

## 高速走行車両からの撮影画像を用いた舗装路面の形状把握に関する基礎的研究

A Fundamental Study of Grasping a Shape of Pavement Surfaces  
using Photographs Taken from a Car Moving at a High Speed

伊東達彦	Tatsuhiko ITO	(広島大学大学院工学研究科)
一井康二	Koji ICHII	(広島大学大学院工学研究院)
角田光法	Mitsunori KADOTA	(元広島大学大学院工学研究科)
石井詩穂	Shiho ISHII	(広島大学大学院工学研究科)
栗原大	Ooki KURIHARA	(広島大学大学院工学研究科)
玉木徹	Toru TAMAKI	(広島大学大学院工学研究院)

近年、土木構造物の効率的な維持管理手法として画像解析技術の導入が進められている。本研究では、目視を主体とした調査に多くを依存している高速道路路面の維持管理に対して、デジタルカメラ画像による3次元形状復元(SIFTを用いた画像解析技術)の適用性を検討した。まず、時速40km/hで走行する車両からの撮影画像による路面の復元形状が可能であり、画像解析の適用性があることを示した。さらに、時速80km/hで高速走行する車両から道路路面を撮影した画像を用いた場合には、シャッタースピードの設定が重要であることを示した。

キーワード：維持管理，画像解析，3次元形状復元，高速道路 (IGC：H06, C07, C04)

## 1. はじめに

現在、舗装路面の維持管理では、主に路面の損傷などの確認を目的とした巡回パトロールが行われている。その上で異常があると判断された場合には、3mプロフィールメータによる平坦性評価や、水糸によるわだち掘れの測定が行われる<sup>1)</sup>。しかし、目視や手作業が主体の調査になるため、労力や時間を必要とすることに加えて、調査の精度が実施する者の経験に左右され、定量的な評価とは言い難い。

近年、画像解析の分野では、デジタルカメラ画像による3次元形状復元が可能となってきた。特に、画像の特徴点をSIFT(Scale Invariant Feature Transformation)<sup>2)</sup>により求め、特徴点によりカメラパラメータを逆算し、対象物の表面形状を3次元点群として復元する技術が確立されてきた。このため、デジタルカメラの撮影位置の情報を与えることなく、極めて簡便に3次元形状の復元が可能となっている。そして、この手法では簡便に構造物の3次元形状を記録できるため、形状の変化を把握することで、土木構造物の維持管理の高度化が期待できる。

現在、土木分野におけるSIFTを用いた画像解析を適用性した研究が進められており、各種土木材料や消波ブロックへの適用性検討がなされ、簡便な維持管理手法が構築できる可能性が指摘されている<sup>3,4,5)</sup>。そこで本研究では、走行車両上から舗装路面を撮影し、復元形状を定量的に把握して、形状の変化を評価できる手法の開発を目指した。

## 2. 撮影画像による3次元形状復元

## 2.1 3次元形状復元の原理

SIFTを用いた3次元形状復元は、特徴点の検出、特徴点の対応付け、3次元座標点の算出の3段階の作業からなる。図-1に復元の流れを示す。

まず第1段階は、画像内の特徴点の検出である。図-1(a)に示すように、特徴点とは周囲の色(輝度)と比べて、自身の色(輝度)が大きく異なる点であり、画像中のエッジやコーナー検出されやすい点のことである。複数の画像で同一と認識できた点について、3次元位置の情報が得られると形状の認識ができる。特徴点とはこの様に、同一点として対応付けるための何らかの特徴を持つ点である。しかし、手動で特徴点を与える作業は大変である。これに対し、自動で特徴点を検出する方法としてSIFTが提案されている<sup>2)</sup>。SIFTは画像中の輝度変化をもとに特徴点を検出し、特徴点周辺の輝度勾配と輝度方向を示す特徴量を算出するアルゴリズムである。

次の段階は、特徴点の対応付けである(図-1(b))。対応付けとは、検出した特徴点が他の画像ではどこにあるかを探すことである。手動で特徴点を与える場合、人間の判断で対応付けを行うが、その作業は極めて大変である。これに対しSIFTを用いる方法では、SIFT特徴量の類似性を用いて、自動で対応付けを行う。

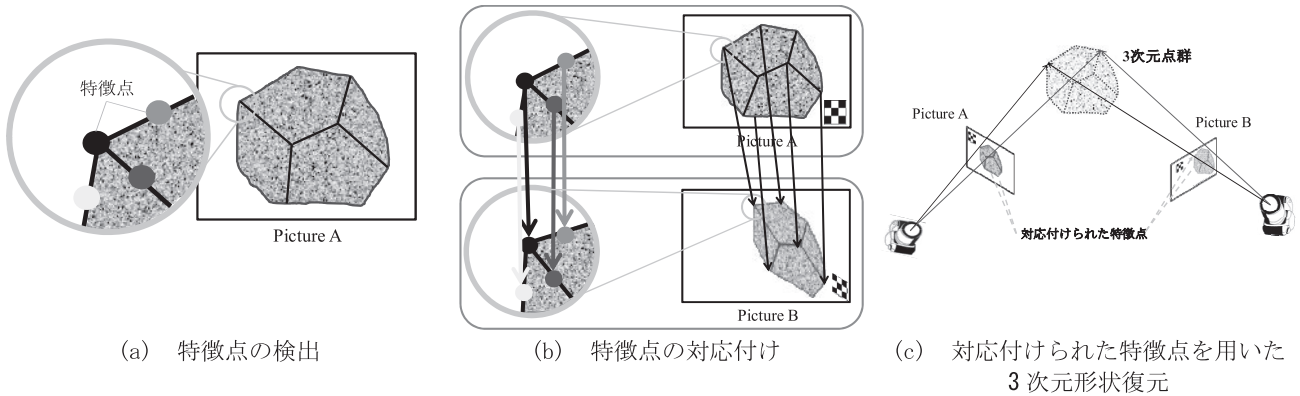


図-1 SIFT を用いた 3 次元形状復元の流れ

そして最後の段階は、対応付けられた特徴点を用いた 3 次元形状復元である(図-1(c)). 三角測量の原理を用いて、カメラから特徴点へ直線を引き、対応する特徴点を通る 2 本の直線の交点が復元した 3 次元点となる。もし対応が誤っていると、本来得られるはずであった 3 次元位置とは異なる位置が得られ、異なる形状が得られることとなる。そのため、特徴点は正しく対応付けられなければならない。

この 3 次元形状復元の手法では、多くの特徴点の情報からカメラ位置を未知数として逆解析で求めるため、撮影時のカメラ位置を指定する必要はない。

## 2.2 3 次元形状復元のデータ処理の流れ

本研究の検討事例では、画像解析のフリーソフトである Bundler<sup>6)</sup> と PMVS2<sup>7)</sup> を用いて、図-2 に示すような処理を行った。Bundler は入力情報として対象物を写した 3 枚以上の画像を用い、各画像で特徴点を検出する。そして、画像 2 枚ごとに比較を行い、特徴点情報の一致を基にカメラの 3 次元位置情報と対象物の 3 次元形状情報を出力する。ここで出力される 3 次元形状情報はわずかで、対象物の形状が分かるほど正確な情報ではない。そこでさらに、PMVS2 を用いて対象物の詳細な 3 次元形状復元を行う。ここでは、Bundler で出力されたカメラの位置情報と画像を入力情報として用いる。3 次元復元された形状は点の集合であり、各点の 3 次元座標値と各点の表面法線情報、色情報(RGB) の 9 つが出力される。

前述したように、SIFT を用いた画像解析技術では最低 3 枚の画像から 3 次元形状復元とカメラ情報の位置決めが可能である。なお、測定精度を保证するための具体的な画像枚数に関しては、撮影角度や撮影対象の材質のほか、復元範囲や入力画像の解像度などに依存する。この点についての検討事例については参考文献<sup>3)</sup>を参照されたい。

この方法による画像解析に用いる画像は特定の位置から撮影する必要がなく、形状復元においても撮影位置の

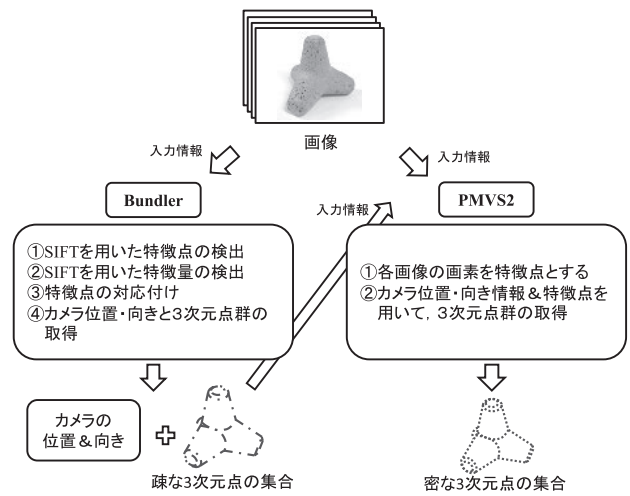


図-2 データ処理の流れ



図-3 本研究での撮影システム

情報も入力する必要がない。この点が、既往の手法と大きく異なる点であり、現場での運用を容易かつ安価に可能とする。また、画像解析に用いる画像の枚数が多ければ多いほど、より密な 3 次元形状復元が可能である。解析結果はテキスト形式のファイルで出力され、例えば非構造 3D 三角形メッシュの処理・編集のためのフリーソフトである Mesh Lab<sup>8)</sup>を用いて可視化できる。

表-1 本研究で使用したカメラの仕様

製品名	COOLPIX P7700
有効画素数	1219 万画素
撮影素子	1/1.7 型減色 CMOS, 総画素数 1276 万画素
レンズ	光学 7.1 倍ズーム, NIKKOR レンズ
	焦点距離 6.0-42.8mm (35mm 判換算 28-200mm 相当)
	開放 F 値 f/2-4
レンズ構成	10 群 13 枚 (ED レンズ 2 枚)
手ぶれ補正機能	レンズシフト方式
オートフォーカス	コントラスト検出方式

表-2 撮影条件

記録画素数	1280×960[pix]
フラッシュ	発光禁止
35mm 判換算焦点距離	28[mm]
俯角 (水平面と視線方向のなす角)	60[°]
撮影速度 (1 秒当たりの撮影枚数)	60[fps] (連写モード)
シャッタースピード	1/3200[秒]

### 3. 道路路面の形状復元とスケールの調整

図-3 に本研究で用いた走行車両を示す。ルーフトップに設置したベースキャリアに鉄製のアングルを固定した。そして、アングルに三脚の雲台を設置し、カメラを固定している。カメラは合計 2 台設置しており、レリーズを用いて助手席から 2 台同時にシャッターを押すことができる。また、表-1 に使用したカメラの仕様を、表-2 に今回のカメラの撮影条件を示す。

3 次元形状復元を行うと、3 次元点の集合で表された復元形状の他に、カメラの撮影位置が得られる。しかし、得られたカメラ位置および復元形状は無次元の座標値で表される点群であり、単位およびスケールが分からない。そこで、カメラの位置情報を用いて、復元形状を定量把握する。図-4 にカメラ間の相対位置を用いたスケール調整の概念図を示す。すなわち、同一車両を用いた撮影であれば、カメラ間の相対位置は一定である。そこで、事前にスケールを撮影し、形状復元することで、メートル単位系によるカメラ間の相対位置を把握しておく。その後の撮影では、既に得られたメートル単位系で表されたカメラ間の相対位置を利用することで、復元形状をメートル単位系で表すことが可能となる。

実際に、時速 40 km/h での走行車両上から舗装道路路面に置かれた高さ 30 mm のハンブを連写モードで撮影し、ハンブの 3 次元形状を復元した。そして、ハンブを実測した値と復元形状の値を比較し、復元精度の検討を行った。図-5 にハンブを示す。ハンブは縦 300mm、横 1800mm の木板の上に簡易アスファルト (NIPPO 製レミファルト) を

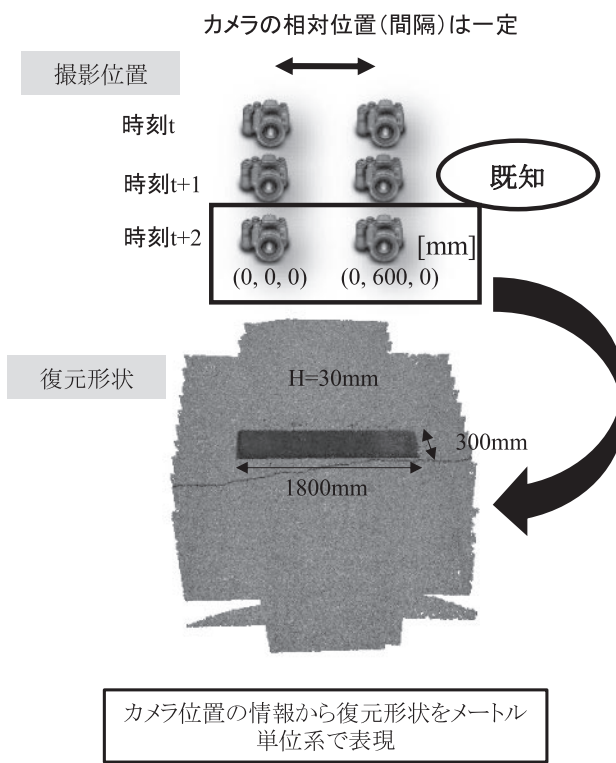


図-4 カメラ間の相対位置を利用したスケール調整の概念図

敷き詰めている。そして、ハンブの左端から 100mm おきに高さを図-6 に示す方法で測定した。また、図-3 に示した車両を用いて、ハンブを図-5 の上側から下側へと横断するように撮影し、形状復元した。そして、図-7 の復元形状をサンプリングしてハンブ高さを測定し、図-8 に実測値と復元形状の比較を示す。

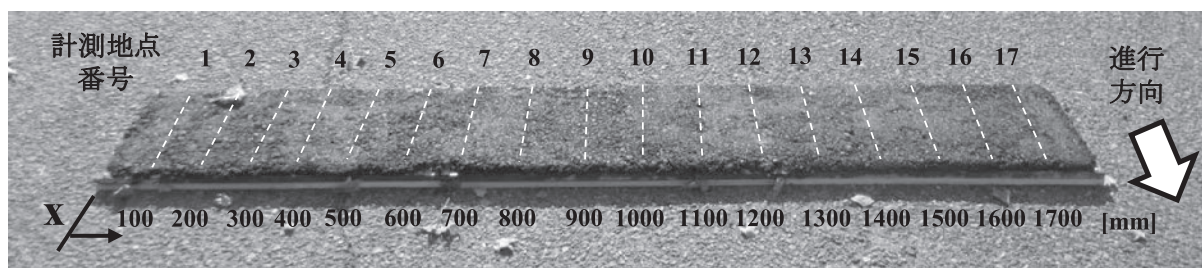


図-5 本研究で使用したハンブ



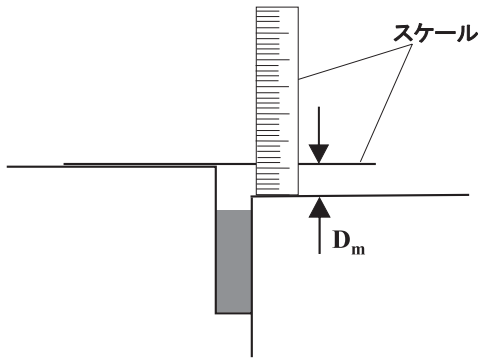


図-6 ハンプの高さの実測方法

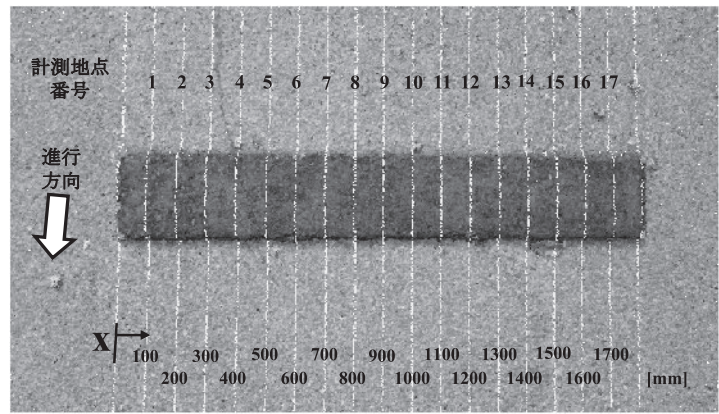


図-7 ハンプの復元形状とサンプリング地点

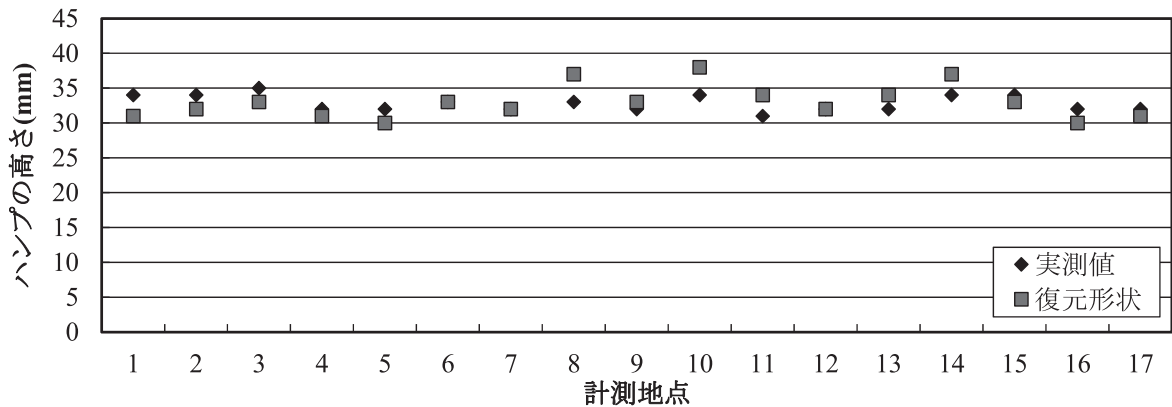


図-8 高さ約 30mm のハンプの実測と復元形状の結果

図-8 より、すべての計測地点において、実測値と復元形状の差が $\pm 5\text{mm}$ 以内となっている。維持修繕要否判断の目標値は、交通量の多い一般道路でわだち掘れの場合 $30\sim 40\text{mm}$ <sup>1)</sup>となっており、本実験で得た $\pm 5\text{mm}$ 以内は高精度であることがわかる。この結果より、低速な状態において撮影された画像を用いた3次元形状復元では、高精度で復元されており、実用レベルの精度を有した路面形状の定量把握が可能となることがわかる。なお、本来であれば高さだけでなくハンプの実測形状との比較も必要であるが、実際のハンプの形状を把握することは難しく、実施できていない。

#### 4. 提案手法の高速道路への適用性検討

##### 4.1 提案手法の高速道路への適用で考えられる問題

提案手法を高速道路の維持管理に適用する場合において、撮影する際の車両の走行速度の影響を明確にする必要がある。まず、高速走行する車両から撮影した画像を用いた3次元形状復元で発生する可能性のある問題を検討した。

一般のカメラでは、画像内のシャッターのタイミングにタイムラグが生じている。このタイムラグは、一般的には、無視できるようなとても短い時間である。したがって、シャッターによるタイムラグの詳しい説明は、ほとんどの場

合、カメラの仕様には載っていない。しかし、このタイムラグが発生した画像を用いた3次元形状復元では、問題が発生する可能性が考えられる。

点Bに対するカメラのシャッターのタイミングを*i*時点、点Aに対するタイミングを*j*時点とした場合を考える。図-9に、シャッターのタイムラグによる影響の概念図を示す。*i*時点では点Bより遠方のみ撮影され、点Aは撮影されていない(図-9(a))。しかし、実際にはシャッターの遅れにより、点Aは*j*時点のときに撮影されたとする(図-9(b))。このとき、画像中の点Bの位置は正しいと仮定すると、点Aの位置にはずれが発生してしまうことがわかる。そして図-9(c)に示されるように、カメラ1とカメラ2での画像中にあるそれぞれの点Aは、予想される位置より内側に移動することが考えられる。

図-10にこれらの誤差がどのようにカメラの撮影位置に影響を与えるかを示す。この図では車両に設置された右側のカメラ(図-9のカメラ2)を考える。カメラの撮影位置は、図-10(a)での点AとBの位置情報を用いて、逆解析することによって得られる。しかし、画像中の点Aの位置が本来あるべき位置と異なると、推定されたカメラ位置にも図-10(b)のように誤差が生じる。この場合では、撮影された点Aの位置は画像の上側(車両の進行方向左側)にずれる。よって、カメラ位置の推定の誤差は、図-10(b)のように、カメラの推定位置が下側(車両の進行方向右側)にずれるという傾向が出てくる。

なお、同じ画像内の点について大きなタイムラグが生じた画像ほど、カメラの推定誤差は大きくなると思われる。そして、もしカメラの推定位置に大きな誤差が発生しているならば、画像中のずれが大きいことが考えられるため、その画像を用いた 3 次元形状復元した際の復元精度は低くなるのがわかる。その誤差の大きさは、車両の走行速度とカメラのシャッタースピードに影響されることが考えられる。

#### 4.2 実フィールドにおける実験

上述の問題を調べるために、実フィールドでの実験を行った。実験では道路路面を、走行速度 40km/h, 60km/h, 80km/h で走行する車両上から連写モードで撮影した。この実験で使用した車両と撮影機構は図-3、カメラの仕様は表-1 と同様である。表-3 に撮影条件を示す。シャッタースピードは 1/1600 秒, 1/2000 秒, 1/3200 秒, 1/4000 秒で変化させて実験した。

3次元形状復元は各カメラ 5 枚ずつの画像を用いて行った。そして、復元形状とカメラの撮影位置を実スケールに調整した。図-11 にそれぞれの走行速度とシャッタースピードで撮影された画像の例を示す。図-11 からは時速 80km/h の場合において、シャッタースピードが 1/1600 秒の画像はぶれたように点が流れて見えるが、1/4000 秒の画像はその傾向が見られない。また、これらの画像は、同じような路面が映っているだけで、3次元形状復元過程で特徴点と特定できるような点は多くないように見えるが、SIFT のアルゴリズムの適用性は高く、図-1 に示した手順でのカメラの撮影位置の逆解析は可能であった。

図-12, 13 には走行速度 40km/h と 80km/h で撮影した画像を用いた復元により得られたカメラの撮影位置を示す。これらのカメラ位置は水平面への投影図であり、右側のカメラの画像の最初の 1 枚の撮影位置を原点とした。また、右側のカメラの動く方向を x 軸と一致させた。

まず、カメラ位置の安定性の評価として、右側のカメラの位置がどの程度 x 軸と一致しているかを評価した。表-4 は右側カメラの撮影位置の横変動の平均値を示す。これらの値には、一定の傾向が見られない。つまり、横変動の平均値は一定ではなく、走行速度にあまり依存していない。

表-5 は右側のカメラの軌跡 (x 軸) と左側のカメラの軌跡 (左側のカメラ位置の近似直線) のなす角度を示している。カメラ間の距離が広がる場合はプラス、狭まる場合はマイナスになるようにした。表-5 では、走行速度が上昇するにつれて、カメラ間の角度が大きくなる傾向が見られる。この実験は 1 ケースしか行っていないが、この結果は、シャッターのタイムラグによって問題が生じる可能性があるという前記の考慮と一致している。特に、車両が時速 80km/h で走行しているとき、この影響は大きくなり、明瞭となる。しかし、高速度のシャッタースピード (1/4000 秒) で撮影された画像を用いた復元では、カメラ間の角度は 1 度未満に収まり、この影響の程度は小さい。

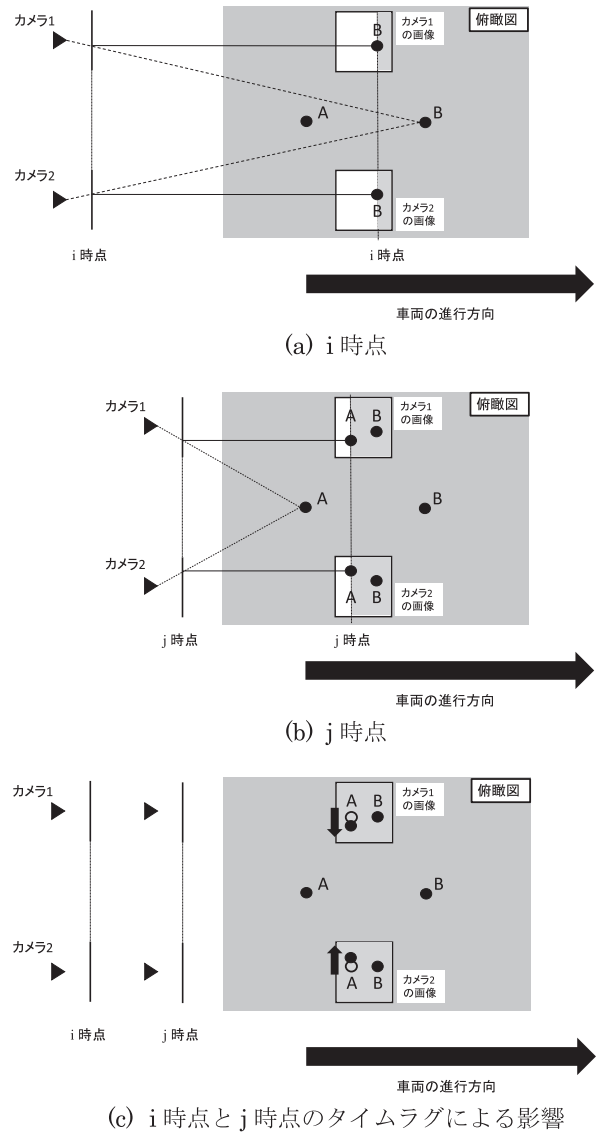


図-9 シャッターのタイムラグによる影響の概念図

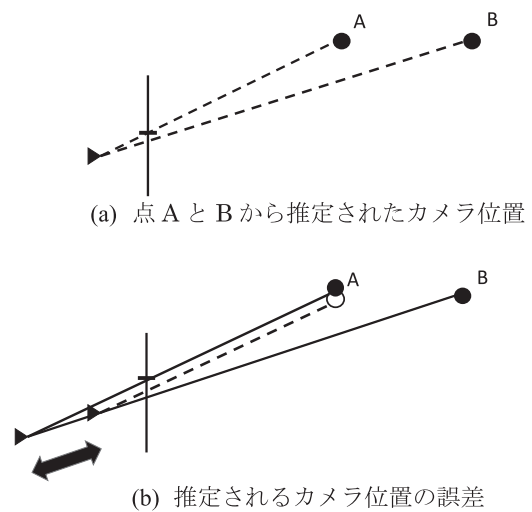


図-10 カメラ位置の推定で生じる誤差の概念図





(a1) シャッタースピード (1/1600 秒), 時速 40km/h



(a2) シャッタースピード (1/4000 秒), 時速 40km/h



(b1) シャッタースピード(1/1600 秒), 時速 60km/h



(b2) シャッタースピード(1/4000 秒), 時速 60km/h

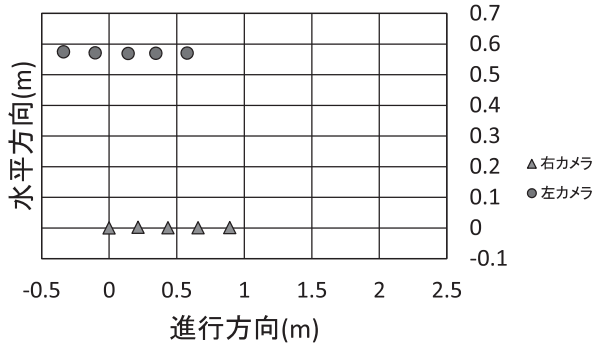


(c1) シャッタースピード(1/1600 秒), 時速 80km/h

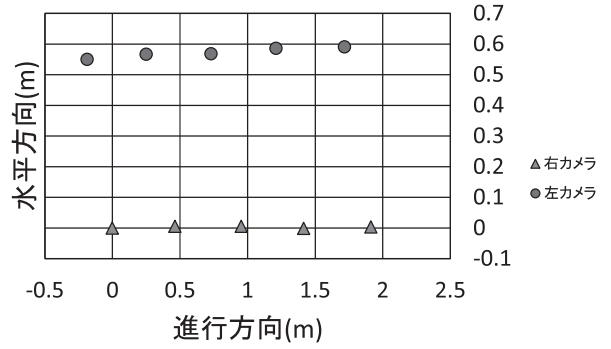


(c2) シャッタースピード(1/4000 秒), 時速 80km/h

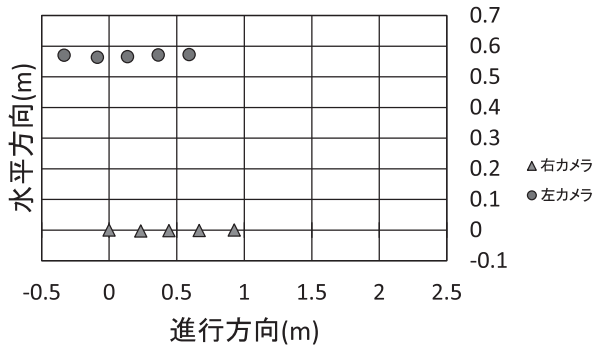
図-11 3次元形状復元に用いた道路路面の画像の例



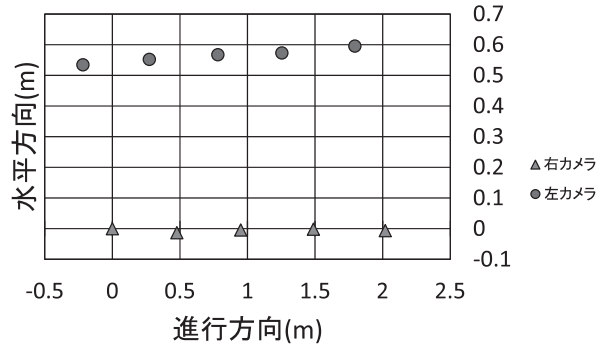
(a) シャッタースピード (1/1600 秒)



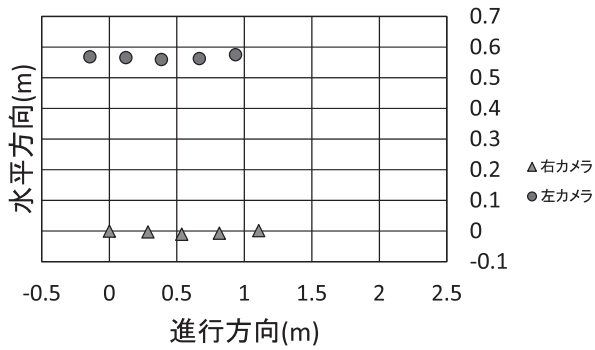
(a) シャッタースピード (1/1600 秒)



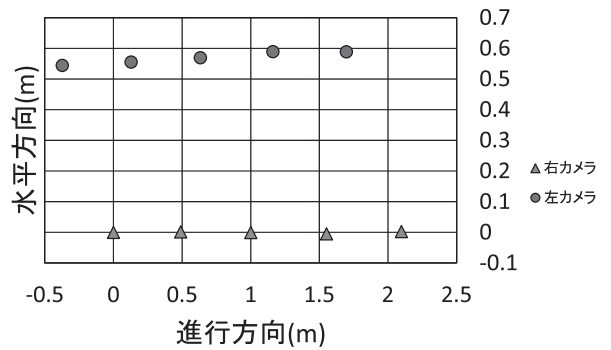
(b) シャッタースピード (1/2000 秒)



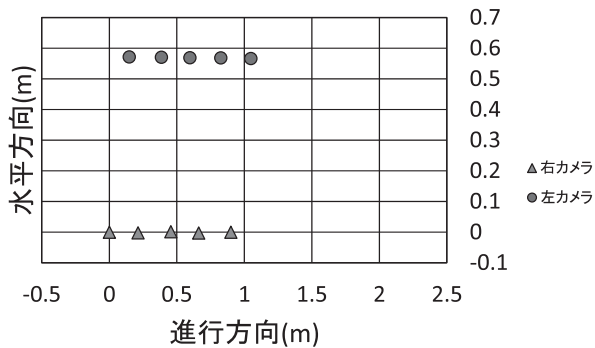
(b) シャッタースピード (1/2000 秒)



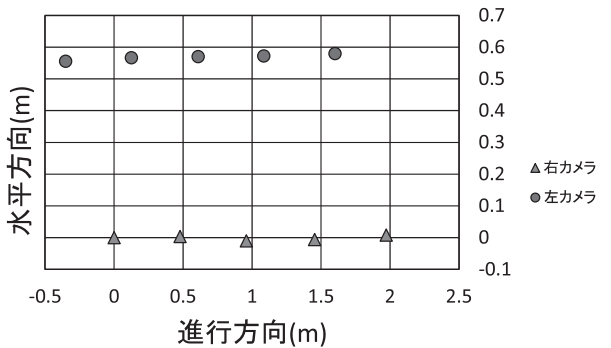
(c) シャッタースピード (1/3200 秒)



(c) シャッタースピード (1/3200 秒)



(d) シャッタースピード (1/4000 秒)



(d) シャッタースピード (1/4000 秒)

図-12 推定されたカメラ位置 (40km/h)

図-13 推定されたカメラ位置 (80km/h)

以上の結果は、車両の走行速度が大きい時にはシャッターのタイムラグによる問題が発生するという我々の考慮が正しいことを示している。つまり、車両の走行速度が大きいと、図-10で模式的に示した点Aの画像内の移動量が大きくなり、シャッターのタイムラグの影響が大きくなるが、シャッタースピードを速くすることでタイムラグ自体を小さくし、問題を抑制することができる。しかし、この実験は1ケースだけしか行えていない。したがって、定量的な結論を得るためには、実際に撮影条件を変えつつ、より多くの実験を行っていく必要がある。

表-3 撮影条件

記録画素数	1280×960[pix]
フラッシュ	発光禁止
35mm判換算焦点距離	28[mm]
俯角（水平面と視線方向のなす角）	45[°]
撮影速度（1秒当たりの撮影枚数）	60[fps]

表-4 右側カメラの撮影位置の横変動の平均値 (mm)

	40km/h	60km/h	80km/h
1/1600	0.73	2.2	3.2
1/2000	1.5	0.37	4.8
1/3200	4.2	3.8	1.9
1/4000	1.2	5.5	5.5

表-5 推定された2台のカメラの軌跡がなす角 (°)

	40km/h	60km/h	80km/h
1/1600	-0.25	0.53	1.22
1/2000	0.29	0.26	1.6
1/3200	0.23	0.71	1.4
1/4000	-0.32	0.13	0.64

## 5. 結論

- (1) 車両の走行速度が 20km/h, 40km/h のとき,  $\pm 5$ mm 以内の精度で路面形状の定量把握が可能であることが示された。
- (2) 高速走行車両から撮影された画像を用いた場合の 3次元形状復元には, シャッターのタイムラグが起因した問題が生じると予想した。そして, 実際のフィールドにおいて行った実験で, 車両の走行速度が 80km/h の場合, 予想通りカメラ位置の推定精度に問題が生じた。
- (3) 車両の走行速度が 80km/h のときであっても, シャッタースピードが速い場合, カメラの撮影位置の推定誤差は小さくなる。

## 謝辞

本研究は, 地盤工学会の道路保全地盤技術向上の調査・研究助成事業の支援を受けて実施した。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 財団法人道路保全技術センター 道路構造物保全研究会: アスファルト舗装保全技術ハンドブック, 2010
- 2) David Lowe : Distinctive image features from scale-invariant keypoints, *International Journal of Computer Vision*, Vol.60, No.2, pp.91-110, 2004.
- 3) 角田光法, 一井康二: 土構造物の維持管理への SIFT を用いた画像解析の適用性に関する研究: 地盤の環境・計測技術に関するシンポジウム, 地盤工学会関西支部, pp.5-10, 2011.
- 4) 一井康二・玉木徹: 画像解析を用いた護岸消波工の積層構造分析技術の開発と維持管理及び長寿命化への応用, 平成 22 年度中国地方建設技術開発交流会, 2010.
- 5) Lin, B., Ueno, Y., Sakai, K., Tamaki, T., Raytchev, B., Kaneda, K., Ichii, K: "Image Based Detection of 3D Scene Change," *IEEJ Transactions on Electronics, Information and Systems*, Vol. 133, No. 1, pp.103-110 (2013b).
- 6) N. Snavely, S. M. Seitz and R. Szeliski : Modeling the World from Internet Photo Collections, *International Journal of Computer Vision*, vol.80, No.2, pp.189-210, 2008.
- 7) Y. Furukawa, J. Ponce, J : Accurate, Dense, and Robust Multiview Stereopsis, *Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol.32, no.8, pp.1362-1376, 2010.
- 8) Mesh Lab : <http://meshlab.sourceforge.net/>  
(確認年月: 2014年6月)

(2014年6月23日 受付)