

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 27 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04171

研究課題名（和文）光学的手法を用いた3次元微小変形分布計測技術の開発

研究課題名（英文）Development of 3D micro-deformation distribution measurement technique using optical methods

研究代表者

王 慶華（Wang, Qinghua）

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

研究者番号：20726856

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：微小領域での三次元変形分布計測は、材料評価への応用で大きな関心を集めている。本研究では、実体顕微鏡を用いた全視野3次元変形計測のための立体視サンプリングモアレ法を開発した。左右の画像平面における位相解析と、ワールド座標系と画像座標系における変位の関係から、試料の3次元変位と面内ひずみ分布を取得することができた。また、格子ピッチの変化を利用して顕微鏡の収れん角を校正する方法を提案した。検証実験の結果、提案手法で測定した面外変位と自動試料ステージの移動量の差が $0.2\mu\text{m}$ 以下であることが確認された。3点曲げ試験における炭素繊維強化プラスチック試験片の微視的な3次元変位と面内ひずみ分布を測定した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の達成によって、ノイズと振動の影響を受けにくいロバストな3次元微小変形分布の高精度計測・解析が可能になった。本研究手法は様々な材料・構造部材の微小領域での損傷挙動評価と破壊メカニズムの解明に役立つ。これにより、信頼性の高いデバイスの設計指針や構造材料の開発に大きく貢献することが期待される。本開発手法は、ナノスケールあるいはミリメートル以上のマルチスケールでの3次元変形分布計測にも拡張することができる。立体視サンプリングモアレ法に基づく異なるスケールでの計測システムが実現できれば、航空、自動車、鉄道、医療などの分野の非破壊評価および構造ヘルスマonitoringにも貢献できる。

研究成果の概要（英文）：Measurement of three-dimensional (3D) deformation distribution in a microscopic area is of great interest for its application to material evaluation. In this study, we developed a 3D sampling moire method for full-field 3D deformation measurement using a stereo microscope. Based on phase analysis in the left and right image planes and the relationship between displacement in the world and image coordinate systems, we were able to obtain 3D displacement and in-plane strain distributions of a test subject. We also proposed a method to calibrate the convergence angle of the stereo microscope using the variation of the grid pitch. Validation experiments confirmed that the difference between the out-of-plane displacement measured by the proposed method and the displacement of the automatic sample stage was less than  $0.2\mu\text{m}$ . Microscopic 3D displacement and in-plane strain distributions of a carbon fiber reinforced plastic specimen were measured in a three-point bending test.

研究分野：実験力学

キーワード：変形計測 材料損傷評価 機械的特性 画像処理 位相解析 ひずみ分布 モアレ法 立体視技術

### 1. 研究開始当初の背景

材料・構造の変形計測は力学的特性、き裂の伝播と進展、残留応力などを評価する上で不可欠である。一般的に材料・構造には内部欠陥や不純物などが含まれており、これらが起点となって微小き裂が発生し、損傷が引き起こされるため、マイクロスケールでの変位・ひずみ計測を通じて、その損傷挙動を把握することが重要である。材料・構造の詳細な解析・評価を行うために、3次元的な微小変形分布計測技術の確立が求められている。

縞投影法やシャドーモアレ法では、3次元形状計測が可能であるが、面内ひずみ分布やマイクロ領域での計測は不可能である。ステレオ式のデジタル画像相関法では、全視野の3次元変形を簡便に計測できるが、一般的な計測範囲はミリオーダー以上である。電子スペックルパターン干渉法やモアレ干渉法では、3次元微小変形の精密計測が原理的には可能であるが、外部振動に非常に敏感であるといった問題点がある。以上のように、マイクロ領域での面内変位・ひずみと面外変位の分布を同時に計測できる3次元計測手法には課題が残されているのが現状である。

### 2. 研究の目的

本研究は、微小格子の位相解析を用いて、マイクロ領域での面内変位・ひずみと面外変位を含む3次元変形分布を簡易かつ高精度に計測するために、新たなステレオサンプリングモアレ法とその計測システムの開発を目的としている。具体的な研究目的は、①3次元微小変形分布計測システムの開発と計測手法の精度検証、②材料の3次元熱変形と力学負荷下の変形分布計測への適用、である。本研究の達成によって、ノイズと振動の影響を受けにくいロバストな3次元微小変形分布の高精度計測・解析が可能になり、様々な材料・構造部材の微小領域での損傷挙動評価と破壊メカニズムの解明に役立つ。これにより、信頼性の高いデバイスの設計指針や構造材料の開発に大きく貢献することが期待される。

### 3. 研究の方法

本研究では、コントラストの良い格子と立体視技術を活用し、二方向から微小格子画像を同時に連続撮影するシステムを開発し、格子画像の位相解析による簡易かつ高精度にマイクロ領域での3次元変形分布を計算できるアルゴリズムを提案した。言い換えれば、マイクロ領域での3次元変形分布の非接触全視野計測の実現を目的として、新たな光学的計測技術であるステレオサンプリングモアレ (Stereo Sampling Moiré, SSM) 法とその計測システムの開発を行った。

具体的には、ステレオカメラを用いて、試料表面に付与した微小格子を二方向から同時に撮影し、座標変換と格子位相解析により面内変位・ひずみおよび面外変位分布の同時計測手法を開発した。SMM法の有効性を実験的に検証した。さらに開発した技術を炭素繊維強化プラスチック (Carbon Fiber Reinforced Plastic, CFRP) の3次元微小変形分布の計測に適用した実証試験を行う。紫外線ナノインプリントリソグラフィによるCFRP断面に15 $\mu\text{m}$ ピッチの格子を作製した。三点曲げにおけるCFRP断面の3次元変位分布及び面内ひずみ分布を測定した。

### 4. 研究成果

#### (1) 3次元変形分布測定のためのステレオサンプリングモアレ法の開発

全視野3次元変形計測のためのステレオサンプリングモアレ法 (SSM法) を提案した。試料格子画像を2方向から撮影し、記録された格子画像から、空間位相シフトアルゴリズムを用いたサ

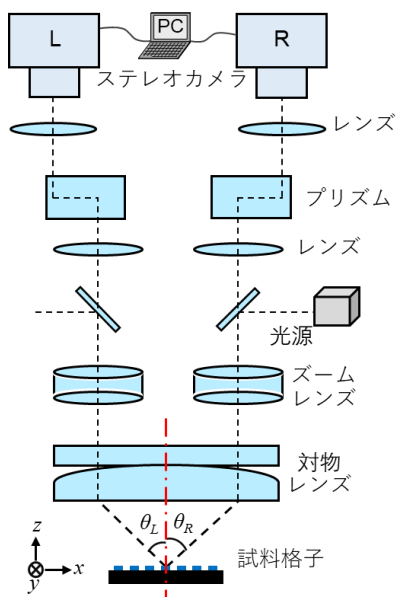


図1 3次元微小変形分布測定システムの光路図

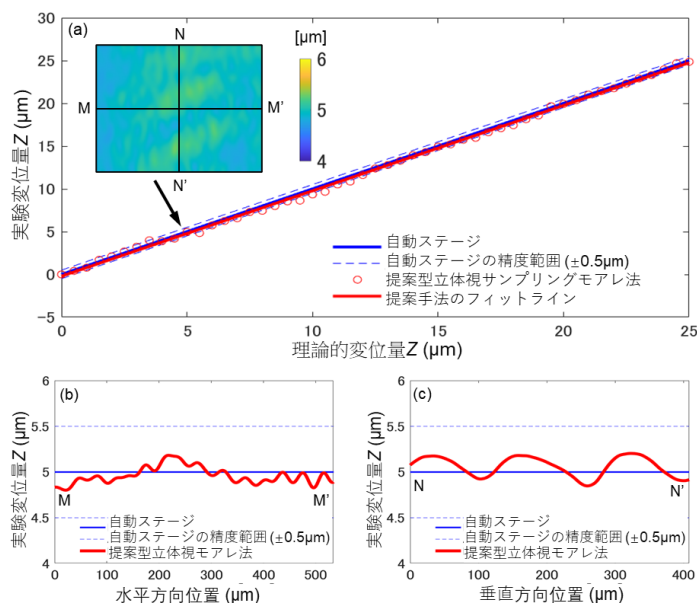


図2 実験的検証結果：(a) 面外変位の比較、(b) (c) Zステップの変位が5 $\mu\text{m}$ の場合MM'とNN'にそれぞれ沿った変位の変化

ンプリングモアレ位相解析により、画像平面上試料格子の変位を得ることができる。ワールド座標と画像座標の変位の幾何学的な関係から、ワールド座標系で3次元変位分布と面内ひずみ分布が測定可能である。

この方法を用いて実体顕微鏡下の変形分布を測定する場合、顕微鏡の左右の収れん角（図1）が必要である。実体顕微鏡内のレンズの組み合わせが複雑なためか、従来のZhangの方法では、実体顕微鏡の収れん角の校正に適さないことが複数の実験により判明していた。そこで本研究では、試料格子ピッチの変化を用いて顕微鏡の収れん角を校正する方法を提案し、校正結果は顕微鏡メーカーが提供する基準値に近いものとなった。

## (2) 開発したSMM法の変形測定精度の実験的検証

顕微鏡の左右の収れん角が等しい場合、面内変位計測の計算式は、実際には従来の左右のカメラの2次元変位計測結果の平均値を取っている。面外変形の影響を無視しても、従来のサンプリングモアレ法およびその派生法を用いて直接測定した面内変位とひずみの精度は実験的に検証されていた。そこで、本研究では、提案手法で測定した面外変位の精度を実験的に検証することを主眼とした。

面外変位計測の実験検証結果を図2に示す。実体顕微鏡の下で、倍率1.5倍の対物レンズと倍率8倍の内蔵ズームの組み合わせで検証実験を行った。Zステージの移動範囲を0.5μm間隔で25μmとし、それぞれの移動量に対してSMM法による面外変位量を算出した。開発方法で測定した試料格子の面外変位は、電動サンプルステージで設定した変位量の精度内に収まっていた。Zステージの変位が5μmの場合、水平線と垂直線に沿った面外変位の測定値は、いずれもZステージの移動精度誤差の範囲内にあり、Zステージの設定値と比較した絶対測定誤差は、いずれも0.2μm以下であることが確認された。図2に示す結果から、面外変位の測定において、提案手法の精度が高いことがわかる。

## (3) 3点曲げにおけるCFRPの3次元微小変形分布測定

本研究で使用した試験片は、 $[\pm 45^\circ]_4$  PAN系CFRP積層板である。50.1 × 11.6 mm<sup>2</sup>の研磨面上に、紫外線ナノインプリント装置（EUN-4200）を用いて、PAK01レジストを用いて15μmピッチの2次元格子を作製した。ガリレオ式実体顕微鏡（ニコンSMZ1270）下で、6軸試料ステージと自作の3点曲げ装置を使ってCFRP試験片に荷重を与えた（図3）。3点曲げの支持スパンは32mmで、スパンと厚さの比は約16だった（図4a）。ローディングヘッドの変位速度は、変位量が5.6mmに達するまで3.2μm/secとした。格子画像記録時の顕微鏡の対物レンズの使用倍率は1.5倍、内蔵ズームの倍率は8倍、左右の平均収れん角はそれぞれ9.8°と8.5°である。図4bは、変形前に顕微鏡の右のカメラで記録された格子画像を示している。

SMM法を用いて、異なるたわみ量における3次元変位分布を測定した結果を図4cに示す。ここで、3次元変位とは、荷重線と変形測定領域の上端点との交点における相対変位である。x方向の相対変位は、荷重線の左側で負、右側で正であり、試験片が長さ方向に引張変形を受けていることを示している。y方向の相対変位は正で、上から下に向かって徐々に大きくなっており、これは試験片が厚さ方向に圧縮変形を受けていることを表している。変形測定領域は3点曲げ試験片の下部にあるため、測定された面内変位は、試験片がx方向に引き伸ばされ、y方向に圧縮されるという理論予測と一致している。

また、3点曲げ荷重を受ける試験片では、y方向の圧縮変形は上部と下部であまり変動しないが、x方向の引張変形は下部に近いほど大きくなる。したがって、体積保存の法則によれば、底面に近いほどz方向の曲面が下向きになる。図4cのz方向の変位の結果は、この解析結果と一致している。さらに、異なるたわみにおけるひずみ分布を測定し、測定されたひずみ特性は、3点曲げ荷重を受けた試験片の変形特性と一致した。

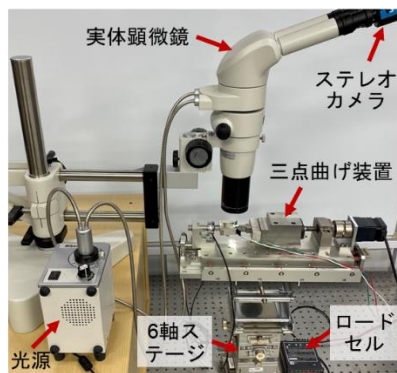


図3 実体顕微鏡と曲げ装置を含む3次元変形分布計測システム

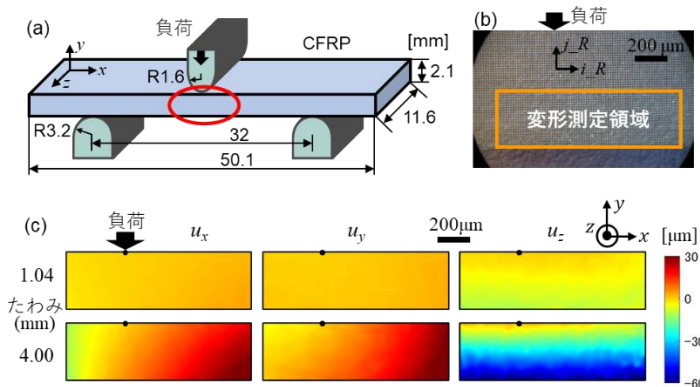


図4 CFRPの変形計測結果：(a) 3点曲げ試験の略図、(b) 実体顕微鏡の右カメラで記録した負荷前の格子画像、(c) 異なる負荷でCFRPの3次元変位分布

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計14件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Wang Qinghua, Ri Shien, Mohammad Fikry M. J., Ogihara Shinji	4. 巻 47
2. 論文標題 Multiplication sampling moire method for full-field deformation measurement of composite materials	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optics Letters	6. 最初と最後の頁 70 ~ 70
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, 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 Zhao Yao, Wu Dongliang, Zhou Jiangfan, Wen Huihui, Liu Zhanwei, Wang Qinghua, Liu Chao	4. 巻 32
2. 論文標題 STEM multiplication nano-moire method with large field of view and high sensitivity	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nanotechnology	6. 最初と最後の頁 475705 ~ 475705
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6528/ac1543	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 Fikry M. J. Mohammad, Wang Qinghua, Irita Masaru, Ri Shien, Toyama Nobuyuki, Vinogradov Vladimir, Ogihara Shinji	4. 巻 31
2. 論文標題 Measurement of microscopic strain distributions of CFRP laminates with fiber discontinuities by sampling moire method	5. 発行年 2021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
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 2021年
3. 雑誌名 Applied Optics	6. 最初と最後の頁 B103 ~ B103
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	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 and Applied Mechanics Letters	6. 最初と最後の頁 100327 ~ 100327
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、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編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 王慶華	4. 巻 21-2
2. 論文標題 目に見えない変形を可視化するのは面白い	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 実験力学	6. 最初と最後の頁 166-167
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 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 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 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 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 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 -

〔学会発表〕 計13件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 3件)

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 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 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 日本実験力学会2021年度年次講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 M. J. Mohammad 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 (国際学会)
4. 発表年 2022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
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuchi Chiang、M. J. Mohammad Fikry、王 慶華、李 志遠、荻原 慎二
2. 発表標題 繊維不連続部を有するCFRP積層板における温度変化による変形評価
3. 学会等名 第13回日本複合材料会議 (国際学会)
4. 発表年 2022年



1. 発表者名 王 慶華、李 志遠
2. 発表標題 サンプリングモアレ法によるチタン合金の全視野ひずみ解析
3. 学会等名 日本鉄鋼協会2022年春季（第183回） 討論会（招待講演）
4. 発表年 2022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 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

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 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編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 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 Niigata (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020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〕

研究成果一覧：非破壊計測研究グループ  
<https://unit.aist.go.jp/rima/ndm/research/>

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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------