

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 9 月 15 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560289

研究課題名(和文)電子基板上の部品群の高精度3次元形状計測技術の開発

研究課題名(英文) Development of 3D-shape measurement technique of an electronic substrate with electronic parts

研究代表者

安達 正明 (Adachi, masaaki)

金沢大学・機械工学系・教授

研究者番号：50212519

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：電子基板に対して波長可変レーザー光を照射し、スペックル干渉計を通して多数の干渉像を取込み、微小振動が残る環境下でも3次元形状を計測できる方法を開発した。ランダム振動環境下で干渉像を多数枚取り込むと、画像間の位相シフト量はランダムな変化となる。画像内の異なる2画素における光強度の最大値・最小値を利用した2回規格化からこの位相シフト量を計算し、取り込んでいる光強度の変化から最小二乗近似で干渉像の位相値をカメラの全画素で計算する。実験ではレーザー波長を7種変えて全体で140枚の干渉像を取込み、6種の波長変更に伴う6種の位相変化分布から電子基板の3次元形状を計算した。

研究成果の概要(英文)：We have developed a 3D-shape measurement technique of an electronic substrate with electronic parts using a wavelength variable laser. In the technique many speckle interferograms are captured under small random vibrations in environment. These vibrations would make phase shifts between the captured interferograms random. Amounts of these shifts are calculated through Max & Min light intensities searchings at two different pixels in frames and twin normalizations of their intensity changes. The calculated shifts and light-intensity changes at pixels are used to extract phase distribution with the Least-Squares Algorithm. During the laser wavelength is varied from 778.20nm to 780.28nm, 140 specklegrams are captured, and phase distributions are extracted regarding 7 different wavelengths. The ratios of phase change against wavelength change are extracted at all pixels of the frame. 3D shape is then calculated from the obtained ratios.

研究分野：計測工学

キーワード：3次元形状計測 スペックル干渉計 位相抽出 ランダム振動 波長可変レーザー 位相シフト

1. 研究開始当初の背景

現在産業機器に広く用いられる電子基板は微小な電子部品から構成され、ハンダ付け工程前では正しく搭載されているか調べる3次元形状検査が必要となる。こ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が広く採用されてきた。しかし、精度を上げようと光線の角度を大きくすると部品による影が生じた。これを解決するには投光方向と観察方向を同じにする手法が有効であり、結像系のボケを用いる方法¹⁾、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へ機械的に動かす必要がある。一方、後2者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、光パルス方式は高さの繰り返し測定誤差を0.5mm以下にすることは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が変化しない状態で波長を線形的に変えて光強度変化の周波数や位相変化から距離を算出するため、環境振動等により波長に近い光路差変動が入る工程では応用が困難であった。

2. 研究の目的

以上のことから投光方向と観察方向が同じで、機械的な駆動部を持たず視野や測定できる高さ範囲も広く、また数 μm の光軸方向振動が残る環境下でも高い精度で形状計測できる手法の開発が求められて来た。

そこで、我々は低価格化と高性能化が進む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次元形状計測する方法」をテーマに取りあげ、20波長(10 μm)前後の振動が光路差内に入り込んでも、高さ範囲10mmで精度10 μm を持つ3次元形状計測技術の開発を目的とした。

3. 研究の方法

1) ランダム振動環境下での波長走査を用いた形状計測の原理

開発する手法では図1に示す光学系を用い、測定対象を段差を持つ粗面とし、参照光と粗面からの反射光を干渉させて取り込む多数枚のスペックル干渉像を利用する。波長を変更する時の反射波面と参照波面が作る干渉像の位相変化量から3次元形状を計算するが、最終的に高精度な3次元形状を得るまでには4つのステップを経る。以下では各ステップで抽出対象とする物理量とその計測原理を説明する。

1-1) 光路差がランダム変動する状態で撮影した多数の干渉像を使う干渉像間の位相シフト量計測

ランダム振動等で予測できない光路差変動が入り込むと、一般的に広く使われている一定量の位

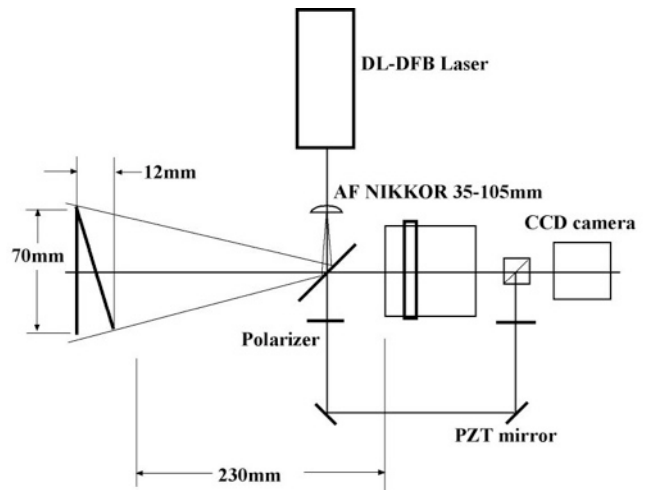


図1 スペックル干渉光学系
測定対象は高さ（距離）が連続的に変わる傾斜粗面

相シフトをした画像を用いる位相抽出法は機能しない。ここでは取り込んだ多数枚の干渉像から干渉像間の位相シフト量を個々に計測し、そのシフト量を用いて干渉像の位相分布を抽出する。

この位相シフト量の計測は我々が独自に開発した「光強度の2回規格化法による位相シフト量の抽出法⁵⁾」を用いる。ここでは要点のみを記載する。まず干渉像から面内の一方向(X軸方向)の光強度が得られているとし、波長以上の光路差変動を受けて各画素で光強度がランダムに大きく変化していると仮定する。この線上の画素から位相が大まかに $\pi/2$ 異なる2点a, bを探し、干渉像が多数取り込まれているとして2点での最大光強度と最小光強度を探す。次にそれらを用いて、光強度の時間変化を振幅1 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の変化を計算し、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。

$$I_{NADD}(t) = \cos\left[\frac{2\phi(t) + \phi_a + \phi_b}{2}\right] \quad (1)$$

$$I_{NSUB}(t) = -\sin\left[\frac{2\phi(t) + \phi_a + \phi_b}{2}\right]$$

ここでtは光強度を取り込んだ時間で、tでランダムに変化する位相を $\phi(t)$ 、その時のa, b点の干渉位相を $\phi(t) + \phi_a$ 、 $\phi(t) + \phi_b$ とした。この和 $I_{NADD}(t)$ と差 $I_{NSUB}(t)$ は同じ引数を持ち、余弦関数と正弦関数になるので、複素平面上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 ϕ_a 、 ϕ_b は $\phi(t) = \phi(t_0) = 0$ 、すなわち最初の画像取得時の位相で時間で変化しない定数だから、時間 t_i (iは画像取込番号)と共に変化する位相変化量 $\Delta\phi_i = \phi(t_i) - \phi(t_0)$ は取り込んだ画像の光強度情報から式(1)で求められる。本研究では取り込まれ

る干渉像は2次元であり画像の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をもち、各線上データは雑音を無視するならば同じ $\Delta \phi_i$ を与えるので、y値の異なる線上データから個々に計算される $\Delta \phi_i$ を総て平均して高精度な位相シフト量 $\Delta \phi_i$ を得る。

1-2) 位相シフト量を用いた干渉像の位相抽出
光路差変動下で取り込まれたN枚の干渉像があり、そのi番目の干渉像の0枚目に対する位相シフト量 $\Delta \phi_i$ が分かる時、その0枚目の干渉像の位相分布は最小二乗法⁶⁾を用いて計算できる。すなわち、取り込まれた干渉像から画素 \mathbf{r} での光強度変化 $I_i(\mathbf{r})$ が分かり、さらに位相シフト量も分かるので、その位相シフト変化に沿った光強度変化になるように初期位相を求める。この初期位相 $\phi(\mathbf{r})$ は以下で与えられる。

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

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、この $\mathbf{A}(\Delta\phi_i)$, $\mathbf{B}(\mathbf{r},\Delta\phi_i)$ は以下である。

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

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

1-3) 振動下での波長変更時の位相変化を用いた相対光路差の計算

光路差が変化しない時、波長変更時の位相変化から光路差は簡単に計算できる。しかし我々の条件では光路差が振動等により変化している。そのために時間と共に変化した成分 (位相のオフセット) を取り除く必要がある。微小振動中での光路差OPDはカメラの画素 \mathbf{r} と撮影時点 t の関数であるが、これを \mathbf{r} に依存する項 OPD_r と t に依存する項 OPD_t の和とする。今波長を λ_0 にして t_0 から画像を撮影し始め、 t_0 での位相を上記の3-2)の方法で抽出した時、位相 ϕ は \mathbf{r} と t_0 と波長 λ_0 の関数となり以下で与えられる。

$$\psi(\mathbf{r}, t_0, \lambda_0) = 2\pi \frac{OPD_r(\mathbf{r}) + OPD_t(t_0)}{\lambda_0} \quad (5)$$

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。

$$\psi(\mathbf{r}, t_1, \lambda_1) = 2\pi \frac{OPD_r(\mathbf{r}) + OPD_t(t_1)}{\lambda_1} \quad (6)$$

これら2つの値の差は次式となる。

$$\begin{aligned} \psi(\mathbf{r}, t_0, \lambda_0) - \psi(\mathbf{r}, t_1, \lambda_1) &= \\ 2\pi \left[\frac{OPD_r(\mathbf{r})}{\lambda_0} - \frac{OPD_r(\mathbf{r})}{\lambda_1} \right] + 2\pi \left[\frac{OPD_t(t_0)}{\lambda_0} - \frac{OPD_t(t_1)}{\lambda_1} \right] & (7) \\ = 2\pi \left[\frac{OPD_r(\mathbf{r})}{\lambda_1 \cdot \lambda_0} - \frac{OPD_r(t_1)}{\lambda_1} + \frac{OPD_t(t_0)}{\lambda_0} \right] & \\ = 2\pi \left[\frac{OPD_r(\mathbf{r})}{\lambda_{E10}} - \frac{OPD_r(t_1)}{\lambda_1} + \frac{OPD_t(t_0)}{\lambda_0} \right] & \end{aligned}$$

ここで λ_{E10} は λ_1 と λ_0 の等価波長である。いま \mathbf{r} と t_0, t_1 に依存する式(7)の左辺で与えられる位相情報に関して、高さの基準点とする \mathbf{r}_g で与えられる位相情報と調べたい点 \mathbf{r} での位相情報の差 ϕ_{E10} を考えると、これは、 t_0, t_1 に依存する成分が消えて以下となる。

$$\begin{aligned} \psi_{E10}(\mathbf{r}, \lambda_{E21}) & (8) \\ = \psi(\mathbf{r}, t_0, \lambda_0) - \psi(\mathbf{r}, t_1, \lambda_1) - [\psi(\mathbf{r}_g, t_0, \lambda_0) - \psi(\mathbf{r}_g, t_1, \lambda_1)] & \\ = 2\pi \left[\frac{OPD_r(\mathbf{r}) - OPD_r(\mathbf{r}_g)}{\lambda_{E10}} \right] & \end{aligned}$$

この式から高さ基準点 \mathbf{r}_g の光路差に対する画素 \mathbf{r} での光路差に関して、等価波長 λ_{E10} を用いて干渉計測した時の位相値が計算できることが分かる。

すなわち、波長を λ_0 から λ_i へと少し変えることで任意の長さの等価波長 λ_{Ei} (E の添え字が1個の時は Ei は必ず0から i への変化を意味するとした) を設定でき、それを用いて場所 \mathbf{r} の光路差に関して \mathbf{r}_g との違い $OPD_g(\mathbf{r})$ を振動による影響を受けないで位相情報 ϕ_{Ei} として計測できることになる。

1-4) 複数の等価波長での複数の位相分布からの高精度光路差の抽出

上で求めた位相情報 ϕ_{Ei} は通常 $-\pi$ から π に値が丸め込ま (ラップさ) れている。その結果、 ϕ_{Ei} と λ_{Ei} から $OPD_g(\mathbf{r})$ を計算しようとしても、位相差は 2π のジャンプを含み計算はできない。一方で測定対象は段差も含むので測定対象が滑らかとして位相差データを横方向にアンラップすることもできない。しかし、自由に波長の変更が可能なので複数種の大きさの λ_{Ei} を設定できる。そこで、複数種の λ_{Ei} による複数個の ϕ_{Ei} から高精度な光路差を次のようにして求める⁷⁾。

いま長短2種の等価波長とそれらの位相情報がある場合、短い等価波長の位相情報は光路差変化に対して高い感度を有し、光路差が少し大きくなるとその位相は 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長い等価波長の位相情報から計算する。この場合、縞次数は理論上整数なので整数フィルタを利用すると縞次数に誤差は入りにくく、得られた位相は高い感度のまま値はアンラップされ 2π 以上の幅を持ち、広い測定幅と高い感度を保つことになる。

そこで、これを複数種の λ_{Ei} の利用に拡張する。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情報 $\phi_{E1}, \dots, \phi_{En}$ があり、測定したい高さ幅より $\lambda_{E1}/2$ が大きく設定されていると、全高さ範囲内で位相が 2π 以内の位相情報 ϕ_{E1} と1段階短い等価波長 λ_{E2} の位相情報 ϕ_{E2} に関して次を得る。

$$OPD_g(r) = \frac{\Psi_{E1}}{2\pi} \cdot \lambda_{E1} \quad (9)$$

$$OPD_g(r) = \left(N_2 + \frac{\Psi_{E2}}{2\pi} \right) \cdot \lambda_{E2}$$

故にこれより N_2 は

$$N_2 = \frac{1}{2\pi\lambda_{E2}} (\Psi_{E1} \cdot \lambda_{E1} - \Psi_{E2} \cdot \lambda_{E2}) \quad (10)$$

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

$$\Psi_{E2} = 2\pi \cdot \text{int}(N_2) + \Psi_{E2} \quad (11)$$

故に式(9)の下側の式はアンラップされて

$$OPD_g(r) = \frac{\Psi_{E2}}{2\pi} \cdot \lambda_{E2} \quad (12)$$

となり、その次に短い等価波長 λ_{E3} の位相情報 ϕ_{E3} では以下が成り立っている。

$$OPD_g(r) = \left(N_3 + \frac{\Psi_{E3}}{2\pi} \right) \cdot \lambda_{E3} \quad (13)$$

故に、式(12)(13)から $\text{int}(N_3)$ を求め、これを用いてさらにアンラップした Ψ_{E3} を得る。このようにしてアンラップされた位相情報を用いて、さらに短い方の等価波長 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、より高精度な OPD_g を求めていく。こうして最終的に得られる光路差では、位相雑音による変動は、最も短い等価波長の位相雑音で得られる雑音変動と同じであり、最も小さい光路差雑音変動のまま同時にアンラップされた光路差となる。

2) 実験装置

実験光学系を前々頁の図1に示した。測定対象は対物レンズ前方約0.2mに置いた。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、測定物体で反射されて戻る光を一眼レフ用ズームレンズ(AF NIKKOR35-105)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

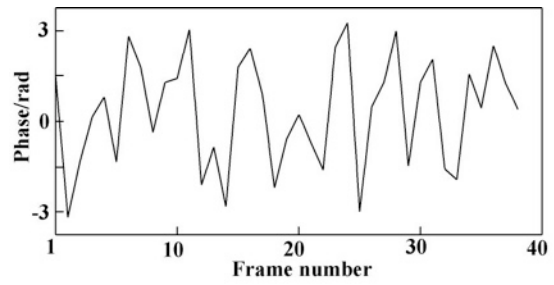


図2 ランダム振動下の光強度変化から計算した位相変化

イズが $6.45 \times 6.45 \mu\text{m}$ で12bitA/D分解能を有し、光強度が飽和してもその画素から周辺画素への影響を抑える機能を持つ。参照光はペリクルビームスプリッタを通過した後、光量制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。この実験では振動等による光軸方向の変動強度を任意に調整できるよう参照光経路のミラーにピエゾ素子を取り付け、光路差変化がランダムになるように画像取込用PCと異なるPCからアンプを介してアナログ電圧による変動を加えている。

波長可変レーザーにはOPTICAのDL_DFBレーザーを用いた。半導体レーザーの発振ゲイン部にブラッグ回折格子を持つ構造でその局所部の温度制御により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。

3) 実験結果

最初に波長を778.20nmにして参照光のピエゾミラーに最大振幅 $5.0 \mu\text{m}$ の乱数による変位振動を与えながら、光軸に対して傾斜させたアルミ粗面板に関して、干渉画像を40枚取込み、3-1)に述べた方法で位相シフト量を計測した。画像中の2点での光強度変化を基に計算した位相シフト量を図2に示す。次に、取り込んである40枚の干渉像と位相シフト量を用いて3-2)に示した最小二乗法で位相分布を計算した。その結果を図3a)に示す。次に波長を778.30nmに変えて同様に干渉画像を40枚取りこ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物を図3b)に示す。この差はスペックル干渉特有のスペックルノイズの影響によって位相分布が見にくいので、計算対象画素を中心とする周辺局所域のデータに関して複素平面で平均しその位相を偏角として抽出した。2X2, 3X3, 4X4 域で平均した物を図3c), d), e)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抑えて位相変化量を精度良く抽出できる。次に波長を778.22nm, 778.30nm, 778.60nmと変えながら画像を取り込んで位相分布を計算し、図3a)に示した位相分布と

の差を計算し局所画素域5X5で複素平均し偏角を抽出した結果を 図4 a), b), c)に示した. このように下の方向に Δ OPDが増えると位相差の変化もその方向に大きく, さらに波長変化量が大きくなると λ_E が小さくなって位相差の変化が一層大きくなる. このように λ_E が小さい場合の位相差の変化は Δ OPDに高感度であるが, 一方で 2π のジャンプが多発する.

この形状計測法を対象としている電子部品を載せた電子基板に対して行った. 測定対象とした電子基盤の写真を図5 a)に, 形状計測の対象とした赤枠内に対して図4a)~ c)のように波長を変えて計測した位相差変化量マップを図5 b)~ f)に示す. これら総ての情報を基に上記の3-4)の方法で計算して得た3次元形状を図6に示す. この測定結果ではレーザーを顕微鏡対物レンズを使って1点から拡散させて照明に用いたために, 視野周辺部に行くに従い高さが低くなっている. 予め, 一様な粗面からなる平面状の試料台を参照高さとして形状計測しておき, 測定した電子基盤の形状から, 試料台の高さを引くことで, これは簡単に補正できた.

次に測定精度評価のためにランダムな光軸方向の振動環境下で500円硬貨と5mm, 10mmの高さの直方体をのせて3次元形状を測定してみた. その結果, 高低差10mmの高さ形状を精度 $5\mu\text{m}$ 前後で計測できることを確認できた.

4. 研究成果

ここまで波長可変レーザーを用いて粗面の3次元形状を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た. この方法に関して, 測定精度, 測定可能最大高さ幅, 測定速度等に関し検討した.

1) 高さ測定精度の上限

波長変更の最大幅が最小等価波長を決める. 本実験で用いた光源の最大波長変更幅は 2.3nm であり, 等価波長は $264\mu\text{m}$ 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分布の抽出精度を $2\pi/40$ とすると光路差の分解限界は $9\mu\text{m}$ となる. 故に高さの分解能は $4.5\mu\text{m}$ と計算され, 実験結果とほぼ同様の精度となる. しかし, この位相抽出精度は横方向に5X5の画素で平均化を行った時の精度であり, 平均サイズで精度は変わる.

2) 測定可能高さの最大幅

測定物体の高さは等価波長とその位相で情報が与えられるので, 測定範囲の最大高さ幅を決める第1因子は最長等価波長となる. 用いたレーザーでは小さな波長変更も可能なので等価波長は 100mm 以上も採れる. この時に次の重要要素として浮上するのが対物レンズのピンボケである. 故に本実験では焦点深度の大きさが光軸方向の測定高さ幅を決めると思われる.

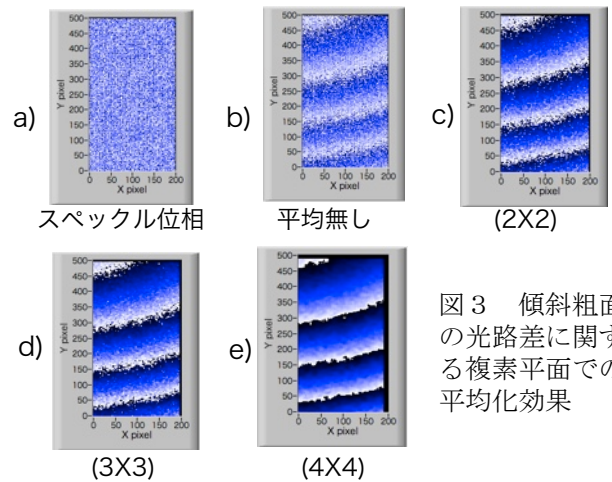


図3 傾斜粗面の光路差に関する複素平面での平均化効果

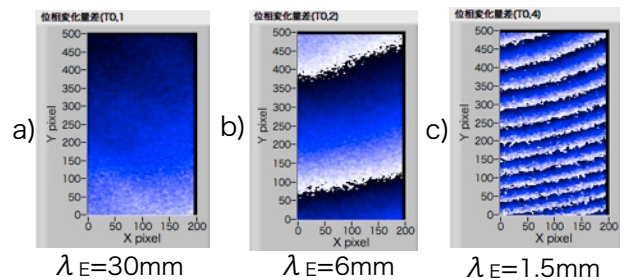


図4 等価波長を短くする時の位相変化

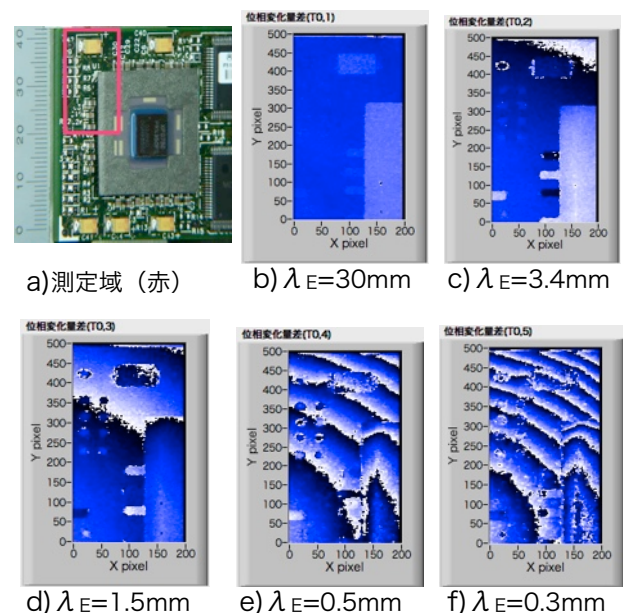


図5 電子基板の測定結果
b), c), d), e), f)と等価波長が短くなる

3) 測定速度の上限

本実験では1台の光源を用いており, 波長変更は熱を用いているため速度は速くない. 実験では連続的に波長を変え, 7種の波長取込域でのスペックル像撮影にトータル2分前後を要した. ただし, 同種の光源を複数台用い, ファイバーとMEMSミラーで波長を切り替えると, 波長変更に時間を要せず, カメラの速度を最大に活かせるだろう.

4) 結論

段差を持つ粗面の形状計測法として波長走査を用いる方法を開発した。従来の波長走査法と大きく異なる点は、測定物体が光軸方向に最大振幅 $5\mu\text{m}$ で振動していても測定できること、また位相差情報を活用し、局所域での位相差を複素平面で平均し 2π の40分の1の精度で測定できるようにし、高さ分解能を $5\mu\text{m}$ まで高めたことである。測定用対物レンズはズームニッコールでありレーザーパワーが大きければ、またカメラの感度が高ければ視野をさらに大きくできる。

<引用文献>

- ① KETENCE, デジタルマイクロスコープ VHX-2000
- 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 (1998) 1022.
- ③ 光パルスの発射と到着の時間差を用いる方法
- ④ S. Kuwamura, I. Yamaguchi: Wavelength scanning for real-time surface shape measurement, Appl. Opt., 36, (1997) 4473.
- ⑤ M. Adachi and S. Sunada: Phase-shift Extraction from Twice-normalized Light-intensity Changes Recorded with Random Phase Shifts, Opt. Rev., 21, (2014), 522.
- ⑥ G. Lai, T. Yatagai: Generalized phase-shifting interferometry, J. Opt. Soc. Am. A, 8, (1991) 822.
- ⑦ D. Malacara: Optical shop testing Second edition, John Wiley & Sons, (1992) 616.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計1件)

- ① M. Adachi and S. Sunada, Phase-shift Extraction from Twice-normalized Light-intensity Changes Recorded with Random Phase Shifts, Opt. Rev., 21, 5(2014), 522-525, 査読有り

[学会発表] (計4件)

- ① 安達正明, 激しい空気擾乱にも影響されない波長変更干渉計による三次元形状計測法, 2015年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 5P, 2015年3月17日, 東京都
- ② 安達正明, 光軸方向の不規則振動の影響を受けない波長走査応用三次元形状計測法, 2014年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, 869P, 2014年9月17日, 鳥取市
- ③ 安達正明, 佐々木裕紀, 振動環境下での波長

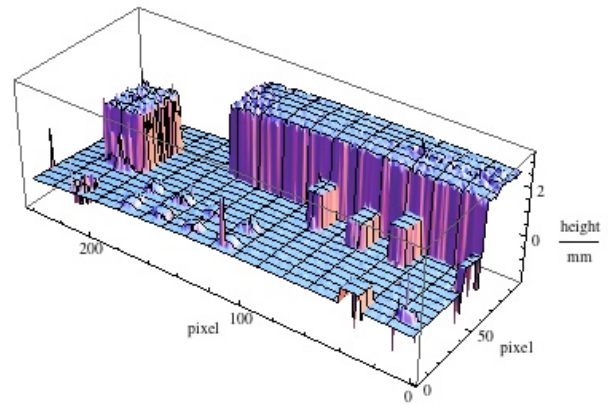


図6 電子基板の3次元形状測定結果

最大で2mmの段差を持つ電子基板の形状測定結果。

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, 111P, 2014年3月18日, 東京都

- ④ 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ック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, 387P, 2013年9月12日, 吹田市

[産業財産権]

○出願状況(計1件)

名称:振動環境下での波長走査を用いた形状計測方法及び装置

発明者:安達正明

権利者:同上

種類:特許

番号:特許願 2014-035873号

出願年月日:26年2月26日

国内外の別:国内

6. 研究組織

(1)研究代表者

安達 正明 (ADACHI, Masaaki)

金沢大学・理工研究域 機械工学系・教授

研究者番号: 50212519