リモートセンシングのためのモアレ縞を用いた加速度可視化マーカ*

高木 健^{*1}, 大政 洋平^{*2}, 石井 抱^{*1}

Acceleration Visualization Marker Using Moiré Fringe for Remote Sensing

Takeshi TAKAKI^{*3}, Youhei OMASA and Idaku ISHII^{*3} Department of Artificial Complex Systems Engineering, Graduate School of Engineering, Hiroshima University,
1-4-1 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima-shi, Hiroshima, 739-8527 Japan

This paper presents an acceleration visualization marker which can display moiré fringe that correspond to a magnitude of acceleration without the use of electronic elements, such as amplifiers, strain gauges and wires. To obtain moiré fringe, the marker consists of two plate printed with a line gratings. Numerical value of the acceleration can be obtained from an image of this marker. We propose an image processing method and have experimentally verified the utility of the proposed marker by taking images with a high-speed camera.

Key Words: Moiré Fringe, Acceleration, Visualization, High Speed Camera

はじめに

計測技術の進歩は、多くの分野に発展をもたらしてきた。使用する環境に応じて高性能なものから、小型軽量、安価なものまでさまざま開発されている。近年用いられている物理量を計測するためのセンサには、多くの場合、電気的な要素が用いられている。また、これらのうち計測点に取り付ける必要があるセンサを用いた場合、センサのある計測点に電力を供給する必要がある。配線を用い外部から電力を供給するか、電源を内蔵しなければならない。また、センサにて計測した情報を伝達するための配線または無線機も必要となる。

このような配線等は環境によっては計測できる対象を制限する要因になっている。この問題を解決するために、従来より光学要素や超音波などを用いることにより、計測点に電力を供給する必要がない計測技術も開発されている。著者らもこれまでに、計測点に電力を供給する必要がない計測技術として、モアレ縞を応用し力を可視化するメカニズムを提案してきた⁽¹⁾⁽²⁾。またその応用として、ロボットグリッパ⁽¹⁾や内視鏡器具⁽²⁾に実装した例を示した。

一方、工場、建造物、橋梁などに生じている物理現象を計測することにより、保守管理を実現しようとする

研究が行われている⁽³⁾⁻⁽⁷⁾。また、これらにおいて振動現象に着目している研究は少なくない⁽⁵⁾⁻⁽⁷⁾。しかし、これらの対象は非常に大きいためセンサまで配線を取り回すことは容易ではない。そこで、計測点に電力を供給する必要がなく、加速度を可視化し提示できるモアレ縞を応用したマーカを提案する。これにより配線することなく離れた所からでもカメラで本マーカを撮影することにより加速度を計測することが可能となる。

従来より、モアレ縞を応用し変位を計測する研究が行われている⁽⁸⁾⁻⁽¹¹⁾。これらの計測方法も計測点に電力を供給する必要がない利点があるが、モアレ縞を生じさせるためにレーザーや縞模様を投影できる特殊な光源を用いている。一方、本手法では自然光でも良く、上記のような特殊な光源を必要としないのでこれらとは異なる。

本手法では、平行格子が印刷された2枚のガラス板を重ね合わせることによりモアレ縞を生じさせている。同じ方法にて、モアレ縞を生じさせて変位を計測する方法も提案されている⁽¹²⁾⁽¹³⁾。しかし、加速度には着目しておらず、さらにカメラを用いて離れた所から情報を取得することは行っていない。

本論文では、加速度に応じたモアレ縞を提示できる加速度可視化マーカを提案すること、および本マーカを撮影した画像より加速度情報を取得する方法を示すことを目的とする。1章では加速度をモアレ縞を用いて可視化する原理について述べ、2章では本マーカを

* 原稿受付 2010年3月11日。

^{*1} 正員、広島大学大学院工学研究科複雑システム工学専攻
(〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1)。^{*2} 広島大学大学院工学研究科複雑システム工学専攻。
E-mail: takaki@robotics.hiroshima-u.ac.jp

Fig. 1 Seismic system

撮影した画像より加速度情報を取得する方法について述べる。3章では減衰能⁽¹⁴⁾に着目し選定した材料を用いて製作したマーカについて述べ、4章ではそのマーカの機械的特性、および高速ビデオカメラを用いて加速度情報を取得できることを示す。5章で考察を述べ、最後に結論を述べる。

1. 加速度可視化マーカ

提案するマーカは1.1節で述べるサイズモ系よりピックアップした加速度を、1.2節で述べるモアレ縞を用いて視覚的に提示するものであり、その構造については1.3節で述べる。

1.1 サイズモ系と加速度の関係 加速度は図1(i)のように計測対象と錘の間をばねとダンパで繋いだサイズモ系を用いることにより計測できることが知られている⁽¹²⁾。計測対象に加速度が生じることにより、図1(ii)のように計測対象には x_o の変位が生じ、錘には x_w の変位が生じたとする。また、計測対象の角振動数を ω_o とし、錘の固有角振動数を Ω_w とする。 ω_o/Ω_w が十分に小さい場合、計測対象の加速度 α は、計測対象と錘の相対変位 $x_o - x_w$ に比例し、その比例定数は錘の固有振動数 Ω_w の二乗となることが知られている。すわち、

$$\alpha \simeq \Omega_w^2 (x_o - x_w) \quad (1)$$

となる。これらの関係の導出の詳細については文献⁽¹²⁾を参考にして頂きたい。

ここで、この式について考える。固有角振動数 Ω_w は錘の質量とばねのばね定数に依存した定数であるため、比例定数(Ω_w^2)は一定である。加速度 α に比例して相対変位 $x_o - x_w$ が生じるため、相対変位 $x_o - x_w$ が可視化できれば、加速度 α を可視化できることになる。しかし、一般に相対変位 $x_o - x_w$ は微小あるため、拡大する技術と組み合わせる必要がある。そこで、次節で述べるモアレ縞を用いてこの相対変位を視覚的に拡大する。

Fig. 2 A moiré Fringe

1.2 モアレ縞により変位を視覚的に拡大する原理 モアレ縞⁽¹¹⁾⁽¹²⁾について説明する。ピッチ p_g の等しい2枚の平行格子を図2(i)のように小さな角度 ϕ ほど傾けて重ねると、元の格子より間隔の広いピッチ p_m のモアレ縞と呼ばれる縞ができる。図2(ii)のように平行格子1を(A)の方向にピッチ p_g だけ変位させると、モアレ縞は(B)の方向にピッチ p_m ($> p_g$)だけ移動するため、微小な変位を視覚的に拡大し表示できる。ピッチ p_g 、 p_m と角度 ϕ の関係は、

$$p_m = \frac{1}{2 \sin \frac{\phi}{2}} p_g \quad (2)$$

となるため、 $1/2 \sin(\phi/2)$ 倍に変位を視覚的に拡大することができる。これを拡大率 M と定義する。

直線格子の相対変位が $x_o - x_w$ の場合、モアレ縞の移動量 x_m は次式となる、

$$x_m = M(x_o - x_w) \quad (3)$$

1.3 加速度可視化マーカの構造 1.2節で述べたモアレ縞にて、一定の拡大率 M を得るためには、相対変位 $x_o - x_w$ が生じて角度 ϕ を一定に保てる必要がある。そこで、図3(i)に示す2枚の同じ形状の薄い弾性板を持つ平行ばねを用いた。平行ばねは弾性板が2枚あるため、図3(ii)のように(a)部に対し(b)部は角度 ϕ を変化させることなく相対変位 $x_o - x_w$ を生じさせることができる。また、この弾性板の弾性と減衰能は、1.1節で述べたサイズモ系におけるばねとダンパとして機能する。これに錘を取り付けばサイズモ系となり、相対変位 $x_o - x_w$ より加速度 α が算出できる。

Fig. 3 An acceleration visualization marker

直線格子が描かれている2枚のガラス板をそれぞれ(a)部と(b)部に取り付くと、加速度 α に比例する相対変位 $x_o - x_w$ をモアレ縞により視覚的に拡大表示できるため、視覚的に加速度 α を提示することができる。以下、これらの部品をまとめて加速度可視化マーカと呼ぶ。

2. 画像処理による加速度の取得方法

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 を求め加速度 α を算出する。これらについて2.1, 2.2節で述べる。

2.1 sin曲線近似 撮影した画像よりモアレ縞をトリミングし、図4(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、

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

となる。次に $f(x)$ を次式のsin曲線 $g(x)$ に近似する。

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

$f(x)$ と $g(x)$ の例を図4(ii)に示す。 $g(x)$ に近似するためには、撮影した画像上のモアレ縞のピッチ p_i 、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。 p_i は $f(x)$ の自己相関より求め、 A, B, θ は最小二乗法より求めることができる。

2.2 位相とモアレ縞の移動量 本マーカに加速度が生じていない静止しているときのモアレ縞の画像を図5(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5(iii)-(a))。加速度が生じ本マーカに図3(ii)のように相対変位 $x_o - x_w$

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

が生じると、モアレ縞は式(3)より x_m だけ移動する。撮影した画像において単位長さが1画素に相当する場合、モアレ縞は画像上で図5(ii)のように lx_m だけ移動する。位相 θ が図5(iii)-(b)のように静止時の位相 θ_0 に対し $\Delta\theta$ だけ移動した場合、これらの関係は、

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

となる。式(1), (3), (6)より加速度 α は次式となり求めることができる。

$$\alpha \simeq \frac{\Omega_w^2 p_i}{2\pi l M} \Delta\theta \quad (7)$$

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、

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

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。

3. 製作した加速度可視化マーカ

製作した加速度可視化マーカを図6に示す。弾性板の材料にはM2052⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾と2017を用いた。M2052はMn73, Cu20, Ni5, Fe2(原子%)からなるマンガンベースの合金であり、極めて大きい減衰能を有している。2017はアルミニウム合金であり減衰能は小さい。表面処理には、M2052は無電解ニッケル、2017は黒アルマイトが施されている。弾性板の形状は同様である。

直線格子のピッチ p_g は0.02 mmであり、線の太さは0.01 mmである。M2052と2017の加速度可視化

Fig. 5 Phase of a moiré fringe

Fig. 6 Developed acceleration visualization marker

マーカーのモアレ縞のピッチ p_m は、それぞれ 6.1 mm, 5.5 mm であり、相対変位 $x_o - x_w$ をモアレ縞によりそれぞれ 303 倍, 277 倍に視覚的に拡大して提示することができる。また、マーカーの全質量はそれぞれ 11.7 g, 13.0 g である。

1.1 節にて述べた方法にて加速度を計測する場合、これら 2 つのマーカーを比較するためには固有角振動数 Ω_n は等しいことが望ましい。そこで、錘を少しずつ切削加工し固有角振動数 Ω_n を調節した。2 つのマーカーで錘の形状が異なるのはそのためである。錘の材料には C2801 を用いた。固有角振動数 Ω_n の詳細については 4.1 節で述べる。

4. 実験

4.1 節では実験により調べた本マーカーの機械的特性を示す。4.2 節では実験装置について述べ、4.3 節にて

Fig. 7 Damped free vibration

本マーカーを撮影した画像より加速度が取得できることを示す。

4.1 固有角振動数と減衰比を求める実験 製作したマーカーの力学的特性を調べるために、マーカーを自由振動させ、錘の変位をレーザ変位計 (KEYENCE, LK-G30) にて計測した。実験結果を図 7 に示す。M2052 と 2017 を用いたマーカーの固有角振動数 Ω_n は、それぞれ 409 rad/s (=65.1 Hz), 406 rad/s (=64.6 Hz) であり、減衰比はそれぞれ 0.0473, 0.0011 となった。M2052 を用いた方が 2017 よりも明らかに早く減衰することが分かる。

4.2 加速度を計測する実験装置 本マーカーにより加速度を計測できるかを検証するための実験装置を図 8 に示す。M2052 と 2017 を用いたマーカーは共に加振器に固定されている。このマーカーを高速ビデオカメラにて約 470 mm 離れたところから撮影する。高速ビデオカメラには、フォトン社の FASTCAM-1024PCI を用いた。撮影した画像のフレームレートは 2000 fps で、画像の大きさは 1024 × 512 pixel である。このとき、撮影した画像において 1 mm は 6.0 pixel に相当する。比較検証するために、3 軸加速度センサ (フリースケール社, MMA7260Q 搭載) も加振器に固定した。LED を用い加速度センサにて計測する値と、本マーカーにて計測する値の同期をとった。また、加振器の振幅を計測するためにレーザ変位計 (KEYENCE, LK-G30) も備え付けられている。

4.3 加速度可視化マーカーを用いた加速度の計測 2.1, 2.2 節で述べた画像処理および、4.2 節で述べた実験装置を用い、製作した加速度可視化マーカーより加速度情報を取得できることを実験により示す。加振器にて本マーカーと 3 軸加速度センサを 12.7 Hz で振動させ

Fig. 8 Experimental setup for developed markers

Fig. 9 Image of a moiré fringe

Fig. 10 Intensity of an image and a fitted curve

た。レーザー変位計より計測した加振器の振幅は 0.58 mm であった。撮影した画像より、マーカ部分をトリミングした画像の例を図 9 に示す。画像の大きさは 125×100 pixel である。また、この画像の Y 軸方向の輝度値の平均 $f(x)$ と、sin 関数に近似した曲線 $g(x)$ を図 10 に示す。

撮影した画像より求めた加速度を図 11 に示す。上側は M2052 を用いたマーカより算出した加速度であり、下側は 2017 を用いたものである。また、比較のために 3 軸加速度センサにて計測した加速度も共に示してある。M2052 を用いたマーカの計測値は 3 軸加速

Fig. 11 Experimental result of the acceleration

度センサの計測値と良く一致している。一方、2017 を用いたマーカには、約 65 Hz の振動が加わっている。3 軸加速度センサにて計測した加速度を真値と仮定して求めた二乗平均平方根誤差は、M2052、2017 を用いたマーカではそれぞれ 0.24, 1.4 m/s^2 となった。M2052 を用いたマーカの方が高い精度で計測できていることが分かる。

5. 考 察

4.3 節の実験結果において、3 軸加速度センサおよび M2052、2017 を用いたマーカにて計測した加振器の加速度にどのような周波数成分が含まれているかを調べるために求めたパワースペクトルをそれぞれ上から順に図 12 に示す。全てにおいて 12.7 Hz 辺りに大きな値を示しているのは、加振器の振動によるものであると考えられる。2 つのマーカの固有角振動数 Ω_w は共に約 400 rad/s (65 Hz) であるが、M2052 を用いたマーカはこの振動数辺りに大きな値を示していないのに対し、2017 を用いたマーカでは大きな値を示している。これは 2017 のマーカの減衰比は 4.1 節で述べたように小さいため、加振器の振動に含まれるわずかな 65 Hz の成分にも大きく共振したためであると考えられる。よって、加速度可視化マーカには、2017 よりも減衰能が大きい M2052 の材料の方が適していることが分かる。

お わ り に

モアレ縞を用いて加速度を可視化し提示するマーカを提案した。本マーカを高速ビデオカメラにて撮影し画像を処理することにより、画像より加速度情報を得られることを示した。また、材料の減衰能に着目し、

Fig. 12 Experimental result of the power spectrum

減衰能がマーカの精度に大きく影響することを実験より示した。今後、本マーカを建造物に取り付け望遠レンズを用いることにより、数十メートル離れたところから加速度を計測する予定である。

文 献

- (1) Takaki, T., Omasa, Y. and Ishii, I., Force Visualization Mechanism using Moire Fringe for Robot Grippers, *The 28th Annual Conference of the Robotics Society of Japan*, 1K3-07, 2008.
- (2) Takaki, T., Omasa, Y., Ishii, I., Kawahara, T., Sumitani D., Yoshida, M. and Okajima, M., Force Visualization Mechanism using Moire Fringe for Endoscopic surgical Instruments, *Journal of Japan Society of Computer Aided Surgery*, Vol. 114, No. 4, pp. 447-456, 2009.
- (3) Fukuda, T., Osaka, K., Mashima, M., and Miki, M., Flexural Behavior of Concrete Beam Reinforced by GFRP Rod and Health Monitoring Using Optical Fiber, *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, Vol. 42, No. 475, pp. 442-448, 1993.
- (4) Takeda, N. and Okabe, Y., Health Monitoring of Composite Materials Using Optical Fiber Sensors, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol. 67, No. 655, pp. 378-383, 2001.
- (5) Tamura, M., Yamamoto, S., Sono, A., and Masuda, A., Measurement of Dynamic Strain of Structure Subjected to Dynamic Load by Using a Couple of Vibratory Gyroscope, *Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of Architectural Institute of Japan)*, No. 509, pp. 61-68, 1998.
- (6) Jiang, Z. and Takeuchi, Y., Health Monitoring Technique for Truss Structure with PZT Patches, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 69, No. 679, pp. 586-593, 2001.
- (7) Hamamoto, T., Ohmura, T., Horiuchi, D., and Choi, J., Laboratory Experiments on Integrated Health Monitoring of Cast-in-Situ Concrete Pile Foundations Using Vibration and Wave Measurements, *Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of Architectural Institute of Japan)*, No. 616, pp. 105-112, 2007.
- (8) Suzuki, S., Morita, Y. and Sakaue, K., Measurement of Opening Displacement of Bifurcated Cracks by High-Speed Holographic Microscopy and Moiré Interferometry, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol. 67, No. 655, pp. 432-439, 2001.
- (9) Arakawa, K., Ishiguma, M. and Takahashi, K., Measurement of Crack Opening Displacement in Mode I Interlaminar Fracture of CFRP by Moire Interferometry, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol. 59, No. 559, pp. 553-557, 1993.
- (10) Ma, y., Kurita, M. and Sasaki, A., Effect of Out-of-Plane Rotation on Strain and Displacement Measurement by Moiré Interferometry, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol. 59, No. 567, pp. 2605-2611, 1993.
- (11) Yamada, T. and Yokozeki, S., Measurement Methods Using Moire Techniques and/or Interferometry, *Corona Publishing Co., Ltd.*, pp. 48-220, 1996.
- (12) Taniguchi, O. and Horigome, Y., Measurement Engineering, Second Edition (in Japanese), *Morikita Publishing Co., Ltd.*, pp. 103-104, pp. 194-198, 1991.
- (13) Masanao, M., Sensing Techniques of Mechanical Quantities, *Corona Publishing Co., Ltd.*, pp. 114-117, 1986.
- (14) Metal editorial department, Dictionary to know metal (in Japanese), Agne Co., Ltd., pp. 46-51, 1978.
- (15) Kawahara, K., Sakuma, N and Nishizaki, Y., Effect of Third Elements on Damping Capacity of Mn-20Cu Alloy, *Journal of the Japan Institute of metals*, Vol. 57, No. 9, pp. 1089-1096, 1993.
- (16) Kawahara, K., Sakuma, N and Nishizaki, Y., Effect of Fourth Elements on Damping Capacity of Mn-20Cu-5Ni Alloy, *Journal of the Japan Institute of metals*, Vol. 57, No. 9, pp. 1097-1100, 1993.