

A02 計測対象表面に二次元格子を貼り付けた表面形状相対変位計測

伊藤良磨 (室蘭工大(院)), 樋口健 (室蘭工大), 勝又暢久 (室蘭工大),
岩佐貴史 (鳥取大), 岸本直子 (摂南大), 藤垣元治 (福井大)

Ryoma Ito (Muroran I.T.), Ken Higuchi (Muroran I.T.), Nobuhisa Katsumata (Muroran I.T.)
Takashi Iwasa (Tottori Univ.), Naoko Kishimoto (Setsunan Univ.), Motoharu Fujigaki (Univ.of Fukui)

Abstract: Two-camera Grating Projection Method is a concise way to measure the total surface shape of large space structures rapidly without contacting. If the measuring set-up is portable, this method becomes more convenient. The usual conventional method needs reference planes and needs to project the grating from a projector. This paper investigates the deformation measuring accuracy of pasting two-dimensional grating using sampling moire method that needs neither a projector nor reference planes. As a result, the method can measure the deformation of surface shape and the distortion with high accuracy by using the object itself as a reference surface before deformation.

Keywords: Two-camera Grating Projection Method, Non-contact surface shape measurement, Deformation measurement

1. 背景と目的

宇宙空間で使用される大型展開構造物はコンパクトに折りたたまれ、打ち上げられた後に軌道上で展開・伸展させて使用する。そのため展開中・展開後の表面形状を簡単かつ高精度に把握できる計測技術が必要である。格子投影法は、表面形状を面として計測できるため、点としての位置情報しか得られない既存の計測手法よりも面計測時間を大幅に短縮することが可能となる^{[1][2][3]}。本研究では格子投影法2カメラ法による相対変位計測において、従来計測で使用していた一次元格子の投影ではなく^[4]、二次元格子を使用して、表面形状計測を行う^{[5][6][7]}。計測対象物に平面と曲面を用いた計測を行い、計測対象物によらずに計測が行えるか探ることを目的とする。表面形状計測を高精度に行った後、既知のひずみを生じさせた格子上で、ひずみ計測も行い、計測対象物への二次元格子貼付における変形計測精度を確認する。機器構成が簡便で高速高精度に表面形状計測や表面変形計測ができる特徴を生かして、可搬型の計測装置を製作しハードウェアとソフトウェアの構成の使い勝手や計測精度の評価を経ることにより、気球や人工衛星搭載型の変形形状計測装置を開発することへと結びつけることを最終的な目標としている。

2. 理論と手法

2.1 格子投影法2カメラ法の相対変位計測原理

格子投影法2カメラ法の相対変位計測は、計測対象物を基準面として設置し、2枚の基準面間に空間座標系を形成した後で、この空間座標系における計測対象物の表面形状計測を行なう。図1に示すように間隔をあけてカメラ2台を配置し、図2に示す原理で計測対象物上の点Sの三次元座標を算出する。図1,2で、プロジェクタから基準面に正弦波格子を投影する代わりに、まずは平面を計測対象としてプラズマディスプレイを基準面とし正弦波格子を表示させ、プロジェクタは使用しない。基準面上の格子間隔が既知であるので、位相接続をすることにより、座標原点からのx方向、y方向の座標値が定まる。z方向は一軸スライダの移動距離が基準面間隔に対応している。まず基準面1の位置で、縦・横格子を基準面上に表示させ、2つのカメラ(Camera L, Camera R)で撮影する。次に、この基準面を面に垂直方向に基準面2の位置に移動させ、基準面1と同じ要領で縦・横格子を撮影する。最後に、基準面を取り除いた状態で、2つの基準面間に計測対象物を置き、縦・横格子を表示した状態で2つのカメラで撮影する。図2の原理図に示すように、計測対象物表面のある点Sを左カメラがとらえている時、カメラの視線が基準面1上でぶつかる点 C_{L1} と基準面2上でぶつかる点 C_{L2} のx,y,z座標値が得られるので、左カメラの視線の式Lが求まる。右カメラの視線からも同様に、基準面1上の点 C_{R1} および基準面2上の点 C_{R2} のx,y,z座標値が得られるので右カメラの視線の式Rが求まる。2つの視線L,Rの式が交わる点が点Sのx,y,z座標値として求められる。この点Sは計測対象物上に多数存在し、この集合として表面形状が求まる。

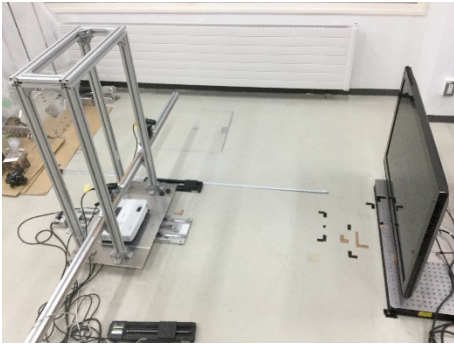


図1 実験装置

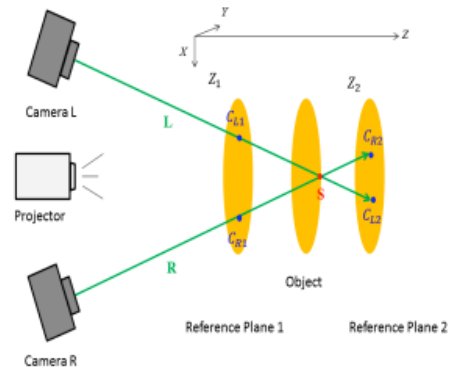


図2 格子投影法2カメラ法の相対変位計測原理図

2.2 2種類の位相接続法

格子投影法2カメラ法の相対変位計測においては、2種類の位相接続の手法がある^[4]。位相シフト法ではプロジェクタあるいはプラズマディスプレイで表示した一次元格子を、縦方向および横方向に一定の周期でシフトさせ画像を取得することを繰り返し、位相接続を行う。サンプリングモアレ法では、プラズマディスプレイに表示あるいは計測対象物そのものに貼付した二次元格子を、1枚の画像から一定の間隔で間引きおよび平滑化を行うことによって、位相接続を行う。

従来の位相シフト法を用いた相対変位計測では、宇宙空間での使用を想定する際は、プロジェクタ光を計測対象物に当てた上で、カメラを使用し画像を取得することにより、空間座標系の形成および計測対象物の形状計測をしている。しかし、サンプリングモアレ法を用いた相対変位計測であれば、計測対象物に二次元格子の模様が表示されているなら、2つの基準面を構築するだけで、プロジェクタを使わず、かつ1枚の画像取得だけで相対変位計測を行うことが可能である。

3. 結果と考察

3.1 実験条件

3.1.1 相対変位計測の実験条件

計測対象物は曲面や区分的傾斜面である場合が多いため、本研究では回転対称曲面を計測対象に相対変位計測を行ない、サンプリングモアレ法を用いた位相接続による表面形状計測の計測精度への影響を探る。二次元格子の表示方法として、図3左に示す平面の供試体には、ディスプレイに表示することにより、図3右に示す回転対称曲面の供試体にはA4サイズの二次元格子シールを貼り付けることにより、相対変位計測を行った。

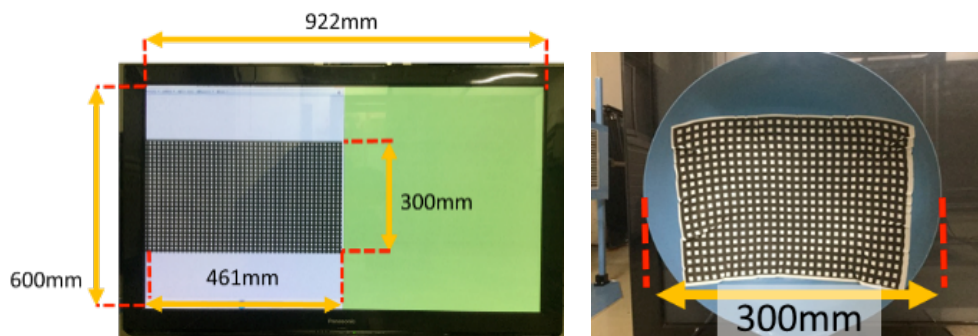


図3 平面供試体および回転対称供試体

3.1.2 表面性状の違いによる格子間隔の決定

ディスプレイ表示は、表示格子の条件変更が容易なため、細かく条件を変えた計測はディスプレイ表示を用いることが好ましい。そこで、ディスプレイ表示とシール貼り付けの表面性状の違いによる計測精度に大きな違いが生じないことを実験により検証した(図4,5)。

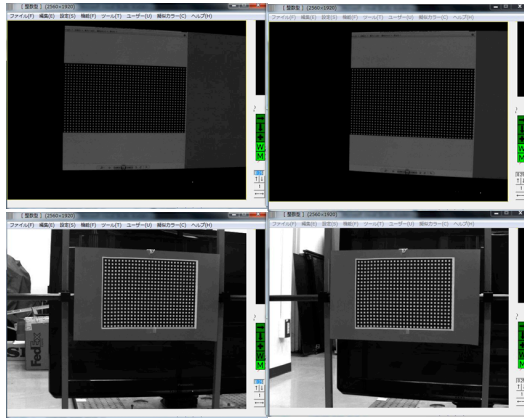


図4 表面性状の違いによるカメラの見え方
(左列: 左カメラ, 右列: 右カメラ)

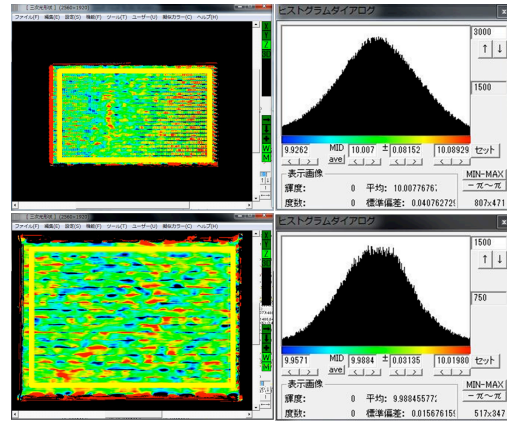


図5 計測結果(左列) および平均距離分布(右列)
(上段: ディスプレイ表示, 下段: シール貼り付け)

図4の左図に左カメラの視野を, 右図に右カメラの視野を示す. 計測領域の大きさは, ディスプレイ表示が横461mm縦300mm(図3左), シール貼り付けが横297mm縦210mm(A4布シール)である. 表示した二次元格子間隔は縦横10mmに統一している. 計測条件を表1に示す.

表1 相対変位計測条件

計測条件	
カメラ間距離	約600mm
地上基準のカメラ高さ	約500mm
カメラ-基準面1間距離	約1100mm
基準面間距離	10mm
基準面1からの計測対象物位置	5mm

図5左列の計測結果の色は, 各画素の基準面1からの距離を示している. 右列は左列の黄色枠で囲まれた範囲の画素の距離分布を示している. この実験における真値が10mmであるため, 画素の距離分布の平均を参照すると, ディスプレイ表示では誤差が $8\mu\text{m}$ であり, シール貼り付けでは誤差が $12\mu\text{m}$ であったため, 表示方法によらず高精度の計測が行えると判断した.

3.1.3 回転対称曲面の計測条件

回転対称曲面の計測を行う前段階として, 平面供試体に二次元格子を表示させ, 相対変位計測が高精度に行える格子間隔を求めるための計測実験を行った. 平面供試体には8mmから12mmまでの格子間隔を1mmずつ変更させ表示し, 計測した. 実験の計測系配置を図6, 7に, 計測条件は表1と同一である. 平面供試体と回転対称供試体の計測対象物の違いによる計測条件の違いはない. その結果, 回転対称供試体には二次元格子シールの格子間隔を10mmで印刷したシールを貼り付けることとした.

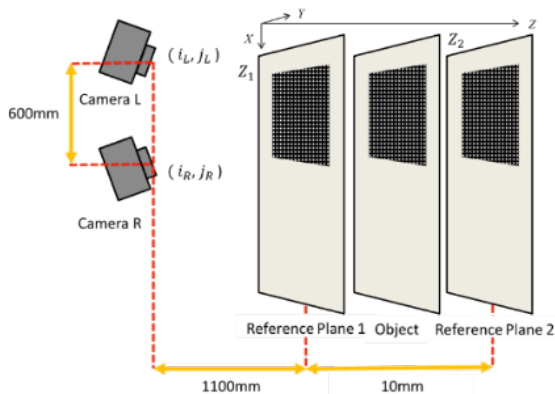


図6 平面供試体相対変位計測実験配置図

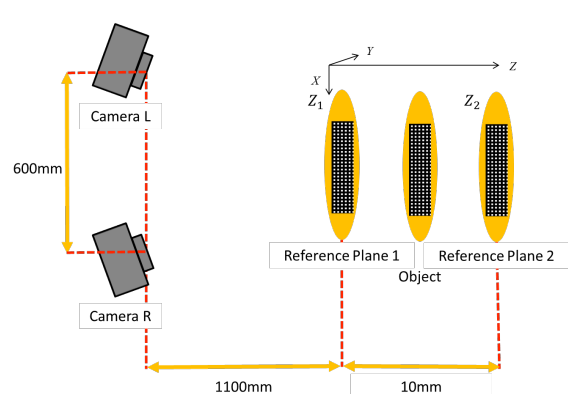


図7 回転対称曲面相対変位計測実験配置図

3.2 相対変位計測結果

3.2.1 平面供試体の計測結果

図8,9に距離の真値が5mmであるディスプレイ表示（横461mm 縦300mm）の5回の計測の結果を示す。図中の①から⑤は実験を行った順番を示している。5回の平均距離計測結果を平均したものを、相対変位計測結果として表2に示す。

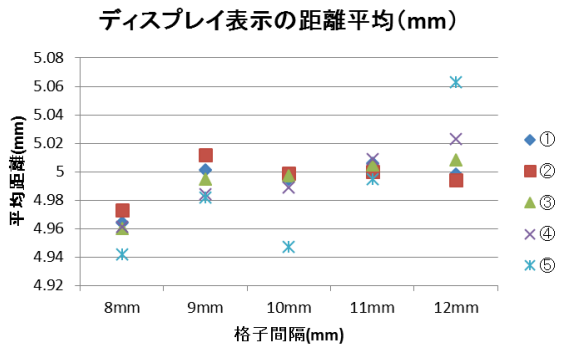


図8 ディスプレイ表示の距離平均

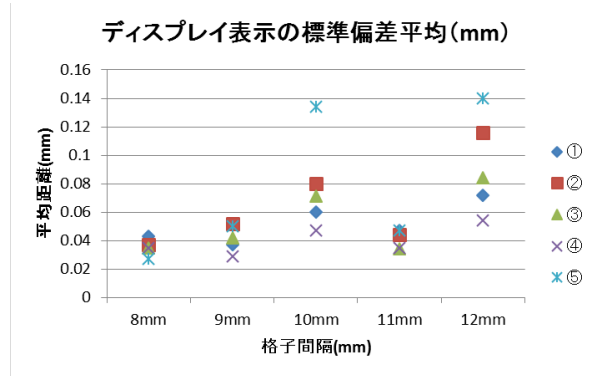


図9 ディスプレイ表示の標準偏差

表2 平面供試体の格子表示ピッチごとの相対変位計測結果

2次元格子間隔	平均距離 (mm)	真値からの差 (mm)	標準偏差 (mm)
8mm	4.960	-0.040	0.035
9mm	4.995	-0.005	0.042
10mm	4.985	-0.015	0.078
11mm	5.003	0.003	0.041
12mm	5.017	0.017	0.093

表2より、相対変位計測結果は10mm前後の格子間隔を表示した相対変位計測において、真値からのズレが40 μ m以内に収まっており、平面供試体を用いた相対変位計測は高精度に計測が行えることが確認された。

3.2.2 回転対称曲面の計測結果

次に、回転対称曲面の計測結果を表3に示す。計測領域は図10の枠で囲まれた場所に対応している。なお、枠が二次元格子シール端まで含まれていないのは、曲面へのシール貼り付け時に発生するシワが原因で相対変位計測結果データに欠損が生じたためである。

表3 回転対称曲面の相対変位計測結果

計測領域	平均距離 (mm)	真値からの差 (mm)	標準偏差 (mm)
左部	5.042	0.042	0.058
上部	5.045	0.045	0.037
中央部	5.057	0.057	0.032
下部	5.039	0.039	0.073
右部	4.939	-0.061	0.234

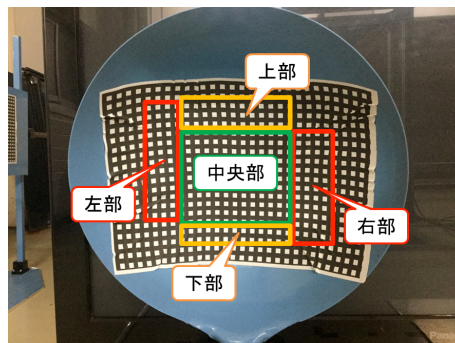


図10 回転対称曲面全体図

真値は 5mm であり、表 3 の真値からの差より、最大でも 60 μ m 程度の誤差であった。この回転対称曲面は、深さが 100mm であり、黄色枠の外側は 30 度に至るため、傾斜が 30 度以内の計測においても、60 μ m を上回る精度の計測が可能であると考えられる。

3.3 ひずみ計測結果

平面ディスプレイを使用した際、空間座標系形成のために基準面として 20mm の格子を表示し、計測対象物にも同じく 20mm の格子を表示することにより、相対変位計測を行ってきた。そこで、20mm の空間座標系を形成したのち、22mm の格子を表示した平面ディスプレイの相対変位計測を行うことで、疑似ひずみを計測することができるはずである。使用した格子を図 1 1 に示す。表 4 に、ひずみ計測の結果を示す。

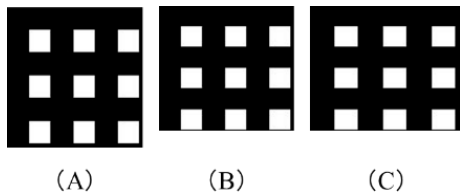


図 1 1 二次元格子表示パターン

(A : 横 20mm 縦 22mm, B : 横 20mm 縦 20mm, C : 横 22mm 縦 20mm)

表 4 ひずみ計測結果

	横方向ひずみ	縦方向ひずみ
横方向拡大格子	10.014%	0.007%
縦方向拡大格子	0.001%	9.982%

図 1 1 に示すように、基準となる格子から 10% のひずみを模擬し、ひずみを縦横方向に計測を行ったので、真値は 10% である。計測結果は、横方向に拡大した際は 10.014%、縦方向に拡大した際は 9.982% と得られ、真値からの誤差はわずかである。

今回はひずみ計測が行えるかという試みで、20mm 格子幅の結果を示したのみである。今後は再現性の高いものであることを検証することが必要である。

4. 結論

二次元格子を計測対象物に貼り付けることによって、プロジェクタを使わずに、表面形状の変形計測が行えることを示した。平面以外の形状でも、基準となる形状から（温度や外力などの）環境変化による相対変位を高精度に計測できた。

謝辞

本研究の一部は、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所戦略的開発研究費「大型高精度光学架台の研究」、および科学研究費補助金（基盤研究（C））「計測対象の大きさによらない高精度動的表面形状計測法」（課題番号 15K06594）の支援により実施された。ここに謝意を表する。

参考文献

- [1] 岩佐貴史, 岸本直子, 樋口 健, 藤垣元治, 小木曾望, “面計測と点計測を統合した大型宇宙構造物の高精度形状計測法の提案,” 航空宇宙技術, Vol.14, pp.95-103, (2015.4).
- [2] 岸本直子, “可搬型高精度 3 次元計測装置によるパラボラアンテナの形状計測,” 第 57 回構造強度に関する講演会, (2015.8), 岡山.
- [3] 伊藤良磨, 樋口 健, 相原弘匡, “格子投影法 2 カメラ法による相対変位計測,” 第 57 回構造強度に関する講演会, 2A11, JSASS-2015-3046, pp.125-127, (2015.8), 岡山.
- [4] 樋口 健, 岸本直子, 岩佐貴史, 勝又暢久, “格子投影法による曲面変位計測 ～格子を投影しない格子投影法～,” 第 31 回宇宙構造材料シンポジウム, A10, (2015.12), 相模原.
- [5] 岸本直子, 樋口 健, 岩佐貴史, 藤垣元治, 勝又暢久, “大型宇宙構造物の高速かつ高精度な軌道上形状計測を可能にする画像計測法の研究開発,” 第 60 回宇宙科学技術連合講演会, 3H14, JSASS-2016-4473, (2016.9), 函館.
- [6] 吉川隆章, “2 次元格子を用いた 3 次元変形計測における高精度化と高速化,” 和歌山大学大学院システム研究科 2014 年度修士論文, (2015.2).
- [7] 花田亮治, 瀬戸秀樹, 藤垣元治, 志茂公亮, 森本吉春, “高速回転タイヤの表面歪測定技術開発,” 自動車技術会論文集, Vol.42, No.1, pp.119-124, (2011.1).