

傾斜したスマートフォンによる自動車の3軸加速度算出手法

木山 昇^{†1} 高橋 利光^{†1} 祖父江 恒夫^{†1} 相川 哲盛^{†2}

近年, 自動車の CAN 情報を利用せず, スマートフォンに搭載されるセンサのみを活用するテレマティクスサービスの普及が進んでいる. しかし, 例えば安全運転診断などの加速度情報を活用するサービスでは, スマートフォンの加速度センサの軸を車両の向きと一致させる必要がある. そのため, 他のアプリケーションを並行して利用する場合には, 画面の視認性が低いという問題点があった. そこで本稿では, 任意の角度に傾斜して固定されたスマートフォンを利用して, 自動車の3軸加速度を算出する手法を提案する. 提案手法では, まず加速度及び方位角の変化量から, 自動車の静止状態及び直進状態を検出する. そして, 両状態を検出した時の加速度データを用いて, スマートフォン基準の座標軸を自動車基準の座標軸に変換する回転行列を算出する. これにより, 両状態検出以降は, スマートフォンの加速度センサ値から自動車の3軸加速度を算出することができる. 評価実験の結果, 提案手法による自動車の進行方向加速度の算出値は, 従来手法と比較して 96%の確率で $\pm 0.05G$ 以下の誤差分布であり, 急加減速($\pm 0.5G$)を検出する運転特性診断機能などに活用可能な精度で加速度を算出できることが確認できた.

A Method of Calculating Vehicles' Three-axis Accelerations using Inclined Smartphones

NOBORU KIYAMA^{†1} TOSHIMITSU TAKAHASHI^{†1}
TSUNEO SOBUE^{†1} TETSUMORI AIKAWA^{†2}

1. はじめに

近年, スマートフォンによる自動車向けサービス (テレマティクスサービス) の普及が進んでいる[1]. クラウドと接続する自動車 (コネクティッドカー) の普及にあたり, スマートフォンは自動車とテレマティクスセンタとを接続する通信機能を担うことも期待されており[2], 今後もテレマティクスサービスにおけるスマートフォンの重要性は増していくものと考えられる. スマートフォン上のアプリケーションが自動車のセンサ情報を活用してサービスを提供する上では, 例えば OBD-II (On-Board Diagnostic ver.2) コネクタなど, CAN (Controller Area Network) 情報を収集可能なコネクタとスマートフォンを接続する必要がある. しかし, OBD-II コネクタを利用する上では専用のケーブルや通信装置が必要であり, また収集可能な CAN 情報のフォーマットは車種依存性が高い. したがって, OBD-II の利用を前提とした場合, 複数のユーザ (ドライバー) に対して追加の費用を必要とすることなく, テレマティクスサービスを提供することは難しい. このことから, 一部のテレマティクスサービスでは CAN 情報の代わりにスマートフォンのセンサ情報を用いるものがある. 例えばナビゲーションアプリでは, スマートフォンに搭載される GPS センサや方位角センサのみを用いてルート案内を実現している.

一方で, 例えばドライバーの安全運転度合いを評価する運転特性診断サービス[3-5]などでは, 急ブレーキや急ハン

ドル操作を検出し, 運転特性診断に活用するため, 自動車の加速度情報が必要である. そのため, クレドールを利用してスマートフォンの向きを自動車の向きに合わせて設置するようドライバーを誘導し, これにより自動車の前後・左右方向の加速度を取得している. しかしながら, その他のアプリケーションを並行して利用する場合には, スマートフォン画面の視認性が低いという問題点があった.

そこで本稿では, クレドールによって任意の傾斜角に設置されたスマートフォンを用いて, 自動車の前後・左右・上下方向の3軸加速度を算出する手法を提案する. 提案手法では, まずスマートフォンがどのような傾斜角で設置されているかを確認するため, 加速度の変化から自動車の静止状態を検出する. 次に, 加速度及び方位角の変化から, 自動車が進行方向に対してハンドルを切ることなく直進加速したことを検出する. この2つの状態を検出した時の加速度センサ値を用いて, スマートフォンを基準とした座標軸を, 自動車を基準とした座標軸へ変換するための回転行列を算出する. これにより, 回転行列を算出した以降は, スマートフォンの加速度センサ値から自動車の3軸加速度を算出することができる.

提案手法による自動車加速度の算出値の誤差を確認するため, 自動車の3軸と向きを合わせたスマートフォンによって得られる加速度センサと, 提案手法によって算出される前後方向の加速度を比較した. その結果, 従来手法と比較して, 提案手法では 96%の確率で $\pm 0.05G$ 以下の誤差分布で加速度を算出しており, 急加減速($\pm 0.5G$)を検出するドライブレコーダーや運転特性診断機能などに活用可能な精度で加速度を算出できることが確認できた.

^{†1} (株) 日立製作所 横浜研究所
Hitachi, Ltd., Yokohama Research Laboratory

^{†2} (株) 日立製作所 情報・通信システム社
Hitachi, Ltd., Information & Telecommunication Systems Company

2. 関連研究

2.1 スマートフォンを用いた運転行動認識に関する研究

スマートフォンを活用したテレマティクスサービスについて様々な研究やアプリケーションの開発が進められている。その中でも加速度を利用したサービスとして、危険運転行動に対する診断や警告を目的としたドライバーの運転スタイルを認識・推定する研究が進められている。

文献[6]では、スマートフォンに内蔵される加速度センサやジャイロセンサを用いることで、ドライバーを non-aggressive と aggressive の2種類に分類する。分類には、複数のセンサ値に対して動的時間伸縮法 (DTW: Dynamic Time Warping) によるパターンマッチングを行うことで急発進や急旋回を抽出し、活用している。

文献[7]では、文献[6]と同様に DTW を利用したドライバーの運転行動の推定を行っている。様々なセンサに対して個々に DTW による分布パターンを特定した後、全てのセンサのパターン特定結果からどのような運転行動であると判断できるか、ベイズ分類器を用いて推定している。

文献[8]では、スマートフォンに搭載される GPS センサを用いて自動車の車速を推定した上で、車速がある閾値を一定時間超えたことを監視してスピード違反に関するアラートをドライバーに出すアプリケーションを開発している。

文献[9]では、ニューラルネットワークを利用して、スマートフォンに搭載される GPS センサ及び加速度センサから、走行中の道路種別およびドライバーの aggressive な運転特性を検出する分類器について提案している。

文献[10]では、事前に急加減速・急ハンドルの加速度分布パターンを教師データとして作成した上で、現在のスマートフォンの加速度分布がどの教師データと一致するか、加速度の時系列データの近似処理と類似度計算に関する手法を提案している。

文献[11]では、スマートフォンの加速度センサを用いて、加速・ブレーキ・ターンなどの運転行動の特定を行っている。スマートフォンの加速度センサ利用には、ドライバーに水平方向に固定するよう画面上で指示を出した上で、初回加速度の検知方向を自動車の移動方向と見なしている。

2.2 本研究の目的

従来研究では、スマートフォンの各種センサを用いて様々な手法で運転行動認識を行っている。一方で、スマートフォンの設置については、例えば自動車の正面を向く様にドライバーを誘導する、水平設置を前提とするなど、スマートフォンの3軸と自動車の3軸が何かしら一致することを前提としている。したがって、ドライバーが画面を閲覧する可能性があるアプリケーションにおいては、視認性が低いという問題点があると考えられる。

提案手法では、傾斜したスマートフォンであっても、設置された自動車の進行方向や左右方向の加速度を算出する

ことができる。これにより、例えばナビゲーションアプリなど、運転行動や運転特性の識別とは異なるサービスを並行してドライバーに提供することが可能となる。

3. 3軸加速度の定義と算出すべき回転角

本章では、傾斜したスマートフォンを用いて自動車の3軸加速度を算出する上で、まずスマートフォン及び自動車を基準とした3軸加速度の定義について詳細を述べる。さらに、スマートフォンを基準とする3軸加速度を、自動車を基準とする3軸加速度に変換する上で必要となる、補正回転角についても詳細を述べる。

3.1 スマートフォンを基準とした3軸加速度の定義

現在普及しているスマートフォンは、その OS に応じて取得可能な加速度センサ値の定義が異なる。そのため、本稿では下記に示す定義に基づき、スマートフォンの3軸加速度の一般化を行う。傾斜した状態で固定されたスマートフォンの様子を図 1(a)に示す。図 1(a)に示す通り、スマートフォンのタッチパネル(画面)に対して垂直な方向を z 軸とした上で、画面上下方向を x 軸、左右方向を y 軸と定義する。z 軸の正方向は、平坦な地面にスマートフォンの画面が上となるように設置した場合での、重力方向と定義する。画面上方向を飛行機の機首に見立てた場合、x 軸はロール (Roll) 回転軸、y 軸はピッチ (Pitch) 回転軸、z 軸はヨー (Yaw) 回転軸に相当する。各軸を基準とした座標系の正方向の回転は、ロール回転では y 軸を z 軸に向ける方向に、ピッチ回転では z 軸を x 軸に向ける方向に、ヨー回転では x 軸を y 軸に向ける方向に回転することになる。以降では、スマートフォンの x 軸 y 軸 z 軸を基準とする座標系を「xyz 座標系」あるいは「端末座標系」と記載する。

なお、図 1(b)に示す通り、地球上の特定地点における加速度の軸としては、重力方向である Z 軸、経線に平行な X 軸、緯線に平行な Y 軸を定義する。各軸の正方向は、X 軸は北方向、Y 軸は東方向、Z 軸は地球の中心方向であると定義する。以降では、地球上の特定地点におけるこの加速度の3軸にて表現される座標系を「地球座標系」あるいは「XYZ 座標系」と記載する。

ここで、xyz 座標系を x 軸回りに α 回転して $x'y'z'$ 座標系に変換する行列を $R_x(\alpha)$ 、 $x'y'z'$ 座標系を y' 軸回りに β 回転して $x''y''z''$ 座標系に変換する行列を $R_{y'}(\beta)$ 、 $x''y''z''$ 座標系を z'' 軸回りに γ 回転して変換する行列を $R_{z''}(\gamma)$ と表現した場合、端末座標系を地球座標系に変換するための回転式は、

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = R_{z''}(\gamma) R_{y'}(\beta) R_x(\alpha) \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (1)$$
$$= \begin{pmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$$

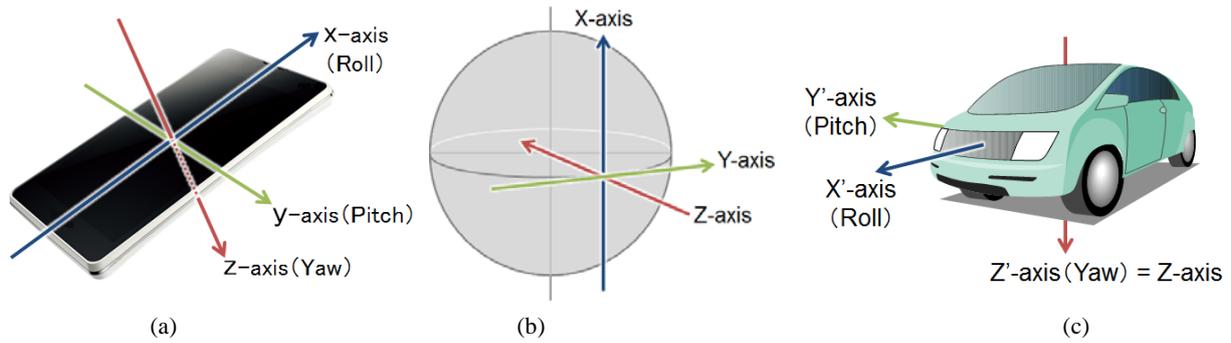


図 1: 各対象を基準とした 3 軸加速度の定義

(a) スマートフォンを基準とした場合 (b) 地球上を基準とした場合 (c) 自動車を基準とした場合

と表現することができる。この数式では、回転の順序をロール軸回転、ピッチ軸回転、ヨー軸回転の順と定義している。以降では、ある直交座標系から別の直交座標系に回転するための回転行列は、オイラー角の定義に基づく「ロール軸回転」「ピッチ軸回転」「ヨー軸回転」の順、すなわち x - y - z 系での表現を行う。

3.2 自動車を基準とした 3 軸加速度の定義

図 1(c)に示す通り、スマートフォンと同様、自動車に対しても加速度の軸を 3 つ定義する。詳細には、自動車の中心と地球の中心の 2 点を通る直線からなる Z' 軸、 Z' 軸に垂直で、自動車のハンドル操作を全くせずに加速した場合に進む方向である、自動車の前後方向を示す X' 軸、 Z' 軸および X' 軸に垂直で、自動車の左右方向を示す Y' 軸を定義する。各軸の正方向は、 X' 軸は車の前進方向、 Y' 軸は進行方向に対する右方向、 Z' 軸は重力方向とも定義する。なお、以降では、自動車が表現する加速度の 3 軸にて表現される座標系を「 $X'Y'Z'$ 座標系」あるいは「自動車座標系」と記載する。

自動車座標系は、重力方向が一致することから、地球座標系を Z 軸 (Z' 軸) 周りに回転することで得ることができる。したがって、 XYZ 座標系を Z 軸周りに δ 回転して変換する行列を $R_Z(\delta)$ と定義した場合、地球座標系を自動車座標系に変換するための回転式は、

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} = R_Z(\delta) \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad (2)$$

と表現することができる。

3.3 求める回転行列

3.1 章及び 3.2 章で定義したスマートフォン及び自動車を基準とした加速度の 3 軸定義に基づき、端末座標系を自動車座標系に変換するための算出すべき回転補正式を定義する。数式 1 において表現される $R_z(\gamma)$ は、適切な α 、 β が設定されていれば、 $x''y''z''$ 座標軸を z'' 軸に γ 回転して XYZ 座標系に一致させるための行列であることから、 z'' 軸は Z 軸と一致することが分かる。同様に、 Z' 軸は Z 軸と

一致することから、数式 1 及び数式 2 を用いて、

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} &= R_{Z'}(\delta) R_{z''}(\gamma) R_{y'}(\beta) R_{x'}(\alpha) \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \\ &= R_Z(\gamma + \delta) R_{y'}(\beta) R_{x'}(\alpha) \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

と表現することができる。スマートフォンを基準とした 3 軸加速度を、自動車を基準とした 3 軸加速度に変換するためには、この回転行列 $R_Z(\gamma + \delta) R_{y'}(\beta) R_{x'}(\alpha)$ を構成する回転角 α 、 β 、 $\gamma + \delta$ を算出することが必要である。次章では、この 3 つの回転角を算出するための手法について、その詳細を述べる。

4. 求める回転角の算出方法

本章では、3 章における加速度の定義を元に、スマートフォンを基準とした加速度を、自動車を基準とした加速度に変換するための回転補正角の算出方法について、詳細を述べる。

4.1 自動車の静止状態検出

本節では、端末座標系から自動車座標系に変換するロール回転角 α およびピッチ回転角 β を算出するための自動車静止状態の検出方法と、回転角の算出式について述べる。

スマートフォンが傾斜した状態で静止・固定されていた場合、端末座標系における x 軸、 y 軸、 z 軸には、地球座標系における重力加速度 G を xyz 軸それぞれに分解した値が加速度センサ値として検出される。 xyz 各軸の加速度のセンサ検出値を G_x, G_y, G_z と定義した場合、 G_x, G_y, G_z は重力加速度 G のベクトルを分解した値であることから、次式が成立する。

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2 + G_z^2} \quad (4)$$

ここで、ある軸 p を基準に ε 度回転する回転行列 $R_p(\varepsilon)$ の逆行列は、回転角の正負を反転した $R_p(-\varepsilon)$ に相当する。したがって、数式 1 に左から逆行列 $R_x(-\alpha) R_y(-\beta) R_z(-\gamma)$

を掛けると,

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = R_x(-\alpha)R_y(-\beta)R_z(-\gamma) \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad (5)$$

が成立する. 上記の通り, XYZ 座標系における重力加速度 G が端末座標系における G_x, G_y, G_z に分解されることから,

$$\begin{pmatrix} G_x \\ G_y \\ G_z \end{pmatrix} = R_x(-\alpha)R_y(-\beta)R_z(-\gamma) \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ G \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -G \sin \beta \\ G \sin \alpha \cos \beta \\ G \cos \alpha \cos \beta \end{pmatrix} \quad (6)$$

が成立する. 例えばクレドールなどを用いてスマートフォンが自動車に固定されており, かつ自動車が完全に静止している場合には, スマートフォンの加速度センサの値 G_x, G_y, G_z が判明する. したがって, G_x, G_y, G_z を用いることで端末座標系から地球座標系に変換するための回転角の内, ロール角 α とピッチ角 β を算出することが可能である. これは, スマートフォンが地面に対してどの程度傾いて設置されているか, その設置角度に相当する.

自動車が完全に静止していることを検出する方法としては, 例えば xyz 各軸の加速度センサ値の分散を用いることが考えられる. 直近 ΔT 秒間における x 軸, y 軸, z 軸それぞれの加速度センサ値の分散が一定値 σ より小さい場合には, その ΔT 秒間は自動車が静止していたと判断し, ΔT 秒間の加速度のセンサ値の平均を G_x, G_y, G_z として用いる. 仮に自動車が何らかの方向に移動していた場合には, 定速で移動していない限り加速度が発生するため, 分散を確認することで移動状態(加速状態)を検出することができる. また, 定速で移動している場合であっても, 路面凹凸による振動ノイズが自動車に働くことを考慮すると, ΔT の値が十分に大きい場合には定速移動中の加速度の分散を 0 に近い値にすることは難しい. したがって, ΔT 及び σ の値を適切に設定することで, 自動車が停止状態であるか, あるいは等速移動状態であるかを区別することもできる.

なお, スマートフォンに搭載される加速度センサには, デバイス固有のノイズが入ることが予測される. また, 加速度センサ値にはエンジン振動に依存した振動ノイズの影響を受けることから, 適切なノイズキャンセル機能を持つデジタルフィルタを考慮する必要がある. 詳細は評価実験の章にて述べる.

数式 6 におけるヨー回転角 γ は方位角に相当することから, スマートフォンの地磁気センサを利用することで算出することが可能である. しかし, 静止している場合であっても, スマートフォンの設置の向きに応じて方位角は変動するため, 自動車の方位角を知ることはできない. したがって, スマートフォンと自動車の方位角の差異に相当する, 端末座標系から自動車座標系へ変換する回転行列のヨー回

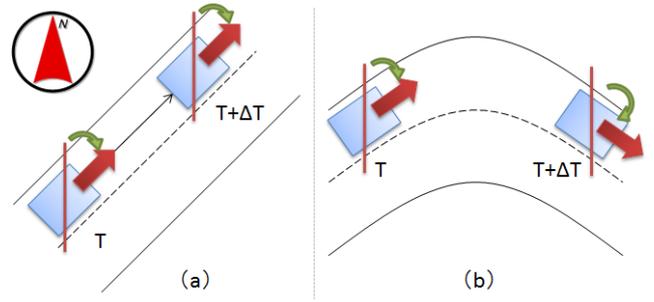


図 2: 進行状況に応じた自動車方位角の変化
(a) 真っ直ぐな道路を直進した場合
(b) カーブする道路を走行した場合

転角 $\gamma + \delta$ の内, δ を単独で算出することはできない. そこで本稿では, 自動車の静止状態検出後, 自動車の直進状態を検出し, ヨー一回転角 $\gamma + \delta$ をまとめて算出する. 詳細は次節に述べる.

4.2 自動車の直進状態検出

本節では, 端末座標系から自動車座標系に変換するためのヨー一回転角である $\gamma + \delta$ を算出するための自動車直進状態の検出方法と, ヨー一回転角の算出式について述べる.

自動車の直進状態を検出する方法を, 図 4 を用いて説明する. 図 2(a)においては, 時刻 T から時刻 $T + \Delta T$ までの ΔT 秒間, 自動車が真っ直ぐな道を進んだ場合を示している. この時, 自動車の方位角は ΔT 秒間ほとんど変化することはない. 一方, 図 2(b)に示すように, ΔT 秒間の間に自動車が右左折した場合, あるいは緩やかにカーブした道を走行している場合には, 自動車の方位角は ΔT 秒間で大きく変化する. 静止判定後のスマートフォンについてもこの方位角の変化は同様であることから, 一定時間 ΔT 秒間のスマートフォンの方位角の分散が, 一定値 Σ 以下である場合には直進中であると判断することができる.

方位角の分散が一定値以下であり直進状態を検出し, かつ自動車が進行方向に対して加速していた場合には, 重力加速度 G を含めた加速度が端末座標系の 3 軸に分解されてセンサ値として取得することができる. 自動車の進行方向の加速度を M , 直進加速を検出した際の加速度センサ値を xyz 軸順に M_x, M_y, M_z と表現した場合,

$$\sqrt{M^2 + G^2} = \sqrt{M_x^2 + M_y^2 + M_z^2} \quad (7)$$

が成立する. ここで, 端末座標系を自動車座標系に変換するための回転角を, ロール回転角 ϕ , ピッチ回転角 θ , ヨー一回転角 ψ と定義しなおした場合, 前期の進行方向加速度を検出した加速度 M 及び加速度センサ値 M_x, M_y, M_z を利用すると, 数式(3)を用いることで次式が成立する.

$$\begin{pmatrix} M \\ 0 \\ G \end{pmatrix} = R_z(\psi)R_y(\theta)R_x(\phi) \begin{pmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{pmatrix} \quad (8)$$

ロール角 ϕ 及びピッチ回転角 θ は、数式 7 を利用して算出した回転角 α 及び β を用いれば良い。この時、 $R_y(\beta)R_x(\alpha)$ は端末座標系を自動車座標系に変換するための行列の一部であり、ヨー回転を除くものである。したがって、 z'' 軸と Z 軸は一致し、ヨー回転では z 成分は変化しないことから、次式が成立する。

$$\begin{pmatrix} M \\ 0 \\ G \end{pmatrix} = R_z''(\psi)R_y(\beta)R_x(\alpha) \begin{pmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{pmatrix} = R_z''(\psi) \begin{pmatrix} x_\psi \\ y_\psi \\ G \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$= \begin{pmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_\psi \\ y_\psi \\ G \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_\psi \cos \psi - y_\psi \sin \psi \\ x_\psi \sin \psi + y_\psi \cos \psi \\ G \end{pmatrix}$$

進行方向の加速度 M は、加速度センサ値 M_x, M_y, M_z と数式 7 を用いることで算出できることから、数式 9 を解くことで、数式 8 に示す端末座標系を自動車座標系に変換するヨー回転角 ψ を算出することができる。

以上、4.1 節及び 4.2 節にて述べた自動車の静止状態検出及び移動状態検出を実行することで、3.3 節にて述べたスマートフォンを基準とした 3 軸加速度を、自動車を基準とした 3 軸加速度に変換するための回転角を計算することができる。この回転角を用いて回転行列を生成することで、直進状態検出行移はスマートフォンの加速度センサ値を自動車の進行方向に合わせた加速度に変更することができる。なお、スマートフォンの画面がドライバーに対して正対している場合には、自動車のバックや急ブレーキ時には必ず xyz 座標系の z 軸に負の加速度が算出される。したがって、 ΔT 秒間の z 軸加速度センサ値の平均値が負である場合にはバックであると判断した上で、自動車の進行方向を適切に特定することが可能である。

4.3 道路勾配の考慮

4.1 章及び 4.2 章における回転角の算出では、全て自動車が平坦な道を走行していたことを前提としている。一方で、坂道や高速道路の入り口など、勾配のある道路を走行する場合には、その勾配角度に応じた回転行列の算出が必要である。勾配を考慮した回転角の算出方法を、図 5 を用いて説明する。

地球座標系における勾配角度は、例えば走行中の道路情報や、地図情報[12]を用いることで入手できることを前提とする。直進判定の実行が完了するまでは、自動車の直進方向が判定できないため、自動車座標系の勾配角度を知ることが出来ない。しかし、地球座標系の勾配は自動車の向きではなくスマートフォンの方位角に依存して影響を与えることから、走行中に随時地磁気センサを用いて方位角を取得し、その角度から勾配角の影響を考慮することになる。図 3 に示す通り、地球座標系における X 軸及び Y 軸を基準とした路面の傾斜を $\Delta Gr_x, \Delta Gr_y$ 、北を基準としたスマートフォンの方位角を ΔGr_z とした場合、端末座標系の x 軸及び y 軸を基準とした勾配角度 $\Delta x, \Delta y$ は次式で計算するこ

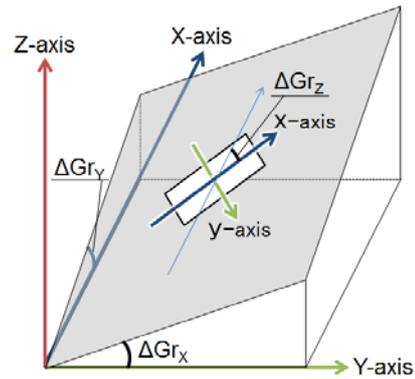


図 3：傾斜した路面上に方位角 ΔGr_z にて固定されたスマートフォン

とができる。

$$\begin{aligned} \Delta x &= \arctan(\tan \Delta Gr_x \sin \Delta Gr_z + \tan \Delta Gr_y \cos \Delta Gr_z) \\ \Delta y &= \arctan(\tan \Delta Gr_x \cos \Delta Gr_z - \tan \Delta Gr_y \sin \Delta Gr_z) \end{aligned} \quad (10)$$

静止判定、直進判定それぞれの場合において、この $\Delta x, \Delta y$ を測定することで、算出したロール回転角 ϕ 、ピッチ回転角 θ 、ヨー回転角 ψ を修正し、平坦な道路に対する補正回転角を算出することが出来る。また、直進判定後に勾配のある道路を走行した場合でも、その地点の地球座標系の勾配情報とスマートフォンの方位角を用いて、勾配道路に平行な平面での補正加速度を算出することも可能となる。

5. 評価実験

5.1 実験内容

提案手法による自動車の前後・左右・上下方向の加速度算出結果が、従来手法の様にスマートフォンの 3 軸加速度を自動車の 3 軸加速度と一致するように設置した場合の値と比べて、どの程度違いがあるかを評価するため、提案手法による自動車加速度算出アプリケーションを実装し、実験を行った。

実験では、車両として NOTE[a]を用いた。また、スマートフォンは、Xperia GX SO-04D[b]を 2 台用いて実験を行った。車内に 2 台のスマートフォンを設置し、1 台は提案手法を実現したアプリケーションをインストールしたものであり、図 4(a)に示す様にクレードルで自動車に固定している。もう 1 台は、図 4(b)に示す様に、スマートフォンの 3 軸と自動車の 3 軸を一致させるようにスマートフォンを固定した。スマートフォンの固定においては、水準器を用いることで、自動車に対する路面の傾斜角度を測定し、その上で固定するスマートフォンも同じ傾斜角度となるように設置している。なお、スマートフォンの縦方向・横方向と自動車の前後・左右方向の位置合わせは、従来研究と同様に目分量で調整している。

[a] NOTE は日産自動車株式会社の商標または商標登録です。

[b] Xperia はソニー株式会社の商標または商標登録です。



図 4：実験風景

- (a) クレドールに設置したスマートフォン
- (b) 自動車の向きに一致させたスマートフォン

パラメータ名	値
加速度データ取得間隔	20 (ms)
静止/直進判定実行間隔	1 (s)
直進判定に利用する 方位角分散の閾値	1 (deg ²)
直進判定に利用する加速度の閾値	0.5 (m/s ²)

表 1：評価実験における設定値

2 台のスマートフォンにて収集した加速度履歴情報は、その収集したデータの時刻を一致させるため、NTP による時刻と OS のシステム時刻との差分をあらかじめ取得しておき、加速度データの取得時刻を補正している。NTP による現在時刻推定においては、2 台のスマートフォンを同一無線 LAN に接続した上で行っており、NTP 時刻の推定誤差はないものとしている。

実験においては、静止判定及び直進判定の正確性を確認するため、様々な走行形態における加速度センサ値の変化の確認を行った。評価実験における設定を表 1 に示す。なお、今回の評価実験では平坦な道路を利用しており、道路勾配については影響を考慮していない。

5.2 実験結果と評価

図 5 に、各運転状況に応じたスマートフォンの加速度センサ値の変化量を示す。図 5 には、(a)エンジン OFF の状態、(b)アイドリング状態、(c)クリープによる等速運動中の状態、それぞれの場合における自動車と 3 軸を一致させたスマートフォンの z 軸加速度センサの各タイムスロットの分散値を示している。加速度データのサンプリングレートは 20ms であり、静止判定を実行する間隔は 1 秒とした上で、約 40 秒間のデータを取得した。その結果、図 5 に示す通りエンジン OFF 状態及びアイドリングストップ状態では加速度の分散は 0.01 以下で大きな変化はないが、クリープによる等速運動中は加速度の分散が大きくなることが判明した。これは、等速運動中であっても路面の凹凸に応じた振動が発生するため、加速度センサ値に影響を与えるためと考えられる。より高速な移動では振動ノイズが大きくなることから、1 秒間の加速度センサ値の分散を 0.01 以下と定義す

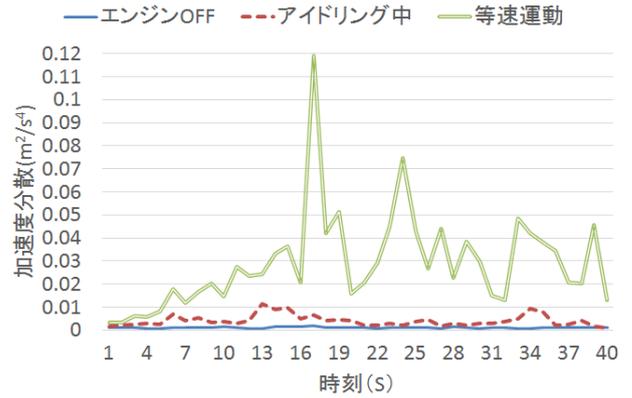


図 5：自動車の 3 軸と一致させたスマートフォンの各状態における z 軸加速度センサ値の分散の変化

ることで、完全な停止状態と等速運動中を区別できるものと考えられる。以降の直進判定における実験では、静止判定に利用する加速度分散の閾値を 0.01 として実験を行っている。

また、路面の凹凸などを含む加速度センサのノイズ周波数を確認するため、各状態の加速度センサ時系列データに対してフーリエ変換を適用し、加速度センサに影響を与えるノイズの周波数特性を調査した。フーリエ変換の結果を図 6 に示す。図 6(a)に示す通り、エンジン停止時の加速度センサに対しては、ホワイトノイズが検出できた。これは、デバイス固有の精度誤差による影響であるものと考えられる。一方、図 6(b)に示す通り、アイドリング中はエンジン振動による加速度センサへのノイズとして、周波数が 20Hz 前後にて大きな振幅を検出していることが確認できる。さらに、図 6(c)に示す通り、クリープ状態による等速運動時には、周波数が 3Hz 前後にてノイズを検出していることが判明した。これが道路の凹凸によって発生する加速度センサのノイズであると推定できる。より高速で運動した場合には、道路の凹凸によるノイズの周波数は大きくなると考えられる。一方で、人間による自動車の加減速操作による加速度変化の周波数は、上記のノイズの周波数と比較して小さいと考えられることから、正確な自動車の加速度を抽出する上では 3Hz 以上の周波数帯域のノイズを削除するローパスフィルタが必要であると考えられる。

提案手法では様々なアプリケーションを並列で起動することを想定していることから、本実験では計算負荷の低い無限長インパルス応答 (IIR) によるローパスフィルタを作成することとした。同様に計算負荷の低減を目的として 2 次のローパスフィルタを作成するものとした。デジタルフィルタとしては、次数が少ない場合でもリップルが見られないバターワースフィルタ [13] を適用した。サンプリングレート 50Hz、カットオフ周波数 3Hz、カットオフ周波数における利得を -10dB とした場合、バターワースフィルタの差分方程式は次式にて表現することができる。ここで、

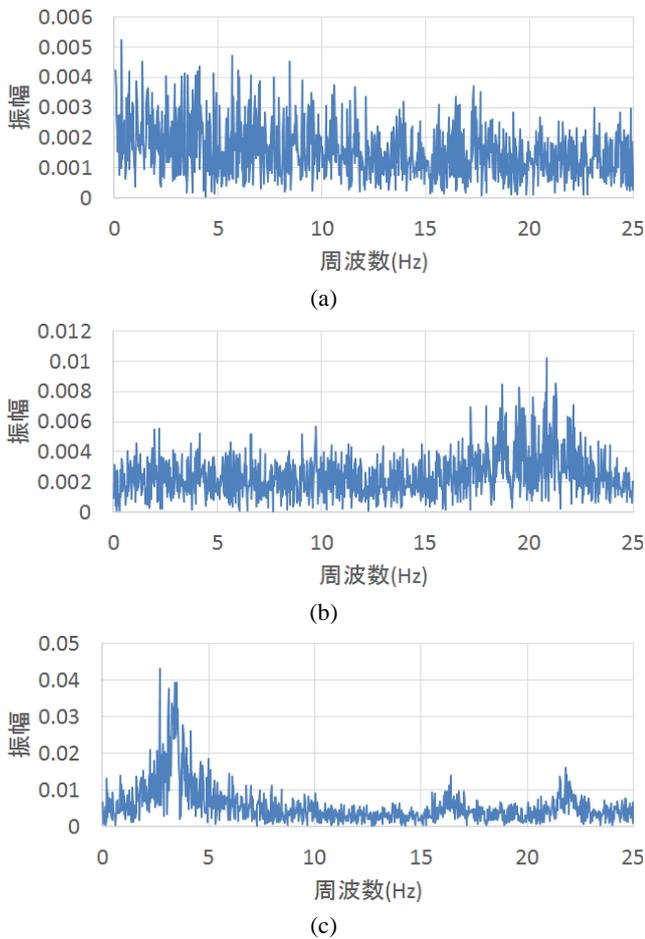


図 6 : 加速度時系列センサデータのフーリエ変換結果
 (a) エンジン停止時 (b)アイドリング時
 (c)クリープによる等速直線運動時

$X[n]$ は時刻 n 秒におけるセンサ値, $Y[n]$ は時刻 n 秒におけるローパスフィルタ後の補正値を表す.

$$Y[n] = 0.0104 * X[n] + 0.0208 * X[n-1] + 0.0104 * X[n-2] + 1.692 * Y[n-1] - 0.7333 * Y[n-2] \quad (11)$$

図 7 及び図 8 には, 各加速運転行動時におけるスマートフォンの加速度センサ値の変化量を示す. 図 7 では, 信号待ちから発進したケースを想定し, シフトを **D** にした状態でアイドリングしている状態から真っ直ぐに加速した場合の加速度時系列データを, 図 8 では, シフトを **R** にしてバックした後, 真っ直ぐ加速した場合での加速度時系列データを示している. 図 7,8 が示す通り, 提案手法による直進方向の加速度算出値については, 自動車の進行方向に合わせたスマートフォンの加速度値の変化と傾向が一致していることが分かる. 各時刻での加速度値の誤差を確認した所, 図 7 のケースでは平均誤差 $u = 0.045(m/s^2)$, 誤差分散 $\sigma^2 = 0.753$, 図 8 のケースでは平均誤差 $u = -0.123(m/s^2)$, 誤差分散 $\sigma^2 = 0.391$ にて算出していることが確認できた.

なお, 図 7(b)及び図 8(b)が示す通り, 提案手法による加速度算出値には, 図 7(a)及び図 8(a)が示す以上にノイズが

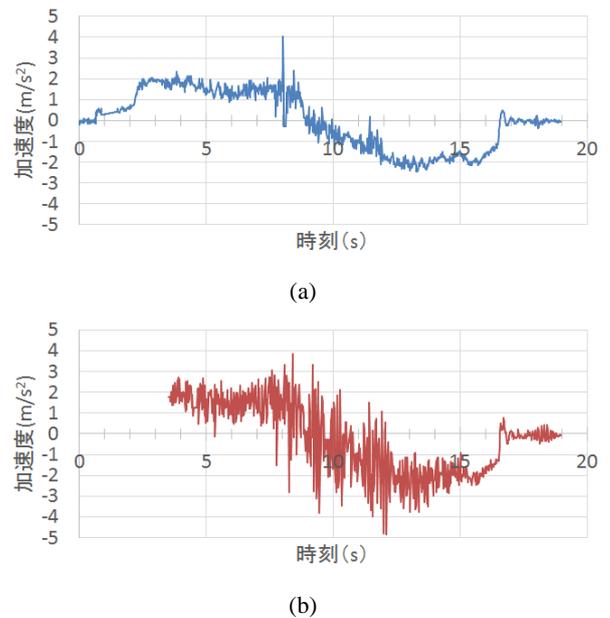
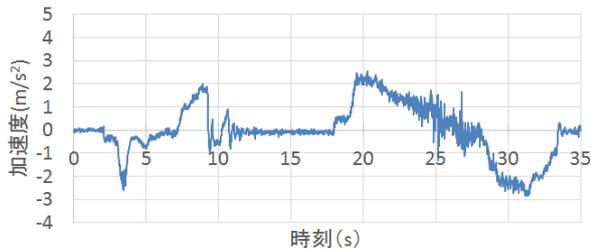


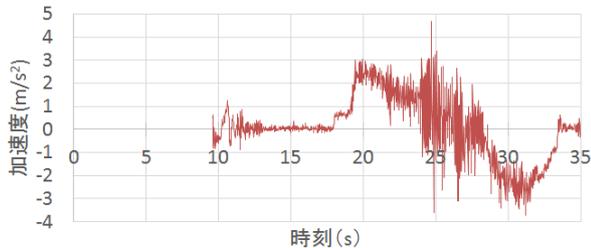
図 7 : 直進加速運転時の前後加速度データ分布
 (a) 自動車と向きを一致させたスマートフォンの加速度
 (b)提案手法による加速度算出値

確認できる. これは, 装着したクレードルの各可動パーツ部分が振動したことによるものと考えられる. この振動はエンジン稼働や路面凹凸に依存するため, 振動周波数は同様に 3Hz 以上であると考えられる. そこで, (12)の差分方程式にて示すローパスフィルタを適用した結果, 精度は図 7 のケースでは平均誤差 $u = 0.047(m/s^2)$, 誤差分散 $\sigma^2 = 0.031$, 図 8 のケースでは平均誤差 $u = -0.122(m/s^2)$, 誤差分散 $\sigma^2 = 0.011$ にて算出しており, ローパスフィルタ適用前と比較して高精度で直進方向の加速度を算出していることが確認できた. なお, 誤差分布は正規分布に近く, 図 8 においては $\pm 2\sigma$ 区間のデータ数は全データ数の約 96.3% を占めている. したがって, 提案手法では約 96%の確率で $\pm 0.05G$ 以下の誤差精度で進行方向の加速度を算出しており, 一般的な急加減速の加速度値である $\pm 0.5G$ を検知する上では十分な精度で算出していることが分かる.

図 9 では, 右折時を想定し, 交差点にやや右ハンドルを切った状態で進入し停止した後, 発進して右折を完了するまでの加速度時系列データを示している. 図 9 のケースでは, 方位角の分散値の閾値は, $1.0(deg^2)$ では直進判定を実行できないため, $10.0(deg^2)$ を設定した. 図 9 の場合では, 数式 11 によるローパスフィルタを適用した場合でも平均誤差 $u = -0.423(m/s^2)$, 誤差分散 $\sigma^2 = 0.353$ にて進行方向加速度を算出しており, 図 7 及び図 8 のケースと比較して精度が悪化していることが判明した. これは, 右折による横加速度の変動が方位角 ϕ の算出に影響を与えているものと考えられる. これにより, 例えば方位角の分散の閾値を $1.0(deg^2)$ などに設定することで, 右左折時の直進判定を実行しないよう対処する必要があることが確認できた.



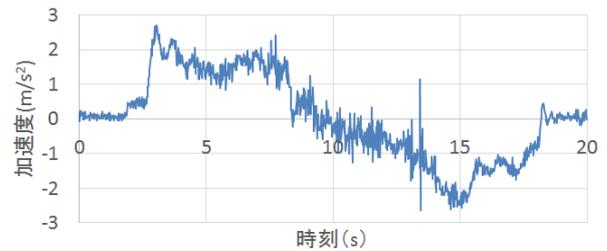
(a)



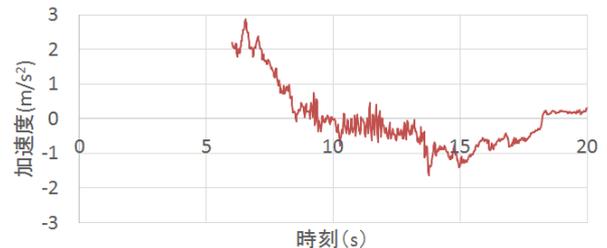
(b)

図 8：バック後に直進加速した際の前後加速度データ分布

- (a) 自動車と向きを一致させたスマートフォンの加速度
(b) 提案手法による加速度算出値



(a)



(b)

図 9：右折時の前後加速度データ分布

- (a) 自動車と向きを一致させたスマートフォンの加速度
(b) 提案手法による加速度算出値

6. おわりに

本稿では、クレードルによって任意の傾斜角に設置されたスマートフォンを用いて、自動車の正確な前後・左右・上下方向の3軸加速度を算出する手法を提案した。提案手法では、スマートフォンの加速度センサおよび方位角センサを用いることで、自動車の静止状態及び直進状態を検出する。検出時の加速度変量と方位角を用いることで、スマートフォンの3軸加速度を自動車の3軸加速度に変換するための回転行列を算出している。評価実験の結果、従来のスマートフォンの3軸を自動車に一致させて加速度を検出する手法と比較して、提案手法では96%の確率で $\pm 0.05G$ 以下の誤差分布であり、急加減速を検出するアプリケーションに活用できる精度で加速度を算出できることを確認した。今後の課題としては、走行中の自動車の前後方向及び左右方向に傾斜した路面の勾配角度を考慮した場合での、自動車3軸加速度の算出精度を確認することなどが考えられる。

参考文献

- 1) 株式会社矢野経済研究所, “2012年度版 乗用車向け ITS テレマティクス市場予測,” 2012.
- 2) 株式会社富士経済, “コネクティッドカー関連市場の現状とテレマティクス戦略 2013,” 2013.
- 3) 株式会社損保ジャパン, “Safety Sight,” Available: http://www.smpo-japan.co.jp/safetysight_app/index.html
- 4) 三井住友海上火災保険株式会社, “スマ保,” Available: <http://www.ms-ins.com/sumaho/untan.html>
- 5) あいおいニッセイ同和損保保険株式会社, “サポ NAVI,” Available: http://www.aioinissaydowa.co.jp/personal/service/mobile/sp_appli/sapo_appli.html

- 6) Derick A. Johnson and Mohan M. Trivedi, “Driving Style Recognition Using a Smartphone as a Sensor Platform,” In Proceedings of 14th International Conference on Intelligent Transportation Systems, pp. 1609-1615, 2011.
- 7) H. Eren, S. Makinist, E. Akin and A. Yilmaz, “Estimating Driving Behavior by a Smartphone,” In Proceedings of International Conference on Intelligent Vehicles Symposium 2012, pp. 234-239, 2012.
- 8) C. Saiprasert and W. Pattara-Atikom, “Smartphone Enabled Dangerous Driving Report System,” In Proceedings of 46th Hawaii International Conference on System Sciences, pp. 1231-1237, 2013.
- 9) J. E. Meseguer, C. T. Calafate, J. C. Cano and P. Manzoni, “DrivingStyles: A Smartphone Application to Assess Driver Behavior,” 2013 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC), pp. 35-540, 2013.
- 10) P. Chaovalit, C. Saiprasert and T. Pholprasit, “A Method for Driving event Detection Using SAX on Smartphone Sensors,” In Proceedings of 13th International Conference on ITS Telecommunications, pp. 450-455, 2013.
- 11) J. Paefgen, F. Kehr, Y. Zhai and F. Michahelles, “Driving Behavior Analysis with Smartphones: Insights from a Controlled Field Study,” In Proceedings of the 11th International Conference on Mobile and Ubiquitous Multimedia, pp. 36-45, 2012.
- 12) 国土交通省, “国土数値情報 標高・傾斜度 5次メッシュデータ,” Available: <http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-G04-d.html>
- 13) S. Butterworth, “On the Theory of Filter Amplifiers,” In Wireless Engineer IEEE, vol. 7, pp. 536-541, 1930,