

文章编号 1004-924X(2018)12-3060-07

结合成像几何特征的立体元图像阵列编码

赵 岩, 李 丽*, 王世刚

(吉林大学 通信工程学院, 吉林 长春 130012)

摘要:为了解决集成成像系统中立体元图像阵列存储和传输的问题,本文提出了一种结合成像几何特征的立体元图像阵列编解码算法。首先,根据立体元图像阵列采集过程中的相关物理参数确定不同立体元图像中同名像点的偏移量,对立体元图像阵列中每行相邻立体元图像进行分组并确定编码顺序。然后,确定待编码立体元图像的预测图并计算待编码立体元图像与其预测图的残差。最后,对残差进行 HEVC 编码。实验结果表明,与传统的 HEVC 帧内预测编码算法,以及与将立体元图像阵列中的所有立体元图像组成一个视频序列进行 HEVC 编码的算法相比,在相同比特率的情况下,本算法解码图像的质量提高了 10~25 dB,说明本文提出的算法具有更高效的编码性能。

关键词:立体元图像阵列;几何特征;同名像点;HEVC;编码

中图分类号:TP394.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20182612.3060

Elemental image array coding combining imaging geometry features

ZHAO Yan, LI Li*, WANG Shi-gang

(College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China)

* Corresponding author, E-mail: lil_93@163.com

Abstract: To solve the problems of storage and transmission of elemental image arrays in the integrated imaging system, an elemental image array coding and decoding algorithm that combines imaging geometry features was proposed. First, the offset of the corresponding image points in different elemental images were determined according to relevant physical parameters in the process of collecting the elemental image arrays. In addition, adjacent elemental images of each row in the elemental image arrays were grouped, and their coding sequences were determined. Then, the prediction image of the elemental image to be encoded was determined, and the residual between the elemental image and its prediction map was calculated. Finally, the residual was coded using High Efficiency Video Coding (HEVC). The traditional HEVC intra-frame prediction coding algorithm, which was formed by all elemental images in the elemental image array, was compared with the proposed HEVC coding algorithm. The experimental results show that the quality of decoded images using the proposed algorithm improved from 10 dB to 25 dB under the same bit rate, demonstrating the efficient coding performance of the proposed algorithm.

Key words: elemental image array; geometric feature; corresponding image points; High Efficiency Video Coding (HEVC); coding

收稿日期:2018-04-27;修订日期:2018-06-16.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61771220, No. 61631009);国家十三五重点研发计划资助项目(No. 2017YFB0404800, No. 2017YFB1002900)

1 引 言

真三维显示技术通过光线叠加实现了立体图像的空间重现,观看者只需裸眼即可观看到具有物理景深的三维图像。其中备受关注的集成成像技术具有观众无需佩戴任何特制的眼镜和头盔、实现过程相对简单、无需相干光源、对记录环境没有特殊要求和系统易实现等优点^[1-2],在军事、医学、生物学和娱乐等领域中具有广泛应用^[3],也是最有可能实现真三维电视的技术。因此,集成成像技术已成为目前国际上的研究热点。集成成像技术由法国物理学家 M. G. Lippmann 在 1908 年首次提出。典型的集成成像系统包括采集、编码以及显示部分^[4],其采集部分生成的视频是由一帧帧时间上连续的立体元图像阵列组成^[5]。立体元图像是构成立体元图像阵列的基本单元,它由集成成像系统中的每个透镜从不同方向对目标场景的一小部分区域成像形成,因此具有纹理结构简单的特点。集成成像系统中的每一帧(即为一幅立体元图像阵列)通常由几十甚至成百上千幅小尺寸的立体元图像组成,从而存储或传输一幅立体元图像阵列所需的存储空间或传输带宽将比存储或传输一幅传统图像多几倍甚至几十倍,对视频也是如此。所以探索立体元图像阵列的视频高效编解码方法是集成成像技术推广应用的一个重要课题。

国内外针对立体元图像阵列编码(一些文章也称为集成成像编码)的研究可分为两大类,一类是基于视频编码国际标准的方法,从二十几年前的 MPEG-2,到十几年前的 MPEG-4、H. 264/AVC,再到最新的 H. 265/HEVC^[6];另一类是基于小波变换、3D-DCT^[7]、K-L 变换以及基于进化策略的编码^[8]等非视频编码标准的方法。基于 HEVC 的视频编码标准,文献^[9]提出一种自相似补偿预测编码,与运动补偿相似,利用块匹配进行编码块区域预测并将两块之间的相对位置作为向量,其自相似补偿过程可以在未知立体元图像结构的情况下进行有效预测。利用高斯过程回归方法的预测方案可以基于 HEVC 进行立体元图像阵列编码^[10]。文献^[11]针对立体元图像阵列获取过程中的光学特征,提出从立体元图像阵列中抽取样本的方法进行编码,每 m 个立体元图像

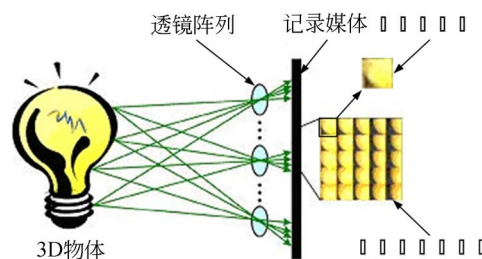
中选择一个立体元图像进行编码,剩余的立体元图像不进行编码,在解码过程中,未进行编码的立体元图像可以从相邻已编码的立体元图像中重建。

为了进一步提高立体元图像阵列的编码效率,本文提出在编码端利用立体元图像阵列的成像几何特征进行编码,根据立体元图像的同名像点之间的相关性提出新的编码顺序和预测方式,采用率失真曲线对比了传统的 HEVC 编码方法,新方法获得了较高的编码效率。

2 立体元图像阵列的采集及成像几何特征

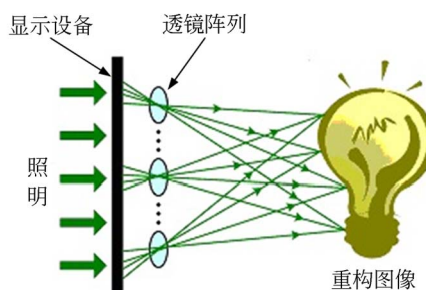
2.1 立体元图像阵列的采集

图 1 为典型的集成成像系统图。它主要分为采集、编码以及显示 3 个部分。采集部分包括由实际被摄物体自身发出的光线通过排列有序的透镜阵列到达记录媒体上,形成立体元图像阵列,如图 1(a) 所示。显示部分包括将已获得的立体元



(a) 采集部分

(a) Acquisition section



(b) 显示部分

(b) Display section

图 1 集成成像系统原理图

Fig. 1 Block diagram of integral imaging system

图像阵列置于透镜阵列前面,透镜阵列的相关参数要与采集过程中用到的一致,根据光路可逆原理,立体元图像阵列发出的光线通过透镜阵列形成了相应的解码图像^[5]。

通过 MATLAB 程序生成的立体元图像阵列如图 2,其部分细节放大图见图 3,从放大图可见相邻的立体元图像具有很大部分的重叠区域,说明了相邻的立体元图像具有很强的相关性,这种强相关性即为本文提出的编码算法提供了理论依据。

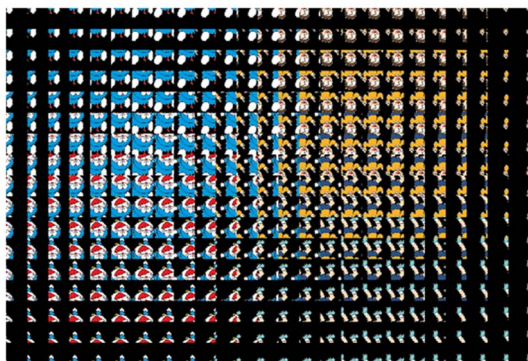


图 2 立体元图像阵列示意图

Fig. 2 Elemental image array diagram

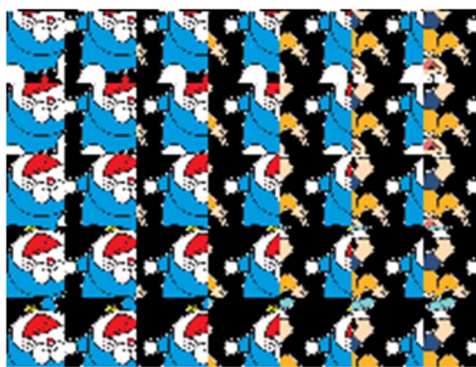


图 3 立体元图像阵列的部分放大细节图

Fig. 3 Partial enlarged detail view of elemental image array

图 4 所示,以垂直一列透镜为例,空间一物体上所有点发出的光线,通过不同的透镜都可以在相应的立体元图像上呈现出来。由图可见物体中区域 W 既可以成像在第 2 个立体元图像上,同时也可以在第 3、4 个立体元图像上成像。这一成像特殊性说明了上述提到的相邻立体元图像之间的重叠区域。

2.2 立体元图像阵列的成像几何特征

在这里,我们提到同名像点的概念:空间一物点,经过不同的成像系统,分别在其像面上成像,

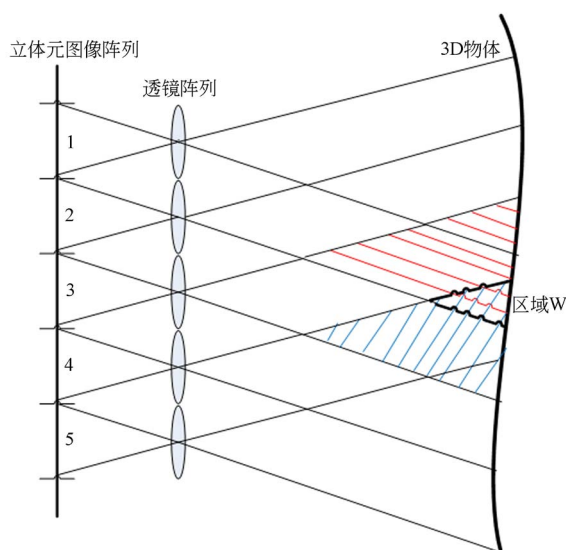


图 4 成像原理示意图

Fig. 4 Schematic diagram of principle of imaging

所成的像点互为同名像点^[12-14]。上面所提到的相邻立体元图像的重叠区域就是对应同名像点组成的。图 5 所示,透镜阵列的物理参数包括物距 h , 像距 g 以及透镜阵列的间距 p (即相邻透镜中心之间的距离)。本文只考虑最普遍的情况,即立体元图像的大小(以正方形为例,即为边长)和透镜的尺寸(即孔径大小)相等,如图 5 所示即立体元图像大小为 p 。 A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 和 A_5 互为同名像点。图 5 中 q 表示相邻立体元图像的同名像点间距。根据三角形法则,可以得到:

$$\frac{p}{q} = \frac{h}{h+g} \quad (1)$$

进而得到相邻立体元图像的同名像点间距大小为:

$$q = p \left(1 + \frac{g}{h}\right) \quad (2)$$

从公式(2)可以看出,任意两个相邻立体元图像之间的同名像点间距都是相同的。已知了同名像点间距和立体元图像大小,可以得到同名像点的偏移量,从图 5 中可以看到同名像点的偏移量指的是 A_m 在其对应的立体元图像中的位置相对于 A_n 在其对应的立体元图像中的位置的偏移量。

所以相隔 x 个立体元图像的同名像点的偏移量 y 可以表示为:

$$y = p \times (x+1) \frac{g}{h} \quad (3)$$

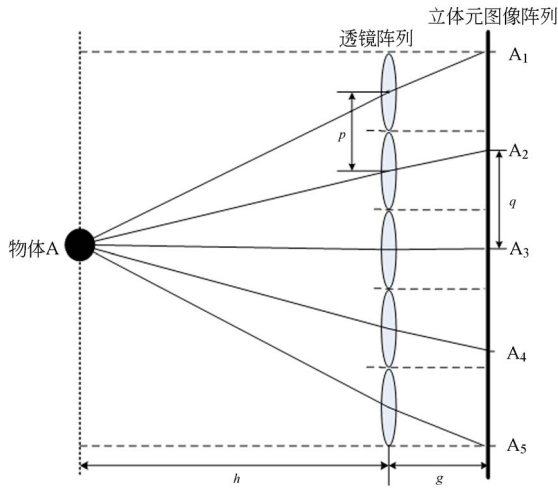


图 5 立体元图像阵列成像几何特征示意图

Fig. 5 Schematic diagram of imaging geometric features of elemental image array

如果是相邻立体元图像中的同名像点,则 x 为 0,故相邻同名像点的偏移量 y_0 为:

$$y_0 = p \frac{g}{h}. \quad (4)$$

3 立体元图像阵列编码的具体算法

3.1 传统的 HEVC 算法

传统 HEVC 的编码框架较为复杂,其中包括帧内预测、帧间预测、变换、量化、熵编码以及环路滤波等模块^[15-16]。HEVC 中较为复杂的部分就是增加了灵活的块结构,包括编码单元、预测单元以及变换单元的递归划分,一般需要从划分到,且每次划分都要经历上面从帧内预测到环路滤波的整个过程,每一次帧内预测都需要遍历 35 种预测模式,然后经过变换、量化后找到最优的预测模式。可见算法的复杂度较高^[17-18]。使用传统的 HEVC 进行立体元图像阵列编码,不仅复杂度高,而且没有充分利用立体元图像阵列区别于普通二维图像的特殊性进行编码,不能达到高效的编码效果。

3.2 本算法

本文提出算法的流程图如图 6 所示。

HEVC 只适用于图像大小为 8 的倍数的图像编码,故本文所采用的实验图像均为 $8M \times 8N$ 的立体元图像阵列。首先,将输入立体元图像阵列中的立体元图像按照从左到右、从上到下的顺

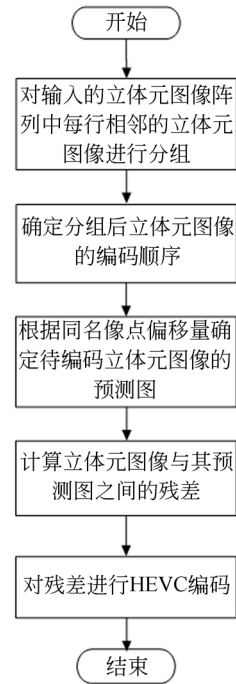


图 6 本算法具体流程图

Fig. 6 Flow chart of proposed algorithm

序进行分组,分组的思想来源于同名像点的偏移量,即计算一个像点的同名像点最多涵括在多少个立体元图像中,就将多少个立体元图像分为一组。也就是求出立体元图像大小 p 与相邻同名像点偏移量 y_0 的比值(向下取整)用 m 来表示这一比值,所以每个分组中立体元图像的个数可以表示为:

$$m = \frac{p}{y_0} = \left[\frac{h}{g} \right]. \quad (5)$$

接下来,介绍分组后立体元图像的编码顺序,每行首先编码每个分组中的第 1 个立体元图像,然后对相邻两个分组中已编码的两个立体元图像中间的立体元图像进行编码,再依次编码每组中剩余的立体元图像,并逐行进行编码。

如图 7 所示,以 $m=8$,即 8 个立体元图像为一组举例,具体说明两组中立体元图像的编码顺序,首先编码编号为 0 的立体元图像,再编码编号为 8 的立体元图像,接下来编码编号为 4 的立体元图像,然后依次编码两组中剩下的立体元图像。

不同于传统 HEVC 中的预测编码部分,本文提出的算法依据同名像点的相关性,对一组立体元图像中处于不同位置的立体元图像进行不同的预测。对于每组中的第 1 个立体元图像,其预测

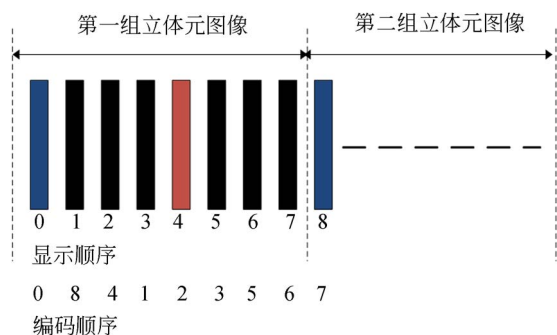


图 7 两组立体元图像及其编码顺序示意图

Fig. 7 Two sets of elemental images and their coding sequence

图的像素值可以设为 0 或 128; 剩余立体元图像预测图的像素值根据同名像点的偏移量进行设置, 即其预测图的所有像素值设为左右最近邻已编码立体元图像的对应同名像点的像素值。以图 7 中编号为 4 的立体元图像为例, 其预测图的像素值分别来自于编号 0 和编号 8 的对应同名像点的像素值。具体见图 8 所示(彩图见期刊电子版)。

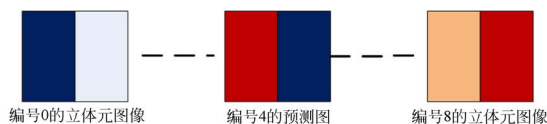


图 8 编号 4 的预测图像素值来源示意图

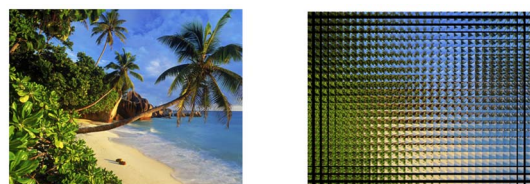
Fig. 8 Schematic diagram of source value of the pixel value of prediction image numbered four

编号 4 立体元图像的预测图的左侧红色部分像素值即为编号 8 的立体元图像的右侧红色部分像素值, 编号 4 预测图的右侧蓝色部分像素值即为编号 0 的立体元图像的左侧蓝色部分像素值。得到预测图的像素值之后, 计算立体元图像与其预测图之间的残差, 最后对残差进行 HEVC 编码。

4 实验结果分析

为了证明本文提出的算法对立体元图像阵列编码的有效性, 分别使用了 $1\ 056 \times 800$ 的风景图、 800×544 的卡通图及 544×544 的 Lena 图来进行实验, 实验中的立体元图像的像素大小均为 32×32 。如图 9、图 10、图 11 所示。图 12、13、14 分别为图 9、10、11 中测试图的实验结果图, 实验结果以率失真曲线进

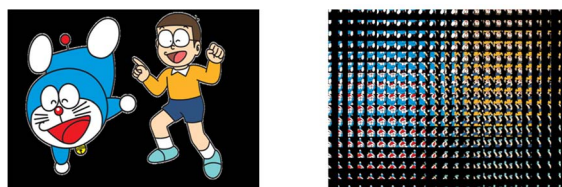
行表示, 其中纵轴为 Y 的峰值信噪比, 单位为 dB; 横轴为比特率, 单位为比特每像素 (b/pixel)。



(a) 原始图像 (b) 立体元图像阵列
(a) Origin image (b) Elemental image array

图 9 $1\ 056 \times 800$ 的风景测试图

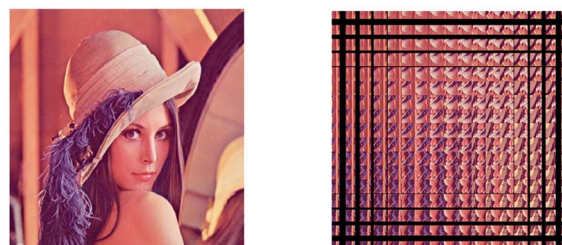
Fig. 9 Landscape test image of $1\ 056 \times 800$



(a) 原始图像 (b) 立体元图像阵列
(a) Origin image (b) Elemental image array

图 10 800×544 的卡通测试图

Fig. 10 Cartoon test image of 800×544



(a) 原始图像 (b) 立体元图像阵列
(a) Origin image (b) Elemental image array

图 11 544×544 的 Lena 测试图

Fig. 11 Lena test image of 544×544

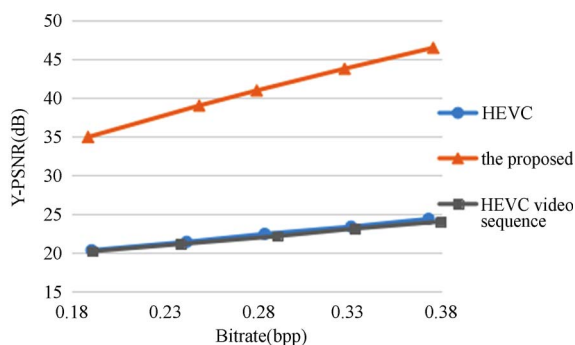


图 12 风景测试图的实验结果对比图

Fig. 12 Comparison of experimental results of landscape test image

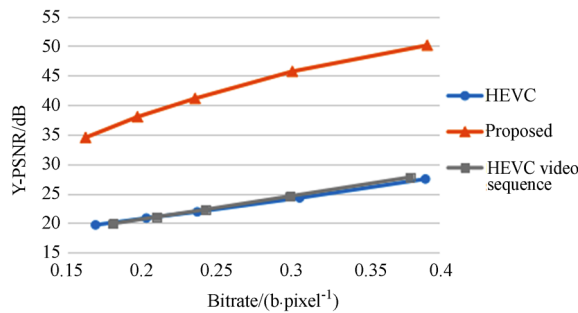


图 13 卡通测试图的实验结果对比图

Fig. 13 Comparison of experimental results of the cartoon test image

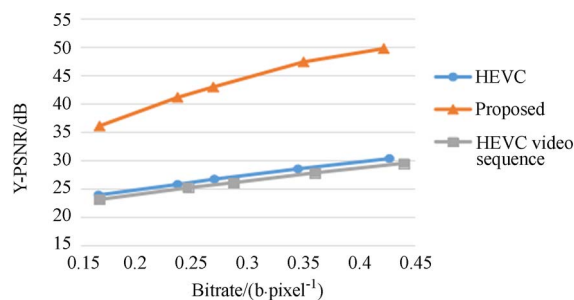


图 14 Lena 测试图的实验结果对比图

Fig. 14 Comparison of experimental results of Lena test image

参考文献:

- [1] 范钧,吴非,吕国蛟,等. 基于可变孔径针孔阵列的集成成像 3D 显示[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(6):38-41.
FAN J, WU F, LU G J, *et al.*. Integrated imaging 3D display based on variable aperture pinhole array [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(06):38. (in Chinese)
- [2] 赵敏,熊召龙,邢妍,等. 采用双目立体相机的实时集成成像拍摄系统[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(11):54-58.
ZHAO M, XIONG ZH L, XING Y, *et al.*. Real-time integrated imaging system using binocular stereo camera[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(11):54-58. (in Chinese)
- [3] 蒋晓瑜,高慧,严志强,等. 集成成像三维显示系统的研究进展及优化方法[J]. 光学与光电技术, 2017, 15(5):67-74.
JIANG X Y, GAO H, YAN ZH Q, *et al.*. Research progress and optimization methods of integrated imaging 3D display system[J]. *Optics and Optoelec-*

从图 12、图 13、图 14 中可以看到,无论是风景图、卡通图还是 Lena 图,本文提出的算法实验结果明显优于传统 HEVC 编码算法以及将所有立体元图像扫描成视频序列进行编码的实验结果,本算法在同等比特率的情况下,解码图像的质量均有大幅提高。可见本算法具有较好的率失真性能,更适合于高效的立体元图像阵列编码。

5 结 论

本文根据立体元图像阵列区别于普通二维图像的特殊性,即立体元图像阵列中相邻的立体元图像之间较强的相关性,提出了一种利用成像几何特征进行立体元图像阵列编码的算法。通过 3 组实验结果说明了本算法对立体元图像阵列编码的有效性。实验结果证明:本算法与传统的 HEVC 标准相比,在同等比特率的条件下, Y 的峰值信噪比提高了大约 10~25 dB。

tronics, 2017, 15(5):67-74. (in Chinese)

- [4] 焦小雪,赵星,杨勇,等. 基于三维集成成像相机阵列获取的元素图像校正[J]. 中国激光, 2012, 39(3):208-214.
JIAO X X, ZHAO X, YANG Y, *et al.*. Elemental image correction based on three-dimensional integrated imaging camera array [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(3):208-214. (in Chinese)
- [5] 吕源治,王世刚,金福寿,等. 立体元图像阵列的分布式预测编码[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, 44(11):87-91+95.
LV Y Z, WANG S G, JIN F S, *et al.*. Distributed predictive coding of three-dimensional elemental image arrays [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2012, 44(11):87-91+95. (in Chinese)
- [6] JIANG X, PENDU M L, GUILLEMOT C. Light field compression using depth image based view synthesis[C]. *IEEE International Conference on Multimedia & Expo Workshops*. *IEEE Computer Society*, 2017:19-24.
- [7] MEHANNA A, AGGOUN A, ABDULFATANHO, *et al.*. Adaptive 3D-DCT based compression algorithms for integral images [C]. *IEEE Interna-*

- tional Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting*. IEEE, 2013:1-5.
- [8] ADEDOYIN S, FERNANDO W A C, AGGOUN A. A joint motion & disparity motion estimation technique for 3D integral video compression using evolutionary strategy[J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2007, 53(2): 732-739.
- [9] MONTEIRO R, LUCAS L, CONTI C, *et al.*. Light field HEVC-based image coding using locally linear embedding and self-similarity compensated prediction[C]. *IEEE International Conference on Multimedia & Expo Workshops*. IEEE Computer Society, 2016:1-4.
- [10] LIU D, AN P, YANG C, *et al.*. Coding of 3D holographic image by using spatial correlation of rendered view images[C]. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*. IEEE, 2017:2002-2006.
- [11] YAN P, XIAN Y Y. Integral image compression based on optical characteristic[J]. *IET Computer Vision*, 2011, 5(3): 164.
- [12] 袁小聪, 徐于萍, 杨勇, 等. 基于相机阵列获取元素图像的集成成像抗串扰参数设计[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(9):2050-2056.
- YUAN X C, XU Y P, YANG Y, *et al.*. Integrated imaging anti-crosstalk parameter design based on camera array acquisition of elemental images[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(9):2050-2056. (in Chinese)
- [13] 徐于萍. 集成成像中基于同名像点变换的三维重构方法的研究[D]. 天津:南开大学, 2012.
- XU Y P. *Research on three-dimensional reconstruction method based on image transformation with the same name in integrated imaging*[D]. Tianjin: Nankai University, 2012. (in Chinese)
- [14] 武奕楠, 李国宁, 张柯, 等. 基于同名点追踪的空间相机成像拼接配准模型[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(03):288-294.
- WU Y N, LI G N, ZHANG K, *et al.*. Space camera imaging stitching registration model based on point tracking of same name[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(3): 288-294. (in Chinese)
- [15] LAINEMA J, HANNUKSELA M M, VADAKITAL V K M, *et al.*. HEVC still image coding and high efficiency image file format[C]. *IEEE International Conference on Image Processing*. IEEE, 2016:71-75.
- [16] 朱秀昌, 李欣, 陈杰. 新一代视频编码标准——HEVC[J]. *南京邮电大学学报(自然科学版)*, 2013, 33(03):1-11.
- ZHU X C, LI X, CHEN J. A new generation of video coding standard——HEVC[J]. *Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Sciences Edition)*, 2013, 33(03): 1-11. (in Chinese)
- [17] CHEN J, HOU J, CHAU L P. Light field compression with disparity-guided sparse coding based on structural key views[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2018, 27(1): 314-324.
- [18] YANG W, PI Y. A low-complexity intra prediction mode selection algorithm in HEVC[C]. *IEEE, Intl Conf on Dependable, Autonomic and Secure Computing, Intl Conf on Pervasive Intelligence and Computing, Intl Conf on Big Data Intelligence and Computing and Cyber Science and Technology Congress*. IEEE, 2016:598-603.

作者简介:



赵岩(1971—),女,吉林辽源人,博士,教授,博士生导师,1993年于长春邮电学院获得学士学位,1999年于吉林工业大学获得硕士学位,2003年于吉林大学通信工程学院获得博士学位,主要从事图像与视频处理,图像匹配,多媒体信号处理,在不可靠网络传输的音频与视频的错误隐藏等领域。E-mail: zhao_y@jlu.edu.cn



李丽(1993—),女,吉林桦甸人,硕士,2016年于吉林大学通信工程学院获得学士学位,主要从事集成成像编码的研究。E-mail: lil_93@163.com