

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 20 日現在

機関番号：15401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2012

課題番号：23760231

研究課題名（和文） モアレ縞を用いたひずみ可視化シートの開発

研究課題名（英文） Development of strain visualization sheet using moiré fringe

研究代表者

高木 健 (TAKAKI TAKESHI)

広島大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：80452605

研究成果の概要（和文）：

ひずみの大きさを文字と縞模様で可視化できるモアレ縞を用いたひずみ可視化シートを提案する。このシートはアンプ、ひずみゲージ、配線などの電気要素を一切必要としない特徴がある。簡単に計測対象に取り付けることができ、大まかなひずみの情報は文字で表示されひずみが目視できるようになる。画像処理を用いれば正確な数値も取得できる。このシートの構造は簡単であるため安価に製造することができる。ひずみ情報を文字で表示でき、正確なひずみの値を画像処理より得られたことを実験により示す。

研究成果の概要（英文）：

We proposes a strain visualization sheet using a moiré fringe which can display characters and fringe that correspond to a magnitude of strain without the use of electronic elements, such as amplifiers, strain gauges and wires. The sheet 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 sheet by using image processing. The structure of the sheet is simple and its fabrication is inexpensive. The results show that the sheet provides the strain information by characters and accurate numerical value of the strain using image processing.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：知能機械学・機械システム

キーワード：メカトロニクス、ひずみ、モアレ縞、可視化

1. 研究開始当初の背景

どのような物体でも、力が加わるとひずみが生じる。従来よりこのひずみをひずみゲージを用いて計測することにより、力、応力、圧力、加速度（慣性力を応用して）、角速度（遠心力を応用して）など、様々な物理量が計測されてきた。しかし、ひずみゲージを用いるためには、配線、信号増幅用アンプ、結果表示用モニタなどが必要であり、このこと

が計測対象を制限する要因にもなっている。そこで、もしもひずみを可視化できれば、これらの機器が必要なくなり、従来手法にはない利点が生じ、これまで計測が困難であった対象でも計測できるようになると考えた。そこで、ひずみを計測したい個所に貼ることにより、ひずみを可視化できるシートを開発する。

開発するシートの利点の概略図を図1に示す。計測対象に本シートを貼ると、ひずみ

の大きさが文字で提示され、これにより作業者は本シートを見るだけでひずみの大きさを知ることができるようになる。また、本シートをカメラで撮影し画像処理すると、詳細なひずみの情報を得ることができる。画像を用いているので周りの状況とひずみの情報を一つのビデオカメラにて記録することが可能となる。



図1 利点の概略図

近年、大型の機械や構造物などの安全が求められており、過負荷が加わっていないかをモニタリングする技術が求められている。しかし、これらの対象は大型であるため、ひずみゲージを貼り配線を取回すことは容易ではない。一方、本シートであれば配線を取回す必要がなく、計測したい個所に本シートを貼れば目視にて大まかなひずみを知ることができる。さらにカメラで撮影し画像処理すれば詳細な数値でひずみを測定することができる。このような用途では10 μ 程度の精度が必要とされている。

2. 研究の目的

本研究では、ひずみを可視化できるシートを開発する。本シートは計測対象に貼るとひずみの大きさに応じた文字を提示できるため、作業者は目視でひずみの大きさを確認できるようになる。また、カメラで本シートを撮影し画像処理をするとひずみの詳細情報を取得することができる。性能としては10 $\mu\epsilon$ 以下の精度でひずみを計測可能とする(1 $\mu\epsilon$ のひずみとは:1kmのモノが1mm伸びたときに生じるひずみ)。また、本シートの設計方法、画像処理方法を体系化する。

3. 研究の方法

画像処理を用いれば10 $\mu\epsilon$ 以下の精度でひずみを計測でき、100 $\mu\epsilon$ 程度の大まかなひずみは目視で確認できるように文字でひずみを提示できる大きさが40 \times 20mmを目標としひずみ可視化シートを開発する。このシートの精度検証環境を整え、ひずみを計測できる

かの検証を行う。また、大型の構造物への応用を考慮し、最終的なひずみ計測はコンクリートに提案シートを設置して、市販のひずみゲージでの計測値と比較検証する。

4. 研究成果

4.1 原理

図2のように、ピッチ p の格子1とそのピッチよりも Δp ($\ll p$)ほど大きいピッチ $p + \Delta p$ の格子2を重ねると、これらの格子1, 2より大きなピッチ W のモアレ縞と呼ばれる縞が現れ、以下の関係がある。

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

図2(2)のように格子1を(A)の方向にピッチ p ほど動かすと、モアレ縞は(A)の方向にピッチ W ほど動く。つまり、変位 X 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。ここで、モアレ縞の移動量を x_m とすると下式となる。

$$x_m = MX \quad \dots(2)$$

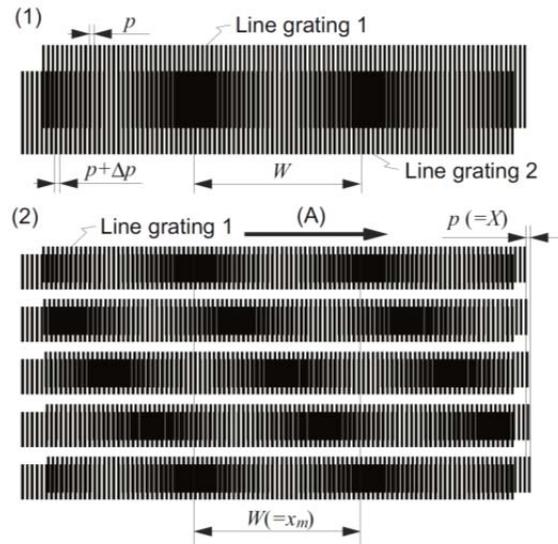


図2 モアレ縞

高拡大率のモアレ縞を得るために、直線格子2を n 個のピッチ p の縞を一塊として、これを $np + \Delta p$ おきに配置することを考える。このとき、モアレ縞のピッチ W は

$$W = \frac{np + \Delta p}{\Delta p} p (= Mp) \quad \dots(3)$$

となり、拡大率 M は $(np + \Delta p)/\Delta p$ となる。

ここで、印刷できる最小の単位を u とし、直線格子1, 2のピッチを $9u$, $10u$ とした場合のモアレ縞を図3(1)に示す。このとき、拡

大率Mは式(1)より10倍となる。一方、直線格子1は上記と同様のピッチで、直線格子2を $p = 9u$, $n = 3$ としたときのモアレ縞を図3(2)に示す。このとき、拡大率Mは式(3)より28倍となり大きな拡大率Mが得られることが分かる。

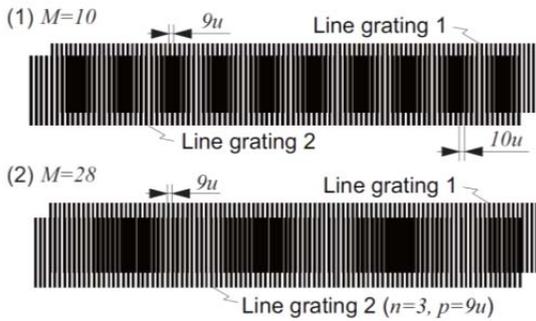


図3 高拡大率を得られるモアレ縞

4.2 目視による変位の計測

大まかな変位Xを目視できるように、モアレ縞で文字を表示する方法を述べる。図4で示したモアレ縞は単なる縞模様であるため、必ずしも視認性が高い提示方法とはいえない。そこで、モアレ縞を用いて文字を表示する方法を提案している。変位Xが生じることにより、モアレ縞が動く様子を図4の左側に示す。図4と同様に直線格子1と直線格子2を重ね直線格子1を(A)の方向に動かすと、モアレ縞は(1)~(3)のように動く。

次に、図4の右側のように直線格子1の代わりに文字の形状をした格子を用いることを考える。これを文字格子と呼ぶこととする。この文字格子と直線格子2を重ねて文字格子を(A)の方向に動かすと、(1')~(3')のように変位Xに応じ文字を順に表示することができる。

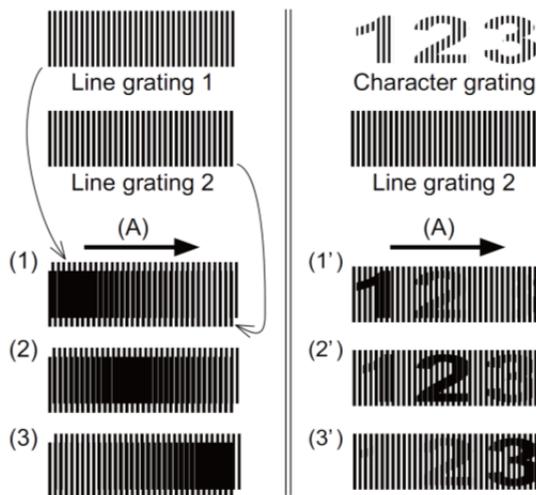


図4 モアレ縞による文字の表示

4.3 画像処理を用いた変位の計測

撮影したモアレ縞の画像の輝度値をsin曲線に近似し、その位相よりモアレ縞の移動量 x_m を求め変位Xを算出する。

撮影した画像よりモアレ縞をトリミングし、図5(i)のようにx, y軸を定義する。トリミングした画像の大きさを(X, Y)とし、(x, y)の位置にある画素の輝度値を $I(x, y)$ とする。また、撮影した画像では、単位長さが1画素で撮影されるとする。まず、それぞれのxにおけるy軸方向の輝度値の平均 $f(x)$ を求める。 $f(x)$ は、

$$f(x) = \frac{\sum_{k=0}^{Y-1} I(x, k)}{Y} \quad \dots(4)$$

となる。次に $f(x)$ を下式のsin曲線 $g(x)$ に近似する。

$$g(x) = A \sin\left(\frac{2\pi}{lW} x + \theta\right) + B \quad \dots(5)$$

$f(x)$ と $g(x)$ の例を図5(ii)に示す。 $g(x)$ に近似するためには、モアレ縞の輝度値の振幅A、輝度値のオフセットB、モアレ縞の位相 θ を求める必要がある、これらは最小二乗法より求めることができる。

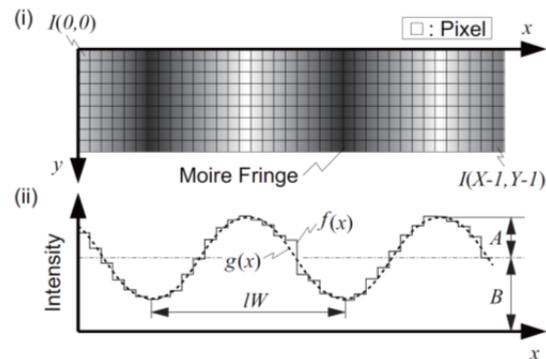


図5 モアレ縞の輝度値のsin曲線近似

本シートに変位Xが生じていないときのモアレ縞の画像を図6(i)とする。このモアレ縞の輝度値を式(5)に近似し、そのときの位相 θ を θ_0 とする(図6(iii)-(a))。本シートに変位Xが生じると、モアレ縞は式(2)より x_m だけ移動する。よって、画像上では lx_m だけ移動する。位相 θ が図6(iii)-(b)のように位相 θ_0 に対し $\Delta\theta$ だけ移動した場合、これらの関係は、

$$lx_m = \frac{lW}{2\pi} \Delta\theta \quad \dots(6)$$

となる。式(1), (2), (6)より変位Xは次式となり求めることができる。

$$X = \frac{p}{2\pi} \Delta\theta \quad \dots(7)$$

ただし、 \sin 曲線 $g(x)$ は周期的な関数であるため、位相 $\Delta\theta$ は $\Delta\theta + 2\pi n$ (n は整数) の値もとり得る。ゆえに、 n についても注意する必要がある。現在撮影した画像とその一つ前に撮影した画像から求めた位相 $\Delta\theta$ をそれぞれ $\Delta\theta_n$ と $\Delta\theta_{n-1}$ とする。カメラのフレームレートが十分に早い場合、 $\Delta\theta_n$ と $\Delta\theta_{n-1}$ の差は小さくなるので、

$$|\Delta\theta_n - \Delta\theta_{n-1}| < \pi \quad \dots(8)$$

が成り立つと仮定する。この場合、 $\Delta\theta_{n-1}$ が既知であれば $\Delta\theta_n$ の範囲が制限されるため n を定めることができる。

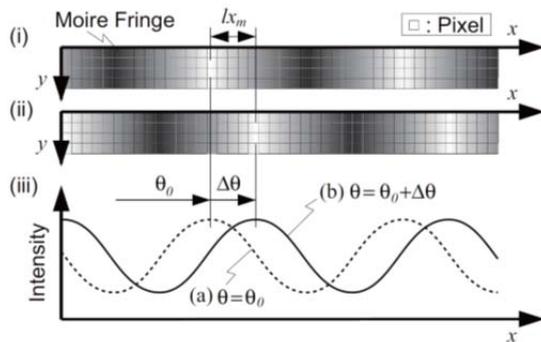


図 6 モアレ縞による文字の表示

4.4 開発したひずみ可視化シート

ひずみ可視化シートの構造を図 7 に示す。2 枚の透明なフィルムから構成されており、上側のフィルムは裏面に、下側のフィルムには表面に格子が描かれている。2 枚のフィルムの間には油が入っており、表面張力により 2 枚のフィルムが離れることを防止している。モアレ縞を鮮明に提示するために、下側のフィルムの裏面は白い塗料が塗られている。図 7 のように、計測したい対象に接着することにより、ひずみ量を可視化することができる。

図 8 に開発したひずみ可視化シートを示す。長さ、幅、厚さはそれぞれ 110 mm, 10 mm, 0.44 mm である。ひずみ量を肉眼で確認できるように上側には 100 $\mu\epsilon$ 毎に 0~1000 までの文字が表示される。1000 $\mu\epsilon$ 以上のひずみが生じた場合、0 $\mu\epsilon$ と 1000 $\mu\epsilon$ は同じ表示となるため、たとえば 1100 $\mu\epsilon$ のひずみでは、100 $\mu\epsilon$ と表示される。また、画像処理には下半分に表示されているモアレ縞を用いる。上側の文字を表示しているモアレ縞および下側の画像処理用のモアレ縞の拡大率 M はそれぞれ 731 倍、321 倍である。

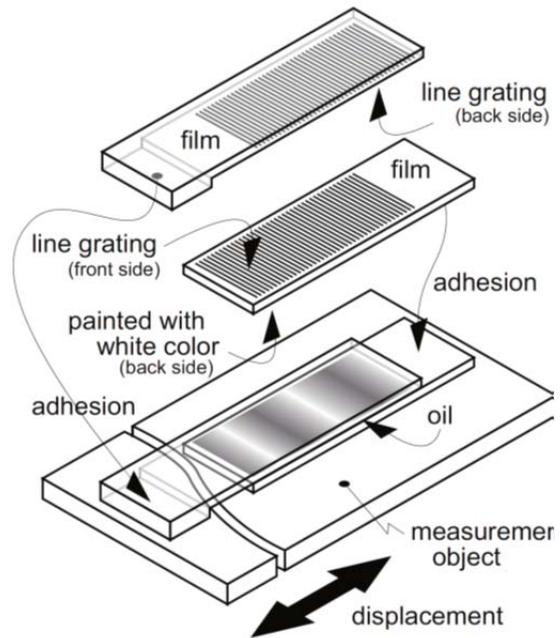


図 7 ひずみ可視化シートの構造

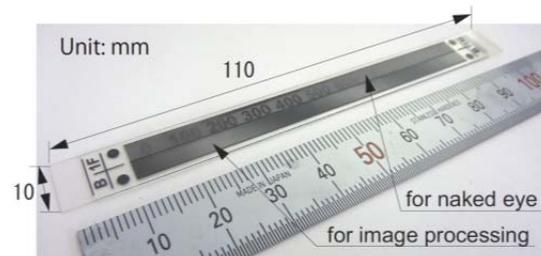


図 8 製作したひずみ可視化シート

4.5 実験

圧縮試験には直径 100mm、高さ 200mm の円柱供試体を用いた。供試体の材料には無収縮モルタルを用い、水結合材比は 18 % である。供試体製作後水中養生し、7 日後に試験を実施した。ひずみ可視化シートは図 9 のように供試体の中央に瞬間接着剤にて接着した。また、比較するためにコンクリート用ひずみゲージも隣接して同様の接着剤を用い接着した。また、圧縮試験機を用いて供試体に圧縮荷重を加えた。ひずみ可視化シートを撮影するために、本シートより約 1 m の位置にビデオカメラを設置した。ビデオカメラ ((株) マイクロビジョン VC-4302) の画素数は 200 万であり、USB にてパソコンに接続できる。画像処理にはノートパソコン (Panasonic CF-S9 Intel(R) Core(TM) i7 CPU M620@2.67GHz, RAM:8GB) を用い、リアルタイムにひずみ量を算出した。

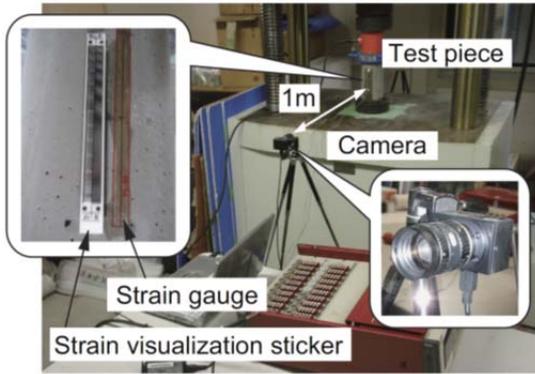


図9 実験環境

試験方法は供試体に衝撃を与えないように一様な速度で200 kNまで載荷し、その後、同様の方法で除荷した。その間、本シートにてひずみ量を計測した。また、比較のためにひずみゲージでも計測した。図10の上側に時間とひずみの関係を、下側にひずみと荷重の関係を示す。載荷当初、ひずみ可視化シートとひずみゲージにて計測したひずみ量の差が約 $30\mu\epsilon$ 生じたが、それを除けば、載荷時、除荷時ともにひずみ可視化シートの計測精度は概ね $\pm 20\mu\epsilon$ であった。コンクリート表面に発生するひずみにおいても、本手法を用いれば非接触にて比較的精度良くひずみ量を計測できることが確認できた。図11に $100\mu\epsilon$ 毎のひずみ可視化シートの画像を示す。 $100\mu\epsilon$ 程度のひずみであれば肉眼で読み取ることが確認できた。

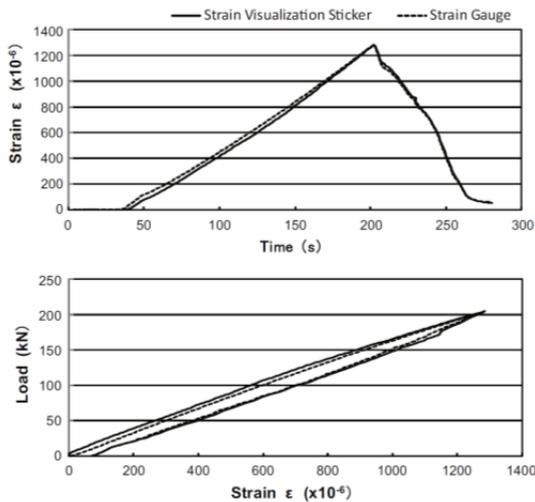


図10 実験結果

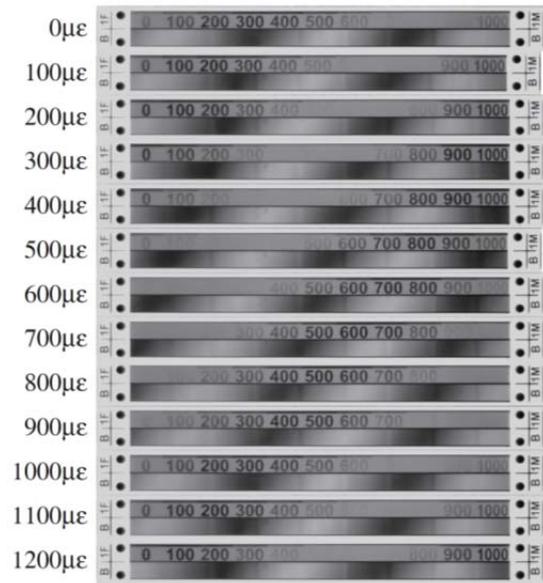


図11 文字によるひずみの可視化

4.6 まとめ

提案したひずみ可視化シートを用いれば、ひずみゲージ、アンプ、信号線のような電気的な要素を一切用いることなく、ひずみ量を $100\mu\epsilon$ 程度の分解能で目視にて確認できた。この値は申請時当初に目標としていた値であり、その値を達成することができた。また、本シートをデジタルカメラにて撮影し画像処理すれば概ね $\pm 20\mu\epsilon$ 程度の誤差にて詳細な値を取得できることを確認した。当初の目標としては $\pm 10\mu\epsilon$ としていたが、ひずみ計測においてはこの値を達成することができなかった。一方で変位に着目した場合(変位を計測しシートの長さで割った値をひずみと仮定した場合は $\pm 10\mu\epsilon$ 以下の精度で計測できていることを確認している。ゆえに、計測対象への設置方法が今後の課題となることが明らかになった。大きさは当初の目標とした大きさよりも大きくなっているが、比較対象のコンクリート用のひずみゲージの大きさに合わせたためである。

今後、計測対象の設置方法を検討すると共に構造物の安全モニタリングへ応用展開して行く予定である。たとえば、プレストレスト・コンクリートの構造物を対象とした施工時における緊張力導入時のコンクリート応力のモニタリング、維持管理面における導入後のプレストレスの経過の把握等に展開していきたい。

5. 主な発表論文等
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計0件)

[学会発表] (計3件)

- (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, Proc. 6th Int. IABMAS Conf., pp. 2212-2217, Jul. 8-12, 2012, Stesa, Lake Maggiore, Italy.
- (2) S. Umemoto, H. Ohata, N. Miyamoto, T. Okamoto, T. Takaki, K. Fujii and I. Ishii: Strain measurement of bridge members using strain visualization sticker, Proc. 6th Int. IABMAS Conf. pp. 2218-2223, Jul. 8-12, 2012, Stesa, Lake Maggiore, Italy.
- (3) 高木健, 石井抱, 梅本秀二, 大畑秀之, 宮本則幸, 岡本卓慈, 1 μ m が測定できる微小変位可視化シールの開発, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2011 予稿集, DVD, 2011/5/26-28, 岡山.

[図書] (計1件)

- (1) T. Takaki: Acceleration Visualization Marker Using Moire Fringe for Remote Sensing, Remote Sensing of Planet Earth (Y. Chemin ed.), INTECH, pp. 201-216, 2012.

[産業財産権]

○出願状況 (計1件)

- (1) 名称: 歪量表示方法及びその装置, 健全性評価方法
発明者: 高木健, 岡本卓慈, 宮本則幸, 梅本秀二, 大畑秀之
権利者: 広島大学, (株) 計測リサーチコンサルタント
種類: 特許出願
番号: 2011-0109
出願年月日: 2011年5月25日
国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等

http://www.robotics.hiroshima-u.ac.jp/mechatronics_manipulation/moire_strain-j.php

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高木 健 (TAKAKI TAKESHI)

広島大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号: 80452605

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: