

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の試み

A Challenge to Grasp the Flatness of Road 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)
角田光法	Mitsunori KADOTA	(元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)
玉木徹	Toru TAMAKI	(広島大学大学院工学研究院)
石井詩穂	Shiho ISHII	(広島大学大学院工学研究科)

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次元形状復元の適用性を検討した。まず、時速40 km/hで走行する車両からの撮影画像による路面の形状評価が可能であることを示した。さらに、高速走行中の車両からの撮影画像の3次元形状復元への適用性を検討し、時速60 km/hまでは同様の精度で適用性があると推定された。また、形状復元結果に基づく路面の平坦性の算出方法を提案した。

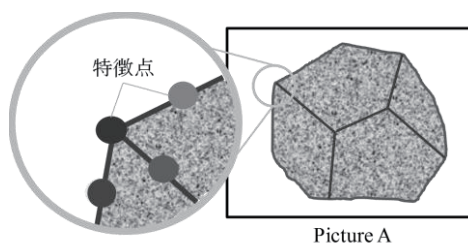
キーワード：維持管理，画像解析，3次元形状復元，高速道路 (IGC：C-7, C-4, H-6)

1. はじめに

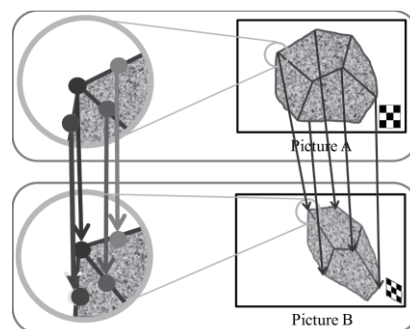
現在、舗装路面の維持管理では、主に路面の損傷などの確認を目的とした巡回パトロールが行われている。その上で異常があると判断された場合には、3mプロファイルメータによる平坦性評価や水系によるわだち掘れの測定が行われる¹⁾。しかし、目視や手作業が主体となるため、労力や時間を必要とすることに加えて、調査の精度が実施する者の経験に左右され、定量的な評価とは言い難い。また、路面性状測定車²⁾による調査方法もあるが、運用費が高価であり、頻度の高い計測実施は難しい。限られた予算を効率よく維持管理に適用する上で、簡便で定量的な評価が可能な路面状況の評価手法が望まれる。

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ている。特に、画像の特徴点をSIFT(Scale Invariant Feature Transformation)²⁾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次元形状の変化を把握することができ、土木構造物の維持管理の高度化が期待できる。

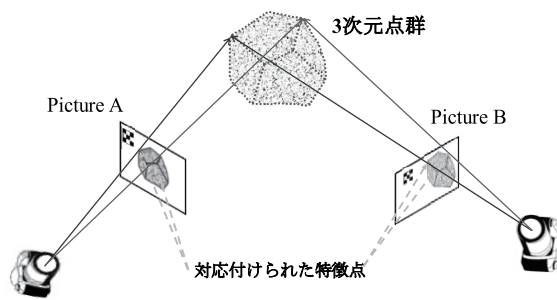
現在、土木分野においても、SIFTを用いた画像解析の応用が着目され、各種土木材料や消波ブロックへの適用性の検討がなされている^{3,4,5)}。特に伊東ら⁶⁾は路面に置かれたハンプを走行中の車両上から撮影し、高さ30mmのハンプを±5mmの誤差で復元できることを示した。3次元形状復元



(a) 特徴点の検出



(b) 特徴点の対応付け



(c) 特徴点の対応に基づく3次元形状復元

図-1 3次元形状復元の流れ⁶⁾

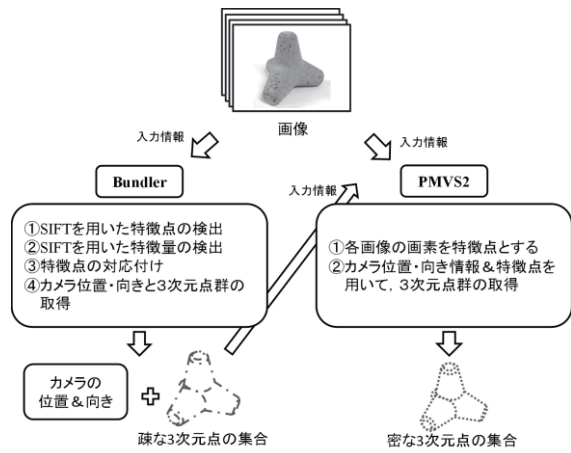


図-2 データ処理の流れ⁶⁾

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。本研究では、画像解析のソフトである Bundler⁷⁾と PMVS2⁸⁾を用いて、図-2に示すような処理を行う。この手法での形状復元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情報を入力する必要がないという利点を有する。

本研究では、道路路面の3次元形状復元について、高速走行中の車両からの撮影画像の適用性を検討した。また、形状復元結果から、道路路面の維持管理の指標である平坦性を算出する方法を提案する。本技術が実用化できると、路面性状測定車等と異なる一般車両による道路パトロールなどの際に、車両に追加したシステムを利用して路面を撮影するだけで路面の状況の評価が定量的に可能となり、路面劣化の進行度を高頻度で把握するなど、維持管理の高度化が期待される。

2. 高速走行中の撮影画像の適用性

2.1 CCD素子の反応時間のずれによる課題

本研究での3次元形状復元手法を、例えば、車両交通の流れを妨げるような低速走行が適切でない高速道路に適用することを目指し、高速走行中に撮影した画像を用いると、いくつかの問題が発生する可能性がある。例えば、図-3は高速走行中の新幹線を通常のデジタルカメラで撮影した事例である。カメラは固定された状態であり、ブレ等の問題は発生しないものの、各 CCD 素子のシャッター時刻のずれに起因して、新幹線の窓が斜めに歪んで撮影されている。このように、一般のカメラでは、画像内の撮影時刻に微小のタイムラグが生じている。このタイムラグは、無視できるようなとても短い時間であり、その詳しい説明は、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。

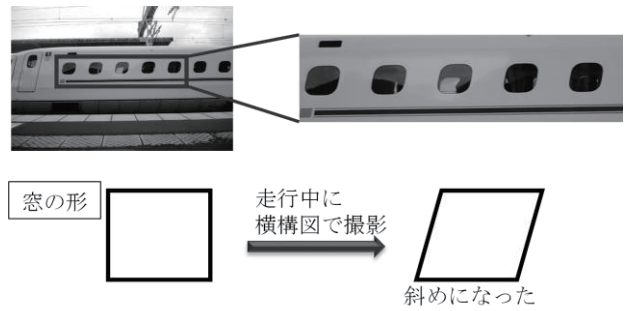
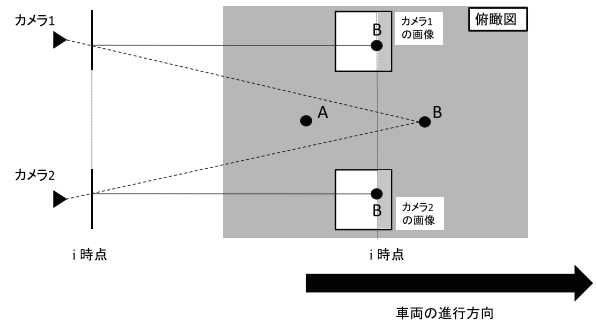
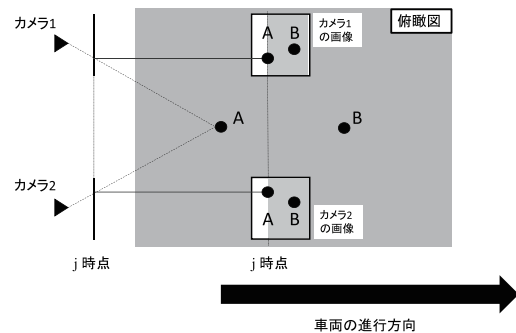


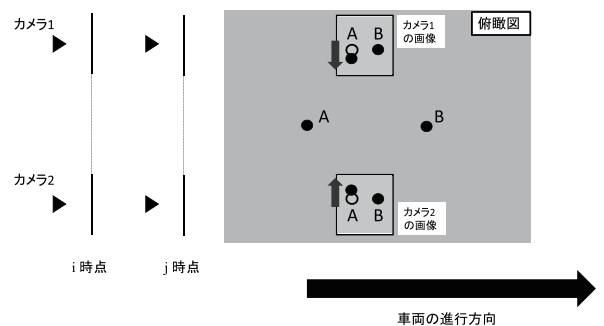
図-3 高速走行中の撮影画像で発生する問題



(a) i 時点



(b) j 時点



(c) i 時点と j 時点のタイムラグによる影響

図-4 シャッターのタイムラグによる影響の概念図⁶⁾

この問題を回避するためには、グローバルシャッターのカメラを利用するなどの方法もあり得るが、高価なカメラを利用するとなると、本来の趣旨である「路面の状況等を安価かつ簡便に定量的に把握」する技術としては望ましくない。そこで、この問題が顕著にならないような撮影条件を検討し、撮影条件の明確化により、高速走行中の画像をもちいた形状把握を可能とすることを考えた。

2.2 カメラ位置の推定における誤差

図-4、図-5 は伊東ら⁹⁾によるシャッターのタイムラグによる影響の概念図とカメラ位置の推定で生じる誤差の概念図である。簡単のため、道路路面上の特徴点 A、B によりカメラ位置が推定される状況を仮定し、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。 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-4 (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-4 (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-4(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。

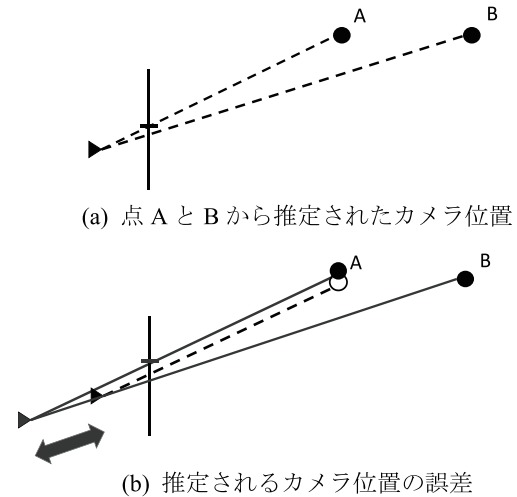


図-5 カメラ位置の推定で生じる誤差の概念図⁹⁾

図-5 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-4 のカメラ 2)を考える。カメラの撮影位置は、図-5 (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-5(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-5 (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考えられる。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ことがわかる。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速度に影響されることが考えられる。

2.3 実験によるシャッター速度の影響評価

シャッター速度が撮影位置推定精度に及ぼす影響を把握するため、実道路を走行する車両での実験を行った。実験では、図-6 に示すように伊東ら⁹⁾と同じ撮影システムを用いて、広島大学構内のがら道、大学外周道路および東広島呉道路を、走行速度 20~80 km/h で走行し、車両上から連写モードで撮影した画像を用いた。この実験で使用したカメラの仕様を表-1 に、撮影条件を表-2 に示す。

路面の 3 次元形状復元は、各カメラ 10 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-7 に撮影画像の例を示す。図-7 は時速 80km/h の場合の画像であるが、シャッター速度が 1/2000 秒の画像はぶれたように流れて見えるが、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、カメラの撮影位

表-1 本研究で用いたカメラの仕様

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

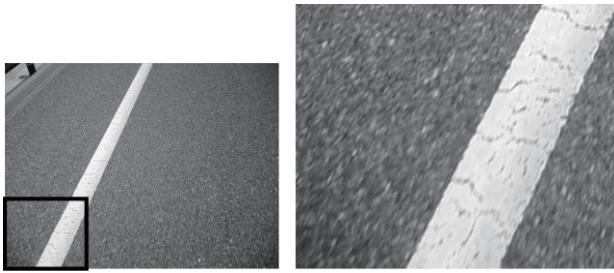
記録画素数	1280×960[pix]
フラッシュ	発光禁止
35mm判換算焦点距離	28[mm]
俯角 (水平面と視線方向のなす角)	45[°]
撮影速度 (1秒当たりの撮影枚数)	60[fps] (連写モード)



図-6 撮影システム⁹⁾

置の逆解析は可能であった。

図-8 に復元により得られたカメラの撮影位置の例を示す。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横軸と一致させた。そして、カメラ位置の推定精度は、図-8 に示すように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) のなす角度で評価することにした。また、



(a) 時速 80 km/h, シャッター速度 1/2000 秒
(右写真は黒枠の拡大図)



(b) 時速 80 km/h, シャッター速度 1/4000 秒
(右図は黒枠の拡大図)

図-7 撮影画像の例

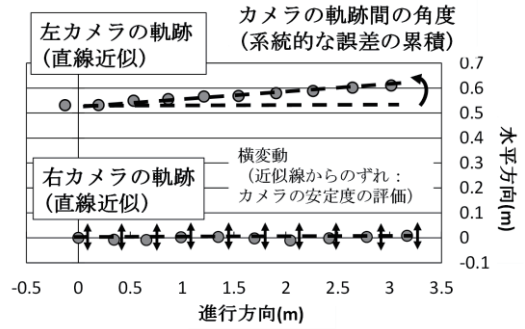


図-8 カメラ位置の推定誤差の指標
(走行速度 60km/h, シャッター速度 1/2000 秒の復元の一例)

表-3 右側カメラの撮影位置の横変動 (平均値 : mm)

	20km/h	30km/h	40km/h	50km/h	60km/h	80km/h
1/1000	0.518	1.067	0.777	1.359		
1/1600	0.494	0.441	0.706	0.527	1.152	1.926
1/2000	0.166	1.903	0.323	2.617	1.200	1.629
1/3200	0.273	0.647	1.239	0.724	1.882	2.218
1/4000	0.575	0.669	1.045	0.544	1.876	1.229

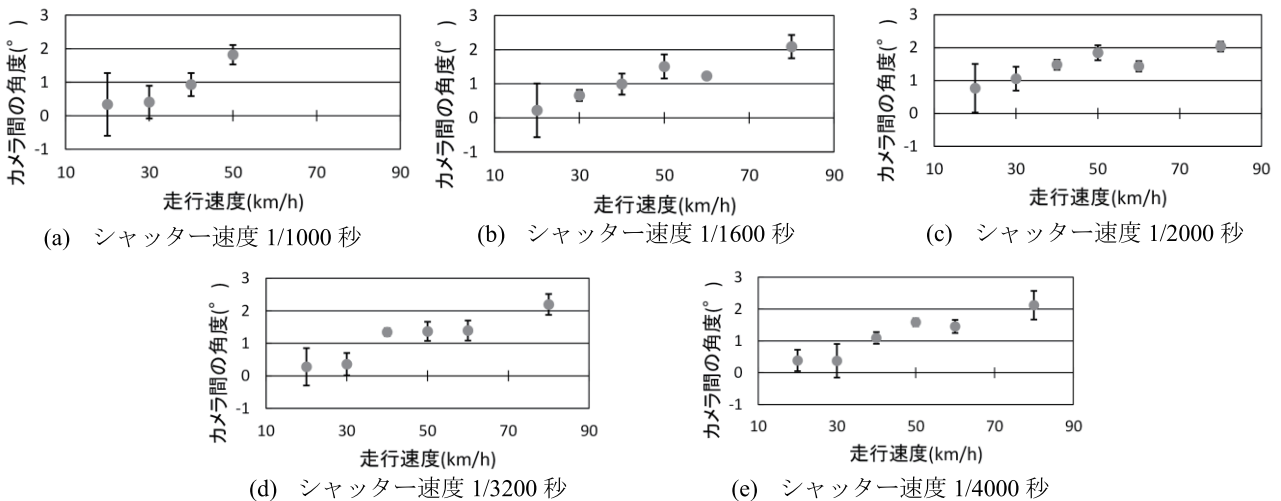


図-9 カメラ位置の推定誤差の指標 (カメラの軌跡間の角度) と走行速度, シャッター速度の関係

カメラの安定度は、横変動として、右カメラのそれぞれの撮影位置の横軸（近似直線）からのずれで評価した。

本研究では走行速度を 20, 30, 40, 50, 60, 80 km/h で撮影し、各走行速度でシャッター速度を 1/1000, 1/1600, 1/2000, 1/3200, 1/4000 秒で変化させ、形状復元を行っている（ただし、シャッター速度 1/1000 秒の場合のみ、時速 60, 80 km/h での実験を行っていない）。なお、既報と同様の検討であるが、ケース数を各条件 5 ケースずつに増やしている。

表-3 に右側カメラの撮影位置の横変動の平均値を示す。これは、車両の走行に伴い、カメラがどの程度左右にぶれているかの指標である。つまり、カメラを固定しているフレームの剛性が不足すると、カメラが左右に揺れ、形状把握の精度が低下することが危惧される。実際に走行した路面の凹凸の度合いにも依存するため、必ずしも明瞭な傾向ではないが、時速 60 km/h 以上だとカメラ位置のブレが大きくなる。カメラ位置の推定精度の低下と、実際に、路面

の凹凸の影響を受けやすくなっていることが理由として考えられる。

図-9 にカメラの軌跡間の角度の評価結果を示す。走行速度が上昇するにつれて、カメラの軌跡間の角度が大きくなる。カメラの軌跡間の角度の増加は、図-9 に示した推定位置の誤差の累積によるものではないかと思われる。

伊東ら⁹⁾の結果によると、時速 40 km/h での走行時、シャッター速度 1/3200 秒で、実用レベルの精度(30 mm の段差について±5 mm)を有した路面形状の定量評価が可能である。この条件に相当するカメラ位置の推定誤差は、カメラの軌跡間の角度で 1.5 度程度である。すなわち、カメラの軌跡間の角度 1.5 度未満の撮影条件であれば、同様の路面性状の評価が可能であると推定できる。この結果、提案手法では、時速 60 km/h でも、同程度の実用レベルの精度があると推定できる。しかし、時速 80 km/h の高速走行下では、シャッター速度を 1/4000 秒に早くしても、カメラの

軌跡間の角度の誤差を 1.5 度以下に収めることはできず、そのままでは適用性に問題がある結果であるといえる。

3. 形状復元結果からの路面の平坦性の算出

3.1 3m プロフィールメータによる平坦性算出方法

維持管理目的での道路路面の性状評価の指標の代表的なものとして平坦性⁹⁾がある。平坦性とは、図-10 に示す 3 m プロフィールメータにより、測定車線に沿った路面の凹凸を測定し、路面凹凸の標準偏差を算出したものである。

実際の調査手順は次のとおりである。1 車線につき 1 本の測定線を車線の中央線と重なるように設定し、通常の歩行速度で 3 m プロフィールメータをけん引する。記録された波形から、舗装路面と想定平坦路面（路面を平坦となるよう補正した場合に想定される舗装路面をいう）との高低差を 1.5 m 間隔で読み取り、式(1)によって標準偏差を単位 mm、小数点以下 2 桁で計算し、平坦性の測定値とする。

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum d^2 - \frac{(\sum d)^2}{n}}{n-1}} \quad (1)$$

ここで、 σ ：平坦性 (mm)、 d ：測定値 (mm)、 n ：データ数である。現在では、3 m プロフィールメータではなく路面性状測定車による測定が行われるが、方法は同様である。

3.2 3次元形状復元結果に基づく平坦性算出

以下に、形状復元結果に基づく平坦性の算出方法を提案する。2つのカメラの撮影位置の軌跡の中心を車線の中央線と仮定し、中央線から車両の進行方向に対して左側 1 m の地点の幅 3 cm の範囲に存在する路面を抽出することとした。図-11 に復元した路面形状の例と抽出位置を示す。この 3次元形状の可視化は MeshLab¹⁰⁾を用いている。

実際の復元形状は 3次元点群で示され、ノイズ状に、点が異常な位置に存在することもある。そこで、抽出した路面形状の点群を進行方向に対して 3 cm 毎に区切り、各 3 cm で鉛直方向座標の平均値を算出する。そして、各区間、3 cm 間隔の路面高さの平均点から、進行方向に対して 1.5 m および 3.0 m 隔てた区間の路面高さを用いて、図-12 のように平坦性を算出することとした。平坦性の算出式は式(1)と同じである。

3.3 実際の形状復元結果による平坦性算出の適用性検証

図-13 に示す広島大学第 8 入口前の横断歩道で、補修前後の道路の平坦性を算出し、提案手法の適用性を検証した。3次元形状復元は、図-6 と同じシステムで撮影した画像を用いた。復元精度を向上させるため、各カメラ 15 枚の計 30 枚をもちいて形状復元を行った。撮影時のカメラの設定は表-2 と同じであり、走行速度は 50 km/h 程度、カメラのシャッター速度は 1/3200 秒である。

図-14 に補修前後の路面の撮影写真の例、図-15 に補修

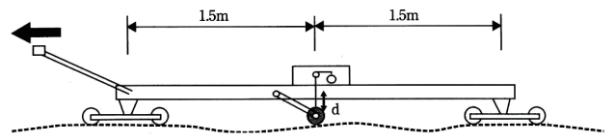


図-10 3m プロフィールメータ¹⁰⁾

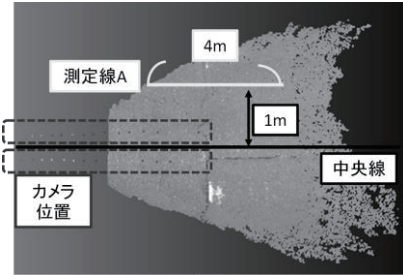


図-11 路面形状復元結果の例と抽出位置

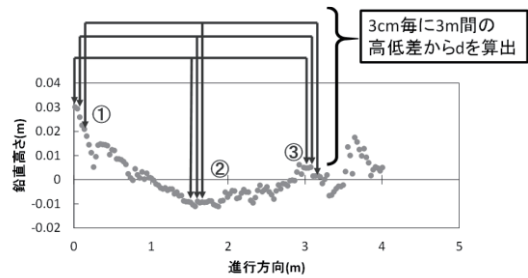


図-12 平坦性の算出方法



図-13 路面の撮影場所

(国土地理院地図に撮影場所を追記)

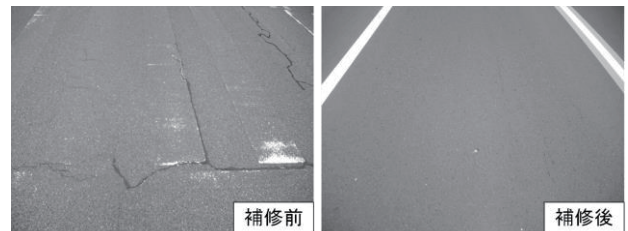


図-14 補修前後の路面の撮影画像

前後の路面の復元形状と進行方向に対して 3 cm 毎に平均をとった結果と撮影画像の拡大図を示した。撮影画像からも分かるように、補修前の路面は粗く、幅広のクラックも広がり、それらによる路面の凹凸が復元形状でも再現されている。復元範囲において、34 点の高低差のデータを算出し、平坦性を求めた。補修前の路面の平坦性は $\sigma = 5.61$ (mm)、補修後の算出結果は平坦性： $\sigma = 3.18$ (mm)である。一般に、交通量の多い一般道路の補修の目安となる平坦性

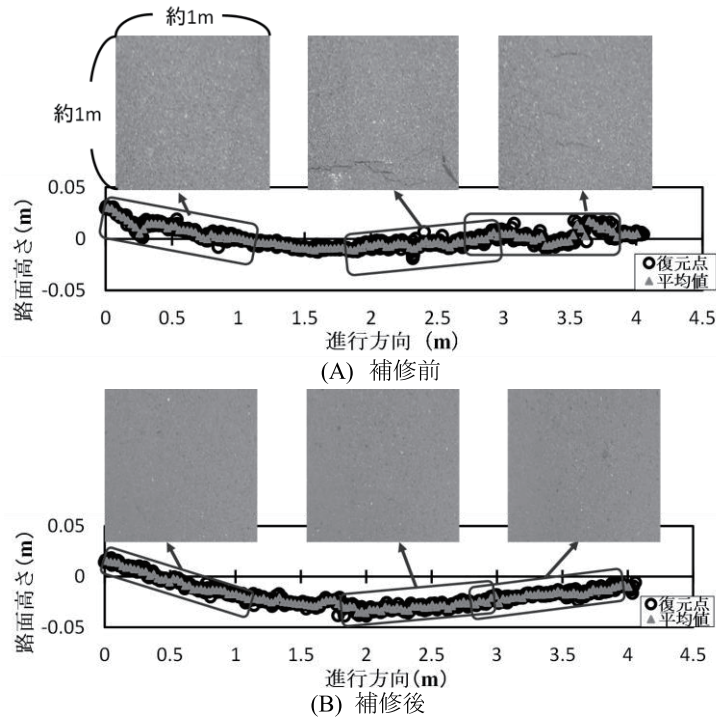


図-15 補修前後の路面形状（復元結果と 3cm 間隔の路面高さの平均）および路面写真

は $\sigma=4.0\sim 5.0$ (mm)であり¹⁾、形状復元結果から算出した平坦性はこの補修基準と調和的である。

4. 結論

- (1) 提案手法を、高速走行中の画像に適用する際、各 CCD 素子のシャッター時刻のずれにより、カメラ位置の推定精度が低下する問題が発生することを示した。
- (2) このカメラ位置の推定誤差は、路面形状の定量評価が可能であった走行速度 40 km/h の場合においても、カメラの軌跡の角度にして 1.5 度程度存在する。
- (3) カメラ位置の推定誤差は、シャッタースピードを大きくすることで低減することが可能であると考えられたが、時速 80 km/h ではシャッタースピード 1/4000 秒以上で撮影しても、カメラの軌跡間の角度が 1.5 度程度にはとどまらず、問題を回避することはできなかった。
- (4) 復元形状に基づく路面の平坦性算出方法を提案した。そして、提案手法を補修前後の道路路面に適用したところ、平坦性の算出値は、一般の道路補修基準と調和的な結果となり、提案手法の有用性が確認できた。

謝辞

本研究は、地盤工学会の平成 24 年度および平成 26 年度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, L. : 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. and 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) 伊東達彦, 一井康二, 角田光法, 石井詩穂, 栗原大, 玉木徹 : 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 : 地盤と建設, 地盤工学会中国支部, vol.32, No.1, pp.149-156, 2014.
- 7) Snavely, N., Seitz, S. M. and Szeliski, R.: Modeling the World from Internet Photo Collections, *International Journal of Computer Vision*, Vol. 80, No. 2, pp. 99-115, 2008.
- 8) Furukawa, Y. and Ponce, J.: Accurate, Dense, and Robust Multiview Stereopsis, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 32, No. 8, pp. 1362-1376, 2010.
- 9) 社団法人日本道路協会 : 舗装調査・試験法便覧, 2007.
- 10) Mesh Lab : Main page, <http://meshlab.sourceforge.net/>, 確認年月日 2015 年 5 月 27 日

(2015 年 6 月 22 日 受付)