

# ストロボ位相シフト干渉法を用いた 超音波モータの振動計測

Vibration Measurement of an Ultrasonic Motor  
Using Stroboscopic Phase-shift Interferometry

山本 勉\*, 鳥井 昭宏\*\*, 植田 明照\*\*, 羽根 一博\*\*\*  
Tsutomu YAMAMOTO, Akihiro TORII, Akiteru UEDA, Kazuhiro HANE

Abstract : We evaluate performance of vibration type microdevices. Stroboscopic phase-shift interferometry is capable of imaging high speed ( $\sim$ MHz) and small ( $\sim$ 10nm) vibration and is applied to displacement measurement of the microdevices. A laser diode, which is used as a light source of the interferometry, is irradiated stroboscopically in order to observe an object vibrating at high frequency. Phase-shift algorithm is used to obtain high contrast images. The optical system is a Fizeau-type interferometer which eliminates optical noises. An ultrasonic motor, which consists of a rotor and a stator, is used as a test object. The vibration frequency of the stator is about 39.2 kHz. In this paper, we measure the vibration of the stator surface of the ultrasonic motor. The vibration distributions are compared with each other. As a result, the change of the vibration distribution proves the movement of the surface of the stator. We examine vibration transmission of the stator surface.

## 1.はじめに

近年、システムの小型化や微細化が要求されている。特に自動車用加速度センサや航空機用ジャイロの小型化、高機能化を実施するためにマイクロマシニングと呼ばれる微細加工技術が発達した<sup>1)</sup>。集積回路を製造するために開発された微細加工技術や写真露光技術を用いて、マイクロメートルレベルでの微小な機械部品をシリコン基板上に作製し、加速度センサやジャイロなどの振動型センサなどが実現された。

振動状態の変化より加速度や角速度を検出する一方で、圧電素子などの高周波振動を用いたアクチュエータも研究されている。表面弾性波 (Surface Acoustic Wave: SAW) デバイスや超音波モータ (Ultrasonic Motor: USM) は、高周波振動を用いたアクチュエータの一種である。

振動を検出する振動型センサや、振動により駆動する振動型アクチュエータなどは振動型デバイスと呼ばれる。多くの振動型デバイスは、圧電材料を用いて振

動が励起されるため振動振幅が数 $\mu\text{m}$ 以下、小型化に伴い共振周波数が上昇するため振動周波数が kHz 以上のオーダで動作する。これらの振動型デバイスの動作性能を評価することは、更なる性能向上に役立つと考えられる。

性能評価方法には、レーザプローブ干渉法やホログラフィ法などが提案されてきた<sup>2,3)</sup>。レーザプローブ干渉法では、一点の微小変位をナノメートルレベルで計測可能であるが、試料表面全体を計測するには各々の点に対する計測を繰り返す必要があるため、ある程度の計測時間を必要とする<sup>2,4)</sup>。また、ホログラフィ法は静止物体の形状分布に有効であるが、計測分解能が数 $\mu\text{m}$ 程度であるため、数 $\mu\text{m}$ 以下の微小振動の計測には適していない<sup>3,5)</sup>。また、ホログラフィ法は動的物体の計測には適さない。すなわち、これらの方法では高速かつ微小振動物体の振動分布の可視化が困難であった。

高速微小振動を計測する新しい方法として、半導体パルスレーザを用いたストロボ位相シフト干渉法が提案された。高速物体を可視化するストロボ法と、微小振幅を高精度に計測する位相シフト法を組み合わせることにより、数 $\mu\text{m}$ 以下の微小かつ数 kHz 以上の高速振動の可視化を可能にした。

本稿では、振動型デバイスのひとつである USM を試料に選び、ステータ表面の振動状態を計測する。ストロボ位相シフト干渉法を用いて振動状態を可視化し、従来は困難であった高速振動状態を解析する。

\* 愛知工業大学大学院 工学研究科  
電気電子工学専攻(豊田市)

\*\* 愛知工業大学 工学部  
電気工学科(豊田市)

\*\*\* 東北大学 工学部  
機械電子工学科(仙台市)

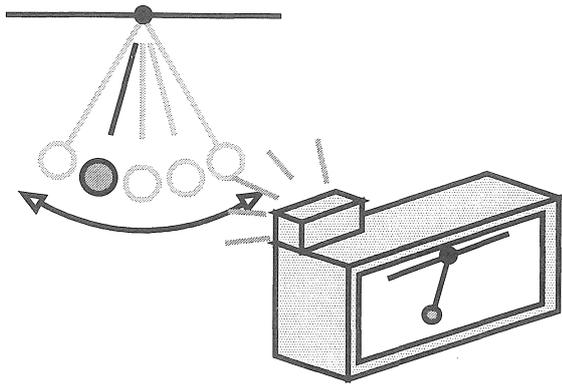


図 1 ストロボ法の原理

2.計測方法

2-1 ストロボ法

ストロボ位相シフト干渉法は、高速運動物体の瞬間的な状態を計測することが可能なストロボ法と、微小振動振幅を高精度に計測する位相シフト法からなる。

ストロボ法は、カメラのフラッシュを用いることで振動する物体の瞬間的な状態を広範囲に画像として得る方法である。動作原理を図 1 に示す。暗闇の中に高速振動物体とシャッターを開いたカメラを置き、撮影可能な状態にしておく。振動周期より十分に短い照射時間のパルス光を高速振動物体に照射することにより、パルス光を照射した時の状態がフィルムに撮影される。動的状態の瞬間的な状態を、静的状態として計測が可能になる。パルス光が照射された瞬間の状態を計測できることから、照射タイミングを調整することにより任意の振動状態の解析が可能になる。

2-2 位相シフト法

マイケルソン干渉計を用いた位相シフト法の原理を図 2 に示す。光源には波長λのレーザを用い、時間に対して矩形パルス光が参照面と試料面に照射される。レーザ光はハーフミラーにより 2 分光され、参照面にて反射する参照光と、試料面にて反射する物体光となる。それぞれの面の反射光が干渉し、干渉位相差による干渉縞が発生して、観測面で干渉光強度  $I_i(x,y,t)$  が計測される。

干渉光強度は計測位置(x,y)と時間 t の関数であり、参照面を N 回に分けて段階的にシフトさせるごとに干渉光強度を計測する。参照面を変位させることにより位相差  $\alpha_i$  を与え、干渉光強度  $I_i(x,y,t)$  を測定する。 $\alpha_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ )シフトさせた時に観測される干渉光強度  $I_i(x,y,t)$  は、

$$I_i(x,y,t) = I_0 [1 - \gamma \cos\{\phi(x,y,t) + \alpha_i\}] \quad (1)$$

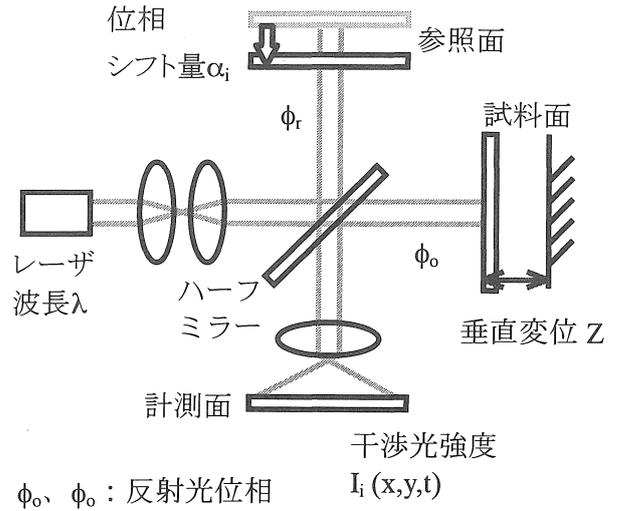


図 2 位相シフト法の原理

と表される。ただし、 $I_0(x,y)$  は光源の光強度や光学系により定まる定数であり、時間の経過による変化がない。 $\gamma$  は、参照面と試料面の反射率などによるコントラスト定数である。 $\phi(x,y,t)$  は干渉位相であり、参照面の反射光位相  $\phi_r(x,y,t)$  と試料面の反射光位相  $\phi_o(x,y,t)$  の差になる。

ここで、位相シフト量  $\alpha_i$  を  $\alpha_i = (i-1)\pi/N$  とし、N 枚の位相シフトされた毎の干渉光強度式(1)より  $\phi(x,y,t)$  は、

$$\phi(x,y,t) = \tan^{-1} \frac{\sum_{i=1}^N I_i(x,y,t) \sin \alpha_i}{\sum_{i=1}^N I_i(x,y,t) \cos \alpha_i} \quad (2)$$

と計算される。本研究においては参照面を 4 段階、すなわち  $N=4$  の方法を用いる。これを 4 バケット法と呼ぶ。

使用したレーザの波長をλとすると、振動する試料表面の垂直方向の基準位置からの変位  $Z(x,y,t)$  は、

$$Z(x,y,t) = \frac{\lambda}{4\pi} \phi(x,y,t) \quad (3)$$

と計算される<sup>6)</sup>。参照面を段階的に位相シフトさせた毎に光強度を計測することで、ランダムに生じる光学的ノイズ分などを考慮に入れずに試料表面の垂直方向の変位情報のみを高精度に得ることができる。計測された干渉光は光強度情報であり、位相シフト法を用いることにより位相情報に変換される。

2-3 周期振動計測方法

ストロボ法の利用による周期振動計測におけるパルス光の設定を図 3 に示す。周期的に高速振動する物体を計測するときには振動周期に対して時間的に、振動振幅に対して空間的に、十分短いパルス光を照射する必要がある。この場合、パルス照射時間が短くなる

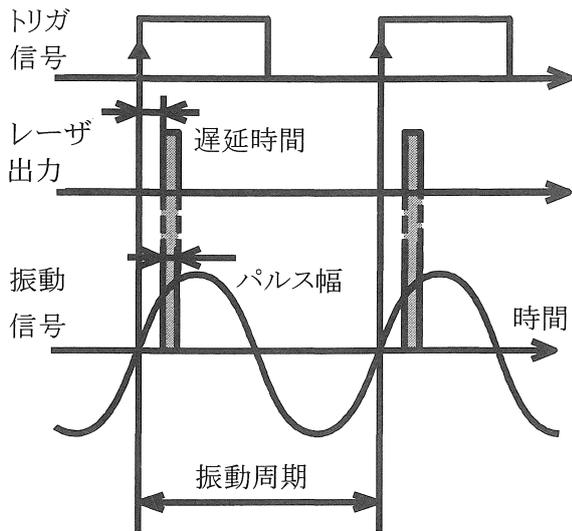


図3 周期振動計測のパルス設定

ために、1 回のパルス光照射では光量不足により高いコントラストを得ることが困難になる。ここで振動に同期して繰り返しストロボ光照射を行うことで、十分な光量が得られ高いコントラストを得ることが可能になる。同期信号を図3に示す。

照射タイミングの調整には、振動信号に同期したトリガ信号を時間基準として用いる。トリガ信号のアップエッジに対する遅延時間を調整することにより、異なった振動状態の計測が可能である。振動周波数が  $f$  Hz のときに計測する振動位相  $\phi_d$  °の時の遅延時間  $t_d$  s は、

$$t_d = \frac{\phi_d}{360f} \quad (4)$$

と計算される。

同条件にて撮影された画像を重ね合わせることで、さらに高いコントラストの画像を得ることが可能である。本計測方法は同じ状態を繰り返す周期方法に対して有効な方法である。レーザ光を繰り返し照射することなくストロボ位相シフト干渉法を用いた計測を行うためには、数 W の出力を数  $\mu$ s 幅のパルス発光が可能である安価なレーザの開発が必要である。

### 3.計測装置

#### 3・1 装置構成

実験装置の構成を図4に示す。光学系には、システムの小型化が可能で、光学的ノイズを低減できるフィズー干渉計で構成される。光源には、マルチモード赤色半導体レーザ(波長 670nm、出力 5mW)を用いる。半導体レーザは数百 ns 程度の極短パルスを照射することが可能である。参照面には、PZT(圧電素子)が取り付けられ、試料と参照面間の距離を変化させることにより位相シフトを行う。試料を駆動するドライバ回路、干渉縞を撮影するビジコンカメラ、画像を格納し重ね合

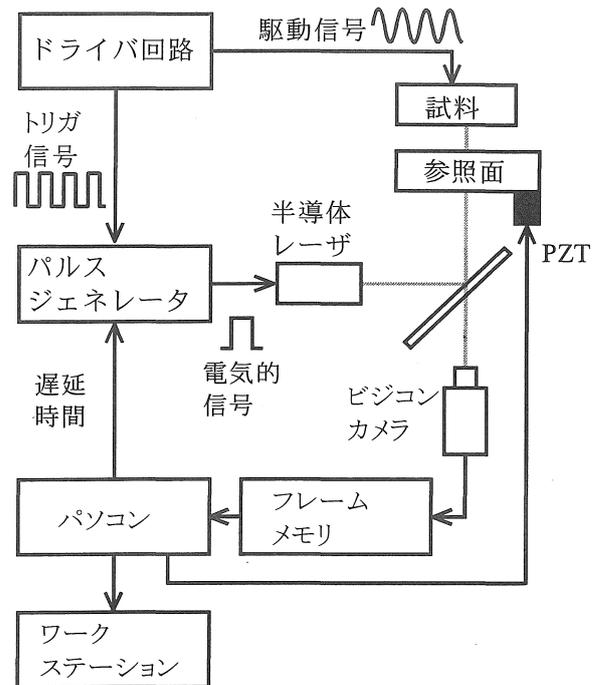


図4 装置構成

わせ処理を行うフレームメモリ、装置の制御を行うパソコンが用いられる。ドライバ回路より駆動信号に同期したトリガ信号がパルスジェネレータに入力され、パルスジェネレータは駆動信号に一定の遅延時間を加えて照射タイミング調整し、半導体レーザに電気的信号を印加して発光させる。レーザに印加される信号は矩形波状の電圧信号であり、レーザは ON / OFF 制御される。レーザ光の照射時間は、駆動信号周期の約 1%にあたる 200ns とする。

#### 3・2 計測試料

振動型デバイスのひとつに USM がある<sup>7)</sup>。USM は微小振動を駆動源とするため、磁界を作る必要がなくコイルなどが不要となり装置の小型化が容易に可能である。USM には、円管状の圧電素子の半径方向や長手方向の伸縮を利用するタイプや、平面上に配置された圧電素子の厚み方向の伸縮を利用するタイプがある。

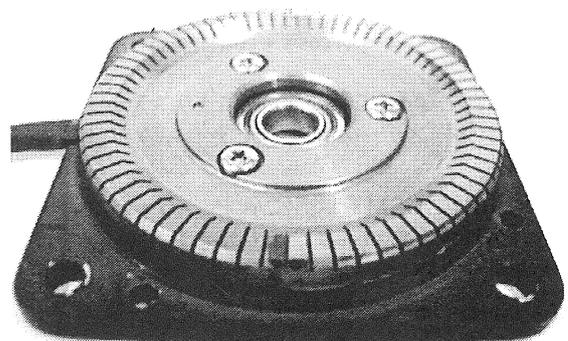


図5 計測試料

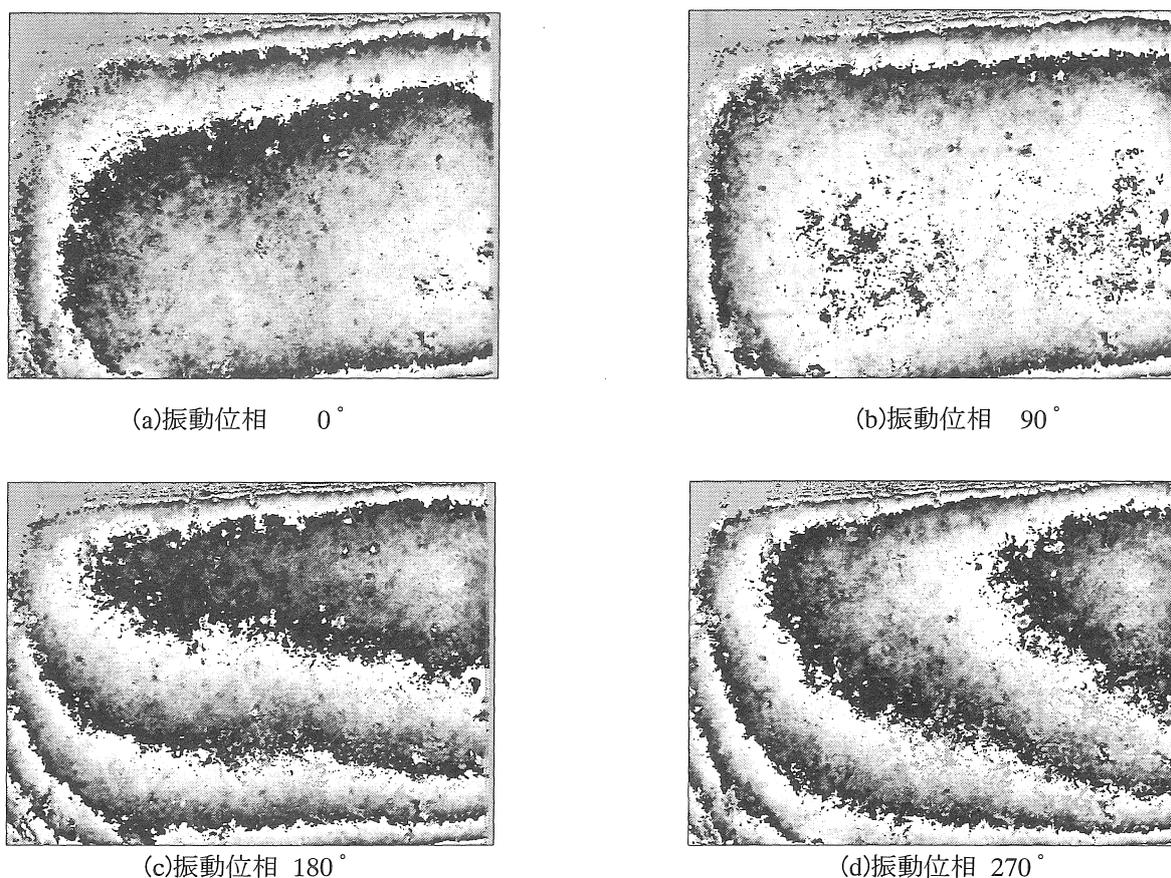


図 6 干渉位相画像

これらは駆動力の伝達方法の違いにより種類分けされる。

本研究での被計測物体は、表面波型 USM を用いる。表面波型 USM の動作は、ステータの下部に円周状に取り付けられた 2 系統の圧電素子により動作する。それぞれの系統の圧電素子は空間的に  $\pi/2$  ずれた位置に配置される。それでこの圧電素子に時間的に  $\pi/2$  ずれた交流電圧を印加する。圧電素子への印加電圧を  $\sin \omega t$ 、 $\cos \omega t$ 、圧電素子の空間配置を  $\sin x$ 、 $\cos x$  とすると、両者がつくる合成振動は、

$$\sin \omega t \sin x + \cos \omega t \cos x = \cos(\omega t - x) \quad (5)$$

となり進行波となる。この進行波によりステータに楕円振動が発生し、ステータに接触したロータが回転駆動する。

計測に用いた USM を図 5 に示す。ステータの上部に取り付けられていたロータは取り除かれている。ステータの大きさは直径 50mm、高さ 5mm であり、表面に矩形凸部 (2mm×3mm) が 72 個並んでいる。圧電素子により発生する進行波の振動を拡大するためにステータ表面はスリットの入った矩形凸部になっている。ステータは鋼鉄製である。駆動周波数は、約 39.2kHz である。

#### 4. 計測結果及び考察

計測には、参照面を 4 回位相シフトして計測を行う 4 バケット法を適用して、計算処理を加えることにより干渉位相画像を得る。得られた干渉位相画像の大きさは 480×640 画素である。各画素は干渉位相値を示し、黒色の画素では  $-180^\circ$  を、白色の画素では  $+180^\circ$  の値を示し、グレイイメージで表されている。

式(2)の結果は  $360^\circ$  の整数倍の自由度を残している。すなわち得られた値が連続するように  $360^\circ$  の整数倍を加算または減算する必要がある。干渉位相値が  $+180^\circ$  から  $-180^\circ$  に変化する場合は  $360^\circ$  を加算し、干渉位相値が  $-180^\circ$  から  $+180^\circ$  に変化する場合は  $360^\circ$  を減算し、値の変化が連続するように調整する。

同じ干渉位相値をつなぎ合わせることで、同じ高さを示す干渉縞ができる。複数できた干渉縞の形状から、試料表面の形状を判別することができる。干渉位相値で 1 周期分が干渉波長に相当することから、干渉縞の間隔から表面の傾きを判別することができる。本研究では、波長 670nm のレーザを使用しているので、干渉波長は 335nm になる。

超音波モータにはドライブ回路を用いて 39.2kHz の

駆動周波数を与え、連続駆動させたときの振動状態の計測を行った。計測箇所はステータ表面に並ぶ矩形凸状のひとつである。遅延時間を調整することにより振動位相の  $0^\circ$  から  $360^\circ$  まで位相間隔  $15^\circ$  毎の計測を行った。遅延時間は式(4)を用いることにより計算される。位相間隔  $15^\circ$  は、時間にして  $1.06\mu\text{s}$  である。計測により得られた干渉画像に処理を加えることにより得られた干渉位相画像の中から振動位相  $0^\circ$  (遅延時間:  $0.0\text{s}$ )、 $90^\circ$  (遅延時間:  $6.37\mu\text{s}$ )、 $180^\circ$  (遅延時間:  $12.7\mu\text{s}$ )、 $270^\circ$  (遅延時間:  $19.1\mu\text{s}$ ) の時の状態の干渉位相画像を図 6 に示す。干渉位相画像の左側が超音波モータの中心軸に近く、右側が中心軸から遠くなる。

干渉縞の間隔は観測面の傾斜を表す。図 6 (a)(b)では干渉縞が少なく試料表面が平坦であることを示している。干渉画像の干渉縞形状より矩形凸部表面では中央部分が高く、中央から離れるにつれ低くなり、矩形の角に当たる部分は丸みを帯びている。図 6 (c)(d)では干渉縞が増加し、観測面に傾斜が存在している事を示している。図 6 (c)では観測面の水平方向に見られる干渉縞が、図 6 (d)では観測面の左下から右下の方向に並んだ干渉縞が見られる。前者は画像下側が奥方向に変化していること意味し、後者は画像左下側が奥方向に変位していることを意味する。これらの図より画像左側(超音波モータの中心軸に近い部分)が、他の部分と比較して大きな振幅で振動していることがわかる。画像右上方向では干渉縞の数が少なく、また干渉縞の形状の変位も少ないため、観測面は主に上下方向の変位を繰り返し、傾斜角の変化が小さいこともわかる。

各状態の干渉位相画像を比較すると、振動位相の変化に同期して、各画素での干渉位相値の変化による干渉縞の濃淡の変化、表面の頂点を示す干渉縞の中心位置の移動と、干渉縞の形状の変化が確認できる。

得られた干渉画像内で、駆動信号の振動位相の変化に対する定点の干渉位相値変化の振動周期が、駆動周波数と一致した物理的に連続したものとなるように補正を加えた結果を図 8 に示す。解析した各点を図 7 に示し、A 点(160,240)、B 点(320,240)、C 点(480,240)の 3 点である。A 点は中心軸に近く、C 点は中心軸から遠く、B 点はステータの凸部のほぼ中心である。図 8 は干渉位相で 1 波長の変化したと考え、得られた干渉位相値に位相補正を加えて示している。図 8 より振動位相の変化に同期して干渉位相値が変化していることがわかる。しかし、解析した点により異なった干渉位相値の変化を示している。振動振幅は各点で多少のばらつきがあるものの A 点では、約  $1260^\circ$ 、B 点では、約  $1080^\circ$ 、C 点では、約  $970^\circ$  になる。中心軸に近いほど、振動振幅が大きいことがわかる。得られた干渉位相値の変化による振動振幅は、式(3)を用いることで、A 点では約  $1.2\mu\text{m}$ 、B 点では約  $1.0\mu\text{m}$ 、C 点では約  $0.9\mu\text{m}$  と求められた。このことは、中心軸に近い部分の振幅は、遠い部分よりも大きいことを意味する。この結果は超音波モータのステータとロータの接触の最適化を検

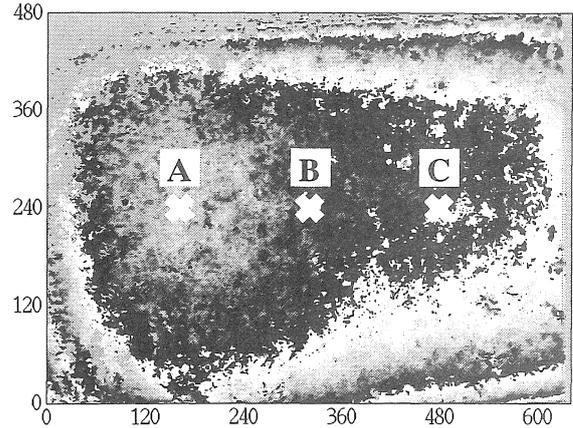


図 7 ステータ表面の解析箇所

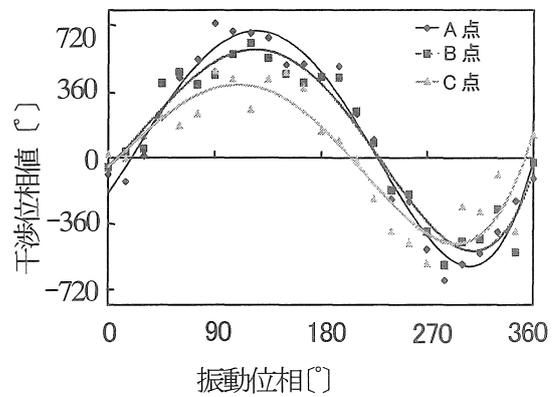


図 8 干渉位相値の変化

討する上で、重要な役割を果たすと考えられる。

5.まとめ

本稿では、ストロボ位相シフト干渉法を用いることによって、高速微小振動する物体の表面全体の振動分布を可視化する方法を述べた。周期的に振動する超音波モータのステータ表面の振動状態をストロボ位相シフト干渉法を用いることにより、干渉位相画像として得ることができた。

得られた干渉位相画像を解析することにより、計測に用いた超音波モータの表面では、中心からの距離により異なった振動を持ち、中心に近い側が遠い側よりも振動振幅が大きいことを確認できた。また、振動位相の変化に同期してステータ表面の頂点が振動すること、表面の傾きの変化より楕円振動をすることが確認できた。

本稿で述べた計測方法は、高速微小振動の可視化を可能にし、振動型デバイスの高性能化に役立つ。また、計測対象として振動型デバイス以外にも高速微小する振動物体全体に応用できると考える。

## 参考文献

- 1). 江刺正喜, 藤田博之, 杉山進 : マイクロマシーニングとマイクロメカトロニクス, 培風館, 東京, 1992.
- 2). K.Yoneda et al., "Laser probe for Surface Acoustic Wave Measurements", Jpn. J. Appl. Phys. Suppl., Vol.20, pp.61-64, 1981
- 3). S.Shiokawa et al., "Study of SAW Propagation Characteristics by Frequency-Translated Holography", Appl. Phys.Lett. , Vol.27, No.8, pp.419-420, 1975
- 4). D.Royer and E.Dieulesaint, "Optical probing of the mechanical impulse response of a transducer", Appl.Phys. Lett., Vol.49, No.17, pp.1056-1058, 1986
- 5). Y.Togami et al., "Observation of Bulk Wave and Surface Waves through Side Planes of Several Cuts of LiNo<sub>3</sub> SAW Devices", J. Appl. Phys., Vol.49, No.6, pp.3587-3589, 1978.
- 6). 中野健他: ストロボ位相シフト干渉法を用いた超音波モータ表面の振動分布計測, 日本機械学会論文集(C編), 62, pp.2237-2243, 1996.
- 7). 内野研二 : 圧電/電歪アクチュエータ, 森北出版株式会社, 東京, 1994.

(受理 平成13年 3月19日)