigma_{q_t}, \sigma_{r_t}$) を適切に設定することで、カルマンフィルタを効果的に動作させることができるが、これらを最適に設定する指針は明確にされていない。そこで、次章で $(\sigma_{q_t}, \sigma_{r_t})$ をパラメータとして様々に与えることでカルマンフィルタによる位置推定精度の関係について検討する。

3. 誤差パラメータ ($\sigma_{q_t}, \sigma_{r_t}$) と位置推定精度の関係

$(\sigma_{q_t}, \sigma_{r_t})$ の設定による位置推定精度の関係を明らかにするために、複数の歩行環境下における検証実験を行った。歩行環境として、GPS の受信環境が良い順に、ケース 1 は携帯端末-GPS 衛星間が見通し内であり「開天頂で周

囲に建物が存在しない場合」、ケース 2 は「開天頂で周囲に建物が存在する場合」、ケース 3 は頭上に屋根などがあり「閉天頂で周囲に建物が存在する場合」の 3 つのケースで行った。歩行方法は、Android 端末を手に固定した状態で保持しながら、開始位置から 60[s] 間、単一方向に可能な限り等速で歩行するものとした。歩行者の相対的な移動は 0.02[s] 間隔で測定したセンサ情報を利用し、1[s] ごとに行われる GPS 測位に合わせて、カルマンフィルタによる位置推定を行った。ただし、本実験において歩行者は等速歩行しているものと想定し、60[s] 間における移動距離をメジャーで計測し、その距離を経過時間の 60[s] で除算することで相対移動速度を算出し、その速度からある時刻での相対移動距離を算出した。また、カルマンフィルタの初期値として、 $\hat{a}_{-1|-1}$ と $\underline{b}_0$ は真の位置が既知であるものとし、 $\underline{u}_0 = \underline{0}$, $\mathbf{P}_{-1|-1} = \mathbf{0}$ とした。

本論文では、以下で定義される位置推定誤差 (Location Estimation Error: LEE) を導入し、各時刻における推定位置と真の位置の誤差の平均値で評価する。

$$\text{LEE}_{w/\text{filter}} = E\{\|\hat{a}_t - \underline{a}_t\|\} \quad (11)$$

ここで、 $\|\cdot\|$ はベクトルノルムを意味する。また、カルマンフィルタ出力は誤差パラメータであるセンサ測定誤差の標準偏差 σ_{q_t} と GPS 測位誤差の標準偏差 σ_{r_t} に依存することに注意する。カルマンフィルタを用いない場合、GPS によって測位された測位位置 $\underline{b}_t$ が推定位置となるので、 $\hat{a}_t = \underline{b}_t$ であり、LEE は

$$\begin{aligned} \text{LEE}_{w/o \text{ filter}} &= E\{\|\underline{b}_t - \underline{a}_t\|\} = E\{\|\underline{r}_t\|\} \\ &= \frac{\sqrt{2\pi\sigma_{r_t}^2}}{2} \end{aligned} \quad (12)$$

で与えられる。ここで、本システムでの $\underline{r}_t$ の想定より、 $\|\underline{r}_t\|$ が Rayleigh 分布に従う確率変数であることを利用した [11]。このとき、LEE は、当然、GPS 測位誤差の分散 $\sigma_{r_t}^2$ にのみ依存する。

3.1 位置推定精度の誤差パラメータ依存性

ケース 1 からケース 3 の結果において、同様の傾向が観察されたため、ここではケース 2 の「開天頂で周囲に建物が存在する場合」の実験結果について議論する。また、本実験では、1 回の歩行施行は 60[s] と短時間であるため、この間では、 $(\sigma_{q_t}, \sigma_{r_t})$ は時刻 t に依存せず一定であるものとし、それぞれ、 (σ_q, σ_r) として評価を行う。

図 6 に、GPS 測位誤差の標準偏差 σ_r をそれぞれ 0, 1, 5, 10, 30[m] とした場合における、センサ測定誤差の標準偏差 σ_q [m] に対する LEE [m] 特性を示す。また、図中の w/o filter はカルマンフィルタを用いずに、式 (12) で示される GPS 測位誤差のみに依存する LEE であり、当然 σ_q には依存しない。まず、 $(\sigma_q^\forall, \sigma_r = 0)$ とした場合、センサ

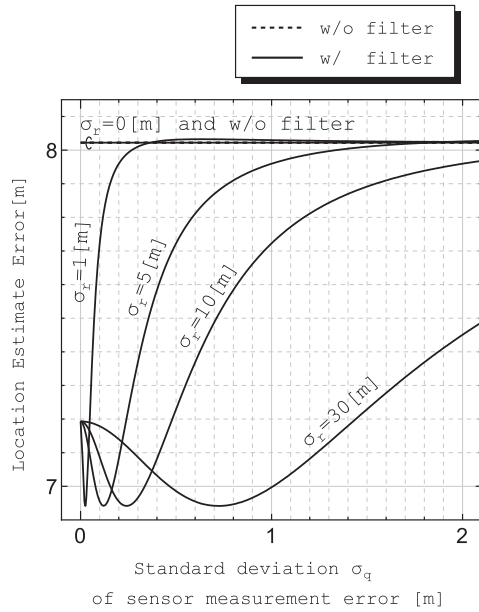


図 6 センサ測定誤差の標準偏差 σ_q に対する LEE

Fig. 6 Location estimation error vs. σ_q varying σ_r .

によって測定した相対的な移動 $\hat{u}_t$ がフィルタリングに利用されず、GPS 測位のみによる位置推定になる。これは、 $R_t = 0$ であるため、カルマンゲイン K_t は単位行列になり、式 (6) において、 $\hat{u}_{t|t} = \hat{u}_t$ となるためである。そのため、LEE は σ_q に依存せず、カルマンフィルタを利用しない w/o filter の特性と一致する。次に、($\sigma_q = 0$, $\sigma_r \neq 0$) とした場合、GPS による測位位置 $\hat{b}_t$ がフィルタリングに利用されず、センサ測定のみによる位置推定を行う。これは、 $Q_t = 0$ であるため、カルマンゲインが $K_t = 0$ になり、式 (6) において、 $\hat{u}_{t|t} = \hat{u}_{t|t-1}$ となるためである。そのため、LEE は σ_r に依存せず、センサ測定のみで位置推定を行う DR と等価になる。最後に、($\sigma_q \neq 0$, $\sigma_r \neq 0$) とした場合、カルマンフィルタは GPS 測位とセンサ測定の両者の情報を利用して位置推定を行う。 $\sigma_r \neq 0$ の場合の特性は、 σ_q を 0 から増加させたとき、LEE は一度最小値をとり、その後増加し続け、そして $\sigma_r = 0$ とした場合の LEE に漸近する。これは、 σ_q が大きくなり、相対的に σ_r が小さくなった結果、GPS による測位が信頼されるためである。これらの結果から、(σ_q , σ_r) を適切に選択できれば、LEE を最小とするカルマンフィルタを構成できる。また、図 6 に示す σ_r において、最小となる LEE は σ_r によらずほぼ一定になることに注意する。

次に、図 7 にセンサ測定誤差の標準偏差 σ_q をそれぞれ 0.0, 0.1, 0.3, 0.5, 1.0, 5.0 [m] とした場合における GPS 測位誤差の標準偏差 σ_r [m] を変化させたときの LEE [m] 特性を示す。図 6 での議論と同様に、($\sigma_q = 0$, $\sigma_r^\forall$) とした場合、カルマンフィルタはセンサ測定のみによる位置推定を行うため、 σ_r に依存せず一定の LEE を示す。そして、 $\sigma_q \neq 0$ の場合の特性も σ_r の増加にともない LEE が一度

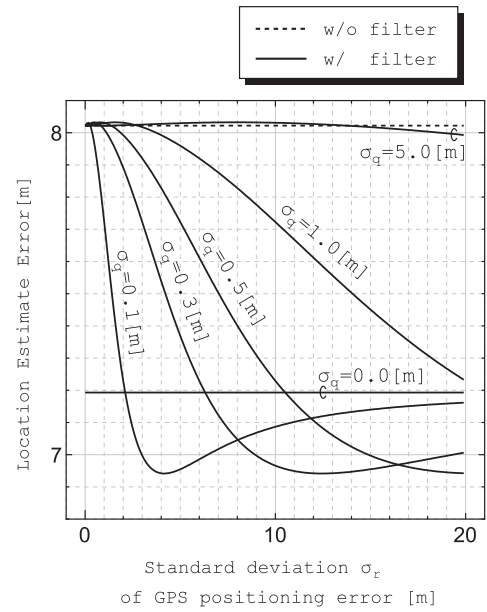


図 7 GPS 測位誤差の標準偏差 σ_r に対する LEE

Fig. 7 Location estimation error vs. σ_r varying σ_q .

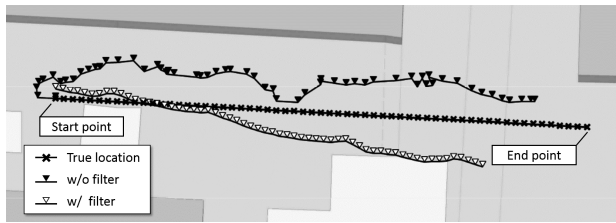
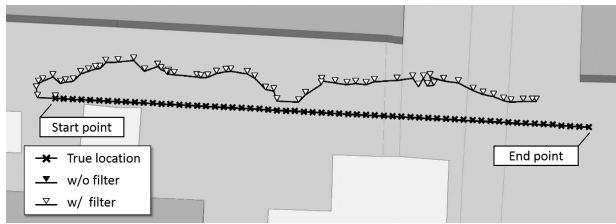
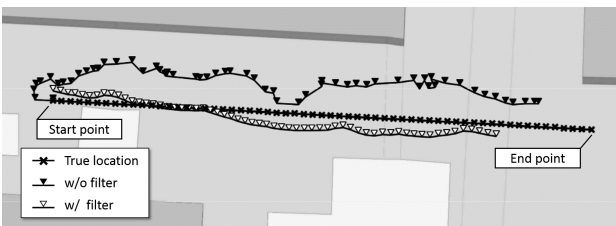
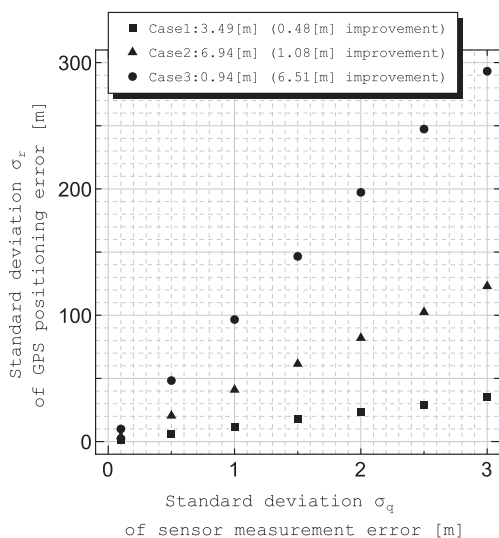
最小値をとり、さらなる σ_r の増加にともない $\sigma_q = 0$ の場合の LEE に漸近する。これは、 σ_r に対して相対的に σ_q が小さくなった結果、センサによって測定した位置推定が信頼されるためである。

3.2 測定空間上での位置推定結果

図 8 と図 9 にケース 2 において $\sigma_q = 0$ とした場合と、 $\sigma_r = 0$ とした場合の実際の測定空間上での位置推定結果の例を示す。図中の凡例は、歩行者の真の位置 (True location) と、GPS 測位のみによる測位位置 (w/o filter)、カルマンフィルタによる推定位置 (w/ filter) を示す。図 8 の $\sigma_q = 0$ の場合、カルマンフィルタはセンサによる相対移動測定のみで位置推定を行う DR であるため、GPS による測位位置に依存しない。ただし、DR ではセンサによる測定に誤差が累積されるため、歩行者の推定位置が時間とともに真の位置から外れていく様子が観測できる。また、図 9 の $\sigma_r = 0$ の場合、カルマンフィルタは GPS 測位のみによる位置推定を行うため、w/ filter と w/o filter の推定位置は同じ位置になる。次に、図 10 に LEE を最小にする (σ_q , σ_r) の組合せとして、($\sigma_q = 0.1$, $\sigma_r = 4.1$) とした場合の位置推定結果の例を示す。図 8, 図 9 での位置推定結果と比べて、相対的に信頼性の高いセンサによる測定情報を利用しつつ、GPS による測位情報を用いた位置推定を行った場合のほうが、歩行者の真の移動経路に近づいている様子が観測できる。

3.3 位置推定誤差を最小とするパラメータ

これまでの議論から、LEE が最小になる (σ_q , σ_r) の適切な組合せの存在が確認された。図 11 に 3 つのケースに

図 8 $\sigma_q = 0$ とした場合の位置推定結果例Fig. 8 An example of location estimation in the case that $\sigma_q = 0$.図 9 $\sigma_r = 0$ とした場合の位置推定結果例Fig. 9 An example of location estimation in the case that $\sigma_r = 0$.図 10 $\sigma_q = 0.1, \sigma_r = 4.1$ のときの位置推定結果例Fig. 10 An example of location estimation in the case that $\sigma_q = 0.1, \sigma_r = 4.1$.図 11 LEE を最小にする (σ_q, σ_r) Fig. 11 (σ_q, σ_r) to minimum location estimation error.

において、LEE を最小とする (σ_q, σ_r) の組合せのプロットと、凡例に、そのときの最小 LEE と GPS 測位のみによる LEE からの改善値を示す。いずれのケースにおいても、カ

ルマンフィルタを導入することにより LEE を改善可能であり、GPS の受信環境が悪いほど改善の程度が大きい。また、図 11 より最適な (σ_q, σ_r) は正比例の関係にあることが分かり、カルマンフィルタに必要な 2 つの誤差パラメータを傾き σ_r/σ_q の 1 つとして扱うことができると考えられる。さらに、この傾きは GPS の受信環境によって変化し、ケース 1 のような GPS の受信環境が良いほど、傾きが小さくなり、ケース 3 のような GPS の受信環境が悪いほど、傾きが大きくなる。

センサによる相対移動推定誤差の偏差は、搭載センサの性能に依存するため、事前測定によって、 σ_{q_t} は t によらず一定の値 σ_q と決定できる。 σ_q が一定の条件の下では、傾き σ_r/σ_q の決定は、 σ_r の決定と等価であるが、GPS 測位では、定点観測においてでさえ、時々刻々とその受信環境は変化し、さらに、移動にともなう建築物などの周辺環境の変化にともなって受信環境は変化する。したがって、カルマンフィルタをつねに適切に動作させるための σ_{r_t} を時刻 t とともに適切に設定する必要がある。 σ_{r_t} は、GPS 測位に基づく絶対位置推定誤差の標準偏差であり、時刻 t での GPS 測位環境に依存すると考えられる。GPS 測位環境と σ_{r_t} の関係の評価するために、GPS 搭載スマートフォンの多くで利用可能な NMEA 形式での GPS 測位環境に関する付加情報を用いる。この付加情報には、GPS 測位時の受信信号対雑音電力比 (Signal to Noise power Ratio: SNR)、観測衛星の幾何的配置情報を意味する DOP (Dilution Of Precision)、可観測衛星数などがある。この DOP を考慮した GPS 補正を行う手法も検討されている [12]。SNR、DOP、可観測衛星数のそれぞれと、測位誤差との関連を評価した結果、本研究で使用した実験端末では、GPS 測位誤差と SNR の相関が顕著であったため、本論文では、SNR を測位誤差の評価指標として採用し、SNR から σ_{r_t} を算出する手法について次章で説明する。これにより、 σ_{q_t} が t によらず一定の条件の下で、自動的に σ_{r_t} を決定することで、カルマンフィルタを適切に動作させることが可能となる。

4. σ_{r_t} の決定手法

提案システムでは、 σ_{r_t} を決定するために、GPS 測位の受信環境を推定するための指針として、GPS 測位時に観測される GPS 信号の SNR に着目する。ここでは、GPS 測位時に観測される GPS 衛星の中から、実際に測位に用いられた衛星群からの受信信号の平均 SNR を用いる。GPS 測位精度と平均 SNR の関係を明らかにするために、1 地点につき 1 [s] ごとの 60 [s] 間の GPS 定点測位を周辺環境の異なる 7 地点で行った。図 12 は、全 420 点における各地点、各時刻での平均 SNR に対する測位誤差 [m] を示す。ただし、各地点の真値 a_t は電子地図データ (Google Maps) に基づく緯度経度とした。本実験における観測標本における SNR の平均は 24.82 [dB]、分散は 43.23 [dB] であり、バ

ラツキの大きい観測値が得られた。図 12 より、平均値付近の SNR での観測が多く、低い SNR の観測は相対的に少数であった。SNR が平均値付近の 20 から 30 [dB] では SNR と測位誤差の相関は小さいが、20 dB 以下の SNR が小さい場合、SNR が小さくなるにつれて測位誤差が大きくなる傾向がある。この相関性から GPS 測位環境を推定するための指針として平均 SNR を利用することができると考えられる。図 12 の傾向から、観測 SNR の変域に合わせて非線形な関数で SNR と測位誤差を関係付けることも可能であると考えられるが、ここでは、簡単のために、平均 SNR を $\bar{\gamma}$ [dB] とするとき、時刻 t での GPS 測位による推定位置は $\hat{b}_t$ であるので、GPS 測位精度を

$$E\{\|\hat{a}_t - \hat{b}_t\|\} = -1.54\bar{\gamma} + 47.3 \quad (13)$$

として線形関数で対応づけることにする。一方で、GPS 測位誤差と σ_{r_t} には

$$E\{\|\hat{a}_t - \hat{b}_t\|^2\} = E\{\|x_t\|^2\} = 2\sigma_{r_t}^2 \quad (14)$$

なる関係がある。したがって、時刻 t での平均 SNR を $\bar{\gamma}_t$ とするとき、

$$\sigma_{r_t} = \frac{-1.54\bar{\gamma}_t + 47.3}{\sqrt{2}} \quad (15)$$

なる関係を導くことができる。 $\bar{\gamma}_t$ は GPS 測位ごとに得ることができるので、ただちに、時刻 t での σ_{r_t} を決定できる。また、GPS 衛星が観測できない場合、 $\bar{\gamma}_t = -\infty$ と等価であるので、 $\sigma_{r_t} = +\infty$ となる。このとき、式 (8) において $K_t = \mathbf{0}$ となるので、式 (6) において、式 (7) より $\hat{a}_{t|t} = \hat{a}_{t|t-1} = \hat{a}_{t-1|t-1} + \hat{u}_t$ となる。これは、GPS 測位位置 $\hat{b}_t$ が、位置推定に利用されず、相対移動の推定値 $\hat{u}_t$ のみで位置推定を更新することを意味する。このように提案方式では、GPS 衛星が観測できなくなった場合であっても、センサ群による相対移動推定のみでの位置推定に切り替わる機構が内在しており、シームレスに推定を継続する

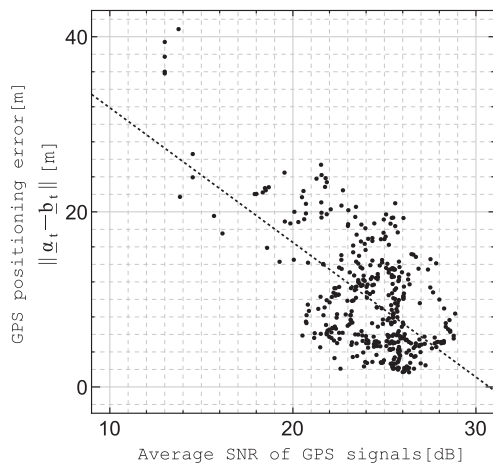


図 12 定点観測での GPS 測位誤差と平均 SNR

Fig. 12 GPS positioning error vs. average SNR in fixed-point observation.

ことが可能である。

5. 評価実験

提案システムの評価実験を宇都宮大学の工学部構内で行い、歩行ルートは図 13 に示すルートとした。凡例の開天頂 (Line-of-sight) は頭上から空が見通し内、閉天頂 (Non Line-of-sight) は頭上から空が見通し外、屋内 (Indoor) は建物内を意味し、GPS の受信環境が良い順に開天頂、閉天頂、屋内と考えられる。また、図中の丸付き数字は、曲がり角の経過を順に示している。この実験では、任意の時刻における歩行者の真の位置を決定するために、図中の丸付き数字の各地点で時刻を計測した。区間ごとに要した時間 [s] とその区間の直線距離 [m] から区間ごとの速度 [m/s] を求め、任意の時刻における真の位置を決定した。実験端末には Android を搭載した端末を利用し、歩行者は端末を地面に対して平行、画面上部が進行方向となるようにして等速に歩行した。現実の歩行環境での端末の保持状態は様々であり、このような自由度の高い端末保持状態での DR 技術は文献 [5] などで広く研究されているが、本論文では相対移動推定と絶対移動推定の組合せに関する部分に注力し、相対移動推定に関しては、歩行時にその端末姿勢が安定するような理想的な状況で実験を行った。このとき、GPS による測位を 1 [s]、相対移動の距離と方位をセンサ群により 0.02 [s] 間隔で取得した。また、相対移動 $\hat{u}_t$ の推定は 2.1.1 項の手法を用いた。初期条件として、カルマンフィルタの初期値として、 $\hat{a}_{-1|-1}$ と $\hat{b}_0$ は真の開始位置、 $\hat{u}_0 = \mathbf{0}$ 、 $\mathbf{P}_{-1|-1} = \mathbf{0}$ とした。また、カルマンフィルタの誤差パラメータ (σ_{q_t} , σ_{r_t}) は、センサによる相対移動推定誤差を t によらず $\sigma_{q_t} = 1$ とし、GPS 測位による絶対位置推定誤差は式 (15) によって時刻 t ごとに $\bar{\gamma}_t$ より算出した。 σ_{q_t} はセンサによる相対移動推定誤差であるので、端末の搭載センサの品質に依存し、時刻によらないものと想定した。また、図 6 の結果から、カルマンフィルタのパラメータである (σ_{q_t} , σ_{r_t}) は最適に設定可能であるが、GPS 測位によ

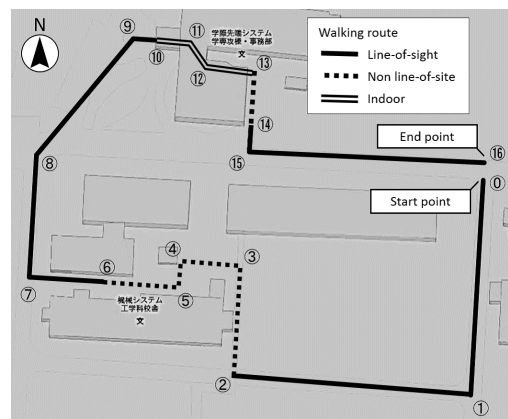


図 13 歩行ルート (宇都宮大学工学部構内)

Fig. 13 Walking route.

る絶対位置測位誤差パラメータで σ_r が 30 [m] とした場合、最適な σ_q は 0.7 [m] 程度であるので、センサによる相対移動推定誤差を 1 [m] と多めに見積もることとした。

図 14 に各時刻における真の位置 (True location), センサによる相対移動推定のみによる位置推定 (Dead-reckoning, $\sigma_{rt} = 0$), GPS 測位による絶対位置推定のみによる位置推定 (GPS, $\sigma_{qt} = 0$), そして、提案システムによる位置推定 (Proposed method) の位置推定結果例を示す。また、図 14 の各位置推定結果における時刻ごとの誤差を左縦軸にとったグラフを図 15 に示す。図 15 において、GPS 測位時の GPS 受信平均 SNR を右縦軸にとり、それらの時間特性をあわせて示す。図上部の丸付き数字は図 13 の丸付き数字の経過時間に対応している。図 14 と図 15 の結果より、GPS 測位のみによる位置推定において、①-②と⑧-⑩の開天頂の区間では真の位置に沿った結果が出力されている。

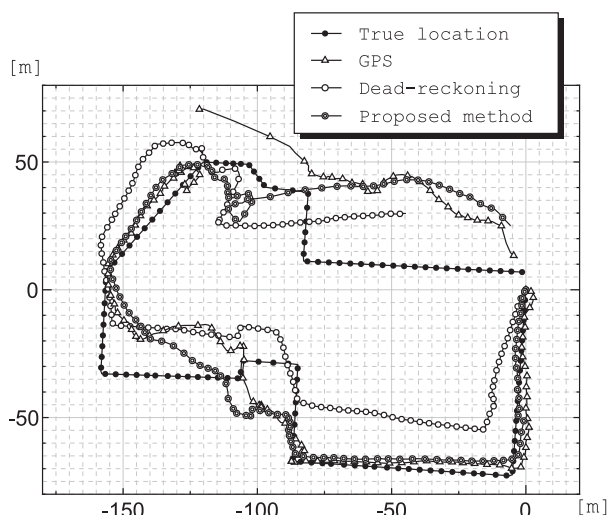


図 14 位置推定結果例

Fig. 14 An example of location estimate of GPS, dead-reckoning, and proposed method.

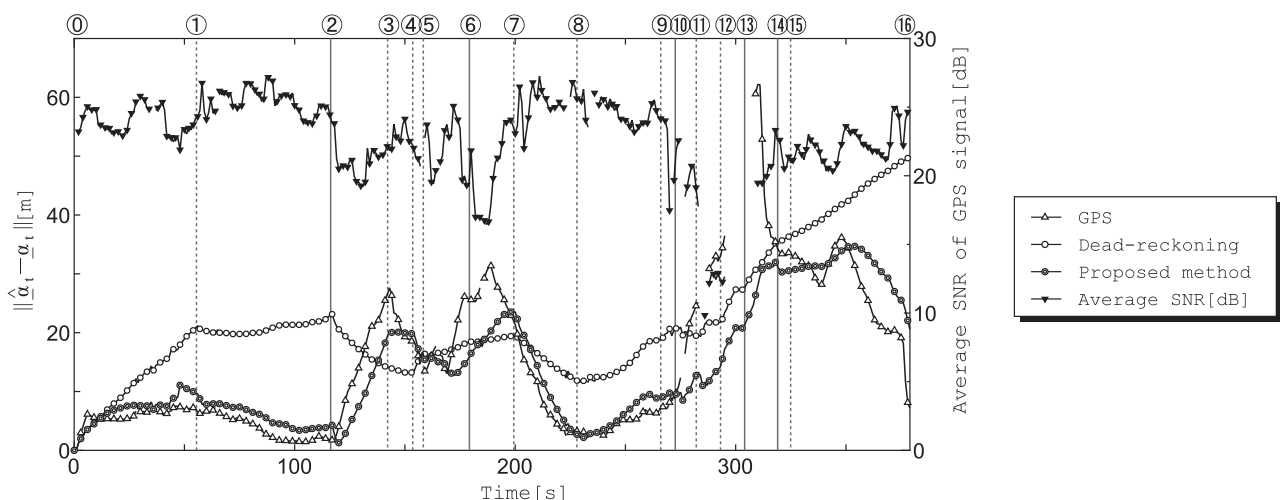


図 15 時系列誤差例

Fig. 15 An example of error of GPS, dead-reckoning, and proposed method.

るが、⑭-⑯の区間では開天頂にもかかわらず真の位置から大きく外れていることが分かる。これは、南側に存在する GPS 衛星が建物の影響により見通し外になり、携帯端末が正確な GPS 信号を受信できなくなったためと考えられる。同様に、閉天頂の区間ではその影響がより大きくなり、特に③-⑥区間においては真の位置から大きくずれた位置が測位されている様子が確認できる。さらに、屋内の⑩-⑬区間においては、GPS 信号を携帯端末で受信することができず、GPS による測位自体が不可能になる時間帯が存在した。

次に、DR による推定位置は、GPS 測位とは違って周辺の建物の影響によらず歩行ルートに沿った軌跡をたどっている。しかし、図 14 と図 15 から分かるように、センサ測定による誤差が累積し続けるため、時間の経過とともに推定位置と真の位置の差が大きくなる。特に、進行方向が切り替わるタイミングで推定誤差の累積の程度が変化しており、方位センサによる方位推定の精度が不十分であることが考えられる。一方で、GPS では測位が不可能であった屋内の通過時間帯でも周囲の環境に依存することなく位置を推定し続けている様子が確認できる。

最後に、提案システムによる位置推定では、開天頂の区間では GPS 受信信号の平均 SNR が高くなるため、センサ測定による相対移動推定より、GPS 測位による絶対位置推定を信頼した位置推定を行う。そのため、GPS 測位のみによる推定位置のように、①-②と⑧-⑩の開天頂の区間では GPS 測位と同様に真の位置に近い位置を推定が可能である。しかしながら、⑭-⑯の区間では図 15 より、GPS 受信平均 SNR も高いので GPS 測位誤差の大きい絶対位置推定が強く反映されてしまうため、推定誤差が大きくなっている。一方、閉天頂や屋内の区間では平均 SNR が低くなるため、GPS 測位による絶対位置推定より、センサ測定による相対移動推定を信頼した位置推定を行うことが可

能である。特に、閉天頂の③-⑥の区間においてはGPS受信平均SNRが相対的に低下しているので、GPS測位による絶対位置推定より提案手法は10[m]程度推定位置の改善が可能である。さらに、GPSによる測位が不可能な屋内区間においても、センサ測定により位置を追跡し続けている様子が観測できる。図14と図15に示した試行において、式(11)で定義したLEEは、それぞれ、GPS測位の場合15.83[m]、DRの場合21.49[m]、提案手法の場合14.24[m]であった。本実験環境の多くの時間区間が屋外であったため、GPS測位のみでの位置推定精度と比較して、提案手法では平均的には1.5[m]程度の改善であったが、GPS測位環境が悪化する閉天頂のような場合や、GPS衛星が観測できない屋内でもシームレスに動作し続けることが可能である。3章での議論より、適切にパラメータ設定を施した提案手法は、GPSによる絶対位置の測位からセンサ群による相対移動の推定のいずれか単独での位置推定と比べて、平均LEEの改善を保証するが、その改善の程度は、GPS測位環境や被験者の個体差に依存するセンサ群による相対移動推定精度に依存することに注意する。

6. むすび

本論文では、携帯端末上において、GPS測位による絶対位置推定とセンサ測定による相対移動推定をカルマンフィルタにより組み合わせた位置推定システムを提案した。また、携帯端末に搭載されているセンサの測定情報を利用し、GPS測位で得られた位置情報を補正することで位置推定の精度が向上することを示した。さらに、フィールド実験から、カルマンフィルタの2つの誤差パラメータ(σ_{q_t} , σ_{r_t})には、搭載センサの測定誤差やGPSの測位誤差に依存した正比例の関係が確認され、傾き σ_r/σ_q の1つのパラメータとして扱えることを示した。その傾きを決定する方法として、GPS測位時の利用GPS衛星からの受信信号の平均SNRに着目し、GPS測位の受信環境に応じた位置推定システムを開発した。フィールド実験より、受信した平均SNRから σ_{r_t} を自動的に決定することで、位置推定精度が向上することを示した。

今後は相対移動推定における進行方向の測定誤差を低減させることで、センサによる測定情報が信頼された場合の位置推定精度の向上を目指す。また、より高精度にGPS測位精度と σ_{r_t} を関係付けられる新たな手法を検討する必要がある。そのために、Android端末で取得することが可能なGPS信号のSNRだけでなく、観測衛星数、DOP、衛星ごとの仰角・方位を組み合わせたGPSの受信環境の推定方法について検討を進める予定である。また、本論文では安定した端末の保持状態で相対移動推定を行ったが、実際の利用シーンを想定して、自由度の高い端末の保持状態での相対移動推定についても検討を行う予定である。また、様々なGPS測位環境や被験者による歩行実験を行い、提

案手法による位置推定精度改善の程度を定量的に評価する予定である。

謝辞 本研究の一部は株式会社KDDI研究所の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] 安田明生：GPS技術の展望，電子情報通信学会論文誌，Vol.J84-B，No.12，pp.2082-2091 (2001)。
- [2] 小島祥子，鈴木徳祥，寺本英二，村瀬 洋：過去のGPS衛星情報を利用した高精度位置推定—郊外路と都心部における検証，電子情報通信学会技術報告，Vol.111，No.219，pp.37-42 (2011)。
- [3] 片山 徹：応用カルマンフィルタ，朝倉書店 (2007)。
- [4] 小河原亮，羽多野裕之，藤井雅弘，渡辺 裕：GPS測位とセンサによる移動推定を組み合わせた位置推定システムに関する一検討，電子情報通信学会技術報告，Vol.113，No.336，pp.1-6 (2013)。
- [5] 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，No.2，pp.558-570 (2011)。
- [6] 村松茂樹，渡邊孝文，上坂大輔，小林亜令，岩本健嗣，横山浩之：ポケットに入れたセンサを用いた歩行者向けデッドレコニングに関する一検討，情報処理学会全国大会講演論文集，Vol.73-1，pp.5-7 (2011)。
- [7] 翁長謙良：身長と歩幅の相関に関する一考察：学生の歩測の事例から，琉球大学農学部学術報告，Vol.45，pp.149-155 (1998)。
- [8] 佐川貢一，煤孫光俊，大瀧保明，猪岡 光：足爪先加速度積分による歩行経路の3次元無拘束計測，計測自動制御学会論文集，Vol.40，No.6，pp.635-641 (2004)。
- [9] 興昭正克，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，電子情報通信学会技術報告，Vol.103，No.737，pp.25-30 (2004)。
- [10] 鵜沼宗利，倉田謙一郎，外山敦也，堀江 武：人の歩行動作認識技術を応用した自律的位置検出手法，電子情報通信学会論文誌，vol.J87-A，No.1，pp.78-86 (2004)。
- [11] Proakis, J.G. and Salehi, M.: *Digital Communications*, 5th ed., McGrawHill (2008)。
- [12] 興昭正克，蔵田武志：組み込み型GPS・自蔵式センサシステムによる屋内歩行者ナビ，電子情報通信学会技術報告，Vol.106，No.73，pp.75-80 (2006)。



小河原 亮

1988年生。2012年宇都宮大学工学部情報工学科卒業。2014年同大学大学院博士前期課程修了。同年KDDI株式会社入社，現在に至る。歩行者位置推定システムの研究に従事。2013年電子情報通信学会ワイドバンドシス

テム研究会学生奨励賞受賞。



羽多野 裕之 (正会員)

1980 年生。2003 年名古屋大学工学部電気電子・情報工学科卒業。2005 年同大学大学院博士課程前期課程修了。2008 年同大学院博士課程後期課程修了。博士(工学)。2008 年静岡大学大学院工学研究科助教。2013 年宇都

宮大学大学院工学研究科助教。現在に至る。無線通信・レーダ、GPS 測位等無線技術の応用に従事。電子情報通信学会 ITS 研究専門委員会幹事、通信ソサイエティマガジン編集委員。2004 年電子情報通信学会東海支部学生研究奨励賞。2007 年 IEEE VTS JAPAN Chapter VTC 2007-Spring Student Paper Award。2011 年 IARIA International conference of networks Best Paper Award。2012 年 International Conference on Intelligent Transportation Systems Telecommunication Best Paper Award。2014 年情報処理学会高度交通システム研究会優秀論文賞。電子情報通信学会、IEEE、自動車技術会各会員。



藤井 雅弘 (正会員)

1975 年生。1998 年東京理科大学基礎工学部電子応用工学科卒業。2000 年同大学大学院修士課程修了。2003 年同大学院博士後期課程修了。博士(工学)。2003 年同大基礎工学部助手。2006 年宇都宮大学工学部助手。2010 年宇都

宮大学大学院工学研究科准教授。現在に至る。無線通信システム、ITS 等の研究に従事。電子情報通信学会 WBS 研究専門委員会幹事、基礎・境界ソサイエティ英文論文編集委員。2002 年 IEEE VTS Japan Researcher's Encouragement Award。2005 年情報理論とその応用学会研究奨励賞。2009 年電子情報通信学会基礎・境界ソサイエティ編集活動感謝状。2012 年同学会基礎・境界ソサイエティ貢献賞。2014 年同学会基礎・境界ソサイエティ貢献賞。2014 年同学会通信ソサイエティ活動功労賞。電子情報通信学会シニア会員。IEEE 会員。



伊藤 篤 (正会員)

1959 年生。1981 年名古屋大学工学部電子工学科卒業。1983 年同大学大学院情報工学専攻修了。同年国際電信電話株式会社(現、KDDI)入社。1985 年～研究所にて仕様記述言語、IN、インターネット、アドホックネットワー

ク、Android 応用等の研究に従事。1991～1992 年スタンフォード大学 CSLI 客員研究員。2014 年宇都宮大学大学院工学研究科教授。現在に至る。博士(情報工学)(広島市立大学)。電子情報通信学会、ACM 各会員。



渡辺 裕

1950 年生。1973 年早稲田大学理工学部応用物理学学科卒業。1979 年同大学大学院理工学研究科物理および応答物理学専攻博士課程修了。工学博士。同年国際電信電話株式会社(現、KDDI)入社。1979 年～研究所にて情報通信

トラヒック、国際通信網の設計運用技術の研究に従事。1999 年 KDD 米国研究所所長・最高経営責任者。2001 年 KDDI 株式会社開発統括部長。2005 年宇都宮大学工学部教授。現在に至る。1986 年(社)電子通信学会論文賞受賞。1986 年(財)電気通信普及財団テレコム自然科学賞受賞。1998 年科学技術庁長官賞研究功績者表彰。2008 年情報化促進貢献個人表彰総務情報通信国際戦略局長表彰。電子情報通信学会会員。