

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 12 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760095

研究課題名(和文) 格子画像の位相情報に基づく大型構造物の高精度高速全視野変位・ひずみ計測法の開発

研究課題名(英文) Development of accurate, fast, full-field displacement and strain measurement method for large-scale structures based on phase information of repeated patterns

研究代表者

李 志遠 (Ri, Shien)

独立行政法人産業技術総合研究所・計測フロンティア研究部門・主任研究員

研究者番号：70509710

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、対象構造物表面に存在する任意の繰り返しのある規則性模様を利用して、デジタルカメラで撮影した格子画像の位相情報を活用した高精度な全視野変位・ひずみ計測手法をそれぞれ開発した。精度確認実験を行った結果、変位計測法では、任意の繰り返し模様ピッチの1/1000の精度の微小変位分布が測定できた。ひずみ計測法では、金属材料の弾性域における微小ひずみ量を検出することができた。インフラ診断への応用として、大型構造物である長さ400メートルの吊り橋のたわみ分布計測へ適用した。重量トラックが橋梁通過時にセンチメートルオーダーのたわみの測定に成功した。

研究成果の概要(英文)：In this study, an accurate and full-field displacement and strain measurement method was developed by using a digital camera and repeated patterns. Displacement experimental results demonstrated that the measurement accuracy is the order of 1/1000 pitch of the repeated pattern. Computer simulation and tensile experimental results showed that strain measurement can be performed accurately in elastic-plastic region of small strain. For a practical application, a deflection measurement of a long bridge was performed. These results indicated that centimeter order deformation across a 400-meter-long bridge was measured successfully when heavy trucks pass through the bridge.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学 機械材料・材料力学

キーワード：変位ひずみ分布計測 繰り返し模様 光学的計測 サンプリングモアレ法 位相解析 フーリエ変換 大型構造物

1. 研究開始当初の背景

構造物の設計段階あるいは使用中における変位やひずみを解析することは、構造物の破壊を未然に防ぎ、安全性を確保するために不可欠である。特に近年、大型機器・構造物の事故や崩落等が問題となっている。加えて、2011年3月11日に発生した東日本大震災(東北地方太平洋沖地震)より多くの橋梁、発電プラントや化学プラントなどの大型インフラ構造物は大きな損傷を受けている。非破壊で検査可能な全視野変位・ひずみ計測技術はますます重要であり、現場で直ちに対応可能な計測技術の早期開発が急務となっている。

既存のセンサとしてひずみゲージや Laser Doppler Vibrometer (LDV)、埋込みセンサである Fiber Bragg Grating (FBG)などが構造ヘルスマニタリング用センサとして広く利用されているが、これらのセンサはポイントごとの情報しか得られない。

一方、光干渉や画像処理技術を用いた全視野計測法は、対象とする領域内の変位・ひずみ分布が求められる非常に有効な手法である。スペックル干渉法(ESPI)を用いたコンクリート構造物のひずみ計測、位相シフトデジタルホログラフィ(DH)による構造物の表面形状・変位計測、デジタル画像相関法(DIC)を用いた橋梁のたわみ分布測定などの先行研究がすでに報告されているが、装置のコスト・計測範囲の制限・振動に弱いなど、実際に検査現場で使用されているケースがほとんどないのが現状である。

上述の研究ニーズに対して、研究代表者は規則性のある正弦波や矩形波パターンを用いて、1枚の縞画像から高精度に変位分布が得られるサンプリングモアレ法(S. Ri, et al., Exp. Mech. 50, pp. 501-508, 2010)を開発した。

本研究は、以上の背景と、研究代表者のこれまで開発したモアレ縞の位相解析技術であるサンプリングモアレ法を発展させ、任意の規則性模様に対応した変位・ひずみ分布計測法の開発および大型構造物への適用研究を計画した。

2. 研究の目的

本研究は、格子画像の位相情報を活用した全視野変位・ひずみ計測手法を開発するものである。規則性のある模様を施した構造物表面をカメラで撮影し、撮影された変形前後の各1枚の格子画像から得られるモアレ縞の位相情報を高次の周波数成分まで考慮した解析手法を開発し、高精度な変位・ひずみ計測を実現する。本開発手法を用いて、室外の大型構造物検査への適用可能なミリオーダーの微小変位と高精度なひずみ検出の実現を図る。

3. 研究の方法

本研究は、2年継続により、(1)規則性模様を活用した変位分布計測法の開発、(2)基準長不要な動的ひずみ計測法の確立、(3)

変位・ひずみ計測精度の定量評価と考察、(4)大型構造物検査への適用、なる4項目の研究を中心に推進し、構造物破壊の危険から未然に身を守る安全・安心な生活を実現するための新規変位・ひずみ計測技術手法を確立し、汎用性の高い計測装置を開発した。

4. 研究成果

(1) 任意の繰り返し模様を利用可能な変位分布計測法の新規開発

従来のサンプリングモアレ法では、矩形波または正弦波の輝度分布をもつ格子画像のみを対象としていた。ここでは、任意の規則性模様に対応できる変位分布計測法を開発した。まず、図1に示す通り、任意の繰り返し模様は複数個の周波数成分(フーリエ級数)の重ね合わせで考えることができる。

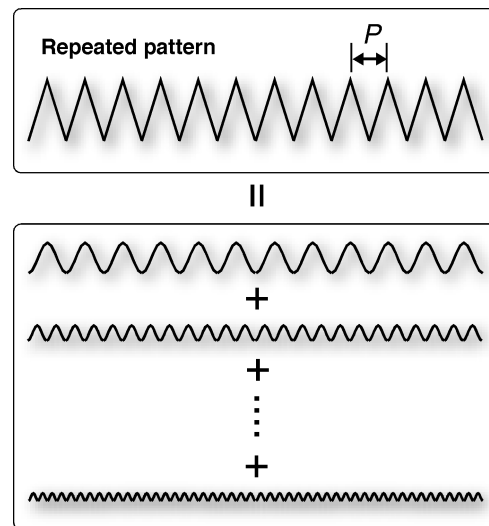


図1 複数個の周波数成分(フーリエ級数)による繰り返し模様の表現

そこで、撮影された1枚の規則性模様に対して、間引きと輝度補間処理により、複数枚の位相がシフトしたモアレ縞を得ることができるが、ここで得られたモアレ縞は元の規則性模様を拡大したものであるため、モアレ縞はまた複数個の周波数成分の正弦波の重ね合わせで表すことができる。したがって、これらのモアレ縞画像を離散フーリエ変換する際に、複数個の高次の周波数成分まで考慮すれば、任意の繰り返し模様に変位計測用の基準格子として利用することができる(図2)。また複数個の周波数成分を同時に用いるため、測定結果のばらつきが少なく、安定した変位分布計測が可能になった。その結果、本開発手法により、構造物表面に存在する規則性模様(例えば、建築物の外壁タイル、高層ビルの窓ガラスなど)を活用することができ、格子の準備や事前の貼付け作業が不要になるという利点がある。


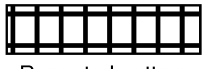


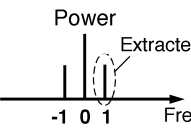
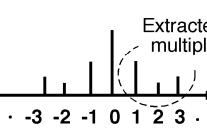
| | Conventional | Proposed |
|------------------|---|--|
| Grating pattern |  Cosinusoidal wave Disadvantage Difficult to fabricate |  Repeated pattern Advantage No need for preparation |
| Moire fringe |  |  |
| Fourier spectrum |  Power vs. Freq. (0, 1) Only first frequency |  Power vs. Freq. (-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3) Multiple frequencies |

図2 高次周波数成分を取り入れた変位分布計測法の原理

(2) 基準長不要な動的ひずみ計測法の開発
 サンプルングモアレ法によって得られるモアレ縞の位相分布から自動的に撮影画像上の格子ピッチを算出する方法を考案した(図3)。ここでは、サンプルングモアレ法で解析したモアレ縞の位相分布に対して、空間微分(画像処理上では差分)することで、画素ごとに撮影された元の格子の画素ピッチを小数点で決定することができた。この格子ピッチの算出方法を用いて、変形前後の格子ピッチの変化からひずみを算出する方法を提案した。シミュレーションによりひずみを算出できることを確認し、その有効性を検証した。

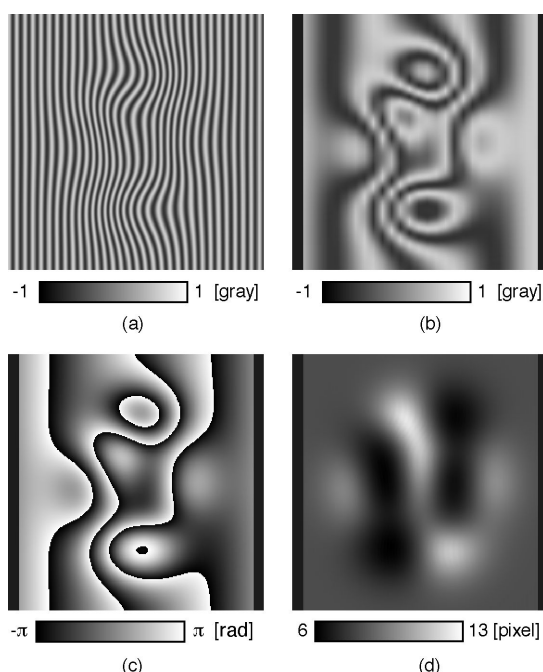


図3 格子ピッチの自動決定法の提案：(a)撮影縞画像，(b)モアレ縞，(c)モアレ縞の位相分布，(d)算出した格子ピッチ分布

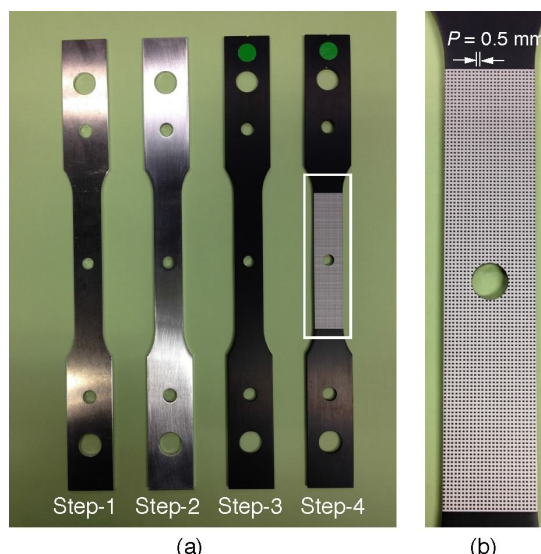


図4 アルミ試験片とレーザーマーキング法による格子作製(格子ピッチ0.5mm)

モアレ法によるひずみ計測を行う際に、試験片表面に規則的な模様を付与する必要がある。本研究では、レーザーマーキングによる精密な格子作製法を提案した。図4に実際のアルミ試験片に0.5 mmピッチの2次元ドットタイプの格子パターンを描き込んだものを示す。ここでは、コントラストのよい模様が得られるように、表面研磨後、黒色のアルマイト表面処理を行い、そのうえでレーザー光を等間隔ピッチで走査することで格子を作製している。従来格子模様を貼付ける方法に比べて、本格子製作法のメリットは材料表面にダイレクトに描き込んでいるため、材料表面のひずみに追従して格子ピッチが変化することである。

(3) 繰り返し模様を利用変位・ひずみ計測の精度確認

まず、繰り返し模様を用いる本開発変位計測法の精度を確認した。実験では、模様ピッチがすべて10 mmの4種類の格子模様を用いた。具体的には、従来の矩形波に加えて、アルファベットのAや数字の3、さらに漢字の模様を規則性模様とみなし、これらの模様を平板プレートに貼付け、精密移動ステージ上に固定した。移動ステージで与えられた移動量と比較することで精度評価を行った。その結果、従来のサンプルングモアレ法では、模様の種類によって、ばらつきの大い結果となったが、本手法によれば、模様の種類によらずに模様ピッチの1/1000の精度で安定した変位量を検出できた(図5)。

次に、図4に示すアルミ試験片を用いて引張実験を行った。引張実験の際に、面外変位の影響を受けないように、カメラの撮影する際に、テレセントリックレンズを用いた。解析した結果、一定領域内における平均ひずみであれば、弾性域内の2000 $\mu\epsilon$ 以下の微小ひずみを測定することができ、ひずみゲージで

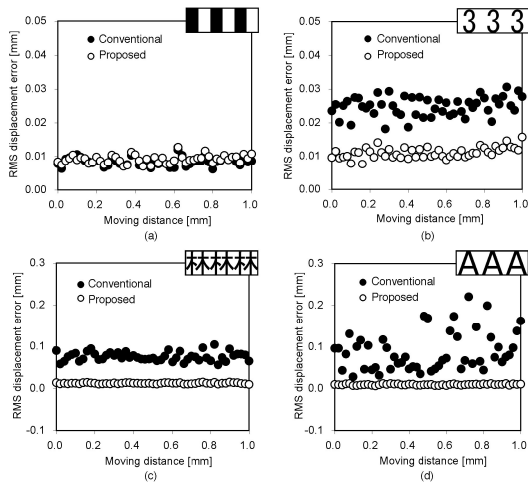


図5 任意の繰り返し模様を用いた変位計測結果

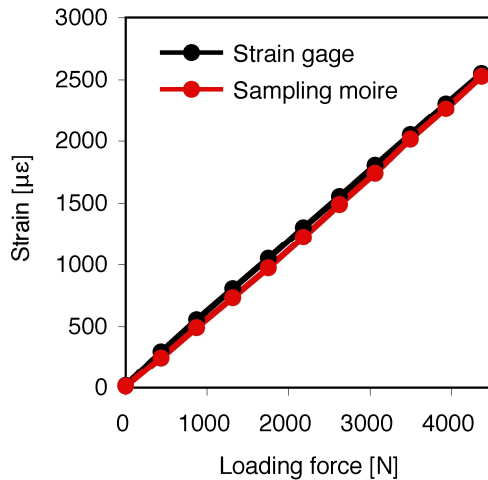


図6 ひずみゲージと開発法によるひずみの計測精度評価

測定されたひずみ量とよく一致した結果(図6)が得られ、本ひずみ算出法の有効性を示した。一方、ひずみゲージに比べて、各画素で得られたひずみのはらつきはまだ大きいため、今後そのばらつきを低減できる方法を検討する必要がある。

(4) 大型構造物のたわみ計測への適用

現在社会インフラの老朽化は急速に進め、経年劣化による被害発生の可能性が指摘されている。このようなことから安価で簡便な社会インフラモニタリング技術の開発が重要である。本研究で開発した繰り返し模様を利用した変位分布計測法を大型構造物である吊り橋(支間長が367メートル)のたわみ計測へ適用した。ここでは橋梁にマーカーを貼付けることなく橋梁が持つ周期的なトラス構造(周期ピッチが2.25 m)を繰り返し模様とみなし、トラックの通過に伴い橋梁全体のたわみ分布を測定することができた(図7)。図8に示すように、トラックの通過に

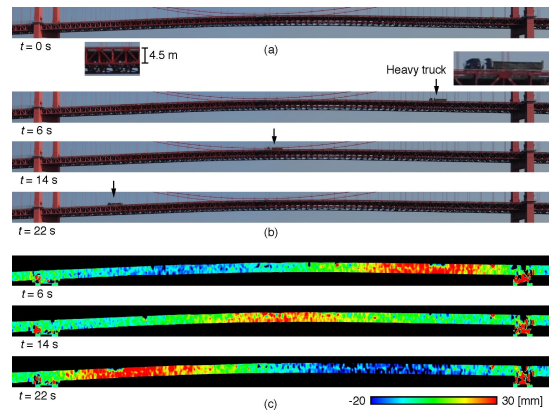


図7 トラス構造を利用した吊り橋のたわみ分布の測定結果

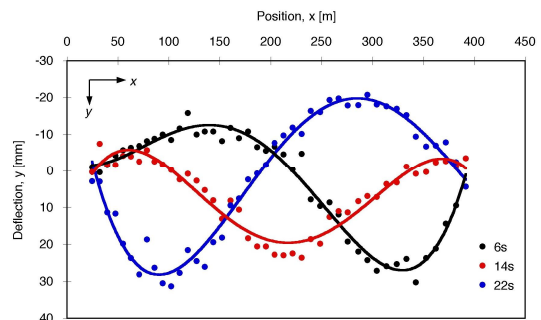


図8 トラックが橋梁を通過時の橋梁全体のたわみ分布

伴い橋がセンチメートルオーダーでのたわみ量が発生していることがわかった。また興味深いことに、トラックが一定の速度で橋梁を通過するため、静的な負荷荷重と異なり、橋梁全体で上下に振動していることも判明した。本手法により、汎用的なデジタルカメラで橋梁を撮影するだけで、全体のたわみ分布を得られることから、低コストな検査手法として期待できる。

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)

S. Ri, S. Hayashi, S. Ogihara, H. Tsuda, Accurate and Fast In-plane Displacement Measurement Method for Large-Scale Structures by Utilizing Repeated Pattern, Proc. SPIE, 査読有, Vol. 8692(2013), 86922F. DOI:10.1117/12.2008286

S. Ri, H. Tsuda, Measurement Small Deformations of Large Structures Using a Digital Camera, SPIE Newsroom, 査読無, (2013), 1-3.

DOI: 10.1117/2.1201305.004877

李志遠, 津田 浩, 高精度高速全視野変位計測法の開発, 検査技術, 査読無, 18-9 (2013), 31-36.

S. Ri, M. Saka, K. Nanbara, D. Kobayashi, Dynamic Thermal Deformation Measurement of Large-Scale, High-Temperature Piping in Thermal Power Plants Utilizing the Sampling Moiré Method and Grating Magnets, *Experimental Mechanics*, 査読有, 53-9 (2013), 1635-1646.

DOI: 10.1007/s11340-013-9761-2

S. Ri, S. Hayashi, S. Ogihara, H. Tsuda, Accurate Full-field Optical Displacement Measurement Technique Using a Digital Camera and Repeated Patterns, *Optics Express*, 査読有, 22 (2014), 9693-9706. DOI:10.1364/OE.22.009693

〔学会発表〕(計 12 件)

李志遠, 2次元サンプリングモアレ法によるワンショット縞画像の高精度位相解析, 日本機械学会材料力学部門 M&M 若手シンポジウム 2012, 2012年8月11日 函館. 李志遠, 坂真澄, 南原健一, 小林大輔, 格子磁石を用いたサンプリングモアレ法による大型高温配管の動的熱変形分布計測, 日本機械学会 M&M2012 材料力学カンファレンス, 2012年9月22日, 愛媛.

林嵯隼, 李志遠, 津田浩, 荻原慎二, タイル模様を利用した大型構造物の全視野変位計測法の開発, 日本非破壊検査協会 第44 回応力・ひずみ測定と強度評価シンポジウム, 2013年1月22日, 東京.

李志遠, 津田浩, サンプリングモアレ法における高精度変位計測のための最適な解析ピッチの自動決定法, 日本非破壊検査協会 第44 回応力・ひずみ測定と強度評価シンポジウム, 2013年1月23日, 東京.

S. Ri, S. Hayashi, S. Ogihara, H. Tsuda, Accurate and Fast In-Plane Displacement Measurement for Large-Scale Structures by Utilizing Repeated Pattern, *SPIE Smart Structures/NDE 2013*, 2013年3月13日, San Diego (USA).

津田浩, 遠山暢之, 李志遠, 光学的手法を用いたスマート損傷検出, 第56 回材料強度と破壊総合シンポジウム, 2013年4月10日, 東京.

S. Ri, H. Tsuda, Two-dimensional Sampling Moiré Method for Fast and Accurate Phase Analysis of Single Fringe Pattern, *Int. Conf. on Optics in Precision Engineering and Nanotechnology (icOPEN2013)*, 招待講演, 2013年4月11日, Singapore.

李志遠, 津田浩, 規則性模様を利用したサンプリングモアレ法による大型構造物の変位計測, 日本材料学会 第62 期通常総会・学術講演会, 招待講演, 2013年5月19日, 東京.

林嵯隼, 李志遠, 津田浩, 荻原慎二, 大型構造物のタイル模様を利用したリモート変位計測法の提案, 日本非破壊検査協会保守検査ミニシンポジウム, 2013年7月5

日, 東京.

林嵯隼, 李志遠, 津田浩, 荻原慎二, 任意の規則性模様を活用した高精度高速変位分布計測法の開発, 日本実験力学会 2013年度年次講演会, 2013年8月21日 秋田.

H. Tsuda, S. Ri, Deformation Distribution Measurement of a CFRP Structure, *The 13th Euro-Japanese Symposium on Composite Materials*, 招待講演, 2013年11月5日, France.

林嵯隼, 李志遠, 津田浩, 荻原慎二, 規則性模様とJPEG圧縮式画像を利用した全視野変位計測, 安全・安心な社会を築く先進材料・非破壊計測技術シンポジウム, 2014年3月10日, 東京.

〔図書〕(計 3 件)

李志遠, 藤垣元治, よくわかる実験技術・学術技術用語第2版, サンプリングモアレ法による高精度微小変位分布計測とその応用, 日本実験力学会出版, 2012, pp. 44-47.

S. Ri, *Optical Measurement Techniques for Systems & Structures 2*, Chapter 34: Spatiotemporal Phase-Shifting Method for Accurate Phase Analysis Using 2-D Discrete Fourier Transform, Shaker Publishing, 2013, 10 pages.

S. Ri, M. Fujigaki, *Recent Advances in Topography Research*, Chapter 4: Single-Shot Phase Analysis by the Sampling Moiré Method and Its Application to Displacement Measurement, Nova Science Pub. Inc., 2013, 20 pages.

〔産業財産権〕

出願状況 (計 3 件)

名称: 高次元輝度情報を用いた縞画像の位相分布解析方法、装置およびそのプログラム

発明者: 李志遠

権利者: (独)産業技術総合研究所

種類: 特許権

番号: PCT/JP2012/83112

出願年月日: 2012年12月20日

国内外の別: 国外

名称: 規則性模様による変位分布のための測定方法、装置およびそのプログラム

発明者: 李志遠, 津田浩

権利者: (独)産業技術総合研究所

種類: 特許権

番号: 特願 2013-149340

出願年月日: 2013年7月18日

国内外の別: 国内

名称: 規則性模様による変位分布のための測定方法、装置およびそのプログラム

発明者: 李志遠, 津田浩

権利者: (独)産業技術総合研究所

種類: 特許権

番号：PCT/JP2013/82701
出願年月日：2013年12月5日
国内外の別： 国外

〔その他〕
ホームページ等
<https://staff.aist.go.jp/ri-shien/>

6．研究組織

(1)研究代表者

李 志遠 (RI SHIEN)
産業技術総合研究所・
計測フロンティア研究部門・主任研究員
研究者番号：70509710

(2)研究分担者 なし

(3)連携研究者 なし