

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 6 日現在

機関番号：13102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630211

研究課題名(和文) 橋梁の維持管理に向けた超全視野三次元変形，ひずみ計測システムの開発

研究課題名(英文) Development of long distance three-dimensional measurement system of deformation and strain for bridge maintenance

研究代表者

宮下 剛 (Miyashita, Takeshi)

長岡技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：20432099

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では，橋梁全体の三次元挙動を計測することが可能な全視野計測システムの開発を目的とする．はじめに，カメラキャリブレーション手法を構築し，その妥当性を屋内の近距離計測で実施したところ，1m程度の精度が得られることを確認した．次いで，二台のハイスピードカメラを用いた計測システムを構築し，溶接箱型試験体の圧縮試験時に適用した．その結果，鉛直方向と水平方向の変位量の誤差は約0.1 mmとなった．最後に，長距離計測については現状では課題が残る．しかし，本研究を通じて構築された全視野計測システムの屋内試験における適用性は十分に確認されており，長距離計測に向けた基盤が確立された意義は非常に大きい．

研究成果の概要(英文)：This research aims to develop a photogrammetry system that makes possible to measure three-dimensional behavior of a whole bridge. Firstly, a camera calibration method was developed, and close-distance measurement in a laboratory setting revealed that an accuracy of the system attained about 1 mm. Then, a photogrammetry system using two high-speed cameras was developed, and applied to deformation measurement of a steel welding box column under compressive force. As a result, errors of deformation in the vertical and horizontal directions became about 0.1 mm. Finally, although it remains challenges relating to a long-distance measurement at present, the feasibility of the developed system has been sufficiently confirmed. Therefore, it is of great significance that foundation for long-distance measurement has been established through this research.

研究分野：維持管理工学

キーワード：写真測量 画像計測 橋梁 ひずみ たわみ 維持管理

## 1. 研究開始当初の背景

橋梁を含む土木構造物の変位計測では、通常、不動点を設けてそこからの移動量を計測する接触式の変位計が用いられる。しかし、土木構造物は空間スケールが大きいことから、計測には困難が伴う。図1は、PCケーブル破断が確認された妙高大橋で载荷試験を実施した際の変位の計測方法である。不動点とした変位計からピアノ線を数十 m ほど伸ばして橋梁下面の治具に結び付ける。ピアノ線が風や気温の影響を受けてしまうため、どうしても精度の良い計測は期待できない。さらに、河川上に架かる橋梁に対してこの方法は適用できない。この他、レーザーを用いた非接触式の変位計測機器もあるが、単点で一方向しか計測できない。そこで、非接触で三次元変形、ひずみを計測可能なステレオ写真測量を用いた画像計測による全視野計測が期待されている。

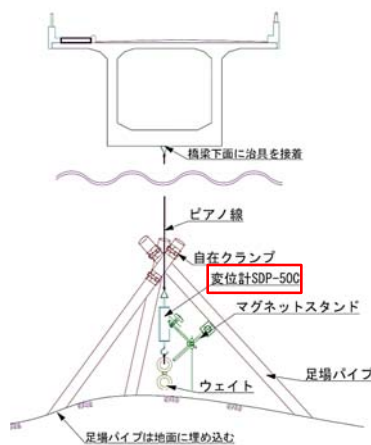


図1 既往の変位計測

計測原理については、これまでの写真測量に基づくものであり、目新しい部分はない。しかし、これを用いて、橋梁全体の三次元挙動を計測し、維持管理へと結びつけようとする試みはこれまでない。有効画素数の増加、高速連写など、近年のカメラ技術の急速な進展によって実現が初めて可能となる。本研究の目的を達成するに当たっての課題（チャレンジ性）を以下にあげる。

### (1) カメラキャリブレーション手法の構築

ステレオ写真測量では、まず、ユーザーが対象空間に三次元全体座標系を設定し、その中に配置したカメラの位置と姿勢（回転）をあわせた六自由度を既知の座標値から同定する（外部キャリブレーション）。同時に、三次元座標とカメラ画素平面の写像関係を表現するカメラモデルに含まれるパラメータも同定する（内部キャリブレーション）。これらの作業を各カメラについて行う。手法自体は古くからあり、近年はロボットの自動走行などコンピュータビジョンの発達で洗

練が進む。しかし、システム化を通じてブラックボックス化も進む。本研究では、広範囲の任意の場所にカメラの設置を許す。カスタマイズ性という観点から、カメラキャリブレーション手法のプログラムを作成する必要がある。また、近距離のキャリブレーションでは、円形のドットを記した平板などを用いる手法が確立されているが、長距離の場合には確立された手法がない。

### (2) カメラの同期計測

静的な計測であれば、カメラ間の同期性は厳密には要求されないため、スチルカメラのタイム機能やワイヤレスリリーズを用いれば対応が可能である。一方、動的な計測では、空間的に離れた場所に設置されたカメラを同期して撮影する必要がある。このような取り組みをこれまで耳にしなが、二台以上の各カメラにGPSのパルス信号を共通信号として入力する、インターネットの時刻同期サーバーを利用する、などの方法が考えられる。

## 2. 研究の目的

画像計測を用いた非接触全視野計測に関する研究は長崎大学などの研究グループが積極的に進めている。ここで使用されている計測部の構成を図2に示す。市販のシステムも同様な構成である。二台のカメラがフレームに固定されていることから三次元座標系におけるカメラ位置と姿勢の同定は実施しやすいが、カメラの焦点距離が短くなり、撮影範囲が限定される。そこで、本研究ではカメラの設置位置を任意にして橋梁全体の三次元挙動を計測することが可能な全視野計測システムの開発を目的とする。これに向けたカメラキャリブレーション手法の開発、カメラの同期計測方法の確立、計測距離と計測精度の把握を行う。



図2 既往の画像計測システムの計測部

カメラの設置位置を任意とし、さらにレンズの組合せも考えると、土木構造物のマイクロ領域からマクロ領域までの三次元変形、ひずみ分布の計測が可能となる。さらに、ハイスピードカメラを用いることで、高速な動的現象の計測も可能となる。マクロ計測からは、

車両走行や温度変化時の橋梁全体の三次元変形挙動や応力分布がわかり、橋梁の健全性診断に有益な情報が得られる。つまり、維持管理の高度化に結び付く。また、マイクロ計測からは、接着系アンカーボルトの接着層、大ひずみ下のゴムや鉛といった制振デバイス、火災を受ける鋼部材など、ひずみゲージでは計測できない部位、部材のひずみ計測が可能となり、性能や設計の高度化に結び付く。

また、これまで計測が不可能であった接着層などのマイクロ領域から、部材の座屈変形などのメソ領域、河川上に架かる橋梁の三次元挙動などのマクロ領域の挙動把握が可能となる。また、橋梁以外にも土木分野では、土粒子やコンクリート材料といった微細構造の挙動、法面やトンネルといった大型構造物の挙動の把握も可能となる。さらに、適用範囲は建築、航空、造船、機械、電子分野など多岐にわたる。

### 3. 研究の方法

本研究の研究期間は2年間とする。平成26年度は、屋内での検証をメインとし、二台のカメラ間距離を数 m 以下と比較的短くして、カメラキャリブレーション手法、デジタル画像相関法の構築を進める。手法の妥当性を鋼板の一軸引張試験、鋼部材の座屈試験を通じて検証する。

平成27年度は、屋外での適用に向けた検討をメインとする。ここでは、二台のカメラ間距離が、数百 m から数 km に達することから、カメラの同期計測手法、カメラキャリブレーションで必要となる既知点の設定方法、計測距離と計測精度の関係について検討する。これらを通じて、橋梁全体の三次元挙動（変形、ひずみ）を計測することが可能な全視野計測システムをまとめ上げる。

### 4. 研究成果

#### (1) 平成26年度

計測システムのコア部分となる、カメラキャリブレーション手法を構築した。ステレオ写真測量では、まず、ユーザーが対象空間に三次元全体座標系を設定し、その中に配置したカメラの位置と姿勢（回転）をあわせた六自由度を既知の座標値から同定する（外部キャリブレーション）。同時に、三次元座標とカメラ画素平面の写像関係を表現するカメラモデルに含まれるパラメータも同定する（内部キャリブレーション）。これらの作業を各カメラについて行う。手法自体は古くからあり、近年はロボットの自動走行などコンピュータビジョンの発達で洗練が進む。しかし、システム化を通じてブラックボックス化も進む。本研究では、広範囲の任意の場所にカメラの設置を許す。カスタマイズ性という

観点から、カメラキャリブレーション手法のプログラムを作成する必要があった。作成したプログラムの妥当性を屋内の近距離計測で実施したところ、1mm 程度の精度が得られている。

#### (2) 平成27年度

ハイスピードカメラを用いた計測システムの構築を進めた。はじめに、構築したシステムの動作性ならびに精度を検証するために、ハイトゲージの変位と構築したシステムによって計測、解析された変位を比較した（図3）。カメラのキャリブレーションは、平面内の二次元キャリブレーションとした。また、カメラレンズの補正も行った。その結果、ハイトゲージの変位量が 30.000mm であるのに対して、構築したシステムによる変位量は 29.977mm となり、十分な精度が得られるとともに、構築したシステムの動作性を確認した。ここで生じた誤差の原因は、奥行き方向の影響と考える。次いで、鋼材から成る溶接箱型試験体の圧縮試験時に、構築した計測システムを適用して変位量の評価を行った（図4）。ここで、使用したカメラの台数は二台である。カメラのキャリブレーションは、立体的な三次元キャリブレーションとし、カメラレンズの補正も行った。その結果、載荷荷重を 24.5 kN としたとき、鉛直方向ならびに水平方向とともに構築した計測システムによる変位量の誤差は約 0.1 mm となった（図5）。比較対象は、ひずみゲージから換算した変位量である。よって、構築した計測システムは、三次元計測でも、その動作性ならびに計測精度とともに問題がないことが確認された。最後に、長距離計測については、LED 光源を用いたカメラの同期や光量調整など、いろいろと試したものの、課題が残る。しかし、本研究を通じて、構築を進める全視野計測システムの屋内試験における適用性は十分に確認されており、長距離計測に向けた基盤が確立された意義は非常に大きい。

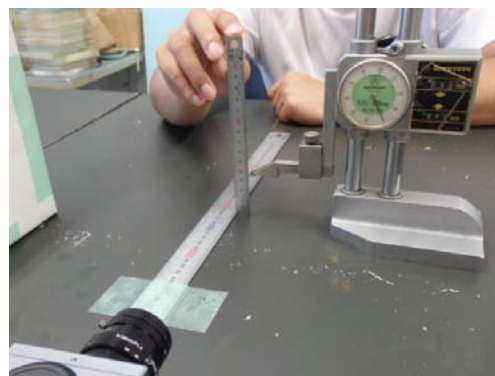
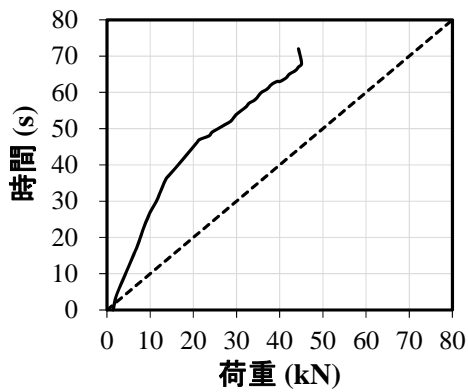


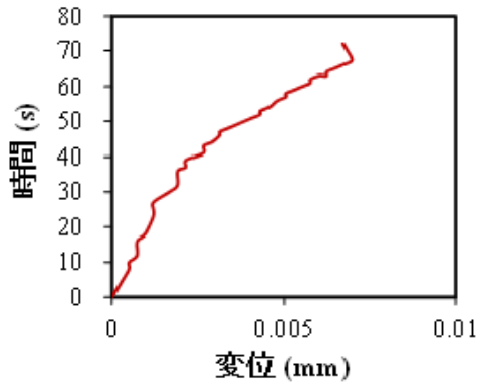
図3 二次元計測の検証



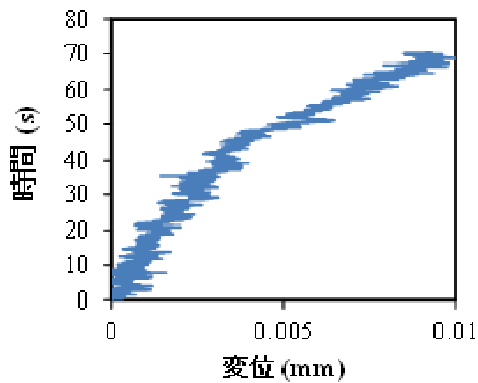
図4 三次元計測の検証



(a) 載荷荷重と経過時間の関係



(b) ひずみゲージによる計測結果  
(部材軸方向)



(c) 全視野計測による計測結果  
(部材軸方向)

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計0件)

[学会発表] (計0件)

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

宮下 剛 (MIYASHITA, Takeshi)

長岡技術科学大学・大学院工学研究科・  
准教授

研究者番号：20432099

### (2) 研究分担者

### (3) 連携研究者