

用光学方法实现图像数据压缩时 对滤波器的精度要求

田逢春^{1),2)} 陈修建¹⁾ 孟书苹¹⁾

¹⁾(重庆大学通信工程学院, 重庆 400044) ²⁾(重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044)

摘要 为了使光学滤波器在空间频域进行小波变换时,能满足图像压缩的精度要求,通过利用光学滤波器在空间频域进行小波变换(或其他变换)来实现图像数据压缩时对滤波器的特殊要求的研究,结合人眼视觉特性(HVS)及视觉感知图像质量评价方法,推导并得出了用光学滤波器来实现图像数据压缩时的精度误差上限的估计值,从而为设计用于高质量图像数据压缩的此类光学滤波器提供了依据,仿真实验证实,光学滤波器能满足图像数据压缩的精度要求。

关键词 光学滤波器 小波变换 图像数据压缩 相对误差 人眼视觉特性

中图分类号: TN919.8 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2005)09-1190-07

The Accuracy Requirement on Optical Filter Used in Image Data Compression

TIAN Feng-chun^{1),2)}, CHEN Xiu-jian¹⁾, MENG Shu-ping¹⁾

¹⁾(College of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044)

²⁾(Key Laboratory of Opto-electronic Technology and Systems of the Educational Ministry of China, Chongqing University, Chongqing 400044)

Abstract We studied the specific requirements on optical wavelet filter in spatial frequency domain for image data compression based on human visual system (HVS) and image perceptual quality evaluation criteria. The upper boundary estimation of the optical wavelet filter in frequency domain was derived and verified by simulation. It will be the bases in designing such kind of optical filter for high quality image data compression.

Keywords optical filter, wavelet transform, image data compression, relative error, human visual specificity

1 引言

用光学方法实现小波变换(或其他变换)具有并行性和高速实时性的特点,目前国际上报导的有关该内容的论文很多,但主要是用于模式识别、边缘增强、特征提取等,而对于用光学小波变换法实现图像数据压缩则很少报道,其主要原因是它对滤波器

的精度要求远比其他应用高得多。因此,在图像数据压缩应用中对光学滤波器有哪些特殊要求?对其精度要求究竟有多高?则需要定量地描述。由于人眼视觉特性对误差有一定的容忍度,或者说在误差小于某个阈值时不能被人眼分辨,因此可以利用这一性质,推导出在不超过这个阈值下所容许滤波器的最大误差,以便为今后设计用于高质量图像数据压缩的光学小波滤波器提供依据。

基金项目:教育部高等学校骨干教师资助计划项目(GG-510-10611-1031),重庆市应用基础研究项目(7344)

收稿日期:2004-01-08;改回日期:2005-03-24

第一作者简介:田逢春(1963~),男,教授,博士生导师。1996年获重庆大学博士学位,主要研究领域为信号处理、生物信息学、电子鼻、通信技术。获“全国优秀科技图书奖”暨科技进步奖(科技著作)二等奖、教育部科技进步二等奖1项,发表论文40多篇,出版专著/教材3部。

E-mail: fctian@163.com

2 频域滤波光学实现的结构

设 2 维小波为 $h(x, y)$, 输入图像像素灰度 (亮度) 为 $g(x, y)$, 则其小波变换为

$$W_g(a_x, a_y, b_x, b_y) = \frac{1}{\sqrt{a_x a_y}} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} g(x, y) h^* \left(\frac{x - b_x}{a_x}, \frac{y - b_y}{a_y} \right) dx dy \quad (1)$$

其中, a_x, a_y, b_x, b_y 分别表示 x, y 方向的尺度伸缩因子和位移, $h^*(x, y)$ 是 $h(x, y)$ 的复共轭, $H^*(a_x u, a_y v)$ 是 $H(a_x u, a_y v)$ 的复共轭, 则式 (1) 的空间频域实现方式可表达为

$$W_g(a_x, a_y, b_x, b_y) = \sqrt{a_x a_y} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} G(u, v) \times H^*(a_x u, a_y v) e^{i2\pi(b_x u + b_y v)} du dv \quad (2)$$

采用光学空间频域法实现图像数据压缩的框图如图 1 所示。

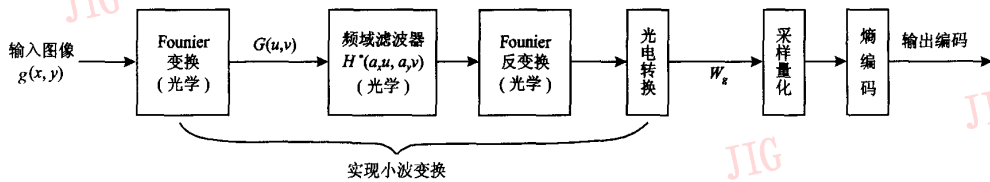


图 1 用光学方法实现图像数据压缩

Fig. 1 The structure of image compression using optical method

一个采用 4f 相关光学处理器实现的 2 维小波变换框图如图 2 所示 (图中的 f 代表透镜的焦距), 只要在傅里叶谱面 P_2 上放置一系列小波匹配滤波器 $H^*(a_x u, a_y v)$, 然后将图像从输入面 P_1 上输入, 经透镜 L_1 实现光学 Fourier 变换后, 其频谱在谱面上与小波滤波器相乘, 再经过透镜 L_2 的 Fourier 反变换, 最后在输出面 P_3 上就得到对应不同尺度因子的小波变换。由于利用 Damman 光栅^[1]或微透镜阵列^[2]可以得到多个输入图像, 因此可以一次实现多个不同尺度 a_x, a_y 下的小波变换。本方法的难点和关键是能否设计出满足要求的光学频域形式的小波滤波器 $H^*(a_x u, a_y v)$ 。

需要满足传统小波变换法需满足的条件外, 还需满足光学方法的特殊要求。

用传统小波变换实现图像数据压缩需满足以下条件:

- (1) 小波的容许条件;
- (2) 精确重建条件;
- (3) 线性相位;
- (4) 正则性。

光学方法的特殊要求为

- (1) 实函数便于实现;
- (2) 精度误差。

传统小波变换方法的条件有很多文章进行了讨论, 本文仅就采用光学滤波器实现图像数据压缩时的特殊要求进行研究。

3.1 滤波器的频域形式

光学滤波器可用灰度级来表示滤波器的幅度大小, 若 $H^*(a_x u, a_y v)$ 是复函数, 则其相位用普通的灰度表示方法就无法表示, 此时须采用夫朗和费 (Fraunhofer) 全息图法, 但实现较为困难, 大多数研究者都尽量避开这种情况^[3], 因此要求 $H(a_x u, a_y v)$ 尽量采用实函数。对于 $H^*(a_x u, a_y v)$ 为实函数的情况, 又分为以下两种情况:

- (1) $H^*(a_x u, a_y v)$ 是正实函数, 这是最理想的情况, 此时可直接用灰度级来表示 $H^*(a_x u, a_y v)$ ^[3];
- (2) $H^*(a_x u, a_y v)$ 是正负相间的实函数,

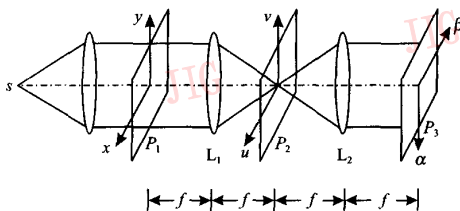


图 2 实现 2 维光学小波变换的 4f 系统

Fig. 2 A typical optical 4f system for 2-D WT

3 对光学滤波器的要求

采用光学空间频域法实现图像数据压缩时, 除

可采用如下方法来表示:令

$$H_1^*(a_x u, a_y v) = H^*(a_x u, a_y v) + C \quad (3)$$

其中, $C = -\min_{u,v} H^*(a_x u, a_y v)$

则必有 $H_1^*(a_x u, a_y v) \geq 0$; 若用 $H_1^*(a_x u, a_y v)$ 代替 $H^*(a_x u, a_y v)$, 则在 P_3 平面上得到的是

$$\begin{aligned} \hat{W}_g(a_x, a_y, b_x, b_y) &= \sqrt{a_x a_y} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} G(u, v) \times \\ &H_1^*(a_x u, a_y v) e^{j2\pi(b_x u + b_y v)} dudv \\ &= W_g(a_x, a_y, b_x, b_y) + Cg(x, y) \end{aligned}$$

此时只要在计算机中减去其中的 $Cg(x, y)$ 即可, 这样即使将结果离散化后也比直接由计算机执行离散小波变换 (discrete wavelet transform, DWT) 的时间快。设原始图像离散化后的尺寸为 $M \times N$, 以第 1 级小波变换为例, 根据文献 [4] 可推出, 传统的 2 维 DWT 所需的加法运算和乘法运算量都为 $O(kN \times M)$, $k > 10$ 。

与传统离散小波变换相比, 实现光学小波变换的时间可忽略不计, 只是在 $H^*(a_x u, a_y v)$ 是正负相间的实函数时, 才需要考虑在计算机中减去 $Cg(x, y)$ 再离散化后的运算量 (忽略 $g(x, y)$ 采样量化的时间), 其加法运算和乘法运算量都为 $M \times N$ 次。可见采用光学方法仍然比传统小波变换方法减少了 10 倍以上的运算量。

3.2 精度误差

在用光学法实现小波变换时, 滤波器常用的实现方法有:

- (1) 光栅法;
- (2) 由计算机产生的数字全息图法^[5];
- (3) 用激光或喷墨打印机在专用胶片上打印^[6];
- (4) 利用液晶电视 (LCTV) 的联合变换相关器 (joint transform correlator, JTC) 纯相位法^[3]。

上述方法的共同特点是误差较大, 它们主要用于图像模式识别中^[7-9], 在这些应用中, 由于不需要恢复/重建原始图像, 只需提取出图像的某些特征或作边缘检测等^[10], 因此对滤波器的误差没有太高的要求。但在图像数据压缩的情况下, 这种误差则无法忍受。虽然文献 [3] 也提到用方法 (4) 进行图像重建, 但由于未给出其重建图像质量, 且由于其高次互相关项的存在, 因而必然引入较大的误差。在图 1 所示系统中, 除了编码部分外, 影响重建图像质量的关键环节是频域滤波部分 $G(u, v) H^*(a_x u, a_y v)$, 假定 $H^*(a_x u, a_y v)$ 的误差为 $\Delta H^*(a_x u, a_y v)$,

那么, 对光学滤波器 $H^*(a_x u, a_y v)$ 而言, 多大的误差 $|\Delta H^*(a_x u, a_y v)|$ 或相对误差 $\left| \frac{\Delta H^*(a_x u, a_y v)}{H^*(a_x u, a_y v)} \right|$ 可以接受呢?

$\Delta H^*(a_x u, a_y v)$ 在频域引起的误差为

$$e_H = \Delta H^*(a_x u, a_y v) \times G(u, v)$$

在选用滤波器前, 首先需要确定人眼可容忍的频域误差 e_H 的大小。这需要涉及人眼视觉特性 (human visual system, HVS), 也就是说, 当滤波器误差造成的重建图像误差使人不能察觉时, 则可认为该图像压缩方法是视觉感知上 (perceptual) “无损的”。目前主要考虑以下几个因素: 人眼视觉对比度灵敏度函数、亮度屏蔽效应、对比度屏蔽效应。

3.2.1 人眼视觉对比度灵敏度函数

人眼视觉对比度灵敏度函数反映了人眼对空间频率 (包括方向) 的敏感程度, 可用下式表达^[11]:

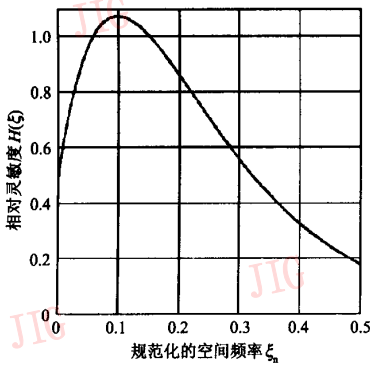
$$H(\xi) = 2.6(0.192 + 0.114\xi) e^{[-(0.114\xi)^{1.1}]} \quad (4)$$

其中, 空间频率 $\xi = (\xi_x^2 + \xi_y^2)^{1/2}$, 其单位为 cycles/degree, 设

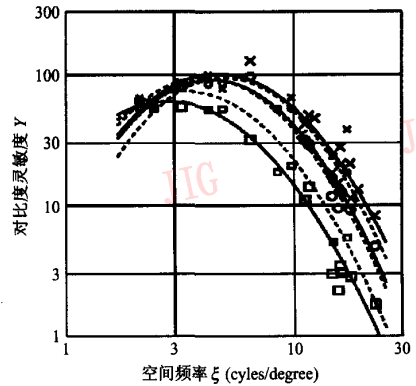
$$\xi_n = \xi / \xi_s \quad (5)$$

ξ_n 是规范化的空间频率 (下角 n 代表 normal), 其取值范围为 $0 \sim 0.5$, ξ_s (下角 s 代表 sample) 设置为 64 cycles/degree。通常 ξ_s 的值等效于观察距离为 4 倍图像高度时的情况, ξ 取值范围为 $0 \sim \xi_s/2$, $H(\xi)$ 的曲线如图 3(a) 所示。 $H(\xi)$ 的倒数 $T_{eye}(\xi)$ 就是人眼视觉误差的阈值, 即重建后的图像误差不应超过 $T_{eye}(\xi)$, 从图 3(a) 中可看出, 由于 $H(\xi)$ 曲线的极大值点就是 $T_{eye}(\xi)$ 的极小值点, 因此只要 $\Delta H^*(a_x u, a_y v) \times G(u, v)$ 的反变换后的幅度值不超过 $T_{eye}(\xi)$ 的极小值就可满足要求。图 3(a) 的 CSF (contrast sensitivity function) 曲线在利用人眼视觉特性对小波变换域中不同部分进行加权非常有用^[11], 例如可以判断, 相对灵敏度最大的空间频率 (规范化的 ξ_n) 约为 0.1, 它是在第 3 级小波变换所处的频带中出现。但其对本文中用于估计 $H^*(a_x u, a_y v)$ 的相对误差则不方便。

为讨论方便起见, 下面首先考虑 DCT (discrete cosine transform) 变换下的情形。图 3(b) 表示非规范化的 CSF 曲线 ($Y = L/T_f$ 与空间频率 ξ 的关系, L 为亮度, T_f (下角 f 代表 frequency) 为人眼视觉的频域误差阈值), 图中 “x”、“菱形”、“方块” 分别代表 R、G、B 3 个分量; 实线代表式 (7) 预测的结果, 虚线代表实测结果。图 3(b) 中的空间频率 ξ 既可代表



(a) 规范化 CSF 曲线



(b) 非规范化的 CSF 曲线

图 3 规范化 CSF 曲线与非规范化 CSF 曲线

Fig. 3 Normalized CSF curve and non-normalized CSF curve

水平方向,也可代表垂直方向的空间频率,将 ξ, T_f 分别离散化为 $\xi_{m,n}, T_{m,n} (m, n = 0, \dots, N-1)$, m, n 分别代表水平、垂直方向的离散样点的坐标序号,则频域误差 e_H 在空域引起的误差表现形式为

$$E_{m,n}(x,y) = e_H \cos\left(\frac{\pi m}{2Nw_x}[2x+1]\right) \times \cos\left(\frac{\pi n}{2Nw_y}[2y+1]\right) \quad (6)$$

其中, $0 \leq x < Nw_x, 0 \leq y < Nw_y, w_x, w_y$ 分别为像素在水平方向和垂直方向的宽度, N 为 DCT 变换中图像块的大小(DCT 将图像分为 $N \times N$ 大小的方块)。图 3(b) 的物理意义在于:只有当 $e_H > T_{m,n}$ 时,人眼才能察觉 $E_{m,n}(x,y)$ 的存在(称 $e_H < T_{m,n}$ 为“视觉上的无损压缩”条件)。从文献[12]可得到

$$\log T_{m,n} = \log\left(\frac{T_{\min}}{r + (1-r)\cos^2\theta}\right) + K(\log\xi_{m,n} - \log\xi_{\min})^2 \quad (7)$$

$m, n = 0, \dots, N-1$

式中, $\theta = \arcsin\left(\frac{2\xi_{m,0}\xi_{0,n}}{\xi_{m,n}^2}\right)$, $T_{m,n}$ 代表频率为 $\xi_{m,n}$ 时的频域误差阈值, r 为考虑 θ 影响的权重因子, T_{\min} 为 $\xi_{m,n} = \xi_{\min}$ 时的频域误差阈值,即图 3(b) 中曲线的极大值点。由于 $0 \leq r \leq 1$, 所以

$$\frac{T_{\min}}{r + (1-r)\cos^2\theta} = \frac{T_{\min}}{r\sin^2\theta + \cos^2\theta} \geq T_{\min}$$

可见式(7)的最小值就是 $\log T_{\min}$ 。若 $e_H < T_{m,n}$, 则必有所有的 $e_H < T_{m,n}$ 。因此若能求出 T_{\min} , 则可以

估计出 $\left| \frac{\Delta H^*(a_x u, a_y v)}{H^*(a_x u, a_y v)} \right|$ 的最小值,但 $T_{m,n}, T_{\min}$ 随亮

度 L 会发生变化,这是由亮度屏蔽效应所引起的。

3.2.2 对比度屏蔽效应

图像中某分量视觉误差阈值会随着另一个分量的出现而增大,并可用下式表示对比度屏蔽效应^[13]:

$$\hat{T}_{m,n,k} = \max[T_{m,n,k} | c_{m,n,k} | \gamma_{m,n} T_{m,n,k}^{1-\gamma_{m,n}}] \quad (8)$$

式中, $\hat{T}_{m,n,k}$ 表示第 k 块图像考虑对比度屏蔽效应后的频域误差阈值, $c_{m,n,k}$ 为第 k 块图像经 DCT 变换后的系数, $\gamma_{m,n}$ 表示对比度屏蔽效应的程度,若 $\gamma_{m,n} = 0$, 则表示没有对比度屏蔽效应。图 4 表示 $T_{m,n,k} = 2, \gamma_{m,n} = 0.7$ 时, $\hat{T}_{m,n,k}$ 随 $c_{m,n,k}$ 变化的曲线。从中可看出,因为由对比度屏蔽效应引起的是频域误差阈值增大,所以始终有 $\hat{T}_{m,n,k} \geq T_{m,n,k}$ 。

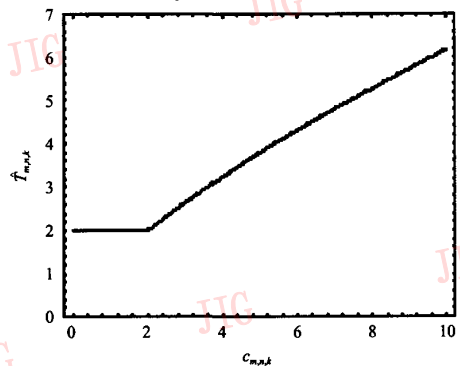


图 4 $\hat{T}_{m,n,k}$ 曲线图,其中 $\gamma_{m,n} = 0.7, T_{m,n,k} = 2$

Fig. 4 The curve of $\hat{T}_{m,n,k}$, where $\gamma_{m,n} = 0.7, T_{m,n,k} = 2$

从对比度屏蔽效应可看出,由于频域误差阈值是频域系数的单调增函数或单调不减函数,因此在设计

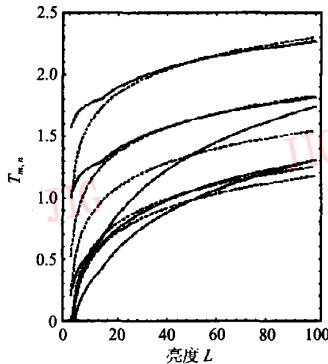
空间频域光学滤波器时,只需考虑最坏情况下对滤波器误差精度的要求,即只需考虑 $T_{m,n,k}$ 最小时的情况。

3. 2. 3 亮度屏蔽效应

亮度屏蔽效应是指人眼的视觉误差阈值随着背景亮度的增加而增加。在 DCT 中,图像的每个方块的平均亮度的变化将使其 DCT 变换系数的阈值相应改变。亮度屏蔽效应表示频域误差阈值 $T_{m,n}$ 是方块平均亮度的函数,而方块平均亮度则体现在该方块的直流部分,也即 DCT 变换后的系数 $c_{0,0,k}$ 上^[13]:

$$T_{m,n,k} = T_{m,n} \left(\frac{c_{0,0,k}}{c_{0,0,0}} \right)^{T_a} \quad (9)$$

式中, k 代表第 k 个 $N \times N$ 的方块, $c_{0,0,0}$ 是对应平均亮度下的 DCT 直流系数, $T_a = 0.649$ 。图 5(a) 给出了频域误差阈值 $T_{m,n}$ 随亮度 L 变化的情况(实线为实测曲线,虚线为式(9)给出的曲线),从图 5(a) 可以看出,频域误差阈值 $T_{m,n}$ 随亮度变化的范围从 $10^0 \sim 10^{2.3}$ (即 $1 \sim 200$)。由亮度变化而引起的 $T_{m,n}$ 变化约为 $10^{0.5} = 3.16$ 倍。



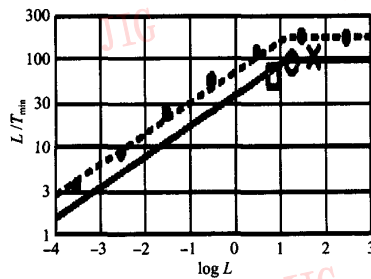
(a) 频域误差阈值随亮度变化曲线

设 L_{back} 、 L_{image} 分别代表背景亮度和图像亮度对总亮度的贡献, $L = L_{back} + L_{image}$, 则频域误差阈值 $T_{m,n}$ 的最小值以及该点的空间频率 ξ_{min} 都会随亮度 L 发生变化,如图 5(b) 所示^[12],图中“×”、“菱形”、“方块”分别代表 R、G、B 3 个分量。图中虚线为实测曲线,实线为式(10)给出的预测曲线(对 R、G、B 3 种颜色都适用):

$$T_{min} = \begin{cases} \frac{L^{T_a} L_T^{1-T_a}}{S_0} & L \leq T_{light} \\ \frac{L}{S_0} & L > T_{light} \end{cases} \quad (10)$$

其中: $T_{light} = 13.45 \text{ cd/m}^2$, $S_0 = 94.7$, $T_a = 0.649$ 的含义见文献[12]。

由图 5(b) 及式(10)可以得到亮度 L 与频域误差阈值最小值 T_{min} 的比值 $L/T_{min} \leq S_0$, 也即对于 R、G、B 中的每个基色都有: $L/T_{min} \leq S_0$, 显然 S_0 是 L/T_{min} 的最大下界(为得到对滤波器精度要求的充分条件,如果 R、G、B 有不同的 S_0 情况,则取其中最大的一个)。



(b) L/T_{min} 随亮度 L 变化曲线

图 5 频域阈值随亮度变化及 L/T_{min} 随亮度 L 变化

Fig. 5 $T_{m,n}$ versus luminance L and L/T_{min} versus luminance L

由于任一输入图像可以分解为三基色 R、G、B, 设它们对应的亮度分别为 L_R 、 L_G 、 L_B 则由 Grassman 的三色调配公理有^[14]

$$L = L_R + L_G + L_B$$

因此

$$\frac{L}{T_{min}} = \frac{L_R}{T_{min}} + \frac{L_G}{T_{min}} + \frac{L_B}{T_{min}} \leq S_0 + S_0 + S_0 = 3S_0 \approx 284 \quad (11)$$

$$\min\left(\frac{T_{min}}{L}\right) = \frac{1}{3S_0} \quad (12)$$

由 DCT 变换与 Fourier 变换的关系不难知道, 若在 Fourier 变换域内有

$$|\Delta H^*(a_x u, a_y v) G(u, v)| \leq \frac{T_{min}}{2} \quad (13)$$

则在 DCT 变换域必然满足“视觉上的无损压缩”条件($e_H < T_{m,n}$)。若上式两端同除 L , 则有

$$\left| \frac{\Delta H^*(a_x u, a_y v) G(u, v)}{L} \right| \leq \frac{T_{min}}{2L} \quad (14)$$

显然在设计滤波器时应考虑右端为最小值时的情况, 所以结合式(12)应该有

$$\left| \frac{\Delta H^*(a_x u, a_y v) G(u, v)}{L} \right| \leq \min\left(\frac{T_{\min}}{2L}\right) = \frac{1}{6S_0} \quad (15)$$

$$\left| \frac{\Delta H^*(a_x u, a_y v) G(u, v)}{H^*(a_x u, a_y v) G(u, v)} \right| \leq \frac{L}{6S_0 |H^*(a_x u, a_y v) G(u, v)|} \quad (16)$$

设 $\max_{u,v} |H^*(a_x u, a_y v) G(u, v)| = F_{\max}$, 若令

$$\left| \frac{\Delta H(a_x u, a_y v)}{H(a_x u, a_y v)} \right| \leq \frac{L}{6S_0 F_{\max}} = \rho \quad (17)$$

则必有式(16)、式(13)成立, 上式中 ρ 给出了确定光学滤波器误差的定量描述。例如, 本文实验中一般图像的傅里叶变换幅度最大值范围为 $10^3 \sim 10^5$ 数量级, 对于 $H^*(a_x u, a_y v)$ 为墨西哥帽小波, 且 $a_x = a_y = 1$ 的情况, 有

$$H^*(a_x u, a_y v) = 4 \sqrt{2\pi^5} (u^2 + v^2) e^{-2\pi^2(u^2 + v^2)}$$

$$\max_{u,v} |H^*(a_x u, a_y v) G(u, v)| \approx 2 \times 10^3 \sim 2 \times 10^5$$

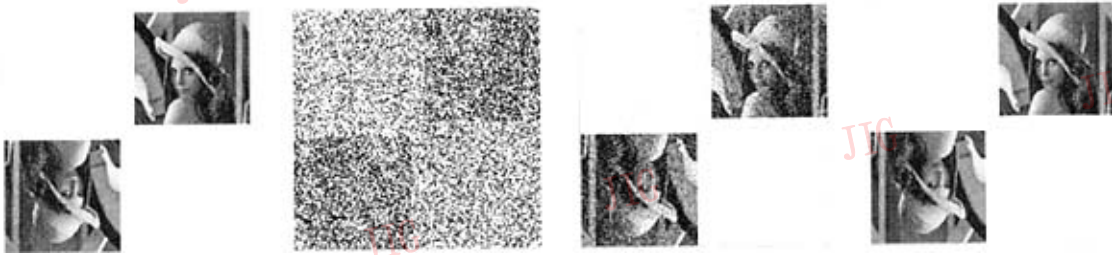
一般情况下, L 的变化范围为 $20 \sim 250 \text{cd/m}^2$, 代入式(17)得到 $\rho = 10^{-7} \sim 10^{-4}$ 。

4 实验结果

在实验中, 采用了仿真实验, 并以实际制作出的频域光学薄膜滤波器(图 2 中的 P_2 平面)的误差实测值作为参考。由于制造工艺的影响, 实际制作出的频域光学滤波器幅度相对误差为 $1/100$, 且其幅度值存在近似正态分布的白噪声。为了研究滤波器其频域误差的影响, 因此本实验中采用幅度恒定的频域滤波器, 即 $H^*(a_x u, a_y v) = 1$, 该频域滤波器的相对误差 $\left| \frac{\Delta H^*(a_x u, a_y v)}{H^*(a_x u, a_y v)} \right|$ 分别等于 10^{-2} 、 10^{-3} 、 10^{-4} , 用其对图像滤波后, 再经 Fourier 逆变换回到

空域中, 通过观察人眼对其误差的敏感程度来找到滤波器 $H^*(a_x u, a_y v)$ 能够容许的相对误差最大值。图 6 是一般显示器亮度下的实验结果, 其中图 6(a) 是由原始 Lena 图像进行对称化处理(第 3 象限的图像是第 1 象限图像的反折)后的结果, 这样可保证得到的傅里叶变换为实数。采用类似本文式(3)的办法, 将图像的傅里叶变换减去其最小值, 即可得到图像的正实数傅里叶变换, 可以证明, 此时其逆变换只是在图 6(a) 的中心点处增加了一个 δ 函数(在离散图像的情况, 其最大值为 255), 由于本来在该处的值就是最大亮度值, 所以实验结果对视觉上没有任何影响。图 6(b)~图 6(d) 是滤波器相对误差分别为 10^{-2} 、 10^{-3} 、 10^{-4} 时的实验结果。由图 6 可以看出, 图 6(b) 和图 6(c) 与原图的差别无法忍受。这说明制作出的精度为 $1/100$ 的频域光学滤波器还不能满足要求。由于人眼对图像的分辨还要受到背景亮度、对比度灵敏度函数 CSF、对比度屏蔽效应及个体差异等因素的影响, 无法观察到一个准确的临界误差值, 但从图 6(d) 可看出, 若滤波器误差小于 10^{-4} , 则人眼就看不出与原图的差别, 实验结果与本文的推导基本一致。

图 7(a)~图 7(d) 是在同样亮度下用标准图像 Baboon 的实验结果。其中图 7(a) 是原始图像, 图 7(b)~(d) 是滤波器相对误差分别为 10^{-2} 、 10^{-3} 、 2×10^{-4} 时的实验结果。从图 7(d) 可以看出, 在考虑图中有效图像(即不包括第 2、4 象限的空白处)时, 人眼能容忍的滤波器误差比 Lena 图像情况下几乎大了一倍(也即对滤波器的精度要求降低了一倍), 其主要原因是由于 Baboon 图像中的空间频率成分比 Lena 图像中丰富得多的缘故, 此时对比度屏蔽效应起了很大的作用。



(a) 对称化处理后的原始 Lena 图像 (b) 滤波器相对误差为 10^{-2} (c) 滤波器相对误差为 10^{-3} (d) 滤波器相对误差为 10^{-4}

图 6 采用相对误差不同的滤波器恢复的 Lena 图像
Fig. 6 Reconstructed Lena image with different relative error filter

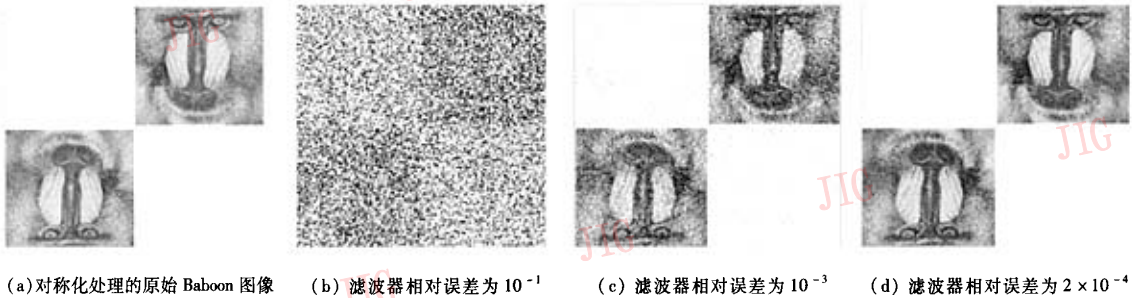


图 7 采用相对误差不同的滤波器恢复的 Baboon 图像
Fig. 7 Reconstructed Baboon image with different relative error filter

5 结 论

本文研究了利用光学滤波器,通过在频域进行小波变换来实现图像数据压缩时,对小波滤波器的特殊要求,该滤波器除了需要满足传统小波变换法需满足的条件外,还要求滤波器在频域尽量为实函数且相对误差(精度)应该满足式(17),而且,人眼视觉特性对图像误差的灵敏程度(视觉阈值)是本文推导的依据。由于式(17)是用频域滤波方法实现图像数据压缩时,滤波器精度误差的上限,因此是设计滤波器时的一个充分条件,从推导过程中可以看出,由于式(17)推导中并未对 $H^*(a_x u, a_y v)$ 作限制,甚至也未要求一定是光学滤波器,因此式(17)不仅可用于小波变换,而且可直接推广到任何其他变换及非光学实现数据压缩的情形。本文得到的结论有助于进行高质量图像数据压缩(“从感知上无损”)时,设计制作此类光学滤波器,但一般情况下,要求制作的滤波器相对误差不得大于 10^{-4} 。由于人眼视觉特性不仅由对比度灵敏度函数描述,也表现为亮度屏蔽、对比度屏蔽,因此图像亮度越低,对滤波器的误差精度要求就越高。仿真实验表明,本文给出的滤波器相对误差上限确实是滤波器精度的充分条件。

本文的贡献在于,它给出了空间频域滤波器设计制作时的精度要求的依据,在此基础上,人们可以进一步研究如何构造出满足本文要求的光学小波滤波器,并将其应用于图像数据压缩中。

参考文献 (References)

- Ouzieli Ido, David Mendlovic. Two-dimensional wavelet processor [J]. *Applied Optics*, 1996, **35**(29): 5839 ~ 5846.
- LIAO Jun, WANG Hai-dong, DING Jian-ping, et al. Multiple image produced by microlenses array [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2001,

- A28(1): 52 ~ 54. [廖军,王海东,丁剑平等. 利用微透镜阵列产生多重像[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(1): 52 ~ 54.]
- Erbach Pöter S, Gregory Don A, Yang Xiang-yang. Optical wavelet transform by the phase-only joint transform correlator [J]. *Applied Optics*, 1996, **35**(17): 3117 ~ 3126.
- Zervas N D, Anagnostopoulos G P, Spiliotopoulos V, et al. Evaluation of design alternatives for the 2D-discrete wavelet transform [EB/OL]. In: The Department “Electronics and Information Processing” of the Faculty of Applied Sciences at the Vrije Universiteit Brussel (VUB). <http://www.etro.vub.ac.be/Members/andreo-poulos.yiannis/>, 2003 ~ 07 ~ 28.
- Block P G, Rogers Steven K, Ruck Dennis W. Optical wavelet transform from computer-generated holography [J]. *Applied Optics*, 1994, **33**(23): 5275 ~ 5278.
- FENG Wen-yi, HUANG Gao-gui, YAN Ying-bai, et al. Multichannel wavelet correlators for fingerprint identification by the use of volume holographic storage. *ACTA OPTICA SINICA*, 2000, **20**(3): 370 ~ 375. [冯文毅,黄高贵,严瑛白等. 多通道体全息子波相关器及其在指纹识别中的应用 [J]. *光学学报*, 2000, **20**(3): 370 ~ 375.]
- Sheng Y, Roberge D, Szu H, et al. Optical wavelet matched filters for shift-invariant pattern recognition [J]. *Optics Letters*, 1993, **18**(4): 299 ~ 301.
- Li Y, Szu H, Sheng Y, et al. Wavelet processing and optics [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1996, **84**(5): 720 ~ 732.
- WU Hua-wen, QI Kai-guo, LI Yong-ping. Optical pattern recognition using wavelet transform [J]. *Physics*, 2002, **31**(10): 654 ~ 658. [吴华文,齐开国,李永平. 光学小波匹配滤波器与图形识别 [J]. *物理*, 2002, **31**(10): 654 ~ 658.]
- ZHAO Wei-yi, SONG Fei-jun, YU Lei, et al. Optical wavelet transform [J]. *Physics*, 2000, **29**(3): 162 ~ 168. [赵维义,宋菲君,俞蕾等. 光学小波变换 [J]. *物理*, 2000, **29**(3): 162 ~ 168.]
- Beegan A P, Iyer L R, Bell A E. Design and evaluation of perceptual masks for wavelet image compression [A]. In: *Proceedings of the 10th IEEE Digital Signal Processing Workshop* [C], Pine Mountain, GA, USA, 2002; 88 ~ 93.
- Ahumada Jr A J, Peterson H A. Luminance-model-based DCT quantization for color image compression [J]. *SPIE Proceedings*, 1992, **1666**: 365 ~ 374.
- Watson A B. Visual optimization of DCT quantization matrices for individual images [A]. In: *Proceedings of AIAA Computing in Aerospace 9* [C], San Diego, CA, USA, 1993: 286 ~ 291.
- JING Ren-jie, YE Xiu-qing, XU Sheng-rong, et al. Computer image processing [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1990, 12. [荆仁杰,叶秀清,徐胜荣等. 计算机图像处理 [M]. 杭州:浙江大学出版社, 1990, 12.]