

一种新的图像实时放大技术¹

吴援明 李天倩

(电子科技大学光电信息学院 成都 610054)

摘要: 该文提出了一种视频图像整数倍放大的实时插值方案——改进的像素填充插值法,给出了其基本原理及软、硬件实现方法,与重复插值法、线性插值法、像素填充插值法和小波放大法等进行了比较,并给出了放大后图像的主观和客观评价,结果表明改进的像素填充插值法的效果明显优于其他实时放大方法,且其硬件实现并不复杂,可用于视频图像实时放大的软、硬件设计。

关键词: 图像放大,插值法,像素填充插值法,小波放大法

中图分类号: TN911.73 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2004)07-1070-06

A New Real-Time Image Zooming Method

Wu Yuan-ming Li Tian-qian

(College of Optoelectronic Info., UEST of China, Chengdu 610054, China)

Abstract A kind of interpolator, called the modified pixel-filled interpolator, is advanced for images enlarged the same integer times in lines as that in columns. The principle and the implement method in software and hardware of the interpolator are given. Comparing with the nearest neighbor interpolator, the bilinear interpolator, the pixel-exchanged-interpolator and the wavelet-based zooming methods, the effects of enlarged images with this interpolator are better according to the subjective and objective evaluation to the enlarged images. Its implementation in software and hardware is easy, and can be applied to all kinds of image zooming.

Key words Image zooming, Interpolation method, Pixel-exchanged interpolator, Wavelet-based zooming method

1 引言

在卫星遥感图像、医学图像、数字影像、多媒体的处理过程中,利用合适的图像放大技术,可以获得比较好的视觉效果。在图像放大时要进行插值运算,理想的插值是辛格函数插值^[1]。但由于它的运算量太大,所以在实际应用中,一般采用以下几种方法:重复插值法、线性插值法、像素填充插值法和小波变换插值法^[2]。

(1) 重复插值法(零阶保持滤波器)。使待插入像素点的值等于前一个像素点的值,待插入行的值等于上一行的值。

(2) 线性插值法(线性插值滤波器)。行内根据待插值像素点与其前后的原图像像素点的位置距离进行加权线性插值,即离原图像像素点越近的待插值像素点,原图像像素的加权系数就越大;行间根据待插值行与其上下的原图像行间的距离进行加权线性插值,即离原图像行越近的待插值行,原图像行的加权系数就越大。

(3) 像素填充插值法。它的单位样本函数的元素全部由 0 和 1 构成,插值后的图像中的像素全部由原图像中的像素填充来组成,因而放大后的图像显示时只需改变像素的读出地址(可通过查找表或可编程器件来实现),这比线性插值法的实现要容易些。

¹ 2003-03-10 收到, 2003-08-04 改回
电子科技大学青年基金资助课题

(4) 小波变换放大法。用 S. Mallat 提出的分解重构算法, 通过二维离散小波变换, 经分析高通滤波器和分析低通滤波器, 可将一幅分辨率为 2^{-j} 的二维图像分解成分率为 $2^{-(j+1)}$ 的离散低频分量 A_1 和水平、垂直、对角 3 个高频分量 H_1, V_1, D_1 , 它们只有原图像大小的 $1/4$ 。这一分解过程是重复进行的, 即 A_1 又可以再分解为 A_2, H_2, V_2, D_2 , 直到细节只包含一个样本为止。通过二维离散小波反变换, 用相应的综合高通滤波器和综合低通滤波器可将各分量重构为原图像。

对于一个图像, 低频成分包含了基本特征, 可以看成原图像的近似, 高频成分反应其细节^[3]。基于此, 将原图像作为低频成分 A_1 , 细节 H_1, V_1, D_1 置零, 进行小波重构, 即可得到放大 4 倍 (2×2) 的图像。依此类推, 可以得到放大 2 的正整数幂次倍的图像。

2 算法及效果分析

下面以 3×3 放大为例 (为了节省篇幅) 简单介绍前 3 种方法, 以 4×4 倍放大为例介绍小波插值法 (小波放大只适用于 2 的正整数幂次倍放大), 并指出它们的优点和不足。

$$\text{设原图像为 } s = \begin{bmatrix} 9 & 9 & 9 \\ 1 & 9 & 9 \\ 1 & 1 & 9 \end{bmatrix}, \text{待插值点处全部插入零, 得到 } x = \begin{bmatrix} 9 & 0 & 0 & 9 & 0 & 0 & 9 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 9 & 0 & 0 & 9 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 9 \end{bmatrix}.$$

(1) 重复插值法 (零阶保持滤波器) 的单位样本函数为一等值序列, 维数为 $L \times L$ (L 为放大倍数)。取 $L = 3$, 有重复插值法的单位样本函数 $h_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$, x 经过重复插值

后得到图像 $y_1 = \text{conv2}(x, h_1)$ 。式中的 $\text{conv2}(\)$ 是二维数字矩阵卷积运算。经计算得到

$$y_1 = \begin{bmatrix} 9 & 9 & 9 & 9 & 9 & 9 & 9 & 9 & 9 \\ 9 & 9 & 9 & 9 & 9 & 9 & 9 & 9 & 9 \\ 9 & 9 & 9 & 9 & 9 & 9 & 9 & 9 & 9 \\ 1 & 1 & 1 & 9 & 9 & 9 & 9 & 9 & 9 \\ 1 & 1 & 1 & 9 & 9 & 9 & 9 & 9 & 9 \\ 1 & 1 & 1 & 9 & 9 & 9 & 9 & 9 & 9 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 9 & 9 & 9 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 9 & 9 & 9 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 9 & 9 & 9 \end{bmatrix}.$$

从 y_1 可以看出, 放大后的图像具有明显的方块现象。零阶保持滤波器是一种性能比较差的滤波器, 因为它的频谱是一个 sinc 函数, 其旁瓣较大。在频域中, 因为频谱是周期性重复的, 所以较大的旁瓣会损失较大的能量, 插值的结果会出现高频的假象^[2]。重复插值法的优点是算法简单, 不需要运算, 硬件实现容易, 成本低, 但是放大后的图像方块现象明显。

(2) 线性插值法 (线性插值滤波器) 的单位样本函数为一三角形序列, 维数为 $(2L_1 - 1) \times (2L_2 - 1)$ (L_1, L_2 为横向、纵向放大倍数)^[4]。取 $L_1 = L_2 = 3$, 有线性插值法的单位样本函数

$$h_2 = \frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 6 & 4 & 2 \\ 3 & 6 & 9 & 6 & 3 \\ 2 & 4 & 6 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 3 & 2 & 1 \end{bmatrix}, \text{ } x \text{ 经过线性插值后得到图像 } y_2 = \text{conv2}(x, h_2), \text{ 只取 } y_2 \text{ 的中心}$$

大小为 7×7 的方块, 且对它进行“四舍五入”取整得到 $y_2 = \begin{bmatrix} 9 & 9 & 9 & 9 & 9 & 9 & 9 \\ 6 & 7 & 8 & 9 & 9 & 9 & 9 \\ 4 & 5 & 7 & 9 & 9 & 9 & 9 \\ 1 & 4 & 6 & 9 & 9 & 9 & 9 \\ 1 & 3 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 7 & 9 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 4 & 6 & 9 \end{bmatrix}$.

从 y_2 中可以看出, 放大后的图像虽然不存在方块现象, 但有明显的过渡区, 使图像边缘变差, 清晰度下降. 实际上, 根据 SVD 分解, $h_2 = \text{conv2}(h_{2a}, h_{2a})$; $h_{2a} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$. 因此, 线性插值相当于原图像经过两次单位样本函数为 h_1 的系统的输出. 它的频谱是 sinc 的平方, 其旁瓣比重复插值法小, 因此比重复插值法性能要好. 线性插值法的优点是放大后的图像质量较好; 但是运算量较大, 要求硬件具有加法、乘法和除法运算能力, 成本较高.

(3) 像素填充插值法. 单位样本函数的维数与线性插值法相同. 取 $L_1 = L_2 = 3$, 像素填充

插值法的单位样本函数 $h_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$. 通过分析, 若令 $h_{3a} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 2 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$, $h_{3b} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$, 则 $h_3 = h_{3a} - h_{3b}$.

x 经过系统 h_{3a} 得到的输出图像 $y_{3a} = \text{conv2}(x, h_{3a})$,

$y_{3a} = \begin{bmatrix} 18 & 18 & 18 & 18 & 18 & 18 & 18 \\ 10 & 09 & 09 & 18 & 09 & 09 & 18 \\ 10 & 01 & 09 & 18 & 09 & 09 & 18 \\ 02 & 10 & 10 & 18 & 18 & 18 & 18 \\ 02 & 01 & 09 & 10 & 09 & 09 & 18 \\ 02 & 01 & 01 & 10 & 01 & 09 & 18 \\ 02 & 02 & 02 & 02 & 10 & 10 & 18 \end{bmatrix}$; x 经过系统 h_{3b} 得到的输出图像 $y_{3b} = \text{conv2}(x, h_{3b})$,

$y_{3b} = \begin{bmatrix} 9 & 9 & 9 & 9 & 9 & 9 & 9 \\ 9 & 0 & 0 & 9 & 0 & 0 & 9 \\ 1 & 0 & 0 & 9 & 0 & 0 & 9 \\ 1 & 1 & 9 & 9 & 9 & 9 & 9 \\ 1 & 0 & 0 & 9 & 0 & 0 & 9 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 9 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 9 & 9 \end{bmatrix}$. 处理方式同 y_2 , 得 $y_3 = y_{3a} - y_{3b} = \begin{bmatrix} 9 & 9 & 9 & 9 & 9 & 9 & 9 \\ 1 & 9 & 9 & 9 & 9 & 9 & 9 \\ 9 & 1 & 9 & 9 & 9 & 9 & 9 \\ 1 & 9 & 1 & 9 & 9 & 9 & 9 \\ 1 & 1 & 9 & 1 & 9 & 9 & 9 \\ 1 & 1 & 1 & 9 & 1 & 9 & 9 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 9 & 1 & 9 \end{bmatrix}$

由 y_3 可以看出, 不仅方块现象不存在, 而且边缘保持得比较好 (只有两个像素宽度)^[5]. 但是放大后的图像在边缘处出现了两个像素亮暗填充的现象, 类似于颗粒噪声, 看起来非常令人讨厌, 视觉效果较差^[6].

像素填充插值法单位样本函数的构成也是非常规律. 4×4 倍放大的单位样本函数: $h_{4a} =$

$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 2 & 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 2 & 2 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$, $h_{4b} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$, $h_4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$; 5×5 倍

$$\text{放大的单位样本函数: } h_{5a} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 2 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 2 & 2 & 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 & 2 & 2 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 2 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad h_{5b} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$h_5 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

以此类推，可以很容易地得到 6×6 ， 7×7 ， 8×8 等倍数放大的单位样本函数。

(4) 小波变换放大法。将原图像作为低频成分 A_1 ，细节 H_1 、 V_1 、 D_1 置零，进行小波重构 (二维图像分解重构 Mallat 算法参见文献 [7])，即可得到放大 4 倍 (2×2) 的图像。但是由于能量守恒，放大后的图像因能量分散而显得较暗。我们借鉴了文献 [8]，改进为增强系数的小波放大法，即将原图像灰度值矩阵乘 2，再进行上述变换，解决了这一问题，小波放大算法原理框图可参见文献 [8]。

小波分解重构是一种全局运算，不会造成重复放大中的方块效应，同时较好地保持图像边缘的清晰。

3 改进的像素填充插值法

虽然像素填充插值法有上述的优点，但也存在类似于颗粒噪声的现象。针对它的不足，我们提出了一种改进的像素填充插值法。类似于颗粒噪声的现象通过人眼后，虽然可以得到一定程度的改善，但是仍然很明显。因此我们提出对经过上述像素填充插值后的图像，再进行中值滤波 [9]。根据 y_3 的两个像素宽度的亮暗填充的现象，采用五点“+”型中值滤波 [10] 是合适

的。得到的图像为 $y_3 =$

$$\begin{bmatrix} 1 & 9 & 9 & 9 & 9 & 9 & 9 \\ 1 & 1 & 9 & 9 & 9 & 9 & 9 \\ 1 & 1 & 1 & 9 & 9 & 9 & 9 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 9 & 9 & 9 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 9 & 9 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 9 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

(1) 五点“+”型中值滤波的软件实现。

我们用 MATLAB 对像素填充插值后的图像进行五点“+”型中值滤波。先读入原图像像素值矩阵 x ，计算原图大小 (尺寸 $s = \text{size}(x)$ ，行数 $\text{row} = s(1)$ ，列数 $\text{col} = s(2)$)；初始化一个与 x 同大小的零矩阵 $y = \text{zeros}(\text{row}, \text{col})$ ，将 x 的四个边上的值赋给 y 的四边；从 2 到 $\text{row}-1$ 行，2 到 $\text{col}-1$ 列，将 x 每个像素及其上下左右像素值用 sort 函数排序，取中间值赋给 y 中对应位置像素；最后得到处理后的新像素值矩阵 y ，用 $\text{imshow}(\text{uint8}(y))$ 实现图像输出。

(2) 五点“+”型中值滤波的硬件实现。用可编程逻辑器件可以从硬件上实时地实现五点“+”型中值滤波。由于人眼对色彩的变化不敏感，我们这里只考虑亮度信号的中值滤波 [11]。从解码器输入到可编程逻辑器件的亮度信号通过两行延时，从第一行取 $x_1 = x(m, n-1)$ ，从第二行取 $x_2 = x(m-1, n)$ ， $x_3 = x(m, n)$ ， $x_4 = x(m+1, n)$ ，从第三行取 $x_5 = x(m, n+1)$ ，对这五个点进行并行排序得 $x'_1 < x'_2 < x'_3 < x'_4 < x'_5$ ，把中间值 x'_3 赋给 $x(m, n)$ ，即实现了中

值滤波。其并行排序算法框图参见文献 [12]，运算过程如下：

$$\begin{aligned}
 p_1 &= \min(x_2, x_3), & p_2 &= \max(x_2, x_3); & p_3 &= \min(x_4, x_5), & p_4 &= \max(x_4, x_5); \\
 p_5 &= \min(x_1, p_1), & p_6 &= \max(x_1, p_1); & p_7 &= \min(p_2, p_3), & p_8 &= \max(p_2, p_3); \\
 p_9 &= \min(p_6, p_7), & p_{10} &= \max(p_6, p_7); & p_{11} &= \min(p_8, p_4), & p_{12} &= \max(p_8, p_4); \\
 p_{13} &= \min(p_5, p_9), & p_{14} &= \max(p_5, p_9); & p_{15} &= \min(p_{10}, p_{11}), & p_{16} &= \max(p_{10}, p_{11}); \\
 p_{17} &= \min(p_{14}, p_{15}), & p_{18} &= \max(p_{14}, p_{15}); & p_{19} &= \min(p_{16}, p_{12}), & p_{20} &= \max(p_{16}, p_{12}); \\
 x'_1 &= p_{13}, & x'_2 &= p_{17}, & x'_3 &= p_{18}, & x'_4 &= p_{19}, & x'_5 &= p_{20}.
 \end{aligned}$$

4 图像处理实例及评价

采用上述 5 种插值方法对文字图像 (如图 1(a) 所示) 进行 4×4 倍放大的结果如图 1 (b), 1(c), 1(d), 1(e), 1(f) 所示。

(1) 主观评价 从图 1 中不难看出这 4 种方法的优点和缺点。其中用两次五点“+”型中值滤波的改进的像素填充插值法效果最好。

(2) 客观评价 对于放大后图像的客观评价，我们主要采用文献 [8] 中的方法，主要有 MSE(Mean-Square Error)、LVE(Luminous Value Error)、SFM(Spectral Flatness Measure) 和 PSNR(Peak Signal-to-Noise Ratio) 并作了合理的修正，评价结果见表 1。从表中可以看出，改进的像素填充插值法的客观评价效果比其他方法好。

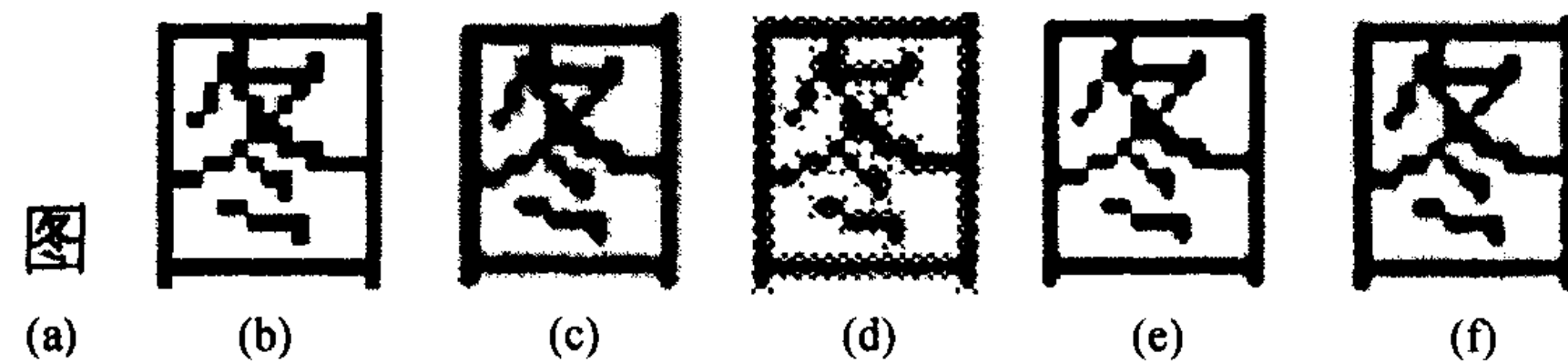


图 1 插值方法对文字图像进行放大的结果

(a) 原图像 (b) 重复插值法 (c) 线性插值法 (d) 像素填充插值法
(e) 改进的像素填充插值法 (f) 小波放大法

表 1 文字放大效果客观评价

	MSE	LVE	SFM	PSNR
(b)	0	0	765.25	Inf
(c)	1291.7	2.98	265010	17.02
(d)	626.02	1.99	287.11	20.16
(e)	552.97	0.86	282.49	20.70
(f)	954.69	0.09	694120	18.33

5 运算复杂度分析

以 $n \times n$ 图像放大 4×4 倍为例。

像素填充插值法先在像素间插 0，所得 $4n \times 4n$ 图像与 6×6 交换算子卷积，运算复杂度为 $O(n^2)$ 。

一次五点“+”型中值滤波经过 $1/2 \times n \times (n-1)$ 次比较运算，运算复杂度为 $O(n^2)$ 。所以，用两次五点“+”型中值滤波的改进的像素填充插值法的运算复杂度为 $O(n^2)$ 。

6 结论

本文提出了一种视频图像整数倍放大的实时插值方案——改进的像素填充插值法。它的主、客观评价效果比其他插值方法好, 克服了线性插值导致的边缘模糊和重复插值导致的方块现象; 并且软、硬件实现并不复杂, 实时性好。正是这一算法的优良特性, 决定它可用于图像实时放大的软、硬件设计。

参 考 文 献

- [1] Crochiere R E, Rabiner L R. Multirate Digital Signal Processing. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1983: 35-39.
- [2] Castleman K R. Digital Image Processing. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1996: 335-343.
- [3] 谢安明, 邵美珍, 李弼程. 基于小波的图像放大模型分析. 信息工程大学学报, 2000, 1(2): 57-60.
- [4] Keys R G. Cubic convolution interpolation for digital image processing. *IEEE Trans. on Acoust., Speech and Sig. Proc.*, 1985, 73(4): 502-522.
- [5] 王兆华. 邻域交换内插法. 信号处理, 1993, 9(1): 2-8.
- [6] 杨健君. 数字图像放大技术的研究与电视墙图像分配器的研制. [博士论文], 成都: 电子科技大学, 2002.10.
- [7] [美] 崔锦泰. 小波分析导论. 西安: 西安交通大学出版社, 1996: 24-28.
- [8] Revathy K, Raju G, Prabhakran Nayar S R. Image zooming by wavelets. *Fractals*, 2000, 8(3): 247-253.
- [9] 黄煦涛. 二维数字信号处理 II-变换与中值滤波器. 北京: 科学出版社, 1985, 第5章1、2、3节.
- [10] 杨健君, 吴援明, 成建波等. 中值滤波器作用于放大图像时的定点问题. 信号处理, 2002, 18(2): 107-109.
- [11] 黄宁, 张家谋. 图像中值滤波的硬件实现. 电视技术, 1996, (8): 6-12.
- [12] 柴晓冬, 吴小培, 陈川等. 中值滤波电路的设计. 微电子学与计算机, 1996, 13(5): 5-7.

吴援明: 男, 1966年生, 副教授, 主要从事信号与信息处理方面的研究工作.

李天倩: 女, 1976年, 工程师, 主要从事图像处理方面的研究工作.