

空間フィルタリングによる物体の寸法測定

末元好郎

§ 1 研究のおこり

スピーカ音の音の高低や色合を調えるためには音声電流の低音部と高音部を強めたり弱めたりするいわゆるトーンコントロールを行う。電流波形はいろいろな周波数の正弦波が重なってできているので、ある周波数成分を強調したり抑制したりしてこのようなことができるのである。このような技術は周波数フィルタリングと呼ばれ時間的に変化する電気信号を扱う場合の常とう手段となっている。

写真フィルムに写っている画像をマイクロフォトメータにかけその透過率を測ると、空間的に変化する波形が得られる。電流波形から類推して、この波形は空間的に変化する正弦波が集まってできていると考えられる。時間的に変化する正弦波の周波数は毎秒何サイクルで表わされるのにひきかえ、空間の場合にはミリメートル当り何サイクルで表わされ空間周波数と呼ばれている。なおマイクロフォトメータで先の場合と直角をなす方向に測れば異なった波形が得られることから推測できるように、空間周波数は横方向と縦方向の2つの周波数をもっている。さて電気信号のフィルタリングに対応する操作を行えば、例えば画像について言えば好みの階調の画像を得たり像を以後の測定に好都合なよ

うに全く変えてしまうこともできることは、電気信号のフィルタリングの類推から考えられることである。このような技術は空間フィルタリングと呼ばれている。

空間フィルタリングを行う光学系を図1に示す。単色点光源より出た光はレンズLにより平行平面波となり物体面 P_1 に置いた物体を照明する。物体により回折された光は、レンズ L_1 を通過した後空間周波数面 P_2 に物体のスペクトル^{注1}として現われる。このスペクトルは横方向の空間周波数 P と縦方向の空間周波数 q の関数として現われる。これらのことは物体面に、例えば x 軸方向に周期的変化をする回折格子を置くと格子の空間周波数が大きくなる程(細かい格子になる程)回折角は大きく従って P 軸上には P の大きな値の点に像が現われることから推測できる。なお、多数の並置された同一形状の物体の場合、理想的光学系では全く同一スペクトルが重なっている。さて P_2 面を通過

注1. 電気信号の場合、それに含まれる周波数成分を周波数の関数として表示したものをスペクトルと呼ぶが、空間物体の場合も縦方向と横方向の空間周波数の関数として物体の含む周波数成分を表示したものをスペクトルと呼ぶ。

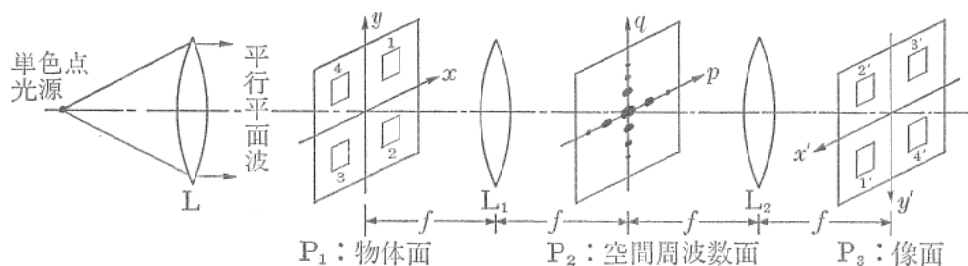


図1 空間フィルタリング光学系 (f : レンズ L_1 , L_2 の焦点距離)

した光がそのままレンズ L_2 を通過して再回折^{注2}されると、像面 P_3 には物体と同じ像（ただし倒立像）が結像される。空間フィルタリングを行う場合は、必要な周波数成分だけを通すような透過フィルタを、例えば写真フィルムで作って空間周波数面に置けば像面にはフィルタリングされた所望の像が得られる。

近年、空間フィルタリングに関する研究が多く行われるようになった理由の1つにレーザーの出現がある。図1の単色点光源は、水銀ランプに光学フィルタをかけて単色光とし可干渉性をよくするためピンホールを通して光を取出しても得られる。しかしレーザー光線を顕微鏡対物レンズで集光して得られる単色点光源の方がはるかによい可干渉性^{注3}を示す。図1の空間フィルタリング光学系で空間周波数面に真のスペクトルが現われるためには、実は光源に非常により可干渉性が要求されそのためには光源は必然的にレーザーとなる。

さて、われわれも空間フィルタリングに関して主としてフィルタの製作といういわば基礎的研究を行っていたが、次のステップとして空間フィルタリングの手法を何か実用的可能性のあるものに適用する問題に取り組んだ。物体を光学的に拡大投影して寸法・形状を測定することがあるが、この際空間フィルタリングで物体の輪郭を鮮明に出す像処理法も報告されていた。しかしこれも得られた像の寸法を物指しで測るわけで寸法が直接何らかの出力として得られるわけではない。物体の寸法の変化に伴って変化

注2. 図1を見れば分るように P_1 面と P_2 面の関係と P_2 面と P_3 面の関係は全く同じであるから、 P_1 面より P_2 面に回折すると全く同じように P_2 面より P_3 面に回折するのでこう呼ばれる。二度同じ回折をして結局元の図形の像が得られるのである。

注3. 通常の光源より出る光波は位相も偏波面もまちまちの継続時間の短い波が集ってできているが、レーザー光は位相も偏波面もよくそろった継続時間の長い波からできている。従って後者では光がよく干渉するので物体による回折像が鮮明にでる。

するスペクトルのうち変化に対して敏感な部分だけ通すようなフィルタで得られる像の中心強度が寸法と関係することを利用し、これを光电測光して電気信号として取り出す測定法が、たまたま海外に2件報告されていたので、実用的可能性のあるものと考えわれわれも応用研究の問題として取り上げた。

§2 研究の目的

被測定物体として例えば精密加工部品や集積回路パターンなど考えられるので、製作しようとする基準寸法からの偏差が、光学的出力として得られるようにするのがよい。その場合比較的広範囲にわたって出力と偏差との間に直線関係が得られる必要のある場合と僅かの偏差に対して出力が鋭く変化するいわば高感度化を計る必要のある場合とがある。これらは空間周波数フィルタをどのように設計するかで決まる。第一段階として被測定物体にスリットを用い、その中の測定において種々のフィルタを仮定し、偏差と出力の関係の計算機シミュレーション^{注4}を行う。次いでそれらフィルタを用いて実験を行い計算機シミュレーションの結果と比較し、フィルタ設計に関し計算機シミュレーションが有効か否かをみることにする。

§3 研究の経過内容

基準スリットのスペクトルは図2(a)に示すように空間周波数 P が大きくなるに従って減衰する形となる。スリット巾が狭くなるとスペクトルは P 軸方向に伸び、広くなると縮む。従ってスペクトルが零となる付近が寸法変化に対して敏感だから、この付近の周波数成分を通すフィルタがよいと考えられる。空間周波数面に置くフィルタとして透過率 T が図2(b)(1)~(5)に示す5種類のバンドパス型のものを対象に、計算機シミュレーションを行った。フィルタリングに

注4. 空間フィルタリング光学系と同じ操作を大型計算機でシミュレート（模擬）する。先ず物体のスペクトルを計算し次いでフィルタを通した後再回折で得られる像の強度分布を計算する。

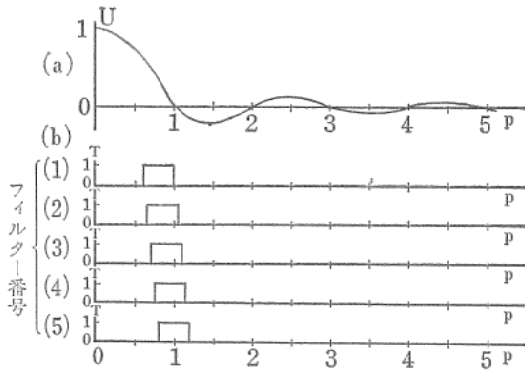


図2 (a) 基準スリットのスペクトルU
(b) バンドパスフィルターの透過率T

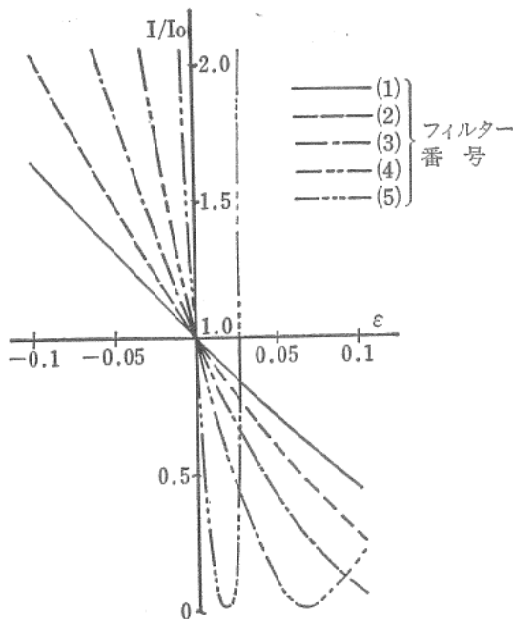


図3 基準寸法からの偏差 ϵ と出力 I の関係の
計算機シミュレーション結果。

$$\epsilon = \frac{A - A_0}{A_0}, \quad A: \text{被測定スリット巾},$$

A_0 : 基準スリット巾. I_0 は基準スリット
の場合の出力.

よって得られる像の中心強度すなわち系の出力を、基準スリット巾からの偏差の関数として表わした結果を図3に示す。フィルタ(1)(2)は、偏差に対する出力の直線域が広く、フィルタ(3)より(5)にゆくに従って高感度となっている。

実験に用いた空間フィルタリング光学系と検出部を図4に示す。He-Ne レーザーからの光は顕微鏡対物レンズ L_3 で一点に集められる。この点光源より出る光はレンズ L_4 で平行平面波とされ、次いでレンズ L_1 により集束され空間周波数面に焦点を結ぶようになっている。こ

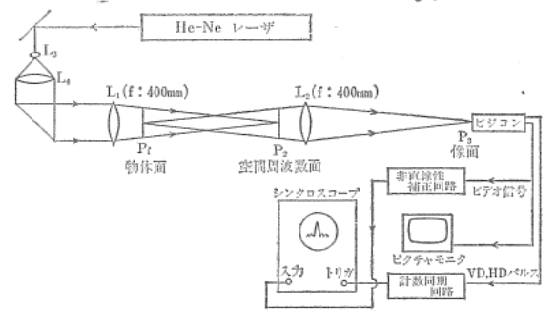


図4 空間フィルタリング光学系と検出部

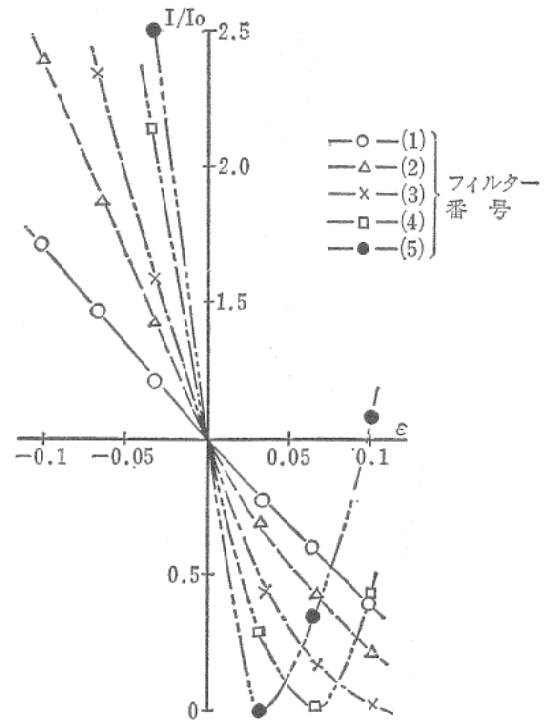


図5 基準寸法からの偏差 ϵ と出力 I の関係
の実験結果。

の集束光路の適切な位置 P_1 面に被測定物体（今の場合スリット）を置くと P_2 面には物体のスペクトルが得られる。この光学系では P_1 面を前後するとスペクトルの伸縮ができるので、フィルタとスペクトルの大きさの相対的調整に便利である。 P_2 面に置く空間周波数フィルタは写真フィルムに所望の透過率パターンを与えて作った。フィルタを通過した光はレンズ L_2 により再回折され出力面 P_3 に出力像として現われる。この像の中心強度を光電測光するが、複数個の被測定物体を同時処理する場合出

力は複数個の位置に現われるので（図1で物体1の像は1'，2は2'に以下同様に現われる）像面各所の測定の可能なビジコンを用いた。ただしビジコンは光強度と電気出力の間に非直線関係があるのでこれを補正する回路を付加してある。ビジコン上任意の走査線上の出力を得るため走査線の計数，シンクロスコープ同期回路およびピクチャモニタを用い，シンクロスコープで出力を測定した。基準スリット巾を0.30 mmとしてスリット巾（目盛付可変スリットを用いた）を変えその偏差と出力の関係を測定した。

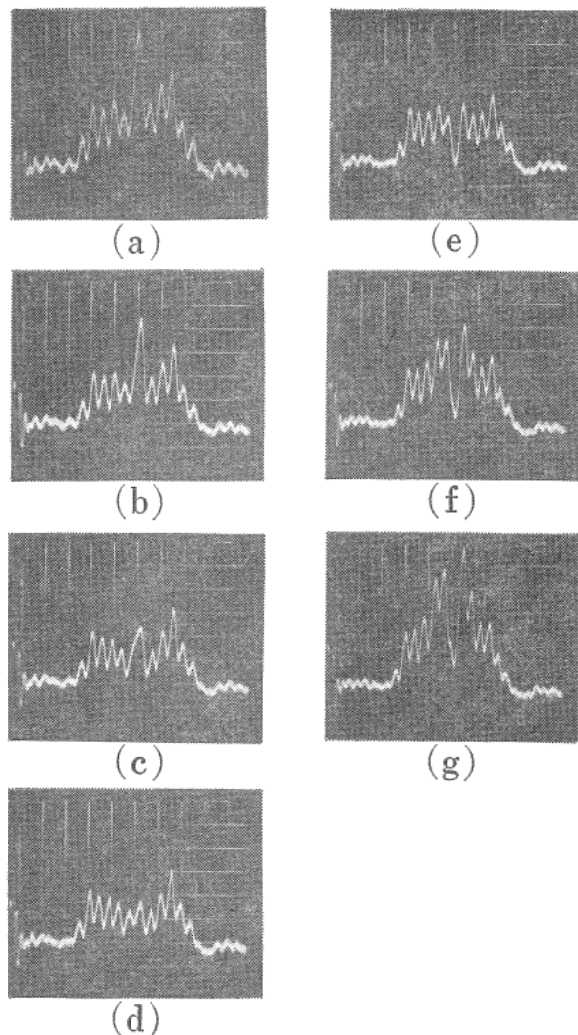


図6 出力パターン

	スリット巾 (mm)	ϵ
(a)	0.27	-0.100
(b)	0.28	-0.067
(c)	0.29	-0.033
(d)	0.30	0
(e)	0.31	0.033
(f)	0.32	0.067
(g)	0.33	0.100

その結果を図5に示す。これと図3を比較すると，各フィルタの示す特性は計算機シミュレーションの予測するものと同じ傾向を示すことがわかる。従ってフィルタの設計には計算機シミュレーションが有力な手段であると言える。なお出力として出力像の中心強度をとったが，出力像全体のパターンは図6に示すようなものになる。これをみれば偏差の変化に伴って出力パターンそのものも変化するが，特に中心の強度が鋭く変化しているのがわかる。なお計算機シミュレーションでは出力パターンは対称な形となるが，レーザー光の場合ビジコン面に現われる干渉縞^{注5}，ビジコンの感度むら，レーザー光による照明の不均一などの影響を受けて非対称な形となっている。

§ 4 研究の成果

得られた成果を総合すると次のようになる。

1. 計算機シミュレーションにより，偏差に対する直線域の広い型のもの，高感度のものなど任意のフィルタの理論設計が可能である。

2. スリット巾の測定では簡単なバンドパスフィルタで充分である。

3. 高感度バンドフィルタでは基準スリット巾0.295mmに対し 2.5μ の変化で出力は50%変化する。

4. 複数個の物体の同時処理の場合は，レーザー光による照明の不均一，レーザー光の場合ビジコン面に現われる干渉縞，ビジコン面感度むらなどの補正を行う必要がある。

§ 5 予想される研究の応用

この測定法は円孔を始め種々の形状の孔の基準形状からのずれを検出するのに適していると考えられる。孔の大きさは0.1~1mm位のもので適当であるが，光学系に工夫を加えればさらに測定範囲を広げ得る。これらの孔が複数個あいている場合や集積回路パターンのように同じものが複数個並んでいる場合のパターン不良部の検出などは，研究の成果の項目4で述べたよ

注5. ビジコン前面（ガラス面）の中での多重反射による干渉縞。

うな補正をすれば可能である。

物体のエッジの形状，例えばネジの形状，歯車の磨耗による形状の変化などの測定の場合は，基準形状からのずれが上記孔の大きさ程度であれば測定できると思われる。

次に加工中の物体，高速回転中の物体のように時間的に変化する形状の測定を必要とする場合，この測定方法は応答が非常に速いので適していると考えられる。もちろん被測定物体の位置が周期的に同位置にくる場合はそれに同期し

て光の照射あるいは検知器の動作を行ったり，場合によっては二次元検知器の出力取り出し位置を適宜に移動したり^{注6} いろいろ工夫を要する。その位置精度は0.1mm程度と見積られるが，干渉による歪み測定に較べればはるかに粗くてよいわけで振動を伴う動的物体の測定には適していると考えられる。

注6．図1に示すように測定物体の位置が移動すると像位置も移動するからである。