

# ハイビジョンカメラと GPS/IMU を用いた 三次元形状連続計測システムの開発

## Mobile Topographic Measurement System using High-vision Cameras and GPS/IMU

佐田 達典 TATSUNORI SADA  
塩崎 正人 MASANDO SHIOZAKI

道路やトンネル等土木構造物の維持管理においては、短時間に広範囲の構造物を効率的に点検・調査する技術が求められている。筆者らは GPS 受信機と IMU を装着することで連続して位置・姿勢検出を可能とした車両に、デジタルハイビジョンビデオカメラを搭載し、走行しながら周辺の形状を連続して計測するシステムを開発した。道路面および周辺構造物の計測に適用した結果、20cm の精度で構造物の絶対位置を計測できることが確認できた。

キーワード：デジタル画像，ステレオ写真，ハイビジョンカメラ，GPS，IMU

An inspection system to detect structural conditions is required for infrastructure maintenance. The authors have developed a mobile topographic measurement system that can be used as an inspection tool for road surfaces using High-vision digital cameras and GPS/IMU. It was further confirmed that this system is capable of generating 3-dimensional global coordinates of the road surface with an accuracy of 20cm.

**Key Words:** Digital Image , Photogrammetry, High-vision Camera, GPS, IMU

### 1. はじめに

道路や橋梁，トンネル等の社会基盤施設の増加に伴い今後維持管理の業務の増大が予想され，短時間に広範囲の構造物を効率的に点検・調査する技術が求められている。そうしたニーズに対応するため，車両で走行しながら計測を行うシステムがいくつか提案されている<sup>1)</sup>が，点検・調査データと位置データの対応付けが難しい。測位が用いられるが，衛星電波の届かないトンネル内や高架橋の下では GPS (Global Positioning System) による高精度の測位ができない，等の課題がある。

本研究では，GPS 受信機と IMU (Inertial Measurement Unit, 慣性航法装置) を組み合わせた連続位置計測システム (GPS/IMU) を用いることでトンネル内等でも連続して高精度な位置・姿勢検出を可能とした。点検・調査データについては，デジタルハイビジョンビデオカメラ (DHVC) により連続撮影することとし，GPS/IMU からの位置・姿勢データと連動することで連続的に三次元形状を計測するシステムを開発した。

今回，本システムを利用して，道路面および周辺構造物を撮影し，その映像を解析することによって道路空間形状を効率良く計測する手法について検討したので，その方法および計測結果について報告する。

### 2. システム構成

本研究では，道路空間の三次元形状を世界測地系に基づいて連続計測し，任意部分の可視化・図化を行うことを目標としている。開発に当たっては，連続位置計測システムとステレオ写真解析技術を組み合わせて連続計測を行い，ステレオ写真解析技術により任意の位置での三次元形状モデルを生成できることを目的とした。そのため次の要求仕様を満たすように機器選定を行った。

①連続した高精度な位置・姿勢計測ができる

GPS/IMUを採用した。GPS電波遮断時にはIMUによりデータを補完して連続した切れ目のない位置・姿勢計測を行うことができる。

②高画質の連続画像を取得する

スチルカメラでは高速走行時に切れ目のない画像を取

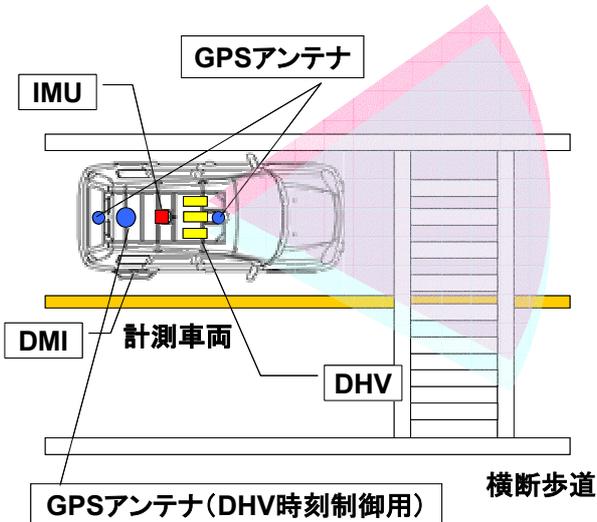


図-1 システム構成

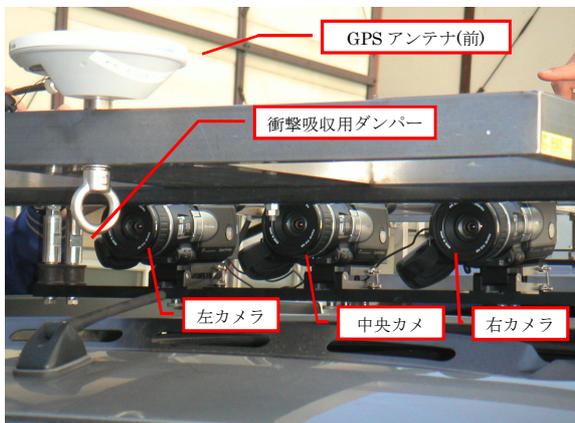


図-2 デジタルハイビジョンカメラ

得ることが困難な場合があるため、ビデオカメラを用いることとした。また、画角、画素数、画質等についても次のように考慮してデジタルハイビジョンカメラを採用した。

- ・画角が広いので、解析可能な有効範囲が広がる（道路に対してワイド画面は有効である）。
- ・通常のビデオカメラよりも画素数が多い（通常の1.5倍程度）。
- ・通常のビデオカメラより画質が高いため計測対象の識別が容易。
- ・動く被写体に対して撮影画像の質が高い。  
具体的な製品名・仕様は以下のとおりである。

### (1) GPS/IMU

POS/LV420（カナダ Applanix社製）を採用した<sup>2)</sup>。本機はGPS受信機とIMU、DMI（距離計）、PCS（データ制御部）から構成される車載用慣性航法ユニットである。ユーザーが指定した任意位置（参照点）を原点と

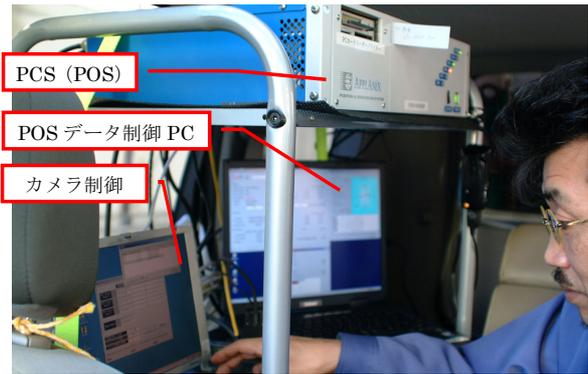


図-3 IMUとGPSアンテナ

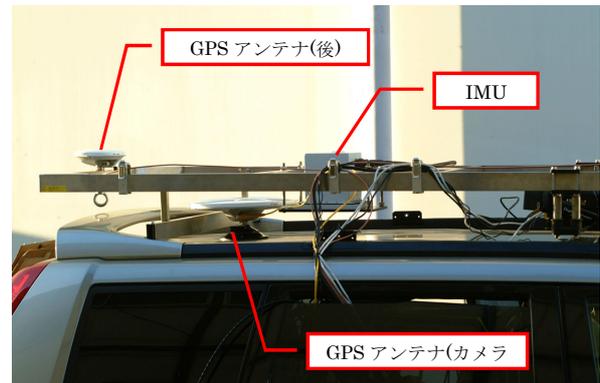


図-4 PCSデータ制御PCとカメラ制御PC

する三次元直交座標系を持ち、参照点の位置情報と姿勢情報を取得する。その主な特徴は次のとおりである。

- ・GPS電波の受信が悪い状況でもIMUの機能により高精度で位置を計測できる。
- ・車両の任意位置を参照点とし、その位置の絶対座標値（緯度、経度、楕円体高）と姿勢情報（Roll, Pitch, Heading）を取得できる。
- ・取得データは200Hzで出力できる。

計測時に好条件であれば、10cm以内で位置情報が取得できる。同様に、計測時に好条件であれば姿勢精度はRoll, Pitchで0.005度、Headingで0.03度とされる。

### (2) DHVC

DHVカメラGR-HD1（ビクター製）を採用した。主な仕様を次に示す。

- ・シャッター速度は1/1000秒
- ・30Hzでデジタル画像を記録
- ・解像度は1280×720ピクセル

例えば時速80kmで車両が走行する場合、1秒間で約22m移動する。30Hzで画像録画を行った場合、1フレームあたり約0.74m移動する。カメラのシャッター速度が1/1000秒なので、1フレーム記録時の瞬間移動距離は、約0.7mmとなる。

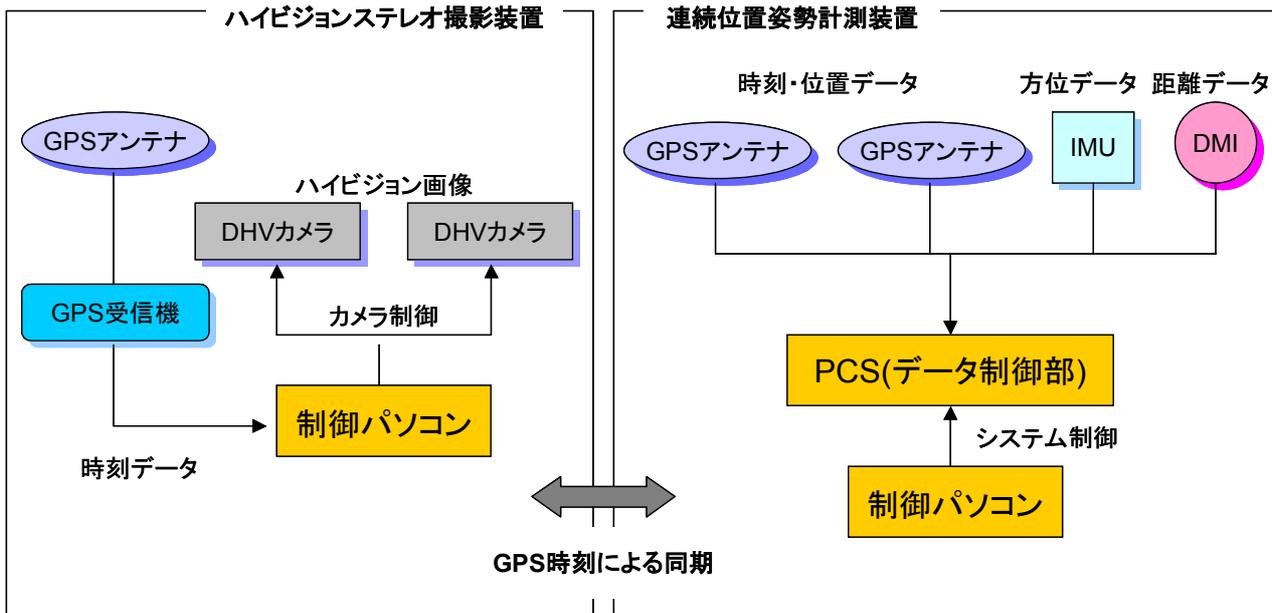


図-5 計測装置の関連

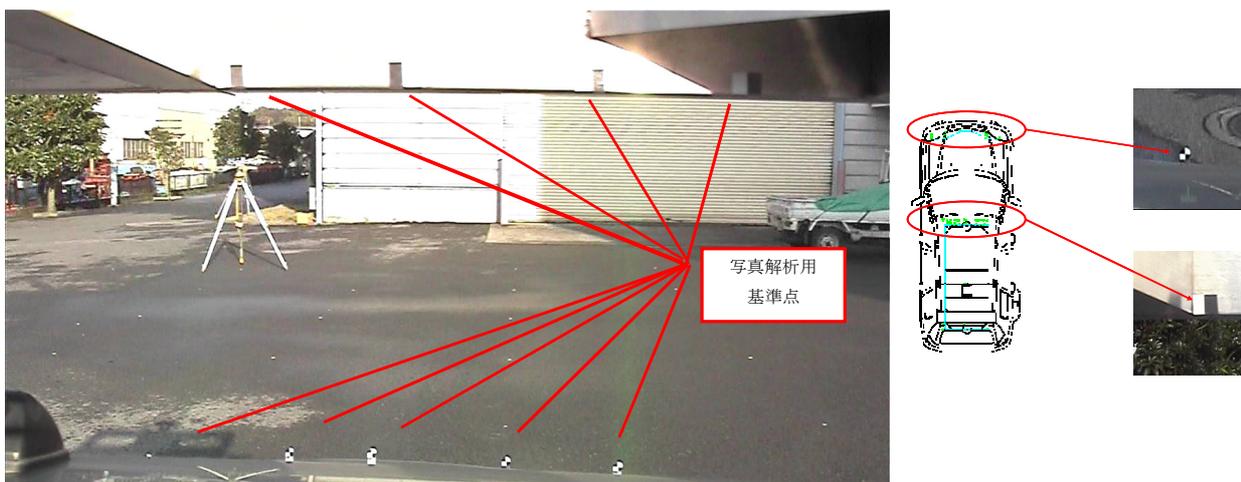


図-6 写真解析用基準点（右カメラの画像と配置図）

### (3) システム構成

本システムは図-1に示すように3台のDHVC（図-2）とGPS/IMU装置（図-3）、時刻同期用のGPS受信機および計測機器を制御するパソコン（図-4）とで構成されている。

GPS/IMU で取得した位置姿勢データを元に車両前部に設置した複数の基準点ターゲットの座標値を算出してその座標値を用いてステレオ画像の三次元解析を行い、世界測地系に基づいて形状データを取得する。

本システムでは車両走行時の衝撃を緩和するためにDHVカメラの取付け箇所へダンパーを入れており、計測時は2台のカメラ位置関係は常に変化する。そこで図-6のように、映像中に基準点を設けてフレーム毎に標定を行っている。この基準点は連続位置解析装置で得られた

三次元位置データをもとにフレーム毎に座標変換を行って写真解析の標定処理に用いる。

### 3. 計測及び解析手順

計測手順を図-5に示す。DHVCで撮影された30分の1秒単位の動画フレームからは1280×720画素の高精細な静止画をキャプチャーすることが可能であり、その画像を写真解析して対象物を計測する。連続位置計測システムであるGPS/IMUは、走行経路の位置（緯度・経度・楕円体高）および車体の姿勢（Roll, Pitch, Heading）を高精度に最大200Hzで計測する。

計測時はDHVCで撮影した映像をMiniDVテープに録画、GPS/IMUからは位置データ、方位データを記録しながら

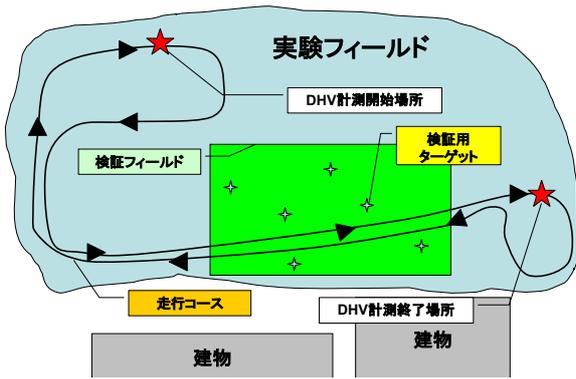


図-7 実験フィールド

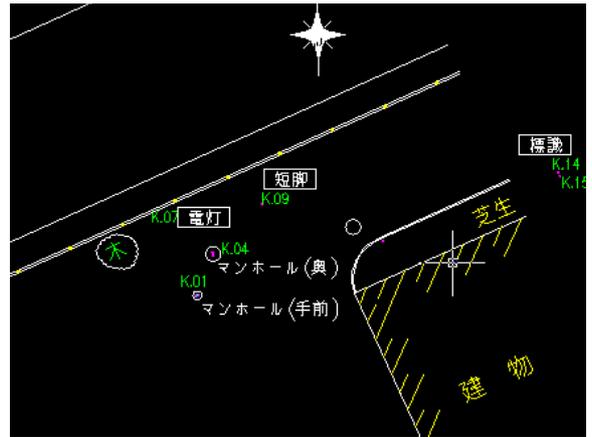


図-9 検証用ターゲットの配置

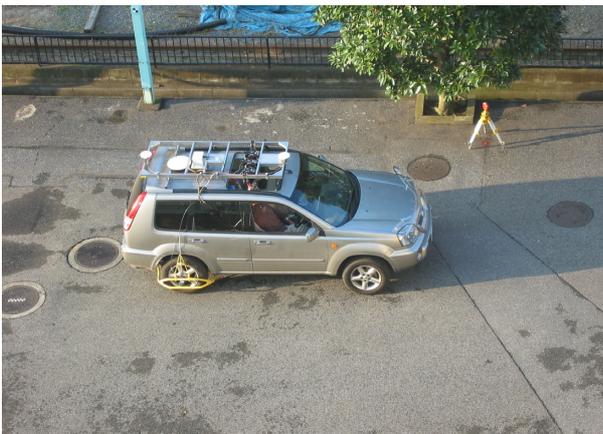


図-8 計測車両全景

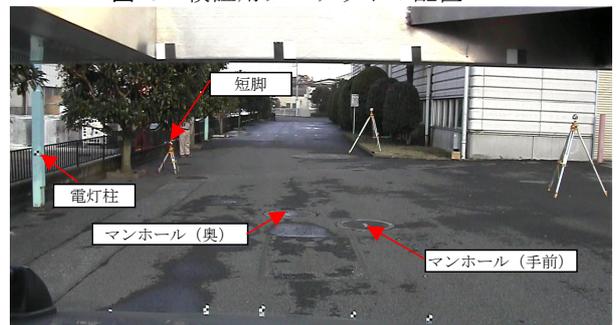


図-10 検証用ターゲット

道路を走行する。ハイビジョンステレオ撮影装置のデータと連続位置計測システムのデータはGPS時刻による同期を取ることで対応付けしている。映像はMiniDVテープを再生装置および動画編集装置で処理して動画データとし30分の1秒単位のフレームをキャプチャーして静止画データを得る。

#### 4. 精度検証

##### (1) 実験目的

本システムによる計測精度を検証することを目的に走行計測実験を行った。主な誤差要因としては、

- a) GPS/IMU の測位・姿勢誤差
- b) 写真解析の誤差 (計測距離が影響すると予想)
- c) GPS/IMU とDHVCとの同期誤差

が考えられる。a), b), c) の誤差の大きさは個別に検証は可能であるが、今回はa) の誤差とシステム全体としての精度を検証した。

##### (2) 実験・検証方法

以下の方法で実験および検証を行った。

- ① 当社技術研究所敷地内で走行コースを設定し (図-7), コースの周辺に精度検証用ターゲットを設置する (図-9, 10)。ターゲットの三次元座標をトータルステーション (TS) で計測する。
- ② GPS/IMU, DHV カメラを動作させ、データ取得を行いながら10回コースを走行する (図-8)。
- ③ 取得したデータの同期をとり、DHVC画像のステレオ画像解析を行う。
- ④ 画像解析後、検証用ターゲットの座標値を抽出し、TSによる計測値との比較を行う

##### (3) データ処理方法

取得したデータの解析は次の手順で行った。

- ① GPS/IMU データの解析による走行軌跡算出: GPS と IMU の両方データを用いて三次元走行軌跡を算出する。GPS 受信がない場合は IMU データのみで解析。
- ② GPS/IMU と DHV を GPS 時刻により同期させる: ビューワー画面により同期を確認する。
- ③ 左右の DHV 画像内のターゲット (標定点) に対応する位置情報を抽出: GPS/IMU データの姿勢・位置データから DHV 画像撮影時刻のデータを抽出して、標定点の三次元座標を算出する。

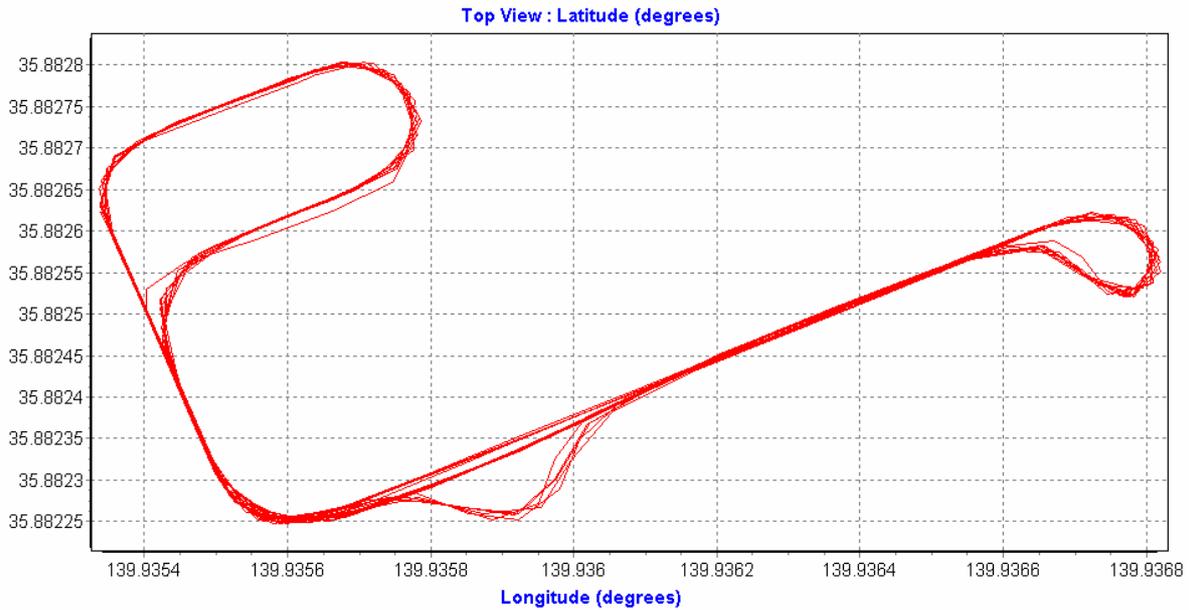


図-11 GPS/IMUによる走行軌跡平面図  
North Position RMS error (meters)

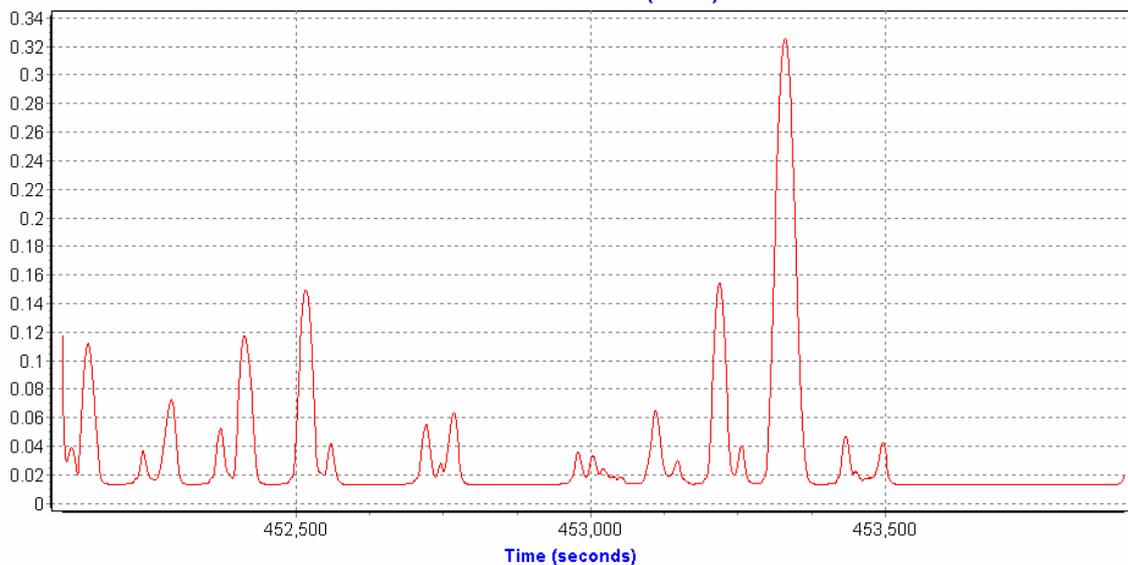


図-12 時刻毎の RMS 誤差（北方向）

- ④ 左右の画像を三次元写真解析し，画像上の道路情報を抽出し，平面図・断面図を作成する。

(4) 実験結果

① GPS/IMU データの解析

図-11 に GPS/IMU により解析した走行軌跡図を平面図で示す。計測精度については図-12 に北方向の RMS 誤差（平均二乗誤差）を時系列データとして示すが，GPS 電波が安定して受信できている場所では 2cm の精度，電波が途切れて不安定な時間帯には 10cm～30cm の誤差が発生している。検証用ターゲットを撮影した時間帯では 2cm～10cm の誤差となっている。

なお，東方向の RMS 誤差，高さ方向の RMS 誤差も同様の結果を示している。したがって，検証用ターゲット撮影時間帯での三次元（斜距離）の RMS 誤差は 4cm～20cm となった。

② 検証用ターゲットの座標値比較

ステレオ画像解析後，各標定点の位置を計測して抽出した座標値の検証を行った。10回の走行計測は時速 30km での走行を 5 回，時速 40km での走行を 5 回行った。表-1は，10回の走行計測の中で各ターゲットの計測値が最も良い（TS との結果の差が最も小さい）場合についてまとめたものである。平均較差は 97mm，最小較差は 61mm となった。

表-1 検証用ターゲットの座標値比較 ( TS 計測値と本システムによる算出値との比較)

| Name | TS座標値      |          |        | 解析結果座標値    |          |        | 較差 (TS-写真解析結果) |        |        |       |
|------|------------|----------|--------|------------|----------|--------|----------------|--------|--------|-------|
|      | X          | Y        | Z      | X          | Y        | Z      | dx             | dy     | dz     | dR    |
| K.01 | -13046.552 | 9270.495 | 59.027 | -13046.583 | 9270.525 | 58.984 | -0.031         | 0.030  | -0.043 | 0.061 |
| K.04 | -13043.661 | 9271.589 | 59.004 | -13043.618 | 9271.512 | 59.070 | 0.043          | -0.077 | 0.066  | 0.110 |
| K.07 | -13041.358 | 9269.278 | 59.892 | -13041.400 | 9269.320 | 59.962 | -0.042         | 0.042  | 0.070  | 0.092 |
| K.08 | -13041.386 | 9269.387 | 60.850 | -13041.339 | 9269.311 | 60.786 | 0.047          | -0.076 | -0.064 | 0.110 |
| K.09 | -13040.136 | 9275.004 | 59.025 | -13040.193 | 9274.963 | 59.067 | -0.057         | -0.041 | 0.042  | 0.082 |
| K.10 | -13041.773 | 9281.354 | 59.123 | -13041.732 | 9281.293 | 59.173 | 0.041          | -0.061 | 0.050  | 0.089 |
| K.13 | -13042.708 | 9283.397 | 59.277 | -13042.651 | 9283.331 | 59.322 | 0.057          | -0.066 | 0.045  | 0.098 |
| K.14 | -13037.943 | 9295.641 | 60.888 | -13037.872 | 9295.564 | 60.947 | 0.071          | -0.077 | 0.059  | 0.120 |
| K.15 | -13038.190 | 9295.754 | 61.057 | -13038.261 | 9295.827 | 61.006 | -0.071         | 0.073  | -0.051 | 0.114 |
| K.17 | -13049.414 | 9274.882 | 59.164 | -13049.476 | 9274.925 | 59.225 | -0.062         | 0.043  | 0.061  | 0.097 |
|      |            |          |        |            |          |        | 平均値            |        |        | 0.097 |
|      |            |          |        |            |          |        | 最大値            |        |        | 0.120 |
|      |            |          |        |            |          |        | 最小値            |        |        | 0.061 |

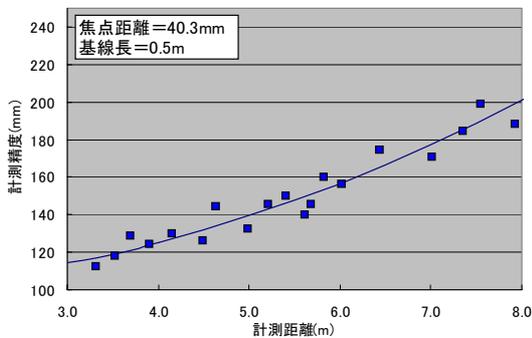


図-13 計測距離と精度との関係

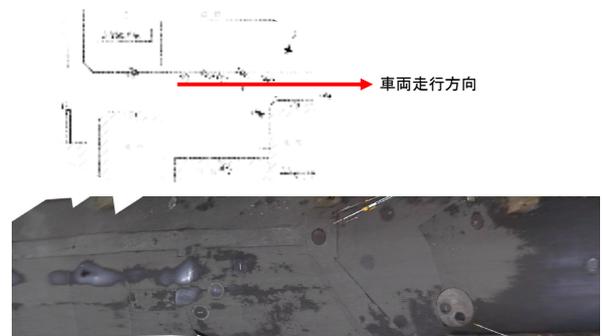


図-15 平面図 (オルソ画像) 作成例

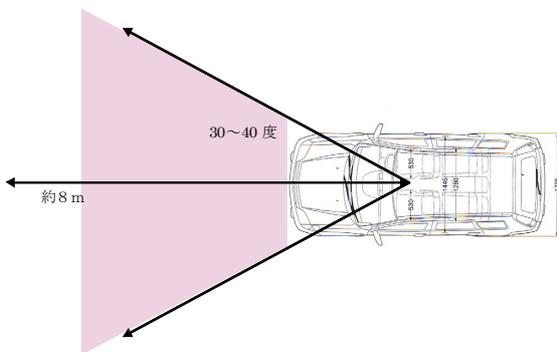


図-14 計測可能範囲

③計測距離と精度との関係

同じ検証用ターゲットに対してカメラからの距離を変えて写真解析を行い、座標を算出して TS による座標値との較差を求めた。ただし、DHVCのカメラ焦点距離を40.3mm、左右のカメラの基線長を0.5mとしている。その結果を計測距離と計測誤差の関係としてグラフ化し、近似曲線を求めたのが図-13である。計測距離が大きくなるに従って、計測誤差が増加する傾向が顕著に出ている。

図-13 から計測精度を 0.20m 以内に収めたい場合、カ

メラから 3m ~ 8m までの範囲を計測有効距離範囲にすればよいことがわかる。また、計測有効画角は、カメラ正面方向より±40度程度であり ( 図-14)、この範囲の外側では、計測精度が急激に劣化することを確認している。

③平面図 (オルソ画像) の作成

精度検証区間の連続撮影 DHVC 画像を射影変換によってオルソ画像に変換し、合成して作成した平面図を図-15に示す。

時速30kmで走行した場合、30Hzで記録されるDHVC画像は車両の進行方向に約27cmずつずれた連続した画像となる。適当な時間間隔で画像を抽出してオルソ画像に変換し、合成を行って平面画像図を作成する。この平面画像図は平面座標を持っているので、画像上の地物をトレースすることにより、平面図を作成できる。

5. 街路走行実験

本システムを用いて当社技術研究所の周辺街路を走行して試験計測を行った。同期が完了したDHVC画像デー

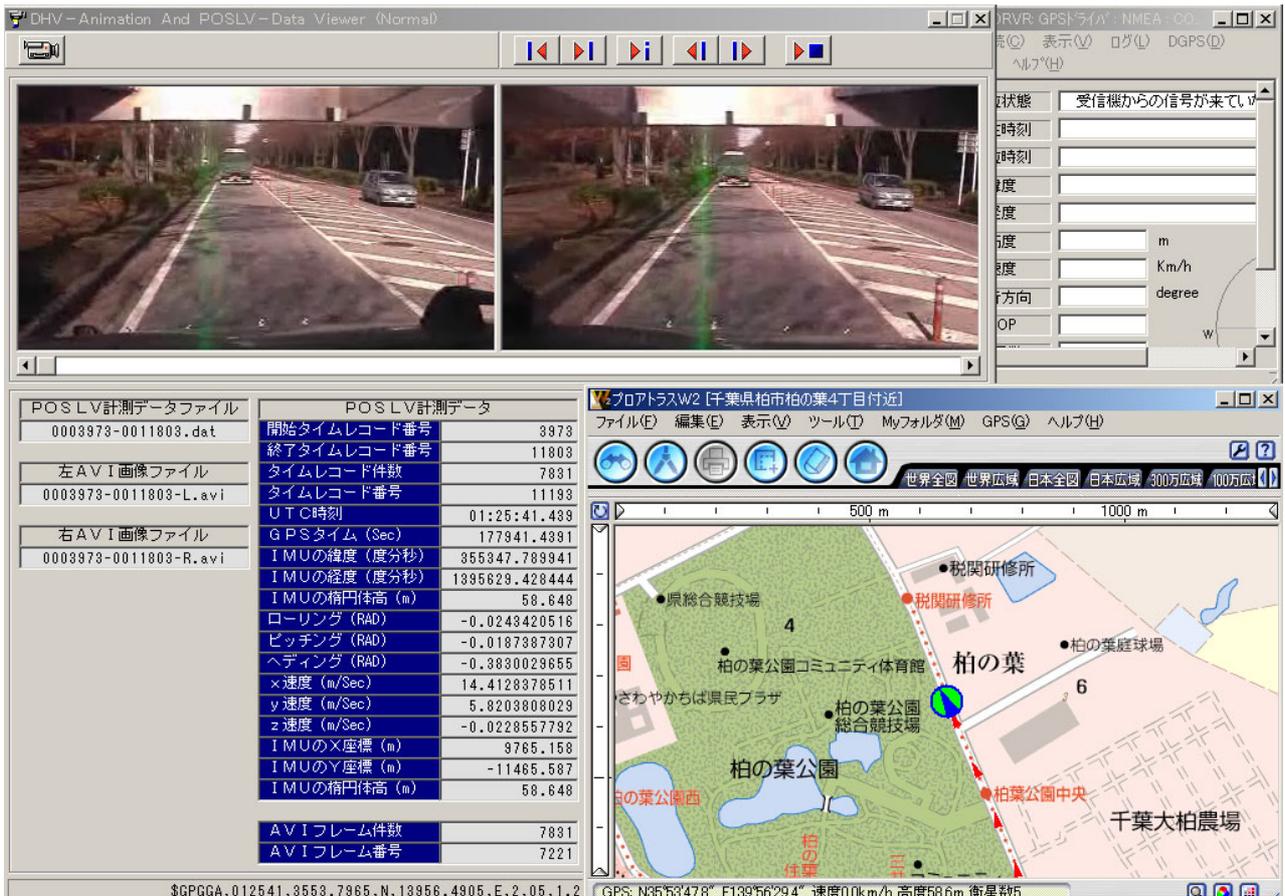


図-16 ビューワの画面例

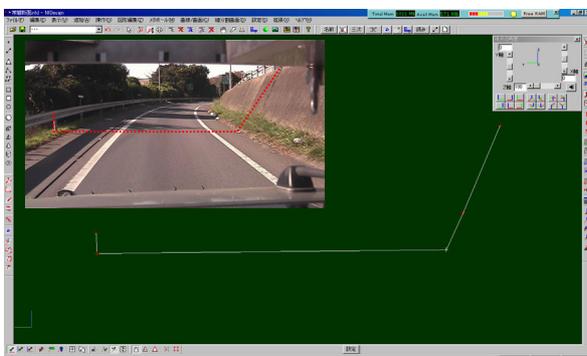


図-17 道路断面作成例

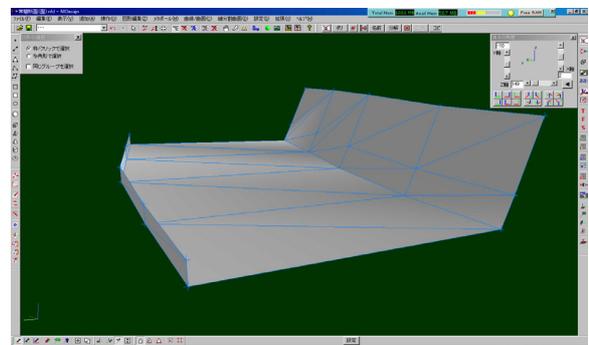


図-18 道路面合成例

タ、GPS/IMUデータを今回新たに開発したビューワーで表示させた(図-16)。本ビューワーは、解析対象とする撮影画像を特定するために開発したものであり、左右のDHVC画像、GPS/IMUの各種情報(位置、姿勢、速度など)、走行軌跡(市販の地図ソフトを利用)が同時に表示され、記録したDHVC画像を再生しながら各画像に対応するデータが表示されるようになっていた。このビューワーを用いて、同期の確認を行い、ほとんどの区間で同期が取れていることを確認した。ただし、路面状態等の諸条件により良好な静止画データを得ることができない場合もあった。

本手法で計測した断面計測データを図-17、走行した道路面を変換合成したデータを図-18に示す。

## 6. まとめ

### (1) 本研究の成果

① GPS/IMUによる位置・姿勢データとDHVCによるステレオ画像データを組み合わせて、走行しながら連続的に周辺形状を計測して三次元モデル化するシステムを構築した。

②実験時の GPS/IMU の精度は 4cm ～20cmであったが、本システムによる全体の計測精度は三次元座標値（斜距離）の比較で最も良い場合で約10cmであった。また、カメラから被写体までの距離が8mまでは約20cmで計測できることがわかった。

ただし、これは GPS/IMU と DHV カメラの同期が取れている場合であり、同期精度が悪くなれば精度低下が生じる。なお、20cmの精度であれば 1/500 平面図等の作成に利用できると考えられる。

③三次元写真解析により抽出した道路空間データから図面を作成するシステムを構築した。また、DHVC取得画像と GPS/IMU データ及び地図データを組み合わせたビューワーを作成した。これにより、画像データの同期の確認や解析対象となる画像データの切り出し作業が容易になった。

## （2）本研究の展開

本手法による計測は、時速50km～60kmの通常の走行速度で計測可能であり、映像に写っている対象であれば位置を計測できるという特徴を有している。カメラの画角、CCDの解像度、対向車両により1回の走行ですべての対象を計測するのは困難であるが1車線の道路であれば往復の最低2回走行で道路に関する位置データを収集することができ、在来の方法に比べ非常に短時間に現場での計測作業を終えることができる。以下に本手法が実用化した場合に期待される効果を示す。

- ・通常速度で走行しながら計測するので交通規制が不要である
- ・一度に道路および道路に関する施設を計測可能である
- ・在来手法に比べ短時間で計測作業が終了する
- ・映像としてデータを取得するので再測する場合、現場に行く作業が不要である
- ・映像と位置情報をデータベース化することで時系列的に道路施設を管理することが出来る。
- ・現場では計測車両を運転するだけで安全である。

在来手法と比較するとまだまだ計測精度は粗いが、撮影条件や機材の性能向上で精度の向上は十分期待できると思われる。精度の向上を図りながら、解析図面の自動化・省力化を進め、実用化に向けた整備を進めていきたい。

謝辞：本研究の実施に当たっては、株式会社テクノバングード掛橋孝夫氏、株式会社フィールドテック村山盛行氏に多大なるご協力をいただいた。ここに深く感謝の意を表す。

## 参考文献

- 1) 辻 求：車両搭載型センサを用いた三次元都市空間モデルの構築，応用測量論文集，Vol.14，2003.6
- 2) 村山盛行，佐田達典：地上型レーザースキャナーとGPS/IMUを用いた三次元形状計測システムの開発，応用測量論文集，Vol.15，pp.91-102，2004.6