

実験車両による実道路における車両走行挙動の連続観測

An experimental vehicle for continuously observing running behavior of vehicles on actual roads

小宮 粹史*・大口 敬**・赤羽 弘和*・堀口 良太***・桑原 雅夫****

Tadashi KOMIYA, Takashi OGUCHI, Hirokazu AKAHANE, Ryota HORIGUCHI and Masao KUWAHARA

1. はじめに

車間距離・走行速度制御、車線逸脱防止など従来より高度な予防安全運転技術が実用化され、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、安全運転支援の利用車と非利用車とが混在することが想定される。利用車と非利用車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期待通りの機能を発揮するためには、道路構造との関係において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挙動を、高精度な走行位置情報とともに計測・記録する仕組みを開発する必要がある。

従来、道路断面における車両の走行速度、車頭時間（交通流率）の計測には車両感知器や地点画像計測が、一定の長さの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。最近では、個々の車両の走行軌跡の長区間連続観測に、路側に設置したカメラによるビデオ画像データの適用する手法が広がりつつある⁽¹⁾。

一方、運転者に対する道路幾何構造や交通信号などの影響、あるいは運転者と周辺の車両の相互作用などを、たとえば1秒未満の高い時間解像度で比較的長い区間にわたり連続的に観測する必要性のある交通現象も存在する。このような交通流内部からの微視的な観測用には、各種計測機器を搭載した実験車両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台の実験車両の相対距離をレーザ車間距離計で計測し、カルマン smoother 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⁽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 を移動車両に適用を試みた実験車両を試験走路において走行実験を行っ

ている。しかし文献⁽²⁾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観測に適用することは困難であった。一方、文献⁽³⁾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、移動体の RTK-GPS による測位は極めて不安定であることが知られており、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有し、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、従来の走行実験車両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、実験車両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観測には十分に対応していなかった。

本研究では被験運転者と周辺走行車両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 1/30 秒、測位精度数 10cm 程度の長区間連続観測を目指し、各種観測機器を実験車両に搭載した時空間連続観測システムを構築した⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾。本稿では、実験車両と観測システムの概要、および実験車両の測位精度の検証結果を報告する。



図1 実験車両

*千葉工業大学

**首都大学東京大学院都市環境科学研究科

***(株)アイ・トランスポート・ラボ

****東京大学生産技術研究所 先進モビリティ連携研究センター

2. 実験車両システムの構築

2.1. 搭載計測機器の機能

2.1.1. 速度計測計

実験車両の速走行度を、スリップ防止用のセンサより速度パルスとして取得している。本装置の計測分解能は他機器と比較して低いため、空間フィルタ式対地速度計の追加搭載を予定している。

2.1.2. 3軸ジャイロ加速度計

各々3個の振動ジャイロ及び高精度加速度センサ直交配置することにより、移動体の3軸まわりの角度、角速度、および3軸加速度を計測することができる。

2.1.3. RTK-GPS 受信装置

キネマティック測位では、基地局との距離が大きくなると精度が低下する。そのため、移動局の概略位置に仮想電子基準点(VRS)を設置し、そこで受信されるであろうGPSデータを実基準点におけるGPSデータに基づいて演算処理で生成し、それを携帯電話回線等で移動局に伝送することにより、任意の位置で高精度なりアルタイムキネマティック(RTK)測位が行われるようになってきている。しかし、実験車両は比較的高速で移動するため、山間部やビルの谷間等において携帯電話によるデータ伝送状況が悪化することにより、VRS利用方式であってもRTK処理で測位精度を維持することは困難である。

2.1.4. 車間距離計

実験車両の前後端部に埋め込まれたレーザ受発光装置から発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。本実験車両では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データ処理し、広範囲の車間距離計測を実現している。

2.1.5. CCDカメラ

周辺車両の相対位置計測を画像処理によって行なうために、実験車両上部のルーフキャリア内に2台、および前方

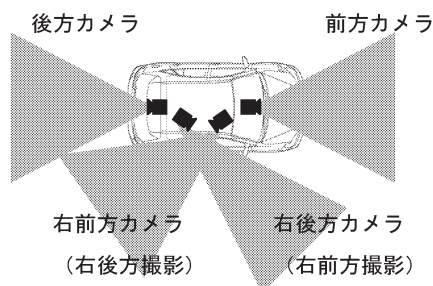


図2 CCDカメラ指向方向

後方車計測用に車内に2台の計4台のプログレッシブ方式CCDカメラを搭載している。プログレッシブ方式では全画素読み出しを行うため、計測分解能は飛び越し走査であるインターレースカメラに比べ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。

2.2. 観測データの同期

各センサによる計測データ、および動画データ統合処理する場合には、それらが同期記録されないと移動速度に比例して図3のような計測誤差が発生する。

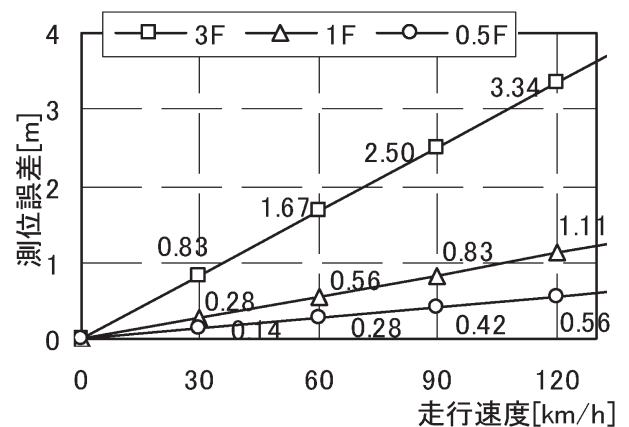


図3 同期誤差と測位誤差との関係

例えば60km/hで走行中には、1F(約1/30秒)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。このように、高精度な同期計測・記録は、移動体の挙動把握には不可欠である。

本実験車両では、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(SMPTEフォーマット29.97Hzドロップフレーム)により、搭載している全ての観測データが1/30秒(厳密には1/29.97秒)周期で高精度に同期記録される。また、CCDカメラのフレーミングも同期し、各フレーム・データにタイムコード

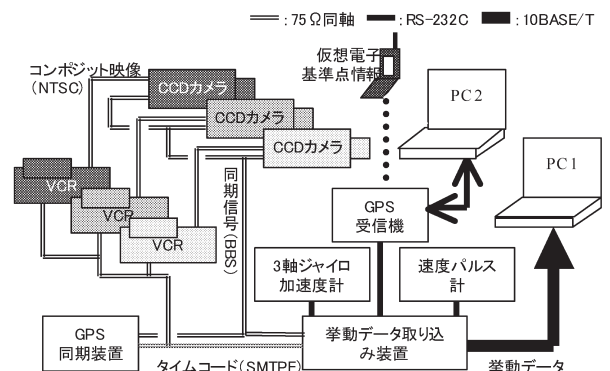


図4 実験車両搭載機器配線略図

が記録される。計測機器との接続図を図4に示す。

GPS同期信号発生装置はGPS受信波を利用するため、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観測・記録を実現できる。これにより、車外の固定ビデオカメラで撮影した動画データと本実験車両の観測データとの照合が容易である。

3. 実験車両の走行挙動推定アルゴリズム

3.1. 挙動推定アルゴリズム

実験車両への搭載機器による観測データには偶然誤差及び定誤差が含まれる。また、GPS受信装置による測位では、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。そのため、これらの誤差の影響を低減し、欠測データを補完することにより、連続した走行軌跡データを生成するために拡張カルマン smoother による統合平滑化処理を行なう。この処理アルゴリズムの特徴は次の通りである。

- ① 観測値諸量間の物理的相互関係を、処理に明示的に反映できる。
- ② ある時点の状態推定に、それよりも後で取得した観測データを含む全データを反映できる。
- ③ 観測値の精度を、観測誤差分散値の設定により、推定処理に明示的に取り込める。

3.2. 実走行データの統合処理結果

図5は、首都高速都心環状線内回り一ノ橋ジャンクション付近における、本実験車両の本線、合流車線の走行結果である。図中の白丸はK-GPS測位結果を表す。K-GPS測位の周期は1秒であるが、統合平滑化処理により1/30秒単位に連続的な走行軌跡を推定することができる。



図5 推定された走行軌跡

3.3. 周辺車両の走行挙動推定

実験車両搭載のGPS同期したCCDカメラにより周辺車両を撮影し、その動画上で周辺車両の特徴点の画面座標を連続取得する。これから、拡張カルマン smoother を用い、

実験車両の重心を原点とする局所座標系における周辺車両の位置を推定する。さらに、この推定値を実験車両の位置と回転角の推定値に基づいて、世界座標系における座標値に変換する。

この方式は、基本的にはビデオカメラで捕捉さえできれば、実験車両と様々な位置関係にある周辺車両の挙動を推定可能である。また、レーザ測距装置等に走査機構を付加して観測範囲を拡大するよりも簡便である。さらに、たとえ間欠的にはあってもレーザ測距データが取得できる場合には、それを画面座標値とともに観測値として拡張カルマン smoother に入力できる。推定した走行挙動データをビデオ画面上の推定対象車両や道路・交通状況の画像と高い時間精度で比較・照合することも特徴である。図6に本実験車両で計測した周辺車両の走行軌跡の一例を示す。

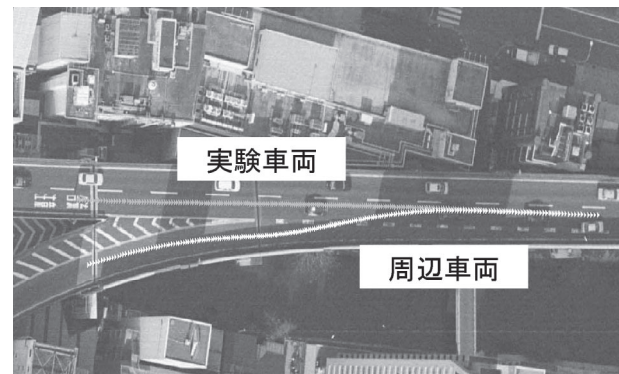


図6 周辺車両の走行軌跡

4. 推定精度の精度検証

RTK-GPS測位あるいはK-GPS測位は、基本的には準静止状態にある移動局の測量に適用されており、比較的高速で走行中の車両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測位精度とともに、移動時における実験車両搭載の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。

4.1. 測位精度の検証方法

道路上に目盛間隔が5mmの巻尺を貼りつけ、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両で、その巻尺を録画しながら走行した。路面撮影用CCDカメラにもGPS同期信号とタイムコードとを入力し、実験車両による測位データとの同期をとった。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局地座標系を世界座標系(WGS-84)に統合し、実験車両の測位結果と比較した。

実験を行った試験走路と路面に貼り付けた巻尺の写真を図7に、路面撮影カメラを取り付けた実験車両を図8に示



図 7 試験走路と路面の巻尺

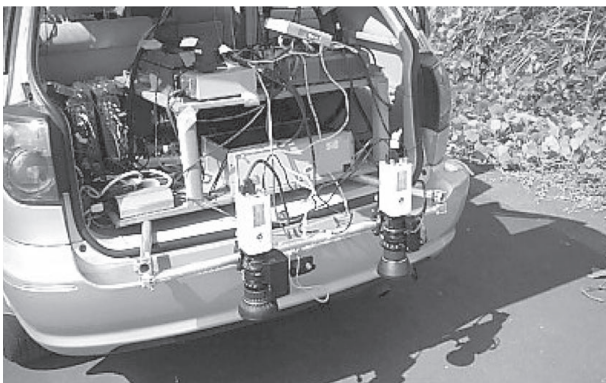


図 8 路面撮影カメラ

す。

4.2. 測位精度の検証結果

4.2.1. 実験車両の測位結果 (GPS 欠測なし)

図 9 に VRS 方式の RTK-GPS 測位の結果, 拡張カルマン smoother による統合平滑化処理結果, および巻き尺目盛の精密測量結果との比較を示す。

図 9 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である。 smoother では, 走行開始から巻尺末端位置通過後 4 秒までの観測データを入力した。 VRS 方式の RTK-GPS 測位, 統合平滑化処理ともに走行速度に比例して誤差が増大する傾向があるが, その絶対値は最大でも 20cm 程度であった。 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。

4.2.2. 実験車両の測位結果 (GPS 欠測あり)

4.2.1 の GPS 測位データに, 仮想的に 5 秒間の欠測区間 (長さ約 54m) を設定し, 統合平滑化処理を実行した。 図 10 に, その処理結果と巻き尺目盛の精密測量結果との比較を示す。 当該区間の GPS 測位データの観測誤算分散値は, 十分大きな値とし, 速度, 加速度の計測値に基づき処理を行った。 欠測区間がない場合と比べ, 同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, 本実験車両の統合平滑化処理の

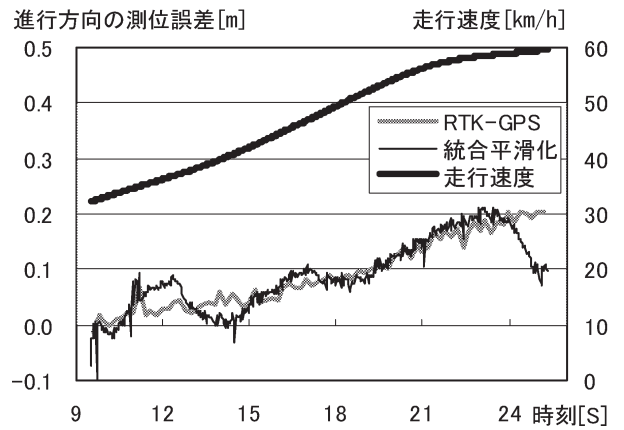


図 9 測位誤差と走行速度

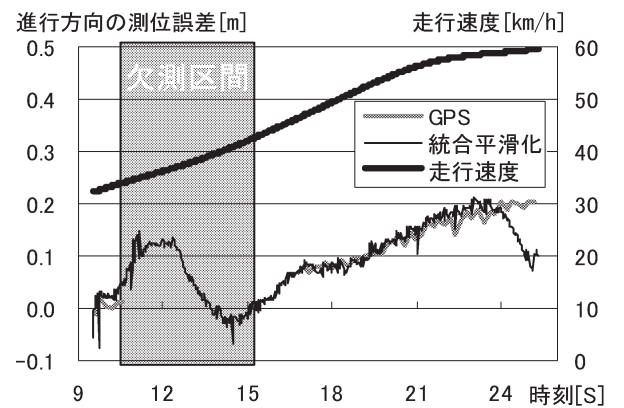


図 10 仮想欠測区間を含む場合の測位誤差

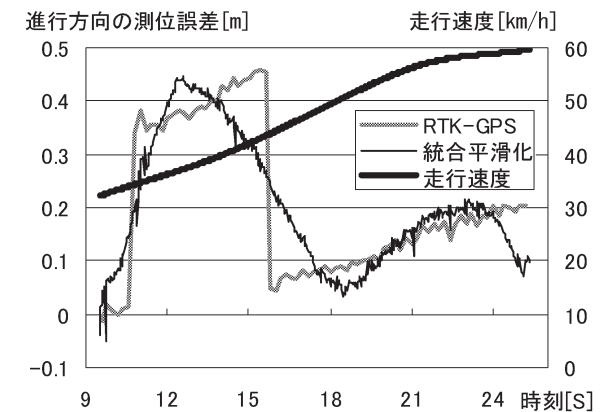


図 11 同期精度の低下がある場合の測位誤差

補間機能の有効性を示している。

4.2.3. 同期精度と測位精度との関係

図 11 に, 4.2.2 の欠測区間において GPS 測位データのみが 1 F (約 1/30 秒) 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。 なお, 当該区間の GPS 測位データの観測誤算分散値は, 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、図 3 の事前評価とほぼ一致する。統合平滑化処理により、当該区間での測位誤差は約 0.2m 改善されてはいるが、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 11 のような精度低下が発生し得る。

5. ま と め

本研究では RTK-GPS 受信機、速度センサ、加速度センサ等を搭載した実験車両と、拡張カルマンスムージングアルゴリズムを適用した諸観測値の統合平滑化処理とにより、車両の走行軌跡を高精度かつ連続的に推定する観測システムを開発した。この観測システムの走行時における測位精度、特に GPS 信号の欠測時における補間処理の精度を、実道路における走行データに基づいて検証した。さらに、高精度な同期システムが、推定精度の実現に寄与していることを定量的に示した。

今後は、周辺車両の走行挙動の推定精度の検証を行う計画である。

(2007 年 3 月 26 日受理)

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: 車両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) G.S.Gurusinghe, 横糸昌典, 中辻隆, 吾田洋一: RTK-GPS を用いた車両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両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, number 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観測システムの開発, *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: 時空間連続観測車両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*, pp.449-454, 2005.