

文章编号 1004-924X(2013)11-2973-07

基于自适应指数哥伦布编码的图像压缩算法

孙 健^{1,2*}, 任国强¹, 吴钦章¹

(1. 中国科学院 光电技术研究所, 四川 成都 610209;

2. 中国科学院大学, 北京 100149)

摘要: 在徐勇等人提出的适用于硬件的低复杂度算法的基础上, 提出了一种基于自适应指数哥伦布编码的图像压缩算法来进一步提高压缩性能。首先, 对图像进行 4 级 5/3 小波变换; 根据小波变换后的子带数据进行建模, 得到最佳量化步长。然后, 采用 JPEG_LS 算法预测量化后的 LL 子带, 并对各个子带数据进行零游程编码。最后, 对零游程编码得到的数据进行自适应指数哥伦布编码。实验表明: 当比特率大于 0.25 bpp 时, 本算法略好于徐的算法; 当比特率小于 0.25 bpp 时, 本算法重构图像的峰值信噪比较徐的算法高 0.2~2 dB。结果显示, 本算法不仅提升了压缩性能, 而且由于指数哥伦布编码级数更新模型复杂度很低, 完全可以用硬件实现。

关键词: 图像压缩; 小波变换; 量化建模; 自适应指数哥伦布编码

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132111.2973

Image compression algorithm based on adaptive exp-Golomb coding

SUN Jian^{1,2*}, REN GUO-qiang¹, WU QIN-zhang¹

(1. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100149, China)

* Corresponding author, E-mail: sunjian233liyi@163.com

Abstract: According to the low-calculation image compression algorithm introduced by Xu Yong, *et al.*, a new image compression algorithm based on adaptive Exp-Golomb coding was proposed to implement the high-speed image compression. Firstly, the image with 4-level 5/3 was transformed with wavelet transform to obtain the optimal quantization step for each wavelet subband according to wavelet subband data model. Then, the JPEG_LS algorithm was employed to predict the value for the LL subband and to encode for all the wavelet subband data in the Zero-Run-Length algorithm. Finally, the adaptive Exp-Golomb coding was adopted to encode the data after Zero-Run-length algorithm. Experiment results show that the proposed algorithm can achieve a little better performance than Xu's algorithm, when the bit rate is greater than 0.25 bpp; and the Peak Signal-to-noise Ratio (PSNR) of the proposed algorithm can increase by 0.2–2 dB when the bit rate is less than 0.25 bpp. It means that the algorithm improves the performance of compression. The Exp-Golomb coding model is extraordinary simple and can be implemented by the hardware completely.

Key words: image compression; wavelet transform; quantization model; adaptive Ex-Golomb coding

1 引言

随着科学技术的发展,相机的分辨率,采样率都在不断提高。目前有限的信道带宽和存储能力已经成为制约某些领域发展的瓶颈。图像压缩技术可以在一定程度上缓解这个问题,其中,离散小波变换以其良好的时频特性和多分辨率分析能力成为图像分析处理的重要工具之一。国内外许多学者已经提出了多种基于小波分解的压缩算法,应用较多的有 EZW (Embedded Zerotree Wavelet)^[1], SPIHT (Set Partitioning in Hierarchical Trees)^[2], SPECK (Set Partitioning Embedded Block)^[3] 以及 EBCOT (Embedded Block Coding with Optimized Truncation)^[4] 算法。这些算法充分利用了小波变换的空频局部化特征,极大地开发了小波分解后子带间、子带内的冗余,达到了很好的压缩效果。结合这些思想,人们又提出了许多改进算法^[5-12,15-16]。文献[5]对 EZW 算法进行了改进,使之更好地适应于高光谱的图像压缩;文献[6]提出了一种扩展指数哥伦布编码方法,通过对感兴趣区域的像素点做标记,有效实现了感兴趣区域的编码;文献[7-8]则针对图像的无损压缩进行了研究;文献[9]采用 Directionlet 对图像进行压缩,对几何正则图像能够取得更好的压缩效果;文献[10]根据图像的局部信息将图像进行自适应分块,以自适应地保护图像的纹理信息不被破坏,对纹理丰富的图像取得了较好的效果。文献[11]将人眼的视觉特性合理地应用到图像编码中,不仅考虑了人眼对图像不同频率的敏感度,也考虑了人眼对图像不同区域的敏感度,使得压缩图像的视觉效果得到了提升。尽管上述方法在图像压缩性能上得到了改善,但算法的复杂度依然较高,难以满足高速图像压缩的需求。针对这个问题,徐勇等人提出了一种适于硬件的低复杂度算法^[12],较好地平衡了算法复杂度与压缩性能之间的矛盾,既能够实现高速图像压缩,也具有较为满意的图像压缩质量。

本文在徐勇等人所提方法的基础上,提出了一种基于自适应指数哥伦布编码的图像压缩算法。算法采用了 4 级小波变换,并根据小波子带数据特征设计了一种小波系数的最优量化方法;然后进行低频预测和零游程编码,同时设计了一种自适应指数哥伦布编码方法来得到最终的码

流。该算法在计算复杂度略有增加的情况下,取得了更好的压缩性能。

2 算法简介

图像变换编码的通用框架由变换、量化、熵编码三部分组成^[13]。变换过程需要去除图像像素间的相关冗余,量化过程用于去除视觉冗余,而熵编码过程则需要去除概率冗余。本文提出的基于自适应指数哥伦布编码的算法流程框架如图 1 所示:

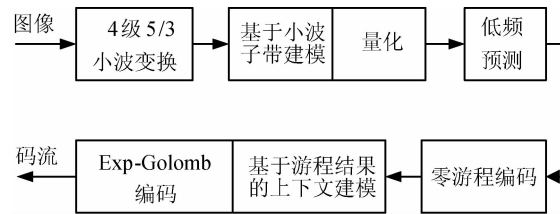


图 1 自适应指数哥伦布编码的图像压缩算法框图
Fig. 1 Block diagram of image compression algorithms based on adaptive Exp-Golomb coding

首先,对图像进行 4 级 5/3 小波变换,并对小波变换后的各个子带数据进行分析,计算出每个子带的最佳量化步长;然后,对最低频子带的数据采用 JPEG_LS 算法进一步去除像素之间的相关冗余,再用零游程编码进行编码;最后,根据零游程编码结果进行上下文建模,不断地更新指数哥伦布编码的级数,再用相应级数的指数哥伦布编码得到最后的码流。

3 小波及小波系数的量化

在图像压缩领域,小波变换有着显著的能量聚集作用,可有效去除图像的空间相关性。在小波的快速实现方面,基于提升的小波构造方法计算量较小,而且能够实现原位计算,工程实现相对容易,成为离散小波变换实现的首选方法。基于提升结构的 CDF5/3 小波变换可由式(1)、式(2)表示:

$$y(2n+1) = x_{\text{ext}}(2n+1) - \left[\frac{x_{\text{ext}}(2n) + x_{\text{ext}}(2n+2)}{2} \right], \quad (1)$$

$$y(2n) = x_{\text{ext}}(2n) + \left[\frac{y(2n-1) + y(2n+1) + 2}{4} \right], \quad (2)$$

其中: x_{ext} 是经过拓展的输入信号, y 是输出信号。

图像进行 N 级小波变换后,就会包含 $3N+1$ 个子带,图 2 为图像进行了 4 级小波变换后的子带示意图。

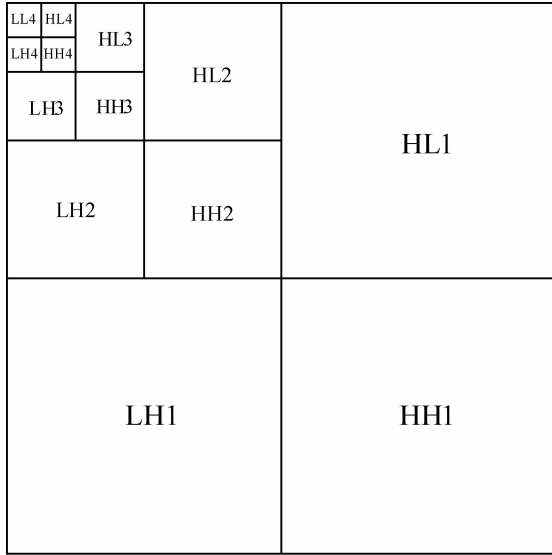


图 2 4 级小波变换子带示意图

Fig. 2 Sub-bands of 4-scale wavelet transform

子带变换增益 G_{b_d} 表示变换级序号为 b 的第 d 个子带的逆整数小波变换综合基矢量的平均范数^[14],它衡量了子带中每个系数的失真对重建图像的影响程度;此外,根据人眼的视觉特点,人们对不同频率图像,以及图像的边缘、平滑和纹理区域的敏感程度也不同,假定子带视觉加权系数为 w_{b_d} ,子带 b_d 的方差为 $\sigma_{b_d}^2$,子带 b_d 的量化步长为 Δ_{b_d} ,子带 b 的量化步长为 Δ_b , Δ 为基本量化步长。由文献[12]可知:

$$\Delta_b = \Delta \sqrt{\frac{1}{G_b}}, \text{ where } G_b \approx 2^{2b}, \quad (3)$$

由文献[15]可得:

$$r_{k,opt} = R + \frac{1}{2} \text{lb} \frac{\sigma_k^2 w_k}{\left[\prod_{l=1}^N \sigma_l^2 w_l \right]^{1/N}}. \quad (4)$$

其中: $r_{k,opt}$ 表示平均码长为 R 时,子带 k 分配的最佳码长。由式(3)和式(4)可得,子带 b_d 的最佳量化步长为:

$$\Delta_{b_d} = \Delta_b \sqrt{\frac{\sigma'^2 w'}{\sigma_{b_d}^2 w_{b_d}}} \text{ where } \sigma' w' = \sqrt{\prod_{d=0}^2 \sigma_{b_d}^2 w_{b_d}}. \quad (5)$$

4 低频预测和零游程编码

对于小波变换后的低频子带数据,仍然存在较强的相关性,本文采用了 JPEG_LS 算法进行低频预测:

$$X' = \begin{cases} \min(A, B), C \geq \max(A, B) \\ \max(A, B), C \leq \min(A, B) \\ A + B - C, \text{ other} \end{cases} \quad (6)$$

其中, X' 表示像素点 X 的预测值, A, B, C 分别表示像素 X 的左边、左上和正上方的 3 个像素点。

由于图像中存在许多较为平滑的区域,这些区域经过小波变换、量化和预测后,就会出现许多零。本文采用了文章[12]中的自适应零游程编码。这种游程编码方法只对零进行游程编码,即当连续零的个数大于等于 2 时,编码器进行零游程状态。当遇到非零样本时,编码器便退出零游程状态,进行普通编码状态。假如输入样本为:12 0 0 1 2 0 4 0 0 0 0 0 3 1,则输出为:12 0 0 0 1 2 0 4 0 0 4 3 1。可见,当样本中有大量连续的零的时候,该方法效果非常显著。

5 自适应指数哥伦布编码

Exp-Golomb 编码是一种可变长前缀码,其硬件实现简单,无需事先建立和存储码表,不但可以通过硬件计算快速产生码字,而且可以根据信源 PDF 函数灵活调整级数 k ,因而,可以达到很高的编码效率。由于具有以上优点,Exp-Golomb 编码已被 H.264 和 AVS 等标准所采纳,其码字由两部分组成:一元码+组内标号。表 1 列出了样本为 0~9($k=0,1,2,3$)的 Exp-Golomb 编码结果。

样本 n 采用了 k 级的 Exp-Golomb 编码得到的码字长度为 L ,其可以简单地表示如下:

$$L = G(k, n). \quad (7)$$

由于小波变换后的高频子带数据经过量化后可以近似为高斯分布,即出现数值较小的值的概率较大。所以,设定初始的 Exp-Golomb 编码的级数为 $k=0$;并且随着样本值的增大,Exp-Golomb 的级数也需要自适应地不断增大。令 N_k 为样本 n 从 k 级 Exp-Golomb 编码转换到 $k+1$ 级 Exp-Golomb 编码的阈值,即当 $n < N_k$ 时,就需要采用下一级 Exp-Golomb 编码。假设样本 n 服

从均匀分布,则阈值 N_k 可以由式(8),式(9)求得:

$$\sum_{n=0}^{N_k} G(k, n) = \sum_{n=0}^{N_k} G(k + 1, n), \quad (8)$$

$$\text{且 } \forall x > N_k, \exists \sum_{n=0}^{N_k} G(k, n) > \sum_{n=0}^{N_k} G(k + 1, n). \quad (9)$$

由于样本 n 近似服从高斯分布,而不是简单的均匀分布,结合式(8),式(9)和表 1,并且考虑易于硬件实现,样本 n 的 Exp-Golomb 级数 k_n 可以表示为:

$$k_n = \begin{cases} 0 & n < 8 \\ \lceil \lg(n) - 2 \rceil & n \geq 8 \end{cases} \quad (10)$$

这样,要确定样本 n 的 Exp-Golomb 级数,只需要通过移位操作就可以实现,易于硬件实现。

表 1 样本 0~9 的 0~3 级指数哥伦布编码

Tab. 1 0-3 Exp-Golomb coding of sample 0-9

样本 n	Exp-Golomb 编码码字			
	$k=0$	$k=1$	$k=2$	$k=3$
0	1	10	100	1000
1	010	11	101	1001
2	011	0100	110	1010
3	00100	0101	111	1011
4	00101	0110	01000	1100
5	00110	0111	01001	1101
6	00111	001000	01010	1110
7	0001000	001001	01011	1111
8	0001001	001010	01100	010000
9	0001010	001011	01101	010001

由于 Exp-Golomb 编码的样本必须是非负的,所以,需要对游程编码得到的数据进行式(11)

进行非负映射:

$$n = \begin{cases} 2c & c \geq 0 \\ -2c - 1 & c < 0 \end{cases} \quad (11)$$

设 $R(m)$ 为游程编码得到的数据进行非负映射后第 m 个样本的值。文中采用 $R(m)$ 的上一个样本的 Exp-Golomb 编码级数来预测本样本 $R(m)$ 的 Exp-Golomb 编码级数。根据零游程编码的特性,其输出中连续出现 2 个零后,第 3 个零被替换为剩余连续零的个数 c_0 。子带的方差越小,量化步长就越大, c_0 的值也就越大。 c_0 的 Exp-Golomb 编码级数可由下式得到,其中, Δ 为基本量化步长:

$$k_{c_0} = \lceil \lg(\Delta) \rceil. \quad (12)$$

本文采用上一个样本的 Exp-Golomb 编码的级数来预测本样本值的级数,同时考虑到了 c_0 以及 Exp-Golomb 编码的初始级数为零。所以,自适应 Exp-Golomb 编码的级数可以由下面表达式确定:

$$k_{R(m)} = \begin{cases} 0 & \text{if } m = 0 \cup R_{(m-2)} = R_{(m-3)} = 0 \\ \lceil \lg(\Delta) \rceil & \text{else if } R_{(m-1)} = R_{(m-2)} = 0 \\ 0 & \text{else if } R_{(m-1)} < 8 \\ \lceil \lg(R_{(m-1)} - 2) \rceil & \text{else } R_{(m-1)} \geq 8 \end{cases} \quad (13)$$

6 实验结果与分析

为了验证算法的有效性,采用标准图片(Lena, Boat 和 Barabar)进行测试,图像的大小为 512×512 ,并与徐勇等人提出的算法[2]以及经典算法 SPIHT [2](采用了 4 级 5/3 小波变换,没有接自适应算法编码器)进行比较。

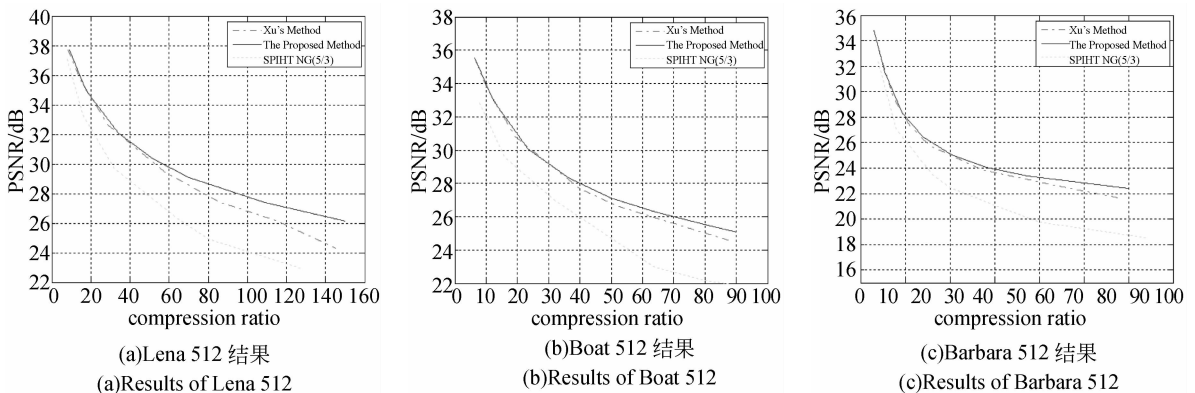


图 3 本算法与徐算法性能比较

Fig. 3 Comparison of our method and Xu's method

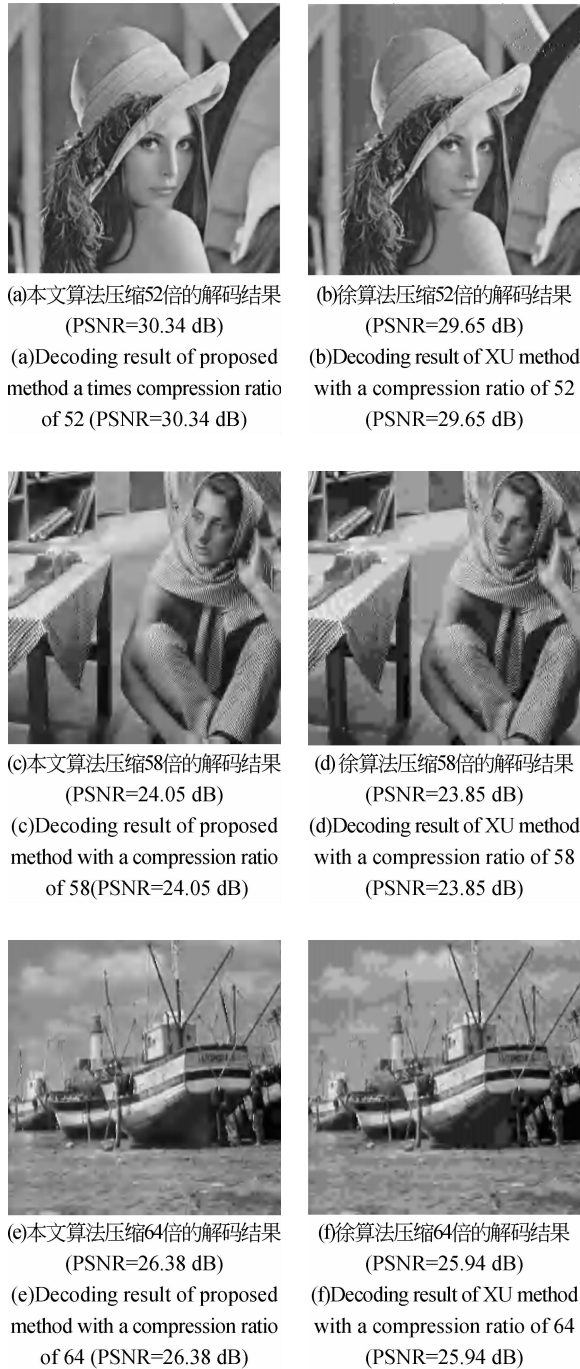


图 4 本算法与徐算法在相同压缩比下解码图像的效果比较
Fig. 4 Comparisons of decoded performance between our method and Xu's method in the same CR

由图 3 中的 PSNR-Compression Ratio 曲线所示,本文算法和徐算法在信噪比上都明显好于采用了 5/3 小波变换的 SPIHT 算法,而且本算法在低压缩比时,性能略好于徐算法;在高压比时,性能明显好于徐算法。图 4 为本文算法和徐算法在相同的压缩比下得到的解码图像,可以看出,本算法

解码得到的图像效果要明显好于徐算法。表 2 为本文算法中自适应指数哥伦布编码器和徐算法中阶数为零的指数哥伦布编码器在 FPGA 上实现后的资源占用和性能的比较。

本文算法性能得到提升的主要原因为:(1)本文给出的最佳量化考虑到了小波子带方差信息,得到了更加合理的量化步长。徐算法中的量化方法实际上就是本文算法在各个子带方差相等时的一个特例。(2)本文提出了一种基于上下文的方法,实时更新 Exp-Golomb 编码的级数,使得 Exp-Golomb 编码效率得到了进一步提升。而且,Exp-Golomb 编码级数的更新模型非常简单,只需要经过移位操作就可以实现。相比徐算法,本算法更好地平衡了计算复杂度和压缩性能间的矛盾。本算法在计算复杂略有提高的情况下,性能得到了更好的提升。

表 2 文中自适应指数哥伦布编码器和徐算法指数哥伦布编码器的比较

Tab. 2 Comparison of adaptive Exp-Golomb coder in this paper and Exp-Golomb coder in Xu's algorithm

模块	资源开销(个)		最高时钟频率(MHz)		
	Slice Register	Slice LUTs	V5(-1)	V5(-2)	V5(-3)
自适应指数哥伦布编码器	522	534	274.20	321.62	393.92
徐算法中指数哥伦布编码器	453	445	284.01	334.85	400.01

7 结 论

为了满足图像压缩领域对高速图像压缩的需求,本文在徐算法的基础上,提出了一种自适应指数哥伦布编码算法。该算法提出了一个更加合理有效的小波子带数据量化方法;并对游程编码后的数据进行上下文建模,实时更新指数哥伦布编码的级数,实现了自适应的指数哥伦布编码。实验表明,在低压缩比时,本文算法略好于徐算法,当压缩比大于 32 时,本文算法比徐算法好 0.2~2 dB。

综上所述,本文算法具有以下特点:(1)复杂度低,整个编码过程只需访问有限个像素;(2)通过简单的上下文模型,可以实时更新指数哥伦布编码的级

数,明显提高了熵编码的性能,而且易于硬件实现;(3)压缩性能良好,压缩比也可通过改变基本量化步长 Δ 的值来改变。

参考文献:

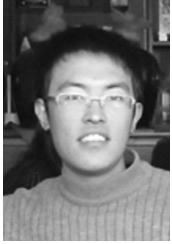
- [1] SHAPIRO J M. Embedded image coding using zero-tress of wavelet coefficients [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1993, 41 (12): 3445-3462.
- [2] SAID A, PEARLMAN W A. A new, fast and efficient image codec based on set partitioning in hierarchical trees [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 1996, 6(3): 243-250.
- [3] ISLAM A, PEARLMAN W A. An embedded and efficient low-complexity hierarchical image coder [J]. *Proceedings of SPIE*, 1999, 3653 (1): 294-305.
- [4] TAUBMAN D. High performance scalable image compression with EBCOT [J]. *IEEE Transactions on Image Process*, 2000, 9 (7): 1158-1170.
- [5] 卫俊霞,相里斌,段晓峰,等. 基于 EZW 的高光谱图像压缩技术研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2011, 31(8): 2283-2286.
- WEI J X, XIANG L B, DUAN X F, *et al.*. Hyperspectral image compression technology research based on EZW [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, 31(8): 2283-2286. (in Chinese)
- [6] 徐勇,徐智勇,张启衡. 基于游程和扩展指数哥伦布编码的任意形状感兴趣区域图像编码 [J]. *光学精密工程*, 2011, 19(1): 175-182.
- XU Y, XU ZH Y, ZHANG Q H. Arbitrary shaped ROI image coding using Run-length coding and generalized Exp-Golomb coding [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(1): 175-182. (in Chinese)
- [7] 王建军,刘波. 适于硬件实现的无损图像压缩 [J]. *光学精密工程*, 2011, 19(4): 922-928.
- WANG J J, LIU B. Hardware implementation of lossless image compression [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(4): 922-928. (in Chinese)
- [8] 汤毅,辛勤,李纲,等. 基于内容的高光谱图像无损压缩 [J]. *光学精密工程*, 2012, 20(3): 668-674.
- TANG Y, XIN Q, LI G, *et al.*. Lossless compression of hyperspectral images based on contents [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20 (3): 668-674. (in Chinese)
- [9] 刘晶,王映辉,刘刚,等. 基于几何方向的图像压缩算法 [J]. *电子学报*, 2011, 39(7): 1693-1697.
- LIU J, WANG Y H, LIU G, *et al.*. Image compression based on geometrical direction [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2011, 39 (7): 1693-1697. (in Chinese)
- [10] 张军,成礼智,杨海滨,等. 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): 184-192.
- ZHANG J, CHENG L ZH, YANG H B, *et al.*. Adaptive lifting wavelet transform and image compression via texture [J]. *Chinese Journal of Computers*, 2010, 33(1): 184-192. (in Chinese)
- [11] 田杰华,顾晓东,汪源源. 利用人眼视觉特性的低比特率小波图像压缩 [J]. *仪器仪表学报*, 2010, 31(11): 2515-2521.
- TIAN J H, GU X D, WANG Y Y. Low-bit-rate wavelet-based image compression using human visual characteristics [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010, 31(11): 2515-2521. (in Chinese)
- [12] 徐勇,徐智勇,张启衡,等. 适于硬件实现的低复杂度图像压缩 [J]. *光学精密工程*, 2009, 17(9): 2262-2268.
- XU Y, XU ZH Y, ZHANG Q H, *et al.*. Low complexity image compression scheme for hardware implementation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(9): 2262-2268. (in Chinese)
- [13] 吴乐南. 数据压缩 [M]. 2 版. 北京:电子工业出版社, 2005.
- WU L N. *Data Compression* [M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005. (in Chinese)
- [14] WOODS J W, NAVEEN T. A filter based bit allocation scheme for subband compression of HDTV [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1992, 1(3): 436-440.
- [15] 朱明,高文,郭立强. 压缩感知理论在图像处理领域的应用 [J]. *中国光学*, 2011, 4(5): 441-447.
- ZHU M, GAO W, GOU L Q. Application of compressed sensing theory in image processing [J]. *Chi-*

nese Optics, 2011, 4(5):441-447. (in Chinese)

- [16] 李桂菊. 利用 DSP 底层结构提高 MPEC-4 编码的实时性[J]. 中国光学, 2011, 4(5):461-467.

LI G J. Improvement of real-time properties of MPEG-4 encoder by DSP undelying structure [J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(5):461-467. (in Chinese)

作者简介:



孙 健(1987—),男,山西忻州人,博士研究生,2010 年于西北工业大学获得学士学位,2012 年于中国科学院光电技术研究所获得硕士学位,主要从事图像编码相关方面的研究。E-mail: sunjian233liyi@163.com



吴钦章(1955—),男,山东新泰人,研究员,博士生导师,主要从事光电跟踪测量系统的自动识别、控制技术及软件工程的研究。E-mail: wuqzh@163.com



任国强(1971—),男,山西忻州人,研究员,主要从事光电记录系统和嵌入式系统相关方面的研究。E-mail: ren-crux@yahoo.com.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)