

高精度光応用計測技術の開発(第5報)

ニポウディスクによる撮像

門藤至宏, 櫛野朝光^{*1}, 廣川勝久, 倉本丈久^{*2}, 竹保義博^{*3}

Noninvasive optical measurement for external, surface and internal structures V

Image observation by use of Nipkow disk

MONDO Munehiro, KUSHINO Tomomitsu, HIROKAWA Katsuhisa, KURAMOTO Takehisa
and TAKEYASU Yoshihiro

We designed and prototyped a Nipkow disk that contains dense pinholes for the fast surface scanning of samples on a confocal microscope. The disk enables us to visualize confocal 2-dimensional image using multi-pinholes. Design key parameters of the disk are as follows: image frames per disk rotation, shift angle of pinhole position, shift radius of pinhole position and pinhole number. We designed more than 250 disks and selected one to produce a prototype. We experimentally demonstrate the efficiency of the disk by using the microscopic configuration.

共焦点光学系における試料表面の高速走査のために, 多数のピンホールを有するニポウディスクを設計, 試作した。ニポウディスクを使うと, 一度に多焦点を使った撮像が可能となり, 撮像速度を大幅に改善することができる。我々は1回転あたりのフレーム数, 隣り合うピンホール間のシフト角度やシフト半径, ピンホール数をパラメータとして, 250パターン以上を設計し, その中から1パターンを選択して試作した。評価用の光学系を利用して撮像実験を行い, 試作ディスクの有効性を示した。

キーワード: 非接触計測, 表面形状計測, 光計測, 共焦点

1. 緒 言

微細加工品の増加に伴い, 小型部品の非接触表面形状計測のニーズが高まっている。我々は, こうしたニーズに対応するため, 非接触3次元計測が可能な光計測法を検討してきた^{1) 2)}。様々な計測方法の中から, 必要となる計測範囲と計測精度を満たす共焦点光学系を採用し, 基礎実験を行ってきた。通常のレーザー変位計では計測が困難な金属光沢のある半田バンプを持つCSP (Chip Size Package) チップにおいても, 単焦点を使って共焦点光学系を構築し実験を行ってきた結果, 共焦点方式が適していることがわかった。

しかし単焦点方式の欠点として, 計測時間の問題がある。単焦点方式では, エリア計測のために計測対象もしくは, 対物レンズを走査する必要がある。実験では, 試料を走査したため, 100点×100点の測定点の撮像に約1時間を要し, 50平面分の計測に2日程度を必要とし, 実

用的ではない。高速化のためには, 多焦点での計測が不可欠である。

前回の報告では, 共焦点光学系において高NA対物レンズや取込画素への重み付けなどを利用し, 計測精度を向上させた結果を示した。そこで今回は, ニポウディスクを用いた多焦点による撮像実験について述べ, ピンホールを同時に多数使うことによる計測時間短縮の検討結果について示す。

2. ニポウディスクの設計と試作

2.1 概要

ニポウディスク^{3) -5)}は, Paul Nipkowにより発明された円盤で, 多数のピンホールを持つ。ニポウディスクが回転することで, ピンホールを通過した複数の光が試料表面上にそれぞれの円弧を描いて走査していく。その円弧の軌跡同士が途切れずに表面を走査すれば, 試料全面を高速走査できることになる。ニポウディスクを共焦点光学系に組み込むことで, XY平面の高速走査が実現され, Z軸(光軸)方向の走査のみで3次元計測が可能となる。

2.2 設計方法

2003.05.30 受理 情報技術部

*1 (株) サンエス

*2 広島県産業科学技術研究所

*3 応用加工技術部

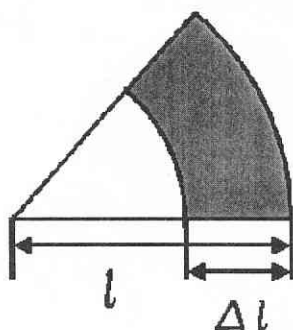


図1 フレーム

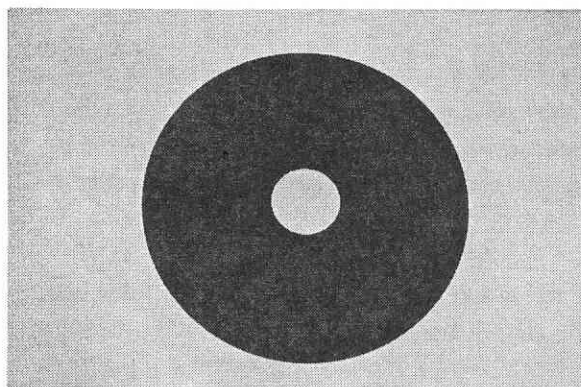


写真1 ニボウディスク

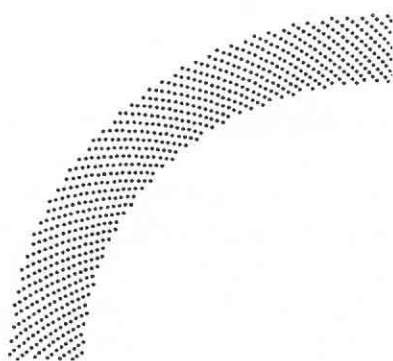


図2 ピンホールパターン (一部)

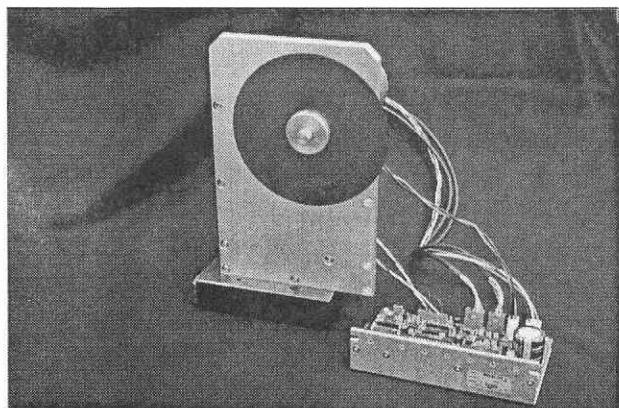


写真2 試作したディスク

設計時の要点としては、①ピンホール同士が一定以上の距離を置くこと、②円弧の軌跡が重なること、③できるだけピンホール数を増やすこと、などが挙げられる。

これらの注意点を満たせば、ニボウディスクとして機能する。設計条件には、1回転当たりのフレーム数、シフト角度、ピンホール数などがある。シフト半径は、ピンホール数とピンホール配置幅から決まる。

2.3 設計したディスク

フレーム数: 2~12, シフト角度: 1~15度, ピンホール数: 2,000~8,000個について250通り以上のディスクパターンを求めた。1画面分の走査を受け持つディスク部分をフレームと呼ぶことにし、図1に示すグレーのエリアにピンホール群を配置する。ディスク分割数(フレーム数)を m 、ピンホール配置幅を Δl 、ピンホール数を n とすると、シフト径 Δr は、

$$\Delta r = \frac{\Delta l}{\left(\frac{n}{m}\right)} \quad (1)$$

ピンホール最外周半径を l とすると、 k 番目のピンホールの半径位置 r_k は式(1)から、

$$r_k = l - \Delta r \left[k - \frac{n}{m} \cdot \text{Int} \left\{ \frac{k}{\left(\frac{n}{m}\right)} \right\} \right] \quad (2)$$

ここで、Int は整数化(端数切り捨て)を表す。式(2)の第2項を式(3)とする。

$$k' = k - \frac{n}{m} \cdot \text{Int} \left\{ \frac{k}{\left(\frac{n}{m}\right)} \right\} \quad (3)$$

すると、 k 番目のピンホールの角度位置 θ_k は、

$$\theta_k = k' \left(\Delta\theta + \frac{2\pi}{n} \right) - \frac{2\pi}{m} \cdot \text{Int} \left\{ \frac{k' \left(\Delta\theta + \frac{2\pi}{n} \right)}{\frac{2\pi}{m}} \right\} + \frac{2\pi}{m} \cdot \text{Int} \left\{ \frac{k}{\left(\frac{n}{m}\right)} \right\} \quad (4)$$

よって、式(2)と式(4)から、

表1 パラメータとピンホール間距離

ピンホール数	シフト半径	最近接距離
2,000	10.00	618
2,200	9.09	917
2,400	8.33	1,025
2,600	7.69	689
2,800	7.14	792
3,000	6.66	853

単位: μm

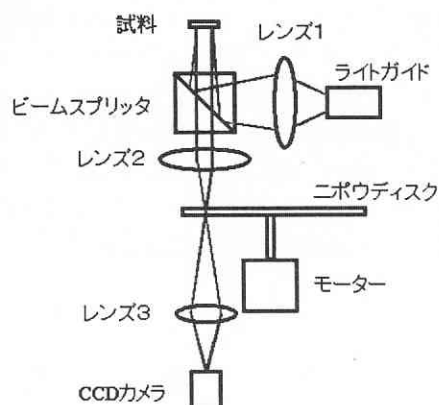


図3 実験光学系

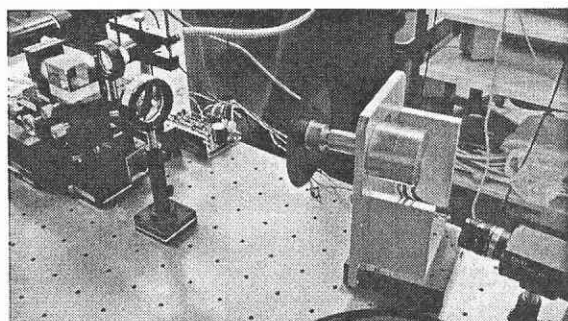


写真3 実験光学系

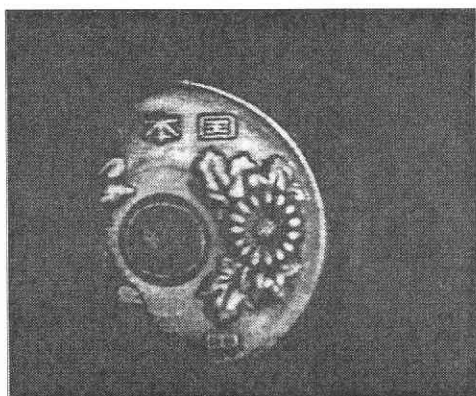


図4(a) ニポウディスク未使用時

$$\begin{aligned} x_k &= r_k \cos \theta_k \\ y_k &= r_k \sin \theta_k, \end{aligned} \quad (5)$$

となり、実際のピンホール座標が求まる。

フレーム数2、シフト角6度の場合のディスク作成用パラメータとピンホール間距離（最近接距離）の一覧を表1に示す。ピンホール間距離は、クロストークを避けるためにピンホール直径の10倍以上であることが必要とされている。ピンホール直径を $40\mu\text{m}$ とすると、この例においては、いずれもその条件を満たしている。またディスクの内周と外周では、角速度が一定であり、シフト角度を一定にした設計ではパターン密度が異なるため、結果として画像の明るさが異なる。それを解消するために、シフト半径を変えて外周のパターン密度を上げる方法がある。しかし今回は、明るさの差が10%程度で、XY平面の各点について、Z軸方向の画像間での比較となるため、形状計測に関しては問題にならないと判断し、密度傾斜は設けていない。

2.4 試作

材料：ステンレス、厚さ： $800\mu\text{m}$ 、直径： 120mm 、フレーム数：2、シフト角度：6度、ピンホール数：2800個、ピンホール直径 $40\mu\text{m}$ のニポウディスクを試作した（写真1）。ピンホールは、半径 40mm ～ 50mm の間に配置されている。ピンホールパターンの一部を図2に示す。

画像を構成するためには、ディスク上においてピンホール以外の光を遮断する必要がある。また、ピンホールに結像させるためには、ディスクを薄くしなければならず、遮光性との両立が問題になる。ホルダーに装着した状態を写真2に示す。

モーターは、(株)千葉精密製ブラシレススピンドルモーターを使用した。回転数 $300\sim 5,000\text{rpm}$ 、面安定性 $5\mu\text{m}$ で高速回転時にもディスク面はほとんど振動しないものである。

3. 実験

ニポウディスクの性能評価用の光学系を構築し、使用した。実験に使用した光学系を、図3と写真3に示す。光学系は、メタルハライド光源、光ファイバライトガイド、カラーフィルター、ビームスプリッタ、レンズ1、レンズ2、レンズ3、ニポウディスク、CCDカメラから構成される。メタルハライド光源からの光は、光ファイバのライトガイドから放射され、ビームスプリッタにより試料に照射される。ライトガイドにはカラーフィルターを装着している。試料からの反射光は、ビームスプリッタを経由してレンズ2によりニポウディスク上に結像する。ニポウディスク上のピンホールを通過した光が、レンズ3を有するCCDカメラにより撮像される。CCDカメラの画像は、画像処理装置に取り込まれ、ビットマップ形式で出力される。

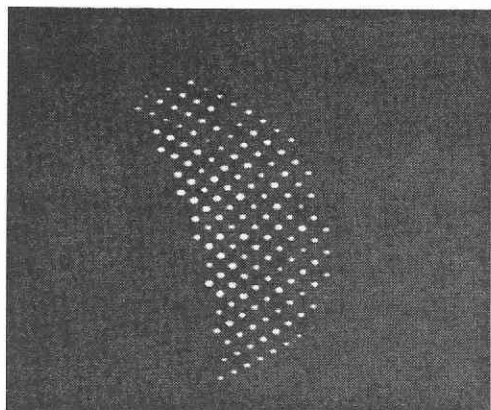


図4 (b) ニポウディスク停止時

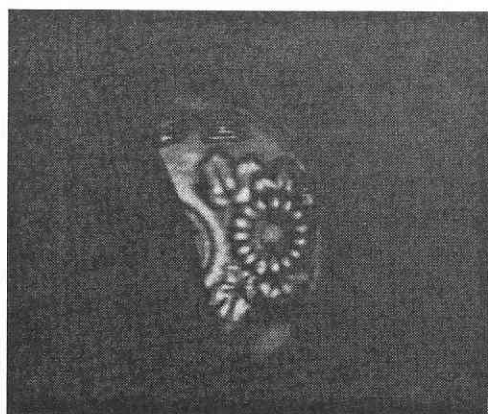


図4 (c) ニポウディスク回転時

4. 結果および考察

ニポウディスクを使用せず撮像した結果を図4 (a)に、光学系にニポウディスクを入れ静止した状態で撮像した結果を図4 (b)に、ニポウディスクを回転させた状態を図4 (c)に示す。試料は50円硬貨である。ニポウディスクは光利用効率が数%しかないため、ニポウディスク挿入前後でメタルハライド光源の出力とCCDカメラの絞りを変えている。

ニポウディスクを回転させるモーターの回転数は5,000rpmまで可能であるが、低速回転においてもピンホールによる縞模様やちらつきがなく、良好な画像が得られた。今回の結果により、良好なディスク性能が得られることがわかった。この結像性能を共焦点光学系に応用することで、所望の高速な形状計測が可能になる。

5. 結 言

共焦点光学系による表面形状計測の高速化をはかるためには、AO素子 (Acousto-optic Modulator) などによるビーム自身を走査する方法やDMD (Digital Mirror Device) デバイスを利用しアクティブにピンホール効果を生じさせる方法⁶⁾があるが、入手や制御が困難である。そこで今回はニポウディスクの利用を検討し、実際にニポウディスクを設計・試作し評価用光学系を構築した。撮像実験を行った結果、良好な画像が得られ十分な結像性能を持つことがわかった。今後このディスクを用いて共焦点光学系を構築し、高速な非接触3次元表面形状計測を行う予定である。

文 献

- 1) 門藤ほか3名：広島県立東部工業技術センター研究報告,14,13-16(2001).
- 2) 門藤ほか4名：広島県立東部工業技術センター研究報告,15,9-12(2002).
- 3) Timothy R. Corle : Confocal Scanning Optical Microscopy and Related Imaging System, Academic Press, p.42-44, 1996.
- 4) 藤田哲也：新しい光学顕微鏡, 学際企画, p.51-55,1995.
- 5) D. T. Fewer, S. J. Hewlett and E. M. McCabe, Appl. Opt. 37,2,380-385(1998).
- 6) P. J. Verveer, Q. S. Hanley et al, Journal of Microscopy 189,3,192-198(1997).