計測シリーズ

大型構造物製作における
計測技術の実際と課題*

松 本 弘 一**

The Current Aspects and Future
Trend in Large-Scale Dimension
Measurements*

by Hirokazu Matsumoto**

キーワード：大型構造物，光計測，距離測定，形状測定，
リモート計測

1. は じ め に

レーザ光を用いた計測法は、非接触で精密な距離測定が可能であることから、最近、多くの分野に应用されてきている。例えば、測地・測量の分野だけでなく、地震予知等のために、精密な測距技術が要求されている。特に最近、ビル、橋梁やパラボラアンテナ等の大型構造物を製作したり、評価するために、距離計測の高精度化・2次元化に対する要求が次第に増えきている。さらに、機械工業等分野においては寸法を高精度・高能率に測定することが必要となっている。ここでは、レーザ光を利用した距離の計測法^{1,2)}等の現状を概説し、それらの大型構造物の精密計測への応用例とその可能性について紹介する。

2. 距離の測定法

2.1 光波干渉法

(1) 合致法

今、矩形物体の端面に平面鏡を光学密着し、ケスター型干渉計によってもう一方の端面と平面鏡からの反射光の間の位相差（干渉縞の端数）を多波長について測定し、これらの測定値を基にして合致をとると干渉縞の整数部が決定されるので、長さが一義的に求められる³⁾。また、この光の物差しの目盛間隔

は正確には $(\text{波長})/2n(n$ ：大気屈折率)で表される。被測定寸法が長くなってくると、可視光による干渉では大気のゆらぎによって目盛間隔が大きく変動するので、測定環境が重要となる。このような場合、光源として波長の長い赤外線を用いると、被測定寸法が長くなっても大気のゆらぎ等の影響が減少される外に、被測定物体の表面粗さの影響も小さくなるので、コントラストの良い干渉縞が形成される⁴⁾。

(2) 合成波長法

2光束型の干渉計において、2波長レーザを同時に入射させ、その検出光の信号を自乗し平均化すると、つまりローパスフィルターに通すと、低い周波数成分のみが残り⁵⁾、波長の長い“合成波長”が得られる。CO₂レーザの2波長のセットを光源として用いることにより、300 μ mと5.6mmの合成波長が形成され、これらの波を用いて100m程度までの距離が 5×10^{-8} の精度で測定されている。このような長い距離を測定できるのは、合成波長を利用することによって外乱の影響が相対的に小さくなるからである。

(3) 白色干渉法

移動量を測定するために用いられる干渉縞計数型測長計によっても距離の決定が可能である。それは、古くから知られた白色干渉による位置決め技術と併用する方法である。2光束干渉計において、2つの光路の長さが等しい時に、コントラストが変化する干渉縞が形成されるので、干渉計の一方の反射鏡を移動台に配置すると、もう一方の反射鏡に対応する位

*原稿受付 平成7年1月9日

**非会員 計量研究所 Non-Member, National Research Laboratory of Metrology

置が検出される⁹⁾。この技術を用いて、200 m 程度の基線の測定が実現され、測量機等の校正に利用されている。このような長い距離においては、光源としてスペクトル幅の広い半導体レーザ等の利用が有効であり、数 μm の空間分解能が得られている。

(4) 空気の屈折率の補正法

大気中において、距離を精密に求めるためには、2 色法が有効である。これは、波長が大幅に異なる 2 色によって同時に測定を行い、これらの測定値の差から、途中の空気の屈折率を導き出す方法であり、実時間でかつ実際の光路中の屈折率を得ることができる特長がある。

2 つの非線形光学結晶 (KTP) を用いた干渉計がある⁷⁾。KTP で発生される第 2 高調波と基本波の 2 波長レーザを、被測定媒質を経た後、もう一度 KTP に入射させて元の第 2 高調波と基本波を干渉させることによって、2 波長における媒質の分散特性に依存する干渉縞のみを形成できるので、媒質である大気等の屈折率を精密に求めることができる。

2.2 光変調による測距法

(1) 光変調法

電界が加わった電気光学結晶に光が入射すると、電界に応じて光の位相変化の受け方が異なるので、電界を交流的に変化させ、出射光を偏光子に通すと、出射光は強度変調される。したがって、電気光学結晶の側面に電極を設け、これにマイクロ波を印加すると、光は高周波で変調される。最近光通信技術と関連して開発された光導波路型の変調器を用いると、高い周波数で変調が可能である。これは非常に狭い部分への光の閉じ込めの効果によって、比較的低い駆動電圧でもって作動されるからである。マッハツェンダー型の変調器では、光路の途中にある電極に電界が加わると、2 つの光路長において差が生じて、振幅変調された光が得られる。近赤外領域では数 10 GHz という高い周波数で変調することができる⁸⁾。

この外に、光の周波数が異なる 2 種類のレーザ光を混合すると、振幅が変調された光と等価なビート信号が観測され、高い周波数で変調された光が実現される。また、半導体レーザは、電源電流を直接変調することによって、高周波で光を振幅変調することが可能である。この方法は簡便であることから、距離測定に多く試みられている。この場合、レーザをパルス化することによって、パルス光の波高値を大きくすることができるので、非接触計測法に有効

図1 光変調距離計の概要

である⁹⁾。

(2) 距離の測定法

変調光を利用する距離の測定法は、出射光と反射光の信号の位相差を測定し、距離を求めるものである。図1に示すように変調されたレーザ光を遠方にある反射鏡に向かって出射する。次に、反射鏡からの反射光を光電素子で検出し、検出信号と参照信号との位相差(ϕ)を位相計によって測定する。この場合、低い変調周波数(f_2)から高い変調周波数(f_1)へと順次測定すると、変調器から反射鏡までの絶対距離が一義的に精密に分る。

距離測定の分解能を上げるために、光の変調周波数が数 GHz まで上げられる。この場合、反射鏡からの反射光を再び別の光変調器に入射させ、出射光用の変調周波数と幾分異なる周波数で動作させると、“ヘテロダイン化”によって測定周波数が数 10 kHz まで低下され、位相の精密測定が可能となり、距離測定の分解能が向上する。

(2) 2色変調法

この場合も、空気の屈折率の自動補正に2色法が利用される。2波長光を変調器によって同時に変調し、それらの変調光の伝搬後の位相差を測定すれば、途中の光路の大気の屈折率を求めることができる。

633 nm He-Ne レーザと 1.06 μm YAG レーザを、LiTaO₃結晶によって変調し、目的の大気中を伝搬させる。この2色の変調波の位相差を精密測定することによって、空気の屈折率を求めることができる。18 km の距離での測距実験によって、約 2×10^{-7} の精度が実現されている¹⁰⁾。

2.3 光パルス法

Q スイッチ法やモードロック法によって発生される光パルスは時間的幅が小さいだけでなく、光パルスの波高値が極端に大きくなるので、単時間で測定

図2 三角測量法による形状計測

するような場合、信号のSN比を向上させる上で有効である¹¹⁾。このような光パルスを利用する場合は、光パルスの空中の伝搬時間の測定から、距離が光速を用いて計算される。しかしながら、この伝搬時間を精密に測定することが容易でないため、空間分解能は高々サブmmとなっている。今後伝搬時間の高精度測定技術の発展が期待される。

2.4 三角測量法

三角測量法は、測定精度が高くないが、距離測定が容易であるので、多くの装置に取り入れられている。この場合、ターゲットを2点から観測するが、これらの角度が大きいくほど測定の感度は高くなるので、長い距離を測定する場合はかなり離れた2点からターゲットを観測することが必要である。また、2点の間隔はあらかじめ目的の精度で測定されることが必要である。図2に示す三角測量法において、計算機の進歩とともに画像の相関技術が進歩し、空間分解能も向上してきている¹²⁾。

3. 三次元構造物の計測

3.1 船・飛行機の測定

光波距離計の大きな応用には、船・飛行機等の構造物の組立や完成品の製作精度を評価するための形状・寸法・位置の測定が上げられる。この距離計には測角の機能も付加されることから、一点から物体を見込むだけでも形状の測定が可能であるが、大きな凹凸の三次元形状に対しては、2または3点からの測定が付加される。

造船技術は、現在ブロック建造が主流であり、多

図3 光変調距離計による形状計測

くのブロックの溶接等による結合によって行われている¹³⁾。特に、船台ドックの使用率を向上させるために、ブロックのサイズを大きくする方向にあり、ドックの形状測定だけでなく、ブロックを目的の位置に配置するための空間位置の精密計測が重要になっている。また、これらのブロックを構成するシャフト等の各種部材の寸法管理も見逃すことができない。

大型飛行機の場合、図3に示すように大型三次元ロボットにタッチセンサ等を取り付けてその形状を倣い、そのタッチセンサーの空間的位置を、測距・測角装置¹⁴⁾によって効率よくサブmmの精度で測定している。今後は構造物の表面自体を反射鏡とする高感度な距離計の開発や三次元の瞬時計測技術の開発が望まれる。

3.2 橋梁の測定

橋梁の場合には、その構造の寸法を測定することはもとより、建築中の沈下計測や列車の通過に伴う橋梁の変位の計測が重要である。これらの測定には、レーザビームを同一平面上で回転させ、そのビームの位置をフォトダイオードのリニアアレーによって測定することが行われている。このアレーの数の加増によって分解能が向上する。また、光ファイバーを用いてこれらのマトリックスをとることによって分解能が向上され、8個のフォトダイオードで0.1mmの分解能が実現されている。図4に示すように、このリニアアレーセンサを橋梁に取り付けることによって、150mまで離れた地点からその変形が数100mmのダイナミックレンジで精密に測定される。また、これらの装置によって列車の移動に伴う橋梁の変位が測定され、その値が数10mm以上になることが示されている¹⁵⁾。

また、このような回転するレーザビームを利用し

図4 リニアレーセンサを利用した歪計

て、建設現場における平面度の測定が試みられているが、大気によるレーザービームのゆらぎが問題となる。

3.3 構造物の測定

天文学の進歩とともに、遠くてより暗い星の観測が求められ、これとともに電波用パラボラアンテナに対する形状精度が高くなってきている。一般に、アンテナの形状精度は観測電波の波長の15分の1が目安であり、ミリ波になると数 $10\mu\text{m}$ の精度となる。従来この測定は電波ホログラフィが利用され、その精度が $65\mu\text{m}$ に達してきているが、このための電波は目的とする任意の観測方位からは得られないので、形状測定に光波距離計を利用することが計画されている¹⁶⁾。これは、光波距離計の分解能が $10\mu\text{m}$ の精度に達してきているからである。その概要を図5に示す。距離計のビームは光ファイバーで多くのビームに分岐され、広角キャッツアイに向かう。また、光波距離計を利用することによって、剛性の高い大型のアンテナでなくて、柔らかいアンテナにして、それらの構造を計測により制御する方が、コスト的にも格段に安くなる利点がある。

3.4 部材の測定

部材の測定には、前述のCCDカメラやイメージセンサ等の利用による三角測量法が有効である外に、ロボットの先端に光変調方式の距離計を取り付けることによって、サブmmの精度の形状測定が実現されている。また、大型部品の高精度な形状測定には、部品の形状をロボットで倣い、その位置を複数個の干渉縞計数型測長計による測定が試みられてきている。

図5 光変調距離計によるアンテナ計測

図6 2色直線計

3.5 加速器の測定

高エネルギー物理学においては、 1TeV 近くのエネルギーの電子 e^- と陽電子 e^+ との衝突実験が計画されており、電子・陽電子を加速し、衝突させるための 1km 前後の大型加速器の製作が不可欠となっている。従来、ピアノ線や液面が基準に用いられていたが、レーザー光の利用が期待される。この場合、大きな問題点は、レーザー光源自体の射出方向が変化することと、大気によりレーザービームの方向が変化することである。前者については、組み合わせの光学系と位置を検出できるセンサーを利用して、 $0.633\mu\text{m}$ He-Ne レーザを光源として用いて数百分の一まで小さくされている¹⁷⁾。

また、後者については、図6に示すように、2色法の適用が行なわれている。レーザービームの位置ゆらぎは一般に利用波長に依存すると考えられるので、異なる2波長が空中を伝搬すると、それらのゆらぎが異なり、それらの差から、ゆらぎが無い時のビームの位置を補正することが可能である。1. $06\mu\text{m}$ YAG レーザと $0.633\mu\text{m}$ He-Ne レーザを光源として用い、これらのビームの大気中伝搬後の位置を測定することによって、大気によるビームの位置ゆらぎを8分の1まで小さくしている¹⁸⁾。

3.6 運動体の測定

光の高速性を利用することによって、自動車における数10mの距離での衝突防止のための距離センサの実現が可能になるとともに、クレーンのトラッキングによるその空間位置の決定が可能となる。このためには、今後レーザ光のパルス化により短時間測定での信号のSN比の向上が重要である。

4. 今後の課題とまとめ

光計測は、大型構造物の測定に有効であり、各種の計測方法が開発されてきている。今後はこれらの技術を現場等において直接応用することはもちろんであるが、これらの計測技術を一部改良して目的とする作業を制御することが期待される。特に、三次元空間位置の精密計測が求められる。さらに、光波面の補償技術を利用することによって、光における大きな問題点である光の回折・収差によるレーザビームの焦点スポット径の増大や大気によるレーザビームゆらぎを減少させることが可能となり、将来的には大気中においても遠方からでもレーザビームを一点に集光させることが実現され、測距・測角の精度向上はもとより、もっと発展して図7に示すように大気中や水中においてもリモートレーザ加工が可能となることが期待される。

図7 将来の生産システム概念

参考文献

- 1) 松本弘一：マクロ計測の実際，O plus E, 169 (1993) 61-65.

- 2) 松本弘一：最近のレーザ測量機の動向，光アライアンス，2-2 (1991) 30-33.
- 3) H. Matsumoto: Infrared He-Xe laser interferometry for measuring length, Appl. Opt., 20-2 (1981) 231-234.
- 4) K. M. Baird: The Role of Interferometry in Long Distance Measurement, Metrologia, 4-3 (1968) 135-144.
- 5) H. Matsumoto: Synthetic interferometric distance-measuring system using a CO₂ laser, Appl. Opt., 25-4 (1986) 493-498.
- 6) K. Seta, S. Iwasaki, B. K. Ward, T.O'ishi: Establishment of a High Accuracy Baseline for EDM Calibration in the Tunnel, J. Geod. Soc. of Japan, 38-2 (1992) 151-162.
- 7) H. Matsumoto: High-accuracy measurement of air refractive index using two frequency-doubling crystals, Opt. Commun., 104-4, 5, 6 (1994) 241-244.
- 8) 斉藤道明, 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) 142-145.
- 9) K. Seta, T.O'ishi: Distance Measurement Using a Pulse Train Emitted from a Laser Diode, Jpn. J. Appl. Phys., 26-10 (1987) L1690-1692.
- 10) 藤間一郎, 松本弘一, 瀬田勝男, 大石忠尚：長距離測定における大気屈折率の2色補正，光学，21-12 (1992) 871-877.
- 11) H. Park, M. Chodorow, R. Kompfner: High resolution optical ranging system, 20-14 (1981) 2389-2394.
- 12) カールツァス(株)カタログ.
- 13) 日本オプトメカトロニクス協会編：生産技術におけるオプトメカトロニクス計測技術に関する調査研究報告書(平成5年度)，p. 39-43.
- 14) 瀬戸孝夫：測量機における3次元計測，O plus E, 169 (1993) 103-107.
- 15) 須崎俊一：レーザープレーナーによる大型構造物の歪み測定，O plus E, 169 (1993) 98-102.
- 16) 服部邦彦：大型パラボラアンテナの形状測定，O plus E, 169 (1993) 74-79.
- 17) 宮下晃一, 松本弘一, 安田耕三, 早川明良, 石原信弘：レーザ光を利用した面内変位測定の研究，日本機械学会論文集(C編)，58-546 (1992) 450-453.
- 18) 曾理江, 松本弘一：直線計のための2色法による大気ゆらぎの補正，精密工学会誌，60-1 (1994) 111-113.