

光路差がランダムに変動する状況下での波長シフト干渉計を用いた粗面の3次元形状計測*

安達 正明** 佐々木 祐理***

3D-shape Measurement of Rough Surface Using Wavelength Shift Interferometer
under Unavoidable Random Changes of Optical Path Differences

Masaaki ADACHI and Yuuri SASAKI

We propose a 3D-shape measurement technique of a rough surface using speckle interferograms captured under random changes of optical path differences. Amounts of the phase shifts between captured interferograms are calculated through Max & Min light intensities searchings at two different pixels in frames and twin normalizations of their intensity changes. The calculated phase shifts which involve random changes over 2π are used to extract phase distribution of a speckle interferogram. After capturing 175 specklegrams which consist of 25 specklegrams at wavelengths of around 778.201nm, 778.217nm, 778.258nm, 778.366nm, 778.623nm, 779.151nm and 780.260nm, phase distributions are extracted regarding the first captured interferogram in each wavelength. These distributions normally involve uncertain offsets due to random shifts. After canceling these offsets with the phase data at a base-height pixel selected arbitrarily, the ratios of phase change against wavelength change are extracted at all the pixels. 3D shape is calculated from the extracted ratios.

Key words: 3D shape, speckle interferometer, phase extraction, random shift, vertical vibration

1. 緒 言

工業製品は一般に小さな部品から構成され、組み立てラインにおいてはそれらの位置が高さも含めて許容範囲にあるか否かを調べる3次元形状検査が必要である。これらの検査は非接触性と高速性が求められ、光を用いる方法では光切断法のように投光方向と観察方向に角度を持たず手法が広く採用されている。しかし部品が高くなると影を生じたり、計測精度を上げようと角度を大きくすると測定域に比較して広い開口部が必要となってくる。このように利用に当たっては採り入れにくい条件もあり、深穴内の底部形状の測定等は困難だった。これを解決するには投光方向と観察方向を同じにする必要がある。この種の方法として、結像系の焦点ボケを用いる方法¹⁾や共焦点光学系を用いる方法²⁾、また光パルス方式³⁾や、波長走査を用いる手法⁴⁾等が知られている。この中で前2者はレンズもしくは測定対象を高さ測定幅を越えて光軸方向に動かす必要があり、大きな測定視野を採りにくい等の問題がある。一方、光パルス方式は機械的な駆動部を必要とせず視野も大きく採りやすいが、高さの繰り返し誤差を1mm以下にすることは一般的に超高速電子デバイスを持っても難しい。そして波長走査を用いる場合は光路差を一定のまま波長のみを線形的に変えて干渉光強度変化の周波数や位相変化速度から距離を算出する。このため、波長以上のランダムな光路差変動が入り易い組み立て工程では応用が困難であった。

以上のことから投光方向と観察方向が同じで、視野や測定できる高さ範囲も広く、また数十 μ m前後のランダムな光路差変動が避けられない環境下でも高い精度で形状計測できる手法の開発は強く求められて来た。この要求を満たす1つの手法として、周波数シフト帰還型レーザーによるマルチ発振光の波長走査を用いる方法が開発⁵⁾され、また波長走査方向が逆の2個の

VCSEL (Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser Diodes) 素子を使い光路差変動下でも使える距離計測法⁶⁾も最近発表された。しかしまだ1点測定である。求められる3次元形状検査の要求速度と費用を考えた場合、性能向上が著しい高速高解像度カメラを利用する手法が開発できれば、その実用性は高いと思われる。

そこで、我々は低価格化が進みつつある波長可変半導体レーザーと高解像度カメラを用いる「光軸方向に振動が残る環境下で高精度に3次元形状を計測できる方法」の開発^{7,8)}に取り組んできた。そして光路差に40波長前後のランダム変動が入り込んでも、高さ範囲10mmで高さ精度5 μ m前後を持つ3次元形状計測技術を開発できた。本論文では、この方法に関して、計測原理、実験結果、計測精度等に関して報告する。

2. 光路差変動下での波長シフトを用いた形状計測の原理

提案する手法では対象を段差を含む粗面形状とし参照光と粗面からの反射光を干渉させ、ランダム光路差変動下で取り込む多数枚のスペックル干渉像を利用する。波長シフト時の干渉像の位相変化量から3次元形状を計算するが、最終的な3次元形状を得るまでには4つのステップを経る。ここではこの形状計測のために新規に提案する以下2.3, 2.4のステップと共に、各ステップで扱う物理量とその抽出方法を説明し、最終的に3次元形状を得るまでの道筋を示す。

2.1 光路差がランダム変動する状況下で撮影された多数枚の干渉像を使う干渉像間の位相シフト量計測

空気擾乱や外部振動等で予測できない光路差変動が入り込む干渉計では、良く知られ広く使われる一定量の位相シフトを用いる位相抽出法は使用できない。そこで多数枚の干渉像から干渉像間の位相シフト量をまず計測し、そのシフト量を用いて1枚目の干渉像の位相分布をその後に抽出する。

この位相シフト量の計測は「光強度の2回規格化法による位相シフト量の抽出⁹⁾」を用いる。この要点のみを読者の便宜を考え再記する。まずラインカメラで干渉像を取り込んだ時のように線上の光強度が得られており、波長以上の光路差変動を受けて光強度が大きくランダムに時間変化していると

* 原稿受付 平成27年 9月11日

掲載決定 平成27年11月13日

** 正 会 員 金沢大学理工研究域 (金沢市角間町)

*** 金沢大学大学院自然科学研究科

する。この干渉像から各画素での最大と最小光強度を探し出し、この両光強度と取込時の光強度を使って位相がだまかに $\pi/2$ 異なる2点A, Bを見つける。この2点での最大光強度と最小光強度を用いて、2点の光強度の時間変化を振幅1で平均値0に規格化する。この規格化されたA, B点での強度変化に関してその和と差を次に計算し、それらを再度規格化すると、その和 I_{NADD} と差 I_{NSUB} は以下となる。

$$\begin{aligned} I_{\text{NADD}}(t) &= \cos \left[\frac{2\phi(t) + \phi_A + \phi_B}{2} \right] \\ I_{\text{NSUB}}(t) &= -\sin \left[\frac{2\phi(t) + \phi_A + \phi_B}{2} \right] \end{aligned} \quad (1)$$

ここで t は光強度を取り込んだ時間で、 t と共にランダムに変化するA, B点での干渉位相を $\phi(t) + \phi_A$, $\phi(t) + \phi_B$ としている。この和 $I_{\text{NADD}}(t)$ と差 $I_{\text{NSUB}}(t)$ は同じ引数を持ち、その余弦関数と正弦関数になるので、複素平面での偏角計算でその引数 $\phi(t) + (\phi_A + \phi_B)/2$ を計算できる。ここで $\phi_A + \phi_B$ は $\phi(t)=0$ の時、すなわち最初の画像取得時の両点の位相の和であり変化しない定数だから、画像取込番号 i ($i=0,1,2,\dots$) と共に変化する位相変化量 $\Delta\phi_i = \phi(t_i) - \phi(t_0)$ は取り込まれた線上の光強度変化から求めることができる。本手法で撮影する干渉像は2次元であり画像は x (水平) 方向に強度変化している y (垂直) 値の異なる多数の線上データから構成される。各線上データは雑音を無視するならば同じ $\Delta\phi_i$ を与える筈なので、 y 値の異なる線上データから個別に計算される $\Delta\phi_i$ を総て平均して高精度な位相シフト量 $\Delta\phi_i$ を計算する。

2.2 位相シフト量 $\Delta\phi_i$ を用いた干渉像の位相抽出

光路差変動下で取り込んだ N 枚の干渉像があり、その i 枚目の干渉像の0枚目に対する位相シフト量 $\Delta\phi_i$ が分かる時、0枚目の干渉像の位相分布は最小二乗法を用いて計算¹⁰⁾ できる。取り込まれた干渉像から、各画素 \mathbf{r} での光強度変化 $I_i(\mathbf{r})$ が分かり位相シフト量も分かっているの、シフト量に合う光強度変化になるように初期位相を求めるのである。この初期位相 $\psi(\mathbf{r})$ は以下で与えられる。

$$\psi(\mathbf{r}) = \arg[\alpha_1(\mathbf{r}) - i\alpha_2(\mathbf{r})] \quad (2)$$

ただし、

$$\begin{bmatrix} \alpha_0(\mathbf{r}) \\ \alpha_1(\mathbf{r}) \\ \alpha_2(\mathbf{r}) \end{bmatrix} = \mathbf{A}^{-1}(\Delta\phi_i) \mathbf{B}(\mathbf{r}, \Delta\phi_i) \quad (3)$$

であり、右辺の $\mathbf{A}(\Delta\phi_i), \mathbf{B}(\mathbf{r}, \Delta\phi_i)$ は次式で与えられる。

$$\mathbf{A}(\Delta\phi_i) = \begin{bmatrix} N & \sum \cos(\Delta\phi_i) & \sum \sin(\Delta\phi_i) \\ \sum \cos(\Delta\phi_i) & \sum \cos^2(\Delta\phi_i) & \sum \cos(\Delta\phi_i) \sin(\Delta\phi_i) \\ \sum \sin(\Delta\phi_i) & \sum \cos(\Delta\phi_i) \sin(\Delta\phi_i) & \sum \sin^2(\Delta\phi_i) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}, \Delta\phi_i) = \begin{bmatrix} \sum I_i(\mathbf{r}) \\ \sum I_i(\mathbf{r}) \cos(\Delta\phi_i) \\ \sum I_i(\mathbf{r}) \sin(\Delta\phi_i) \end{bmatrix} \quad (5)$$

2.3 波長シフト時の位相変化を用いた高さ基準点との光路差の計算

光路差が変化しない時、波長シフト時の位相変化から光路差は簡単に計算できる。しかし本研究では光路差がランダムで 2π 以上変化している。そのために時間と共に変化する成分(位相のオフセット)を取り除くため以下の取り扱いをする。変動中の光路差 OPD は測定点 \mathbf{r} と撮影時点 t の関数であるが、この OPD は \mathbf{r} に依存する項 OPD_r と t に依存する項 OPD_t の和で与えられるとする。今波長を λ_0 にして t_0 から画像を複数枚撮影し始め、 t_0 での位相を上記の2.2の方法で抽出する時、位相 ψ は \mathbf{r} と t_0 と波長 λ_0 の関数として以下となる。

$$\psi(\mathbf{r}, t_0, \lambda_0) = 2\pi \frac{OPD_r(\mathbf{r}) + OPD_t(t_0)}{\lambda_0} \quad (6)$$

次に波長を λ_1 にして t_1 から画像を撮影し始め t_1 の位相を抽出すると以下となる。

$$\psi(\mathbf{r}, t_1, \lambda_1) = 2\pi \frac{OPD_r(\mathbf{r}) + OPD_t(t_1)}{\lambda_1} \quad (7)$$

これら2つの位相の差は次式となる。

$$\begin{aligned} \psi(\mathbf{r}, t_0, \lambda_0) - \psi(\mathbf{r}, t_1, \lambda_1) &= 2\pi \left[\frac{OPD_r(\mathbf{r})}{\lambda_0} - \frac{OPD_r(\mathbf{r})}{\lambda_1} \right] + 2\pi \left[\frac{OPD_t(t_0)}{\lambda_0} - \frac{OPD_t(t_1)}{\lambda_1} \right] \\ &= 2\pi \left[\frac{OPD_r(\mathbf{r})}{\frac{\lambda_1 \cdot \lambda_0}{\lambda_1 - \lambda_0}} - \frac{OPD_t(t_1)}{\lambda_1} + \frac{OPD_t(t_0)}{\lambda_0} \right] \\ &= 2\pi \left[\frac{OPD_r(\mathbf{r})}{\lambda_{E10}} - \frac{OPD_t(t_1)}{\lambda_1} + \frac{OPD_t(t_0)}{\lambda_0} \right] \end{aligned} \quad (8)$$

ここで λ_{E10} は λ_1 と λ_0 の等価波長である。この \mathbf{r} と t_0, t_1 に依存する式(8)の左辺に関して、測定域内に適当に高さ基準点として置く \mathbf{r}_g で与えられる値と測定点 \mathbf{r} での値との差 ψ_{E10} を考えると、これは式(8)の右辺より以下となる。

$$\begin{aligned} \psi_{E10}(\mathbf{r}, \lambda_{E21}) &= \psi(\mathbf{r}, t_0, \lambda_0) - \psi(\mathbf{r}, t_1, \lambda_1) - [\psi(\mathbf{r}_g, t_0, \lambda_0) - \psi(\mathbf{r}_g, t_1, \lambda_1)] \\ &= 2\pi \left[\frac{OPD_r(\mathbf{r}) - OPD_r(\mathbf{r}_g)}{\lambda_{E10}} \right] \end{aligned} \quad (9)$$

この式(9)から、高さ基準点 \mathbf{r}_g での光路差を0とした時の測定点 \mathbf{r} の光路差に関して等価波長 λ_{E10} を用いて計測した時の位相を計算できることが分かる。

すなわち、波長を λ_0 から λ_1 へと少し変えることで任意の長さの等価波長 λ_{Ei} (E に続く添字が1個の時、 Ei は波長が必ず0から i への波長変化を意味させる記号とし、先の例では $E0i=E1$ とする)を設定でき、それを用いて調べたい場所 \mathbf{r} の光路差に関して \mathbf{r}_g の光路差との違い $OPD_g(\mathbf{r})$ を、 $OPD_g(\mathbf{r}) = OPD_r(\mathbf{r}) - OPD_r(\mathbf{r}_g)$ として光路差変動による影響を除いて位相情報 ψ_{Ei} として計算できることになる。

2.4 等価波長別の位相分布からの高精度光路差の抽出

式(9)で求める位相情報 ψ_{Ei} は値が $-\pi$ から π に丸め込まれている。その結果、 ψ_{Ei} と λ_{Ei} から $OPD_g(\mathbf{r})$ を計算しようとしても、 2π のジャンプ回数が分からないのでそのまま計算はできない。一方で測定対象は段差も含むので測定表面が滑ら

かとして位相を横方向にアンラップすることもできない。そこで、波長シフトで得られる複数種の λ_{Ei} による複数個の ψ_{Ei} から高精度な光路差を次のようにして求める。

長短2種の等価波長とその波長での位相がある場合、短い等価波長の位相は光路差に対して高い感度を有し、光路差が大きくなるとその値は先に 2π を越え、位相縞の次数も1増加する。この整数となる縞次数を計算するのに長い等価波長の位相を使う。この時、縞次数は整数なので誤差は入りにくく、得られた光路差の感度は短い等価波長での感度と同じでありながら、位相はアンラップされ 2π 以上の位相差を与える広い測定幅を保っている。

これは数学的に次の様に記述できる。複数種の等価波長 $\lambda_{E1} > \lambda_{E2} > \dots > \lambda_{Ei} > \lambda_{Ei+1} > \dots > \lambda_{En}$ による複数個の位相 $\psi_{E1}, \dots, \psi_{En}$ があり、測定したい高さ範囲より $\lambda_{E1}/2$ が大きく設定されていると、全測定高さ範囲内で位相が 2π を上回らない λ_{E1} での位相情報 ψ_{E1} と、次に短い等価波長 λ_{E2} の位相情報 ψ_{E2} から次式を得る。

$$OPD_s(\mathbf{r}) = \frac{\psi_{E1}(\mathbf{r})}{2\pi} \cdot \lambda_{E1} \quad (10)$$

$$OPD_s(\mathbf{r}) = \left(N_2 + \frac{\psi_{E2}(\mathbf{r})}{2\pi} \right) \cdot \lambda_{E2} \quad (11)$$

故にこれより N_2 は

$$N_2 = \frac{1}{2\pi\lambda_{E2}} [\psi_{E1}(\mathbf{r}) \cdot \lambda_{E1} - \psi_{E2}(\mathbf{r}) \cdot \lambda_{E2}] \quad (12)$$

となる。これを整数化した $\text{int}(N_2)$ を使うと、 ψ_{E2} をアンラップした次の Ψ_{E2} を得る。

$$\Psi_{E2}(\mathbf{r}) = 2\pi \cdot \text{int}(N_2) + \psi_{E2}(\mathbf{r}) \quad (13)$$

故に式(11)は

$$OPD_s(\mathbf{r}) = \frac{\Psi_{E2}(\mathbf{r})}{2\pi} \cdot \lambda_{E2} \quad (14)$$

となる。一方で次に短い等価波長 λ_{E3} の位相情報 ψ_{E3} から次の関係も得ている。

$$OPD_s(\mathbf{r}) = \left[N_3 + \frac{\psi_{E3}(\mathbf{r})}{2\pi} \right] \cdot \lambda_{E3} \quad (15)$$

故に、式(14)(15)から $\text{int}(N_3)$ を求め、これを用いてアンラップした Ψ_{E3} を得る。このようにしてアンラップされた位相を用いて、次に短い等価波長 λ_{Ei} に対する $\text{int}(N_i)$ を得てアンラップした Ψ_{Ei} を計算し次々と高精度な OPD_s を求めていく。このようにして最終的に得られる光路差の位相雑音による変動は、最も短い等価波長の位相雑音による変動と同じであり、同時にアンラップされた光路差となる。

3. 実験装置

実験に用いたスペックル干渉計の光学系を図1に示す。測定対象は対物レンズ前方約0.23mに置いている。レーザー光源からの光は対物レンズ直前のペリクルビームスプリッタを介して測定対象にカメラ方向から照射され、対象表面で反射されて戻る光を一眼レフ用ズームレンズ（AF NIKKOR 35-105）を通してカメラManta G-145 NIRで撮影する。カメラはピクセルサイズが $6.45 \times 6.45 \mu\text{m}$ で12bitA/D分解能を有し、光強度が飽和した画素からの周りの画素への影響を抑える機能を持つ。参照光はビームスプリッタを通過した後、光量制

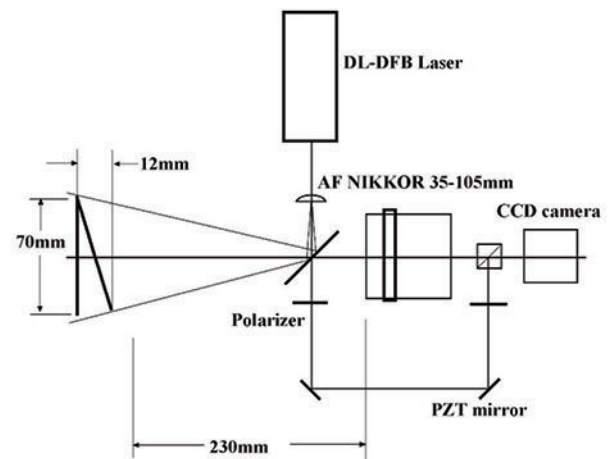


Fig.1 Optical layout of a wavelength-shift interferometer used for 3D-shape measurement of rough surface. Light source is DFB laser whose wavelength can be changed between 778.2nm and 780.3nm. PZT mirror is used to make random phase shift. An object is a rough aluminium plate

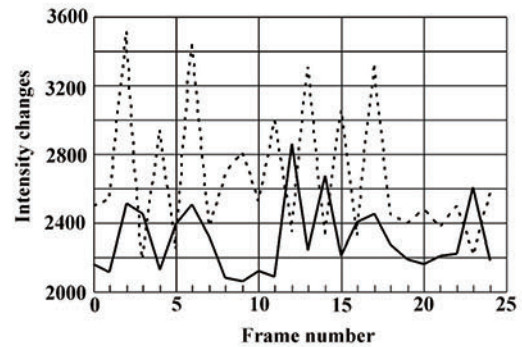


Fig.2 Light intensity changes at positions A and B as a function of the frame number recorded with random phase shifts over 2π . The intensity changes at A are shown as dotted line, and the changes at B are shown as a solid line

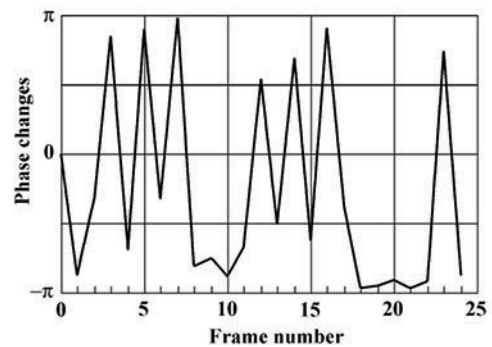


Fig.3 Extracted random phase shifts as a function of the frame number

御のための偏光板を2枚通過し、ビームスプリッタを介してカメラ受光面に入る。この実験では光路差変動の大きさを制御できるように参照光経路のミラーにピエゾ素子を取り付け、光路差がランダム変化になるように画像取込用PCと異なるPCからアナログ電圧をアンプを介して加えている。

波長可変レーザー光源にはOPTICAのDL-DFBレーザーを用いた。レーザー発振ゲイン域にブラッグ回折格子を持つ構造で温度制御による波長変更機構を有し778.20nm~780.28nmまでモードホップフリーで波長を変えることができ、出力は最大70mWである。シャッター時間は65μ秒とした。

4. 実験結果

最初に波長を 778.201nm にして参照光のピエゾミラーに最大振幅 10.0 μm となる乱数による位置変動を与えながら、光軸に対して傾斜させたアルミ粗面に関して、干渉画像を25枚取込み、2.1に述べた方法で位相シフト量を計測した。画像中のあるA, B点での光強度変化を図2に、また位相シフト量を図3に示す。次に、取り込んである25枚の干渉像と位相シフト量から2.2で述べた最小二乗法で位相分布を計算した。その結果を図4(a)に示す。次に波長を778.623nmに変えて同様に干渉画像を25枚取込み同じく位相分布を算出し、(a)に示した位相分布との差を計算した。この差はスペックル干渉特有の強いノイズの影響によって位相差の分布が見えにくい。そこでこの位相差を与える複素数を求め、計算対象画素を中心とする周辺局所画素域で得られる全複素数を平均したものから位相を偏角として抽出した。3 \times 3, 4 \times 4, 5 \times 5と平均サイズを変えて計算した位相を 図4(b), (c), (d)として示す。このように複素平面で平均することでスペックルノイズを強く抑えて位相差を精度良く抽出できる。次に波長を778.201nmに戻し、778.217nm, 778.258nm, 778.366nm, 778.623nm, 779.151nm, 780.260nm と変えながら画像を取り込んで位相分布を計算し、(a)に示した位相分布との差を計算し局所画素域 5 \times 5で複素平均し偏角を抽出した結果を図5(a), (b), (c), (d), (e), (f)に示した。このように ΔOPD が下の方に大きくなると位相差の変化もその方向に大きく、さらに波長シフト量が大いとき λ_E が小さくなって位相差の空間変化がさらに大きくなる。 λ_E が小さい時の位相差の変化は ΔOPD に高感度であるが、一方で 2π 以上の変化となって位相ジャンプが多く発生する。

これら総ての情報を基に光路差変化を2.4の方法で算出した。局所域での平均化も行っているため奇数の画素毎に抜き出した高さの全体を図6に示す。図6の測定対象は傾斜が一樣な粗面だが、視野周辺部に行くに従い光路差が大きくなる形状をしている。これは図1の光学系では光軸上の1点から放射状に出た照明光を用い、その反射光をカメラのズームレンズで取り込んで光路差変化を計算したためである。そこで光軸に対して垂直な試料台(粗面)を準備しその3次元形状を測定すると共に、その試料台に図7に示す電子基板を載せて同じように光路差変化を計算した。図5に相当する電子基板の位相差情報を図8に示す。これらの位相差を基に3次元形状を計算し試料台の形状を差し引いた奇数の画素毎の高さ形状を図9に示す。図9ではIC表面に半透明膜領域もあり、それらの領域や境界付近では表面の正しい高さが得られていないが、ベース基板のハンダづけ部分も含めて3次元形状が高精度に計算できている。ランダムな光路差の変動環境下で同様に500円硬貨と5mm, 10mm 高さの金属ブロック直方体を接触させて3次元形状を測定し、その結果から試料台の形状を差し引いた結果を図10に示す。この形状には周辺部に行くに従い、照明光の進行方向が試料台の垂直方向からずれることによる微小な誤差が入っていることが予想されるが、その値は測定高さの概略0.12%と非常に小さいので補正しないまま示した。このコインとブロックの隣接部に関してズームレンズを用い拡大した画像から計算した形状を図11に示す。ここでは図で示していないが断面形状のPV誤差20 μm から形状計測誤差は標準偏差で5 μm 前後と判断できた。

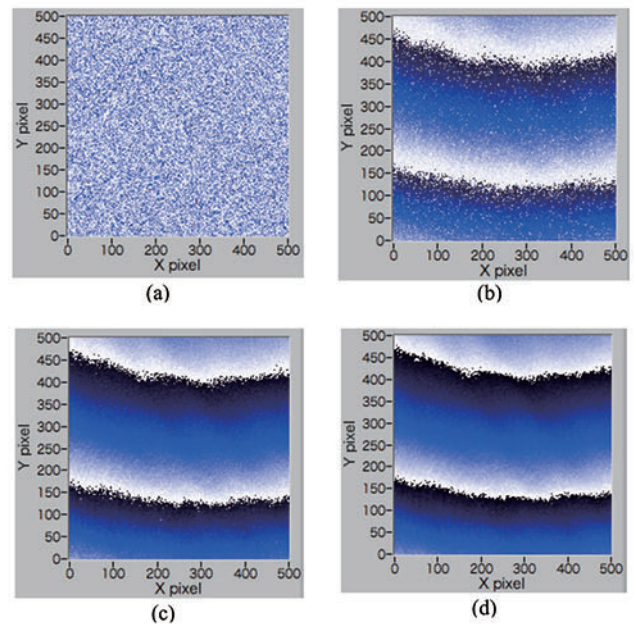


Fig.4 Phase distribution. (a):extracted for the first speckle interferogram captured with the wavelength of 778.201nm. (b): phase difference distribution between 778.201nm and 778.623nm interferograms. This distribution was already averaged with the local size area of 3 \times 3 pixels. (c): difference distributions averaged with the local size of 4 \times 4 pixels. (d): difference distributions averaged with the local size of 5 \times 5 pixels

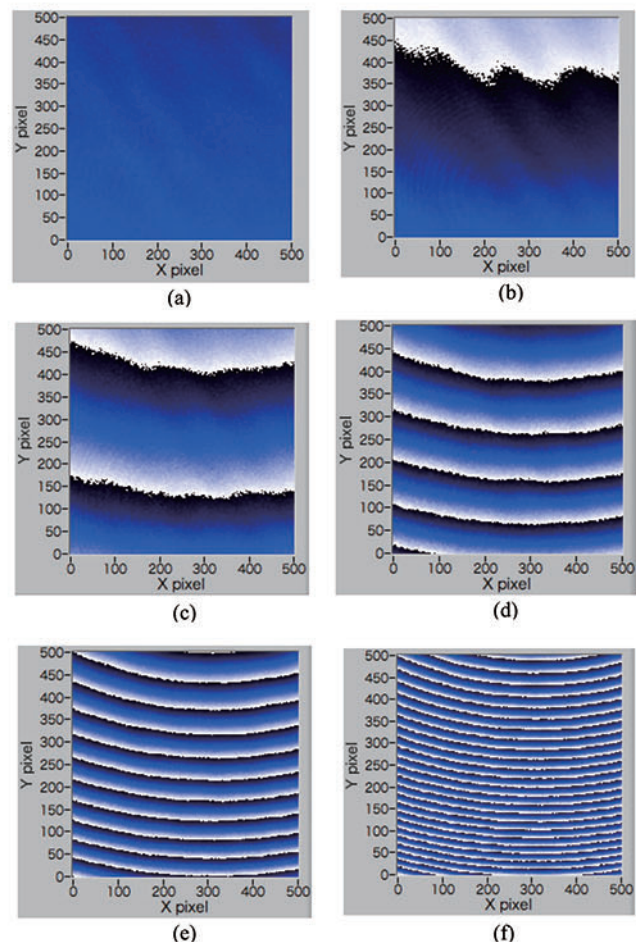


Fig.5 Local-size-averaged phase difference distribution. (a): between 778.201nm and 778.217nm. Their wavelengths mean a equivalent wavelength of 37.8mm. (b), (c), (d),(e),(f): equivalent wavelengths of 10.63mm, 3.67mm, 1.44mm, 0.638mm, 0.295mm, respectively

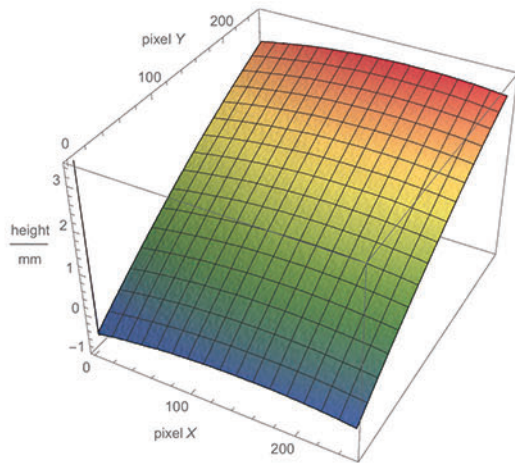


Fig.6 A calculated 3D shape of a rough aluminum flat surface shown in Fig.1. Surrounding area is looked lower than a center area. The reason is that the incident laser light on the surface has a convex wavefront

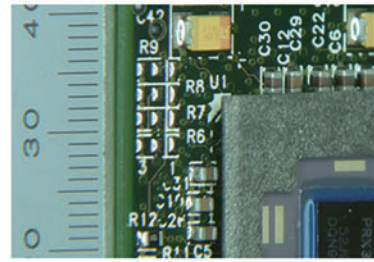


Fig.7 A picture of the measured electronic substrate and parts installed on it. White characters were printed on it and no coat was deposited for the measurement

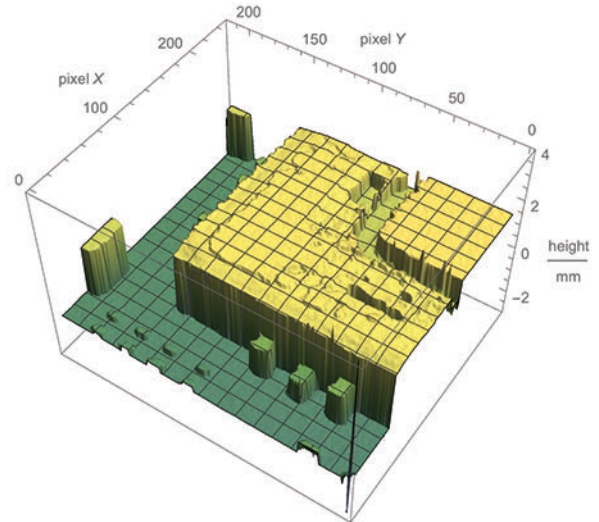


Fig.9 The measured 3D shape of the electronic substrate and parts installed on it. Convex properties shown in Fig.6 are removed by subtracting a shape data of a flat plate which is used to put the measured object on

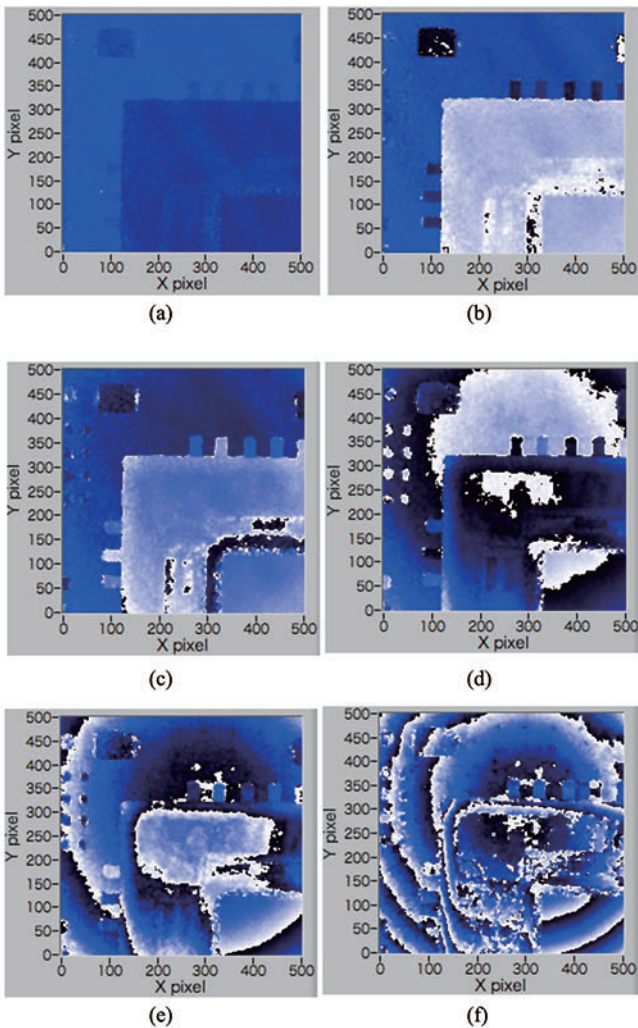


Fig.8 Local-size-averaged phase difference distribution for the measured electric substrate. (a): equivalent wavelength of 37.8mm, (b), (c), (d), (e): equivalent wavelengths of 10.63mm, 3.67mm, 1.44mm, 0.638mm, 0.295mm, respectively. Local-size for averaging is 5×5 pixels

5. 考 察 と 結 論

波長可変レーザーを用いて段差物体等の粗面の3次元形状を光路差がランダムに変動する状況下で計測する手法に関して、その計測原理と実験結果に関して述べてきた。この方法に関して、測定高さ精度、測定可能最大高さ幅、測定速度等に関して検討する。

5. 1 測定高さ精度

波長の最大シフト幅が最小等価波長を決め、それを与える最短波長と最長波長で計測したスペックル位相の抽出精度とこの最小等価波長が光路差の測定精度を決定する。本実験で用いた光源の最大波長シフト幅は2.06nmであり、最短波長と最長波長から与えられる等価波長は $295 \mu\text{m}$ となる。一方でこれらの波長で測定されたスペックル位相の位相抽出精度を $2\pi/40$ とすると、差の位相分布の誤差は $2\pi/40 \times \sqrt{2} = 2\pi/28$ となって光路差の分解上限は $295 \mu\text{m}/28 = 10.5 \mu\text{m}$ となる。故に高さの分解能は $5.3 \mu\text{m}$ と計算され、実験結果とほぼ同じ精度となる。この位相抽出精度 $2\pi/40$ は横方向に 5×5 の位相差の平均化を行った時の精度であり、当然横方向の平均化サイズによって精度は変化する。ここで 5×5 の平均化による横分解能は視野20mmの $5/500$ 倍の 0.2mm と見積もられる。

5. 2 測定可能最大高さ幅

光路差情報は等価波長と位相でその情報が与えられるので、測定範囲の最大高さ幅を与える第1因子は最長等価波長となる。ここで用いた光源は小さな波長シフトも可能なので、等価波長は理論上100mm以上と大きく採れる。次の因子として浮上するのが対物レンズのピンボケ（焦点深度）である。故に本手法では焦点深度が光軸方向の測定範囲を決める。この焦点深度はレンズの絞りを小さくすれば向上する。しかし小さな絞りは光量の低下を伴うので、位相差抽出の精度低下を引き起こす。これはレーザーパワーや測定対象の反射率を含む実際の条件から決まる値となる。

5. 3 測定速度の上限

本実験では1台の光源を用いており、その波長変更は熱を用いるために変更速度がハード的に限られ、7波長でのスペckル像撮影には1分前後の時間を要している。ただし、同種の光源を複数台設置し、ファイバーとMEMSミラーで波長を切り替えると、波長シフトに時間を必要とせず、カメラの速度を最大に活かせるだろう。MEMSミラーデバイスの切り替え時間を約2msとし、カメラの撮影速度を200枚/s、波長シフトを6段階とし、各波長で25枚の撮影を行うとすると、全画像取込速度は $7 \times (125+2) = 889\text{ms}$ と計算される。PCでのデータ処理速度だが、最小二乗法での位相計算はカメラの画素数(500 × 500)に比例し、我々のCore i5 (3GHz)を使うPCでは7波長で15秒の処理時間を要した。

5. 4 波長シフト幅を大きくして高精度化を進めた時の鏡面と粗面の共存域の形状計測可能性

5. 1の測定精度で評価した高さ分解能は約 $5.0\mu\text{m}$ である。波長シフト幅が現状の6倍とれるとすると $0.9\mu\text{m}$ となる。この場合、その測定精度は単波長レーザーを用いた鏡面の測定可能段差高さにかなり近づくこととなる。果たして、この方法を拡張して鏡面形状計測へシームレスにたどり着くことは可能だろうか。計測原理のみからでは物体が鏡面であっても、測定に問題は無いと思われる。しかし鏡面と粗面ではカメラが受ける光強度の反射面角度異存性は極端に異なる。鏡面の場合、対物レンズへ鏡面反射光が入るか否かで光強度は極めて大きく変化する。粗面は拡散反射なので反射面角度の異存性は低い。故に共存域で光路差変化を与える光強度変化を精度良く取り込むためにはかなり広いダイナミックレンジを持つカメラが必要となるだろう。そのようなカメラでも境界域の画素内の光強度信号では鏡面成分が粗面成分を押さえ込むので高さ形状に飛びが出ると思われる。現実には波長分散などこの他の要素も加わることになるので今後、実験や検討を進めて行きたい。

6. ま と め

本研究で得た結果を簡単にまとめると以下となる。

- (1) 光軸方向に光路差が最大振幅 $20\mu\text{m}$ でランダム変動していても、波長シフト干渉計を用いて段差を有する粗面の3次元形状を高精度に計測できる手法を提案できた。
- (2) 実験ではコインの形状を計測し、繰り返し測定誤差はPVで $20\mu\text{m}$ 、RMSで約 $5\mu\text{m}$ 程度を得た。また金属ブロックの高さ10mmの段差形状も測定できた。

なお、本研究はJSPS科研費24560289の助成を受けたものです。

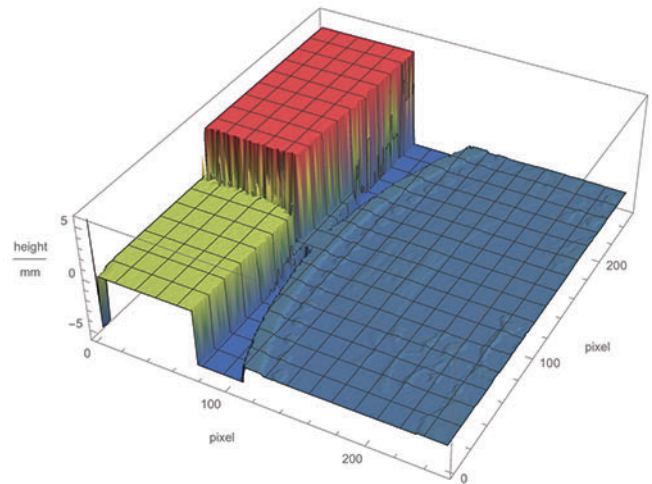


Fig.10 Measured shape of a part of Japanese 500-yen coin and two blocks whose heights are 5mm and 10 mm. This data show that the proposed method has height range more than 10mm in shape measurement

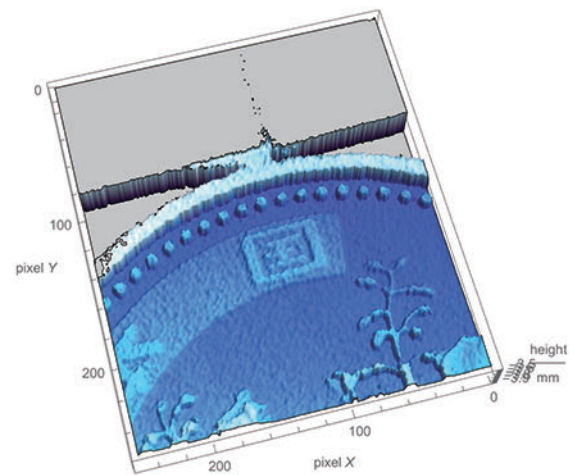


Fig.11 Measured shape of a part of the objects shown in Fig.10. Enlarged images of specklegram are captured by adjusting a Zoom lens. An upper area contacting the coin is looked like flat. This phenomena is thought to come from specular reflection at a wall of blocks

参 考 文 献

- 1) キーエンス、デジタルマイクロスコープ、Depth from Defocus法。
- 2) 石原満宏、佐々木博美：非走査マルチビーム共焦点撮像系による高速三次元計測、精密工学会誌、64、7(1988) 1022。
- 3) 超短パルス光が発射されてから反射して戻るまでの時間差から距離を計測する手法。高速応答電子デバイスのバンド幅が精度を決める。
- 4) S. Kuwamura, I. Yamaguchi, Wavelength scanning profilometry for real-time surface shape measurement, Appl. Opt., 36, 19(1997) 4473.
- 5) 独創的シーズ展開事業委託開発「超長距離高精度光学式距離計」、JST 科学技術振興機構報、第334号、平成18年9月7日。
- 6) S. Kakuma, Y. Katase, Frequency Scanning Interferometry Immune to length Drift Using a Pair of Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser Diodes, Optical Review, 19, 6(2012) 376.
- 7) 安達正明、佐々木裕紀、振動環境下で取り込まれた多数枚のスペckル干渉像からの位相抽出、2013年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集、387。
- 8) 安達正明、佐々木裕紀、振動環境下での波長走査を用いた電子基板の3次元形状計測法、2014年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集、111。
- 9) M. Adachi and S. Sunada, Phase-shift Extraction from Twice-normalized Light-intensity Changes Recorded with Random Phase Shifts, Optical Review, 21, 5(2014) 522.
- 10) J. E. Greivenkamp: Generalized data reduction for heterodyne interferometry, Optical Engineering, 23, 4(1984) 350.