

平成30年6月15日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06197

研究課題名(和文)非接触変位場時刻歴応答計測に基づく既設構造物の表面き裂・内部損傷同定法の開発

研究課題名(英文)Development of surface crack and internal damage identification system based on non-contact displacement measurements

研究代表者

野村 泰稔(Nomura, Yasutoshi)

立命館大学・理工学部・任期制講師

研究者番号：20372667

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、非接触変位場計測技術を用いて、事前情報を必要とすることなく、き裂および構造内部の損傷を定量的に同定するシステムの構築を試みた。変位場およびその時刻歴応答から計算される見かけ上の最大主ひずみおよびその方向から、不可視な状態にあるき裂を検出することに成功し、提案システムはき裂を定量化できることを示した。

本研究のもう一つの取組みとして、深層学習に基づく一般物体検出技術を利用して、き裂をスクリーニングする技術の開発を試みた。動画撮影しながらひび割れを瞬時に検出することに成功し、検査員が立ち入りにくい領域を検査するとともに、その場で構造全体系からき裂を検出できる可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：This study attempted to develop the crack detection system using non-contact displacement measurements which can identify crack and the damage inside structure quantitatively without requiring baseline information. We succeeded in detecting the invisible crack by evaluating the maximum principal strain and the principal direction from the displacement fields and their time-history. It was demonstrated that the proposed system makes it possible to quantify the crack. As another attempt in this study, we developed a screening system of cracks, which can be easily installed into UAV or inspection robots, using general object detection technology based on deep learning. We succeeded in detecting the crack instantaneously by using deep convolution neural network while shooting a video. It was demonstrated that the proposed system has potentialities to inspect the space where an inspector is difficult to approach and locate the crack to be quantified from the whole structure on the spot.

研究分野：応用情報学

キーワード：構造ヘルスマニタリング き裂検出 デジタル画像相関法 深層学習

1. 研究開始当初の背景

近年、老朽化に伴う安全性の低下が懸念される社会基盤に対して、その構造健全性を如何に効率的かつ的確に評価するかが、維持管理計画を策定する上で重要である。

構造健全性の評価方法として、既設構造物に対する診断効率性の観点から、赤外線を用いた方法や可視光画像を評価するもの等、非接触型の方法が有望視されている。赤外線を用いた方法は診断対象のき裂や内部損傷の検出に利用されているが、自然加熱を利用する方法では気象条件により損傷検出精度は大きく低下する。また、その改善策として、パルス光源による瞬間加熱やヒータによる長時間過熱を行う検査方法も提案されているが、適用できる対象が限られ、どちらも様々な構造物に汎用的に使用できる検査技術とは言い難い。一方、可視光画像を用いた損傷診断法も研究されており、その代表的な方法の一つに各種パターン認識技術を利用したき裂検出システムが提案されている。ただし、これらの方法はき裂そのものの特徴を形態学的に評価することから、視認困難なき裂に対して誤検出は避けられない。また、診断対象の内部損傷の検出に利用できるものではない。可視光画像を用いた他の損傷検出法に、デジタル画像相関法を利用し、構造物の表面変位場からき裂を検出する方法が提案されている。これらの方法は、常に構造物のき裂発生あるいは進展前の画像を必要とし、き裂の状態に変化がなければき裂検出は困難であり、既設構造物の即時診断に適用できない。今後、診断すべき構造物がさらに増加することを勘案すると、健全時等の基準データを必要とせず、社会基盤のき裂や内部損傷を総合的にその場で簡便に即時診断できる技術の開発は重要な課題である。

2. 研究の目的

本研究では、研究代表者らが開発を進めてきた画像相関法に基づく構造損傷検出システムを基礎として、既設構造物の表面変位場およびその時刻歴応答から、健全時等の事前情報を必要とすることなく、微小き裂および構造内部の損傷を即時にかつ定量的に同定するシステムの構築を試みた。また、構造全体系を画像計測しながら、深層学習に基づく一般物体検出技術を利用して、定量化すべきき裂をスクリーニングする技術の構築も試みた。これらの技術を統合することで、構造全体系からき裂発生箇所を検出し、表面変位場およびその時刻歴応答から、き裂とその構造内部への進展性・程度を定量的に診断することが一連の流れの中で行える。以下に本申請課題を通じて検討した主張な研究項目についてまとめる。

(1)非接触変位場応答計測による不可視損傷検出

(2)非接触変位場応答計測に基づくコンクリート床版下面のき裂検出

(3)深層畳み込みニューラルネットワークに基づくコンクリート表面のひび割れ検出

3. 研究の方法

(1)非接触変位場応答計測による不可視損傷検出

荷重変動に伴うき裂開閉挙動に着目し、き裂の発生・進展前の画像を必要とせず、さらに荷重の変動幅に大きく依存しないき裂検出システムの開発を試みるとともに、不可視な状態にあるき裂を検出することができるかどうか確認した。具体的には、デジタル画像相関法により被写体表面の変位場を取得し、き裂開口に伴う見かけ上のひずみ場を算出・評価することで、コンクリートおよびあらかじめ切断された鋼板にCFRPを接着した供試体に対して、き裂検出を行い、本システムの有効性を検証した。

(2)非接触変位場応答計測に基づくコンクリート床版下面のき裂検出

(1)の成果をもとに、構造物がカメラに近づいてくるような状況で、き裂を定量的に検出できるか確認した。具体的には、車両交通下にあるコンクリート床版下面を動画撮影し、被写体表面の変位場から見かけ上のひずみを算出することで、き裂を定量化できるか確認した。

(3)深層畳み込みニューラルネットワークに基づくコンクリート表面のひび割れ検出

現在、各所で開発が進められている高所等、人が立ち入ることが困難な箇所等の点検ロボットに実装するシステムを構築すること、および、ひび割れ定量化前に、通常、検査者が行っていた構造全体系からのひび割れ発生箇所の検出を自動的かつ実時間で行えるようにすることを目的として、各種ひび割れの画像を深層畳み込みニューラルネットワークにより学習し、UAVやWebカメラ等により撮影される構造全体系の多数の画像に対して、リアルタイムにひび割れの有無・領域をスクリーニング可能なシステムの開発を試みた。具体的には、深層学習を用いた一般物体検出技術の内、高速処理が可能なYOLOv2を用いて、コンクリート表面のひび割れ検出システムを開発した。

4. 研究成果

(1)非接触変位場応答計測による不可視損傷検出

ここでは、不可視損傷検出に関する結果のみをまとめる。図-1に示すようなCFRP接着鋼板に一軸引張負荷を与え、CFRP表面の力学状態から鋼板の切断箇所(図中白線)を検出できるかどうか確認した。ここでは、取得動画は1秒間23フレームのビットマップ画像に変換した後、提案システムを適用した。図-2に画像相関法により得られた変位場を示す。事前に設けた鋼板の切断箇所の近辺で、

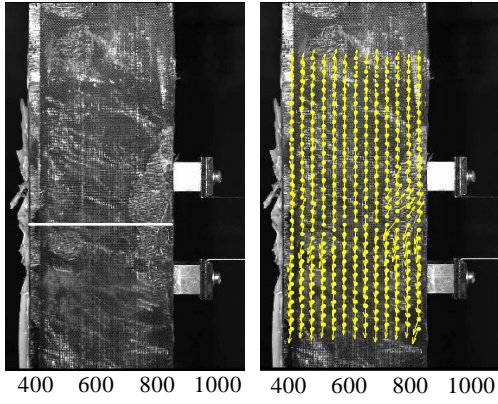
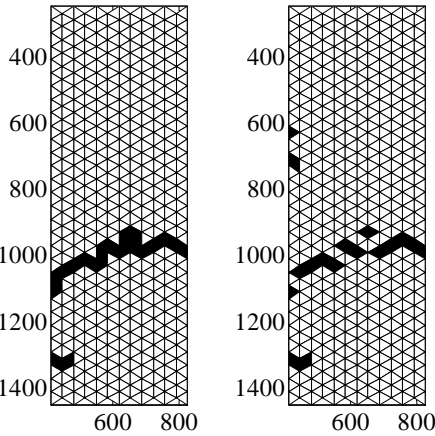


図-1 CFRP 接着鋼板

図-2 変位場



(a) 開口量 $\delta_{crk} > 0.1\text{mm}$ (b) ひずみ比 $\hat{\alpha} > 6.5$
図-3 き裂検出結果

変位ベクトルが逆向き（不連続）になっていることが分かる．提案システムにより推定されたき裂開口量 δ_{crk} と閾値処理を施した結果 ($\delta_{crk} > 0.1\text{mm}$) をそれぞれ図-3(a)に示す．本システムのき裂分布は実際の鋼板の切断箇所と比較して，若干の検出欠落と過剰検出が見られるものの，概ね一致していることが分かる．

提案手法により算出されたひずみ比 $\hat{\alpha}$ と閾値処理を施した結果 ($\hat{\alpha} > \alpha_{th} = 6.5$) を図-3(b)に示す．推定されたき裂開口量の分布と同様に，ひずみ比 $\hat{\alpha}$ に関して，多少の検出欠落や過剰検出が認められるものの，ひずみ比が高い領域は概ね実際の鋼板切断箇所と一致している．なお，この際の応力差は 13.44N/mm^2 であった．以上のことから，構造物に一定の応力差が生じていれば，被写体表面の力学状態から，対象が不可視な状態においても検出する可能性があると言える．

(2)非接触変位場応答計測に基づくコンクリート床版下面のき裂検出

図-4 に示す動画像に対してき裂検出を行った．図中，黄色囲みはき裂の領域を示している．図-5 に節点番号 1（最も左上）の時刻

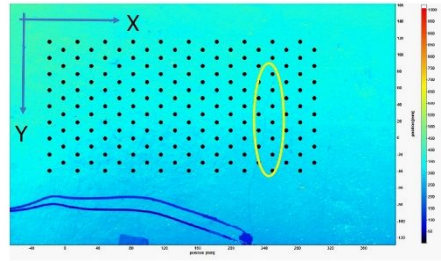
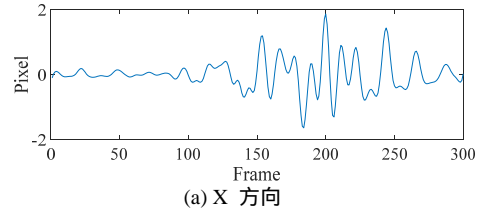
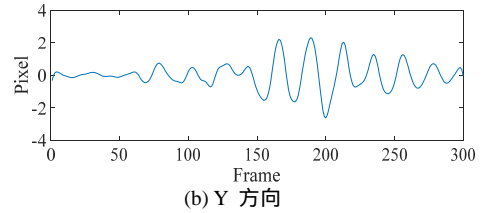


図-4 床版下面と離散化のための節点配置

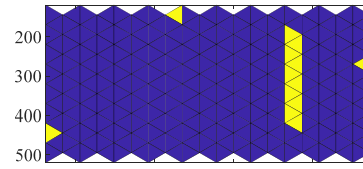


(a) X 方向

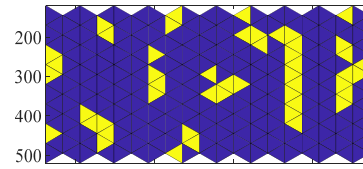


(b) Y 方向

図-5 変位場時刻歴応答



(a) き裂開口量 ($\delta_{crk} > 0.2\text{mm}$)



(b) ひずみ比 ($\hat{\alpha} > 2.18$)

図-6 き裂検出結果

歴応答を示す．図-6 に車両通過後，変位の大きかった $\text{Frame}=245$ でのき裂検出結果を示す．図-6(a)に示すき裂開口量に基づく結果は実際のき裂箇所に対してほぼ一致していることが分かる．一方，図-6(b)に示すひずみ比に基づく結果は多くの過剰検出が認められるものの，実際のき裂箇所を含んだ結果となった．なお， $\text{Frame}=245$ 以外のデータに対しても，変位応答のピーク値を与える時刻ではほぼ同様の結果が見られた．以上のことから，車両交通下など，構造物に一定の応力差が生じていれば，被写体表面の力学状態から，対象がカメラに近づいてくる状況および視認困難な状態においてもき裂を定量的に検出する可能性があると言える．ただし，厳密には，実際のき裂領域とシステムの出力は1要素分ずれる結果となった．この原因として，本研究では画像から得られるたわみ振動（面外方



図-7 入力画像

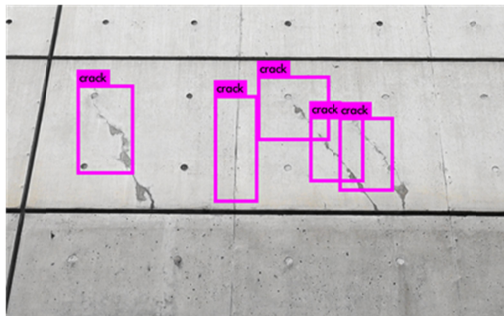


図-8 壁面のひび割れ検出結果

向の変位) に対し多項式近似を行い、両者の差分を面内変位と見なし提案システムを実行した。この面外・面内変位の分離精度がき裂検出結果に影響を及ぼすと考えられることから、今後はこの方法論を確立する必要があると考える。

(3) 深層畳み込みニューラルネットワークに基づくコンクリート表面のひび割れ検出

大学構内の壁面を約 5m 離れた場所から、動画計測しながらひび割れの検出を行った。ここでは、図-7 に示す入力画像の解像度は画像取得時の 1920×1080pixel をそのまま利用した。ひび割れ検出結果を図-8 に示す。図から明らかなように、本システムは概ねひび割れ箇所を検出することに成功していることが分かる。ただし、ひび割れの下側の領域を認識していないことと、コンクリートのつなぎ目をひび割れであると誤検出していることが分かる。ただし、事前に教師データにひび割れ先端部およびつなぎ目データを与えておくことで、検出欠落と誤検出はある程度低減できると考えられるが、今後の課題とする。以下に、本研究により得られた知見を整理する。

一般的な動画の解像度である 1280×960pixel の場合、概ねひび割れの領域を検出できることが分かった。ただし、ひび割れの先端部や開口量の小さな領域は見落としてしまうことが認められた。ひび割れの評価時間に関しては、画像の解像度に関わらず、ほぼ同じ時間で結果を出力し、一般的な動画のフレームレートである 60Hz より遅いものの、概ね実用に耐えうる時間でひび割れを

評価できることが分かった。施設の壁面への適用結果から、概ねひび割れの発生箇所を同定できることが分かった。ただし、ひび割れの先端部を完全に検出することはできなかった。加えて、誤検出が生じた。

全ての評価結果を通じて、ひび割れの検出欠落および誤検出が認められたが、ひび割れ先端部の検出欠落に関しては、開口量が小さかったことが理由として考えられる。教師データにひび割れ先端が写された画像を与えることで、これはある程度改善すると思われる。一方で、施設壁面の結果で見られた誤検出に対しては、今後の重要な課題であるが、検査者が結果を取捨選択する必要があると考えられる。

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 5 件)

野村泰稔, 井田一晟, 宮地翼, 宮本学, 菅真人, 深層畳み込みニューラルネットワークによるバルブの健全性診断, 材料, 査読有, Vol.67, No.2, pp.177-183, 2018.
<https://doi.org/10.2472/jsms.67.177>

野村泰稔, 村尾彩希, 阪口幸広, 古田均, 深層畳み込みニューラルネットワークに基づくコンクリート表面のひび割れ検出システム, 土木学会論文集 F6(安全問題), 査読有, Vol.73, No.2, pI_189-I_198, 2017.
https://doi.org/10.2208/jscejsp.73.I_189

野村泰稔, 井田一晟, 宮地翼, 宮本学, 菅真人, 深層学習に基づく配管バルブの健全性モニタリング, 土木学会論文集 F6(安全問題), 査読有, Vol.72, No.2, I_183-I_190, 2016.
https://doi.org/10.2208/jscejsp.72.I_183

野村泰稔, 内山洸, 野坂克義, 日下貴之, 非接触変位場応答計測に基づく不可視損傷検出の基礎的研究, 土木学会論文集 A2(応用力学), 査読有, Vol.72, No.2, I_87 - I_96, 2016.
https://doi.org/10.2208/jscejam.72.I_87

珠玖隆行, 吉田郁政, 山本真哉, 田中耕司, 藤澤和謙, 野村泰稔, 各種観測更新アルゴリズムによる事後確率分布の推定, 土木学会論文集 A2(応用力学), 査読有, Vol.71, No.2, I_59-I_70, 2015.
https://doi.org/10.2208/jscejam.71.I_59

〔学会発表〕(計 14 件)

野村泰稔, 村尾沙希, 石橋健, 古田均, 深層生成モデルを利用した構造物のひび割れ検出システムの開発, 第 30 回記念信頼性シンポジウム, 2017.

Y.NOMURA, N.YAMAGIWA, K.IZUNO, H.FURUTA, Structural Damage

Quantification Based on AR Model for Earthquake Response and Particle Swarm Optimization, The 12th International Conference on Structural Safety and Reliability (ICOSSAR2017), 2017.

野村泰稔, 井手和也, 地震応答の AR モデルと融合粒子フィルタを用いた構造同定, 第 20 応用力学シンポジウム, 2017.

野村泰稔, 西村航平, 今井道男, 露木健一郎, 非接触変位場応答計測に基づくコンクリート床版下面のき裂検出, 材料学会第 66 期学術講演会, 2017.

野村泰稔, 井手和也, 山際渚, 伊津野和行, 地震応答の AR モデルと粒子群最適化を用いた構造損傷同定, 第 29 回信頼性シンポジウム, 2016.

野村泰稔, 井田一晟, 宮地翼, 宮本学, 菅真人, 深層畳み込みニューラルネットワークによるバルブの固着損傷診断技術の開発, 第 29 回信頼性シンポジウム, 2016.

野村泰稔, 山際渚, 伊津野和行, 木質構造物の地震応答評価に基づく損傷発生検出, 材料学会第 65 期学術講演会, 2016.

野村泰稔, 内山洸, 野阪克義, 日下貴之, 非接触変位場時刻歴応答評価に基づく CFRP 補強鋼板のき裂検出, 材料学会第 65 期学術講演会, 2016.

野村泰稔, 内山洸, 野阪克義, 日下貴之, 非接触変位場応答計測に基づく不可視損傷検出の基礎的研究, 第 19 回応用力学シンポジウム, 2016.

野村泰稔, 山際渚, 伊津野和行, 地震応答の局所定常 AR モデルに基づく木質構造の損傷検出, 第 19 回応用力学シンポジウム, 2016.

野村泰稔, 大島義信, 北村竜希, 融合粒子フィルタに基づく構造動特性の同定と未観測データの取得, 第 19 回応用力学シンポジウム, 2016.

Y.NOMURA, T.KUSAKA, H.FURUTA, Structural damage Quantification Based on Image Correlation and PSO, The 4th International Conference on Soft Computing Technology in Civil, Structural and Environmental Engineering, 2015.

Y.NOMURA, T.SATO, H. FURUTA, Structural damage quantification Based on Recurrence plots and relaxation method of particle filter, The 7th ECCOMAS Thematic Conference on Smart Structures and Materials (Smart2015), 2015.

野村泰稔, 山際渚, 伊津野和行, 木造住宅の地震応答評価に基づく構造ヘルスマニタリング技術の基礎的研究, 材料学会第 64 期学術講演会, 2015.

立命館大学・理工学部・任期制講師
研究者番号: 20372667

(2)研究分担者

日下 貴之 (KUSAKA, Takayuki)
立命館大学・理工学部・教授
研究者番号: 10309099

6. 研究組織

(1)研究代表者

野村 泰稔 (NOMURA, Yasutoshi)