

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 20 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02038

研究課題名（和文）三次元時空位相解析で切り拓くモアレ変位・ひずみ計測の新展開

研究課題名（英文）Development of Moire Displacement and Strain Measurement by Three-dimensional Spatiotemporal Phase Analysis

研究代表者

李 志遠 (Li, Shien)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・上級主任研究員

研究者番号：70509710

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究はランダムノイズや空気揺らぎなど外乱の多い条件でもロバストな全視野変位・ひずみ測定を実現するものである。記録された縞画像の時間と空間方向にダウンサンプリング処理で得られる複数枚の位相シフトされたモアレ縞を用いることでより高精度に位相分布を計算できる。同技術をベースに、マイクロスケールのひずみ分布計測から大型構造物の変位測定まで応用展開を行った。インフラ構造物である橋のたわみを計測できる方法とマイクロスケールの材料評価のための変位・ひずみ分布測定法を提案し、その有効性を確認した。加えて位相シフトデジタルホログラフによる透明体の位相分布と3次元温度分布を測定できるシステムを構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

開発した時空位相シフト法は、カメラのランダムノイズや空気の揺らぎなどの様々な外乱に対してロバストであることを確認できた。また、従来の位相解析で発生していた周期的な位相誤差を、時空間位相シフト法を用いることで自動的にキャンセルできることを示した。縞模様画像の位相分布を高精度に解析できるようになったことで、構造材料の微小な変位やひずみ分布を得ることができる。材料科学における全視野での変位・ひずみ計測の実現は、学術的な意義だけでなく、インフラ構造物である橋のたわみ計測による健全性評価を可能にするという社会的意義がある。

研究成果の概要（英文）：This study achieves robust full-field displacement and strain measurements despite challenging external disturbances, such as random noise and atmospheric fluctuations. A spatiotemporal phase analysis technique is developed to improve the precision in determining the phase distribution. By harnessing this technological advancement, various applications have been developed, from evaluating micro-scale strain distribution to assessing displacements in large-scale structures. We proposed a method that can measure the deflection of bridges and a method for measuring strain distribution for micro-scale material evaluation and confirmed the method's effectiveness. In addition, we also constructed a system that can measure the phase distribution and 3D temperature distribution of transparent objects using the phase-shifting digital holography.

研究分野：実験力学

キーワード：モアレ法 位相シフト 位相解析技術 フーリエ変換 変位・ひずみ測定 サンプリングモアレ法 時空位相シフト法 材料評価

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

航空機で使用されている高強度・軽量化可能な CFRP 材料や耐熱 Ti 合金などの複合材料の機械的特性評価において、微細組織が大きく関与するマイクロスケールでのひずみ分布測定ニーズが高い。加えて、近年橋梁のたわみや鉄道レールの軌道変位測定といったインフラ構造物の構造上での健全性評価を低コストかつ高精度で測定できる代用技術が求められている。従来よく使われている変位計やひずみセンサは貼り付けた部位での変形情報しか得られないため、画像撮影によるランダムな模様を用いるデジタル画像相関法、またはレーザー干渉縞を用いる電子スペckル干渉計、デジタルホログラフィやモアレ法などの全視野計測法が有効である。とりわけ変形情報を含む縞画像の位相を解析することで測定精度を大幅に向上させることができる。

しかしながら、対象物のスケールによらず、共通してカメラのランダムノイズ・空気ゆらぎ・陽炎や霧など様々な外乱によって、安定した変位計測が出来ない場合がある。特に変位分布を微分して得られるひずみ計測は難しい。このように、外乱の多い環境では、従来の解析技術だけでは解決することが難しく、新たな計測方法を見出す必要がある。

本研究は、ランダムノイズや空気揺らぎなどの外乱の多い実験環境でもロバストに全視野変位・ひずみ測定を実現するものである。時間的または空間的に変調・記録された縞画像を、ダウンサンプリング処理で得られる複数枚の位相シフトされたモアレ縞を用いて、独自の位相算出方法より高精度に位相分布を計算できる。これにより計測環境の変動に伴う計測誤差発生の問題解決に着手し、計測環境が比較的悪い条件下でも高精度な位相解析の測定を実現する。また同技術をマイクロスケールからメートルスケールの構造物の面内・面外変位とひずみ分布計測に応用展開する。

2. 研究の目的

本研究の目的は、マイクロからメートルスケールの構造物を対象に、外乱の多い環境でも高精度な変位とひずみ計測を実現すべくモアレ計測技術を確立しようとするものである。これを実現するためには、いかに外乱の多い計測環境で生じる不規則な外乱信号から、本来抽出したい規則模様の位相情報を抽出するかが重要な鍵となる。

ところで、これまでに開発された縞画像の位相解析技術は、大きく分けて2つのアプローチが広く知られている。1つ目に1枚の縞画像のみを用いる空間的な位相解析法(例えば、フーリエ変換法、窓付フーリエ変換法、ウェーブレット変換法やサンプリングモアレ法である。2つ目に複数枚の位相がシフトされた縞画像を連続的に撮影する時間的な位相解析法である位相シフト法(例えば、3ステップや4ステップ、 N ステップ、等速位相シフト法等)と実に100種類以上の計算アルゴリズムが報告されている。ほとんどの研究者は上記の「空間的な位相解析」または「時間的な位相解析」のいずれかを利用しているのが現状である。

そこで、本研究は縞画像の位相解析精度をさらに向上させることを目的に、空間ならびに時間での高次元輝度情報を同時に利用した高精度な位相解析技術である「時空位相シフト法」の開発に取り組む。加えて、マイクロスケールでのひずみ分布計測から大型構造物の変位測定への応用を展開する。

3. 研究の方法

本研究は3年間の期間内で、構造材料の高精度な変位・ひずみ分布測定ができる時空位相解析アルゴリズムの新規開発と、それを実現する計測システムの構築、さらにモアレ法による構造物の変位・ひずみ分布と位相シフトデジタルホログラフィによる材料の変位測定への応用研究を進めた。具体的な応用研究を下記に示す。

(応用1) 室外環境でのインフラ構造物の変位測定

橋梁のたわみ計測や鉄道レールの軌道変位計測など室外天気の影響を受けやすい環境において、開発した計測手法による霧や陽炎などの揺らぎの影響の検証実験を行った。

(応用2) マイクロスケールにおける異種接合材料の加熱/冷却試験中のひずみ分布測定

高温および低温領域での材料の熱ひずみ計測を実施し、品質管理で重要となる熱残留ひずみ分布をより高精度で測定できるようにした。

(応用3) デジタルホログラフィによる透明体の位相分布と3次元温度分布測定

位相シフトデジタルホログラフィによる透明体の位相分布と3次元温度分布測定実験を実施し、それぞれ動的計測ができることを確認した。

なお、本研究課題の役割分担として、初年度の計測手法開発は李と王が主担当し、装置開発は李と夏が主担当した。2年目以降の実用研究において、李が大型構造物の変位計測、王が複合材料の微小ひずみ分布測定、夏はデジタルホログラフィによる変位測定や透明体の位相分布計測に焦点を当ててそれぞれ応用研究を進めた。

4. 研究成果

(1) 高精度な縞画像の位相解析を可能とする時空位相シフト法の開発 (主担当: 李)

本研究は、ランダムノイズや空気揺らぎなどの外乱の多い実験環境でもロバストに全視野変位・ひずみ測定を実現するものである。初年度では開発した時空位相シフト法を初めてレーザー干渉計測に応用して精度の良い干渉縞の位相分布計測が行えたことを確認した (*Journal of Optics*, 2020 に掲載)。とりわけ、レーザー干渉実験で外乱となるレーザ光源の出力の変動 (背景輝度と輝度振幅のばらつきを招く原因となる) や PZT の制御精度または外部振動による位相シフト誤差が原因で従来の位相解析では生じる周期的な位相誤差が時空位相シフト法を用いることで、自動的にセルフキャンセルできることを明らかにした。しかし、この場合は連続的に 4 枚の位相シフトされた縞画像を取得する必要があるため、動的な計測への適用が困難という課題があった。この課題に対して、今年度はさらに偏光カメラを利用した Mach-Zehnder 型の動的位相計測システムを構築した。偏光カメラを用いることで、シングルショットで同時に偏光状態が異なる 4 つの位相シフトされた干渉縞を撮影できる。同計測システムにより、ガス噴射時の透明物体の密度変化分布の測定を実現した。また、従来の位相シフト法に比べて、時空位相シフト法が外乱による周期位相誤差が発生しない理由を、複素数平面でそのメカニズムを解明した。具体的には輝度サチュレーションや非線形性などの外乱が発生しても、時間方向で発生している周期的な位相誤差を空間方向で 1 周期回転させることでキャンセルさせていることを確認できた。外乱が増えると縞画像の輝度振幅の低下となるが、位相誤差は発生しないという極めて優れた位相計算アルゴリズムであることを初めて明らかにした。

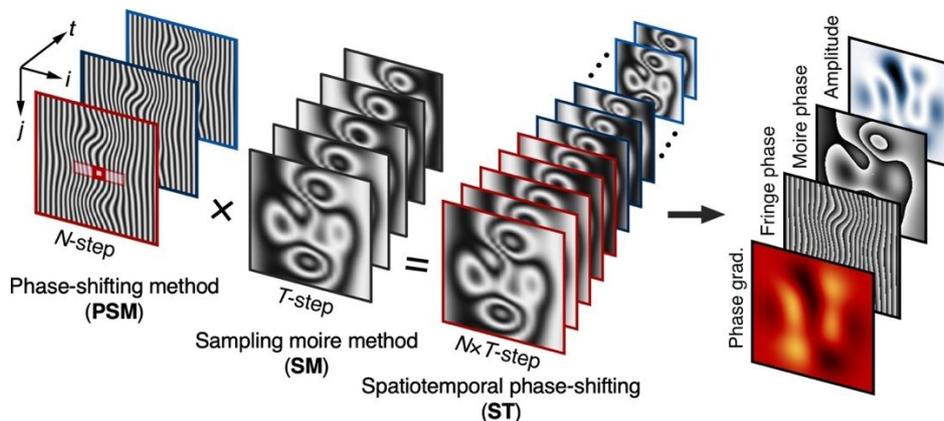


図 1 高次元輝度情報を用いた時空位相シフト法による縞画像の位相解析の概要

次年度ではインフラ構造物の変位測定技術として、物体表面に付与した格子ピッチの変化から単一カメラによる物体の面外変位を計測可能な手法を開発した (*Measurement Science and Technology*, 2021 に掲載)。同手法をさらに改良を行い、単一カメラによる大型構造物の 3 次元剛体変位を計測できる光学的手法を開発した (*Optics and Lasers in Engineering*, 2022 に掲載)。加えて、強風によるカメラの揺れやドローン空撮で記録した動画画像を用いて、高精度に画像ぶれを補正できる技術 (特願 2021-196484) を開発した。

最終年度は 3 つの応用研究を行い、マイクロスケールのひずみ分布計測から大型構造物の変位測定まで応用を展開した。インフラ構造物の変位測定技術として、橋梁の遠方に設置した産業用カメラからの画像撮影により、新幹線が通過するコンクリート橋のたわみ計測に成功した (*Strain*, 2020 に掲載)。空気揺らぎの影響を受けにくい橋の下から画像を撮影し、橋のたわみを計測できる方法を開発した (*Experimental Techniques*, 2022 に掲載)。従来、高精度な測定が困難であった面外変位を見かけ上の面内変位から換算する方法を提案することで、10 メートル離れた撮影場所でも 0.05mm の精度で橋のたわみ値を測定できた。

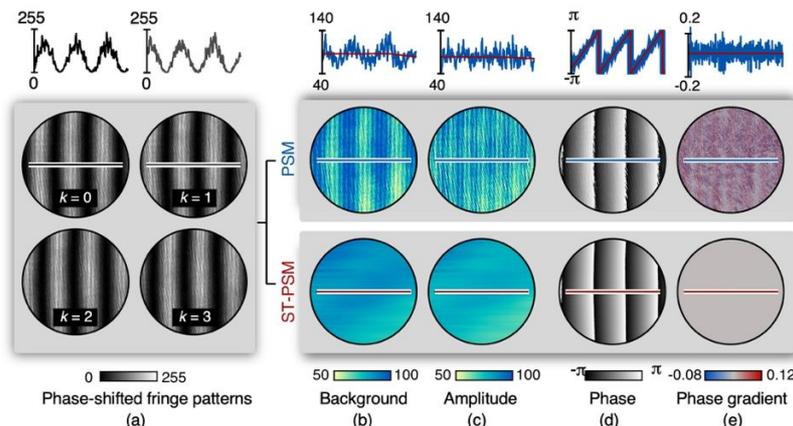


図 2 レーザ干渉の実験結果 (*Journal of Optics*, 22 (2020) 105703, Fig. 13 より抜粋)

(2) 高精度広視野なひずみ計測法の開発と複合材料のひずみ分布計測への応用（主担当：王）

マイクロスケールの異種材料のひずみ分布を測定する目的として、広視野・高精度なひずみ分布計測が可能な空間位相シフト走査モアレ法を開発した（[Applied Optics, 2021](#) に掲載）。また樹脂材料を挿入した CFRP クロスプライ積層板のひずみ分布測定を行った。その際に顕微鏡で観察される一部の CFRP のファイバ模様がノイズとして解析誤差をもたらすこととなるが、その影響を抑えるために、新たに倍増サンプリングモアレ法を開発した（[Optics Letters, 2022](#) に掲載）。これにより、規則格子以外の CFRP の表面にファイバ繊維の模様があっても、妥当なひずみ分布が得られるようになった（[Advanced Composite Materials, 2022](#) に掲載）。同手法をさらに 2 次元へ拡張することで、シリコン単結晶の SEM 像へ応用し、空孔を含む点欠陥を検出することができた（[Nanoscale, 2021](#) に掲載）。加えて、マイクロスケールの材料評価のための変位・ひずみ分布測定として、2 台の実態顕微鏡カメラを導入した 3 次元変位計測法を提案し、そのための計測システムを構築した（[Optics Express, 2022](#) に掲載）。これにより、CFRP 複合材料の 3 点曲げ試験における 3 次元変位と面内ひずみ分布の計測が可能となった。

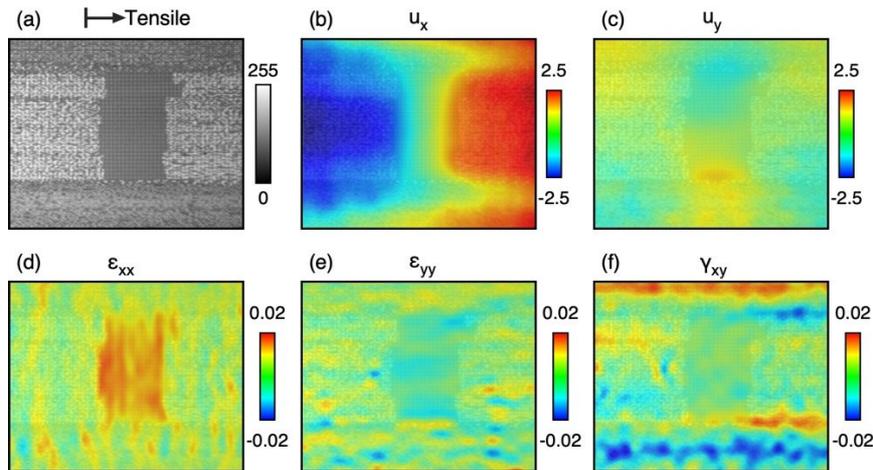


図 3 複合材料の微小ひずみ分布計測

(3) デジタルホログラフィによる透明体の位相分布と温度分布測定への応用（主担当：夏）

自己校正型のランダム位相シフトデジタルホログラフィの計測システムを開発した。空間分割多重技術を利用して、ホログラフィと校正用干渉縞を 1 枚の画像に同時に記録することができる。ランダムに位相シフトした 3 枚のホログラムとそれに対応する干渉縞に対して、サンプリングモアレ法より正確な位相シフト量を算出できる。提案手法の有効性をシミュレーション及び実験より確認できた（[Optics Express, 2020](#) に掲載）。また、レーザー干渉による面外変位測定に関して、デジタルホログラフィによる面外変位を測定できるレンジを広げるために、新たに 2 波長の計測システムを考案・構築し、その有効性を確認できた（[Applied Optics, 2022](#) に掲載）。

デュアル偏光イメージセンサカメラを用いて、デジタルホログラフィによる透明物体の位相分布を異なる撮影角度からの同時記録に成功した（[Optics and Lasers in Engineering, 2021](#) に掲載）。本計測システムによるガス噴射時の計測結果例を図 4(a)に示す。

さらにシングルカメラでマルチ光路のデジタルホログラフィシステムを考案・構築し、多視点記録を行うことで透明体の 3 次元位相分布の測定を実現した（[Optics and Lasers in Engineering, 2023](#) に掲載）。その応用として、図 4(b)に示すように、非対称な温度場計測の実験を通じてその有効性を確認した（[Optics Express, 2022](#) に掲載）。本技術により、空気揺らぎなど目に見えない透明な物体の動的な動きを可視化することに成功した。

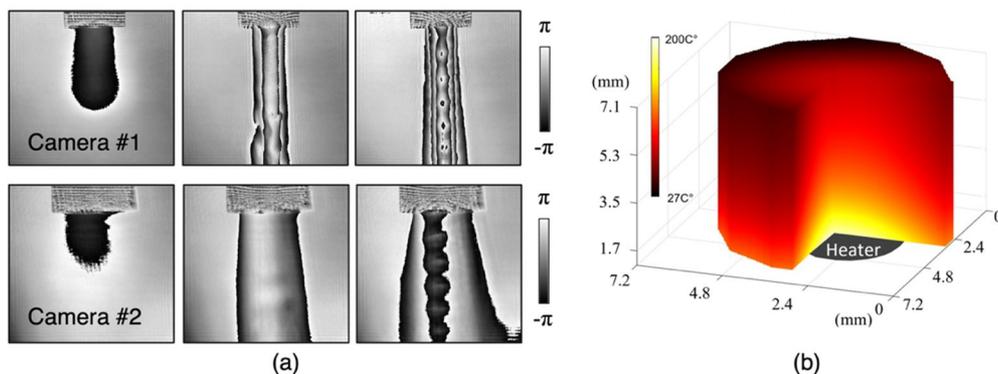


図 4 開発した位相シフトデジタルホログラフィの計測システムによる
(a) 透明体の多視点の位相分布動的計測、(b) 3 次元温度分布の測定

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計29件（うち査読付論文 18件／うち国際共著 1件／うちオープンアクセス 9件）

1. 著者名 S. Ri, Q. Wang, H. Tsuda, H. Shirasaki, K. Kuribayashi	4. 巻 47
2. 論文標題 Deflection Measurement of Bridge Using Images Captured Under the Bridge by Sampling Moire Method	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Experimental Techniques	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s40799-022-00616-y	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Q. Wang, S. Okumura, S. Ri, P. Xia, S. Ogihara	4. 巻 30
2. 論文標題 Stereo sampling moire method for three-dimensional deformation mapping with a stereomicroscope	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 29310-29328
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OE.464574	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 P. Xia, S. Ri, T. Inoue, Y. Awatsuji, O. Matoba	4. 巻 30
2. 論文標題 Three-dimensional dynamic measurement of unstable temperature fields by multi-view single-shot phase-shifting digital holography	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 37760-37768
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OE.472997	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 P. Xia, S. Ri	4. 巻 168
2. 論文標題 Three-dimensional phase measurement of transparent gas by high-speed digital holographic tomography system	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Optics and Lasers in Engineering	6. 最初と最後の頁 107656
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.optlaseng.2023.107656	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 李 志遠	4. 巻 60
2. 論文標題 時空位相シフト法による高精度な非接触三次元形状計測	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 光技術コンタクト	6. 最初と最後の頁 17-25
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 李 志遠, 王 慶華, 津田 浩	4. 巻 21
2. 論文標題 原理からわかる非破壊検査技術とその最前線 (第3回: ひずみ測定の基礎と応用)	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 保全学	6. 最初と最後の頁 24-29
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 李 志遠, 夏 鵬	4. 巻 69
2. 論文標題 時空位相シフト法によるCFRP複合材の非接触反り分布計測 (非破壊検査・センシング関連特集)	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 強化プラスチック	6. 最初と最後の頁 107-112
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 李 志遠, 王 慶華, 夏 鵬	4. 巻 60
2. 論文標題 High-Precision 3D Shape Measurement Using Spatiotemporal Phase-Shifting Method	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Laser & Optoelectronics Progress	6. 最初と最後の頁 0811024 (9 pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Ri Shien, Yoshida Takeshi, Tsuda Hiroshi, Sato Eiichi	4. 巻 148
2. 論文標題 Optical three-dimensional displacement measurement based on moire methodology and its application to space structures	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Optics and Lasers in Engineering	6. 最初と最後の頁 106752, 10pp
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.optlaseng.2021.106752	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Wang Qinghua, Ri Shien, Xia Peng, Ye Jiaying, Toyama Nobuyuki	4. 巻 13
2. 論文標題 Point defect detection and strain mapping in Si single crystal by two-dimensional multiplication moire method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nanoscale	6. 最初と最後の頁 16900-16908
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D1NR04054E	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Fikry Mohammad, Wang Qinghua, Irita Masaru, Ri Shien, Toyama Nobuyuki, Vinogradovd, Vladimir, Ogihara Shinji	4. 巻 31-3
2. 論文標題 Measurement of microscopic strain distributions of CFRP laminates with fiber discontinuities by sampling moire method	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Advanced Composite Materials	6. 最初と最後の頁 273-288
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/09243046.2021.1975208	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Xia Peng, Ri Shien, Wang Qinghua	4. 巻 61-5
2. 論文標題 Dynamic deformation measurement of dual-wavelength arbitrary phase-shifting digital holography with automatic phase-shift detection	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Optics	6. 最初と最後の頁 B103-B110
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/AO.440048	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Wang Qinghua, Ri Shien, Fikry Mohammad, Ogihara Shinji	4. 巻 47-1
2. 論文標題 Multiplication sampling moire method for full-field deformation measurement of composite materials	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Optics Letters	6. 最初と最後の頁 70-73
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OL.445854	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Wang Qinghua, Ri Shien	4. 巻 12
2. 論文標題 Sampling Moire method for full-field deformation measurement: A brief review	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Theoretical & Applied Mechanics Letters	6. 最初と最後の頁 100327. 7pp
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.taml.2022.100327	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 李志遠	4. 巻 71-1
2. 論文標題 縞画像の高精度位相解析技術の開発と応用	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 計測標準と計量管理	6. 最初と最後の頁 40-42
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 李志遠、王慶華	4. 巻 67-9
2. 論文標題 サンプリングモアレ法による複合材の全視野ひずみ計測	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 強化プラスチック	6. 最初と最後の頁 364-369
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 李 志遠、吉田 剛、佐藤 英一	4. 巻 70-10
2. 論文標題 サンプリングモアレ法の大型宇宙構造物検査への適用	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 非破壊検査	6. 最初と最後の頁 432-436
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 王 慶華、李 志遠	4. 巻 65-12
2. 論文標題 サンプリングモアレ法による異種接合材料の残留熱ひずみ分布測定	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 機械設計	6. 最初と最後の頁 45- 50
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 夏 鵬、李 志遠、井上 智好、粟辻 安浩、的場 修	4. 巻 26-11
2. 論文標題 2台の偏光カメラを用いた高速透明気体の3次元動画画像計測技術	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 検査技術	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 李 志遠	4. 巻 70-12,
2. 論文標題 位相シフトデジタルホログラフィ (応力・ひずみ測定部門)	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 非破壊検査	6. 最初と最後の頁 534-541
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 李志遠、王慶華、夏鵬	4. 巻 21-4
2. 論文標題 時空位相シフト法による高精度な縞画像の位相解析技術	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 実験力学	6. 最初と最後の頁 279-286
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Wang Qinghua, Ri Shien, Xia Peng, Liu Zhanwei	4. 巻 129
2. 論文標題 Automatic detection of defect positions including interface dislocations and strain measurement in Ge/Si heterostructure from moire phase processing of TEM image	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optics and Lasers in Engineering	6. 最初と最後の頁 106077 (9pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.optlaseng.2020.106077	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Xia Peng, Wang Qinghua, Ri Shien	4. 巻 28
2. 論文標題 Random phase-shifting digital holography based on a self-calibrated system	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 19988 ~ 19996
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.395819	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Taira Yoshitaka, Fujimoto Masaki, Ri Shien, Hosaka Masahito, Katoh Masahiro	4. 巻 22
2. 論文標題 Measurement of the phase structure of elliptically polarized undulator radiation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 New Journal of Physics	6. 最初と最後の頁 093061 (12pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1367-2630/abb54a	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Ri Shien, Takimoto Taiki, Xia Peng, Wang Qinghua, Tsuda Hiroshi, Ogihara Shinji	4. 巻 22
2. 論文標題 Accurate phase analysis of interferometric fringes by the spatiotemporal phase-shifting method	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Optics	6. 最初と最後の頁 105703 (15pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/2040-8986/abb1d1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Ri S., Wang Q., Tsuda H., Shirasaki H., Kuribayashi K.	4. 巻 56
2. 論文標題 Displacement measurement of concrete bridges by the sampling Moire method based on phase analysis of repeated pattern	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Strain	6. 最初と最後の頁 e12351 (20pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/str.12351	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Wang Qinghua, Ri Shien, Xia Peng	4. 巻 60
2. 論文標題 Wide-view and accurate deformation measurement at microscales by phase extraction of scanning moire pattern with a spatial phase-shifting technique	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Optics	6. 最初と最後の頁 1637 ~ 1645
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/AO.416742	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Xia Peng, Ri Shien, Inoue Tomoyoshi, Awatsuji Yasuhiro, Matoba Osamu	4. 巻 141
2. 論文標題 Dynamic phase measurement of a transparent object by parallel phase-shifting digital holography with dual polarization imaging cameras	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optics and Lasers in Engineering	6. 最初と最後の頁 106583 (5pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.optlaseng.2021.106583	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ri Shien	4. 巻 32
2. 論文標題 Accurate and fast out-of-plane displacement measurement of flat objects using single-camera based on the sampling moire method	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Measurement Science and Technology	6. 最初と最後の頁 035022 (6pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6501/aba647	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計28件 (うち招待講演 7件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 李 志遠
2. 発表標題 位相解析を用いた光学的変位計測技術の開発と橋梁たわみ計測への応用
3. 学会等名 光応用技術シンポ ジウムSenspec2022 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 王 慶華, 李 志遠, フィクリ モハマド, 荻原 慎二
2. 発表標題 複合材料の全視野変形測定のための倍増サンプリングモアレ法の開発
3. 学会等名 日本実験力学会 2022年 度年次講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 李 志遠, 王 慶華, 夏 鵬
2. 発表標題 時空位相シフト法による周期誤差が受けない縞画像の位相解析とそのメカニズム解明
3. 学会等名 日本実験力学会 2022年 度年次講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大内 潤仁, 李 志遠, 王 慶華, 叶 嘉星, フィクリ モハマド, 荻原 慎二
2. 発表標題 スマートフォンを利用したモアレ変位計測法の開発
3. 学会等名 日本実験力学会 2022年 度年次講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 李 志遠
2. 発表標題 規則性模様有位相情報を利用した全視野変位・ひずみ測定とその応用
3. 学会等名 第2回RC294「低炭素 社会実現に向けた電子実装と熱制御に関する研究分科会」(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 李 志遠
2. 発表標題 光(量子)の本当の姿を探る:光の二面性を考える
3. 学会等名 分科会合同ワークショップ2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 李 志遠, 叶 嘉星, 王 慶華, 夏 鵬, 山本 哲也, 遠山 暢之
2. 発表標題 ドローン空撮によるインフラの変位計測技術開発と橋梁検査への応用
3. 学会等名 2022年度計量標準総合センター成果発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 夏 鵬, 李 志遠
2. 発表標題 デジタルホログラフィによる位相物体の3次元動的計測
3. 学会等名 2022年度計量標準総合センター成果発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 王 慶華, 李 志遠
2. 発表標題 3次元微小変形分布計測技術の開発とCFRPの変形分布計測
3. 学会等名 2022年度計量標準総合センター成果発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 李 志遠, 夏 鵬, 王 慶華, 津田 浩, 滝本 大喜, 荻原 慎二
2. 発表標題 時空位相シフト法による高精度な干渉縞画像の位相解析
3. 学会等名 日本実験力学学会2021年度年次講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 滝本 大喜, 李 志遠, 津田 浩, 荻原 慎二
2. 発表標題 時空位相シフト法を用いた位相解析における輝度サチュレーションの影響評価
3. 学会等名 日本実験力学学会2021年度年次講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 王 慶華、李 志遠、榎本 利章
2. 発表標題 フリップチップパッケージ用アンダーフィル剤の全視野残留熱ひずみ測定
3. 学会等名 日本実験力学会2021年度年次講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 李 志遠、王 慶華、津田 浩、白 崎 広和、栗林 健一
2. 発表標題 Displacement measurement of concrete bridges by the sampling moire method
3. 学会等名 15th International Conference on Advances in Experimental Mechanics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 李 志遠、王 慶華
2. 発表標題 モアレ位相解析技術による高精度な全視野変位・ひずみ計測
3. 学会等名 第36回日本整形外科 学会基礎学術集会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 李 志遠
2. 発表標題 ドローン空撮によるインフラ構造物のたわみ計測技術の開発
3. 学会等名 2021年度サステナブルインフ ラ研究ラボ公開セミナー (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 M. J. Mohamad Fikry、王 慶華、入田 賢、李 志遠、Vladimir Vinogradov、荻原 慎二
2. 発表標題 Measurement of microscopic strain distributions of CFRP laminates with fiber discontinuities by sampling moire method
3. 学会等名 46th International Conference and Exposition on Advanced Ceramics and Composites (ICACC2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 李 志遠、叶 嘉星、遠山 暢之、王 慶華、山本 哲也、有隅 仁
2. 発表標題 ドローン空撮によるインフラ構造物のたわみ計測技術の開発
3. 学会等名 2021年度NMIJ成果発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 王 慶華
2. 発表標題 実体顕微鏡を用いた3次元微小変形分布計測の開発
3. 学会等名 2021年度NMIJ成果発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 夏 鵬
2. 発表標題 多波長レーザーを用いた校正型位相シフトデジタルホログラフィの研究開発
3. 学会等名 2021年度NMIJ成果発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 遠山 暢之、李 志遠、神村 明哉、河西 勇二、寺崎 正、小林 健
2. 発表標題 インフラ診断省力化技術研究チームの紹介
3. 学会等名 2021年度NMIJ成果発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 李 志遠、王 慶華
2. 発表標題 最新のモアレ解析技術による全視野変位・ひずみ計測
3. 学会等名 第47回日本臨床バイオメカ ニクス学会 in Nigata (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 李 志遠
2. 発表標題 時空情報を用いた縞画像の高精度位相解析手法の開発とその応用
3. 学会等名 精密工学会北陸信越支部 (福井県)特別講演会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 李 志遠、王 慶華、夏 鵬
2. 発表標題 時空位相シフト法による高精度な縞画像の位相勾配計測技術
3. 学会等名 2020年度計量標準総合センター成果発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 王 慶華、李 志遠
2. 発表標題 結晶欠陥検出とひずみ測定のための画像処理技術の開発
3. 学会等名 2020年度計量標準総合センター成果発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 夏 鵬
2. 発表標題 校正型ランダム位相シフトデジタルホログラフィの研究開発
3. 学会等名 2020年度計量標準総合センター成果発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 李 志遠
2. 発表標題 縞画像利用による計測技術の研究開発（これまでとこれから）
3. 学会等名 全空間画像計測コンソーシアム 第11回総会・第14回セミナー（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 王 慶華、李 志遠
2. 発表標題 光学的手法による微小領域での構造材料のひずみ分布計測
3. 学会等名 日本非破壊検査協会令和2年度第1回 応力・ひずみ測定部門講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 奥村 茂里、王 慶華、李 志遠、津田 浩、荻原 慎二
2. 発表標題 サンプリングモアレ法によるCFRP積層板の三点曲げにおける変位分布計測の有効性の検証
3. 学会等名 日本非破壊検査協会令和2年度第1回 応力・ひずみ測定部門講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 李 志遠、王 慶華	4. 発行年 2021年
2. 出版社 金原出版(株)	5. 総ページ数 6
3. 書名 運動器のバイオメカニクス -Cutting Edge 2021 新しい解析手法と知見	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>編画像の高精度位相解析技術の開発と応用、李志遠、NMIJ研究トピックス(2021) https://unit.aist.go.jp/nmij/public/report/NMIJ_topics/pdf/2021_04_No19.pdf</p> <p>デジタルホログラフィによる3次元動的計測、夏鵬・李志遠・王慶華、NMIJニュースレター(2021) https://unit.aist.go.jp/nmij/public/report/newsletter/pdf/NMIJ_Newsletter_2021_No14_jp.pdf</p> <p>ドローン空撮による橋梁のたわみ計測、李志遠・叶嘉星・遠山暢之、NMIJニュースレター(2022) https://unit.aist.go.jp/nmij/public/report/newsletter/pdf/NMIJ_Newsletter_2022_No15_jp.pdf</p> <p>Researchmap https://researchmap.jp/ri.shien</p> <p>産総研・研究者個人HP https://staff.aist.go.jp/ri-shien/</p>
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	王 慶華 (Wang Qinghua) (20726856)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・主任研究員 (82626)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	夏 鵬 (Xia Peng) (80768458)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・主任研究員 (82626)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関