

格子パターンの改良によるひずみ可視化シールの高精度化

High performance of strain visualization sticker by improving the pattern of fringe

○山川 将太 (広島大) 正 高木 健 (広島大)
正 青山 忠義 (広島大) 正 石井 抱 (広島大)

Yamakawa SHOTA, Hiroshima Univ.
Takeshi TAKAKI, Hiroshima Univ.
Tadayoshi AOYAMA, Hiroshima Univ.
Idaku ISHII, Hiroshima Univ.

There is a strain visualization sticker using a moire fringe. This can display characters and fringe that correspond to magnitude of strain without the use of electronic elements, such as amplifiers, strain gauges and wires. This is simply attached to a measurement object, and it shows strain information by characters which can be visible to the naked eye. Accurate numerical value of the strain can be obtained from an image of the sticker by using image processing. The strain has an error since the pattern of fringe so far. We proposes new pattern of fringe that can relieve an error of the strain and confirms usability by experimental results.

Key Words: moire fringe, strain, visualization, high performance, pattern of fringe

1 はじめに

多くの分野で高精度に変位を計測できることが求められている。なぜならば、力、応力、圧力などの物理量は力が加わったことより生じた変位より算出されることが多く、このように多くの物理量は変位を計測することにより算出されることが多いためである。

微小な変位を計測する場合、ひずみゲージやレーザー変位計などのセンサが用いられてきた。これらは非常に精度良く変位を計測できるが、電源や配線などの設置が必要となり計測に手間がかかること、電気的な要素を嫌う場所には設置が困難なこと、また、さまざまな場所にセンサを設置するにはコストがかかるなどの問題がある。

そこで、我々は微小変位を可視化できればこれらの問題を解決できると考え、ひずみにより生じた変位をモアレ縞を応用し拡大表示するひずみ可視化シール、および画像処理により変位計測を行う方法を提案してきた [1]。モアレ縞は2つの少し異なる直線格子を重ね合わせることで生じさせている。構成する2つ直線格子の位置関係が少しでも変化すると、モアレ縞は大きく変化する特徴がある。この特徴を用いることにより、変位を視覚的に拡大表示している。

これまでに高拡大率を得るための直線格子のパターンを提案している [1] (以下、旧パターン)。しかし、旧パターンはモアレ縞の輝度値が大きく段階状に変化する問題があった。一方、この問題を解決したパターン (以下、提案パターン) を用いたひずみ可視化シールも製作している [2]。この提案パターンを用いると、ひずみゲージと同程度のひずみ計測が実現できることを示しているが、この提案パターンの詳細はこれまでに発表していない。また、旧パターンと比較して、どの程度精度が向上したかの検証も行っていない。そこで、本稿では提案パターンの詳細を述べると共に、旧パターンと比較してどの程度精度が向上したかを実験により示す。

2 ひずみ可視化シールのコンセプト

はじめに、構造物の維持管理に着目しひずみ可視化シールのコンセプトについて述べる。構造物の異常を検出するためにセンサを設置する試みが多く行われている。しかし、電気的なセンサを取り付けるためには、電源や信号のための配線が必要であり構造物が大きいために設置することは容易ではない。この問題を解決するために、ひずみ可視化シールを用いることを考える。使用方法のコンセプトを図

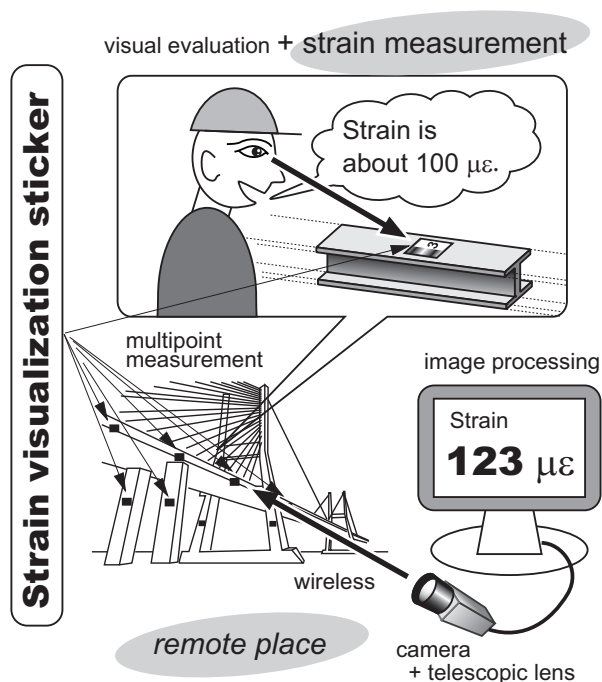


Fig.1 Concept of a proposed Strain Visualization Sticker

1に示す。このシールを設置するとひずみを文字で表示できるため目視で確認することができ、シールの写真を画像処理すれば詳細なひずみの値を計測することができる。また、望遠レンズを用いて提案シールを撮影すれば遠隔地より計測することが可能となる。

参考のために、文献 [2] のひずみ可視化シールを図 2(1)に示す。図 2(2) はひずみが $100\mu\epsilon$ おきに加わっているときの様子であり、ひずみに応じて文字が表示でき、モアレ縞が変化していることが分かる。このモアレ縞を画像処理することにより詳細な数値を算出することができる。

また、産業機械などのロボットに設置すれば、産業機械に異常なひずみが生じていないかを目視で確認できる。他

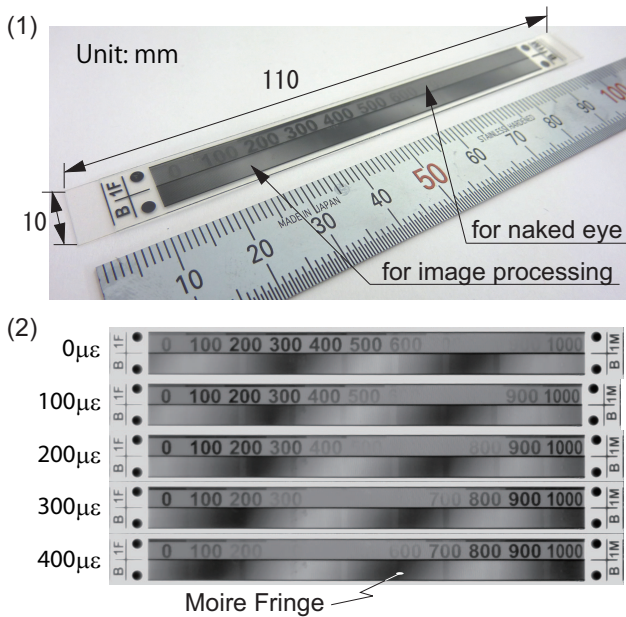


Fig. 2 Sample of the Strain Visualization Sticker

の使用法として、精密機械の輸送時に輸送前に本シールを設置しておき、輸送後に本シールを確認すれば、輸送時にひずみが生じていないかを確認することもできる。その他、工具に使用すれば、工具に加えた力を目視で確認できるようになると考えられる。そして、本シールは目視でひずみを確認できるため、特別な技術を持った技術者でなくても使用できる特徴がある。ゆえに、適用用途は非常に大きい。

このひずみ可視化シールは、微小な変位をモアレ縞を用いて拡大表示しているものであり、モアレ縞については2.1節で述べる。画像処理方法の概要について2.2節で述べる。また、画像処理方法の詳細やシールの構造については文献[1]を参照して頂きたい。

2.1 モアレ縞

Fig. 3(1)のように、ピッチ p の細かい直線格子1とそのピッチよりも $\Delta p (\ll p)$ 大きいピッチ $p + \Delta p$ の直線格子2を重ねると、これらの直線格子のピッチより大きなピッチ W の縞が現れる。この大きな縞はモアレ縞と呼ばれている。直線格子1を(A)の方向にピッチ p だけ動かすと、モアレ縞は(A)の方向にピッチ W だけ動き、これらの関係は、

$$W = \frac{p + \Delta p}{\Delta p} p \quad (1)$$

となる[3]。変位に応じてモアレ縞が動く様子をFig. 3(2)に示す。つまり、変位を視覚的に $(p + \Delta p)/\Delta p$ 倍に拡大表示することができる。この拡大率を M とする。

2.2 画像処理の概要

ひずみ可視化シールを撮影し、モアレ縞の部分のみを切り取った画像を図4(1)とする。また、図4(1)のように x, y 軸を定義する。 y 軸方向の輝度値の平均を求め、その値を計測値として図4(2)に示す。この計測値を最小二乗法を用いて \sin 関数に関数近似する。ひずみ可視化シールにひずみが生じると、モアレ縞は図3(2)のように動くため \sin 関数に近似した場合、位相が変化する。この位相よりひずみを算出することができる。ゆえに、精度良くひずみを算出するためには、計測値が精度良く \sin 関数に近似できる必要がある。

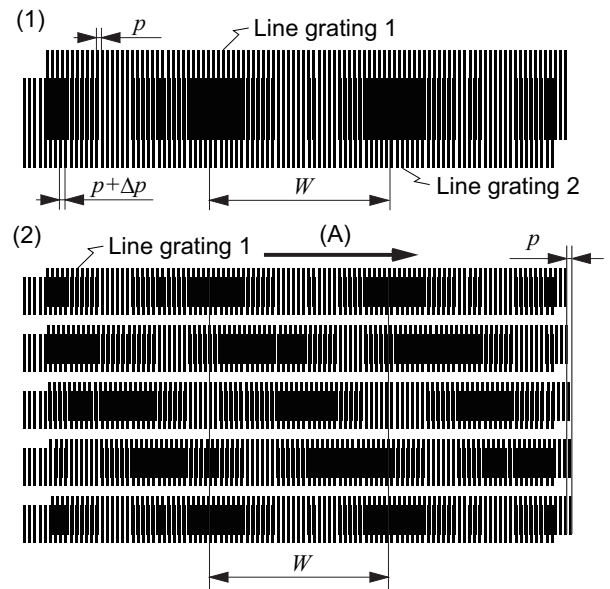


Fig. 3 Moire fringe

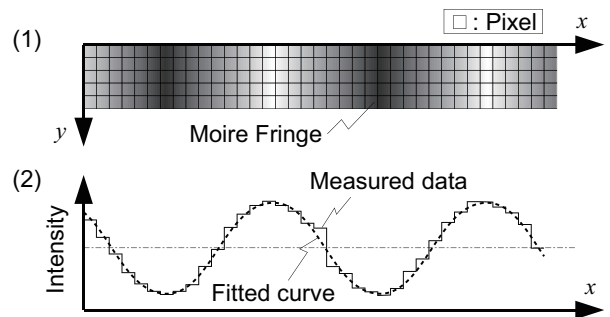


Fig. 4 Intensity of a moiré fringe and a fitted curve

3 高拡大率を得るための格子パターン

3.1 パターン製造技術の解像度

一般にパターン製造技術には、最も細かく製造できる最小の大きさがある。そこで、その最小の大きさを u と定義する。たとえば、解像度が 600 dpi の印刷機であれば $1/600$ inch が製造できる最小の大きさであるため、 $u = 1/600$ inch となる。

ここで、図3(1)のモアレ縞の拡大率について考える。式(1)より、大きな拡大率 M を得るためには、ピッチ p に対し Δp を小さくすればよい。しかし、印刷技術を考慮すると Δp の最小値は u となる。

以下、 $\Delta p = u$ として議論する。たとえば、10倍の拡大率 M を得たい場合、式(1)より直線格子1, 2のピッチ $p, p + \Delta p$ は、それぞれ $9u, 10u$ とすればよい。一方、28倍の拡大率 M を得たい場合、それぞれ $27u, 28u$ とすればよい。これらのモアレ縞をFig. 5(1)(2)に示す。

Fig. 5(1)は直線格子1, 2が細かいためモアレ縞は明瞭となるが、拡大率 $M (= 10)$ は小さい。一方、Fig. 5(2)は直線格子1, 2が太いためFig. 5(1)と比較するとモアレ縞は明瞭ではなくなるが、拡大率 $M (= 28)$ は大きい。この場合、繊細なパターンを製造できる高価な製造技術を用い u を小さくしなければ、大きな拡大率 M および明瞭なモアレ縞を得ることはできない。

3.2 高拡大率を得るための旧パターン [1]

前節の問題を解決するために文献[1]では旧パターンを提案している。その旧パターンについて説明する。Fig. 5(1)

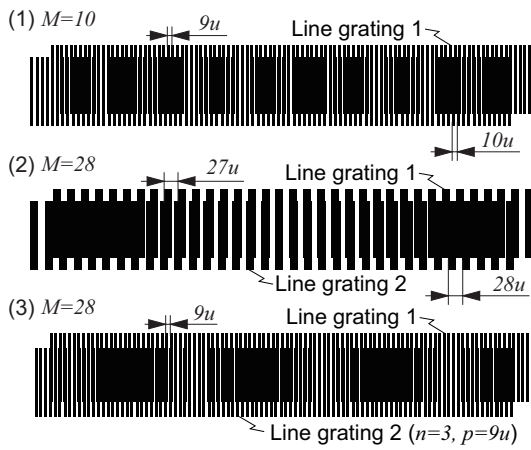


Fig. 5 Moire fringe and magnification M

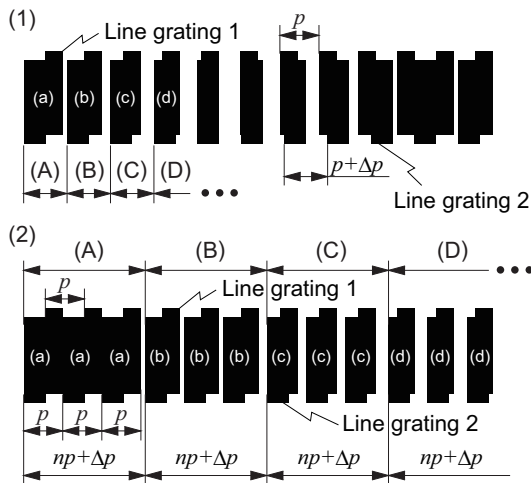


Fig. 6 Fine Moire fringe with inexpensive printing techniques

のモアレ縞の1周期分を拡大した図を Fig. 6(1) に示す。直線格子 1, 2 が重なり合っでできる黒い部分を順に (a)~(d) とする。Fig. 6(2) のようにこの黒い部分が (a)(a)(a)... (b)(b)(b)... (c)(c)(c)... (d)(d)(d)... と繰り返されるように直線格子 2 を構成することを考える。このとき直線格子 2 は、 n 個 (図中では $n=3$) のピッチ p の直線格子を一塊として、これを $np + \Delta p$ おきに配置してある。Fig. 6(2) のモアレ縞のピッチ W は、

$$W = \frac{np + \Delta p}{\Delta p} p \quad (2)$$

となり、拡大率 M は $(np + \Delta p)/\Delta p$ となる。 $p = 9u$, $n = 3$ としたときのモアレ縞を Fig. 5(3) に示す。このとき、拡大率 M は式 (2) より、Fig. 5(2) と同様の 28 倍となるが、Fig. 5(3) の方が構成する直線格子が細かいためモアレ縞が明瞭となっている。このように直線格子を構成すると、安価な印刷技術でも明瞭かつ大きな拡大率 M のモアレ縞を得ることができる。

式 (2) より n を大きくすれば拡大率 M は非常に大きな値を取りえる。しかし、 n を大きくすると、たとえば図 7(1) の (a)(a)(a)... の部分は輝度値が一定であり、また、(b)(b)(b)... の部分の輝度値も一定であるため、図 7 のようにこれらの境で大きく輝度値が変化する。この場合、 \sin 関数に近似しても位相を精度よく計測できない可能性が高くなる。

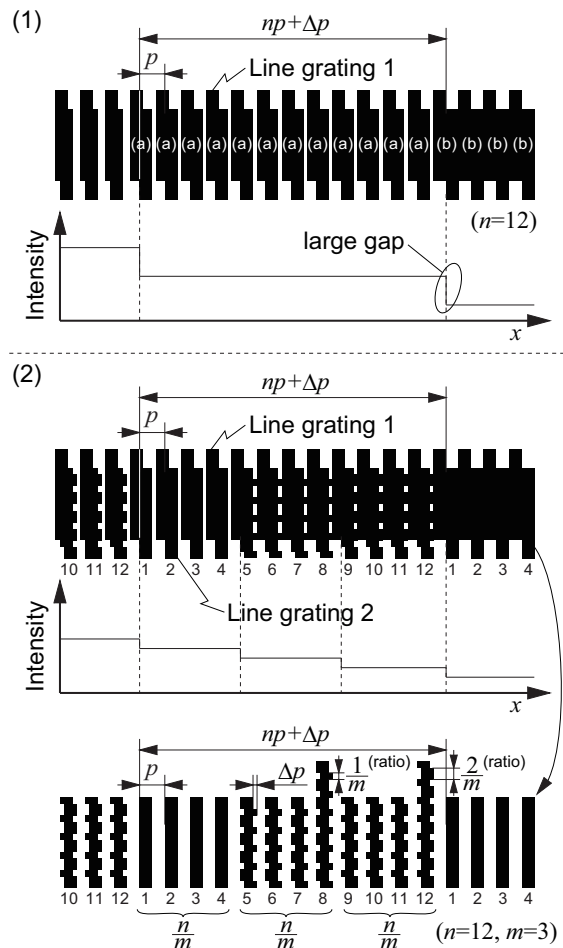


Fig. 7 Comparison between old pattern and proposed pattern

3.3 高拡大率を得るための提案パターン

旧パターンの問題を解決するために新たなパターンを提案する。 $n = 12$ とした旧パターンを図 7(1) に示す。また、提案パターンを図 7(2) に示す。この提案パターンは旧パターンをベースにして改良されている。ここで、提案パターンの直線格子 2 を構成する直線に左から順に 1, ~, n まで番号を繰り返し付けて説明する。この線を n/m 本ずつ、縦方向に $1/m$ の割合でずらすことを考える。具体的には、 $i = 0, \dots, m-1$ とし、番号 $(n/m)i + 1, \dots, (n/m)(i+1)$ までの線を i/m の割合で Δp ほどずらす。たとえば、 $n = 12$, $m = 3$ とした場合、番号 1~ 4 の線は $0/3 (= 0)$ の割合で Δp ほどずらし (割合が 0 なのでずらさない)、番号 5~ 8 の直線は $1/3$ の割合で Δp ほどずらし、番号 9~ 12 の直線は $2/3$ の割合で Δp ほどずらす。この場合、拡大率 M は同様でありながら、旧パターンのように輝度値が大きく変化しなくなるため、より精度よく位相を求められると考えられる。

4 実験

提案パターンと旧パターンでは、どちらの方が精度よく計測できるかを検証するために、図 8 に示すひずみ可視化シールを製作した。製作したシールには図 8 に示すように (1)~ (4) の 4 種類のモアレ縞がある。(1) と (2)、(3) と (4) は同じ拡大率 M でありそれぞれ 231 倍、210 倍である。また、(1) と (3) は旧パターンを用いており、(2) と (4) は提案パターンである。今回製作した格子パターンを製造する最小の大きさ u は 0.01 mm である。それぞれの格子の

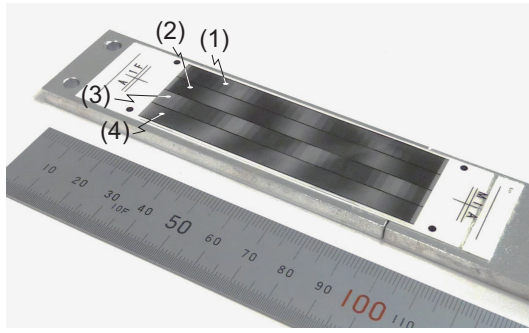


Fig.8 Developed Strain Visualization Sticker

No.	W [mm]	Δp [mm]	p [mm]	M	n	m
(1)	23.1	0.01	0.1	231	23	1
(2)						6
(3)	23.1	0.01	0.11	210	19	1
(4)						5

Table 1 Detail of the developed strain visualization sticker

詳細を表1にまとめる。

図9に実験環境を示す。マイクロステージを用い、ひずみ可視化シールに微小な変位を与えた。本シールでは $1\mu\text{m}$ の変位が $10\mu\text{E}$ のひずみに相当する。比較のためレーザー変位計でも変位を計測した。カメラにはマイクロビジョン製 CMOS カメラ (VC-4302) を用い、画像サイズは 1600×1200 pixel で、フレームレートは 5.6 fps で撮影した。また、カメラは 750 mm 離れたところからひずみ可視化シールを撮影した。

図10(1), (2)にモアレ縞(1), (2)の y 軸方向の輝度値の平均と、 \sin 関数に近似した曲線を示す。旧パターンを用いているモアレ縞(1)の輝度値の平均は階段状になっているのに対し、提案パターンを用いているモアレ縞(2)はなめらかな曲線になっており、 \sin 関数にも良く近似できることが分かる。

また、レーザー変位計の値と、それぞれの格子パターンを画像処理し算出した値とのRMSE(平均二乗誤差)を図11に示す。(1)と(2), (3)と(4)はそれぞれ同じ拡大率 M のモアレ縞であるが、提案パターンを用いた(2), (4)の方が誤差が小さくなっていることより、提案手法の方が従来手法より精度よく計測できることが分かる。一方、この誤差にはレーザー変位の計測誤差も含まれているため、今後実験装置の構成も改良し、より精度よく誤差を計測する予定である。

5 おわりに

高拡大率の得られる格子パターンの詳細を述べ、ひずみに相当する変位を従来よりも高精度に計測できることを実験により示した。

References

- [1] T. Takaki, K. Fujii, I. Ishii, S. Umemoto, H. Ohata, N. Miyamoto and T. Okamoto, "Strain visualization sticker using moire fringe for remote sensing," in Proc. 6th Int. Conf. bridge maintenance, Safety and Management, 2012.
- [2] 高木健, 田ノ上誠次, 梅本秀二, 宮本則幸, 青山忠義, 石井抱: ひずみ可視化シートを用いたコンクリート表面のひずみ計測, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013 予稿集, 2A2-P24, 2013.
- [3] 山田朝治, 横関俊介: モアレ縞・干渉縞応用計測法, コロナ社, pp.1-46, 1996.

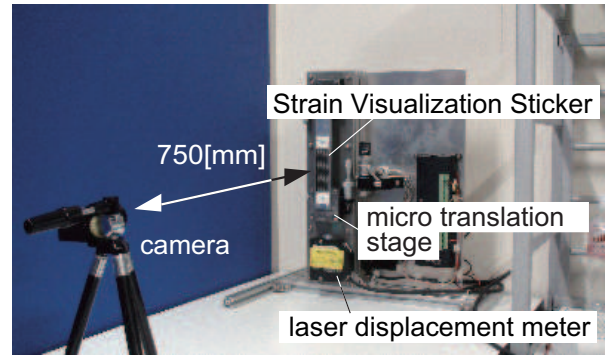


Fig.9 Experimental setup

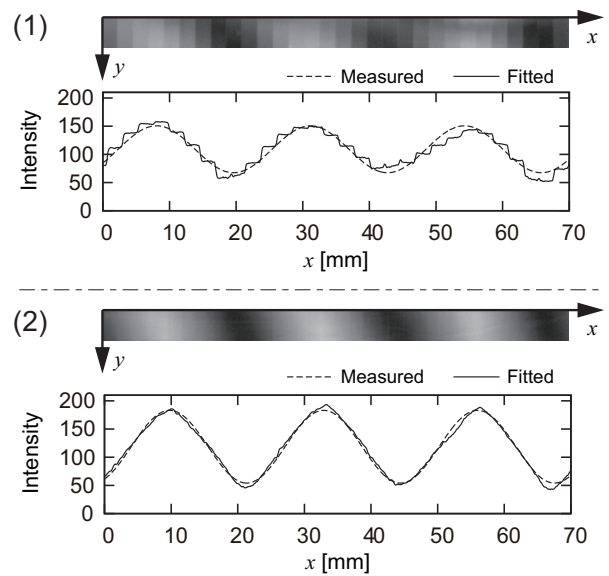


Fig.10 Intensity of moire fringes and corresponding fitted curve

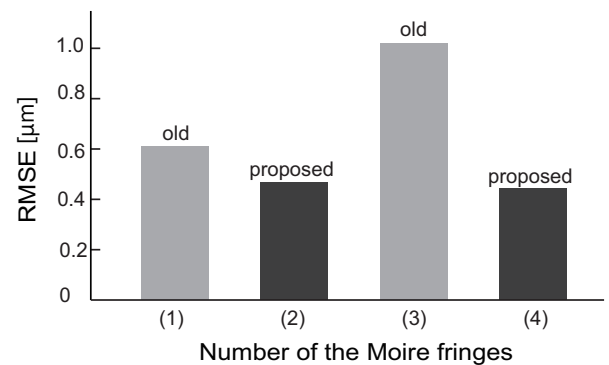


Fig.11 RMSE of the measured displacement