



躍動

若手研究者・技術者の取り組みと将来の夢

サンプリングモアレ法による大型構造物の変形計測を通じて光計測の奥義を知る

Entering the World of Optical Measuring Through the Study of Measuring the Displacement of Large-scale Structures Using the Sampling Moire Method

姜 偉
Wei Jiang

福井大学
大学院工学研究科知能システム工学専攻
研究員

この度、鉄鋼協会から研究紹介チャンスを頂き、筆者として誠に光栄に感じています。筆者は2020年福井大学の金属加工専門の博士後期課程を修了し、同年10月に同大学の光計測システム研究室（藤垣元治教授の研究室）に研究員として研究活動を開始し、その時から、光計測の研究に携わることとなりました。これまでの2年半の研究・勉強により、光計測の世界の扉を開いたこととなります。本稿では、その2年半の研究成果と、筆者が光計測について学んだことことを紹介させていただきます。

「光計測」と言っても、幅広い計測方法があり、それら全てを紹介することは不可能であるため、本研究室で主に用いてサンプリングモアレ法^{1,3)}を使用した3次元計測と変位計測の中から、本稿では、サンプリングモアレ法の基本と筆者が研究開発した2種類のサンプリングモアレ法による変位計測手法を紹介する。

1 サンプリングモアレ法の基本

サンプリングモアレ法とは、李ら¹⁾が2010年に開発した位相解析方法であり、その歴史自体はまだ浅い。しかし、サンプリングモアレ法は精度良く計測できると計測装置への敷居が低いため、多くの業界から脚光を浴びている。そのため、応用研究や実用機器の開発は速い速度で進んでいる^{4,7)}。産業界では、すでにサンプリングモアレ法のアルゴリズムを実装したサンプリングモアレカメラが開発され、市販製品として利用されている⁴⁾。

サンプリングモアレ法に使用する装置は簡単である。基本的に格子（黒と白を周期に印刷した板であること）、撮影するカメラと解析用パソコンの3つだけで計測ができる。計測時

には、格子を計測対象物に取り付けて、格子を離れた距離からカメラによって撮影するだけである。撮影した画像に対して、位相解析して、格子・計測対象の変位を求める。図1にサンプリングモアレ法による計測の様子を示す。1方向の格子から、1方向の変位を計測する。サンプリングモアレ法では、2次元格子を2次元の平滑化によって、格子画像の面内2方向の計測ができる。図2は、2次元格子での平滑化と位相解析の

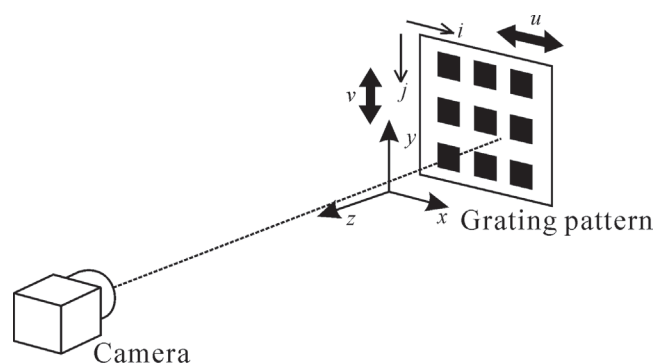


図1 サンプリングモアレ法による計測の様子

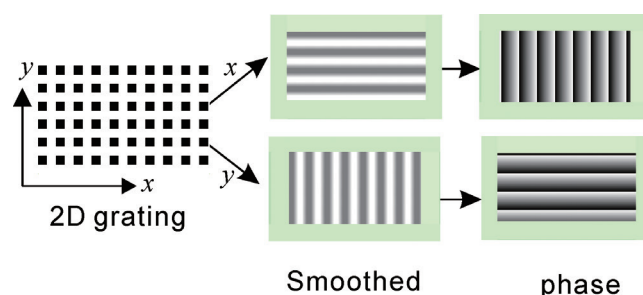


図2 2次元格子に対する平滑化と位相解析 (Online version in color.)

説明の図である。サンプリングモアレ法には、1枚の画像に対して、間引き処理（サンプリング）することで、モアレが発生する。そのモアレを利用して、モアレの位相から元画の位相を求めることが位相計測の原理である。この原理の詳細は、紙面の都合上、割愛するが、詳細は参考文献1を参照して頂きたい。

上述したように、サンプリングモアレ法は原理自体が非常に簡単である。そして、使用した格子のピッチの数100から1000分の1ぐらいの計測精度が得られるために、非常にパワフルな計測手法である。また、それだけではなく、サンプリングモアレ法は使用したカメラの1画素ごとに計測しているために、全視野計測ができる⁸⁻¹⁰⁾。変位の分布からひずみや回転角度や応力などさらに多くの情報が引き出せるのはサンプリングモアレ法が脚光を浴びる原因の1つと考えられる。

2 位相解析光切断法による大型構造物の面外変位計測方法の開発

橋梁などの大型インフラ構造物の変位計測は事故の発生の予防に重大な意味を持つ。そのため、サンプリングモアレ法は、橋梁インフラ構造物の変位計測に比較的早い時期から適用されてきた。ただし、サンプリングモアレ法を使用する場合、格子プレートを橋梁に貼り付ける作業が必要である。また、サンプリングモアレ法は全視野計測ができると言っているが、橋のような数十メートルや数百メートルの細長いインフラ構造物に格子を貼る作業や長い格子を製造することは容易ではない。実際に使用する時には、図3のように、1枚の格子を数ヶ所に貼り付けて計測するのが一般的である。さらに、大型構造物の計測ニーズとしては、面外変位が求められることもある。

2.1 位相解析光切断法手法の提案

サンプリングモアレ法の分布計測の利点を活用するために、筆者らはサンプリングモアレ法の位相解析の原理を光切断法に応用した、位相解析光切断法を提案した¹¹⁾。その方法は、レーザースリット光（長さは数十メートルが可能）の

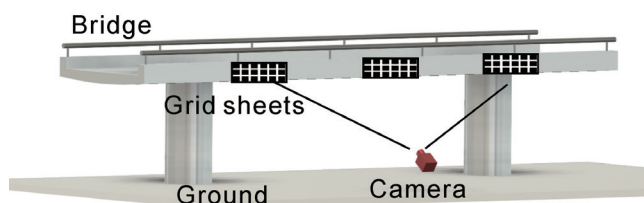


図3 サンプリングモアレ法による橋梁の計測の様子 (Online version in color.)

画像上の移動を利用しているために、大型インフラ構造物の面外変位の計測に最も適している。図4は、回折格子を利用して、カメラ内に複数本の平行なレーザーラインの画像を生成する原理を示している。入射した1本のレーザーラインは回折格子を通過後に、回折して結像することによって、複数本の平行のレーザーラインが投影されているような画像が撮影される。

図5は、位相解析光切断法の変位計測原理を示している。1本のレーザースリット光を計測対象に投射して、撮影カメラの前に細かいロンキールリングを回折格子として置いて、レーザの回折原理により、平行なレーザーラインが生成される。その中心部の明るい3本のレーザーライン（0次と ± 1 次回折光）を用いて位相解析を行う。図5に示すように、計測対象物が面外変位する場合に、画像中ではレーザーラインが変形量に応じて面内移動する。その面内移動は位相差から計測できる。さらに、面外変位は面内移動から換算できる。

2.2 計測結果¹¹⁾

開発した位相解析光切断法で、実際の橋梁での計測を行った。図6は、位相解析光切断法を使用した、高速道路橋の計

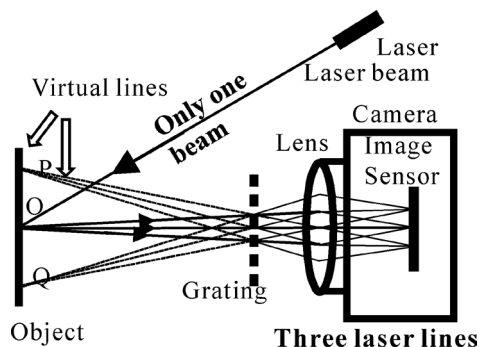


図4 回折現象によってカメラ内で複数本のレーザー線画像を生成する原理

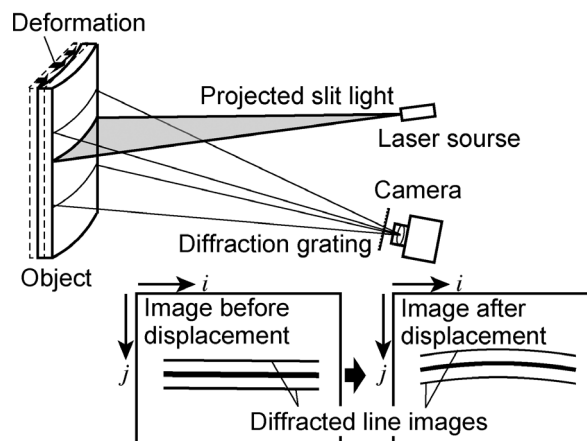


図5 位相解析光切断法の計測原理

測現場の様子を示している。高速道路橋の下にカメラとレーザーを設定した。図7と図8は計測結果を示している。図7は、レーザーライン上の3箇所（画像中に $i=1000, 2000, 3000$ 、橋には、基点から3.0 m、6.0 mと9.0 mの3箇所）の車が通過時の時系列の変位を示している。図7から、9.0 s付近に車が通過したことが分る。図8は、車が通過した過程の高速道路橋のたわみ分布を示している。図8から、橋面の中心部が両端より変位が大きいことが確認できる。

3 キャリブレーションフリーステレオ式サンプリングモアレ法による3次元変位の計測

3.1 キャリブレーション方法

前述のサンプリングモアレ法は面内変位を精度よく計測できる。一方、面外変位については、見かけのひずみを用いて算出する方法もあるが、計測精度はあまり高くない。任意の位置から3次元変位を計測できるために、ステレオ式サンプリングモアレ法が開発された。

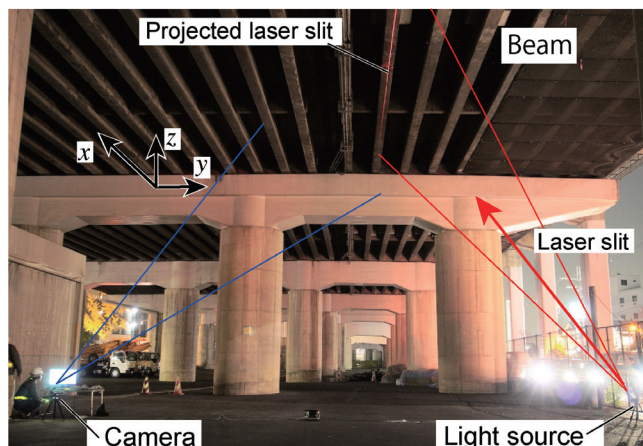


図6 高速道路橋の現場計測様子 (Online version in color.)

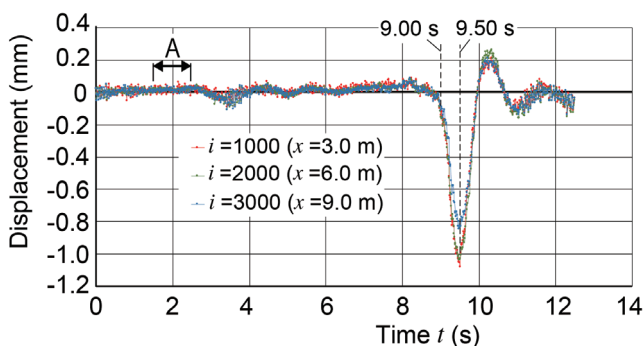


図7 車が通過した時の時系列の変位結果 (Online version in color.)

図9は、ステレオ式サンプリングモアレ法の原理を示している。図9に示すように、対象物の法線方向とは異なる方向に設置されたカメラで撮影した画像においては、3次元変位が発生した場合であっても、格子は面内に変位するのと同様の画像として撮影されることになる。

この時、計測対象が微小に変位する場合を考えると、位相差 $\Delta\phi_x$ と $\Delta\phi_y$ は、それぞれ x, y, z 方向の変位 u, v, w に対して比例すると考えることができる。これは、別の位置に配置したカメラにとっても同様であるため、カメラ1とカメラ2により得られる位相差は、 x, y, z 方向の変位 u, v, w を用いて式 (1) のように書き表すことができる。

$$\begin{bmatrix} \Delta\phi_{1x} \\ \Delta\phi_{1y} \\ \Delta\phi_{2x} \\ \Delta\phi_{2y} \end{bmatrix} = [B] \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (1)$$

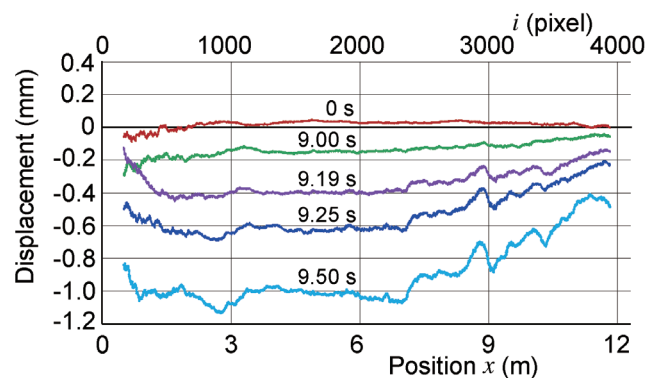


図8 計測した高速道路橋の時系列のたわみ分布 (Online version in color.)

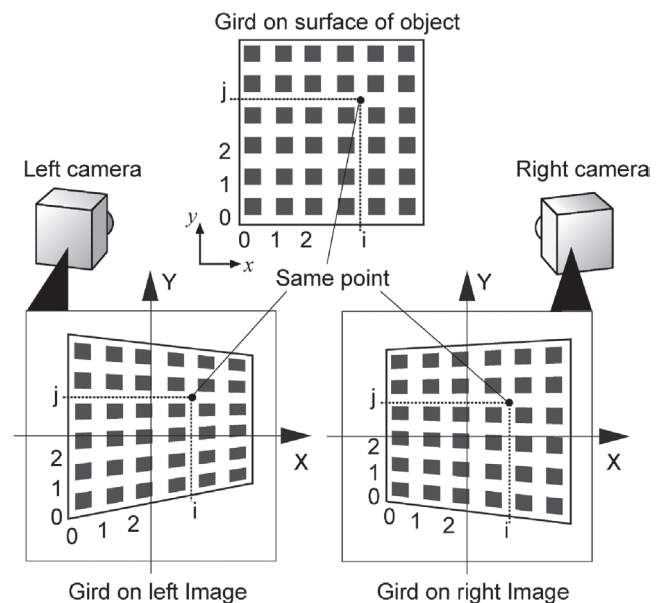


図9 ステレオ式サンプリングモアレ法の原理

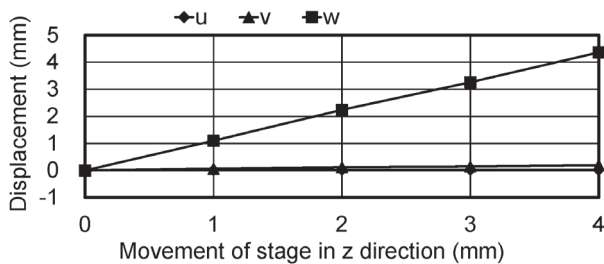
ここで $\Delta\phi_{nx}$ はカメラ n の x 方向の位相差。 $\Delta\phi_{ny}$ はカメラ n の y 方向の位相差を表す。

さらに、式 (1) を変形すると、式 (2) が得られる。式 (2) によると、各カメラで得られた x 方向と y 方向の位相差から x, y, z 方向の変位 u, v, w を求める式が得られる。ここで、行列 A は行列 B の疑似逆行列である。

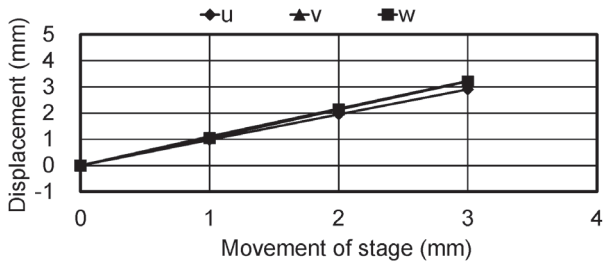
また、この行列 B の各要素は次のようにして求めることができる。行列 B の各要素は位相差と変位間の換算係数であることから、式 (3) が得られる。 p_x と p_y は使用する2次元格子のピッチである。行列 B の第3列目には、格子パネルを面外に既知の量だけ平行移動することで測定した位相差とその変位量から算出する。 w はキャリブレーションの移動量、 $\Delta\phi_{w,1x}$ はカメラ1の x 方向の位相差を示す。

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = [A] \begin{bmatrix} \Delta\phi_{1x} \\ \Delta\phi_{1y} \\ \Delta\phi_{2x} \\ \Delta\phi_{2y} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{2\pi}{p_x} & 0 & \frac{\Delta\phi_{w,1x}}{w} \\ 0 & \frac{2\pi}{p_y} & \frac{\Delta\phi_{w,1y}}{w} \\ \frac{2\pi}{p_x} & 0 & \frac{\Delta\phi_{w,2x}}{w} \\ 0 & \frac{2\pi}{p_y} & \frac{\Delta\phi_{w,2y}}{w} \end{bmatrix} \quad (3)$$



(a) z 方向のみ移動、変位量 $w = 0, 1, 2, 3, 4$ mm



(b) 3次元変位する。変位量 uvw とも1, 2, 3 mm

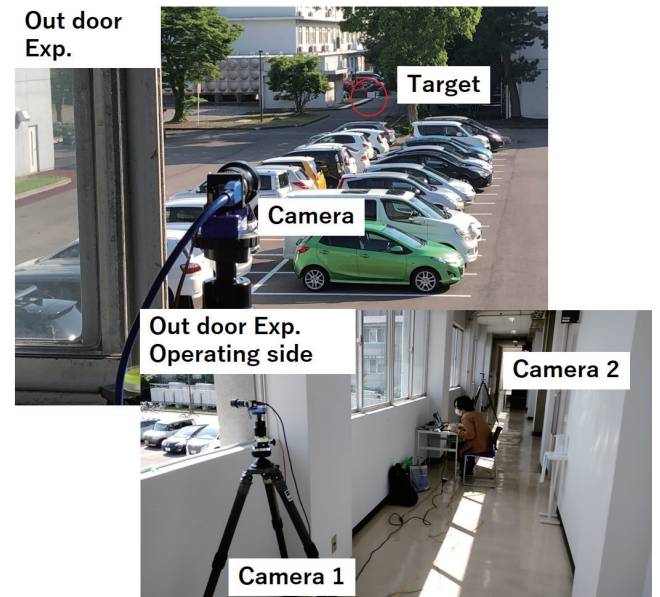
図10 室内実験の3次元変位の計測結果

3.2 キャリブレーション不要なステレオ式¹²⁾

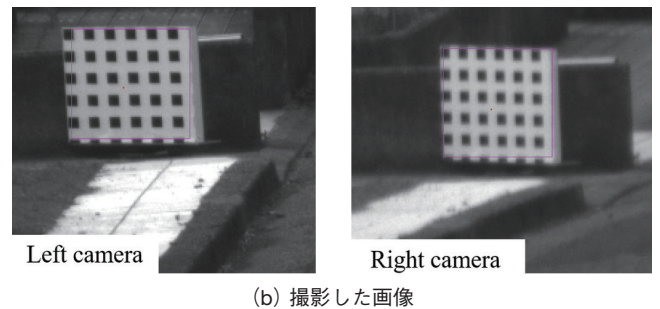
上述のステレオ式サンプリングモアレ法は、3次元変位を計測ができるが、キャリブレーションが必要である。しかし、遠距離でインフラ構造の計測する場合には、カメラの移動や計測対象物の移動は難しい。そのため、キャリブレーションフリーな計測手法が求められる。

上述のステレオサンプリングモアレ法の計測原理に基づいて、著者らはキャリブレーションフリーな計測方法を開発した。その原理について紹介する。カメラの光軸と格子の法線方向のベクトルが平行ではない場合、カメラが撮影した格子画像では、 i 方向と j 方向に縮んだり傾いたりすることになる。画像から、その縮む量と傾むく量を算出して、格子法線ベクトルとカメラの光軸の空間角度を算出することができる。続いて、算出した角度で、空間位置上で変位 w が発生した時の位相差を理論的に求めることができる。ここから前述のキャリブレーションと同様に行列 B を求める。

このキャリブレーションフリーな方法で、室内実験及び100メートル程度離れた遠距離実験を行った。室内実験では、



(a) 実験様子



(b) 撮影した画像

図11 遠距離3次元変位の計測の様子と撮影された格子画像 (Online version in color.)

格子を2カメラの繋線から3.2 mを離れた所に設定した。格子ピッチは10 mmにした。格子を x, y, z に動けるステージに乗せて、ステージを移動して、カメラから3次元変位計測する。図10は、室内実験で計測した3次元変位の結果を示している。図10から、1軸のみ変位した場合と3軸同時に変位する場合にも提案方法は精度良く変位を計測した。

図11 (a) は、100 mの遠距離の計測実験の様子を示している。図11 (b) は実際に撮影された格子画像を示している。図12は図11に示した遠距離3次元変位計測の配置を示している。格子ピッチは142 mm $\times$ 100 mmのサイズを使用した。100 mmの焦点距離レンズと2 $\times$ のエクステンダーを使用した。室外実験では、格子を z 方向に10, 20, 30, 40 mmずつ移動した。図13は、室外実験での計測結果を示す。 x 方向と y 方向の変位 u と v の結果はほぼ0 mmで、 z 方向の変位 w はステージに与えた変位とほぼ同じ変位になった。与えた変位が40 mmの時の誤差は6.1 mmであった。

この方法の計測精度は、求めた角度に依存しているため、角度の測定精度を高めると、変位の計測精度も向上すると想定している。

4 サンプリングモアレの発展の余地

サンプリングモアレ法は高速・高精度に変位を測ることができる方法である。そして、時間方向と空間方向の変位分布を測ることができる。そのため、変位以外の物理量の計測も

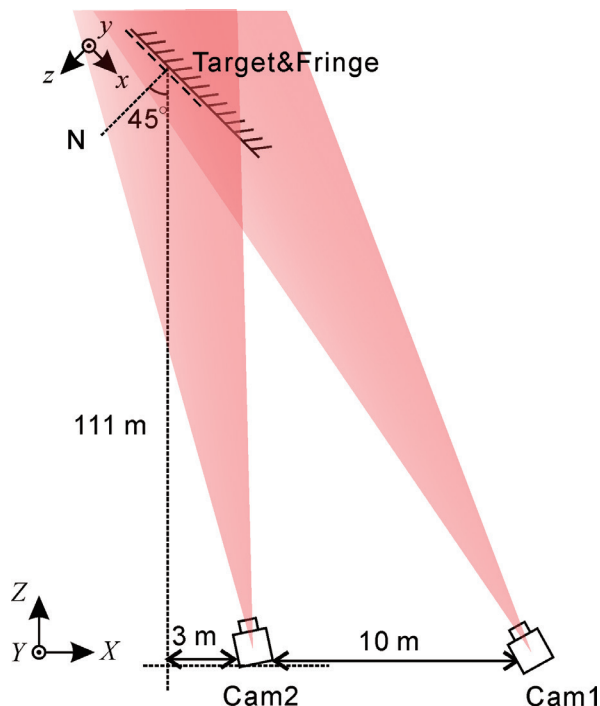


図12 遠距離3次元変位計測実験の配置 (Online version in color.)

することができる。例えば、サンプリングモアレ法が一番よく応用されている構造物の変位計測において、時間方向の変位から、物の振動周波数を測ることができる。また、空間方向の変位分布から、ひずみと回転角度も測ることができる。そして、これらの計測はすべて分布として、計測できる。

時間方向と空間方向のデータだけではなく、さらに、距離と他の物理量を連携させて、サンプリングモアレ法は様々な物理量の計測まで拡張できると考えられる。図14は、国際単位系 (SI) の7つの基本単位の関係を示している。図14に示すように、長さの単位 (m) は他の単位と密な関係がある。サンプリングモアレ法で計測した変位量ともう1つ物理量の連携で、今まで計測されていない量を求めることができると考えられる。例えば、変位とヤング率の組み合わせで、応力の計測ができる。また、ひずみと時間の組み合わせで、ひずみ速度を測ることができる。また、別の例として、変位と膨張係数の組み合わせで温度を測ることもできる。

上述のように、現在サンプリングモアレは主に変位計測の分野に使われたが、他の物理量と連携することで、様々な物理量の計測に適用することができると考えられる。

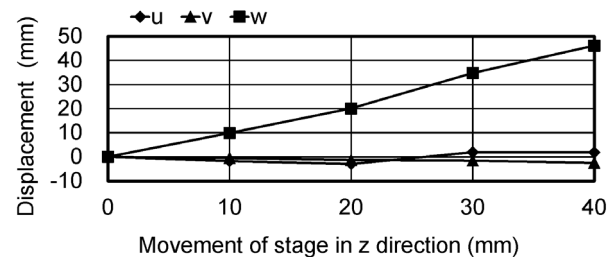


図13 遠距離3次元変位計測の結果

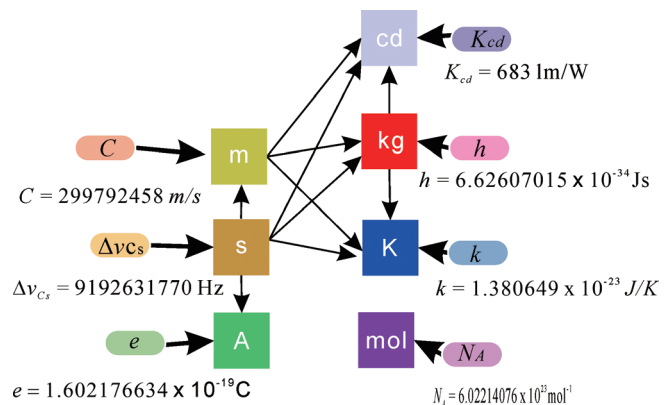


図14 基本国際単位の関係 (Online version in color.)

5 まとめ

本稿ではインフラ構造物の面外変位の計測を目的にしたレーザー回折を使用するサンプリングモアレ法と遠距離での大型構造物三次元変位計測を目的にしたキャリブレーションフリーのステレオサンプリングモアレ法の2種類の研究事例を紹介した。また、サンプリングモアレ法の特徴とこれからの展望についても簡単に記した。サンプリングモアレ法は非常に低コストかつ高い能力を秘めた計測方法で、非接触な光計測の中でもポテンシャルが大きい手法と考えられる。その基本原理は簡単であり、時間方向と空間方向などの拡張の応用によって、さらに様々な計測ができることを期待している。

謝辞

私はもともと金属加工の卒業生でしたが、偶然にも藤垣教授の光学測定研究室に所属しました。その時点では光計測についてはまったく初心者であった私に藤垣教授は忍耐強く光計測の知識を教えてくださいました。学習中に疑問点があると、先生はとても熱心に基本原理から私に説明してくださいました。研究室の7階と教授のオフィスの8階には、いつでも授業ができるホワイトボードがあり、先生はそのホワイトボードを使って、いつでもどこでも私に教えてくださいました。この場を借りて、藤垣教授に深く感謝を申し上げます。

また、レーザー回折サンプリングモアレ法の研究には、NEXCO西日本イノベーションズ(株)の内田様らに手厚くサポートいただいたこともあり、開発した手法で実際の橋梁の計測ができました。この場を借りて、内田様らに感謝申し上げます。

参考文献

- 1) S.Ri, M.Fujigaki and Y.Morimoto : Exp. Mech., 50 (2010), 501.
- 2) 森本吉春, 藤垣元治, 梶谷明大 : J. Vac. Soc. Jpn., 54 (2011), 32.
- 3) 藤垣元治 : 溶接学会誌, 84 (2015), 90.
- 4) S.Ri, H.Tsuda, K.Chang, S.Hsu, F.Lo and T.Lee : Exp. Tech., 44 (2020), 313.
- 5) 藤垣元治, 中嶋友朗 : 鉄と鋼, 106 (2020), 71.
- 6) M.Fujigaki, Y.Masaya, H.Kondo, M.Nakabo, T.Hara, Y.Morimoto, D.Asai, T.Miyagi and N.Kurokawa : Appl. Mech. Mater., 83 (2011), 48.
- 7) 栗林賢一, 大久保洵, 松本理佐, 服部篤史, 木村元哉, 藤垣元治, 河野宏隆 : 実験力学, 18 (2018), 18.
- 8) 藤垣元治 : システム/制御/情報, 48 (2004), 495.
- 9) Q.Wang and S.Ri : Theor. Appl. Mech Lett., 12 (2022), 100327.
- 10) Q.Wang, S.Ri, H.Tsuda and M.Koyama : Opt. Lasers Eng., 110 (2018), 155.
- 11) W.Jiang, M.Fujigaki, Y.Uchida and S.Funaki : Opt. Lasers Eng., 151 (2022), 106891.
- 12) W.Jiang, Y.Wang, 田村葵, 藤垣元治 : 材料とプロセス, 35 (2022), 353, CD-ROM.

(2023年5月10日受付)

先輩研究者・技術者からのエール

広島大学 大学院先進理工学系科学研究科 助教

島崎 航平

カメラの光計測を活かしたサンプリングモアレ法に関する姜さんの研究の進展に心からのエールを送ります。私が姜さんに初めて出会ったのは、2022年の10月のアンローダークレーンの実験の時でした。その頃から、知的好奇心が旺盛で、精力的に機材や実験設定などの情報を収集し、努力を惜しまない姿勢で研究及び実験に取り組んでいました。金属材料の加工の出自から短い期間で光計測の研究で博士課程を修了され、新しい計測方法の提案など、複雑な計測原理を完全に理解されており、大変驚きました。そして、今ではこの分野の第一人者としてご活躍されていることを知り、私も一緒に計測実験で活動させていただいたことを誇りに思います。

私は2015年から広島大学石井先生のスマートロボティクス研究室に加わり、センシング技術を自分の技術とすべく長い期間をかけて自己研鑽に励んで参りました。私はミラー駆動型高速アクティブビジョンによるパノラマ振動イメージング技術を中心に取り組み、1か所に設置したカメラの視野を高解像度かつ広範囲、高速に切り替えてセンシングすることで、時間空間稠密な振動分布を捉えることにより、製鉄所の大規模かつ長距離に張り巡らされたコンベアやアンローダーをはじめとする原料搬送移動機でのトラブルを早期発見し、製鉄所全体の工程に影響を及ぼさないようにすることを一つの目標

としています。カメラ計測技術は人間の視覚情報と整合性が高く、位置情報やその異常現象を解析できる長所があり、設備異常監視と相性がよく、効率を大きく改善できることが期待されます。これからも姜さんと一緒にインフラ構造物の変位や振動等のダイナミクス計測に関する光計測の研究を続けていき、当分野のさらなる課題解決につなげていきたいです。

今回のサンプリングモアレ法による大型構造物の3次元変形計測の研究は、福井大学の藤垣先生を中心として、姜さんがこれまで積み上げてきた研究成果の集大成であり、新たな展開が期待されています。また、姜さんの研究が鉄鋼業界に新たなインパクトを与え、橋梁計測などの他の産業にも多大な影響を与えることと思います。研究者としての道は決して平坦ではありませんが、姜さんのような勉強熱心で情熱的な人が挑戦し続けることで、新たな発見や技術が生まれることと思います。これからも、姜さんの研究に対する情熱を大切に、未来への道を切り開いていってください。

最後に、これからも姜さんの研究活動がますます充実し、人間面でもさらなる成長を遂げることを祈念し、エールを送ります。藤垣先生と共に様々な技術実装の困難にも立ち向かい、勇敢に挑戦し続ける姜さんを心から応援しています。頑張ってください、姜さん！

JFEスチール(株)スチール研究所 主任研究員

梅垣 嘉之

姜さんと初めてお会いしたのは、昨年(2022年)の鉄鋼協会の研究会活動として行った弊社JFE西日本製鉄所福山地区でのフィールド試験でした。本フィールド試験では、製鉄所内の大型設備の診断への応用を目的として、稼働中設備の振動や歪みの計測を姜さんたちが開発したサンプリングモアレ法でトライしました。私たちJFEでは試験場所や試験日程の調整と設備への格子パタンの貼り付けという形で、姜さんたちの計測試験をサポートさせていただきました。慣れない環境ではあったと思いますが、姜さんが熱心に撮影機材のセッティングと計測ソフトのパラメータ調整などをされていたことが印象に残っています。また、研究会でのご報告をお聞きしておりまして、ご自身の研究に情熱をもって取り組まれている姿勢が伝わってきました。

サンプリングモアレ法につきましては、大型設備産業である鉄鋼業には大変魅力的な手法だと考えております。製鉄所内の大型設備、構造物の多くは、容易にアクセスしたり自由に動かしたりはできません。そのため、数十～百メートル離れたところから構造物の変位を遠隔で精密に3次元計測できる同手法は非常に有用だと思

ますし、キャリブレーションフリーとする姜さんたちのアイデアは、実用におけるニーズを的確に捉えていて、とても評価できます。

さて、フィールド試験でのエピソードを紹介すると、実のところ最初の試験はうまくいきませんでした。当日は設備の稼働状況が芳しくなく、昼間にカメラをセッティングしてもすぐには撮影が行えず、夕方、あたりが暗くなり始めてからようやく設備が稼働しはじめて、撮影ができたという状況でした。そのため撮影した画像が暗すぎて計測に使用できなかったというのが失敗要因の一つでした。良い試験環境をご提供できなかった点は大変申し訳なく思っておりますが、一方で、計測技術は実際の現場・環境で使えてこそ意味があると思います。その意味で今回のフィールド試験での経験は失敗も含めて姜さんにとって大変意義のあるものであったのではないかと思います。

姜さんは計測手法の応用発展については大変興味深いビジョンをお持ちですので、是非ともそれらの実用化を目指して、これからの研究活動を進めていただければと思います。今後のご活躍を期待しております。