



## 高精度測距技術

松本 弘一

計量研究所量子部 〒305 つくば市梅園 1-1-4

(1993年11月5日受理)

### High-Accuracy Optical Distance Measurements

Hirokazu MATSUMOTO

Quantum Metrology Department, National Research Laboratory of Metrology,  
1-1-4, Umezono, Tsukuba 305

#### 1. はじめに

レーザー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、多くの分野に応用されてきている。長い距離では、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。また、中距離では、多関節大型ロボットやパラボラアンテナ等の高精度化・複雑化に対する要求が次第に増えてきているし、短い距離では、半導体工業や機械工業等の分野において寸法や距離を高精度・高効率に測定することが必要となっている。このような距離測定を $10^{-7}$ に達する精度で実現するためには、空気の屈折率の補正が必要となってくる。ここでは、レーザー干渉計<sup>1)</sup>とレーザー変調距離計<sup>2)</sup>を概説し、次に空気の屈折率を実時間で精密補正するための2色法について紹介する。

#### 2. 距離の干渉測長法

##### 2.1 干渉縞計数型測長計

###### 2.1.1 原理

今、 $f_1$ と $f_2$ の周波数(波長が $\lambda_1$ と $\lambda_2$ )の光による干渉を考えると、マイケルソン型の干渉計の反射鏡から戻る光波 $E_n$ は、

$$E_n = A_n \exp \{-2\pi i(f_n t + L_n/\lambda_n)\} \quad (n=1, 2) \quad (1)$$

と表されるので、これらの光による干渉強度 $I$ は、

$$\begin{aligned} I = |E_1 + E_2|^2 = & A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \\ & \times \cos 2\pi \{(f_1 - f_2)t + (L_1 - L_2)/\lambda_2 \\ & + L_1(1/\lambda_1 - 1/\lambda_2)\} \end{aligned} \quad (2)$$

で与えられる。ここで、 $L$ は干渉計の腕の光路長、 $A$ は

光の振幅である。

###### 2.1.2 計数測長計

$f_1 = f_2$ の場合、(2)式から $I \propto 2A_1A_2 \cos \{2\pi(L_1 - L_2)/\lambda\}$ が得られる。したがって、干渉計の一方の反射鏡を直線運動する移動台上に配置しておく、移動台の走行にともなって $\lambda/2$ を周期とする正弦波信号が得られる。これを光電検出しカウンターで計数すると、移動台の移動量つまり長さが求められる。この際、干渉縞測定の感度を上げたり、干渉縞の移動方向を知るために、 $90^\circ$ だけ位相の異なる2種類の干渉縞信号が利用される。図1は、英国の国立物理研究所において開発された干渉計の例である<sup>3)</sup>。レーザー光の偏光原理をうまく利用することによって、位相が $90^\circ$ だけ異なる3種類の干渉縞信号を形成させ、これらの差から位相差 $90^\circ$ の信号を作っている。この結果、信号の平均強度レベルが常に一定になることから、外乱等によるレーザー光の強度変動に対して強い干渉計となっている。電子技術の進歩により測定可能速度が十分速くなるとともに、分解能も電気信号の分割によって1nmと高くなっている<sup>4)</sup>。

###### 2.1.3 ヘテロダイン測長計

$f_1 \neq f_2$ の場合はヘテロダイン干渉と呼ばれ、常に周波数 $(f_1 - f_2)$ の光ビート信号が観測される。このとき、 $L_2$ を変化させるとそのビート信号の位相が変化する。したがって、このビート信号と参照信号との位相差を測定すれば、 $L_2$ の変位量すなわち長さが求められる。この種の干渉計の典型的な例が、ヒューレット・パッカード社(HP)のレーザー干渉計である<sup>5)</sup>。光源は、ゼーマン効果によって得られるHe-Neレーザーからの2周波

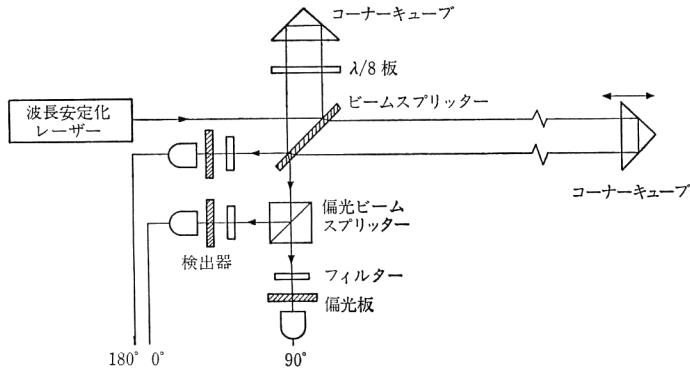


図 1 偏光型干渉測長計の例<sup>3)</sup>

光（差周波数；約 1.8 MHz）である。それらの光は偏光状態がお互いに直交しているため、偏光ビームスプリッターによって分離され、別々のコーナーキューブに向かう。それらからの反射光が干渉し、ビート信号が得られる。このとき、一方のコーナーキューブが速度  $v$  で動くとき、 $f_1$  のビームはドップラー変移を  $2vf_1/c$  ( $c$ ；光速) だけ受ける。時間  $t$  で光路長  $L$  を動くとするとき、計数される縞数は  $2vtf_1/c=L/\lambda_1$  と表される。この測定法は、光電検出される信号のうちのビート信号に関する交流成分のみを利用するので、外乱の影響が比較的小さくなる。しかしながら、ドップラー効果により光の周波数がシフトするので、最高測定速度は 300 mm/s である。

2.2 多波長法

2.2.1 合致法

今、矩形物体（長さの概略値  $L_0$  が知られている）の端面に平面プレートを光学密着し、ケスター型干渉計によってもう一方の端面と平面プレートからの反射光の間の位相差（干渉縞の端数） $\phi_i (i=1, 2, 3)$  を多波長  $\lambda_i (i=1, 2, 3)$  について測定し、これらの  $\phi_i$  を  $2L_0=(m_i+\phi_i/2\pi)$  ( $i=1, 2, 3$ ) に挿入して合致をとると、正数  $m_i$  が一義的に決定されるので、物体の長さが求められる<sup>6)</sup>。このためには、コヒーレントな多波長レーザー光が要求される。また、この光の物差しは目盛間隔は正確には  $\lambda/2n$  ( $n$ ；空気の屈折率) によって表されるので、被測定寸法が長くなってくると、可視光による干渉では、大気のゆらぎ等によって目盛間隔が大きく変動するので、測定環境が重要である。

この場合、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。また、赤外レーザーは単一縦モードレーザーの実現が容易であるので、光路差の大きな干渉計に応用し

ても、コントラストの良い干渉縞が形成される<sup>7)</sup>。

2.2.2 合成波長法

2 光束型の干渉計において、 $\lambda_1$  と  $\lambda_2$  の 2 波長レーザーを同時に入射させ、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、次式が得られる。

$$I_S \propto (5 + \cos 2\pi L/\lambda_S)$$

$$\lambda_S = \lambda_1 \lambda_2 / (\lambda_1 - \lambda_2) \tag{3}$$

ここで、 $L$  は光路長である。したがって、 $\lambda_1$  と  $\lambda_2$  の差が小さいと、波長の短い光源を用いても干渉縞のコントラストは幾分悪くなるけれども、波長の長い“合成波長”と呼ばれる  $\lambda_S$  を光源とする干渉と等価な信号が得られることがわかる。

CO<sub>2</sub> レーザーの 2 波長のセットを光源として用いることにより、300  $\mu\text{m}$  と 5.6 mm の合成波長が形成され、これらの波を用いて 100 m 程度までの長さが  $5 \times 10^{-8}$  の精度で測定する方法が開発されている<sup>8)</sup>。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。

2.3 光変調による測距法

2.3.1 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、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。この際、変調器の電気抵抗を電源とマッチングさせることが必要であり、結晶の特性に応じて形状が決定される。

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

て、比較的低い駆動電圧でもって光の振幅が変調されるからである。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、二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 10 GHz という高い周波数で変調することができる<sup>9)</sup>。しかしながら、可視光に対しては、光損傷のために、今後の研究が必要である。

この外に、光の周波数が異なる2種類のレーザー光を混合すると、強度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、半導体レーザーは、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。また、レーザー発振しきい値付近では、パルス化することができ、光パルスの波高値を大きくすることができるので、非接触計測法に利用されている<sup>10)</sup>。

### 2.3.2 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。電気光学結晶を利用した変調法による場合、図2に示すように変調されたレーザー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( $\phi$ )を位相計によって測定する。この場合、低い変調周波数( $\omega_1$ )から高い変調周波数( $\omega_2$ )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わかる。

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十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。

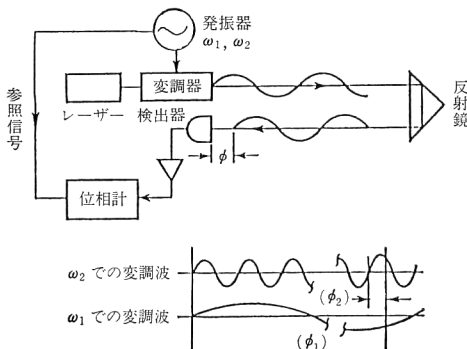


図2 測距法の原理

## 3. 空気の屈折率の補正法

### 3.1 従来の方法

大気中において光によって高精度な長さ測定を行うには、空気の屈折率の補正が必要となる。これには、真空中と大気中における光の飛行時間の違いを測定する方法が利用されるほかに、一番多く利用されるのが気象条件を利用する方法である。空気の成分ガスの濃度比は地球上ではあまり変わらないので、気温、気圧および湿度を精密に測定すれば、空気の屈折率を計算することができる。この場合、 $1 \times 10^{-7}$ の精度を得るためには、気温、気圧および湿度をそれぞれ  $0.1^\circ\text{C}$ 、40 Pa、20%の精度で測定することが必要である。

### 3.2 2色干渉計による方法

#### 3.2.1 2色法の原理

空気の屈折率は分散特性を有するので、異なる波長のレーザー光によって同時に干渉測定を行えば、これらの測定値の差から空気の分散式を利用して屈折率を実時間で導き出すことができ、これによって幾何学的長さを精密に得ることが可能である<sup>11-13)</sup>。今、波長  $\lambda_1$  と  $\lambda_2$  による干渉を考えると、幾何学的長さ  $D$  は、

$$D = D_1 - A(D_1 - D_2) \quad (4)$$

で与えられる。ここで、 $D_1, D_2$  はそれぞれ  $\lambda_1, \lambda_2$  による光学的測定値であり、 $A$  は  $\pm 5^\circ\text{C}$  程度の温度変化に対しては定数であり、 $\{(n_{10}-1)/(n_{10}-n_{20})\}$  によって与えられる。 $n_{10}$  と  $n_{20}$  のサフィックス0はエドレンの式<sup>14)</sup>より計算される、実験の気象条件に近いある特定の空気の屈折率を示す。また、任意の空気の屈折率  $n_1$  は、

$$n_1 = A(D_1 - D_2)/D_1 \quad (5)$$

で与えられる。この場合、測長誤差  $\delta D$  は、

$$\begin{aligned} \delta D &= A(\delta D_1 - \delta D_2) \\ &= A \{ (\lambda_1 \delta m_1 / 2 - \lambda_2 \delta m_2 / 2) \\ &\quad + (\delta \lambda_1 D_1 / \lambda_1 - \delta \lambda_2 D_2 / \lambda_2) \} \quad (6) \end{aligned}$$

で近似されるので、波長変換素子による基本波と第2高調波を用いると、(6)式の第2項はゼロとなる。ここで、 $\delta m$  は干渉縞の位相の測定精度である。

#### 3.2.2 分解能の向上

測長の分解能を上げるためには、上述の議論より、2色法における係数“ $A$ ”が小さいことが重要であると同時に、干渉縞の測定の分解能を上げることが必要である。したがって、光源の波長としては、空気の分散が大きい紫外レーザーが有効であるが、単一モード発振で光周波数の安定な光源は今のところない。これに対して、YAGレーザーは単一周波数で安定な発振が可能である

ので、2色法の光源として有効であるが、この基本波とその第2高調波を利用する場合、 $A$ 係数の値は65.6と大きくなるので、干渉縞測定の分解能の向上が重要である。

一般に、大気ゆらぎは、コヒーレント(均一)な空気の塊の移動によるので、微小空間領域においては屈折率が一定であると見なすことができ、平均化の操作による分解能の向上が可能である<sup>15)</sup>。2色による干渉縞を別々に同時に計数しパーソナルコンピュータに入力されるが、これらの計数値を二つの経路に分離する。一方の経路のデータは、従来どおり測長に用いられるが、もう一方の経路のデータは、常に  $N(=100\sim 10000)$  個ずつ積分して出力される。この場合、元のデータはランダムと考えることができるので、量子化誤差を小さくすることができ、干渉縞の分解能が  $\sqrt{N}$  分の1だけ向上される。この結果、空気の屈折率の算出において、 $A$ 係数の分だけ分解能が向上し、誤差は干渉縞の量子化のレベルになるので、ナノメートルのオーダーの測長が可能となる。

3.2.3 開発された2色干渉計

2色干渉測長計は図3に示すように、2色が同一光路となっており、 $\lambda/8$ 板を利用したマイケルソン型偏光干渉計で構成されている。光源として、市販の  $1.06\ \mu\text{m}$  YAG レーザー(米国 LIGHTWAVE 社、レーザーパワー; 40 mW 以上)を用いて、10 mm 長の KTP (KTiOPO<sub>4</sub>) 結晶を用いて約  $4\ \mu\text{W}$  の第2高調波が発生される。これらのレーザー光は色消しレンズで約 6 mm の径のビームにコリメートされ、 $\lambda/2$ 板を経た後ビームスプリッターに向かう。そのビームスプリッターを透過

したレーザー光はプローブ光として、移動コーナキューブに向かい、ここで反射されたレーザー光は分解能を上げるためにビームスプリッター側にある平面鏡に行く。ビームスプリッターで反射されたビームは  $\lambda/8$ 板を経た後、参照コーナキューブに向かう。これらの反射光はビームスプリッターで干渉し、ダイクロイック鏡で分離される。基本波と第2高調波の両波長において、偏光ビームスプリッターによって  $90^\circ$  位相差信号が形成される。これらの光電検出信号をコンパレータに入れると、1パルスが  $\lambda/16=33\ \text{nm}$  となる。

1000 個のパルスを平均すると、干渉計の分解能は 1 nm となるので、 $A$ 係数を考慮して、測長の分解能は 66 nm となる。カバーがかけられた干渉計の回りの空気は一般に安定しており、数百  $\mu\text{m}$  以下の空間領域では空気の屈折率は変化しないと考えられる。移動距離約 0.5 m の測定結果から、2色法による決定値は気象センサーによる値<sup>14)</sup>との差が  $2\times 10^{-7}$  より小さいことがわかった。

3.3 非線形光学干渉による方法

3.3.1 原理

2色法において測長の分解能を上げるには、干渉縞測定の分解能を上げることが必要である。これには、非線形光学結晶の特長を利用した干渉計測の利用が考えられる。非線形光学結晶で発生される第2高調波と基本波の2波長レーザーを、被測定媒質を経た後、もう一度非線形光学結晶に入射させ、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させると、媒質である空気等の屈折率を精密に求めることができる<sup>16)</sup>。

今、波長  $\lambda_1$  と  $\lambda_2$  における空気の屈折率を、それぞれ  $n_1, n_2$  とすると、あらかじめ  $\lambda_2$  に変換されて伝搬する波と  $\lambda_1$  のままで伝搬した後  $\lambda_2$  に変換される波との干渉における光学的距離の差  $\Delta D$  は、

$$\begin{aligned} \Delta D &= D_2 - D_1 \\ &= (n_2 - n_1)D \\ &= (n_2 - 1)D/A \end{aligned} \tag{7}$$

によって与えられる。ここで、 $D$  は光学的距離であり、概略値でよい。したがって、 $\Delta D$  つまり干渉縞の位相を精密に測定し、その値を  $D$  で割り、 $A$  を掛けると、空気の屈折率が求められる。(7)式からわかるように、 $\Delta D$  の測定だけでよいので、高い分解能で位相が測定される。つまり、前節では基本波と第2高調波を別々に測定した後、それらの差を求めていたので、測定の分解能を向上させることが困難であったのに対し、本方法は従

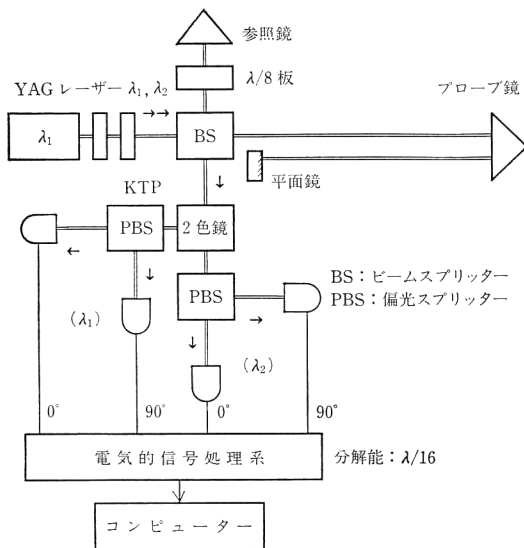
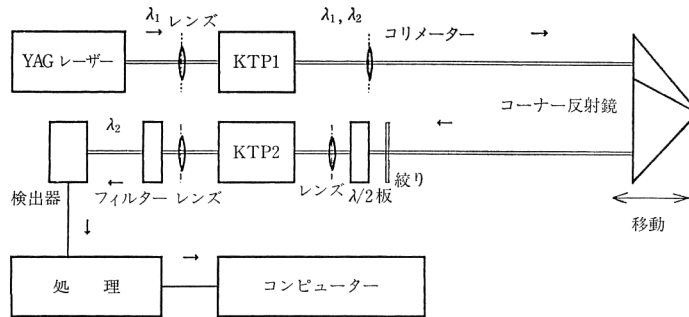


図3 2色干渉測長計<sup>15)</sup>

図4 非線形光学2色干渉計<sup>16)</sup>

来のビームスプリッターの代りに非線形結晶を用いて基本波と第2高調波を干渉させるので、これらの波長の違いによる分だけの干渉縞が形成される。このため、干渉縞の数は従来の場合より格段に少なくなるので、形成される干渉縞をコンピュータなどに記録し、その位相を  $0.5^\circ$  以上の分解能（長さにして、 $0.7\text{ nm}$ ）で測定される。

### 3.3.2 非線形光学干渉計

図4は二つの非線形光学結晶(KTP)を用いた干渉計である。レーザー光は、レンズを経てKTP1に入射し高2高調波が発生された後、レンズによってコリメートされる。この第2高調波と基本波が干渉測長等のために空气中を伝搬し、移動台上に配置された反射鏡からの反射光の偏光状態を波長板等によって調整した後、レンズを経てからKTP2に入射する。第2高調波はそのまま進行するが、基本波の一部は第2高調波に変換されるので、この波と元の第2高調波とが干渉する。この干渉縞は媒質としての空気分散における基本波と第2高調波との違いの分だけ形成されるので、第2高調波だけの単一の波長による通常の干渉縞の数の約10の6乗分の4となり、計測すべき干渉縞の数が極端に少なくなる。これらの干渉縞信号はパーソナルコンピュータに入力され、空気の屈折率が0.6 mの移動距離で  $1 \times 10^{-7}$  以上の精度で計算される。

## 3.4 2色変調法による方法

### 3.4.1 原理

今、 $\lambda_1, \lambda_2$ の2色の変調光による測距を考えると、幾何学的距離  $D$  は、(4)式から算出される。ここで、 $D_1$  と  $D_2$  は、それぞれ  $\lambda_1$  と  $\lambda_2$  の波長によって測定された光学的距離である。このように、2色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。この場合、空気の屈折率は位相屈折率でなく、群屈折率であるので、分散特性が大きくなり、 $A$  係数の

低下に有利である。

### 3.4.2 2色変調型距離計

633 nm He-Ne レーザーと  $1.06\ \mu\text{m}$  YAG レーザーを、 $\text{LiTaO}_3$  結晶による変調器（マッチ棒状の結晶の側面から電界をかける進行波型変調器）によって同時に1 GHzの周波数で変調し、目的の大気中を伝搬させる。これらのレーザー光を別の変調器を用いて(1 GHz + 50 kHz)の周波数で復調する。2色の変調波の位相差が、大気の屈折率に応じて異なるので、ダイクロイック鏡で2色を分離して別々に光電検出した後、位相差を精密測定することによって(7)式から空気の屈折率を求めることができる。この場合、検出信号のSN比が良いと、2色の信号の一方を参照信号として位相敏感検出器で位相を求めることができるが、信号のSN比が悪い時には、発振器から50 kHzの参照信号を作り、別々に位相を求め、それらの差を得る方法が利用される。18 kmの距離での測距実験によって、約  $2 \times 10^{-7}$  の精度で空気の屈折率を算出することが実現されている<sup>17)</sup>。

## 4. レーザービーム位置ゆらぎの補正の可能性

### 4.1 原理

レーザー光を利用して直線計や三角測量を実現する場合、レーザービームの位置ゆらぎが大きな誤差となる。レーザービームの位置ゆらぎは使用波長の12分の7乗に逆比例する<sup>15)</sup>ことが知られているので、2色を同時に大気中を伝搬させると、それらの位置ゆらぎの差から、ゆらぎのない状態を推定することができる。

### 4.2 2色計

2色計の概要を図5に示す<sup>19)</sup>。レーザー光源の本体や周囲の温度変化等によるビーム方向の変動を抑えるため、2台のレーザー光がビームスプリッターで混合した後、単一モード光ファイバに入射せられる。次に、光

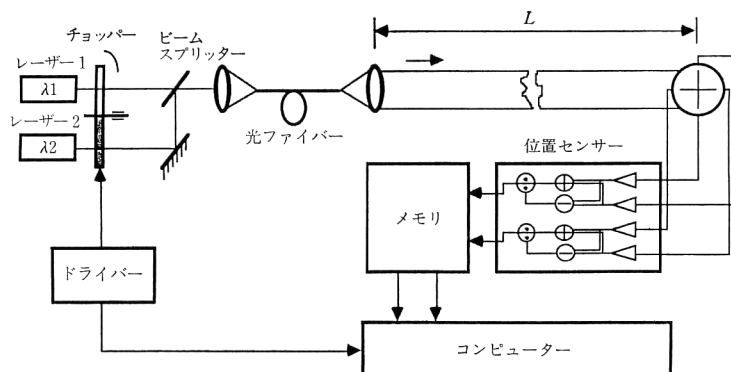


図 5 2色直線計<sup>19)</sup>

ファイバからの出射光をレンズで約 3 cm の径のビームにコリメートされる。大気中伝搬後のビーム (径: 約 5 mm) を, 4 分割位置センサー (面積: 78 mm<sup>2</sup>) で検出する。これらの出力は, 図に示すようにアナログ演算処理が行われる。また, 2 色の差の測定精度を向上させるために, あらかじめ 2 色のビームはチョッパーによって交互に約 200 Hz の周波数で変調され, サンプリグして 2 色のゆらぎ情報が分離して収集される。2 色によって測定された位置のゆらぎ  $P_1$  と  $P_2$  より, ゆらぎのない時の理想位置が  $\{P_1 - k(P_1 - P_2)\}$  ( $k$ ; 定数) によって回帰分析される。この結果より, ゆらぎの振幅が約 8 分の 1 に減少されている。

### 5. おわりに

以上, 光波による距離測定法の現状について紹介し, 高精度化において大きな課題となる空気屈折率の補正法について紹介した。2 色法を利用することによって, 干渉測長法や光変調測距法において  $1 \times 10^{-7}$  以上の精度で幾何学的距離を測定できることがわかる。また, 2 色法はレーザービーム位置のゆらぎの補償にも期待される。さらに, 非線形光学現象の利用は, 固体レーザーの短波長化や位相共役による波面補償を可能にし, 距離測定のような光計測技術の高度化に有効であると考えられる。

### 文 献

- 1) 松本弘一: “最近のレーザー干渉測長機”, 計量管理, **38** (1989) 758-763.
- 2) 松本弘一: “最近のレーザー測量機の動向”, 光アライアンス, **2**, 2 (1991) 30-33.
- 3) M.J. Downs and K.W. Raine: “An unmodulated bi-directional fringe-counting interferometer for measuring displacement,” *Precis. Eng.*, **1** (1979) 85-88.
- 4) レニション社カタログ.

- 5) L.J. Wuerz and R.C. Quenelle: “Laser interferometer system for metrology and machine tool applications,” *Precis. Eng.*, **5** (1983) 111-114.
- 6) H. Matsumoto: “Infrared He-Xe laser interferometry for measuring length,” *Appl. Opt.*, **20** (1981) 231-234.
- 7) K.M. Baird: “The role of Interferometry in long distance measurement,” *Metrologia*, **4** (1968) 135-144.
- 8) H. Matsumoto: “Synthetic interferometric distance-measuring system using a CO<sub>2</sub> laser,” *Appl. Opt.*, **25** (1986) 493-498.
- 9) 齊藤道明, 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** (1993) 142-145.
- 10) K. Seta and T. Oishi: “Distance measurement using a pulse train emitted from a laser diode,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, **26** (1990) L1690-L1692.
- 11) P.L. Bender: “Laser measurements of long distances,” *Proc. IEEE*, **55** (1967) 1039-1045.
- 12) A. Ishida: “Two-wavelength displacement-measuring interferometer using second-harmonic light to eliminate air-turbulence induced errors,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, **28** (1989) L473-L475.
- 13) H. Matsumoto, Y. Zhu, S. Iwasaki and T. Oishi: “Measurement of the changes in air refractive index and distance by means of a two-color interferometer,” *Appl. Opt.*, **31** (1992) 4522-4526.
- 14) B. Edlén: “The refractive index of air,” *Metrologia*, **2** (1966) 71-80.
- 15) H. Matsumoto and T. Honda: “High-accuracy length-measuring interferometer using the two-colour method of compensating for the refractive index of air,” *Meas. Sci. Technol.*, **3** (1992) 1084-1086.
- 16) H. Matsumoto and L. Zeng: “High-accuracy measurement of air refractive index using two frequency-doubling crystals,” *Opt. Commun.*, **104** (1994) 241-244.
- 17) 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** (1992) 871-877.
- 18) J.H. Churnside, R.J. Latatis and J.J. Wilson: “Two-color correlation of atmospheric scintillation,” *Appl. Opt.*, **31** (1992) 4285-4290.
- 19) 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** (1994) 111-113.