

レーザーポインタを用いたカメラ位置姿勢推定技術の研究開発

生駒 晃大 渡辺 博己 浅井 博次 棚橋 英樹

鈴木 真宏* 林 忍* 加藤 光章* 江口 真澄* 原田 宣男*

Development of Camera Position and Orientation Estimation Techniques using Multiple Laser Pointers

Akihiro IKOMA Hiroki WATANABE Hirotsugu ASAI Hideki TANAHASHI

Masahiro SUZUMURA* Shinobu HAYASHI* Mitsuaki KATO* Masumi EGUCHI* Nobuo HARATA*

あらまし 老朽化が進行する社会インフラ構造物の維持管理手法が様々検討される中、我々は橋梁等のコンクリート構造物の点検業務を支援するため、カメラを用いた点検システムの開発に取り組んでいる。本研究では、点検業務にカメラを用いた場合に生じる課題解決に向け、カメラと複数のレーザーポインタを組み合わせた撮影装置を製作し、撮影した画像からカメラの位置姿勢を推定可能な技術の開発を行った。本稿では、提案するカメラ位置姿勢推定技術について述べるとともに、製作した検証用装置による実験結果について報告する。

キーワード 社会インフラ、点検システム、レーザーポインタ、カメラ位置姿勢推定

1. はじめに

道路や橋梁、トンネル等の社会インフラ全体において、老朽化の進行に伴う構造物の維持管理への対応が問題となっている。社会インフラの維持管理にかかる費用や工数は年々増大していく一方、熟練技術者の退職や若手人材の不足等により、維持管理に必要な人員を確保することは困難となってきた。また、平成26年7月の道路法施行規則の改正では、橋長2m以上の橋梁やトンネル等の道路構造物が5年に1回の頻度で近接目視による点検を行うことが義務化された。岐阜県の場合、県が管理する橋長2m以上の橋梁は4343橋（2016年4月1日現在）であり、毎年約860橋の橋梁点検が実施されている^[1]。

このような背景から、現状の限られた予算や人員の中においても、構造物の劣化状況を的確に把握し、戦略的な維持管理を行うための技術や仕組みが必要とされている。そこで我々は、橋梁をはじめとするコンクリート構造物の点検業務において、壁面に発生するひび割れや剥離等の損傷を、カメラを用いて計測可能な点検システムの開発に向けた研究に取り組んでいる。

カメラを活用した社会インフラ構造物の点検手法やシステムの開発は従来から様々な方法で行われており、近年ではドローンに搭載されたカメラを用いた点検システム等も提案されている^[2]。しかし、このようなシステム

を利用する場合、システムを扱うための高度な技量が必要となることや、システム自体がとても高価となることなどが問題となる。そのため、我々は、誰でも容易に扱うことができ、比較的安価な構成での点検システムの開発を目指している。

2. 点検システムの検討

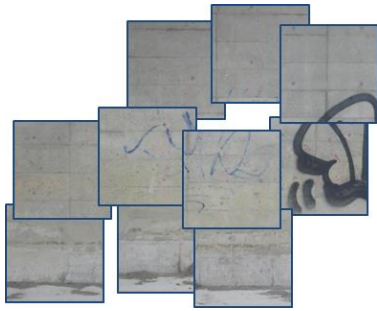
2. 1 点検作業の現状

橋梁等のコンクリート構造物の点検業務における一般的な作業工程は下記の手順となる。

1. 調査準備（点検箇所への足場の設置等）
2. 構造物の形状寸法測定と全体マップ作成
3. 目視による損傷の確認
4. 構造物へのマーキング
5. 損傷形状の計測（ひび割れの幅や長さの計測）
6. 損傷位置を全体マップへ写実（スケッチ）
7. 写実の計測結果の図面データ化
8. 図面より損傷の集計
9. 点検結果報告書の作成

1～6は現場での作業であり、劣悪な現場環境で長時間の点検を行うため、多くの労力を要する作業である。また、高所等の点検では、作業者の安全性の確保にも注意が必要となる。7～9は事務所での作業となるが、7の作業では、手書きスケッチをすべて読み取り、電子データ化しなければならないため、特に時間を要する作業となる。

* 株式会社 市川工務店



(a) 分割して撮影された壁面画像



(b) 画像統合による展開画像の生成

図1 カメラによる点検作業のイメージ

2. 2 カメラを活用した点検作業とその課題

2.1節の作業工程において、カメラを用いた点検システムを導入することにより、構造物の壁面状態を画像として記録することができるため、現場や事務所での作業を大きく省力化することが可能となる。また、ズーム機能による目視できない範囲の遠方からの計測も可能となるため、作業者の安全性も向上される。さらに、作業者ごとの主観的な損傷の判断ではなく、画像から計測を行うことより、点検データの信頼性も向上する。

実際にカメラを用いて点検業務を行う場合、構造物の壁面全体を一度に撮影すると、カメラ画素数の関係上、ひび割れ等の微細な損傷を画像から捉えることはできなくなる。そのため、使用するカメラの性能に合わせて、壁面全体を細かな領域に分割し、分割した領域ごとに撮影を行うのが一般的である(図1(a))。

分割して撮影された画像は、その後の統合処理により壁面全体の展開画像として合成される(図1(b))。しかし、通常撮影される画像は、壁面に対して様々な角度や距離から撮影されたものであり、同一平面であっても撮影時のカメラの位置や姿勢により見え方が変化する。そのため、撮影した画像をそのまま合成しただけでは、壁面全体の状態を正確に再現した展開画像を取得することは困難となる場合が多い。

このような場合の対策として、壁面を撮影する際には、撮影距離を常に一定とし、壁面に対して正対した状態を保つことで、簡単な処理で画像統合を行うことが可能な画像のみを撮影するといった方法が利用される。三脚等の補助器具を用いることで、ある程度の位置姿勢を保った撮影も可能となる。しかし、三脚等を設置できない現

場環境においては、人手によって位置姿勢を変更しながら撮影を行わなければならない場合も多いため、そのような状況で撮影された画像であっても正確な画像統合を行うことが課題となる。

2. 3 提案システムの構成

本研究で開発するカメラを用いた点検システムは、橋梁等のコンクリート構造物の壁面の点検を対象としており、橋梁としては橋長15m未満の比較的小規模な構造物をターゲットとしている。そのため、特殊な計測装置や点検車両が用いられる大規模な点検システムではなく、人手でも持ち運びや撮影ができるシステム構成とすることが望ましい。

そこで本研究では、システムの規模を抑えつつ、2.2節で述べた画像統合処理の際の課題に対応するために、カメラと複数のレーザーポインタを一体的に固定可能な構造を持つ点検システムを構築し、レーザーポインタを利用したカメラの位置姿勢推定技術の開発を行った。提案システムを用いて撮影された画像から、壁面に対するカメラの位置姿勢を推定することで、その推定結果をもとに、壁面に対して正対した状態で撮影したような正面画像へと変換することが可能となり、画像統合の際の課題を解決するための手段となる。

3. カメラ位置姿勢推定手法

3. 1 提案手法の原理

提案システムによる点検の対象となる橋梁等のコンクリート壁面は、歪曲の少ない平面であると仮定することができる。そのため、画像中にどのように平面が写っているのかを推定することができれば、その壁面に対するカメラの位置姿勢も推定することが可能となる。平面推定には、同一平面上に存在する点が少なくとも3点必要となるため、本システムを実現するためには、3個以上のレーザーポインタが必要となる。

また、本システムでは、カメラとレーザーポインタが一体的に固定されているため、カメラの位置姿勢が変化した際には、レーザーポインタもカメラと同様の変化をすることになる。つまり、カメラに対してレーザーポインタは常に同じ位置からレーザーを照射することになる。そのため、カメラの光軸とレーザーポインタの光線が平行だと仮定した場合、壁面に対して同じ位置姿勢で撮影された画像同士では、レーザーポインタの照射点の座標位置は同じとなる。

これらのことから、壁面に対してカメラが正対している状態を基準とした場合、正対した状態で撮影した画像中の各レーザーポインタの照射点の座標位置に対して、カメラの位置姿勢が未知な状態で撮影した画像中の各レーザーポインタの照射点の座標位置がどのように変化したかを捉えることで、カメラの位置姿勢を推定することが可能となる。

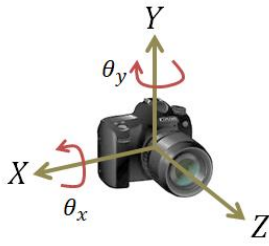


図2 座標系の定義

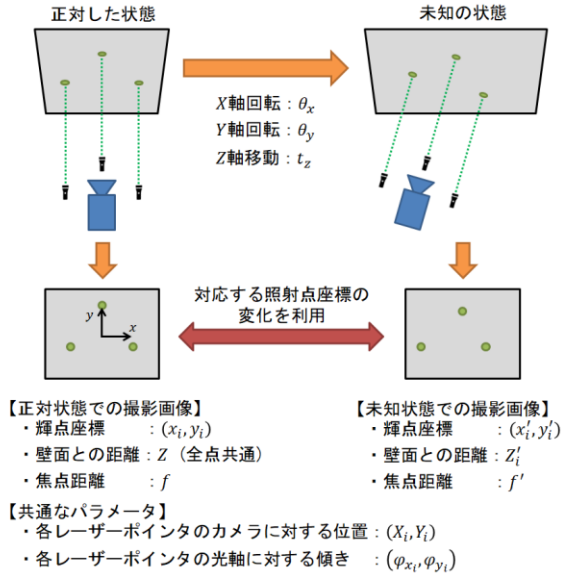


図3 位置姿勢推定手法のイメージ

3. 2 推定対象となるパラメータ

図2に示すカメラを中心とした座標系を定義し、カメラが壁面に対して正対した状態を基準とすると、正面画像への変換を行う際に必要となる位置姿勢のパラメータとして、正対した状態からのカメラの鉛直方向(X軸)の回転角度 θ_x と、水平方向(Y軸)の回転角度 θ_y を推定する必要がある。カメラの光軸方向(Z軸)での回転も考えられるが、光軸方向への回転は、壁面に対してカメラが回転するだけで、傾くことはないため、推定の対象としない。

また、基準の状態におけるカメラと壁面との距離を Z と定義すると、この状態からの距離の変化量 t_z は撮影距離の違いによる画像中のスケールの変化を捉えるために推定する必要がある。なお、移動量 t_z はカメラ回転後の座標系における壁面との距離の変化量とする。

3. 3 推定処理の流れ

提案するカメラ位置姿勢推定手法の処理の流れについて、図3に示すイメージ図で定義する記号を用いて説明する。

まず始めに、壁面に対してカメラを正対させ、基準とする距離 Z だけ離れた状態で画像を撮影した場合に、各レーザーポイントの照射点が画像中でどの座標位置に写るのかを計測する。各照射点の座標値 (x_i, y_i) と壁面との位置関係は式(1)のように表される。カメラが壁面に正対している状態なので、壁面との距離 Z はどのレーザーポイントでも共通の値となる。

$$(x_i, y_i) = \left(\frac{X_i + Z \tan \varphi_{y_i}}{Z} f, \frac{Y_i + Z \tan \varphi_{x_i}}{Z} f \right) \quad (1)$$

式(1)の $(\varphi_{x_i}, \varphi_{y_i})$ は、各レーザーポイントのカメラ光軸に対する傾きを表している。レーザーポイントはカメラの光軸と平行となるように設置するのが好ましいが、厳密な平行を保つことは困難である。そのため、レーザーポイントのキャリブレーションを行い、各レーザーポイントの光軸に対する微細な傾きを求めることで、カメラ位置姿勢の推定精度への影響を抑えることができる。

次に、推定の対象となる未知な位置姿勢で撮影された画像に対して、画像中の各レーザーポイントの照射点の座標位置を抽出する。式(1)と同様に、座標値 (x'_i, y'_i) と壁面との位置関係は式(2)ようになる。位置姿勢が未知のため、各レーザーポイントと壁面との距離 Z'_i も未知であり、カメラの姿勢変化により、レーザーポイントごとに異なった値となる。

$$(x'_i, y'_i) = \left(\frac{X_i + Z'_i \tan \varphi_{y_i}}{Z'_i} f', \frac{Y_i + Z'_i \tan \varphi_{x_i}}{Z'_i} f' \right) \quad (2)$$

式(1), (2)を用いることにより、正対した状態と位置姿勢変化後の座標位置の関係から、壁面との距離 Z'_i に関する式(3)が導出される。

$$Z'_i = P_i Z \quad (3)$$

$$P_i = \frac{f'(x_i - f \tan \varphi_{y_i})}{f(x'_i - f' \tan \varphi_{y_i})} = \frac{f'(y_i - f \tan \varphi_{x_i})}{f(y'_i - f' \tan \varphi_{x_i})}$$

次に、カメラの壁面に対する回転と移動による距離の変化について考えると、壁面との距離 Z'_i に関する式(4)が導出される。

$$Z'_i = \frac{Z}{\cos \theta_x \cos \theta_y} + (X_i + Z'_i \tan \varphi_{y_i}) \tan \theta_y + (Y_i + Z'_i \tan \varphi_{x_i}) \tan \theta_x + t_z \quad (4)$$

最後に、式(1), (3), (4)を用いることで、式(5)が導出される。

$$\begin{aligned} & (1 - \tan \varphi_{x_i} \tan \theta_x - \tan \varphi_{y_i} \tan \theta_y) P_i \\ &= \frac{1}{\cos \theta_x \cos \theta_y} + \left(\frac{x_i}{f} - \tan \varphi_{y_i} \right) \tan \theta_y \\ & \quad + \left(\frac{y_i}{f} - \tan \varphi_{x_i} \right) \tan \theta_x + \frac{t_z}{Z} \end{aligned} \quad (5)$$

式(5)より、下記に示すパラメータが既知であれば、回転角度 θ_x と θ_y 、移動距離 t_z を求めることができる。

- (x_i, y_i) と (x'_i, y'_i) の座標値のペアが3点以上
- 各レーザーポイントの微細な傾き $(\varphi_{x_i}, \varphi_{y_i})$
- 正対した基準状態でのカメラと壁面との距離 Z
- 撮影時のカメラの焦点距離 f と f'

よって、装置のキャリブレーションや、正対した状態での画像の撮影と距離の計測を予め行っておけば、未知状態の画像を撮影し、レーザーポイントの照射点の座標値を抽出することでカメラの位置姿勢を算出可能である。



(a) 正面 (b) 背面

図4 検証用撮影装置

4. 検証用装置の開発

提案手法によるカメラ位置姿勢推定精度の検証を行うために、カメラとレーザーポインタを用いた検証用の撮影装置を開発した(図4)。装置の製作にあたり、撮影装置を構成するカメラやレーザーポインタのスペック等について検討した内容を説明する。

4.1 カメラのスペック

本システムで利用するカメラは、一般的なデジタルカメラ等で問題なく、カメラ画素数や最大ズーム倍率等は任意のものでよい。しかし、点検システムとして壁面の状態を正確にとらえた画像を撮影するためには、撮影した画像の画素分解能[mm/pix] (1画素あたりの実サイズ)が重要となるため、構造物の大きさや、計測したい損傷の種類に合わせて適切なものを選択する必要がある。

先行研究³⁾によると、コンクリート構造物の壁面の微細なひび割れを対象とする場合、画素分解能の5割程度の幅のひび割れであれば検出可能であることが報告されている。そのため、例えば、0.1mmの幅のひび割れを捉えたい場合、0.2mm/pix程度の分解能が最低でも必要となる。

4.2 レーザーポインタのスペック

レーザーポインタのスペックに関して、レーザー光の出力は利用する現場環境にも左右されるが、概ね1mW程度の出力のもので問題なく、色は視認性に優れた緑色が好ましい。照射点の形状は、真円かつ中心から正規分布に従うような輝度分布であれば、画像から照射点の中心座標を抽出しやすくなるため、高精度なレーザーポインタであるほど、位置姿勢推定の精度は高くなる。

4.3 カメラとレーザーポインタの配置

カメラとレーザーポインタを固定するにあたり、その配置関係も検討する必要がある。提案手法では、画像中の3点以上のレーザーポインタの照射点位置から平面推定を行う形で位置姿勢を推定するため、画像中の狭い範囲に照射点が集まるような場合、位置姿勢推定精度は悪化する可能性がある。そのため、撮影した画像の広い範囲に照射点が分布するように、レーザーポインタを配置するのが理想となる。

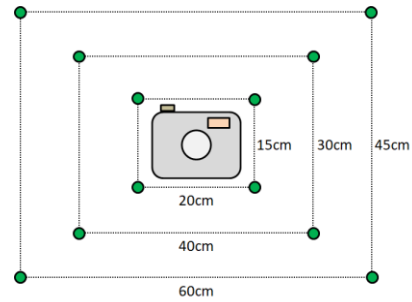


図5 レーザーポインタの配置

4.4 試作した検証装置

これらの検討内容をもとに、試作した検証用装置について説明する。使用したカメラはSONYのCyber-shot DSC-RX10M4で、解像度は5472×3648となる。このカメラを用いて画素分解能0.2mm/pixで撮影する場合、一度に撮影可能な範囲は最大で110cm×70cmとなる。また、その際の撮影距離はズームなしの状態で約70cmとなる。

本システムの原理上、レーザーポインタは最低3個あればカメラの位置姿勢を推定可能だが、今回試作した装置では、12個のレーザーポインタをカメラ光軸となるべく平行になるよう設置した。4個以上のレーザーポインタを使用する場合、その中から3個のレーザーポインタを選ぶ組み合わせが複数存在するようになるため、各組合せでの推定値を用いることで、3個1通りの場合よりも推定精度を高めることができる。

また、レーザーポインタは、図5に示すように、カメラを囲うように縦横比3:4の長方形が3つできるように配置した。これにより、レーザーポインタの配置の違いによる位置姿勢推定精度の検証が行えるようにした。

5. 実験

製作した検証用の撮影装置を用いて、実際のコンクリート壁面を撮影した際のカメラ位置姿勢推定精度の検証実験の結果を述べる。

5.1 姿勢変化による実験

本実験では、壁面に対する装置の位置は固定とし、装置の回転により姿勢が変化した場合について検証を行った。なお、12個あるレーザーポインタの内、本実験では真ん中の長方形上に配置された4個のみ使用した。

図6は装置を壁面に対して正対させた基準となる状態で撮影した画像である。カメラと壁面との距離Zは1175mmであり、キャリブレーションや後の検証のために、格子パターンを壁面に貼り付け撮影を行った。なお、各レーザーポインタの光軸に対する傾きは、本実験ではないもの($\varphi_{xi} = \varphi_{yi} = 0$)として推定処理を行った。

図7は装置の回転により姿勢を変化させて撮影した画像の一例である。この画像は図6の状態から装置を水平方向に回転させて撮影した画像であり、実際にカメラの回転角度を計測したところ約23度であった。

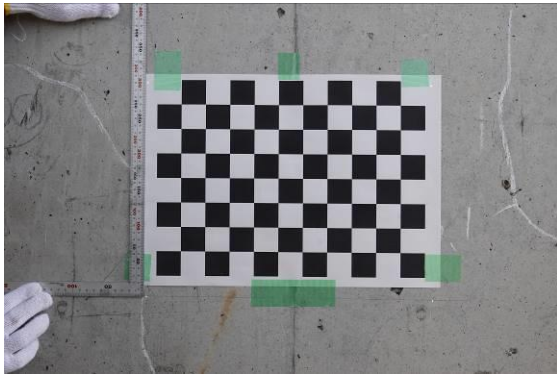


図6 正対状態での撮影画像



図7 図6の状態から装置を左に回転させて撮影した画像



図8 推定結果をもとに正面画像へ補正した結果

表1 姿勢変化による実験の推定結果

項目		鉛直回転[度]	水平回転[度]	移動距離[mm]
1	実測	-5.7	0	0
	推定	-4.4	0	-27
2	実測	-14.8	0	0
	推定	-11.1	0.2	-33
3	実測	0	-6.7	0
	推定	1.0	-7.0	-19
4	実測	0	-23.3	0
	推定	2.0	-22.5	-8
5	実測	-5.4	-42.2	0
	推定	-4.7	-42.4	-25

図7の画像に対して、画像中の照射点の座標情報からカメラの姿勢を推定したところ、回転角度は22.5度と推定された。また、この推定結果をもとに図7の画像を正面画像へ変換した結果を図8に示す。図7、図8の画像中の格子パターンの変形の様子より、提案手法により推定された結果を用いた場合でも、正面から撮影したような画像へ

と正しく変換可能であることが確認できる。

表1に本実験の結果をまとめる。5つのパターンの回転による姿勢変化について、実際の計測による実測値と提案手法による推定値を比較したものであり、項目4が図7の画像に対しての結果である。数値の符号は、回転であれば回転の方向を表し、距離であればマイナスは壁面に対して近づく移動、プラスであれば離れる移動を表している。

表1より、回転角度の推定結果については、実測値と比較して誤差は約1~3度となった。また、移動距離の結果については、本実験では装置の位置は固定のため、移動距離は全てゼロとなることが理想だが、数cmの距離変化を含む結果となった。これらの推定誤差について、本システムの目的は完全な正面画像への変換ではないため、この程度の誤差であれば、画像の統合へ向けた正面画像への変換の場合には問題ない結果と考えられる。

5. 2 距離変化を含む実験

回転による姿勢変化に加え、壁面との距離も変化させた場合の検証を行った。また、本実験では12個すべてのレーザーポインタを使用し、配置による推定精度の比較も行った。

図9が基準となる正対した状態の画像であり、壁面との距離Zは1675mmとした。本実験では、この正対した状態から壁面に対して装置を500mmずつ前後に移動させることで距離を変化させた。また、各レーザーポインタの光軸に対する傾き(ϕ_{x_i}, ϕ_{y_i})は、予めキャリブレーションにより求めた数値を利用した。

表2に本実験の結果をまとめる。項目1が装置を壁面に対して近づけて撮影した図10(a)の画像に対しての結果であり、項目2が遠ざけた図10(b)の画像に対しての結果である。推定結果の(大), (中), (小)は、図5で示したレーザーポインタの配置における3つの長方形の大きさを表しており、(大)であれば一番外側の大きな長方形上に配置された4個のレーザーポインタのみを使用した推定結果となる。

表2より、移動距離の推定結果については、実測値と比較して約20~80mmの誤差となった。また、レーザーポインタの配置の違いによる精度の差はそれほど見られない結果となった。一方、回転角度の推定結果に関しては、一番外側の大きな長方形での推定結果が最も実測値に近い値となり、小さな配置になるにつれて誤差も大きくなることが確認できた。特に一番小さな配置では、他の2つの配置と比較して大きく異なる推定結果となった。これは、画像全体の大きさに対してレーザーポインタの照射範囲が狭いため、カメラ位置姿勢変化による照射点の座標位置の変化量に対して、レーザーポインタの微細な傾きなどの誤差要因による座標変化の占める割合が大きくなってしまったためだと考えられる。

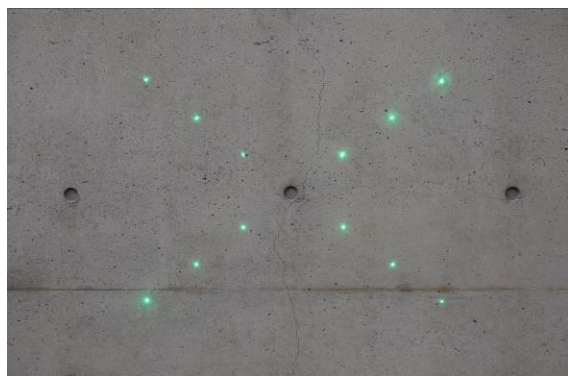
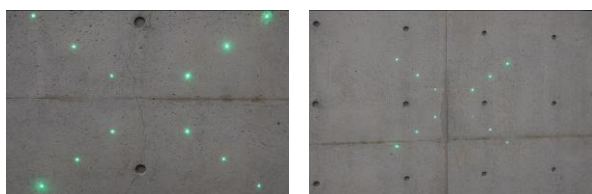
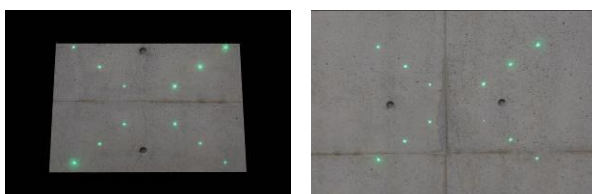


図9 正対状態での撮影画像



(a) 近づけた場合 (b) 遠ざけた場合

図10 図9の状態からカメラの位置姿勢を変化



(a) 近づけた場合 (b) 遠ざけた場合

図11 スケールも含めた正面画像への補正結果

表2 距離変化を含む実験の推定結果

項目		鉛直回転 [度]	水平回転 [度]	移動距離 [mm]
1	実測	-9.9	0	-500
	推定(大)	-8.4	-0.3	-579
	推定(中)	-6.9	2	-574
	推定(小)	-2.5	9.1	-585
2	実測	0	21.6	500
	推定(大)	1.7	20.5	472
	推定(中)	1.4	20	482
	推定(小)	5.1	15.3	518

図11は一番大きな配置での推定結果を利用してそれぞれ正面画像への変化を行った結果である。姿勢だけでなく、壁面との距離も変化しているため、変換後の画像スケールを統一するために、移動距離に応じて拡大・縮小が行われている。画像統合により壁面全体の状態を正確に再現した展開画像を構築するには、画像のスケールを統一させることも重要となるため、移動距離の推定精度についてはさらに向上させる必要がある。

6. まとめ

本研究では、橋梁等のコンクリート構造物の壁面を対象とした点検業務において、従来の手作業による点検に代わり、カメラを用いた点検が可能なシステムの開発に向け技術検討を行った。カメラによる点検での課題を解決するために、カメラと複数のレーザーポイントを一体的に固定可能な撮影装置を製作し、コンクリート構造物の壁面を撮影した画像から、壁面に対するカメラの位置姿勢を推定可能な技術を開発した。本装置を用いた場合での位置姿勢推定精度の検証を行い、実際の測定値との誤差やレーザーポイントの配置による精度の違いを確認した。また、推定したカメラの位置姿勢から、壁面を正面から撮影したような正面画像へと変換可能であることを確認した。

今後は、位置姿勢推定により変換した正面画像の統合による壁面全体の展開画像の生成や、展開画像からひび割れ等の損傷を計測するための仕組みを開発し、点検システムとしての有効性を検証していく。また、撮影装置に関しては、今回試作したのは検証用装置のため、サイズも大きく、撮影の際の取り扱いも簡単ではないため、今回の検証結果を踏まえ、推定精度を保ちつつ小型化するための仕組みを検討する必要がある。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、検証用装置の製作にご協力いただきましたTMDテクノジャパン株式会社の皆様に深く感謝致します。また、本研究の一部は、岐阜市の産官学連携事業の補助を受けたものである。

文 献

- [1] 岐阜県県土整備部道路維持課，“岐阜県橋梁長寿命化修繕計画”，2017.
- [2] 国土交通省，“コンクリートのひび割れを遠方より検出できる技術”，2014.
- [3] 庄野昭，齋藤涼 “コンクリート表面のひび割れ評価方法”，ハザマ研究年報，2009.