スペックル干渉法と三角測量法を用いた複合距離計測

松田 文夫¹, 岡島 拓¹, 杉浦 純平², 長南 功男³, 北川 秀夫³, 西脇 彰

¹豊田工業高等専門学校 (〒471-8525 愛知県豊田市栄生町2-1)

²豊橋技術科学大学 (〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)

³岐阜工業高等専門学校 (〒501-0495 岐阜県本巣市上真桑2235-2)

Complex Displacement Measurement by Speckle Pattern Interferometry and Triangle Method

Fumio MATSUDA,¹ Taku OKAJIMA,¹ Jyunpei SUGIURA,² Isao CHOUNANN,³
Hideo KITAGAWA,³ and Akira NISHIWAKI

¹Toyota National College of Technology, 2-1 Eisei, Toyota, Aichi 471-8525

²Toyohashi University of Technology, 1-1 Hibarigaoka, Tempaku, Toyohashi, Aichi 441-8580

³Gifu National College of Technology, 2236-2 Kamimakuwa, Motosu, Gifu 501-0495

(Received April 1, 2008)

Two methods of displacement measurement of object with diffusing surface have been developed already. One is by speckle pattern interferometry method with wavelength order accuracy and a half wavelength measurement area, and another is by triangle method with micrometer order accuracy and a millimeter measurement range. We propose a method of complex displacement measurement by using the speckle pattern interferometry method and the triangle method. In both methods, measurement point on object surface is the same. In this paper, a calculation method used in the method of complex displacement measurement is described. The method make that displacement measurement of object with diffusing surface can be available with wavelength order accuracy and a millimeter measurement area.

Key Words: Displacement Measurement, Interferometer, Speckle pattern, Diffusing surface, Triangle method

1. はじめに

物体面の凹凸や変位を非接触で高精度に計測する要求に対し、レーザーを用いたスペックル光の干渉による微小変位計測がある¹⁾。この手法は、被測定物体表面が拡散面であっても照射レーザー光のスポット径を小さく絞ることにより、粗面からの反射光をあたかも鏡面からの反射光のように得ることが可能となり、参照光との干渉によって干渉縞を形成し、この干渉縞のフリンジの半径方向への移動距離から、測定面の変位を求めるものである。この欠点は半波長(He-Neレーザー波長: 633 nm)以上の変位に対しては、変位が連続しない限り、フリンジの移動が、半波長周期で何回移動した結果か判別できないことである。従って測定範囲は半波長以内となる。測定スポット径は4.8 μm である¹⁾。測定精度はフリンジの1分の移動距離の10分の1から100分の1の読み取りが可能と考えれば、およそ(63.3/2) nmから(6.33/2) nmとなる。

また、光学的には位置は同じであるが、測定面と参照光を発生する参照面に鏡を用いてフリンジ干渉を作り、

測定面の変位によってフリンジの移動が起こるが、この移動をカウントすることで変位測定が可能となる¹⁾。この手法は任意の対象物体の表面を測定面として用いることができない。

一方、同様の要求に対して、三角測量の手法によって被測定面の変位を求める方法もある。この方法は製品としてはすでに存在し、その一例として、カタログ上の仕様は測定範囲が $\pm 0.2 \text{ mm}$ で、測定精度が0.01 μm 、最小スポット径が $20 \times 12 \mu\text{m}$ である。測定精度が0.01 μm はカタログ上で、実際は0.1 $\mu\text{m} = 100 \text{ nm}$ 程度と考えられる。

本研究では、この二つの方法を巧みに組み合わせることで、測定精度は干渉縞による測定精度の値を持ち、測定範囲は、干渉縞の方法の測定範囲の半波長をはるかに超える、三角測量の範囲を持つ相対位置測定に必要な算出手法⁴⁾を提案する。

^{†1} URL: http://www.onosokki.co.jp/HP-WK/c_support/faq/lv/lv_fringe.htm

2. 測定方法

2.1 同一光軸

干渉縞の方法と三角測量の方法を組み合わせる時に問題になる点として、二つの方法の測定対象となる物体上の点と同じ点であるかである。測定対象となる点は、一例として干渉縞が $4.8\ \mu\text{m}^1$ 、三角測量が $20 \times 12\ \mu\text{m}$ (カタログ値)と考えた場合、別々の測定システムとして構成した場合2つの点を同じにするのは困難である。この問題を解決した計測システムをFig. 1に示す。従来の干渉縞の計測システムで用いられている物体表面(拡散面)に照射しているレーザー光をそのまま用いて、そこからの拡散反射しているレーザー光をレンズで、位置検出素子であるPSD上に集光する。PSDの位置の値から、三角法を用いて物体表面の変位を算出することが可能となる。

2.2 距離算出法

半波長以下の測定範囲しか持たない干渉縞による方法に、測定精度は劣るが測定範囲が、半波長をはるかに超える三角法をどのように組み合わせて、測定精度は干渉縞、測定範囲は三角法とする方法について述べる。Fig. 2はこの算出法を示す。①の x は被測定表面の仮想的変位を示す。②の Δx は干渉縞によって測定された仮想的変位を示し、 $\lambda/2$ 以内の値となる。 x は次式で表される。

$$x = (\lambda/2)n + \Delta x \quad (1)$$

ここで n は干渉縞のフリンジが $\lambda/2$ 周期で何回移動したかを

Fig. 1 Block diagram of complex displacement measurement system.

Fig. 2 Principle of complex displacement measurement.

示し、次式で表される。

$$n = \left[\frac{\Delta b \pm e}{(\lambda/2)} \right] \quad (2)$$

Δb は三角法で得られた被測定表面の変位である。 $\pm e$ はその誤差である。 $[\]$ は、 $[\]$ の中の値を小数点以下を切り捨てた整数値とする演算を示す。 $\pm e$ が $\pm \lambda/4$ より小さければ、 n は最大一つ存在する。(1)式で計算した x の値で $\Delta b \pm e$ に入る x は最大一つ存在する。この値を被測定表面の変位 x とする。

$\pm e$ が $\pm \lambda/4$ 以上 $\pm \lambda/2$ より小さければ、 n は最大三つ存在する。式(1)で計算した x の値で $\Delta b \pm e$ に入る x は最大三つ存在する。この中で Δb に一番近い値を被測定表面の変位 x とする。

次に決め方を説明する。三角測量の誤差 $\pm e$ が、条件の悪い $\pm \lambda/2$ の場合を考える。被測定表面の仮想的変位 x の計算結果として候補の2つと3つが考えられるが、いずれの場合も値は $\lambda/2$ の差を持つ。まず2つの場合を考える。三角測量の誤差が $\pm \lambda/2$ であるので、この2つの値のどちらを取るかは Δb に近い方を取ることで明白と考えられる。ただし等距離付近の場合は決めるのは困難であるが、三角測量の測定値の誤差が最大の $\lambda/2$ の時の値であることを考えると、曖昧さは残るが、確率的に少ないので妥当と考える。次に3つの場合を考える。この場合は三角測量の測定値 Δb が正規分布の中心付近にあり、誤差が $+\lambda/2$ と $-\lambda/2$ の時の候補値が加わり3つとなるが、誤差が $+\lambda/2$ と $-\lambda/2$ 付近の最悪の場合を除き、誤差0付近の真ん中の候補値を算出結果とする。

$\pm e$ が $\pm \lambda/2$ 以上、 λ より小さい場合は n の値が最大五つ存在する、また、 $\pm e$ が $\pm \lambda$ 以上の場合、 n が最大六つ以上存在し、式(1)で計算した x の値で $\Delta b \pm e$ に入る x の値も、最大六つ以上となり、いずれの場合も、測定表面の変位 x であるかを、論理的には決めるのには無理がある。

ただし $\Delta b \pm e$ が正規分布をしていると仮定すれば、 Δb に近い値を被測定表面の変位 x とすることも考えられるが、 $\pm e$ が干渉縞測定範囲 $\pm \lambda/2$ を遙かに超えることも考えれば、この算出の適用外とするのが妥当である。したがって三角測量法の測定精度 $\pm e$ は $\pm \lambda/2$ より小さいことが条件となる。

2.3 干渉縞変位計測法

Fig. 1を用いて説明する。レーザー光はビームエクspanderを通してビームが拡大された後平行光線となる。さらにこれを凸レンズで絞ると、焦点に非常に小さい $6\ \mu\text{m}$ 程度のスポットを作る。ビームスプリッターを通して、被測定面と参照面が焦点距離となっているため、これらの面上に非常に小さいスポットが作られ、拡散反射を生じる。被測定面と参照面からの反射光はビームスプリッターを通った後、スクリーンに向かって、どこの断面もFig. 3に示すような多重フリンジになっていて、しかもビームスプリッターから離れていくに従って大きくなっていく干渉縞を構成する。半透明のスクリーンをビームスプリッターとCCDカメラの間のどこに置いてもFig. 3に示すような

Fig. 3 Interference fringes.

干渉縞が観測される．これをCCDカメラで画像入力するか，じかにスクリーンの代わりにCCDカメラを置いて画像入力を行い，フリンジの引き込みを検出する^{2,3)}．

良好な干渉縞を得るためには，拡大したレーザー平行光を凸レンズで集光して，一番小さくなったところに測定面，参照面ともに位置することが必要となる．この点に調節するために，それぞれ単独に，スペックルパターンを発生させ，これが最大になるようにする．この後，干渉を生じさせ，微調整を行い，良好な干渉縞が得られるようにする．

2.4 三角測量変位計測法

三角測量による変位計測は，すでに確立した方法で，製品としても数多く存在している．Fig. 4にその原理を示す．

レーザー光が被測定面に垂直に照射され，それが拡散反射され，レンズを通して，位置検出素子PSD上に結像される．被測定面が面垂直方向に移動すればPSD上に結像されたレーザースポット光は方向を伴ってPSD上を移動する． Δb は被測定面の変位を， Δa はPSD上の結像されたレーザースポット光の変位を示す． Δb は次式で示される．

Fig. 4 Principle of triangle measurement method.

$$\Delta b = \Delta a \times \frac{b}{a} \times \frac{l_1}{l_2} \quad (3)$$

l_1 は凸レンズから被測定面までの距離， l_2 は同じく凸レンズから位置検出素子PSDまでの距離を示す．この方式の測定範囲は幾何学的な寸法によって決まるが，本方式に適用できる拡散タイプの一例として，測定範囲が ± 3 mm，測定精度(分解能)が200 nmのレーザー変位計が挙げられる．

3. 算出法の検証

干渉縞による方法と三角測量による方法を組み合わせるで算出する方法が正しいかを確認する方法を述べる．式(1)と式(2)に従って，三角法で得られた被測定表面の変位 Δb と干渉縞によって測定された変位 Δx から被測定表面の変位 x を求めるプログラムを組み， Δb に誤差を $\pm \lambda/2$ との範囲でランダムに与え，常に正しい値を算出するかを確認する．Fig. 5はこの確認のために作られたプログラムのパソコンスクリーン上の操作パネルである．左上の“Resolution”はあらかじめ与えられた各測定方法のプログラムの中で与えられたその時々分解能を示す．“Triangulation”は三角法の分解能で 1.0×10^{-8} mは10 nmを，“Interferometer”は干渉縞による方法の分解能で 3.165×10^{-8} mは31.65 nmを意味する．この表示は一例である．

1の“Error”のラジオボタンは誤差の付加の方法を選択する．“Random”なら試行ごとに，3に入力した値の $\pm$ の範囲でランダムに誤差を付加，“Constant”なら4に入力した値の誤差を付加する．3と4にはあらかじめ指数形式で数値を入力しておく．2の“Trial”のラジオボタンで試行の方法を選択する．“Random”ならば5に入力した回数だけ，ランダムに被測定面の真の値を設定し，それに3の三角法によ

Fig. 5 An operational panel on a CRT display to check calculation method.

る被測定面の誤差の範囲のランダムな値を加え、これを三角法による測定値 Δb とする。また真の値から干渉縞から求まるはずの Δx を求めておく。 Δb と Δx から式(1)と式(2)を用いて算出値 x を求め、真の値を横軸に算出値を縦軸にして、自動的にプロットする。“Constant”ならば6に入力した被測定面の真の値に3の三角法による被測定面の誤差の範囲のランダムな値を加え、これを三角法による測定値 Δb とする。前と同様に真の値から干渉縞から求まるはずの Δx を求めておく。 Δb と Δx から式(1)と式(2)を用いて算出値 x を一度だけ求め、真の値を横軸に算出値を縦軸にして、自動的にプロットする。左下の“db”と“dx”、“ans”は、算出するときにその時々 Δb と Δx 、 x の値が表示されるようになっている。この算出の検証はWindows XP上で、言語Rubyを用いて行われた。

4. 検証結果と考察

Fig. 6は、ランダムに被測定面の真の値を設定し、それにFig. 6の操作パネルの3にあらかじめセットされた三角法による被測定面の誤差の最大値(この場合はこの算出法で許される最大値 $\lambda/2$ すなわち316 nmである)の範囲でランダムな値を加え、これを三角法による測定値 Δb とする。また真の値から干渉縞から求まるはずの Δx を求めておく。 Δb と Δx から式(1)と式(2)を用いて算出値 x を求め、真の値を横軸に算出値を縦軸にして、同様にFig. 6の操作パネルの5にあらかじめセットされた回数だけ、自動的にプロットした図である。

Fig. 7は、Fig. 5の操作パネルの3にあらかじめセットされる三角法による被測定面の誤差の最大値が、 $\lambda/2$ を超えた値600 nmに変わった事以外Fig. 6で述べた内容と同じである。

Fig. 8は、被測定面の真の値を542 nmに設定し、それに三角法による被測定面の誤差を加えた値を測定値 Δb とする。また真の値から干渉縞から求まるはずの Δx を求めて

Fig. 6 Calculation results of true position from ΔX and Δb with less than half wavelength $\lambda/2$ error to check calculation method.

Fig. 7 Calculation results of true position from ΔX and Δb with more than half wavelength $\lambda/2$ error to check calculation method.

Fig. 8 Calculation results of true position 542 nm from ΔX and Δb with incremented error from 0 to about 500 nm over than half wavelength $\lambda/2$.

おく。 Δb と Δx から式(1)と式(2)を用いて算出値 x を求める。被測定面の誤差を徐々に大きくしながらその都度、算出値 x を求め、測定面の誤差を横軸に算出値 x を縦軸にして自動的にプロットした図である。

Fig. 6とFig. 7から、三角法による被測定面の誤差が $\lambda/2$ すなわち316 nm以内であれば本算出法が正しいことがいえる。誤差が $\lambda/2$ を超えた場合は誤差によっては真の値から $+\lambda/2$ または $-\lambda/2$ ずれることがFig. 8によって説明できる。一般に、波長オーダ以上の誤差を持つ三角法による計測値 Δb に波長オーダ以下の干渉縞による計測値 Δx を単に加えても誤差は大きい方の波長オーダ以上になってしまう。本手法は基本的には干渉縞による方法である。ただ $\lambda/2$ 毎の測定面の変位で干渉縞は同じ位置に来てしまう。何回この位置を通り過ぎたかを補助的に三角法を用いて求めて、実際の正確な位置を求める算出法を提案し、正しいことが確認できた。

5. 計測装置

同じレーザー光を被測定面に照射して、それによって生じる干渉と拡散反射による三角測量法を用いた複合距離計測の装置をFig. 9に示す。

図中で1がHe-Neガスレーザーの光源($\lambda = 633 \text{ nm}$)，3が直径20 mmのビームエクspanderで平行ビームに拡大する．4が焦点距離 $f = 150 \text{ mm}$ の凸レンズでビームを収束させる．焦点でのスポット径は， $6.04 \mu\text{m}$ となる．5がビームスプリッタ，7が被測定面，6が参照面，8がスクリーンである．被測定面からの拡散光と，参照面からの拡散光でスクリーンに向かって，同心円でフリンジ状の干渉縞が作られ，スクリーン状に映し出される．これを $640 \times 480 \text{ dot}$ のCCDカメラで，コンピュータに取り込み画像処理がされる．

また7の被測定面で拡散反射された光は10の凸レンズで，11の位置検出素子PSD上に結像され，その位置信号はRS232Cシリアルインターフェースを通して，コンピュータに取り込まれる．

6. むすび

物体面の変位を非接触で計測する方法として，計測範囲は半波長以下で，測定精度は波長オーダー以上のレーザーを用いた干渉による計測と，計測範囲は半波長以上で，測定精度が波長オーダー以下三角測量による計測がある．本研究では，この二つの方法を巧みに組み合わせることで，測定精度は干渉縞による測定精度の値を持ち，測定範囲は，半波長を超える，三角測量の範囲を持つ相対位置測定に必要な算出手法を提案した．測定範囲の最大値は基本的に三角測量の方法による制限を受ける．一例としてカタログ状の仕様で測定範囲が $\pm 0.2 \text{ mm}$

Fig. 9 A picture of complex displacement measurement system.

が確認できる．

本算出手法は基本的には干渉縞による方法である．ただ半波長毎の測定面の変位で干渉縞は同じ位置に来てしまう．何回この位置を通り過ぎたかを補助的に三角法を用いて求めて，実際の正確な位置を求める算出法を提案し，正しいことを確認した．

参考文献

- 1) 高田 直人，長南 功男，北川 秀夫，松田 文夫，西脇 彰：レーザー研究 **32** (2004) 538.
- 2) 松田 文夫，浜田 泰裕，長南 功男，高田 直人，西脇 彰：スベックル光の干渉を用いた拡散面一点変位計測の自動化 (2006).
- 3) 松田 文夫，西脇 彰，浜田 泰裕：“拡散面一点微小変位自動計測処理装置” 特許2005-258340 (2005).
- 4) 松田 文夫，西脇 彰，杉浦 純平：“干渉・三角測量同一光軸複合距離測定装置” 特許2006-258651 (2006).