



JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS

主办: 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

2014
12
VOL.19

ISSN1006-8961
CN11-3758/TB



图像色彩和谐变化 P1766



第19卷第12期（总第224期）

2014年12月16日

中国精品科技期刊
中国国际影响力优秀学术期刊
中国科技核心期刊

版权声明

凡向《中国图象图形学报》投稿，均视为同意在本刊网站及CNKI等全文数据库出版，所刊载论文已获得著作权人的授权。本刊所有图片均为非商业目的使用，所有内容，未经许可，不得转载或以其他方式使用。

Copyright

All rights reserved by Journal of Image and Graphics, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS. The content (including but not limited text, photo, etc) published in this journal is for non-commercial use.

主管单位 中国科学院

主办单位 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

主 编 李小文

编辑出版《中国图象图形学报》编辑出版委员会

邮政信箱 北京9718信箱

邮 编 100101

电子信箱 jig@irsa.ac.cn

电 话 010-64807995

网 址 www.cjig.cn

广告经营许可证 京朝工商广字第0361号

总 发 行 北京报刊发行局

订 购 全国各地邮局

海外发行 中国国际图书贸易集团有限公司
(邮政信箱：北京399信箱 邮编：100048)

印刷装订 北京科信印刷有限公司

Journal of Image and Graphics

Title inscription: Song Jian

Monthly, Started in 1996

Superintended by Chinese Academy of Sciences

Sponsored by Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS
China Society of Image and Graphics

Institute of Applied Physics and Computational Mathematics

Editor-in-Chief LI Xiaowen

Editor, Publisher Editorial and Publishing Board of Journal of
Image and Graphics

P.O.Box 9718, Beijing, P.R.China

Zip code 100101

E-mail jig@irsa.ac.cn

Telephone 010-64807995

Website www.cjig.cn

Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals

Domestic All Local Post Offices in China

Overseas China International Book Trading Corporation
(P.O.Box 399, Beijing 100048, P.R.China))

Printed by Beijing Kexin Printing Co., Ltd.

CN 11-3758/TB

ISSN 1006-8961

CODEN ZTTXFZ

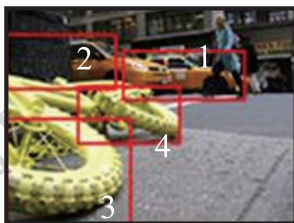
国外发行代号 M1406

国内邮发代号 82-831

国内定价 50.00元



改进鱼眼变换技术的图像适应(第1743页)



面向部件遮挡补偿的车辆检测模型(第1802页)



基于暗原色及入射光假设的单幅图像去雾(第1812页)

综述

视频摘要技术综述

王娟, 蒋兴浩, 孙铨锋 1685

局部二进制模式方法综述

刘丽, 谢毓湘, 魏迎梅, 老松杨 1696

图像处理和编码

2维全相位内插核的设计与实现

苏飞, 孙杰, 秦娟, 段宇翔 1721

改进的正则化模型在图像恢复中的应用

李旭超, 宋博 1730

改进鱼眼变换技术的图像适应

张丽霞, 区兆明, 宋鸿陟 1743

去除乘性噪声的分数阶变分模型及算法

田丹, 薛定宇, 陈大力 1751

丢包环境中H.264视频编码的快速模式判决

兰梦, 张远, 魏雨农 1759

图像分析和识别

偏度和峰度的图像色彩和谐变化

马云芳, 宋明黎, 卜佳俊 1766

结合稀疏表示和概率潜在语义的图像模糊度评价

张涛, 王新年, 梁德群 1775

Log-Gabor小波和分数阶多项式KPCA的火焰图像状态识别

宋昱, 吴一全 1785

加权局部二值模式的人脸特征提取

张洁玉, 武小川 1794

面向部件遮挡补偿的车辆检测模型

陈远, 谢昭, 吴克伟 1802

基于暗原色及入射光假设的单幅图像去雾

於敏杰, 张浩峰 1812

空间可变有限混合模型

申小虎, 吕导中, 万荣春 1820

遥感图像处理

高分辨率极化SAR图像水平集分割

邹鹏飞, 李震, 田帮森 1829

混合本征模型的多视SAR影像海冰密度检测

汪霄箭, 李玉, 赵泉华, 何晓军 1836

总目次

CONTENTS

JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Improved fisheye transformation for image retargeting (P1743)



Part-oriented occlusion compensate model for vehicle detection(P1802)



Single-image dehazing based on dark channel and incident light assumption(P1812)

Review

- Review of video abstraction
Wang Juan, Jiang Xinghao, Sun Tanfeng 1685
- Survey of Local Binary Pattern method
Liu Li, Xie Yuxiang, Wei Yingmei, Lao Songyang 1696

Image Processing and Coding

- Design and implementation of 2D all-phase interpolation kernel
Su Fei, Sun Jie, Qin Juan, Duan Yuxiang 1721
- Applying the improved regularization model to image restoration
Li Xuchao, Song Bo 1730
- Improved fisheye transformation for image retargeting
Zhang Lixia, Ou Zhaoming, Song Hongzhi 1743
- Fractional-order variation model and algorithm for multiplicative noise removal
Tian Dan, Xue Dingyu, Chen Dali 1751
- Fast-mode decision for H.264 video coding in a packet-loss environment
Lan Meng, Zhang Yuan, Wei Yunong 1759

Image Analysis and Recognition

- Image color harmonization algorithm using skewness and kurtosis
Ma Yunfang, Song Mingli, Bu Jiajun 1766
- Image blur evaluation based on sparse representation and probabilistic latent semantic analysis
Zhang Tao, Wang Xinnian, Liang Dequn 1775
- State identification of boiler combustion flame images via Log-Gabor wavelet and kernel principal component analysis with fractional power polynomial models
Song Yu, Wu Yiquan 1785
- Feature extraction of faces based on a weighted local binary pattern
Zhang Jieyu, Wu Xiaochuan 1794
- Part-oriented occlusion compensate model for vehicle detection
Chen Yuan, Xie Zhao, Wu Kewei 1802
- Single-image dehazing based on dark channel and incident light assumption
Yu Minjie, Zhang Haofeng 1812
- Spatially variant finite mixture model
Shen Xiaohu, Lyu Daozhong, Wan Rongchun 1820

Remote Sensing Image Processing

- High-resolution PolSAR image level set segmentation
Zou Pengfei, Li Zhen, Tian Bangsen 1829
- Intrinsic mixture model-based measurement of sea ice density from a multi-look SAR image
Wang Xiaojian, Li Yu, Zhao Quanhua, He Xiaojun 1836

中图法分类号: TP309 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2014)12-1721-09

论文引用格式: Su F, Sun J, Qin J, Duan Y X. Design and implementation of 2D all-phase interpolation kernel[J]. Journal of Image and Graphics, 2014, 19(12): 1721-1729. [苏飞, 孙杰, 秦娟, 段宇翔. 2 维全相位内插核的设计与实现[J]. 中国图象图形学报, 2014, 19(12): 1721-1729.][DOI: 10.11834/jig.20141203]

2 维全相位内插核的设计与实现

苏飞, 孙杰, 秦娟, 段宇翔

天津理工大学电子信息工程学院, 天津 300384

摘要: **目的** 图像的内插处理中,常将图像分解成许多子块,在块与块的交界处或图像边缘会引起图像质量的损伤。为了克服边缘效应,本文提出基于 2 维全相位数字信号处理的内插算法。**方法** 首先设计加窗的 2 维全相位数字信号处理算法,并利用该算法得到基于离散傅里叶变换(DFT)、离散余弦变换(DCT)和离散小波变换(DWT)的 3 种类型 2 维图像内插核,可同时处理行列及斜向频率分布。其次,为保持线性相位特性,对 2 维基窗和特性矩阵 H 的构成提出约束条件。**结果** 该方法在有效地降低分块效应的同时,解决了对斜向内容分量无法有效操作的问题,使内插得到的图像 PSNR 至少提升 3 dB。**结论** 设计针对不同频率分布的 3 种图像内插实验,并同传统 6 种内插方式结果进行对比,表明该算法物理意义明确,恢复效果良好,实用性较强。

关键词: 全相位;内插核;模板;全相位基;基窗

Design and implementation of 2D all-phase interpolation kernel

Su Fei, Sun Jie, Qin Juan, Duan Yuxiang

Institute of Electronic Information Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China

Abstract: **Objective** Traditional image interpolation methods separate an image into many sub-blocks. In this case, the quality of the recovered image becomes poor, particularly in the boundary of the blocks and the image borders. To eliminate this side effect, we present a new algorithm based on the 2D all-phase digital signal processing method. **Method** First, an algorithm for 2D all-phase windowed processing is designed to achieve three kinds of interpolation kernel based on DFT, DCT, and DWT. The three kernels, which are built directly from the 2D transmission property H , can process the frequency distribution along the row and column as well as along the diagonal slope directions. Both H and the base window should be confined for phase linearity. **Result** The proposed algorithm effectively eliminates the blocking effects and solves the uncontrollable contents in the diagonal slope directions using a traditional technique. In addition, the proposed algorithm improves the PSNR of the recovered images by at least 3 dB. **Conclusion** Comparison experiments on the proposed algorithm and six traditional methods show that the proposed algorithm is physically explicit and applicable.

Key words: all-phase; interpolation kernel; template; all-phase base; base window

收稿日期:2014-05-15;修回日期:2014-07-21

基金项目:天津理工大学高级人才引进基金项目(2013ADIF0755)

第一作者简介:苏飞(1975—),男,讲师,2004 年于天津大学获信号与信息处理专业博士学位,主要研究方向为数字信号处理,数字电视软件设计,发表 EI 核心论文 20 余篇,完成著作一部。E-mail: sufei19751215@163.com

0 引言

2 维图像内插广泛地应用于压缩重构、图像放大、信息复原等领域。最早应用的插值算法是线性插值^[1],主要有理想低通特性插值、邻近域插值和双线性插值算法,具有计算量小,插值速度快的优点;随后 Herman 等人^[2-3]将 B 样条应用于医学图像插值上,这两种算法以及立方插值法,其本质都是通过建立数学相关函数以求出待插值点,因此,插值后使边界变得模糊。自适应插值则在分析图像结构的基础上,不同特征的区域采用不同的插值算法以适应各方向的边缘,但计算量又较大^[4-5]。小波分析是时间和频率的局部变换,能有效地提取出信号信息,被誉为“数字显微镜”。小波插值通过保留各子带中不多系数而使图像得以完美重构,虽然较好地解决了图像边界过于光滑的缺陷,但算法较复杂且收敛性取决于小波性质,算法不稳定^[6-7]。

基于全相位的图像内插是建立在重叠加权方法之上的^[8],它通过包含某处理点的全部分块的平均输出产生内插结果,并采用加窗方式使效果得到进一步改善。文献[9]对 1 维信号设计了全相位内插算法并提出了全相位内插核的概念,但这种内插核只是基于离散余弦变换(DCT)变换,对于具有复数性质的 DFT 及完全离散意义的离散小波变换(DWT)却无法实现。文献[10-11]在 2 维全相位模板设计方面进行了初步探究并在离散傅里叶变换(DFT)域实现了内插模板,但并未给出设计的一般形式,对 DCT 和 DWT 等正交变换域没有结论;此外,也并未明确建立 2 维全相位内插核。因此,本文将在系统设计 2 维全相位信号处理的基础上,给出全相位内插核的数学表达及求解方法;对于 2 维全相位基的归一化处理方法进行讨论,最后设计实验与 6 种传统方法内插效果进行对比和分析。

1 2 维加窗全相位处理算法设计

传统 2 维信号的处理原理图如图 1 所示^[12]。

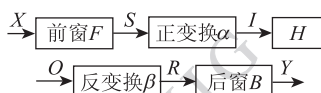


图 1 带前后窗的 2 维正交变换处理

Fig. 1 Two dimensional orthogonal transformation process with front and back windows

假定系统维度为 $N \times N$, 输入 X 是 $x_{i,j}$ 遍历 N^2 位置时的全部输入矩阵, Y 是对应元素 $x_{i,j}$ 位置的输出矩阵, 前后窗函数定义为

$$F = \begin{bmatrix} F_{0,0} & F_{0,1} & \cdots & F_{0,N-1} \\ F_{1,0} & F_{1,1} & \cdots & F_{1,N-1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ F_{N-1,0} & F_{N-1,1} & \cdots & F_{N-1,N-1} \end{bmatrix}_{N \times N}$$

$$B = \begin{bmatrix} B_{0,0} & B_{0,1} & \cdots & B_{0,N-1} \\ B_{1,0} & B_{1,1} & \cdots & B_{1,N-1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ B_{N-1,0} & B_{N-1,1} & \cdots & B_{N-1,N-1} \end{bmatrix}_{N \times N} \quad (1)$$

由图 1 得到

$$S_{p,q} = X_{p,q}^{(u,v)} \cdot F_{p,q}, \quad Y_{u,v} = R_{u,v} \cdot B_{u,v}$$

$$I_{m,n} = \sum_{p=0}^{N-1} \sum_{q=0}^{N-1} \alpha_{m,p} \alpha_{n,q} S_{p,q} = \sum_{p=0}^{N-1} \sum_{q=0}^{N-1} \alpha_{m,p} \alpha_{n,q} F_{p,q} X_{p,q}^{(u,v)}$$

$$O_{m,n} = I_{m,n} H_{m,n} = \sum_{p=0}^{N-1} \sum_{q=0}^{N-1} \alpha_{m,p} \alpha_{n,q} H_{m,n} F_{p,q} X_{p,q}^{(u,v)} \quad (2)$$

各中间变量如图 1 所示。对于 $N \times N$ 2 维信号的全相位处理, 如果分别在 N 个长度为 N 的行信号上进行, 虽然在行方向上实现截断效应的改善, 但列方向上由于忽略相关性而没有得到充分处理。2 维的全相位信号处理应从纵横空间域上同时进行即分块重叠方式, 如图 2 所示。

2 维全相位数字处理的输入是 $x_{i,j}$ 遍历 $N \times N$ 个位置的 N^2 个矩阵, 输出则是对应 $X^{(u,v)}$ 在位置 (u, v) 处 N^2 个输出 $Y_{u,v}^{(u,v)}$ 的求的平均。输入遍历矩阵

$$X^{(u,v)} = \begin{bmatrix} x_{i-u,j-v} & x_{i-u,j-v+1} & \cdots & x_{i-u,j-v+N-1} \\ x_{i-u+1,j-v} & x_{i-u+1,j-v+1} & \cdots & x_{i-u+1,j-v+N-1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{i-u+N-1,j-v} & x_{i-u+N-1,j-v+1} & \cdots & x_{i-u+N-1,j-v+N-1} \end{bmatrix}_{N \times N} \quad (3)$$

从而得到对与任意输入点 $x_{i,j}$ 的相关的滑动坐标为 (u, v) 的输出为

$$Y_{u,v} = B_{u,v} \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} \beta_{u,m} \beta_{v,n} O_{m,n} =$$

$$\sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} \beta_{u,m} \beta_{v,n} \sum_{p=0}^{N-1} \sum_{q=0}^{N-1} \alpha_{m,p} \alpha_{n,q} H_{m,n} F_{p,q} B_{u,v} X_{p,q}^{(u,v)} =$$

$$\sum_{p=0}^{N-1} \sum_{q=0}^{N-1} \left(\sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} \alpha_{m,p} \alpha_{n,q} \beta_{u,m} \beta_{v,n} H_{m,n} F_{p,q} B_{u,v} \right) X_{p,q}^{(u,v)} \quad (4)$$

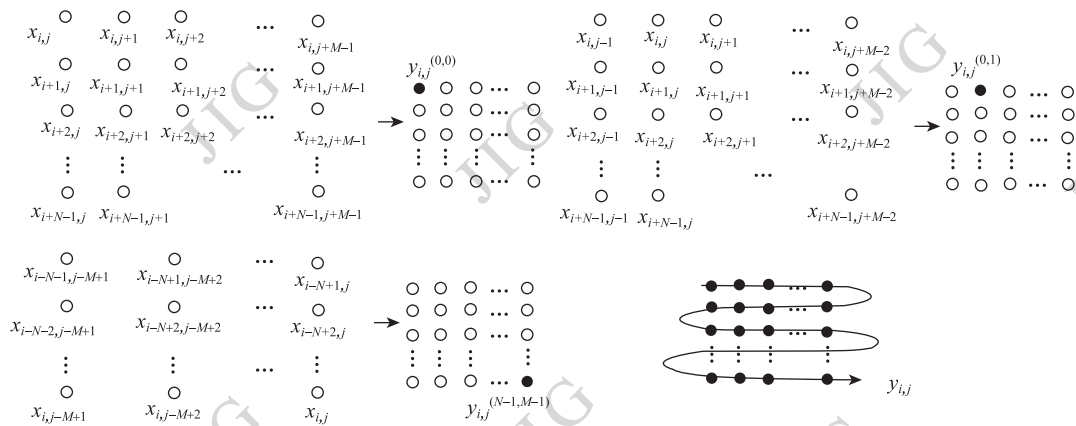


图2 2维全相位处理示意图

Fig. 2 Two dimensional all-phase digital signal processing method

所以,加双窗的全相位信号处理输出为

$$y = \frac{1}{N^2} \sum_{u=0}^{N-1} \sum_{v=0}^{N-1} Y_{u,v} = \frac{1}{N^2} \sum_{u=0}^{N-1} \sum_{v=0}^{N-1} \left[\sum_{p=0}^{N-1} \sum_{q=0}^{N-1} \left(\sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} \alpha_{m,p} \alpha_{n,q} \beta_{u,m} \beta_{v,n} H_{m,n} F_{p,q} B_{u,v} \right) X_{p,q}^{(u,v)} \right] \quad (5)$$

观察式(3)易知

$$X_{p,q}^{(u,v)} = x_{i+p-u, j+q-v} \quad (6)$$

令

$$T_{p,q}^{(u,v)} = \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} \alpha_{m,p} \alpha_{n,q} \beta_{u,m} \beta_{v,n} H_{m,n} F_{p,q} B_{u,v} \quad (7)$$

把式(6)(7)代入到式(5)得

$$y = \frac{1}{N^2} \sum_{u=0}^{N-1} \sum_{v=0}^{N-1} \left[\sum_{p=0}^{N-1} \sum_{q=0}^{N-1} T_{p,q}^{(u,v)} x_{i+p-u, j+q-v} \right] \quad (8)$$

分别交换 \$r\$ 与 \$x\$ 和 \$c\$ 与 \$y\$ 的求和顺序后得

$$y = \frac{1}{N^2} \left(\sum_{r=1}^{N-1} \sum_{u=0}^{N-1-r} + \sum_{r=-N+1}^0 \sum_{u=-r}^{N-1} \right) T_{r+u, c+v}^{(u,v)} x_{i+r, j+c} = \frac{1}{N^2} \left[\sum_{r=1}^{N-1} \sum_{u=0}^{N-1-r} \sum_{c=1}^{N-1} \sum_{v=0}^{N-1-c} + \sum_{r=-N+1}^0 \sum_{u=-r}^{N-1} \sum_{c=-r}^{N-1} \sum_{v=-c}^{N-1} \right] T_{r+u, c+v}^{(u,v)} x_{i+r, j+c} =$$

$$\sum_{r=1}^{N-1} \sum_{u=0}^{N-1-r} \sum_{c=-N+1}^0 \sum_{v=-c}^{N-1} T_{r+u, c+v}^{(u,v)} x_{i+r, j+c} + \frac{1}{N^2} \left[\sum_{r=-N+1}^0 \sum_{u=-r}^{N-1} \sum_{c=1}^{N-1} \sum_{v=0}^{N-1-c} + \sum_{r=-N+1}^0 \sum_{u=-r}^{N-1} \sum_{c=-N+1}^0 \sum_{v=-c}^{N-1} \right] T_{r+u, c+v}^{(u,v)} x_{i+r, j+c} = \frac{1}{N^2} \left[\sum_{r=1}^{N-1} \sum_{c=1}^{N-1} \left(\sum_{u=0}^{N-1-r} \sum_{v=0}^{N-1-c} T_{r+u, c+v}^{(u,v)} \right) + \sum_{r=1}^{N-1} \sum_{c=-N+1}^0 \left(\sum_{u=0}^{N-1-r} \sum_{v=-c}^{N-1} T_{r+u, c+v}^{(u,v)} \right) + \sum_{r=-N+1}^0 \sum_{c=1}^{N-1} \left(\sum_{u=-r}^{N-1} \sum_{v=0}^{N-1-c} T_{r+u, c+v}^{(u,v)} \right) + \sum_{r=-N+1}^0 \sum_{c=-N+1}^0 \left(\sum_{u=-r}^{N-1} \sum_{v=-c}^{N-1} T_{r+u, c+v}^{(u,v)} \right) \right] x_{i+r, j+c} \quad (9)$$

参考式(7)一式(9),可得全相位变换公式,

$$y = \sum_{r=-N+1}^{N-1} \sum_{c=-N+1}^{N-1} A_{r,c}^d x_{i+r, j+c} \quad (10)$$

双窗全相位变换基定义为

$$A_{r,c}^d = \begin{cases} A^{++} = \left[\frac{1}{N^2} \sum_{u=0}^{N-1-r} \sum_{v=0}^{N-1-c} B_{u,v} T_{r+u, c+v}^{(u,v)} F_{r+u, c+v} \right] & 1 \leq r \leq N-1, 1 \leq c \leq N-1 \\ A^{+-} = \left[\frac{1}{N^2} \sum_{u=0}^{N-1-r} \sum_{v=-c}^{N-1} B_{u,v} T_{r+u, c+v}^{(u,v)} F_{r+u, c+v} \right] & 1 \leq r \leq N-1, -N+1 \leq c \leq 0 \\ A^{-+} = \left[\frac{1}{N^2} \sum_{u=-r}^{N-1} \sum_{v=0}^{N-1-c} B_{u,v} T_{r+u, c+v}^{(u,v)} F_{r+u, c+v} \right] & -N+1 \leq r \leq 0, 1 \leq c \leq N-1 \\ A^{--} = \left[\frac{1}{N^2} \sum_{u=-r}^{N-1} \sum_{v=-c}^{N-1} B_{u,v} T_{r+u, c+v}^{(u,v)} F_{r+u, c+v} \right] & -N+1 \leq r \leq 0, -N+1 \leq c \leq 0 \end{cases} \quad (11)$$

双窗全相位变换基由无窗变换基和以下定义的 2 维窗 C^d 共同决定。

$$C^d = \begin{cases} C^{++} = [B_{u,v} F_{r+u,c+v}] & 1 \leq r \leq N-1, 1 \leq c \leq N-1, 0 \leq u \leq N-1-r, 0 \leq v \leq N-1-c \\ C^{+-} = [B_{u,v} F_{r+u,c+v}] & 1 \leq r \leq N-1, -N+1 \leq c \leq 0, 0 \leq u \leq N-1-r, -c \leq v \leq N-1 \\ C^{-+} = [B_{u,v} F_{r+u,c+v}] & -N+1 \leq r \leq 0, 1 \leq c \leq N-1, -r \leq u \leq N-1, 0 \leq v \leq N-1-c \\ C^{--} = [B_{u,v} F_{r+u,c+v}] & -N+1 \leq r \leq 0, -N+1 \leq c \leq 0, -r \leq u \leq N-1, -c \leq v \leq N-1 \end{cases} \quad (12)$$

C^d 的元素可通过图 3 来说明。

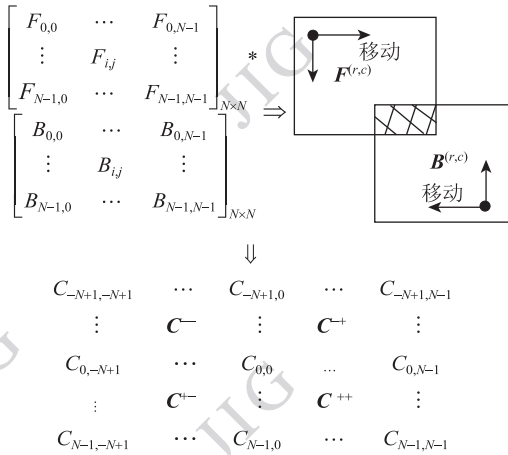


图 3 2 维窗 C^d 形成示意图

Fig. 3 Diagram of constructing 2D window C^d

根据前后窗移动时的相对位置,分别形成窗 C^d 4 个子矩阵,其中 $C_{r,c}^d$ 又是包含 $(N-|r|)(N-|c|)$ 个元素的亚矩阵。窗 C 形成过程类似卷积,因此称其为卷积窗。前后均为矩形窗时对应的卷积窗

$$A_{r,c}^d = \begin{cases} A^{++} = \frac{h(-r, -c)}{N^2} \sum_{u=0}^{N-1-r} \sum_{v=0}^{N-1-c} B(u,v) F(u+r, v+c) & 1 \leq r \leq N-1, 1 \leq c \leq N-1 \\ A^{+-} = \frac{h(-r, -c)}{N^2} \sum_{u=0}^{N-1-r} \sum_{v=-c}^{N-1} B(u,v) F(u+r, v+c) & 1 \leq r \leq N-1, -N+1 \leq c \leq 0 \\ A^{-+} = \frac{h(-r, -c)}{N^2} \sum_{u=-r}^{N-1} \sum_{v=0}^{N-1-c} B(u,v) F(u+r, v+c) & -N+1 \leq r \leq 0, 1 \leq c \leq N-1 \\ A^{--} = \frac{h(-r, -c)}{N^2} \sum_{u=-r}^{N-1} \sum_{v=-c}^{N-1} B(u,v) F(u+r, v+c) & -N+1 \leq r \leq 0, -N+1 \leq c \leq 0 \end{cases} \quad (16)$$

仔细观察式(16),可知二重求和部分等于 B 的反转与 F 的卷积。所以,式(16)又可写成

$$A_{r,c}^d = \frac{h_e(-r, -c)}{N^2} \otimes [B(-r, -c) * F(r, c)] = h_e(-r, -c) \otimes C_{r,c}^d \quad (17)$$

符号 $\otimes$ 表示异或运算。

1.2 2 维 DCT/DWT 全相位 (ap²DCT/ap²DWT)

对于 2 维余弦变换, $\alpha = C, \beta = C^T$, 代入到

记为 C^n , 前窗或者后窗为矩形窗时的卷积窗记为 C^s 。

1.1 2 维 DFT 全相位 (ap²DFT, 2D DFT All Phase)

对于 2 维傅里叶变换, $\alpha = [F_N], \beta = [F_N^*]$, 代入到式(7), 并令前后基窗均为矩形窗。

$$T_{p,q}^{(u,v)} = \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} F_{m,p} F_{n,q} F_{u,m}^* F_{v,n}^* H_{m,n} \quad (13)$$

注意到

$$\begin{aligned} F_{m,p} &= W_N^{mp} = (W^*)_N^{-mp} = \\ &= (W_N^{-mp})^* = F_{m,-p}^* \\ F_{n,q} &= W_N^{nq} = (W^*)_N^{-nq} = \\ &= (W_N^{-nq})^* = F_{n,-q}^* \end{aligned} \quad (14)$$

把式(14)代入到式(13)并整理得

$$T_{p,q}^{(u,v)} = \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} F_{(u-p),m}^* H_{m,n} F_{n,(v-q)}^* = h(u-p, v-q) \quad (15)$$

对于带双窗的 ap²DFT, 根据式(11)及式(15)可得对应的全相位变换基

式(7)并简单整理可得

$$T_{p,q}^{(u,v)} = \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} C_{m,p} C_{n,q} C_{m,u} C_{n,v} H_{m,n} \quad (18)$$

相乘的 4 个余弦基元素不能进一步合并, 所以式(18)没有更具体的表达形式。对于 2 维沃尔什变换, $\alpha = W_N, \beta = \alpha$, 代入到式(7)并整理可得

$$T_{p,q}^{(u,v)} = \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} W_{m,p} W_{n,q} W_{u,m} W_{v,n} H_{m,n} =$$

$$\sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} W_{p \otimes u, m} H_{m, n} W_{n, q \otimes v} = h(p \otimes u, q \otimes v) \quad (19)$$

对于 ap²DCT, 由(7)式可得到

$$\begin{aligned} T_{N-1-p, N-1-q}^{(N-1-u, N-1-v)} &= \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} [(-1)^m C_{m, p} (-1)^n \times \\ &C_{n, q} (-1)^m C_{m, u} (-1)^n C_{n, v} H_{m, n}] = T_{p, q}^{(u, v)} \\ T_{N-1-p, q}^{(N-1-u, v)} &= \\ \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} (-1)^m C_{m, p} C_{n, q} (-1)^m C_{m, u} C_{n, v} H_{m, n} &= T_{p, q}^{(u, v)} \\ T_{p, N-1-q}^{(u, N-1-v)} &= \\ \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} C_{m, p} (-1)^n C_{n, q} C_{m, u} (-1)^n C_{n, v} H_{m, n} &= T_{p, q}^{(u, v)} \end{aligned} \quad (20)$$

当 N 是 2 的整数幂时有 $p \otimes u = (N-1-p) \otimes (N-1-u)$, 所以式(20)的结论对 ap²DWT 仍然成立。基于此结论的 ap²DCT 和 ap²DWT 的全相位变换基也具有对称性。根据式(11)的定义, 位于第 4 象限的 A^- 元素 $A_{r, c}$ 的中心对称是位于第 1 象限的 A^{++} 的元素 $A_{-r, -c}$, 两者的关系推导(假定双基窗均经过归一化处理)为

$$\begin{aligned} A_{-r, -c}^d &= \sum_{u=0}^{N-1+rN-1+c} \sum_{v=0}^{N-1} B_{u, v} T_{u-r, v-c}^{(u, v)} F_{u-r, v-c} = \\ &\sum_{u'=-rv'=-c}^{N-1} \sum_{v'=0}^{N-1} B_{N-1-u', N-1-v'} T_{N-1-u'-r, N-1-v'-c}^{(N-1-u', N-1-v')} F_{N-1-u'-r, N-1-v'-c} = \\ &\sum_{u=-rv=-c}^{N-1} \sum_{v=0}^{N-1} B_{N-1-u, N-1-v} T_{r+u, c+v}^{(u, v)} F_{N-1-(r+u), N-1-(c+v)} = \\ &\sum_{u=-rv=-c}^{N-1} \sum_{v=0}^{N-1} B_{u, v} T_{r+u, c+v}^{(u, v)} F_{(r+u), (c+v)} = A_{r, c}^d \end{aligned} \quad (21)$$

式(21)成立的条件只是要求基窗具有中心对称性, 即 B 和 F 中心对称。

1.3 2 维全相位处理的线性相位条件

由式(10)可以得到系统传输特性

$$\begin{aligned} H(j\omega_r, j\omega_c) &= \sum_{r=-N+1}^{N-1} \sum_{c=-N+1}^{N-1} A_{r, c}^d e^{-j(\omega_r r + \omega_c c)} = \\ &A_{0,0}^d + \sum_{c=1}^{N-1} (A_{0,c}^d e^{-j\omega_c c} + A_{0,-c}^d e^{j\omega_c c}) + \\ &\sum_{r=1}^{N-1} (A_{r,0}^d e^{-j\omega_r r} + A_{-r,0}^d e^{j\omega_r r}) + \\ &\sum_{r=1}^{N-1} \sum_{c=1}^{N-1} [A_{r,c}^d e^{-j(\omega_r r + \omega_c c)} + A_{-r,-c}^d e^{j(\omega_r r + \omega_c c)} + \\ &A_{r,-c}^d e^{-j(\omega_r r - \omega_c c)} + A_{-r,c}^d e^{j(\omega_r r - \omega_c c)}] \end{aligned} \quad (22)$$

当全相位基满足式(23)条件时, 特性具有线性相位。

$$A_{-r, -c}^d = A_{r, c}^d \quad (23)$$

由式(17)(20)(21), 总结 ap²DFT/ap²DCT/ap²DWT 具有线性相位的条件是: N 阶 ap²DFT 系统要求 $H(k) = H(N-k)$, 且对于单窗系统要求非矩形窗中心对称, 对于双窗系统要求 $F = B$ 或者前后窗均中心对称。 N 阶 ap²DCT/DWT 系统具有线性相位的充要条件是前后窗均中心对称。

满足线性相位条件的传输特性可由式(22)推导得

$$\begin{aligned} H(j\omega_r, j\omega_c) &= \\ &A_{0,0}^d + 2 \sum_{c=1}^{N-1} A_{0,c}^d \cos(c\omega_c) + 2 \sum_{r=1}^{N-1} A_{r,0}^d \cos(r\omega_r) + \\ &2 \sum_{r=1}^{N-1} \sum_{c=1}^{N-1} [A_{r,-c}^d \cos(r\omega_r - c\omega_c) + A_{r,c}^d \cos(r\omega_r + c\omega_c)] \end{aligned} \quad (24)$$

综合以上结论, 可以看到 2 维全相位基 A 即为 2 维全相位内插核。求 A 的步骤如下:

- 1) 确定基窗 B/F , 并要求满足线性性;
- 2) 分别确定 DFT、DCT 和 DWT 下的特性矩阵 H 并要求满足线性性;
- 3) 按照式(7)求出矩阵 T ;
- 4) 按照式(11)求出矩阵 2 维全相位内插核。

2 卷积窗的归一化

对于 2 维全相位处理, 应使特性函数在取样点处的幅值等于特性矩阵 H 。这样对于起加权作用的卷积窗 C 需要作条件限制, 否则将产生幅度失真, 以 2 维 DFT 全相位内插核设计为例。由式(17)和式(22), 可知在点 (u, v) 处特性函数值为

$$\begin{aligned} apH\left(j\frac{2u\pi}{N}, j\frac{2v\pi}{N}\right) &= \\ &\sum_{r=-N+1}^{N-1} \sum_{c=-N+1}^{N-1} C_{r, c} h(-r, -c) e^{-j\left(\frac{2u\pi}{N}r + \frac{2v\pi}{N}c\right)} = \\ &\sum_{r=-N+1}^{N-1} e^{-j\frac{2u\pi}{N}r} \left[C_{r,0} h(-r, 0) + \right. \\ &\sum_{c=1}^{N-1} (C_{r,c} + C_{r,c-N}) h(-r, -c) e^{-j\frac{2v\pi}{N}c} \left. \right] = \\ &C_{0,0} h(0, 0) + \sum_{c=1}^{N-1} (C_{0,c} + C_{0,c-N}) h(0, -c) e^{-j\frac{2v\pi}{N}c} + \\ &\sum_{r=1}^{N-1} (C_{r,0} + C_{r,-N}) h(-r, 0) e^{-j\frac{2u\pi}{N}r} + \\ &\sum_{r=1}^{N-1} \sum_{c=1}^{N-1} (C_{r,c} + C_{r,c-N} + C_{r-N,c} + C_{r-N,c-N}) \\ &h(-r, -c) e^{-j\frac{2u\pi}{N}r - j\frac{2v\pi}{N}c} \end{aligned} \quad (25)$$

对于无窗和单窗 ap^2DFT , 卷积窗 C 与前基窗 f 的关系为

$$\begin{aligned}
 C_{0,0} &= \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x,y) \\
 C_{0,c} &= \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=c}^{N-1} f(x,y) \\
 C_{0,c-N} &= \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{c-1} f(x,y) \\
 &\Downarrow \\
 C_{0,c} + C_{0,c-N} &= \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x,y) = C_{0,0} \\
 C_{r,0} &= \sum_{x=r}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x,y) \\
 C_{r-N,0} &= \sum_{x=0}^{r-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x,y) \\
 &\Downarrow \\
 C_{r,0} + C_{r-N,0} &= \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x,y) = C_{0,0} \\
 C_{r,c} &= \sum_{x=r}^{N-1} \sum_{y=c}^{N-1} f(x,y) \\
 C_{r-N,c} &= \sum_{x=0}^{r-1} \sum_{y=c}^{N-1} f(x,y) \\
 &\Downarrow \\
 C_{r,c} + C_{r-N,c} &= \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=c}^{N-1} f(x,y) \\
 C_{r,c-N} &= \sum_{x=r}^{N-1} \sum_{y=0}^{c-1} f(x,y) \\
 C_{r-N,c-N} &= \sum_{x=0}^{r-1} \sum_{y=0}^{c-1} f(x,y) \\
 &\Downarrow \\
 C_{r,c-N} + C_{r-N,c-N} &= \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{c-1} f(x,y) \\
 &\Downarrow \\
 C_{r,c} + C_{r-N,c} + C_{r,c-N} + C_{r-N,c-N} &= \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x,y) = C_{0,0}
 \end{aligned}$$

将式(26)的结果代入式(25), 并整理得

$$\begin{aligned}
 \text{ap}H\left(j\frac{2u\pi}{N}, j\frac{2v\pi}{N}\right) &= \\
 C_{0,0} \sum_{r=0}^{N-1} \sum_{c=0}^{N-1} h(-r, -c) e^{-j\frac{2u\pi}{N}r - j\frac{2v\pi}{N}c} &= \\
 C_{0,0} H(N-u, N-v) &\Leftrightarrow C_{0,0} = 1 \quad (27)
 \end{aligned}$$

即用卷积窗的中心点 $C(0,0)$ 对卷积窗做归一化处理就可以保证内插结果的幅度不失真。但是, 对于双窗系统来说, 由于前后基窗均是非矩形平面, 不再

具有式(26)结论。按照与上同法得到卷积窗 C 与前基窗 f 和后基窗 b 关系

$$\begin{aligned}
 C_{0,0} &= \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x,y) b(x,y) \\
 C_{0,c} &= \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=c}^{N-1} f(x,y) b(x,y-c) \\
 C_{0,c-N} &= \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{c-1} f(x,y) b(x, N+y-c) = \\
 &\sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{c-1} f(x,y) b(x,y-c) \\
 &\Downarrow \\
 C_{0,c} + C_{0,c-N} &= \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x,y) b(x,y-c) \\
 C_{r,0} + C_{r-N,0} &= \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x,y) b(x-r,y) \\
 C_{r,c} + C_{r-N,c} + C_{r,c-N} + C_{r-N,c-N} &= \\
 &\sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x,y) b(x-r,y-c) \quad (28)
 \end{aligned}$$

对于满足线性相位的双窗 ap^2DFT 即有 $f=b$, 由式(28)易知

$$\begin{aligned}
 C_{0,0} &\geq C_{0,c} + C_{0,c-N} \text{ (or } C_{r,0} + C_{r-N,0}) \geq \\
 &C_{r,c} + C_{r-N,c} + C_{r,c-N} + C_{r-N,c-N} \quad (29)
 \end{aligned}$$

显然, 如果此时用 $C_{0,0}$ 对式(26)进行归一化, 由式(29)的结论可知, 全相位特性在频率采样点的值小于频率取样矩阵 H 对应点。显然, 对于 ap^2DCT 和 ap^2DWT , 上述结论仍然成立。

3 图像内插实验

分别采用传统的内插器即理想低通、最近邻域、双线性、3次B样条、立方卷积、小波以及2维全相位内插(包含无窗、单窗和双窗的DFT、DCT合DWT变换共9种)对3幅2:1下取样图像进行重构实验, 实验路线图如图4所示。

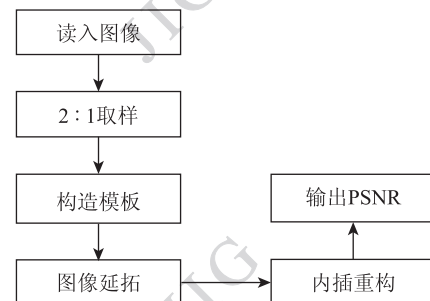


图4 内插实验方案

Fig. 4 Schema of interpolation experiment

测试使用的 3 种图像及谱图如图 5 所示。

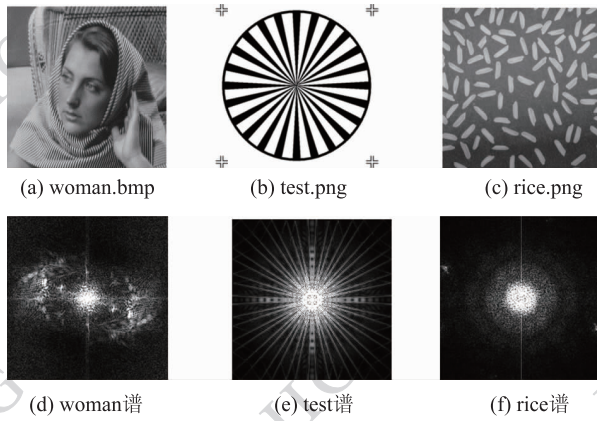


图 5 测试图像及谱

Fig. 5 Tested images and spectrums

3 种变换下,设计全相位内插核使用的传输特性序列分别定义为

$$H_{DFT} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1/2 & 1 \\ 1 & 1/2 & 0 & 1/2 \\ 1/2 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1/2 & 0 & 1/2 \end{bmatrix}$$

$$T_{DWT}^{2d} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0.0385 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.0577 & 0 & -0.0577 & 0 & 0 \\ 0 & -0.0577 & 0 & 0.3269 & 0 & -0.0577 & 0 \\ 0.0385 & 0 & 0.3269 & 1.0769 & 0.3269 & 0 & 0.0385 \\ 0 & -0.0577 & 0 & 0.3269 & 0 & -0.0577 & 0 \\ 0 & 0 & -0.0577 & 0 & -0.0577 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$T_{DCT}^{2d} = \begin{bmatrix} 0.0021 & 0.0042 & -0.0064 & 0.0099 & -0.0064 & 0.0042 & 0.0021 \\ 0.0042 & -0.0127 & -0.0466 & 0.0383 & -0.0466 & -0.0127 & 0.0042 \\ -0.0064 & -0.0466 & 0.0127 & 0.2972 & 0.0127 & -0.0466 & -0.0064 \\ 0.0099 & 0.0383 & 0.2972 & 0.8310 & 0.2972 & 0.0383 & 0.0099 \\ -0.0064 & -0.0466 & 0.0127 & 0.2972 & 0.0127 & -0.0466 & -0.0064 \\ 0.0042 & -0.0127 & -0.0466 & 0.0383 & -0.0466 & -0.0127 & 0.0042 \\ 0.0021 & 0.0042 & -0.0064 & 0.0099 & -0.0064 & 0.0042 & 0.0021 \end{bmatrix}$$

(31)

上面 3 种全相位内插模板(核)的时频图如图 6 所示。

图像内插的过程可以简单地描述为:将图像以补零的方式进行 1:2 提升,然后将模板中心对准待内插点位置进行卷积运算即为插值结果;滑动模板依次得到其余各插值。内插效果图如图 7 所示(以 woman. bmp 为例)。

各种算法重构得到的 PSNR 对比如表 1,表 2 所示。

对比实验结果可以得到:3 种图像中具有丰富

$$H_{DWT} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1/2 \\ 1 & 1 & 1/2 & 0 \\ 1 & 1/2 & 0 & 0 \\ 1/2 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$H_{DCT} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1/2 & 1 \\ 1 & 1/2 & 0 & 0 \\ 1/2 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (30)$$

即 2 维低通滤波器,其构造过程在参考文献[12]中有详述。

基窗选择 2 维三角窗,设计得到 3 种变换内插模板(只列出双窗情况)为

$$T_{DFT}^{2d} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0714 & 0.0714 & 0.0714 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.2857 & 1 & 0.2857 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0714 & 0.0714 & 0.0714 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

低频成分的 rice. png 重构效果最好,而高频成分较多的 test. png 效果最差;采用 DWT 和 DCT 的 2 维全相位内插效果基本高出传统方法(小波除外)至少 3 dB。需要指出的是,全相位模板内插效果与窗函数的选择有关,三角基窗本身可由两矩形窗卷积得到,因此,为得到较大的衰减特性及较陡峭的过渡边沿,上面实验中全部采用三角基窗。如果根据图像谱分布情况来自适应选择窗函数以达到优化内插效果的目的,性能将进一步得到提升。

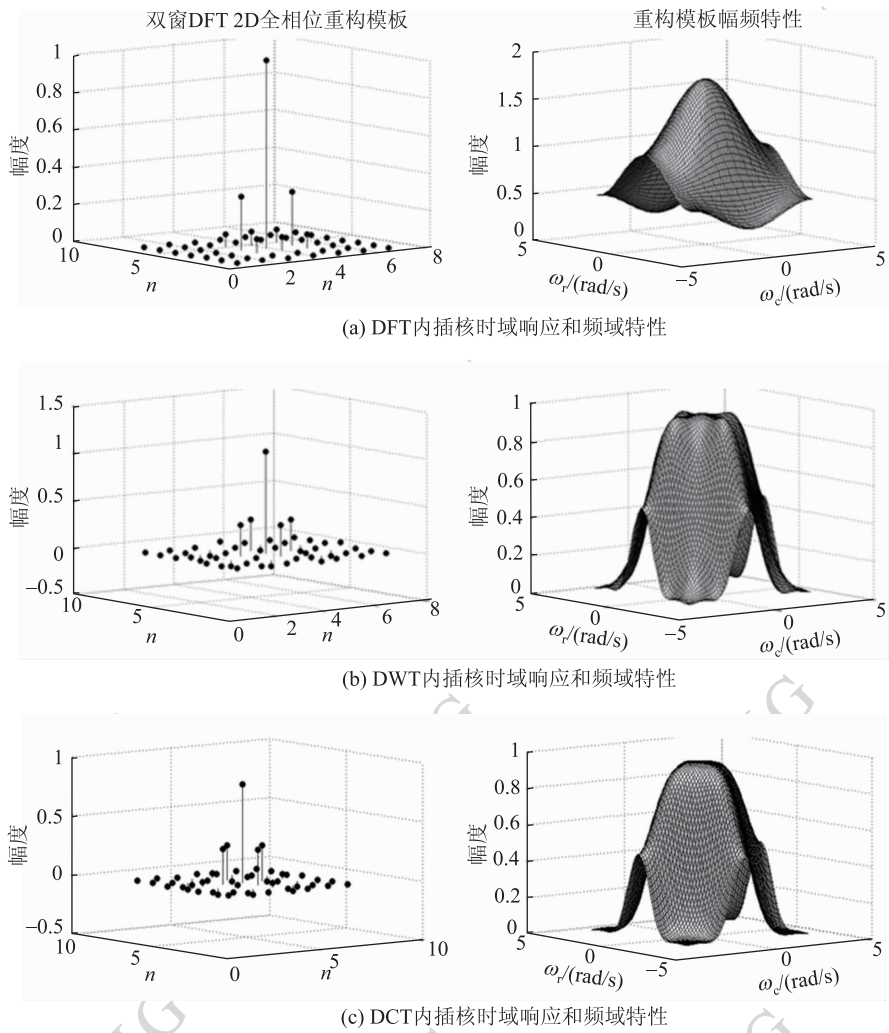


图 6 3 种变换 2 维全相位内插核时频图

Fig. 6 Time-frequency figures of 3 kinds of ap^2 Interpolation kernels in DFT/DCT/DWT domains

表 1 传统方法内插

Table 1 Traditional interpolation						/dB
图像	ideal	nearest	bilinear	B-Spline	cubic	wavelet
woman	20.30	19.94	21.63	22.44	21.18	30.30
test	21.45	17.45	22.07	19.90	21.41	33.72
rice	28.86	26.16	29.45	28.30	28.77	34.44

表 2 2 维全相位内插

Table 2 2D All-phase interpolation									/dB
图像	DFT			DWT			DCT		
	N	S	D	N	S	D	N	S	D
woman	15.68	15.65	18.31	25.53	25.52	25.49	25.37	24.40	23.59
test	11.41	11.65	14.81	25.03	25.33	25.41	24.91	22.90	21.48
rice	16.73	16.81	20.11	31.90	32.03	32.13	31.67	28.85	27.17

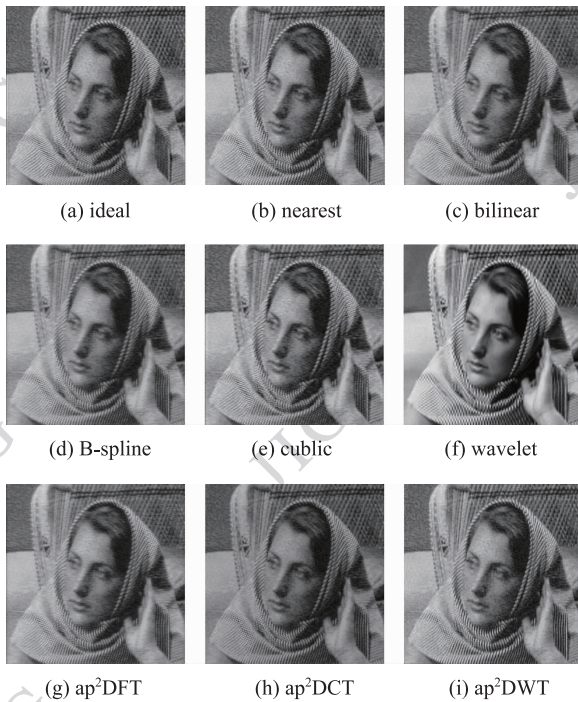


图7 采用不同内插核重构图

Fig. 7 Reconstructed images by using traditional and ap^2 interpolation kernels

4 结 论

第一、本文实现了各种正交变换下的2维全相位内插核设计算法,并对DFT、DCT和DWT下的全相位处理的线性性做了分析;第二、得到卷积窗 C 的归一化条件;第三、通过图像内插实验证实2维全相位内插效果好于传统的各种算法(小波除外)至少3 dB。

图像谱特征,模板尺寸和窗函数是设计全相位内插核需要考虑的3个重要因素,高频分量很少的信号满足信号能量集中在低频的假设条件,效果比较理想。但对于具有丰富高频的信号,传输特性 H 的设置应该重新考虑;模板尺寸的大小取决于像素间的相关程度,通过采用大尺寸模板就使周围邻近像素对待插值点的贡献充分体现;此外,窗函数的选择重新调整了内插核系数,具有进一步低通处理效果,显然对高频会造成损伤,实验结果得到证实。如何根据期望目标特征量自适应地设计高性能全相位内插核是值得研究的方向。

参考文献 (References)

[1] Yang J S, An K, Wang B. Intermediate view synthesis algorithm

of stereo image [J]. Journal of Tianjin University, 2011, 44(4): 339-343. [杨嘉琛, 安坤, 王斌. 立体图像中间视点生成算法[J]. 天津大学学报, 2011, 44(4): 339-343.]

[2] David Sarrut, Jef Vandemeulebroucke. Fast and low memory B-spline image interpolation [J]. Computer Methods and Programs in Biomedicine, 2009, 99(2): 172-178.

[3] Rutupama Panda, Rath G S, Chatterji B N. Generalized B-spline signal processing [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1996, 55(1): 1-14.

[4] Xu X Z, Wu Z M, He Y. Chatterji. A refined motion estimation strategy for adaptive interpolation filter [J]. IEEE Transactions on Signal Processing for Image Communication, 2009, 25(2): 121-129.

[5] Zhao L, He H J, Yin Z K. Adaptive image interpolation algorithm based on Curvelet stripes direction [J]. Journal of Optoelectronics. Laser, 2012, 23(4): 798-804. [赵亮, 和江红, 尹忠科. 基于Curvelet纹理方向的自适应图像插值算法[J]. 光电子. 激光, 2012, 23(4): 798-804.]

[6] Asamwar R S, Bhurchandi K, Gandhi A S. Successive image interpolation using lifting scheme approach [J]. Journal of Computer Science, 2010, 6(9): 969-970.

[7] Liu Y, Ngan K N. Weighted adaptive lifting-based wavelet transform for image coding [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2008, 17(4): 500-511.

[8] Su F, Wang Z H. Design of 2D fourier interpolation template with window [J]. Journal of Image and Graphics, 2004, 9(4): 339-444. [苏飞, 王兆华. 二维FOURIER带窗内插模板的设计[J]. 中国图象图形学报, 2004, 9(4): 339-444.] [DOI: 10.11834/jig.20040484]

[9] Li Z G, He K, Wang C Y. Comparative study of all phase DCT data interpolation and cubic convolution interpolation method [J]. Journal of Tianjin University of Technology, 2008, 24(6): 36-41. [李志国, 何凯, 王成优. 全相位DCT数据内插与立方卷积内插方法比较研究[J]. 天津理工大学学报, 2008, 24(6): 36-41.]

[10] Chen Z Z, Huang G Y. Design of 2D windowed all-phase image filtering template [J]. Computer Engineering and Applications, 2008, 44(27): 180-183. [陈忠泽, 黄国玉. 二维加窗全相位图像卷积滤波模板的设计[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(27): 180-183.]

[11] Huang X D, Wang Z H, Li W Y. Design of 2D windowed all-phase image filtering template [J]. Journal of Image and Graphics, 2006, 11(6): 811-817. [黄翔东, 王兆华, 李文远. 二维加窗全相位图像滤波模板的设计[J]. 中国图象图形学报, 2006, 11(6): 811-817.] [DOI: 10.11834/jig.200606136]

[12] Wang Z H, Huang X D. Digital Signal All Phase Spectrum Analysis and Filtering Technology [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2009: 259-261. [王兆华, 黄翔东. 数字信号全相位谱分析与滤波技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009: 259-261.]