



音響光学素子を用いたビーム走査式差動型ヘテロダイン干渉法による3次元表面形状計測

藤田 宏 夫

シチズン時計(株)技術研究所 〒359 所沢市下富 840

(1991年12月18日受付, 1992年2月27日受理)

3-Dimensional Surface Shape Measurement Based on Differential Heterodyne Interferometry with Laser Beam Scanning Using an Acousto-Optic Device

Hiroo FUJITA

Technical Laboratory, Citizen Watch Co., Ltd., 840, Shimotomi, Tokorozawa 359

(Received December 18, 1991; Accepted February 27, 1992)

A surface shape measurement system based on differential heterodyne method using a laser and an acousto-optic device (AO) is described. The AO generates two beams which advance in different directions at different frequencies by driving an electrical signal which has two frequency components, $f_a \pm f_m$. The separation angle into the two beams and diffraction angle are controlled by the frequency, f_m and f_a , respectively. These two beams fall on a surface and scan thereon. The scanning direction of the two beams can change in various directions in a 2-dimensional plane by a rotating prism. Difference in surface height between the two beams is detected from a phase change of a beat signal with an accuracy of the order of 1nm. We applied this system to the fine angle measurement. The angle of 30 minutes can be measured with accuracies of ± 5 seconds.

1. はじめに

最近の微細加工技術の進歩により、サブミクロン以下のオーダーで3次元的に変化する表面の加工が行われ、3次元の表面形状を nm オーダーの精度で測定するニーズが高まっている。表面形状測定には干渉縞の強度変化を位相変化として検出する縞解析法¹⁾が多く用いられている。この方法は 1/100 波長程度の位相変化が測定できるが、干渉縞の強度変化を安定に検出するために、振動等による外乱の影響を排除することが重要である。使用に際しては十分な除振が必要となり、設置環境が厳しい生産ラインでのインライン的測定には必ずしも適していない。

これに対して、光ヘテロダイン干渉²⁻⁴⁾による形状測定も用いられている。これは、周波数の異なる二つの光

波を干渉させて差の周波数のビート信号を得る方法で、この電気信号の位相変化から、元の光波に含まれている物体情報を検出する。ヘテロダイン干渉ではゼーマンレーザーを用いた例⁵⁾、2個の音響光学素子(AO)を使用する例⁶⁾が良く知られている。

最近では周波数の異なる2ビーム光を物体面上に照射し、2ビーム光の間の位相変化を検出する差動型ヘテロダインの例⁷⁻¹⁰⁾も提案されている。Chungらの差動型ヘテロダイン法⁸⁾はAOを互いに独立した周波数を持つ二つの交流信号で駆動し、AOから駆動周波数に応じた方向に回折される周波数の異なる2ビーム光を発生させる。この駆動信号系では2ビーム光の光学的な走査は行われず、機械ステージで物体面を移動させて2ビーム光を走査する。筆者は一定の周波数差を持つ2周波数成分の交流信号から成り、その中心周波数を可変とすること

により、2ビーム光を発生させるとともに回折方向を連続的に変化させて2ビーム光を走査する差動型ヘテロダイン法を提案した^{9,10)}。今回、2ビーム光の走査方向を2次元面内の任意の方向に変換する新規な1次元走査光学系を付加し、位相の検出範囲を $\pm 2\pi$ まで拡大することにより、生産ラインのインライン計測に適した差動型ヘテロダイン法を開発した。以下に走査方向変換を行うビーム走査式差動型ヘテロダイン干渉による3次元表面形状測定の方法、測定例について報告する。

2. ビーム走査式差動型ヘテロダイン干渉システム

2.1 2ビーム光の発生と走査

AOは超音波と光の相互作用により光の回折を制御するもので^{11,12)}、媒質内部を進行する超音波の粗密波が媒質中に屈折率の周期的変動を生じさせる。これが光に対する回折格子として作用し、光の回折、強度変調、周波数シフトを起こさせる。ブラッグ回折モードで動作するAOを単一の交流信号源で駆動し、生じた1次の回折光を走査させることは多くの分野で用いられている。このブラッグ回折モードのAOを同時に多周波数の信号で駆動すれば、それぞれの周波数に対応する角度方向に同時に回折されるビームが得られる^{13,14)}。この多重ビーム発生に走査機能を付加する方法を説明する。

Fig. 1にAOによる2ビーム光発生と走査を示す。キャリア周波数が f_a の高周波交流信号と、変調周波数が f_m の低周波交流信号との間で振幅変調を行い、中心周波数が f_a で、 $f_a \pm f_m$ のサイドバンド周波数を持つ2周波数成分の信号をAOに印加する。この信号波形をFig. 2に示す。周波数 f_m は250 kHz、 f_a は40 MHzに設定し、周波数 f_a 成分の強度を最小にしてサ

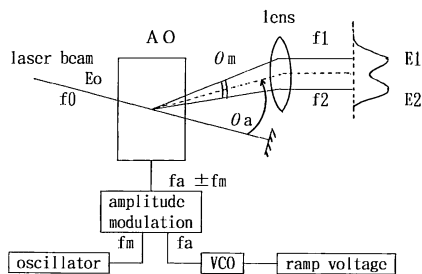


Fig. 1 Schematic diagram of two beams generation from an acousto optic device (AO) by driving the signal which has two frequency components. Separation angle, θ_m , and diffraction angle, θ_a , are controlled by frequency, f_m and f_a , respectively.

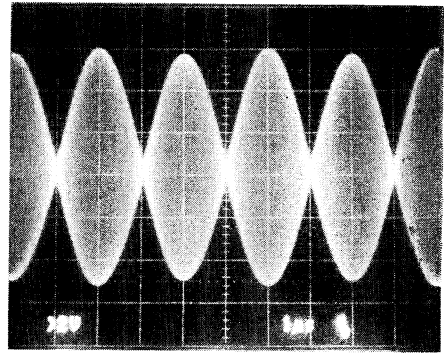


Fig. 2 Waveform of driving signal which has two frequency components applied to the AO. The envelop frequency is 500 kHz, in which carrier frequency of 40 MHz is included.

イドバンド周波数 $f_a \pm f_m$ を最大にすると、エンベロープ周波数が 500 kHz で内部に 40 MHz の成分を持つ信号が得られる。

周波数 f_0 を持つ直線偏光のレーザー光 E_0 が AO に入射したとき、同じ直線偏光で、 $f_1 = f_0 + f_a + f_m$ 、 $f_2 = f_0 + f_a - f_m$ の周波数の2ビーム光 E_1 、 E_2 が発生する。この2ビーム光は、周波数 f_a だけで駆動されるときに発生する通常の1次回折光がさらに、 ± 1 次光に分離されたもので、互いの分離角度 θ_m で異なる方向に進行する。2ビーム光の中心は非回折光から θ_a の角度に回折される。分離角度 θ_m 、回折角度 θ_a は周波数 f_m 、 f_a に比例して変化する。周波数 f_m を一定に保ち、周波数 f_a を変化させると、2ビーム光は分離角度 θ_m を保った状態で回折角度 θ_a が変化し、2ビーム光の偏向(走査)が行われる。回折角度 θ_a の制御は電圧がリニアに変化するランプ波信号で行い、直流電圧を電圧制御発信器(VCO)で周波数 f_a の交流信号に変換する。用いたAOは中心周波数が40 MHzで、ランプ電圧が1 Vの変化で周波数 f_a が20 MHz変化し、回折角度が3.25 mrad 変化する。

互いに異なる方向に進行する2ビーム光を、レンズで平行に進行させて物体面に照射し、物体面上を走査する。このときの2ビーム光のピーク強度間距離は周波数 f_m とレンズの焦点距離に応じて設定できる。

任意の点 x での2ビーム光 E_1 、 E_2 の複素振幅は、

$$\begin{aligned} E_1(x, t) &= A_1(x) \exp \{i[2\pi f_1 t + \phi_1(x)]\} \\ E_2(x, t) &= A_2(x) \exp \{i[2\pi f_2 t + \phi_2(x)]\} \end{aligned} \quad (1)$$

$A_1(x)$ 、 $A_2(x)$ は振幅、 $\phi_1(x)$ 、 $\phi_2(x)$ は位相である。2ビーム光を干渉させたときの強度 $I(x, t)$ は、

$$I(x, t) = A_1^2(x) + A_2^2(x)$$

$$+ 2 A_1(x) A_2(x) \cos(2\pi \Delta f t + \Delta \phi) \quad (2)$$

ただし、 $\Delta f = f_1 - f_2$ 、 $\Delta \phi = \phi_1(x) - \phi_2(x)$ である。

ここで、直流成分 $A_1^2(x) + A_2^2(x)$ をカットし、交流成分 $2 A_1(x) A_2(x) \cos(2\pi \Delta f t + \Delta \phi)$ を検出すれば、差周波数 $\Delta f = 2f_m$ のビート信号が得られ、周波数 Δf を一定に設定し、位相変化 $\Delta \phi$ を検出する。この $\Delta \phi$ は 2 ビーム光の相互の光路長の差に対応する。

2.2 差動型ヘテロダインの構成

Fig. 3 に差動型ヘテロダイン干渉の構成を示す。He-Ne レーザー光源から放射されたレーザー光を AO に入射し、2 ビーム光を発生させるとともに走査する。2 ビーム光をビームスプリッターで 2 方向に分割し、反射して進行する 2 ビーム光を受光器で受光して参照光信号を作成する。透過して進行する 2 ビーム光を 2 個のプリズムの組み合わせから成る走査方向変換回転プリズム¹⁵⁾ (SDP) に入射する。SDP はステップモーターで光軸の回りに回転させられ、回転角度の 2 倍の角度方向に走査方向を変換する。この 2 ビーム光を対物レンズで微小なスポット径に集光し、接近して互いに平行に進行するビームに変換して被測定物面上に照射する。反射光は元の光路を逆進してビームスプリッターで反射され、受光器で検出して反射光信号を作成する。参照光信号、反射光信号はともに周波数 $2f_m$ のビート信号で、参照光信

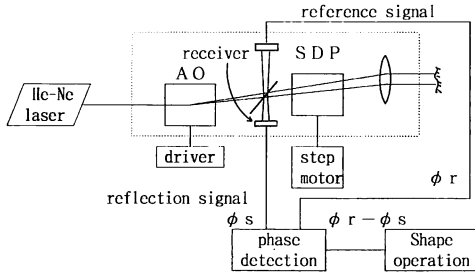


Fig. 3 Schematic diagram of surface shape measurement system by the differential heterodyne method using the two laser beams scanning.

号の位相 ϕ_r は一定、反射光信号の位相 ϕ_s は物体面上での 2 ビーム光の相互の光路差に応じて変化する。位相 ϕ_s の変化を検出するために、二つの信号の位相差 $\phi_r - \phi_s$ を位相比較器で検出し、位相 ϕ_s の変化から物体の 3 次元形状を測定する。反射光の位相の変化がそのままビート信号の位相の変化に対応するため、電気信号の位相の 1° は 2 ビーム光の光路差に換算すると $1/720$ 波長になる。このヘテロダイン検出では、物体表面の反射率の変化等による反射光強度の変動に影響されずに位相検出ができる。

本システムは参照光および物体面に照射する 2 ビーム光はともに接近して進行し、実質的に同一の光路を進む。物体面に垂直な方向に振動が生じて 2 ビーム光は同時に振動の影響を受けるため、互いにキャンセルされて実質的には振動の影響を受けにくい。さらに参照光信号も反射光信号も同一の AO から作成される 2 ビーム光のビート信号であるため、周波数変化の影響を受けずに位相の検出ができる。

2.3 走査方向変換型 1 次元走査光学系の構成

AO で 2 ビーム光を X 軸方向へ 1 次元走査を行うとき、X 軸以外の任意方向の形状を測定するには、物体面を機械ステージで回転させ、測定する方向と 2 ビーム光の走査方向を合わせる必要がある。この場合は回転機構系を用いるため測定の効率が悪くなり実用的でない。そこで SDP を用いて光学的に走査方向を変換し、2 次元面内の任意の方向に 2 ビーム光を走査する。

Fig. 4 に走査方向変換型 1 次元スキャナーの構成を示す。2 mW のパワー、波長が 633 nm の He-Ne レーザー光源から放射された直線偏光を持つ円形状のビームを、シリンドリカルレンズ f_1 とレンズ f_2 の組み合わせで、紙面に平行な面内に広がりを持ち、垂直な方向に集光するシート状ビームに変換して AO に照射する。AO からは角度 θ_a 方向に回折される 2 ビーム光が生じる (図では 1 本のビームで表す)。シート状ビームをレンズ

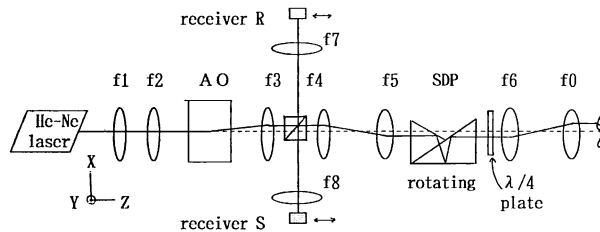


Fig. 4 Optical arrangement of two beams scanning system with conversion of scanning direction in a X-Y plane. The SDP, a rotating prism, rotates around the optical axis. In these lenses, f_1 and f_4 are cylindrical lenses, the rest are convex lenses.

f_3 とシリンドリカルレンズ f_4 の組み合わせで再び円形状のビームに変換する。シート状ビームを用いるのは、AO の回折効率を上げるためである。なお、シリンドリカルレンズ f_1 , f_4 はともに紙面に平行な方向への屈折作用面を持つ。レンズ f_3 とシリンドリカルレンズ f_4 の共通焦点位置に偏光ビームスプリッター (PBS) を配し、反射される2ビーム光をレンズ f_7 で紙面に平行な面に広がりを持つシート状ビームに変換し、参照光として受光器 R で検出する。なお、レーザー光源から放射されるレーザー光の直線偏光軸を S 偏光軸から P 偏光軸方向に一定軸だけ回転させておき、PBS に入射する2ビーム光強度の 20% を反射させ、80% を透過させる。

PBS を透過した2ビーム光はシリンドリカルレンズ f_4 、レンズ f_5 を通り、発散光として SDP に入射する。SDP は正三角形プリズムと、頂角が 30° , 60° の直角プリズムの組み合わせから成り、直角プリズムの反射底面をステップモーターで光軸の回りに回転する。SDP に入射する X 軸方向に走査される2ビーム光は、プリズム内部で Y 軸方向に V 字型の光路をたどり、Y 軸方向には入射光と平行な光軸で出射する。直角プリズムの反射底面を回転させたとき、X 軸方向に走査される2ビーム光の反射底面での反射位置は、X 方向への走査に従って Z 方向に変化し、反射底面が Y 軸に直角となる基準位置から角度 ω だけ回転したとき、X 軸から Y 軸方向に、角度 2ω だけ走査方向が回転する。これは像回転プリズムとして知られる dove-prism と同じ働きである。SDP の入射面、出射面を光軸に対して垂直な面とすることにより、発散光が入射しても非点収差によるビーム形状の変形を防ぐことができる。プリズム反射底面を $\pm 90^\circ$ 回転することにより、走査の向き、方向も含めて2次元面内で放射状に2ビーム光を走査することができる。ステップモーターは 0.5° ステップで回転させ、 1° ステップで走査方向を変換する。SDP を出射した2ビーム光は $1/4$ 波長板を経てレンズ f_5 でコリメートされ、対物レンズ f_0 で微小なスポット径に集光して物体面上を走査する。物体面上での2ビーム光の走査距離 L_s 、2ビーム光のピーク強度間距離 L_b は(3)式で与えられる。

$$\begin{aligned} L_s &= f_3 \cdot f_5 \cdot f_0 \cdot \theta_a / (f_4 \cdot f_6) \\ L_b &= 2L_s \cdot \theta_m / \theta_a \end{aligned} \quad (3)$$

ただし θ_a は AO による全回折角度 (3.25 mrad)、分離角度 θ_m は周波数 f_m が 100 kHz のときに $30 \mu\text{rad}$ 程度である。本光学系では走査距離 L_s は 1 mm に設定した。SDP はさらに、反射底面を基準角度位置 ($\omega=0$) に

保ち、Y 軸方向に移動させれば、Y 軸方向へのビーム走査が可能で全体で2次元走査ができる^{16,17)}。

反射光は元の光路を逆進して PBS で反射し、レンズ f_8 で紙面に平行な面内に広がりを持つシート状ビームに変換されて受光器 S で検出され、反射光信号を作成する。このとき、 $1/4$ 波長板を回転させて偏光軸を調整し、反射光全体を PBS で反射させ、レーザーへの戻り光をなくするようにする。

参照光、反射光を検出する受光器はビーム幅よりも小さい受光面を持ち、それぞれ図の方向に移動させる。シート状ビームはビーム広がり方向に位相の空間分布を持つため、受光位置に応じて検出される位相が変化する。反射光信号の位相変化の正負の符号を安定に検出するため、受光器の検出位置を移動させ参照光信号と反射光信号の初期位相差を 0° 近くに設定する。

本光学系は周波数 f_m を変化させることにより、2ビーム光を構成する各々のビームのピーク強度間距離を自由に設定することができる。Fig. 5 に対物レンズ f_0 の焦点位置での2ビーム光の強度プロファイルを示す。2ビームへの分離がなく1ビーム状態でのビームスポット径は $20 \mu\text{m}$ である。波形(a)はピーク強度間距離が $13 \mu\text{m}$ で周波数 f_m が 100 kHz の場合である。これは2ビーム光への分離が生じる状態で、レーリの規定条件に相当する。したがって AO は 100 kHz 以上の周波数

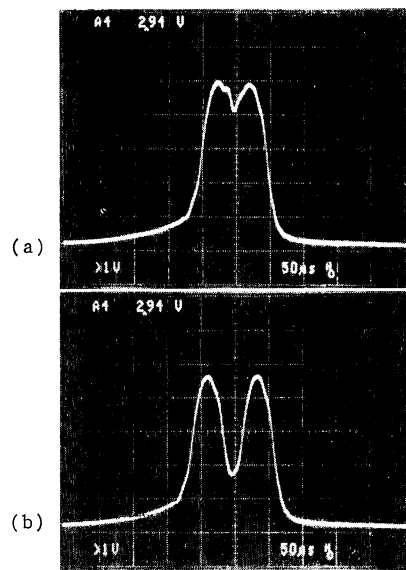


Fig. 5 Waveforms of light intensity distribution of the two beams. Waveform (a) is less separation, and waveform (b) is large separation into the two beams.

f_m で駆動する必要がある。波形 (b) は周波数 f_m が 160 kHz の場合で 2 ビーム光への分離は十分大きく、ピーク強度間距離は $20 \mu\text{m}$ である。2 ビーム光のピーク強度間距離は計測する対象物、必要な精度に応じて設定する。

3. 表面形状測定例と結果

2 ビーム光を用いる差動型ヘテロダイン干渉法は 2 ビーム光の間の光路差を検出するため、表面の微分的変化が測定でき、表面粗さ測定に適しているが、われわれは 1 度以下の微小角度の測定に応用した。Fig. 6 に 2 ビーム光の走査を用いた角度測定例を示す。基準面と斜面を各々走査し、各々の面で 2 ビーム光が照射されている 2 点間の光路差 Δh を、ビート信号の位相差 $\Delta\phi$ から検出する。 Δh と $\Delta\phi$ の関係は (4) 式

$$\Delta h = \lambda \Delta\phi / 4\pi \quad (4)$$

で表される。ただし、 λ はレーザー光の波長である。He-Ne レーザーの場合、ビート信号の位相の 1 度は光路差の 0.88 nm に相当する。基準面が平面であれば、斜面での 2 ビーム光の位相差から光路差 Δh を (4) 式から求め、斜面角度 α を

$$\alpha = \tan^{-1}(\Delta h / D) \quad (5)$$

から求める。 D は 2 ビーム光のピーク強度間距離である。このとき、例えば基準となる角度 θ_g のゲージを作成してオートコリメータ等で角度を測定しておき、本測定で角度 θ_g に対応する位相差 ϕ_0 を測定し、

$$D = 0.00088 \phi_0 / \tan \theta_g \quad (\mu\text{m}) \quad (6)$$

により、2 ビーム光のピーク強度間距離 D を決定する。

Fig. 7 に角度測定で得られたビート信号波形例を示す。波形 P は基準面、波形 S は斜面でのビート信号波形で、各々の ch 1 の波形は参照光信号、ch 2 の波形は反射光信号で、各々の周波数は 400 kHz である。試料は表面粗さが $0.02 \mu\text{m}$ 以下の鏡面状である。反射光は基準面からは正反射されるが、斜面からは斜めの角度方向に反射されるために反射光強度の低下が生じる。本測定では 2 ビーム光を構成する各々のビームスポット径は $20 \mu\text{m}$ に設定し (表面の粗さ等の影響を少なくするため)、

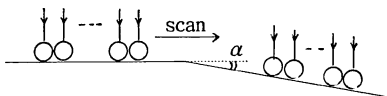


Fig. 6 Example of fine angle measurement using the differential heterodyne method by two beams scanning. Optical path length difference between the two beams is detected.

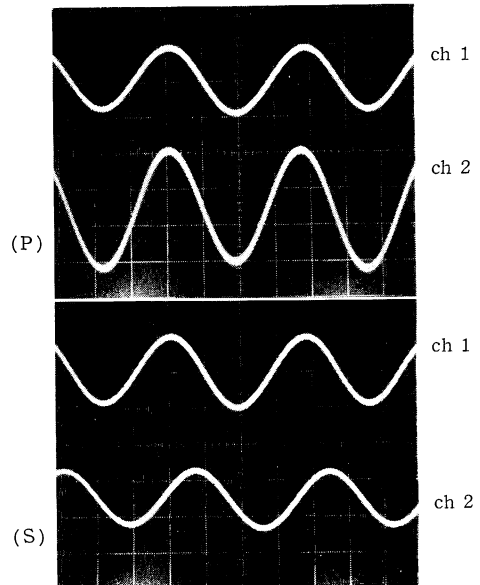


Fig. 7 Beat signal waveforms obtained angle measurement shown in Fig. 6. Waveforms (P) are obtained by flat plane, waveforms (S) are obtained by slope plane. Each waveforms, signals of ch 1 are reference signal, ch 2 are reflection signal. The frequency of each beat signals is 400 kHz.

周波数 f_m を 200 kHz にして 2 ビーム光の間の距離 D を $25 \mu\text{m}$ に設定した。Fig. 7 の波形では基準面の位相差が 6° 、斜面部の位相差が -68° となり、基準面に対する斜面の位相差は $360 - (6 + 68) = 286^\circ$ である。この位相差の演算は、斜面からの反射光強度の低下量から 74° ではなく 286° であることが決定できる。斜面での 2 ビーム光の間の光路差は 252 nm となり、斜面角度 α が 34 分 23 秒であると測定できる。この角度測定の繰返し安定度は各々の面で検出された位相の平均をとれば、位相差にして $\pm 0.7^\circ$ で ± 5 秒に対応する。これは光路差に換算すれば 1 nm のオーダーである。2 ビーム光の走査ステップは $10 \mu\text{m}$ で行い、 1 mm の範囲を 1 ms で走査した。位相データ処理も単純な演算でよいから、リアルタイムで角度測定ができる。

一般に位相の検出範囲は正負の符号を含めて $0 \sim \pm\pi$ で、検出できる光路差 Δh は、 $|\Delta h| \leq \lambda/4$ である。Fig. 8 に位相角と表面形状の凹凸の関係を示す。位相角が P の位置 (角度 ϕ_p) にあるとき表面が凸であるとすれば、位相角が Q の位置 (角度 $-\phi_q$) では表面が凹である。ここで、実際の表面が凹で、位相角が $-\pi$ を越えて P の位置にあるとき、本来の位相角は $-(2\pi - \phi_p)$ であるのに、

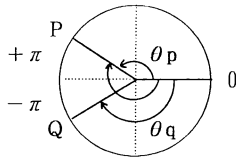


Fig. 8 Relation between phase angle and convex/concave state of the surface shape between the two spot beams.

位相角が ϕ_p で表面が凸であると誤測定される。そこで、表面の凹凸を確実に測定するため、2ビーム光のピーク強度間距離 D を小さくして位相角の変化が $\pm\pi$ より小さくなるようにプリスキャンを行い、位相角の正、負の変化の方向を決定しておく。次に2ビーム光の間の距離 D を物体形状に応じて設定し、位相角の変化が $\pm\pi$ を越えた場合でも位相の補正を行い、凹凸の判定とともに精度の良い形状測定を行う。このように、2ビーム光のピーク強度間距離を自由に設定することで、実質的に位相の検出範囲を $\pm 2\pi$ の範囲まで拡大することができる。

4. ま と め

AO から作成された2ビーム光の走査を行う差動型ヘテロダイナミクスを用いた3次元表面形状測定機を開発して、微小角度の測定に応用した。35分程度の角度を ± 5 秒以内の精度で検出することができた。2ビーム光のピーク強度間距離を電気信号の周波数で自由に設定することにより、位相差が $\pm\pi$ を越える場合でも位相差の変化の方向を検出することで、 $\pm 2\pi$ まで検出範囲を拡大することができた。

1次元的に走査される2ビーム光の走査方向を2次元面内の任意の方向に変換する光学系により、物体表面の任意方向での表面形状測定が可能になる。本測定機は振動等の外乱の影響を受けにくく、通常の環境下で使用できる。また、検出した位相変化から簡単なデータ処理で

リアルタイムで表面形状が判定できるため、生産ラインでのインラインの測定機としての効果が大きい。

しかし、本測定法は2ビーム光が照射されている2点間のポイント計測であるため、線、面としての計測に拡大することが今後の課題である。

文 献

- 1) 谷田具彦: 応用光学—光計測入門 (丸善, 1988) pp. 185-198.
- 2) 中島俊典: “ヘテロダイナミクス干渉法”, 光学, 9 (1980) 266-274.
- 3) 岩田耕一: “ヘテロダイナミクス法”, O plus E, 27 (1982) 90-96.
- 4) 中島俊典: “ヘテロダイナミクス干渉法による表面形状の高精度測定”, 応用物理, 55 (1986) 704-707.
- 5) G. E. Sommargren: “Optical heterodyne profilometry,” Appl. Opt., 20 (1981) 610-618.
- 6) N. A. Massie: “Real-time digital heterodyne interferometry: a system,” Appl. Opt., 19 (1980) 154-160.
- 7) C. W. See, M. V. Iravani and H. K. Wickramasinghe: “Scanning differential phase contrast optical microscope: application to surface studies,” Appl. Opt., 24 (1985) 2373-2379.
- 8) H. Chung, L. M. Walpita and W. S. C. Chang: “Simplified differential phase optical microscope,” Appl. Opt., 25 (1986) 3014-3017.
- 9) 藤田宏夫: 特開昭 59-211810 (1984).
- 10) H. Fujita: U.S. Patent No. 4, 577, 967 (1986).
- 11) R. Adler: “The interaction between light and sound,” IEEE Spectrum, May (1967) 42-54.
- 12) 杉浦幸雄: “音響光学変調器・偏向器”, O plus E, 63 (1985) 86-92.
- 13) W. Baronian: “Acoustooptic bragg diffraction devices and their applications,” IEEE '74 REGION SIX CONF., pp. 70-77.
- 14) 田中文雄, 金山光一: “超音波偏向器とその使用法”, オプトロニクス, 8 (1982) 38-45.
- 15) 藤田宏夫: “レーザー光走査を用いた2次元パターン計測(2)”, 第52回応用物理学会議講演会予稿(3), 11a-PA-19 (1991) p. 894.
- 16) 藤田宏夫: “レーザービーム走査による2次元微小パターン計測”, 光学, 20 (1991) 160-161.
- 17) H. Fujita: “Two-dimensional micropattern measurement using precision laser beam scanning,” SPIE Proc., 1332 (1990) 456-467.