



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	空間フィルタリングによる光線収差および波面収差の測定
Author(s)	村田, 和美; 松居, 寛
Citation	北海道大學工學部研究報告, 125, 77-84
Issue Date	1985-03-29
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/41916
Type	departmental bulletin paper
File Information	125_77-84.pdf



空間フィルタリングによる 光線収差および波面収差の測定

村 田 和 美 松 居 寛*

(昭和59年11月30日受理)

Measurement of Ray- and Wave-Aberration by Spatial Filtering

Kazumi MURATA and Hiroshi MATSUI

(Received November 30, 1984)

Abstract

A method for the measuring of the ray- and wave-aberration of an optical system is described, in which the spatial filtering with coherent light and the digital image integration by micro-computer are successively applied. The ray-aberration is optically measured by using a square-root filter and then digitally transformed into the wave-aberration almost in real time. The principle of the method is presented and some experiments are shown.

1. 緒 言

光学系の結像特性で最も重要なのは収差である。実際の光学系の収差測定法については、現在までに多くの方法が提案され実用化されている¹⁾。これらの収差測定法を大別すると、トワイマン型干渉計などによって光学系の射出瞳面における波面収差を等位相干渉縞として測定する方法と、ハルトマンテストなどのように像面における光線収差を写真測定または光電測定する方法とに分類される。前者の干渉測定は振動に敏感であり、また測定された干渉縞の解析に時間を要する。後者の光線収差の測定も多くの光線による像点の測定とそれらから一つの収差曲線を得るのにかなりの時間がかかる。さらに光学系の結像特性を詳細に評価するには、像高、焦点面、光の波長などのパラメーターを変えた多くの組み合わせに対して、収差測定を繰り返さなければならないので、1回の収差測定は簡単かつ迅速に実行できることが必要である。また、波面収差と光線収差を同時に測定することも望ましい。

以上述べた理由から、本研究では一つの光学系の光線収差と波面収差を実時間に近い速さで測定する方法を提案し、測定装置を試作して実際の光学レンズに対して収差測定実験を行なった。その原理は、まずコヒーレント光情報処理系の入力面に被検レンズの射出瞳を置いて波面収差を発生させ、そのフーリエスペクトル面に平方根フィルターを挿入して微分処理を施し、波面収差の微分、すなわち光線収差に等しい強度分布を出力面に得る。次にこれを固体イメージセンサーに記録するとともに、マイクロコンピュータによって積分処理を行なって波面収差に変換するものである。

2. 測定の原理

一般に光学系の波面収差は、物点からの単色光球面波が光学系を透過後、射出瞳面 (x, y 面) でその波面が、理想結像の場合の参照波面から変位している量、すなわち両波面間の光路差であり、これを $W(x, y)$ とあらわす。波面収差にその光の波数 $k=2\pi/\lambda$ を乗じた位相関数を $\phi(x, y)$ とすると射出瞳面における光波の分布 $O(x, y)$ は、

$$O(x, y) = \exp \{i \phi(x, y)\} \quad (1)$$

とかける。一方、像面における光線収差は、その光線が実際に像面と交わる像点と理想像点との距離であり、やはりその光線が射出瞳を出射した点の座標 x, y の関数として $R(x, y)$ のようにあらわす。光線収差 R と波面収差 W との関係は、 R の x, y 方向成分を R_x, R_y とすると W の x, y 方向の微分がそれぞれ R_x, R_y に比例することが判っている²⁾。従っていま x 方向の1次元関数として波面収差 W に相当する位相関数 ϕ と光線収差成分 R とあらわすと、

$$O(x) = \exp \{i \phi(x)\} \quad (2)$$

$$R(x) \propto \frac{d\phi(x)}{dx} \quad (3)$$

$$\phi(x) \propto \int R(x) dx \quad (4)$$

本測定法はコヒーレント光学処理系の入力面に被験レンズの射出瞳をおき、平方根フィルターをフーリエスペクトル面に挿入して位相 $\phi(x)$ の微分として光線収差を強度検出し、さらにマイクロコンピュータにより、光線収差を積分して位相分布を回復し波面収差を求めようとするものである。

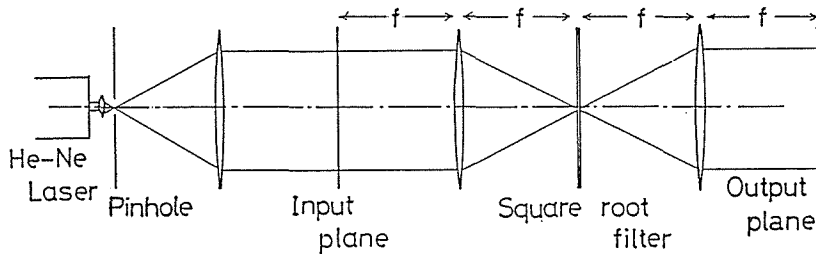


図1 コヒーレント光再回折空間フィルタリング系

図1はコヒーレント光による再回折空間フィルタリング系の原理を示す。レーザー光を集光して得られる点光源は、被験レンズの焦点面になっている。点光源からの球面波は被験レンズを透過しその射出瞳面に波面収差を生じるが、この面と再回折系の入力面とを一致させておく。一般にコヒーレント光処理系にて空間的微分処理を施す場合、フーリエスペクトル面におく微分フィルターは³⁾、空間周波数 N に直線比例する振幅分布をもつものが用いられるが、この場合出力像の振幅分布が所望の微分値であり、これを強度検出器で測定すると2乗則により歪んだものとなる。そこで本研究ではフーリエスペクトル面に平方根フィルターを挿入してフィルタリングし、出力像の強度分布が入力物体の微分値に等しくなるようにした。平方根フィルター⁴⁾は図2のごとく空間周波数座標 N の平方根に比例した振幅透過率をもち、

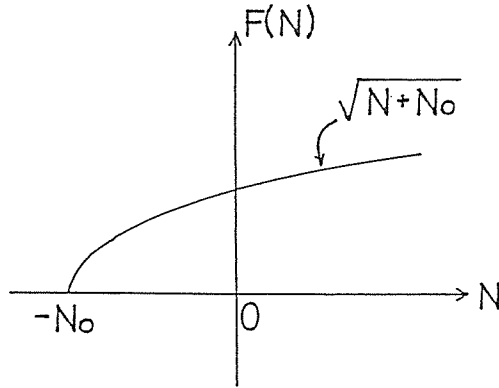


図2 平方根フィルターの振幅透過率

$$F(N) = \sqrt{N + N_0} \quad (5)$$

とあらわせ N_0 は定数である。入力面の位相物体 $O(x) = \exp \{i\phi(x)\}$ のフーリエスペクトル $\tilde{O}(N)$ が N 軸上あらわれるので、これを平方根フィルター $F(N)$ でフィルタリングすることになる。このとき出力像の振幅分布は

$$A(X) = \int_{-\infty}^{\infty} F(N) \tilde{O}(N) e^{2\pi i N X} dN = \int_{-\infty}^{\infty} \sqrt{N + N_0} \tilde{O}(N) e^{2\pi i N X} dN \quad (6)$$

ここで $\sqrt{N + N_0}$ を級数展開し整理すると

$$A(X) = \sqrt{N_0} e^{i\phi(X)} \left[1 + \frac{1}{2N_0} \phi'(X) + \frac{1}{8N_0^2} \{i\phi''(X) - \phi'(X)^2\} - \frac{1}{16N_0^3} \{\phi'''(X) + 3i\phi'(X)\phi''(X) - \phi'(X)^3\} + \dots \right] \quad (7)$$

となる。従って出力像の強度分布は

$$I(X) = |A(X)|^2 = N_0 \left\{ 1 + \frac{1}{N_0} \phi'(X) - \frac{1}{8N_0^3} \phi'''(X) + \dots \right\} \quad (8)$$

とあらわされ、 $(1/N_0)$ の3乗以上の項は省略できるとすれば、

$$I(X) \approx N_0 + \phi'(X) \quad (9)$$

を得る。この式から平方根フィルターによる出力像の強度分布は、入力物体の位相分布の微分に線形となることがわかる。またバイアス値 N_0 を中心とした強度の変化分が $\phi'(x)$ であるから、 N_0 を調整することにより、広範囲の $\phi'(x)$ の検出が可能となる。このバイアス値は、平方根フィルターを挿入しないときの出力像の様な強度であらかじめ別に測定できるので、 $I(x)$ から N_0 を差し引き、位相の微分項のみを取り出すことができる。

$$I(X) - N_0 \approx \phi'(X) \quad (10)$$

つぎにこの $\phi'(X)$ をマイクロコンピュータによってデジタルに積分すれば入力物体の位相分布 $\phi(X)$ を回復することができる。

$$\int \phi'(X) dX = \phi(X) \quad (11)$$

以上の(10)で与えられる $\phi'(X)$ の検出によって、(3)で示したように光線収差 $R(X)$ が測定されたことになり、また(11)の積分計算により、瞳関数の位相分布 $\phi(X)$ 、従って波面収差 $W(X)$ が求まる。

3. 実験方法と実験結果

前章2に述べた原理にもとづき、図3のような収差測定装置を試作し、一つの凸レンズを対象にして測定実験を行なった。以下に実験方法と実験の結果について述べる。

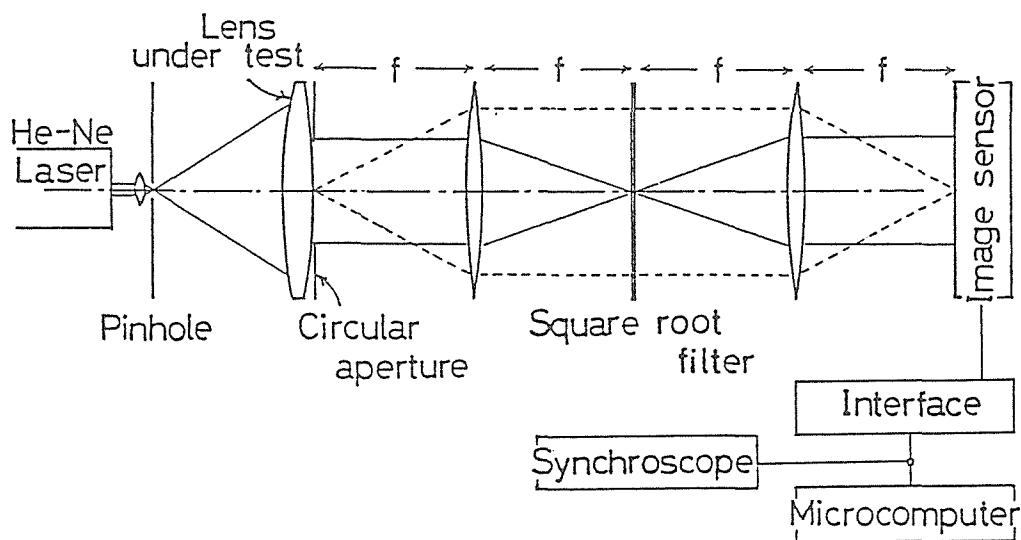


図3 光学系の収差測定装置

3. 1 平方根フィルターの製作

コヒーレント光フィルタリング系で重要な役割りを果す平方根フィルターは、その1次元的な振幅透過率分布が位置の平方根に比例するものである。従ってその強度透過率分布は、フィルター上の位置に直線的に比例することになる。このようなフィルターは写真乾板の上にあらかじめ計算された関数形の開口幅をもつマスクをかさね、乾板を定速で移動させながら露光を与えたのち、一定の現像条件で現像して製作した。マスクの開口関数形は、写真のH-D特性の直線範囲、ガンマ値などのパラメーターを実験的に求めて決定したが、出来上がった平方根フィルターの濃度分布から得られた振幅透過率は、図4のごとくほぼ所望の分布が得られていることがわかった。

3. 2 光線収差の測定

測定の対象とした被検レンズは直径40mm、焦点距離50mmの単凸レンズで、瞳面上の明るさが一定と見られる範囲を保証するため、直径10mmの円形開口のマスクを用いた。軸上の光線収差、すなわち球面収差を測定するため、光軸上焦点面のピンホール上にレーザー光を集光して点光源をつくり、被検レンズの射出瞳をコヒーレント光再回折系の入力物体とした。フーリエスペクトルフィルター面に挿入する平方根フィルターのN方向の位置は、光軸上で振幅透過率が0.5にな

るようにセットした。出力像面に出力される微分像の強度分布 $I(X)$ は、固体イメージセンサーで検出しインターフェイスを介して、シンクロスコープにディスプレイし、またマイクロコンピュータに入力した。

また、同一条件下で平方根フィルターを一樣な振幅透過率をもつフィルターに代えて(9)中の一定のバイアス項 N_0 に相当する強度を測定し、これをコンピュータで $I(X)$ から差し引き光線収差に相当する強度分布 $\phi'(X)$ を求めディスプレイする。さらにこの $\phi'(X)$ をコンピュータで、0 から X まで積分し、波面収差に相当する位相分布 $\phi(X)$ を求め、これを波数 $k=2\pi/\lambda$ で割った値として波面収差 $W(X)$ を得てディスプレイする。

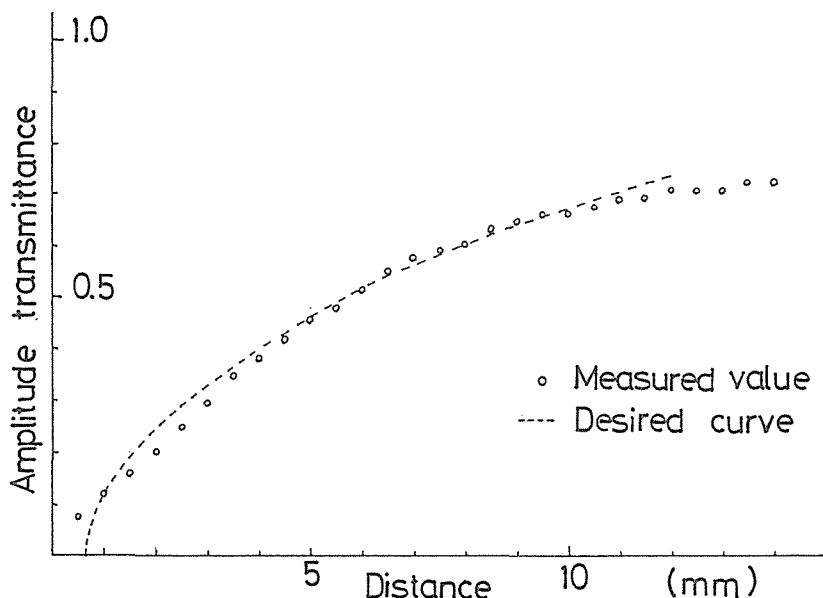


図4 製作した平方根フィルターの振幅透過率

3.3 実験結果

コヒーレント光フィルタリング系の出力像強度分布をイメージセンサーで検出処理した結果を図5に示す。図のAは平方根フィルターによる出力像、Bは平方根フィルターを一樣な透過率をもつフィルターに代えたときの出力像でバイアス項に相当する強度分布、A-BはAからBを差し引いて得られた光線収差に相当する強度分布である。さらに、このA-Bのデータを積分処理した結果が図6に示され、波面収差の位相分布に相当するものである。

一方、この測定法の精度を確かめるために、同じレンズの縦収差を従来の測定法の一つであるハルトマンテストにより測定して光線収差を求め、これから波面収差を計算した。図7のAは光線収差、Bは波面収差であり、これらを本方法にて測定した図5のA-Bおよび図6とそれぞれ比較すると、かなりよい一致を見ることができる。

以上の実験では球面収差の測定に限定したが、レンズを傾けてレーザー一点光源を移動させることにより軸外の収差の測定も可能であることが判った。

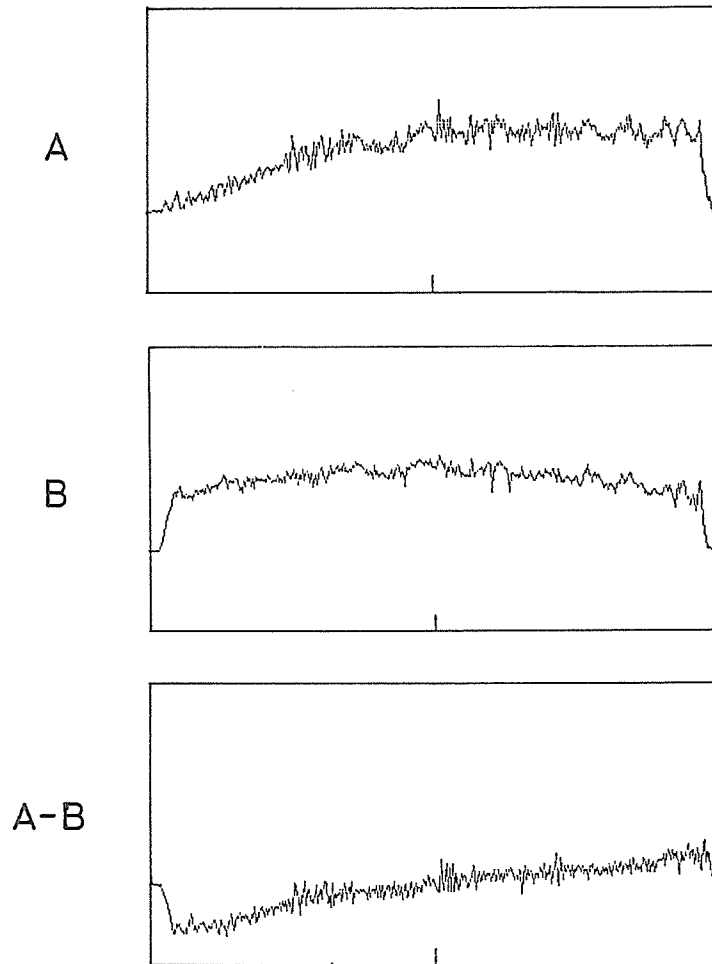


図5 コヒーレント光フィルタリング系の出力像 A. 平方根フィルターによる出力像, B. 一様透過率フィルターによる出力像, A-B. AとBの差

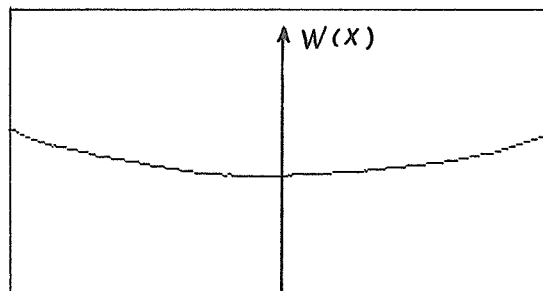


図6 実験により得られた波面収差

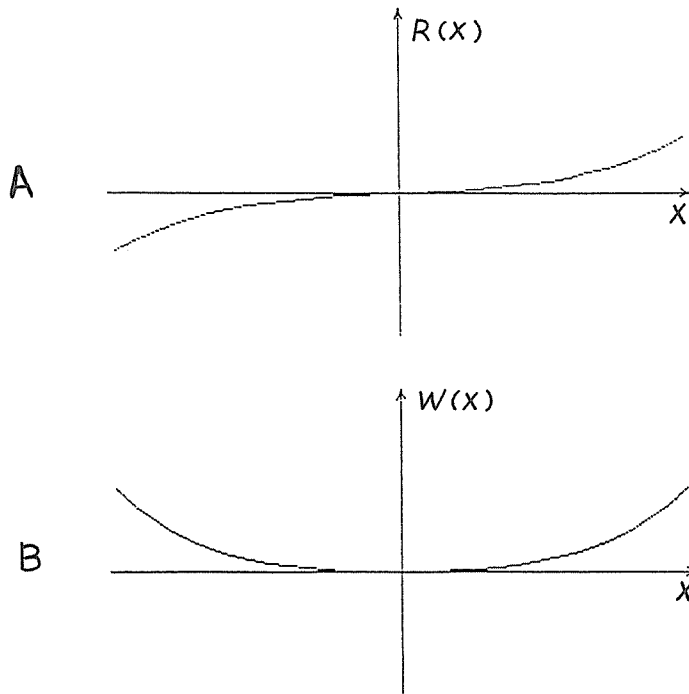


図7 ハルトマンテストにより得られたA. 光線収差と B. 波面収差

結 言

結像光学系の光線収差と波面収差を、平方根フィルタによるコヒーレント光処理系と、マイクロコンピュータをハイブリッドにつないで迅速に測定する新しい方法を提案し、測定装置を試作し実験によりその有効性を確めた。本研究による収差測定法は従来の収差測定法に比べて次のような利点をもつと考えられる。

- (1) 光線収差と波面収差をほとんど同時に測定できる。
- (2) 測定装置は比較的簡単で、測定のために調整する部分が少なく操作も容易である。
- (3) 目的とする光線収差と波面収差が直接ディスプレイされ記録されるので、干渉法やハルトマンテストのように測定後のデータ整理や解析が不要である。
- (4) 収差量の測定範囲が大きく、干渉法では測定が困難な大きな波面収差の測定もできる。

一方、本測定法の短所と考えられるものは次のごとくである。

- (1) 平方根フィルタは一種のハイパスフィルタであるので、出力像が光学雑音の影響を受け易い。
- (2) 平方根フィルタに不均一な位相分布があるときも出力像に強度雑音があられる。この場合はリキッドゲートなどを用いる必要がある。
- (3) 収差は実時間では子午の平面内での1次元的な測定しかできない。これは平方根フィルタと1次元イメージセンサーを軸の回わりに少しずつ回転しながら測定を繰り返せば、2次元的な収差測定も可能となる。

本研究は収差の測定を目的としているが、入力物体はレンズの瞳関数に限らず一般の位相物体

であっても全く同じ原理で，その位相分布を強度分布の形で回復表示することができる。従って位相物体の測定法としても有効であると考えられる。

参 考 文 献

- 1) 久保田 広：光学，(1964)p.201，岩波書店
- 2) 村田 和美：光学，(1979)p.150，サイエンス社
- 3) 辻内 順平，村田 和美編：光学情報処理(1974)p.81，朝倉書店
- 4) B.A. Horwitz：Opt. Commun. 17, (1976)231