三角測量センサにおいてスペックルが 微小表面形状測定に与える影響*

深津 拓也** 安藤 真央*** 石綿 俊作† 工藤 晟将† 大坪 樹†† 伊藤 幸弘**

Influence of Speckle on Micro Form Measurement by a Laser Triangulation Sensor

Hiroya FUKATSU, Mahiro ANDO, Shunsaku ISHIWATA, Jyoichi KUDO, Tatsuki OTSUBO and Yukihiro ITO

A laser displacement sensor based on the triangulation method is capable of high-speed measurement, has a long working distance, and has a wide measurement range, so it can be used for distance measurement, vibration measurement, positioning measurement, form measurement, etc. However, speckles are generated in the image spot because the laser, which is coherent light, is used as the light source. It is known that the center of gravity of the image spot changes due to this speckle pattern, resulting in a change in displacement. The displacement fluctuation due to speckle is considered to be related to the NA of the light receiving lens, the triangulation angle of the receiving lens, the wavelength of the light source, and the surface textures of the irradiation spot. In this study, we varied conditions of these elements and measured micro form. As a result, it was found that the displacement fluctuation decreased with increasing NA and triangulation angle. Regarding the wavelength of the light source, it was possible to reduce the displacement fluctuation by shortening the wavelength. It was also found that the displacement fluctuation differs depending on the submicro topography of the irradiation spot. These results are important in designing the laser triangulation sensor.

Key words: triangulation sensor, speckle, NA of the lens, triangulation angle, wavelength of the light source, surface texture

1. 緒 言

近年工業分野において、部品や素材等の形状の高精度化が要求されている。そのためこの要求を満たすための測定装置も重要な役割を持つ。現在表面形状を高精度かつ非接触で測定できる装置として、共焦点顕微鏡¹⁾やCSI²⁾(垂直走査低コヒーレンス干渉計: 白色干渉顕微鏡とも呼ばれる)が使用されているが、これらの測定装置は高精度ではあるが変位方向(光軸方向)に光学系の垂直走査が必要であるため、移動物体の測定や高速測定が要求される機上測定等のオンライン測定には使用できない。これに対して三角測量法によるレーザー変位センサ(以降三角測量センサと呼ぶ)は、光学系の走査は必要ないので表面形状を高速に測定することができる。しかも測定範囲と作動距離は共焦点顕微鏡やCSIと比べて広くて長い。しかしながら、これまでの三角測量センサの測定対象は三次元物体等の比較的大きな形状が多く^{3) 4)}、微小表面形状測定に関する研究は少ない⁵⁾。その理由としてスペックルの影響がある。三角測量センサは、多くの場合光源にコヒーレント光であるレーザー光を使用するため、測定面からの反射光は回折光でもある。そのため検出器上の結像スポット内にスペックルが発生し、測定した変位が測定場所によって大きく変動することがある。三角測量センサのスペックルと変位変動の関係については多くの論文^{6) ~ 8)}がある。特にDorschら⁷⁾の論文には三次元の統計的解析および実験も詳細に記述されており、変位変動の抑制には、受光レンズのNAを大きくすることと低コヒーレンス光源の効果が大きいと結

論づけている。しかしながら、コヒーレント光源であるレーザー、特にLD(半導体レーザー)は小型、高出力および低価格と優れた特徴を持つので、三角測量センサの光源にはLDの使用は不可欠である。したがって、三角測量センサにおいて光源にLDを採用しつつ変位変動が減少できれば、数 μm オーダの高分解能でしかも高速測定が期待できる。変位変動の原因は表面からの回折光によるスペックルであるので、それに影響を受けるものは受光レンズのNA以外にもある。例えば投光軸に対する受光軸の角度(以後この角度を三角測量角度とする)、光源の波長、測定対象の表面性状およびセンサから測定表面までの距離も変位変動に影響することが推察できる。

本研究では、三角測量センサから測定面にレーザー光を出射しスペックルが発生したとき、三角測量センサの構成要素の条件(NAや角度の違い等)が微小表面形状測定に与える影響を明らかにする。

2. 三角測量センサの原理

Fig. 1 Optical configuration of a laser triangulation sensor

* 原稿受付 令和2年 5 月 19 日

掲載決定 令和2年 11 月 16 日

** 正 会 員 東京都立産業技術高等専門学校(東京都品川区東大井 1-10-40)

*** 株式会社ディスコ(東京都大田区大森北 2-13-11)

† 学生会員 東京都立産業技術高等専門学校

†† 正 会 員 長崎大学大学院(長崎県長崎市文教町 1-14)

図1に三角測量センサの測定原理図を示す。光源にLDを使用し、その光を焦点距離 f_1 のレンズ L_1 で測定面に集光させる。このとき照射スポット径は、レンズ L_1 のNA(L_1 への入射光束半径と f_1 の比)とLDの波長で決まる。測定面で回折した反射光は、三角測量角度 θ 傾けた焦点距離 f_2 の受光レンズ L_2 で受光され、 L_2 から b の位置にある検出器上に結像する。測定面に Δz の変位があると検出器上のスポットが Δx だけ移動し、検出された Δx から変位 Δz を求めることができる。 Δz と Δx の関係は式(1)となる。

$$\Delta x = (\beta \sin \theta) \Delta z \quad (1)$$

ここで β は光学系の倍率(b/a)であり、受光レンズの焦点距離 f_2 およびレンズと測定面までの距離 a で決まる。すなわち移動量 Δx は三角測量角度 θ と光学倍率 β に比例する。

3. スペックルが変位変動に及ぼす影響

三角測量センサでは、レーザー光を集光して加工面に照射するが、照射スポット内には微小凹凸が存在する。この微小凹凸からの反射回折光を受光レンズで検出面に結像させると結像スポット内にスペックルが現われる。図2に完全拡散面に近い表面と研削加工面からの結像スポットを示す。図(a)の拡散面ではほぼ均一な反射光強度分布であるが、図(b)の研削加工面ではスペックルによる強度分布ムラが現れており、結像スポットの重心位置がスポット中央から移動している。この強度分布ムラは照射スポット内の表面性状(凹凸の高さやパターン)によって異なるので、測定場所が変わるとそれとともに重心は変化する。そのため変位 Δz がゼロの場所であっても結像スポットの重心が変動し、あたかも変位があるような信号が出力されることがある。これがスペックルによって生じる変位変動である。スペックルによる結像スポットの x 方向(図1参照)の重心変動量を δx とすると、変位変動 δz は式(2)のように表せる。

$$\delta z = \frac{1}{\sin \theta} \delta x \quad (2)$$

θ は三角測量角度で、 θ を大きくすることでも δz を減少させることができる。式(2)に光学系の倍率 β は現れない。 β を大きくすると式(1)に示すように移動量 Δx は大きくなり、変位変動 δz の低減に効果があるように見えるが、検出器上の結像スポットも β 倍だけ拡大されて δx も β 倍になるので δz は β には依存しない。また受光レンズのNAは式(1)には現れず、三角測量センサの測定感度は共焦点顕微鏡等のようにNAには依存しない。しかしスペックルサイズはNAに反比例するので、 δx はNAが大きいほど小さくなり、 δz も減少すると推察できる。さらに対象とする加工面からの反射光は回折光であり、表

a) Imaging spot from diffusion surface b) Imaging spot from machined surface

Fig. 2 Changes in the center of gravity of the spot caused by speckle

面の凹凸のピッチ(波長)の違いによって回折する角度は異なる。そのため、どのピッチ成分の回折光を受光するかによっても δx は異なると考えられる。すなわち三角測量角度 θ と δx には相関があると推察できる。これについては5.2で述べる。

4. 実験方法と実験条件

図3に実験装置を示す。LDから出射したレーザー光をレンズ L_1 で測定面に照射し、反射回折光を三角測量角度 θ だけ傾斜したレンズ L_2 で受光し、検出器であるCCD上に結像させる。結像位置は測定面の変位 Δz によって変化するので、一般的にはCCDをシャインプルーフの条件で傾斜させる。本研究では微小形状測定のため Δz は小さく結像位置はほとんど変化しないので、光学系の調整を容易にするためCCDは受光軸に直角に設置した。また反射光の強度は測定場所によって大きく変動するので、CCDで受光する反射光を一定にするためにAPC(Automatic Power Control)を使用した。CCDで得られたスポット画像から、計測ソフトウェアを用いてスポットの重心および変位の計算を行なう。試料の移動には、高精度ステージを使用した。表1に実験条件を示す。光源には波長658nmの赤色LDと波長405nmの青色LDを使用した。投光レンズ L_1 はNA0.06を採用し、その焦点位置でのスポット径は、赤色LDは約14 μm 、青色LDは9 μm となる。レンズ L_2 にはNA0.25の顕微鏡用対物レンズを使用し、レンズの前に絞りを設置してNAを0.04から0.2まで約0.5ずつ変化させた。三角測量角度 θ は32.5°から70°まで約10°ずつ変化させた。測定面には筋状加工痕の研削加工面、ランダム加工痕の放電加工面および切削加工によって製作された正弦波形状の標準片を採用した。放電加工は特殊な加工方法であるが、その加工面は放電現象により複雑な凹凸形状になり、非接触測定法を使用すると触針式測定法では見られない異常振幅が発生することもある¹⁾。また非接触式測定でも測定法が異なることによって測定値に差が生じる等の指摘もあるので⁹⁾本研究では対象面として加えた。

Fig. 3 Experimental equipment

Table 1 Experimental conditions

Wave length of LD	658nm, 405nm
NA of Irradiation lens L_1	0.06
NA of Receiving lens L_2	0.04, 0.10, 0.15, 0.20
Optical magnification β	2.5
Triangulation angle θ	32.5°, 40°, 50°, 60°, 70°
Sample surfaces	Ground surfaces EDMed surfaces Standard specimen(sine wave)

Fig. 4 Difference in speckle size when changing of receiving lens of NA (red LD)

Fig. 5 Difference in amplitude of measured waveform when NA is different

Fig. 6 Relation between NA of receiving lens and $\Delta z'$

測定長さは研削加工面および放電加工面は 3.5mm, 正弦波形状標準片は 0.3mm, サンプリグ間隔は全て 0.2 μ m とした。

5. 光源が赤色 LD のときの実験結果

5.1 受光レンズの NA と変位変動の関係

受光レンズの NA と変位変動の関係は先行研究⁷⁾ において既に行われているが、三角測量角度や光源の波長等の関係性もあるので実験を行った。図 4 にレンズ L_2 の NA を 0.04 から 0.2 まで変化させたときの結像スポット画像を示す。ここでの光源は波長 658nm の赤色 LD で、測定面は研削加工面である。スペックルサイズ (斑点の大きさ) は NA の増加とともに小さくなっており、NA を増加させることで重心変動量 δx の減少が期待できる。図 5 に NA が 0.04 と 0.2 のときの断面曲線を示す。断面曲線には表面の凹凸高さ Δz が含まれ、波形の振幅は Δz とスペックルによる変位変動 δz の和になる。NA 0.2 の波形の振幅は 0.04 のそれよりも減少している。これはスペックルサイズが縮小したことにより δx が減少し、その結果 δz も減少したことを示している。図 6 に NA と断面曲線の二乗平均平方根 $\Delta z'$ との関係を示す。測定面は凹凸高さの異なる研削加工面 (触針式測定値: 0.13 μ m Pq, 0.51 μ m Pq) である。どちらの $\Delta z'$ も NA の増加とともに減少しているが、 $\Delta z'$ の差はほとんどなかった。測定面の凹凸高さが異なっても $\Delta z'$ にほとんど差が生じないのは、凹凸高さ Δz に比べて δz が大きく、

(a) Submicro topography of the ground surface measured by AFM

(b) Long pitch component

(c) Short pitch component

Fig. 7 Measurement results of the ground surface by AFM

Fig. 8 Relationship between diffraction angle and roughness pitch

δz は Δz の大きさに依存しないためである。

5.2 三角測量角度 θ と変位変動の関係

図 7 に研削加工面を AFM で測定した結果を示す。図 (a) は三次元表面性状であり、図 (b) はその三次元データから抜き出した輪郭曲線の長ピッチ成分、図 (c) は短ピッチ成分である。長ピッチ成分はピッチが 4 ~ 5 μ m で凹凸高さの変化は 0.3 μ m 程度、短ピッチ成分は 1 ~ 2 μ m で凹凸高さの変化は 0.05 μ m 程度である。これらのピッチはいずれも約 10 μ m の照射スポット径より短い。そこで図 8 のように面を長ピッチ成分と短ピッチ成分に分けて考える。レーザー光を照射し、測定面を移動させたとき、図に示すように照射スポット内において、(a) の長ピッチ成分では場所による凹凸高さの差は大きい、(b) の短ピッチ成分の凹凸の差は小さい。すなわち長ピッチ成分からの回折光のスペックルパターンは、測定場所により大きく変化して結像スポットの重心を大きく変動させるが、短ピッチ成分によるスペックルパターンは変化が少なく、スポットの重心変動

も小さくなることが予想できる。したがって短ピッチ成分からの回折光を主体的に受光できれば、スポットの重心変動を抑制できると考えられる。測定面の凹凸のピッチを d 、光源の波長を λ 、回折光の次数を n とすると回折角度 α は式 (3) とする。

$$\alpha = \sin^{-1} \left(n \frac{\lambda}{d} \right) \quad (3)$$

ここで式 (3) を使って表 2 に短ピッチを $1.4 \sim 1.6 \mu\text{m}$ 、長ピッチを $4.9 \sim 5.1 \mu\text{m}$ としたときの回折光の次数と回折角度の関係を示す。例えば三角測量角度 θ を 30° 前後にすると短ピッチ成分からは 1 次の、長ピッチ成分からは 3 次から 4 次の回折光を同時に受光する。また θ を 70° 近くに設定すると赤枠で囲ったように短ピッチ成分からは 2 次の、長ピッチ成分からは 7 次の回折光を受光することになる。回折光は、次数が大きくなればなるほどその強度は著しく減少する。したがって θ を 70° 近くに設定すると、スポットの重心変動が大きい長ピッチ成分からの回折光の影響は非常に少なく、重心変動の少ない短ピッチ成分からの回折光が主体的になる。すなわち θ を大きく設定することで、重心変動量は減少すると推察できる。図 9 に研削加工面 ($0.13 \mu\text{m} Pq$) を測定面としたときの三角測量角度 θ に対する $\Delta z'_q$ の関係を示す。ここで受光レンズの NA は 0.20 を使用した。

Table 2 Relationship between diffraction angle and diffraction order caused by difference in roughness pitch

Pitch	Order	1	2	3	4	5	6	7
Short : 1.4-1.6 μm	24-28	55-70	-	-	-	-	-	-
Long : 4.9-5.1 μm	7.5	15	23	32	41	52	67	

Wavelength of light source: $0.658 \mu\text{m}$

Fig. 9 Relationship between the triangulation angle θ and $\Delta z'_q$ (Comparison of calculation result and measured result)

Fig. 10 Relationship between the triangulation angle and $\Delta z'_q$ when each NA results are added to Fig. 8

図中の白三角は式 (2) の δx を一定値としたときの計算結果 (Δz は一定) である。この結果は θ を大きくしていくと三角測量センサの感度も大きくなり、変位変動 δz が減少することを示している。黒三角は測定結果である。 $\Delta z'_q$ は計算結果と同様に θ とともに減少しているが計算結果より減少率は大きい。すなわち δx は一定値ではなく θ に依存し、 θ を大きくしていくと感度の効果以上に δz が減少することを示している。この理由は、 θ を大きくすると、 δx の変化が大きい長ピッチ成分からの回折光強度が弱まり δx の変化が小さい短ピッチ成分からの回折光が主体的になるからである。図 10 は図 9 の測定結果に NA = 0.04, 0.1, 0.15 の結果を加えた図である。 $\Delta z'_q$ はどの NA でも θ の増加とともに減少する。 $\Delta z'_q$ の減少率は、 θ が 32.5° から 70° で約 67%、NA が 0.04 から 0.2 で約 20% であった。図 11 は θ が 32.5° , 50° , 70° のときの断面曲線 (形状波形) である。比較のために触針式測定機で得られたプロファイルも合わせて図示した。 θ を大きくしていくと波形の短波長成分の振幅は減少し、同時にうねり成分の振幅も減少する。三角測量センサでは、フィルタ処理によって得られた波形から短波長成分を取り除くことが多いが、 $\theta = 32.5^\circ$ のときの波形では短波長成分の除去はできてもうねり成分が残存しフィルタ処理の効果は少ない。 $\theta = 70^\circ$ の波形はうねり成分が少ないので、フィルタ処理の効果は大きく、微小形状の測定が期待できる。

5.3 測定対象面の表面性状の影響

図 12 は研削加工面 ($0.13 \mu\text{m} Pq$) と放電加工面 ($0.12 \mu\text{m} Pq$) の $\Delta z'_q$ を比較した結果で、このときの NA も 0.20 である。放電加工面の $\Delta z'_q$ も研削加工面と同様に θ とともに減少しているが、2つの試料がほぼ同じ Δz の表面であるにもかかわらず

Fig. 11 Relationship between the triangulation angle θ and measurement waveform

Fig. 12 Difference in tendency between the ground surface and the EDMed surface

Fig. 13 Submicro topography of the EDMed surface and diffracted light

Fig. 14 Surface texture of the EDMed surface and diffracted light

すべての三角測量角度で放電加工面の $\Delta z'_q$ は研削加工面のそれより小さい結果となった。これにはいくつかの要因があると思われるが、そのひとつは研削加工面と放電加工面の表面性状の違いが考えられる。図 6 (a) に示したように研削加工面の表面性状は方向性がある。そのためスペックルによる受光スポットの重心変化は検出器上の x 方向のみに移動する。それに対して放電加工面の凹凸パターンは図 13 に示す AFM の三次元画像のようにランダムである。そのため回折光もランダムとなる。図 14 に研削加工面と放電加工面の重心変動 δx の違いを示す。図 (a) に示すように、研削加工面ではスペックルパターンは検出器 CCD 上で x 方向に変化するので、結像スポットの重心変動も x 方向のみである。すなわち重心の移動量と δx は一致する。これに対して放電加工面の結像スポットのスペックルパターンはランダムであり重心は x 方向以外にも移動するので、図 (b) に示したように δx は重心の移動量より減少する場合がある。これにより δz が小さくなったものと推察できる。このように δz は、加工面の凹凸パターンの違いにも影響されることが分かる。

6. 光源波長が変位変動に与える影響

6.1 光源を青色 LD に変更したときの効果

これまで波長が 658nm の赤色 LD について述べてきたが、近年高精度化を目的として波長を 400nm 程度の青色 LD に変更した製品も発表されている。この波長の変更はスペックルによる変位変動 δz の低減を試みていると思われるが、光源波長が精度に与える影響の研究は少ない。先行研究⁷⁾によりスペックルサイズは、光源波長にも反比例することが示されている。このことから、光源を赤色 LD から青色 LD に変更することでスペックルサイズが小さくなり、 δx の減少が期待できる。

6.2 NA と変位変動の関係

図 15 に波長 405nm の青色 LD の受光レンズの NA ごとの結像スポットを示す。図 4 の赤色 LD と比較すると同じ NA であればスペックルサイズは青色 LD のほうが赤色 LD より小さく理論と一致する。しかしながら、NA が 0.04 と 0.1 のスペックルサイズの差は大きい。0.1 から 0.2 ではサイズの差はあまりなかった。図 16 に青色 LD を使用したときの NA と $\Delta z'_q$ の関

Fig. 15 Change in speckle size when using blue LD

Fig. 16 Relationship between NA and $\Delta z'_q$ when using blue LD

Fig. 17 Comparison of red LD and blue LD in measuring the ground surface and the EDMed surface

係を示す。ここで θ は 50° で、測定面は研削加工面である。比較のために赤色 LD の結果も合わせて図示した。全ての NA で $\Delta z'_q$ は青色 LD のほうが赤色 LD より小さくなっており、 δz は波長に依存することが確認できた。これは図 15 のスペックルサイズの結果と一致する。ただし、青色 LD では NA を 0.1 以上にしても $\Delta z'_q$ はほとんど変化しなかった。

6.3 θ と変位変動の関係

図 17 に研削加工面と放電加工面を用いたときの三角測量角度 θ と $\Delta z'_q$ の関係を示す。このとき NA は 0.20 とした。研削加工面において青色 LD の $\Delta z'_q$ は、 θ の増加とともに減少し、 $\Delta z'_q$ の赤色 LD に対する青色 LD の減少率は、31 から 54% であった。これは図 16 の結果の傾向と一致し、光源の短波長化によるスペックルサイズの縮小効果と思われる。三角測量角度 θ に対する波長の影響については、波長が短くなると回折角は小さくなり (式 (3)), 同じ θ では赤色 LD のときより次数の高い、重心変動量 δx の小さな回折光を受光するので、 θ が 40° 以下では $\Delta z'_q$ はさらに減少すると思われたがその効果はみられなかった。放電加工面の場合も $\Delta z'_q$ は θ の増加とともに減少したが、減少率は 5 から 22% で研削加工面より少なかった。光源の短波長化の効果は加工面の表面性状で異なる結果となったが、放電加工面の場合赤色 LD の変位変動が図 12 および図 14 で示したようにもともと研削加工面より少ないためと思われる。図 18 に NA が 0.2, $\theta=70^\circ$ の条件のときの研削加工面と

a) Surface with Stylus method measurement value of about 0.1 μm Pq

b) Surface with Stylus method measurement value of about 0.5 μm Pq

Fig. 18 Difference in profiles of surfaces with different Pq value

放電加工面の断面曲線を示す。測定面の凹凸高さは図(a)は触針式粗さ測定機の測定値がおおよそ 0.1 μm Pq の試料であり、図(b)は図(a)の約 5 倍の 0.5 μm Pq の試料である。この結果からも青色 LD の振幅は青色 LD より小さく光源の短波長化による変位変動が減少することがわかる。図(a)と図(b)を比較すると凹凸高さの大きい面の図(b)の試料の振幅が触針式測定値に近い。これはスペックルによる変位変動が 10 μm 程度の小さな照射スポット内で発生するので、凹凸高さの小さな加工面でも大きな加工面でも 10 μm の照射スポット内ではスペックルの影響は余り変わらず、測定面の凹凸高さが大きくなればなるほどスペックルによる変位変動分の割合が減少するためと思われる。

Fig. 19 Relationship between $\Delta z'_q$ and z displacement

7. z 変位と変位変動の関係

三角測量センサの精度は、原理上は測定距離には影響されない。しかしながら、測定面が投光レンズの焦点位置から離れていくと照射スポット径が大きくなるため、検出器上の結像スポット径も大きくなる。そのため重心変動量 δx が大きくなることが予想される。図 19 に測定面に z 変位を与えたときの z 変位と $\Delta z'_q$ の関係を示す。この結果はまず測定面の z 位置を投光レンズの焦点位置に固定し、試料を x 方向に移動しながら測定した断面曲線から $\Delta z'_q$ 計算し、次に z 位置を焦点位置から変化させてまた同じように断面曲線を測定して $\Delta z'_q$ の計算を行ったものである。このときの三角測量角度 θ は 40° と 70° であり光源は赤色 LD と青色 LD である。測定面は研削加工面を使用した。どちらの θ であっても z 変位を大きくしていくとそれとともなって $\Delta z'_q$ は増加していくが、 $\theta=40^\circ$ の場合は $\pm 50 \mu\text{m}$ から急激に増加し赤色 LD は青色 LD より増加が大きかった。 $\theta=70^\circ$ では両 LD とも $\Delta z'_q$ の増加は緩やかで、 $\pm 100 \mu\text{m}$ まではほとんど変化しなかった。この結果は $\theta=70^\circ$ を採用し、センサから測定表面までの距離の変化が $\pm 100 \mu\text{m}$ 以内であれば、形状測定への影響は少ないことを示している。

8. 正弦波形状標準片の測定

ここまで平面加工面の結果を示してきたが、ここでは最大高さ 9.4 μm、ピッチ (波長) 100 μm の正弦波形状標準片を測定対象とする。この標準片は切削加工で製作されたものであり、表面に微小な筋目が存在する。この形状の最大傾斜角は 16.2° である。赤色 LD と青色 LD の測定結果を図 20 に示す。このとき NA と三角測量角度 θ は、 $\Delta z'_q$ が最小となる 0.2 と 70° とした。図中には比較のため触針式測定値を加えた。両レーザーともに触針式測定値に近い形状が得られたが、青色 LD の結果は、波形の山頂および谷において赤色 LD より変位変動は少なく、正弦波形状の結果においても光源の短波長化の効果がみられた。両レーザーの触針式測定値との偏差は、赤色 LD は最大幅で 6 μm、青色 LD は 4 μm、その二乗平均平方根はそれぞれ 1.13 μm、0.58 μm であった。図 21 は青色 LD の 40° および 50° の結果である。50° では図 20 の 70° の結果との差は小さいが、40° では振幅が非常に大きい。特に正弦波形状の最大傾斜角のところで急激に変位が大きくなっている。これはこの位置での 0 次回折光の反射角度が $16.2^\circ \times 2 = 32.4^\circ$ となり、三角測量角度 40° に近くなるためと思われる。このような形状においても θ が大きいほど変位変動が抑制できる。

Fig. 20 Measurement results of the sine wave shaped specimen

9. 結 言

本研究によって得られた知見と結論は以下のとおりである。

- (1) 三角測量角度を増加させると、変位感度の効果以上に変位変動を減少させることができる。また三角測量角度が 40° 以下になると極端に変位変動が増加する。
- (2) 本研究の実験条件では、変位変動の減少率は、受光レンズの NA を増加させたときよりも三角測量角度を増加させたときの方が大きい。
- (3) 放電加工面の変位変動は研削加工面より小さく、変位変動は表面の凹凸パターンによって異なるので、測定結果にフィルタ処理を行なうときは、表面性状の違いを考慮してカットオフ波長を決める必要がある。
- (4) 変位変動は光源の波長に依存し、受光レンズの NA と三角測量角度が同じであれば、青色 LD を使用すると赤色 LD のときより変位変動は大きく減少する。
- (5) 測定面が投光レンズの焦点近傍から z 変位するとき、 z 変位とともに変位変動は増加するが、三角測量角度が大きいほど変位変動の増加は抑制できる。
- (6) 正弦波形状の測定結果より、条件を適切に選ぶことにより数 μm オーダの微小形状の測定が可能になる。

Fig. 21 Difference in measured waveform when $\theta = 40^\circ$ and 50°

参 考 文 献

- 1) 深津拓也, 柳和久: 共焦点式輪郭測定センサを対象とした異常値低減法の開発, 精密工学会誌, 79, 3 (2013)248.
- 2) Peter de Groot, Xavier Colonna de Lega, Jim Kramer, and Michael Turzhitsky: Determination of fringe order in white-light interference microscopy, *Appl. Opt.* 41 (2002) 4751.
- 3) Yurie Okugawa, Naoki Asakawa and Masato Okada: Development of a system for measuring the thickness of free curved plates-Measurement posture planning using C-space, *Int. J. of Automation Technology*, 7, 5 (2013)593.
- 4) Matthias Marcus Auerawald, Axel von Freyberg, Andreas Fischer: Laser line triangulation for fast 3D measurements on large gears, *The international Journal of Advanced Manufacturing Technology* (2018), <https://doi.org/10.1007/s00170-018-22636-z>.
- 5) Manuel F. M. Costa : Optical triangulation-based micro-topographic inspection of surfaces, *Sensors* 12 (2012) 4399.
- 6) Rejean Baribeau, Marc Rioux: Influence of speckle on Laser range finders, *Appl. Opt.* 30(1991)2873.
- 7) R. G. Dorsch, G. Hausler and J. M. Herrmann : Laser triangulation : fundamental uncertainty in distance measurement, *Appl. Opt.* 33 (1994) 1306.
- 8) Thomas Mueller, Andreas Poesch, Eduard Reithmeier : Measurement uncertainty of microscopic laser triangulation on technical surfaces, *Microscopy and Microanalysis*, 21 (2015)1443.
- 9) 飯田勇太, 深津拓也, 吉田政弘: 光学式顕微鏡及び断面形状積算法を用いた単発放電痕の調査, 2015 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 47-48.