光学ローパスフィルタって何ですか？

正会員 小西 正 弘[†]

キーワード：光学ローパスフィルタ、OLPF、複屈折板、水晶板

図 1 撮像素子の画素配列

図 2 撮像素子のナイキスト帯域のモアレ発生

図 3 光学ローパスフィルタによるモアレの抑圧

Q：光学ローパスフィルタはカメラのなかで、どのような役割をもつのでしょうか？

A：CCDなどの固体の撮像素子で撮像する際に発生するモアレを取り除き、自然な画像を得るために用います。

Q：モアレはどうして発生するのですか？

A：固体撮像素子では光に感じる画素が独立し、一定間隔に規則正しく配列されています。したがって、一定の画素ピッチ(P_x)で画像をサンプリングすることになります。サンプリング定理から、再現できる基底周波数は $1/2(P_x)$ となり、この帯域外の情報はサンプリングすることで低い周波数に折り返ります。これがモアレといわれる一種の折り返り雑音と考えられます。実際の画像では、金網やすだれなどの規則的な縞模様が全く異なる周波数に再現されたり、強い色のついた縞が現れたりする現象が見られます(図1, 図2)。

Q：どのようにしてモアレの発生をおさえるのでしょうか？

A：光学ローパスフィルタを用いて、ナイキスト帯域外の高い空間周波数成分の画像を減衰させることでモアレの発生を防止することが基本の原理です(図3)。

Q：光学ローパスフィルタはどのようにカメラの中で使用されているのでしょうか？

A：図4に示されるように、複屈折板を用いる方式と、回折格子を用いる方式が用いられています。現在はデジタルビデオカメラやデジタルスチルカメラでは複屈折板を用いる方式が一般的です。

Q：複屈折板の光学ローパスフィルタはどのような原理で空間周波数のローパスフィルタとして機能するのでしょうか？

図 4 複屈折板と回折格子の光学ローパスフィルタを用いたカメラ

図 5 複屈折による点像の分離

A：方解石の実験を思い出してください。方解石を通して文字を見ると、文字が2重に見えたことを覚えていることと思います。これが複屈折といわれる現象で、光の偏向方向により屈折率が異なるために1点の入射像より2

[†] 富士写真フイルム株式会社 電子映像事業部 設計部

“The First Steps to Understand the Function of the Low Pass Filter” by Masahiro Konishi (Fuji Photo Film Co., Ltd., Saitama)

$$h_{in}(x) = \delta(x) \cdots \text{入力点像}$$

$$h_{out}(x) = |\delta(x-d/2) + \delta(x+d/2)|/2 \cdots \text{LPF 出力点像}$$

これをフーリエ変換すると光学 LPF の周波数特性が求まる

$$H(u) = F[|\delta(x-d/2) + \delta(x+d/2)|/2] \\ = \cos 2\pi u(d/2)$$

像強度は $|H(u)|$ で図 6 の特性になる。

(式 1) 光学ローパスフィルタの空間周波数特性の計算

図 6 光学ローパスフィルタの空間周波数特性

点の像が発生します。2 点像の距離 d は、複屈折板の厚み t に比例します。また、比例係数は材料によって異なります(図 5)。

Q: 複屈折の特性をもつ材料はどのようなものがあるのでしょうか？

A: 誘電体結晶で、加工性等を含め実用になっているのは水晶(SiO_2)、リチウムニオブ化合物などです。

Q: 2 点像がどうして光学ローパスフィルタ特性をもつのでしょうか。

A: 一番簡単に 1 点の像が d の間隔の 2 点の像に分離し投影されたとして、この像をフーリエ変換してみる(式 1)ことで、空間周波数に対してコサイン特性を持つローパスフィルタになっているのがわかります(図 6)。

Q: コサイン特性以外の光学ローパスフィルタは作れないのでしょうか？

A: 複数の複屈折板を重ねることで様々な特性が合成できます。しかしながら、コサインより低域の周波数特性が良好なフィルタは構成できません。したがって、解像度が低域から劣化することが避けられず、画質設計上モアレと解像度は常にトレードオフの関係にあります。

A: 実際の CCD カメラでの設計例を解説してください。

Q: CCD では画素は水平、垂直の 2 次元に構成されているので、両方向のモアレを取り除くために、水平、垂直 2 枚の複屈折板による光学ローパスフィルタが必要になります。2 枚の複屈折板の間には 1 枚目の複屈折板の直線偏光の 2 点像を円偏光にもどすための位相板が加わります(図 7)。2 枚の光学ローパスフィルタが水平垂直の 4

図 7 カメラにおける光学ローパスフィルタの構成例

図 8 図 7 の構成のローパスフィルタによる点像

重の像が発生し、水平垂直のコサイン特性を持つ、2 次元の LPF として機能します。光学ローパスフィルタのゼロ点は CCD の画素ピッチとすることでモアレは最小になります(図 8)。

(2000 年 7 月 3 日受付)

〔文 献〕

- 1) 木内, 作左郎: “CCD のエリアシングに対応する複屈折空間周波数フィルタの設計”, テレビ学技報, 19, 65, pp. 19-24 (Nov. 1995)
- 2) 西田ほか: “回折格子を利用した新構成光学ローパスフィルタ”, テレビ大全, 1-2 (1989)

こにし まさひろ
小西 正弘

1979 年、東北大学通信工学科卒業。同年、富士写真フイルム(株)中央研究所入社、電子映像の基礎研究に従事する。1985 年より電子映像事業部にて、電子スチルカメラおよび、デジタルスチルカメラの製品開発のなかで撮像技術の開発に従事。正会員。