

ラジアルシェア干渉計を用いる粗面の形状計測*

安達正明** 大杉博人*** 平林 崇† 稲部勝幸††

Shape Measurement Method of Rough Surface using a Radial Shearing Interferometry

Masaaki ADACHI, Hiroto OOSUGI, Takashi HIRABAYASHI and Katsuyuki INABE

A new shape measurement method of rough surface is proposed. The method utilizes a radial shearing interferometry consisting of two zoom lenses with different magnifying powers and a laser diode being able to change its wavelength in a small range less than 0.1 nm. The radial shearing interferometry, known as a kind of common path interferometer, is capable of obtaining a very stable specklegram even under normal vibrational circumstance. From the specklegrams two phase maps corresponding to two slightly different laser wavelengths are extracted. The difference of phase values between two maps is nearly independent of random speckle phase, but depends on optical path differences. Then shape of the rough surface can be calculated from the two phase maps through the optical path differences. The validity of the method is experimentally demonstrated.

Key words: rough surface, shape measurement, radial shearing interferometry, laser diode, phase shifting

1. 緒 言

光を用いる粗面の形状計測では光の直進性を利用するモアレ法や光切断法が広く用いられている。これらは測定できる空間範囲が広く大型物体も対象とし得るが、測定原理から照明方向と観測方向に角度を持たせる必要がある¹⁾²⁾。その結果、深い凹凸を持つ物体では陰が生じやすいという欠点が存在する。一方、光の干渉を用いる形状測定法は照明と観測を同方向から行うことができ非常に高精度である反面、測定範囲が前後方向に数十 μm 以下と狭く測定対象が光学面に限られるなどの制限がこれまでであった。

近年、波長を容易に変えることのできる高出力な半導体レーザーが出現して上記の状況は大きく変化した。粗面を対象とする場合でも干渉を用いて照明と観測を同方向に取りながら形状計測を行い得る道が開かれたのである。そして2波長や3波長のレーザー光を用いた粗面形状の測定法が報告され始めた³⁾⁴⁾。さらに非常に広い波長範囲(数十nm前後)でも連続して波長変更のできる特殊な最新の半導体レーザー素子を用いる連続広域波長走査を利用する方法⁵⁾も提案され始めた。後者は光学系からの絶対距離も測定可能な方法であり、精度の高さなどからも注目される。

これら光干渉を用いる方法は使用する半導体レーザーがこれまでのレーザー光源に比べ極めて低消費電力でコンパクトなこと、さらには半導体レーザー製造技術とその性能が今後も改善されてより安価で高性能な製品の出現が予想されることなどから、将来広く普及すると考えられる。この意味で現時点で非常に注目される研究開発テーマと言える。

しかし干渉を用いる粗面形状計測には普及に際し解決されるべき大きな問題点が少なくとも1つある。それは光干渉を用いており、一方で作動距離(測定器と被測定物間の距離)が長く

なるため、測定系が空気じょう乱や外部振動の影響を受けやすくなって測定環境に限られるということである。我々はこの問題の重要性を考慮し解決法の1つの可能性を探る意味で、今回環境の影響を受けにくいラジアルシェア干渉計を用いる粗面形状計測法の研究を行った。ラジアルシェア干渉計では空気じょう乱や外部振動の影響を受やすい測定光学系と被測定物の間が共通光路となり、空気じょう乱等が光路差すなわち干渉画像に影響しにくい。このため鏡面のインプロセス形状計測にその応用研究がなされてもいる⁶⁾。2次元的变化を持つ粗面のラジアルシェア干渉計を応用する形状計測法の研究は我々の知る限りまだ発表されたものはなく、本研究は粗面物体を正面から長い作動距離で形状測定する手法の研究に道を開くものとする。

今回は干渉光源に波長変更が狭い範囲($< 0.1\text{nm}$)だが可能であり出力が大きい(50 mW)半導体レーザーを用いた。そして近接する2波長(782.30nm, 782.36nm)で位相シフト法(ハリハラン法⁷⁾)による位相測定を行っている。スペckル干渉では粗面反射の関係する位相が未知数として干渉画像の位相に影響する。この未知数を除去するため2波長を用いた位相測定では1つの位相図しか得られない³⁾⁴⁾。そこで我々は測定対象を連続する粗面を持つ形状に限った。ただし提案するラジアルシェア干渉計を用いる形状計測の原理は、連続広域波長走査や段差測定を可能にする3波長を用いる測定にも拡張できると考えている。

2. 測定原理

光干渉を用いた形状計測では、形状の情報を光路差情報を介して位相情報としてコンピュータに取り込む必要がある。一般にレーザー波長はサブミクロンであるから、光路差が振動や空気のじょう乱によりほんの少し(0.1 μm 前後)変化しても位相は大きく変化する(干渉顕微鏡ではこのため干渉計部分を高剛性に作る)。通常、粗面物体の形状計測では測定対象物が大きく(干渉顕微鏡で測定する物体と比較して)作動距離も長い。その結果非常に外乱の影響を受けやすくなる。

この外乱の影響を受けにくくする光干渉法として発展してきたのが共通光路干渉計である。干渉を与える2つの光路がほぼ

* 原稿受付 平成11年11月8日
** 正会員 金沢大学大学院(金沢市小立野2-40-20)
*** 大同工業(株)(加賀市熊坂町)
† (株)デンソー(刈谷市昭和町)
†† 金沢大学工学部

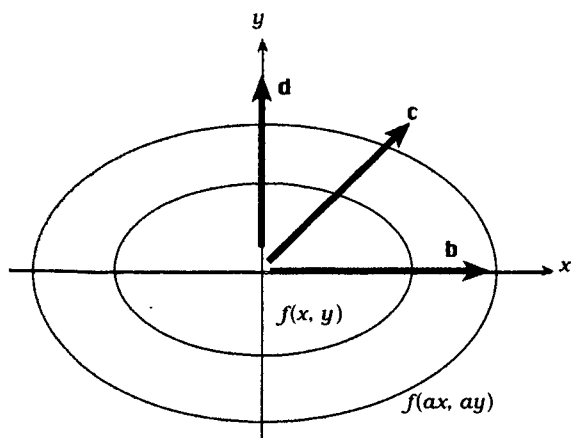


Fig.1 Shear directions b, c, d in a radial shear image. $f(x, y)$ is a contour of original object and $f(ax, ay)$ ($a < 1.0$) is of an enlarged one. A center of the object coincides with the corresponding point of the enlarged one

同じ空間位置で同じ反射物体から作られるため、振動や空気じょう乱は両方の光路にほとんど等しく影響し、その結果光路差には影響しにくい。そこで我々は最も簡単な共通光路干渉計である一方向のみへのシェア干渉計を用いる形状計測法をこれまで研究してきた⁹⁾。しかし一方向のみにシェアする（ずらす）ためシェア方向の形状計測しか行い得ず、全方向に形状変化を持つ物体を測定するときは最初にあるシェア方向で測定を行い、次に最初の方向と直角にシェア方向を変更して再度測定を行って、最後に2つの測定データから2次元形状を復元する必要があった。

この複雑さを解消し測定途中のシェア方向変更作業での誤差混入を避ける方法として研究したのが今回報告するラジアルシェア干渉計を用いる形状計測法である⁹⁾。

ラジアルシェア干渉では同一物体から作られる拡大倍率の異なる2つの像を用いる。2つの像を観察視野の中心付近で同じ部分があるように重ね、視野中心以外では結果として一方の像に対してもう一方の像を視野中心から遠ざかる方向にシェアさせて干渉させる方法である。図1に示すのはラジアルシェア干渉で見られる2つの物体像のモデル図である。モデル物体はラグビーボールのような回転楕円体形状を想定している。 $f(x, y)$ で示すものは倍率が1で、 $f(ax, ay)$ ($a < 1.0$)で示すものは倍率が約1.5と大きく、それらは視野中心で同一部分が重なって配置される。ここで、 b, c, d はそのベクトル上におけるシェア方向となる。

次にこの二重像から像の粗面形状を求める方法を述べる。以下、式(3)までの二重像間隔から3次元形状を復元する方法は文献6)で報告されているデータ処理法と基本的に同じである。ここではより簡単な表現とし半導体レーザーからの2波長の使用方法も含めた全方向の形状測定法を述べる。図2に示す2つの曲線を図1の**b**方向にシェアされた横倍率の異なる2つの像の断面形状 $f(x)$ と $f(ax)$ とする ($y=0$ なので表現を簡略化して $f(x, 0)=f(x)$ と置く)。ここで $1/a$ ($a < 1.0$) は倍率の大きい像の拡大率である。この時、視野中心から x の位置での像表面の間隔 $g(x)$ は次式で与えられる。

$$g(x) = f(ax) - f(x) \quad (1)$$

この式に $x = ax$ ならびに $x = a^i x$ ($i=2, 3, 4, \dots$) を代入すると

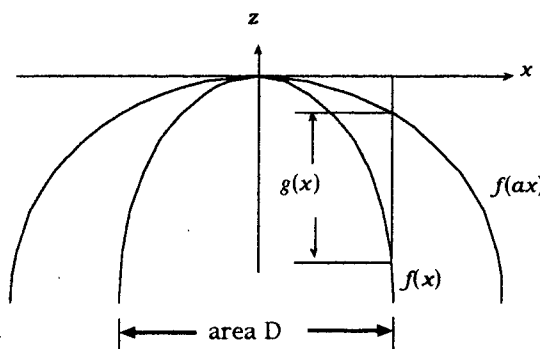


Fig.2 Sectional profiles on the x axis for the original object and the enlarged one. z is height. $g(x)$ is the distance between the original surface $f(x)$ and the enlarged surface $f(ax)$

式(1)はそれぞれ

$$\begin{aligned} g(ax) &= f(a^2x) - f(ax) \\ g(a^2x) &= f(a^3x) - f(a^2x) \\ g(a^3x) &= f(a^4x) - f(a^3x) \end{aligned} \quad (2)$$

となる。これらすべての式を上下に加えあわせると次の式(3)が得られる。

$$\sum_{i=0}^n g(a^i x) = f(a^{n+1}x) - f(x) \quad (3)$$

この式で右辺の第1項は a が $a < 1.0$ であるから n が十分大きな値を採るとき測定原点（視野中心）の断面データとなり、第2項は測定したい箇所の断面データとなる。一方で左辺は二重像の表面の間隔からコンピュータで簡単に計算される量である。故に図2の $f(x)$ を包含する area D の領域データが求められれば形状計測が可能となる。

次に図2に示す二重の像表面が作る間隔を半導体レーザーを用いて測定する方法を述べる。半導体レーザーは波長が可変である。まず波長 λ_1 のレーザー光で像表面の間隔 $g(x)$ が作る光路差 $2g(x)$ の干渉像に関して、ハリハラ法（対雑音性の良い位相シフト法として知られる⁷⁾）により位相 $\psi_1(x)$ を求めると $\psi_1(x)$ は次式となる。

$$\psi_1(x) = \frac{2\pi}{\lambda_1} [2 \cdot g(x) + B] + \phi_1(x) \quad (4)$$

ここで $\phi_1(x)$ は粗面での反射で生じる空間的にランダムな値をとる位相の成分であり、また B は用いる干渉光学系が構造上持つ光路差である。同様に波長 λ_2 を用いて位相 $\psi_2(x)$ を求めると次式となる。

$$\psi_2(x) = \frac{2\pi}{\lambda_2} [2 \cdot g(x) + B] + \phi_2(x) \quad (5)$$

ここで $\lambda_1 \approx \lambda_2$ （実験では $\lambda_1 = 782.30\text{nm}$, $\lambda_2 = 782.36\text{nm}$ を使用）として位相の粗面反射によるランダム成分を $\phi_1(x) = \phi_2(x)$ と仮定¹⁰⁾すると、 $\psi_{12}(x) = \psi_1(x) - \psi_2(x)$ で与えられる $\psi_{12}(x)$

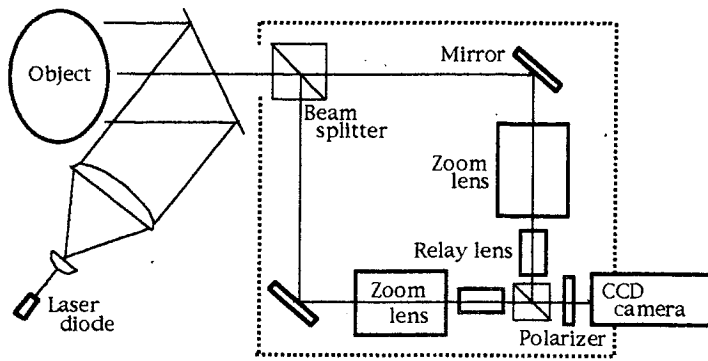


Fig. 3 Optical layout of a radial shearing interferometry and a light source. An object is illuminated along the same direction to measurement one. Dotted lines mean a contour of black plastic cover of the interferometry

は次のようになる。

$$\psi_{12}(x) = 2\pi[2 \cdot g(x) + B] \cdot \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) \quad (6)$$

これらの値は光路差： $2g(x) + B$ を波長 $\lambda = 1/(1/\lambda_1 - 1/\lambda_2)$ を用いて干渉測定したときに得られる位相と同じである。

ところで位相シフト法による2波長での位相測定では波長を変える前後で複数枚の画像を取り込む必要がある。このため波長で測定時間が少しずれ、光路差 B がいつも同じになるとは言えない。また我々が欲しいのは $g(x)$ だけである。故に $\psi_{12}(x)$ ではなく $\psi'_{12}(x) = \psi_{12}(x) - \psi_{12}(0)$ で与えられる $\psi'_{12}(x)$ を考えた。 $g(x)$ は式(1)より $g(0)=0$ であるので $\psi'_{12}(x)$ は次式となる。

$$\psi'_{12}(x) = 4\pi \cdot g(x) \cdot \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) \quad (7)$$

この $\psi'_{12}(x)$ と $\lambda_1=782.30\text{nm}$ 、 $\lambda_2=782.36\text{nm}$ を用いて式(7)から $g(x)$ を算出し、アンラップ(3.2 測定結果の節を参照のこと)後に式(3)から最終的に b 方向の粗面形状 $f(x)$ を求める。

b 方向以外の任意の方向の形状に関しても図1から分かるようにその方向にシエアされた干渉像の光強度データが得られているので、 b 方向と同じようにして形状を計算する。

3. 実験

3.1 実験装置

実験に用いた測定光学系(上方から見た光学素子配置図)を図3に示す。半導体レーザは電流注入により波長が容易に変化するファブリーペロ型(日立製HL7851G:出力50mW)を用い、レーザからの発散ビーム光を大型レンズで平行光にしてからベリクルビームスプリッタ(薄い膜からなるスプリッタで振動や空気が乱の影響を受けやすい。しかし大口径で安価)を介して観測方向より被測定物体に当てている。被測定物体はベリクルビームスプリッタの前方約35cmに配置した。物体から観測方向への反射光はベリクルビームスプリッタを通過して大型キューブビームスプリッタに入る。図3の点線は黒色アクリル板で作られた箱型のおおいであり、大型キューブビームスプリッタ等からなる干渉計が外乱の影響を受けにくくなるようにしている。図4に示すようにキューブビームスプリッタは圧電素子で光軸方向に数 μm 移動できるようにしてあり、スプリッタの移動はコンピュータによって制御される。スプリッタの光軸方

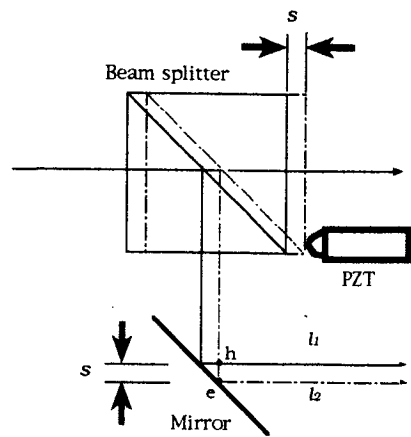


Fig. 4 PZT actuator setup for phase shifting. Large beam splitter in Fig.3 is moved by PZT actuator. Light l_1 reflected by the moved splitter takes path length shorter than that of light l_2

向の距離 s の移動は光路差を s だけ変化させる(s が数 μm と小さいため図4の l_1 と l_2 に沿って進んだ光はほぼ同じ経路を走ってカメラの同じ画素に入る。その結果、圧電素子が伸びることにより l_1 は l_2 に対し he の長さ、すなわち s だけ光路が短くなる)。大型ビームスプリッタを通過した2つの光はミラーにより倍率の異なる2つの結像レンズにそれぞれ向けられる(図3)。結像レンズは同時期に購入した(同ロットと考えられる)ズームニッコール35-105であり、一方は測定対象物表面での25mm \times 25mmの領域をCCDカメラの画素200 \times 200に取り込めるよう、もう一方のズームレンズは10mm \times 10mmの領域を画素200 \times 200に取り込めるように調整した。ズームレンズによる結像位置はレンズ背面から後方約50mmの所にあり、レンズの口径が大きくて(直径50mm以上)、小型ビームスプリッタを介して2つの像をカメラ受光面にそのまま結像させることができない。そこで後方に1倍のリレーレンズを入れ、リレーレンズ直後に小型ビームスプリッタを置いて2つの像をCCD受光面に正面から入射させている。受光面の直前の偏光板は測定物体での粗面反射で偏光方向が一部ランダムに変化し、受光面上での2つの光が互いに異なる偏光成分を含み、結果として干渉じまのビジビリティを下げることを回避するために入れている。以上の光学系はマッハツェンダー干渉計を含むものであって完全な共通光路干渉計でない。しかし形状測定において最も問題となる測定光学系と被測定物の間が共通光路となっておりマッハツェンダー干渉計も外乱の影響を受けにくいようにしてある。このためラジアルシエア干渉計(共通光路干渉計)の特徴を持つものとしてここでは取り扱った。

コンピュータに装着された画像取込みボードは64Mbyteのメモリを搭載しており、圧電素子でビームスプリッタをゆっくり移動し続けた時の干渉画像を30枚/sの速度で連続して128枚コンピュータへ取り込める。取り込んだ画像は取込み順に10枚ずつ平均し(ランダムノイズを抑えるため)、平均画像から同一画素でのビームスプリッタの移動に伴う光強度の変化を調べ、それぞれ $\pi/2$ の位相差を持つ平均画像を5枚抜き出してハリハラン法⁷⁾を用いて位相を評価した。

半導体レーザの発振波長は、あらかじめ250mm焦点の分光器で注入電流と発振波長の変化の関係を求めておき、実際の測定ではこの関係を利用して注入電流から計算している。以下に述べる形状測定で用いた波長は $\lambda_1=782.30$ 、 $\lambda_2=782.36\text{nm}$ であり、波長変化は0.1nm以下となっている。一般に半導体レーザの発振波長は素子の温度と注入電流によって変化することが知られている。故に素子には温度制御器を付けるべきだろうが、

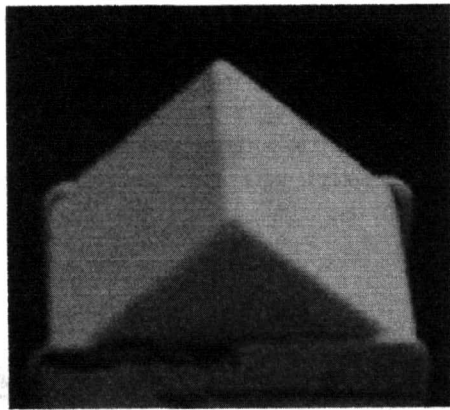


Fig.5 The first measured object

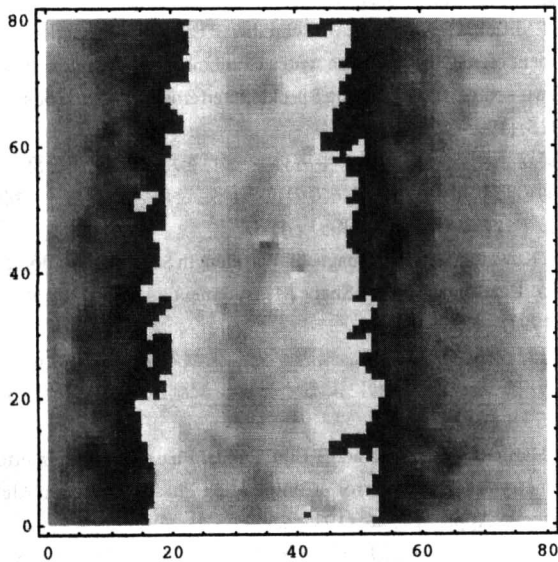


Fig.6 Measured phase. Perfect white and black mean phase of π and $-\pi$, respectively. Gray means phase between π and $-\pi$

装置は高価であって測定原理の検証には必ずしも必要でないため本実験では用いていない。

3.2 測定結果

本実験で最初に測定したのは直角を挟んで20mm×20mmの幅面を持つ直角三角柱に酸化マグネシウムの粉を吹き付けた粗面である(図5)。直角三角柱の材料は木である。3つの平行な稜が垂直方向に立ち、直角に接する稜が視野中心に来るようにして形状を測定した。ハリラン法を用いて2つの波長で位相をそれぞれ測定して式(7)で与えられる位相の差を描画した結果を図6に示す。図6は図5に示した物体を手前上方から見た時の10mm×10mm(画素80×80)の領域の位相の差を示しており、ランダムな雑音成分をなるべく除去するために測定点を中心とする3画素×3画素の領域で位相差データを平均している。この結果には位相の飛び(位相値の変化に伴う $-\pi$ から π の飛び、またはその逆の飛び)があるので飛びをアンラップ(飛びのない画像に回復)し、アンラップ結果を基に式(3)の左辺を計算(式(7)から $g(x)$ を求めて計算)した。式(3)の左辺から右辺第2項の $f(x)$ を計算した結果を図7に示す。横方向はメッシュが見やすくなるように2画素×2画素分を1メッシュで示した。式(3)の左辺に関しては $g(a^nx, a^ny)$ の a^nx, a^ny が0.5(ピクセル)以下になった時点でそれ以上の計算を終了した。また計算には、ピクセルの中心座標以外の位置での $g(x, y)$ も必要になる。この

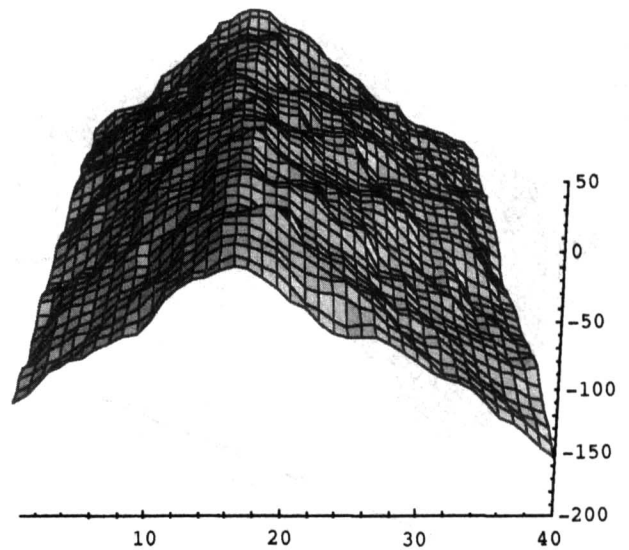


Fig.7 Measured shape. x range (from 0 to 40) and z range (from -200 to 50) correspond to 10mm and 8mm long respectively

場合は計算位置を取り巻く4ピクセル位置での $g(x, y)$ を基に、計算位置と4ピクセル中心位置までの距離情報を基に $g(x, y)$ を内挿計算している。

これらの形状計測の測定精度は用いる波長と波長差⁴⁾、取込画像に含まれるランダムノイズの強度(故に半導体レーザの出力やレンズの絞り)等に強く依存する。故に形状計測の手法による測定精度を抜き出して評価することは難しい。しかし本方法で得られる計測精度については何らかの評価が必要と思われる。そこで我々は図7の測定結果から測定精度の評価を行った。図7では三角柱を測定しているが、その斜面は完全な平面であると仮定し、測定結果に最も近い完全平面と測定結果を比較してそのずれの標準偏差を求めた。その結果から標準偏差は0.14mmであることが分かった。この値は横方向の平均処理から横分解能が $(25\text{mm}/200) \times 3 = 0.4\text{mm}$ として得られたものである。

三角柱以外に高圧ガスのバルブキャップの一部も形状測定した。表面には酸化マグネシウムの粉を吹き付け同様な条件で測定した結果を図8に示す。また図9には2次元変化を持つ身近なものとしてガラスピーカを取り上げてその注ぎ口付近を計測した結果を示す。

共に途中でシエア方向を変えることなく、ピーカの注ぎ口では二次元的な変化を有する形状が測定できている。

これらはすべて被測定物と測定光学系の間がオープンな環境でベリクルビームスプリッタを使用して測定できており、実験装置の耐振動性や耐空気じょう乱性が高いことを示すものである。

4. 結 論

以上の本論文の内容は以下のようにまとめることができる。

- (1) 本論文では、レーザ光の照射と反射光の測定が同方向から行い得、測定光学系と被測定物間の距離が長くても外部振動や空気じょう乱の影響を受けにくい共通光路干渉計を利用した粗面物体の形状計測法を新たに提案し、形状測定が可能であることを確認した。
- (2) この方法ではラジアルシエア干渉計を使用することで2次元形状変化を有する粗面物体も測定できた(我々の知る限り共通光路干渉計を利用した粗面物体の形状測定では、

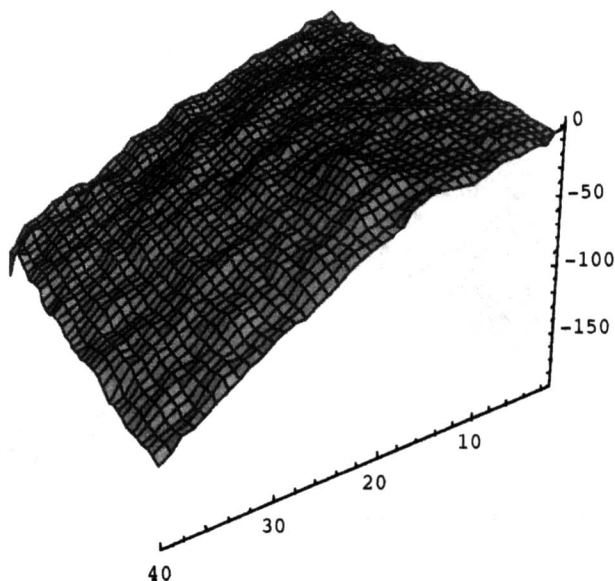


Fig.8 Measured shape of a part of cylindrical gas valve cover. x range corresponds to 10mm long and z range corresponds to 6mm long

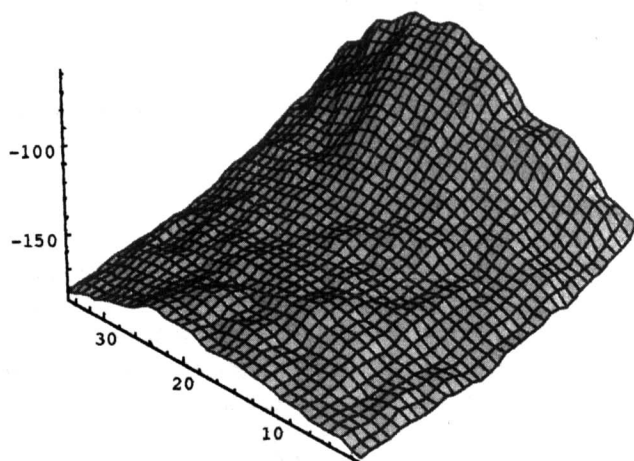


Fig.9 Measured shape of a pouring part of a beaker. x range corresponds to 10mm long and z range corresponds to 4 mm long

1 方向にシエアを与えて測定する方法しか報告例がなく、1 次元的变化（シエア方向的变化）を有する物体しかこれまでに測定できていない（例えば文献 11）。

(3) また可動部はビームスプリッタ部分にしかなく、移動量も数 μ m 前後であって駆動に圧電素子を用いているために機械的なガタは発生しにくく、繰り返し使用に耐える構造となっている。

参 考 文 献

- 1) K. J. Gasvik: *Optical Metrology, 2nd Ed.*, John Wiley & Sons Ltd., (1995) 161.
- 2) 大澤尊光, 浅野秀光, 古谷涼秋, 高増 潔, 大園成夫: 多値パターン投影による3次元形状測定(第3報), 精密工学会誌, 64, 2 (1998) 236.
- 3) T.Maack, G. Notni and W. Schreiber: Three-coordinate Measurement of an Object Surface with a Combined Two-wavelength and Two-source Phase-shifting Speckle Interferometer, *Opt. Commun.*, 115, (1995) 576.
- 4) 安達正明, 稲部勝幸: 半導体レーザを用いた段差を持つ粗面の形状計測 -3 波長での位相測定を用いる方法- 精密工学会誌, 65, 3 (1999) 418.
- 5) S. Kuwamura and I. Yamaguchi: Wavelength Scanning Profilometry for Real-time Surface Shape Measurement, *Appl. Opt.*, 36, 19 (1997) 4473.
- 6) 河野嗣男, 松本大司, 細越剛史, 矢沢孝哲, 宇田 豊: ラジアルシエア干渉計によるオンマシン測定, 精密工学会誌, 65, 3 (1999) 443.
- 7) P.Hariharan, B.F.Oreb and T.Eiju: Digital Phase -Shifting Interferometry - A Simple Error - Compesating Phase Calculation Algorithm-, *Appl. Opt.*, 26, (1987) 2504.
- 8) 大杉博人, 安達正明, 稲部勝幸: シエアログラフィを利用した形状計測, 1997 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1997) 461.
- 9) 平林 崇, 安達正明, 稲部勝幸: ラジアルシエア干渉計を用いた粗面物体の 3 次元形状測定法, 1998 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1998) 184.
- 10) G.Parry: Some Effects of Surface Roughness on the Appearance of Speckle in Polychromatic Light, *Opt. Commun.*, 12, (1974) 78.
- 11) P. K. Rastogi : An Electronic Pattern Speckle Shearing Interferometer for the Measurement of Surface Slope Variations of Three-dimensional Objects, *Opt. and Lasers in Eng.*, 26, (1997) 93.