

适合高频子带特征的小波域图像放大算法

李庆忠, 陈 静

(中国海洋大学 工程学院 山东省海洋工程重点实验室, 山东 青岛 266100)

摘 要: 针对小波域图像放大出现的伪吉布斯现象和虚假边缘问题, 提出一种新的小波域图像放大算法。对原始图像进行一级小波变换, 根据各高频子带的方向特点, 确定高频子带系数在放大子带中的摆放位置。给出基于边缘方向的高频系数插值方法, 计算空白像素的高频系数。将线性变换的原始图像作为放大后的低频子带, 结合放大后的 3 个高频子带进行小波反变换, 得到基于小波变换的放大图像。实验结果表明, 该算法可有效克服由于小波变换缺乏平移不变性造成的伪吉布斯现象, 避免产生虚假边缘。

关键词: 图像放大; 小波变换; 高频子带放大; 伪吉布斯现象; 虚假边缘

中文引用格式: 李庆忠, 陈 静. 适合高频子带特征的小波域图像放大算法[J]. 计算机工程, 2017, 43(7): 268-273.

英文引用格式: Li Qingzhong, Chen Jing. Image Magnification Algorithm in Wavelet Domain Adapted for Characteristics of High Frequency Subbands[J]. Computer Engineering, 2017, 43(7): 268-273.

Image Magnification Algorithm in Wavelet Domain Adapted for Characteristics of High Frequency Subbands

LI Qingzhong, CHEN Jing

(Shandong Provincial Key Laboratory of Ocean Engineering, College of Engineering,
Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China)

[Abstract] In order to suppress Pseudo-Gibbs phenomena and remove false edges in image magnification of Wavelet domain, an image magnification algorithm in Wavelet domain is presented. After the original image is decomposed by one level Wavelet transform, an accurate location and placement method of high frequency coefficients in magnified high frequency subbands is given according to the orientation characteristic of high frequency subbands. An edge direction based interpolation method is proposed to determine the value of high frequency coefficient at the blank spaces of pixels. The magnified image is obtained by inversing Wavelet transform on the above magnified three high frequency subbands, and the magnified low frequency subband generated by linear transform of the original image. Experimental results show that the proposed algorithm can effectively remove the Pseudo-Gibbs phenomena due to the shift variance characteristic of wavelet transform, and avoid the generation of false edges.

[Key words] image magnification; Wavelet transform; magnification of high frequency subbands; Pseudo-Gibbs phenomena; false edge

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2017.07.045

0 概述

图像放大是将低分辨率图像进行高分辨率显示的图像处理技术, 在很多领域中都有着重要的应用, 例如遥感图像的高分辨率显示、医学图像的高分辨率显示检查、刑侦图片的高分辨率显示识别、高清晰电视制作、远程无线传输监控视频图像的高分辨率显示等。

传统的图像插值放大算法有最近邻点插值、双线性插值、三次样条插值和三次 B 样条插值等^[1-5]。其中最近邻点插值速度较快, 但会产生明显的锯齿形边缘和方块效应; 双线性插值虽然具有一定的边缘平滑作用, 但也会使图像的细节产生退化, 从而丢失一些重要的边缘特征; 三次样条插值和三次 B 样条插值放大后的图像具有较高的光滑性, 但是计算量大, 而且放大后的图像易出现边缘模糊问题。

基金项目: 国家自然科学基金(61132005); 海洋公益性行业科研专项(201505002)。

作者简介: 李庆忠(1963—), 男, 教授, 主研方向为图像处理、信号处理; 陈 静, 硕士研究生。

收稿日期: 2016-07-28 **修回日期:** 2016-08-29 **E-mail:** liqingzhong@ouc.edu.cn

目前,小波变换在图像增强、去噪等领域得到了广泛的应用^[6-7]。将小波变换应用到图像放大领域^[8-14],能够比较有效地克服单纯空域插值带来的图像局部受损,并具有较好的实时性。基于小波变换的图像放大算法主要是通过在小波变换域内构造新的高频特征,最终达到提高图像分辨率和重建质量的目的,但其关键在于如何合理构造放大后图像的高频子带系数。高频子带系数的放大目前主要面临2个难题:1)由于小波变换缺乏平移不变性,因此在放大过程中会产生伪吉布斯(Pseudo-Gibbs)现象,即数字信号在时域的微小移动会造成小波变换系数分布的极大变化,表现为图像的某个区域出现类似水波的波纹,这与图像不连续点位置和小波基元素的特征之间的对准有关。因此,高频子带放大时,必须考虑图像不连续点特征差异。2)一般图像在像素之间具有较强的相关性,而图像小波变换后得到的各个高频子带,因为主要包含与图像边缘、纹理对应的高频系数,且具有正负跳跃性,所以相邻高频系数之间相关性很差。因此,若直接利用一般图像的插值方法,会造成严重虚假边缘问题。

本文为解决小波高频子带放大中面临的问题,提出一种适合高频子带特点的小波域图像放大算法。该算法根据3个方向高频子带的特点,给出高频子带系数在放大子带中的准确定位摆放的方法,去除伪吉布斯现象。此外,根据3个方向高频子带边缘特征的方向性差异,给出基于边缘方向的高频系数插值方法。

1 小波域图像放大算法

基于小波变换图像放大算法的核心是如何构建放大图像的高频系数。传统的小波域图像放大算法是直接对高频子带进行插值放大,因为小波高频系数之间相关性很差,并且小波变换不具备平移不变性,所以直接插值放大会造成伪吉布斯现象和虚假边缘问题。为克服这2个问题,本文提出了基于小波变换的新的放大算法。以放大4倍为例,其整体流程如图1所示,在此基础上,可以进一步进行小波变换放大,依次放大至 4^2 倍、 4^3 倍、……、 4^n 倍。

算法主要流程如下:

- 1)将原始低分辨率图像进行一级离散小波变换,分解后的得到1个低频子带LL1和3个高频子带HL1,LH1,HH1。
- 2)对高频子带HL1进行准确定位摆放和基于边缘方向的插值得到放大4倍的HL1'。

3)对高频子带LH1进行准确定位摆放和基于边缘方向的插值得到放大4倍的LH1'。

4)对高频子带HH1进行准确定位摆放和基于边缘方向的插值得到放大4倍的HH1'。

5)对原始图像进行线性变换作为放大图像的低频子带LL1'。

6)对放大后的所有小波子带进行小波逆变换得到放大4倍的图像。

在以上算法步骤中,核心是3个高频子带的放大算法,其实现过程如图1所示。

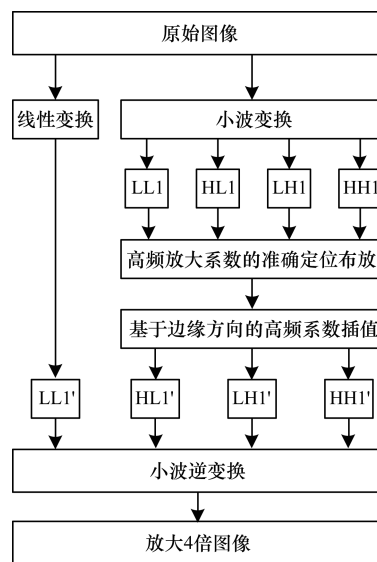


图1 图像放大算法流程

1.1 低分辨率图像小波变换分解

考虑到计算的实时性,本文采用 Daub 5/3 小波^[15]对低分辨率图像进行提升小波变换。其中,正变换公式与反变换公式分别如式(1)、式(2)所示。

$$d_1[2n] = s_0[2n+1] - \left[\frac{1}{2}(s_0[2n] + s_0[2n+2]) + \frac{1}{2} \right]$$

$$s_1[2n] = s_0[2n] + \left[\frac{1}{4}(d_1[2n-2] + d_1[2n]) + \frac{1}{2} \right] \quad (1)$$

$$d_0[2n] = s_1[2n] - \left[\frac{1}{4}(d_1[2n-2] + d_1[2n]) + \frac{1}{2} \right]$$

$$s_0[2n+1] = d_1[2n] + \left[\frac{1}{2}(d_0[2n] + s_0[2n+2]) + \frac{1}{2} \right] \quad (2)$$

其中, $s_0[n]$ 是原始一维信号; $s_1[2n]$, $d_1[2n]$ 分别是原始信号经过低通、高通滤波并降采样后的信息。

对一幅图像进行一级提升小波变换后,可以得到一个低频子带LL1和3个高频子带HL1,LH1,HH1。图2为一幅图像经过一级小波变换得到4个子带图像,可见,HL1,LH1,HH1分别为垂直方向、水平方向和对角方向的边缘、纹理信息。

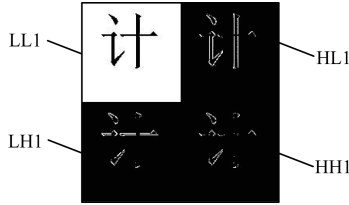


图 2 图像一级小波变换示意图

1.2 高频子带系数放大后的准确定位布放方法

传统的高频子带放大过程如图 3 所示,假设图 3(a)是放大前某高频子带相邻的 4 个系数,图 3(b)是这 4 个相邻系数 4 倍放大后的情况,其中, $H(i,j)$ 放到 $m(2i,2j)$ 的位置;其余 3 个类似,都是按位置坐标 2 倍关系放置,即图 3(b)中深色标记的 4 个像素。总之,高频子带中的一个系数 $H(i,j)$ 放大后对 4 个像素位置,其中空白位置的高频系数再根据双线性插值或牛顿插值算法来计算。可见,这种高频子带放大算法存在 2 个问题:1) 高频子带系数直接按照位置坐标 2 倍关系定位布放会造成伪吉布斯现象,原因是 2 倍关系的位置布放不一定是合理的,因为小波变换不具有平移不变性,即数字信号在时域的微小移动会造成小波变换系数分布的极大变化。2) 因为高频子带图像主要呈现一些边缘、纹理信息,其方向性和位置性很强,绝对值系数之间的相关性不是区域性的,而是具有很强的方向性。因此,直接用一般图像中的插值方法,很容易造成虚假边缘现象。

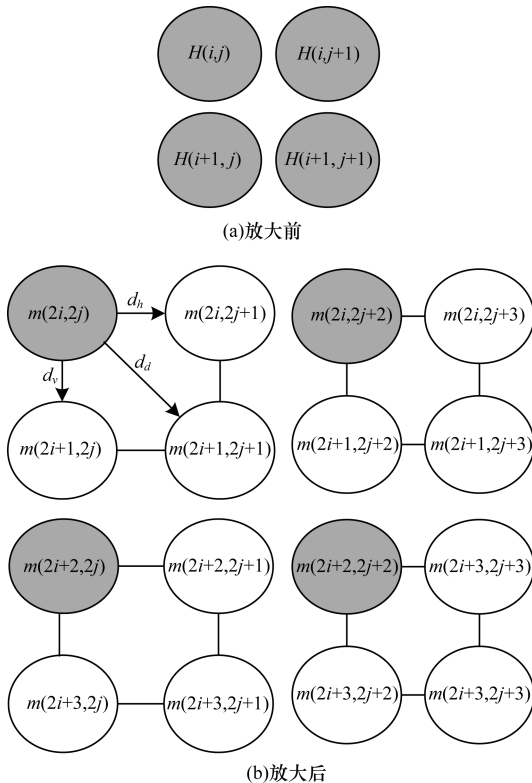


图 3 高频子带放大示意图

为了消除高频系数放大后定位不合理造成的伪吉布斯现象,本文分别根据各高频子带的方向特点,提出放大后高频子带系数布放位置确定方法如下:对于呈现垂直边缘信息的高频子带 HL1,该子带中的高频成分是对原始图像的每一行的一维信号按式(1)进行分解计算得到。

$$d_1[2n] = s_0[2n+1] - \left[\frac{1}{2}(s_0[2n] + s_0[2n+2]) + \frac{1}{2} \right] \quad (3)$$

其中, $d_1[2n]$ 是计算得到的高频系数,因为要进行 $\frac{1}{2}$ 下采样处理,对于高频子带 HL1,令位置 (i,j) 的高频系数记为 $H(i,j)$;对于原始图像,令位置 (i,j) 的像素值记为 $F(i,j)$,代入式(3)并整理可得:

$$H(i,j) = \frac{1}{2}\Delta h_1 + \frac{1}{2}\Delta h_2 - \frac{1}{2} \quad (4)$$

其中:

$$\begin{aligned} \Delta h_1 &= F(2i,2j+1) - F(2i,2j) \\ \Delta h_2 &= F(2i,2j+1) - F(2i,2j+2) \end{aligned} \quad (5)$$

可见,高频系数 $H(i,j)$ 取决于原始图像像素 $F(2i,2j+1)$ 及其前后 2 个相邻像素的变化量之和。

由图 3(b)可知, $H(i,j)$ 放大后,传统放大算法是把 $H(i,j)$ 直接布放在 $m(2i,2j)$ 的位置,这会引引起定位不准造成的伪吉布斯现象。为克服此问题,必须根据原始图像 $\Delta h_1, \Delta h_2$ 的大小,来准确定位 $H(i,j)$ 在放大后高频子带中的位置。本文采用的定位布放准则如下:

1) 当 $|\Delta h_1| \geq |\Delta h_2|$ 时, $H(i,j)$ 放在 $m(2i,2j)$ 位置;

2) 当 $|\Delta h_1| < |\Delta h_2|$ 时, $H(i,j)$ 放在 $m(2i,2j+1)$ 位置。

即根据前后变化量的大小,在图 3(b)所示的水平方向 d_h 左右移动一个像素位置。

对于呈现水平边缘信息的高频子带 LH1,该子带中的高频成分是对小波行变换后图像的每一列的一维信号按式(1)进行分解计算得到。同理可得:

$$H(i,j) = \frac{1}{2}\Delta v_1 + \frac{1}{2}\Delta v_2 - \frac{1}{2} \quad (6)$$

其中:

$$\begin{aligned} \Delta v_1 &= F(2i+1,2j) - F(2i,2j) \\ \Delta v_2 &= F(2i+1,2j) - F(2i+2,2j) \end{aligned} \quad (7)$$

可见,高频系数 $H(i,j)$ 取决于原始图像像素 $F(2i+1,2j)$ 及其上下 2 个相邻像素的变化量之和。故 $H(i,j)$ 在放大后高频子带中的定位布放准则是:

1) 当 $|\Delta v_1| \geq |\Delta v_2|$ 时, $H(i,j)$ 放在 $m(2i,2j)$ 位置;

2) 当 $|\Delta v_1| < |\Delta v_2|$ 时, $H(i,j)$ 放在 $m(2i+1,2j)$ 位置。

2j) 位置。

即根据上下变化量的大小,在图 3(b) 所示的垂直列方向 d_v 上下移动一个像素位置。

对于呈现对角边缘信息的高频子带 HH1,该子带小波系数是水平行变化和垂直列变化高频信息的叠加,因此, $H(i,j)$ 在放大后高频子带中的位置确定必须同时考虑水平和垂直 2 个方向的变化情况,具体定位布放准则如下:

1) 当 $|\Delta h_1| \geq |\Delta h_2|$ 且 $|\Delta v_1| \geq |\Delta v_2|$ 时, $H(i,j)$ 放在 $m(2i,2j)$ 位置;

2) 当 $|\Delta h_1| \geq |\Delta h_2|$ 且 $|\Delta v_1| < |\Delta v_2|$ 时, $H(i,j)$ 放在 $m(2i+1,2j)$ 位置;

3) 当 $|\Delta h_1| < |\Delta h_2|$ 且 $|\Delta v_1| \geq |\Delta v_2|$ 时, $H(i,j)$ 放在 $m(2i,2j+1)$ 位置;

4) 当 $|\Delta h_1| < |\Delta h_2|$ 且 $|\Delta v_1| < |\Delta v_2|$ 时, $H(i,j)$ 放在 $m(2i+1,2j+1)$ 位置。

即根据前后和上下变化量的大小,通过以上规则在图 3(b) 所示的水平行方向 d_h 、垂直列方向 d_v 或在对角方向 d_d ,移动一个像素位置。

总之,高频子带系数 $H(i,j)$ 在放大的高频子带中的定位布放不再是直接按照位置坐标 2 倍关系布放,而是根据 Daub 5/3 小波高频系数的提升计算公式,计算高频系数在原始图像中对应的相关像素的前后变化量或上下变化量,然后依照这 2 个变化量的大小来确定 $H(i,j)$ 在放大高频子带中的定位布放位置,由此,可以避免高频子带放大时因为定位不准造成的伪吉普斯现象。

1.3 高频子带放大后基于边缘方向的插值方法

由图 3 可以看出,1.2 节中介绍的高频系数放大后的定位布放方法,仅是完成了 $H(i,j)$ 系数在放大后高频子带中的准确位置布放,也就是在图 3(b) 中完成蓝绿像素的定位布放。显然,还有 3/4 总数的空白位置的高频系数需要由插值方法来计算填充。下面仍以图 3 为例说明高频子带放大后,空白位置高频系数的插值的方法。

对于呈现垂直边缘信息的高频子带 HL1,假设图 3(a) 所示的垂直边缘系数,在放大后高频子带中的布放位置如图 3(b) 所示。因为不为 0 的高频系数对应于垂直边缘的位置,所以图 3(b) 中有 2 条垂直边缘,一条是 $m(2i,2j) - m(2i+2,2j)$ 对应的垂直边缘,另一条是 $m(2i,2j+2) - m(2i+2,2j+2)$ 对应的垂直边缘。因为不为 0 的高频系数必然对应着边缘的位置,所以不可随意用插值算法来计算填充空白位置的高频系数,否则会造成虚假边缘。由此,本文提出基于边缘方向的空白点高频系数插值计算方法,基本思想是只能顺着边缘的方向进行插值。以

图 3(b) 为例,只能根据 $m(2i,2j)$ 和 $m(2i+2,2j)$ 的高频系数来插值计算 $m(2i+1,2j)$ 的高频系数,插值规则如下:

1) 若 $m(2i+1,2j)$ 上下相邻位置的高频系数不为 0,则 $m(2i+1,2j) = (m(2i,2j) + m(2i+2,2j))/2$;

2) 若 $m(2i+1,2j)$ 上下相邻位置的高频系数有一个为 0,则 $m(2i+1,2j) = 0$;

3) 空白列 $m(2i,2j+1) - m(2i+2,2j+1)$ 位置的高频系数必须保持为 0,不可通过左右相邻系数进行插值填充,否则会造成虚假垂直边缘。

同理,也是基于以上规则,根据 $m(2i,2j+2)$ 和 $m(2i+2,2j+2)$ 的高频系数来插值计算 $m(2i+1,2j+2)$ 的高频系数。

对于呈现水平边缘信息的高频子带 LH1,假设图 3(a) 所示的水平边缘系数,在放大后高频子带中的布放位置如图 3(b) 所示。因为不为 0 的高频系数对应于水平边缘的位置,所以图 3(b) 中有 2 条水平边缘,一条是 $m(2i,2j) - m(2i,2j+2)$ 对应的水平边缘,另一条是 $m(2i+2,2j) - m(2i+2,2j+2)$ 对应的水平边缘。同理,只能根据水平边缘的方向,插值计算 2 条水平边缘上对应的空白点的高频系数,插值规则如下:

1) 若空白像素水平方向左右相邻的高频系数不为 0,则其高频系数为左右相邻高频系数的平均值。

2) 若相邻其中一个为 0,则插值为 0。

3) 空白行 $m(2i+1,2j) - m(2i+1,2j+2)$ 位置的高频系数要保持为 0,不可通过上下相邻系数进行插值填充,否则会造成虚假水平边缘。

对于呈现对角边缘信息的高频子带 HH1,假设图 3(a) 所示的水平边缘系数,在放大后高频子带中的布放位置如图 3(b) 所示。因为不为 0 的高频系数对应于对角边缘的位置,所以图 3(b) 中有 2 条对角边缘,一条是 45° 的 $m(2i+2,2j) - m(2i,2j+2)$ 对应的对角边缘,另一条是 135° 的 $m(2i,2j) - m(2i+2,2j+2)$ 对应的对角边缘。同理,只能根据对角边缘的方向,插值计算 2 条对角边缘上对应的空白点的高频系数,插值规则如下:

1) 若空白像素对角方向相邻的 2 个高频系数不为 0,则其高频系数为相邻高频系数的平均值。

2) 若相邻其中一个为 0,则插值为 0。在图 3(b) 中,也就是只能插值计算 $m(2i+1,2j+1)$ 的高频系数,其值为对角方向系数值的平均。

3) 非对角方向的其余空白位置的高频系数要保持为 0,不可通过上下或左右相邻系数进行插值填充,否则会造成虚假对角边缘。

总之,并非所有空白点的高频系数都需要插值填充,3个高频子带中空白系数的插值,只能在相应的边缘及其所在的方向上进行,其余空白高频系数必须保持为0,否则就会产生虚假边缘。

1.4 小波低频子带放大

小波低频部分集中了原图像的绝大部分信息,与原始低分辨率图像较为相似,可用原始低分辨率图像替代小波低频子带的放大图像。为了保证原始图像和低频子带放大图像的取值范围一致,对原始图像进行线性比例变换如下:

$$F(i, j)' = kF(i, j) \quad (8)$$

其中,比例系数 $k = \frac{LL1_{\max}}{F_{\max}}$; $LL1_{\max}$ 是低频子带 $LL1$ 的系数最大值; F_{\max} 是原始图像的像素最大值。

2 实验结果与分析

本文对低分辨率图像做了以下2组实验,并对提出算法的性能进行了测试,与文献[10]提出的基于小波变换的牛顿插值算法进行了性能对比。

第1组实验分别对本文提出的高频子带放大后系数准确定位布放方法、高频子带放大后基于边缘方向的插值方法的有效性进行了测试。图4是其中一次16倍图像放大测试的典型结果。

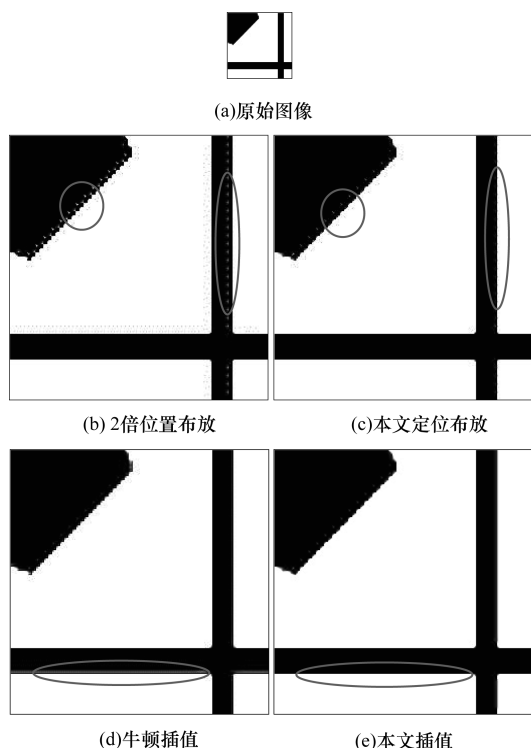


图4 16倍图像放大测试结果

其中,图4(a)是原始图像,分别含有明显的水平、垂直和45°方向的边缘信息;图4(b)、图4(c)仅用于观察不同布放方法放大后的图像效果,空白位

置高频系数未做任何插值,其中图4(b)是高频系数 $H(i, j)$ 在放大高频子带中的按照传统2倍位置坐标关系布放的放大效果;图4(c)为高频子带系数 $H(i, j)$ 在放大高频子带中的布放按照本文提出的定位布放方法放大后的图像,通过对比可以看出,图4(b)产生了伪吉普斯现象,如2个圆圈标出的边缘位置,都有伪吉普斯波纹现象,而图4(c)的边缘清晰,不存在伪吉普斯现象;图4(d)、图4(e)是高频子带系数都按照本文算法进行定位布放后,对空白位置的高频系数运用不同的方法进行插值,观察不同插值方法放大后的图像效果。其中,图4(d)为高频子带系数按照本文算法布放后,运用牛顿插值算法进行插值的放大图像;图4(e)为高频子带系数按照本文算法布放后,运用本文基于边缘方向方法进行插值的放大图像。通过对比可以看出,图4(d)产生了虚假边缘,如圆圈标出的水平边缘位置,且在45°边缘上锯齿现象严重;而图4(e)的边缘清晰,不存在虚假边缘,且45°边缘上锯齿细微。

第2组实验是用本文提出的算法和文献[10]提出的基于小波变换的牛顿插值算法进行性能对比。文献[10]提出的算法是高频子带放大后,原先的高频系数按照2倍位置坐标关系布放,然后对空白位置的高频系数按照牛顿插值方法插值。图5是对比实验的一次典型结果。

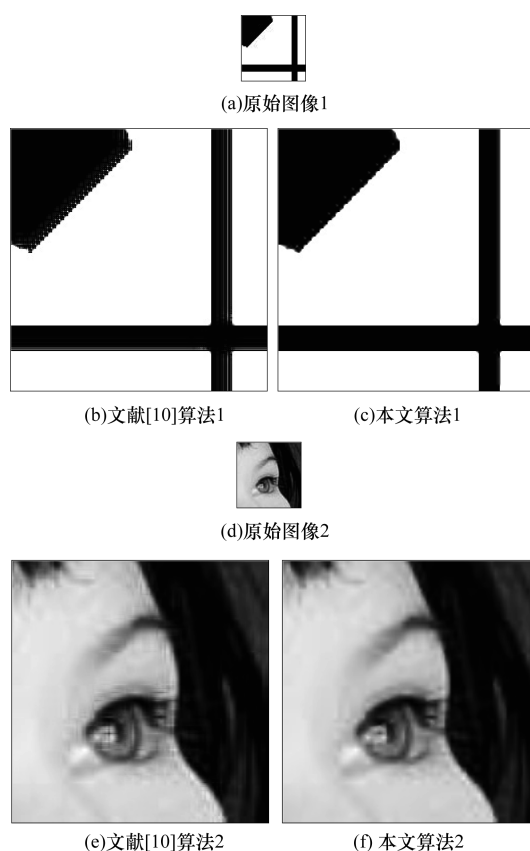


图5 对比实验结果

其中,图5(a)、图5(d)是2幅原始图像;图5(b)、图5(e)是文献[10]算法的16倍放大结果;图5(c)、图5(f)是本文算法的放大结果。由图5(b)、图5(e)可以看出,文献[10]算法在图像的边缘位置存在明显的伪吉布斯现象,并产生了虚假边缘导致的图像失真问题。而本文算法放大的结果图5(c)、图5(f),失真度较小,目标边缘也比较清晰,能够有效消除伪吉布斯现象,并避免虚假边缘的产生。

3 结束语

本文提出一种小波域内高频子带插值放大的算法。该算法根据 Daub 5/3 小波高频系数的提升公式,计算高频系数在原始图像中对应的相关像素的前后变化量或上下变化量,然后依照这2个变化量的大小,确定各高频系数在放大高频子带中的定位布放位置。对于高频子带放大后空白点的高频系数,只能在相应的边缘及其所在的方向上进行插值计算,其余空白高频系数必须保持为0。实验结果表明,该算法能够克服由于小波变换缺乏平移不变性造成的伪吉布斯现象。

参考文献

- [1] 金海丁,周孝宽. 数字图像自适应插值[J]. 激光与红外,2006,36(9):907-910.
- [2] Parker J A, Kenyon R V, Troxel D E. Comparison of Interpolating Methods for Image Resampling[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 1983, 2(1):31-39.
- [3] 龚昌来,杨冬涛. 一种改进的双线性插值图像放大算法[J]. 激光与红外,2009,39(8):899-901.
- [4] 王会鹏,周利莉,张 杰. 一种基于区域的双三次图像插值算法[J]. 计算机工程,2010,36(19):216-218.
- [5] 李英明,夏海宏. 双二次 B-样条插值图像缩放[J]. 中国图象图形学报,2011,16(10):1937-1943.
- [6] 李庆忠,刘 清. 基于小波变换的低照度图像自适应增强算法[J]. 中国激光,2015,42(2).
- [7] 李慧斌,刘 峰. 小波变换和稀疏冗余表示的混合图像去噪[J]. 中国图象图形学报,2012,17(9):1061-1068.
- [8] 刘志刚,刘代志. 基于小波变换的图象放大方法再探讨[J]. 中国图象图形学报,2003,8(4):403-408.
- [9] 杨 波,吴纪桃,谢晓振. 小波域中双稀疏的单幅图像超分辨[J]. 中国图象图形学报,2014,19(11):1570-1576.
- [10] 程玉宝. 一种基于小波变换的红外图像放大算法[J]. 光学与光电技术,2008,6(5):59-61.
- [11] 冯象初,姜东焕,徐光宝. 基于变分和小波变换的图像放大算法[J]. 计算机学报,2008,31(2):340-345.
- [12] 蔡 念,张海员,张 楠,等. 基于小波的双线性插值误差补偿算法的图像放大[J]. 激光与红外,2010,40(5):558-562.
- [13] 董卫军,周明全,耿国华. 一种新的基于小波变换的图像放大算法[J]. 计算机应用与软件,2007,24(4):18-20.
- [14] 刘 婕,宋伟杰. 基于小波变换和 Cycle Spinning 图像放大算法[J]. 计算机工程与应用,2011,47(33):207-208.
- [15] Adams M D, Ossentri F K. Reversible Integer-to-integer Wavelet Transforms for Image Compression: Performance Evaluation and Analysis[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2000, 9(6):1010-1024.
- [8] Torres R S, Falcao A X. Contour Saliency Descriptors for Effective Image Retrieval and Analysis[J]. Image Vision Comput, 2007, 25(1):3-13.
- [9] Luce B, Saïd H, Raïd M. One-level Reformulation of the Bilevel Knapsack Problem Using Dynamic Programming[J]. Discrete Optimization, 2013, 10(1):1-10.
- [10] Xu Guoqing, Mu Zhichun, Xu Ye. Shape Retrieval Using Multi-level Included Angle Functions-based Fourier Descriptor[J]. Journal of Southeast University, 2014, 30(1):22-26.
- [11] El-ghazal A, Basir O, Belkasim S. Invariant Curvature-based Fourier Shape Descriptors[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2012, 23(4):622-633.
- [12] Atreyee S, Sugata B, Liu Chengjun. New GPHOG Descriptors for Object and Scene Image Classification[J]. Machine Vision and Applications, 2014, 25(2):361-375.
- [13] 李明子. 基于紧凑局部描述符聚类矢量签名的 Web 规模图像检索研究[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(31):84-89.
- [14] Miguel A H, Francesc J F. An Improved Distance-based Relevance Feedback Strategy for Image Retrieval[J]. Image and Vision Computing, 2013, 31(10):124-131.
- [15] Jawandhiya P M, Pravin R S, Suresh A A. Image Indexing for Fast Retrieval of Image from Image Database Using Color Feature[J]. International Journal of Advancements in Technology, 2010, 1(2):170-174.

编辑 索书志

(上接第267页)

编辑 刘 冰 索书志