

令和元年6月20日現在

機関番号：80122

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K14766

研究課題名（和文）光学的計測技術に基づく建築構造の汎用的損傷評価法に関する基礎研究

研究課題名（英文）Basic study on versatile damage evaluation method for structure based on the optical measurement technique

研究代表者

齊藤 隆典（SAITO, Takasuke）

地方独立行政法人北海道立総合研究機構・建築研究本部北方建築総合研究所・研究職員

研究者番号：90586497

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、計測対象の構成材料や変形状態に依存しない汎用的な光学的変形計測法を開発し、その計測精度の検証を行うことを目的とする。これまでに研究開発を進めている光学的変形計測法を用いた計測実験から、現状の計測精度の検証と問題点の抽出を行った。計測上の問題点を解決するために画像解析法に改良を加え、従来計測が困難であった部材変形に回転変位を含む場合の計測を可能とした。外力作用時の曲げやせん断による変形・損傷が予想されるCFRPコンクリート合成部材やCLT部材を対象とした計測実験を行い、画像解析法の改良効果の検証と計測法の妥当性に関する検討を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、従来の変位計やひずみゲージ等では困難な、構造部材の広範な変形挙動や損傷過程を把握することが可能となる。これまでは、有限要素解析等により解析的に予測するのみであったこの種の挙動を、可視化表示することで直接的に観察可能となるため、構造性能を検討する上で重要なデータを提供することが可能になる。近年は建築技術の高度化に伴い、構造物への新材料や各種デバイスの適用が進んでいる現状があり、これらの構造性能を詳細に把握する上でも本計測法は非常に有効である。また、本計測法は計測時に特殊な機器や技能を必要としないため、将来的な社会普及の観点からも望ましいと考えられる。

研究成果の概要（英文）：This research aims to develop a versatile optical deformation measurement method which does not depend on the state of the measurement object, and to verify the measurement accuracy. Verification of the measurement accuracy and extraction of measurement problems were conducted by measurement tests using the current optical deformation measurement method. In order to solve the problems in measurement, the image analysis method was improved to enable optical measurement including rotational displacement in deformation of members. Verification of the improvement effects of the image analysis method and examination of the validity of the measurement method were performed using the measurement tests for CFRP concrete composite members and CLT members expected to be damaged by bending or shear under external force.

研究分野：工学

キーワード：光学的全視野変形計測 非接触型計測 デジタル画像解析 位相限定相関法 回転不変位相限定相関法

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

建築構造の性能評価や損傷評価を行う場合、その構成要素である部材の変位計測は極めて重要である。現在、変位計測では変位計やひずみゲージに代表される接触型と呼ばれる計測法の使用が一般的であるが、近年ではデジタル画像解析を用いて非接触で対象の変形挙動を計測可能な光学的計測法の研究<sup>1),2)</sup>が進められている。この方法は、図1に示すように、デジタルカメラを用いて対象の変形状態を画像データとして記録し、これを画像解析することで、刻々と変化する対象の変形挙動を全視野的に把握できる。従来の接触型計測法と比較して広範囲の変形挙動を詳細に把握できる等、有用性が高い。

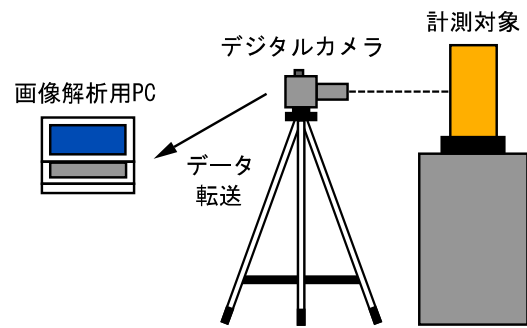


図1 光学的変形計測法

しかしながら、既往の光学的変形計測法では、マーカやランダムパターンといった計測用のターゲットを予め対象に塗料等を用いて付与する必要があり、計測対象の変形量の増加や局部変形が生じる場合には、塗布部分の剥落や損傷で計測が困難となる可能性がある。また、この種の計測法では画像間の相関性に基づいた解析から計測点の変位量を求めることになるが、曲げやせん断による変形が卓越し、変形後の画像が初期画像に対して著しく変化した場合に、相関性の大幅な低下により解析が困難となるケースもある。近年、建築構造技術の高度化に伴って、炭素繊維補強プラスチック (CFRP) 等の採用や免震・制振デバイス等の適用が活発に行われているが、このような計測上の課題から、既往の光学的計測法を用いてこれらの変形挙動を精度良く捉えることは技術的な限界があるものと思われる。

このような研究背景を鑑み、研究代表者はこれまで、画像解析アルゴリズムに「位相限定相関 (POC) 法<sup>3)</sup>」を採用した光学的変形計測法の研究を進めてきた。この方法は、指紋認証や虹彩認証といった極めて高い精度が要求される画像パターンマッチングに用いられる技術であり、これを応用することで計測の高精度化が期待できる。さらに、その高いパターンマッチング性能を活かすことで計測対象への計測ターゲット等を必要としない計測が可能になるため、より簡便で汎用的な光学的変形計測法の実現が可能になるものと考えられる。

### 2. 研究の目的

本研究では、研究代表者がこれまでに研究開発を進めてきた、POC法を用いた光学的変形計測法をベースとして、各種構造材料の計測への適応の可能性を検討し、構造部材や構造デバイスで想定される種々の変形状態を追跡可能な、汎用性の高い計測技術を確立することを目的とする。併せて、本研究期間内において実施する計測実験から、この技術を用いた構造損傷評価法の構築に向けた基礎データの蓄積を図る。

### 3. 研究の方法

本研究では、平成29年度～平成30年度の2年間の研究期間において、以下の3項目の研究プロセスを遂行して研究目標を達成する。

#### (1) 既存の光学的変形計測法の精度検証と問題点の抽出

これまでに未検討である構造材料を対象に、現状の計測法による計測の可能性を確認するため、基礎的な計測実験を行う。対象の種類や変形状態をパラメータとした複数の計測実験を実施し、計測精度の検討および計測における問題点の抽出を行う。

#### (2) 画像解析法の改良

基礎計測実験の検討結果より、計測精度ならびに計測の汎用性を向上させるための画像解析法の改良を行う。計測精度については、現状では不十分な結果となる場合も想定されるため、これに対応可能な画像解析アルゴリズムの導入を視野に入れる。尚、画像解析プログラムは数値計算言語 MATLAB を使用して研究代表者が自主開発しているため、新たな画像解析アルゴリズムを導入する場合でも容易に対応可能である。

#### (3) 汎用的損傷計測技術の開発

研究の方法(1)、(2)を踏まえて、CFRPコンクリート合成部材や構造用木合板の一種である直交集成板 (CLT) 部材等の部材レベルでの試験体を対象とした応用的な計測実験を実施し、本計測法の精度の検証を行う。部材の載荷実験は、研究代表者の所属機関が保有する機器設備を使用して遂行する。主に、外力作用時の曲げ変形やせん断変形による損傷が見込まれる試験体を複数体設定し、画像解析法の改良による効果の検証と計測法の妥当性に関する検討を行う。

### 4. 研究成果

#### (1) 既存の光学的変形計測法の精度検証と問題点の抽出

コンクリートや鋼、木材等の主要な建築材料の計測実験から、本計測法が一般的な接触型変位計測法である変位計やひずみゲージと、同程度の精度を持つことを確認した (図2、図3)。

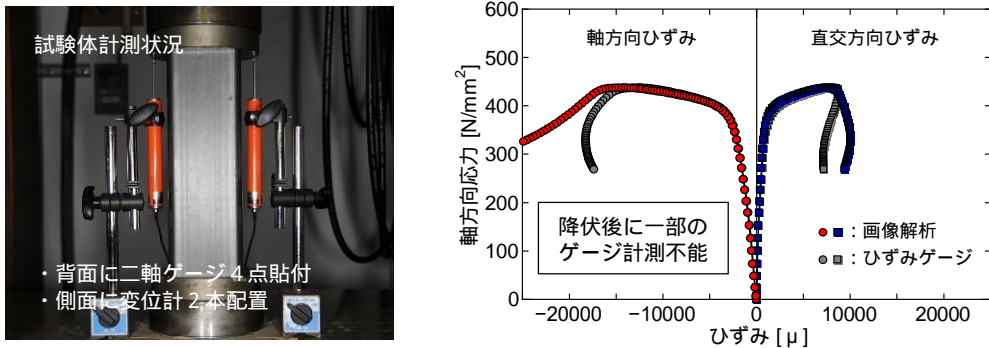


図2 角型鋼管試験体の一軸圧縮試験の計測結果

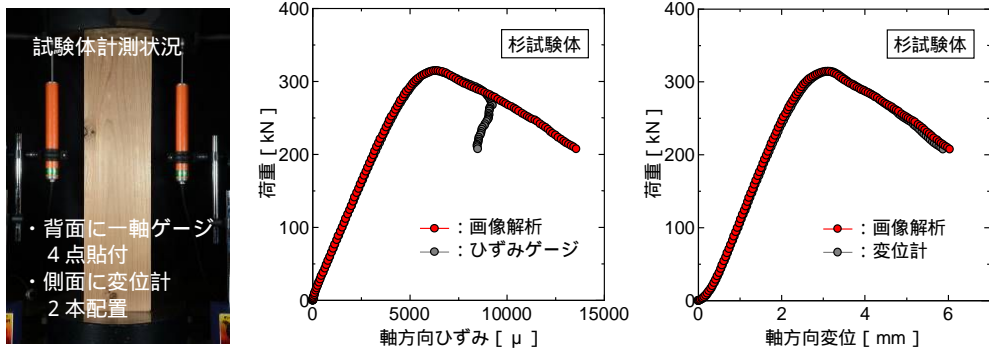


図3 木材（杉）試験体の一軸圧縮試験の計測結果

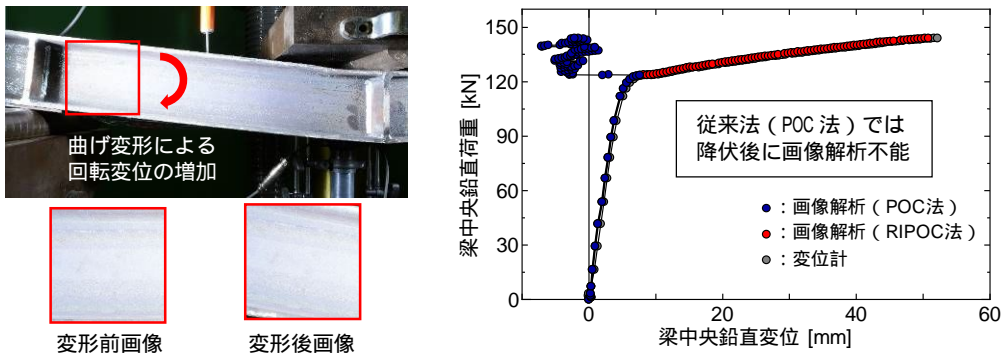


図4 画像解析法へのRIPOC法の導入効果（鋼材梁曲げ試験の計測結果）

また、鋼材梁の曲げ実験の計測結果の検討から、計測対象の変形が増加して画像中の回転変位が増加する場合には、画像解析による計測が不能となる問題点があることを確認した（図4）。

### (2)画像解析法の改良

計測上の問題点を解決するため、画像解析法に改良を行った。具体的には、サブセット画像更新法および回転不変位相限定相関（RIPOC）法<sup>4)</sup>を新たに画像解析法に導入することで、これまで画像計測が困難であった回転変位が増加する場合においても、光学的変形計測が可能となることを確認した（図4）。また、計測変位からひずみを計算するプロセスにおいて、有限要素解析等で用いられる4節点アイソパラメトリック要素を導入し、画像解析より求められるひずみ分布を高精度で表示することを可能とした。

### (3)汎用的損傷計測技術の開発

#### CFRP 補強 RC 梁試験体の計測実験の検討

せん断破壊先行型のRC梁試験体をベースに、CFRP補強の方法が異なる試験体を対象とした計測実験を実施した。試験体は無補強1体とCFRP補強の異なる2体の計3体を用いた（図5）。支持条件は単純梁とし、中央一点集中の一方向载荷とした。デジタルカメラ3台を試験体の左側、中央、右側を撮像出来るよう配置したシンクロ撮影により画像取得を行い、同周期で荷重や試験体背面に設置した変位計の計測を行った（写真1）。

図6に試験体中央位置における計測変位の比較を示す。計測結果の比較より、画像解析による計測値は、補強方法が異なるいずれの試験体においても変位計の計測値と比較してほぼ同程度の計測精度を有することを確認した。

図7に各試験体の左側位置における、画像解析より表示した最大主ひずみ分布と損傷状況を示す。この結果から、コンクリートやCFRPの表面に認められる損傷箇所とひずみの集中箇所は概ね良好に対応していることを示した。CFRP補強の程度による変形や損傷の抑制効果も視覚的



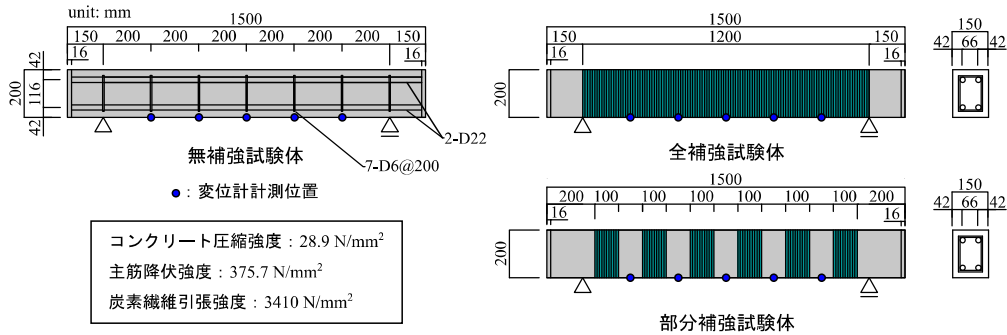


図5 CFRP 補強 RC 梁試験体の概要

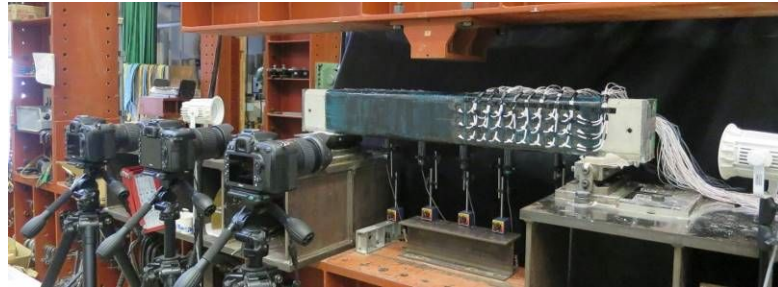


写真1 CFRP 補強 RC 梁試験体の計測状況

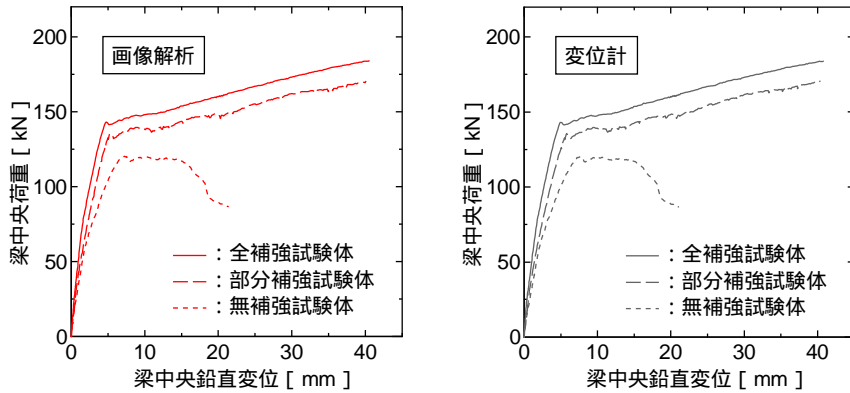


図6 CFRP 補強 RC 梁における梁中央荷重 - 鉛直変位関係の計測結果

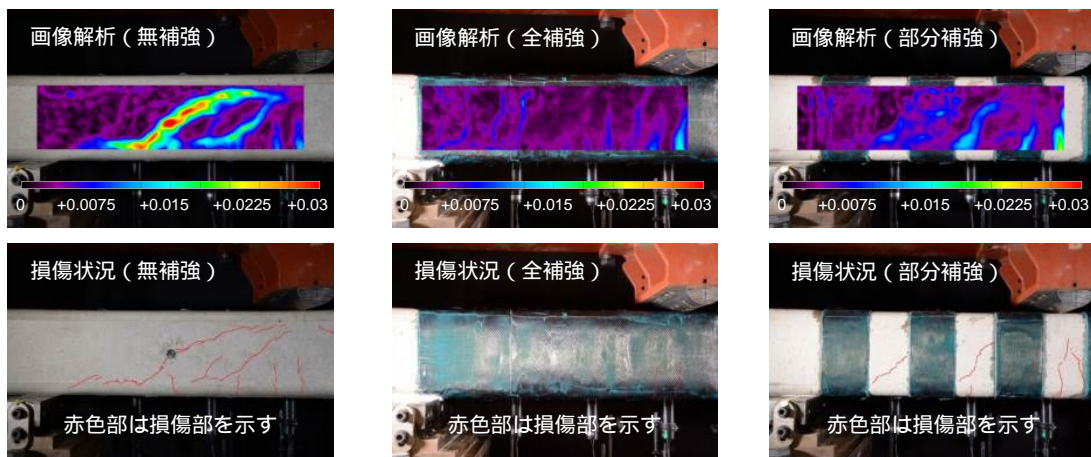


図7 画像解析結果に基づく CFRP 補強 RC 梁の最大主ひずみ分布と損傷状況

に把握でき、本計測法が CFRP 補強部材の変形挙動を光学的に捉え得ることを明らかにした。

#### CLT 梁試験体の計測実験の検討

CLT 梁を対象に面外曲げ試験および水平せん断試験の二種の計測実験を実施した。ここでは紙幅の都合上、水平せん断試験の結果のみを記述する。試験体は 5 層 5 プライのカラマツ CLT (異等級構成、強度等級 Mx90) で、支持条件は単純梁、中央一点集中の一方方向荷重とし、せん断破壊が先行するようスパン長を材せいりの 5 倍とした(図 8)。画像データ取得には、デジタルカメラ 2 台を用いて試験体正面を左右に分けたシンクロ撮影を行い、同周期で荷重および比較用に配置した変位計による鉛直変位の同時計測を行った。

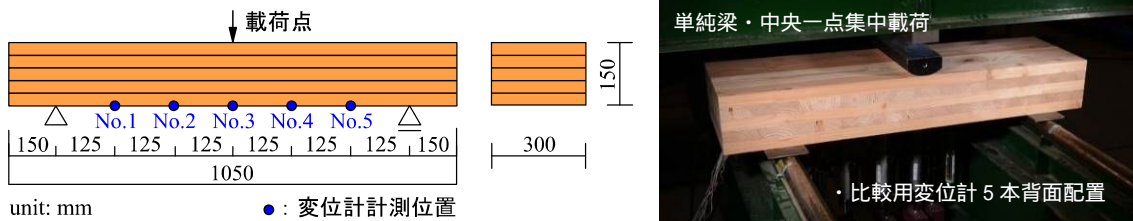


図8 CLT 梁試験体（水平せん断試験）の概要

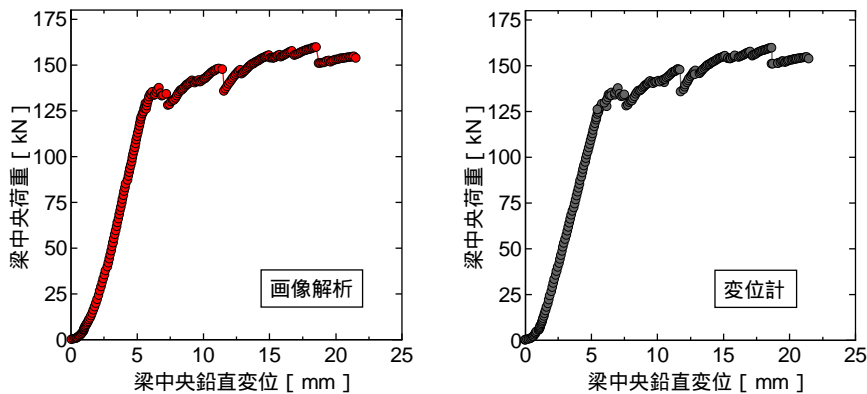


図9 CLT 梁における梁中央荷重 - 鉛直変位関係の計測結果

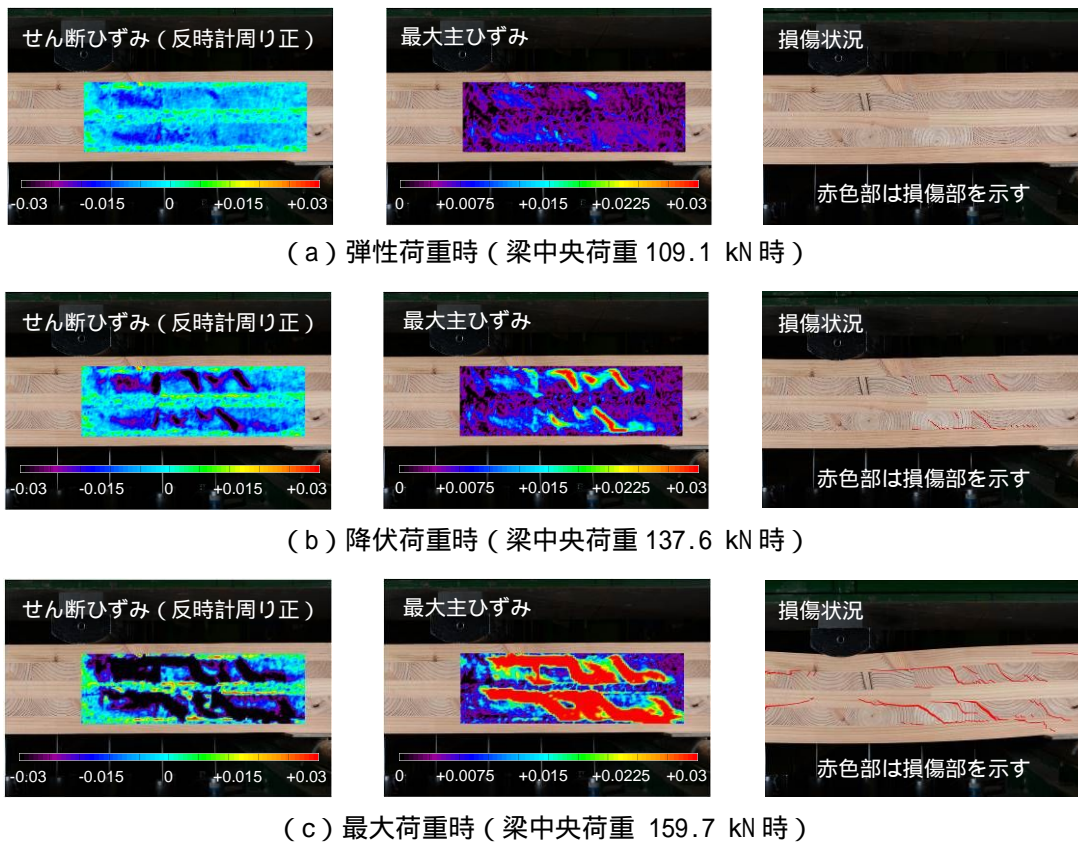


図10 画像解析結果によるCLT 梁のひずみ分布と損傷状況

図9に示すCLT 梁試験体の中央位置における荷重 - 鉛直変位関係の比較から、画像解析による計測値は変位計計測値と比較して、ほぼ同程度の計測精度を持つことを確認した。試験体の降伏以降、せん断ひび割れ等の発生による複数回の荷重低下が確認できるが、両計測値の間に大きな差異は認められなかった。

図10に画像解析より表示した試験体右側のひずみ分布と損傷状況について、試験体の弾性荷重時、降伏荷重時、最大荷重時における結果を示す。これらの結果より、弾性時からCLT部材を構成する直交層ラミナでのせん断ひずみの集中が顕著となっている。これは直交層ラミナでのローリングシアによる変形を捉えたものと考えられ、試験体降伏以降にせん断ひび割れが主に直交層ラミナで発生することと符号する。また、ひび割れ発生箇所と最大主ひずみの集中箇所は良好に対応しており、本計測法が外力作用下のCLT 梁部材の変形挙動を捉え、変形や損傷の推移を可視化表示できることを示している。

<引用文献>

- 1) 出水亨, 松田浩, 中島朋史, 浜岡広: 非接触全視野計測によるコンクリートの材料試験, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.473-478, 2006
- 2) 渡辺健, 東広憲, 三木朋広, 二羽淳一郎: コンクリート構造実験を対象としたリアルタイム画像解析システムの開発, 土木学会論文集 E, Vol.66, No.1, pp.94-106, 2010
- 3) 長嶋聖, 青木孝文, 樋口龍雄, 小林孝次: 位相限定相関法に基づくサブピクセル画像マッチングの高性能化, 計測自動制御学会東北支部第 218 回研究集会, pp.1-10, 2004
- 4) 大槻浩之, 青木孝文, 樋口龍雄, 小林孝次: 回転不変位相限定相関法に基づく画像照合手法とその評価, 計測自動制御学会東北支部 第 194 回研究集会, 194-7, pp.1-9, 2001

5. 主な発表論文等

[学会発表](計 4 件)

Takasuke SAITO, Hiroki SATO, BASIC VERIFICATION ON OPTICAL DEFORMATION MEASUREMENT APPLICABILITY FOR STRUCTURAL MATERIALS, 16th European Conference on Earthquake Engineering, PaperID:10888, 2018

齊藤隆典, 佐藤宏貴, 趙衍剛, CFRP 補強 RC 梁部材の光学的全視野変形計測に関する基礎検討, 2018 年度日本建築学会大会(東北)学術講演梗概集, 構造, 2018

齊藤隆典, デジタル画像解析を用いた CLT 梁部材の光学的全視野変形計測, 2019 年度日本建築学会大会(北陸)学術講演梗概集, 構造, 2019

齊藤隆典, 回転不変位相限定相関法を用いた CLT 梁部材の光学的全視野変形計測, 日本建築学会北海道支部研究報告集, No.92, pp.121-124, 2019

6. 研究組織

(1)研究分担者

該当なし

(2)研究協力者

研究協力者氏名: 佐藤 宏貴

ローマ字氏名: (SATO, Hiroki)