

フーリエ変換法を用いたレーザ計測に関する研究

山 田 諄

Investigation of Laser Measurement by Fourier Transfer Method

Jun YAMADA

A laser measurement by Fourier transfer method is one of the simplest method for detecting a defect of the object spreading in two dimensions. Fourier transfer pattern of a metal mesh is measured in detail. The measured Fourier transfer pattern is compared with the calculated one. The period of the diffraction pattern, the peak value and the half width agree with the calculated one. In the edge part of the diffraction pattern, the measured value of the pattern is larger than the calculated one.

Fourier transfer pattern of the object with a defect is compared with one of the object without a defect. The method for detecting a defect in a production process is discussed.

1. まえがき

近年、生産工程における自動化、省力化、品質管理のため、計測制御システムの果たす役割はきわめて重要である。計測技術のうちレーザ計測は、高精度、高感度、非接触計測等の利点のため広い範囲にわたり使われ始めている。レーザを用いた工業計測には、長さ、変位¹⁾、速度²⁾等一次元計測はすでに多く実用化されている。欠陥検出等二次元計測には、レーザ光のスキヤングか又はCCDカメラ等で画像を入力し、電子計算機による膨大な量の情報処理を行う必要があるため、一般に高速な実時間計測が困難となる。

これら実用化されているレーザ工業計測の多くはレーザ光を単に情報取込みのためのセンサーとして利用しているにすぎない。しかし、フーリエ変換計測法は、光に情報処理の機能を多く持たせるため後処理が楽になり、欠陥検出等においては簡便で有用な方法であると言える。フーリエ変換法は、レーザ光の二次元な拡がりを利用して、レーザ照射面内の情報を光の回折とレンズによるフーリエ変換機能を使って、一度にかつ並列的に処理しようとするものである。フーリエ変換像は、検体の空間スペクトル解析像であり、検体が横方向にずれてもフーリエ変

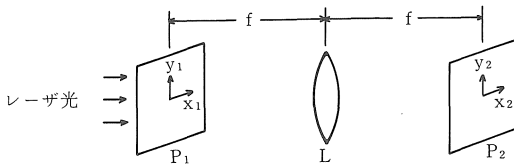
換像が変化しないので、空間フィルタリングによって高速なインプロセス計測が可能となる。

フーリエ変換法の原理は古くから知られているが、実用化されている例は多くない。そこでメッシュ等規則性のある検体の欠陥検出を目ざし、フーリエ変換パターンの詳細な測定を行ない、計算値との比較検討を行ない、欠陥品と良品のフーリエ変換像の比較検討を行なったので、その結果について報告する。

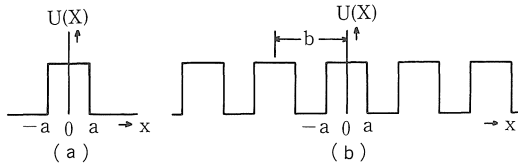
2. フーリエ変換法

フーリエ変換計測法は、光の回折現象と凸レンズによるフーリエ変換機能によって、検体の空間スペクトル解析を一度に簡単に行なおうとするものである。ここでは光の振幅と位相を信号として用い、光の振動強度がベクトルの的に加算されるコヒーレント光学系を利用するため、コヒーレントな光源であるレーザ光を用いる必要がある。

平面波が波面と平行な開口部を出射すると、回折波を生じ遠方におかれたスクリーン上に開口部形状に対応したフーリエ変換である回折パターンを生ずる。この回折パターンの振幅分布は、Huygensの原理により、各点から出る波面の伝ぱんの重ね合せに



第1図 フーリエ変換法



第2図 透過率分布関数

より計算出来る。第1図に示すように、焦点距離 f の凸レンズ L の前焦点面 P_1 面上に振幅透過率分布が $U(x_1, y_1)$ を持つ検体をおき、左側から一様で平行なレーザー光を照射したとき、レンズの後焦点面 P_2 面上における光の振幅分布は次式で与えられる³⁾。

$$E(p, q) = C \iint U(x_1, y_1) \exp\{-2\pi j(p x_1 + q y_1)\} dx_1 dy_1 \quad (1)$$

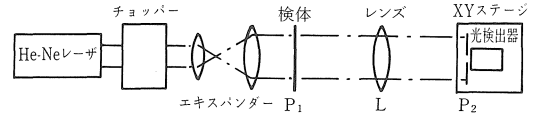
$$p = x_2/f\lambda, \quad q = y_2/f\lambda \quad (2)$$

ここで、 x_1, y_1, x_2, y_2 はそれぞれレンズの前後焦点面上の座標を、 λ はレーザー光の波長を、 f はレンズの焦点距離を示す。 p, q は空間周波数の x, y 成分であり、第2式より P_2 面上の座標に対応している。第1式は光の振幅透過率分布関数 $U(x_1, y_1)$ を二次元的にフーリエ変換する式であり、フーリエ変換法と呼ばれるゆえんである。電気信号のフーリエ変換と比べ、光学系では負の周波数が等価的に存在すること、及び入力信号は正だけであることを除けば電気信号のフーリエ変換と同じで、空間周波数のスペクトルに分解出来る。このようにして得られるフーリエ変換像は、 P_1 面上の空間スペクトル解析像であり、検体の位置が P_1 面上で横方向にずれても、 P_2 面上の強度分布は変化しない。従って検体が P_1 面内で高速で移動していても瞬時にスペクトル解析が出来る。

P_1 面に間隔 $2a$ の単一スリットをおいたとすれば、透過率分布関数は第2図(a)のようなシルクハット形関数となる。即ち、

$$U(x_1) = \begin{cases} 1 & , -a \leq x_1 \leq a \\ 0 & , x_1 < -a, a < x_1 \end{cases} \quad (3)$$

これを第1式に代入して積分を実行すれば



第3図 実験装置

$$\begin{aligned} E(p) &= C \int_{-a}^a \exp(-2\pi j p x_1) dx_1 \\ &= \frac{C}{\pi p} \sin(2\pi a p) \end{aligned} \quad (4)$$

となる。

次に検体として金属メッシュ等の格子状のものを考えれば、このようなスリットが間隔 b で $2N+1$ 個の多数並んだものと考え、第2図(b)のような透過率分布関数を考えれば、光の振幅分布は

$$E(p) = C \sum_{n=-N}^N \int_{nb-a}^{nb+a} \exp(-2\pi j p x_1) dx_1 \quad (5)$$

となる。ここで次の関係式

$$\begin{aligned} &\int_{nb-a}^{nb+a} \exp(-2\pi j p x_1) dx_1 \\ &+ \int_{-nb-a}^{-nb+a} \exp(-2\pi j p x_1) dx_1 \\ &= \frac{2}{\pi p} \sin(2\pi a p) \cos(2\pi n b p) \end{aligned} \quad (6)$$

を使って、第5式を変形すれば次のようになる。

$$\begin{aligned} E(p) &= \frac{C}{\pi p} \sin(2\pi a p) \\ &\left\{ 1 + 2 \sum_{n=1}^N \cos(2\pi n b p) \right\} \\ &= \frac{C}{\pi p} \sin(2\pi a p) \cdot \sin\{(2N+1)\pi b p\} \\ &\quad / \sin(\pi b p) \end{aligned} \quad (7)$$

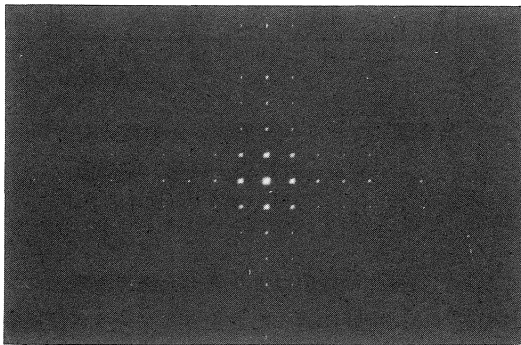
この式は P_1 面上におかれた検体の空間周波数 p のスペクトル分布を示す。空間周波数 p を第2式で P_2 面上の座標におき換えれば、 P_2 面上の光の振幅分布を示す。実際に光検出器で検出されるのは光強度なので、第7式を二乗し、又光検出器は一般に有限の大きさを持つので光検出器の開口にわたって積分したものが、実験によって得られる光出力の分布に比例する。もし検体として金属メッシュのように x, y 方向に同じ構造のものであれば、 y 方向の空間周波数 q のスペクトル分布も第7式と同様に求まり、 P_2 面上の二次元振幅分布が得られる。

3. 実験装置

実験に使用した装置の配置図を第3図に示す。レーザーは出力 1 mW の He-Ne レーザで、レーザー出

表1 検体の種類

検体	線の直径	線の間隔	開口の大きさ
I	28 μm	72 μm	44 μm
II	71	176	105
III	163	373	210
IV	300	800	500

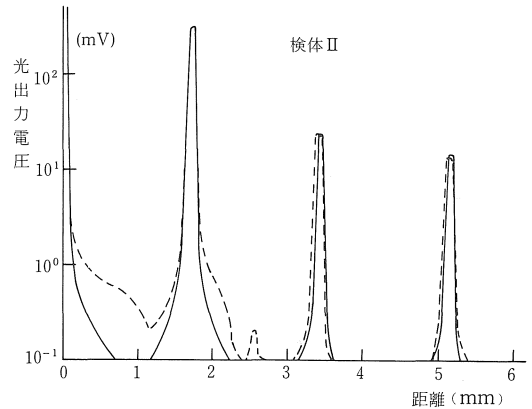


第4図 フーリエ変換像の一例

力光はビームエキスパンダーにより直径約30mm ϕ の平行ビームにして、フーリエ変換用レンズLの前焦点面 P_1 におかれた検体に照射される。検体として金属メッシュを用い、4種類の線径、メッシュ間隔の異なるものを用いた。メッシュを構成している線の直径、線の間隔、線と線との開口部の大きさを顕微鏡で測定した値を表1に示す。この他、メッシュを構成している線を1本又は2本抜いたもの、ハリで小さな穴をあけたもの等を欠陥品として用いた。

このようにして得られたレンズLによってフーリエ変換された検体の P_2 面上における変換像をカメラによって撮影した一例を第4図の写真に示す。フーリエ変換像は、 x 、 y 方向に対称で、ほぼ等間隔に並んだ円形のスポットが得られており、中心から遠ざかるに従い変換像は小さくなり、光強度が減少している。円形スポットの間隔は、メッシュ間隔が小さくなると大きくなり、検体の空間周波数に大きく依存するが、検体の位置が上下又は左右にずれても変化しない。しかし検体が P_1 面内で回転すれば、変換像も同じ角度だけ回転する。従って、メッシュの方向は正確に x 、 y 方向に調整しておく必要がある。

ここで用いた検体のフーリエ変換像は第4図の写真に示されるように、 x 、 y 方向に対称なので、どち



第5図 フーリエ変換像の光強度分布
実線—良品，破線—欠陥品

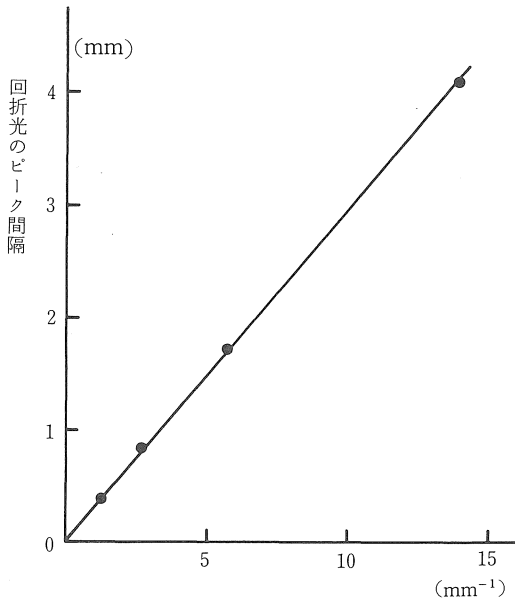
らかに一方の変化のみ測定すれば十分である。マイクロメータ付微動移動台上に取り付けたピンホール付フォトダイオードを P_2 面上におき、 $y=0$ における x 方向の光出力の変化を測定した。フーリエ変換用レンズLは、焦点距離50~500mmの数種類のものを用いた。又、かなり低い光出力の領域まで測定するので、外乱光や暗電流の影響を避けるため、レーザ光に機械的チョッパーで変調をかけている。

4. 実験結果及び討論

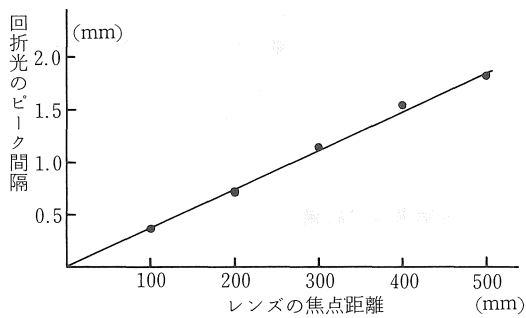
フーリエ変換像の詳細な光強度分布を得るため、マイクロメータ付微動移動台上におかれたフォトダイオードの出力電圧を、 P_2 面上で $y=0$ で x 方向に変化させた時に得られた結果の一例を第5図に示す。ここで実線は検体として検体IIの良品を用いた時に得られたもので、破線は同じ検体IIの一本抜けの欠陥品を用いた時に得られたものである。中心 $x=0$ の零次回折光のピーク値は、高次回折光に比べ非常に大きいので、第5図には零次回折光のピーク値は示されていない。又フーリエ変換像は y 軸に関して対称なので、 x が負の時も同様な光強度分布が得られるが、第5図には x が負の時の分布は示されていない。

このようにして得られたフーリエ変換像の高次回折光のピーク間隔を縦軸にとり、メッシュを構成している線の間隔 b の逆数を横軸にとった結果を第6図に示す。ここで、黒丸は4種類の検体によって得られた実測値を、実線は

$$T = f\lambda/b \quad (8)$$

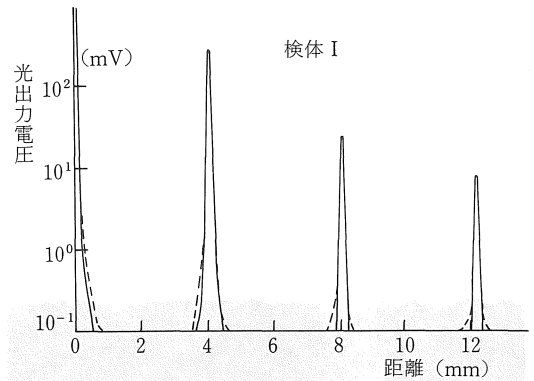


第6図 回折光のピーク間隔対メッシュ間隔の逆数



第7図 回折光のピーク間隔対レンズの焦点距離

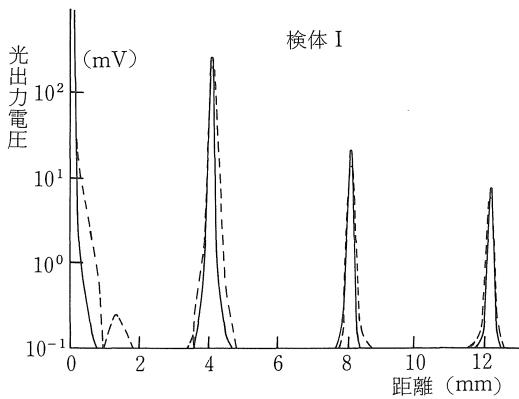
により計算された値を示す。回折光のピーク間隔はメッシュ間隔 b の逆数に比例しており、実測値と計算値は良く一致していることが分かる。フーリエ変換用レンズ L の焦点距離を変えた時、第5図と同様にして得られた回折光のピーク間隔を縦軸に、レンズの焦点距離 f を横軸にとった結果を第7図に示す。ここで、黒丸は検体IIを用いた時の実測値を、実線は第8式による計算値を示す。第7図より、回折光のピーク間隔はレンズの焦点距離に比例し、計算値と実測値は良く一致していることが分かる。従って、回折光のピーク間隔を測定することにより、細かいメッシュの間隔を求めることが出来る。特に、メッシュ間隔が細くなる程、回折光のピーク間隔が大きくなるので、細かいメッシュ程測定精度が良



第8図 フーリエ変換像の光強度分布
実線—計算値, 破線—実測値

くなる。又検体の種類により適当な焦点距離のレンズを選べば、実験に適した大きさのフーリエ変換像を得ることが出来る。

次にフーリエ変換像の詳細な光強度分布の実測値と計算値の比較を行なう。第7式で与えられる光の振幅分布関数は無限小の大きさを持つ光検出器を用いた時に得られるもので、実際には有限の大きさを持つ光検出器、即ちフォトダイオードの前においたピンホールの直径にわたり第7式を積分する必要がある。第7式の二乗を第1回折光のピーク値で実測値と合せた光強度分布の計算値を第8図の実線で示す。また、同じ条件の実測値を第8図の破線で示す。実測値と計算値とは、回折光のピーク値、ピーク間隔、半値幅等、光出力の高いところでは第8図のグラフからまったく区別がつかぬ程良く一致している。しかし、回折光の周辺部における光出力の極く低いところでは、実測値の方が計算値より少し大きく、回折像が少ししみ出している感じである。他の検体を用いた時も同様に、光出力が数 mV 以下の回折光の周辺部で実測値の方が少し大きくなる。回折光の周辺部で実測値が計算値より大きくなる程度は、メッシュの粗さやレンズの焦点距離の違いによる規則性は見られなかった。これは第4図の写真で、フーリエ変換像の円形スポットが必ずしも真円でないことに関係していると思われる。この原因として、レンズの収差、検体として用いたメッシュの間隔が必ずしも等間隔でないこと、測定誤差等が考えられるが、詳細は不明である。しかし、この計算値と実測値の違いは、光出力の低い領域だけなので、フー



第9図 フーリエ変換像の光強度分布
実線—良品, 破線—欠陥品

リエ変換像全体に与える影響は小さい。

最後に欠陥検出を行うため、検体として表1に示した良品のメッシュの他に、メッシュを構成しているy方向の線を1本抜いたものを用いた時のフーリエ変換像を第5図の破線で示した。又最も細かいメッシュである検体Iの時は、線を1本抜くのが困難だったので、ハリの先で100~200 μ mの小さな穴をあけたときの結果を第9図の破線で、良品のときの結果を第9図の実線で示す。検体に欠陥があれば、第5図、第9図の破線で示されるように、回折光のピークとピークの間で良品の時は光出力が存在しなかった位置に光出力が現われたり、回折光の周辺部の光出力が増加する。欠陥の程度が大きい程、例えば、1本抜けより2本抜けの方が、キズをつけた穴の直径が大きい程、良品のときは光出力が存在しなかった部分の光出力が大きい。又、メッシュ間隔が細かい程、小さな欠陥でも大きな光出力が得られる。従って、良品の検体を用いたとき回折光が現われる部分を完全にシャ断するような空間フィルターをP₂面におき、空間フィルターを通過した光をレンズで集め一つの光検出器で観測しておれば、もし検体に欠陥があればフーリエ変換された光は空間フィルターをもれて光が検出される。もし検体に欠陥がなければ光が検出されない。この方法は、欠陥の種類や位置を知ることが出来ないが、二次元的な拡がりを持つ検体の良否を、一つの光検出器の出力の大小

だけで判定出来るので、後処理がほとんど不用で、欠陥検出が簡単に出来る。空間フィルターは、良品の検体でフーリエ変換像を作り、これを写真にとることにより、又は第7式を使って計算によって回折光の位置と大きさを知ることが出来るので、比較的簡単に作ることが出来る。フーリエ変換像はすでに述べたように、検体の空間周波数のスペクトル解析像であり、検体が上下、左右にずれても変換像は変化しないので、検体が上下又は左右に高速で移動していても瞬時に欠陥検出が出来る。よって、フーリエ変換法は生産工程中の高速な欠陥検出法として、簡便で有益な方法であると言える。

5. まとめ

金属メッシュ等規則性のある二次元的拡がりのある検体の簡易な欠陥検出を目ざし、フーリエ変換像の詳細な光強度分布の測定と計算を行なった。フーリエ変換像の実測値と計算値は、回折光のピーク値、ピーク間隔、半値幅等良く一致していた。回折光のピーク間隔を測定することにより細かいメッシュの間隔を精度良く求めることが出来る。回折光の周辺部の光出力の低い領域では、実測値は計算値より少し大きくなった。この原因としてレンズの収差、検体のメッシュ間隔の精度等が考えられる。

欠陥のある検体のフーリエ変換像を測定し、良品の時の比較を行なった。欠陥のある検体の変換像は、良品のときに光出力が存在しなかった部分にも光出力が現われ、欠陥の程度が大きい程この光は増加する。従って、良品の変換像をシャ断する空間フィルターを用いることにより、欠陥の種類や位置は分からないが、欠陥の有無を高速で簡単に検出できることが分かった。

参考文献

- 1) 松崎陽一: "レーザによる計測システム", 機械と工具, (1978) No.9
- 2) 谷田貝豊彦: 光学的測定ハンドブック, 朝倉書店 (1981)
- 3) J.W. Goodman: "Introduction to Fourier Optics", McGraw-Hill, New York (1968)

(受理 昭和63年1月25日)