

半導体レーザー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 -

安達正明** 北川洋一*** 松本哲也*** 稲部勝幸†

Shape Measurement of Rough Step Like Surface using a Laser Diode
- The Method with Three-wavelength Phase Shifting -

Masaaki ADACHI, Youichi KITAGAWA, Tetsuya MATSUMOTO and Katsuyuki INABE

The authors propose a new method which can measure a shape of rough step like surface by means of a speckle interferometry with a wavelength-changeable laser. A speckle phase available in the interferometry is usually affected not only by an optical path difference but also by a random component associated with surface roughness. The phase shifting method using two different wavelengths (λ_1, λ_2) is, therefore, limited to a single phase map about the optical path difference, because of the random component which remains without cancel. The single phase map is available only for the calculation of the shape of a continuous surface. In the proposed method, the authors use three different wavelengths ($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$) to obtain a double phase map, which is capable of a discontinuous surface shape calculation by means of a fringe-counting two-wavelength method. The validity of the method is experimentally demonstrated and discussion is extended to an accuracy of the measurement and an extent of the measurement range.

Key words: speckle interferometry, rough surface, shape measurement, laser diode, three wavelengths

1. 緒 言

粗面物体の3次元形状の測定法については原理の異なる多くの方法がこれまでに開発されている。その中で光を用いる測定法は、非接触性、長い作動距離、高密度な測定点など他の方法では実現しがたい多くの特徴を持つ。今後、大容量のデータも高速処理できるコンピュータの小型化や、よりコンパクトで高性能なレーザー光源の出現が期待できることを考えると、光を用いる3次元形状計測技術は応用分野をさらに大きく広げていくと予想される。故に、この分野における新しい方法の研究開発や既存技術の改良は現在の重要なテーマと言えよう。

光を用いる3次元形状の測定法はその原理から大きく2つに分類される。光の直進性すなわち幾何光学的性質を用いるものと、光の干渉的性質を用いるものである。幾何光学的方法は三角測量法を基本原理とするが、基本的な1点測定のもの、各種の異なるパターンを投影するもの¹⁾、モアレ法と呼ばれる周期的な1種類のパターンを投影する方法²⁾などがある。これらは一般に測定できる空間範囲が広く大型構造物を得意とするが、照明方向と観測方向に角度を持たせなければならない(凹凸の深い物体では陰が生じやすい)。一方、光の干渉的性質を用いる方法は照明と観測を同方向に取れ、非常に高精度である反面、測定範囲が狭かったり、測定対象が光学面に限られる等の制限があった。

干渉法でのこれらの制限は次の現象等に由来する。すなわちレーザー光など干渉性の高い光を、光の波長よりも凹凸が粗い面

に当てると、反射された光は空間にスペックルと呼ばれるコントラストの強い、空間変化の激しいパターンを作る。そこで粗面を対象とした干渉測定では、このスペックルの光路差変動(位相シフト)時に生じる振幅の小さな光強度変化を利用しなければならない。また、気体レーザー光など単一波長の光を用いて表面形状を測定しようとする、波長の整数倍の不確定さが避けられないなどである。

しかし近年、狭い範囲だが波長を容易に変えることのできる半導体レーザー光源で、高出力な製品が出現するにつれ、粗面でも干渉を用いて精度良く形状計測が行い得る道が開かれた。そして2波長のレーザー光を用いた粗面(段差のない)の測定法が報告され始めた³⁾⁴⁾。一方では、スペックル干渉計にレーザー波長の連続走査を組み合わせた方法⁵⁾⁶⁾も提案され始めた。特に後者は光学系からの絶対距離の測定も可能で段差も測定でき、その精度の高さなどからも将来的に注目すべき方法と思われる。

しかし後者の方法は、広い範囲にわたって波長を連続的に走査(数~数十nm)する必要がある。広い範囲にわたって波長を連続走査でき、出力の大きいレーザー光源は通常、色素レーザーやチタンサファイヤレーザー等の特殊な構造を必要とし、まだ半導体レーザーでは開発段階で入手できる物も低出力である。一方、波長を広範囲に走査しなくても良い半導体レーザー光源は出力も大きく、入手も容易で価格も安い。そこで我々は種々の光応用形状計測法の研究開発の重要性を考え、波長が狭い範囲だが変更可能で高出力の半導体レーザーを用いる、段差を持つ粗面の形状計測法の研究開発を行った。

スペックルを用いた干渉では粗面が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。このため、2波長を用いた位相シフト法では1つの位相図しか得られない³⁾⁴⁾。我々は段差形状も測定するため、3種類の波長を用いて2つの位相図を得た。さらに2つの位相図から形状を求める過程では、高精度な形状の計算が可能なしま次数決定型2波長法⁷⁾を用いた。実験

* 原稿受付 平成10年7月6日

** 正会員 金沢大学大学院(金沢市小立野2-40-20)

*** 兵庫県立工業技術センター(神戸市須磨区行平町3-1-12)

† 金沢大学工学部

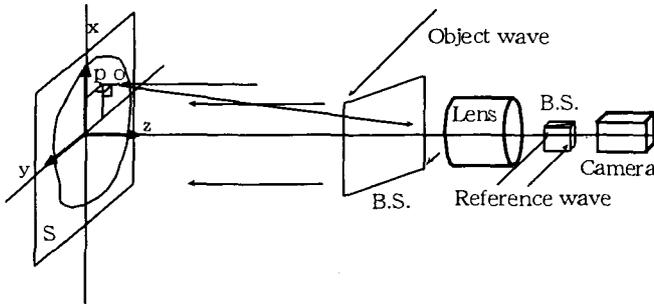


Fig. 1 Optical arrangement for surface shape measurement. B.S. means beam-splitter

では約3mmの段差を持つ粗面物体の形状計測を行い、提案する方法の有用性と精度を確かめている。本法は精度的には連続的で広範囲な波長走査を用いる方法に劣ると考えられるものの、簡単に形状計測が可能なる方法と思われる。

2. 測定原理

広げられた2つの平行平面波で物体の照明波面と参照波面を作る図1に示すような光学系を考える。ここで物体表面と一部分で交差し、図中のz方向に法線を持つ仮想面Sを考え、カメラレンズはS近傍の点がカメラの受光面に結像するように調整されているとする。また、参照光路を通った光はS上で反射される光に対して、カメラの受光面上で光路差Bだけ余分に空間を走っていると仮定する。

まず、波長 λ_1 のレーザー光を用いて、物体面上の点O(面Sからのz方向の高さを $h(x,y)$ とする：図2参照)からの光に関して、位相シフト法⁶⁾により位相 ψ_1 を求めたとする。O点からの光はS面上の点Pで反射される光に対して光路差が $h(x,y)(1+\cos\theta)$ だけ短くなるから、 ψ_1 は次式となる。

$$\psi_1 = \frac{2\pi}{\lambda_1} [h(x,y)(1 + \cos\theta) + B] + \phi_1 \quad (1)$$

ここで ϕ_1 は粗面での反射のために生じたランダムな位相の成分であり、また θ は図2に示すように反射光がz方向となす角度である。同様に、波長 λ_2, λ_3 を用いて位相 ψ_2, ψ_3 を求めると次式となる。

$$\psi_2 = \frac{2\pi}{\lambda_2} [h(x,y)(1 + \cos\theta) + B] + \phi_2 \quad (2)$$

$$\psi_3 = \frac{2\pi}{\lambda_3} [h(x,y)(1 + \cos\theta) + B] + \phi_3 \quad (3)$$

ここで $\lambda_1 \approx \lambda_2 \approx \lambda_3$ (実験では $\lambda_1 = 782.31, \lambda_2 = 782.36, \lambda_3 = 782.39\text{nm}$ を使用)として、粗面による位相のランダム成分を $\phi_1 = \phi_2 = \phi_3$ と仮定⁹⁾すると、 $\psi_{1,2} = \psi_1 - \psi_2, \psi_{1,3} = \psi_1 - \psi_3$ で与えられる $\psi_{1,2}$ と $\psi_{1,3}$ は次のようになる。

$$\psi_{1,2} = 2\pi [h(x,y)(1 + \cos\theta) + B] \cdot \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) \quad (4)$$

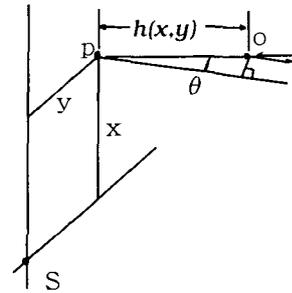


Fig. 2 An enlarged geometry about the reflection point O on an object surface

$$\psi_{1,3} = 2\pi [h(x,y)(1 + \cos\theta) + B] \cdot \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_3} \right) \quad (5)$$

これらの値は光路差 $L = [h(1 + \cos\theta)] + B$ を波長 $\lambda' = 1 / (1/\lambda_1 - 1/\lambda_2), \lambda'' = 1 / (1/\lambda_1 - 1/\lambda_3)$ を用いてそれぞれ干渉測定した時に得られる位相と同じである。故にこれらの波長 λ', λ'' は合成波長と呼ばれる。一般にこの波長は $\lambda_i (i = 1, 2, 3)$ に比べると非常に大きく設定することも可能である。しかし、測定面が段差を持つ場合は、段差の部分で波長の整数倍の不確かさが入ることは避けられず、Lの正しい評価には式(4), (5)のような2つ以上の合成波長での位相情報が必要となる。

2つの波長での位相情報が与えられた時、その結果から段差を含む形状計測を高精度に行う方法に関しては、過去に光学面を対象とする方法が報告されている⁷⁾。このしま次数決定型2波長法と呼ばれる方法は2つの波長での位相差よりしま次数と呼ばれる 2π の飛びの次数を決定する。そしてしま次数と1波長での位相情報より形状を精度良く計算する方法である。特に外乱により位相情報に誤差が混入しやすい条件下では、用いている2つの波長の新たな合成波長を計算し、その位相から形状を測定する方法より非常に高精度であることが明らかにされている(報告されている方法⁷⁾では波長 $\lambda_1 = 0.539 \mu\text{m}, \lambda_2 = 0.593 \mu\text{m}$ で段差を含む高さの範囲 $3 \mu\text{m}$ が高精度に測定できることが述べられている)。

本論文では測定対象面が粗面であり、式(1),(2),(3)は空間変化が激しいスペックル位相のランダム成分 ϕ_i を含むため、光路差Lの測定にこの方法を直接用いることはできない。しかし、式(4),(5)で計算される位相 $\psi_{1,2}$ と $\psi_{1,3}$ は ϕ_i を含まず空間的にゆっくり変化し、光学表面間の干渉による位相と似た特徴を持つため、この方法が有効と考えた。そしてこの方法によりLを求めることにした。

ところで、式(4),(5)で与えられる $\psi_{1,2}$ と $\psi_{1,3}$ の測定結果に大きな誤差を与えるが、まだ考慮されていない現象がある。測定時に波長を変え、位相シフトした光路差を元に戻す時、光路差Bが空気じょう乱等のため完全には戻らず、変化してしまう現象である。この変化は式(4),(5)で用いられているBが同じとは保証されないことを意味する。上に述べたしま次数と位相情報より形状を高精度に計算する方法では、2つの波長での位相値の小さな違いを利用して、しま次数を決定している。故に、光路差Bの変化は小さくても重大な影響をもたらす。しかも、本文で対象とする粗面の形状計測では作動距離が大きく、

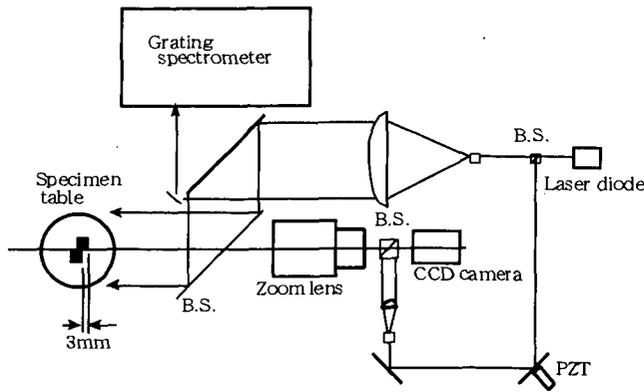


Fig. 3 Optical setup used in an experiment

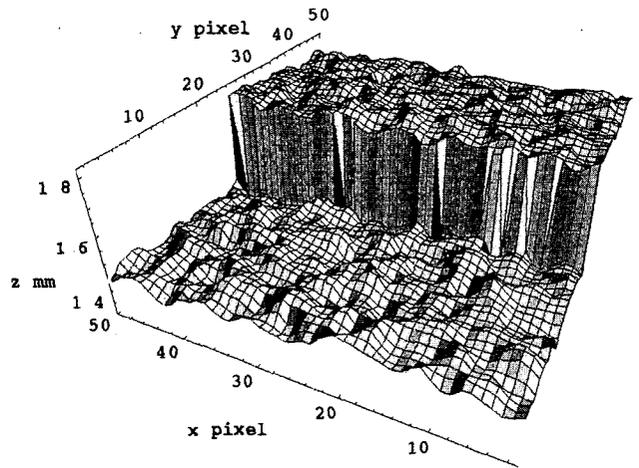


Fig. 4 3D expression of a measured step-height specimen which has a step height of 3mm

B の変化も大きい。この問題に関しては、測定対象物体と仮面 S の交点で式(4),(5)の位相がゼロとなるように位相の全域に一定値を加えて補正する方法(位相補正法)を採った。この場合、最終的に得られる光路差 L は S に対する相対値となる。この補正法と全く同じ手法が、光路差ゼロの面が測定対象物表面にない時のしま次数決定法として先の論文⁷⁾にも記述されている。我々は光路差ゼロの面の有無ではなく、長い作動距離での空気じょう乱による影響の除去のために位相補正法を用いた。

このようにして L が求められる。ここで粗面形状 $h(x,y)$ は L と $L=h(x,y)(1+\cos\theta)$ で関係づけられている。式の中の θ はカメラ画像内のピクセルの座標と、カメラからの物体の距離を元に容易に計算される量である。故に最終的に L から粗面形状 $h(x,y)$ を簡単に求めることができる。

3. 実験

3.1 実験装置

実験に用いた測定光学系(上方から見た配置図)を図3に示す。半導体レーザー光源は電流注入により波長をスムーズに変えられるファブリーペロー型(日立製HL7851G:出力50mW)を用い、レーザーからのビーム光を対物レンズで広げ、再びレンズで平行光にして、測定対象面にカメラ方向から照明光として当てている。測定対象物体を載せる台をカメラレンズの前方約50cmに配置した。カメラレンズはAFズームニッコール35-105を用い、台上での25mm×25mmの領域をCCDカメラの画素488×488に取り込めるように調整した。参照光路には位相シフトのためのミラーを置き、光路差制御はミラーを後方から圧電素子で移動して行った。参照光ビームは物体光と同様の方法で広げ、平面波にしてからカメラ受光面に正面から入射させた。コンピュータに装着される画像取込みボードは64Mbyteメモリを搭載しており、圧電素子で移動し続けた時の画像を30枚/秒の速度で連続して128枚コンピュータへ取り込めるようになっている。取り込んだ画像からそれぞれ $\pi/2$ の位相変化を持つ画像を4枚抜き出し、4画面位相シフト法を用いて位相を評価した。

半導体レーザー光源の発振波長は、物体照明光の一部を25cm焦点の分光器に導き、もう1つのコンピュータで自動測定した。以下に述べる段差形状を有する粗面の測定で用いた波長は $\lambda_1=782.31$, $\lambda_2=782.36$, $\lambda_3=782.39$ nmであり、最大でも波長変化は0.1nm前後となっている。なお、波長の測定精度

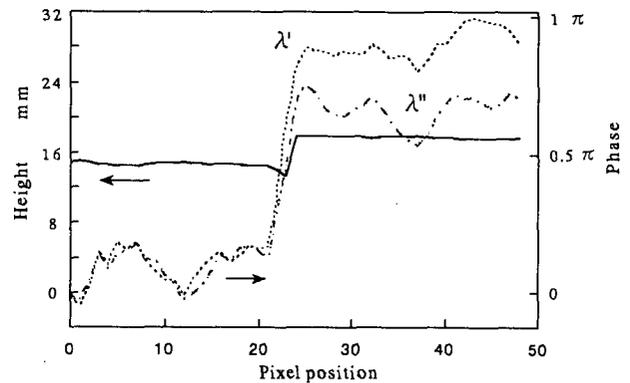


Fig. 5 Phase values calculated by Eqs. (4),(5) and the measured profile of the step-height specimen along the y-axis

はスペクトルのフィッティング処理を用いており0.005nmである。

3.2 測定結果

本実験で測定したのは、1cm×1cmの断面を持つ四角柱を2個接触させて固定し、それに酸化マグネシウムの粉を吹き付けて作製した段差粗面である。材料は黄銅であり切削加工で作製している。段差が視野の中心付近に来るようにして、形状を測定した結果を図4に示す。この測定では式(4),(5)で与えられる位相の情報からしま次数を決定する時に誤りを生じさせやすい雑音成分をなるべく除去するために、測定点の画素を中心とする5画素×5画素の領域で位相データを空間平均している。具体的には各画素での位相を ϕ_j とするとき、平均領域内で $\sum \cos \phi_j$ と $\sum \sin \phi_j$ を求め、この2つの値から平均位相 ϕ を複素数 $\sum \cos \phi_j + i \sum \sin \phi_j$ の位相として計算した。その後、しま次数決定型2波長法⁷⁾によりしま次数と式(5)の位相を用いて形状を計算している。平均処理後の式(4),(5)で与えられる位相のy方向の変化とそのデータから得られた形状の変化を図5に示す。粗面の段差は3mmに設定しているが、図5からもその段差がほぼ正しく測定されていることが分かる。ただし、ここ

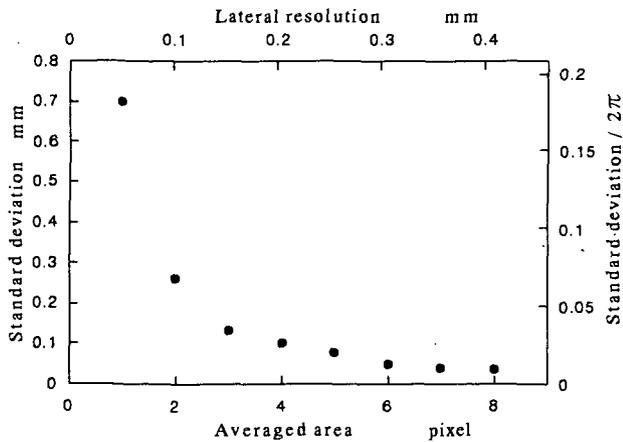


Fig.6 Averaged area dependence of standard deviation about the measured profile

では図1に示す θ は最大でも $\theta = 2.5/50 = 0.05$ であった。故に $1 + \cos \theta = 1.9988$ と計算されるので、画面内の全領域で $\theta = 0$ と近似した。

3.3 測定精度

まず、縦と横方向の測定精度について考える。図4、5に示したデータでは光学系により、 $25 \times 25 \text{mm}$ の領域がカメラの 488×488 画素に結像され、ソフトウェアで 5×5 画素の平均がとられている。故に、横分解能は $(25/488) \times 5 = 0.26 \text{mm}$ と計算される。この時、縦方向の測定精度は図5の高さデータの変動値より、標準偏差が約 0.1mm と計算された (λ "での位相値の標準偏差/ 2π は 0.023)。ここで平均画素数を変えた時のそれぞれのデータの標準偏差値の変化を、図4、5に使用したものと同一データを用いて調べた。結果を図6に示す。平均画素数を小さくし横分解能を上げていくと標準偏差値が急速に大きくなるのが分かる。

以上の横分解能に対する高さ方向の良い測定精度は、位相補正法の使用によるところが大きい。位相補正法を用いて外乱による B の変動を取り除いているからである。位相補正法を用いない状態ではしま次数決定型2波長法が正しく動作せず形状はほとんど測定できなかつた。すなわち本方法では通常雰囲気でも干渉じまがほとんど乱れない共通光路干渉計の性質を位相補正法(ソフトウェア)で持たせることができ、高精度測定が可能になっていると見なせる。

一方、本方法では波長を可変できる光源を用いるが、この波長測定精度も形状の測定精度に大きく影響すると予想される。そこで次に波長測定精度の影響を評価した。2つの位相図からの形状計算ではしま次数決定型2波長法⁷⁾を用いるが、しま次数決定に波長の測定精度が影響しないと仮定すると、形状計測値への影響は位相計算で用いた式(5)で評価できる。今、位相補正法でS仮面では $B=0$ とし、その点からの高さを $h(x,y)$ と計算するから、式(5)より

$$\psi_{1,3} = 2\pi \cdot h(x,y) (1 + \cos \theta) \cdot \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_3} \right) \quad (6)$$

故に

$$|dh(x,y)| = \frac{\psi_{1,3}}{2\pi(1 + \cos \theta)} \left\{ \frac{\left| \frac{d\lambda_1}{\lambda_1^2} + \frac{d\lambda_3}{\lambda_3^2} \right|}{\left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_3} \right)^2} \right\} \quad (7)$$

これと式(6)を用いて

$$\frac{|dh(x,y)|}{h(x,y)} = \frac{\left| \frac{d\lambda_1}{\lambda_1^2} + \frac{d\lambda_3}{\lambda_3^2} \right|}{\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_3}} \quad (8)$$

と評価される。このように形状の測定精度は波長の測定精度だけでなく、 λ_1 や λ_3 の値にも影響される。ここで波長の測定精度を 0.005nm 、 $\lambda_1 = 782.31$ 、 $\lambda_3 = 782.39 \text{nm}$ とすると $|dh(x,y)|/h(x,y)$ は11%となった(この精度はz軸の縮尺にのみ影響する)。このことから、図4と5の縦軸の高精度な評価には、 λ_1 、 λ_3 に大きな差を有するものを用いるか、より高精度な波長測定をすることが必要と分かる。もし λ_1 、 λ_3 に 1nm の波長差を与えれば波長の測定精度が 0.005nm でも縦軸の精度は1%となる。

ところで粗さによるスペックル位相のランダム成分やスペックルの形状はレーザー波長により変わることがこれまでに知られている⁹⁾。故に波長を広範囲に走査する場合、スペックル位相のランダム成分は波長走査の初期と後期では違ふと見なさなければいけない。この点において本方法は波長走査域が広くなく、波長を変えた時の位相への影響は無視できる。一方、広域での波長走査を行う場合は、この効果を打ち消す何らかの統計的方法が必要であろう。

3.4 測定範囲

この方法の測定範囲はしま次数決定型2波長法⁷⁾の次数決定精度による。次数が正確に決定できれば先に述べた測定精度が保証される。では次数決定はどれくらいのz方向測定範囲を許容するだろうか。条件の1つは合成波長 λ' と λ'' での測定位相の差が 2π を越えないことである。この場合、広い範囲の測定を可能にするには λ' と λ'' にあまり差を与えない方がよい。もう1つの条件は、測定された位相は通常誤差を伴うが、この誤差が次数決定に影響しないことである。しま次数決定型2波長法では各波長 λ' と λ'' での位相 $\psi_{1,2}$ 、 $\psi_{1,3}$ の関数である次数識別量 $D(\psi_{1,2}, \psi_{1,3})$ を用いる。そして2つの波長でのしま次数を n 、 m (共に整数)として、 $n\lambda'/2 - m\lambda''/2$ のどの n 、 m で D が与えられるかを調べている。故に誤差が一定の場合、 λ' と λ'' はなるべく大きな差を持つ方がよい。この両者の条件から位相測定誤差の関数として、最適な λ' と λ'' の比ならびに測定範囲が決められる。

以上の条件から測定範囲を解析的に予測することは我々には困難であった。そこでここでは数値計算を用いた。結果を図7に示す。x座標は位相測定誤差の標準偏差を 2π で割ったものであり、y座標は λ' と λ'' の比である。また、z座標値は次数が正しく測定できる範囲が短波長の何倍に当たるかを示す。ただし、z座標値の10以上を省略した。10以上を与えるためには位相測定誤差は非常に小さい必要があり、ここで述べたスペックル干渉では測定が難しいからである。図7のz値は測定

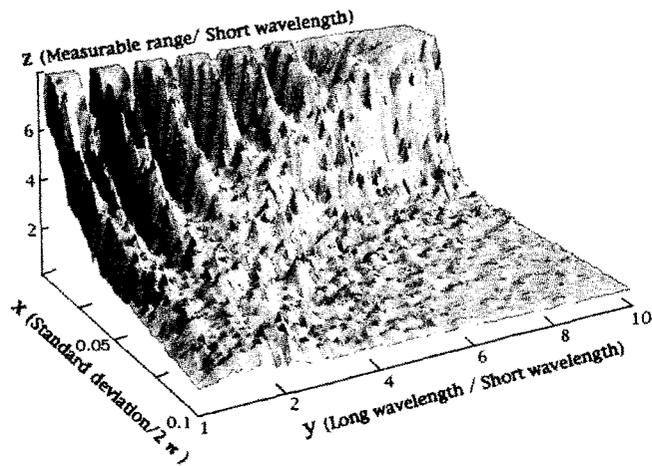


Fig.7 Numerical simulation result for measurable range. X axis means the standard deviation of phase measurement divided by 2π . Y axis means long wavelength divided by short wavelength. Z axis means measurable range divided by short wavelength.

範囲を少しずつ大きくしていく時、次数が正しく測定され続けた時の範囲である。故にこの条件は測定が非常に高い確率で保証される測定範囲と言える。図より λ' / λ は 1.3, 1.7, 2.3, 2.7 倍前後が良く、(位相測定での誤差の標準偏差) / 2π が 0.023 の場合(図5の位相データの変動値はほぼこの値となる)、測定できる範囲は短波長の5倍前後であることが分かる。ここで、 λ' と λ は半導体レーザのそれぞれの波長 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ から合成波長として計算されるので、 λ' / λ は広い範囲で可変であり 1 ~ 10 とした。

短波長 λ を大きくすれば測定範囲は広がると予想されるが、3.3節で述べたように、測定精度は少なくとも短波長 λ に比例するため悪くなる。

4. 結 論

本論文で提案した方法は次の特徴を持つと結論できる。

- (1) 段差を持つ粗面の形状を精度良く自動測定できる(横分解能 0.26 mm, 縦の測定精度は標準偏差で 0.1 mm。ただし、波長の測定精度の影響を除く)。

- (2) 波長走査域の狭い半導体レーザ(走査域 0.1 nm 以下)が使用可能である(実験では $\lambda_1 = 782.31$, $\lambda_2 = 782.36$, $\lambda_3 = 782.39$ nm を使用)。
- (3) 照明光を物体に対して正面からあてることのできるため、段差のある粗面でも陰のない測定ができる。
- (4) 位相補正法を用いており、空気じょう乱等の外乱の影響をあまり受けない。
- (5) (位相測定での測定誤差の標準偏差) / 2π が 0.023 の場合、測定できる範囲は短波長の 5 倍前後である。

参 考 文 献

- 1) K.Sato and S.Inokuchi: Three-dimensional Surface Measurement by Space-encoding Range Imaging, *J. Robotic Syst.*, **2**, 1, (1985) 27.
- 2) K. J. Gasvik: *Optical Metrology*, 2nd Ed., John Wiley & Sons Ltd., Chichester, (1995) 161.
- 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. Com.*, **115**, (1995) 576.
- 4) Y. Zou, G. Pedrini and H.Tiziani: Surface Contouring in a Video Frame by Changing the Wavelength of a Diode Laser, *Opt. Eng.*, **35**, 4, (1996) 1074.
- 5) S. Kuwamura and I. Yamaguchi: Wavelength Scanning Profilometry for Real-time Surface Shape Measurement, *Appl. Opt.*, **36**, 19, (1997) 4473.
- 6) H. J. Tiziani, B. Franze and P. Haible: Wavelength-Shift Speckle Interferometry for Absolute Profilometry using a Mode-hop Free External Cavity Diode Laser, *J. Mod. Opt.*, **44**, 8, (1997) 1485.
- 7) 西川尚之, 高安拓朗, 岩田耕一: 2波長位相シフト法による微細表面形状計測, *精密工学会誌*, **57**, 9 (1991) 1633.
- 8) J. E. Greivenkamp and J. H. Bruning: Phase Shifting Interferometers, in *Optical Shop Testing*, 2nd Ed., D.Malacara ed., John Wiley & Sons Ltd., New York, (1992) 532.
- 9) G.Parry: Some Effects of Surface Roughness on the Appearance of Speckle in Polychromatic Light, *Opt. Com.*, **12**, (1974) 78.