

時空間連続観測車両による周辺車両の走行挙動計測

○小宮粹史^{*1} 大口敬^{*2} 赤羽弘和^{*3} 堀口良太^{*4} 桑原雅夫^{*5}

千葉工業大学 工学研究科 (〒275-8588 千葉県習志野市津田沼 2-17-1) ^{*1}

首都大学東京 都市環境学部 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1) ^{*2}

千葉工業大学 工学部 (〒275-8588 千葉県習志野市津田沼 2-17-1, akahane@ce.it-chiba.ac.jp) ^{*3}

(株)アイ・トランスポート・ラボ (〒101-0062 東京都千代田区神田駿河台 3-7 第2三勢ビル5階A) ^{*4}

東京大学国際・産学共同研究センター (〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1) ^{*5}

近い将来に安全運転支援技術やより高度な道路情報技術の普及が期待されるが、それらを楽しむことができる車両とできない車両とが混在する期間が比較的長期に及ぶことも想定される。したがって、これらの技術の性能を発揮させるためには、まずは現状においてより詳細な車両挙動データを収集し、車々間の相互作用を徹底的に解析する必要がある。そのために本研究では自車両の走行挙動及び周辺車両との相対的位置関係などを、交通流内部において時空間的に連続計測が可能な高精度計測車両システムを構築した。本稿では、計測車両に搭載したビデオ映像を用いた周辺車両の挙動推定モデルを提案し、その推定精度検証と実走行実験での車両走行軌跡推定の結果を報告する。

Validation of an experimental vehicle for successively observing interactions between vehicles

Tadahi KOMIYA^{*1} Takashi OGUCHI^{*2} Hirokazu AKAHANE^{*3} Ryota HORIGUCHI^{*4} Masao KUWAHARA^{*5}

Faculty of Engineering, Chiba Institute of Technology^{*1}

Faculty of Urban Environmental Sciences, Tokyo Metropolitan University^{*2}

Faculty of Engineering, Chiba Institute of Technology (akahane@ce.it-chiba.ac.jp)^{*3}

i-Transport Lab. Co., Ltd.^{*4}

Center for Collaborative Research, The University of Tokyo^{*5}

As a leading stage of a fully Automated Highway System, a period of traffic flow where vehicles equipped with safety driving support systems are mixed with unequipped vehicles is expected to continue for comparatively many years. Therefore, more detailed data of vehicle behavior should be collected in order to microscopically analyze interactions between vehicles in the present traffic flow. The purpose of our study was to develop an experimental vehicle that can successively observe interactions between vehicles in real traffic flow. In this paper, we propose an estimation system of trajectories of surrounding vehicles with video image acquired by on-board cameras, and report a result of validation on a real road section.

Keywords: vehicle behavior, image processing, GPS, Kalman smoother

1. はじめに

近年、高速道路走行時の走行制御や追突軽減ブレーキなどの予防安全運転技術が実用化され始めた。これらの技術の導入・普及期には相当の長期にわたり、安全運転

支援を楽しむことができる車両とできない車両とが混在することが想定される。これらの技術の性能を発揮させるためには、こうした運転支援システム搭載車両と一般車両の混在交通流が、一般車両にとって円滑・安全面の問題がな

いこと、あるいはより望ましい状態に改善するように、車々間の相互作用に対応したシステム設計が極めて重要である。そのためには実道路における複数の車両の走行挙動を時空間的に連続して観測することが必要であるが、これまで実用的な手法は存在しなかった⁽¹⁾。

2. 本研究の目的

車両挙動の計測にはさまざまな目的がある。ある道路断面の各車両の速度、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、道路リンクや長い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る。さらに、車両挙動の計測には路側にビデオカメラを設置し、定点観測することにより通過する車両の挙動を推定する手法も広がりつつある⁽¹⁾。

一方、運転者に対する道路幾何構造や交通信号などによる影響、あるいは運転者と周辺の車両の相互作用などを詳細な時間解像度（1秒未満）で比較的長い区間で調査する必要性のある交通現象も存在する。これらの事象の調査には交通流内部からの微視的な観測が必要であるため、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-GPS（Kinematic 干渉測位型 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、キロボストなどの目視に頼る必要があるため、位置精度は十分ではなく、減速挙動の上流への伝播現象などを確認することは困難であった。一方文献(3)の方法では、位置計測精度は原理的に極めて高いとされているが、この研究ではその位置計測精度検証は十分ではない。また RTK-GPS 計測は、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切れれば位置計測が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走行計測車両を用いることにより、これらの不都合を回避でき

る。しかし、従来の走行計測車両では各種データを同期処理するための時刻情報の記録精度が十分とは言えなかった。また、自車両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な計測には十分に対応していなかった。

我々は、従来より RTK-GPS 受信機、3軸ジャイロ加速度計等を搭載し、全計測データを GPS ベースのタイムコードとともに 1/30 秒間隔で同期記録可能な計測車両を構築してきた⁽⁴⁾。図-1 にその搭載機器と配線略図を示す。本計測車両では、3階微分までの3軸回転運動、4階微分までの3軸並進運動、およびセンサ取り付け不整バイアス等に関する 30 状態量からなるシステム方程式と観測方程式とに拡張カルマンスムージングアルゴリズムを適用し、統合平滑化処理する。これにより、各計測データに含まれる系統誤差や偶然誤差の影響を除去して走行挙動を最小自乗推定し、GPS 測位の欠測区間を含め、自車両の走行挙動が時空間連続推定可能となった⁽⁵⁾。また、本計測車両では、RTK-GPS、および連続的通信を必要としないが原理的に同等の位置精度を可能とする K-GPS 方式による位置計測精度の検証を路面上の評定点の精密測量値と比較する方法により、数十 cm の精度を得た⁽⁶⁾。したがって、本計測車両が道路構造との関係においても、車両挙動を高精度に観測できるものと期待される。

本稿では、自車両のみならず不特定多数の周辺車両の挙動計測を微視的に行うために、自車両の全計測データと時間軸上で整合するよう GPS 同期録画可能な CCD カメラを利用した、周辺車両の挙動計測手法を提案する。加えて、この手法の精度検証を行うとともに、実際の走行データを用いて、不特定の周辺車両の走行挙動推定を行う。

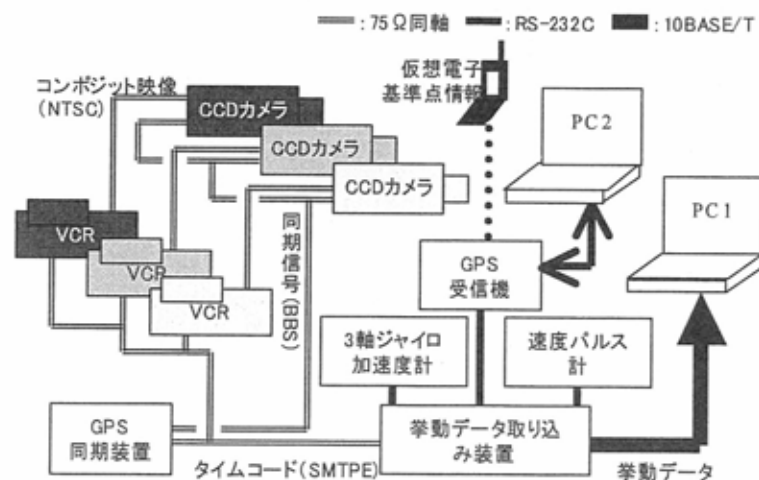


図-1 計測車両搭載機器配線略図

3. 周辺車両の挙動推定

3-1 推定手法

本計測車両システムの特徴は、車載カメラ（現段階では前方、右前方、右後方を計測範囲とした3台のCCDカメラ）による周辺車両のビデオ画像データに基づいて、その走行挙動を推定することが可能な点にある。

車両に搭載した CCD カメラを GPS 信号から生成された同期信号（BBS）により制御し、同じく GPS 信号ベースのタイムコードと共に同期録画する。720×480 画素のビデオ画像において周辺車両の特徴点を第 1 フレームにおいて任意に指定すると、第 2 フレーム以降は自動トラッキングするアプリケーションにより、特徴点の画面座標を連続取得する。次に図-2 のように計測車両の重心を原点として設定した局所座標系において、周辺車両の位置をカルマンスムージングアルゴリズムにより推定した。式(1)に推定に用いたカメラ画面座標値と局所座標値との関係式を示す。さらに、計測車両の走行挙動の WGS-84 座標系における計測結果を用いて、周辺車両の走行挙動推定結果を回転変換により統合し、同座標系における走行挙動を推定した。

この方式ではビデオカメラの撮影範囲で対象車両を捕捉する必要があるが、ビデオカメラを増設し広角および望遠レンズを組み合わせることにより、観測範囲を任意に設定できる。また、周辺車両の挙動のみならず、道路上の構造物の測位や道路線形の計測も可能である。

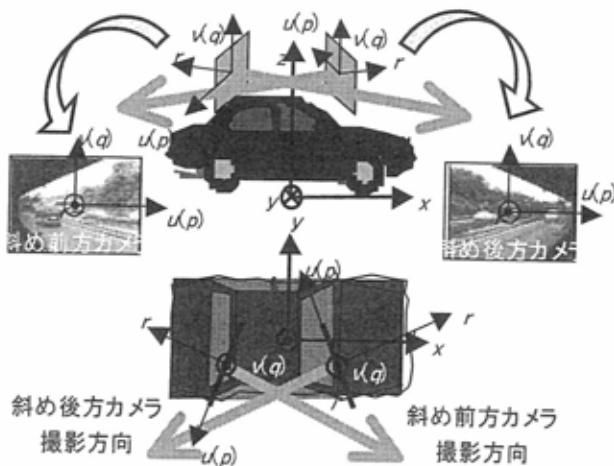


図-2 周辺車両計測イメージ

$$\begin{cases} u = f \frac{\cos(b)\cos(c)y + \{\sin(b)\sin(a)\cos(c) + \cos(a)\sin(c)\}h + \{-\sin(b)\cos(a)\cos(c) + \sin(a)\sin(c)\}x}{\sin(b)y - \cos(b)\sin(a)h + \cos(b)\cos(a)x} \\ v = f \frac{-\cos(b)\sin(c)y + \{-\sin(b)\sin(a)\sin(c) + \cos(a)\cos(c)\}h + \{\sin(b)\cos(a)\sin(c) + \sin(a)\cos(c)\}x}{\sin(b)y - \cos(b)\sin(a)h + \cos(b)\cos(a)x} \end{cases} \quad (1)$$

ここに f は焦点距離、 a, b, c はカメラのヨー角、ピッチ角、ロール角、 h はカメラ取り付け高さ

3-2 推定アルゴリズム

周辺車両は計測車両と同一道路平面を走行しているものと仮定し、計測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 2 次元並進運動の差分方程式を状態方程式とした。また、周辺車両の特徴点の画面座標と上記局所座標系における周辺車両の位置座標との関係を平行移動と回転変換により式(1)のように定式化し、観測方程式とした。この観測方程式におけるカメラの取り付け角度と焦点距離、カメラの取り付け高さの特徴点の高さの差を未知パラメータとする。カメラの取り付け角度は、路面に設定した目標点により予め外部評定を行い、その結果に基づいて初期設定する。これらの変量を、状態方程式に一定値（時間変動しない状態量）として組み込んだ。これらの状態方程式と観測方程式に対し、拡張カルマンスムーザを適用し、計測車両の局所座標系における周辺車両の位置を 1/30 秒毎に推定した。さらに、計測車両の 6 自由度運動状態量の拡張カルマンスムーザによる推定値^⑥をパラメータとして、この周辺車両の推定状態量を世界座標系に変換した。

4. 固定点の座標推定による精度検証

本推定方式の妥当性および推定精度の確認のため、精度検証を行った。

4-1 検証方法

道路面上の固定点を速度=0、高さ=0の周辺車両とみなして、本手法による推定位置座標と、固定点の世界座標系における精密測量結果（航空写真測量による）とを比較対象とした。推定時には、計測車両と固定点との相対距離、速度、加速度、加速度の時間微分の初期値を設定する必要がある。この初期値は推定結果に影響を及ぼす。今回は、推定結果と真値との関係に基づいて、初期値を逐次修正しながら、妥当な初期値を探索した。

4-2 固定点と計測車両の関係

搭載している 3 台のカメラについて、計 4 パターンの検証を行った。表-1 に、検証対象とした固定点と計測車両との関係を記す。①～③は推定対象となる固定点へ向かって走行、④は遠ざかる方向への走行である。推定時間とは、固定点が撮影されていたフレーム数に対応する時間長であり、走行区間長はその間の計測車両の走行距離である。図-3 に固定点と計測車両の関係の一例、図-4

表-1 撮影カメラ及び推定条件

	①	②	③	④
カメラ方向	前方	右前方	右前方	右後方
推定時間 [フレーム数]	80	36	79	72
走行区間長 [m]	35.49	22.57	40.02	41.61
初期X座標値 [m]	45.0	30.8	64.5	-3.1
初期Y座標値 [m]	2.1	5.9	11.5	5.7

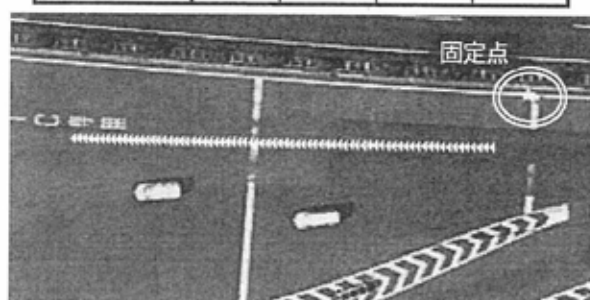


図-3 固定点 (④) と計測車両の走行軌跡

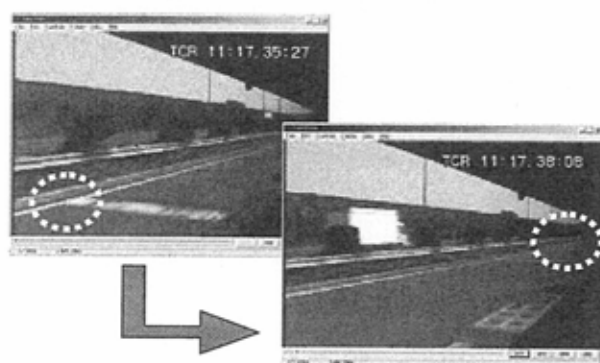


図-4 固定点 (④) のビデオ画像例

に推定時間の始終点のビデオ画像の一例を示す。

4-3 検証結果

図-5～図-8 に、固定点の座標値の真値と推定値との差の時間変動を示す。図中の○印は推定始点である。図-9 には、計測車両と固定点との距離と推定誤差との関係を示す。どの検証対象においても、推定精度の絶対値は 0.3m 程度であることがわかる。

ビデオ映像を用いた計測の場合、推定対象点との距離や画像の鮮明度に反比例して精度が低下すると考えられる。しかし、本研究では推定精度と推定対象点 (固定点) の位置に相関関係は見られず、初期条件を修正することによって、良好な推定結果を得ることができた。走行速

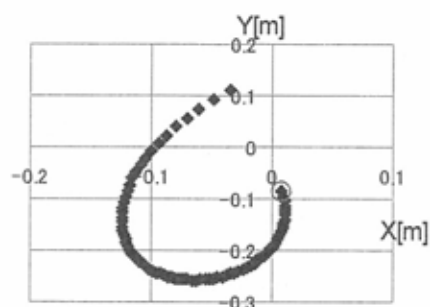


図-5 推定誤差の時間変動①

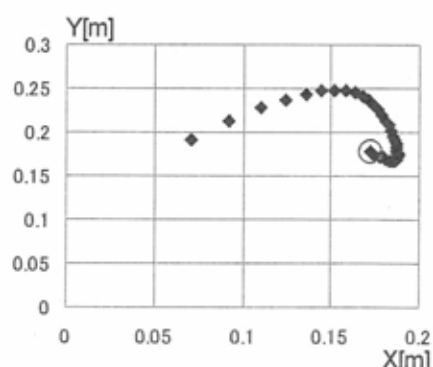


図-6 推定誤差の時間変動②

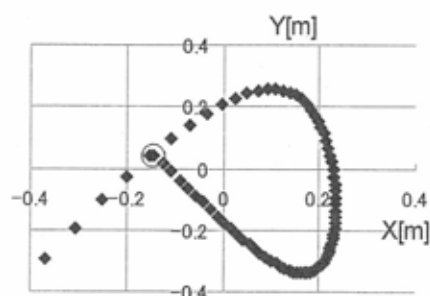


図-7 推定誤差の時間変動③

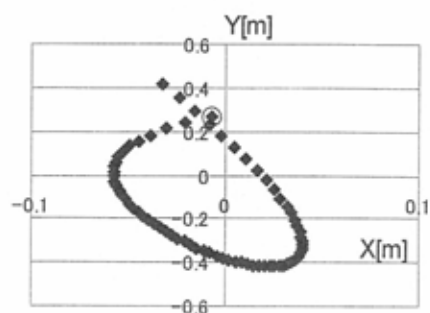


図-8 推定誤差の時間変動④

度や観測フレーム数に精度が依存しないことから、部分的に計測精度が低下しても、カルマンスムーザにより時間軸全体を見通して適切な推定値を得ることができるためと考えられる。しかし、現状では初期値の設定に推定精度が依存してしまう点には、留意が必要である。

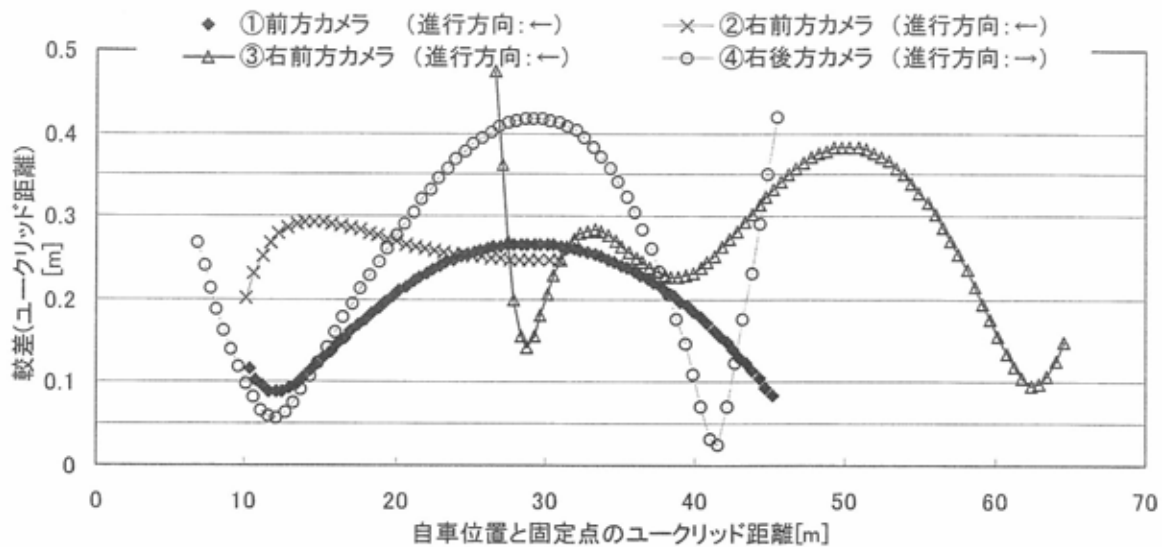


図-9 推定対象との距離と較差の関係

5. 周辺車両の挙動推定

本推定方式を用いて、周辺車両の挙動推定を行った。複数ビデオカメラシステム⁽¹⁾による同一車両の推定結果と比較し、本手法の推定結果の精度を確認する。複数ビデオカメラシステムにおいても、本計測車両と同様にGPS信号ベースの時刻情報を利用しており、また推定周期も1/30秒間隔なので、タイムスタンプを基に各時刻における車両位置を厳密に比較することが可能である。

5-1 前方走行車両の挙動推定

推定対象車両のビデオ画像の例を図-10に示す。図-10は1秒ごとの静止画像で、左上の静止画を開始時点とし約7秒間にわたり相対運動を推定した。なお、この推定対象は右側から計測車両を追い越した車両である。

図-11に対象車両の世界座標における推定位置を示す。対象車両の走行軌跡が良好に推定されたことが見て取れる。図-12に複数ビデオカメラシステムによる同時刻の推定走行位置と周辺車両の推定走行位置との較差を、図-13に同じくユークリッド距離で示した較差を示す。4節の固定点を対象とした推定では50m程度離れた距離においても0.4m程度の誤差であった。これに対して、自車と対象車両とが同程度離れて走行している状態では、2.5m程度の較差となった。ただし、比較対象の複数ビデオカメラシステムによる観測値にも誤差が含まれる点に留意する必要がある。対象車両が自車前方を走行しているため、同時刻帯のレーザ測距出力値も得られた。図-14にレーザ測距結果と本手法による推定結果とを示す。時刻0-2秒までは推定対象車両が自車の側方を走行していたため、レーザ測距範囲に推定対象車両が存在せず、側壁までの距離を計測していたものである。時刻2秒以降のレーザ

測距結果と画像処理による推定結果の較差の平均値は5.11mとなったが、標準偏差は0.29mである。時間とともに相対距離が増大したにもかかわらず、較差はほぼ一定であった。しかし、複数ビデオカメラシステムによる推定値との較差と比べ、当該較差の平均値は大きい。この要因のひとつは、CCDカメラとレーザ測距装置の搭載位置、および前者トラッキング位置と後者の測距位置の較差であると考えられる。

6. まとめと今後の展開

本研究では、RTK-GPS受信機、3軸ジャイロ加速度計等の搭載機器の計測データを1/30秒周期で同期記録可能な計測車両システムを用い、周辺車両の車載カメラ画像上の画像座標に対して拡張カルマンフィルタを適用し、その走行挙動を推定することを可能とした。車載カメラを用いることにより、一般に利用されているレーザやミリ波による測距に比べ簡易に広範囲の観測も可能である。また、ビデオ画像において推定対象を特定しつつ、走行挙動を分析できることも特徴である。

なお、追跡点の画面座標系における移動量が小さい場合には、いわゆる多視点情報が不足して推定精度が低下する可能性がある。これに対しては、レーザによる測距値を観測方程式に取り込み、画面座標値とともに統合処理するようにアルゴリズムを改良することが考えられる。

本システムにより、様々な道路区間において実験車両単独で全方位の周辺車両の微視的な走行挙動観測を行えることになる。今後は、合流部や織り込み区間等での複雑な走行挙動の分析に適用し、その結果を周辺車両の挙動モデルとしてドライビングシュミレータに組み込んで行くことも可能である。

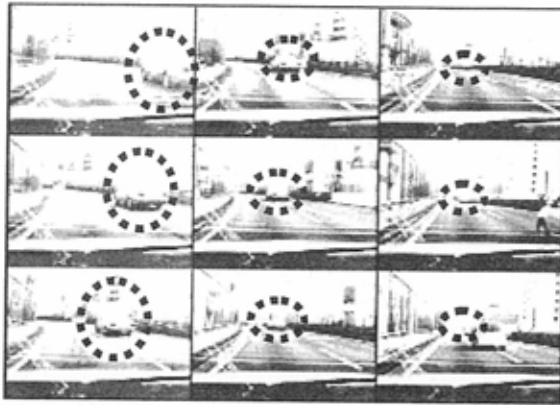


図-10 推定対象車両 (前方カメラ)



図-11 推定結果 (世界座標統合後)

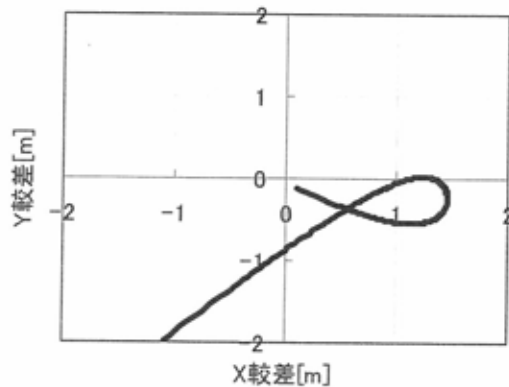


図-12 X-Y 較差 (世界座標系)

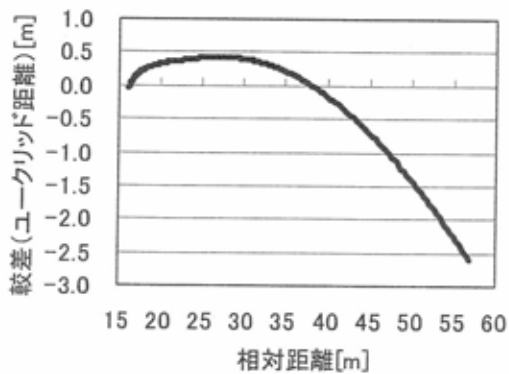


図-13 相対距離と較差

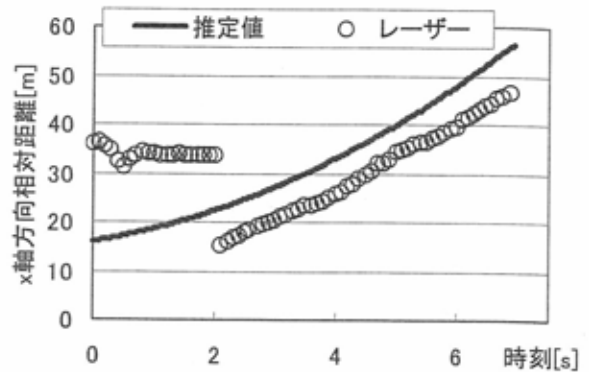


図-14 推定結果とレーザー測距結果

【謝辞】

本研究においては、東京大学生産技術研究所西川功技官より多大なる助力、支援を受けた。ここに記して謝意を表す。

【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) Gurusinge, G, 横象昌典, 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.