

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 Development of an experimental vehicle for successively observing interactions between vehicles in relation to road structure

小 宮 粹 史*
大 口 敬 **
赤 羽 弘 和**
堀 口 良 太***
桑 原 雅 夫****

様々な安全運転支援技術の導入・普及期には、その利用車と非利用車とが混在する状況が継続すると想定される。この混在が交通流を攪乱して新たな安全・円滑上の問題をもたらすことなく、安全運転支援技術が所期の機能を発揮するように、車両間および車両と道路幾何構造との相互作用を考慮した技術開発と運用を実現しなければならない。そのためには、車両の走行挙動に関する基礎データを周辺車両との関係とともに連続的に収集できる計測技術が求められる。本研究では近傍を走行する車両の走行挙動を含め、高精度な走行位置情報および時刻情報とともに計測・記録が可能な走行実験車を開発し、道路構造と走行挙動との関係や周辺車との相互作用の計測を目指す。本稿では、走行実験車に搭載された計測システム、車両の走行挙動と計測値との関係を記述する状態方程式と観測方程式、実験走路における推定値の精度検証の方法を示す。精度検証の結果、実験車の測位精度は20cm程度、周辺車の測位精度は1m程度であることを確認した。

キーワード 車両挙動計測, GPS, カルマンスムージング, 座標変換

1 はじめに

車両間距離・走行速度制御、車線逸脱防止などより高度な安全運転支援技術が実用化され、路車協調システムの実道実験も各所で始まりつつある。これらの導入・普及期には相当の長期にわたり、安全運転支援サービスの利用車と非利用車とが混在する状況が継続すると想定される。

この混在が交通流を攪乱して新たな安全・円滑上の問題をもたらすことなく、安全運転支援サービスが所期の機能を発揮するためには、たとえば合流部やサグ等の特定の道路構造との関係において、個々の車両の走行挙動や車々間の相互作用を考慮することが極めて重要である。

このような技術的要件を満たすためには、特定の車両のみならず、その近傍を走行する車両の走行挙動に関する基礎データを、高精度な走行位置情報とともに収集できる計測技術を開発する必要がある。

従来は、道路断面における車の走行速度、車頭時間（交通流率）の定量的な計測には車両感知器や地点画像計測が、質的な計測にはITVによる範囲が限られた区間での交通流監視が、一定の距離がある道路区間の旅行時間計測にはフローティング調査やナンバープレート調査が一般的に用いられてきた。しかし、効果的な安全運転支援サービスを計画し設計するためには、まず任意の計測区間

* [学生会員] 千葉工業大学工学研究科工学専攻

** [正会員] 首都大学東京 大学院都市環境科学研究科都市基盤環境工学専攻 教授 (TEL: 0426-77-2781, e-mail: oguchi@tmu.ac.jp)

*** [正会員] 千葉工業大学 工学部建築都市環境学科 教授 (TEL: 047-478-0444, e-mail: akahane@ce.it-chiba.ac.jp)

**** [正会員] TOE (株) アイ・トランスポート・ラボ 代表取締役 (TEL: 03-3344-1219, e-mail: horiguchi@i-transportlab.jp)

***** [正会員] 東京大学国際産学・共同研究センター 教授 (TEL: 03-5452-6418, e-mail: kuwhara@iis.u-tokyo.ac.jp)

でより高い測位精度と時間精度，より短い時間間隔で，まずは走行実態を把握をすることから始める必要がある。

路側に設置したカメラで長区間連続計測を行い個々の車両のビデオ画像データから走行軌跡を推定する手法も適用されつつある⁽¹⁾。これらは，不特定多数の車両を計測対象とできる長所を有するが，カメラの設置位置により計測区間が限定される面もある。一方で，これらの手法の計測精度の評価基準値を与え得る手段は未確立である。これも，直接的な方法で，車両の走行挙動を高精度に計測できる手法の開発が必要な背景の一つである。

このような認識に基づいて，各種計測機器を搭載した実験車の開発が行われてきた。赤羽ら⁽²⁾は速度，加速度計を搭載した2台の実験車の相対距離をレーザ車間距離計で計測し，カルマンスムーザにより車両運動状態量を推定するシステムを開発した。またGurusingheら⁽³⁾は，準静的な精密測量技術であるRTK（Real Time Kinematic 実時間干渉測位）-GPSを移動車に適用を試みた実験車を試験走路において走行実験を行っている。しかし赤羽らの方法では絶対位置の計測は，キロポスト（距離標）などの目視確認に頼る必要があるため，測位精度は十分とは言えず，車群中の減速挙動の伝播現象などの計測に適用することは困難であった。一方，Gurusingheらの方法では，測位精度は原理的に極めて高いとされているが，その実地検証は十分ではない。また，RTK-GPSによる移動体の測位には，基地局との通信が一瞬でも途絶すれば測位不能になる等の短所もあり，そのままでは実道路上での計測走行に用いることは困難である。

測位データと速度や加速度の計測データとを統合処理して，GPS測位の欠測を補完することにより，これらの短所は改善できる。しかし，従来の走行実験車では各種データを同期記録するための時刻データの精度が十分とは言えなかった。また，実験車自体の挙動を把握することはできても，不特定多数の周辺車両の挙動の微視的計測には十分に

対応していなかった。

著者らは，実験車と周辺走行車の挙動の相互作用などを詳細に計測するため，時間解像度がビデオのフレームレートである1/29.97秒，測位精度数10cm程度の長区間連続計測を目指し，GPS受信装置，速度計，加速度計等の計測機器と，周辺状況を撮影するCCDカメラを実験車に搭載した時空間連続計測システムを構築し⁽⁴⁾⁽⁵⁾，自車両の位置計測の精度検証を試みた⁽⁶⁾ものの，同期精度に課題が残った。さらに，ビデオ画像データに基づく周辺走行車の計測システムを構築したが，画像処理のみでの相対距離計測による精度確保が困難な事例が見られた⁽⁷⁾。

本稿では，効果的な安全運転支援サービスを計画し設計するために走行挙動の実態をサービスに必要な精度と周期で把握することを目的として，実験車および周辺走行車の走行挙動の推定アルゴリズムの詳細をあらためて統合的に記述するとともに，計測データ間の同期精度と推定精度との関係を明らかにする。また，周辺車両の挙動推定においては，ビデオ画像データとレーザ測距データとを併用する方式を新たに提案する。さらに，これらの推定アルゴリズムの精度を厳密に検証するための測位および計時手法を提案し，それを適用した実験車の測位精度の検証結果を報告する。

2 実験車に搭載された計測・記録システムの構成

従来は，各地点の通過を手動で入力したり，各機器個別の時刻信号に依拠して，収集データを同期させていた。このような同期方式では，周辺車両を含む微視的な走行挙動計測を行なうに足る推定精度を実現することは困難であった。各センサによる計測データ，および動画像データを統合処理する場合には，同期誤差と移動速度とに比例する測位誤差が発生するからである。

例えば60km/hで走行中には，ビデオ画像の撮影周期である1/29.97秒（1フレーム）の同期誤差が0.56mの測位誤差をもたらす。静止時のRTK測位の

精度が数cm程度であることと比較すると、この誤差は非常に大きい。

図-1に、実験車の全景を示す。本実験車では、GPS同期信号発生装置により生成される同期(Black Burst with Sync)信号とタイムコードとにより、搭載している全ての計測データ、およびCCDカメラの記録周期を同期し、各フレームおよび各データにタイムコードが記録される。このように高精度、かつ自動で同期記録をとることにより、同期精度が大幅に向上し、より詳細な走行挙動計測を可能としている。

2.2 搭載計測機器の機能^{(4) (5)}

1) 速度計測計

実験車の速度をスリップ防止用のセンサより速度パルスで出力する。パルスは変換係数により速度に換算される。

2) 3軸ジャイロ加速度計

各々3個の振動ジャイロおよび1軸加速度センサを直交配置することにより、移動体の3次元の角速度および加速度を計測することができる。

3) GPS受信装置

本システムの測位に用いる。搭載受信機は高精度な測位が可能なキネマティック測位機能を有する。キネマティック測位では基地局との距離に比例して測位精度が低下する。そのため、本システムではリアルタイムキネマティック(RTK)処理に携帯電話接続による仮想電子基準点(VRS)方式を用いて、既設電子基準点までの距離による精度低下を回避している。

RTK測位ではアンテナから広い範囲の上空が見渡せなければならず、山間部やビルの谷間等、GPS衛星の捕捉が困難な地点や携帯電話電波を受信しにくい地点では高精度な位置測定は保証されない。

携帯電話接続によるVRS方式では、携帯電話回線の伝送遅延により、位置情報の記録に数フレーム分の遅延が発生することがある。そのため、GPS同期信号発生装置に基づく時刻とGPSメッセージに含まれる時刻とを照合し、同期誤差が最大でも1



図-1 実験車

フレーム未満となるように事後処理する。統合処理には、WGS-84系にて計測される緯度、経度を平面直角座標系に変換し適用する。

4) 車間距離計

実験車の前後端部に埋め込まれたレーザ受発光装置から照射されたレーザが前方車後部及び後方車前部に反射して受光されるまでの時間から、それぞれの車間距離を計測する。本実験車では60m程度までの車間距離が計測可能である。

レーザによる測距においては、計測対象範囲が狭いため、カーブ区間などでは前方車を捕捉できない場合も少なくない。そこで、レーザ測距装置を補完する目的で、次項のCCDカメラにより取得した動画像データを処理し、広範囲の車間距離計測を実現している。

5) 順次走査方式カメラ

周辺車両の相対位置推定を画像処理によって行なうために、実験車上部のルーフキャリア内に2台、および前方後方車計測用に車内に2台の計4台の順次走査方式CCDカメラを搭載している。映像は車内に設置したVCRにて録画する。順次走査方式では全画素読み出しを行なうため、解像度は飛び越し走査方式カメラに比べ2倍となる。

図-2に各カメラの指向方向を示す。撮影範囲は各カメラともに約100～80mである。

2.3 計測データの記録と同期の方法

GPS同期信号発生装置と各計測機器の接続図を図-3に示す。GPS同期信号発生装置はGPS受信波を

利用するため、GPS受信波に同期した時計を持つ機器と、隔絶した複数の地点間や固定点～移動体間においても簡便かつ高精度な同期計測・記録を実現できる。これにより、例えば車外の同期信号を入力した固定ビデオカメラで撮影した動画像データと本実験車の計測データとの照合も可能である。

3 実験車の走行挙動推定

実験車搭載機器による計測データには偶然誤差

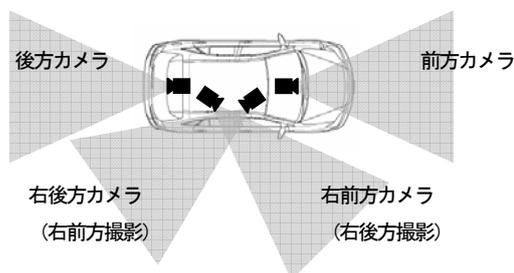


図-2 CCDカメラ指向方向

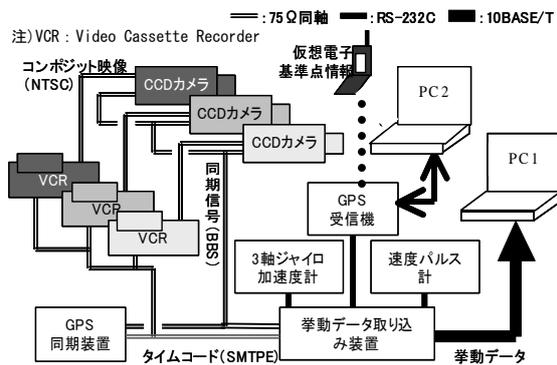


図-3 搭載機器の配線略図

および偏りが含まれる。GPSによる測位では、トンネル内やビルに囲まれた区間などGPS波の受信状況が悪化する場所では、欠測が避けられない。そうした状況下でも走行挙動を推定するため、拡張カルマンスムーザ（EKS）を適用し、GPS測位値、速度および加速度の計測値を、同一車両の走行挙動に関する情報として統合しつつ平滑化する。これにより、計測誤差の影響を低減し、欠測デー

タ（他計測機器との計測周期の差による短時間の欠測も含む）を補完し、連続した走行軌跡を最小二乗推定する。

EKSの特徴は時々刻々与えられる計測データを用いて、直接計測することが困難であっても動的システムの状態量を逐次的に推定することが可能なことである⁽⁸⁾。動的なシステムを記述する状態方程式には、加速度の時間積分が速度の時間変動、速度の時間積分が位置の時間変動などの状態量間の物理的関係を、明示的に取り込むことができる。また、計測値と状態量との相互関係から、観測方程式が構成される。

観測方程式においては、各センサの仕様や計測精度の検証結果を、各計測データの誤差分散値の設定により、推定処理に反映できる。さらに、本システムでは、GPS測位データ等の欠測区間において誤差分散値を非常に大きく設定することで、処理過程の連続性を維持しつつ、推定精度を確保している^{(2) (6)}。

本実験車のようにデータ蓄積装置を持ち、事後解析処理が許容される場合には、実時間処理では一般的なフィルタリング処理にとどまらず、スムージング処理が適用可能となる。スムージング処理では、ある時点 k における状態量 $x(k)$ を、時点 k およびそれより前の計測データだけではなく、時点 k より後の計測データも取り入れて推定することができるため、推定精度は格段に向上する。また、欠測区間における補間性能も高い。

3.1 6自由度運動状態量のEKSモデル

図-4に、実験車のGPSアンテナ位置を原点とする実験車移動座標系の概念図を示す。並進運動は車の進行方向を 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 ρ 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。

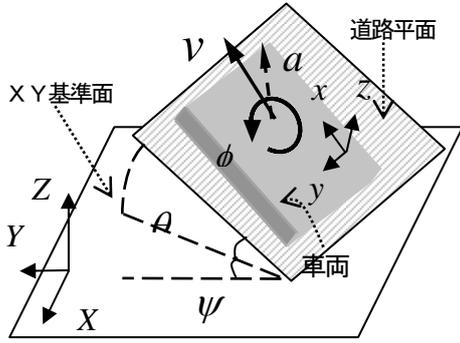


図-4 実験車の局地座標

式(1)と式(2)とは、本研究のEKS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実験車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。

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

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

ここに、

t : 時刻, Δt : 計測周期 (1/29.97秒),

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

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

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

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

$$\bar{x}(t) = [\bar{x}_p(t) \quad \bar{x}_r(t) \quad \bar{B}_\omega(t) \quad \bar{B}_I(t) \quad \bar{B}_v(t)]^T,$$

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

$$\bar{p}(t) = [X(t) \quad Y(t) \quad Z(t)]^T: \text{3次元位置座標},$$

$$\bar{v}(t) = [\dot{X}(t) \quad \dot{Y}(t) \quad \dot{Z}(t)]^T: \text{3次元速度},$$

$$\bar{a}(t) = [\ddot{X}(t) \quad \ddot{Y}(t) \quad \ddot{Z}(t)]^T: \text{3次元加速度},$$

$$\bar{\omega}^m(t) = [\ddot{X}(t) \quad \ddot{Y}(t) \quad \ddot{Z}(t)]^T: \text{3次元jerk},$$

$$\bar{x}_r(t) = [\bar{r}(t) \quad \bar{\theta}(t) \quad \bar{\phi}(t)]^T,$$

$$\bar{r}(t) = [\psi(t) \quad \theta(t) \quad \phi(t)]^T: \text{3次元姿勢角},$$

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

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

$$\bar{B}_p(t): \text{重力による加速度の偏り}$$

(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),

$$B_v: \text{速度計測値の偏り}$$

(車両局地座標系におけるx軸方向1次元ベクトル),

$$\bar{w}(t): \text{不規則変動成分ベクトル}$$

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

$$\bar{h}(t) =$$

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

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

: 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

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

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

: 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,

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

である。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 $\bar{e}(t)$ 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。

4 周辺車の走行挙動推定

実験車搭載のビデオカメラにより周辺車を撮影し、事後画像処理により周辺車両の特徴点の画面

座標を各ビデオフレームにおいて連続取得する。これから、EKSを用いて実験車のGPSアンテナ位置を原点とする局所座標系において、実験車と周辺車との相対的な位置関係を推定する。さらに、この推定値を実験車の位置、姿勢角情報に基づいて、世界座標系上に変換することにより、周辺車の走行挙動を推定する⁽⁷⁾。この方式では、ビデオ画面上の周辺車の挙動を広角度にわたり計測可能であり、レーザ測距装置等に走査機構を付加するよりも簡便である。また、推定した走行挙動データをビデオ画面上の推定対象車や道路・交通状況の画像と高い時間精度で比較・照合できることも特徴である。また、本手法ではステレオカメラ方式に比べ、より少数のカメラでより広い範囲を撮影することが可能である。

図-5のように実験車の局所座標系はカメラの進行方向（実験車の進行方向と平行な軸）を x 、車の上方向を z 、実験車に左向きの軸を y とする右手座

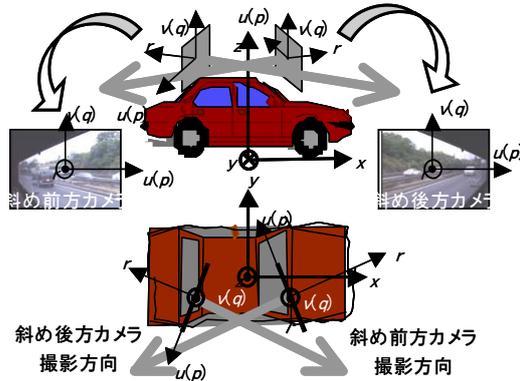


図-5 実験車による周辺車の計測

標系とする。実験車移動座標系 x, y, z は原点が車載カメラ位置であること以外は、図-4と同様である。画像座標系 (u, v) を、画像の中心を原点として u の向きを画像の右方向、 v の向きを画像の上方向とすると、カメラの姿勢角(3軸回りの取り付け角度 a, b, c)と焦点距離 (f) 、カメラ取り付け高さ(特徴点の高さとカメラの取り付け高さの差)を用いて実験車座標に変換することができる。しかし並走状態や追従走行状態のように、特徴点の

変動量が小さい場合には変換誤差が大きくなるため、本システムではレーザ測距値と併せて最小二乗推定を行なう。

4.1 EKSによる統合平滑化処理

式(3)は、実験車局所座標系における周辺車両の水平面上の2次元並進運動、カメラ・パラメータおよびビデオ画像上における特徴点～レーザ照射点間の距離 s の差分方程式を含む状態方程式である。式(4)は、周辺車両のビデオ座標値とレーザ測距値とから成る計測値と、状態方程式(3)に含まれる周辺車の位置、速度などの状態量との関係を記述する観測方程式である。

$$\begin{aligned} \bar{x}^{sr}(t+\Delta) &= \mathbf{F}_{sr}(t) \left[\bar{x}_p^{sr}(t) \quad \bar{d}(t) \right]^T + \bar{w}^{sr}(t) \quad (3) \\ \bar{y}^m(t) &= \bar{h}^{sr} \left(\bar{x}^{sr}(t) \right) + \bar{e}^{sr}(t) \quad (4) \end{aligned}$$

ここに、

$$\begin{aligned} t: & \text{時刻, } \Delta t: \text{計測周期 (1/29.97秒)}, \\ \mathbf{F}_{sr}(t) &= \text{diag}(\mathbf{F}_s, \mathbf{E}, \mathbf{E}, \mathbf{E}), \\ \mathbf{E} &= \text{diag}(1, 1), \quad \mathbf{O} = \text{diag}(0, 0), \\ \mathbf{F}_s &= \begin{bmatrix} \mathbf{E} & \mathbf{D} & \mathbf{C} & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \mathbf{E} & \mathbf{D} & \mathbf{C} \\ \mathbf{O} & \mathbf{O} & \mathbf{E} & \mathbf{D} \\ \mathbf{O} & \mathbf{O} & \mathbf{O} & \mathbf{E} \end{bmatrix}, \\ \mathbf{D} &= \text{diag}(\Delta t, \Delta t), \quad \mathbf{C} = \text{diag}(\Delta t^2/2, \Delta t^2/2), \\ \bar{x}_p^{sr}(t) &= \left[\bar{p}^{sr}(t) \quad \bar{p}^{sr}(t) \quad \bar{p}^{sr}(t) \quad \bar{p}^{sr}(t) \right]^T, \\ \bar{d}(t) &= \left[z^{sr}(t) \quad a \quad b \quad c \quad f \quad s(t) \right]^T, \\ \bar{p}^{sr}(t) &= \left[x^{sr}(t) \quad y^{sr}(t) \right]^T: \text{2次元位置座標,} \\ \dot{\bar{p}}^{sr}(t) &= \left[\dot{x}^{sr}(t) \quad \dot{y}^{sr}(t) \right]^T: \text{2次元速度,} \\ \ddot{\bar{p}}^{sr}(t) &= \left[\ddot{x}^{sr}(t) \quad \ddot{y}^{sr}(t) \right]^T: \text{2次元加速度,} \\ \overset{\circ}{\bar{p}}^{sr}(t) &= \left[\overset{\circ}{x}^{sr}(t) \quad \overset{\circ}{y}^{sr}(t) \right]^T: \text{2次元jerk,} \\ z^{sr}(t) &: \text{カメラ設置位置と特徴点の高さ} \\ \bar{x}_p^{sr}(t) &= \left[\bar{p}^{sr}(t) \quad \dot{\bar{p}}^{sr}(t) \quad \ddot{\bar{p}}^{sr}(t) \quad \overset{\circ}{\bar{p}}^{sr}(t) \right]^T, \\ \bar{d}(t) &= \left[z^{sr}(t) \quad a \quad b \quad c \quad f \quad s(t) \right]^T, \\ \bar{p}^{sr}(t) &= \left[x^{sr}(t) \quad y^{sr}(t) \right]^T: \text{2次元位置座標,} \\ \dot{\bar{p}}^{sr}(t) &= \left[\dot{x}^{sr}(t) \quad \dot{y}^{sr}(t) \right]^T: \text{2次元速度,} \\ \ddot{\bar{p}}^{sr}(t) &= \left[\ddot{x}^{sr}(t) \quad \ddot{y}^{sr}(t) \right]^T: \text{2次元加速度,} \\ \overset{\circ}{\bar{p}}^{sr}(t) &= \left[\overset{\circ}{x}^{sr}(t) \quad \overset{\circ}{y}^{sr}(t) \right]^T: \text{2次元jerk,} \\ z^{sr}(t) &: \text{カメラ設置位置と特徴点の高さの差,} \\ s(t) &: \text{レーザ照射点～特徴点間の距離,} \end{aligned}$$

$z^{SR}(t)$: カメラ設置位置と特徴点の高さの差,
 $s(t)$: レーザ照射点～特徴点間の距離,
 a : カメラの取付け角 (y軸周り) ,
 b : カメラの取付け角 (z軸周り) ,
 c : カメラの取付け角 (x軸周り) ,
 f : カメラレンズの焦点距離,
 $\bar{w}^{SR}(t)$: 不規則変動成分ベクトル,
 $\bar{y}^m(t) = [u(t) \ v(t) \ l(t)]^T$,
 $u(t)$: 特徴点のビデオ画面上の水平座標値,
 $v(t)$: 特徴点のビデオ画面上の垂直座標値,
 $l(t)$: レーザ測距値,

$$\bar{h}(t) = \begin{bmatrix} f \frac{m_u}{n} & f \frac{m_v}{n} & \sqrt{(x^{SR}(t))^2 + (y^{SR}(t))^2} + s(t) \end{bmatrix}^T,$$

$$m_u = \begin{bmatrix} \cos(a)\cos(a) \\ \sin(b)\sin(a)\cos(c) + \cos(a)\sin(c) \\ -\sin(b)\sin(a)\cos(c) + \cos(a)\sin(c) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} y^{SR}(t) \\ z_{grd}(t) \\ x^{SR}(t) \end{bmatrix},$$

$$m_v = \begin{bmatrix} -\cos(b)\sin(a) \\ \sin(b)\sin(a)\cos(c) + \cos(a)\cos(c) \\ \sin(b)\cos(a)\sin(c) + \sin(a)\cos(c) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} y^{SR}(t) \\ z_{grd}(t) \\ x^{SR}(t) \end{bmatrix},$$

$$n = \begin{bmatrix} \sin(b) \\ -\cos(b)\sin(a) \\ \sin(b)\cos(a) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} y^{SR}(t) & z_{grd}(t) & x^{SR}(t) \end{bmatrix}^T,$$

$z_{grd}(t)$: 特徴点の路面からの高さ,
 $\bar{e}^{SR}(t)$: 計測誤差ベクトル

である。

EKS を適用して推定した実験車座標系における周辺車の水平面上の位置を、2次元回転変換行列により座標回転させ、実験車座標系原点を自車位置にとることで、世界座標系における周辺車の位置に変換する。

周辺車の挙動を推定するにあたり、実験車に設定した局所座標系における各カメラの姿勢角を初期設定しなければならない。カメラの姿勢角は実験車に設定した局所座標系上での傾きを計測することにより得られるが、それを直接計測することは困難である。そこで、実験車座標系上に位置が既知の基準点を設定し、画面座標値 u, v から変換計算される座標値 x, y, z とその基準点座標値との二乗誤差を最小化することにより、カメラ・パラメータ値を推定する。カメラ設置位置と特徴点の

高さの差 $z^{SR}(t)$ およびレーザ照射点と特徴点間の距離の初期値は、ビデオ画面における各位置の関係に基づいておおよそその値を設定する。この際に、レーザ照射点の位置は、車両後端のレフレクタを目安にする。不規則変動成分ベクトル $\bar{w}^{SR}(t)$ と計測誤差ベクトル $\bar{e}^{SR}(t)$ の分散共分散行列の各要素の値は、実験車の挙動推定と同様に設定している。

5 走行挙動の推定精度の検証

キネマティック測位は、基本的には準静止状態にある移動局の測量（一般的に数 cm 程度の測位精度が期待できる）に適用されており、比較的高速で走行中の車上においては測位精度が十分に検証されているとは言えない。そこで、統合平滑化処理による挙動推定精度とともに、移動時における実験車搭載の GPS 測位精度を検証するため、試験道路上において走行実験を行った。

本実験では RTK-GPS 測位の Fix 解が得られた走行データを用いて精度検証を行なう。

5.1. 測位精度の検証方法

道路上に目盛間隔が 5mm の巻尺を 200m に渡り貼りつけ、これを基準軸として路面に局所直交座標系を設定した。路面に対向して CCD カメラを取り付けた実験車と並走車とで、その巻尺を録画しながら走行した。両者の路面撮影用カメラにも GPS 同期信号とタイムコードとを入力し、実験車による自車および周辺車両の挙動計測値との同期をとった。巻尺の各目盛の位置をトータルステーション (TS) により 2m 間隔で精密測量し、TS 基準点を RTK-GPS で静止測量したうえで TS 局地座標系を WGS-84 座標系に統合し、実験車の測位結



図-6 路面撮影カメラと路面の巻尺

果と比較した。図-6 に、路面撮影用カメラを取り付けた実験車と路面に貼り付けた巻尺を示す。

5.2 RTK-GPS 測位時の実験車の走行挙動推定精度の検証

1) GPS 欠測時の実験車の測位精度

図-7、図-8 に、VRS 方式 RTK-GPS 測位および EKS 統合平滑化処理による測位の TS 測量結果に対する誤差の比較を示す。同図に示す結果は、巻尺手前から走行を開始し、走行開始後約 9 秒で巻尺上に到達し、同約 24 秒で巻尺終端に至り、その後停止した走行したケースである。EKS アルゴリズムには、走行開始から巻尺末端位置通過後 4 秒までの計測データを入力した。欠測区間は GPS 測位データを仮想的に無効化し、観測誤算分散値を十分大きな値として統合平滑化処理を行った。

仮想欠測時間の約 6 秒は、VRS 方式において GPS 衛星信号が途絶してから RTK 測位が回復するまでに要する時間よりは短い、DGPS 計測状態への回復所要時間とは同程度と想定される。統合平滑化処理において DGPS 測位に対応した計測誤差を設定すれば、同測位値を走行挙動推定に適用できるので、GPS 測位の実際の欠測状況においても、図-8 と同様に推定の安定性の維持は可能と期待される。

RTK-GPS 測位、EKS 推定ともに走行速度に比例して誤差が増大する傾向にあるが、その絶対値は最大でも 20cm 程度であった。これは、図-7 において走行速度が 60km/h 程度に達して概ね定速走行に移行してからは誤差が増大していないことも考慮すると、GPS 測位において走行速度に比例して発生する誤差に、主に起因しているものと推定される。また、誤差の短周期の変動は、巻尺の目盛の読み取り誤差に起因すると考えられる。

欠測ありでは欠測区間における誤差が増大しているが、その他の区間では大きな影響は見られない。この結果は、本実験車の統合平滑化処理の補完機能の有効性を示している。さらに、図-8 より、本実験車搭載の GPS 受信機による VRS 方式 RTK-GPS 測位は 1/5 秒間隔であるが、EKS 推定で

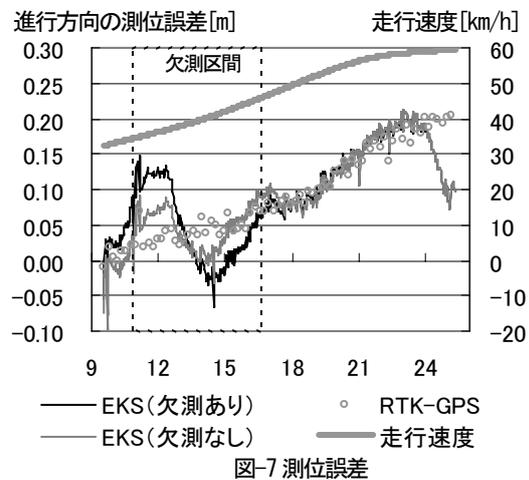


図-7 測位誤差

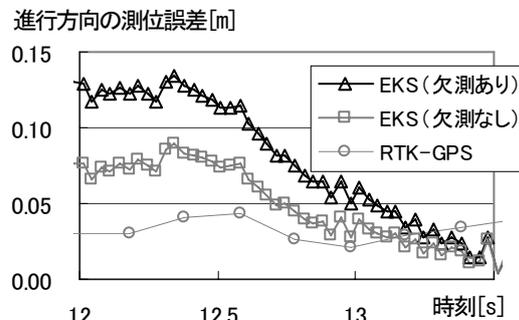


図-8 測位誤差 (拡大表示)

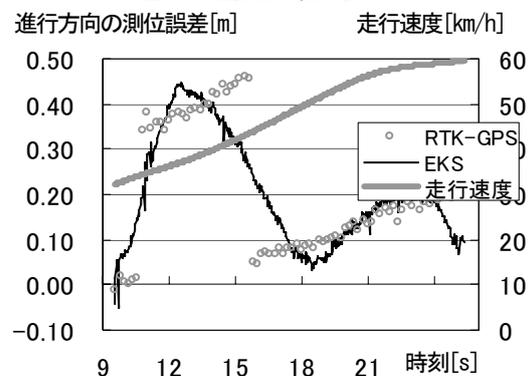


図-9 同期精度の低下がある場合の測位誤差

は速度や加速度などの他の計測値と整合した 1/29.97 秒間隔の位置推定値が得られる。

2) 同期精度と測位精度との関係

図-9 に、2)の欠測区間において GPS 測位データのみが 1 フレーム遅れて記録されたと仮定し、統合平滑化処理を行った結果を示す。当該区間の

GPS 測位データの計測誤差分散値は、同期誤差の大きさが未知であるとの仮定のもと、他の区間よりも大きめに設定し統合平滑化処理を適用した。同期精度低下区間における走行速度は約40km/hであり、GPS 測位データの誤差が0.3mを超えていることは、1フレームの時間で進行する距離と一致する。統合平滑化処理により、当該区間での測位誤差の変化は連続するものとなったが、同期誤差の影響を皆無にすることはできない。一般的には、系統的な同期が行われていない複数の計測・記録機器間の同期誤差を定量的に把握することは困難であり、その場合には統合平滑化処理においても図-9のような精度低下が発生し得る。したがって、高精度な同期は極めて重要である。

3) 転回時の走行挙動推定

図-10に転回時の走行速度、方位角（進行方向が北となす角）、北方向加速度、東方向加速度を示す。図-10は、西から東へ進行した後、回転半径5mで左回りに転回し西へ進行した走行である。なお、全時間に渡り1/5秒間隔でGPS測位が行われた。

当該区間には巻尺を設置しておらず、TS測量値との比較は行っていない。しかし、少なくとも実験車の実際の転回状況等と整合する推定値が得られることは確認できた。

5.4 周辺車の走行挙動推定精度の検証

1) 先行車の測位結果

停止・発進を含む追従走行を模した走行について、図-11に車間距離と測位誤差、自車速度と測位誤差、相対速度と測位誤差の関係を、先行車が巻尺上に到達した時刻を0秒として示す。世界座標系に統合するための実験車挙動値は、GPS欠測を伴わない走行時の統合平滑化処理による推定値を用いた。実験車は前方車に追従し、両車とも速度約30km/hから減速し、一旦停止の後再び30km/h程度まで加速した挙動である。なお、実験車の測位誤差の影響を除去するため、世界座標系に統合した前方車の挙動推定結果とTS測量結果との差から、実験車の測位誤差を相殺して示す。

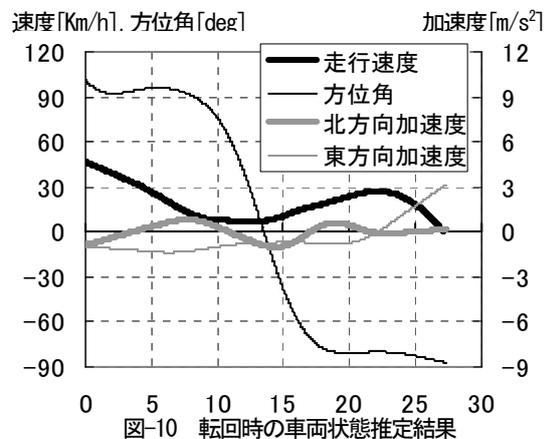


図-10 転回時の車両状態推定結果

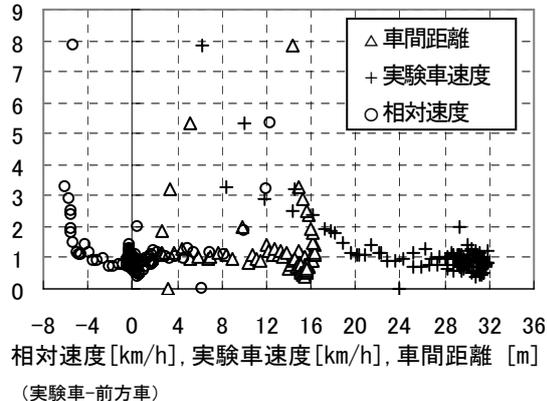


図-11 車間距離、実験車速度、相対速度と測位誤差の関係

隣接車線走行車両の走行挙動推定結果

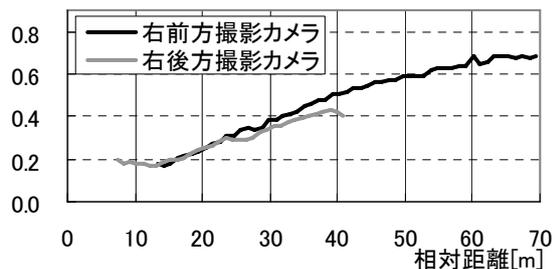


図-13 隣接車線走行車両の走行挙動推定結果

図-11、図-12より実験車の走行時には、車間距離に関わらず1m程度の測位誤差となった。しかし、実験車が停止したために、前方車との相対速度が増大する場合には測位誤差も増大した。これは、式(1)と式(2)に示す実験車挙動の推定モデル

ルが、停止・発進を含む走行挙動推定に十分対応できていないためと考えられる。

2) 並走車の測位結果

図-13に、並走車が実験車とすれ違う挙動を模し、静止状態の実験車に隣接する車線を、対向して走行する周辺車の測位誤差を示す。周辺車は速度約60km/hで走行し、実験車からは右前方撮影カメラで3.5秒間、右後方撮影カメラで2.5秒間捕捉することができた。同図から、実験車との相対距離にほぼ比例して、測位誤差が0.2mから0.7m程度変動したことがわかる。

6 まとめ

本研究では道路構造と車両挙動の関係を周辺車との相互関係を計測するため、種々の計測機器を搭載した実験車を構築した。本実験車では、計測データはGPS信号発生装置により生成される同期信号により1/29.97秒間隔で同期記録し、同期誤差の発生を抑制した。さらに各種センサによる計測値を、計測誤差を合理的に処理しつつ統合し、GPS欠測時においても1/29.97秒単位で測位可能なシステムとするべく、車両の運動を状態方程式で、状態量と観測値との関係を観測方程式で記述し、これらに拡張カルマンスムーザを適用し、車両挙動を最小二乗推定した。車両の挙動推定結果に対し、精密測量値に基づく測位精度検証を行い、実験車と周辺車の測位精度を確認した結果、GPS測位時、欠測時ともに実験車の測位誤差が最大でも0.3m程度であることを、周辺車両の挙動を推定した結果、測位誤差が相対距離40mにおいて最大でも0.5m程度であることを確認した。本実験車の測位手法は、道路構造と走行挙動との関係や周辺車との相互作用の計測のみならず、3次元道路地図作成の効率的なデータ収集ツールとしての応用も可能である。今後の課題は、後方車両の挙動推定、GPS測位が困難な道路区間における推定精度の向上が挙げられる。さらに本実験車を用いて、安全運転サービスが必要とされる合流部などクリティカルな道路区

間において走行実験を実施し、運転感覚と整合する挙動データの収集への適用を考える。

本研究に対しは、東京大学生産技術研究所・西川功技官、国土交通省国土技術政策総合研究所ITS研究室および千葉工業大学・小泉俊男教授より多大なる支援を受けた。ここに謝意を表す。

参考文献

- (1) H. Akahane, S. Hatakenaka: Successive Observations of Trajectories of Vehicles with Plural Video Cameras, International Journal of ITS Research, Vol.2, No.1, pp.47-53, 2004.
- (2) 赤羽弘和, 大庭孝之, 桑原雅夫, 越正毅: 車の走行挙動計測システム, 土木計画学研究・講演集, No.11, pp.63-70, 1988.
- (3) Gurusinge, G., 横糸昌典, 中辻隆, 吾田洋一: RTK-GPSを用いた車追従試験と車群中の反応時間特性, 第21回交通工学研究発表会論文報告集, pp.213-216, 2001.
- (4) 西川功, 野田隆, 桑原雅夫, 赤羽弘和, 大口敬: 運転挙動の計測システム搭載実験車とデータ処理システムの開発, 第26回土木計画学研究・講演集, 2002.
- (5) T. Oguchi, H. Akahane, I. Nishikawa and M. Kuwahara: Development of an experimental vehicle for evaluating highway traffic composed of automobiles with and without adaptive cruise control systems. 30th FISITA 2004 World Automotive Congress, No. F2004I046, CD-ROM, 2004.
- (6) 小宮粹史, 大口敬, 赤羽弘和, 桑原雅夫: GPS測位に基づく自動車および周辺車両走行挙動計測システムの開発, 交通工学研究発表会論文報告集, pp.21-24, 2004
- (7) 小宮粹史, 大口敬, 赤羽弘和, 堀口良太, 桑原雅夫: 時空間連続計測車による周辺車両の走行挙動計測, 第4回ITSシンポジウム2005論文集, pp.449-454, 2005
- (8) 片山徹: 新版 応用カルマンフィルタ, 朝倉書店, 2000