



半導体レーザーの狭域波長走査を用いた スペックル干渉計での粗面の形状計測*

安達 正明** 舛岡 淳司*** 稲部 勝幸

Shape measurement of diffuse objects using short-range scanning of laser diode wavelength in speckle interferometry
Masaaki ADACHI, Junji MASUOKA and Katsuyuki INABE

A phase ϕ of specklegram is a function both of an optical path difference L and wavelength λ . From this function, the optical path difference L , which is directly used to calculate a shape of an object, can be given as a function of $d\phi/d\lambda$. In the proposed technique, a widely used laser diode is adopted as a wavelength-changeable light source, and its wavelength λ is scanned slowly within 0.25 nm by using current injection control of the diode. From specklegrams captured during wavelength scanning, changing amounts of ϕ are extracted on individual pixels with a modified phase shifting technique. Since a scanning range is very short, it is difficult to measure a changing amount of λ along each specklegram capturing. Then a reference height step is also inserted in a vision of CCD camera and changing amounts of ϕ are measured both on the reference step and the object. From the ratio of the total changing amounts of ϕ , the shape of the object is calculated. Experiments are carried out to confirm the validity of the method.

Key words: speckle interferometry, diffuse surface, shape measurement, laser diode, wavelength scanning

1. 緒 言

粗面物体の3次元形状測定については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、高密度に取れる測定点など他では実現しがたい多くの特長を持つ。データ処理用コンピュータの高性能化や小型化が将来さらに進み、大量データも容易に高速処理できるようになることを考えると、光を用いる3次元形状測定法、特にCCDカメラを用いる方法は高密度測定点を活かして広く利用が進むと予想される。故に光とCCDカメラを用いる方法での測定精度の向上に関する研究や新しい手法の研究は工学的に重要と思われる。

光とCCDカメラを用いる粗面の形状測定法では、パターン投影を利用するものが広く知られており実用されてもいる。しかし、近年になって小型、廉価で波長可変な半導体レーザーが出現するにつれ、光の干渉的性質を用いる方法も積極的に研究され始めた^{1)~7)}。この方法は照明と観測を同方向に取れてシステムをコンパクト化でき、さらに凹凸の深い形状でも測定が原理的に可能である。低価格化が進む小型で高解像度なCCDカメラの普及と相まって、半導体レーザーと光干渉そしてCCDカメラを用いる方法は光応用形状計測の1つの重要技術になることが期待される。

これまでに公表された光干渉とCCDカメラを用いる方法には、2波長のレーザー光を用いる段差のない粗面形状の測定法⁸⁾や、スペックル干渉計にレーザー波長の広域連続走査を組み合わす方法⁹⁾、さらには狭域走査と周波数解析を用いる方法⁷⁾などがある。この中で広域走査を用いる方法は光学系からの絶対距離も測定可能であり、精度の高さなどからも注目すべき方法と思われる。しかしこの方法は、光出力をほぼ一定のまま広い範

囲(数~数十nm)に渡って波長を連続走査する必要があり、光源には大型で高価な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する⁹⁾。一方、狭域の波長走査を用いる方法では、光ディスク等の大きな市場に支えられて出力が大きく価格も安くなってきた半導体レーザーが利用でき、段差形状も正しく測定できる⁷⁾。この点で狭域波長走査と周波数解析を用いる方法は工業応用し易い⁷⁾と考える。しかしこの方法も、半導体レーザーに電流注入による波長走査でしばしば見られるモードホップがあるとこのレーザー素子は利用できない⁹⁾。そこで我々は、モードホップがある半導体レーザーでも使用可能な狭域波長走査型の3次元粗面形状測定法の開発を行った。

通常、半導体レーザーの厳密な波長走査は高価で特殊なドライバー装置を用いない限り困難である。提案する方法では、測定対象物の視野内に参照用段差を挿入して被測定物体と一緒に測定することでこの困難を解決している。また形状計算では取込画像の位相測定を利用しているが、これを数値計算で作成した変数が2個のルックアップテーブルを応用して高精度に行っている。実験では三角柱の形状やゴムタイヤの曲面形状を測定し、提案する方法の有用性と精度を評価した。本法は精度的には広域連続波長走査を用いる方法に劣ると考えられるものの、簡単かつ安価な機材で形状測定が可能な方法と思われる。

2. 測定原理

干渉計において光路差を L 、波長を λ とすると干渉の位相 ϕ は次式で与えられる。

$$\phi = \frac{2\pi \cdot L}{\lambda} \quad (1)$$

故に、波長 λ を少し変えた時の位相 ϕ の変化は次式となる。

$$d\phi = \frac{-2\pi \cdot L}{\lambda^2} \cdot d\lambda \quad (2)$$

式(2)から $d\phi/d\lambda$ を求めることで光路差 L が計算できる。こ

* 原稿受付 平成12年10月25日
** 正会員 金沢大学工学部 (金沢市小立野2-40-20)
*** 富士通機電(株) (新潟県西蒲原郡吉田町東栄町17-8)
†† 金沢大学工学部

の原理を用いると、粗面が作る光干渉像(位相と光強度が空間的にランダムに変化しておりスペckル干渉像と呼ばれる)であっても、波長を $\Delta\lambda$ ずつ変えながらCCDカメラを用いて像を取り込み、その時の位相変化量 $\Delta\phi$ を画素毎に抽出すると、 L を介して粗面の形状を測定できることになる。

干渉光強度から位相 ϕ を求める方法として良く知られているのは位相シフト法である⁹⁾。一般に位相シフト法では測定したい波面に対して参照光路の長さを波長の1/4倍ずつステップ的に変え($\pi/2$ ずつシフトし)、3画面以上を取り込む。故にこの原理での形状測定法に応用するには、波長を少し($\Delta\lambda$)変えた後、参照光路長をステップ的に変えながら干渉画像を複数枚取り込み、その後に参照光路長を戻し波長をさらに $\Delta\lambda$ 変えて同じような測定を繰り返すことになる⁹⁾。しかし通常の測定環境では、空気じょう乱や外部振動、さらに位相シフトに広く用いられる圧電素子の非線形性などから、光路差を元の状態に正確に戻しながら位相の高精度測定を繰り返すことは極めて難しい。

そこで我々は半導体レーザーへの注入電流をゆっくりと増やして発振波長を変えながら、スペckル干渉画像を連続的に取込み、これらを位相シフトされた画像として扱うことを考えた。式(2)にあるように波長を変えると光路差に比例して位相が変わる。この位相変化を位相シフト量とした。しかしこの位相シフト量は光路差に比例するので、全ての測定点で $\pi/2$ とすることは当然できない。そこで次の方法を用いた。

この方法はシフト画面を5画面用いる位相シフト法(ハリハラン法¹⁰⁾)の特別な形式での応用である。位相シフト法では3画面や4画面を用いるものが広く知られている。また画面数が少ないほうが短時間に測定できるという長所もある。しかし抽出位相の精度が重要な場合は3画面や4画面を用いる方法よりハリハラン法が適している。我々は雑音を考慮した数値シミュレーションからこのことを確認したので、ハリハラン法を応用した。ハリハラン法では位相シフト量 α 毎に取り込まれる次の干渉画像光強度を仮定する¹⁰⁾。

$$\begin{aligned} I_1(x, y) &= I_0(x, y)[1 + V(x, y)\cos\{\phi(x, y) - 2\alpha(x, y)\}], \\ I_2(x, y) &= I_0(x, y)[1 + V(x, y)\cos\{\phi(x, y) - \alpha(x, y)\}], \\ I_3(x, y) &= I_0(x, y)[1 + V(x, y)\cos\phi(x, y)], \\ I_4(x, y) &= I_0(x, y)[1 + V(x, y)\cos\{\phi(x, y) + \alpha(x, y)\}], \\ I_5(x, y) &= I_0(x, y)[1 + V(x, y)\cos\{\phi(x, y) + 2\alpha(x, y)\}], \\ I_6(x, y) &= I_0(x, y)[1 + V(x, y)\cos\{\phi(x, y) + 3\alpha(x, y)\}] \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 I_0 は平均光強度、 V はモジュレーション、 ϕ は干渉画像 I_3 の位相である(以降、簡単化のため変数の座標 (x, y) は省略する)。この式を用いると I_3 と I_4 の位相がハリハラン法では次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \tan(\phi) &= 2\sin(\alpha) \cdot \frac{I_2 - I_4}{2I_3 - I_5 - I_1} \\ \tan(\phi + \alpha) &= 2\sin(\alpha) \cdot \frac{I_3 - I_5}{2I_4 - I_6 - I_2} \end{aligned} \quad (4)$$

式(4)から ϕ を正確に求めるにはシフト量 α が分かっている必

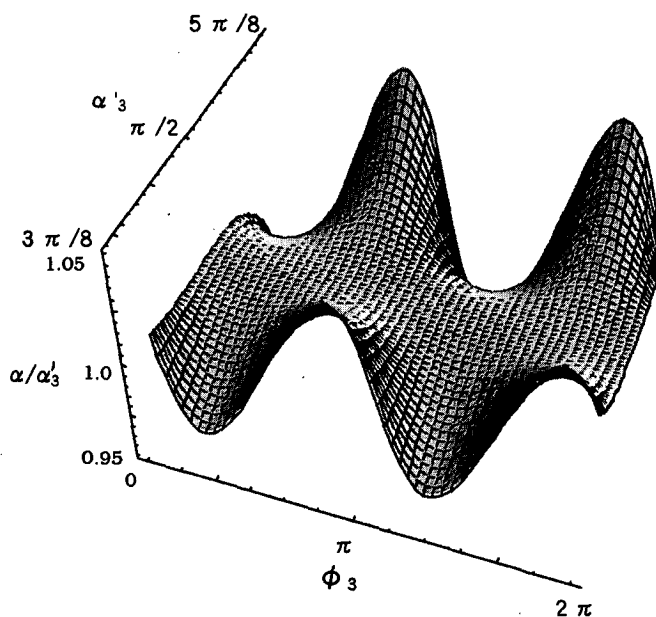


Fig.1 Dependency of α/α_3' on ϕ_3 and α_3' . This is obtained by numerical calculation using Eq.(3) and Eq.(5). The dependency is given as a 2-dimensional lookup table and is used to obtain an accurate value of α from the nominally calculated values of ϕ_3 and ϕ_4 .

要がある。しかし、式(2)が示すように位相シフト量は光路差に比例するため不明である。そこで $\alpha = \pi/2$ の時に I_3 と I_4 の正しい位相となる次の ϕ_3 と ϕ_4 を導入する。

$$\begin{aligned} \phi_3 &= \tan^{-1}\left[\frac{2(I_2 - I_4)}{2I_3 - I_5 - I_1}\right] \\ \phi_4 &= \tan^{-1}\left[\frac{2(I_3 - I_5)}{2I_4 - I_6 - I_2}\right] \end{aligned} \quad (5)$$

この $\phi_4 - \phi_3$ は α が $\pi/2$ の時には正しく α を与える。 α が $\pi/2$ からずれた時は、 $\phi_4 - \phi_3$ も $\pi/2$ からずれる。両者のずれは同じ量とはならないが、その時でも α のずれに従って $\phi_4 - \phi_3$ はずれるのだから、 $\phi_4 - \phi_3$ は α と何らかの関係を持つと想像できる。そしてこの関係を与える関数は ϕ_3 の値にも依存していると考えるのが一般的である。この依存性を調べるために式(3)と式(5)を基に、 ϕ を $0 \sim 2\pi$ 、 α を $0 \sim \pi$ の範囲で変えた時に、 ϕ_3 と $\alpha_3' (= \phi_4 - \phi_3)$ がどうなるかを数値計算した。図1はその結果から逆算した α/α_3' の α_3' と ϕ_3 への依存性を示す。この図を変数が2個(α_3' と ϕ_3)のルックアップテーブルとして、式(5)で計算される ϕ_3 と ϕ_4 からの正確な α の計算に用いることにした。

上記の方法で位相変化量 $\Delta\phi = \alpha$ は求まる。しかし、光路差を式(2)から求めるためには λ や $\Delta\lambda$ も必要である。これらを求めるためには通常、分光器を必要とする。ここで全波長走査量を0.3nm、その間に画像を300枚(以下の実験では245枚取り込んでいる)取り込むとし、波長変化量 $\Delta\lambda$ を概算すると $\Delta\lambda$ は1画像あたり0.001nm前後となる。この測定精度を満足する回折格子型分光器は少なくとも50cm以上の焦点距離を持つ大型のもの(重量は約100kg以上)である。故に組み込みは非現実的である。その点、最近出回っている光スペckル

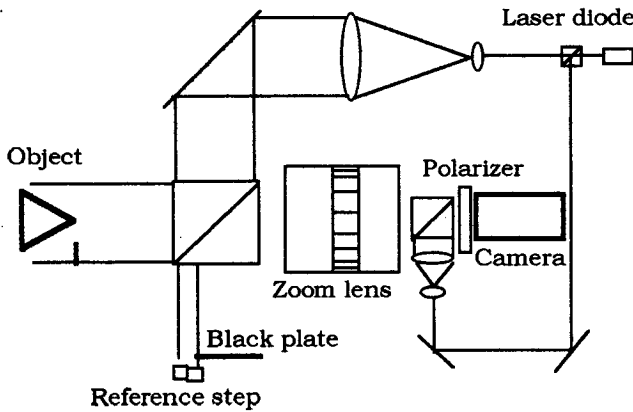


Fig.2 Optical layout of a shape measurement interferometry using narrow-range scanning of laser diode wavelength

メータと呼ばれる小型で高分解能な干渉式分光器は組み込める可能性が高い。しかし提案する測定法では干渉計を用いてないので、コストと簡便さから参照段差を利用することにした。すなわち、被測定物体に加えて2mmの段差を持つ参照段差を測定視野内に入れて測定し、段差を作る上下の各面での位相変化量の違いを同時に評価し、この値を基に被測定物体表面での光路差を正しく評価する方法を採った。

以上の方法を用いて最終的には走査可能な波長域の殆どに渡ってゆっくりと波長を変化させながら画像を多数枚取込み、これらのデータから形状の計算を行った。

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2に示す。半導体レーザは電流注入により波長がスムーズに変えられるファブリペロー型（日立製HL7851G：出力50mW）である。コンピュータの12ビットD/Aコンバータからの出力電圧を自作の電圧電流変換回路に通し、このレーザを制御した。使用したレーザ光の中心波長は782nmであり最短波長から最長波長までの走査範囲は0.25nm前後である（25cm焦点距離分光計を用いて測定）。レーザからのビーム光を直前に置いた小型ビームスプリッタで物体光と参照光に分け、物体光は対物レンズで拡げ大口径レンズで平行光にして大型ビームスプリッタを介して、カメラ方向から測定対象物に当てている。測定対象物はカメラレンズの前方約30cmの所に置いた。カメラレンズはAFズームニッコール35-105を用い、物体位置の2.5cm×2.5cmの領域をCCDカメラの画素300×300に取り込めるように調整した。参照段差は光が大型ビームスプリッタを直進して通過した位置に配置し、物体、参照段差共にカメラレンズのピントを合わせて取り込めるようにした。ビームスプリッタと物体の間には図に示す黒い遮光板を設置し、物体と参照段差の二重像がカメラ受光面に生じないようにしている。参照光ビームは物体光と同様の方法で拡げ平面波にしてから小型ビームスプリッタを介して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た画像取り込みボードは64Mbyteメモリを搭載しており、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。

3.2 測定結果

本実験で最初に測定したのは、三角柱である。材料は木であ

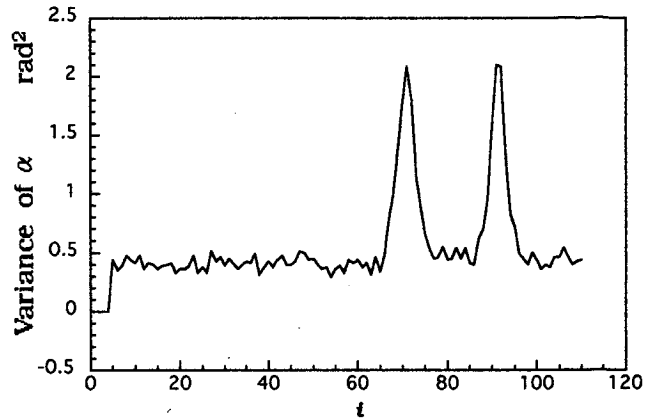


Fig.3 Mode-hop of a laser diode. Deviation of α calculated in a vision area has extremely large values at certain captured images

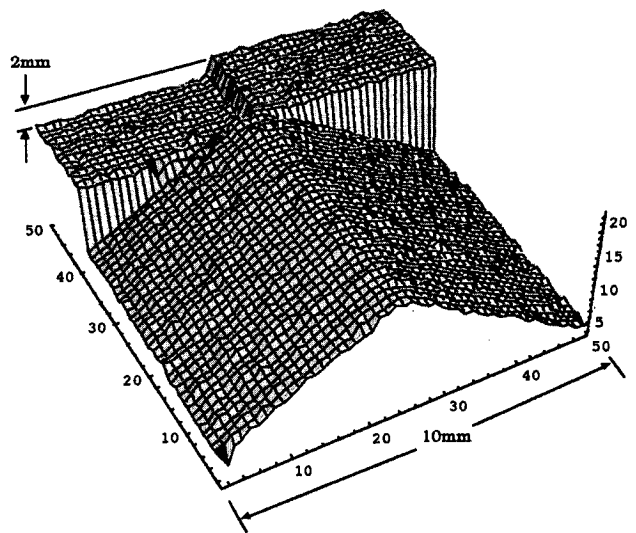


Fig.4 Measured shape of a triangle pole using narrow-range scanning of laser diode wavelength

り、光反射率を上げるために表面には酸化マグネシウムの粉を吹き付けている。参照段差は10mm×10mmの断面を持つ四角柱を2個接触させて固定し、同じく酸化マグネシウムの粉を吹き付けて作製した。四角柱の材料は黄銅であり切削加工で作製し、段差の高さは2.0mmである。被測定物体が視野の中心付近に来るようにし、参照段差が視野周辺に来るようにし、半導体レーザの発振波長を長波長側に少しずつ（平均で0.001nmと計算される）移動させながら移動毎にCCDカメラから画像を5枚取り込み平均した。この取り込みと平均を245回繰り返し、全体での波長走査は0.24(=0.001×245)nm前後、測定面付近での光路差からくる位相変化の総量は平均で60π前後になるように参照光路長を調整した。取り込み後、波長が長方向と短方向に隣り合わせとなる2画像をそれぞれ自身に加え、3波長での光強度の平均を画素毎に計算し、波長シフトに伴う光強度変化が滑らかになるようにした。そして平均した画像から取り込み初期の5平均画像分を捨て（波長走査初期で波長変化がスムーズでなかったため）、さらに1平均画像飛びに抜き出したものを短波長側から順に I_i ($i=1,2,3 \dots 119$)とした。この I_i は*i*が変わる毎に位相変化の平均値が約 $\pi/2$ [≒(60π/(245-2-5))×2] 前後となっている。これらの I_i から式(5)を用いて ϕ_i と ϕ_{i+1} を評価し、さらに $\alpha_i' = \phi_{i+1} - \phi_i$ を求め図1の

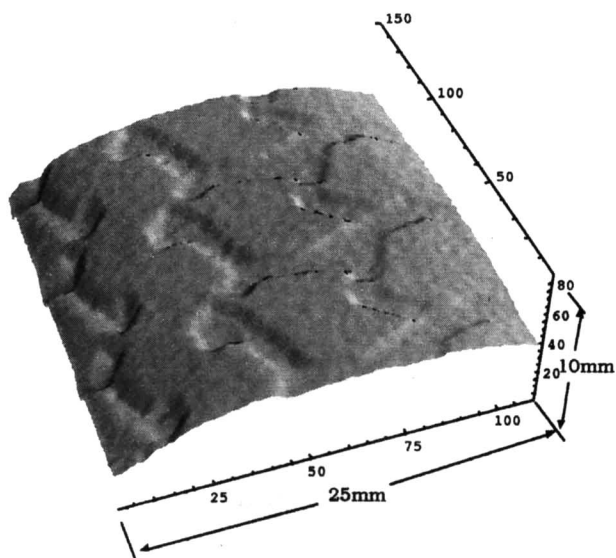


Fig.5 Measured shape of a part of bicycle tire

2変数のルックアップテーブルを用いて正しい α を計算した。 α の画像内での分散の、 l の増加に伴う変化の具体例を図3に示す。ゼロでない分散は画像内の各画素での L の違いからくるものであるが、図では $l=70$ と90付近で α の分散が異常に大きくなっている。この変化は l の全ての領域で観測されるわけではなく全幅も6画像ぐらいであり、波長が急激に変化した結果、すなわち半導体レーザーのモードホップと理解された。そこでこの領域、 $l=65\sim 75$ と85 ~ 95 付近のデータを $l=5$ から110までの α のデータから除去し、残りの α の全変化量($\Sigma\alpha$)を画素毎に求めた。最初にこの方法で得た α の変化量の測定結果には無視できない雑音信号の混入が多く見られ、この原因の多くが波長走査に伴う I_0 の変動にあることが分かった。そこで各 l での画像内の光強度の総和が一定値になるように光強度を規格化して I_0 のベースライン変化の補正を行った。しかし、依然として取り除くことのできない雑音が $\Sigma\alpha$ の測定結果に残った。そこでさらに画素のモジュレーション(画素位置に依存)が小さい場合には、その画素を中心とする 3×3 画素内でモジュレーションが最大のデータで置き換えを行うことや、計算結果に 3×3 画素でのメディアンフィルタ処理を行う方法を最終的に取り入れた。

得られた三角柱の形状測定結果を図4に示す。干渉像のTVモニター画面では段差と三角柱の像が少し重なって見られたが、重なり部分を除去して画像データをコンピュータメモリに取り込んでおり、結果として図4では段差と三角柱が隣接して表示されている。また、自由曲面を持つものとして自転車のタイヤのパターンも測定した。測定結果を図5に示す。このタイヤの写真を図6に示す。さらにプラスチックのギヤも測定した。しかし、ギヤの測定結果には以上の方法では取り除くことができない雑音が多く含まれており、さらに何らかの改善が必要であることを示した。

3.3 測定精度

ここでは図4の測定結果より測定精度と分解能を評価した。測定された三角柱の斜面が理想的な平面と仮定し、実際の測定結果との違いから測定精度を、また測定された参照段差のステップ形状の横方向の変化から横方向分解能を評価した。その結果、測定精度は標準偏差で0.1mm、横分解能は0.2mmとなった。一方、ギヤでは雑音が多くて測定が難しかったが、こ

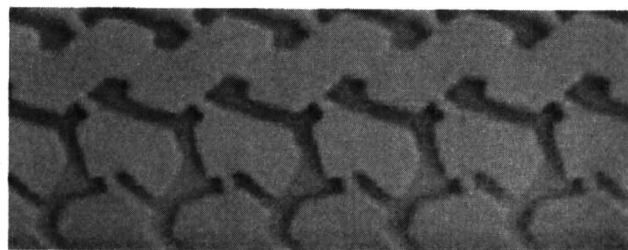


Fig.6 Picture of a part of bicycle tire pattern

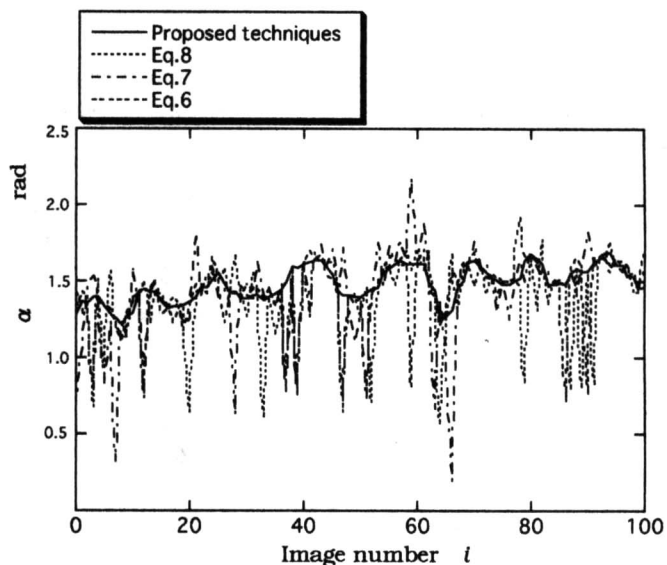


Fig.7 Changes of α calculated by the proposed technique and Eq.(6),(7),(8)

れは凹凸を持つ物体の凹面部分では近くの粗面から反射された光も直接の照明光に加わり、これが計測される光の光路差に外乱として働くのではと予想させた。故に、上記の測定精度と分解能は凸の形状を持つ粗面での精度と考えるべきだろう。後者の現象に関しては、原因の確認を進めて改めて報告したいと考える。

ところで、式(3)で与えられる光強度から、シフト量 α を解析的に求めることも可能である。式(6)はハリハラが報告しているものである¹⁰⁾。また、式(7)と式(8)は式(6)と違うものとして我々が式(3)から解析的に計算したものである。これらを用いての形状評価も我々は行った。しかし、式(6)、式(7)、式(8)を用いての測定精度はここで提案した方法に比べ非常に悪いものであった。

$$\alpha = \cos^{-1} \left\{ \frac{I_3 - I_1}{2(I_4 - I_2)} \right\} \quad (6)$$

$$\alpha = \cos^{-1} \left\{ \frac{(I_1 + I_3) - (I_0 + I_4)}{4I_2 - 2(I_1 + I_3)} - \frac{1}{2} \right\} \quad (7)$$

$$\alpha = \cos^{-1} \left\{ \frac{(I_1 + I_3) - (I_2 + I_4)}{2(I_2 - I_3)} \right\} \quad (8)$$

図7は、図5の計算のために取り込まれた波長走査時の光強度

データから、ある画素についての α の t の増加に伴う変化を各式を用いて計算したものである。式(6),(7),(8)共に α の変動は非常に大きい。一方、変数が2個のルックアップテーブルを用いる方法は実線で示すように滑らかな変化をしている。図から α の測定値は t の増加と共に小さく変動しており、波長走査が直線的な変化でないことが分かる。この変動を含んでいても式(6),(7),(8)から得られる α の測定値のバラツキは標準偏差で提案方法の約2倍以上であった。波長走査が直線的な場合、標準偏差の違いは(図7から予想すると)さらに大きなものになると思われる。このように、提案した方法は α の評価に優れている。図7の結果は提案する方法の有用性を示す。

なお、式(2)から0.25nmの波長走査では参照段差の上下面(光路差4mm)での位相変化総量の違いは 3.3π であり、図4の測定精度の標準偏差0.1mmは位相変化量にして0.16 radの違いに相当する。このような位相の高精度な抽出は周波数解析を用いる方法⁷⁾では実現できないものである。

一方、広域波長走査で用いられる光源を我々の方法にそのまま応用すると仮定した時に得られる測定精度 ΔL を次に推定した。式(2)の $d\phi$ の総量 $\Sigma d\phi$ の測定誤差は広域走査でもこの実験で得られた値と同じと仮定すると、本実験での波長走査量を $\Delta\lambda'$ 、広域波長走査量を $\Delta\lambda$ として、 ΔL は

$$\Delta L = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda} \cdot \Delta\lambda' \quad (9)$$

と計算される。故に当然ながら測定精度を上げるためには広域波長走査と組み合わせることが効果的である。半導体レーザで広域波長走査の可能な高出力光源が開発されることを期待する。

3.4 測定範囲

本手法では光路差の違いによって各画素で位相シフト量が異なっており、これを図1のルックアップテーブルで補正して計算している。補正はしていても位相シフト量が $\pi/2$ から大きくずれることは α/α_i' が1から大きくずれることもあり、信号対雑音強度比の点からは好ましくない。そこで、図1の補正係数 α/α_i' が1に近い $\alpha_i' = \pi/2 \pm \pi/8$ 以内を用いることにし、 α_i' をこの範囲に収めるためには光路差の違い L' (測定範囲)はどこまでが許されるかを評価した。式(2)の位相変化量を α_i' として次式が成立する。

$$\frac{\pi}{2} \pm \frac{\pi}{8} = \frac{L \pm L'}{\lambda^2} \Delta\lambda \quad (10)$$

故に

$$\frac{L'}{L} = \frac{1}{4} \quad (11)$$

これより、干渉計を組み上げたときの測定中心での光路差の $\pm 1/4$ 倍が精度の良い測定の範囲となる。この結果は光路差を大きくすればそれに比例して測定範囲が広がることを意味する。しかし、大きくすると α_i' を $\pi/2$ 付近に保つために $\Delta\lambda$ を小さくする必要が生じ、走査可能な波長域を全て走査するためには多くの画像を取り込む必要が生じる。しかし L' の決定には、この問題と同時に結像系の焦点深度が測定範囲を制限する問題をも考慮する必要がある。この焦点深度は用いた図2の光学系では約8mmと計算された¹²⁾。これは式(11)より厳しい条件となっている。

最後に図2に示した一般的な結像レンズを用いる方法では、像の視野中心と視野周辺では理論上で光路差に小さい違いが生じることもあけておく。この誤差はテレセントリック系と呼ばれる光学系を用いれば取り除くことができるが、図2の配置から誤差は0.01%以下と評価されたのでここでは無視した。

4. 結 論

本論文で提案した方法はまとめると次の特徴を持つ。

- 1) 波長走査域の狭い半導体レーザ(走査域0.3nm以下)が使用可能であり、また波長走査にモードホップがあっても良い。
- 2) 照明方向と観測方向を同じ方向に取れるため段差のある粗面でも陰のない測定ができる。
- 3) 波長走査による位相シフトを用いているため、光路差によってシフト量が $\pi/2$ と異なるが、これを変数が2個のルックアップテーブルという概念を使用して解決した。この方法を位相測定の精度に優れるハリハラン法と組み合わせることにより、測定精度を高めることができた(形状測定精度の標準偏差で約0.1mm、位相変化総量の位相の測定精度で0.16 rad)。

参 考 論 文

- 1) M. Yonemura: Wavelength-change characteristics of semiconductor lasers and their application to holographic contouring, *Optics letter*, **10**, 1 (1985) 1.
- 2) Y. Ishii, J. Chen, and K. Murata: Digital phase-measuring interferometry with a tunable laser diode, *Optics letter*, **12**, 4 (1987) 233.
- 3) T. Maack, G. Notni, 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, 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) M. Takeda and H. Yamamoto: Fourier-transform Speckle Profilometry: Three-dimensional Shape Measurements of Diffuse Objects with large Height Steps and/or Spatially Isolated Surfaces, *Appl. Opt.*, **33**, 34 (1994) 7829.
- 8) J. E. Greivenkamp and J. H. Bruning: Phase Shifting Interferometers, in *Optical Shop Testing*, 2nd Ed., D. Malacara ed, (1992) 532.
- 9) J. Kato and I. Yamaguchi: Phase-shifting Fringe Analysis for Laser Diode Wavelength-scanning Interferometer: *Opt. Rev.*, **7**, 2 (2000) 158.
- 10) P. Hariharan, B.F. Oreb and T. Eiju: Digital Phase-shifting Interferometry: A Simple Error-compensating Phase Calculation Algorithm, *Appl. Opt.*, **26**, 13 (1987) 2504.
- 12) K.J. Gasvik: *Optical Metrology*, 2nd Ed., John Wiley & Sons Ltd, England (1995) 72.