光コムレーザを用いた距離計測技術の開発*

針山達雄** 笠井啓晃*** 渡辺正浩**

Development of Distance Measurement Technique Using Optical Comb Laser

Tatsuo Hariyama, Hiroaki Kasai and Masahiro Watanabe

High accuracy shape measurement technique is necessary for processing and assembling large-size products such as electric generators and rail cars with efficiency and high accuracy. Widely-used manual measurement in manufacturing scenes has the following problems. Firstly, it takes much time for measurement. Secondly, the accuracy depends on individual measurement skill of using contact gauge. For the purpose of shorting time for measurement and improving measurement accuracy, we propose a non-contact distance measurement technique by combining optical comb laser with electrical optical modulator. The experimental result shows that it is possible to measure distance with smaller than 25 μm accuracy on the condition that the detected light power is -60 dBm.

Key words: shape measurement, optical comb, electrical optical modulator

1. 緒 言

発電機や鉄道車両などの大物製品の製造工程において、加工中ならびに加工後の形状の確認のために、寸法・形状計測が行われている。現在、製造現場では、ノギスや金尺などの接触式の測定器と測定治具を組み合わせる寸法を計測しているため、一人作業での計測が困難である上、測定結果に個人差が発生する。そのため、計測時間の短縮と、測定結果が作業者の技能に依存しない自動計測が可能な非接触計測法に対するニーズが高い^{1)~4)}。また、作業者に依存しない自動計測技術の確立は、今後海外での製造においてより重要になってくると考えられる。これら中・大物製品の部品サイズは数メートル程度あり、100 μm 以下の加工精度が求められることがある。こうした部品の形状計測には数メートルの距離を加工精度の数分の一程度の精度が求められる。

長距離の非接触形状計測法にはレーザを用いた距離測定（以下、測距という）方式が広く採用されている^{5)~8)}。しかし市販製品では精度の良いものでも 10 m の距離に対して 100 μm 程度の測距精度である。

近年光コムレーザを用いた測距技術が提案されており、数十～数百メートルの距離を数～数十マイクロメートル以下の精度で計測したことが報告されている^{9)~11)}。ただし測定対象はミラーであり、大物構造物に直接照射して測定することは想定していない。対象に直接照射して測定する方式として、光コムレーザ 2 台と AOM(Acoustic Optical Modulator)を用いた方式が提案されている¹²⁾。しかし、光コムレーザ 2 台と AOM を使用する必要があり、装置コストが高くなる懸念があった。

我々は、長距離を高精度に測距可能な光コムレーザを用いた測距技術を発展させ、大物製品に対して、リフレクタを接触させずに計測でき、高精度な形状測定を可能とする 3 次元形状計測装置

の開発に取り組んだ。上記の考察から距離 10 m に対する目標精度を $\pm 25 \mu\text{m}$ とした。測定対象を直接測定する場合は、対象からの散乱光を検出するため、検出光量が-60 dBm と微弱となり、電気的なクロストークの影響で測定精度が劣化する課題があった。そこで、光コムレーザを EOM(Electro-Optic Modulator)を用いて光ビートダウンすることで電気的なクロストークを抑制する方法を提案し、検出光量が-60 dBm と微弱な場合でも、目標精度 $\pm 25 \mu\text{m}$ の性能を得たので、本内容について報告する。提案方式は、従来方式¹²⁾と比較し、光コムレーザ 1 台と EOM で構成されており、低コスト化が期待できる。

2. 光コムを用いた距離計測

2.1 検出原理

図 1 に光コムレーザを用いた長距離高精度計測方式の原理について説明する。図 1(b)は光コムレーザのスペクトル分布を示す。光コムレーザはスペクトル成分が離散的に等間隔に並んでおり、検出器で受光すると各スペクトル成分間のビート信号が複数種類(図 1(b)の f_1, f_2, f_3 等)発生する。すなわち光コムレーザは複数の周波数で同時に強度変調を受けたビームとみなすことができるので、これを光の物差しとして測距に用いることが可能である。図 1(a)に光学系の構成例を示す。光コムレーザを、ファイバカップラを用いて照射光と参照光に分け、参照光を受光器 1 で検出する。照射光は測定対象に照射し、その戻り光を受光器 2 で検出する。光コムレーザのうちの 1 つの周波数成分 f_i について測距原理を説明する。検出した参照光と戻り光の周期的強度変化の位相差 $\Delta\phi_i$ から距離を算出する。距離 L は次式で表すことができる。

$$L = \frac{c}{2f_i} \left(N_i + \frac{\Delta\phi_i}{2\pi} \right) \quad (1)$$

ここで、 c は大気中の光速、 N_i は任意の整数を表す。距離 $c/2f_i$ で位相が元に戻ることから、以降 $c/2f_i$ を物差しの長さと呼ぶ。位相測定精度が一定であれば、変調周波数 f_i を上げることにより物差しの長さが短くなるので測距精度は向上するが、距離を一意に決定できる範囲は狭くなってしまう。このトレードオフの関係を解決するために光コムの特徴で

* 原稿受付 令和元年 10 月 6 日

掲載決定 令和 2 年 2 月 14 日

** 正 会 員 (株)日立製作所 横浜研究所 (神奈川県戸塚区吉田町 292 番地)

*** (株)日立製作所 横浜研究所 (神奈川県戸塚区吉田町 292 番地)

Fig.1 Principle of high accuracy long distance measurement using optical comb

ある変調周波数 f_i の異なる複数の物差しを併用する方法を用いる。図 1(c)に 10 m を $\pm 25 \mu\text{m}$ の精度で測距するための物差しの組合せ例を示す。ここでは位相測定精度を $2\pi/180$ と仮定している。測定したい距離 10 m より物差しの長さが大きい 15 m (変調周波数 f_1 : 10 MHz) の物差しと、要求される測定精度 $\pm 25 \mu\text{m}$ を満足する 4.5 mm (変調周波数 f_4 : 33.3 GHz) の物差し、その間をつなぐ 1 m (変調周波数 f_2 : 150 MHz) と 150 mm (変調周波数 f_3 : 1 GHz) の物差しを備える。ここで、物差し 15 m の $1/180$ は 83 mm であり、1 m 以下なので、物差し 1 m での測定距離の計算における N_2 が決定できる。同様に、 N_3 , N_4 が決定でき、これにより物差し 15 m で絶対距離を測定可能な範囲を物差し 4.5 mm の $1/180$ の精度 $\pm 25 \mu\text{m}$ で測定することができる。

2.2 従来の電気ビートダウン方式

本測距方式では最終段において光コムの変調周波数 f_4 (33 GHz) の位相測定を行う必要がある。変調信号を受光器で検出してロックインアンプ等で位相測定を行う必要があるが、市販されているロックインアンプの対応周波数は 200 MHz 程度であるため、ロックインアンプへの入力前段で低周波数にビートダウンする必要がある。図 2 に従来の電気ビートダウン方式を示す。33 GHz の光変調信号を高周波対応の受光器で受光し、電気信号に変換する。発振器により 32.9 GHz の電気信号を発生させ、高周波対応のミキサーによってミキシングすることにより、100 MHz までビートダウンした電気信号を生成する。ミキシング後の信号には 100 MHz 以外のビート信号成分も含まれるため、バンドパスフィルタにより、100 MHz のビート成分のみを抽出する。ビートダウンされた参照信号に対する測定信号の位相を測定することで、距離を算出する。本方式は測定対象がミラーで、検出光量が十分に強い場合は、精度良く位相測定できるが、測定対象が粗面で、検出光量が弱い場合は、検出されるビート信号が弱いため、参照側 (図 2 の Reference Detector 1) からの電気的なクロストークの影響を測定側の信号が受けるため、測定精度が劣化する課題がある。また信号周波数が高いほど、クロストークは大きくなるため、最も周波数が高い 33

Fig.2 Conventional setup for electric beat down of detected signal

GHz の変調信号はよりクロストークの影響を受けやすくなる。

2.3 提案する光ビートダウン方式

我々は光の状態でのビートダウンすることで、電気的なクロストークによるノイズを大幅に抑制可能な方式を提案する。光の状態でのビートダウンするために EOM を用いる。EOM の構成を図 3 に示す。EOM は MZI (Mach-Zehnder Interferometer) の構成をしており、加える電圧により屈折率が変化する素子を一方の光路に挿入し、その素子に電気変調信号を加えることで、入射光を変調することが可能である。変調光には、加えた電気変調周期 Δf の整数倍の変調成分が発生する。EOM を用いた光ビートダウン方式の構成を図 4 に示す。参照光を EOM1 に、測定光を EOM2 にそれぞれ入射する。光コムモード間ビート 33 GHz の変調成分を光ビートダウンするため EOM1 と EOM2 に対して発振器から 32.9 GHz の電気変調信号を加える。図 5 を用いて光ビートダウンの原理を説明する。図 5 は横軸が光周波数で縦軸が強度を示す。光コムは繰り返し周波数 f_{rep} で等間隔に櫛歯上に発生する。光コムのある周波数成分 f と、それに対して 33 GHz 隔てた周波数成分 f_n を考える。周波数成分 f_n は EOM に入射することで、EOM に加わる電気変調周波数 Δf 隔てた周波数に変調信号が発生する。すると f と $f_n - \Delta f$ 間で干渉して、その差周波数まで光ビートダウンすることが可能となる。EOM に加える電気変調周波数が 32.9 GHz の場合 33 GHz との差周波数は 100 MHz となり、受光器で受光することにより 100 MHz の電気信号を得ることができる。本方式は、EOM を用いて光の状態での低周波数にビートダウンしてから、位相比較するため、電気的なクロストークが生じにくい。

また本方式の他の利点として、EOM に変調信号を加えた場合、図 3 で示したように 1 倍波、2 倍波、... と高次の変調成分が生じるため、高次の変調成分を利用することにより、発振器の発振周波数を低くすることが可能である。例えば、変調信号の 2 次変調成分を光ビートダウンに用いるのであれば、発振器から 32.9 GHz の半分の 16.45 GHz の電気変調信号を加えることによって 33 GHz の光変調成分を 100 MHz に光ビートダウンすることが可能である。これにより高周波発振器のコストを低減させることが可能である。

変調光に対して EOM を用いて光ビートダウンし、低周波にて位相検出する方法は過去に報告¹³⁾¹⁴⁾があるが、CW 光を EOM に入射して変調し、測定対象から反射した戻り光を別の EOM に入射して復調する方式であり、変調と復調の 2 種類の高周波発振

Fig.3 Structure of EOM and image of generated modulation signal

Fig.6 Experimental setup for measuring target distance

Fig.4 Proposed setup for optical beat down of detected signal using EOM

Fig.5 Optical beat down image using optical comb and EOM

器を用いているため、電気的なクロストークが生じ、測定誤差を補正する必要があった。本方式は光コムレーザを光源として用いるため、変調用の EOM と発振器の 1 セットが必要になるため、従来の 2 種の高周波発振器で生じていた電気的なクロストークが生じない利点がある。

3. 実験評価

提案する光ビートダウン方式の実験検証を行った。光ビートダウンによるクロストーク抑制効果を検証するため、電気ビートダウンを用いた実験構成と、光ビートダウンを用いた実験構成で比較を行う。

3.1 電気ビートダウン方式の構成

図 6 に実験装置構成を示す。光源には波長 1550 nm、繰り返し周波数 72.561 MHz、照射光量 10 mW の光コムレーザを用いた。ファイバコプラによって 2 分岐し、一方を参照光として用い、一方を測定光として用いる。測定光をコリメートレンズによって空間に射出し、PBS (polarization beam splitter)、 $\lambda/4$ 板、フォーカスレンズを通り、測定対象のミラーに照射する。反射光は再びフォーカスレンズ、 $\lambda/4$ 板、PBS を通り、測定側に導かれる。電気ビートダウンの検証には光コムレーザの繰り返し周波数 72.561 MHz の 13 倍の成分 943.293 MHz を用いた。電気ビートダウンの構成は図 2 で説

明したように、参照光と測定光をそれぞれ受光器で受光し、電気信号に変換する。それぞれの信号は、発振器からの 960MHz の信号とミキシングされ、差周波の 16.707 MHz にビートダウンした後に受光器(TTI 製 TIA-952)で検出され、位相比較器(Stanford Research 製 SR844)により位相検出する。測定対象はミラーとし、精密移動ステージ(シグマ光機製 SGSP33-200、位置決め精度 20 μ m)に搭載し、ステージ移動に対する測距性能を検証した。ステージは 5 mm 間隔で 160 mm 移動させた。これは物差し長さ 159.017 mm 同等の距離である。検出光量が微弱光の場合のクロストークの影響を確認するために、検出光量が比較的強い場合(-30 dBm)と、粗面からの反射を想定した微弱光(-60 dBm)の場合で、それぞれ評価を行った。照射光量は ND フィルタを用いて調整した。位相比較器の時定数は検出光量が強い条件では 100 μ s とし、微弱光の条件では 100 ms とした。図 7 に測定結果を示す。横軸はステージ移動指令値を示し、縦軸はステージ移動指令値に対する実験装置の測定誤差を示す。図 7(a)の測定光量が強い場合は、測定誤差は 0.18 mm(2σ)と小さいが、図 7(b)の計測光量が微弱な場合は、周期的な誤差が発生し、測定誤差は 5.38 mm(2σ)と大きい。これはクロストークの影響により、サイクリックエラーが発生したためである。図 8 を用いて、クロストークが発生した場合にサイクリックエラーが発生する原理を説明する。検出周波数の回転座標系で考える。固定ノイズ成分がない場合には、測定距離の変化に対し測定信号のベクトルは、原点を中心に回転する為、位相(ϕ)は線形に変化する。しかし、観測する周波数に固定ノイズ成分が存在する場合には測定距離の変化に対し真の信号ベクトルは、固定ノイズ成分だけシフトして回転することになり、観測する位相(ϕ')は非線形に変化するため、位相誤差 $\Delta\phi$ が生じる。位相誤差は次式で表される。

$$\Delta\phi = \tan^{-1}\left(\frac{R\sin\phi + r\sin\alpha}{R\cos\phi + r\cos\alpha}\right) - \phi \quad (2)$$

ここで R は真の信号の強度、r は固定ノイズの強度、 α は固定ノイズの位相である。

図 7(b)のサイクリックエラーが発生する場合の固定ノイズ量を把握するために数値計算を行った。数値計算は式(2)を用いて、測定誤差が図 7(b)同等となるように、真の信号強度に対して、固定ノイズ強度を調整した。図 9 に数値計算結果を示す。本結果は、真の信号強度に対して固定ノイズ強度を 1/6 にした場合に得られた数値計算結果である。図 7(b)と類似した波形が得られている。図 7(b)の検出光量は-60 dBm であることから、クロストークによるノイズ量はその 1/6 の-68 dBm 程度であると推定できる。

3.2 光ビートダウン方式の構成

次に光ビートダウン方式の構成で評価を行った。光コムレーザと光学系部分は図 6 で示した電気ビートダウン時と共通である。図 4 で説明したように、参照光と測定光をそれぞれ EOM(Thorlabs 製 LN27S-FC)に入射する。EOM は発振器からの信号により変調しており、光コムレーザの高周波成分を光ビートダウンし、受光器で受光する。受光した信号は位相比較器(Stanford Research 製 SR844)により位相検出する。今回の実験では、測距に用いる光コムレーザの高周波成分は繰返し周波数 72.561 MHz の 455 倍の成分 33.015 GHz とした。EOM に加える発振器の発振周波数を 33 GHz にす

ることで、差周波の 15 MHz に光ビートダウンされロックインアンプにて位相比較可能な周波数帯となる。

33.015 GHz の周波数に対応する物差しの長さは 4.54 mm である。この物差しを用いて $\pm 25 \mu\text{m}$ の測距精度が得られるかを検証した。測定対象をミラーとし、精密移動ステージ(シグマ光機製 SGSP33-35, 位置決め精度 $5 \mu\text{m}$)に搭載し、ステージ移動に対する測距性能を検証した。ステージは 0.1 mm 間隔で 5 mm 移動させた。これは物差し長さ 4.54 mm と同等の距離である。検出光量が微弱光の場合のクロストークの影響を確認するために、検出光量が比較的強い場合(-30 dBm)と、粗面からの反射を想定した微弱光(-60 dBm)の場合でそれぞれ評価を行った。照射光量は ND フィルタを用いて調整した。位相比較器の時定数は検出光量が強い条件では 100 μs とし、微弱光の条件では 100 ms とした。図 10 に測定結果を示す。横軸はステージ移動指令値を示し、縦軸はステージ移動指令値に対する実験装置の測定誤差を示す。図 10(a)の測定光量が強い場合は、測定誤差は $13.8 \mu\text{m}(2\sigma)$ と小さい。図 10(b)の計測光量が微弱な場合は、わずかにサイクリックエラーが発生しているが、測定精度は $24.4 \mu\text{m}(2\sigma)$ で目標精度 $\pm 25 \mu\text{m}$ を達成した。わずかにサイクリックエラーが発生する原因は、PBS, $\lambda/4$ 板, フォーカスレンズなどの光学系部分の反射による。光学系部分から反射があった場合は、図 8 で説明したように対象からの反射光成分以外に固定ノイズが発生するため、サイクリックエラーが発生する。そこで固定ノイズ量を推定するために、数値計算を行った。図 11 に計算結果を示す。検出信号に対して固定ノイズが 1/40 の場合の数値計算結果である。図 10(b)と類似した波形が得られることが判明した。よってクロストークによるノイズ量は -76 dBm と推定できる。電気ビートダウン方式との比較から、光ビートダウン方式に変えることにより、ノイズ量は 1/7 程度に減少したことを確認した。これによって、ターゲットからの反射光が微弱な -60 dBm の条件でも目標精度が確保できる。

Fig.7 Measurement result of electric beat down method for 1GHz modulation signal. (a) Detected power is -30dBm. (b) Detected power is -60dBm

Fig.8 Mechanism of causing a cyclic error

Fig.9 Simulation result of cyclic error whose parameter is adjusted to get the similar result of Fig.7 (b)

Fig.10 Measurement result of optical beat down method for 33GHz modulation signal. (a) Detected power is -30dBm. (b) Detected power is -60dBm

Fig.11 Simulation result of cyclic error whose parameter is adjusted to get the similar result of Fig.10 (b)

Fig.12 Cyclic error removed result subtracted Fig.11 data from Fig.10 (b) data

次に図 10(b)のデータについてサイクリックエラー以外の誤差要因について考察する。まずサイクリックエラーの影響を除去するため、図 10(b)に対して図 11 で求めた正弦波を差し引き、疑似的にサイクリックエラーがない状態の測定データを算出した。算出結果を図 12 に示す。本データの測定バラつきは $13.9\mu\text{m}(2\sigma)$ となった。一方、ステージを静止した状態でターゲットを測定したときの静止安定性を測定した結果、 $14.1\mu\text{m}(2\sigma)$ であった。これは図 12 の測定バラつきと同等であることから、図 12 の測定バラつきの主要因は静止安定性であると推測できる。

3.3 物差し接続

2.1 節で説明したように光コムレーザを用いた測距方式では、4 種類の合成波長による物差しを用い、長い物差しの測距結果を補間して、短い物差しの測距結果に繋ぎ合わせるにより、段階的に精度を上げることで、広い範囲の絶対距離を高精度に測定することができる。本方式にて目標測距範囲 10 m を連続的に測距できることを検証した。図 13 に検証方法を示す。測定対象とするミラーをある基準位置 ①から⑤まで移動させ、実験装置にて距離を計測する。一方ミラーの裏面を市販距離計 (Leica 製 DISTO05, 計測範囲 100 m, 計測精度 $\pm 1\text{ mm}$) にて同様に距離計測を行う。基準位置からの相対的な移動距離に関して、開発した測距装置と市販距離計による測距結果を比較し評価を行った。評価結果を図 14 に示す。相対移動距離 2.5 m から 15.8 m 間の範囲 13.3 m にて評価を行った。開発した測距装置の測距結果と市販距離計の測距結果との偏差は $\pm 0.5\text{ mm}$ 以下となり、市販距離計の測距精度以下となった。以上の結果より、範囲 13 m において物差しの繋ぎ合わせが正しく行われていることを確認した。10 m の距離にわたり、精度 $\pm 25\mu\text{m}$ で測定できることを直接評価することは難しいが、本節の物差し接続の結果と、3.2 節の最終段の 4.5 mm の物差しの精度検証結果から、提案手法が、10 m の距離を精度 $\pm 25\mu\text{m}$ で測定できる可能性を示した。

Fig.13 Experiment setup for evaluating long distance measurement accuracy using commercial distance meter

Fig.14 Long distance measurement result of experimental equipment and commercial distance meter

4. 結 言

中・大物製品の寸法計測や形状計測を目的に光コムを用いた距離計測の高精度化について研究し、以下の結論を得た。

- (1) 光コムレーザを光源として用い、光コムレーザの高周波変調成分の位相を、光変調器を用いて光ビートダウンして低周波にて位相計測することで、電気的なクロストークの影響を抑制する方式を提案した。
- (2) 提案方式にて、光コムの変調周波数 33 GHz (物差し長さ 4.5 mm 相当) のビート成分を用いた測距性能評価の結果、ターゲットからの散乱光を想定した検出光量 -60 dBm の条件にて、精度 $\pm 25\mu\text{m}$ 以下で測距可能であることを確認した。
- (3) 光コムの物差し接続による長距離高精度計測方法を評価するために、計測精度 $\pm 1\text{ mm}$ の市販距離計との比較評価を行った結果、距離 13 m にわたり偏差は $\pm 0.5\text{ mm}$ 以下となることを確認した。

本論文の提案手法によって、測定対象にリフレクタを接触させずに、高精度な 3 次元形状計測が可能となる。

参 考 文 献

- 1) 松本弘一: 大物構造物製作における計測技術の実際と課題, 溶接学会誌, **64**, 3, (1995) 21.
- 2) 針山達雄, 笠井啓晃, 吉田実, 吉村和士, 渡辺正浩: 光コムレーザを用いた形状計測技術の開発, 精密工学会学術講演会講演論文集, 2012A(0) (2012) 629.
- 3) 廣瀬丈師, 田中麻紀, 中野博之, 谷口伸一, 三輪俊晴: モノづくりの高度化を牽引する「検査・計測」技術基盤, 日立評論, **98**, 5 (2016) 372.
- 4) 阿部誠: 非直交光学式三次元測定機の動向と性能評価法の標準化, 精密工学会誌, **85**, 5, (2019) 388.
- 5) 井口征士: 3次元形状計測の最近の動向, 計測と制御, **34**, 6, (1995) 429.
- 6) G.Berkovic and E.Shafir: Optical methods for distance and displacement measurements, Advances in Optics and Photonics, **4**, 4, (2012) 441.
- 7) 金井理: 大規模環境の3次元計測と認識・モデル化技術の現状, 精密工学会誌, **79**, 5, (2013) 379.
- 8) 増田宏: 3次元計測に基づく大規模点群処理の課題と技術動向, 精密工学会誌, **79**, 5, (2013) 384.

- 9) K.Minoshima and H.matsumoto: High-accuracy measurement of 240-m distance in an optical tunnel by use of a compact femtosecond laser, Appl.optics, **39**, 30, (2000) 5512.
- 10) H.matsumoto, X.Wang, K.Takamasu and T. Aoto: Absolute measurement of baselines up to 403 m using heterodyne temporal coherence interferometer with optical frequency comb, Appl. Physics Express, **5** (2012) 046601.
- 11) 高増潔：光周波数コムを用いた絶対距離測定への展開，精密工学会誌，**84**, 8, (2018) 692.
- 12) T. Onoe, S.Takahashi, K.Takamasu and H.matsumoto: Non-contact precision profile measurement to rough-surface objects with optical frequency combs, Meas. Sci. Technol., **27**, (2016) 124002.
- 13) 斎藤道明，松本弘一，藤間一郎，大石忠尚：光導波路変調器を用いた高分解能距離計，光学，**22**, 3, (1993) 142.
- 14) I.Fujima, S.Iwashaki and K.Seta: High-resolution distance meter using optical intensity modulation at 28GHz, Meas. Sci. Technol., **9**, 7, (1998) 1049.