

文章编号:1000-582X(2008)04-0426-06

# 光学 $4f$ 系统的图像空间频率特性

韩亮<sup>1</sup>, 田逢春<sup>1</sup>, 徐鑫<sup>1</sup>, 刘伟<sup>2</sup>, 王宇<sup>1</sup>

(1. 重庆大学 通信工程学院, 重庆 400030; 2. 通信指挥学院, 湖北 武汉 430010)

**摘要:**为将光学小波变换应用于图像压缩,分析光学  $4f$  系统中图像实现方式和图像采集对图像空间频率特性的影响,研究图像频域能量集中特性及其在光学  $4f$  系统中的表现,提出光学  $4f$  系统中图像空间频率特性的相关计算方法。理论分析、仿真计算和光学实验结果表明:用于图像压缩的光学小波变换在频谱面上的空间滤波范围受到输入图像尺寸、近轴条件、光学  $4f$  系统的器件采样特性、图像频域能量集中度以及系统噪声的影响,应根据实际光学  $4f$  系统选择合适的数学小波变换的空间滤波范围。实验结果验证了方法和结论的正确性。

**关键词:**光学信息处理;光学  $4f$  系统;空间频率特性

中图分类号:TN911.74

文献标志码:A

## Spatial frequency characteristics of optical $4f$ system

HAN Liang<sup>1</sup>, TIAN Feng-chun<sup>1</sup>, XU Xin<sup>1</sup>, LIU Wei<sup>2</sup>, WANG Yu<sup>1</sup>

(1. College of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China;  
2. PLA Institute of Communication and Command, Wuhan 430010, P. R. China)

**Abstract:** To achieve image compression with an optical wavelet transform method, we investigated the effects methods of image realization and image capture in an optical  $4f$  system on the spatial frequency characteristics, and studied the characteristics of image energy concentration in the frequency domain of optical  $4f$  system. The relevant calculation methods were thus proposed. The theoretical analysis, simulation and optical experimental results demonstrate that the spatial filtering radius of optical wavelet transformation, which can be applied to image compression, is controlled by various factors. These include the input images size, the adaxial condition, the apparatus sampling characteristics in an optical  $4f$  system, the image energy concentration characteristics in the frequency domain, and the system noise. Thus, the suitable spatial filtering radius should be chosen according to the situation of actual optical  $4f$  system. The methods and conclusions are verified by experimentation.

**Key words:** optical information processing; optical  $4f$  system; spatial frequency characteristics

由于其良好的性能,小波变换在图像压缩、信号处理以及图像处理等领域中有着非常广泛的应用<sup>[1]</sup>,但是,其庞大的计算量制约了小波变换应用的进一步推广。因此,将光学方法与小波变换结合起来,形成光学小波变换方法,可以极大地减少小波变

换所花的时间,这是很有理论和实用价值的。

Quzieli 和 Mendlovic 提出了二维小波变换的光学实现方法<sup>[2]</sup>。光学小波变换的本质是对输入图像的频谱进行空间滤波,以实现信号的多分辨率分析。目前,光学小波变换已经被用于边缘提取<sup>[3]</sup>、特

收稿日期:2007-12-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60472037)

作者简介:韩亮(1975-),男,重庆大学讲师,博士研究生,主要从事图像处理、信息光学方向研究。

田逢春(联系人),男,重庆大学教授,博士生导师,(Tel)023-65106498;(E-mail) fctian@163.com。

欢迎访问重庆大学期刊网 <http://qks.cqu.edu.cn>

征提取<sup>[4]</sup>、模式识别<sup>[5]</sup>等领域,但是,用于图像压缩的光学小波变换还很少出现,其中一个重要的原因就是光学4f系统中的空间频率特性研究不够深入,还有以下一些问题有待解决。

1)边缘提取、特征提取和模式识别等领域的应用主要依赖于对图像的部分特征频率成分的处理,但图像压缩需要处理的是输入图像的全部频率成分。如何选择合适范围的频谱进行空间滤波以满足图像压缩的要求是光学小波变换应用于图像压缩需要解决的首要问题。

2)光学4f系统自身对输入图像的空间频率特性有怎样的影响?这对基于光学4f系统的光学小波变换用于图像压缩又有怎样的影响?

针对这些问题,基于傅立叶光学理论,分析光学4f系统中图像实现方式和图像采集对图像空间频率特性的影响,研究图像频域能量集中特性及其在光学4f系统中的表现,在此基础上,提出光学4f系统中图像空间频率特性的相关计算方法,总结出关于光学4f系统中图像空间频率特性的基本性质的相关结论。为光学小波变换应用于图像压缩建立了良好的理论基础,对光学小波变换在其他领域的应用也有一定的促进作用。

## 1 利用光学4f系统实现光学小波变换

光学小波变换常用光学4f系统(如图1所示)实现<sup>[6]</sup>。图1中, $f$ 为傅立叶透镜焦距; $P_1$ 平面,又称作输入面( $xy$ 平面); $P_2$ 平面,又称作频谱面( $uv$ 平面); $P_3$ 平面,又称作输出面( $\alpha\beta$ 平面)。

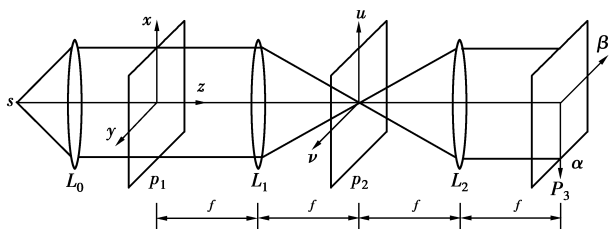


图1 光学4f系统示意图

笔者实验使用的光学4f系统的参数为:激光光源波长 $\lambda=632.8\text{ nm}$ ;透镜焦距 $f=400\text{ mm}$ ;胶片两相邻像素间距 $d_f=0.008\ 333\text{ mm}$ ;空间光调制器(spatial light modulators, SLM)两相邻像素间距 $d_{\text{SLM}}=0.013\ 89\text{ mm}$ ;输出面使用Canon350D采集实验结果,其电荷耦合器件(charge coupled device, CCD)两相邻像素间距 $d_{\text{CCD}}=0.006\ 424\text{ mm}$ 。笔者的计算和分析均以此为准。

利用光学4f系统实现光学小波变换的原理如下:将输入图像 $f(x, y)$ 置于输入面,则经傅立叶透镜 $L_1$ ,在频谱面将出现它的谱 $F(u, v)$ ;在频谱面放置小波滤波器 $\psi(x, y)$ 的谱的共轭 $\Psi^*(u, v)$ ,则形成 $F(u, v)\Psi^*(u, v)$ ;再经过第二个傅立叶透镜 $L_2$ ,在输出面得到它的傅立叶逆变换,即输入图像的小波变换 $f(x, y)\otimes\psi(x, y)$ 。

## 2 空间频率

空间频率可以用空间周期的倒数来表示,单位为lp/mm。对于数字图像,假定相邻两像素间距为 $d_i$ ,则其采样频率为

$$f_s = \frac{1}{d_i} \quad (1)$$

当采样频率确定后,采样信号所能表现的最大的信号频率为采样频率的一半。因此,相邻两像素间距为 $d_i$ 的数字图像所能表示的信号的最大空间频率为

$$f_i = \frac{1}{2d_i} \quad (2)$$

平面波的空间频率是傅立叶光学中常用物理量。设平面波的波长为 $\lambda$ ,透镜的焦距为 $f$ ,波矢量为 $\vec{k}$ ( $\vec{k}$ 的方向余弦为 $\cos\alpha, \cos\beta, \cos\gamma$ ),在满足近轴条件的情况下,若透镜前焦面的输入信号为 $f(x, y)$ ,则在透镜的后焦面可以近似得到<sup>[7]</sup>

$$F(u_d, v_d) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) e^{-j2\pi\left(\frac{u_d}{\lambda f}x + \frac{v_d}{\lambda f}y\right)} dx dy \quad (3)$$

其中 $u_d \approx f \cos\alpha, v_d \approx f \cos\beta$ ,为傅立叶透镜后焦面上的坐标。由信号的角谱与信号的空间频率关系可知: $f_x = \frac{\cos\alpha}{\lambda}, f_y = \frac{\cos\beta}{\lambda}$ 。因此,信号的频率 $f_e$ 与对应于频谱面上的坐标 $u_e$ 关系如下

$$u_e \approx f \times \lambda \times f_e, \quad (4)$$

$$f_e \approx \frac{u_e}{f\lambda} \quad (5)$$

## 3 光学4f系统的图像空间频率特性分析

### 3.1 光学4f系统中器件采样特性的影响

使用胶片或空间光调制器实现输入图像和光学小波滤波器时都对所实现的信号进行了采样;使用CCD采集光学小波变换结果也对其进行了采样。

以笔者使用的实验系统为例,具体分析如下。

1)使用胶片实现输入图像。胶片实现方式对光学4f系统中输入图像的空间频率范围的限制如表1

所示。

由表1可知:在输入面对输入图像采样限定了光学 $4f$ 系统所需要处理的图像的最高频率,理论上只需要对有限空域范围(对应于输入图像所表示的最大空间频率)进行光学小波空间滤波,就可以利用输出面采集到的光学小波变换结果高质量地重建输入图像。

表1 由胶片实现的输入图像的空间频率特性

加工方式 <sup>1)</sup>	采样频率 $/(lp \cdot mm^{-1})$	$r_1/mm^2$	所能表示 的信号最 大频率	
			$r^2/mm^3$	$/(lp \cdot mm^{-1})$
逐点加工	120	30.374 4	60	15.187 2
按 $2 \times 2$ 的 方块加工	60	15.187 2	30	7.593 6
按 $4 \times 4$ 的 方块加工	30	7.593 6	15	3.796 8

说明:1)加工方式表示输入图像像素点与胶片像素点的关系;

2) $r_1$ 为采样频率对应的频谱面坐标绝对值;

3) $r_2$ 为所能表示的信号最大频率在频谱面对应的坐标绝对值。

由于近轴条件限制,在频谱面上半径小于7.6 mm的范围内,信号频谱的精度较高<sup>[8]</sup>。由表1可知:输入图像的采样频率低于30 lp/mm就可以满足该要求。光学 $4f$ 系统中输出面的信号为频谱面上信号的傅立叶变换,因此输入图像的尺寸也应小于该范围。

2)使用SLM实现光学小波滤波器。在频谱面对光学小波滤波器采样将导致光学小波变换结果在输出面上的周期延拓。SLM的采样频率为72 lp/mm,光学小波变换结果周期延拓的空间周期为18.224 6 mm

(水平和垂直方向)。因此输入图像的小波变换结果的尺寸要小于 $18.224 6 mm \times 18.224 6 mm$ 。

3)使用Canon350D采集光学小波变换结果。在输出面对光学小波变换结果采样限定了光学 $4f$ 系统所能够处理的图像的最高频率。其CCD采样频率为155.68 lp/mm,能正确重现的信号的频率为77.84 lp/mm,CCD至多能正确反映频谱面上的坐标半径为19.702 3 mm范围以内的频率成分。实现输入图像的采样频率应该小于CCD采样频率。

对图像采样会将其频谱限制在采样频率的一半范围以内,等效于经过一个低通系统,所以由模拟图像得到数字图像总会存在能量损失;光学 $4f$ 系统中的器件采样特性决定了光学 $4f$ 系统也是一个低通系统,利用光学 $4f$ 系统实现图像的光学小波变换时也会有能量损失,只需要将这种损失控制在可以接受的范围以内,就能将光学小波变换应用于图像压缩。

### 3.2 输入图像频域能量集中度的影响

#### 3.2.1 输入图像频域能量集中度与对应图像重建质量及空间滤波半径的关系

图像的能量主要集中在低频部分,对一些标准测试图像进行关于频域能量集中度的Matlab仿真分析,具体方法如下。

1)按指定的频域能量比例(输入图像低频范围能量与全部能量的比例),滤除输入图像的高频分量,保留低频分量,然后重建图像,计算重建图像与输入图像之间的PSNR,并计算其对应的在频谱面上的空间滤波半径。实验结果见表2。

2)按指定的在频谱面上的空间滤波半径,滤除输入图像的高频分量,保留低频分量,然后重建图像,计算重建图像与输入图像之间的PSNR。实验结果见表3。

表2 图像频域能量集中度所对应的图像重建质量及空间滤波半径

图片名称	胶片采样频率 $/(lp \cdot mm^{-1})$	99.00%的能量集中度		99.90%的能量集中度		99.99%的能量集中度	
		空间滤波半径/mm	PSNR/dB	空间滤波半径/mm	PSNR/dB	空间滤波半径/mm	PSNR/dB
LENA256	30	0.97	27.21	2.39	37.18	3.12	46.96
Photography	30	1.15	25.59	2.53	35.57	3.14	45.45
Testpat	30	0.89	25.03	1.94	35.01	2.65	44.85
BABOO	60	3.69	25.37	5.67	35.35	6.68	45.20
PEPPERS	60	0.84	25.81	4.34	35.79	6.56	45.62
Boat	60	1.23	25.35	4.22	35.33	6.18	45.16
Elaine	60	0.49	24.99	4.05	34.95	5.99	44.81

表3 图像空间滤波半径所对应的图像重建质量

图片名称	胶片采样频率 (lp·mm <sup>-1</sup> )	空间滤波半径对应的图像重建 PSNR/dB									
		0.25 mm	0.50 mm	1.00 mm	1.50 mm	2.00 mm	2.50 mm	3.00 mm	3.50 mm	4.00 mm	5.00 mm
LENA256	30	20.23	23.48	27.50	30.65	33.98	38.36	45.29	54.67	∞	∞
Photography	30	19.38	21.64	24.68	27.56	30.76	35.23	43.38	52.22	∞	∞
Testpat	30	12.62	19.10	26.39	31.55	35.45	40.57	56.78	79.96	∞	∞
BABOO	60	17.93	18.69	19.60	20.42	21.36	22.37	23.54	24.83	26.30	30.32
PEPPERS	60	19.90	23.20	26.69	28.69	30.16	31.33	32.44	33.58	34.81	38.27
Boat	60	19.99	22.06	24.39	26.40	28.35	30.09	31.69	33.17	34.67	38.29
Elaine	60	21.18	25.14	28.76	30.60	31.68	32.52	33.12	33.87	34.88	36.65

由表2、3可知:

1)图像的主要能量集中在低频段附近,利用图像低频段的部分能量就可以高质量地重建图像。

2)同一图像,能量集中度越高,对应的重建PSNR也越高;不同的图像,能量集中度相同,但对应的重建PSNR一般不同。图像重建质量不仅与能量集中度有关,还与频域能量的具体分布有关。

3)同一图像,进行低通滤波的空间滤波半径越大,对应的重建PSNR越高。

### 3.2.2 图像不同尺寸与对应图像重建质量的关系

对于不同尺寸的标准输入图像LENA,其像素

点相同,采样频率不同。对不同尺寸的LENA图像进行仿真分析,方法如下:按指定的在频谱面上的空间滤波半径,滤掉输入图像的高频分量,保留低频分量,然后重建图像,计算重建图像与输入图像之间的PSNR。所得的实验结果见表4。

由表4可知:同一图像,尺寸越大,在使用相同的空域滤波半径进行低通滤波时,重建图像的质量越高。这是因为同一图像尺寸越大,在频域能量就越集中,以相同截止频率进行低通滤波后所保留的能量就越多。

表4 不同尺寸的LENA空间滤波时所对应的重建图像质量

采样频率 (lp·mm <sup>-1</sup> )	图像尺寸 (mm×mm)	空间滤波半径对应的图像重建 PSNR/dB									
		0.25 mm	0.50 mm	1.00 mm	1.50 mm	2.00 mm	2.50 mm	3.00 mm	3.50 mm	4.00 mm	5.00 mm
120	2.13×2.13	15.14	17.24	20.23	21.96	23.48	24.72	25.60	26.21	27.46	29.06
60	4.27×4.27	17.24	20.23	23.48	25.60	27.50	29.06	30.65	32.20	33.98	38.39
30	8.53×8.53	20.23	23.48	27.46	30.65	33.98	38.39	45.29	54.67	∞	∞

## 4 光学4f系统的图像空间频率特性的光学实验

### 4.1 SC(sierpinski carpet)分形图片的空间频率特性

为便于观察,使用由胶片制作生成的迭代4次的SC分形图片(如图2所示)作为输入图像进行实验。采用逐点加工方式,采样频率为120 lp/mm。

利用如图1所示的光学4f系统,在输入面上放置用胶片制作的SC分形图片;在频谱面上由空间光调制器生成不同孔径的圆形光阑和圆环,对输入的SC分形图片进行空间滤波;在输出面上用CCD采集实验结果。SC分形图片中各种像元代表的频率在频谱面上的坐标如表5所示,对实验结果的分析

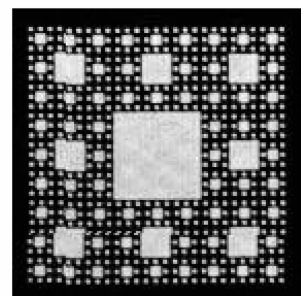


图2 迭代4次的SC分形图片

论分析如表6所示,CCD上采集到的光学实验的结果如图3所示。

表 5 SC 分形图片像元空间频率计算结果

像元类型	方向	两像元点之间 间距/mm	对应频率 /(lp·mm <sup>-1</sup> )	对应谱面 坐标/mm
最小		0.333	3.000	0.760 0
次小	水平与	0.933	1.071	0.271 0
次大	垂直	2.733	0.366	0.092 6
最大		∞	0	0

对比表 6 和图 3,可知:光学实验结果与理论分析是一致的。这表明所采用的关于光学  $4f$  系统中的图像空间频率的计算和分析方法是正确的。

表 6 SC 分形图片滤波实验分析结果

SC 分形图 片滤波实验	低通滤波半径/mm			带通滤波半径/mm	
	0.15	0.65	1.50	0.15~0.55	0.55~1.50
CCD 采集 到的像元	最大、 次大	最大、 次大、 次小	全部	次小	最小
滤波滤除 的像元	最小、 次小	最小	无	最大、 次大、 最小	最大、 次大、 次小

表 7 光学  $4f$  系统中空间滤波半径对应的图像重建质量

图片名称	胶片采样频率 /(lp·mm <sup>-1</sup> )	空间滤波半径对应的图像重建 PSNR/dB									
		0.25 mm	0.50 mm	1.00 mm	1.50 mm	2.00 mm	2.50 mm	3.00 mm	3.50 mm	4.00 mm	5.00 mm
LENA256	30	16.85	19.27	21.11	21.66	21.75	21.47	21.33	21.34	21.39	21.35
Photography	30	15.52	17.12	18.16	18.52	18.58	18.65	18.62	18.53	19.20	19.19
Testpat	30	10.89	15.32	19.53	20.71	20.83	20.76	20.80	20.68	20.72	20.67
BABOO	60	15.36	16.45	17.26	17.55	17.76	17.80	17.77	17.75	17.73	17.72
PEPPERS	60	16.16	18.80	20.64	21.30	21.63	21.52	21.41	21.37	21.38	21.35
Boat	60	15.79	17.67	18.91	19.36	19.45	19.33	19.25	19.15	19.10	19.20
Elaine	60	17.17	19.71	21.76	22.36	22.34	22.13	22.09	22.03	22.02	22.05

对比表 3、7 可知:

1) 对于使用相同的空间滤波半径进行低通滤波后,在实际光学  $4f$  系统中得到的图像的质量要小于理论分析的结果。

2) 在空间滤波时,所使用的理想低通滤波器半径较小时,光学实验结果和理论计算结果比较接近;所使用的理想低通滤波器半径较大时,光学实验结果和理论计算结果相差较大。

3) 同一图像,空间滤波半径较小时,CCD 采集到的图像的质量随空间滤波半径增大而提高,这与节 3.2.1 的分析是一致的;但是,空间滤波半径较大时,CCD 采集到的图像的质量反而随空间滤波半径增大而减小;空间滤波半径为 2.0~3.0 mm 时,CCD 采集到的图像的质量最高。

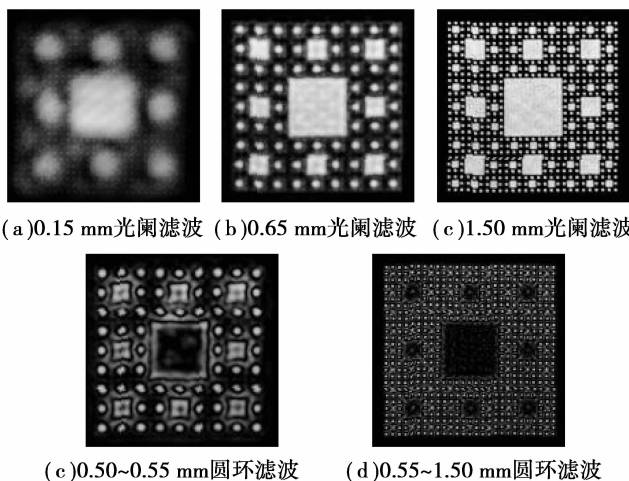


图 3 对 SC 分形图片空间滤波的光学实验结果

## 4.2 基于光学 $4f$ 系统的标准图像的空间频率特性

### 4.2.1 标准图像的空间频率特性

利用如图 1 所示的  $4f$  系统,在输入面放置用胶片制作的标准输入图像;在频谱面由空间光调制器生成不同半径的理想低通滤波器,对输入的图像进行空间滤波;在输出面上用 CCD 采集实验结果,并计算其与标准输入图像之间的 PSNR。实验结果如表 7 所示。

4) 在实际光学  $4f$  系统中,空间滤波后在 CCD 采集到的图像的 PSNR 最高只有 20 dB 多一点,还需要有效提高整个光学  $4f$  系统的质量。

产生上述结果的原因是:在实际光学  $4f$  系统中存在噪声;而且由于图像能量主要集中于低频段<sup>[9-10]</sup>,高频段的信噪比要低于低频段的信噪比。因此,光学小波变换在频谱面上的空间滤波半径增加到一定程度后,图像的重建质量会达到一个极大值,再增加空间滤波半径并不能有效提高图像的重建质量,反而可能有所降低。应该根据光学实验结果选择合适的光学小波变换在频谱面上的空间滤波范围。

### 4.2.2 不同支集长度的图像的空间频率特性

使用胶片加工的不同尺寸的 LENA 作为输入图像,图像像素点为  $256 \times 256$ 。利用如图 1 所示的  $4f$  系统,首先在输入面上放置用胶片制作的输入图

像;然后在频谱面上由空间光调制器生成不同半径的理想低通滤波器,对输入的图像进行空间滤波;最后在输出面上用 CCD 采集实验结果,并计算其与标准输入图像之间的 PSNR。实验结果如表 8 所示。

表 8 光学  $4f$  系统中不同尺寸的 LENA 所对应的图像重建质量

采样频率 /(lp·mm <sup>-1</sup> )	图像尺寸 /(mm×mm)	空间滤波半径对应的图像重建 PSNR/dB										
		0.25 mm	0.5 mm	1.00 mm	1.50 mm	2.00 mm	2.50 mm	3.00 mm	3.50 mm	4.00 mm	5.00 mm	
120	2.13×2.13	13.70	14.94	16.76	17.39	17.62	17.71	17.77	17.67	17.61	17.60	
60	4.27×4.27	14.75	16.82	18.19	18.62	18.85	18.88	19.00	19.01	19.16	19.11	
30	8.53×8.53	16.19	18.22	18.12	21.62	21.64	21.44	21.41	21.31	21.45	21.18	

### 4.3 空间光调制器的空间周期延拓效应

采用平行单色光照明,在傅立叶透镜前焦面上放置 SLM,将 SLM 所有像素均置为 255(全白);在傅立叶透镜后焦面上采用 CCD 采集实验结果。一束平行光经由全白的空间光调制器后,在傅立叶透镜的作用下,将在频谱面中心形成一个冲激点。由于 SLM 的采样特性,该冲激点将以 18.224 6 mm 的空间周期进行周期延拓。

光学实验结果如图 4 所示,经过测量,频谱面中心冲激点和第一级周期延拓冲激点的距离约为 18.2 mm,光学实验结果与节 3.1 的理论分析一致。

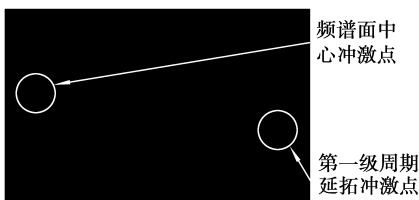


图 4 CCD 上采集到的冲激点周期延拓示意图

## 5 结 论

1)在实际的光学  $4f$  系统中,用于图像压缩的光学小波变换在频谱面上的空间滤波范围受到输入图像尺寸、近轴条件、光学  $4f$  系统的器件采样特性、图像频域能量集中度以及系统噪声的影响,既不能太小,也不能太大,应该根据光学实验结果选择合适的光学小波变换的空间滤波范围。

2)选择较大尺寸的输入图像,有助于提高光学小波变换结果的精度;但输入图像尺寸也不能太大,以满足近轴条件,并避免其光学小波变换的结果在输出面产生混迭。

对光学  $4f$  系统中图像的空间频率特性的有效分析,不仅为光学小波变换应用于图像压缩提供了理论分析基础,更重要的是提供了基于光学  $4f$  系统

由表 8 可知:同一图像,尺寸不同,采用相同空间滤波半径进行低通滤波后,在 CCD 上采集到的尺寸较小的图像的质量要比尺寸较大的差,这与节 3.2.2 的分析是一致的。

的图像的空间频率的分析方法以及理论依据,促进了光学小波变换在图像处理中的应用。

### 参考文献:

- [1] MALLAT S. A wavelet tour of signal processing[M]. Beijing: China Machine Press, 2003: 11-17.
- [2] OUZIELI I, MENDLOVIC D. Two-dimensional wavelet processor [J]. Applied Optics, 1996, 35(29): 5839-5846.
- [3] HONMA H, NOSE T, SATO S. Liquid crystal polarization-converting devices for edge and corner extractions of images using optical wavelet transforms [J]. Applied Optics, 2006, 45(13): 3083-3090.
- [4] PAL H S, GANOTRA D, NEIFELD M A. Face recognition by using feature-specific imaging [J]. Applied Optics, 2005, 44(18): 3784-3794.
- [5] DOH Y H, YOON J S, CHOI H K, et al. Optical security system for the protection of personal identification information [J]. Applied Optics, 2005, 44(5): 742-750.
- [6] 张琳丽,盛利. 基于光学子波变换的 SDF 匹配滤波器 [J]. 光学技术, 2007, 33(1): 156-158.  
ZHANG LIN-LI, SHENG LI. SDF matching filter based on optical wavelet transform [J]. Optical Technique, 2007, 33(1): 156-158.
- [7] 宋菲君, JUTAMULIA S. 近代光学信息处理 [M]. 北京: 北京大学出版社, 1998, 16-25.
- [8] TIAN F C, XU X, XUE F, YANG S X. The size limitation on input image of  $4f$  system in applications of optical image data compression [C] // Proceedings of International Conference on Sensing, Computing and Automation ICSCA 2006 Chongqing, China. Waterloo, Canada: Watam Press, 2006, (5): 2208-2211.
- [9] 容观澳. 计算机图像处理 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [10] 阮秋琦. 数字图像处理学 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.

(编辑 赵 静)