

# 複数のビデオカメラによる車両走行軌跡の連続観測

赤羽弘和<sup>\*1</sup> ○畠中聡志<sup>\*2</sup>

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(at)ce.it-chiba.ac.jp) <sup>\*1</sup>  
千葉工業大学大学院 (〒275-8588 千葉県習志野市津田沼 2-17-1) <sup>\*2</sup>

本研究においては、道路に沿って隣接設置された複数のビデオカメラ映像に画像処理や幾何補正等の技術を適用し、車両軌跡に関する一体的な計測データを生成するシステムを開発した。本システムにより、単一ビデオカメラとの比較において、観測精度と観測範囲とをより高度に両立させることができる。また、オクルージョンの影響も低減することができる。さらに、従来の2次元射影変換に基づく方式を発展させ、道路面を近似する三角形の方程式と3次元射影変換式とを組み合わせることで観測方程式を構成した。この方式による推定誤差を、1/22縮尺の模型車両の走行軌跡を精密測量した結果と比較・検証した。その結果、分・合流部や事故発生時における車両の走行挙動の微視的分析への、本システムの適用可能性が示された。

## Successive Observations of Trajectories of Vehicles with Plural Video Cameras

Hirokazu AKAHANE<sup>\*1</sup> · Satoshi HATAKENAKA<sup>\*2</sup>

Faculty of Engineering, Chiba Institute of Technology<sup>\*1</sup>

Graduate School, Chiba Institute of Technology<sup>\*2</sup>

In this study, a system for successive observations of trajectories of vehicles with image of plural video cameras installed adjacently along roads through the use of techniques, such as image processing and geometry transformation, was developed. This system can more highly equilibrate the observation precision and the observation range than using image of a single video camera. In addition, it can exclude the influence of occlusion, too. Furthermore, an observation equation, which had been previously based on two-dimensional projective transformation, was derived in combination of equations of triangles that approximate road surfaces with equations of three-dimensional projective transformation. The measurement errors of this method were evaluated in comparison with results of precision survey of trajectories of an 1/22-scaled model of a vehicle. As a result, applicability of this system to microscopic analysis of vehicle behavior at merging or diverging sections and at times of traffic accidents was shown.

**Keyword:** vehicle tracking, vehicle behavior, image processing, Kalman smoother

### 1. 序論

ITSの安全運転支援システムにおいて、安全情報や警告を運転者に提供したり、手動運転操作に自動制御が介入することにより危険を回避させるときには、情報提供や制御の直接的対象や周辺車両を混乱させたり、交通流全体に悪影響を及ぼしたりしないことが求められる。これは、安全運転支援システムが人間の運転操作と自動制御との間隙に位置するが故の要件であり、道路上の全車両がいわゆる「完全自動運転」される状況とは趣を異とする課題の存在を示している。このよ

うな課題解決のためには、人間の運転操作およびその結果としての車両の走行挙動や、周辺走行車両との相互作用を、高精度に把握することが必須である。

本研究では、微視的な車両挙動に関する位置や速度などを連続的な数値データとして取得しデータベース化することを目指し、道路に沿って隣接設置された複数のビデオカメラ映像から車両軌跡に関する一体的な計測データを生成するシステムを開発している。

表-1に示すように、ビデオ画像による観測は、他の観測手法と比較して、いくつかの特徴を有する。本研

表-1 車両走行挙動の観測手法の比較

観測方法 比較項目	車両感知器	走行測定車	ビデオ観測
観測対象車両	不特定多数	測定車とその近傍車	不特定多数
車両の走行軌跡の時空間連続観測	不可	可	可(ビデオ撮影範囲に限定される)
走行位置の計測法	感知器設置点の通過を検出	GPS等	画像座標の幾何補正
走行速度の計測法	通過検出の時間差と感知器設置間隔から算定	車輪回転速度の変換, 空間フィルタ式等	不可(位置データから差分計算)
加速度の計測法	不可	歪ゲージ式, ジャイロ式センサ等	不可(位置データから差分計算)
計測の難易	容易(増設は困難)	容易	幾何補正用データ取得とカメラ新設が困難

究では、画像による観測の長所を活かしつつ、観測範囲と観測精度とをより高次元で両立させることを目指している。また、本手法により同一地点における車両の走行挙動を複数のカメラで撮影・処理することにより、オクルージョン(画像上の車両の重なり)の影響も低減できると期待される。

## 2. 観測システムの基本構成

本システムの基本構成は、以下の通りである。

### 2-1 複数のビデオカメラによる同期撮影・録画

各カメラにおける画像取得を同期させるために、主カメラから副カメラにデジチェーン接続で、同期信号と SMPTE タイムコード信号を供給する。

屋外観測においては GPS 利用ビデオ同期発生器<sup>1)</sup>を使用する。本装置は、GPS 受信波から同期(ブラックバースト)信号と SMPTE タイムコード信号とを生成・出力する。本装置を利用すると、カメラ間の有線接続が不要となるため、カメラの設置間隔が大きな場合にも、簡易に高精度な同期撮影・録画を実現できる。

### 2-2 ビデオ画像上の車両座標の取得

ビデオ画像上の車両座標の取得には、TrackPoint<sup>2)</sup>を

用いた。このアプリケーションでは、車両が画面端に出現する際に操作者が追跡対象点を指定すると、以降は移動する対象点が自動追跡され、各フレームにおける座標値が出力される。自動追跡結果と追跡対象点との乖離が肉眼で確認されたときには、マウス操作で追跡結果を修正するインターフェースも備えている。

追跡対象点としては、画像処理上の要求により、いわゆる特徴点を選択する必要がある。具体的には、ナンバープレートや車体の隅角部を選択している。車輪の接地点は道路面上に存在するため、追跡対象点として後述の画像座標の幾何補正には有利である。しかし、車両の前後方向からの撮影では、渋滞時などに車両間隔が小さくなると他の車両により接地点が隠蔽される確率が高くなり、実用上の制約が大きくなる。

### 2-3 画像座標の幾何補正と補正誤差分散の評価

2-2 で計測したビデオ画像上の車両座標を、ビデオカメラ毎に独立に地上座標(実寸座標)に幾何補正する。従来は、車両が単一平面上を移動するものと仮定して、幾何補正に二次元射影変換を適用してきた<sup>3)</sup>。二次元射影変換式のパラメータは、道路面上の所要数以上の測位点において、画面座標と地上座標との双方を取得することにより同定できる。

幾何補正の誤差は、カメラの諸特性、設置位置、設置角度等により、補正対象点の画面上における位置に依存して変動する。この誤算分散を射影変換式に基づいて評価し、後述の推定処理に適用する。

### 2-4 隣接カメラ画像間における車両照合

2-3 の方法でビデオカメラ毎に独立に幾何補正された座標値を、2-5 の方法で車両毎に平滑処理するためには、隣接するカメラ画像間で車両を個々に照合する必要がある。

隣接するカメラ画像に重複撮影区間がある場合、および重複撮影区間はないが非撮影区間が短い場合には、幾何補正後の座標値と計測時刻とにより、所要精度の照合が可能である。現状では、本研究においても、この照合方式を適用している。

非撮影区間長が一定以上になると、車両の走行軌跡の外挿予測や車両の外観に関する特徴情報(大きさ、輝度、RGB 値)を用いることにより、照合することが考えられる。

### 2-5 車両軌跡の推定

2-3 の方法でビデオカメラ毎に独立に幾何補正された座標値から、車両毎の一連の走行軌跡データを最小

自乗原理で推定するために、カルマンスムージングアルゴリズムを適用した<sup>3)</sup>。同アルゴリズムによる推定処理は、以下に大別される。

1) 座標値の幾何補正の誤差処理

2-3 で評価した幾何補正誤差を処理する。同一の追跡対象点が同時刻に異なるビデオ画像上で捕捉された場合には、対応する各カメラの幾何補正誤差分散を推定処理に用いることにより、観測データを合理的に統合することができる。

2) 追跡対象点の路面からの高さによる誤差処理

2-3 の二次元射影変換では、車両の追跡対象点が路面上に存在することを前提としている。実際の追跡対象点は路面から高さ方向に乖離しているために、幾何補正に誤差をもたらす。この補正誤差は、追跡対象点の路面から高さが得られれば、幾何学的に修正することができる。

隣接するカメラ画像に重複撮影区間があるときには、ステレオ写真測量と同様の原理で、追跡対象点の高さを推定することができる。カルマンスムージングアルゴリズムには、この高さを最小自乗推定しつつ、それによる幾何補正誤差を修正する機能が組み込まれている。

3. 観測方程式と状態方程式の改訂

2. の基本構成のうち、今回は本節に述べる諸点を改訂した。

3-1 三次元射影変換とパラメータの同定

幾何補正において道路面の勾配を考慮するために、2-3 の二次元射影変換に代えて、式(1)に示す三次元射影変換を導入した。

$$\left. \begin{aligned} x &= \frac{b_1 X + b_2 Y + b_3 Z + b_4}{b_9 X + b_{10} Y + b_{11} Z + 1} \\ y &= \frac{b_5 X + b_6 Y + b_7 Z + b_8}{b_9 X + b_{10} Y + b_{11} Z + 1} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここに、

- $x, y$ : 画面座標
- $X, Y$ : 地上座標
- $b_i$ : パラメータ

である。

三次元射影変換式のパラメータの同定には、DLT (Direct Linear Transformation) 法を用いた<sup>4)</sup>。二次元射影変換式のパラメータ同定は、道路面上の測位点のみの画像座標と地上座標とで実行できる。しかし、三次元射影変換式のパラメータ同定には、三次元空間に

散在する測位点が必要となる

3-2 道路面の三角形近似と観測方程式の構成

道路面は平面・縦断曲線と対応する横断勾配とから構成されている。式(2)に示すように、本研究においては、道路面上に設定された測位点を頂点とする三角形により、同面を近似した。

$$\alpha(X - X_1) + \beta(Y - Y_1) + \gamma(Z - Z_1) = 0 \quad (2)$$

ここに

$\alpha, \beta, \gamma$ : 近似三角形の法線ベクトルの要素

$X_1, Y_1, Z_1$ : 近似三角形の一頂点の座標

である。

式(1)に式(2)を代入して  $Z$  を消去し、追跡対象点の道路面からの高さを  $h$  とすると、式(3)のような観測方程式が近似的に得られる。

$$\left. \begin{aligned} x &= \frac{AX + BY + Ch + D}{IX + JY + Kh + L} \\ y &= \frac{EX + FY + Gh + H}{IX + JY + Kh + L} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ここに

$$A = \gamma b_1 - \alpha b_3$$

$$B = \gamma b_2 - \beta b_3$$

$$C = \gamma b_3$$

$$D = \alpha b_3 X_1 + \beta b_3 Y_1 + \gamma b_3 Z_1 + \gamma b_4$$

$$E = \gamma b_5 - \alpha b_7$$

$$F = \gamma b_6 - \beta b_7$$

$$G = \gamma b_7$$

$$H = \alpha b_7 X_1 + \beta b_7 Y_1 + \gamma b_7 Z_1 + \gamma$$

$$I = \gamma b_9 - \alpha b_{11}$$

$$J = \gamma b_{10} - \beta b_{11}$$

$$K = \gamma b_{11}$$

$$L = \alpha b_7 X_1 + \beta b_7 Y_1 + \gamma b_7 Z_1 + \gamma b_8$$

である。

観測方程式(3)により、2-3 の幾何補正と 2-5 の推定処理とを、カルマンスムージングアルゴリズムに一体的に組み込むことができる。

観測方程式(3)のパラメータ値は、カメラと近似三角形との組み合わせ毎に異なる。各カメラによる画面座標の観測値は、個別の観測ベクトルとして扱い、対応する観測方程式のパラメータセットで処理する。近似三角形に対応した観測方程式のパラメータセットは、カルマンスムージングアルゴリズムの前処理として実行される同フィルタリングアルゴリズムにおいて、 $X, Y$  地上座標の時間更新推定値に基づいて選択される。

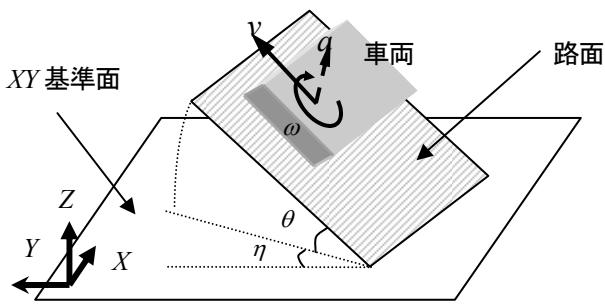


図-1 車両の運動モデルの概念<sup>5)</sup>

### 3-3 状態方程式の改訂

これまでの本研究では、カルマンスムージングアルゴリズムにおける状態方程式に、地上座標のX軸方向とY軸方向とに分解した車両の並進運動の差分方程式を組み込んで来た<sup>3)</sup>。これにより、走行軌跡の推定過程において、車両の加速度、速度、位置等の諸量間の物理的関係を明示的に反映させることができた。

図-1には、今回新規に導入した車両の運動モデルの概念を示す。並進運動に加えて回転運動を考慮し、かつ道路面上における車両の進行方向ベクトルを定義した点が、主な置換内容である<sup>5)</sup>。

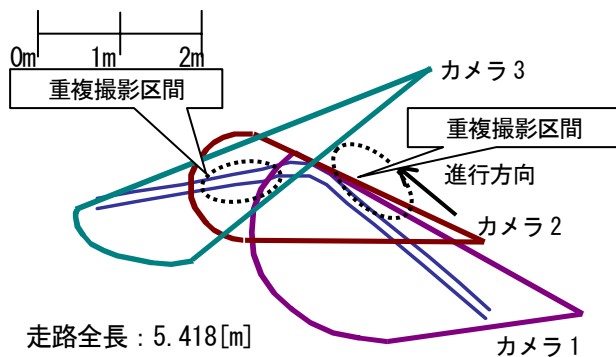


図-2 走路の平面線形とカメラ配置

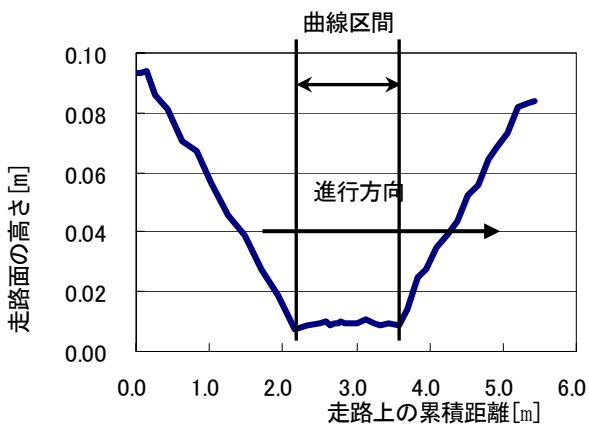


図-3 走路の縦断線形

### 4. 模型実験による精度検証

本実験では、1/22縮尺の模型車両の走行状況を、2-1の手法で複数のビデオカメラから同期撮影し、カメラ画像から2-2の手法で追跡対象点の一連の画像座標を取得した。さらに、3節の三次元観測方程式と状態方程式とを組み込んだカルマンスムージングアルゴリズムにより、走行軌跡を推定した。この推定結果と、模型車両の走行軌跡の精密測量結果とを比較し、提案手法の精度を検証した。

#### 4-1 実験方法

図-2に、実験走路の平面線形とカメラ配置を示す。図-3に、実験走路の縦断線形を示す。約4%の下り勾配と上り勾配が、水平な曲線区間を挟む構成である。走路延長は実寸換算で100[m]余りである。図-4には、各カメラからの撮影画像例を示す。模型車両は走路中央に設置された案内溝に沿って走行する仕組みであり、走行速度のみを無線操縦した。

図-5に、模型車両へのビデオカメラの搭載方法を示す。この車載カメラは、他の観測カメラ1~3と同期し、走路上に設置された巻尺の目盛りを撮影・録画し

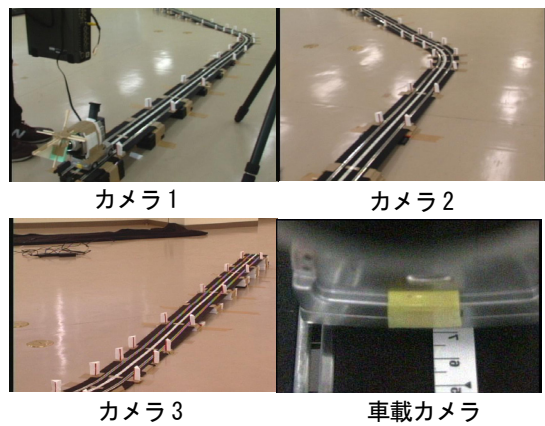


図-4 各カメラの画像

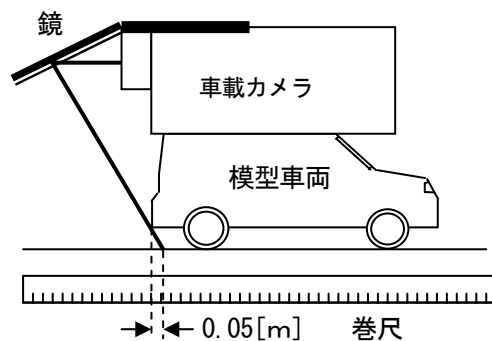


図-5 ビデオカメラの車載状況

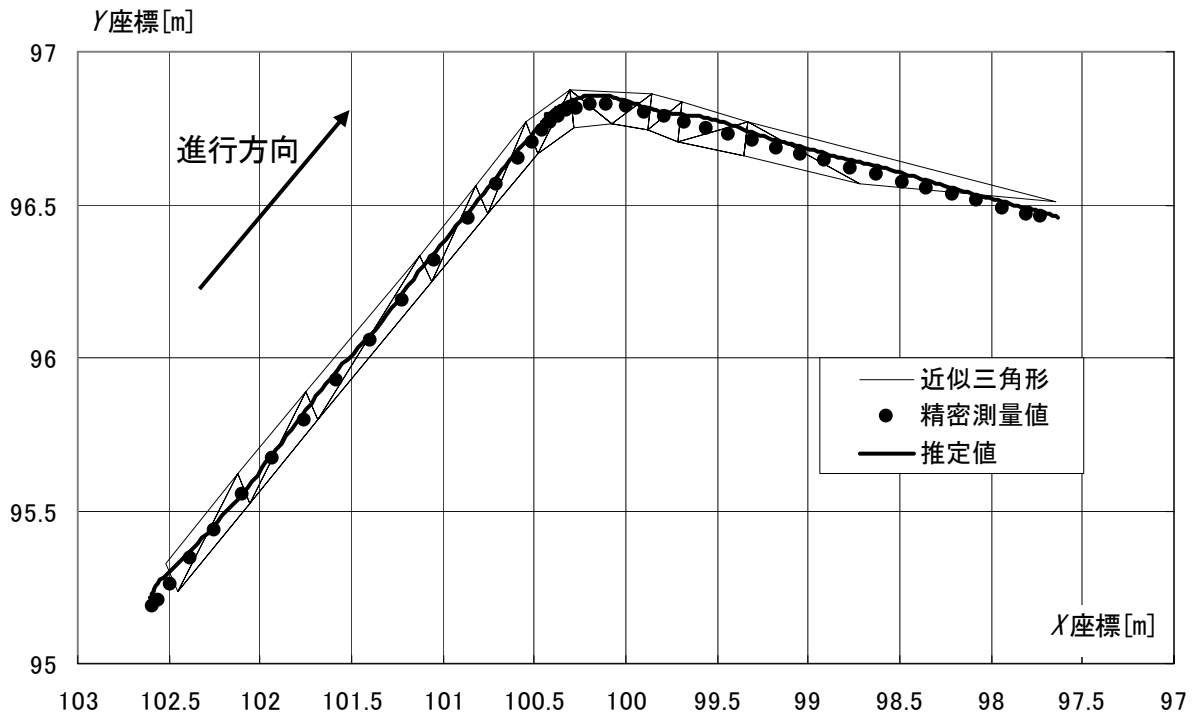


図-6 車両軌跡(追跡高 0.16m)と折れ面近似の例

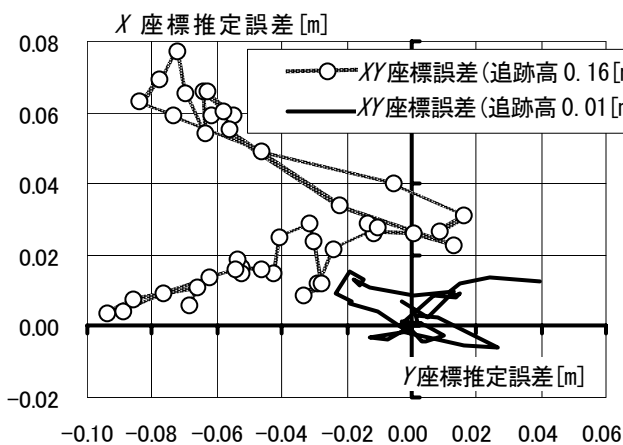


図-7 精密測量値に対する推定値の誤差

た. この目盛り値を6フレーム(0.2[秒])ごとに特定し, トータルステーションで精密測量し, 車両位置座標の検証用データとした.

走路上に設置された測位点, および三次元射影変換式のパラメータ同定精度を向上させるために走路周辺で走路面より高い位置に設置された測位点も, 精密測量した.

#### 4-2 精度検証結果

図-6には, 道路面の三角形による近似状況, 追跡高 0.16[m] の場合の推定軌跡, および精密測量結果とを

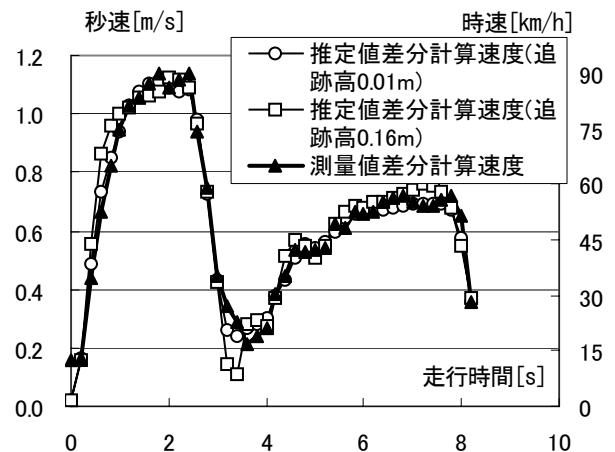


図-8 走行速度の時間変動と追跡高

示す. 図-7には, 追跡高 0.16[m]と 0.01[m]の場合の, 推定値の精密測量値に対する誤差を示す. 走行路両端の縦断勾配部で, 追跡対象点が路面から高くなるほど, 偏りが増大する傾向が見られる. 現状では, 観測方程式(3)において, 道路面と追跡対象点との Z 軸方向の距離を, 道路面に対する法線ベクトルに沿った距離で近似していることが, 偏りの発生要因ではないかと推定している. 今後は, Z 軸方向の距離を直接用いて, 推定精度の改善効果を確認する予定である.

図-8には, それぞれ推定位置座標および精密測量座標とから差分計算した, 車両進行方向の速度を示す.

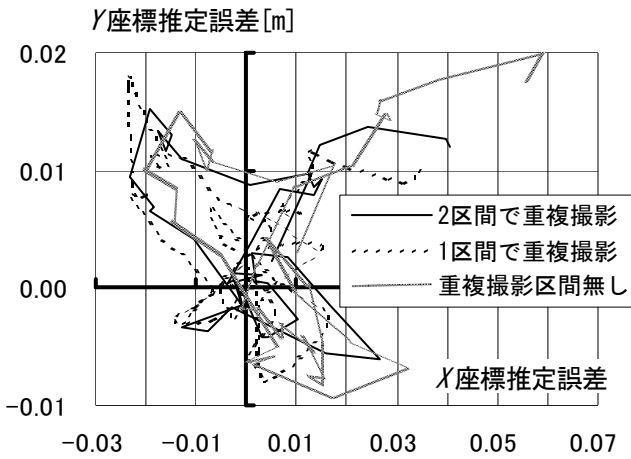


図-9 重複撮影区間と推定誤差

同図の右側の縦軸は、実寸換算の速度を時速で示す。短時間に走行速度が大きく変動している状況を、概ね良好に推定できている。位置座標の推定値に見られるような顕著な偏りは発生していない。ただし、追跡対象点が路面から高くなるほど推定精度が低下する傾向は、同様に見られる。

図-9に、カメラ1とカメラ2とで重複撮影された区間において一方のカメラによる観測値のみを用いた場合の推定値、および全ての重複撮影区間で一方のカメラによる観測値のみを用いた場合の推定値とについて、精密測量値に対する座標誤差を示す。特に、重複撮影された2区間の一方の観測値でも利用できる場合には、重複区間の全観測値を用いた場合と比較して、顕著な誤差の増加は見られない。この結果は、重複撮影が1区間であっても、そこにおける観測値に基づいて追跡対象点の路面からの高さを最小自乗推定できる原理と合致する。

### 5. 走行計測車両の計測値に基づく観測方程式の同定

観測方程式(3)のパラメータ同定は、特にトンネル内等で道路敷外からの測量が困難であるような区間では、実用上の制約が大きい。そこで、本観測システムと並行して開発を進めている運転挙動の計測システム搭載実験車両<sup>6)</sup>の計測データに基づいて、観測方程式を同定する方式も検討を進めている。

同実験車両は、RTK-GPS受信機、速度センサ、3軸加速度センサ、3軸角加速度センサなどを搭載している。これらの計測データをカルマンスムージングアルゴリズムで統合処理することにより、実験車両の地上座標をはじめとする運動に関する諸量を、高精度に推定することを目指している。

実験車両の計測データは、2-1のGPS利用ビデオ同期発生器のタイムコードとともに記録される。したが

って、観測対象区間を走行中の実験車両を観測用カメラで撮影し同じ方式で同期録画すれば、同じ時刻における実験車両の地上座標と画面座標とを取得することができる。これにより、煩雑な測量作業をかなり省略しつつ、観測方程式のパラメータを同定できる可能性がある。また、実験車両の走行速度や加速度の計測データは、本観測システムの精度検証にも有用である。

### 6. まとめと今後の課題

道路に沿って隣接設置された複数のビデオカメラ映像に画像処理や幾何補正等の技術を適用し、車両軌跡に関する一体的な計測データを生成するシステムを開発した。道路面を近似する三角形の方程式と三次元射影変換式とを組み合わせる観測方程式を構成し、1/22縮尺の模型車両の観測データにカルマンスムージングアルゴリズムを適用した結果、単一ビデオカメラとの比較において、本観測システムが観測精度と観測範囲とをより高度に両立させ得る可能性を示した。

今後は、実道路における精度検証を進めるとともに、交通事故発生過程の解析や合流部・折り返み部等における車両挙動の微視的分析への適用を進める予定である。

本研究は、国土交通省国土技術政策総合研究所から東京大学生産技術研究所ITS研究グループが受託した「ITSに関する基礎的先端的研究」の一環として実施された。ここに記して、委託者およびITS研究グループに謝意を表す。

### 参考文献

- 1) <http://www.totsu-eng.co.jp/products/index0.html#GVS-0110>
- 2) <http://www.gen.co.jp/GENTECH.html>
- 3) 赤羽弘和：複数の高精細度ビデオカメラによる車両軌跡の高精度連続観測システムの開発，第37回土木計画学シンポジウム論文集，pp. 89-96, 2001.
- 4) (社)日本写真測量学会：解析写真測量 改訂版，1998.
- 5) 堀口良太，赤羽弘和，舟橋賢二：拡張カルマンスムージングによる3次元プローブ車両走行軌跡と運転挙動の推定，第57回土木学会年次学術講演会講演概要集，CD-ROM，2002
- 6) 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回土木計画学研究発表会講演集，No.26，CD-ROM，2002.