

ホログラフィック振動変位パターン抽出への パラメトリックスプライン関数の応用に関する一考察

A Study on the Application of Parametric Spline Function to Extract of Vibrational Displacement Pattern from Holographic Image

土屋 隆* 高橋 吾郎* 谷口 正成*
Takasi TSUCHIYA* Gorou TAKAHASHI* Masanari TANIGUCHI*

赤崎 勇* 高木 相**

Isamu AKASAKI* Tasuku TAKAGI**

*名城大学 理工学部

**日本大学 工学部

*Meijo University

**Nihon University

Keywords : ホログラフィ(Holography) , 微小変位(Microscopic displacement) ,
振動(Vibration) , パターン計測(Pattern measurement) ,
スプライン関数(Spline function) , 補間曲線(Interpolated Curve)

連絡先 : 〒468 名古屋市天白区塩釜口 1-501 名城大学大学院理工学研究科 土屋 隆
TEL:052(832)1151 , FAX:052(832)1244 , E-Mail:c3962007@meijo-u.ac.jp

1. はじめに

周知のごとく、計測技術として基本的に要求される条件としては、非接触、非破壊、高分解能、高感度、空間的、同時並列計測などが挙げられる^[1]。また、これらの基本的な条件を満足させるには、光波、電磁波の媒体を利用した波動応用計測は最も有効な手段といわれている^{[2][3]}。

とくに、ホログラフィ干渉計測法は光学系の精度、ならびに、環境に対して厳しい条件が要求されるが、被測定物体の表面、形状、材質の影響を受けず、微小な振動変位を直接パターンによる計測が可能であるなど、他の光学式計測法と比較して多くの特徴を有している^{[4][5]}。

しかし、ホログラフィ干渉計測法にも様々な解決すべき課題を有している^{[6][7]}。その課題の一つとして、被測定物体の振動変位分布の定量化計測には多大な労力、および、時間を要し、さらに、その3次元可視化計測は困難であった。

筆者らはホログラフィと図形処理技術とを組み合わせた新しい計測システム(ホログラフィックパターン計測システム: HPMS)を独自に開発した^{[8][9]}。これによって、非接触で被測定物体の微小な振動変位の3次元可視化計測が可能となった。また、それを機構デバイスの熱変形や振動計測に応用し、その有効性を得た^[10]。

しかし、現計測システムでは、干渉縞の情報抽出を手作業で行うため、誤差の影響や処理時間が問題となる場合がある。したがって、干渉縞の情報を的確に抽出するための手法、ならびに、干渉縞の情報が少なくとも振動変位分布を精度よく処理する必要がある。

本研究では、干渉縞の情報を適格に抽出する一手法としてパラメトリックスプライン関数の応用について調査、検討を試みた。今般、諸学兄のご意見を賜りたくHPMSの概要とパラメトリックスプライン関数による振動変位パターンを抽出した結果の一部を報告する。

2. ホログラフィックパターン計測

新しく開発したホログラフィックパターン計測システム (HPMS) はホログラフィ干渉計測装置と図形処理装置とを組み合わせたものである。以下、ホログラフィの原理とその計測装置、ならびに、図形処理装置の概要を述べる。

2-1 ホログラフィの原理と振動計測への応用

ホログラフィの基本原理は図1に示すように、被測定物体にレーザ光を照射し、その反射光と参照光をともにホログラム乾板に重ねて記録する手法である。その乾板を現像処理後、参照光を照射すると被測定物体が立体的に再生される。

この手法を振動計測に応用する場合、時間平均法、ストロボ法、あるいは、実時間平均法が用いられる。とくに、時間平均法は最も有効で簡便な手法である^[11]。この手法で被測定物体を記録、再生した場合、被測定物体上の任意の点 r の変位量を $d(r)$ とすると、その点 r の再生光強度 $I(r)$ は、次式のように表される。

$$I(r) = kJ_0^2 \left[a(r) \frac{2\pi}{\lambda} (\cos \theta_1 + \cos \theta_2) \right] \quad (1)$$

- ただし、 k : 比例定数
 λ : 光源の発振波長
 $a(r)$: 被測定振動物体の任意の点 r の振動変位
 θ_1 : 変位方向と照射光との角度
 θ_2 : 変位方向と反射光との角度

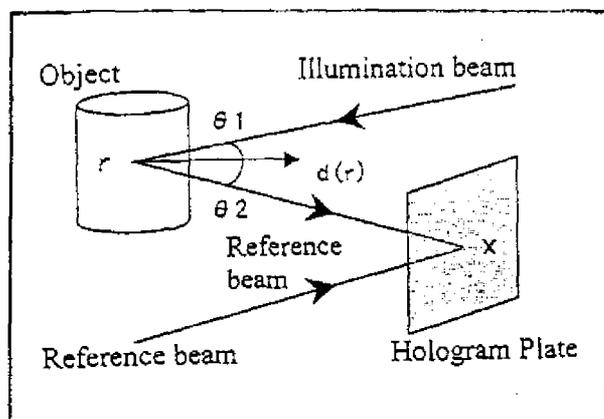


図1 ホログラフィの基本原理

と表される^[12]。

したがって、時間平均法で記録、再生したホログラム像には被測定物体とともに、およそ $\lambda/4$ (光源を He-Ne Gas Laser とすれば、約 $0.16 \mu\text{m}$) ごとの振動変位に応じて干渉縞が観測される。したがって、その縞の数とパターンから被測定物体の振動変位分布を測定することが可能である。

2-2 ホログラフィ干渉計測装置

本研究では、前項で述べたホログラフィの基本原理にもとずいて図2に示すような光学機器で構成したホログラフィ干渉計測装置を作製した。本装置では、耐震動、対衝撃を考慮して、光源、ならびに、全ての光学機器、被測定物体を定盤の上に固定した。

光源には、He-Ne Gas Laser (発振波長 $\lambda : 6328 [\text{\AA}]$) を使用した。光源からのレーザ光をビームスプリッタで照射光と参照光に分光 (分光比 5 : 1) 後、いずれも対物レンズで光束を広げ、照射光を被測定物体に、参照光をホログラム乾板に直接照射した。また、被測定物体からの反射光と参照光との光強度比を最適な条件にするために偏光フィルタで調整した。

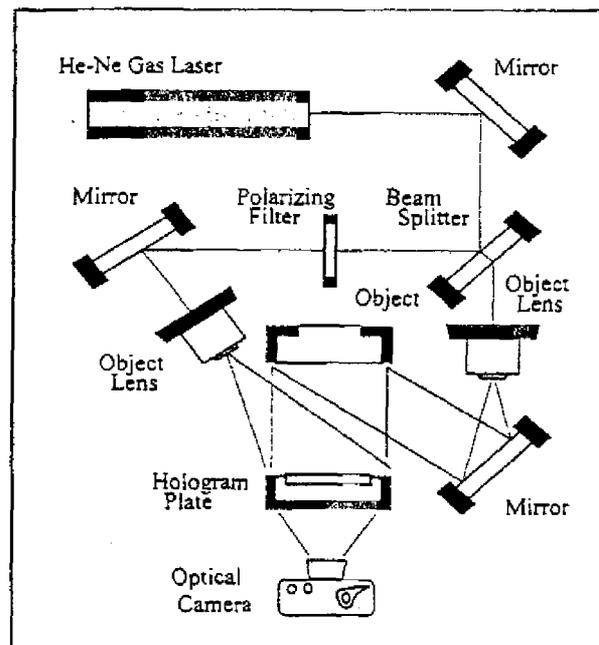


図2 ホログラフィ干渉計測装置

2-3 変位分布の定量化とその3次元図形表示

HPMSでは、ホログラフィ干渉計測法で得られた干渉縞の情報から被測定物体の振動変位分布の定量化とその3次元可視化を目的として図3に示すようなパーソナルコンピュータを利用した簡便な図形処理装置を独自に開発した。

本装置では、座標入力装置（デジタイザ）とキーボードによって干渉縞のパターンと振動変位量を2次元で入力する。入力された情報は微分オペレータ方式によって不足情報を補間し、平滑化後、あらかじめ指定しておいた照射光と反射光の入射角度を考慮して変位量を補正する。それを基礎データとしてフロッピーディスクに記録する。その基礎データをもとにワイヤフレーム手法によりCRTディスプレイ、および、X-Yプロッタに3次元図形表示される。

3次元図形表示には、無限遠点から俯瞰した平行投影法を利用した。これにより視線を決定する方位角と俯角を任意に設定することによって、あらゆる角度からの3次元図形表示が可能である。

また、本装置では、3次元図形表示をする際、3次スプライン関数によるサンプルデータの補間を行った。これによって、干渉縞の情報の手作業入力の簡略化、および、干渉縞の情報が少なくても精度よく3次元図形表示が可能となった^[13]。

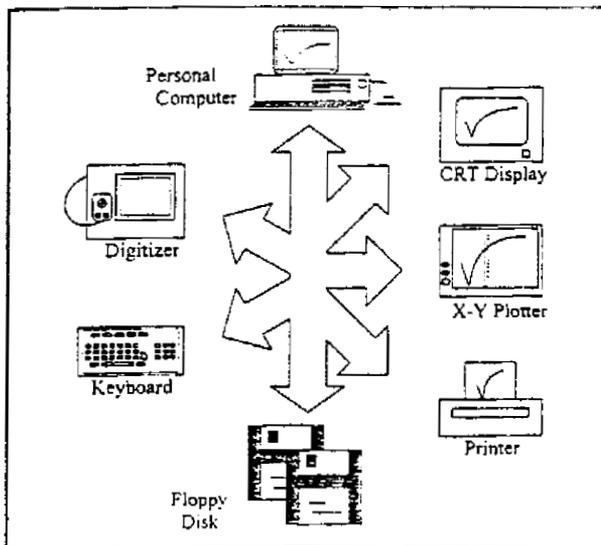


図3 3次元図形表示装置

3. 音響計測と振動計測

3-1 被測定振動板と実験方法

本実験に使用した被測定振動板は、材質をKS鋼板（厚さ：0.12mm）とした。また、その形状は周辺を固定した○形（直径：46mmの円形）、△形（一辺：62mmの正三角形）、□形（一辺：40mmの正方形）とし、さらに、各振動板の振動面積を一定とした。一方、振動板の駆動は電磁形電気音響変換器の駆動コイルを使用した。図4に示すように、今回の実験では、その駆動コイルに、正弦波の交流電圧を印加し、駆動周波数を変化させた場合における振動板から発生する音圧レベルの測定と、その振動板の表面の振動パターンを測定した。

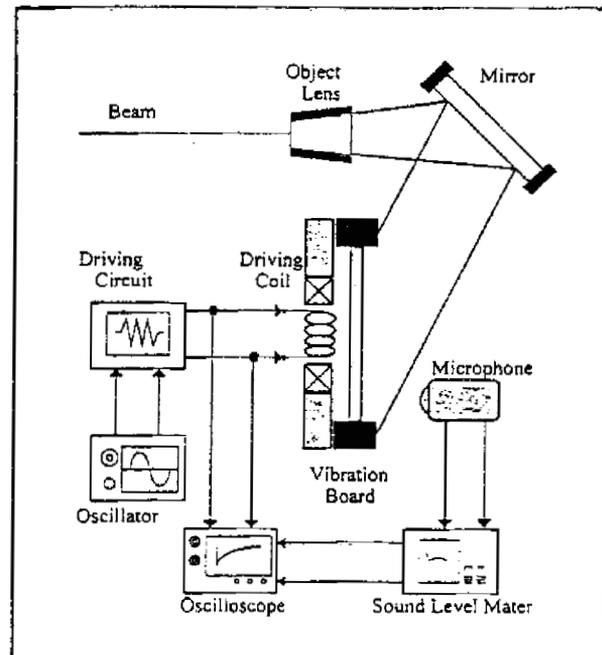


図4 被測定振動板の音響測定装置

3-2 被測定振動板の振動変位パターンの測定

被測定振動板（○形、△形、□形）に正弦波交流電圧を印加し、駆動周波数を可聴周波数帯において変化させたとき、被測定振動板より発生した音圧レベルを測定した結果の一例を図5に示す。なお、図5（a）は○形、（b）は△形、（c）は□形振動板の音響特性を示す。なお、音響測定には、電子計測器株式会社のTYPE1052を使用した。

図5に示すように、各振動板の音響特性は300Hz~20KHzにおいて観測された。また、その特徴として、共振周波数が○形振動板では1800Hz、△形振動板では1600Hz、□形振動板では1900Hz、とほぼ等しい周波数において観測された。また、この測定結果から、○形振動板に比べ、△形、□形振動板は高域まで音圧レベルが高い傾向を観測した。

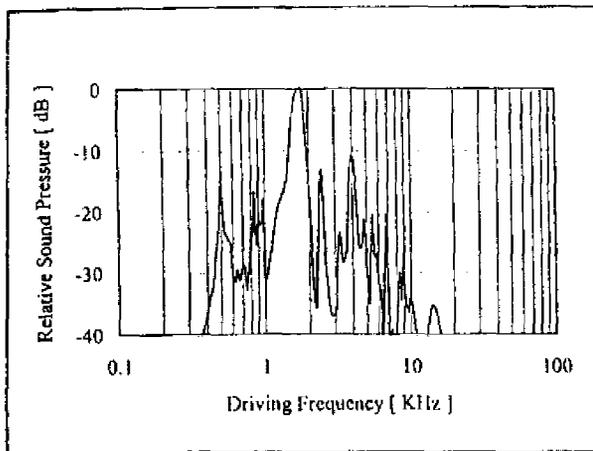


図5(a) ○形振動板の音響特性

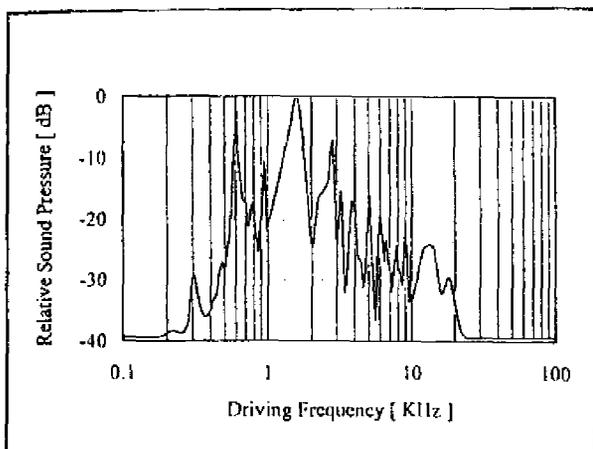


図5(b) △形振動板の音響特性

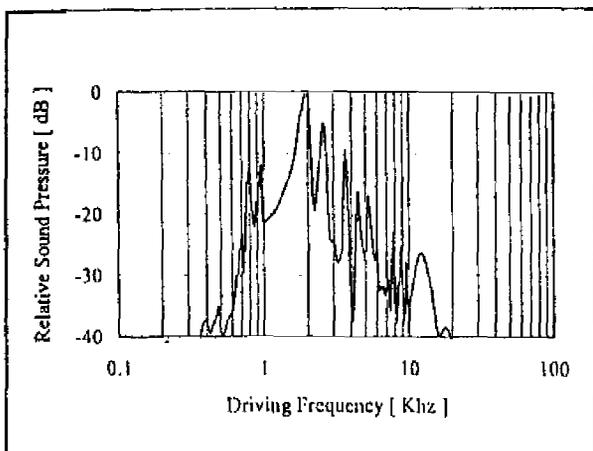


図5(c) □形振動板の音響特性

一方、その時各振動板の表面をホログラフィ干渉計測法で記録再生したホログラム像の一例を図6に示す。なお、図6の(a)は○形振動板で、駆動周波数970Hz、(b)は同振動板で、1800Hzの場合の振動パターンを示す。また、(c)は△形振動板で、駆動周波数1100Hz、(d)は同振動板で、1600Hz、さらに、(e)は□形振動板で、駆動周波数2200Hz、(f)は、2600Hzの場合の振動パターンを示す。なお、いずれの場合も、各振動板を上記の周波数で連続駆動させ、そのうち8秒間を時間平均法によって記録、再生した。

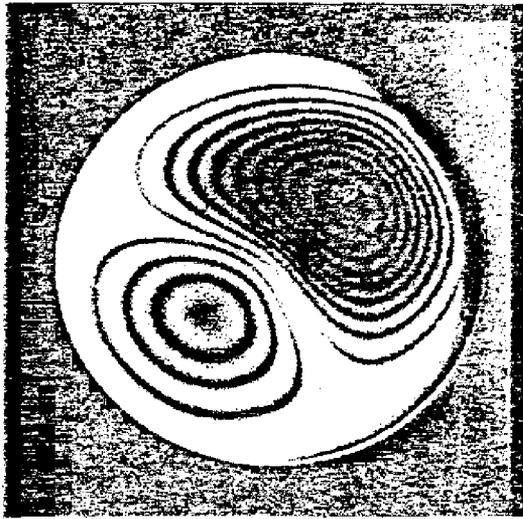
図6に示すように、各振動板の振動振幅、および、その振動パターンに応じた干渉縞を観測した。これらの図に示すように、被測定振動板の形状ならびに、その駆動周波数によって、それぞれ特有の振動変位パターンを観測した。

3-3 振動変位パターンの3次元図形表示

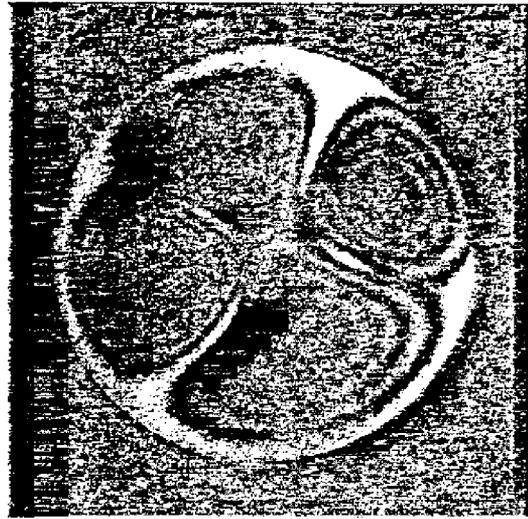
図6の(b),(c),(f)で示したホログラム再生像の干渉縞の情報をもとに、被測定振動板の振動変位分布を算出し、その結果を3次元図形表示した一例を図7(a),(b),(c)に示す。

図7に示すように、各振動板とも固定した周辺を基準として、駆動周波数に応じて、異なったパターンで振動する様子が観測された。

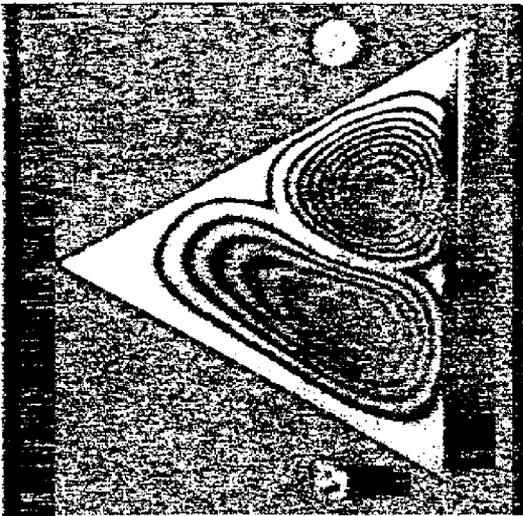
したがって、音響特性の測定のみでは、振動パターンの解析を行うことは困難であるが、本計測システムを応用することで、振動変位分布の詳細な解析が可能である。とくに、干渉縞のパターンから振動変位分布を3次元図形表示することによって、各振動板の全体の振動の様相と形状の違いによるパターンへの影響に対する様相を把握することができる。



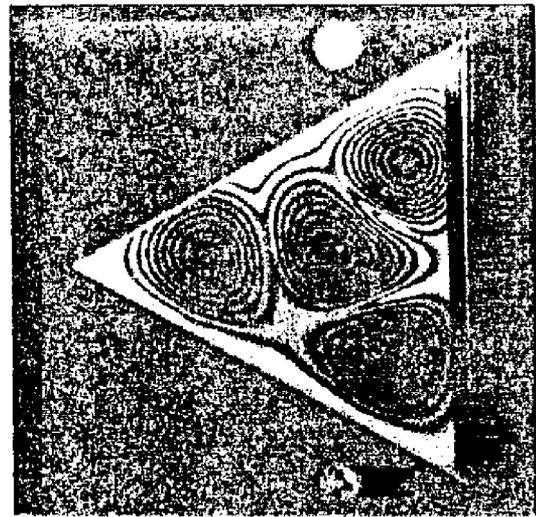
(a) ○形振動板 (駆動周波数: 970Hz)



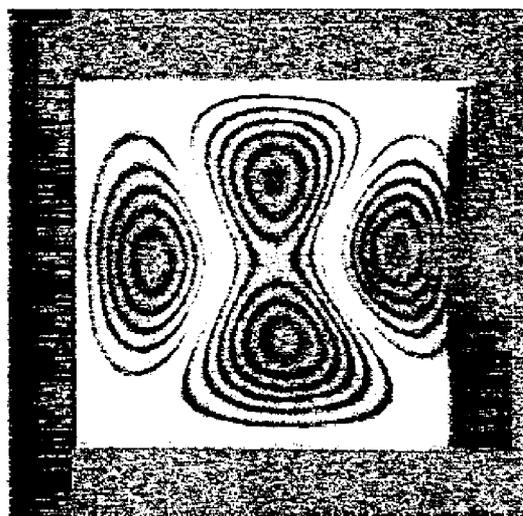
(b) ○形振動板 (駆動周波数: 1800Hz)



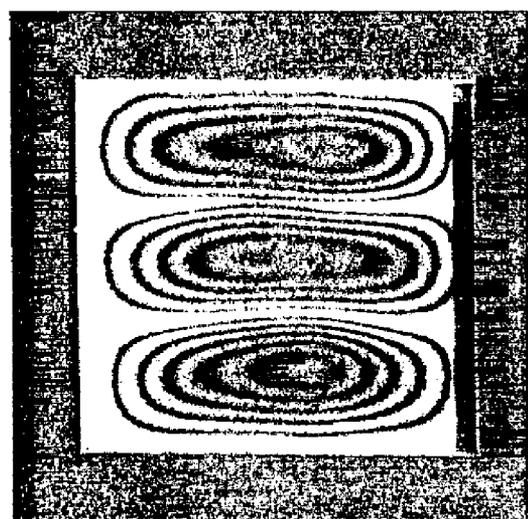
(c) △形振動板 (駆動周波数: 1100Hz)



(d) △形振動板 (駆動周波数: 1600Hz)

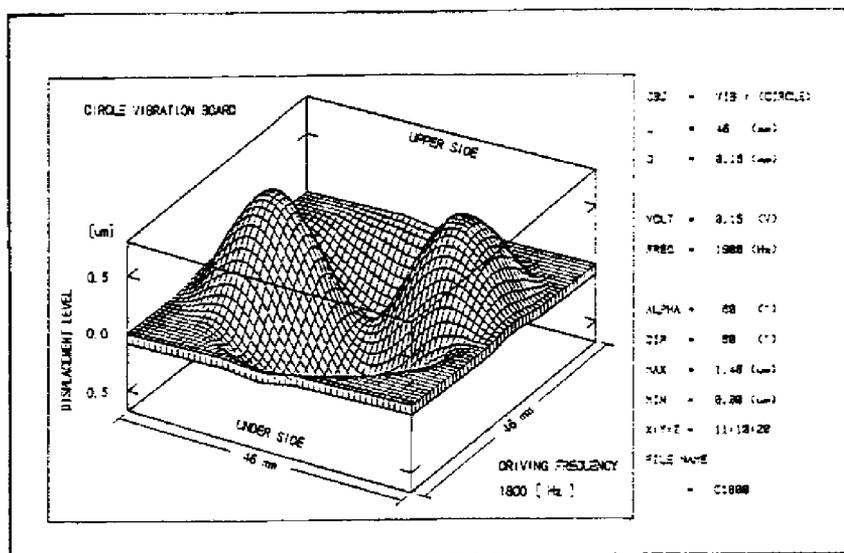


(e) □形振動板 (駆動周波数: 2200Hz)

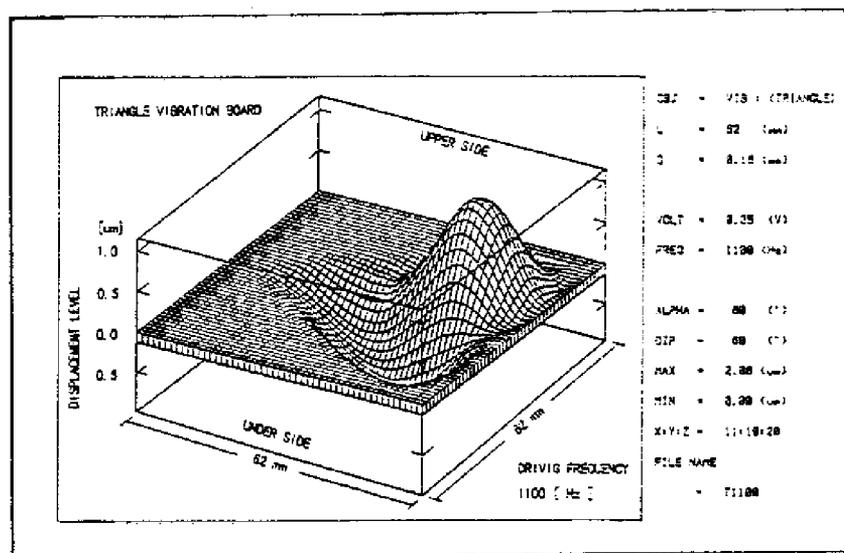


(e) □形振動板 (駆動周波数: 2600Hz)

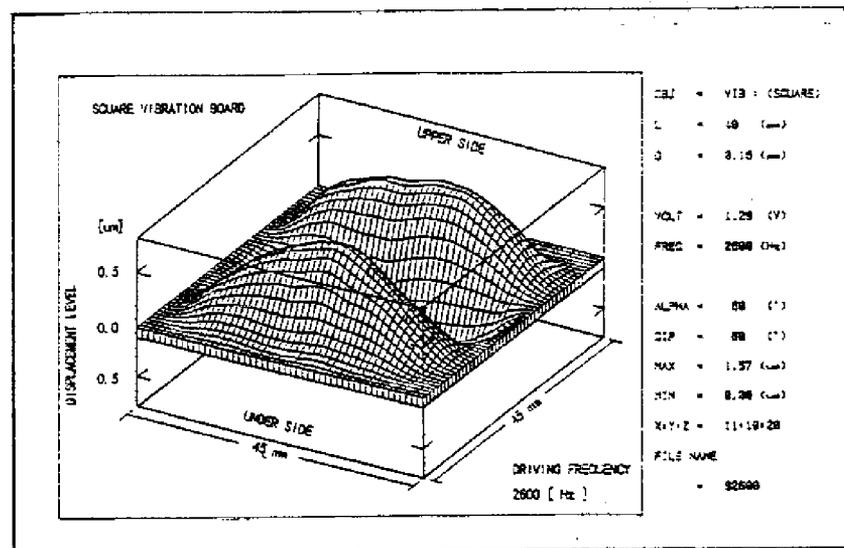
図6 被測定振動板のホログラム再生像



(a) ○形振動板 (駆動周波数 : 1800Hz)



(b) △形振動板 (駆動周波数 : 1100Hz)



(c) □形振動板 (駆動周波数 : 2600Hz)

図6 被測定振動板の振動変位パターンの3次元図形表示

4. スプライン補間関数^{[14][15]}

4-1 スプライン関数の基本式

スプライン関数は分割された区間に対して、それぞれ異なった多項式で構成される滑らかな区分的多項式である。また、スプライン関数は以下に示す2つの条件を満たす m 次の関数 $S(x)$ である。

①各小区間 $q_i \leq x \leq q_{i+1}$ ($i=1, 2, \dots, n-1$)

で $S(x)$ は m 次かそれ以下の多項式

$$a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_mx^m$$

とする。

② $S(x)$ とその $1, 2, 3, \dots, m-1$ 階微分

$$(S^{(1)}(x), S^{(2)}(x), \dots, S^{(m-1)}(x))$$

は全区間 $q_1 \leq x \leq q_n$ で連続とする。

一般に、 n 個の節点 $q_1, q_2, q_3, \dots, q_n$ を持つ m 次のスプライン関数 $S(x)$ は切断べき関数を用いると次式のように表される。

$$S(x) = P(x) + \sum_{i=1}^n \alpha_i (x - q_i)^m \quad (2)$$

ただし、 $P(x)$: m 次の多項式

α_i : 定数係数

4-2 (k-1) 次のスプライン関数

($k-1$) 次のスプライン $S(x)$ は $B_{i,k}$ を基底とする1次結合、すなわち、

$$S(x) = \alpha_1 B_{1,k}(x) + \alpha_2 B_{2,k}(x) + \dots + \alpha_n B_{n,k}(x)$$

$$= \sum_{i=1}^n \alpha_i B_{i,k}(x) \quad (3)$$

と表すことができる。

したがって、($k-1$) 次のスプライン関数 $S(x)$ は与えられたサンプルデータ

$$(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3), \dots, (x_n, y_n)$$

に対して、

$$y_i = S(x_i), \quad (i=1, 2, 3, \dots, n)$$

を満足するように、係数 α_i ($i=1, 2, 3, \dots, n$) を決定することによって得られる。

4-3 パラメトリックスプライン関数

パラメトリックスプライン関数は x 座標、 y 座標との間の関係が具体的な関数で表されていない場合でもサンプル点の補間曲線を容易に求めることができる。パラメトリックスプライン関数の曲線座標 (x, y) は区間 $[0, n-1]$ のパラメータ値 t における、 B -スプラインの値を $B_{i,k}(t)$ とすると、その x 座標、 y 座標は、

$$\left. \begin{aligned} X(t) &= \sum_{j=k-1}^j \alpha_j B_{j,k}(t) \\ Y(t) &= \sum_{j=k-1}^j \beta_j B_{j,k}(t) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ただし、 α_i, β_i : 定数

$B_{i,k}(t)$: ドバア・ノックス

より算出する。

と表される。

4-4 パラメトリック周期スプライン関数

($k-1$) 次のパラメトリックスプライン関数では、その曲線の始点終点での接線ベクトルの方向が必ずしも一致しない。したがって、全サンプルデータを滑らかな曲線とするには、周期スプライン関数の応用が不可欠である。

周期スプラインは奇数 $(2m-1)$ 次のパラメトリックスプラインを用いて周期境界条件を満するように構成すれば得られる。

$$\left. \begin{aligned} X(t) &= \sum_{i=1}^{n-1} \alpha_{i-m} B_{i-m, 2m}(t) \\ Y(t) &= \sum_{i=1}^{n-1} \beta_{i-m} B_{i-m, 2m}(t) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

と表示される。

したがって、上式にサンプル点のパラメータ値 t_i ($i=1, 2, 3, \dots, n$) に対する B -スプライン値を代入すれば、 $(n-1)$ 個の α_i および、 β_i についての連立方程式が得られる。

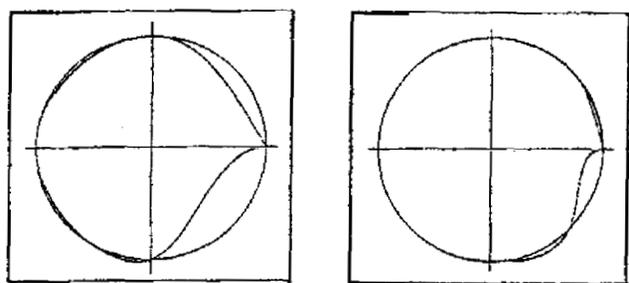
5. パラメトリックスプライン関数による干渉縞の抽出

5-1 サンプルデータ数と誤差

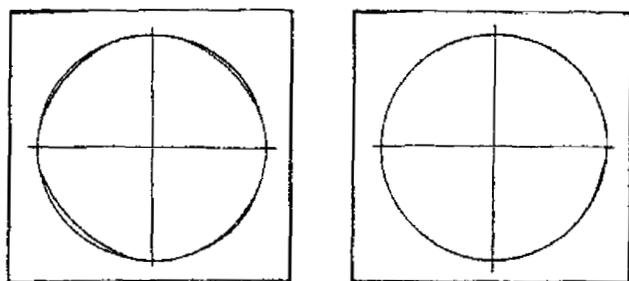
ここで、さらに、基本的な関数をもとに、パラメトリックスプライン関数による補間処理した補間値と真値との誤差について調査した結果の一例を図8に示す。

図8は真円から算出した360個の真値と、その真値の中から任意の数のデータをサンプルし、そのサンプルデータから360個補間した値を示す。図8に示すようにサンプルデータ数が少ない場合、とくに、始点と終点で誤差の生ずる傾向が現れた。そこで問題を解決するため始点と終点にその前後の値を考慮して、補間処理（前後処理と称する）を行った。この手法で真円の中から任意の数のデータをサンプルし、そのサンプルデータから360個補間した値を図9に示す。図9に示すように、前後処理前と比較して、サンプルデータ数が少なくても誤差の影響を受けないことを確認した。

また、サンプルデータの数と誤差率との関係を求めた一例を図10に示す。図10に示すように、サンプルデータの始点と終点を前後処理することによって、誤差率の大幅な軽減が可能となった。



(a) サンプルデータ数: 5 (b) サンプルデータ数: 9
図8 真円とその補間値（前後処理前）



(a) サンプルデータ数: 5 (b) サンプルデータ数: 9
図9 真円とその補間値（前後処理後）

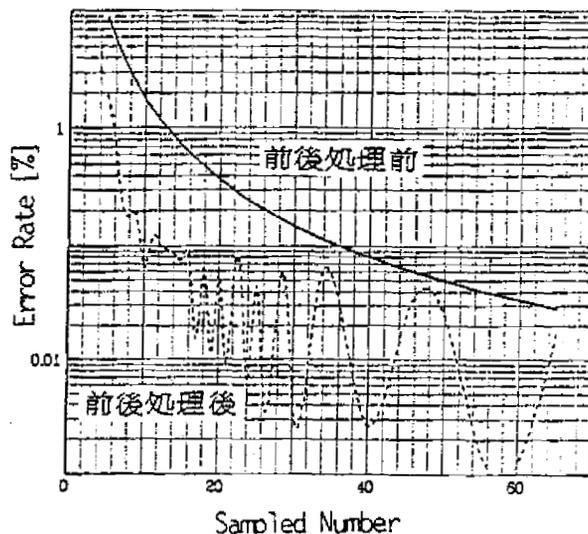


図10 サンプルデータ数と誤差との関係
5-2 スプライン補間による干渉縞のパターン

図6で示したホログラム再生像の干渉縞の情報をサンプルし、そのサンプル点をパラメトリックスプライン関数により補間処理し、その干渉縞の情報を抽出した一例を図11に示す。図11(a)は図6(b)の干渉縞を、図11(b)は図6(c)の干渉縞を、図11(c)は図6(f)の干渉縞の情報をそれぞれパラメトリックスプライン関数によって抽出し、また、補間処理した干渉縞のパターンである。

図11に示すように、1ライン（干渉縞一本）あたり10個以上データをサンプルすることで干渉縞の情報を適格に抽出し、また、表示できる可能性を得た。

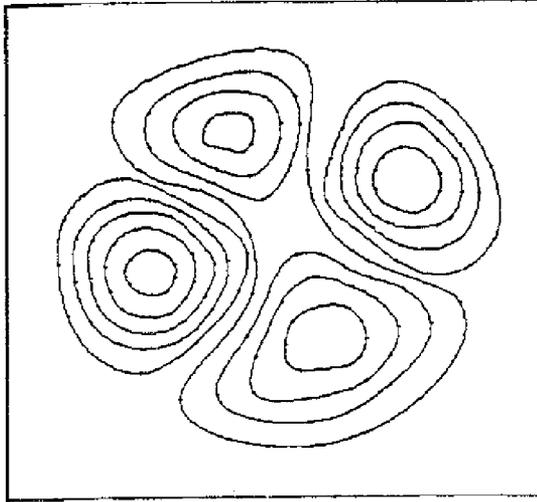
6. おわりに

筆者らが開発した新しい計測システム（ホログラフィックパターン計測システム：HPMS）の概要とその有効性を紹介した。また、HPMSの全自動化を目標としてホログラフィック振動変位パターン抽出について調査、検討をした。その結果、パラメトリックスプライン関数の応用について有効性を得た。とくに、サンプルデータの始点と終点を前後処理することによって、誤差の影響を軽減することができた。

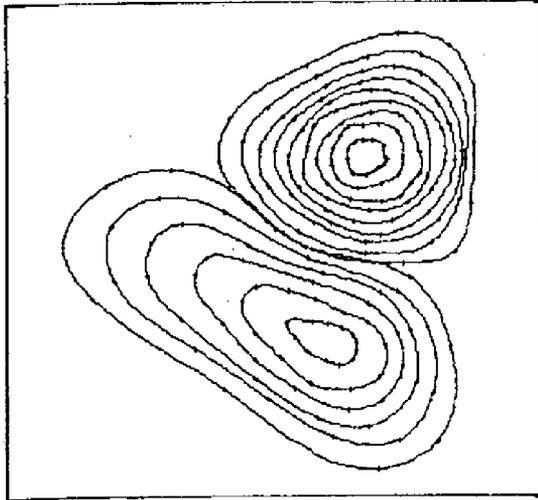
今後の課題として、ホログラム再生像より干渉縞の自動抽出に関する調査、検討が必要と思われる。

参考文献

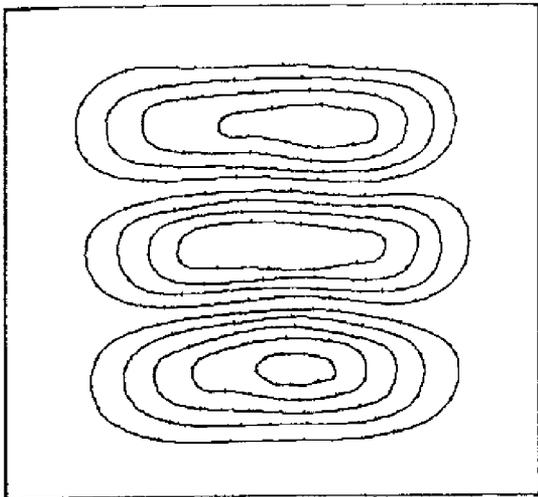
- [1] 高木: "電気・電子応用計測", 朝倉書店, (1989-4)
- [2] 高木: "応用計測通論", 啓学出版, (1983-5)
- [3] 佐藤: "波動応用計測と映像形成", 計測と制御, 29(4), pp. 293-298, (1990-04)
- [4] 新田: "光学式パターン計測の産業への応用", 電気学会誌, 100(3), pp. 195-202, (1980-3)
- [5] 永田: "ホログラフィ干渉計測への応用", 機械の研究, 31(5), pp. 1029-1034, (1979-5)
- [6] 小林: "光応用計測", 計測と制御, 26(4), pp. 280-282, (1987-4)
- [7] 小林: "光応用計測の構造とシステム", 計測と制御, 26(4), pp. 290-295, (1987-4)
- [8] 谷口, 高木: "ホログラフィックパターン計測システムとそのプリント配線板の熱変型計測解析への応用", 電気学会論文誌, 110-c(9), pp. 534-539, (1990-09)
- [9] M. Taniguchi and T. Takagi: "Holographic Pattern Measuring System and Its Application to Thermal Deformation Analysis of Printed Circuit Board Due to Thermal stress of Mounted Parts", IEEE Trans. on IM, 43, (2), pp. 326-331, (Apr. 1994)
- [10] M. Taniguchi, M. Oki, and T. Takagi: "Holographic Pattern Measuring Techniques for Vibration and Displacement Analysis" Proc. of JC-MECOD, PP225-232, (Nov. 1988)
- [11] J. W. C. Gates: "Instrument Science and Technology ;The Influence of Holography on Measurement Technology", J. Phys. Escl. Instrum, 19(12), pp. 998-1007, (Dec. 1986)
- [12] C. M. Vest: "Holographic Interferometry", John Wiley & Sons, (1979)
- [13] M. Taniguchi, M. Oki, and T. Takagi: "3-Dimensional Graphic Image Representation of Holographic Microscopical Displacement Pattern by using Cubic Spline Function", Computers & Industrial Engineering, 27(1-4), pp. 293-295, (Dec. 1994)
- [14] 市田, 吉本: "スプライン関数とその応用" 教育出版, (1986-3)
- [15] 吉村, 高山: "パソコンによるスプライン関数", 東京電機大学出版局, (1993-7)



(a) ○形振動板



(b) △形振動板



(b) □形振動板

図 11 パラメトリックスプライン補間処理した干渉パターン