

平成 30 年 6 月 21 日現在

機関番号：13401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K14112

研究課題名(和文) 超微小時間差撮影による振動波面伝搬の可視化と構造物内欠陥の位置特定

研究課題名(英文) Visualization of Vibration Wave Propagation with Imaging Using Ultramicro Temporal Difference and Position Identification of Defect in Object

研究代表者

藤垣 元治 (Fujigaki, Motoharu)

福井大学・学術研究院工学系部門・教授

研究者番号：40273875

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、構造物内部の欠陥を外部から振動を与えることによる微小な変化をとらえ、検出して可視化するシステムを構築するための手法を提案した。微小な変化をレーザースペckルを用いて検出する手法について実験的に確認した。まずは、簡単な光学系によって、構造物を加振した際の塗装下の欠陥の検出がスペckルパターンの撮影によって行うことができた。さらに2個のカメラを用いて、微小に撮影タイミングをずらして撮影することで波面の位置を検出する実験装置の構築を行った。1μ秒ごとにトリガ信号が出力できることを確認し、さらに、物体を加振させたときの波動の伝搬の様子を超微小時間差撮影によって可視化することができた。

研究成果の概要(英文)：In this study, we proposed two methods to visualize the position of crack using laser speckle images. Firstly, a method to detect crack under paint using laser speckle images with a simple optical setup. We built a simple experimental setup to detect crack. The result showed that defect detection was carried out. It was confirmed that the detection sensitivity was higher when the camera was not located across from the object. Secondly, we tried to build an experimental system to catch the movement of an elastic wave in an object using a speckle interferometry. It was confirmed that the system can make two triggers with an interval of 1 micro-seconds after detecting the first wave. The result showed that the visualize of movement of an elastic wave was performed.

研究分野：光応用計測, 実験力学

キーワード：スペckルパターン スペckル干渉法 内部欠陥 波面検出 画像処理

1. 研究開始当初の背景

橋梁や鉄塔などの鋼材で作られたインフラ構造物の内部欠陥検査を効率的に行う新しい手法の開発が求められている。レーザー干渉技術を用いると数ナノメートルの微小な変位を計測することができるが、光学系や解析アルゴリズムが複雑で実際には実用化されていない。

従来の欠陥検出の研究では、精度よく変位やひずみ分布を計測することをめざしていたが、実際の現場においては、短時間で簡単に欠陥の有無の判定ができることが望まれている。そのためには、定量的に精度よく変位やひずみを計測することができなくても、欠陥の有無が2次元の分布として得られればよい。それに限定すれば、簡素な作りの欠陥可視化装置が実現できる。そこで本研究では、スペックルを利用して欠陥を可視化する手法について実験的に検討する。

2. 研究の目的

本研究の目的は、構造物内部の欠陥を外部から振動を与えることによる微小な変化をとらえることで検出するシステムを構築することである。構造物内部の欠陥があると、振動を加えた時の構造物の表面の振動の様子が微小に変化する。また、加振時の波面の伝播の様子も欠陥部で一様でなくなる。この微小な変化について、レーザースペックルを用いて検出する手法を開発する。

3. 研究の方法

まず、レーザースペックル干渉法を用いて、構造物表面の微小変位計測を行う実験装置の構築を行った。それを用いて欠陥を持つ試験片における欠陥部の検出の可能性を確認した。

次に、振動時にスペックルパターンの微小な変化を捉えて、画像処理により可視化する手法の有効性を確認した。

最後に、外部から振動を与え、その波面の伝搬の様子をスペックル干渉法によって可視化する手法の有効性を確認するための実験装置を構築した。

4. 研究成果

(1) レーザースペックル干渉法による構造物表面の微小変位計測実験

対象物体を図1に示す。対象物体は高さ700mm、幅500mm、厚さ5mmのアルミ板を用いた。このアルミ板には、高さ220mmの位置に幅0.3mm、長さ150mmの切り欠きが入っている。

対象物体に0.04mmの面外変位を与えた。変位後のスペックル画像を図3(a)に示す。干渉縞を検出するために、これらの画像から輝度値の差の絶対値を求めた。このようにすることで、図3(b)に示すような干渉縞の画像が得られた。欠陥部分の周辺(図中矢印の位置)で干渉縞の傾きに変化がみられる。この

ことから、スペックル干渉法での塗装下の欠陥検出が可能であることが確認できた。

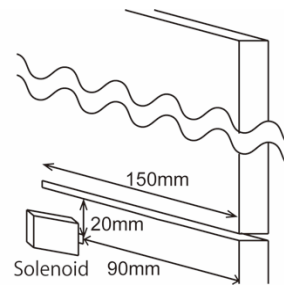
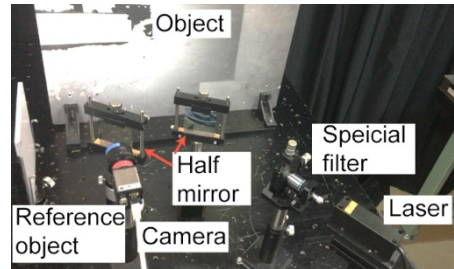
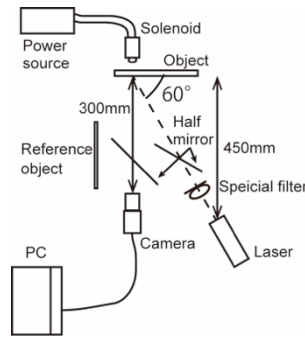


図1 計測試料 (切り欠き付き)

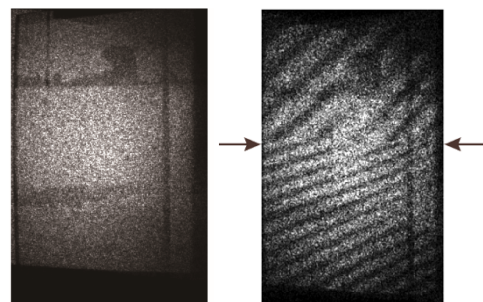


(a) 写真



(b) 光学系

図2 実験装置



(a) 撮影画像 (b) スペックル干渉縞

図3 実験結果

(2) スペックルパターンの微小な変化による欠陥部の可視化

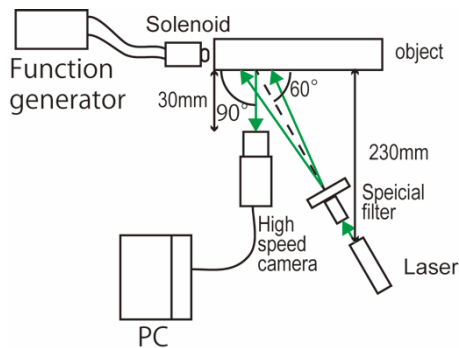
図4に実験装置を示す。試料として、樹脂製の箱を用い、側面をハンマーで叩いて、クラックを付けた。光源は、波長532nm、最大出力150mWのDDSレーザーを使用した。スペックルの撮影には撮影領域2592×2048ピクセルの高速度カメラを使用した。フレーム

レート を 800fps, 露光時間を 1ms とする. 撮影範囲は横 8mm, 縦 6mm (640×480 ピクセル) とする. 試料とカメラとの距離を 30 mm とする. ソレノイドで対象物体に振動を与え, 振動中のスペックルパターンを記録する. ソレノイドにはファンクションジェネレーターから電圧 5V, 周波数 7Hz の正弦波を与えた.

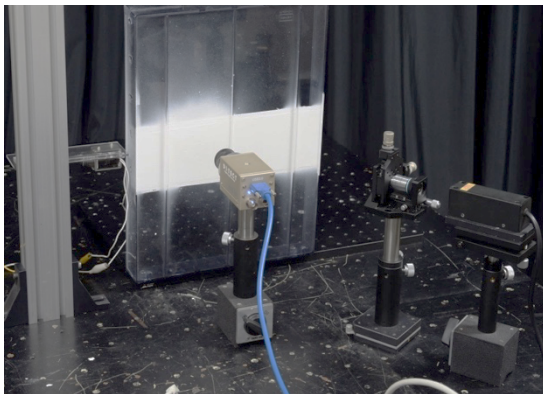
図 2 に実験結果を示す. 1/800 秒間隔で撮影して得られた時系列の画像の中から取り出した連続する 2 枚の画像を図 2(a) と図 2(b) にそれぞれ示す. それらの差の対値を求めた画像を図 2(c) に示す. 図 2(c) より, 塗装下の欠陥の検出ができていることがわかる.

図 2(c) における縦の点線部分について, 縦断面の値のグラフを図 3 に示す. 図中の矢印で示す欠陥部は, 少しではあるが, 周囲と比較すると平均的に大きな値になっているのがわかる. これは, 1 フレーム目と 2 フレーム目の間で, 周辺の画素よりもスペックルの位置の移動量が大きいことを意味している. この原因として, き裂が多少開いたときに, き裂部分の塗装が伸びることによって, スペックルのパターンが他の部分と比較して大きく変化するためと予想している.

本実験結果より, 試料にレーザーを照明として照射して, それをカメラで撮影するだけの単純な光学系で, 塗装下の欠陥の検出ができることが確認できた.

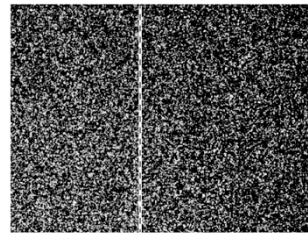


(a) 光学系

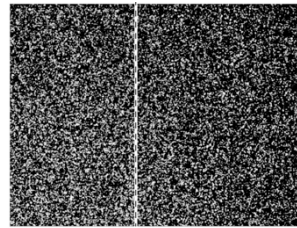


(b) 写真

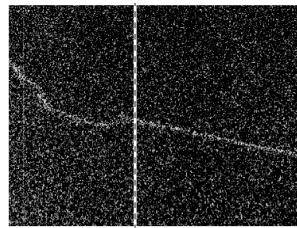
図 4 スペックルパターンの微小な変化による欠陥部の可視化実験装置



(a) 1 フレーム目



(b) 2 フレーム目



(c) 差の絶対値

図 5 欠陥部分の抽出

### (3) レーザースペックル干渉法による波面の伝搬観察実験

固体中を伝わる弾性波の波面の移動速度は, 材料によるが, 数千 m/s 程度であり, 非常に速い. この波面の移動を観察するために, 2 台のカメラにわずかに時間をずらして外部トリガー信号を入力することで短時間にスペックル干渉縞を 2 回撮影し, その発生位置を観察できるような光学系を試作する. 欠陥の有無により, 波面の進行の様子が変化することが捉えられれば, 欠陥検出のひとつの手法となる.

構築した波面の伝搬観察実験の光学系を図 6 に示す. 計測に使用した対象物体は幅 150 mm, 高さ 150 mm, 厚さ 10 mm の合成ゴムにスペックルを検出しやすいように紙を貼ったものを使用した.

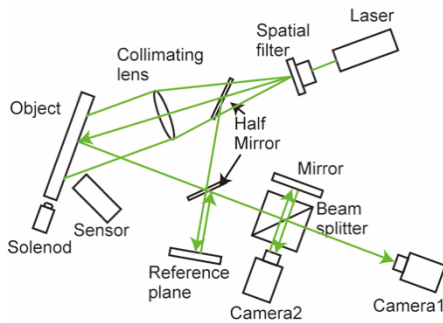
試験片に衝撃を加える電磁石を取り付け, カメラで撮影する領域との間に, 輝度の変化量を検出する高速型のフォトダイオードを取り付けて, スペックルの動きを検知するようにした. 衝撃により波面が伝播してくると, スペックルのパターンが変化することになるために, 波面の移動が検出できる. その後, 2 μs 後にカメラ 1 にトリガ信号を入力し, さらに 1 μs 後にカメラ 2 にトリガ信号を入力した. これにより, カメラ 1 とカメラ 2 は, 1 μs だけ時間差のあるスペックル干渉縞を撮影することになる.

図 7 に, 物体の上側から衝撃を加えたときに得られたスペックル干渉縞画像を示す. ス

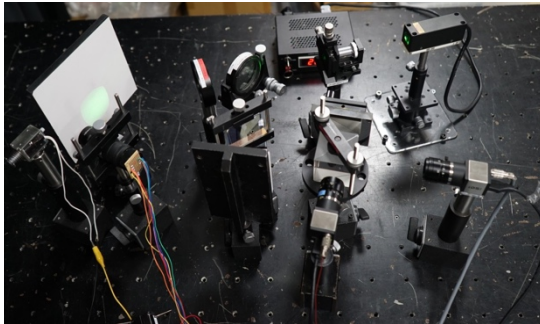


ペックル干渉縞の発生位置がわかるように、全体を平滑化してスペックルノイズを除去した画像を図8に示す。さらに、画面中央部の縦線で示す断面を抽出したグラフを図9に示す。これより、カメラ1で撮影されたスペックル干渉縞のピークの位置は  $j = 224$ 、カメラ2で撮影されたスペックル干渉縞のピークの位置は  $j = 347$  であり、123画素の違いが現れた。この実験では、100画素が10.0mmとなるように撮影をしていることより、スペックル干渉縞のピークの位置は、 $1\mu\text{s}$  で約12mm移動したということになる。これより、伝播速度を求めると1200m/sとなり、ゴムの音速に近い値が得られた。

以上のことより、本研究で試作した装置により、波面の伝搬の観察ができたと考えられる。

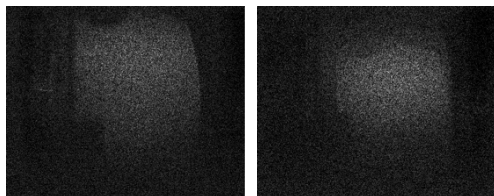


(a) 光学系



(b) 写真

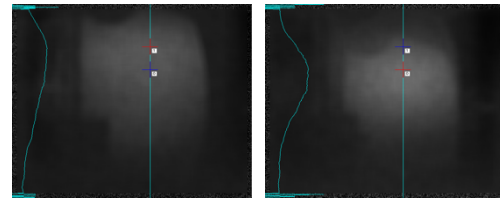
図6 波面の伝搬観察実験の装置



(a) カメラ1

(b) カメラ2

図7 スペックル干渉縞画像



(a) カメラ1

(b) カメラ2

図8 スペックル干渉縞の平滑化画像

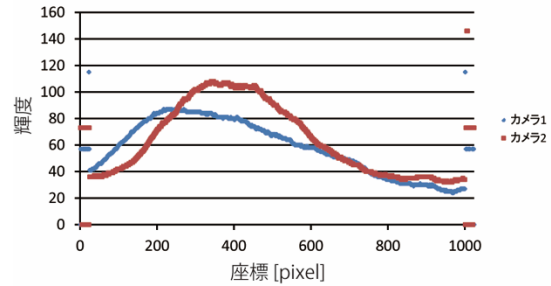


図9 縦断面のグラフ

#### (4) まとめ

まず、レーザースペックル干渉法による構造物表面の微小変位計測実験によって、スペックル干渉法での塗装下の欠陥検出が可能であることが確認できた。

次に、スペックルパターンの微小な変化による欠陥部の可視化実験により、単純な光学系を用いても構造物内部の欠陥の検出を行うことができた。この手法は塗装膜によって外部から目視できない欠陥を検出する手法として利用できる。

レーザースペックル干渉法による波面の伝搬観察実験により、本研究で試作した装置により、波面の伝搬の観察ができたと考えられる。今後は、この装置を持ちいて、欠陥部の検出実験に使う予定である。

以上のことより、本研究の成果として、スペックルを利用することで比較的簡単な光学系で構造物内部の欠陥検出の可能性が確認できた。

#### 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1件)

(1) 山口論人, 村田頼信, 藤垣元治: スペックル干渉法を用いた超音波ホログラフィ画像撮像システムの構築, 電気学会論文誌 C, Vol. 136, No. 8, pp. 1056-1062 (2016) 【査読あり】,

〔学会発表〕(計5件)

(1) Kawahara, K., Fujigaki, M., Trial of Crack Detection Using Laser Speckle Movement, Proceedings of the 12th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics (12th ISEM'17-Kanazawa), 125, (5 pages) (2017).

発表日：2017年11月2日

主催：日本実験力学会

(2) 川嶋慧輔, 村田頼信, 藤垣元治: 超音波ホログラフィ法における位相シフトデジタルホログラフィを用いた波面撮像の検討, 電気学会 第22回知能メカトロニクスワークショップ, 一般社団法人電気学会 知覚情報技術委員会, 甲府, 2B3-4 (2017).

発表日：2017年8月27日

(3) 川嶋慧輔, 村田頼信, 藤垣元治: 位相シフトデジタルホログラフィを用いた超音波波面撮像の検討, 日本非破壊検査協会関西支部 平成29年度非破壊検査に関する研究発表会, 大阪, pp. 23-28 (2017).

発表日：2017年8月10日

(4) 藤垣元治, 川原滉平, レーザースペックル画像を用いた塗装下の欠陥検出の試み, 平成28年度第3回応力・ひずみ測定部門講演会資料, SSM-0061, 7-8(2017).

発表日：2017年3月11日

発表場所：東京, (一社)日本非破壊検査協会 亀戸センター

(5) 川嶋慧輔, 村田頼信, 藤垣元治: 位相シフトデジタルホログラフィを用いた超音波波面の計測, 平成28年度 計測自動制御学会関西支部・システム制御情報学会 若手研究発表会, 大阪, pp. 60-63 (2017)

発表日：2017年1月13日

#### 〔産業財産権〕

○出願状況 (計1件)

名称：スペックル画像を用いる欠陥検出方法およびその装置

発明者：藤垣元治, 川原滉平, 目黒栄

権利者：国立大学法人福井大学

種類：特許

番号：特願 2017-170670

出願年月日：2017年9月5日

国内外の別：国内

#### 〔その他の項目〕 (計1件)

(1) 村田頼信, 藤垣元治: 光学的手法を用いた超音波波面の計測, 非破壊検査, vol. 66(1), pp. 9-14(2017)

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤垣 元治 (Fujigaki Motoharu)

福井大学・学術研究院工学系部門・教授

研究者番号：40273875

(2) 研究分担者

村田 頼信 (Murata Yorinobu)

和歌山大学・システム工学部・教授

研究者番号：50283958