

回転角の非接触測定法の研究

小山職業訓練短期大学校 阿 見 誠

Optical Method of Measuring Angular Displacement Using A Diffraction Pattern

Makoto Ami

要 約 本研究は、物体像の角変位を測定する方法について考察する。レーザー光の中にスリットを置くと回折像ができるが、この回転角を測定することによりスリットの角変位を知ることができる。画像データは直交座標上にあるので、計算を簡略化するために極座標に変換する。さらに回折像の回転前と回転後の2つのパターンの相互相関を計算すると、その最大値が角変位となる。測定分解能は角度の分割を細かくするほど向上し、角変位が $\pm 5^\circ$ 以内であれば、測定誤差は 0.05° 以下となる。さらに球面座標上にスリットがあってその投影像の形がゆがむ場合に、その角変位を測定する方法をコンピュータシミュレーションにより考察する。回転軸の方位角または仰角が $\pm 60^\circ$ 以内ならば角変位を計算することができ、その測定誤差は 0.1° 以下となる。

I. はじめに

物体が回転軸をもつ場合に、ある回転軸まわりの角変位を測定する方法は、実にさまざまな方法が考案されている。本研究は、物体像を画像情報として入力しその角変位をパーソナルコンピュータ(パソコン)を用いて測定する方法について考察している。物体像をフーリエ変換すると回折像がえられる。回折像の性質を用いれば、回転軸の上下左右の変位は回折像の変化に影響せず、回転角成分だけを測定することができる。この性質を用いると、角変位のみを抽出できるので測定精度が向上する⁽¹⁾。

レーザー光の中にスリット(細長い隙間)を置くと回折像ができる。この像はスリットが回転すると同じ角度だけ回転する。この原理を用いると、回折像の回転角を測定することによりスリットの角変位を知ることができる。レーザー光に直角な平面内でスリットが回転すると回折像も回転するが、スリットがこの面内で平行移動しても回折像の回転中心は移動しない。回折像のこの性質⁽²⁾を用いると、被測定物の回転角の測定が容易になる。

II. 回折像の性質

このことを Fig. 1に示す回折像測定システムを用いて

確かめる。イメージセンサは一次元センサでその画素数は1,024である。走査方向と直角にセンサを動かすことに

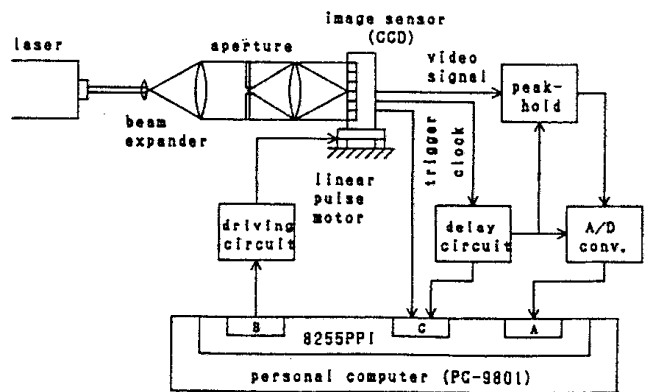


Fig.1. Diffraction pattern measuring system

より二次元イメージを得ることができる。イメージセンサはリニアパルスモータ上に設置してあり、パソコンの信号により駆動する。リニアパルスモータはセンサの1回の走査で1ステップ(0.4mm)移動する。ビデオ信号はピークホールド回路を経由してA-D変換器に達する。A-D変換のタイミングはビデオ信号の走査クロックに同期している。この画像データをパソコンに入力する。イメージセンサの1回の走査で1,024画素が得られるが、これをプログラムにより圧縮して63画素とする。イメージセンサは63ステップ移動するので、結局63×63画素の二次元イメージが得られる。

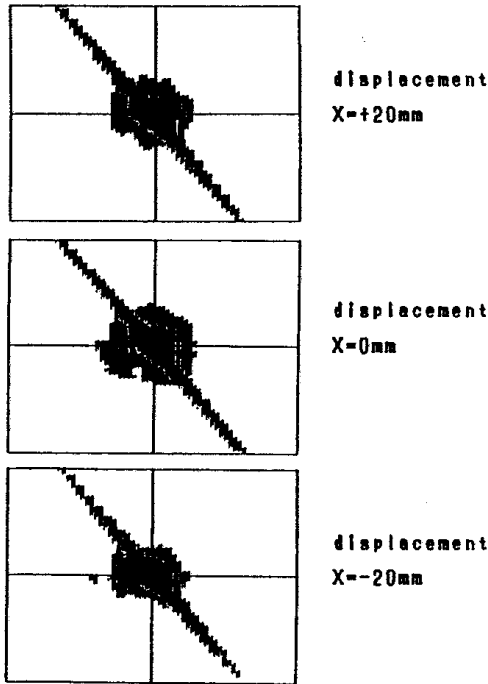


Fig.2. Diffraction pattern of the slit

一例として Fig.2にはこのシステムを用いて入力したスリットの回折像を示す。これはレーザの光軸に直角な面内でスリットを移動させたものである。+20mmから-20mmまで10mmおきにスリットが移動した場合、それぞれのパワースペクトラム(回折像強度分布)がほぼ同一であることを示している。このことから、スリットがレーザ光内で平行移動しても、回折像の中心は移動しないことがわかる。

III. 角変位の測定

回折像測定システムを用いて、スリットの角変位を測定する。画像の取り込みには、一次元CCD(charge coupled device)カメラを用いる。回折像は、リニアパルスモータ上にある平面鏡によって反射される。CCDカメラは回折像をビデオ信号として検出して、ピークホールド回路を経由し、A-D変換器へ送る。このデータをパソコンに入力し、カメラの走査方向の2,048画素をプログラムにより圧縮して255画素とする。さらに平面鏡をリニアパルスモータで走査方向と直角に移動することにより、255×255画素の二次元イメージを得ることができる。

このデータはパソコンの画像メモリ内において直交座標上にあるので、計算を簡略化するために極座標に変換する。さらに、回折像の回転前と回転後の2つのパターンの相互相関を計算する。極座標に変換する際には、補間法

により極座標上の新しいデータを作らなければならない。そこで、Lagrangeの補間方程式を用いる。もし $n+1$ 個のデータ点があって、それらが $g_0(x_0), g_1(x_1), \dots, g_n(x_n)$ であるとする、多項式 $g(x)$ は次のようになる。

$$g(x) = \sum_{i=0}^n \left(\prod_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^n \frac{x-x_j}{x_i-x_j} \right) \cdot g_i \quad (1)$$

これは、Lagrangeの n 次補間方程式である。画像データは、上式により極座標に変換される。Fig. 3に示すように、補間によりまず X 軸方向 ($y=y_i$) の値 $f(x, y_i)$ を得る。次に Y 軸方向の値 $f(x, y)$ を計算する。しかし

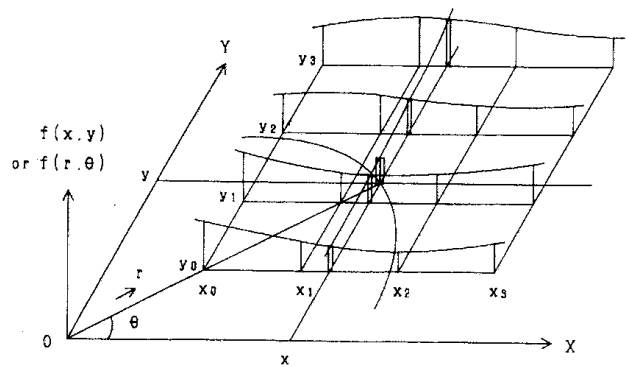


Fig.3. Coordinate system

パソコンを用いる場合、変換時間が非常に長くなるという問題が生じる。それは、補間点に近い4点のデータに限定してこの平均値を計算する方法で解決できる。これにより変換時間が短縮できる。

この極座標上で回折像の回転前と回転後の相互相関をとる事により回転角が測定できる。回転前の像を $f_1(r, \theta)$ 、回転後のそれを $f_2(r, \theta)$ とすると、推定相関値 $R_{12}(lh)$ は次のようになる。

$$R_{12}(lh) = \sum_{r=1}^m \sum_{\theta=0}^{n-1} f_1(r, \theta) \cdot f_2(r, \theta + lh) \quad (2)$$

この式において、 m は半径方向の分割数、 n は角度方向の分割数、 h は最小分割角度($h=360^\circ/n$)、 l はおくれ数($l=0, 1, 2, \dots, n-1$)である。この相関値が最大となるときの l をパソコンで計算する。この計算により回折像の角変位は lh として得られる。

IV. 測定分解能

角度方向の分割数と測定分解能の関係をFig. 4に示す。

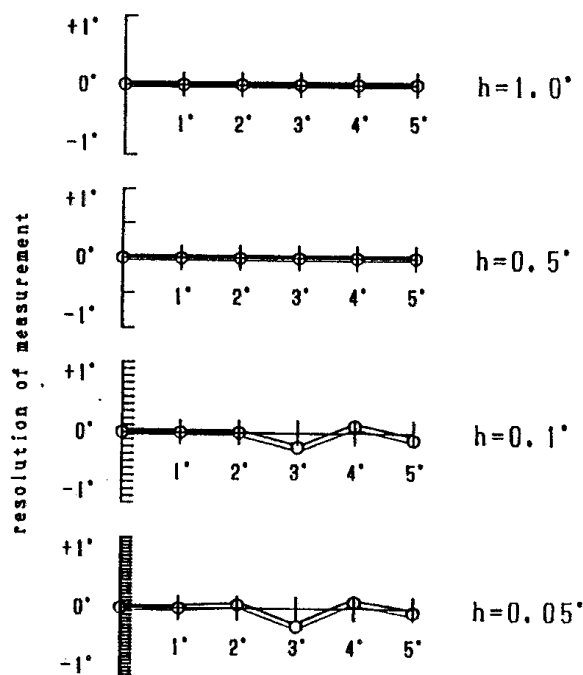


Fig.4. Angular displacement and its measurement resolution (h is the minimum division angle)

画像データは不連続であるから、角度の分割を細かくするほど補間により新しいデータが増えるので、測定分解能が向上することになる。したがって最小分割角度が測定分解能となることがわかる。角変位が±5°以内であれば、測定誤差は0.05°以下となる。回折像の性質を用いると、アパーチャが平行移動しても角変位のみを測定することができるので平行移動の影響がなくなり、さらに補間により新しいデータが増えるので測定精度が向上する。

V. シミュレーションによる測定

回折像はスリットをフーリエ変換した結果得られる。もし球面座標上にスリットがあってその回折像の形がゆがむ場合に、その角変位を測定する方法をコンピュータシミュレーションにより考察する。球面座標上の十字パターンをFig. 5のように考えると、回転軸の方位角 ϕ と仰角 ψ によりX-Y平面に投影した時の十字パターンの形が変わる。回転角を計算する時に、パターンは座標変換方程式によりZ軸上にその中心を移動する必要がある。旧座標系X-Y-Z上の点を $a(x, y, z)$ 、新座標系X'-Y'-Z'上の点を $a'(x', y', z')$ とすると変換方程式は次のようになる。

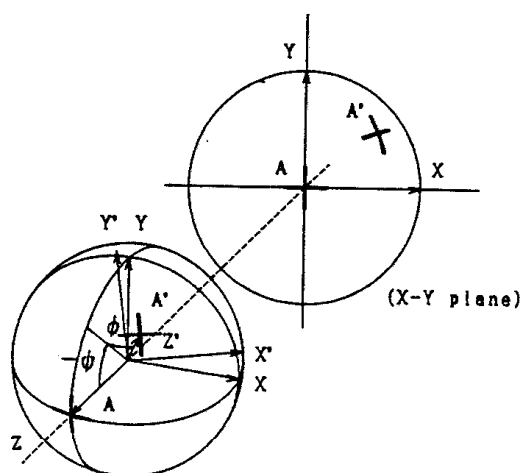


Fig.5. Spherical coordinate system

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\phi & \sin\phi \sin\psi & \sin\phi \cos\psi \\ 0 & \cos\psi & -\sin\psi \\ -\sin\phi & \cos\phi \sin\psi & \cos\phi \cos\psi \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (3)$$

この方程式を用いて球面上の十字パターンの中心をZ軸上に移動し、さらに相関法により角変位を計算する。回転軸の方位角または仰角が±60°以内ならば角変位を計算することができ、その測定誤差は0.1°以下となる。

VI. まとめ

以上のことによりレーザー光内の被測定物が平面内にある場合は、平行移動の影響は物体と回折像との関係より無視でき、角変位のみを測定することができる。また、被測定物が球面上にある場合は、座標変換方程式により光軸上に位置するときの形状を作り出して角変位を測定すると、測定精度が向上することがわかる。

参考文献

- (1) M. Ami et al.:"Optical Method of Measuring Angular Displacement Using a Diffraction Pattern", Applied Optics, 26, 4310 (1987).
- (2) J. W. Goodman:"Introduction to Fourier Optics", McGraw-Hill Book Company, New York (1968).