

走行軌跡推定機能付きスマートフォンプローブアプリの開発

小宮 粹史^{*1} 花房比佐友^{*1} 堀口良太^{*1}
所属^{*1} (株) アイ・トランスポート・ラボ

本研究ではアンセンティッドカルマンフィルタで走行軌跡をオンライン推定するスマートフォンアプリを開発した。スマートフォンには、位置情報測位機能や加速度計、姿勢情報の測位機能が搭載されている。GPS 測位ができない場合、携帯電話基地局情報から現在位置を測位するが、GPS に比べて地下道などでは特に測位精度は低下するため測位情報のみの記録ではプローブ機器に適さない。しかし、本研究で開発したプローブアプリでは、加速度情報と端末姿勢情報を統合することで、安定的に低精度な測位状態でも車両の走行位置を推定可能とした。

Development of a tool to estimate the trajectory of a probe car with smartphone

Tadashi Komiya^{*1} Hisatomo Hanabusa^{*1} Ryota Horiguchi^{*1}
i-Transportl Lab. Co.,Ltd.^{*1}

Abstract (100 words)

Keyword: SmartPhoe ,Application for ProbeCar ,Uncented Kalman Filter

1 目的と背景

旅行時間や走行速度の調査などのプローブ走行調査では、GPS ロガーを使用したデータ収集が行われている。一般的な GPS ロガーでは速度が GPS 位置から計算される速度であり、高架下やビル街での測位精度低下がしばしば問題となる。このような測位精度の低下に対して、GPS 以外のセンサー計測値を統合（センサーフュージョン）することで確度の高い測位結果を得ることができる。筆者らは、実験車両 MAESTRO に RTK-GPS、3 軸ジャイロ加速度計、非接触対地速度計等を搭載し、観測モデルと運動モデルに拡張カルマン smoother (EKS) を適用した車

両挙動推定システム 1)を開発してきた。これらセンサーと同種の計測は、計測精度こそ劣るもののスマートフォンで計測可能である。そこで本研究では上記推定モデルをスマートフォンに実装すると共に、より信頼性の高い Unscented Kalman Filter, Smoother (UKF, UKS) を EKS に変えて適用することで、従来の GPS ロガーを用いたプローブ機器にできなかった高精度な走行軌跡や車両挙動を推定可能なスマートフォンプローブアプリを開発する。

2 時刻管理

車両の走行挙動の分析では、時刻や車両位置をキーに、自車と周辺車の速度や加速度などの状態量の

比較が行われる。これらから、発進波や減速波の伝播や、追従時の反応遅れなどの指標を得るためには、同期記録されないと移動速度に比例する測位誤差が発生するため、個々のスマートフォン間の時刻同期が極めて重要である。スマートフォンでは下記の時刻情報を取得可能である。

API あり：電話機本体のシステム時刻，GPS 時刻

API なし：NTP サーバ時刻，携帯基地局

電話機本体のシステム時刻は，SIM カードを挿入し携帯電話基地局と通信可能な状態であれば，少なくとも本体起動時に基地局時計と本体時計が同期補正される。しかし，機種やキャリアにより本体システム時刻の補正が働く瞬間はまちまちであり，後の分析にあたり時刻情報の確度が担保されない。

複数の車両の走行挙動を計測する場合，全てのスマートフォンを同一機種，同一キャリアで統一することで基地局時計との同期タイミングによる時刻バイアスを低減できるが，現実的には調査員所有のスマートフォンにアプリのみインストールし走行挙動を測位する調査手法のほうが低コストで行えるため，機種，キャリアを揃えることは，調査規模に比例して困難になる。

複数の車両間でスマートフォンの時刻を信頼に足る確度を得るためには，GPS 時刻情報や NTP サーバの時刻情報を同時に記録することが重要となる。本研究で開発したアプリでは，本体システム時刻と合わせて，データ記録時の GPS 時刻を合わせて記録し，本体システム時刻を事後補正可能とした。

3 スマートフォン搭載センサー

本研究で開発したアプリでは，下記のセンサー計測値を入力値としている。センサーの種類と記録可能周期をまとめる。

- ・GPS (X, Y, Z, Time) : <1Hz
- ・加速度 (x, y, z) : <50Hz
- ・姿勢角 (θ, ϕ, ω) : <10Hz

姿勢角については直接計測されるわけではなく，地磁気と方位角から計算される値である。

4 システム構成 Unscented Kalman Filter(UKF)²⁾

非線形モデルの状態推定手法として拡張カルマン

フィルタが知られている。しかし，非線形性が強いモデルでは，状態量の時間更新をモデルの偏微分値に基づいて行うため，誤差の蓄積による推定精度の低下が問題となる。一方，UKF では状態量の周辺にシグマポイントと呼ばれる仮の点を配置し，時間更新において，それらの点を更新し重心を取ることで，真値により近い推定値を安定的に得ることができる。

さらに，スムージングアルゴリズムを適用することで，さらに高精度に推定を行うことも可能である。本アプリではリアルタイム処理には UKF アルゴリズムを，事後処理が可能であれば UKS アルゴリズムを用いて，車両の走行挙動を記録する。

4-2 6 自由度運動状態量の UKF モデル

図 1 に，スマートフォンの GPS アンテナ位置を原点とする車両局地座標系の概念図を示す。並進運動は進行方向を x 軸，左横方向を y 軸，上方向を z 軸とした運動であり，回転運動は車両の局地座標系に対して z 軸回りの回転をヨー角 ϕ ，y 軸回りの回転をピッチ角 θ ，x 軸回りの回転をロール角 ψ とする運動である。また，XYZ は WGS84 測地系に基づく平面直角座標系を示す。

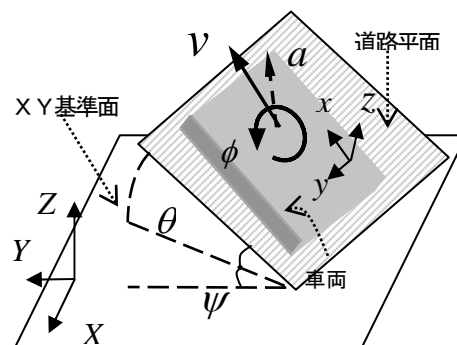


図 1 車両局地座標系

$$\bar{x}(t + \Delta t) = \mathbf{F}(t)\bar{x}(t) + \bar{w}(t) \quad (1)$$

$$\bar{y}^m(t) = \bar{h}(\bar{x}(t)) + \bar{e}(t) \quad (2)$$

$$\begin{aligned}\bar{x}(t) &= [\bar{x}_p(t) \quad \bar{x}_r(t) \quad \bar{B}_\omega(t) \quad \bar{B}_I(t) \quad \bar{B}_v(t)]^T, \\ \bar{x}_p(t) &= [\bar{p}(t) \quad \dot{\bar{p}}(t) \quad \ddot{\bar{p}}(t) \quad \ddot{\bar{p}}(t) \quad \bar{B}_p(t)]^T, \\ \bar{p}(t) &= [X(t) \quad Y(t) \quad Z(t)]^T: 3次元位置座標, \\ \dot{\bar{p}}(t) &= [\dot{X}(t) \quad \dot{Y}(t) \quad \dot{Z}(t)]^T: 3次元速度, \\ \ddot{\bar{p}}(t) &= [\ddot{X}(t) \quad \ddot{Y}(t) \quad \ddot{Z}(t)]^T: 3次元加速度, \\ \ddot{\bar{p}}(t) &= [\ddot{\ddot{X}}(t) \quad \ddot{\ddot{Y}}(t) \quad \ddot{\ddot{Z}}(t)]^T: 3次元jerk, \\ \bar{x}_r(t) &= [\bar{r}(t) \quad \dot{\bar{r}}(t) \quad \ddot{\bar{r}}(t)]^T, \\ \bar{r}(t) &= [\psi(t) \quad \theta(t) \quad \phi(t)]^T: 3次元姿勢角,\end{aligned}$$

t : 時刻, Δt : 計測周期 (1/29.97秒),

$$\mathbf{F}(t) = \text{diag}(\mathbf{F}_p, \mathbf{F}_r, \mathbf{E}, \mathbf{E}, 1),$$

$$\mathbf{F}_p = \begin{bmatrix} \mathbf{E} & \mathbf{D} & \mathbf{C} & \mathbf{O} & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \mathbf{E} & \mathbf{D} & \mathbf{C} & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \mathbf{O} & \mathbf{E} & \mathbf{D} & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \mathbf{O} & \mathbf{O} & \mathbf{E} & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \mathbf{O} & \mathbf{O} & \mathbf{O} & \mathbf{E} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{F}_r = \begin{bmatrix} \mathbf{E} & \mathbf{D} & \mathbf{C} \\ \mathbf{O} & \mathbf{E} & \mathbf{D} \\ \mathbf{O} & \mathbf{O} & \mathbf{E} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{E} = \text{diag}(1, 1, 1), \quad \mathbf{O} = \text{diag}(0, 0, 0),$$

$$\mathbf{C} = \text{diag}\left(\frac{\Delta t^2}{2}, \frac{\Delta t^2}{2}, \frac{\Delta t^2}{2}\right), \quad \mathbf{D} = \text{diag}(\Delta t, \Delta t, \Delta t),$$

$$\dot{\bar{r}}(t) = [\dot{\psi}(t) \quad \dot{\theta}(t) \quad \dot{\phi}(t)]^T: 3次元角速度,$$

$$\ddot{\bar{r}}(t) = [\ddot{\psi}(t) \quad \ddot{\theta}(t) \quad \ddot{\phi}(t)]^T: 3次元角加速度,$$

$$\bar{B}_p(t): \text{重力による加速度の偏り}$$

(車両局地座標系における3次元ベクトル),

$$\bar{B}_I: \text{加速度計の取り付け不整による加速度の偏り}$$

(車両局地座標系における3次元ベクトル),

$$\bar{B}_\omega: \text{加速度計の取り付け不整による角速度の偏り}$$

(車両局地座標系における3次元ベクトル),

$$\bar{B}_v: \text{速度計測値の偏り}$$

(車両局地座標系におけるx軸方向1次元ベクトル),

$$\bar{w}(t): \text{不規則変動成分ベクトル}$$

$$\bar{y}^m(t) = [\bar{p}^m(t) \quad v^m(t) \quad \bar{a}^m(t) \quad \bar{\omega}^m(t)]^T,$$

$$\bar{h}(t) = \begin{bmatrix} \bar{p}(t) \\ \dot{X}(t) \cos \phi(t) \cos \theta(t) + \dot{Y}(t) \sin \phi(t) \cos \theta(t) - \dot{Z}(t) \sin \theta(t) \\ \mathbf{R}_I \mathbf{R}(\psi(t), \theta(t), \phi(t)) (\ddot{\bar{p}}(t) + \bar{g}_z) + \mathbf{R}_I \bar{B}_p(t) \\ \mathbf{R}_I(t) \dot{\bar{r}}(t) \end{bmatrix}$$

$$\bar{p}^m(t) = [X(t) \quad Y(t) \quad Z(t)]^T$$

: 3次元測位座標値 (平面直角座標),

$$v^m(t): \text{走行速度の計測値},$$

$$\bar{a}^m(t) = [a_x(t) \quad a_y(t) \quad a_z(t)]^T$$

: 3次元加速度の計測値,

$$\bar{\omega}^m(t) = [\dot{\psi}(t) \quad \dot{\theta}(t) \quad \dot{\phi}(t)]^T$$

: 3次元角速度の計測値

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \psi & \sin \psi \\ 0 & -\sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi & 0 \\ -\sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{R}_I = \mathbf{R}(\psi_I, \theta_I, \phi_I)$$

: 加速度計の取り付け不整による車両座標系における角速度計測値の偏り,

$$\bar{g}_z = [0 \quad 0 \quad -g]^T, \quad \bar{\varepsilon}(t): \text{計測誤差ベクトル}$$

式(1)と式(2)とは、本研究の UKF に適用する状態方程式と観測方程式である。状態方程式(1)は、世界座標系におけるスマートフォンの並進運動と回転運動、計測値の偏りの差分方程式とから構成される。計測値の偏りを状態量として明示的に組み入れることにより、道路の勾配などによる車の姿勢の影響や、センサーの取り付け不整を補正することができる。観測方程式(2)は、状態方程式に含まれる状態量と計測値との関係を記述している。不規則変動成分ベクトル

$\bar{w}(t)$ の分散共分散行列に関しては、3次元 jerk,

3次元角加速度、加速度と角加速度の偏りに対応する対角要素の値のみを時間変動の大きさを目安として設定し、他の要素値は0とした、計測誤差ベクトル

$\bar{\varepsilon}(t)$ の分散共分散行列に関しても、対応する各計測値の誤差に比例させて対角要素の値のみを設定し、他の要素値は0とした。

5 スマートフォンによる計測データ

試作したセンサーデータ記録アプリを MASESTRO に搭載し、走行実験を行った。図 2 に進行方向加速度、図 3 に横方向加速度、図 4 に重力加速度の計測値を MASESTRO の計測値と共に、図 5 にスマートフォン GPS による走行軌跡を示す。この走行は、スマートフォンの計測軸と車両進行方向に合わせてほぼ固定して設置し走行した例である。スマートフォンでは、瞬間的に計測値が0となるが、MAESTRO と同様の傾向で加速度が計測されている。さらに、進行方向加速度には-1G 程度のバイアスが含まれているが、これはフィルタのバイアス初期値を適切に設定することで除去可能である。

6 まとめと今後の課題

本研究では、走行軌跡や車両挙動を推定可能なプローブアプリの開発を目指し、推定モデルの構築と、センサーデータ記録アプリの開発を行った。今後は、アプリへの UKS の実装と、推定パラメータの同定を行い、大規模走行調査でのデータ記録への本アプリの適用を目指す。さらに大量の計測データを効率良く収集するためのサーバ構築を行う。

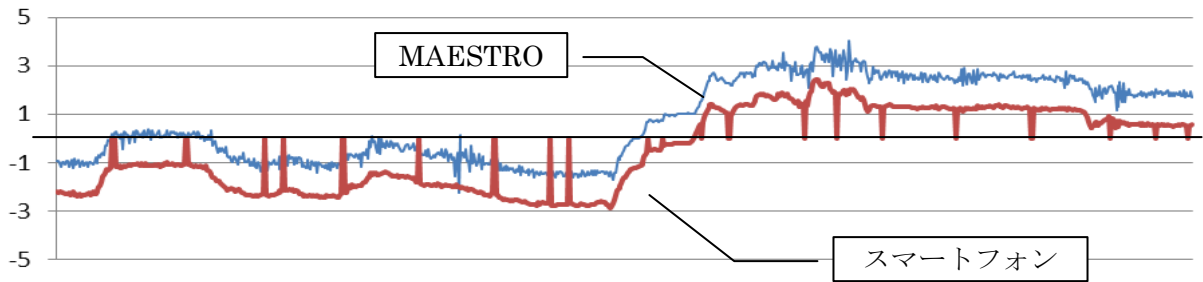


図 2 進行方向加速度[G]

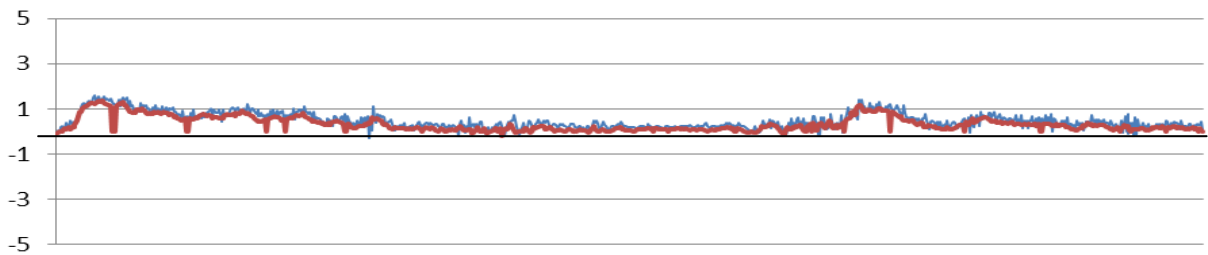


図 3 横方向加速度[G]

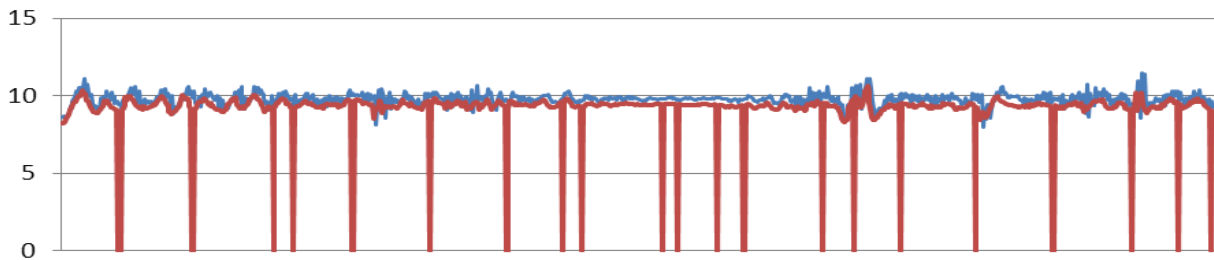


図 4 重力加速度[G]



図 5 走行位置

【参考文献】

- 1) 小宮稔史, 大口敬, 赤羽弘和, 堀口良太, 桑原雅夫: 車両間および車両と道路構造との相互作用の連続観測用実験車の開発, 交通工学, Vol.44, No.1, pp. 71-80, 2009年1月.
- 2) S. J. Julier and J. K. Uhlmann, "A New Extension of the Kalman Filter to Nonlinear Systems," in Proc. of AeroSense: The 11th Int. Symp. on Aerospace/Defence Sensing, Simulation and Controls., 1997.