

回折型ローパスフィルターの設計法

Method of Designing a Diffractive Type Low-pass Filter

大田 耕平*

Ohta, Kohei

A method of Designing a Diffractive Type Low-pass Filter is described. Calculating a diffractive MTF by ray-tracing through the surface of the phase grating filter is an effective method for various evaluations, and is useful for a practical design. The example of design having a fine low-pass performance is also shown.

1 はじめに

デジタルカメラ、VTRカメラなどの撮像系では、光学的ローパスフィルターを用いて、受光素子ピッチ近傍の周期構造を持つ像で発生する偽色やモアレを防止している。基板上に設けた凸凹形状の位相格子で光束を回折させる位相型のローパスフィルターは、複屈折によって光束を分離する水晶板のローパスフィルターに較べて、安価で量産性にすぐれ、省スペース化にも利点がある。

この位相型光学的ローパスフィルターの設計では、ローパス特性をMTFで評価している。このMTFの計算は、凸凹の位相形状から解析的に瞳関数を求め、その自己相関を計算する手法が使われている。この方法は解析的な扱いのため、ローパスフィルターの基本的な特徴を把握しやすく、例えば矩形波や台形波などの特徴が明瞭に比較できる。¹⁾²⁾しかし、格子形状が複雑な場合や角周特性を評価する場合などのように解析的に瞳関数の自己相関を求めにくい場合、あるいはローパスフィルターと撮像レンズとの合成系のMTFを評価する場合などにおいて、この方法では十分でない場合がある。

一方、レンズ系を評価するコンピュータソフトでは、波動光学的MTFは光線追跡により瞳関数を求めて計算されている。この計算には、屈折の法則により追跡した光線収差が、参照球面半径に対し十分小さいことが前提条件となっている。ローパスフィルターを含むレンズ系においても、ローパスフィルターの位相格子形状を含めて光線追跡を行えば、追跡する全てあるいはほとんど全ての光線がこの条件を満たすことから、この方法が使えることに着目し、光線追跡による位相型ローパスフィルターの設計法を開発した。この方法は、収差のあるレンズ系での計算や角周特性の計算などの場合、レンズ系全体のMTFが容易に求まり、実際の設計に適している。

本稿では上記の光線追跡によるMTF評価を含めたローパスフィルターの設計法をまとめ、設計例を示す。

2 設計法

位相型ローパスフィルターの設計法を順に記す。

1) 基本形状の選定

矩形波、台形波など基本的な格子形状のMTFは前述のように求められており、望ましい特性や製造条件などから基本とする形状が選ばれる。Fig.1に頂部と底部の位相差 γ が、 π の時と 0.7π の時の例を示す。例えば低周波数でのMTF劣化が少ない点では、矩形波より下に図示するものほど優れている。 d は格子ピッチ、 δ は格子の高さ($\delta = \gamma\lambda / (2\pi(n-1))$)、 λ を基準波長、 n は基板の屈折率)である。またMTFは空間周波数 f に対して周期性を持ち、 f_0 はその周期である。

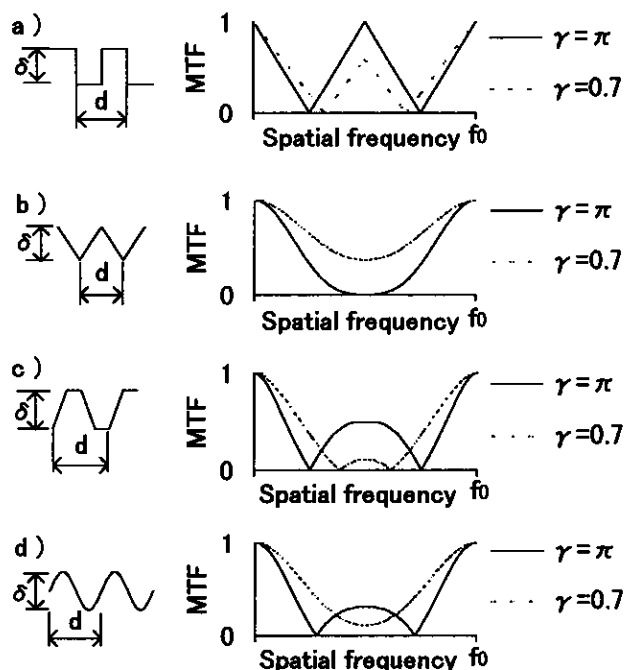


Fig.1 Profile and MTF of typical phase gratings
a) Rectangular wave b) Triangular wave
c) Trapezoidal wave d) Sinusoidal wave

* オプト事業部光学開発センター

2) 形状パラメータの初期値設定

MTFを0にしたい空間周波数 f_c とローパスフィルターの光学系内での配置から、格子の高さ δ 、格子ピッチ d などの初期値を定める。ただし、 f_c でのMTFを0にする形状パラメータの設定には自由度があり、初期値を定めるには他の何等かの仮定が必要となる。

例として正弦波格子について示す。このMTF $H(\xi)$ と f_0 は、 l をローパスフィルターと像面との距離、 J_0 を0次のベッセル関数として、次式で与えられる。

$$H(\xi) = J_0(\gamma \sin(\pi\xi/d)), \xi = \lambda lf, 0 \leq \xi \leq d/2, \\ f_0 = d/(\lambda l)$$

ここで、 f_c を f_0 の半分を選ぶことにすると、そこでのMTFを0とするには、

$$d = 2\lambda lf_c, J_0(\gamma) = 0, \delta = \gamma\lambda/(2\pi(n-1))$$

とすればよい。

なお、ローパスフィルターと撮像面との間にレンズ素子がある場合は、それによって生じるローパスフィルターの像が上記の l と d を満たすようにする。³⁾

3) MTF評価と修正設計

ローパスフィルターの形状を光線追跡ルーチンに組み込んだMTF計算ソフトを準備し、評価に用いる。格子ピッチや位相差あるいは基本形状からの変形を示すパラメータを入力できるようにしておき、実使用状態に即してMTFを評価しながら、所望の特性が得られるようそれらの形状パラメータを修正してゆく。MTF評価の項目としては波長特性、像高特性、小絞り時の特性、製造誤差感度などが挙げられる。

3 設計例

撮像用プラスチック非球面単レンズ(焦点距離3.7mm、Fナンバー2.8、画角56度)の屈折面上に、ローパス効果を有する位相型回折格子を一体的に形成した設計例を示す(Fig. 2)。格子形状は、ベースとなる回転対称非球面に一次元格子を重ね合わせたもので、次式で示すように正弦波格子のピッチを光軸近傍に比べ周辺部で大きくするように変化させている。

$$z = (\text{回転対称非球面形状}) - (\delta/2) \cdot \cos(2\pi x/d) \\ d = d_0(1+cx^2)$$

ただし、 x, z は座標、 d_0 は中心のピッチ、 c はピッチ変化の係数であり、 $d_0 = 0.33 \text{ mm}$ 、 $c = 0.10$ 、 $\delta = 0.42 \mu\text{m}$ とした。なお図では回折格子の振幅を誇張して描いている。

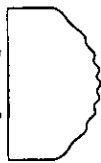


Fig. 2 Cross section of the example lens
(The amplitude of the phase grating is drawn on a extremely magnified scale)

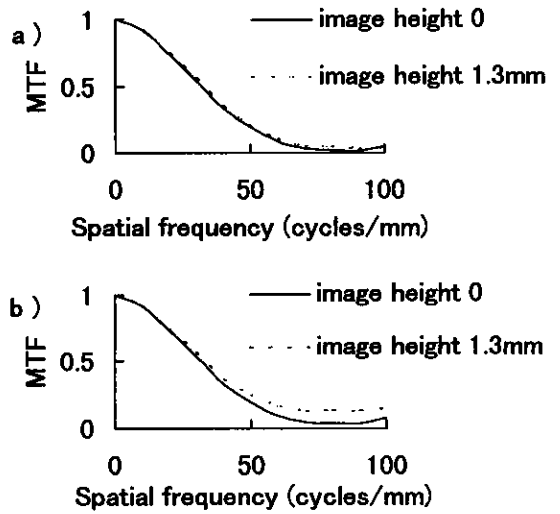


Fig. 3 MTF of the lenses ($\lambda = 550 \text{ nm}$)
a) Example lens with non-uniform pitch grating
b) Reference with uniform pitch grating

Fig. 3 a)はこのレンズの、ローパス効果を有する方向のMTF曲線図であり、Fig. 3 b)は、比較のために正弦波格子のピッチを一定とした場合のものである。Fig. 3 a)では軸上と軸外との周波数特性が揃っており、このように簡易な構成で画面周辺に対しても所望のローパス効果を有する撮像レンズが得られる。

4 まとめ

回折型ローパスフィルターの設計において、位相格子の形状を光線追跡ルーチンに組み込んだMTF評価を行えば、解析的なMTF計算に比べて複雑な構成・評価に対応でき、実用価値の高い評価ができることを示した。

●参考文献

- 1) Masayuki Mino and Yukio Okano: 'Optical Low-Pass Filter for a Single-Vidicon Color Television Camera' J. SMPTE 81, 282-284
- 2) R. L. Townsend: 'Spatial-Frequency Filter for a Kell-Type Color Camera' Applied Optics 11 2463-2472
- 3) 白石昭彦、加藤正猛: 回折格子を用いた光学的ローパスフィルター、光学シンポジウム講演予稿(1990)13-16