干渉計の安定化と位相制御による高精度干渉計測

中　島　俊　典*

光の干渉による計測法は，物体表面の形状や変位などを，非接触で，光の波長を単位とする高い精度で求められることから，幅広い分野で利用されている．しかし，最近では加工，研磨技術の高度化にともない，超精密研磨面の検査，高性能の機械部品や光学部品の精密位置決め，透過物体の均質性の評価などに，さらに格段に高い精度が要求されるようになっている．

干渉縞の強度は，干渉する光の光路差について光の波長を周期として正弦波状に変化する．そのため通常行われているように干渉縞を計数するだけでなく，強度のわずかな違いを検出すれば，光の波長以下の光路差の変化でも測定できる．しかし，実際には干渉する光の強度が空間的に一様でなかったり，時間的に変動したりするので，強度変化の測定から，光路差について光の波長の1/10を越える高い精度を得るのは容易ではない．

そこで，干渉縞の画像から物体の表面形状などを求めるとき，1枚の干渉縞の画像ではなく，光の位相を変化させて得られる複数の干渉縞画像から光の波長以下の光路差変化を検出する，位相シフト干渉法などの高精度干渉法が利用されるようになった[1-3]．

ところで，このような方法で実際に高精度を得るためには，干渉計を除震した重い定盤の上に設置して測定精度に見合う十分な機械的安定性を確保しなければならない．そのため，高精度干渉法の適用範囲は大幅に制限されてしまう．このような状況を打破するために，外乱の影響を補償して安定化する干渉計を製作し，位相シフト干渉法を適用して，基本的な性能を確認した．

この報告では，干渉計測の原理と位相制御をする位相シフト干渉法について述べた後，製作した安定化と位相制御をした干渉計による高精度の形状計測の結果について報告する．

1. 干渉計測の原理

干渉計測を行なうには，干渉計を用いて，光源からの光を二つに分け，測定対象で反射や透過をした光にもう一方の光を重合わせる．干渉計には物体の表面形状や透過物体の屈折率分布などの測定目的に応じてさまざまな形式がある．図1に代表的なトワイマン・グリーン干渉計の基本的な構成を示す．光源のレーザーからの光をレンズ系で平行光にした後，半透明鏡で二つに分ける．透過光は測定対象である試験反射鏡で，反射光は基準となる参照光用反射鏡で反射させる．二つの反射鏡からの反射光を半透明鏡で重ね合わせて干渉させ，試験反射鏡の像面で干渉縞を観測する[1]．

観測面上の点 x における干渉縞の強度は，干渉する二つの光の位相差を $\Delta\phi(x)$ とすると，次のように表わすことができる．

$$I(x)=a(x)+b(x)\cos\Delta\phi(x) \quad \cdots(1)$$

ここで，$a(x)$, $b(x)$ はともに定数である．干渉縞の強度は，干渉する二つの光の位相差 $\Delta\phi(x)$ によって正弦波状に変化し，

$$\Delta\phi(x)=2n\pi$$
$$n=0, \pm1, \pm2, \ldots\cdots\cdots\cdots(2)$$

* なかじま　としのり　文教大学教育学部

のところで極大になる．n は干渉縞の次数である．また，光路差 $\Delta d(x)$ については，光の波長を λ とするとき，

$$\Delta d(x)=(\lambda/2\pi)\Delta\phi(x)=n\lambda$$
$$n=0,\ \pm1,\ \pm2,\ \ldots\cdots\cdots\cdots(3)$$

のところが極大になる．

光路差は半透明鏡からそれぞれ試験反射鏡までの距離と参照光用反射鏡までの距離との差の2倍に等しい．参照光用反射鏡や半透明鏡などには表面精度の高い素子を用いるので，二つの反射鏡がともに光軸に垂直であれば，観測される干渉縞は試験反射鏡の表面の凹凸について $\lambda/2$ ごとの等高線となる．この等高線を計数すれば，試験反射鏡の表面形状を測定することができる．

この測定は光の波長の1/2を単位としている．より高い精度が必要な場合には，干渉縞の強度の極大だけでなく，中間の強度を測定して光の位相差を求める．しかし，実際の干渉縞では，干渉する光の強度分布が空間的に一様でなかったり，振動や温度変動の影響で強度が時間的に変動したりするために，必ずしも高い精度を得ることができない．

2. 位相シフト干渉法

位相シフト干渉法では，1枚の静止した干渉縞画像だけでなく，干渉する光の位相を変化させて得られる多数の干渉縞画像を用いて高い精度を得る[1-3]．そのほかにも，高い精度を得る方法に，光の周波数を偏移させて干渉縞を連続的に時間変化させ，電気信号の測定によって高精度を得るヘテロダイン干渉法などがある．

位相シフト干渉法で，干渉する一方の光の位相を一定量ずつ段階的に変化させると，干渉縞の明暗が少しずつ異なる多数の干渉縞画像が得られる．観測面上の各点ごとにそれぞれの干渉縞画像の強度を測定して，干渉する光の位相差を計算する[4]．

たとえば，干渉する一方の光の位相を $\pi/2$ ずつ変化させると，観測される干渉縞の強度は，次のように表わせる．

$$I_1(x)=a(x)+b(x)\cos\Delta\phi(x)\cdots(4)$$
$$I_2(x)=a(x)+b(x)\sin\Delta\phi(x)\cdots(5)$$
$$I_3(x)=a(x)-b(x)\cos\Delta\phi(x)\cdots(6)$$
$$I_4(x)=a(x)-b(x)\sin\Delta\phi(x)\cdots(7)$$

これらの式から次のようにして位相差が求められる．

$$\Delta\phi(x)=\tan^{-1}\{[I_2(x)-I_4(x)]/[I_1(x)-I_3(x)]\}\ (\mathrm{mod}\,\pi)\cdots\cdots\cdots(8)$$

ここで，mod π は求めた値に π の整数倍の不確定性があることを示す．この不確定性は，位相差の空間的分布を求めるとき，隣り合う点での値との連続性を考えて，π の整数倍を加算または減算して除く．

この方法では，干渉縞のある1点での光の位相差を，その点だけの強度の値から求めるので，干渉する光の強度に空間的な変動があっても，影響を受けない．また，多数回の強度の測定値をもとに位相差を計算するので，時間的な強度変動の影響も少ない．そのため光路差について光の波長の1/100を越える高い精度を得ることも可能になる．また，光の位相が変化するときに，その符号もわかる．一方，空間的な分解能は光電検出素子の受光部分の大きさによって決まり，干渉縞の形状や空間的な密度によらない．

干渉する一方の光の位相を変化させるには，参照光用反射鏡にピエゾ素子をつけ，これに電圧を加えて微小変位させればよい．また，光源に半導体レーザーを用いると，機械的な駆動部分なしに，簡単に光の位相差を変えられる．半導体レーザーは発振する光の周波数が，モードホップがなければ，駆動電流または温度の変化によって直線性よく変化する．光の周波数を f，光の速度を c とすると，光の位相差は，

$$\Delta\phi(x)=(2\pi f/c)\Delta d(x)\ \cdots\cdots\cdots(9)$$

となるので，光の周波数が変化すると，位相

差が変化する．必要な周波数変化は光路差 $\Delta d(x)$ に依存する[5]．

3. 干渉計の安定化と位相シフト

干渉計に加わる機械的振動のような外乱の影響を打ち消して安定化するには，外乱による干渉縞の強度変動を検出して，それを補償するように光の位相を変化させる．安定化した状態で，位相シフト干渉法を適用すると，外乱の下での高精度の干渉計測を実現できる[6]．

製作した干渉計を図2に示す．光源は半導体レーザー LD で，その駆動電流を変化させて光の位相差を変化させる．参照光用反射鏡 M1 と試験すべき凹面鏡 M2 からの光を干渉させる．干渉縞の画像は CCD カメラで撮像すると同時に，空間フィルター検出器 SFD で検出する．空間フィルター検出器は，光電検出素子を1次元の列に並べて電子的に走査できるようにしたもので，干渉縞の強度変動を検出して，光の位相変化に比例する信号を出す．これで検出した外乱の大きさに対応して，計算機 PC を通してレーザーの電源からの駆動電流を変化させ，干渉計を安定化する．干渉計が安定化した状態で駆動電流を段階的に変化させて，二つの光の間に位相シフトを与える．図2で点線で囲んだ部分は，すべての部品をフレームに固定して一体化した可搬型の干渉計ヘッドになっている．これを試験したい反射鏡の近くへ簡単に移動させて測定ができる．実験では，干渉計ヘッドと試験凹面鏡は分離して木製の机の上に配置したので，干渉計の安定化をしないと振動の影響で干渉縞は強度の変動が激しく，干渉計測ができない．まして，干渉する光に一定の位相変化を与えて，位相シフト干渉法を適用することはできない．

干渉計を安定化して位相シフト法により凹面鏡の形状を測定した．直径 130 mm，曲率半径 150 mm の凹面鏡について，中央の 83 mm×83 mm の部分を測定し，球面からの誤差を求めた結果を図3に示す．表面形状の球面からの誤差は，最大で光の波長 λ (691 nm) の 1/5 であり，繰り返し測定精度は，$\lambda/35$ であった．光の波長より小さな形状の変化を，高い精度で測定できている．

4. 結　論

安定化した干渉計に位相シフト干渉法を適用することにより，干渉計測で最も問題となる機械的な振動のような外乱の影響を打ち消して，光の波長の 1/35 という高精度で凹面鏡の表面形状を測定した．この方法によれば，光学定盤の上でなくても高精度の干渉計測ができるので，これまでになく広い分野で干渉計測が利用されることが期待される．

本研究の主な部分は著者が理化学研究所に在職中に，光工学研究室のスタッフと共同して行なった．

文　献

1) 中島俊典：干渉測定法，光工学ハンドブック，朝倉書店 (1986) 387-396.
2) 中島俊典：ヘテロダイン干渉法，光学，9，No. 5 (1980) 266-274.
3) 武田光夫：サブフリンジ干渉計測基礎論，光学，13，No. 1 (1984) 55-65.
4) J. H. Bruning *et al.*: Digital Wavefront Measuring Interferometer for Testing Optical Surfaces and Lenses, Appl. Opt. 13, No. 11 (1974) 2693-2703.
5) 石井行弘：半導体レーザーの周波数変調特性を用いた干渉法，光学，20，No. 5 (1991) 265-270.
6) 劉紀元ほか：半導体レーザー変調を用いた能動型位相シフト干渉計，第15回光波センシング技術研究会講演論文集 (1995) 39-46.

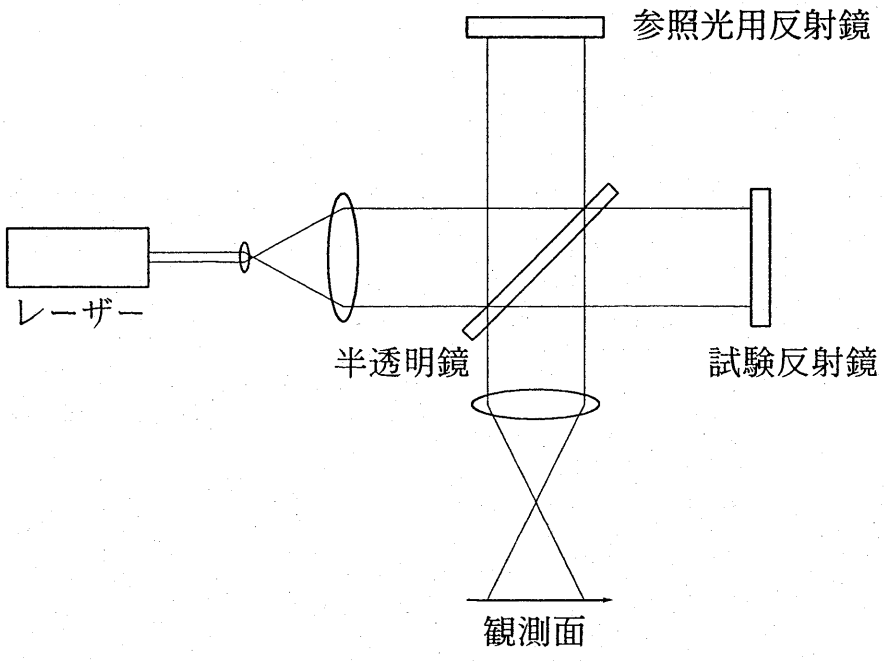

図1　トワイマン・グリーン干渉計の基本構成

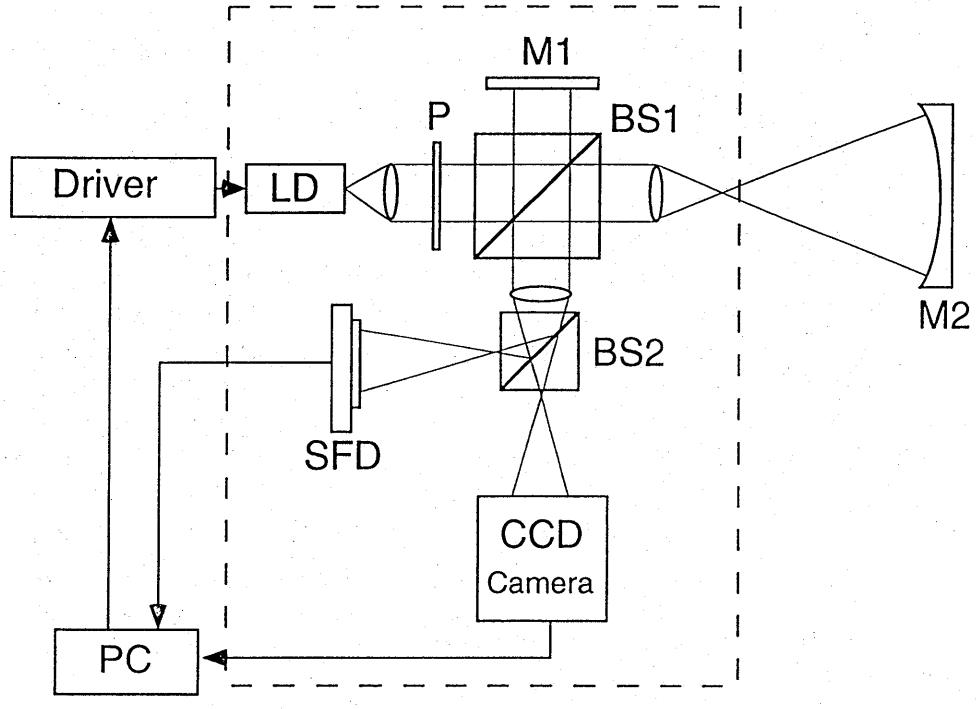

図2　安定化位相シフト干渉計

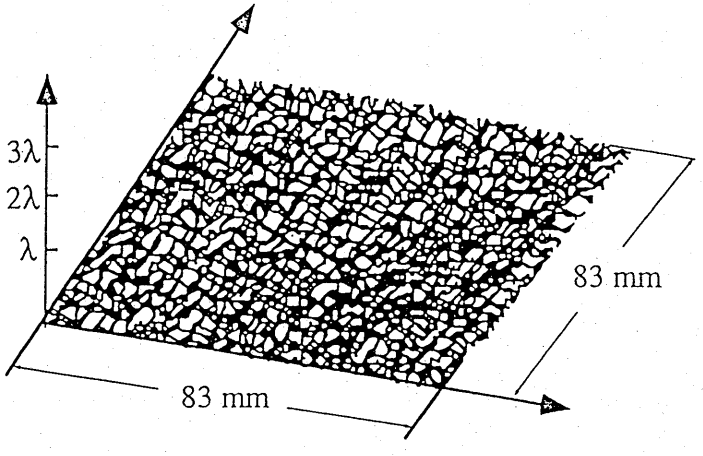

図 3　測定した凹面鏡の中央部分の形状誤差，λ は光の波長（691 nm）