

基于几何方向的图像压缩算法

刘 晶¹,王映辉¹,刘 刚²,段敬红¹

(1. 西安理工大学计算机科学与工程学院,陕西西安 710048;2. 西安电子科技大学计算机学院,陕西西安 710071)

摘 要: 标准二维小波仅沿图像水平和垂直两个方向变换,图像稀疏化表示有待改进完善.文中提出了一种基于方向波变换(Directionlet)的图像压缩算法:通过八叉树分割算法对图像自适应分块;块内最优逼近几何方向构成 Directionlet 变换的采样矩阵;块区域进行 Directionlet 变换,变换系数和方向信息分别编码.沿图像块最优逼近几何方向进行各向异性的 Directionlet 变换,改善了图像稀疏化效果,提高了编码效率.仿真实验表明,与基于小波的 SPIHT 和 JPEG2000 等压缩算法比较,本文方法在数值指标和视觉效果方面均有优势,对几何正则图像,优势更加明显.

关键词: 图像压缩;方向波变换;最优逼近几何方向;几何正则图像

中图分类号: TN919.81 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2011)07-1693-05

Image Compression Based on Geometrical Direction

LIU Jing¹, WANG Ying-hui¹, LIU Gang², DUAN Jing-hong¹

(1. Faculty of Computer Science and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

2. School of Computer Science and Technology, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract: The standard wavelet transform fails to provide an efficient representation due to the spatial isotropy of its basis functions built in the horizontal and vertical directions. In this paper, Directionlet based compression scheme was proposed. Using improved octree segmentation to adaptively partition an image into the smaller segments with a dominant direction. Directionlet is applied on a geometrical regular segment, whose optimal geometrical directions constitute the generator matrix of Directionlet transform, coding the coefficients and directional information respectively. Application of Directionlet transform along the optimal geometrical direction per segment efficiently improves sparse representation for image and enhances the coder performance. Experiments demonstrate the superiority of the proposed approach when compared to the wavelet-based SPIHT and JPEG2000 both in terms of objective compression performance measurements as well as visual quality, especially for those images with geometrical regular features.

Key words: image compression; directionlet transform; optimal geometrical direction; geometrical regular image

1 引言

对图像灰度渐变区域,标准二维小波变换的压缩效果很好,经量化后高频子带产生大量的零系数;但在非平滑区域,高频子带却残留有较多的大幅度系数,满足不了图像稀疏表示的要求^[1].这对图像压缩很不利,在低比特率情况下产生振铃效应^[2,3].图像多尺度几何分析方法希望挖掘并利用图像内在的几何正则性,去除标准小波变换所带来的各向同性几何冗余^[4].相继出现的多尺度分析工具 Ridgelet^[5]、Curvelet^[6]及 Contourlet 变换^[7],虽能够提供更多方向的选择,能够有效地捕捉图像纹理信息,然而,这些变换提供的方向信息固定且有限,对自然图像中非水平或非竖直方向的纹理信息稀疏表示能力仍旧欠缺. Bandelet 变换^[4]在小波域的高频区

能自适应地跟踪图像的几何正则方向,在图像压缩和去噪方面体现出一定的优势和潜力,但 Bandelet 基函数不是全局正交的,重构图像出现严重边缘效应,影响图像视觉效果. Directionlet 变换^[8,9]以一维小波理论为基础,对二维小波进行多方向扩展.它不仅具有各向异性基函数,重要的是它能够对图像进行任意两个有理方向的变换,可以如 Bandelet 一样沿图像块中的最优逼近几何方向进行小波变换,且变换系数能够与成熟的 JPEG2000 中的 EBCOT 编码方法直接结合.

结合图像自身几何正则特性,本文提出了一种基于 Directionlet 变换的图像压缩算法.首先对图像作八叉树分割获得每个子块的最优逼近几何方向,沿最优逼近几何方向作 Directionlet 变换.数值实验显示:本文方法能使图像高频能量降低,高频系数幅度明显减小.在同比

特率下与基于小波的 SPIHT^[10]和 JPEG2000^[11]等压缩算法比较,本文方法获得的压缩图像边缘清晰;对于几何正则图像,压缩效果更突出,峰值信噪比提高明显。

2 Directionlet 变换

Directionlet^[8,9]可以理解为斜的各向异性的小波变换。斜表示不仅沿水平和垂直方向,还可以沿任意有理斜率的方向进行变换。各向异性指每个方向上应用一维小波变换的次数 n_1 和 n_2 并不相同,这样的异性变换记为 $AWT(n_1, n_2)$,各向异性比记为 $\rho = n_1/n_2$,它决定了 $AWT(n_1, n_2)$ 基函数的延伸趋势。

Directionlet 借助计算机图形学的数字线理论,使变换可以沿任意有理斜率方向进行。用 36 个像素(图 1(a)黑色圆点)表示一幅图像,若对该图沿斜率为 $\frac{1}{2}$ 的方向进行一维小波变换,需用数字线 $y = \frac{1}{2}x + b$ 分割点阵(图 1(b)),并以图 1(c)中箭头所示的顺序扫描排列各像素,得到一个新的 6 行 6 列的点阵。对这个 6 行 6 列的点阵沿水平或垂直方向进行一维小波变换,就等效于对图 1(a)沿斜率为 $\frac{1}{2}$ 的方向进行小波变换。

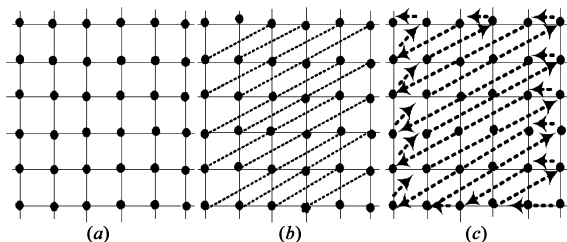


图1 数字线分割点阵

为避免一维处理后变换方向的互感现象,Directionlet 变换采用了基于整数栅格的滤波和采样处理。根据整数栅格理论,栅格采样矩阵 M_Λ 由两个线性无关向量的线性组合确定(矩阵可以不唯一):

$$M_\Lambda = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中 a_1, a_2, b_1, b_2 都为整数,向量 d_1 (斜率为 b_1/a_1)表示的方向为变换方向,向量 d_2 (斜率为 b_2/a_2)为队列方向。由 M_Λ 采样将点阵图分解得到 $|\det(M_\Lambda)|$ 个陪集,每一个陪集由平移向量 $s_k (k = 0, 1, \dots, |\det(M_\Lambda)| - 1)$ 确定。Directionlet 将栅格滤波与 AWT 的频域分解相结合,构造了多方向框架下各向异性的小波变换,更加有效地描述了图像中各向异性几何特征。

综上所述,Directionlet 变换可以分为两步:第一步是对图像进行陪集分解;第二步是对每个陪集单独处理,在变换方向上进行一维滤波和子采样。在图像压缩领域它具有如下潜力:

(1)基函数具有各向异性,能够用更少的系数逼近图像的光滑曲线,便于图像压缩。

(2)变换可以沿任意两个有理方向进行,若用图像最优逼近几何方向构造 Directionlet 的采样矩阵,变换沿图像边缘方向进行,图像边缘处分布的高频子带系数幅度则会降低,能量进一步集中于低频带,更利于压缩图像。

3 基于几何方向的图像压缩

自然图像可以由几何正则特征描述,它包含了图像大量的直线和曲线的方向信息。为了能够有效表示这些信息,需对图像分块,继而用拉格朗日定理(Lagrangian)定量计算块内最优逼近几何方向。

3.1 图像块内的最优逼近几何方向

Directionlet 变换通过整数栅格理论对图像采样,消除了变换方向非正交引起的互感效应。在选取块区域的变换方向时,可以不考虑变换和队列两个方向的正交性。那么,究竟如何确定块区域的最优逼近几何方向呢?本文采用 Canny 算子提取图像边缘,然后用拉格朗日定理(Lagrangian)定量计算图像每条边缘在某点的导数 $f'(\xi)$ (式(2)):

$$f'(\xi) = \frac{f(b) - f(a)}{b - a} \quad (2)$$

其中, a, b 为边缘 f 横坐标的起始点, $f(a), f(b)$ 为其纵坐标值, $\xi \in (a, b)$ 。再计算(式(3)):

$$aver = \frac{\sum_{i=1}^k f'(\xi_i)}{k} \quad (3)$$

其中, $\xi_i, i = 1, 2, \dots, k$, k 为边缘上的点数。平均取整(式(3))后作为该条边缘的方向斜率。在边缘图中,块区域内若只有一条边缘,那么,该边缘的方向就为此块的几何方向;若块内有多条边缘,选取的斜率值应能刻画多条边缘的方向或边缘点数 k 最多的边缘方向作为块的几何方向;若块内没有明显方向,这时,选取标准方向即水平或垂直方向作为块的几何方向。由块的几何方向构成该块 Directionlet 变换采样矩阵的一个方向矢量,同时,为了简化陪集分解,采样矩阵的另一个方向矢量由垂直(或水平)方向构成。在图 2(a)中,第一行第二列对应的帽子区域,我们没有选取帽顶对应的边缘方向,而是选取图 2(c)所示方向(斜率接近 2),是因为该块中检测出的多条边缘的方向斜率都为 2 或与此值接近;第二行第一列对应的分块区域,垂直方向的边缘比较突出明显,则将此方向定义为该块的几何方向;第二行第二列的块区域,帽檐的方向较明确清晰,选择它作为此块的几何方向。而在图 2(b)中,第二行第四列的区域很多边缘都为水平方向,所以,此块的几何方向

为水平走向.图 2(c)、(d)中,块区域中白色线的方向表明此块的最优逼近几何方向,方向斜率由式(3)计算得到;显示两条表示此块的采样矩阵由这两条线段的斜率构成;显示一条的,构成采样矩阵还需一个方向矢量,正如上面所述,由垂直(或水平)方向构成.

3.2 算法实现

为了用图像边缘及纹理方向构造 Directionlet 变换的采样矩阵,需将图像划分为若干个具有最优逼近几何方向的子块.文中采用八叉树分割算法对图像进行分块,是为了使区域的长宽比与 Directionlet 的各向异性比一致,每个子块内具有一个显著的几何正则方向,划分为止.在块内,Directionlet 变换沿显著的几何正则方向进行,变换系数采用 JPEG2000 中的 EBCOT 方法编

码,块及其方向信息采用算术编码.每个子块编码结果由三部分构成:块编码;块内最优逼近几何方向编码;块内 Directionlet 系数编码.图像块的编码过程描述如下:

- ① 依据 3.1 节确定每个图像块的采样矩阵 M_A :
 - i. 对图像进行 Canny 运算,得到边缘图;
 - ii. 分块并计算块中边缘及纹理的方向;
 - iii. 构造每个图像块的采样矩阵;
- ② 图像块陪集分解,进行 Directionlet 两层变换;
- ③ 每个陪集单独进行 EBCOT 编码;
- ④ 图像的分块结构及方向信息进行算术编码;
- ⑤ 输出该块编码结果.

4 仿真实验与结果分析

为了验证本文方法的有效性,实验选取 4 幅 $512 \times 512 \times 8\text{bit}$ 测试图像: Lena、Cameraman、Picture1 和 Picture2,其中,Picture1 和 Picture2 是两幅几何正则图像,全幅图像只有 ± 1 两个主方向.小波滤波器选择 9-7 小波,各向异性比 $\rho = 2$.实验从两方面来做:一、主要比较本文方法和标准小波变换对图像稀疏表示的有效性,从变换后高频系数的平均幅度、高频能量等方面进行衡量;二、通过不同码率下的峰值信噪比(PSNR)和图像视觉效果评估压缩质量,对比算法是基于小波的 SPIHT 算法和 JPEG2000 算法.

首先,进行实验一:图 3 显示四幅测试图频域分解后,第一层所有方向高频信息的叠加加图,为了观察方便,将系数都放大 10 倍显示.比较高频子带图可以看出,小波变换后高频子带中图像轮廓仍然十分清晰,相关性很强,系数幅值较大,而本文方法变换后高频能量

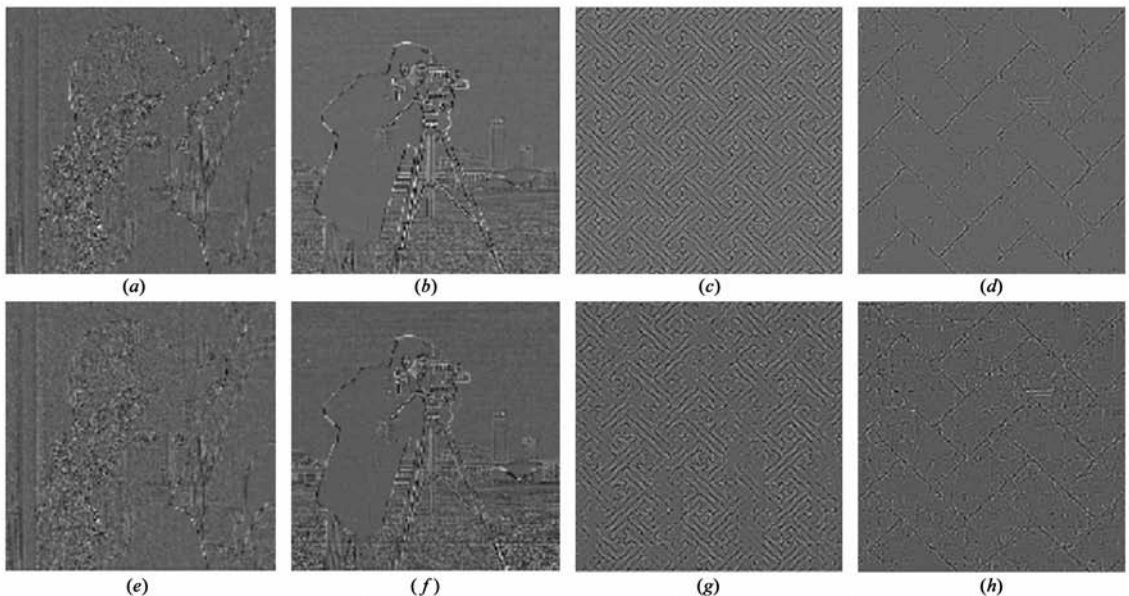


图3 第一层高频信息叠加图比较,(a)~(d)标准小波变换,(e)~(h)本文方法

明显降低,高频子带中的图像轮廓要模糊得多.实验中若没有进行最优方向选择,而是选取任意两个方向对全图进行 Directionlet 变换,如 Picture1 和 Picture2 两幅图,变换沿水平垂直标准方向进行,而不是沿其正则方向,实验效果基本上与标准小波变换一致,高频子带性能并没有改善.这充分说明只有沿着图像区域最优逼近几何方向进行高低频分解,才能得到能量最少的高频子带.在众多现有的多尺度分析工具中,只有 Directionlet 变换方向可以由图像边缘方向确定,这是本文压缩效果良好的理论前提和保证.

表 1 高频系数平均幅度及高频能量比较

方法 \ 图像		Lena	Camraman	Picture1	Picture2
高频子带系数平均幅度	本文方法	4.82	7.14	23.45	5.18
	DWT	6.28	9.59	40.50	7.73
降低百分比	降低百分比	23.3	25.5	42.2	33.1
	本文方法 * 10 ⁶	10.16	10.13	48.81	2.24
高频子带能量	DWT * 10 ⁶	11.90	12.04	65.78	3.92
	降低百分比	14.6	15.8	25.8	42.9

表 1 比较了第 1 层高频子带系数平均幅度和高频子带能量.可以看出本文方法获得的高频子带系数的平均幅度都有所降低,高频子带能量都得到减少;对几何正则图像而言,降低的幅度还要大,Picture1 和 Picture2 两幅图的高频子带系数平均幅度下降达到 30% 以上,高频子带能量减少到 20% 以下.测试其他图像,高频系数的平均幅度及高频能量也有明显的降低.多幅图像的测试说明本文方法能够稀疏表示图像,针对几何正则图像,稀疏表示效果还要突出明显.

实验二的内容:首先计算 4 幅图像在不同码率下各个算法的 PSNR 值.图 4(横坐标 bpp,纵坐标 PSNR 值)

曲线数据表明:本文方法下,Lena 图的 PSNR 值的优势并不很强,Cameraman 图的结果略好一些;而 Picture1、Picture2 两幅图像的视觉效果要好很多,PSNR 值高出 SPIHT 和 JPEG2000 两种方法下的 1dB 左右.这两幅图含有明显的几何正则方向,本文方法很好地利用了其几何特征,沿着最优逼近几何方向进行频率分解变换,因此,图像稀疏效果明显改善,PSNR 值提高要大些.

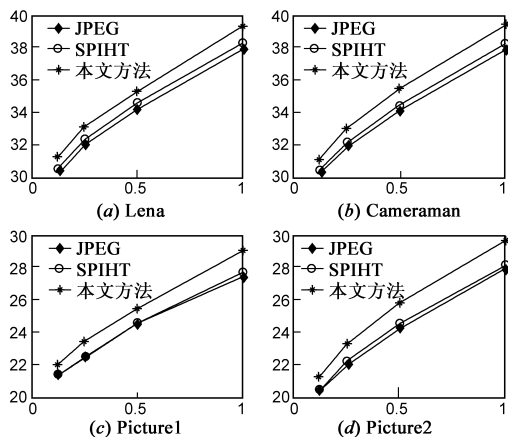


图 4 不同比特率下得到的 PSNR 曲线示意图

我们还考察了 Lena 图像在 0.25bpp 和 Picture2 在 0.125 下压缩解压后的重建图像质量.仔细观察图 5 中的 Lena 图帽沿和 Picture2 图砖缝两处发现:JPEG2000 和 SPIHT 算法压缩解压后图像的清晰度差,有振铃效应,两处锯齿现象非常突出;相比之下,本文方法具有较好的图像重建质量,较好地保持了图像中的细节信息,图像纹理微细清晰.本文方法充分利用图像的方向信息,沿图像最优逼近几何方向进行频域分解,才使低比特率下细节信息丢失不多,压缩图像才具有良好的视觉质量.

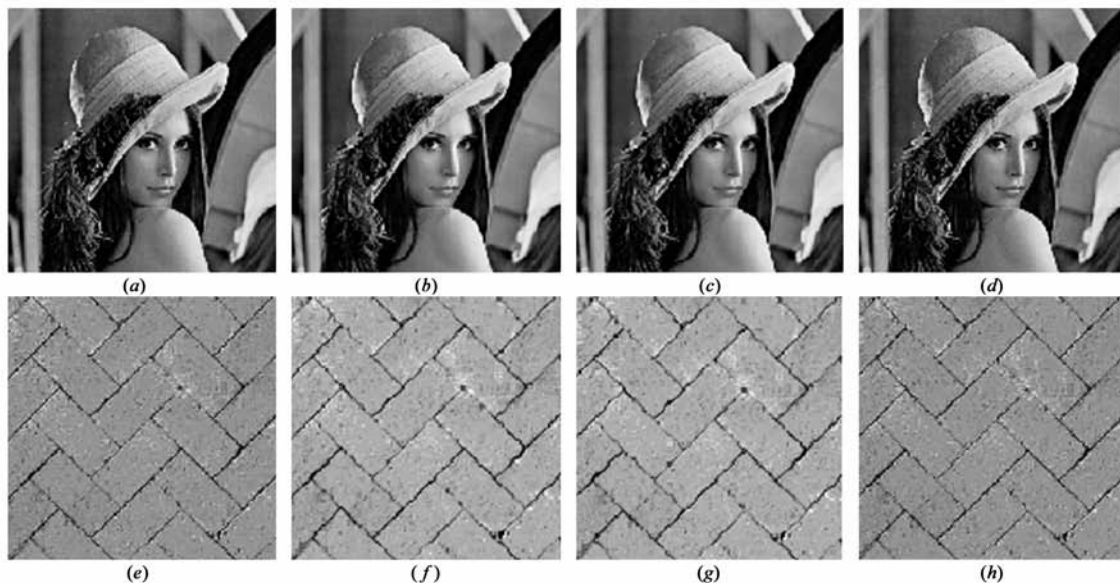


图 5 三种算法解压重构图像比较.(a)(e)为原图;(b)(f)为 JPEG2000;(c)(g)为 SPIHT;(d)(h)为本文方法

表 2 给出编码块区域与块内几何方向信息所需的比特数目及占全部编码的百分率,可以看到在 0.125bpp 下,四幅图附加信息编码相对于图像本身编码很少,只占总比特数很小部分,但能够保持图像边缘纹理等信息的清晰度,提高图像的压缩质量.对只有单一主方向的几何正则图像 Picture1、Picture2,不需要分块、只对方向信息编码,需要的比特数更少;Cameraman 图的方向正则性要比 Lena 图好,块分割的区域普遍比后者的大,编码需要的比特数相应也少一些.

表 2 块结构及方向信息编码在 0.125bpp 下所占比特数

	Lena	Cameraman	Picture1	Picture2
比特数	658	597	11	11
百分率	0.020	0.018	0.0003	0.0003

5 总结

为了寻求更加有效的图像稀疏表示,本文首先分析了一种新的多尺度分析方法——Directionlet 变换,在此基础上提出了基于 Directionlet 变换的压缩方法:图像分块,沿块区域最优逼近几何方向进行 Directionlet 变换,变换系数 EBCOT 编码,块及方向信息算术编码.具体包含下面两点:(1)利用 Directionlet 变换的优异特性:具有任意两个有理方向的消失矩,我们对块区域的图像沿其最优逼近几何方向进行高低频分解,使图像边缘纹理等处的高频系数幅值尽量小,达到最佳稀疏效果,较好地保留图像几何特征;(2)Directionlet 变换本质为斜的各向异性的小波变换,块区域系数编码可以结合成熟的 JPEG2000 中的 EBCOT 编码方案.多幅图像测试结果表明,与基于小波的 SPIHT 和 JPEG2000 的压缩算法相比,本文方法变换后的高频系数的平均幅度和高频能量得到了显著降低,压缩比相同条件下 PSNR 值提高 0.5dB 以上;对具有强方向特征的几何正则图像,本文方法获得的性能参数和视觉效果改善明显.

参考文献

- [1] 甘涛,何艳敏.基于稀疏分解的可伸缩图像编码[J].电子学报,2010,38(1):156-160.
Gan Tao, He Yanmin. Scalable image coding based on sparse decomposition[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(1): 156-160. (in Chinese)
- [2] 张军,成礼智,杨海滨,黄魁华.基于纹理的自适应提升小波变换图像压缩[J].计算机学报,2010,33(1):184-193.
Zhang Jun, Cheng Lizhi, Yang Haibing, Huang Kuihua. Adaptive lifting wavelet transform and image compression via texture [J]. Chinese Journal of Computer, 2010, 33(1): 184-193. (in Chinese)
- [3] Liu Hui, Ma Siliang. R-D optimized tree-structured compression

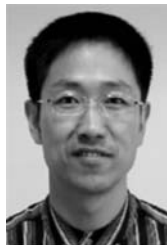
algorithms with discrete directional wavelet transform[J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2008, 219(1): 302-311.

- [4] E Pennec, S Mallat. Sparse geometric image representation with bandelets[J]. IEEE Trans Image Processing, 2005, 4(4): 423-438.
- [5] M N Do, M Vetterli. The finite ridgelet transform for image representation[J]. IEEE Trans Image Processing, 2003, 12(1): 16-28.
- [6] E J Candès, D L Donoho. Curvelets: A surprisingly effective nonadaptive representation for objects with edges[A]. L L S, et al. Curves and Surfaces [M]. Nashville: Vanderbilt University Press, 1999.
- [7] M N Do, M Vetterli. The contourlet transform: An efficient directional multiresolution image representation[J]. IEEE Trans Image Processing, 2005 14(12): 2091-2106.
- [8] V Velisavljevic', B Beferull-Lozano, M Vetterli, et al. Directionlets: Anisotropic multi-directional representation with separable filtering[J]. IEEE Trans Image Processing, 2006, 15(7): 1916-1933.
- [9] V Velisavljevic', B Beferull-Lozano, M Vetterli, et al. Space-frequency quantization for image compression with directionlets [J]. IEEE Trans Image Processing, 2007, 16(7): 1761-1773.
- [10] A Said, W A Pearlman. A new fast and efficient image coded based on set partitioning in hierarchical trees[J]. IEEE Trans Circuits System Video Technolgy, 1996, 6(3): 243-250.
- [11] D S Taubman, M W Marcellin. JPEG2000: Image Compression Fundamentals, Standards, and Practice [M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2002.

作者简介



刘 晶 女, 1973 年生于黑龙江齐齐哈尔. 副教授, 博士研究生. 研究方向为图像压缩、数字水印.
E-mail: liujing@xaut.edu.cn



王映辉 男, 1967 年生于甘肃庄浪. 博士 (博士后出站), 教授, 博士生导师, CCF 高级会员. 研究方向为图像模式识别、虚拟现实和软件工程与方法学.