

# 基于小波子带系数预测的深度图像编码

李 幸 赵 耀 林春雨 姚 超

(北京交通大学计算机与信息技术学院信息所 北京 100044)

(现代信息科学与网络技术北京市重点实验室 北京 100044)

**摘 要** 随着3D视频技术的再度兴起,基于深度图像的3D视频数据表示格式得到了广泛的应用,因此针对深度图像的编码算法已成为当前研究的热点课题。利用小波变换后子带系数的分布统计特征,提出了一种不同于以往的基于小波变换的深度图像编码方案。该方案对小波量化系数进行统计分析,利用子带间小波系数的相关性,对小波变换后各个子带的小波系数进行预测。在同一层小波子带间,利用对角子带系数分别对水平和垂直方向的子带系数进行预测;在相邻层间,被预测的系数利用上一层相应的4个低频子带系数进行预测。最终,将原子带系数与预测系数的残差进行算术编码。实验结果表明,本方案在保证图像质量的同时能够有效地减少深度图像编码所需的比特数,最大可节省18.4%的码率。

**关键词** 深度图像,小波变换,3D视频,图像编码

**中图分类号** TP191.81 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2014.10.031

## Depth Map Coding Based on Wavelet Inter-subband Coefficients Prediction

LI Xing ZHAO Yao LIN Chun-yu YAO Chao

(Institute of Information Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

(Beijing Key Laboratory of Advanced Information Science and Network Technology, Beijing 100044, China)

**Abstract** With the re-emergence of 3D video technology, the format based on 3D video has been used widely, and the coding algorithm aiming at the depth map has become a hot research in recent years. Different from the image coding based on wavelet transform, we proposed a novel scheme based on the correlations of intra-subband. The scheme is performed in the wavelet quantization coefficients. Firstly, we predicted the coefficients in the horizontal and vertical directions by using the diagonal subband in the same level. Then, we made use of four coefficients to predict the corresponding coefficient in the adjacent level. Finally, we performed arithmetic coding for atom-band coefficients and the residual values after prediction. The experimental results show that the proposed scheme in this paper keeps the quality of depth map, while up to 18.4% bit rate can be saved.

**Keywords** Depth map, Wavelet transform, 3D video, Image coding

## 1 引言

近年来,3D视频技术成为当前研究中的一个热点领域,吸引了越来越多的专家学者从事这方面的研究。3D视频可以反映场景的景深信息,并给用户带来更加逼真的视觉体验。联合视频专家组(Joint Video Team, JVT)提出多视点视频加深度(Multi-View-Plus-Depth, MVD)<sup>[1]</sup>的3D数据表示格式。在这种数据格式中,每幅纹理图像都有一幅与其点对应的深度图像用来表示场景的深度信息,从而在显示端可以更好地展示3D场景。然而这也额外地增大了所需传输的视频数据量,不适用于有限带宽下的视频内容的传播。因此如何高效地对深度图像进行编码压缩以缓解网络带宽的压力成为当前研究的重点问题。

目前深度图像的编码方法主要有以下3种:一种是基于形状自适应的小波编码方法<sup>[2]</sup>,其主要是根据深度图像的形状信息,通过人工干预或者特殊的边缘检测算法获取优质的边缘信息,再根据图像边缘特征对深度图像进行压缩处理,在编码的同时保护深度图像的边缘信息。在文献[2]中,避免了对深度图像边缘的编码,减少了边缘上的小波系数和熵值,同时减小了深度图像和自然图像之间的相关性,得到了良好的图像重建效果,但是其深度图像的边缘特征是通过人工干预的方式获得,对深度边缘特征的提取对其最终的结果影响很大。第二种广泛研究的方法是基于感兴趣区域(Region of Interest, ROI)的深度图像编码<sup>[3,4]</sup>,这类方法在深度图像中提取出ROI区域,对ROI区域进行有保护的编码,也可得到良好的合成效果。如文献[3]使用不同的模式策略,检测ROI

到稿日期:2013-06-30 返修日期:2013-08-16 本文受国家自然科学基金重大国际合作项目(61210006),NSFC(61202240),中央高校基本科研业务费专项基金(2012RC043,2013JBM018,2013JBM022)资助。

李 幸(1989—),女,硕士生,主要研究方向为多媒体信息处理,E-mail:12120343@bjtu.edu.cn;赵 耀(1967—),男,教授,主要研究方向为图像编码、数字水印等;林春雨(1979—),男,讲师,主要研究方向为多媒体信息处理。



区域,对两者分开编码,但这种检测过程需耗费大量时间,同时,庞大的计算量对硬件设备有更高的要求。第三是基于上/下采样的深度图像编码方法<sup>[5]</sup>,该方法对深度图像下采样后进行压缩,有利于提高图像的压缩率,在重建图像时再进行上采样恢复。由于深度图像的边缘对重建图像质量影响较大,因而需要设计良好的滤波器完成上/下采样过程。在文献<sup>[5]</sup>中,通过改进上/下采样的滤波器,一定程度上改善了合成图像的效果,但是由于二维中值滤波在对边缘处理时,不能清晰地保护图像的边缘信息,因而限制了图像的重建效果。

基于小波变换的深度图像编码算法近年来成为深度图像编码的主要研究内容之一<sup>[2,6]</sup>。小波变换由于其良好的时频特性,被广泛应用于图像研究领域。小波变换的基本思想是通过二维离散小波变换,将原始图像数据转换为小波系数。图像经过小波变换,大部分小波系数集中在低频子带中,但由于图像的边缘包含纹理信息,因此有小部分系数分布在高频子带中<sup>[7]</sup>,这些高频子带的系数容易引起图像压缩码率的提高。而深度图像中,部分边缘信息是以高频分量的形式表示的,因此,深度图像经过小波变换之后,在高频子带内积聚了部分大系数,限制了深度图像的编码效率。

本文利用高频子带间的相关性,分别在水平和垂直方向上对同一层及相邻层子带的小波系数进行预测,以减少小波量化系数中非零值的数量,在保护高频边缘信息的同时提高深度图像的压缩效率。该方案包含两部分:首先,利用对角方向的子带系数分别预测水平和垂直方向上的子带小波系数,以减少同一层子带内非零系数的数量;然后,除最高频子带外,在水平、垂直方向上的每个系数均利用其相对于的下一级空间位置的4个系数预测,以减小相邻子带间的空间相关性。在熵编码的过程中,仅编码子带间的残差系数,以达到节省编码比特数的目的。

本文第2节是本文提出的基于小波系数的预测编码方案;第3节是本方案的实验结果与分析;最后对本文的研究成果做出总结。

## 2 基于子带小波系数预测的深度图像的编码方案

在传统的基于小波变换的图像编解码方案的基础上,本文提出了基于子带系数预测的深度图像编码方法,其编解码过程如图1所示。在编码端,原始的深度图像通过小波变换得到各个子带的小波系数,并采用死区量化的方法对小波系数进行量化,之后采用本文提出的子带系数预测方案对量化的小波系数进行后处理,最后对处理后的小波系数进行熵编码以实现压缩的目的。在解码端,压缩码流进行熵解码后,对小波系数进行反方向恢复以得到量化后的小波系数,进一步通过小波逆变换恢复编码的深度图像。

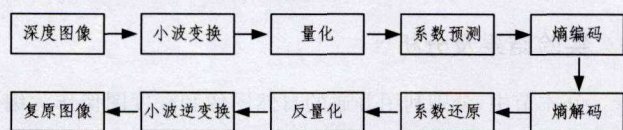


图1 小波变换编码示意图

本文提出,利用同一层和相邻层的子带间的相关性进行

预测。为清楚说明子带间的这种相关性,图2给出了三级小波分解的塔式结构图<sup>[8]</sup>。

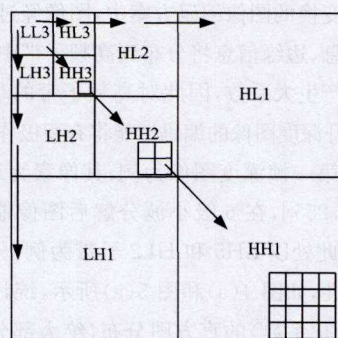


图2 三级小波分解塔式结构图

从图2中可以看出,图像经过小波变换后,从低分辨率到高分辨率形成一个树状结构。小波系数间的两种空间相关性如下所述:

(a)在相同层的不同方向上,每个小波系数都与其他两个方向上相同空间位置的小波系数相关联。如图3中符号标注,“▲”所代表的B、B1和B2,这3个小波系数均在图中的第三层上,具有空间位置相关性。

(b)在相邻层的相同方向上,非最高频及非最低频的每个系数都与其相同方向的相应的空间位置的4个系数相关联。如图3中“●”所代表的F、C1、C2、C3和C4 5个小波系数,其中F系数与C1、C2、C3、C4系数处于相邻层,其空间位置之间存在相关性。

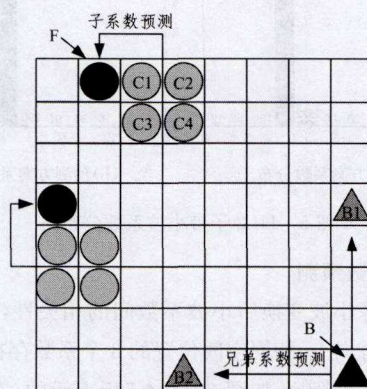


图3 小波系数的相关特性

图像在通过小波分解后,图像信息的低频、高频信息被分解到不同的子带中,较多的能量分布在低频子带中,而仍有小部分能量分布在高频子带。在传统图像的编码过程中,由于高频信息对图像质量的影响不大,因此大多数的高频信息会被舍弃。然而对于深度图像而言,过多地舍弃高频信息可能会造成合成图像的严重失真,这是由深度图像的特性所决定的。深度图像用0~255的灰度值来描述场景的深度信息,具有最远的深度值用0来表示,最近的深度值用255来表示<sup>[9]</sup>。在同一目标上,由于其距离摄像头的距离是一致的,即便在深度图像中其表达的深度信息也具有 consistency,因此深度图像不会含有过多的纹理特征。可是,在目标边缘处,由于深度变化剧烈,其深度信息就具有了明显的边缘特性,尤其在场景深度范围比较小时,深度的变化在灰度图像上突变将更剧烈。因



此对深度图像的边缘信息进行保护,是深度图像编码过程中重点考虑的问题。

基于小波变换的图像编码方案中,图像经过小波变换后,部分的纹理信息、边缘信息将分布到高频子带中,而这很容易在高频子带中产生大系数,因此对高频子带的小波系数进行优化编码对提升深度图像的编码性能将有积极作用。以“Book Arrival”序列中第一帧深度图像为例,其像素为 $1024 \times 768$ ,灰度值范围为 $[0, 255]$ ,在6级小波分解后图像能量被分配到19个子带中。此处以LH5和HL2子带为例,分析小波系数的分布统计特性,如图4(a)和图5(a)所示,统计这两个子带的小波系数(量化系数)的直方图分布,绝大部分系数经过小波变换和量化后,都变为零或分布在零值附近,但仍有部分数据分布在大值的范围内。因此进一步减少较大的小波量化系数的数量,并且尽量保证高频信息的无失真,将对提高深度图像的编码性能具有重要意义。

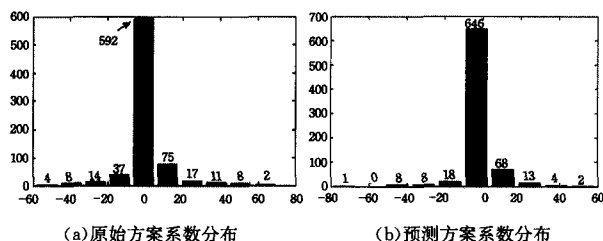


图4 LH5子带小波系数分布

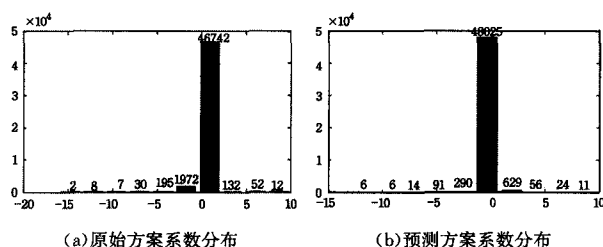


图5 HL2子带小波系数分布图

## 2.1 兄弟系数预测

基于图像小波变换后小波系数间的相关性,即在同一层的3个不同方向上,相同空间位置的3个系数存在关联(称为“兄弟”系数关系<sup>[10]</sup>),如图3中“▲”所表示的,在水平、垂直方向上相同空间位置的系数可以由同一个对角系数预测。这里由于在高频子带中存在非零小波系数,因此可以使用这些高频子带的小波系数来减小低频子带的小波系数,以实现减少较大小波系数数量的目的。

为清楚说明这种预测的运算过程,式(1)和式(2)分别给出了兄弟预测在两个方向上的计算方法。图3中的黑色“▲”的标号B,代表其所在子带位置的系数,B1和B2分别代表B所对应的两个兄弟系数。

$$\text{水平方向: } B' = B \pm B_1 \quad (1)$$

$$\text{垂直方向: } B' = B \pm B_2 \quad (2)$$

其中,当对角系数为正数时,采用减法预测;当对角系数为负数时,采用加法预测。实验过程中小波分解为6层,每一层水平和垂直方向均可以采用类似的方法预测,得到的残差代替原来的量化系数值,预测模式如图6所示。

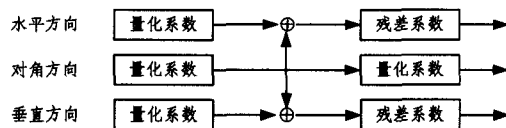


图6 兄弟系数预测

## 2.2 子系数预测

对于非最高分辨率子带,每个小波系数都与其对应的下一层的相同空间位置的4个小波系数相关联。如图3中“●”所表示的系数间的关系,每个黑色“●”标注的系数在下一层均存在空间位置对应的4个小波系数(图中用灰色“●”标注)。对于这种相关性,称上一层的这个系数为父系数,下一层的4个系数为其子系数。在预测中,这4个子系数作为基准系数。

因此上文提到的预测方法可以拓展到各个子带系数层,图7所示的是所提方案中的子系数预测部分。图中残差系数是由2.1节中的方法所得到的结果,利用这些残差系数按照图中的方法进行子系数预测,进一步压缩。

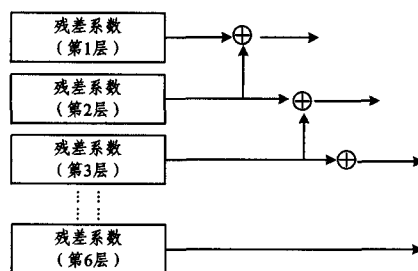


图7 子系数预测

同理,为清楚说明该部分预测的运算过程,式(3)给出了子系数的预测算法。图3中的父系数、黑色“●”的标号F,代表其所在子带位置的系数,C1、C2、C3和C4分别代表F所对应的4个子系数。

$$F' = F - (C_1 + C_2 + C_3 + C_4) \quad (3)$$

这里特别说明,这种预算过程是从低分辨率子带到高分辨率子带方向进行,这样预测的残差 $F'$ 不会对下一层预测造成影响。若反方向预测,则此处的基准系数 $C$ 是下一层预测的 $F$ ,容易破坏预测系数之间的相关性。与兄弟系数预测相同,每一层水平和垂直方向都采用类似的方法预测,得到的新的残差值代替原来的2.1节中计算得到的残差值。

本文通过应用以上2.1节与2.2节所提的两种相关性预测后,得到了子带系数的重新分配。理论上,由于水平和垂直子带传输的是预测的残差,因此这些值通常比原量化值小。实际结果如图4(b)和图5(b)所示,其分别是LH5子带和HL2子带重新分配的结果。从图中可看出,相比原始方案,大系数被有效地减少了,更多的系数分布在零值上。因此,在对小波系数进行编码的过程中,所使用的比特数将有效减少。

## 3 实验结果及分析

在本节中,分别利用普通的自然图像和深度图像作为编码器的输入图像,对本方案进行验证。选取“Book Arrival”序列的第8个视点纹理图像的第一帧作为自然图像测试数据。采用3组序列:“Book Arrival”、“Kendo”和“Pantomime”均选

取第一帧深度图像作为深度图像测试数据。本文均采用六级小波分解。实验参数如表 1 所列。

表 1 实验参数

| 测试序列         | 像素       | 量化死区 | 左右视点         | 合成视点  |
|--------------|----------|------|--------------|-------|
| Book Arrival | 1024×768 | 0.7  | 视点 8 和视点 10  | 视点 9  |
| Kendo        | 1024×768 | 0.7  | 视点 1 和视点 3   | 视点 2  |
| Pantomime    | 1280×960 | 0.6  | 视点 37 和视点 39 | 视点 38 |

为重点说明该方案对深度图像的压缩质量,合成视点利用的自然图像没有经过压缩,是原始的图像数据。重建的深度图与其对应的自然图像利用 VRS3.5 (View Synthesis Reference Software 3.5)<sup>[11]</sup>合成相应的虚拟视点图像。为方便实现,本文的实验仅采用小波变换-熵编码来模拟实现图像的编码压缩过程。

为了验证本文的预测方案的性能,实验首先通过计算每个子带的熵值进行检验。如表 2 所列,该表中以“Book Arrival”视点 8 深度图像的第一帧为例,其量化步长为 15,死区为 0.7,计算了水平和垂直方向子带的熵值变化情况。为清楚说明,表中第一列是子带编号;第二列和第三列分别是利用原始方案和预测方案得到的子带熵值,计算时以 2 为底,单位是:比特/符号(bit/symbol);最后一列给出的是预测方案相比原始方案,熵值的变化。由于对角子带作为预测的基准,为保证水平和垂直子带无失真地还原,该子带的系数保持不变,因此其熵值不发生变化,在表中不列出。

表 2 子带熵值的比较

| 子带编号 | 原始方案<br>(bit/symbol) | 改进方案<br>(bit/symbol) | 差值<br>(bit/symbol) |
|------|----------------------|----------------------|--------------------|
| HL6  | 5.6011               | 4.8418               | -0.0525            |
| LH6  | 5.3611               | 5.0023               | -0.1792            |
| HL5  | 4.2067               | 3.6250               | -0.0707            |
| LH5  | 4.0741               | 3.6811               | -0.1548            |
| HL4  | 2.7152               | 2.2975               | -0.0722            |
| LH4  | 2.5055               | 2.1885               | -0.0386            |
| HL3  | 1.3471               | 1.2201               | -0.0206            |
| LH3  | 1.2177               | 1.0782               | -0.0169            |
| HL2  | 0.4504               | 0.4237               | -0.0047            |
| LH2  | 0.4142               | 0.3787               | -0.0072            |
| HL1  | 0.0830               | 0.0738               | 0.0028             |
| LH1  | 0.1035               | 0.0918               | -0.0005            |

从表中可看出,改进方案的子带熵值普遍减小,这预示在熵编码过程中编码所需的码率将有所降低。这是因为,根据最大离散熵定理<sup>[12]</sup>,若子带的熵值越小,则该子带的平均不确定性越小,其熵编码性能也越高。以上通过分析小波系数的分布情况并利用熵值进行验证,说明本文提出的方案有利于减少子带内的大系数,进而提高压缩性能。

本文所提出的预测方案在原理上同样适用于纹理图像编码。图 8 是自然图像的原始方案与本文方案的曲线对比图,其中横轴为解码图像的 PSNR 值,纵轴为编码图像使用的比特数。从图中可以看出,本文方案应用到纹理图像编码时,在维持图像质量的同时可以节省一部分比特数。如图 9 所示,利用本文方案编码深度图像,实验分别比较了 3 个实验序列的改进方案与原始方案的 RD 曲线性能。图中横轴表示利用编解码的深度图像重建的虚拟视点的质量,纵轴表示图像编码深度图像的比特数。

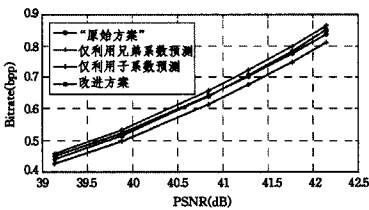
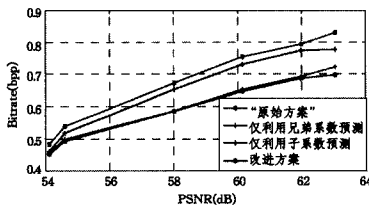
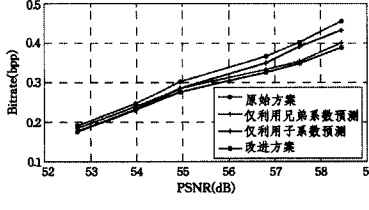


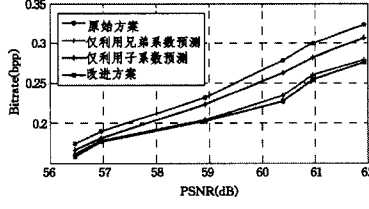
图 8 “Book Arrival”纹理图像



(a) “Book Arrival”深度图像



(b) “Kendo”深度图像



(c) “Pantomime”深度图像

图 9 深度图像

实验结果显示,将本文方案应用于深度图像的编码能够取得更加明显的效果,针对“Book Arrival”、“Kendo”和“Pantomime”3 个序列,在改进方案中码率分别为 0.69bpp、0.39bpp 和 0.05bpp 时最大可减小 0.13bpp、0.07bpp 和 0.05bpp,因此各深度图像节省的码率比例接近 15.8%、14.5% 和 18.4%。这是因为该方案旨在减少高频子带的非零小波系数。对于普通的自然图像和深度图像,编码最大的差异在于边缘的重要性,而图像的边缘值大多属于图像的高频系数。对深度图像而言,边缘的剧烈变化使其更容易在高频子带内产生大系数,影响编码性能。本文方案根据这一特点,将深度图的高频子带系数嵌入到低频子带中,因此,在一定程度上保护了深度图像的高频信息,进而相比于自然图像,可以更大程度地节省图像的编码码率,而保证图像质量不受影响。

**结束语** 本文提出了一种基于小波子带间小波系数相关性的预测方案,其中包括兄弟系数预测和子系数预测两部分。文中通过分析小波子带系数的分布,说明利用该方案可有效地减少小波变换后非零小波系数的数量,进而节省图像编码所需的比特数。文中通过比较自然图像和 3 组深度图像的实验结果表明,该方案在保证图像的重建质量的同时,对降低编码的比特率具有积极作用。在未来的工作中,期待在以下

两个方面取得进展:1)在复杂的编码系统中实现小波系数的预测,考虑到量化操作也会给高频系数带来失真,在量化操作前对不同层间的小波子带系数进行预测将更能保证高频子带系数的有效性,因此探究小波子带内部和子带间系数的相关性,将更有效地提高图像的压缩性能;2)将这种方案应用到3D视频序列,而不局限于图像,结合小波系数的时间相关性,进一步提高编码效率。

## 参 考 文 献

- [1] Smolic A, Mueller K, Merkle P, et al. Multi-View Video plus depth (MVD) format for advanced 3D video system[C]//23rd Meeting ISO/IEC JTC1/SC29/WG11 and ITU-T SG16 Q. 6, JVT-w100. USA; San Jose, 2007
- [2] Maire M, Do M N. Joint Encoding of the Depth Image Based Representations Using Shape-Adaptive Wavelets[C]//IEEE Proceedings of the International Conference on Image Processing. 2008;1768-1771
- [3] Wang M, Liu C, Zhang T, et al. Region of interest oriented fast mode decision for depth map coding in DIBR[C]//IEEE 7th International Colloquium on Signal Processing and its Applications. 2011;177-180
- [4] Christopoulos C, Askelof J, Larsson M. Efficient regions of Interest coding Techniques in upcoming JPEG2000 still image coding standard[C]//Proceedings of International Conference on

Image Processing(ICIP). 2000;2:41-44

- [5] Oh K-J, Yea S, Vectro A, et al. Depth Reconstruction Filter and Down/Up Sampling for Depth Coding in 3-D Video[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2009, 16(9):747-750
- [6] Daribo I, Saito H, Furukawa R, et al. Effects of Wavelet-Based Video Compression[C]//3D-TV System with Depth-Image-Based Depth Rendering. 2013;277-298
- [7] Hyeokho Choi Justin K. Romberg and Richard G. Baramiuk; Multiscale edge grammars for complex wavelet transform[C]//IEEE International Conference on Image Processing. 2001;614-617
- [8] Daubechies I. Ten Lectures on Wavelets [M]. Philadelphia; Society for Industrial and Applied Mathematics, 1992
- [9] Pourazad M T, Nasiopoulos P, Ward R K. Generating the Depth Map from the Motion Information of H. 264-Encoded 2D Video Sequence[C]//EURASIP Journal on Image and Video Processing. 2010
- [10] 顾寅红, 杨长生, 宋广华. 一种基于预测分类的小波图像编码[J]. 浙江大学学报:理学版, 2002, 29(6):663-668
- [11] Tanimoto M, Fujii T, Suzuki K, et al. Reference Softwares for Depth Estimation and View Synthesis[J]. ISO/IEC JTC1/SC29/WG11 MPEG, Archamps, France, 2008, 20081; M15377
- [12] Shannon C E. A mathematical theory of communication[J]. The Bell System Technical Journal, 1948, 27(3):379-423

(上接第 112 页)

力和优于已有算法的处理效果。但是,这一研究工作尚处于初级阶段,还有很多问题需要解决,比如更加充分地利用图像的丰富信息,从而更精确地提取出表征图像特征参数的方法;引入更有效的增强函数自适应生成机制,进一步提高算法的适应能力等,这些问题将在未来的工作中继续得到研究。

## 参 考 文 献

- [1] Nagy L, Benyo B. Filtering and contrast enhancement on subtracted direct digital angiograms [C]//Annual International Conference of the IEEE. San Francisco, CA, USA; IEEE, 2004; 1533-1536
- [2] Gonzalez R C, Woods R E. Digital image processing[M]. New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 2001
- [3] Li Guo-rong, Qu Wei, Huang Qing-ming. A multiple targets appearance tracker based on object interaction models[J]. IEEE Trans on Circuits and system for video technology, 2012, 22(3): 450-464
- [4] Lin Liang, Lu Yong-yi, Pan Yan, et al. Integrating graph partitioning and matching for trajectory analysis in video surveillance [J]. IEEE Trans on Image Processing, 2012, 21(12):4844-4857
- [5] Stark J A. Adaptive image contrast enhancement using generalizations of histogram equalization[J]. IEEE Trans on Image Processing, 2000, 9(5):889-896

- [6] Ji T-L, Sundareshan M K, Roehrig H. Adaptive image contrast enhancement based on human visual properties[J]. IEEE Trans on Medical Imaging, 1994, 13(4):573-586
- [7] Rivera A R, Ryu B, Chae O. A content-aware dark image enhancement through channel division[J]. IEEE Trans on Image Processing, 2012, 21(9):3967-3980
- [8] Huang S-C, Cheng F-C, Chiu Yi-Sheng. Efficient contrast enhancement using adaptive gamma correction with weighting distribution[J]. IEEE Trans on Image Processing, 2013, 22(3): 1032-1041
- [9] Kim T K, Paik J K, Kang B S. Contrast enhancement system using spatially adaptive histogram equalization with temporal filtering[J]. IEEE Trans on Consumer Electronics, 1998, 44(1): 82-87
- [10] Bin Liu, Weiqi Jin, Yan Chen, et al. Contrast enhancement using non-overlapped sub-blocks and local histogram projection[J]. IEEE Trans on Consumer Electronics, 2011, 57(2):583-589
- [11] Kim J-Y, Kim L-S, Hwang S-H. An advanced contrast enhancement using partially overlapped sub-block histogram equalization[J]. IEEE Trans on Circuits and system for video technology, 2001, 11(4):475-482
- [12] Yeganeh H, Ziaei A, Rezaie A. A novel approach for contrast enhancement based on histogram equalization[C]//Proceedings of the International Conference on Computer and Communication Engineering. Kuala Lumpur, Malaysia; IEEE, 2001; 256-260